

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta přírodovědně-humanitní a pedagogická



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Liberec 2022

Ing. Jan Vaverka



Návrh volitelného předmětu Astronomie a astrofyzika pro gymnázia

Diplomová práce

Studijní program:

N1701 Fyzika

Studijní obory:

Učitelství fyziky pro střední školy

Učitelství matematiky pro střední školy

Autor práce:

Ing. Jan Vaverka

Vedoucí práce:

Mgr. Ondřej Kopáček, Ph.D.

Katedra fyziky





Zadání diplomové práce

Návrh volitelného předmětu Astronomie a astrofyzika pro gymnázia

Jméno a příjmení: **Ing. Jan Vaverka**
Osobní číslo: P19000327
Studijní program: N1701 Fyzika
Studijní obory: Učitelství fyziky pro střední školy
Učitelství matematiky pro střední školy
Zadávací katedra: Katedra fyziky
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je vytvoření vzdělávacího plánu pro výuku volitelného předmětu Astronomie a astrofyzika pro gymnázia. Výstupem bude podklad pro kantory definující výukový plán a náplň předmětu s dotací 60 vyučovacích hodin adaptovaný pro zařazení v druhém ročníku čtyřletých gymnázií a odpovídajícím ročníku víceletých gymnázií.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby
50 stran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

M. Macháček: Fyzika pro gymnázia – Astrofyzika, Prometheus, 2008
A. Fraknoi, D. Morrison, S. C. Wolff: Astronomy by Openstax, Dostupné on-line
P. Murdin: Tajemství vesmíru; Jak jsme objevovali kosmos, Argo a Dokořán, 2009
M. Harwit: Astrophysical Concepts, Springer-Verlag New York Inc., 2006
H. Karttunen, P. Kröger, H. Oja, M. Poutanen, K. J. Donner: Fundamental Astronomy, Springer, 2017

Vedoucí práce:

Mgr. Ondřej Kopáček, Ph.D.
Katedra fyziky

Datum zadání práce:

9. října 2020

Předpokládaný termín odevzdání:

17. května 2021

prof. RNDr. Jan Pícek, CSc.
děkan

L.S.

prof. Mgr. Jiří Erhart, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 9. října 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

25. dubna 2022

Ing. Jan Vaverka

Poděkování

V první řadě patří můj dík Mgr. Ondřejovi Kopáčkovi, Ph.D., vedoucímu diplomové práce, za jeho odborné vedení, trpělivost, cenné rady, postřehy a připomínky v průběhu roku a půl, kdy diplomová práce vznikala.

Kromě vedoucího diplomové práce bych chtěl poděkovat RNDr. Zdislavu Šimovi, CSc. a Mgr. Viktoru Ježkovi, kteří se velkou měrou podíleli na formování zadání práce a v závěru mi poskytli zpětnou vazbu. Za cennou zpětnou vazbu bych chtěl poděkovat i Janu Spratkovi a jeho kolegům z Hvězdárny a planetária hlavního města Prahy, především pak prof. RNDr. Petru Kulhánkovi, CSc.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým kolegům ze S.A.B. Aerospace, své rodině a přátelům za podporu v průběhu celého studia a v době finalizace diplomové práce.

Anotace

Diplomová práce popisuje návrh volitelného předmětu „Astronomie a astrofyzika“ pro druhý ročník čtyřletého gymnázia. Na půdorysu 60 vyučovacích hodin je nastíněna koncepce předmětu, který multidisciplinárně propojuje témata z celé řady vědních odvětví, související s astronomií, astrofyzikou a kosmonautikou. Diplomová práce je volně předělena v polovině, kdy první polovina je více zaměřena na témata spojená s astronomií, zatímco druhá polovina se soustředí především na astrofyziku a v závěru i na kosmologii. Celou práci pak procházejí dílčí témata spojená s kosmonautikou, základním a aplikovaným výzkumem. Výstupem diplomové práce je výukový plán, který poslouží učitelům jako podklad pro výuku volitelného předmětu, případně jako opora pro zařazení dílčích témat do výuky povinné fyziky.

Klíčová slova

Astronomie, astrofyzika, kosmonautika, vzdělávací plán, volitelný předmět.

Annotation

This diploma thesis describes a concept of voluntary subject Astronomy and Astrophysics for the second year of gymnasium. The concept of the subject is described in the scope of 60 lessons, which connects topics from several scientific fields related to the astronomy, astrophysics and cosmonautics. The diploma thesis is divided into two halves; the first half focuses mostly on astronomy related topics, whereas the second half concentrates mainly on astrophysics and, at the end, also on cosmology. In addition topics related to the cosmonautics, basic research and applied research are included as well. The output of the diploma thesis is an educational plan to be used as a frame of the voluntary subject; alternatively it can be used as a support for the inclusion of partial topics in the teaching of compulsory physics.

Key words

Astronomy, astrophysics, cosmonautics, educational plan, voluntary subject

Obsah

1 Úvod	15
2 Kontext tvorby vzdělávacího plánu	17
3 Vzdělávací plán	21
3.1 Přístup ke vzdělávacímu plánu	21
3.2 Předpoklady pro zařazení předmětu	22
3.3 Členění vzdělávacího plánu	23
3.4 Náplň vzdělávacího plánu	24
Úvodní hodina	24
Úvod do předmětu Astronomie a astrofyzika	25
Kalendáře	29
Základy pozorování	34
Geografická hodina	37
Pozorovací systémy	41
Pozorování noční oblohy	48
Aplikace znalostí pozorovacích systémů	51
Historický vývoj vnímání vesmíru I.	53
Historický vývoj vnímání vesmíru II.	58
Newtonův gravitační zákon a jeho souvislost s 3. NPZ a Keplerovými zákony	62
Newtonův gravitační zákon a Keplerovy zákony v příkladech I.	65
Newtonův gravitační zákon a Keplerovy zákony v příkladech II.	67
Praktické důsledky zákonů nebeské mechaniky	71
Rakety I.	76
Rakety II.	79
Rakety III.	83
Raketoplány	88
Výzkum ve vesmíru I.	92
Výzkum ve vesmíru II.	95
Výzkum ve vesmíru III.	98
Doplnění látky klasické mechaniky	102
Sluneční soustava I.	104
Sluneční soustava II. - Původ Země	107
Sluneční soustava III. - Kinematika Země	111
Sluneční soustava IV. - Měsíc	113
Sluneční soustava V. - kamenné planety	116
Sluneční soustava VI. - plynní obři	121
Sluneční soustava VII. - hranice Sluneční soustavy	127
Sluneční soustava VIII. - komety	130
Úvod do hvězd	134
Slunce I.	139
Slunce II.	144
První měření vzdáleností hvězd	150

Hvězdná magnituda	154
Hertzsprungův-Russelův diagram	159
Život hvězd	164
Finální stadia hvězd I.	171
Finální stadia hvězd II.	174
Speciální teorie relativity	178
Obecná teorie relativity	181
Kosmologické důsledky Obecné teorie relativity	185
Vznik a vývoj vesmíru	190
Pozorovací technika	195
Současnost a budoucnost astronomického výzkumu	203

4 Závěr	211
----------------	------------

Seznam obrázků

3.1	Geometrická vizualizace Erastothena experimentu	26
3.2	Schematické znázornění průběhu zatmění Měsíce k určení poměru velikosti mezi Zemí a Měsícem	27
3.3	Odhad velikosti objektů s využitím podobných trojúhelníků	27
3.4	Archistarchova trigonometrická úvaha k určení vzdálenosti Slunce	28
3.5	Rozdíl mezi slunečním a hvězdným dnem	29
3.6	Východy a západy Slunce a Měsíce ve významných dnech pozorované ve vyšších severních šířkách	31
3.7	Rozmístění menhirů na neolitickém nalezišti v Carnacu	31
3.8	Newgrange	32
3.9	Úspořádání na nalezišti Stonehenge	32
3.10	Úsvit na Sněžce 15. března 2020 v 6:01	35
3.11	Úsvit na Sněžce 15. března 2020 v 6:23	35
3.12	Průběh dne v Brně při letním slunovratu 2021	37
3.13	Průběh dne v Tromsø při zimním slunovratu 2021	38
3.14	Průběh dne v Asuánu při letním slunovratu 2021	39
3.15	Pohyb Slunce po obloze ve dnech 20. března, 21. června, 22. září a 21. prosince	40
3.16	Obzorníkový systém	41
3.17	Ekvatoriální systém	42
3.18	Noční obloha nad Brnem směrem k severu o půlnoci předcházející letnímu slunovratu v roce 2021.	44
3.19	Noční obloha nad Brnem směrem k jihu o půlnoci předcházející letnímu slunovratu v roce 2021.	45
3.20	Noční obloha nad Brnem směrem k severu v noci, kdy nastala podzimní rovnodennost 2021.	46
3.21	Noční obloha nad Brnem směrem k jihu v noci, kdy nastala podzimní rovnodennost 2021.	46
3.22	Noční obloha nad Brnem směrem k jihu v noci, kdy nastal zimní slunovrat 2021.	47
3.23	Otočná mapa hvězdné oblohy pro 50. rovnoběžku	48
3.24	Pohyb hvězd v průběhu noci ve středních šířkách nad severním a jižním obzorem	49
3.25	Pohyb hvězd v průběhu noci nad východním a západním obzorem ve středních šířkách a v tropech	49
3.26	Rozdíl v navigaci podle hvězd na rovníku a ve středních šířkách	50
3.27	Porovnání geocentrického a heliocentrického modelu	54
3.28	Retrográdních pohyb Marsu	54
3.29	Koperníkova představa o heliocentrickém systému	55
3.30	Uranienborg v Atlase Maior z roku 1663	56
3.31	Výstupy z Galileova pozorování Měsíce sepsané v knize Sidereus Nuncius	58
3.32	Galileovy poznámky k pozorování Venuše sepsané v knize Il Saggiatore	59
3.33	Vizualizace 2. Keplerova zákona	60
3.34	Vizualizace translunární dráhy	68
3.35	Orbitální rychlosti	69
3.36	Důležité orbity	72

3.37	Dispenzer SSMS	72
3.38	Mapa kosmodromů	73
3.39	Schéma rakety V-2	77
3.40	Rozpočet NASA jako procentuální podíl na federální rozpočtu USA	77
3.41	Raketový motor Raptor pro raketu Falcon Heavy	80
3.42	Návrat prvního stupně rakety Falcon 9 pro opětovné použití	81
3.43	Apollo 11	82
3.44	Let Jurije Gagarina 12. dubna 1961	83
3.45	Jurij Gagarin a Alexei Leonov	84
3.46	Jednomístná raketa vyvinutá v rámci programu Mercury	85
3.47	Lunární modul Apollo 11 na Měsíci	86
3.48	Velikostní srovnání raket	89
3.49	Vizualizace raketoplánu s laboratoří Spacelab	90
3.50	Sovětský raketoplán Buran	90
3.51	Kosmická stanice Saljut 6	93
3.52	Velikostní srovnání vesmírných stanic a raketoplánu	95
3.53	Nizozemský kosmonaut André Kuipers vyfocený přes kapku v kapce	96
3.54	Italský kosmonaut Luca Parmitano a Kubik	97
3.55	Vizualizace polohy sond mířících pryč ze Sluneční soustavy	99
3.56	Plaketa umístěná na sondě Pioneer 10	100
3.57	Plaketa umístěná na sondě Voyager	100
3.58	Snímky sondy New Horizons	101
3.59	Vymezení pojmů konjunkce, elongace, opozice a kvadratura	106
3.60	Řez nitrem Země	108
3.61	Barringerův kráter v Arizoně	109
3.62	Kráter Chicxulub na poloostrově Yucatan	110
3.63	Precese a nutace zemské osy	112
3.64	Datování úplňků na novů v závislosti na vzdálenosti mezi Zemí a Měsícem	113
3.65	Poměrové srovnání velikosti superúplňku a mikroúplňku	114
3.66	Síly působící na Zemi v systému Země-Měsíc	114
3.67	Rozdíl v orientaci Měsíce při pohledu ze severní a z jižní polokoule	115
3.68	První snímky Merkuru pořízené sondou Mariner 10	117
3.69	Fotografie z povrchu Venuše pořízená sondou Veněra 13	118
3.70	Rover Curiosity a jeho technické vybavení	119
3.71	Kolorizovaný snímek Marsu pořízený sondou Perseverance	119
3.72	Snímky Jupiteru pořízené sondami Voyager 1, Cassini-Huygens a Juno	122
3.73	Galileovské měsíce ve velikostním srovnání s Jupiterem	123
3.74	Snímky Saturnu pořízené sondou Cassini	124
3.75	Vizualizace mise Cassini-Huygens	124
3.76	Snímky Uranu a Neptunu pořízené Hubblovým vesmírným dalekohledem	125
3.77	Vlevo výskyt planetek na hranici vnitřní Sluneční soustavy	128
3.78	Schéma sluneční soustavy	128
3.79	Dráha Halleyovy komety	130
3.80	Noční obloha severním směrem v českých zeměpisných šířkách v červenci 2020, kdy byla k vidění kometa Neowise	131
3.81	Dlouhoexpoziční fotografie komety Neowise nad hradem Bezděz	131
3.82	Charakteristika komety 67P/Čurjumov-Gerasimenko	132
3.83	Snímky komety 67P/Čurjumov-Gerasimenko	132
3.84	Proton-protonový cyklus v nitru hvězdy	135
3.85	Snímky Slunce pořízené různými detekčními metodami	136
3.86	Planckův vyzařovací zákon a Wienův posunovací zákon	137
3.87	Barevná teplota	138

3.88	Emisní spektrum Slunce	139
3.89	Změna emisního spektra Slunce v průběhu dne	140
3.90	Řez Sluncem	141
3.91	Observatoř ALMA v poušti Atacama	142
3.92	Vizualizace mise Solar Orbiter	142
3.93	Predikce rychlosti a vzdálenosti od Slunce pro sondu Solar Orbiter	143
3.94	Úplná a prstencová zatmění Slunce mezi lety 2020 a 2026	144
3.95	Průběh zatmění Slunce v pondělí 8. dubna 2024	145
3.96	Pás totality na pomezí USA a Kanady	145
3.97	Denní obloha jižním směrem v průběhu zatmění 8. dubna 2024 v Buffalu	146
3.98	Úplné zatmění Slunce vyfocené z letadla nad Antarktidou 4. prosince 2021	146
3.99	Spektrální analýza sluneční korony	147
3.100	Úplné zatmění Slunce 29. března 2006 v Lybii	148
3.101	Snímky Slunce v extrémní ultrafialové oblasti	148
3.102	Mlhovina v Andromedě v Messierově katalogu mlhovin	151
3.103	Geometrie měření paralaxy	152
3.104	Křivka jasu cefeidy	152
3.105	Zavedení délkové jednotky parsek	155
3.106	Srovnání míry světelného smogu dle Bortleovy stupnice	157
3.107	Světelný smog nad Střední Evropou	157
3.108	První Hertzsprungův-Russelův diagram publikovaný v roce 1914	159
3.109	Moderní Hertzsprungův-Russelův diagram	160
3.110	Velikostní srovnání hvězd	162
3.111	Sloupy stvoření v Orli mlhovině	164
3.112	Scénáře vývoje hvězdy na HR diagramu	165
3.113	Obytná zóna ve Sluneční soustavě nyní a v budoucnosti	166
3.114	Mlhovina Helix	167
3.115	Krabí mlhovina	168
3.116	Výbuch supernovy typu Ia, který krátkodobě přесvítíl galaxii	169
3.117	Četnost výskytu prvků ve vesmíru	170
3.118	Vizualizace přesunu hmoty z červeného obra na bílého trpaslíka	171
3.119	Struktura neutronové hvězdy	173
3.120	Vizualizace černé díry	175
3.121	Hmotnosti slučujících se černý děr	176
3.122	Relativistické jevy za předpokladu, že by rychlost světla byla blízká cestovním rychlostem	180
3.123	Obecná teorie relativity	181
3.124	Slunce jako gravitační čočka	182
3.125	Vizualizace černé díry tak, jak bychom ji měli pozorovat	183
3.126	První fotografie černé díry publikovaná v roce 2019	184
3.127	Dopplerův jev	186
3.128	Anténa, kterou se podařilo poprvé reliktní záření detekovat	187
3.129	Mikrovlnná mapa oblohy pořízená sondou Planck	188
3.130	Standardní model částicové fyziky	192
3.131	Simulace srážky dvou těžkých jader za vzniku kvark-gluonové plazma	192
3.132	Vizualizace časové osy velkého třesku	193
3.133	Srovnání Keplerova a Galileova dalekohledu	195
3.134	Triedr a divadelní kukátko	196
3.135	Největší refraktorový dalekohled na Yerkesově observatoři	196
3.136	Srovnání Newtonova dalekohledu a Cassagrainova dalekohledu	197
3.137	Haleův dalekohled	198
3.138	Dalekohled Grand Telescope Canarias	198

3.139	Extremely large telescope	199
3.140	Schematický graf závislosti absorpce atmosféry na vlnové délce	200
3.141	Radioteleskop Arecibo v době, kdy byl v provozu	201
3.142	Velikostní srovnání optiky minulých, současných a plánovaných teleskopů	202
3.143	Schéma Hubblova vesmírného dalekohledu	204
3.144	Orlí mlhovina ve viditelném a v infračerveném spektru	204
3.145	Hubblovo hluboké pole	205
3.146	Mechanismus rozkládání dalekohledu Jamese Webba	206
3.147	Primární zrcadlo dalekohledu Jamese Webba	206
3.148	Geometrie detektoru LIGO	208
3.149	Záznam gravitačních vln z kolize dvou černých děr	208

Seznam tabulek

3.1	Dny v týdnu v různých jazycích.	30
3.2	Srovnání magnitud a vzdáleností nejjasnějších hvězd v našich zeměpisných šířkách.	156
3.3	Srovnání zdánlivých magnitud nejjasnějších objektů noční oblohy.	156
3.4	Charakteristické vlastnosti hvězd hlavní posloupnosti dle spektrální třídy	161

Seznam použitých zkratk a symbolů

ALMA	Atakamská velká milimetrová anténní soustava (z anglického Atacama Large Millimeter Array)
AV ČR	Akademie věd České republiky
CCD	Charge-Coupled Device
CERN	Evropská organizace pro jaderný výzkum (z francouzského Conseil Européen pour la recherche nucléaire)
CEST	Středoevropský letní čas (z anglického Central European Summer Time)
CET	Středoevropský čas (z anglického Central European Time)
ELT	Extremely Large Telescope
ESA	Evropská kosmická agentura (z anglického European Space Agency)
EVE	Extreme Ultraviolet Variability Experiment
GEO	Geostacionární orbita
GMT	Greenwichský střední čas (z anglického Greenwich Mean Time)
GTC	Grand Telescope Canarias
GUT	Teorie velkého sjednocení (z anglického Grand Unified Theory)
HR diagram	Hertzsprungův-Russelův diagram
HST	Hubblův vesmírný dalekohled (z anglického Hubble Space Telescope)
IBEX	Interstellar Boundary Explorer
ISS	Mezinárodní vesmírná stanice (z anglického International Space Station)
JAXA	Japonská kosmická agentura (z anglického Japan Aerospace Exploration Agency)
JWST	Dalekohled Jamese Webba (z anglického James Webb Space Telescope)
KZ	Keplerův zákon
LEO	Nízká orbita Země (z anglického Low Earth Orbit)
LHC	Velký hadronový urychlovač (z anglického Large Hadron Collider)
LIGO	Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory
LISA	Laser Interferometer Space Antenna
MEO	Střední orbita Země (z anglického Medium Earth Orbit)
MFF UK	Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy
NASA	Národní úřad pro letectví a vesmír (z anglického National Aeronautics and Space Administration)
NPZ	Newtonův pohybový zákon
OTR	Obečná teorie relativity
PLATO	Planetary Transits and Oscillations of Stars
RVP	Rámcový vzdělávací program
SELČ	Středoevropský letní čas
SLAVIA	Space Laboratory for Advanced Variable Instruments and Applications
SOŠ	Střední odborná škola

SDO	Observatoř solární dynamiky (z anglického Solar Dynamics Observatory)
SSMS	Small Spacecraft Mission Service
SSO	Heliosynchronní orbita (z anglického Sun-synchronous orbit)
SŠ	Střední škola
STR	Speciální teorie relativity
ŠVP	Školní vzdělávací program
UV	Ultrafialové záření (z anglického Ultraviolet)
ZŠ	Základní škola
a_g	Dostředivé zrychlení
A	Hlavní poloosa
b	Wiennova konstanta
c	Rychlost světla
d	Průměr
D	Vzdálenost
E	Energie
E_k	Kinetická energie
e	Excentricita
F_D	Dostředivá síla
F_G	Gravitační síla
G	Gravitační konstanta
h	Planckova konstanta
I	Moment setrvačnosti
k	Boltzmannova konstanta
L	Moment hybnosti
M, m	Hmotnost
M_v	Absolutní vizuální magnituda
m_v	Zdánlivá vizuální magnituda
n	Index lomu
p	Hybnost
R, r	Poloměr
T	Teplota
T_p	Perioda
v	Rychlost
v_h	Hyperbolická rychlost
v_k	Kruhová rychlost
v_p	Parabolická rychlost
λ	Vlnová délka
Φ	Světelný tok
σ	Stefanova-Boltzmannova konstanta
ω	Úhlová rychlost

Kapitola 1

Úvod

„Astronomie nemá ve školách zrovna na různých ustláno”, píše Josef Duhajský, z Gymnázia J. S. Machara v Brandýse nad Labem, ve svém článku pro webové stránky Česká škola [1]. Ač článek pochází z roku 2007, tedy zhruba z doby, kdy jsem sám byl ještě žákem gymnázia, je aktuální i dnes, v roce 2022.

K dnešnímu dni není astronomie a astrofyzika přímo zařazena do Rámcového vzdělávacího programu pro gymnázia, a tak se dostává na program výuky fyziky vesměs jen prostřednictvím jiných témat, jakým je například Newtonův gravitační zákon, nebo jako okrajové téma v závěru studia. Na to ale bohužel obvykle nevybyde čas ve snaze využít poslední měsíce studia k opakování témat k maturitě a k přijímacím zkouškám na vysoké školy.

Je to svým způsobem paradoxní, protože zatímco při „standardní“ výuce fyziky učitel neustále čelí výzvám spojeným s nedostatečným matematickým aparátem na straně žáků, a proto je třeba adaptovat učivo do srozumitelné, ale mnohdy dosti nepřesné podoby, mnohá z témat astronomie a astrofyziky lze učit na střední škole s matematikou prvního, nejvýše druhého ročníku čtyřletého gymnázia bez hrubší újmy na přesnosti. Nadto témata spojená s vesmírem patří mezi ta nejděčnější, která umí přírodní vědy středoškolským žákům nabídnout, a vždy se těší jejich zájmu.

A pak je tu třetí, neméně atraktivní, téma, kterému se v této diplomové práci věnuji, kosmonautika. Kosmonautiku lze chápat jako aplikovanou astronomii a jde především o technickou disciplínu, což nutně vede k tomu, že se jí nedostává na gymnáziích pozornosti. Přitom kosmonautika žáky fascinuje. Pozornost upřenou na kosmonautiku přivádí komerční lety do kosmu, zájmu napomáhá i to, že se dnes už do širšího povědomí dostává přínos kosmonautiky pro všednodenní život počínaje využíváním produktů kosmického výzkumu, ať už jde o suché zipy nebo dehydratované potraviny, konče infrastrukturou spojenou s tisíci družic, které nás neustále zásobují daty.

Popularizaci kosmonautiky pomáhá i na české poměry velká komunita nadšenců, díky které se do obecného povědomí dostává, že Česká republika je jakožto člen Evropské vesmírné agentury zapojena do kosmického průmyslu a výsledky českých firem se pomalu dostávají i do mediálního popředí. Nejinak je tomu u astronomie, jejíž popularizaci se věnuje v České republice celá řada odborníků, kteří jsou v průběhu diplomové práce citováni.

Na jedné straně tu tak máme komunitu odborníků a nadšenců přibližujících vesmír a vesmírné technologie více či méně odborné veřejnosti prostřednictvím popularizačních přednášek s desítkami tisíc zhlédnutí, na druhé straně rámcový vzdělávací program, který nezohledňuje všeobecný zájem o tato témata.

Ambicí této diplomové práce je otevřít cestu tématu vesmíru a vesmírných technologií na gymnázia prostřednictvím vzdělávacího plánu pro volitelný předmět a ukázat, jak lze k těmto tématům přistupovat a jak je propojovat. I proto diplomová práce vzniká ve spolupráci s celou řadou odborníků jak ze středního i vysokého školství, z Akademie věd, vzdělávacích institucí, jakými jsou například Hvězdárna a planetárium hlavního města Prahy, tak i ve spolupráci s odborníky na kosmonautiku.

Cílovou skupinou diplomové práce jsou učitelé, k nimž se touto cestou dostává podklad, o který se lze opřít při výuce astronomie, astrofyziky a kosmonautiky na čtyřletém gymnáziu a vyšším stupni víceletého gymnázia.

Kapitola 2

Kontext tvorby vzdělávacího plánu

Přístup k výuce na středních školách se v obecné rovině dnes opírá především o dva pilíře. Tím prvním je Rámcový vzdělávací program (dále RVP), který popisuje soubor znalostí, dovedností a klíčových kompetencí, který by měl být žákům předáván a zasazuje jej do širšího multidisciplinárního kontextu. RVP vytváří rámec pro zpracování Školních vzdělávacích programů. Není pro jednotlivé učitele přímo závazný, nicméně je klíčovým podkladem, o nějž se výuka opírá. Druhým dokumentem je právě Školní vzdělávací program (dále ŠVP), který schvaluje ředitel školy a pro učitele závazný je. ŠVP vychází z RVP a samotná škola je při jeho tvorbě dosti autonomní. ŠVP stanovuje mimo jiné zaměření školy, výchovné a vzdělávací strategie, zabezpečení výuky nadaných žáků, učební plán, učební osnovy a hodnocení výsledků vzdělávání žáků. ŠVP může například implikovat, že se ve výuce na dané škole nepoužívají učebnice nebo že se na místo frontální výuky využívá projektové vyučování.

Z hlediska RVP jsou pro diplomovou práci relevantní dva dokumenty: RVP pro základní vzdělávání [2] a především RVP pro gymnázia [3].

Diplomová práce sice cílí na gymnázia, nicméně stojí za to hned zkrájím zmínit, do jaké míry se tomuto tématu věnuje RVP pro základní vzdělávání. RVP pro základní vzdělávání přímo astronomii, astrofyziku ani kosmonautiku nezmiňuje. Nicméně zahrnuje kapitolu nazvanou Vesmír, kde je zmíněn jeden očekávaný výstup – kvalitativní objasnění pohybu planet kolem Slunce a měsíců kolem planet. Mezi učivo spojené s tímto bodem se řadí porozumění měsíčních fází a osvojení vědomostí o Zemi.

Do roku 2021 RVP [4] zahrnoval mimo to výstup – odlišení planet od hvězd na základě jejich vlastností a s tím spojené učivo „hvězdy a jejich složení“. Právě tento bod, hvězdy a jejich složení, který nebyl dále detailněji popsán, je jediným tématem zasahujícím do astrofyziky. Jde o poměrně rozsáhlé a pokročilé téma s obrovským přesahem (do jaderné fyziky i do chemie) a vzhledem k tomu, že byl zmíněn pouze v této stručné podobě, nelze dost dobře odhadnout záměr, s jakým byl do RVP zařazen.

Do RVP pro gymnázia je téma astronomie, astrofyziky a kosmonautiky zařazeno jen velice nepřímou. Na rozdíl od RVP pro základní vzdělávání, které zmiňuje kapitolu vesmír, resp. Sluneční soustavu, k níž lze přistoupit v mezích popisu různými způsoby, jediné stěžejní téma dotýkající se vesmíru, které RVP pro gymnázia obsahuje, je gravitační pole, resp. gravitační a tíhová síla. Ve fyzice je vše propojené se vším, a tak by se některá témata z astrofyziky dala spojit s kapitolou mikrosvět, která zmiňuje i syntézu jader, nebo s tématem elektromagnetického záření, nicméně lze očekávat, že toto nebyl úplně záměr autorů RVP.

Odhlédneme-li od tématu astronomie a astrofyziky, ani z hlediska širšího přírodovědného kontextu nedává RVP jednoznačnou představu, jak při formulování ŠVP postupovat, a dává tak škole

nebývalou volnost. RVP pro gymnázia požaduje ze strany žáků hlavně osvojení přírodovědeckého přístupu k problémům, ať už se jedná o odbornou kritiku, či nakládání s údaji. Zamyšlení nad tím, co je pro přírodovědný přístup ke světu charakteristické, se od žáků ale nevyžaduje: „*Gymnaziální přírodovědné vzdělávání musí proto též vytvářet prostředí pro svobodnou diskusi o problémech i pro ověřování objektivitu a pravdivosti získaných nebo předložených přírodovědných informací. Lze toho dosahovat tím, že si žáci osvojují např. pravidla veřejné rozpravy o způsobech získávání dat či ověřování hypotéz, rozvíjejí si schopnost předložit svůj názor, poznatek či metodu k veřejnému kritickému zhodnocení, učí se nevnímat oponenta pouze jako názorového protivníka, ale i jako partnera při společném hledání pravdy. K základním morálním normám přírodovědného poznávání patří především požadavek nezkrášlovat data získávaná ve výzkumu a nevyužívat jeho výsledky pro vytváření technologií a dalších praktických aplikací, které by mohly poškozovat zdraví člověka či nevratně narušit přírodní a sociální prostředí. Žákům je tak zapotřebí na konkrétních případech ukazovat negativní důsledky zkrášlování výzkumných dat či využívání výsledků přírodovědného výzkumu pro účely potenciálně ohrožující člověka a další složky přírody*“ [3].

Této „povrchnosti“ RVP pro gymnázia si všímá celá řada autorů, například studie Výuka o vědě a jejích dějinách: Česko vs. Západ, která se do značné míry zaměřuje na oblast Člověk a společnost, v níž sice přírodní vědy zahrnuty nejsou, nicméně zabývá se tématem dějin věd: „*Česká výuka o vědě se orientuje především na osvojení obvyklého postupu přírodovědného bádání. Vztahu vědy a společnosti je věnováno poměrně málo pozornosti, zamyšlení nad povahou vědeckého poznání se od našich žáků nepožaduje vůbec... Vzdělávací oblast Člověk a společnost si myslí za cíl podporovat úctu k intelektuálnímu bohatství lidstva a vést studenta k pochopení proměnlivosti pohledu na svět v různých fázích jeho vývoje. Nicméně v očekávaných výstupech najdeme pouze jediný požadavek, který souvisí s dějinami věd. Student má identifikovat nové myšlenky z období renesance a novověku a posoudit jejich dopad.*“ [5]

Tatáž studie pak hodnotí současný přístup v České republice s přístupem v Angloamerickém světě: „*Požadavky, které bývají součástí výuky v Anglii a Angloamerice, české kurikulum buď neobsahuje vůbec (např. povědomí o proměnlivosti a nedefinitivnosti vědeckého poznání), nebo je zahrnuje v nedostatečné míře (povědomí o vztahu světa vědy a společnosti).*“

Tedy nejen téma astronomie a astrofyziky, ale obecně téma přístupu k přírodním vědám je v RVP dosti upozaděno. Historicky tomu tak ale nebylo vždy, což vynikne zvláště na případu astronomie. Do roku 2004, kdy byl zaveden systém rámcových vzdělávacích programů, byly pro vzdělávání závazné osnovy, které byly unifikované pro školy napříč republikou, resp. napříč českými zeměmi. V roce 1948 byla astronomie zařazena do 3. ročníku čtyřletého gymnázia. Obsah učiva byl stručný: Zdánlivé a skutečné pohyby nebeských těles, zvláště Slunce a Měsíce, Kopernikova soustava a zákon všeobecné gravitace. Po další změně v roce 1949 bylo učivo astronomie a astrofyziky rozděleno do 3. a 4. ročníku. Ve 3. ročníku byla probírána témata: gravitace, Keplerovy zákony a gravitační zákon (pouze gravitační pole Země). Do 4. ročníku byly zařazeny poznatky z astrofyziky: Spektrální analýza (světla ze Slunce, Měsíce, planet a hvězdných soustav), Dopplerův jev a kosmické záření [6]. Od roku 1953 do roku 1959 byl do osnov zařazen samostatný předmět astronomie. Jako oporu pro tento předmět měli žáci k dispozici přeloženou ruskou učebnici od sovětského astronoma B. A. Voroncova-Veljaminova *Astronomie – učebnice pro 10. třídu sovětských středních škol, pro jedenáctý postupný ročník* [7]. Kniha ale byla příliš rozsáhlá a na tuto novinku vyučující nebyli připraveni, proto tento předmět obvykle vyučoval pedagog, který byl o jednu lekci před žáky [8]. V důsledku neustálých reforem v následujících letech postupně astronomie z osnov zcela zmizela.

Důsledky hodnotí Jiří Grygar ve článku *Lesk a bída školního vzdělávání v astronomii*, přičemž současnou situaci popisuje slovy: „*Bídne všeobecné povědomí o stavbě vesmíru a obliba astrologie jsou důkazem, že školní vzdělávání v astronomii nebylo dostatečné.*“ Přitom astronomie se těší zájmu velké části veřejnosti a žáků, což se snad nejvíce projevuje v počtech účastníků

národních olympiád v astronomii, které často převyšují počty v dávno zavedených olympiádách v matematice, fyzice, chemii či biologii[8].

Po formální stránce vývoj směrem k dnešní situaci hodnotí Radek Kříček z Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v článku "Astronomie ve škole a mimo ni" [9] „Zavedení Rámcových vzdělávacích programů (RVP) umožnilo výuku astronomie dále omezit, nebo naopak využít volnost škol k jejímu rozšíření. Od školního roku 2014/15 tak vesmír tvoří například kostru výuky fyziky podle školního vzdělávacího plánu (ŠVP) Gymnázia Jana Keplera v Praze.” Zaměřuje se také na střední odborné školy, do jejichž Rámcového vzdělávacího programu astronomie zařazena je: „RVP pro SOŠ vesměs obsahují podobné astronomické učivo a očekávané výstupy jako RVP pro ZŠ.... Nabízí se otázka, zda je zjištěný rozdíl mezi gymnaziálním vzděláváním a vzdáváním na jiných středních školách záměrný a žádoucí.“

Závěrem tedy je, že RVP jako celek přistupuje k tématu astronomie a astrofyziky dosti nejednoznačně a je tak na jednotlivých školách, zda jej do ŠVP zařadí, případně v jaké podobě. Konkrétně míře zapojení astronomie na gymnáziích se asi nejobširněji po kvalitativní stránce věnuje Petr Pudivíttr ve své disertační práci Výuka astronomie na středních školách [10]. Práce sice pochází z roku 2004, nicméně, jak naznačují postřehy výše citovaných autorů, v zásadě jde o popis, který je i dnes aktuálním. Autor píše: „Na velké většině škol se dostává astronomii pouze velmi omezený prostor nebo žádný, někde se astronomie vyučuje pouze návštěvou blízké hvězdárny nebo planetária, což je způsobeno také nevhodným umístěním astronomie jako posledního tématu fyziky do posledního ročníku gymnázia (těsně před maturitou), dokonce až za Fyzikální obraz světa. Zatím nevyužito zůstává propojení astronomie na další přírodovědné předměty mimo fyziku.“

Navzdory zmíněnému jsou znalosti žáků mnohdy výborné, což se projevuje jak jejich zájmem v obecné rovině, tak i konkrétně, a to nejen na příkladu zmíněných astronomických olympiád. Zájem je o astronomii a kosmonautiku na úrovni středoškolské odborné činnosti, což mohou potvrdit i z vlastní praxe. V posledních letech se k nám navíc dostávají projekty jako CanSat [11] nebo AstroPi [12], kdy se žáci mohou zapojit do soutěží pořádaných Vzdělávací kanceláří Evropské vesmírné agentury. Na úrovni základního školství vznikají projekty jako Labyrinth Space Academy [13], která je určená žákům Základní školy Labyrinth.

Z výše uvedeného je zjevné, že mimořádný zájem žáků o astronomii není reflektován odpovídajícím zastoupením tématu při výuce. Cílem práce je právě přispět k rozšíření výuky astronomie a astrofyziky skrze praktický podklad pro středoškolské učitele fyziky, jenž může být využit jak v podobě navrženého volitelného předmětu, tak i jako inspirace pro zařazení konkrétních témat do výuky fyziky.

Kapitola 3

Vzdělávací plán

3.1. Přístup ke vzdělávacímu plánu

Předně je třeba zmínit, že pojem vzdělávací plán nevystihuje přesně terminologicky koncept předmětu, který v diplomové práci nastiňuji. Pojem vzdělávací plán se v didaktické terminologii používá obvykle v kontextu se speciálními vzdělávacími potřebami a pro návrh koncepce předmětu se více hodí pojem vzdělávací obsah. Nicméně, i s ohledem na citace v předchozí kapitole, toto vymezení není úplně striktní a proto budeme v dalším textu používat termínu vzdělávací plán.

Vzdělávací plán, nastíněný na následujících stranách, nemá fungovat jako soubor příprav na hodiny, kterého by se měl pedagog striktně držet. Jde spíše o konceptuální přístup k výuce předmětu, resp. k jednotlivým tématům, čemuž je upravena i forma – terminologie je popsána především kvalitativně ve snaze vysvětlit všechny důležité souvislosti a mnohdy tak má text téměř až povahu učebnice nebo referátu. To vynikne především u hodin z druhé poloviny plánu, které jsou více výkladové a jejich popis je proto objemnější. Vedle toho hodiny, kde je větší potenciál rozvíjet diskuzi se žáky, jsou svým popisem stručnější.

Na úrovni vyučovacích hodin, případně dvouhodinovek, je popsáno, co by mělo být sdělením hodiny, jakých opor lze využít a jakým směrem lze výklad dále rozšiřovat. Tomu odpovídá i volba referencí, které do značné míry plní funkci studijních opor pro učitele při přípravě na výuku, případně opor, které může sdílet učitel s žáky. Z praktických důvodů jsou proto zmiňovány spíše odkazy na popularizační přednášky, kde celá řada předních českých odborníků popisuje témata způsobem přístupným široké veřejnosti (například přednášky zprostředkované kanálem LLionTV, který sdílí mj. Přednášky z moderní fyziky pořádané na půdě MFF UK [14]), než že by bylo odkazováno na vědecké publikace nebo původní zdroje, které sice mohou učiteli dát velmi přesnou představu o dané problematice, ale na úrovni střední školy je lze jen stěží využít jako studijní oporu. Tento přístup se do značné míry opírá i o fakt, že v současné době v českém prostředí neexistují aktuální učebnice nebo monografie se záběrem odpovídajícím rozsahu navrhovaného předmětu.

V mnoha případech lze k samotným hodinám přistupovat různými způsoby dle preferencí učitele, cílové skupiny – žáků, případně dle prostředků, které má učitel k dispozici. Předmět může být pojat jak konvenčně, kdy velká část předmětu bude výkladem učitele, tak projektově, kdy lze žákům zadávat jednotlivá témata ke zpracování do podoby prezentací, od nichž se následně bude rozvíjet diskuze doplněná výkladem učitele. Specifické jsou hodiny zaměřující se na pokročilá témata jako je orientace na obloze, obecná teorie relativity nebo tepelné záření, kde je přístup k tématu více limitován znalostmi žáků, resp. možnosti přístupu k těmto hodinám se tím mohou omezovat.

Přístup ke vzdělávacímu plánu odpovídá obecně zažitému paradigmatu, kdy cílem vzdělávání je rozvíjet klíčové kompetence, ne jen předat žákům co nejvíce informací. To neznamená, že bych osobně nedával důraz na encyklopedické znalosti, naopak zastávám názor, že co nejširší objem znalostí, resp. co největší multidisciplinarita, je přesně tím, co otevírá cestu k uplatnitelnosti. Příběhy celé řady úspěšných vědců, vynálezců a podnikatelů to dokazují. Typickým příkladem budiž Elon Musk (narozen 1971) a jeho záliba v encyklopediích už v raném školním věku [15]. Na druhou stranu k rozšiřování encyklopedických znalostí není nutně potřeba učitele – tuto roli mohou dnes zastoupit edukativní internetové zdroje. Rolí učitele je především představit tematiku žákům srozumitelným a poutavým způsobem a propojovat informace do celistvých celků. Z těchto důvodů obsahují popisy hodin poměrně malé množství vzorců nebo odvození vzorců. Naopak zvýšený důraz je kladen na vizualizaci, a to ať už prostřednictvím přímo vložených ilustrací nebo nepřímo, odkazováním na příslušné publikace nebo videa.

3.2. Předpoklady pro zařazení předmětu

Předmět je určen žákům druhého ročníku čtyřletého gymnázia, nebo odpovídajícího ročníku víceletého gymnázia, a je koncipován jako volitelný předmět s hodinovou dotací 2 hodiny týdně, optimálně jako dvouhodinovky. Alternativně lze uvažovat nad rozdělením předmětu mezi druhý a třetí ročník v případě dotace 1 hodiny týdně.

Plán je navržen na 60 vyučovacích hodin s tematickým předělem v polovině, který odděluje pololetí, případně celé ročníky. Pololetí samo o sobě nemá obvykle přesně 30 vyučovacích hodin, ale spíše 33 až 35. Velká část této rezervy může ale padnout na hodiny, které odpadnou. Mimo to do plánu nejsou zařazeny testy, pouze je zmíněno, ve které fázi by k testování mohlo dojít, případně co by mohlo být jeho obsahem.

S plánem lze pracovat volně, nicméně rozdělení na poloviny, kdy první polovina se zabývá především klasickou astronomií a kosmonautikou, zatímco druhá je zaměřená více na astrofyziku a moderní astronomii, by se mělo z didaktických důvodů dodržet.

Z hlediska znalostí vycházíme z toho, že žáci mají základní znalosti fyziky odpovídající učivu základní školy a znalosti odpovídající prvnímu ročníku fyziky čtyřletého gymnázia, především kinematiky a dynamiky. Dále vycházíme z předpokladu, že žáci mají zažité kapitoly prvního ročníku matematiky čtyřletého gymnázia, především základní operace s rovnicemi, a mimo to že si v průběhu druhého ročníku v rámci výuky matematiky osvojí práci s logaritmy.

Mnohá témata jsou koncipována jako dvouhodinovky. Celkem je takových témat 15 a to především témata multidisciplinární nebo větší tematické celky – v kontextu diplomové práce je priorita dána na dělení hodin na tematické celky spíše než striktně na jednotlivé vyučovací hodiny. Tento přístup vynikne zvláště u samonosných, avšak objemných, témat (například pozorovací systémy a orientace na noční obloze) nebo u témat těsně propojených (americká a sovětská kosmonautika nebo vývoj hvězd). Cílem je udržet maximálně přehlednost a celistvost vzdělávacího plánu, spíše než dělit plán ostře na jednotlivé hodiny.

3.3. Členění vzdělávacího plánu

1. pololetí

První pololetí si klade za cíl seznámit žáky se základy astronomie. Pozornost se věnuje zpočátku základům pozorování a historickému kontextu vývoje disciplíny. V návaznosti na Newtonovskou a Keplerovskou mechaniku je pak pozornost věnována kosmonautice. Kosmonautika je zařazena do prvního i druhého pololetí průběžně dle probíraných témat, nicméně v prvním pololetí dostává prostoru více.

2. pololetí

Druhá polovina plánu začíná Sluneční soustavou a dále se zabývá fyzikou hvězd a vesmíru jako celku. K tomu je třeba doplnit část fyzikálního aparátu, který se standardně probírá až ve 3. a 4. ročníku čtyřletého gymnázia nebo se na středních školách přeskakuje úplně. To se týká především mechaniky, částečně i moderní fyziky. Nadto v druhé polovině plánu využijeme toho, že v průběhu druhého pololetí mají již žáci osvojené logaritmy.

3.4. Náplň vzdělávacího plánu

1. Úvodní hodina

Téma: Organizační hodina, po fyzikální stránce nemá hodina žádné nosné téma

Cíl: Seznámit se s žáky a zjistit jejich očekávání

Přístup k hodině

Každá třída je unikátní a už jen proto, že jde o volitelný předmět, budou k předmětu žáci přistupovat se svými vlastními očekáváními, na základě kterých je možné plán výuky předmětu více či méně adaptovat.

Úvodní hodina by proto měla být v zásadě rozdělena na dvě části:

- V první části hodiny by měla proběhnout otevřená diskuze s žáky, kdy se žáci představí, řeknou, proč si předmět vybrali a co od něj očekávají.
- V druhé části by mělo proběhnout hrubé představení předmětu učitelem, resp. jeho rozdělení na dvě části – astronomii a astrofyziku s tím, že témata související s kosmonautikou budou průběžně včleňována.

Představení kostry předmětu by mělo na žáky působit motivačně, resp. nemělo by vyznít v duchu, že učitel žáky staví před hotovou věc. Může se sice stát, že někteří žáci budou chápat poslání předmětu naprosto odlišně než učitel, nicméně tomu nebude možné vždy spolehlivě předejít.

Spíše než že by se očekávání žáků naprosto míjela s koncepcí předmětu, může se stát, že někteří žáci nebudou vědět, jak svá očekávání formulovat nebo budou mít ostych si vzít slovo. To není na gymnaziální úrovni až tak neobvyklé, na rozdíl od základních škol, kde mají žáci mnohdy tendence hned zkraje dávat otevřeně najevo, co už o tématu vědí a chtěli by vědět.

Shrnutí

Cíl této hodiny není zaměřen na žáky, neb jde především o to, aby učitel dostal vstupy, díky kterým může obsah předmětu upravit na míru očekáváním žáků, a to například tím, že některým kapitolám bude věnovat zvýšenou pozornost na úkor jiných, které upozadí.

2. Úvod do předmětu Astronomie a astrofyzika

Téma: Astronomie a astrofyzika jako pojmy a jejich vývoj v čase

Cíl: Seznámit žáky se základní terminologií a uvést je do historického kontextu

Přístup k hodině

Dříve, než se pustíme do jednotlivých kapitol astronomie, je třeba vymezit základní terminologii. V různých zdrojích lze nalézt celou řadu definic. My se opřeme o Slovník fyziky vydaný Oxfordskou univerzitou [16], kde se píše:

Astronomy is the study of the universe beyond the earth's atmosphere. The main branches are astrometry, celestial mechanics, and astrophysics.

Astrophysics is the branch of astronomy concerned with the physical processes associated with the celestial bodies and the intervening regions of space. It deals principally with the energy of stellar systems and the relation between this energy and the evolution of the system.

Lze tedy říci, že astronomie je pojem obecný, nadřazený astrofyzice, která se zabývá specifickými tématy astronomie a lze ji klást na úroveň nebeské mechaniky nebo astrometrie. Toto dělení budeme ctít, byť to není možné úplně bezvýtku – dopplerovské jevy v astronomii a práce Edwina Hubbla spadá především do astrometrie, nicméně z hlediska členění plánu se hodí tato témata zařadit až po kapitolách o hvězdách.

Při práci se základními termíny se lze opřít i o etymologii pojmů samotných. Astronomie vychází z řeckého astron (hvězda) a nomos (zákon). Z hlediska dnešního významu to může být trochu zavádějící, protože astronomie se nezabývá jen hvězdami. Nicméně není naší ambicí přejmenovat odvětví, aby svým jménem více odpovídalo své povaze. Důvod, proč tento přístup zmiňujeme, je jiný. Poměrně často u širší veřejnosti dochází k záměně s astrologií, která namísto nomos má logos (slovo). Astrologie je od 20. století celou vědeckou komunitou považována za nevědeckou, resp. pseudovědeckou, což je dnes podpořenou i celou řadou vědeckých výzkumů, do kterých se zapojili „vyhlášení astrologové“. Na druhou stranu stojí za to říct, že spousta jevů dříve přičítána astrologickým fenoménům může být reálná, avšak jejich příčina leží někde jinde. Typickým příkladem je vyšší kriminalita při úplňku, která může být způsobená tím, že 0,2 luxů měsíčního svitu postačí ke zlepšení orientace v nočních ulicích. Ani na tom ale není ve vědecké obci konsensus [17].

Vývoj astronomie

Z hlediska historického kontextu lze astronomii chápat jako nejstarší vědu – popis pohybu nebeských objektů je prvním matematickým popisem přírodních jevů a historicky byl považován za symbol řádu věcí a pravidelnosti. Znalosti ročních cyklů byly v dobách minulých stěžejní pro přežití, proto není náhoda, že se tyto znalosti objevily v našem geografickém okruhu – euroasijském prostoru [18].

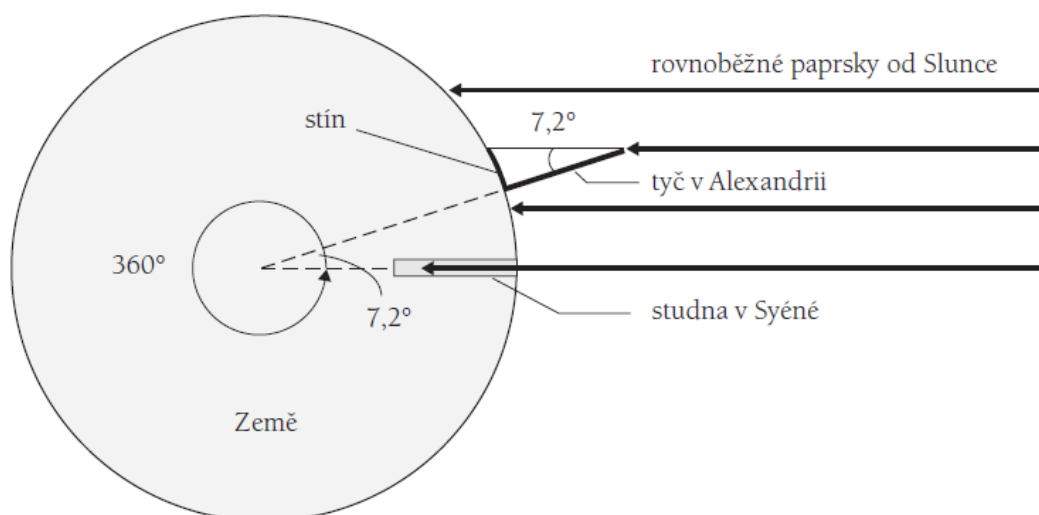
Astronomie byla už od prvopočátku spojována s mytologií. Toho si lze všimnout v celé řadě kultur, které vznikaly nezávisle na sobě – stvořitel Pchan-ku v čínské mytologii, obr Wulbarin ze západoafrické mytologie nebo Bůh z Bible. I k mytologii jako takové lze přistoupit etymologicky – je odvozena od mythos, řecky příběh nebo poslední slovo. Byť byli například Egypťané technologicky mnohem vyspělejší civilizací, byly to právě Řekové, kteří odpoutali výklad světa od dogmatu mytologie a od 6. století př. n. l. začali tvořit vlastní teorie [19].

Vývoji astronomie starověku by se daly věnovat celé hodiny a právě citovaná kniha Velký třesk od Simona Singha může pomoci k rozšíření obzorů. My se v této zaměříme na praktičtější stránku věci. Jednou z nich jsou kalendáře, kterým je věnována následující hodina, druhým jsou zásadní objevy starověku z hlediska astronomie, na něž se zaměříme nyní.

Už staří Řekové měli jasnou představu o tom, že Země je kulatá, byť ji umísťovali do středu vesmíru (i pro to ale měli dobré důvody, k čemuž se vrátíme ve [12. hodině](#)). Empirických důkazů o tom, že je Země kulatá, měli hned několik:

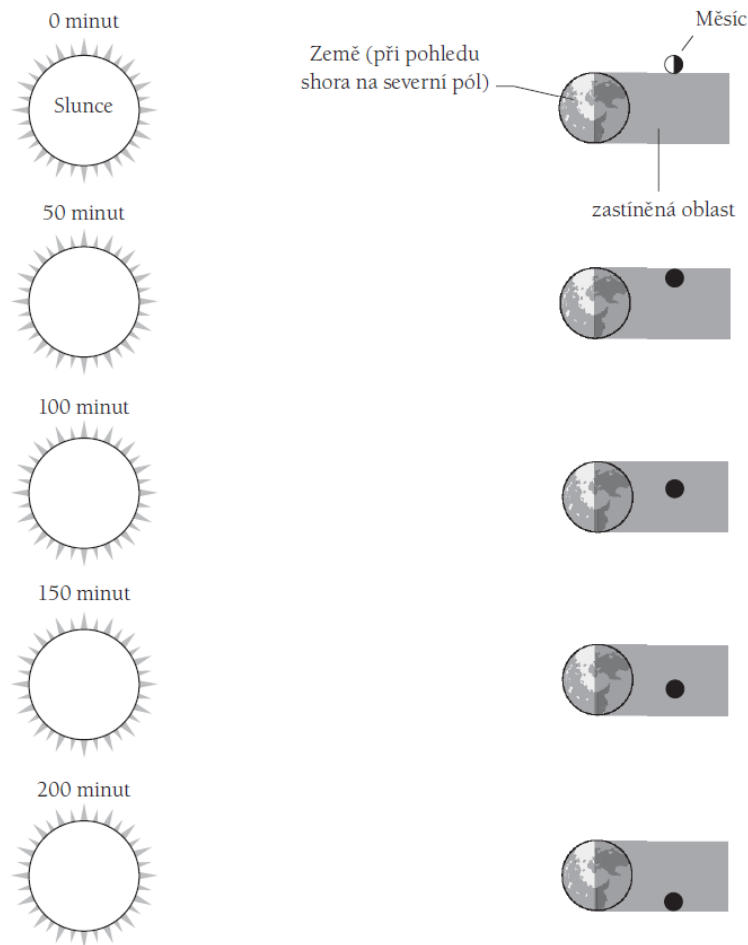
Aristoteles přišel s touto teorií ve 4. století před naším letopočtem při pozorování zatmění Měsíce. To nastává při úplňku, kdy se Měsíc dostane do stínu Země. Než se tomu tak stane, je přímo na Měsíci vidět zaoblený stín Země následovaný zarudnutím Měsíce do tmavě cihlové barvy, způsobeným tím, že jej osvěčují paprsky procházející zemskou atmosférou. K tomuto tématu lze nalézt celou řadu názorných fotografií nebo videí [\[20\]](#)[\[21\]](#). Je třeba ale mít na paměti, že tyto podklady mohou být trochu zavádějící, protože mnohdy ve snaze zdůraznit zbarvení Měsíce při totálních zatměních opomíjejí skutečnost, že v této fázi zatmění má Měsíc výrazně menší jas.

Erastothénes (3. století před naším letopočtem) přišel s experimenty, které jej vedly ke, z dnešního pohledu, velice přesným měřením velikosti Země. Byl si vědom toho, že při letním slunovratu v Asuánu dopadají sluneční paprsky kolmo na Zemi (viz [Obrázek 3.1](#)). Z výsledku měření délky stínu v Alexandrii při letním slunovratu a vzdálenosti mezi Asuánem a Alexandrií byl schopen nebývale přesně určit obvod Země jako hodnotu odpovídající dnešním 39 200 km [\[19\]](#)[\[22\]](#).

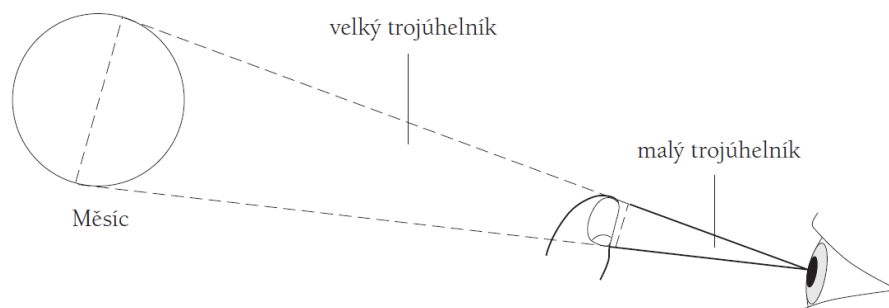


Obrázek 3.1: Geometrická vizualizace Erastothenovho experimentu, kterým odhadl velikost Země. Převzato z [\[19\]](#).

Druhým jeho významným závěrem byl odhad velikosti Měsíce pozorováním jeho zatmění, viz [Obrázek 3.2](#). Erastothénés proměřoval délku zatmění a jeho závěrem bylo zjištění, že poměr průměru Země a Měsíce je 4:1 - Měsíci trvá 50 minut než po první doteku zemského stínu dosáhne úplného zakrytí, dalších 200 minut trvá, než se ze zemského stínu úplně vynoří. Jednoduchým geometrickým experimentem dále Erastothénés zhruba určil vzdálenost Měsíce ([Obrázek 3.3](#)).

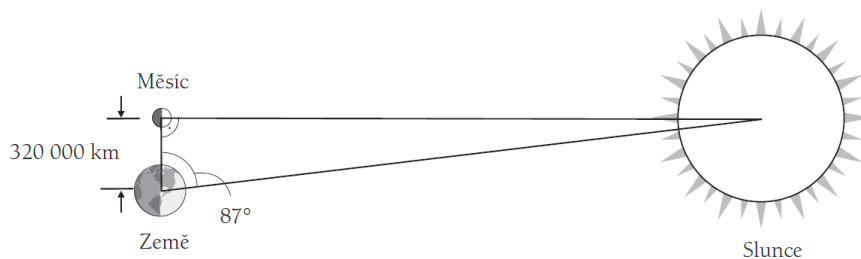


Obrázek 3.2: Schematické znázornění průběhu zatmění Měsíce k určení poměru velikosti mezi Zemí a Měsícem. Převzato z [19].



Obrázek 3.3: Odhad velikosti objektů s využitím podobných trojúhelníků. Převzato z [19].

Další experiment se opírá o úvahu Aristarchose (3. století před naším letopočtem), že vzdálenost Slunce lze odhadnout řešením trojúhelníku Slunce – Země – Měsíc v první (nebo poslední) čtvrti a jeho průměr z pozorování zatmění Slunce. Výsledkem měření bylo, že Slunce je 20x dále než Měsíc, což je dosti nepřesné, protože Slunce je zhruba 400x dále. Nicméně tyto úvahy byly svým přístupem správné, jejich nepřesnost spočívala v zásadním vlivu sebemenší odchylky téměř pravého úhlu na délku přepony trojúhelníku, resp. na délku delší odvěsny, viz Obrázek 3.4. Nicméně Aristarchos logickou úvahou dospěl k závěru, že Slunce je mnohem dále než Měsíc a tedy i mnohem větší [22].



Obrázek 3.4: Archistarchova trigonometrická úvaha k určení vzdálenosti Slunce. Převzato z [19].

Dosadíme-li na místo velikosti úhlu 87° jeho skutečnou hodnotu $89,85^\circ$, jako vzdálenost Slunce vyjde hodnota blízká astronomické jednotce.

Podobně jako Řekové, i jiné starověké civilizace nezávisle na sobě empiricky studovaly hvězdnou oblohu, proto u mnoha z nejzákladnějších objevů nelze spolehlivě určit, kdo je jako první zmapoval. Důležité při pohledu na tuto epochu jsou především praktické důsledky objevů, z nichž tomu nejzásadnějšímu, kalendářům, se věnuje následující dvouhodinová.

Shrnutí

Je ke zvážení, do jaké míry se na úrovni této hodiny do detailu věnovat popisu experimentům řeckých učenců. Nejde o těžko uchopitelná témata, pro která by bylo potřeba hlubších znalostí z následujících hodin, nicméně napojení například na hodinu věnovanou Měsíci (36. hodina) je těsné.

Z výše zmíněného je vidět, že počátky astronomie jsou vděčným tématem. Oporou krom knihy Simona Singha může být celá řada přednášek, například přednáška Astronomie, matka fyziky od profesora Podolského [23], která se věnuje i astronomii v neolitu a dalším starověkým civilizacím. Hodina by měla především v žácích zakotvit základní terminologii a zasadit astronomii jako celek do historického kontextu. Tyto poznatky budeme v následujících hodinách rozvíjet.

3. a 4. Kalendáře

Téma: Týdenní cyklus, měsíční cyklus, roční cyklus, historické kalendáře

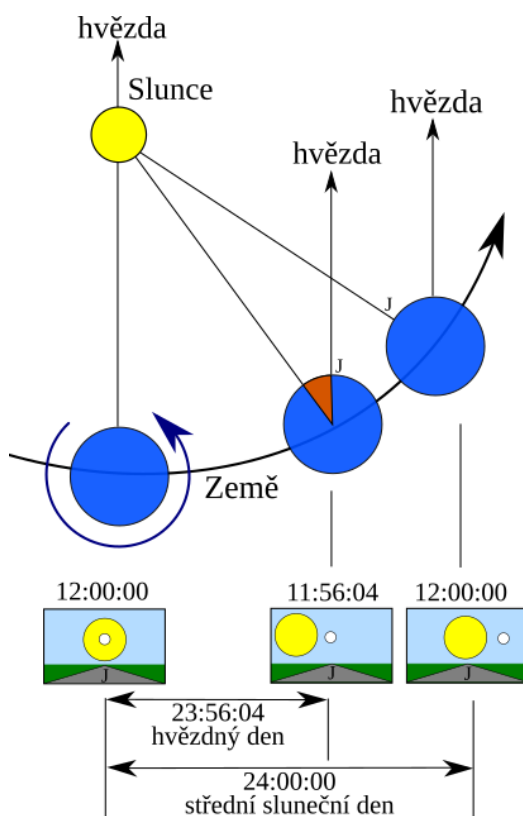
Cíl: Popsat žákům první reálnou aplikaci astronomických měření – kalendáře

Přístup k hodině

Kalendáře vznikly jako přirozený důsledek pozorování pravidelných astronomických jevů. Pohlédneme-li na téma ještě obecněji jako na téma času a měření času, bavíme se nejen o astronomii a důsledcích pozorování, ale i o formalismu daném defintoricky a to je třeba hned zkráje rozlišit. Tuto hodinu zaměříme na nejstarší aplikovanou astronomii, svázanou s neolitem, starověkem a středověkem. Vzhledem k tomu, že jde o košaté téma výkladové povahy, s velkým přesahem do dalších oborů, přistoupíme k tématu jako ke dvouhodinově.

Měření času

Sluneční den trvá 24 hodin, zatímco hvězdný (siderický) den trvá 23 hodin 56 minut a 4,09 sekundy. Tento rozdíl může být na první pohled zarážející, proto je vhodné jej názorně vysvětlit. K tomu poslouží například následující ilustrace na Obrázku 3.5:



Obrázek 3.5: Rozdíl mezi slunečním a hvězdným dnem. Převzato z [24].

Délka hodiny, resp. minuty a sekundy je dnes dána definicí a nevychází z astronomie jako takové. Už v Mezopotámii a Egyptě se pracovalo se dnem o 12 hodinách a nocí o 12 hodinách. Jednotka hodiny ale nebyla fixní a její délka se měnila v průběhu roku. Podobně neměla ani půlnoc a poledne většího významu z hlediska měření času. K měření samotnému se využívalo gnómonu – slunečních hodin, které sloužily spíše ke kalendářním účelům, resp. pro jejich nepřesnost sloužily spíše k určování denní doby než k určování přesného času [25].

Stejně dlouhé hodiny se sice používaly už ve starověku, ale jen pro vědecké účely, protože v občanském životě nebyla k dispozici zařízení k měření času. Mechanické hodiny se objevily až ve vrcholném středověku a do té doby se dalo využívat jen jednoduchých zařízení, jako jsou vodní nebo přesýpací hodiny. Důvod, proč počítáme s 12 hodinami, 60 minutami a 60 sekundami,

je čistě numerologický a jeho původ sahá patrně do Babylonu. Počítání času od půlnoci bylo zavedeno až v novověku [25].

Z didaktického hlediska je třeba brát zřetel na to, že téma spíše spadá do společenských věd než do astronomie. Bližší vzhled do problematiky nabízí kniha Historická chronologie od Marie Bláhové, která je jedním z hlavních podkladů této dvouhodinovky.

Dny v týdnu už souvisí s astronomií mnohem těsněji. Sedmidenní týden byl zaveden v Přední Asii, patrně v Babyloně, odkud se rozšířil do středomoří. Důvod, proč bylo zvoleno právě sedm, nelze jednoznačně určit, nicméně je pravděpodobné, že souvisel s uctíváním sedmi nebeských těles – Slunce, Měsíce a pěti okem viditelných planet. Kalendář v této podobě později od Židů převzali Římané, kteří podle kosmických objektů pojmenovali dny v týdnu, čímž vznikl tzv. planetární týden. Tento způsob pojmenování dnů se v průběhu dalších století projevil ve většině indoevropských jazyků, především těch románských, viz Tabulka 3.1.

	latinsky	italsky	francouzsky	německy	česky
den Slunce	dies Solis	Domenica	Dimanche	Sontag	neděle
den Měsíce	dies Lunae	Lunedì	Lundi	Montag	pondělí
den Martův	dies Martis	Marterdi	Mardi	Dienstag	úterý
den Merkurův	dies Mercuris	Mercoledì	Mercredi	Mittwoch	středa
den Jupiterův	dies Jovis	Giovedì	Jeudi	Donnerstag	čtvrtek
den Venušin	dies Veneris	Venerdì	Vendredi	Freitag	pátek
den Saturnův	dies Saturni	Sabato	Samedi	Samstag	sobota

Tabulka 3.1: Dny v týdnu v různých jazycích.

Římané považovali za první den týdne sobotu, to se změnilo v 3. století, kdy se pod vlivem kultu Slunce stala neděle preferovaným dnem.

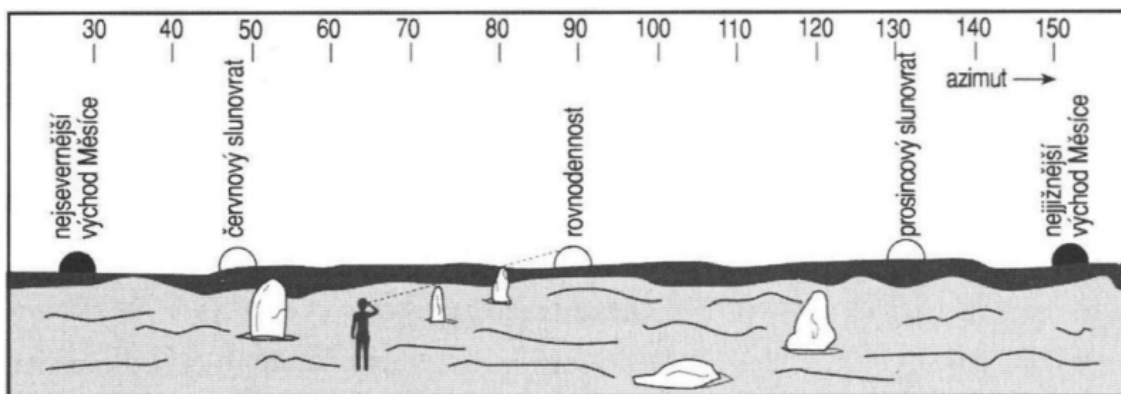
Úvod ke kalendářům

Kalendáře jsou trojího typu:

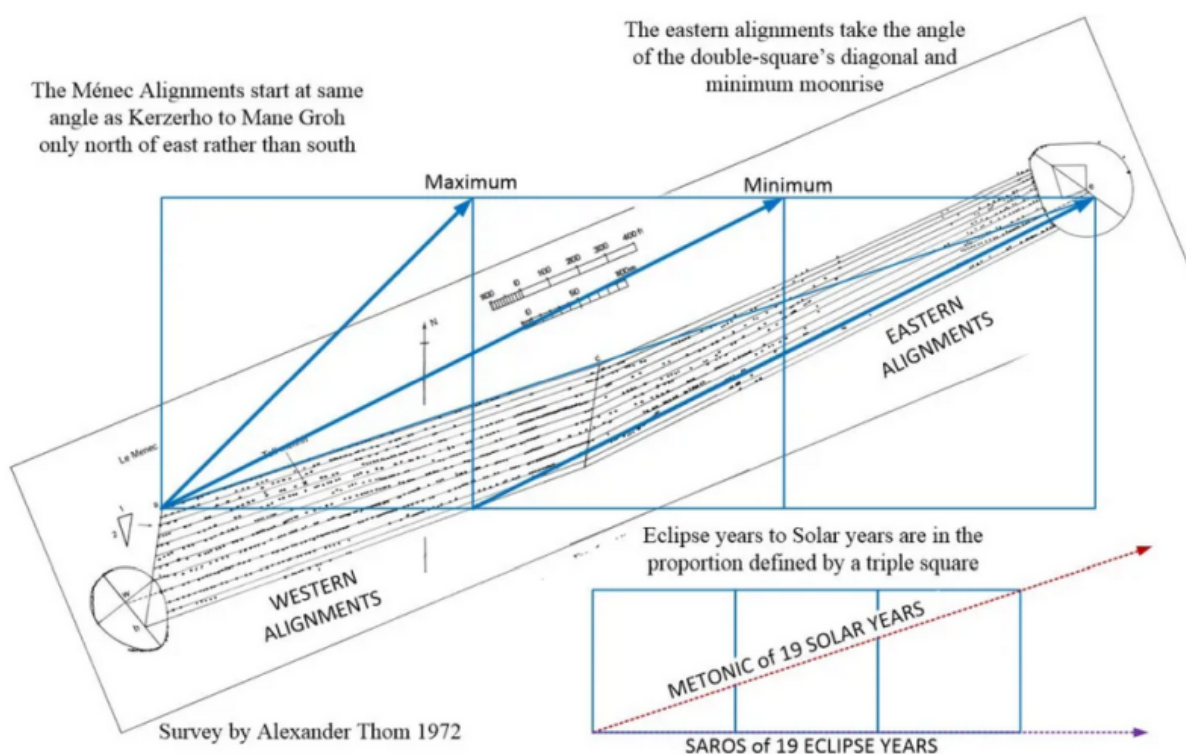
- Lunární – řídí se pouze cykly Měsíce a počítá se od novu k novu, tj. dle synodického měsíce, který má 29,53 dne. Lunárním kalendářem je dodnes islámský kalendář. Lunární kalendář je na jednu stranu snadno uchopitelný, nevýhodou ale je, že se rozchází s pravidelnými solárními cykly. Lunárním kalendářem byl patrně babylonský kalendář a první egyptský kalendář.
- Solární kalendář se dnes už nepoužívá, nicméně využíván byl například v starověkém Egyptě. Solární kalendář lépe reflektuje pravidelná střídání ročních období. Nevýhodou ale je, že jeden cyklus je příliš dlouhý.
- Lunisolární kalendář kompenzuje nevýhody lunárního a solárního kalendáře. Díky němu je možné pevně stanovit začátek roku a jednotlivé měsíce vždy do stejné části roku.

Neolitické kalendáře

Nejstarší kalendáře vznikaly už v neolitu. Tento účel z části plnily megalitické stavby, například Newgrange (Irsko), Carnac (Francie), Kokino (Severní Makedonie) nebo Stonehenge (Velká Británie). Jde o rozlehlé stavby z menhirů, které jsou rozmístěny tak, že tvoří slunovratové linie a lunární linie, podle nichž lze určit významné dny v roce. Stavby dokonce zohledňují změny mezních východů Měsíce, které oscilují s periodou 18,61 let [18][26]. Na Obrázku 3.6 můžeme vidět schematicky klíč, podle kterého neolitické kalendáře byly stavěny. V nejjednodušší formě šlo o seskupení menhirů, které mohly být vystavěny v plochem terénu, jako například v Carnacu, viz Obrázek 3.7, nebo naopak ve členitém terénu mezi skalami jako v observatoři Kokino.



Obrázek 3.6: Východy a západy Slunce a Měsíce ve významných dnech pozorované ve vyšších severních šířkách. Převzato z [26].

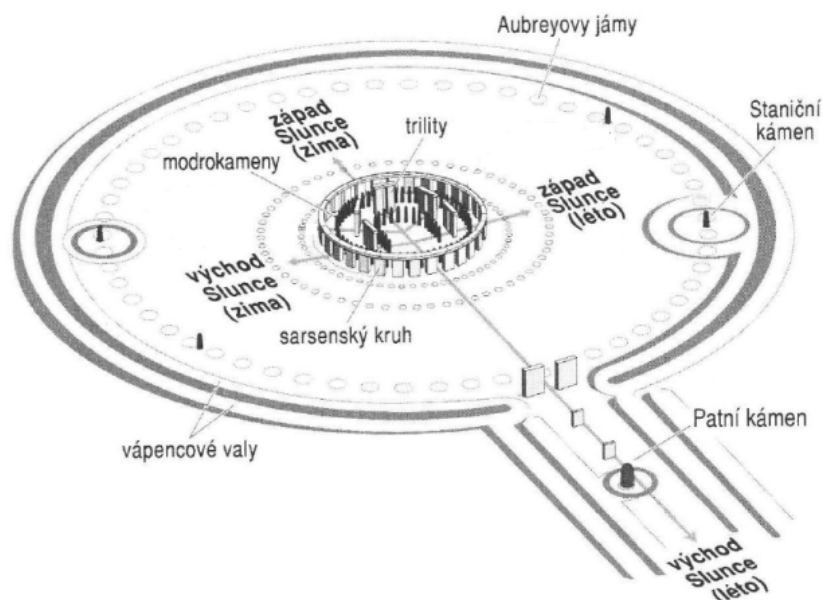


Obrázek 3.7: Rozmístění menhirů na neolitickém nalezišti v Carnacu, Francie. Převzato z [27].

Vedle toho Newgrange nebo Stonehenge byly sofistikovanějšími komplexy. Newgrange je mohylovým monumentem, který byl patrně především náboženskou stavbou, viz Obrázek 3.8, zatímco Stonehenge byl spíše místem setkávání místních komunit [29]. Na Obrázku 3.9 můžeme vidět schéma areálu ve Stonehenge.



Obrázek 3.8: Newgrange, Irsko. Převzato z [28].



Obrázek 3.9: Úspořádání na nalezišti Stonehenge (Velká Británie). Převzato z [26].

Egyptský kalendář

Nejstarším kalendářem pevně zasazeným do roku je staroegyptský kalendář. Ten se skládal z 12 měsíců po 30 dnech s 5 přestupnými dny navíc na konci roku věnovanými památce zemřelých a pokání. Rok se skládal ze tří sezón po čtyřech měsících – sezóny záplavové, secí a sklízecí. Egypťané zjistili, že období záplav začíná v době, kdy se na obloze objevuje hvězda Sirius – okolo letního slunovratu nastává v Egyptě heliaktický východ Siria, kdy je možné Sirius spatřit těsně před východem Slunce. Na záplavách závisela celoroční úroda Egypta, proto právě na heliaktický východ Siria navázali Egypťané kalendář. Egyptský kalendář se každý rok rozešel o zhruba čtvrtinu dne oproti tropickému roku (365,2522 dne), proto byl heliaktický východ Siria používán k určení začátku záplav a egyptský rok se sám synchronizoval jednou za 1460 tropických let, čemuž odpovídalo 1461 egyptských let. Přestupný rok se v Egyptě začal používat až v roce 26 před naším letopočtem s rozšířením Juliánského kalendáře [25].

Moderní kalendáře

Podobně jako dny v týdnu i kalendář, který dnes používáme, má původ u Římanů. Julius César zavedl Juliánský kalendář, který vychází z dlouhodobých pozorování Egyptů. V Juliánském kalendáři má rok 365,25 dne a zavádí tak jednou za 4 roky přestupný rok se dnem navíc. V Juliánském kalendáři začíná rok 1. března což je dodnes znát v etymologii jmen měsíců většiny indoevropských jazyků (např. September – septem je latinsky sedmý, dále pak analogicky October, November a December). Počátek kalendáře dle narození Ježíše Nazaretského byl zaveden v 6. století.

Juliánský kalendář byl reformován v roce 1582 z důvodu kumulující se odchylky 11 minut ročně, o kterou je Juliánský kalendář kratší než tropický rok. Reformovanou podobu – Gregoriánský kalendář využíváme dodnes (výjimkou z tohoto pravidla je datace svátků v některých kulturách, například v Číně, Arabském světě nebo východní Evropě) a oproti Juliánskému se liší zavedením nepřestupných let, je-li letopočet dělitelný 100 a zároveň není dělitelný 400.

Téma kalendářů je velice obsáhlé a zahrnuje celou řadu dalších kalendářů, například Mayský kalendář, který byl hojně propíraným tématem v roce 2012, Řecký kalendář těsně spojený s antickými olympijskými hrami nebo Čínský používaný pro dataci čínského nového roku.

Shrnutí

Obecně lze říct, že téma kalendářů astronomická literatura příliš nezpracovává. Posláním této dvouhodinovy je především nastítnit provázanost mezi astronomií a tvorbou kalendáře, který sám o sobě dává řád jak společnosti, tak z hlediska historického i procesům, které byly nezbytné pro přežití.

Výhodou tématu je, že je z velké části samonosné a lze jej těsně spojit s výukou dějepisu – zvláště rozkol mezi používáním Juliánského a Gregoriánského kalendáře má silný historický kontext a konsekvence z hlediska datace historických událostí a svátků.

5. Základy pozorování

Téma: Co můžeme vidět na noční obloze, co je to den, noc, soumrak a rozbřesk

Cíl: Seznámit žáky se základní terminologií astronomického pozorování

Přístup k hodině

Předchozí dvě hodiny měly především výkladovou povahu a většina informací v nich zahrnutá byla s velkou pravděpodobností pro žáky nová. Tato hodina se svou povahou dosti liší, neb je postavena na práci s terminologií, kterou každý na obecné úrovni zná. Proto tuto hodinu lze vést formou diskuze, kdy se žáci budou snažit sami zformulovat správné odpovědi na klíčové otázky:

1. Proč nevidíme hvězdy přes den?
2. Co je to noc? Resp. co je to astronomická noc, astronomický soumrak, nautický soumrak, občanský soumrak?
3. Co můžeme vidět na noční obloze pouhým okem?

Odpovědi na otázky

Začneme od definice oblohy. Tento pojem bývá často chápán intuitivně, jako něco, co je nad námi. To není ale úplně přesné. Vysokoškolská učebnice Základy astronomie od Miroslava Zejdy [30] definuje oblohu jako: „*všechny směry vycházející z pozorovatele, z jeho očí, mířící nad obzor*“, přičemž obzorem je: „*krajina, která nás obklopuje*“. Pokud bychom byli na dokonalé kouli, oblohou by pro nás byla půlsféra. Tak tomu může být ale (hypoteticky) jen na širém moři, které je dokonale klidné nebo na pustých rovinatých pláních.

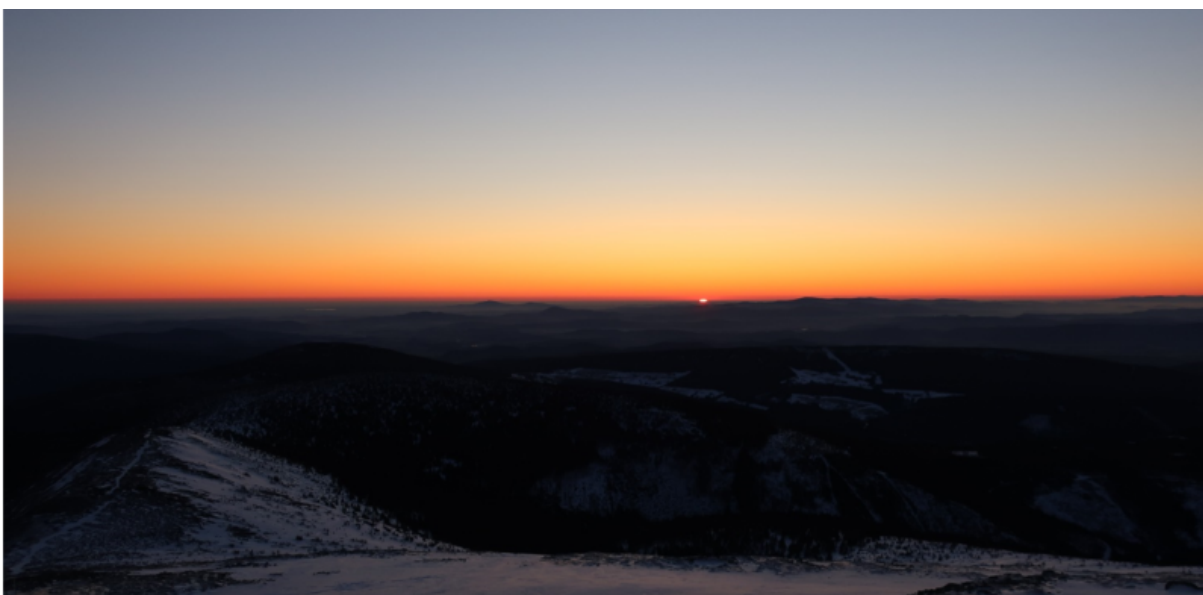
Odpověď na otázku, proč nevidíme hvězdy přes den, je v zásadě stejná jako odpověď na otázku, proč je obloha modrá. Může za to rozptyl světla, tzv. Rayleighův rozptyl v atmosféře, který je tím intenzivnější, čím je kratší vlnová délka světla [31]. Kdybychom atmosféru neměli, jak je tomu například na Měsíci, viděli bychom na obloze Slunce na černém pozadí obklopeném hvězdami. Rozptyl slunečního světla v atmosféře způsobuje, že se obloha „prosvítí do modra“ a díky tomu sekundárně nejsou hvězdy vidět, protože je pro nás v tu chvíli obloha přesvícená. To ale neznamená, že hvězdy na denní obloze nejsou. Zde může být vhodné zmínit, že ten samý rozptyl způsobuje v ranních nebo večerních hodinách červánky a zbarvuje Měsíc do červena při zatmění Měsíce a těsně nad obzorem.

V souvislosti s prvním dotazem se nabízí také otázka: Proč je obloha právě modrá? Proč není obloha fialová? To už souvisí s vyzařovací charakteristikou Slunce, které má emisní maximum kolem 500 nm. V této fázi není naší ambicí se ponořit detailněji do tématu elektromagnetického, resp. tepelného záření, k němuž se vrátíme 45. hodině.

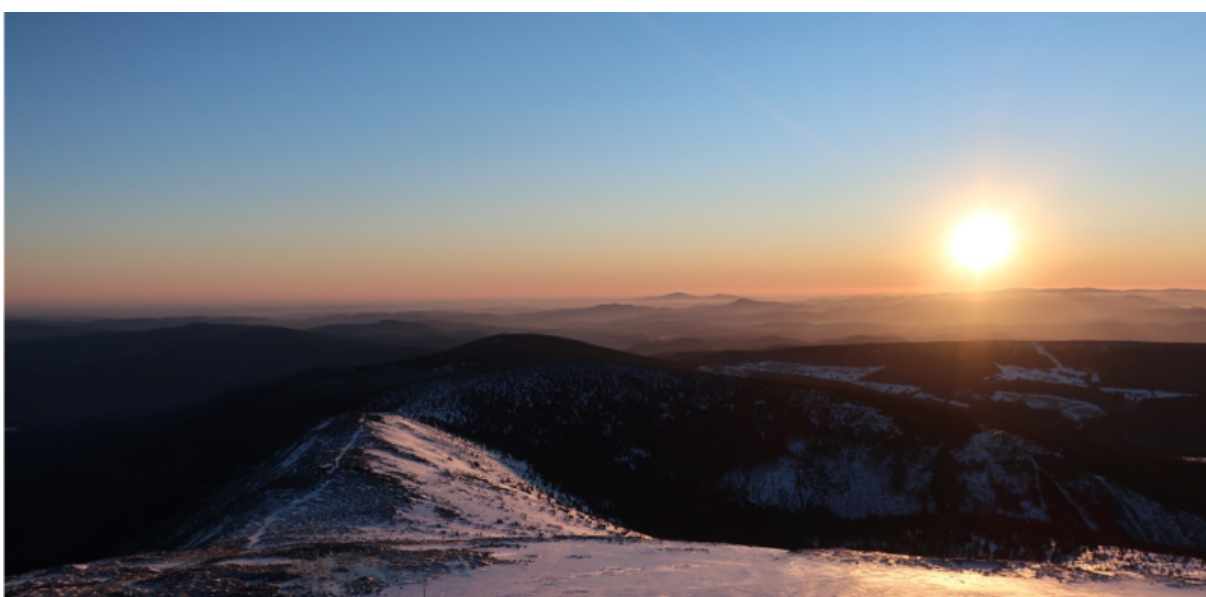
Odpověď na otázku, co je to noc, je triviální jen na první pohled. Zajde-li Slunce opticky pod horizont nastává soumrak. Kdy tomu tak je, striktně vzato, záleží i na morfologii našeho okolí, viz definice oblohy. Nicméně obecně lze říci, že noc je období, kdy je střed Slunce alespoň $0^{\circ}50'$ pod obzorem. Proč $0^{\circ}50'$? V atmosféře dochází k lomu světla, který způsobuje, že Slunce je při východu a západu vidět, přestože je fyzicky stále $0^{\circ}34'$ pod obzorem. Další $0^{\circ}16'$ připadá na vrub úhlovému poloměru Slunce.

Následují 4 fáze:

- **Občanský soumrak/rozbřesk** – Slunce je maximálně 6° pod obzorem. Vidět můžeme jen nejjasnější hvězdy, případně blízké planety a lze se pohybovat na volném prostranství, za dobrého počasí, bez umělého světla. To je v následujících fázích noci možné jen omezeně a to především za úplňku.
- **Nautický soumrak/rozbřesk** kdy je Slunce 6° až 12° pod obzorem – jsou vidět dominantní hvězdy a souhvězdí (mohou být vidět blízké planety, tj. Merkur, Venuše, Mars, Jupiter, Saturn), podle nichž se dá orientovat.
- **Astronomický soumrak/rozbřesk**, kdy je Slunce 12° až 18° pod obzorem. To už jde velmi dobře pozorovat hvězdy a souhvězdí, ale ještě (nebo už) není dostatečná tma pro plnohodnotná astronomická pozorování.
- **Astronomická noc** nastává, když je Slunce více než 18° pod obzorem.



Obrázek 3.10: Úsvit na Sněžce 15. března 2020 v 6:01. Fyzicky je Slunce stále za obzorem.



Obrázek 3.11: Úsvit na Sněžce 15. března 2020 v 6:23. Slunce je zhruba 3° nad obzorem.

V astronomické terminologii se nocí chápe astronomická noc, zatímco v běžné mluvě je obvykle noc vymezena jako doba mezi západem a východem Slunce. Proto se můžeme setkat například s pojmem bílá noc, kterou lze na severní polokouli pozorovat v období okolo letního slunovratu v zeměpisných šířkách severně od $60^{\circ} 33'$ severní šířky (souřadnice polárního kruhu minus 6 stupňů)¹.

Z mé zkušenosti se dosti rozcházejí názory na nezbytnost zavedení těchto pojmů, čemuž částečně odpovídá i to, že jim není věnována v astronomické, resp. fyzikální, literatuře velká pozornost a najdeme o nich zmínku spíše v literatuře zaměřující se na námořní navigaci [32].

Nicméně, dle mého soudu, je vymezení těchto pojmů klíčové s ohledem na to, že se používají v běžné mluvě. Klíčové jsou i z hlediska amatérského pozorování, protože vysvětlují, proč a jak se mění pozorovací podmínky v závislosti na fázi noci, ročním období nebo zeměpisné šířce. Tomu se bude věnovat z velké části následující vyučovací hodina.

Téma pouhým okem pozorovatelných objektů na noční obloze částečně navazuje na předchozí vyučovací hodinu, proto by žáci neměli mít problém tuto otázku alespoň z části odpovědět.

Odpovědí je, že na noční obloze můžeme pouhým okem vidět:

- Planety Merkur, Venuše, Mars, Jupiter a Saturn, za výjimečných podmínek i Uran
- Viditelných hvězd je z jednoho místa zhruba jen několik tisíc v závislosti na lokalitě a míře světelného znečištění. V České republice, v odlehlých lokalitách, můžeme vidět přibližně 2000 hvězd. Za zmínku stojí i to, že všechny okem viditelné hvězdy se nacházejí v Mléčné dráze. Výjimkou je jen Galaxie v Andromedě a Magellanova mračna (viditelná především z jižní polokoule), které jsou ale pro běžného pozorovatele svojí povahou těžko rozlišitelná od ostatních hvězd.
- Méně obvyklé objekty jako komety, meteory bolidy (jasný meteor) nebo perseidy (kometární meteoritický roj pozorovaný v červenci a srpnu).
- Mezinárodní vesmírná stanice (dále ISS²) a další umělé družice, v posledních letech především družice Starlink.
- V neposlední řadě Měsíc. Věnovat se mu budeme důkladně v **36. hodině**, nicméně už teď se hodí říct, že Měsíc má zásadní vliv na pozorování, protože se svojí intenzitou přibližně 0,2 luxu při úplňku dokáže přesvítit velkou část oblohy, což zamezí pozorování velké části jinak viditelných hvězd.

Na kvalitu pozorovacích podmínek má největší vliv světelné znečištění v dané lokalitě. Nejlepší pozorovací podmínky v České republice jsou obvykle na Šumavě a v Blanském lese, především v období zimních inverzí.

Shrnutí

Hodina má za cíl uvést žáky srozumitelně do problematiky pozorování ještě předtím, než se otevřou témata geografie, pozorovacích systémů a jejich propojování. Samotná problematika astronomického pozorování těsně souvisí s tématem světelného znečištění, kterému se budeme věnovat ve **48. hodině**. Alternativně lze zařadit téma světelného znečištění již v této fázi vzdělávacího plánu.

¹Komplementárně i na jižní polokouli, nicméně tam se v těchto šířkách nenachází stálá obydlí

²V rámci celé práce budeme využívat obou termínů, Mezinárodní vesmírná stanice i ISS, ve snaze předejít přednostnímu používání jednoho z nich.

6. a 7. Geografická hodina

Téma: Ekliptika, sklon zemské osy a důsledky, které z toho plynou

Cíl: Seznámit žáky s astronomickou terminologií spojenou se Zemí

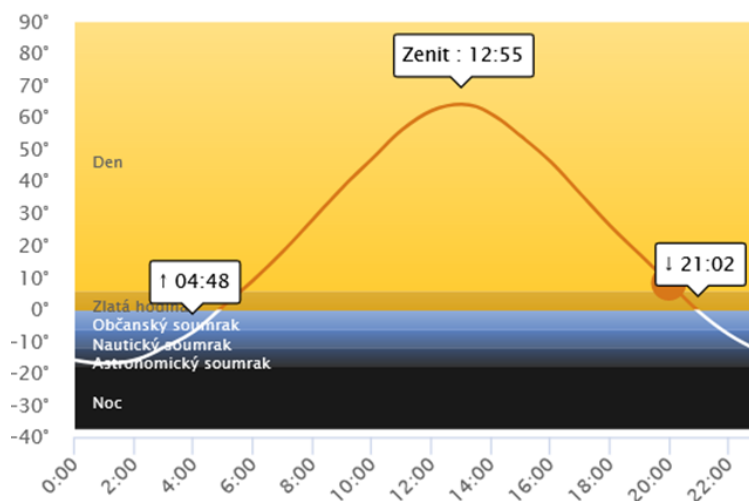
Přístup k hodině

Tato hodina má být především praktická a z důvodu její multidisciplinarity je koncipována jako dvouhodinovka. Žákům by se zde nemělo ani tak dostat nových znalostí, cílem je spíše propojit znalosti, které již mají z předchozího studia. Zpočátku využijeme znalostí z předchozí hodiny, které budou pojítkem k dalším tématům.

Průběh dne v Brně

Na následujícím Obrázku 3.12 je vidět průběh dne Brně při letním slunovratu. Udaný čas odpovídá CEST (Central European Summer Time), tedy střeoevropskému letnímu času (SELČ). CEST je roven GMT+2, tedy Greenwich Mean Time plus 2 hodiny – jedna hodina posunu odpovídá pásmovému posunu, druhá hodina letnímu času.

Na první pohled zaujme, že v den slunovratu astronomická noc v Brně nenastává – při slunovratu nastává astronomická noc v České republice jen v její jižní části jižně od Vyššího Brodu, na Sněžce naopak nenastane po 7 týdnů.



Obrázek 3.12: Průběh dne v Brně při letním slunovratu 2021. Převzato z [32].

Dále je pak z Obrázku 3.12 vidět, že půlnoc není polovinou noci a poledne není polovinou dne. To způsobují dva faktory:

- Letní čas, částečně zmíněný již výše, kdy se od konce března do konce října používá čas posunutý o jednu hodinu vpřed oproti standardnímu času. Letní čas byl poprvé zaveden za 1. světové války, přičemž motivací byly energetické úspory. V České republice, resp. Československu byl zaveden v roce 1979. Diskuze o pozitivích a negativích letního času, resp. přechody mezi letním a standardním časem, nejsou tak úplně záležitostí astronomie a spíše než se věnovat tomuto tématu je třeba zdůraznit, že mimo období letního času používáme standardní čas, nikoli zimní čas (i zimní čas, tedy čas posunutý o jednu hodinu vzad v zimních měsících se historicky používal v Československu, Irsku nebo Chile, nicméně dnes už se od něj všude upustilo).
- Místní čas. Časové pásmo České Republiky se nazývá CET (Central European Time) nebo analogicky česky SEČ a odpovídá GMT+1. CET pásmo je vztaženo k 15. poledníku, který prochází Jindřichovým Hradcem. V jistém přiblížení tak lze říct, že v Jindřichově Hradci je dle CET času poledne po celý rok ve 12 hodin. Zeměpisná délka Brna je zhruba 16° 36,5'.

Každý stupeň poledníku odpovídá posunu v místním čase o 4 minuty, proto místní čas je posunutý proti pásmovému zhruba o 6 minut³.

Dále je z obrázku vidět, že Slunce vrcholí ve výšce více než 60° nad obzorem. Přesná výška je dána zeměpisnou šířkou a sklonem zemské osy.

Sklon zemské osy, nebo přesněji sklon rotační osy Země, je přibližně $23,5^\circ$. To je poměrně známá věc. Nicméně je třeba si říci, k čemu vztahujeme sklon rotační osy. Sklon rotační osy se určuje vzhledem k rovině oběhu Země, která se nazývá ekliptika. S určitou mírou nepřesnosti lze říci, že i ostatní planety Sluneční soustavy se pohybují po ekliptice, proto na obloze (až už noční nebo denní) tvoří ekliptika oblouk, po němž se pohybují všechny planety Sluneční soustavy, Slunce samo a najdeme zde i zvířetníková (zodiakální) souhvězdí.

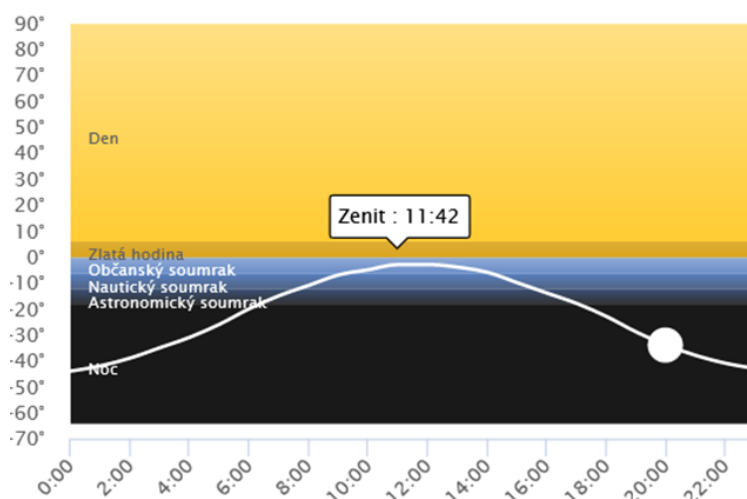
Zpátky k výpočtu výšky Slunce ve vrcholu při slunovratu v Brně. Víme, že sklon osy je $23,5^\circ$ a zeměpisná šířka Brna je zhruba $49^\circ 10'$. Z toho plyne, že Slunce bude při letním slunovratu vrcholit zhruba ve výšce $62^\circ 20'$ ($41^\circ 50' + 23^\circ 30'$).

Způsob, jak určit výšku, v níž vrcholí Slunce v jiných zeměpisných šířkách, resp. v jiných fázích roku, názorně ukazují obrázky 3.15.

Obecně lze říci, že při rovnodennosti Slunce vrcholí ve výšce, která je doplňkem zeměpisné šířky do 90° . V případě slunovratů se tato výška mění o $\pm 23,5^\circ$ podle toho, zda jde o zimní nebo letní slunovrat.

To můžeme demonstrovat na celé řadě příkladů

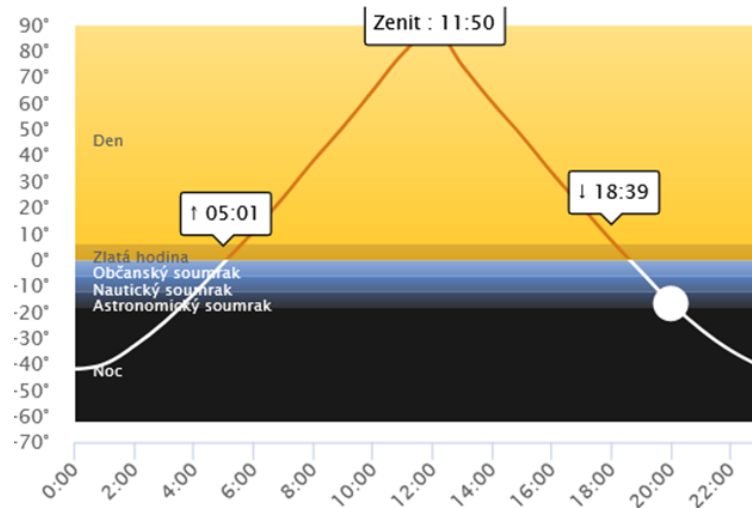
- Při dosažení zeměpisné šířky za polárním kruhem vychází, že při polární noci vrcholí Slunce pod obzorem. To ovšem neznamená permanentní tmu – bude-li Slunce vrcholit například 3° pod obzorem (Tromsø v Norsku při zimním slunovratu, viz Obrázek 3.13) nastává alespoň občanský rozbřesk, který plynně přejde do občanského soumraku.



Obrázek 3.13: Průběh dne v Tromsø při zimním slunovratu 2021. Převzato z [32].

- Při dosažení zeměpisné šířky obratníků vidíme, že při jednom ze slunovratů, dle obratníku, vrcholí Slunce přímo nad naší hlavou, tedy v zenitu. To je případ egyptského Asuánu (obratník raka) z Erastothénova experimentu zmíněného v 2. hodině, viz obrázek 3.14.

³Odhlédneme-li od hranic států, resp. jejich regionů, v ideálním případě by měl daný pásmový čas platit pro oblast, která leží $\pm 7,5$ poledníku od centrálního poledníku pro dané pásmo.



Obrázek 3.14: Průběh dne v Asuánu při letním slunovratu 2021. Převzato z [32].

- Pro zeměpisné šířky mezi obratníky vrcholí Slunce v zenitu dvakrát ročně, na rovníku právě v rovnodennosti. To dokladují předchozí obrázky na příkladu inckého Cuzca v Peru a mayského Chichén Itzá v Mexiku.

Nejzásadnějším důsledkem náklonu zemské osy je pak střídání ročních období. Střídání ročních období má celou řadu konsekvencí ať už astronomických tak klimatických:

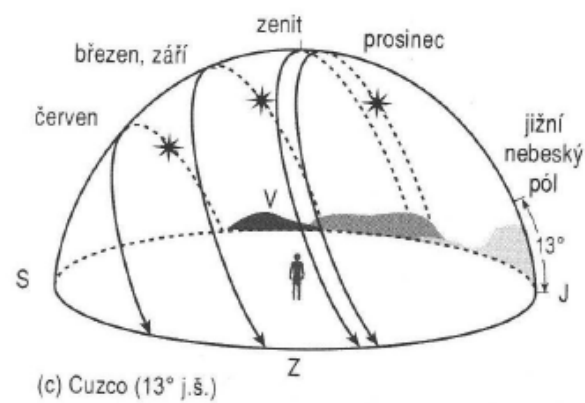
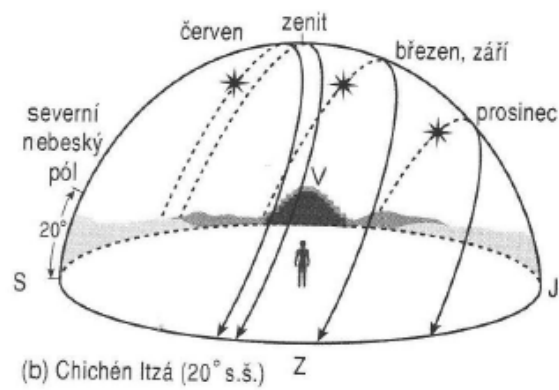
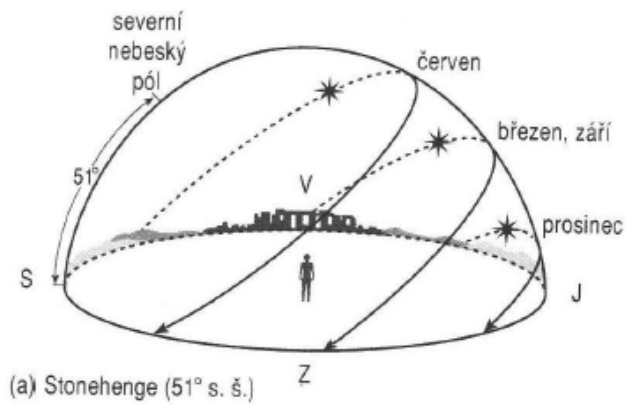
- V zimních obdobích jsou dny kratší, proto množství energie dopadající v tyto dny je menší.
- V zimních obdobích je také Slunce níže nad obzorem a z toho důvodu světlo letí delší dráhu atmosférou, která jej rozptyluje. Proto je při slunném zimním dni intenzita osvětlení Slunce zhruba třetinová oproti slunnému letnímu dni (v českých podmínkách jde přibližně o 100 000 luxů při letním slunném dni, resp. 30 000 luxů při zimním slunném dni). Má-li učitel k dispozici luxmetr, otevírá se prostor pro měření vývoje změny intenzity osvětlení Slunce v průběhu roku.
- Na střídání ročních období, má zásadní vliv mikroklima i makroklima dané lokality, resp. regionu. Jde například o:
 - Oceánské proudy
 - Větrné proudy
 - Stabilní i méně stabilní cyklóny a anticyklóny
 - Vliv tepelné kapacity vodních ploch
 - Odrazivosti vodních ploch a sněhové pokrývky
 - Vliv nadmořské výšky a s tím spojené vegetace

Na první pohled je zjevný rozdíl ročních období na severní a jižní polokouli, kdy jižní polokoule je chladnější mj. proto, že je na ní méně pevniny a v červenci nastává odsluní, což brání rychlejšímu úbytku sněhu.

Shrnutí

Pro geografickou hodinu, i pro následující hodiny, může být velkým pomocníkem globus, který dá žákům lepší představu o tom, jak se mění pozorovací podmínky dle polohy. Geografická hodina má potenciál být přesahová do celé řady dalších předmětů a nabízí spoustu témat, která by mohla zaplnit celé další hodiny.

I proto je toto téma koncipováno jako dvouhodinová, ač v kontextu pozdějších dvouhodinovek může působit dojmem, že dává komfortní rezervu pro probírání navázaných témat. Z hlediska přístupu takto má učitel nebývalou volnost a může hodinu vést formou diskuze, kterou navádí tak, aby nesklouzla daleko od původního tématu.



Obrázek 3.15: Pohyb Slunce po obloze ve dnech 20. března, 21. června, 22. září a 21. prosince pozorován ve třech lokalitách: (a) Stonehenge (Velká Británie), (b) Chichén Itzá (Mexiko), (c) Cuzco (Peru). Převzato z [26].

8. a 9. Pozorovací systémy

Téma: Obzorníkový systém, ekvatoriální systém, ekliptikální systém

Cíl: Poskytnout žákům základní vzhled, jakým způsobem se orientovat na noční obloze

Přístup k hodině

Téma pozorovacích systémů je rozděleno na dvě části – na zavedení pozorovacích systému a na jejich aplikaci. Proto je volena forma dvouhodinovky, abychom mohli pozorovací systémy hned aplikovat na specifických pozorováních.

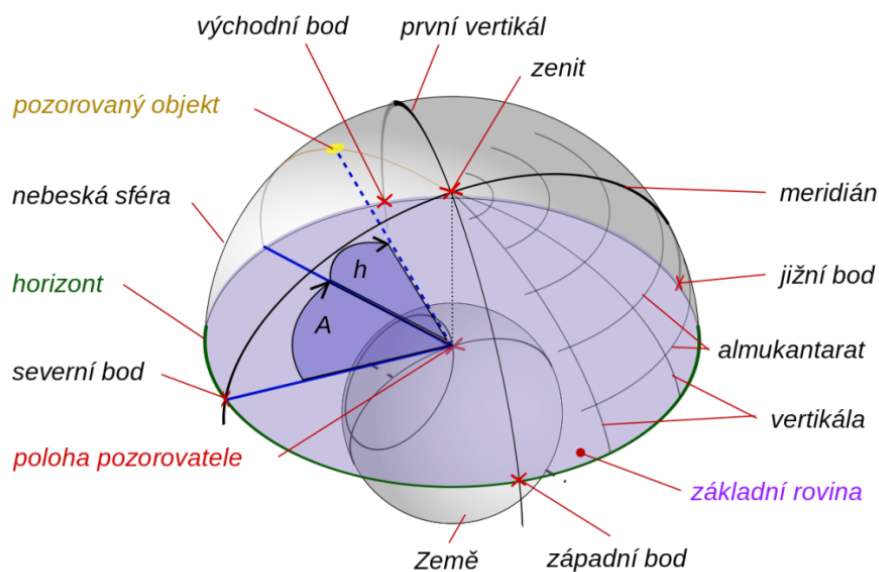
Abychom se mohli začít orientovat na obloze, potřebujeme zavést metodiku. Proto se odrazíme od popisu 3 systémů, které se používají nejčastěji.

Pozorovací systémy

Každý pozorovací systém má své přednosti i své nedostatky

- **Obzorníkový systém** je nejjednodušší. Objekty na obloze jsou definovány azimutem, výškou a pevným bodem, viz Obrázek 3.16. Klíčové pojmy jsou definovány následujícím způsobem:
 - Základní rovinou je rovina obzoru, nebo též **obzorník**.
 - Pevným bodem je jižní bod, dle kterého se určuje **azimut** po směru hodinových ručiček, tedy $A = 90^\circ$ je západní bod atd.
 - **Výška** se udává v rozmezí $\pm 90^\circ$. Bod ve výšce $+90^\circ$ se nazývá **zenit**, bod ve výšce -90° se nazývá **nadir**.
 - Vertikál je kružnice složená z bodů s definovaným azimutem a azimutem o $+180^\circ$ větším.
 - **Meridián** je vertikál, který prochází nebeským pólem.

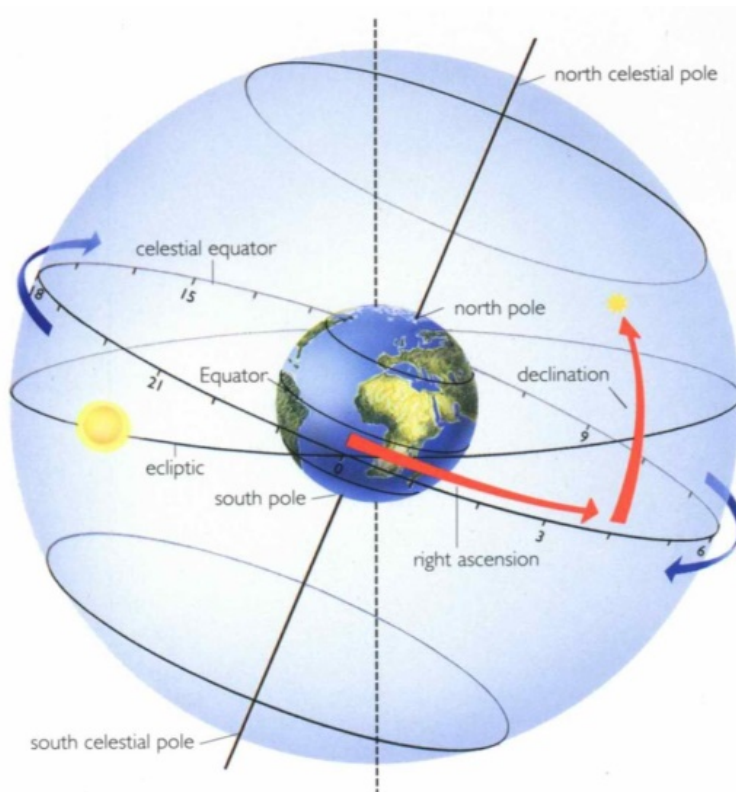
Výhodou systému je snadná orientace pro laického pozorovatele. Nevýhodou je, že dané souřadnice (azimut a výška) jsou poplatné zeměpisné šířce pozorovatele, datu a hodině pozorování.



Obrázek 3.16: Obzorníkový systém. Převzato z [34].

- **Ekvatoriální systém** (viz Obrázek 3.17) je vztažený k rovníku:
 - Ekvivalentem azimutu je **rektascenze**, která se měří od jarního bodu a udává se ve stupních (0° až 360°) nebo v hodinách (0 až 24 hodin) a měří se od západu směrem na jih a dále na východ
 - o ekvivalentem výšky je **deklinace**, která se měří od nebeského rovníku.
 - **Jarní bod** je jeden ze dvou průsečíků nebeského rovníku s ekliptikou, a to v tom, ve kterém se nachází Slunce v okamžiku jarní rovnodennosti (druhým bodem je podzimní bod) a je naším pevným bodem s rektascenzí 0° (podzimní bod má rektascenzi 180°).

Ekvatoriální systém se používá pro určování poloh hvězd ve vědecké obci nejčastěji. Výše popsaný přístup se nazývá systémem 2. druhu. Systém prvního druhu využívá na místo rektascenze hodinový úhel měřený v rovině rovníku od meridiánu, přístup je ale analogický. Dále budeme využívat souřadnice 2. druhu.



Obrázek 3.17: Ekvatoriální systém. Převzato z [35].

- **Ekliptikální systém** je vztažený k ekliptice. Orientace v systému vůči horizontu se mění v průběhu roku a noci, souřadnice samy o sobě jsou (skoro) konstantní. Zavádí se:
 - **Ekliptická délka** jako ekvivalent rektascenze, která je měřena od jarního bodu.
 - **Ekliptická šířka** jako ekvivalent deklinace měřena od ekliptiky.

Ekliptikální systém se na rozdíl od ekvatoriálního hodí pro popis poloh planet. Zde jej zahrnujeme jen pro úplnost. Dále s ním pracovat nebudeme. Podobně nebudeme pracovat ani s galaktickými souřadnicemi, které jsou vztaženy k rovině galaxie, jenž je nakloněna zhruba o 60° vůči ekliptice. Ekliptické a galaktické souřadnice se používají výhradně ve vědecké obci.

Aby to ale nebylo jednoduché i jarní bod se posouvá vinou planetární precese, proto jsou rektascenze a deklinace, resp. ekliptická délka a šířka vztaženy ke konkrétnímu roku. Tomuto tématu se budeme věnovat v 35. hodině.

Na první pohled je vidět, že pozorovací systémy nejsou úplně triviální problematikou a nabízí se tak otázka, jak k tomuto učivu přistoupit. Vizualizace samotných systémů není až tak složitá. Výzvou ale může být jejich aplikace. Na následujících stranách bude rozebrán přístup, který je dle mého soudu nejvhodnější – přístup vztažený ke dvěma z nejnámějších hvězd a k dobře definovaným pozorovacím podmínkám. Výhodou je, že touto cestou vyvodíme i některé obecné závěry.

Na následujících příkladech ukážeme, jak pracovat s ekvatoriálním a obzorníkovým systémem. Příklady spojíme primárně se dvěma hvězdami, Polárkou a Sirem, ve třech situacích navázaných na Brno – o půlnoci předcházející letnímu slunovratu 2021, o podzimní rovnodennosti 2021 a zimním slunovratu 2021.

K hvězdám samotným

- **Polárka**, někdy nazývaná Severka

Rektascenze: 02h 31m 48,7s

Deklinace: +89° 15' 51"

Polárka je pro českého pozorovatele nejnámější cirkumpolární hvězda (viditelná na noční obloze po celý rok a po celou noc), za což vděčí tomu, že leží téměř přesně nad severním pólem. To můžeme vyčíst právě z deklinace. Poloha Polárky v blízkosti protažení zemské osy znamená, že je cirkumpolární hvězdou pro téměř celou severní polokouli. Nebýt toho, šlo by o v zásadě zaměnitelnou hvězdu, resp. trojhvězdu, která je svojí jasností 2 mag (magnituda je v tomto případě jednotka zdánlivé hvězdné velikosti, blíže se definici hvězdné magnitudy budeme věnovat v [48. hodině](#)) až v páté desítce a nachází se zhruba ve vzdálenosti 400 světelných let.

- **Sirius**

Rektascenze: 06h 45m 08,9s

Deklinace: -16° 42' 58"

Sirius je naopak nejjasnější hvězdou noční oblohy (-1,46 mag). Sirius je dvojhvězda se svítivostí 26krát větší než Slunce nacházející se ve vzdálenosti 8,6 světelného roku a je tak třetí nejbližší okem pozorovatelnou hvězdou noční oblohy (po Alfa Centauri A a Alfa Centauri B). Na území České republiky je hvězdou zimní oblohy a můžeme ji vidět od října do dubna zhruba nad jižním obzorem. Z deklinace lze také vyčíst, že Sirius lze vidět teoreticky na noční obloze, kdekoli jižně od 73. rovnoběžky severní šířky, a že pro pozorovatele jižně od 73. rovnoběžky jižní šířky je cirkumpolární (což ale mnoho pozorovatelů neuspokojí neb jižně od 73. rovnoběžky jižní šířky je jen Antarktida a zamrzlý Jižní oceán).

Z uvedeného lze, bez hlubšího porozumění geometrii ekvatoriálního systému, vyvodit důležité obecné závěry:

- Kladnou deklinaci mají hvězdy severní oblohy, zápornou deklinaci mají hvězdy jižní oblohy.
- Čím vyšší je absolutní hodnota deklinace, tím pro větší část povrchu Země je hvězda nebo souhvězdí cirkumpolární, resp. hvězdy s deklinací 90° jsou hypoteticky viditelné celoročně z celé severní polokoule.
- Rektascenze je vodítkem, kde na noční obloze hvězdu hledat, případně v které části noci, resp. které části roku, je ji možné vidět. Obecně rektascenze nemá velký vliv na to, jestli je ji možné z daného místa v průběhu noci vidět.
- Astronomická půlnoc nastává v momentě, kdy se ztotožní meridián s deklinační kružnicí pro 0h, resp. pro 12h.

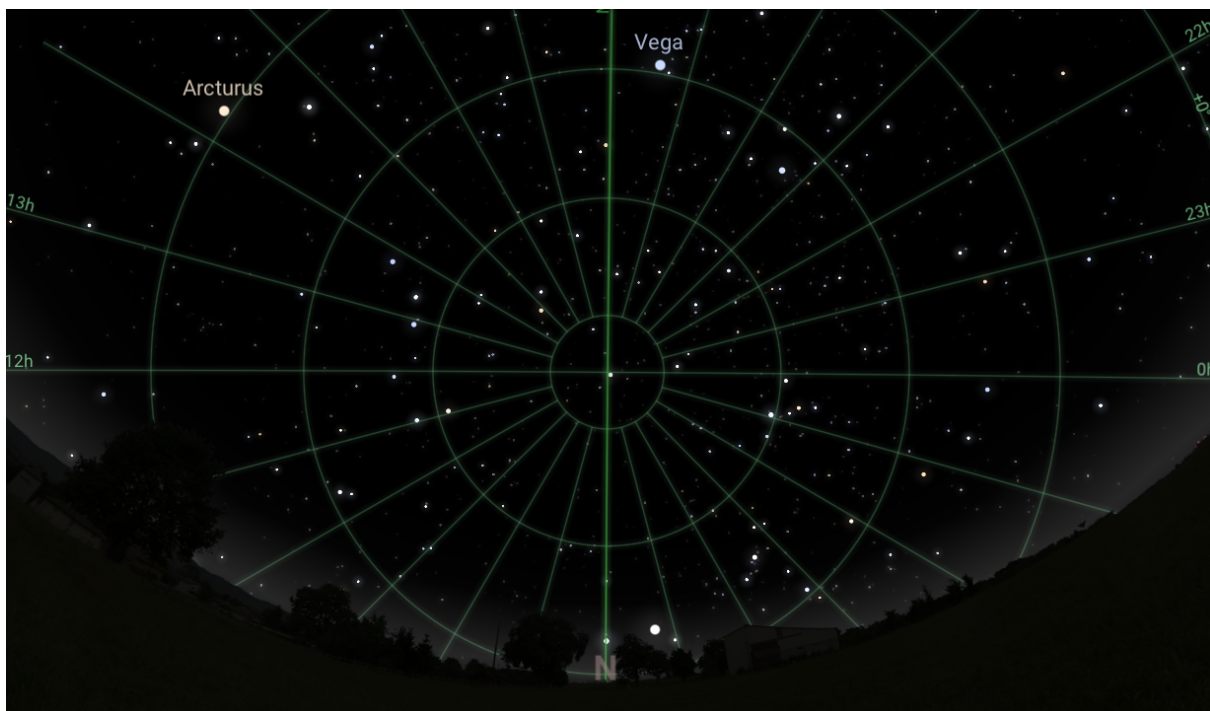
Aplikujeme-li obecné závěry na Českou republiku, resp. na 50. rovnoběžku, dostaneme následující závěry:

- V České republice jsou cirkumpolárními, krom Polárky, například Velký vůz nebo souhvězdí Kassiopeia, obecně pak všechny hvězdy s deklinací vyšší než $+40^\circ$.
- Mimo cirkumpolárních hvězd můžeme na noční obloze vidět hvězdy s deklinací zhruba $\pm 40^\circ$. Čím nižší je deklinace, tím méně můžeme hvězdu na noční obloze pozorovat, protože vidíme menší výseč kruhové dráhy, kterou po obloze opisuje. Jde ale pouze o korelaci.
- Rektascenze určuje, kdy hvězdu vidíme na noční obloze - v jakém intervalu pro jednotlivé dny. Například Antares má rektascenzi 16h 30m 59.8s a deklinaci $-26^\circ 29' 22,3''$. Můžeme jej vidět na noční obloze při letním slunovratu a díky dlouhým zimním nocím můžeme Antares na noční obloze zahlédnout zhruba od konce prosince do půli října. Proti tomu Sirius můžeme pozorovat (jen) od konce srpna do začátku května ač má deklinaci $-16^\circ 42' 58''$.
- Pokud by atmosféra nerozptylovala sluneční světlo, mohli bychom vidět všechny hvězdy s deklinací vyšší než -40° každý den. Reálně takové pozorování může nastat jedině při úplném zatmění Slunce, o tom více ve [45. hodině](#).
- Má-li hvězda deklinaci nižší než přibližně -40° , nemůžeme ji na obloze vidět vůbec, protože je permanentně zastíněna Zemí.

Výše zmíněné budeme ilustrovat na výstupech z webové aplikace Stellarium [\[36\]](#), která může být velice cenným podkladem ve výuce, protože umožňuje vizualizovat noční oblohu, resp. i denní oblohu, kdekoli na Zemi v jakýkoli den a hodinu. Do všech ilustrací je vsazen ekvatoriální souřadný systém, vyznačen meridián a ekliptika.

Příklady

Na Obrázku [3.18](#) je noční obloha severním směrem v noci předcházející letnímu slunovratu v Brně v roce 2021. Polárku můžeme vidět téměř přesně na nebeském pólu. V obzorníkových souřadnicích je azimut zhruba 180° a výška $48^\circ 44'$, což odpovídá zeměpisné šířce Brna.

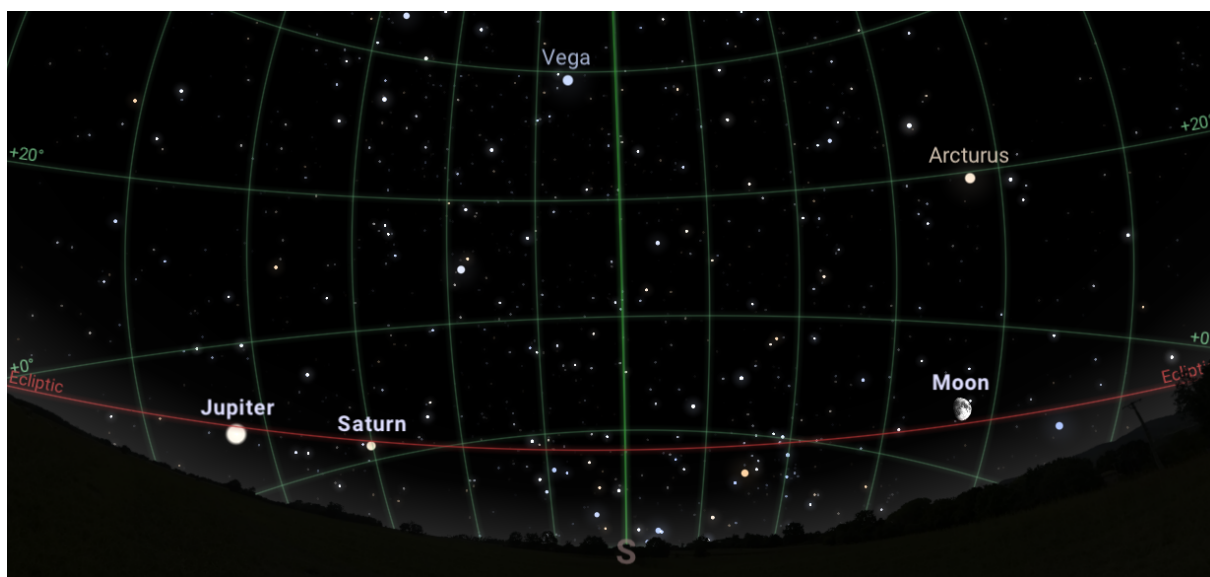


Obrázek 3.18: Noční obloha nad Brnem směrem k severu o půlnoci předcházející letnímu slunovratu v roce 2021.

Soustředné kružnice kolem nebeského pólu odpovídají souřadnicím se stejnou deklinací. V blízkosti kružnice pro 40° můžeme vidět Vega, 5. nejjasnější hvězdu noční oblohy (0,03 mag). V blízkosti kružnice pro 20° pak můžeme vidět Arcturus, což je 3. nejjasnější hvězda noční oblohy

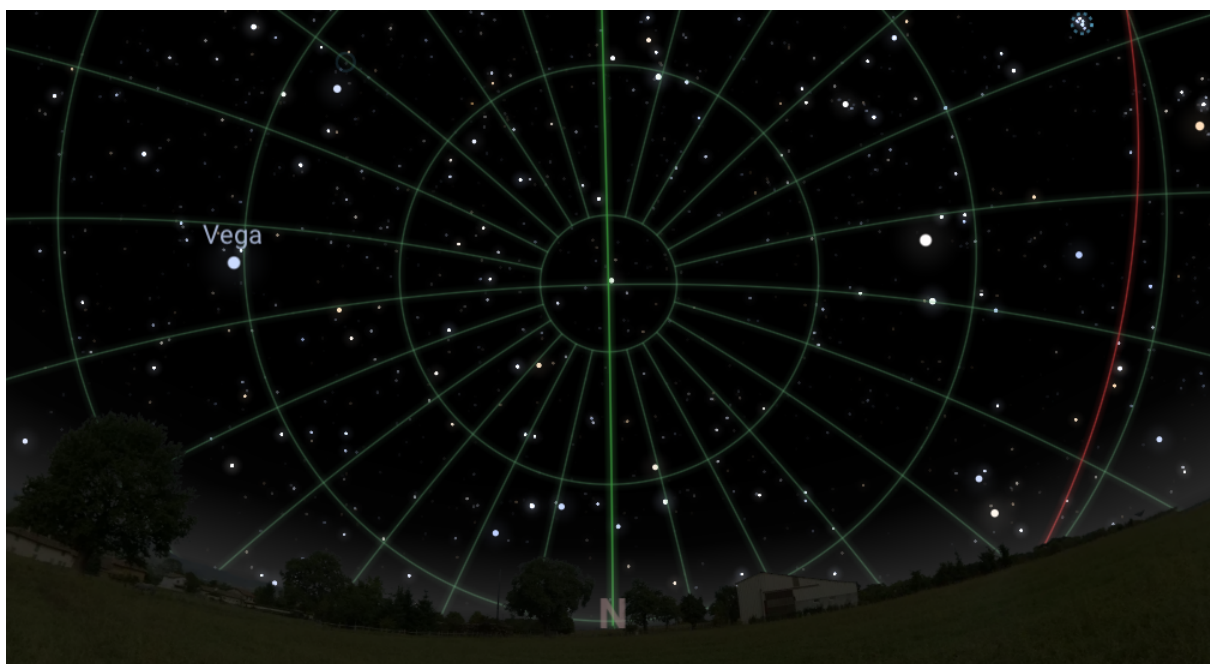
($-0,04$ mag). Ani jedna v České republice není cirkumpolární, protože nejsevernější bod České republiky leží na 51. rovnoběžce. Nicméně stačilo by se posunout například k Baltu a Vega by už cirkumpolární hvězdou byla. Pozorné oko si všimne dvou typických cirkumpolárních souhvězdí. S rektascenzí zhruba $+60^\circ$ a deklinací zhruba $1h$ je to Kassiopeia s charakteristickým tvarem W. Dále pak je to Velký vůz, který není souhvězdím, ale je součástí souhvězdí Velké Medvědice. Velký vůz najdeme zhruba na souřadnicích $+55^\circ$ a $12h$.

Pohled jižním směrem (Obrázek 3.19) ukazuje nebeský rovník (deklinace 0°) a ekliptiku, v jejíž blízkosti je vidět dorůstající Měsíc a Jupiter se Saturnem. Sirius vidět nemůžeme, protože je pod obzorem (konkrétně má Sirius výšku $-56^\circ 15'$). Podél ekliptiky lze také rozlišit zvířetníková souhvězdí. Od východu je to Vodnář, Kozoroh, Střelec, Hadonoš, Štír, Váhy a Panna. Můžeme si také všimnout, že ekliptika je symetrická dle meridiánu. To při půlnočním pozorování nastává jen při slunovratu.



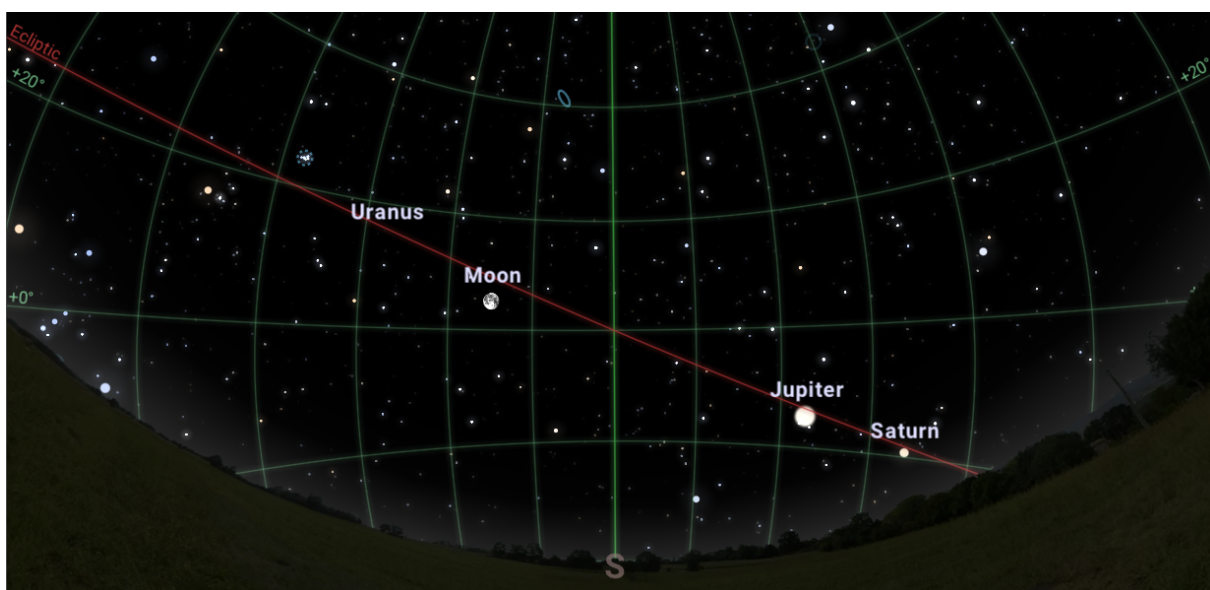
Obrázek 3.19: Noční obloha nad Brnem směrem k jihu o půlnoci předcházející letnímu slunovratu v roce 2021.

Na Obrázku 3.20 je vidět pohled severním směrem v noci, kdy nastala podzimní rovnodennost 2021. Oproti obloze při slunovratu se leccos změnilo – Arcturus zmizel pod obzorem, zatímco Vega se posunula nad západní obzor. Zde můžeme také vidět, že obzorníkové souřadnice Polárky zůstávají (téměř) neměnné.



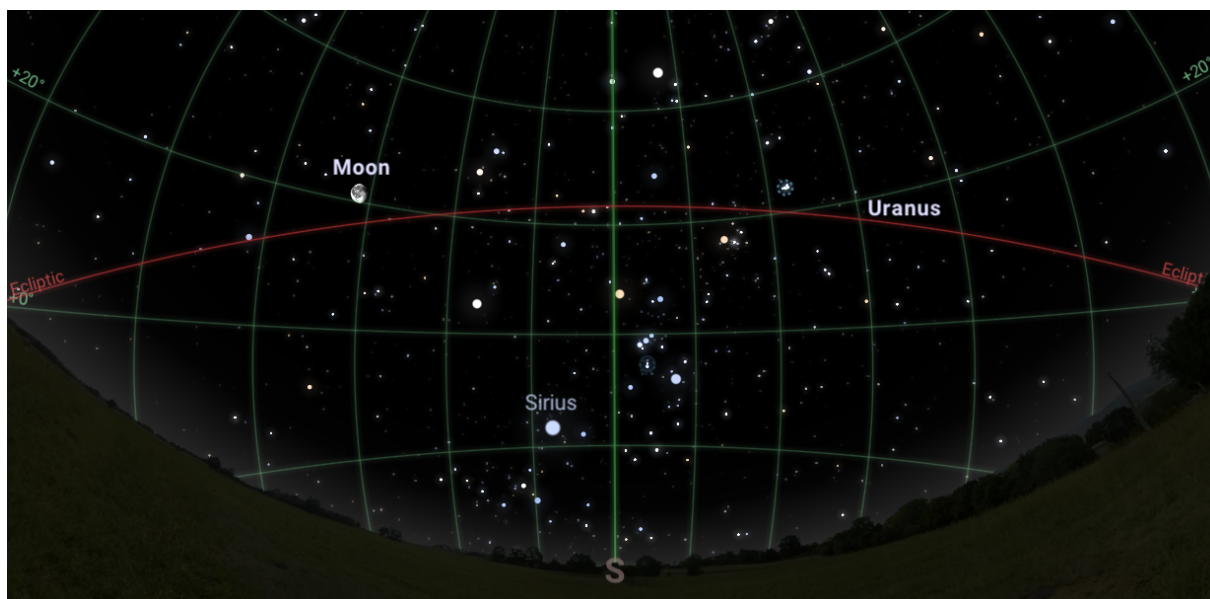
Obrázek 3.20: Noční obloha nad Brnem směrem k severu v noci, kdy nastala podzimní rovnodennost 2021.

Při pohledu jižním směrem, Obrázek 3.21, vidíme průmět ekliptiky, nebeského rovníku a meridiánu, který vyznačuje podzimní bod. Kromě vyznačených planet a zvířetníkových souhvězdí vidíme velkou část souhvězdí Orionu, především trojici výrazných hvězd poblíž nebeského rovníku nad východním obzorem, a dále výrazné hvězdy Betelgeuse (červený veleobr a 9. nejjasnější hvězda noční oblohy, 0,5 mag) nad východním obzorem s deklinací $+7^{\circ}25'$ a Rigel (modrý veleobr a 6. nejjasnější hvězda noční oblohy, 0,12 mag) těsně nad obzorem s deklinací $-8^{\circ}10'$. Navíc jsou na Obrázku 3.21 vyznačeny plejády na $+24^{\circ}10'$ a 3h 50m, známá hvězdokupa, a Galaxie v Andromedě na $+41^{\circ}23'$ a 0h 43m, která je jediným objektem mimo Mléčnou dráhu, který je vidět z České republiky pouhým okem.



Obrázek 3.21: Noční obloha nad Brnem směrem k jihu v noci, kdy nastala podzimní rovnodennost 2021.

Pohled na severní oblohu při zimním slunovratu 2021 zde zmiňovat nebudeme – nenabízí žádné velké překvapení, snad jen to, že Vega opravdu zmizí pod obzorem. Proti tomu pohled na jižní oblohu (Obrázek 3.22) se liší naprosto zásadně. Noční obloze (krom Měsíce) dominuje Sirius se souhvězdím Orionu.



Obrázek 3.22: Noční obloha nad Brnem směrem k jihu v noci, kdy nastal zimní slunovrat 2021.

Průběžně jsme zde zmínili hned pět hvězd z první desítky nejjasnějších hvězd noční oblohy (Sirius, Arcturus, Vega, Rigel, Betelgeuse).

Ze zbývajících pětice bude našinci známa především Alfa Centauri ($-0,27$ mag), která je po Slunci nejbližší okem viditelnou hvězdou noční oblohy. Dále jde o Prokryon ($0,38$ mag), který je součástí souhvězdí Malého psa, a Capellu ze souhvězdí vozky ($0,08$ mag), a dvě hvězdy jižní oblohy (Canopus a Archenar) s deklinací jižnější než -50° , pročež nejsou k vidění na české noční obloze.

Shrnutí

S pozorovacími systémy nelze efektivně pracovat bez názorných příkladů. Tato dvouhodinová je záměrně svým popisem objemnější a poskytuje větší množství informací, než lze v jejím průběhu využít. K hodině lze přistoupit různými cestami – lze se více soustředit na geometrickou povahu problematiky a vizualizaci nebo se zaměřit na dominantní hvězdy a jejich chování v souřadných systémech. K tomu mohou být oporou také atlasy noční oblohy nebo otočná mapa oblohy zmíněná v následující hodině. Žáci by z této dvouhodinové měli získat především základní poznání o tom, jak se na obloze orientovat. To budeme dále rozvíjet v následujících hodinách. K hvězdám samotným se vrátíme až v druhé polovině plánu.

10. Pozorování noční oblohy

Téma: Pohyb hvězd na noční obloze

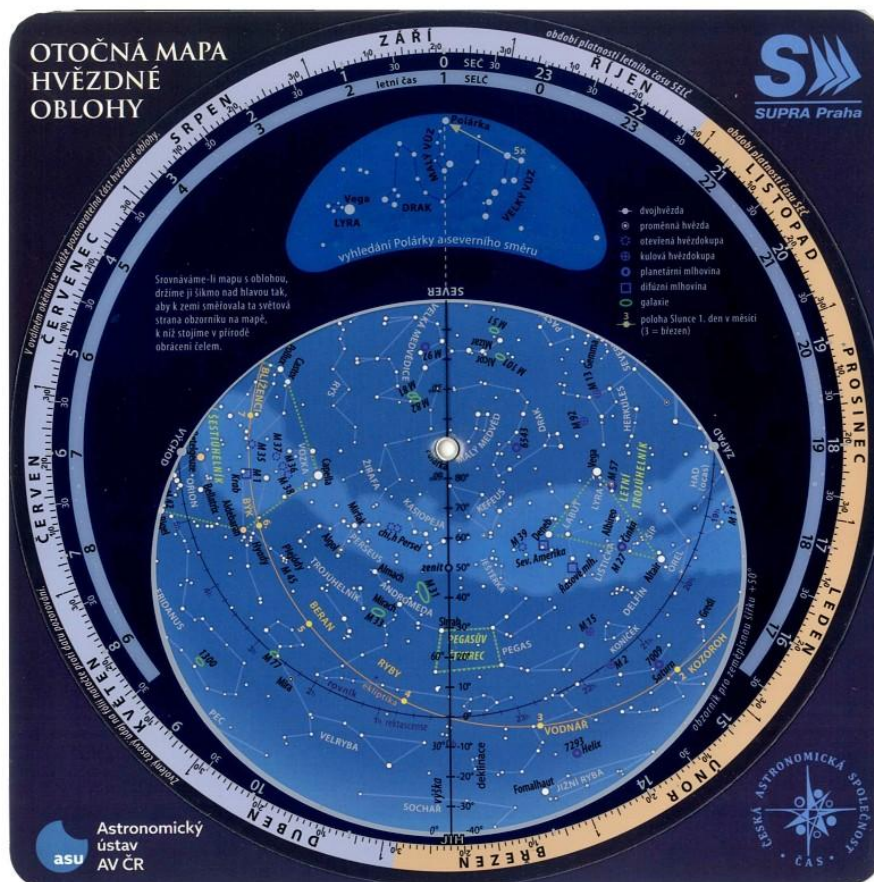
Cíl: Nastínit žákům, jak se mění obloha v průběhu noci a jaké to má důsledky

Přístup k hodině

V předchozím k zorientování na noční obloze posloužily především dominantní hvězdy, popsané v přesně definovaných okamžicích. Nyní bude naším cílem tyto poznatky maximálně zobecnit pro pozorování jak na úrovni jedné noci, tak k pozorování změn v průběhu roku.

Orientace na obloze dle lokality

V prvním přiblížení může být cenným pomocníkem otočná mapa hvězdné oblohy, která ukazuje souhvězdí a dominantní hvězdy pozorovatelné v České republice.

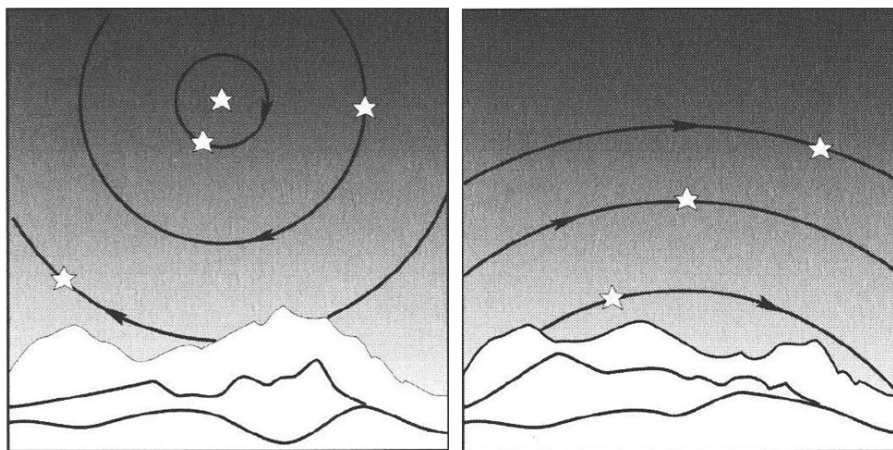


Obrázek 3.23: Otočná mapa hvězdné oblohy pro 50. rovnoběžku

V tomto případě je mapa vztažena k 50. rovnoběžce na severní polokouli a lze na ní demonstrovat mnohé:

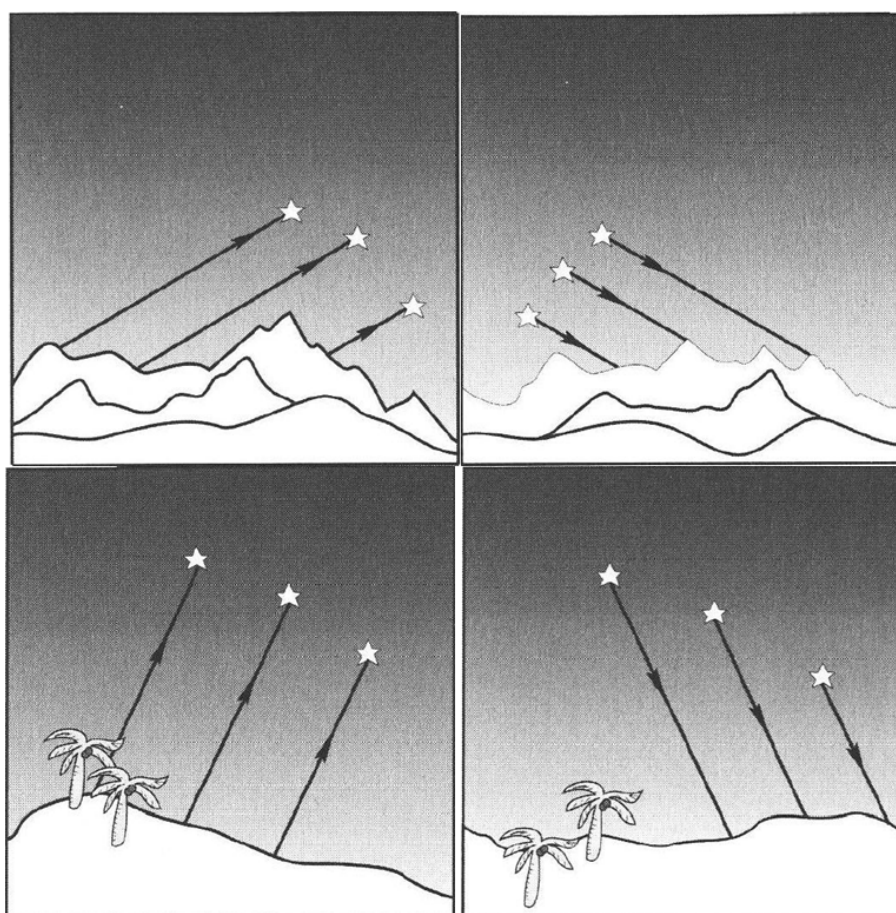
- Cirkumpolární hvězdy a souhvězdí.
- Změnu polohy ekliptiky na hvězdné obloze – na zimní noční obloze je vysoko nad jižním obzorem, zatímco na letní noční obloze je nízko nad obzorem (stojí za povšimnutí, že je to přesně naopak než ve dne, kdy je v létě ekliptika vysoko nad obzorem a zímě nízko nad obzorem).
- Skutečnost, že noční obloha v daný den a danou hodinu odpovídá noční obloze v jiný den a jinou hodinu, například, že noční obloha, kterou vidíme při zimním slunovratu o půlnoci je (téměř) stejnou oblohou, kterou vidíme na konci února v 8 hodin večer a ke konci října ve 4 hodiny ráno.

Důležité poznatky pro pozorování můžeme vidět na schematicky na Obrázku 3.24, kde levá část ukazuje pohyb hvězd nad severním obzorem ve středních šířkách severní polokoule a pravá část ukazuje pohyb hvězd nad jižním obzorem ve středních šířkách severní polokoule. Zatímco nad severním obzorem můžeme v našich končinách očekávat hvězdy, které setrvávají na obloze celou noc, nad jižním obzorem budou hvězdy, které po setmění vyjdou nad obzor a před úsvitem opět zapadnou za obzor.



Obrázek 3.24: Pohyb hvězd v průběhu noci nad severním a jižním obzorem ve středních šířkách. Vlevo nad severním obzorem, vpravo nad jižním obzorem. Převzato z [26].

Na Obrázcích 3.25 můžete vidět schematicky pohyb hvězd nad východním a západním obzorem pro střední šířky na severní polokouli v prvním řádku a pro tropy na druhém řádku.

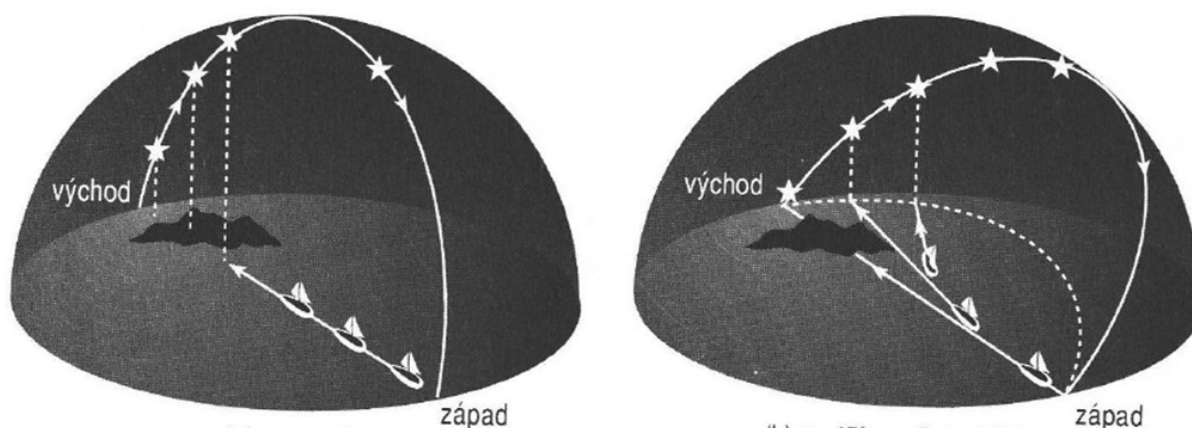


Obrázek 3.25: Vlevo pohyb hvězd nad východním obzorem, vpravo nad západním obzorem. První řádek pro střední šířky, druhý pro tropy. Převzato z [26].

Úhel, který svírají hvězdy pohybující se vzhůru nad východní obzor, resp. pod kterým klesají k západnímu obzoru, je vzhledem k obzorníku doplňkem zeměpisné šířky do 90° . Tedy čím blíže jsme rovníku, tím strměji hvězdy stoupají (naopak v extrémním případě na pólu se jejich výška nemění vůbec).

Co z toho plyne?

Představme si, že jsme námořníci, kteří použijí k navigaci hvězdy. Pokud poplujeme po rovníku, můžeme využít pohybu hvězd s deklinací blízkou nule z hlediska navigace po rovnoběžce. Čím dále ale budeme od rovníku, tím více pro nás tento přístup může být zavádějící. To dobře demonstruje Obrázek 3.26.



Obrázek 3.26: Rozdíl v navigaci podle hvězd na rovníku a ve středních šířkách. Převzato z [26].

Nicméně to neznamená, že nemáme k dispozici spolehlivé metody, jak určit světové strany dle pohybu hvězd. Zde nastíním několik metod používaných k orientaci podle hvězd [37]:

- K nalezení severu na severní polokouli se využívá Polárky, která má (ve 21. století) deklinaci $+89^\circ 15'$.
- Na jižní polokouli můžeme přibližně nalézt jih dvěma cestami – dle orientace Mlhoviny v Orionu nebo podle Jižního kříže.
- Poblíž rovníku lze nalézt východ podle souhvězdí Orionu – první z trojice hvězd v centru souhvězdí, nazývaných pás Orionu, vychází nad východem a zapadá na západě.

Z výše zmíněného plyne, že navigace podle hvězd noční oblohy není úplně triviální disciplína. Na jednu stranu dle hvězd lze poměrně spolehlivě určit, na jaké rovnoběžce se nacházíme a dle zeměpisné délky pak můžeme určit poměrně spolehlivě i datum (nebo naopak), na druhou stranu pro přesnou navigaci je třeba pokročilých znalostí.

Shrnutí

Zatímco předchozí, osmá, hodina měla za cíl osvojit si pozorovací systémy na příkladech svázaných s Brnem, nyní jsme propojili poznatky ve snaze osvojit si obecná pravidla pro pozorování, kdekoli na Zemi. Účinným pomocníkem nám může být opět aplikace Stellarium, kde můžeme popsané principy ihned demonstrovat na pohybu hvězd po obloze.

Doposud jsme se zaměřovali především na kvalitativní přístup. Následující hodina se dotkne kvantitativního přístupu, resp. aplikujeme dosavadní poznatky na řešení příkladů.

11. Aplikace znalostí pozorovacích systémů

Téma: Procvičování práce s pozorovacími systémy

Cíl: Naučit žáky řešit příklady na pozorovací systémy a aplikovat znalosti v praxi

Přístup k hodině

Na úrovni této hodiny nastíníme, jakým způsobem lze přistoupit k příkladům z astronomie. Zda je vhodné zařazovat do plánu separátní hodinu na výpočty, nebo příklady z astronomie prokládat jednotlivé hodiny je ke zvážení. Důležité je, aby výuka astronomie v příkladech byla maximálně interaktivní a příklady názorné.

Příklady na pozorovací systémy

Nedoporučoval bych zabředávat do sférické geometrie a jich aplikací při různých volbách počátku. Vysokoškoláka může nadchnout, do jaké míry se sférická astronomie liší od té klasické (součty vnitřních úhlů trojúhelníku nebo sinová a kosinová věta), žáka střední školy ale tato specifiky mohou dokonale zmást. Z podobných důvodů bych se vyhnul i příkladům na transformace souřadnic.

I bez toho se příkladů k procvičení nabízí celá řada a příklady samotné mohou být snadno modifikovány. Zařadit můžeme například následující příklady:

- V jaké výšce vrcholí Slunce v Brně při rovnodennosti, zimním slunovratu a letním slunovratu? [$49^\circ 12'$, resp. $49^\circ 12' \pm 23,5^\circ$]
- Na které zeměpisné šířky bychom se museli přesunout, abychom na noční obloze viděli Alfa Centauri (deklinace $-60^\circ 50'$) a ve který den bychom ji viděli nejdéle na noční obloze? [vidět bude jižně do $29^\circ 50'$ severní šířky při zimním slunovratu, jižněji než $30^\circ 10'$ jižní šířky bude cirkumpolární]
- Zhruba ve kterých zeměpisných šířkách mohou v průběhu noci procházet planety a Měsíc zenitem? [mezi obratníky, přičemž zenitem mohou procházet i severně od obratníku raka a jižně od obratníku kozoroha, protože planety a Měsíc se nenacházejí přímo na ekliptice]
- Určete zeměpisnou šířku pozorovatele, pozoruje-li Arcuturus s deklinací $+19^\circ 26'$ kulminující ve výšce $59^\circ 21'$ [$50^\circ 5'$ severní šířky, což odpovídá Praze, Krakovu, ostrovu Sachalin nebo Vancouverskému ostrovu – jde o doplněk do 90° z výrazu výška minus deklinace]
- Na kterých zeměpisných šířkách můžeme pozorovat Altair, který má deklinaci $+8^\circ 44'$? [všude mimo poloh jižně od $81^\circ 16'$ jižní šířky]
- Na kterých zeměpisných šířkách můžeme pozorovat hvězdu s deklinací 0° ? [teoreticky na všech, ale cirkumpolární hvězdou bude teoreticky jen na pólech]

Zmíněné příklady jsou řešitelné na několik kroků. Nedoporučoval bych se pouštět do složitějších, resp. hůře uchopitelných příkladů, například takových, kdy by žáci řešili, jaká je poloha hvězdy v definovaný čas. Pakliže by po nich chtěl učitel sáhnout, podobných a ještě složitějších příkladů je plno, například v knize Základy astronomie v příkladech [38], která ale neobsahuje postup řešení. Podobně nelze očekávat, že by žáci dokázali počítat pohyby hvězd v průběhu noci. Nicméně stojí za to využít například aplikace Stellarium a ukázat žákům, jak se mění obzorníkové souřadnice hvězd v průběhu noci a v průběhu roku.

Shrnutí

Tato hodina na rozdíl od předchozích není výkladová. Klade si za cíl, aby si žáci zažili i výpočtovou stranu astronomie, byť na úrovni jednoduchých příkladů, které jim ale otevřou nový pohled na problematiku.

Mimo to, s koncem 11. hodiny končí i jeden z tematických celků. Nabízí se proto možnost žáky otestovat. Pokud vyučující zvolí formu písemného testu, může zahrnovat následující otázky nebo jednoduché příklady:

- Jak byste ze Země prokázali, že je kulatá?
- Jak dlouhý je den na severním polárním kruhu v den letního slunovratu?
- Jak vysoko nad obzorem je Slunce v Brně při zimním slunovratu?
- Co je to ekliptika?

12. a 13. Historický vývoj vnímání vesmíru I.

Téma: Cesta od geocentrického k heliocentrickému modelu

Cíl: Ukázat žákům, jak se vyvíjelo vnímání světa

Přístup k hodině

Historie fyziky, nebo obecně přírodních věd, je ve středním školství dosti opomíjena, což už bylo reflektováno v 2. kapitole. Vezmeme-li v potaz, že se historií fyziky nezabývá na obecné úrovni Přehled středoškolské fyziky od Emanuela Svobody [39] ani na konkrétnější úrovni Fyzika pro gymnázia - Astrofyzika od nakladatelství Prometheus [40], tedy dvě z nejpoužívanějších učebnic fyziky na středních školách, nepřekvapí, že se tématu nedostává pozornosti.

Přítom k pochopení takřka jakékoli vědní disciplíny je žádoucí sledovat její vývoj. Konkrétně v případě fyziky, resp. astronomie, je k tomuto účelu k dispozici celá řada vysoce kvalitních zdrojů od publikací zaměřených spíše na vědeckou obec [41] nebo v podobě populárně naučné literatury [19], po celou řadu popularizačních přednášek (od prof. Jiřího Podolského, prof. Pavla Krtouše, prof. Petr Kulhánka, Dr. Jiřího Grygara a dalších) a edukační videa na youtube [42].

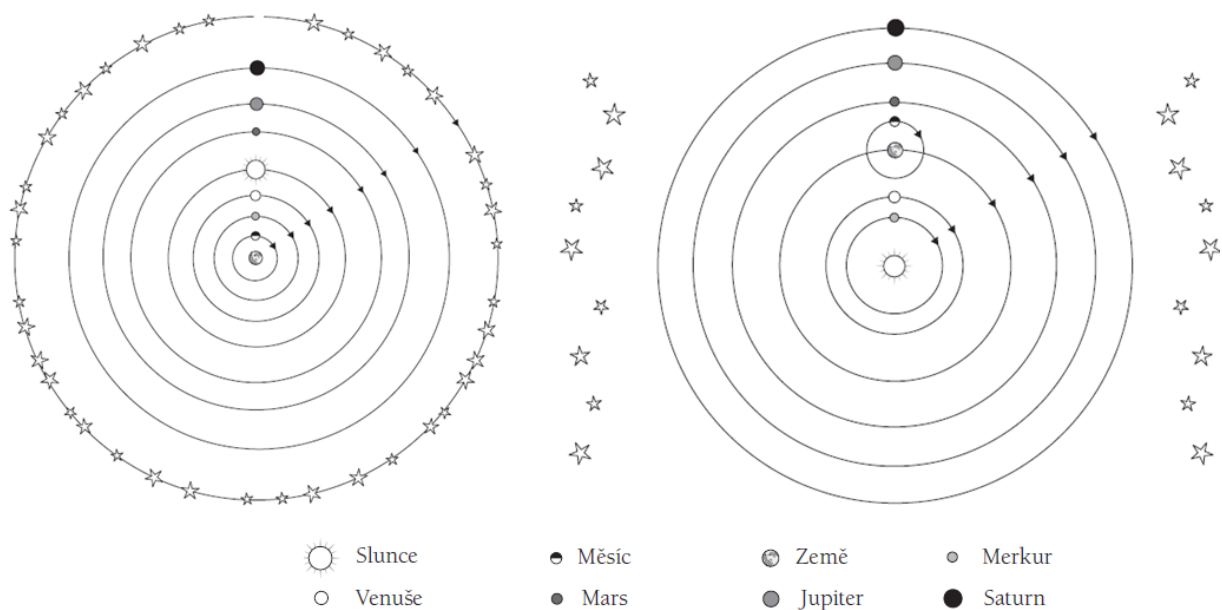
Historie astronomie, které budeme věnovat následující dvě dvouhodinovky, je téma objemné. Cílem bude především nastínit souvislosti, které nejsou mnohdy až tak intuitivní a pomohou lepšímu pochopení historického vývoje vnímání vesmíru. Prvním dílčím tématem je souboj geocentrického modelu s heliocentrickým.

Geocentrický model

Ve 2. hodině jsme zmínili experimenty, myšlenkové i reálné, kterými starověcí myslitelé dokázali, že Země je kulatá. Lidé odjakživa měli tendence všechno dění vztahovat k sobě jako ke vztažené soustavě nebo alespoň k něčemu dobře známému. To se projevuje ve všech aspektech vědeckého, potažmo lidského, života. Starověký člověk při pohledu k obloze viděl, že je vše v pohybu, že hvězdy se pohybují méně, zatímco planety a Slunce více. Z toho vytvořil jednoduchý závěr, vše se točí kolem Země, planety a Slunce jsou blíže, zatímco hvězdy jsou dále. Klíčové pro toto vnímání bylo, že pozemšťan žádný pohyb Země necítil, zatímco pohyb hvězd přímo pozoroval.

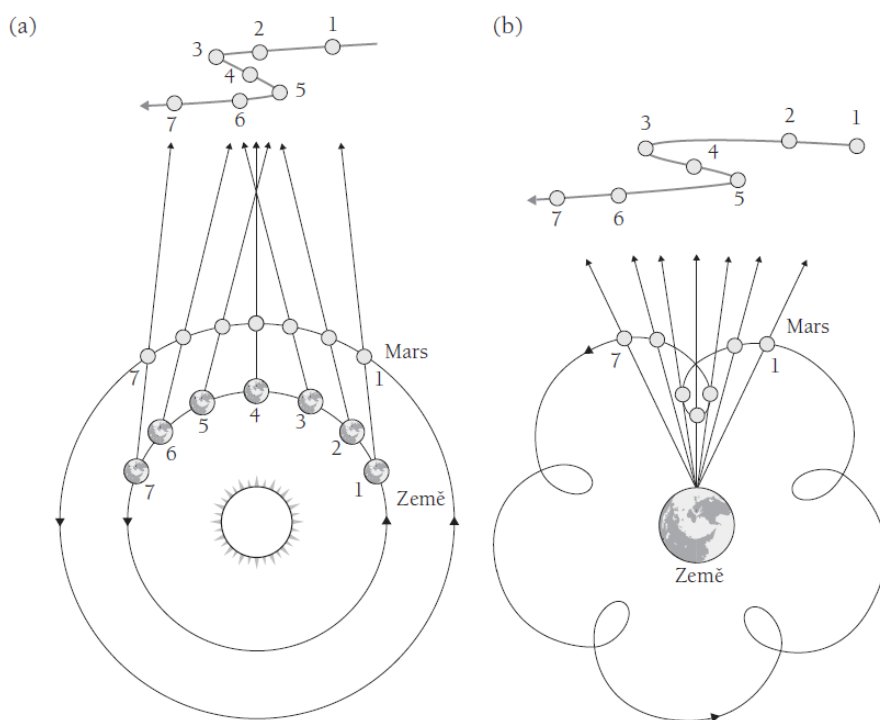
Sami tedy vidíme, že bez bližšího zkoumání byly argumenty pro geocentrický model tvrdé a nemáme-li v ruce měření, která by teorii nabourala, těžko se něco na vnímání vesmíru může změnit. Pro tehdejší vnímání světa se používá termínu Aristotelovská fyzika nebo Aristotelovský model. Je důležité si uvědomit, že Aristotelovská fyzika nezná pojem gravitace ani síly. Naopak zavádí koncept nebeských sfér, po nichž se pohybují kosmické objekty éterem po dokonalých kružnicích (viz Obrázek 3.27).

Nabízí se otázka: Co vyvolává pohyb těles? Aristotelovská fyzika zavádí koncept hybatele, resp. prvotního hybatele. Z toho už je vidět, že jsme více ve filozofii než ve fyzice. V té době bylo vnímání světa do značné míry věcí estetiky a vývoji vědy nepomáhal ani fakt, že experiment se v té době považoval za cosi podřadného [43]. Toto téma má velký přesah do společenských věd, hlavně do filozofie, proto se jím nebudeme detailněji zabývat.



Obrázek 3.27: Porovnání modelů. (a) Geocentrický model, (b) Heliocentrický model. Převzato z [19].

Geocentrický model měl ale (zprvu) jeden základní nedostatek. Nedokázal vysvětlit retrográdní pohyb planet. Obrázek 3.28 ukazuje retrográdní pohyb Marsu, kdy rozdílná úhlová rychlost Marsu oproti Zemi (důsledek 3. Keplerova zákon, viz 14. hodina) způsobuje, že Mars se na své dráze po noční obloze vrací ve dnech předcházejících a následujících po opozici planet⁴.



Obrázek 3.28: Retrográdních pohyb Marsu. (a) Heliocentrický model, (b) Geocentrický model. Převzato z [19].

Ptolemaios, strůjce geometrického popisu geocentrického modelu, tento problém vyřešil zavedením epicyklů, které se pohybují po deferentu. Systém je to poměrně složitý, ale při správném

⁴Opozice Země a Marsu nastává, je-li Slunce, Země a Mars na jedné přímce, více se tomuto tématu budeme věnovat v 32. hodině.

zadání parametrů dokáže pohyb planet dostatečně přesně popsat⁵. Díky tomu obstál geocentrický model opírající se o skoro až posvátné vzhlížení ke sféram a kružnicím až do pozdního středověku. Zmíněná přednáška prof. Krtouše [43] mj. ukazuje vizualizaci tohoto systému a porovnání s heliocentrickým systémem, který jej později nahradil.

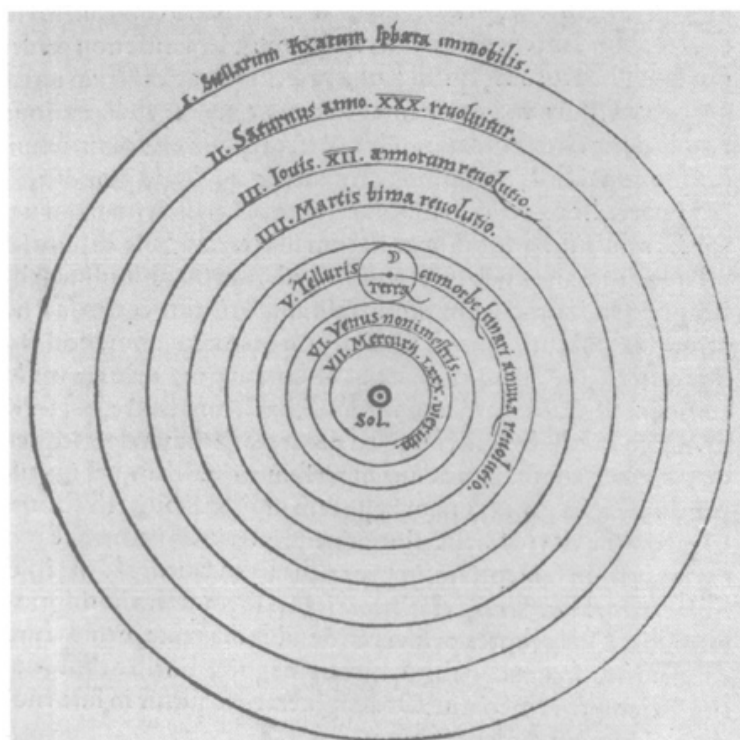
Heliocentrický model

Za autora heliocentrické modelu je považován Mikuláš Koperník (1473 – 1543). Nebyl sice prvním, kdo byl zastáncem tohoto modelu (v Řecku jej zastával Aristarchos zmíněný již ve 2. hodině), Koperník jej ale detailně popsal a opřel o pozorování.

Koperník se opírá o 7 axiomů:

- Nebeská tělesa nemají společné centrum
- Střed Země není centrem vesmíru
- Centrum vesmíru je poblíž Slunce
- Vzdálenost od Země ke Slunci je nepatrná v porovnání se vzdáleností ke hvězdám
- Zdánlivý denní pohyb hvězd je důsledkem otáčení Země kolem vlastní osy
- Zdánlivý roční chod Slunce je důsledkem oběhu Země kolem něj. Všechny planety obíhají kolem Slunce
- Zdánlivý retrográdní pohyb některých planet je pouhým důsledkem našeho postavení pozorovatele na pohybující se Zemi

Koperníkova teorie je zformulována v díle De Revolutionibus Orbium Coelestium, česky O obězích nebeských sfér, kde mimo jiné popsal precesi zemské osy (viz 35. hodina). Na Obrázku 3.29 je diagram z knihy popisující Koperníkův pohled na vesmír.



Obrázek 3.29: Koperníkova představa o heliocentrickém systému publikovaná v knize De Revolutionibus Orbium Coelestium. Převzato z [19].

Koperník svým modelem do značné míry předběhl dobu. Opuštění geocentrického modelu bylo dost radikální ideou a on sám neměl k dispozici důkazy, kterými by geocentrický model vyvrátil.

⁵Reálně byl ptolemaiovský systém ještě složitější, protože vyžadoval dodefinování excentru a ekvantu.

Navíc, ač byl heliocentrický model jednoduchý, existoval proti němu (v té době) velmi tvrdý a validní argument: Pohybuje-li se Země kolem Slunce, proč nepozorujeme změnu polohy hvězd v důsledku tohoto pohybu? Tuto otázku lze žákům předložit k zamyšlení. Odpovědí je, že rozdíl polohy, nazývaný paralaxa, astronomové na počátku novověku nemohli pozorovat, protože je příliš malý, což je způsobeno ohromnou vzdáleností hvězd (vzdálenost Slunce je 8 světelných minut, zatímco vzdálenost nejbližší další hvězda Proxima Centauri je vzdálena zhruba 4,2 světelného roku). Paralaxe se budeme blíže věnovat v [47. hodině](#).

Dále je důležité zmínit, že Kopernikovská revoluce nebyla revolucí v pravém slova smyslu. Jeho texty se ve své době dostaly k minimu učenců, což bylo způsobeno i tím, že je sepsal „bezzvýznamný kanovník pracující na periferii Evropy“ [19]. A tak zatímco Koperníkovo následovník Galileo Galilei (1564 – 1642) za své teze čelil perzekuci církve, Koperníkovo dílo bylo téměř zapomenuto. Důležité ale je, že kniha *O obězích nebeských sfér* se později dostala k Johannesovi Keplerovi (1571 – 1630), který kolem Koperníkova modelu vybudoval svoji teorii.

Dříve, než se dostaneme ke Galileovi a Keplerovi, hodí se zmínit ještě jedno jméno: Tycho Brahe (1546 – 1601). Jeho život by vydal na působivé vyprávění, neb vedl hédonický život na Uranienborgu – nejbohatší vědecké instituci historie, která stála 5 % tehdejšího dánského HDP. Nešlo ale jen o vědu, žáky nepochybně zaujmou i nevědecké aspekty Tychonova života – Tycho pořádal večírky, kterými byl slavný po celé Evropě, o zábavu se staral trpaslík Jeppe, který byl jasnovidcem, Tycho sám choval jako domácího mazlíčka losa, který později uhynul poté, co v opilosti spadl ze schodů [19].



Obrázek 3.30: Uranienborg v Atlase Maior z roku 1663. Převzato z [44].

Každopádně Brahe proslul především velice přesnými měřeními. Poslední část jeho vědecké kariéry je spojena s Prahou, kde působil jako císařský astronom na dvoře Rudolfa II. Zde se v roce 1600 spojila jeho cesta s Keplerem, jenž později z velké části na jeho přesných měřeních vybudoval svoji teorii [45]. Brahe na základě svých měření vytvořil poslední geocentrický model, v němž Země obíhal Měsíc a Slunce, a kolem Slunce obíhaly planety. Tento model tak ač stojí na chybných předpokladech, je de facto správný, protože jde o transformaci Koperníkova modelu do vztažné soustavy spojené se Zemí.

Shrnutí

Žáci by si měli z této hodiny odnést především poznání, jak se vnímání světa vyvíjelo a proč tomu tak bylo. Nemá jít jen o technický popis jednotlivých modelů, je třeba dbát i na argumentační obhajobu a nastínit žákům, jak tehdejší učenci uvažovali a z jakých důvodů se mýlili. Ponaučením je zde především to, že lpění na dogmatických, resp. nevědeckých, tezích, může být zásadní brzdou pro vědecké poznání.

14. a 15. Historický vývoj vnímání vesmíru II.

Téma: Těžká cesta heliocentrického modelu ke všeobecnému přijetí

Cíl: Vysvětlit žákům, jak se podařilo prosadit heliocentrický model a jak se dále rozvíjel

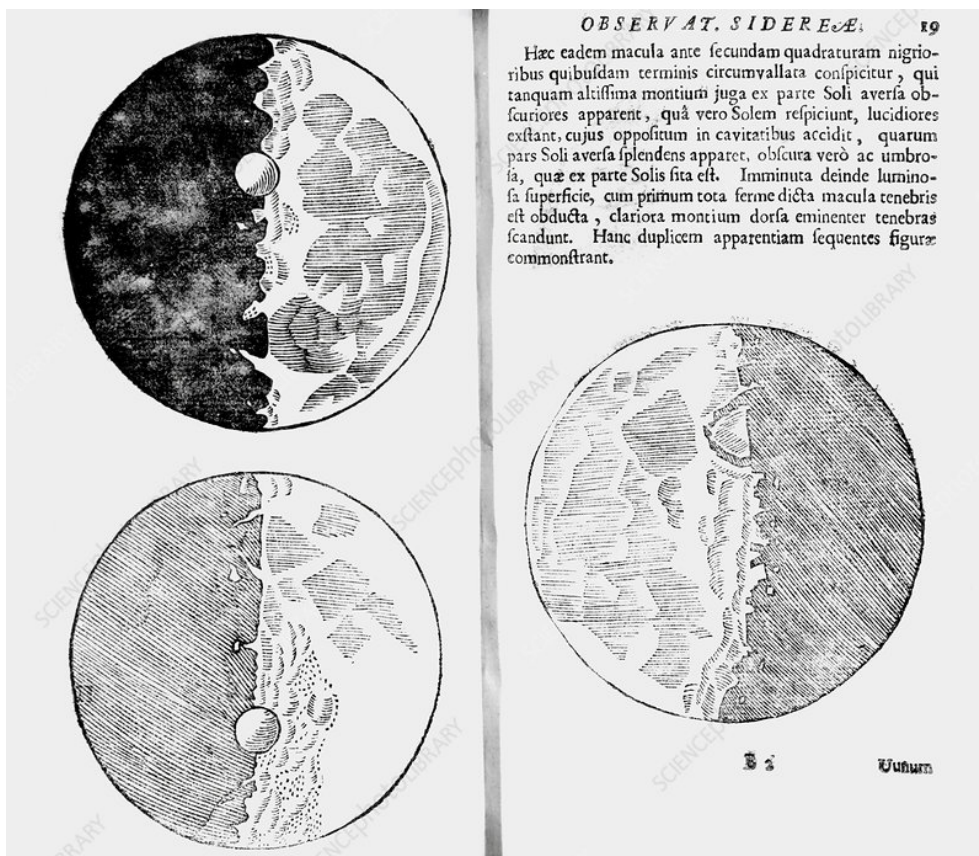
Přístup k hodině

Po popisu vývoje vnímání světa se zaměříme v další dvouhodinovce na experimentální obhajobu heliocentrického modelu, která je mimoděk i produktem zrození vědecké metody jako takové.

Od Galilea ke Keplerovi

17. století je obdobím počínající Vědecké revoluce [46]. Pro nás bude klíčový především Galileo Galilei a Johannes Kepler. Galileo Galilei bývá označován za otce vědy, pro jeho velký přínos napříč obory (cenným podkladem může být článek Galileův život v úlohách [47], který se na Galileův odkaz dívá v širším pojetí nebo Galileo project [48], který se zabývá více Galileem jako člověkem). Zde je potřeba vyzdvihnout především Galileův přístup v obecné rovině, který se opíral o experimenty a pozorování a de facto znamenal zrod vědecké metody jako takové. Jeho empirický přístup ho dovedl k celé řadě závěrů, mezi nimi například k tezi, že všechna tělesa padají k Zemi se stejným zrychlením. Z hlediska astronomického jsou klíčové především jeho objevy, které jsou spojeny s použitím dalekohledu⁶. Byl to Galileo Galilei, kdo zdokonalil dalekohled, namířil jej k nebi a objevil, že:

- Slunce má skvrny.
- Měsíc má složitou morfologii povrchu.
- Jupiter má měsíce dnes nazývané Galileovské měsíce, viz 39. hodina.
- Venuše má fáze podobné těm měsíčním.



Obrázek 3.31: Výstupy z Galileova pozorování Měsíce sepsané v knize Sidereus Nuncius [49].

⁶Dalekohled si nechal patentovat v roce 1608 holandský optik Hans Lippershey.

vány empiricky a jejich platnost teoreticky potvrdil až Isaac Newton (1643 – 1727) na základě gravitačního zákona. Jinými slovy KZ jsou triumfem intuice, což je samo o sobě dělá ještě více fascinujícími.

Jejich znění je:

- 1. KZ – Planety obíhají Slunce po eliptických trajektoriích, v jejichž společném ohnisku je Slunce.
- 2. KZ – Obsah ploch opsaných průvodičem planety za stejný čas jsou stejně velké.
- 3. KZ – Poměr druhých mocnin oběžných dob dvou planet je stejný jako poměr třetích mocnin jejich hlavních poloos.

Bližší ke Keplerovým zákonům

1. KZ má dva důležité důsledky. Implikuje, že geocentrický model, i kdyby byl matematicky správný (Braheho model), není vhodný pro popis pohybu planet. Druhým, zásadnějším důsledkem je, že vzdálenost od hvězdy je proměnná. Vrchol blíže ke Slunci se nazývá přísluní (perihelium), vrchol dále od Slunce se nazývá odsluní (afélium). Konkrétně v případě Země jsou tyto extrémy $\pm 2,5$ milionu kilometru proti střední vzdálenosti, kterou nazýváme astronomická jednotka. To, jak bylo nastíněno v [6. hodině](#), má vliv i na globální klima.

Hlavním důsledkem 2. KZ je proměnlivost rychlosti oběhu planet – planeta se pohybuje nejrychleji v přísluní, nejpomaleji v odsluní. Může se zdát, že 2. KZ není až tak stěžejní, protože rozdíl v rychlosti oběhu Země není až tak velký. Proti tomu například u komet se projeví 2. KZ naprosto zásadně. Ještě výraznějším příkladem, ke kterému se vrátíme v [54. hodině](#), je oběh hvězd kolem galaktického centra. Vizualizace 2. KZ je k vidění na [Obrázku 3.33](#) na příkladu fiktivní planety s extrémní excentricitou.



Obrázek 3.33: Vizualizace 2. Keplerova zákona. Převzato z [\[19\]](#).

Zachování obsahu plochy opsané průvodičem lze vyjádřit i analyticky. Bez infinitezimálního počtu půjde ale ve středoškolském prostředí o těžko uchopitelné vzorce. Mnohem lépe zde může fungovat vizualizace, při níž se lze inspirovat výukovým videem Evropské vesmírné agentury, které popisuje experiment snadno realizovatelný přímo v hodině [\[52\]](#).

3. KZ umožňuje vypočet periody (T_p) oběhu planet nebo hlavní poloosy oběhu planety (A).
3. KZ zní:

$$\frac{T_{p1}^2}{T_{p2}^2} = \frac{A_1^3}{A_2^3} \quad (3.1)$$

Zde se nabízí prostor pro zařazení příkladů na periodu oběhu planet Sluneční soustavy. My se nyní zaměříme na kvalitativní závěry, které z 3. KZ plynou:

- Perioda oběhu se zkracuje se zkracující se vzdálenosti od Slunce. Tedy rok na Merkuru a Venuši je kratší než na Zemi, zatímco na planetách za Zemí je delší.
- Planety mají různé úhlové rychlosti, například Jupiter je 5,2x dále od Slunce než Země, ale jeho rok trvá 11,9x déle než na Zemi, Saturn je 9,5x dále od Slunce než Země, ale rok na Saturnu trvá 29,5 roku pozemského.
- Především vede k tomu, že opozice Země s některou planetou nemusí být až tak běžným jevem. V případě Marsu nastává zhruba jednou za dva roky. Vzácnějším jevem je situace, kdy jsou 3 planety na jedné přímce (nejde nutně o opozici), tak jako tomu bylo v prosinci 2020, kdy na jedné ose se Zemí byl Jupiter a Saturn (jev se nazývá konjunkce a v případě Země, Jupiteru a Saturnu nastává zhruba jednou za 20 let).

Z Newtonova gravitačního zákona, viz [následující hodina](#), lze odvodit zobecněnou formu 3. KZ, do kterého se dosazuje hmotnost objektu, kolem kterého jiný objekt obíhá. Zobecněný vzorec má podobu:

$$\frac{A^3}{T_p^2} = \frac{G(M + m)}{4\pi^2} \approx \frac{GM}{4\pi^2} \quad (3.2)$$

V této podobě lze 3. KZ aplikovat i na jiné systémy než je Sluneční soustava, například na hvězdy obíhající galaktické jádro, na dvojhvězdy nebo na exoplanety. Keplerovy zákony tak, ač byly odvozeny pozorováním objektů Sluneční soustavy, mají všeobecnou platnost.

Shrnutí

Galileo Galilei a Johannes Kepler způsobili převrat v astronomii. Galileo především svým přístupem a důvtipem, díky kterému experimentálně došel k naprosto zásadním objevům, Kepler svoji matematickou intuicí, jenž jej dovedla k nebeským zákonům, které jsou univerzálně aplikovatelné pro veškerá pozorování.

Přínosem předchozích dvou dvouhodinovek je kromě seznámení s cestou ke geocentrickému modelu i zasazení vývoje astronomie do tehdejšího historicko-společenského kontextu, na což mohou navazovat témata z dějepisu. Následující hodiny budou zaměřeny více aplikačně.

16. Newtonův gravitační zákon a jeho souvislost s 3. NPZ a Keplerovými zákony

Téma: Newtonovská fyzika v astronomii

Cíl: Objasnit žákům nebeské zákony řečí Newtonovské fyziky

Přístup k hodině

Dalo by se říct, že není fyziky bez Newtona. Největší vědec své doby byl všestranným géniem, o kterém lze bez nadsázky říct, že ovlivnil fyziku jak nikdo jiný. Nejen že vybudoval klasickou mechaniku, zásadním způsobem přispěl i k obrovskému posunu matematiky, aplikované optiky a mimo to byl alchymistou, poslancem nebo dozorcem královské mincovny. To vše v době, kdy Anglii sužoval mor.

Nebudeme zde ale detailně rozebírat život Newtona, ani jeho konflikty s Leibnitzem a Huygensem. Newtonovým pohybovým zákonům (NPZ) se ale vyhnout úplně nemůžeme, byť je to spíše disciplína klasické fyziky než astronomie.

Newtonovy pohybové zákony

1. NPZ a 2. NPZ lze shrnout následujícím způsobem: Nepůsobí-li na těleso žádná síla, těleso se pohybuje rovnoměrně přímočaře. Působí-li na těleso síla, tato síla způsobuje zrychlení, které vede ke změně vektoru rychlosti (mění se jeho velikost, směr, případně obojí).

Jaké jsou klíčové důsledky pro astronomii:

- Aby bylo těleso v pohybu, nepotřebuje hybatele. To je de facto parafráze 1. NPZ. Důležité je, že toto tvrzení je v naprosto zásadním rozporu s Aristotelovskou fyzikou, z níž se ve středověku vyvinula tzv. teorie impetu [43], která tvrdila, že aby se těleso pohybovalo, musí k tomu neustále dostávat impulsy.
- Zrychleným pohybem je i každý pohyb, který není přímočarý. Tedy na jednu stranu, aby byl pohyb křivočarý, musí existovat vnější síla, která jej vyvolá, což je docela intuitivní, na druhou stranu takový pohyb může být rovnoměrný, což už tak intuitivní pro žáky není.

A pak je tu 3. NPZ o vzájemném působení sil, který je pro astronomii vidět nejvíce. Jeho znění je: vzájemná působení dvou těles jsou vždy stejně velká a míří na opačné strany. Z vlastní zkušenosti vím, že pro žáky není snadné toto tvrzení správně uchopit. Nabízí se vcelku prosté příklady, například že ve stoje svými podrážkami působíme na Zemi a ona stejnou silou působí na nás, proto zůstáváme na místě vzhledem k vztažné soustavě spojené se Zemí.

K 3. NPZ lze v astronomii přistoupit různými způsoby. My se opřeme především o kvalitativní přístup. Ještě předtím je ale potřeba popsat Newtonův gravitační zákon.

Newtonův gravitační zákon

S Newtonovým gravitačním zákonem sice kvantitativně budeme pracovat až později, nicméně hovoříme-li o gravitaci (jev, resp. interakce), hodí se už nyní zmínit, že gravitaci vyvolává gravitační síla, jejíž velikost je popsána vztahem:

$$F_G = G \frac{Mm}{R^2} \quad (3.3)$$

Newtonův gravitační zákon říká, že gravitační síla je úměrná konstantě ($6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$) vynásobené součinem hmotností těles a vydělené jejich kvadrátem vzdálenosti⁷.

⁷Síla sama o sobě je vektorovou veličinou o třech složkách, vztah 3.19 proto sám o sobě nestačí pro výpočty nebeské mechaniky.

Nabízí se otázka. Proč součin hmotností a proč kvadrát ve jmenovateli? Součin hmotností lze vysvětlit tím, že je třeba, aby gravitační síla poměrově klesala dle hmotnosti objektů, zatímco kvadrát vzdálenosti je pak projevem vlastností prostoru jako takového, podobně jako klesá se vzdáleností intenzita osvětlení (jednotka lux) nebo hlasitost (jednotka decibel). Pokud by přesto nebyla gravitační síla úměrná kvadrátu vzdálenosti, řešení rovnic by nevedlo na uzavřené trajektorie [53]. Nedoporučuji se do těchto diskuzí v této fázi hluboce ponořovat, protože na střední škole může být velkou výzvou tyto poznatky uchopitelně předat. Důležité je pro žáky pochopení, co je to gravitace v Newtonovském pojetí – že gravitace je přitažlivé působení mezi dvěma objekty, a že jde o působení, které je úměrné gravitační konstantě, jenž je velice malá, na druhou stranu, že jde o silové působení s neomezeným dosahem.

Zpět ke kvalitativnímu přístupu k 3. NPZ v astronomii. Mějme systém Země-Slunce. Gravitační síla od Slunce způsobuje, že Země obíhá kolem Slunce. Kdyby tu nebylo Slunce, Země by se pohybovala rovnoměrně přímočaře ven ze Sluneční soustavy (1. NPZ), která by neexistovala. Jenže stejnou silou působí i Země na Slunce. Rozdíl je v tom, že hmotnost Slunce je o zhruba 6 řádů vyšší.

Ve skutečnosti tak není tvrzení, že Země obíhá kolem Slunce, přesné. Země i Slunce obíhají kolem společného středu soustavy Slunce-Země, tzv. barycentra (i zde jde ale o určitou míru zjednodušení, protože pro přesné výpočty nelze zanedbat gravitační vliv dalších planet). Protože Slunce je o tolik těžší než Země, střed této soustavy je pod povrchem Slunce a Slunce působí dojmem, že je v klidu. Podobnou úvahu lze použít i na systém Země-Měsíc. Měsíc je zhruba 80x lehčí než Země, přesto je střed soustavy Země-Měsíc pod povrchem Země. U dvojhvězd už může být situace dosti rozdílná a jejich pohyb pak může připomínat tanec kolem společného těžiště, které se pohybuje prostorem.

S využitím gravitačního zákona lze k 3. NPZ přistoupit i kvantitativně, tedy spočítat, jaká je gravitační síla mezi Zemí a Sluncem a jaké dostředivé zrychlení takto síla vyvolává. Tím se dostáváme k dalšímu klíčovému tématu, které je probíráno v povinné fyzice – k dostředivé síle, resp. k dostředivému zrychlení. S využitím vztahu pro dostředivou sílu (na střední škole se obvykle neodvozuje, byť s rozměrovou analýzou to není až tak složité) se otevírá prostor pro celou řadu příkladů, kterým se budeme věnovat v [následující hodině](#).

Na závěr je důležité zmínit propojení Newtonova gravitačního zákona s Keplerovými zákony. Jsou-li do výuky fyziky Keplerovy zákony zahrnuty, obvykle je tomu až po kapitolách o Newtonových zákonech. To může implikovat, že Keplerovy zákony jsou odvozeny z Newtonova gravitačního zákona.

Kepler vydal *Harmonices Mundi*, kde popisuje 3. KZ, v roce 1618, zatímco Newton dokázal, že Keplerovy zákony jsou důsledkem obecnější teorie v roce 1687. Keplerovy zákony lze odvodit z Newtonova gravitačního zákona a v případě 3. KZ pro kruhové dráhy (speciální případ eliptických drah) to není nikterak složitá operace, což můžeme vidět na vztazích 3.4 až 3.8. Stačí dát rovnost mezi dostředivou silou a gravitační silou a po několika krocích dostaneme zobecněný 3. KZ v podobě, ve které je zmíněn v předchozí hodině, kdy je zanedbána hmotnost menšího tělesa.

$$F_G = F_D \quad (3.4)$$

$$G \frac{Mm}{R^2} = \frac{mv^2}{R} \quad (3.5)$$

$$v^2 = G \frac{M}{R} \quad (3.6)$$

$$vT_p = 2\pi R \quad (3.7)$$

$$T_p^2 = \left(\frac{4\pi^2}{GM} \right) R^3 \quad (3.8)$$

Důležité je zde především pochopení synergie přístupů Keplera a Newtona, kdy Kepler vyšel z přesných měření a díky své intuici dospěl k obecně platným nebeským zákonům, které až do Einsteinovy Obecné teorie relativity (viz 56. hodina) nedoznaly změn a pro naprostou většinu případů jsou dodnes postačující. Vedle toho Newton byl excelentní teoretik, který vybudoval od základu celou fyziku – popsal teoretické zákony, které byly v dokonalé shodě s Keplerem.

Shrnutí

Newton je vrcholným představitelem vědecké revoluce. Byl to on, kdo vycházející z empirických poznatků svých předchůdců, položil základní kameny dnešní fyziky. Těžko bychom hledali v historii někoho, kdo tak zásadním způsobem posunul vědu. Newtonova fyzika na úrovni makrosvětla přežila dodneška, byť byla v případě gravitace obecné rovině překonána Einsteinovou teorií relativity. Pro nás je především klíčové propojení známých znalostí Newtonovské mechaniky s novými z astronomie. Tímto na nějakou dobu opouštíme historii fyziky a teoretický přístup k výuce. Nyní se více zaměříme na praktickou rovinu – na výpočty jednoduchých příkladů, dále pak na experimenty a technologie, které vycházejí ze znalostí zákonů fyziky.

17. Newtonův gravitační zákon a Keplerovy zákony v příkladech I.

Téma: Aplikace Newtonových a Keplerových zákonů v příkladech

Cíl: Ukázat žákům, jak Newtonovy a Keplerovy zákony aplikovat na konkrétní úlohy

Přístup k hodině

V následujících dvou hodinách se zaměříme na aplikaci principů a zákonů, které jsme popsali v předchozích hodinách. Nejprve se zaměříme na řadu úloh, které ač mohou znít dosti odlišně, vystačíme si u nich v zásadě se třemi vztahy: gravitační silou, dostředivou silou a 3. KZ. Dlužno dodat, že není cílem nalézt přesná řešení konkrétních úloh – u příkladů budeme vycházet z toho, že pohyby méně hmotných objektů kolem hmotnějších objektů jsou kruhové a že hmotné objekty jsou statické. To sice není úplně přesné, ale pro účely praktické demonstrace nebeských zákonů na střední škole dostačující.

Gravitační a tíhové zrychlení na Zemi a na Mezinárodní vesmírné stanici (ISS)

Předně je třeba tyto dva pojmy odlišit. Gravitační zrychlení nad povrchem Země je dáno hmotností Země a vzdáleností od jejího středu. Toto zrychlení působí na všechny objekty stejně (což je jeden z poznatků Galilea, kterého jsme zmiňovali ve 14. hodině). Kvantitativně vyjadřuje gravitační zrychlení vztah:

$$a_g = G \frac{M}{R^2} \quad (3.9)$$

Dosadíme-li rovníkový poloměr Země, resp. poloměr Země plus výšku orbity ISS, vyjde nám, že na Zemi je gravitační zrychlení $9,83 \text{ ms}^{-2}$, zatímco na ISS je $8,75 \text{ ms}^{-2}$, tedy zhruba o 12 % menší než na Zemi. Tady se mohou žáci znejistět. První hodnota jim není povědomá, druhá jim přijde přímo zarážející, protože mají před očima, jak se kosmonauti vznášejí na ISS.

Tíhové zrychlení je zrychlením volného pádu. Na jeho velikost mají vliv gravitační síly a setrvačné síly. Na Zemi jsou těmito setrvačnými silami především odstředivé síly, které vyvolávají zrychlení:

$$a_d = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R \quad (3.10)$$

kde v je rychlost, R je poloměr rotačního pohybu a ω je úhlová rychlost. Dosadíme-li za rychlost obvodovou rychlost rotace Země odpovídající konkrétní rovnoběžce, můžeme přibližně dopočítat tíhové zrychlení pro jakékoli místo na Zemi (přesné hodnoty snadno spočítat nelze, protože Země není koule a hustota podloží se mění dle lokality i dle počasí). Z předešlého vyplývá, že na pólech je tíhové zrychlení největší (odpovídající gravitačním zrychlení) a na rovníku nejmenší ($9,78 \text{ ms}^{-2}$). Proto obvykle pracujeme se střední hodnotou tíhového zrychlení, která se zaozkrouhluje na $9,81 \text{ ms}^{-2}$. Pro přesné výpočty se využívá hodnota normálního tíhového zrychlení $9,80665 \text{ ms}^{-2}$, která odpovídá 45. rovnoběžce.

Pro středoškolské účely lze říci, že tíhové zrychlení odpovídá tlaku tělesa do podložky. Při volném pádu je tlak do podložky nulový a nastává proto stav beztíže. To je i případ ISS, která je permanentně ve volném pádu. Kdyby ISS stála na 400 km vysoké věži, kosmonauti by stav beztíže nepociťovali.

Obvodová rychlost oběhu planet ve srovnání se Zemí

S fyzikou 17. století vyjdeme z 3. KZ.

$$A_2 = A_1 \sqrt[3]{\frac{T_{p2}^2}{T_{p1}^2}} \quad (3.11)$$

Z výpočtu získáme délku hlavní poloosy (ze znalosti délky planetárního roku a zemského roku) jako poměr vůči astronomické jednotce (tu v 17. století neznáme). Vzhledem k tomu, že délku

hlavní poloosy považujeme za poloměr oběhu, obvodovou rychlost dopočítáme jako součin úhlové rychlosti ($2\pi/T$) a poloměru oběhu. Přesněji řečeno, dopočítáme poměr obvodové rychlosti planety vůči obvodové rychlosti Země.

V 17. století existovaly velice nepřesné odhady toho, jakou hodnotu astronomická jednotka má. Tyto odhady vycházely z geometrického postupu nastíněného ve [2. hodině](#). První přesnější měření bylo až v 19. století na základě pozorování přechodu Venuše přes Slunce, což je samo o sobě velice vzácný jev. Měření spočívalo v pozorování délky přechodu z různých míst na Zemi, přičemž výsledkem bylo proměření paralaxy Slunce [\[54\]](#). Paralaxe se budeme blíže věnovat ve [47. hodině](#).

Hmotnost Země

Tu lze určit celou řadou postupů. Jedním z nich může být například odvození na základě známé vzdálenosti Měsíce a jeho periody oběhu. Postup spočívá v rovnosti gravitační síly s dostředivou silou.

Jak rychle by se musela Země točit, aby byl na rovníku stav beztíže

Úkolem je dopočítat obvodovou rychlost rotace Země kolem vlastní osy, aby setrvačné síly vyvolávaly zrychlení rovné gravitačními zrychlení. Dosazením zjistíme, že obvodová rychlost na rovníku by byla 7,9 km/s, což je zároveň první kosmická rychlost, kterou se budeme zabývat v [následující hodině](#).

Pakliže by se Země otáčela rychlostí 7,9 km/s, den by při zachování tvaru Země trval 84,5 minuty. To je i bez hlubšího studia chybný předpoklad, protože v takovém případě by Země ani vzdáleně nepřipomínala kouli. Taková Země by naši Zemi nepřipomínala v zásadě v ničem. Vyjdeme-li z (patrně mylného) předpokladu, že by Země držela stále pohromadě, tvarem by připomínala silně zploštělý elipsoid. Důsledně vzato by tak předchozí výpočet byl silně nepřesný, do těchto debat bychom se ale s žáky pouštět raději neměli.

Gravitační a tíhové zrychlení na jiných planetách

Se znalostmi velikostí a hmotností jiných kosmických objektů lze kvantifikovat mikrogravitaci a supergravitaci, kterou bychom na nich pocítovali. Tyto příklady lze použít k procvičení, nicméně jde o dokola se opakující přístup. Mnohem příhodnější může být vizualizace. K tomuto účelu se lze opřít například o simulační hru BeamNG.drive, hru, kterou lze zajistit na platformě Steam [\[55\]](#), nebo je možné využít videa z youtube, zaměřená je na vizualizaci vlivu rozdílného gravitačního, resp. tíhové zrychlení [\[56\]](#)[\[57\]](#).

Shrnutí

Na úrovni této hodiny si vystačíme především se vztahy známými už z prvního ročníku z klasické mechaniky, navíc tu máme jen 3. KZ zákon. Příklady zmíněné výše jsou výpočetně jednoduché, navíc je lze parafrázovat na celou řadu dalších úloh. Hodinu lze pojmout jako cvičení k osvojení teorie, nebo se lze zaměřit na některý z typů úloh, důkladněji se jí zabývat a zasazovat ji do širšího kontextu. V následující hodině se zaměříme na aplikační důsledky – na kosmické rychlosti.

18. Newtonův gravitační zákon a Keplerovy zákony v příkladech II.

Téma: Kosmické rychlosti

Cíl: Ukázat žákům, jak Newtonovy a Keplerovy zákony aplikovat na konkrétní úlohy

Přístup k hodině

Kosmické rychlosti jsou žhavým tématem. Žáci o něm mají periferní povědomí a téma je dokáže zaujmout, protože poměrně snadným způsobem se analyticky dopracujeme k hodnotám pro 1. kosmickou rychlost a 2. kosmickou rychlost, které působí v pozemských měřících jako obrovské. Téma kosmických rychlostí, ač je čistě fyzikální, nám vybuduje základ pro pozdější hodiny zaměřené na kosmonautiku.

Kosmické rychlosti

Kosmické rychlosti popisují, jakých rychlostí je třeba dosáhnout, abychom setrvali na oběžných drahách hmotných těles, případně abychom opustili povrch tělesa nebo opustili oběžnou dráhu tělesa z definované orbity.

První Keplerův zákon říká, že planety obíhají po eliptických drahách a ne jinak je tomu u družic. Kruhová dráha a tedy i kruhová rychlost jsou speciálním případem, jinak obecně eliptických drah a rychlostí. Pro obecnost prve nastíníme obecný vztah, který má pro orbitální rychlost podobu:

$$v = \sqrt{GM \left(\frac{2}{R} - \frac{1}{A} \right)} \quad (3.12)$$

Jeho odvození je poměrně pracné a na hranici středoškolské fyziky – využívá zákona zachování energie a 2. KZ [6]. My se zaměříme na konkrétní případy vztahované k Zemi.

1. kosmická rychlost

První kosmická rychlost je kruhovou rychlostí. Jde o minimální rychlost, kterou musí mít těleso, aby se v gravitačním poli udrželo na definované orbitě. Pokud bychom vztáhli první kosmickou rychlost na povrch Země, půjde o rychlost, které bychom museli dosáhnout, pokud bychom chtěli letět nad povrchem Země tak, aby gravitace nezpůsobila náš pád na povrch. Tento popis zní dosti křečovitě, už jen proto, že něco podobného není ani teoreticky možné pro makroskopické objekty větší než několik centimetrů (experimenty s impakty v takto vysokých rychlostech existují [58][59], nicméně mají svoje limity), a může tak vyvolat dojem, že jde o umělou veličinu. Uchopitelnější je tvrzení, že kosmická rychlost je teoretickou minimální rychlostí, kterou je třeba mít, abychom setrvali na definované orbitě, resp. oběžné dráze kolem kosmického tělesa.

Rychlost můžeme vypočítat dvěma různými způsoby, které pěkně demonstrují provázanost Keplerových zákonů s Newtonovým gravitačním zákonem:

- Tím, že do předchozího vzorce dosadíme za hodnotu hlavní poloosy hodnotu poloměru, což odpovídá specifickému typu elipsy, kterým kružnice je. Vztah se tím zjednoduší do podoby

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R}} \quad (3.13)$$

- Rychlost vypočítáme ale i tak, že dáme rovnost mezi dostředivou silou a gravitační silu

$$\frac{mv^2}{R} = G \frac{Mm}{R^2} \quad (3.14)$$

a po několika úpravách dostaneme pro parametry kruhové dráhy stejný vztah jako výše s využitím obecného vzorce.

Za R dosazujeme hodnoty odpovídající dané orbitě. Vyjde nám, že pro povrch Země je rychlost 7,9 km/s, zatímco pro Měsíc obíhající Zemi je rychlost zhruba 1 km/s. Nyní můžeme v návaznosti na příklad z předchozí hodiny snadno dopočítat, že ve výšce 400 km nad povrchem Země, kde se zhruba nachází ISS, jde o rychlost 7,65 km/s, což implikuje, že perioda oběhu ISS je 90 minut.

2. kosmická rychlost

Druhá kosmická rychlost, též nazývaná parabolická rychlost nebo úniková rychlost, je rychlost potřebná k opuštění orbity. Dostaneme ji, dosadíme-li do obecného vztahu za hodnotu A nekonečno, protože parabolu lze chápat jako specifický typ elipsy, konkrétně elipsu s nekonečnou hlavní poloosou.

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \quad (3.15)$$

Ze vztahů vidíme, že mezi 1. kosmickou rychlostí a 2. kosmickou rychlostí je jasně definovaný lineární vztah s koeficientem odmocnina ze 2. Dosadíme-li za hodnotu r poloměr Země, dostáváme rychlost, které je třeba dosáhnout k opuštění povrchu Země, což je 11,18 km/s.

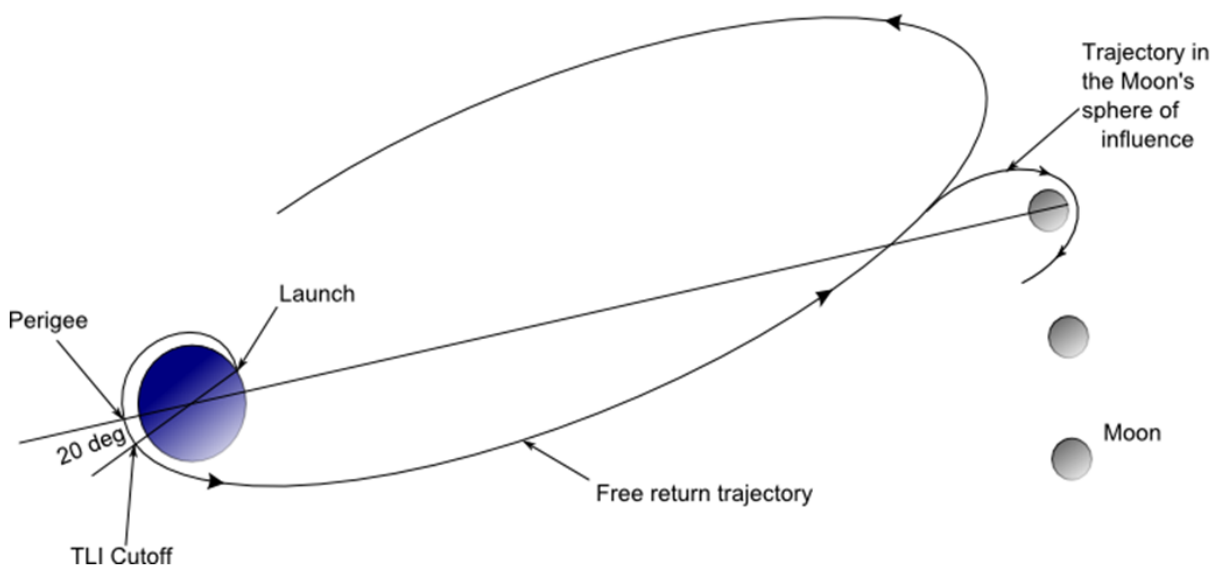
Alternativně lze vztah pro 2. kosmickou rychlost odvodit též ze zákona zachování energie – minimální možnou rychlost pro opuštění gravitačního pole (teoreticky pro dosažení nekonečné vzdálenosti) vypočteme z předpokladu, že po opuštění gravitačního pole bude pohybová energie nulová, jinými slovy, že se všechna vypočtebuje na to, abychom se vymanili z gravitačního potenciálu. To můžeme zapsat v podobě:

$$\frac{mv^2}{2} - G\frac{Mm}{R} = 0 + 0 \quad (3.16)$$

Eliptická rychlost

Oběžná dráha Země je fakticky eliptická, ve všech případech, kdy je uzavřená. Nejvyšší rychlosti se dle 2. KZ dosahuje v perigeu, kdy je družice nejbližší Zemi, přičemž aktuální rychlost družice se pohybuje v rozmezí, které definuje dosažení hodnot $A \pm e$ za parametr R do vztahu 3.13.

Touto cestou lze řešit úlohu o rychlosti potřebné k dosažení Měsíce – dráhu, po které se musí raketa letící na Měsíc vydat, lze brát jako elipsu s velkou excentricitou, viz Obrázek 3.34



Obrázek 3.34: Vizualizace translunární dráhy. Převzato z [60].

Zkusíme v hrubém přiblížení spočítat, nakolik musíme zrychlit, abychom se mohli směrem k Měsíci vydat: Dosadíme-li jako hlavní poloosu 200 000 km a za hodnotu $A - e$ 6 800 km (řekněme,

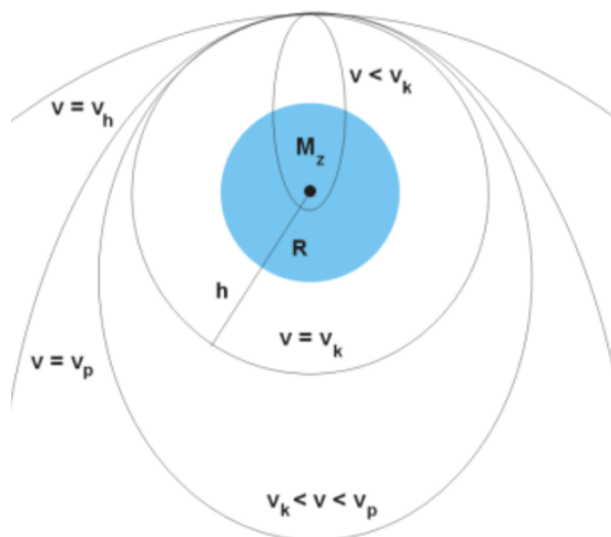
že raketa opouští oběžnou dráhu Země z orbity přibližně 420 km nad povrchem Země), dostaneme, že abychom se z orbity dostali na dráhu směřující k Měsíci, potřebujeme dosáhnout v perigeu rychlosti 10,7 km/s. To není až tak velký rozdíl oproti parabolické rychlosti pro stejnou orbitu, která je 10,79 km/s.

Téma eliptických drah je poměrně pokročilé a to i s ohledem že kuželosečky jsou obvykle až věcí matematiky 3. ročníku. Je ke zvážení, zda se u eliptických drah neomezit jen na kvalitativní popis.

3. kosmická rychlost

Dosáhneme-li rychlosti vyšší než 2. kosmická rychlost, vymanili jsme se z gravitačního působení Země. Výsledkem je eliptická orbita kolem Slunce za oběžnou dráhou Země. Třetí kosmická rychlost je hyperbolickou rychlostí nebo též nadúnikovou rychlostí a jde o rychlost potřebnou k uniknutí z gravitačního působení Slunce.

Třetí kosmickou rychlost nebudeme rozebírat analyticky. Kvalitativně můžeme říct, že se k jejímu dosažení využívá gravitačního praku planet Sluneční soustavy, kdy je sonda s rychlostí menší než hyperbolickou urychlena o rotaci některého z plynných obrů na periferii Sluneční soustavy. K tomuto tématu se vrátíme ve [31. hodině](#).



Obrázek 3.35: Orbitální rychlosti: $v < v_k$ - sestupová rychlost, v_k - kruhová rychlost, $v_k < v < v_p$ - eliptická rychlost v_p - parabolická rychlost (2. kosmická rychlost), v_h - hyperbolická rychlost (3. kosmická rychlost). Převzato z [\[61\]](#).

Obecné důsledky

V této fázi může být snadné se v teorii ztratit, a proto je důležité si uvědomit některé klíčové důsledky a souvislosti:

- Nastíněné výpočty kosmických rychlostí nekalkulují s rotací Země kolem vlastní osy. Na druhou stranu jde o univerzální výpočty, vztáhnutelné na jakýkoli jiný objekt. Záměnou vstupních parametrů tak můžeme propočítat 1. kosmickou rychlost například pro povrch Měsíce (1,68 km/s), Marsu (3,56 km/s) nebo Jupiteru (42,1 km/s), obdobně pro 2. kosmickou rychlost.
- 1. i 2. kosmická rychlost klesá s rostoucí vzdáleností. Dá se říct, že pozemskému Měsíci by stačilo nabrat rychlost zhruba 1,5 km/s, aby po parabolické dráze opustil oběžnou dráhu Země. To ale nevypovídá přímo o tom, jaké rychlosti je třeba dosáhnout, abychom se dostali k němu.

- Z výše uvedeného plyne, že abychom se dostali na vyšší orbitu, potřebujeme nejprve dosáhnout rychlost vyšší než je kruhová rychlost na dané orbitě. Nejde ale jen o to zvýšit rychlost, je třeba akcelarovat i ve správném směru a se správným načasováním tak, aby výsledkem nebylo jen zvětšení excentricity dráhy. Způsobů, jak manévrovat mezi orbitami, je více. Nejsnáze uchopitelnou je Hohmannova trajektorie, jenž spočívá v opsání elipsy, v jejích hlavních vrcholech jsou orbity, mezi kterými se přemísťujeme. Bližší vzhled do problematiky mechaniky kosmického letu nabízí například kniha *Mechanika kosmického letu* od doc. Vladimíra Daňka [62].
- Z jiného soudku: 2. kosmická rychlost není jen únikovou rychlostí. Její hodnota také definuje minimální (teoretickou) hodnotu rychlosti srážky s jiným kosmickým (nebo umělým) objektem, resp. s jeho povrchem. K posouzení potenciálních následků nárazu je kromě rychlosti klíčová velikost objektu, materiálové složení a úhel dopadu. V případě Země tyto parametry zásadně ovlivní, jestli (případně jaká část) shoří v atmosféře.
- 3. kosmická rychlost vztažená k oběžné dráze Země má hodnotu 42,1 km/s, protože oběžná rychlost Země je 29,8 km/s (výpočet není složitý, proto jej lze zařadit). To je dobré si uvědomit s ohledem na sondy (Pioneer, Voyager, New Horizons), o kterých se budeme bavit ve 30. hodině, u nichž nemá smysl udávat jejich rychlost vzhledem k Zemi.

Shrnutí

Kosmické rychlosti jsou atraktivním tématem navíc na první pohled poměrně jednoduše didakticky uchopitelným. Nicméně není až tak snadné k tématu přistoupit způsobem, který bude pro středoškolské žáky srozumitelný, proto se mohou hodit vizualizace vycházející z vyšších ročníků matematiky.

V tuto chvíli je především klíčové, aby žáci získali představu, o jakých rychlostech se v kosmických měřících bavíme, resp. že jde o rychlosti, které jsou řádově vyšší než běžné cestovní rychlosti na Zemi. Nové poznatky hned použijeme v následující hodině, která otevírá téma kosmonautiky.

19. a 20. Praktické důsledky zákonů nebeské mechaniky

Téma: Oběžné dráhy, lokalizace kosmodromů a další konsekvence zákonů nebeské mechaniky

Cíl: Nastínit žákům klíčové aspekty nebeské mechaniky, které mají praktické dopady

Přístup k hodině

Zákony a jevy popsané v předchozích hodinách mají celou řadu praktických a technických důsledků, které ovlivňují jak aplikované vědy, především kosmonautiku, tak i celou řadu procesů na Zemi. V této hodině se zaměříme na některé z aspektů, které ovlivňují kosmonautiku, kterou tímto otevíráme jako větší tematický celek.

Z důvodu informačního rozsahu je téma komponováno jako dvouhodinovka, nicméně celá řada informací obsažených především v druhé polovině tematicky zasahuje též do hodin věnovaných raketám, které po této dvouhodinovce následují.

Důležité orbity

Rovnou se zaměříme na umělé družice Země – systémy, které jsme vyslali na oběžnou dráhu, aby tam plnily vědecké nebo technické zadání. Oběžné dráhy, nebo též orbity, Země dělíme do tří základních kategorií na nízkou orbitu, střední orbitu a geostacionární orbitu (viz Obrázek 3.36):

Nízká orbita Země (LEO, dle Low Earth Orbit) se nachází ve výšce 160 km až 2 000 km nad povrchem Země a je „nejlevnější orbitou“. Družice se zde pohybují velice rychle relativně nízko nad Zemí, proto je LEO vhodná pro snímkování Země s vysokým rozlišením nebo pro komunikační satelity, protože signál nemusí urazit dlouhou vzdálenost. Na LEO najdeme Mezinárodní vesmírnou stanici (o té více ve 28. hodině) i Hubblův vesmírný dalekohled (o něm více především ve 26. a 60. hodině). Velkou výhodou je, že na LEO se mohou družice pohybovat pod hranicí tzv. van Allenových pásů, v nichž je vysoká koncentrace nabitých částic, uvězněných magnetickým polem Země, které jsou nebezpečné pro elektroniku družic. Dlužno ale říct, že LEO je také nejfrekventovanější orbitou, a tak je zde riziko kolize s jinou družicí nebo smetím z předchozích kolizí největší, a také, že takto nízká orbita poskytuje komunikační dosah jen pro omezenou část povrchu Země.

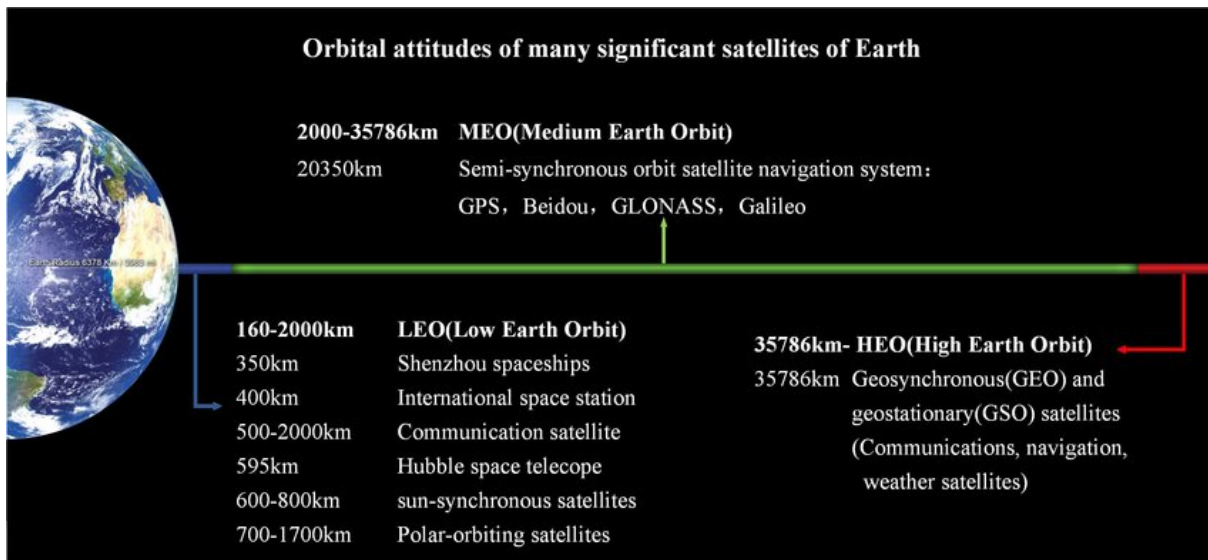
Střední orbita Země (MEO, dle Medium Earth Orbit) se nachází ve výšce 2 000 km až 35 786 km nad povrchem Země. Zde najdeme především navigační družice, kterým na rozdíl od komunikačních satelitů nevádí větší prodleva v detekování signálu. MEO se také používá k vědeckým účelům, například k dlouhodobému mapování klimatických jevů.

Geostacionární orbita Země (GEO) je ve výšce 35 786 km. Perioda oběhu na GEO je jeden den, a tak se družice na GEO nachází pořád nad stejným místem. GEO se hodí pro meteorologické účely, pro sledování klimatických fenoménů nebo pro přenos vysílání. Na druhou stranu GEO je také „nejdražší orbitou“ – k jejímu dosažení je třeba dosáhnout při opouštění atmosféry rychlosti zhruba 9 km/s.

K vizualizaci orbit lze dále využít například anglickou wikipedii, kde je k dispozici animace, která v měřítku ukazuje jednotlivé orbity a pohyb družic po nich [64].

K výše zmíněnému definujeme pojem inklinace, se kterým budeme záhy pracovat a využijeme jej i v pozdějších hodinách. Inklinace vyjadřuje, jak je oběžná rovina skloněna vůči základnímu souřadnému systému. V případě Země vyjadřujeme inklinaci vzhledem k rovníku, v případě Sluneční soustavy vzhledem k ekliptice. Je-li inklinace vůči Zemi nulová, jde o ekvatoriální dráhu, v rozmezí 0° až 90° hovoříme o prográdní dráze, pro úhel 90° jde o polární dráhu a pro úhly větší než 90° o retrográdní dráhu.

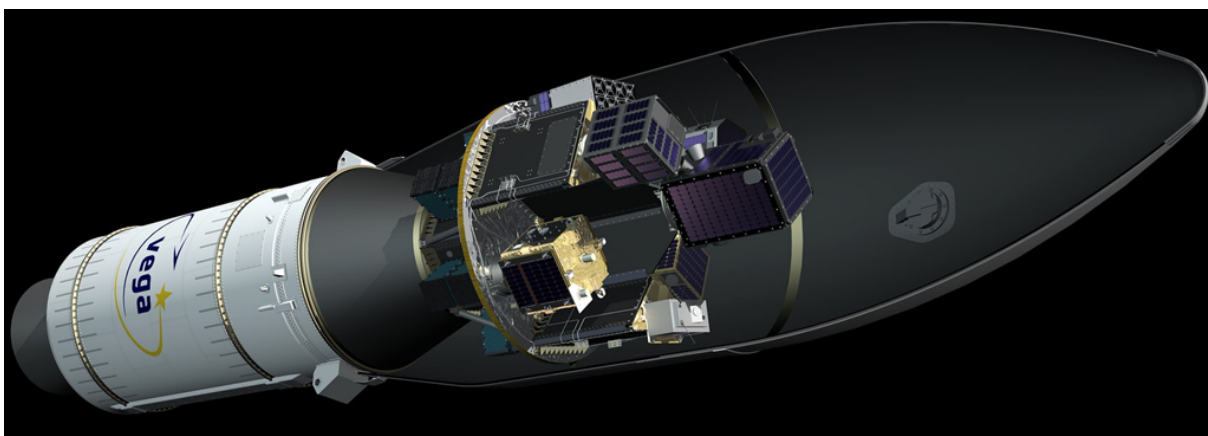
Retrográdní dráhu má heliosynchronní orbita (SSO, dle Sun-synchronous orbit). SSO spadá do kategorie LEO nebo MEO a její předností je, že družice na této orbitě přelétají každý den



Obrázek 3.36: Důležité orbity. Převzato z [63].

nad stejnou lokalitou ve stejnou hodinu. Tyto parametry se hodí především pro průzkumné družice, a to jak vědecké tak špionážní. Specifikem SSO je, že její výška nad povrchem je diskrétně definována podle toho, kolik obletů má družice udělat za den. S rostoucí orbitou roste i inklinace. Výsledkem je, že čím vyšší je SSO, tím nižší zeměpisné šířky lze z orbity mapovat. Odvození těchto parametrů [62] není triviální a je daleko za hranicemi středoškolského učiva.

SSO stojí za zmínku proto, že právě na tento typ orbity v posledních letech míří mnoho misí, především ty, které nesou mikrosatelity a nanosatelity. Mezi nanosatelity se řadí tzv. Cubesat – jde o družice unifikovaných parametrů (100x100x100 mm a 1,33 kg) nebo jejich celočíselných násobků, které díky systému pro vynášení velkého množství družic (dispenseru) mohou být dopravovány na SSO za cenu řádově desítek tisíc euro. To je již cena, která vypouštění družic dělá dosažitelné i pro výzkumné týmy na univerzitách nebo i pro nadšence. Tyto dispensery se vyvíjejí individuálně pro potřeby konkrétních typů raketových nosičů a mohou být modulární pro různé velikosti družic. Dispenser pro evropskou lehkou raketu Vega, k níž se vrátíme ještě ve 22. hodině, se vyvíjel a vyráběl v České republice [65], díky čemuž se v roce 2020 poprvé od vzniku České republiky objevila česká vlajka na raketovém nosiči.



Obrázek 3.37: Dispenser SSMS (Small Spacecraft Mission Service) na vrcholu rakety Vega. Převzato z [65].

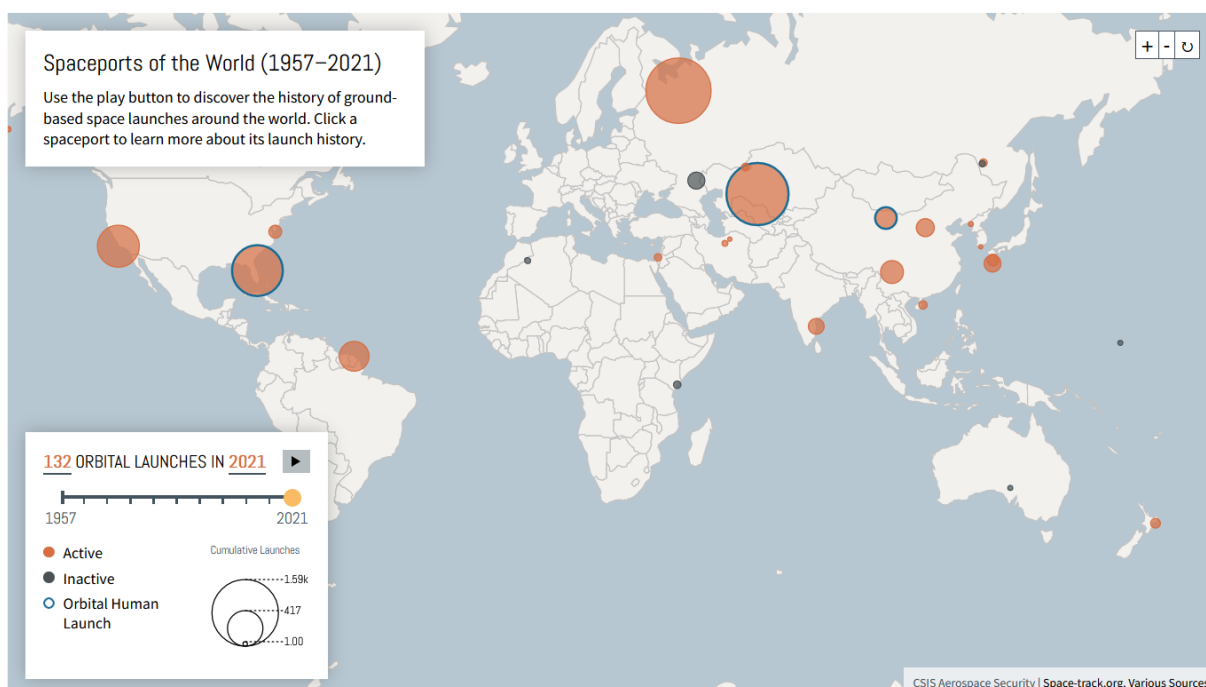
Kosmodromy

V 17. hodině jsme se dotkli tématu nižšího tíhového zrychlení na rovníku. Obvodová rychlost na povrchu Země v blízkosti rovníku je zhruba 460 m/s a klesá se vzdáleností od rovníku. Raketa startující z rovníku má tak tuto rychlost ve směru rotace Země ještě dříve, než se odlepí od povrchu, a aby se dostala na ekvatoriální orbitu nebo orbitu s nízkou inklinací, nepotřebuje vynaložit tolik energie, jako kdyby startovala dále od rovníku.

Jedním z důsledků je to, že kosmodromy se staví co nejblíže rovníku. Poloha vůči rovníku nicméně není jediným zásadním vlivem. Historicky byly zásadním vlivem geopolitické okolnosti, těm se ale prozatím vyhneme. Po technické stránce jsou důležitými aspekty například tektonická stabilita lokality, nadmořská výška, stabilita klimatu nebo dostatečný odstup od obydlených oblastí (především východním směrem).

Zde se otevírá prostor ukázat, kde se kosmodromy nacházejí. Za zmínku stojí minimálně 3 v dnešní době nejvýznamnější:

- Cape Canaveral – Florida, USA
- Bajkonur – Kazachstán
- Kourou – Francouzská Guyana



Obrázek 3.38: Mapa kosmodromů s váhou dle kumulativního počtu startů. V absolutních číslech nejvíce startů proběhlo z kosmodromu Plesetsk zhruba 200 kilometrů jižně Archangelsku (v severní části evropské části Ruska), především na LEO s vysokou inklinací, nicméně odtud nikdy nesharžovala pilotovaná mise. Pilotované mise startovaly z Bajkonuru, Cape Canaveral nebo z kosmodromu Jinqian v Číně. Převzato z [66].

Další souvislosti

Následující hodiny budeme věnovat vesmírné technice. Nyní zde budou zmíněna dílčí témata, která se mohou vynořovat jak u hodiny zaměřené na kosmické rychlosti, tak později v hodinách věnovaných kosmonautice. Tato témata nelze spojitě zařadit ani do předchozích hodin, fyzikálně zaměřených, ani do hodin zaměřených na kosmonautiku.

Žáci mají periferní povědomí o kosmonautice, které ale není (alespoň prozatím) v mezích vzdělávacího plánu více konfrontováno s fyzikálními zákony. Proto může nastat moment, kdy se vynoří

otázka na téma, proč pro cesty do vesmíru budujeme obrovské rakety vysoké desítky metrů, jejichž hmotnost je o několik řádů vyšší než hmotnost jejich nákladu.

Žáci přicházejí s dvěma typy otázek:

- Proč nesedneme do letadla a nestoupáme pořád výš a výš?
- Proč neletíme do vesmíru heliovým balonem tak jako Felix Baumgartner v roce 2012?[67]

Tyto dotazy, ač znějí dost rozdílně, jsou si podobné. Vycházejí z vnímání optikou pozemšťana obklopeného atmosférou. Proudové letadlo letí, protože má vztlak a protože k pohonu využívá proudový motor, který nasává vzduch z okolí a vypouští jej za sebe. Ve vyšších vrstvách atmosféry je vzduch řídký, a proto tu není ani vztlak, ani vzduch k nasátí do proudového motoru.

Přesto: v hrubém přiblížení se může zdát, že raketová věda není až taková věda. Kde je tedy ten zádrhel? Vyjdeme nejprve z limitů proudových letadel. Nejrychlejší proudové letadlo historie Lockheed SR-71 Blackbird dosáhlo maximální rychlosti zhruba 3600 km/h, tedy 1 km/s, a stabilně létalo až ve výšce 26 km nad Zemí. Na příkladu tohoto letounu lze ukázat, že atmosféra je pro vysoké rychlosti dobrý sluha, ale špatný pán. Vyšších letových hladin proudový letoun systematicky využívat nemůže⁸, protože v nich není dostatek vzduchu, který by mu poskytl vztlak a který by nasával do motoru. Na druhou stranu, i ve výšce 26 km způsobuje okolní vzduch v hypersonických rychlostech enormní zahřívání letounu a s tím spojené teplotní dilatace. V neposlední řadě zásadní překážkou je, že odpor vzduchu roste s druhou mocninou rychlosti, což dále zvyšuje nároky na tah potřebný k další akceleraci⁹.

Tak jinak: Co takhle nabrat rychlost v atmosféře a vyletět do kosmu. To je dobrý nápad jen napůl. Samo o sobě dosáhnout kosmu není až tak složité. Už v 60. letech experimentální raketový letoun X-15 dokázal vylétnout do výšky 108 km, přitom svojí koncepcí připomínal spíše letadlo než raketu. X-15 ale po dosažení maximální výšky stáhla gravitace zpět k Zemi, protože už neměl dostatečnou rychlost, aby na orbitě setrval. Obdobným případem jsou i projekty firem Virgin Galactic a Blue Origin, uvedených do komerčního provozu v roce 2021, které otevírají cestu vesmírné turistice [68].

Problémem totiž není ani tak se do kosmu dostat, problémem je v kosmu setrvat a to je možné jen dosažením rychlosti blízké první kosmické rychlosti. A na to všechno potřebujeme obrovské množství energie. O tom v dalších hodinách.

A heliový balón? Ani ten není úplná výhra. Ano, helium může jako lehký plyn uniknout z atmosféry Země, ale ne uzavřené v balónu táhnoucí na lanech náklad. Výškový rekord bezpilotního letu z roku 2002 je výšce 53 km a bylo k němu využito polyethylenového balónu o tloušťce 3,4 mikrometru [69].

⁸Výškový rekord pro proudové letadlo 37,65 km, jde zde ale o dosažení výšky nikoli o stabilní letovou hladinu.

⁹V zásadě jde o podobnou situaci jako u automobilů. Rychlosti 200 km/h dosáhne i vozidlo s výkonem 100 koňských sil, zatímco první produkční vozidlo, které překonalo rychlost 400 km/h, Bugatti Veyron, mělo výkon 1000 koňských sil.

Shrnutí

Zatímco předchozí hodiny mají pevné tematické zakotvení, tato hodina je svým obsahem spíše volnější a může obsáhnout více témat nebo může být zaměřena například jen na orbity. Hodinu lze pojmut formou otevřené diskuze zaměřené primárně na některé z dílčích témat, což může působit motivačně směrem k dalším hodinám zaměřeným na vesmírnou techniku.

Tímto se také otevírá prostor pro otestování žáků. Níže nabízím několik námětů na otázky nebo na jednoduché příklady:

- Jak dokázal Galileo Galilei, že Země obíhá kolem Slunce?
- Jakou rychlostí obíhá Země ISS?
- Jaká je perioda oběhu ISS kolem Země?
- Jak daleko je geostacionární dráha?
- Jaká je perioda oběhu Marsu kolem Slunce?

21. Rakety I.

Téma: Úvod do kosmických letů

Cíl: Nastínit studentům, kde se kosmonautika vzala a jaký je její přínos

Přístup k hodině

Následující hodiny budou zaměřené na kosmonautiku – na její vývoj a na fyziku, která za ní stojí. Nejprve budeme ke kosmonautice přistupovat spíše z hlediska historického a z hlediska základních principů, zatímco moderní kosmonautika bude zařazena později.

Kosmonautika je téma velice objemné. I na středoškolské úrovni by vydalo na celé pololetí. V rámci vzdělávacího plánu je cílem ke kosmonautice přistupovat v širším kontextu, proto bude na následujících stranách v mnohém odkazováno na přední odborníky, kteří jsou aktivní jak v publikační, tak v popularizační rovině a mohou pomoci s inspirací k rozšíření dílčích témat. V této a následujících hodinách se zaměříme především na klíčové aspekty kosmonautiky v soudobých souvislostech a s ohledem na fyziku kosmických letů. Hodiny věnované kosmonautice budou svým popisem spíše encyklopedické než didaktické. Tento přístup volím proto, že kosmonautika je ve středoškolské didaktice neprozkoumaným územím, a tak na rozdíl od dalších částí plánu, které jsou více či méně svázány s výukou fyziky na středních školách, v případě hodin zaměřených na kosmonautiku je třeba sdílet více informací. První hodina má, více než ty další, potenciál být hodinou motivační.

Vývoj kosmonautiky

Kde se kosmonautika vzala?

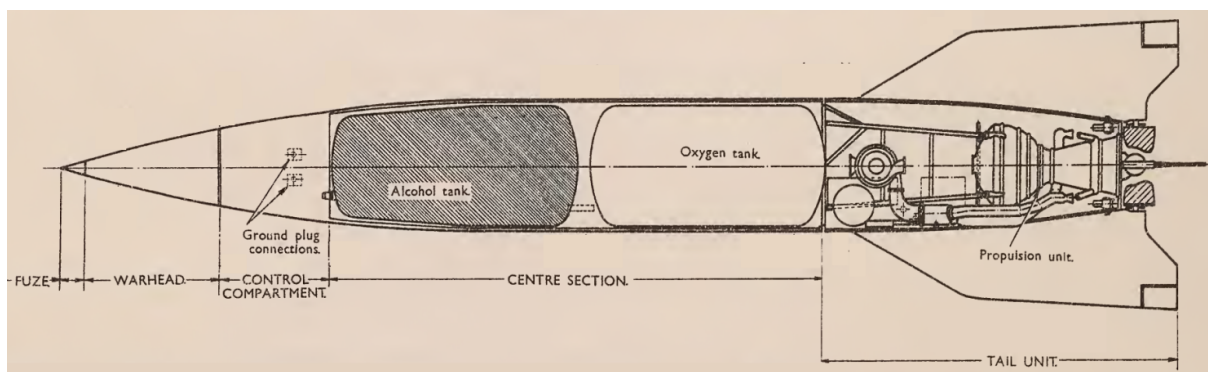
Není snadné určit, kde začíná vývoj kosmonautiky. První systémy koncepčně připomínající rakety vznikaly už ve středověku [62], nicméně z dnešního pohledu bychom si tehdejší rakety patrně připodobnili k zábavní pyrotechnice. Se skutečnými počátky kosmonautiky v 1. polovině 20. století je spojen Konstantin Eduardovič Ciolkovskij (1857-1935), který vystavěl teoretickou kosmonautiku, ze které se později vycházelo při stavbě prvních raket.

Jak definujeme raketu?

Když mluvíme o prvních raketách, je řeč o neřízených střelách případně o balistických raketách, tedy o zbraních, jejichž nákladem je bojová hlavička. V kosmonautice pod pojmem raketa myslíme dopravní prostředek s definovaným nákladem. Samotný dopravní prostředek se nazývá nosná raketa, raketový nosič nebo jen nosič. Definice není striktní, nicméně v tomto smyslu budeme dále s pojmy pracovat.

Zatímco za počátky teoretické kosmonautiky stál zájem o technologický pokrok, v případě aplikované kosmonautiky byl hybnou silou potenciál využití pro armádní účely. Nezní to sice kdovíjak půvabně, nicméně je třeba si říct, že kosmonautika se nezrodila ani tak ze snahy poznávat svět kolem nás, jako ze snahy mít vojensky navrch, a že nechybělo až tak mnoho a rakety vyvíjené v nacistickém Německu (především raketa V-2, viz Obrázek 3.39) mohly sehrát zásadní roli ve vývoji 2. světové války.

Je ke zvážení, do jaké míry tuto část historie žákům nastínit, avšak odhlédneme-li od souvislostí s vývojem balistických střel za 2. světové války, ani dále nemůžeme opomenout, že ještě dlouho po 2. světové válce, byla armáda hlavním hybatelem vývoje kosmonautiky.

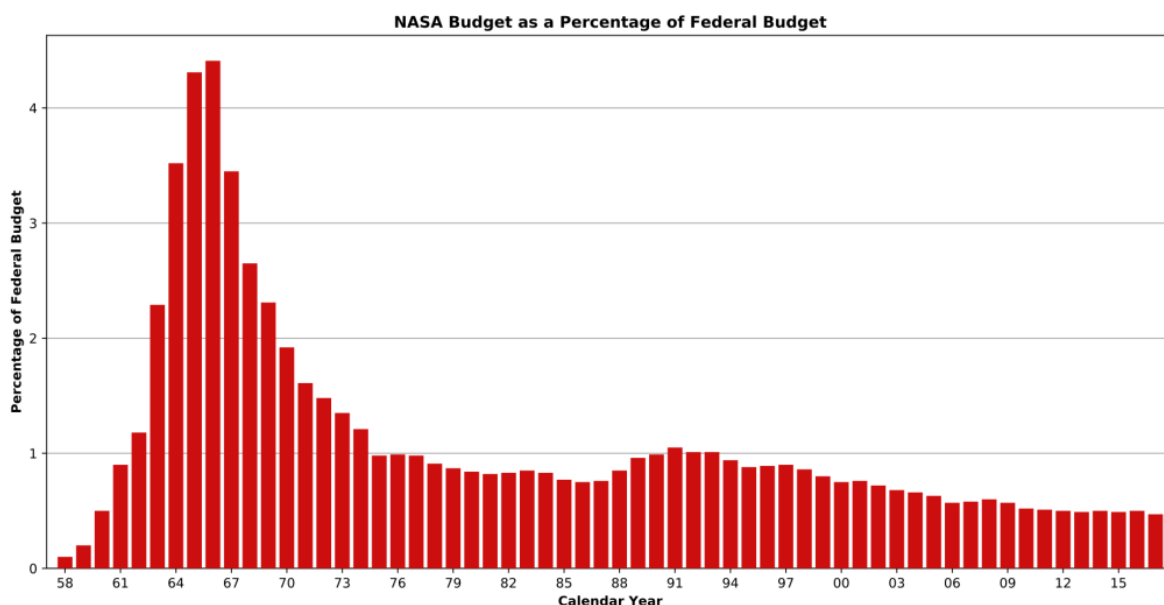


Obrázek 3.39: Schéma rakety V-2. Převzato z [70].

Proč do kosmu létáme?

Dnes si tuto otázku není těžké zodpovědět, protože najdeme celou řadu důvodů od technologií denní potřeby až po základní výzkum. Optikou 60. let je ale pohled na kosmonautiku jiný. Tehdejší motivace byla z velké části geopolitická. Probíhala studená válka, která mnohdy spočívala ve vedení zástupných konfliktů, jindy měla podobu technologických závodů mezi USA a Sovětským svazem. Z hlediska potenciálního globálního konfliktu přinášelo dobývání vesmíru nový typ rizika a to ať už z hlediska přímého ohrožení tak z hlediska špionáže.

Význam kosmonautiky v 60. letech dokladuje fakt, že tehdejší rozpočet amerického Národního ústavu pro letectví a vesmír (NASA) byl až 4,5 % federálního rozpočtu USA, což je v relativním srovnání se současným podílem na rozpočtu řádově více, viz Obrázek 3.40. Vývoji kosmonautiky od konce 50. let a rivalitě mezi USA a Sovětským svazem se budeme blíže věnovat ve 24. hodině.



Obrázek 3.40: Rozpočet NASA jako procentuální podíl na federální rozpočtu USA. Převzato z [71].

Co počátky kosmonautiky přinesly technologickému a vědeckému vývoji?

Pro nás jsou z didaktického hlediska z tohoto období dva zásadní obecné výstupy:

- První dekády kosmického věku jsou obdobím technologického vývoje, který ohromným způsobem ovlivnil celou řadu odvětví a z mnoha těchto objevů čerpá kosmonautika dodnes (v době psaní této diplomové práce se připravuje mise Artemis [72], která by člověka měla po více než 50 letech vrátit na Měsíc, přitom od roku 1972 žádná pilotovaná mise nebyla dále od Země než na LEO [73]).
- Byť vývoj rané kosmonautiky nepoháněla primárně touha po vědeckém poznání, jeho vedlejším produktem byl posun na poli čistě vědeckém, ať už díky měřením získaným z družic nebo například prostřednictvím misí Apollo, které zkoumaly povrch Měsíce a dovezly z něj stovky kilogramů hornin (tomuto tématu se obšírně věnuje celá řada dokumentů [74] a budeme se k němu vracet v závěru první poloviny vzdělávacího plánu).

Shrnutí

Posláním této hodiny je dát žákům základní vhled do kosmonautiky v historickém kontextu. Hodina je koncipována poměrně volně a lze ji uchopit formou diskuze, kterou lze doplňovat vybranými fakty souvisejícími s vývojem kosmonautiky.

Následující hodiny budou zaměřeny více technicky a propojí obecné informace se znalostmi z předchozích hodin. Alternativně lze volně přejít k tématům americko-sovětské rivality v době studené války, čemuž se věnuje [24. hodina](#).

22. a 23. Rakety II.

Téma: Fyzika kosmického letu

Cíl: Vysvětlit studentům, jaká fyzika stojí za cestou do kosmu

Přístup k hodině

Po obecném vhledu do tematiky se se nyní zaměříme více na fyziku. Toto téma je pojato jako dvouhodinovka, čímž se otevírá prostor pro maximální názornost. Opřít se lze především o fotografie a záznamy startu raket.

Odrážíme se od fyzikální stránky kosmického letu. Na raketu při cestě do kosmu působí 3 síly:

- Tah rakety, který zajišťuje její vynesení do kosmu a manévrování
- Gravitační síla, která na raketu působí v závislosti na její hmotnosti a její výšce nad povrchem Země
- Aerodynamický odpor, který způsobuje atmosféra

Pohybové rovnice rakety jsou složité, protože gravitační síla, hmotnost rakety i aerodynamický odpor (v návaznosti na měnící se sklon dráhy) se mění dle fáze letu. Nezanedbatelný vliv má i aktuální poloha vzhledem k rotující vztažné soustavě spojené se Zemí [62]. Přístup k této dvouhodinovce proto bude jen kvalitativní.

Fyzika kosmického letu

Na úvod se nabízí prostor k rozproudení diskuze. Cílem je uvědomit si, jaké aspekty jsou pro mechaniku kosmického letu nejkritičtější. Jde především o to, že:

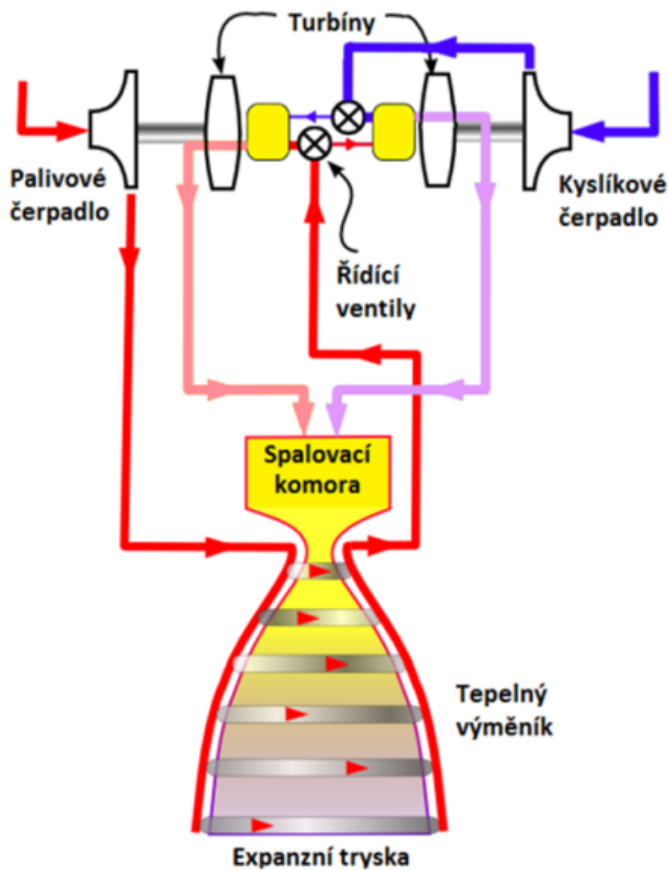
- Aerodynamický odpor je úměrný hustotě atmosféry, která (exponenciálně) klesá se vzdáleností od povrchu. To má za následek, že rakety startují kolmo vzhůru, aby nejhustější částí atmosféry prošly co nejrychleji.
- Chceme dosáhnout obvykle kruhové dráhy na definované orbitě. Proto se trajektorie letu stáčí takzvaným gravitačním klopením, které napomáhá dosažení kruhové dráhy a tah je využit především k postupné akceleraci, resp. ke zvyšování orbity. Zjednodušeně lze říct, že gravitační klopení zaoblí dráhu směrem k cílové orbitě.

Jakmile raketa dosáhne orbity zhruba 160 km nad Zemí, ocitá se v prostoru, kde se může dlouhodobě (několik měsíců) udržet bez stálého tahu. Dlužno ale dodat, že ještě ve výšce přibližně 500 km se nachází zbytková atmosféra, proto například ISS potřebuje jednou za čas korigovat svoji orbitu, aby se nevydala na sestup do atmosféry (který by trval několik let).

Aby se rakety dostaly do kosmu, využívá se vysoce reaktivních chemických procesů. Toto téma je spíš doménou chemie, nebudeme proto zabíhat do podrobností. V obecné rovině lze říct, že rakety využívají 3 typy paliv [75]:

- Tekutá paliva, například mísíme-li tekutý vodík s tekutým kyslíkem
- Pevná paliva, používaná hojně v moderních nosičích
- Kombinace tekutých a pevných paliv

Výsledkem je konverze chemické energie na pohybovou, prostřednictvím vytlačování zplodin z ústí rakety. V zásadě tak nejde o nic jiného než o 3. NPZ. Příklad raketového motoru můžeme vidět na Obrázku 3.41 níže, vlevo schéma raketového motoru Raptor, vpravo samotný motor navržený pro raketu Super Heavy od firmy SpaceX.



Obrázek 3.41: Raketový motor Raptor pro raketu Falcon Heavy. Vlevo schéma motoru, vpravo jeho prototyp. Převzato z [76] a [77].

Ač rakety využívají nejenergičtějších chemických reakcí, největší překážkou pro ně je, že aby mohly systematicky zrychlovat ve snaze nabrat 1. kosmickou rychlost, musí si na cestu vzít spoustu paliva. Palivo má svoji hmotnost, což zvedá další nároky na palivo a tak dále. Z tohoto koloběhu nás vysvobodí až to, že hmotnost rakety v průběhu letu klesá [78][79].

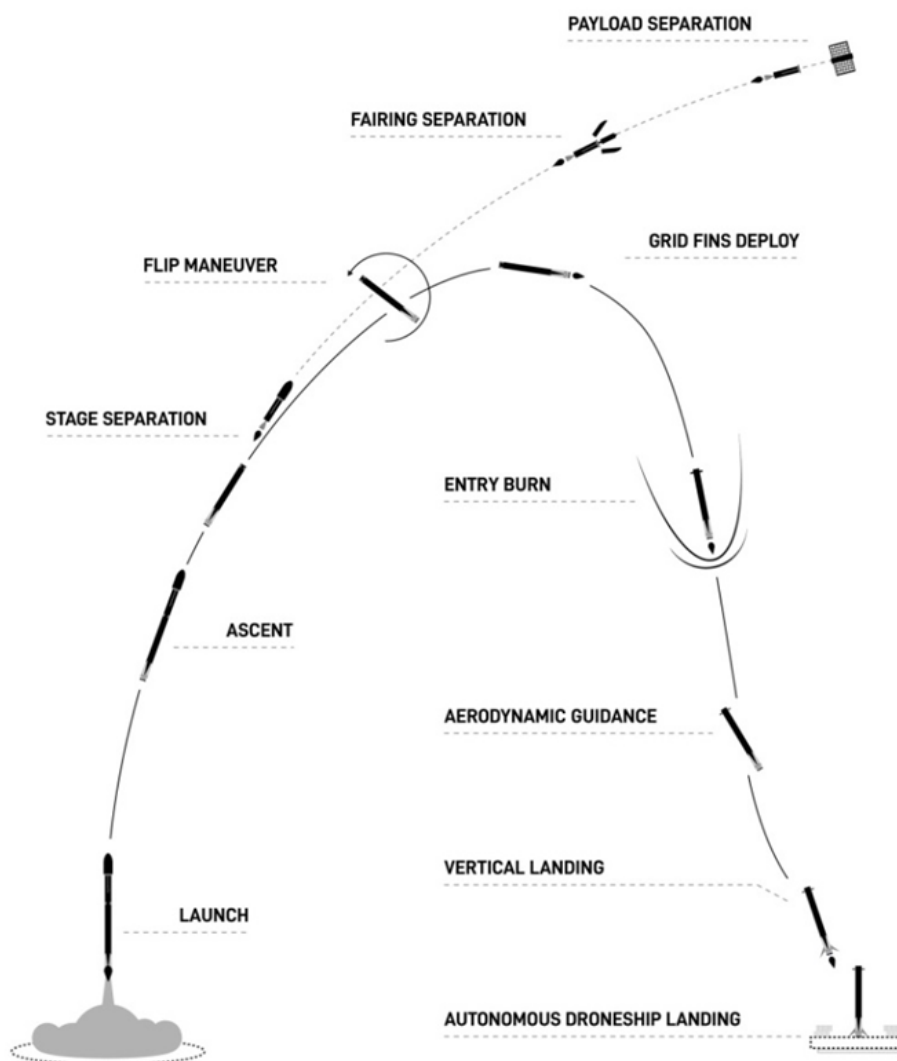
Jaké jsou důsledky pro konstrukci raketových nosičů? Nosiče jsou vícestupňové a na cestě do kosmu postupně svoje stupně odhazují poté, co v nich veškeré palivo vyhoří. Navzdory této optimalizaci jsou ve srovnání se svým nákladem stále obrovské a těžké. Příkladem může být nosná raketa Vega – lehký nosič využívaný Evropskou vesmírnou agenturou. Vega je čtyřstupňovou raketou, jejíž celková hmotnost je 137 tun. Přesto vynesou na LEO maximálně zhruba 2 tuny v závislosti na parametrech cílové orbity [80]. Přitom Vega se se svými 30 metry řadí mezi menší raketové nosiče.

Naopak mezi ty největší nosiče se historicky řadí Saturn V, který vynesl ze Země mise Apollo na jejich cesty k Měsíci. Saturn V měl nosnost 120 tun na LEO [81]. Hmotnost nosiče ale byla takřka 3 000 tun a celková výška rakety 110 metrů. Dlužno dodat, že Saturn V od Vegy dělí zhruba 50 let technologického vývoje a jeho poměr tah/tíha, který ovlivňuje dynamiku vzletu (a je-li menší, než 1 nemůže raketa vzlétnout), byl zhruba 1,2 [82], zatímco v případě Vegy je takřka 2,2 [80]. Proto se Saturn V odlepoval od Země pozvolna [83], zatímco vyvolával otřesy, které byly cítit i v 1500 km vzdáleném New Yorku [99]. Proti tomu start Vegy připomíná sprint [84]. K dohledání je celá řada názorných velkoformátových srovnání velikostí raket, které lze ve výuce použít [85].

Nabízí se otázka, která také bude žáky zajímat: Jak se rakety vrací na Zemi?

Odpověď není vůbec jednoduchá. Ještě na začátku 21. století bychom řekli, že raketové nosiče odhazují své stupně, které jako mrtvá váha padají k Zemi, a na orbitu se reálně dostane naprostě

minimum hmotnosti plně naložené původní rakety, která z kosmodromu startovala. Technologický posun ale umožnil kontrolovaně vracet první stupně raket Falcon 9 (s motory Merlin) zpět na Zemi pro opětovné použití, viz Obrázek 3.42. Dlužno dodat, že cesta k úspěchu byla trnitá a vedla přes celou řadu havárií [86].

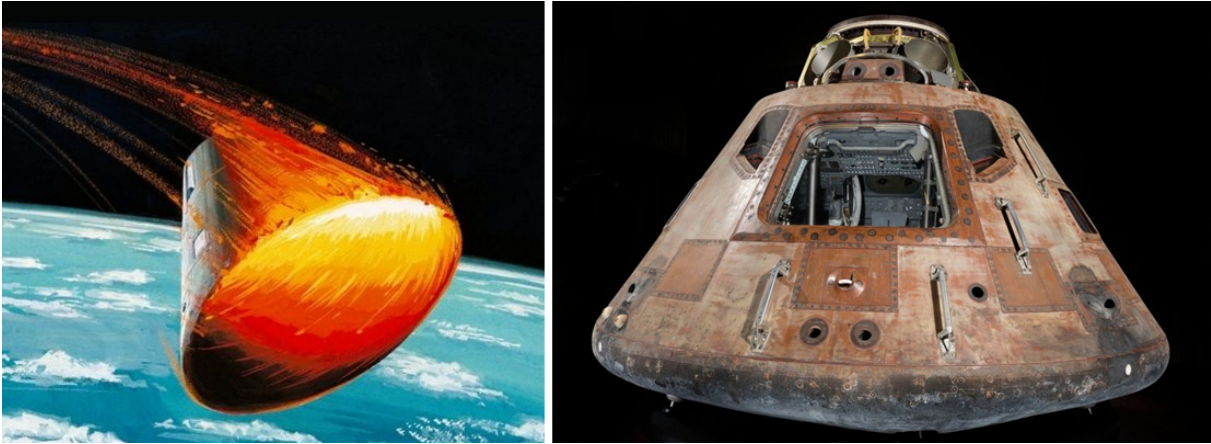


Obrázek 3.42: Návrat prvního stupně rakety Falcon 9 pro opětovné použití. Převzato z [87].

O vyšších stupních nosičů už toto říct nemůžeme – ty jako mrtvá váha i nadále po vyčerpání paliva a oddělení padají k Zemi. Vyšší stupně raket dnes obsahují systémy, tzv. deorbit burn, které zajistí jejich navedení do atmosféry tak, aby v ní shořely. Pakliže tyto systémy selžou, mohou padat nekontrolovaně, viz incident Falconu 9 v březnu 2021 [88].

O tom, zda se náklad vrací na Zemi, rozhoduje povaha mise. Návrat nákladu nebo posádky na Zemi je velice složitou problematikou. Hladké přistání na Zemi by se dalo zajistit raketovými motory (v případě přistání například na Měsíci, který atmosféru nemá, je to dokonce nevyhnutelné), to by ale bylo extrémně energeticky náročné. Proto se využívá aerodynamického brzdění v atmosféře. Aerodynamické brzdění ovšem přináší další technickou výzvu – při návratu do atmosféry dochází k enormnímu zahřívání vyvolanému obrovskou rychlostí, ze které je potřeba zpomalit do rychlosti umožňující kontrolované přistání [62].

K nadměrnému zahřívání nedochází ani tak vinou tření, jak by si kdekdo mohl myslet, ale je způsobeno stlačováním vzduchu. To je u vstupních rychlostí natolik silné, že teplota na tepelném štítu návratových modulů přesahuje 1500 °C.



Obrázek 3.43: Vlevo vizualizace vstupu velitelského modulu Apollo do atmosféry, vpravo skutečný velitelský modul Apollo 11 v Národním muzeu letectví a kosmonautiky ve Washingtonu. Převzato z [89].

Proto je třeba vstupovat do atmosféry kontrolovanou rychlostí a pod kontrolovaným úhlem [62]. Co se stane, není-li tomu tak, je dobře vidět na příkladu bolidů – jasných meteorů. Bolidy vstupují do atmosféry natolik vysokou rychlostí, že se zahřívající vzduch ionizuje, což vyvolává světelnou stopu na obloze [90].

Shrnutí

Abychom se dostali do kosmu a bezpečně se vrátili zpět na Zemi, musíme si poradit se složitými technickými výzvami. Každé z dílčích témat hodiny by vydalo na separátní přednášku, je tak na zvážení, jakým způsobem k hodině přistoupit. Cílem hodiny je především uvést žákům nejdůležitější aspekty kosmického letu do souvislostí. S tímto základem se můžeme v dalších hodinách blíže podívat na kosmickou techniku a její vývoj od konce 50. let 20. století.

24. a 25. Rakety III.

Téma: Technický pohled na počátky kosmonautiky a její další vývoj

Cíl: Nastínit studentům, jaká technika stála za lety do kosmu a jaký pokrok lety přinesly

Přístup k hodině

Předchozí hodiny daly stručný úvod do historie kosmonautiky a zaměřily se na kosmonautiku po fyzikální stránce. Tato dvouhodinová by měla zevrubně seznámit žáky s technologiemi a s misemi, na kterých se technologie uplatnily. Zaměříme se především na kosmické programy 60. let a začátku 70. let. Pozdějšímu vývoji se budeme věnovat částečně v dalších hodinách a částečně v druhé polovině plánu.

Z historického hlediska je třeba si předně uvědomit, že z geopolitických důvodů se kosmonautika ve svých počátcích rozvíjela v USA a Sovětském Svazu nezávisle na sobě. Reliktem této doby je i to, že rozlišujeme kosmonauty a astronauty. Významově jde o stejné pojmy, nicméně pojem astronaut se rozšířil v západním světě, zatímco kosmonaut v Rusku, resp. ve Východním bloku. Čistě etymologicky je vhodnějším pojmem kosmonaut, protože dobývá kosmos, nikoli hvězdy.

I toto téma je pojato jako dvouhodinová, čímž se otevírá prostor pro propojení tématu americké a sovětské kosmonautiky, resp. jejich počátků, v rámci jednoho tematického bloku.

Sovětská kosmonautika

V technickém vývoji měl zpočátku navrch Sovětský svaz, proto jej zmíníme jako první. Éra kosmických letů začíná vypuštěním družice Sputnik 1 Sovětským Svazem v roce 1957. Ještě v téže roce následoval Sputnik 2 (se psem Lajka na palubě [91]) a Sputnik 3 (více než tunová družice vypuštěná v roce 1958). Všechny tyto lety byly zajištěny nosnou raketou R-7, která byla původně balistickou raketou.

Její nástupce byla nosná raketa Vostok, která vynesla 12. dubna 1961 do kosmu Jurije Gagarina (1934 - 1968) – prvního kosmonauta, který během 108minutového letu obletěl téměř celou planetu, viz Obrázek 3.44.



Obrázek 3.44: Let Jurije Gagarina 12. dubna 1961. Převzato z [92].

Stejná raketa později téhož roku vynesla do kosmu Germana Titova (1935 - 2000), jenž během více než 25hodinového letu obletěl Zemi 18krát. Titov, který letěl ve věku necelých 26 let, je do dneška nejmladším profesionálním kosmonautem.

Raketa Vostok byla následně použita v rámci programu Luna, který spočíval v bezpilotních letech na Měsíc. Program Luna probíhal až do 70. let, ve své druhé polovině už s jinými nosiči, a jeho nejznámějším výsledkem je přistání robotického vozidla Lunochod na povrchu Měsíce, kde Lunochod pořídil řadu snímků a chemicky analyzoval vzorky. Z nosiče Vostok technicky vychází nosič Sojuz, který se s generačními obměnami používá dodnes.

Sovětský svaz si na počátcích kosmického věku připsal celou řadu prvenství:

- 1. družice v kosmu – Sputnik 1 (1957)
- 1. živý tvor v kosmu – pes Lajka na palubě družice Sputnik 2 (1958)
- 1. pilotovaný let do kosmu – Jurij Gagarin (1961)
- 1. oblet země a zároveň první pobyt v kosmu, který překročil 24 hodin – German Titov (1961)
- 1. žena v kosmu – Valentina Těreškova (1963)
- 1. výstup do otevřeného prostoru – Alexei Leonov (1965)



Obrázek 3.45: Vlevo Jurij Gagarin před svým letem, vpravo Alexei Leonov při první výstupu do otevřeného prostoru. Převzato z [93] a [94].

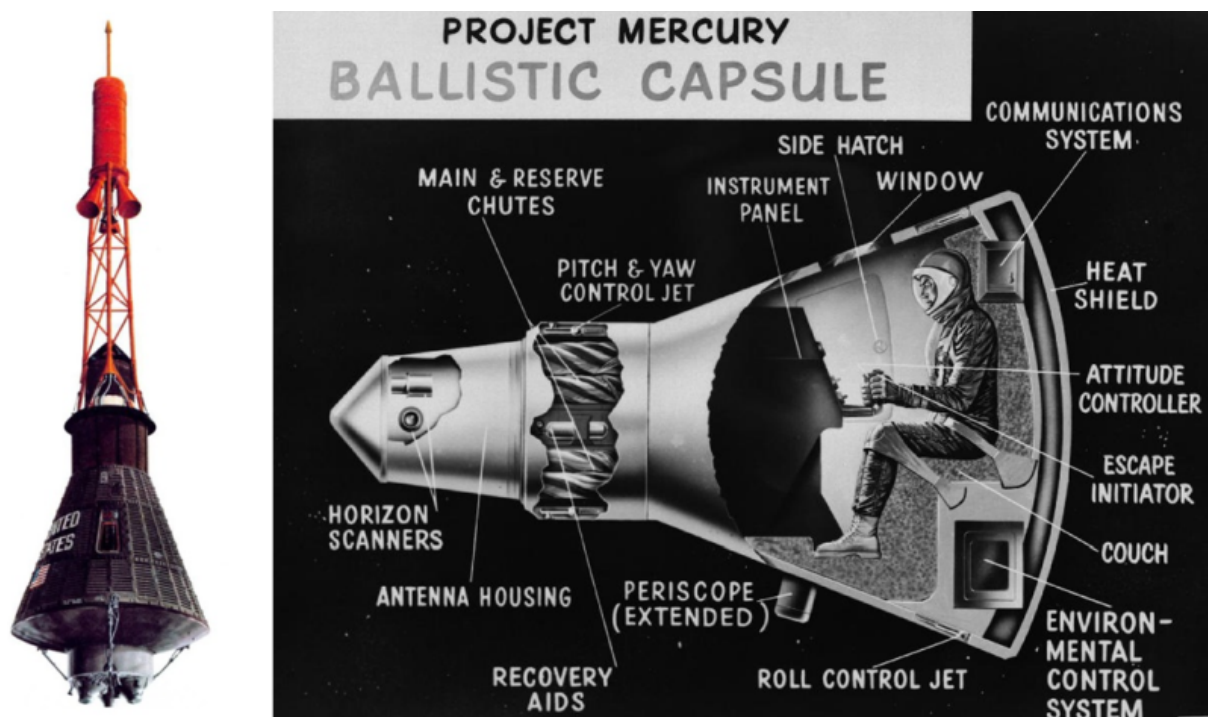
Přesto Sovětský svaz svůj technický náskok z přelomu 50. a 60. let ztratil, prohrál boj v závodě o dobytí Měsíce a nikdy neměl pilotovanou misi za hranicí LEO. Na druhou stranu byl to Sovětský svaz, který v 70. letech přišel s programem kosmických stanic Saljut a později začal budovat kosmickou stanici Mir. K tomuto tématu se vrátíme ve 27. hodině.

Americká kosmonautika

Ač byla Sovětská kosmonautika zpočátku v čele, Američané začali Sověty rychle dohánět a předhánět. Prvním Američanem v kosmu byl Alan Shepard (1923 - 1998) necelý měsíc po letu Jurije Gagarina. V prvním desetiletí kosmických pilotovaných letů se uskutečnilo celkem 41 misí, z nich 25 bylo amerických. Americká kosmonautika se navíc od sovětské zásadně lišila tím, že kosmonauté byli od poloviny 60. let vysíláni na mise opakovaně – všichni členové posádky Apollo 11 byli už předtím na misi v rámci programu Gemini a například Jim Lovell (nar. 1928), kapitán mise Apollo 13, byl v kosmu celkem 4 krát – 2 krát v rámci programu Gemini a 2 krát v rámci programu Apollo.

V USA souběžně probíhaly 4 dlouhodobé programy – Explorer, Gemini, Mercury a Apollo.

- Program Explorer začal v roce 1958 a běží dodnes. V rámci něj byla vypuštěna první americká družice Explorer 1 s použitím nosiče Juno. Od té doby byla v rámci programu vypuštěna téměř stovka družic ať už pozorovacích tak měřících, mezi nimi například mikrovlákná družice COBE zaměřená na studium reliktního záření, čemuž se budeme věnovat v 57. hodině.
- Program Mercury probíhal v letech 1958 až 1963 a byl zaměřený na krátkodobé pilotované lety v jednomístných raketách. Nejprve proběhly nepilotované lety, kdy ve dvou případech byl pasažérem makak a ve dvou šimpanz, a následně 6 pilotovaných letů, kdy prvním Američanem v kosmu byl Alan Shepard, první orbitální let provedl John Glenn (1921 - 2016). Tyto jednomístné rakety byly velice stísněné (podobně tomu bylo i v případě Vostoku), viz Obrázek 3.46.

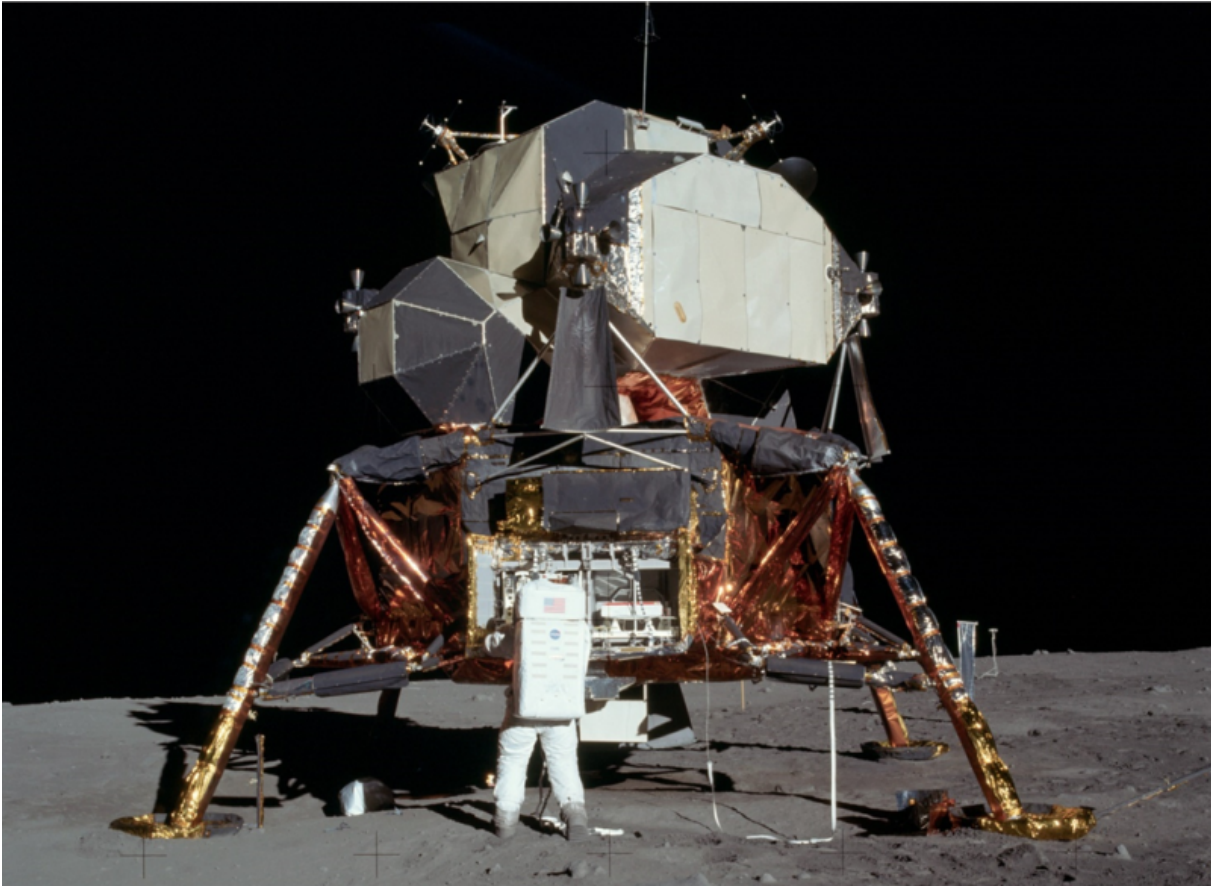


Obrázek 3.46: Jednomístná raketa vyvinutá v rámci programu Mercury. Převzato z [95] a [96].

- Program Gemini probíhal od roku 1962 do roku 1966 se zaměřil na dlouhodobé, až dvou-týdenní, pobyty ve vesmíru, v dvoustupňových raketách. Šlo o 10 pilotovaných misí, během nichž došlo k prvnímu americkému výstupu do otevřeného kosmu, bylo otestováno manévrování lodí a jejich spojování.
- Neznámější je program Apollo, jehož cílem bylo přistání na Měsíci. Celkem šlo o 11 pilotovaných misí. Apollo 8 se jako první vydalo k Měsíci (s nosičem Saturn V, stejně jako všechny další mise programu Apollo), Apollo 10 sestoupilo dokonce jen 15 km nad povrch Měsíce. Apollo 11 jako první úspěšně na povrchu přistálo a Neil Armstrong (1930 - 2012) se stal prvním člověkem, kterým stanul na povrchu Měsíce. Po Apollu 11 následovalo další 6 misí k Měsíci, přičemž neznámější z nich je mise Apollo 13, která se úspěšně vrátila navzdory závažné poruše¹⁰.

Americká kosmonautika 60. let je velice vděčným tématem a lze bez problému postavit hodinu jen na ní nebo jen na misi Apollo 11. Oporou mohou být přednášky a knihy Tomáše Příbyla [98][99][100] a Milana Halouska [101] nebo videa, která vizualizují raketu Saturn V a celou misi Apollo 11 krok za krokem [102][102][103][104].

¹⁰O misi Apollo 13 byl natočen úspěšný hollywoodský film, který je doceňován i odbornou komunitou.



Obrázek 3.47: Fotografie lunárního modulu Apollo 11 s kosmonautem Edwinem Aldrinem pořízená Neilem Armstrongem 20. července 1969. Převzato z [97].

Zvolený přístup závisí na konkrétní třídě a učitel. Nicméně vyzdvihnu zde několik důležitých postřehů, které stojí za to neopomenout v rámci tohoto tematického bloku:

- Éra kosmických závodů byla obdobím enormního technologického rozvoje. V rámci vývoje i samotných misí čelili inženýři a kosmonauti zapeklitým problémům, jejichž rozřešení vyžadovalo inovativní přístupy a mnohdy i notnou dávku bezprostřednosti. To se týká jak misí veskrze úspěšných jakou je Apollo 11 [106], tak i mise Apollo 13, jejíž úspěšný návrat je mnohdy považován za největší úspěch celého programu.
- Mise Apollo dovezly na Zemi dohromady přes 380 kg hornin. Výsledkem byly důležité poznatky o geologické historii Měsíce a Země, k čemuž velkou měrou přispělo i to, že součástí poslední mise Apollo 17 byl vědec, geolog Harrison Schmitt (nar. 1935), který byl prvním vědcem v kosmu.
- V rámci programu Apollo byla také rozmístěna na Měsíci celá řada přístrojů, mezi nimi například systém zrcadel pro přesná měření vzdálenosti laserem [107]. Pro mise Apollo 15, Apollo 16 a Apollo 17 byl také vyvinut lunární rover.
- Zároveň to byla doba, kdy technologický rozvoj byl na straně USA i Sovětského svazu vykopen enormními finančními náklady. Zatímco úsilí vynaložené na straně USA přineslo další technologický boom, ze kterého svým způsobem těžila celá země, na straně Sovětského svazu byla motivace především vojenská a vesmírný program neměl velký přínos pro řadové obyvatele.

Shrnutí

Počátky éry kosmických letů patří k nejatraktivnějším tématům kosmonautiky a v zásadě i celého vzdělávacího plánu. Dílčí témata, která jsou tu zmíněna, lze rozšířit na mnoho hodin. Pokudliže se učitel chce zaměřit na kosmonautiku více, oporou mu kromě zmíněných odkazů může být celá řada původních a i nepůvodních českých článků a knih.

Následující hodina je zaměřena na program Space Shuttle, který po dobu 30 let zajišťoval pravidelně cesty do kosmu.

26. Raketoplány

Téma: Program Space Shuttle

Cíl: Vysvětlit žákům koncept raketoplánu, který byl pro kosmonautiku ohromným posunem

Přístup k hodině

Raketoplány sice nelétají od roku 2011, nicméně i dnes budí vášně a žáci se na ně ptají. Proto stojí za to je neopomenout, ač to lze udělat bez většího vlivu na další hodiny. Program Space Shuttle realizoval celkem 135 misí v pěti raketoplánech, přičemž v rámci každé mise mohlo být vyneseno do kosmu až 27,5 tuny nákladu. Už jen to ukazuje, že raketoplány, přestože se ukázaly být rizikovým programem, měly enormní přínos.

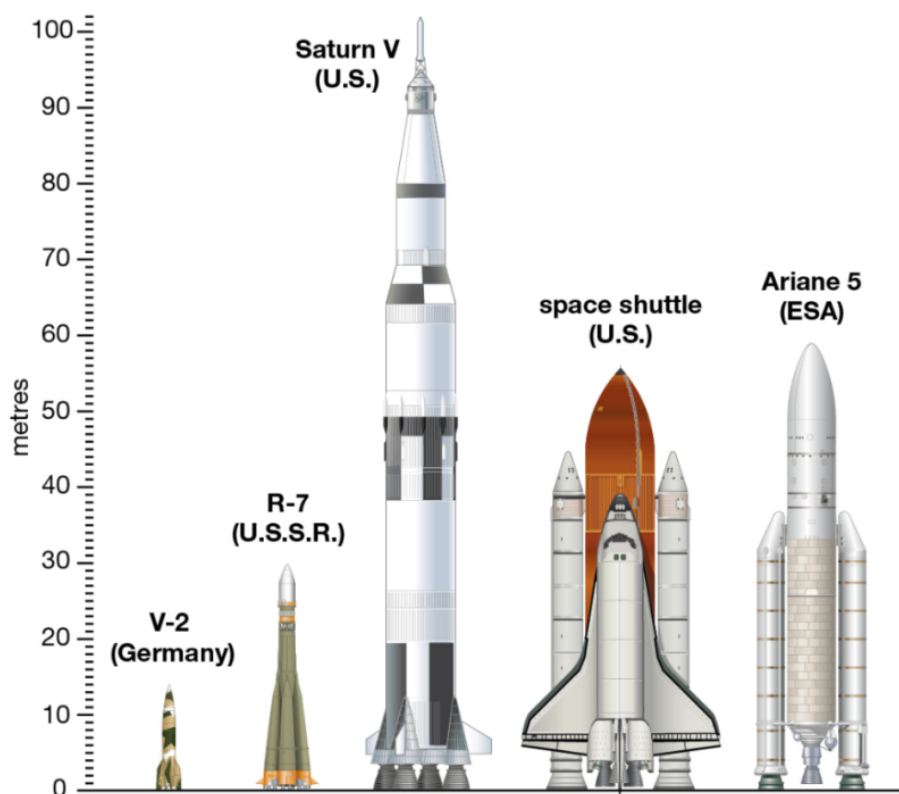
Koncepce raketoplánu

Raketoplán, jako dopravní prostředek, má širší definici, do níž spadá X-15 zmíněný [19. hodině](#). V tomto případě se omezíme na kosmické raketoplány především v rámci programu Space Shuttle, kdy se dá raketoplán chápat jako kosmický dopravní prostředek, který je, na rozdíl od rakety, určen k opakovanému použití.

Program Space Shuttle začal v roce 1972, tedy na konci éry programu Apollo. Na srovnání s nosičem Saturnem V lze demonstrovat, o jak zásadní koncepční změnu šlo. Zatímco Saturn V dokázal na LEO vynést 120 tun nákladu, raketoplán „jen“ 27,5 tuny. Zásadní změnou ale bylo, že raketoplán měl definovaný nákladový prostor zhruba válcového tvaru o objemu 300 metrů krychlových a mohl operovat jako kyvadlová doprava (proto označení shuttle).

Koncept raketoplánu spočíval v 1,5stupňovém pohonu, kdy start zajistily přídavné rakety, po jejichž dohoření a odhození pohon zajišťoval raketový motor spojený s raketoplánem, zásobovaný obrovskou přídavnou nádrží, která byla odhozena ve finálním stádiu startu. Technické řešení s tím spojené je vidět například na animaci [\[108\]](#). Tato koncepce měla celou řadu důsledků: Ač byl oproti raketě Saturn V raketoplán co do výšky zhruba poloviční (viz [Obrázek 3.48](#)), vážil 2000 tun, tedy zhruba jen o 30 %. Start raketoplánu měl také dosti rozdílný průběh než start rakety, a to jak po akustické stránce [\[109\]](#), tak z hlediska komfortu pro posádku, resp. pro náklad, z důvodů významně menších vibrací.

První start raketoplánu, konkrétně šlo o raketoplán Columbia, by realizován 12. dubna 1981, tedy přesně 20 let po letu Jurije Gagarina. Celkem bylo za celou dobu programu v provozu 5 raketoplánů (Columbia, Challenger, Discovery, Atlantis a Endeavour), které létaly po většinu z třiceti let provozu do kosmu v několikaměsíčních rozestupech. Posádku raketoplánu tvořilo až 8 členů, z nichž mnozí byli vědci.



Obrázek 3.48: Velikostní srovnání německé V-2, sovětské R-7, americké rakety Saturn V, amerického raketoplánu a evropské rakety Ariane 5. Převzato z [110].

Raketoplány dopravily na oběžnou dráhu celou řadu družic, opakovaně se propojily s orbitální stanicí Mir a zásadně se podílely na budování ISS. Za zmínku stojí především dva zásadní projekty, které by (patrně) nebyly, nebýt programu Space Shuttle:

- **Spacelab** byl projekt spuštěný v 80. letech, během něhož byly realizovány mikrogravitační experimenty v laboratoři válcového tvaru. Laboratoř vyvinula Evropská vesmírná agentura. Celkem byla vynesena na orbitu a vrácena zpět na zem ve 32 misích. Na Obrázku 3.49 můžeme vidět vizualizaci provozu laboratoře Spacelab.
- **Hubblův vesmírný dalekohled** byl vynesena na orbitu v roce 1990 raketoplánem Discovery a dále byl servisován prostřednictvím letů raketoplánů. Jde o dalekohled především pro viditelnou oblast spektra o celkové hmotnosti 11 tun, první a poslední svého druhu, který přispěl k zásadním objevům astronomie, mimo jiné pozorováním tzv. Hubblových hlubokých polí – pozorování nejvzdálenějších pozorovatelných objektů. K Hubblovu vesmírnému dalekohledu se ještě opakovaně vrátíme.

Raketoplánům se přezdívalo létající cihla. Důvodem bylo to, že při finální fázi přistání se chovaly v zásadě jako dopravní letadlo ovšem s tím zásadním rozdílem, že neměly proudové motory, k zemi klesal rychleji a pod strmějším úhlem. De facto tak šlo o kluzák s obrovským tepelným štítem vespod a samo přistání vyžadovalo vysokou míru preciznosti, protože bylo potřeba nasměrovat raketoplán z výšky několikaset kilometrů přímo na přistávací plochu na letecké základně [112].

Celkem raketoplány nalétaly 882 milionů kilometrů (vítězem mezi nimi je s 238,5 miliony kilometrů Discovery), což z nich dělá „dopravní prostředky s největším nájezdem“, na druhou stranu nelze opomenout, že program potkaly tragické havárie, které jej pokaždé na několik let zastavily a vedly (krom finančních důvodů) i k zastavení programu.

Nejprve došlo v lednu 1986 k havárii raketoplánu Challenger krátce po startu, kdy byla havárie vyvolána degradací materiálu v důsledku nízké teploty před startem. V roce 2003 pak došlo



Obrázek 3.49: Vizualizace raketoplánu s laboratoří Spacelab. Převzato z [111].

k havárii Columbie, kdy už při startu došlo k narušení izolace na křídle, což se projevilo až při návratu zpět na Zemi. Oběma haváriím se detailně v kontextu celého programu věnuje ve svých knihách Tomáš Příbyl [113][114].

Výsledkem je, že zpětný pohled na program je poněkud rozporuplný, protože na jedné straně je zde jeho neoddiskutovatelný přínos, na druhé fakt, že 2 z 5 raketoplánů měly fatální nehodu. Dnes lze s trochou nadsázky říct, že Space Shuttle je tak trochu Concorde kosmonautiky – nikdo mu nemůže upřít jeho přínos, z různých důvodů projekt skončil, ale přesto idea s ním spojená žije dále a pracuje se na jeho nepřímém nástupci (viz projekt Boeing X-37B [115]).

Hodí se zmínit, že i Sovětský Svaz pracoval na raketoplánu. Jejich raketoplán Buran, ale nikdy neabsolvoval pilotovanou misi a jedinou úspěšnou misí je nepilotovaný 3 hodinový let, během něhož dvakrát obletěl Zemi [116]. Jeden ze zkušebních modelů raketoplánu se nachází v technickém muzeu ve Speyeru, viz Obrázek 3.50 níže.



Obrázek 3.50: Sovětský raketoplán Buran v technickém muzeu ve Speyeru v Německu.

Pokud jde o americké raketoplány, raketoplán Atlantis je k vidění v Kennedyho vesmírném středisku na Floridě, Discovery v Národním muzeu letectví a kosmonautiky ve Washingtonu a Endeavour v California Science Center v Los Angeles.

Shrnutí

Pro svou odvážnou koncepci a obrovské úspěchy na poli technickém i vědeckém je i dnes téma raketoplánů, resp. projektu Space Shuttle, velice atraktivní. Ač se nyní dá považovat program Space Shuttle v lecčem za přežitý, nelze říct, že by šlo o koncept, který by byl definitivně opuštěn a už jen proto by dle mého soudu neměl zůstat opomenut.

27. Výzkum ve vesmíru I.

Téma: Pilotované mise

Cíl: Přiblížit žákům kosmický výzkum a co je jeho přínosem

Přístup k hodině

Předchozí hodiny se zaměřovaly na kosmonautiku především z hlediska historie a techniky raket resp. raketoplánů. Kosmického výzkumu jsme se sice trochu dotkli u projektu Apollo, při popisu orbit a u projektu Spacelab. Nyní se více zaměříme na přidanou hodnotu pilotované kosmonautiky, a to ať už právě z hlediska výzkumu, tak z hlediska vývoje navázaných technologií.

Počátky kosmického výzkumu na pilotovaných misích

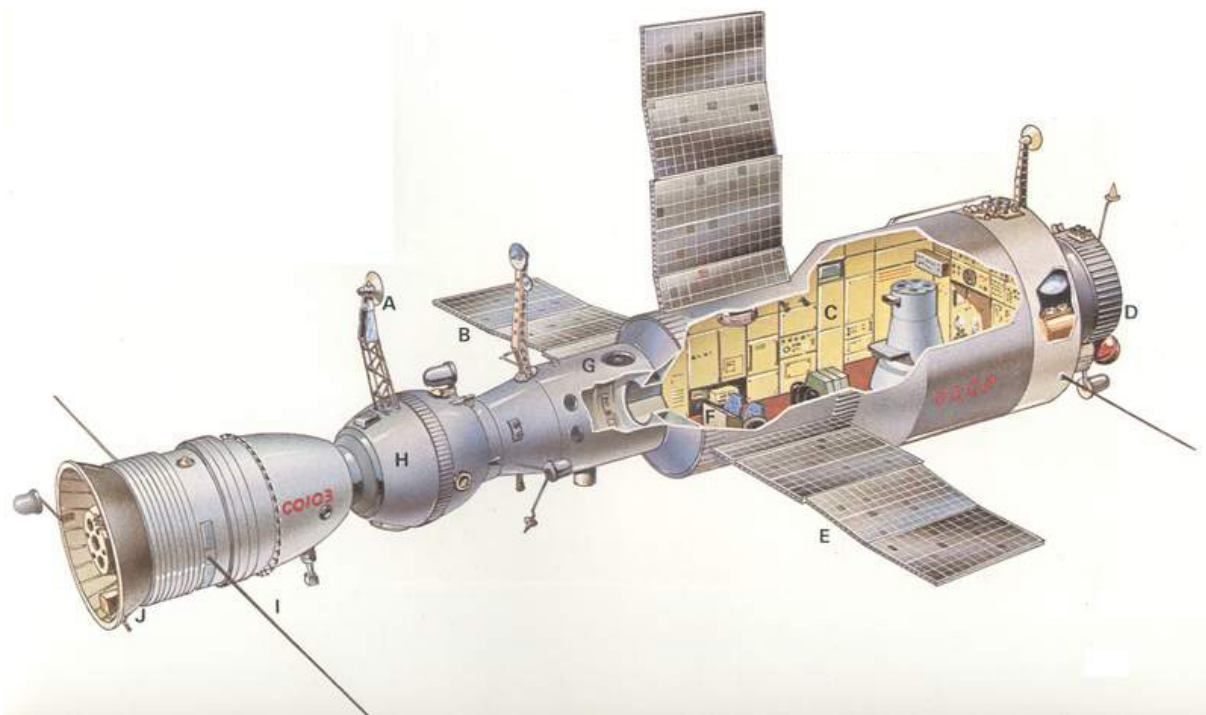
Kosmický výzkum je poměrně široký pojem, který zasahuje do celé řady tradičních věd a disciplín jako jsou například lékařské vědy, fyzika nebo biotechnologie. Na počátku kosmického věku byl výzkum ve vesmíru především soustředěn na krátké mise, kdy objektem zkoumání byli z velké části sami kosmonauti. Později se přidaly nepilotované mise na Měsíc nebo na Venuši, k nimž se ještě vrátíme v dalších hodinách. V této hodině se zaměříme na lety s posádkou, kdy posádka sama realizovala připravené experimenty.

Pilotované mise můžeme rozdělit do dvou kategorií, dle největší vzdálenosti, ve které se od Země ocitly. Deset misí Apollo se vydalo na několikadenní cestu k Měsíci. Rekordmanem mezi nimi je strastiplná mise Apollo 13, jejíž posádka se při obletu Měsíce ocitla ve vzdálenosti více než 400 000 km od Země. Pomineme-li mise Apollo, nejdále se pilotovaná mise dostala na vzdálenost 1369 km od povrchu Země (Gemini 11), šlo tedy stále o LEO [73].

Z hlediska trvání mise se hodí rozdělit mise na ty, které se omezovaly na LEO a ty, které byly za hranici LEO. Nejdelší z misí Apollo byla mise Apollo 17, která trvala 12 dní. Omezíme-li se pouze na LEO rekordmanem v nejdelším čase stráveném nepřetržitě v kosmu je, v době psaní diplomové práce, Valerij Poljakov (nar. 1942), s téměř 438 dny vkuse mezi roky 1994 a 1995 [117]. Vesmír je nehostinné prostředí plné radiace, nicméně na nízkých orbitách chrání kosmonauty alespoň částečně magnetické pole Země. Je proto důležité si uvědomit, že ne všechny zkušenosti nabitě dlouhodobým pobytem na orbitálních stanicích jsou přenositelné na dlouhé cesty vesmírem. Přesto díky orbitálním stanicím toho víme mnoho o negativním vlivu mikrogravitace na zdraví kosmonautů (o tom více v [následující hodině](#)).

Orbitální stanice se začaly budovat od 70. let nezávisle na sobě v USA a Sovětském svazu. V Sovětském svazu v rámci programu Saljut bylo v průběhu 70. a 80. let vybudováno celkem 7 kosmických stanic. Šlo o orbitální stanice ve výškách zhruba 200 až 300 km. Na stanicích Saljut (a paralelně na americké stanice Skylab) probíhaly první dlouhodobější experimenty ve stavu beztíže. Nástupcem Saljutů byla vesmírná stanice Mir, která byla první dlouhodobě obydlenou vesmírnou stanicí a jejímž nástupcem je dnešní ISS, na kterou je zaměřena [následující hodina](#).

Zde je nepříhodnější chvíle zmínit nejznámější českou stoupu v kosmu. Na stanici Saljut 6, viz Obrázek 3.51, pobýval po dobu necelých 8 dní Vladimír Remek (nar. 1948), první (a v době psaní diplomové práce zatím i poslední) český, resp. československý kosmonaut. Na příkladu jeho mise v roce 1978 lze dobře ilustrovat, jaká vědecká činnost na vesmírné stanici probíhala. Experimenty, které realizoval, byly připraveny československými vědci a jednalo se například o zkoumání rozmnožování řas chlorela, měření okysličování tkání kosmonautů nebo sledování změn jasnosti hvězd při západu za obzor. Z tohoto výčtu je vidět poměrně velký rozsah zaměření, což je dodnes typické pro experimenty na kosmických stanicích.



Obrázek 3.51: Kosmická stanice Saljut 6: A – Radar, B, E – Solární panely, C – laboratoř, D – pohon orbitální stanice, F – řídicí stanoviště, G – přechodová komora, H – pracovní prostor v Sojuzu, I – anténa, J – pohon Sojuzu. Převzato z [118].

O letu Vladimíra Remka bylo napsáno a řečeno mnohé. Inspirací mohou být články [119][120] nebo televizní reportáže [121]. Dlužno dodat, že příběh Vladimíra Remka je bohužel poznamenán propagandistickým kontextem doby, který v lecčem zastínil vědecko-technické aspekty mise. Remek se stal prvním kosmonautem z jiné země než Sovětský svaz nebo USA a vybrán byl na základě režimního zadání, kdy svoji roli sehrálo i to, že měl slovenského otce a byl tak ideálním československým kandidátem. Tento dobový kontext nicméně nesnižuje jeho zásluhu a Vladimír Remek by rozhodně v rámci výuky neměl být opomenut.

Počátky kosmické spolupráce

Po dobytí Měsíce Američany začala rivalita mezi USA a Sovětským svazem polevovat. Právě s projekty Saljut a Skylab jsou spojeny s prvními náznaky spolupráce, která ale v 70. a 80. letech nebyla úplně funkční. Došlo k prvnímu spojení americké a sovětské kosmické lodi nebo se poprvé Američané dostali do sovětského hvězdného městečka, nicméně o otevřené spolupráci mezi zeměmi lze hovořit až od 90. let a ani poté nebyla spolupráce jednoduchá [122][123].

Od poloviny 80. let Sovětský svaz začal budovat vesmírnou stanici Mir. Zde probíhaly první pobyty kosmonautů, které přesahovaly půl roku. Jurij Romaněnko (nar. 1944) byl první, kdo strávil v kosmu nepřetržitě více než 300 dní a až zde se v pozdějších 90. letech naplno rozjela spolupráce mezi nově vzniklým Ruskem a USA, která byla nejvíce vidět na programu Shuttle-Mir, který zahrnoval celkem 11 misí raketoplánů.

Vesmírná stanice Mir byla v provozu více než 15 let. Rozjely se zde ve velkém měřítku experimenty v mikrogravitaci a byla nastavena mezinárodní spolupráce zahrnující mimo Roskosmosu (Ruské kosmické agentury) a NASA i další kosmické agentury včetně Evropské kosmické agentury (ESA) a Japonské kosmické agentury (JAXA).

Dnešní pohled na kosmický výzkum

Dlužno dodat, že z hlediska kosmického výzkumu jsou kosmické stanice jen částí příběhu (nepilotovaným misím se budeme věnovat ve [30. hodině](#) a částečně se k nim vrátíme v druhé polovině plánu). Z této hodiny by si žáci měli odnést mimo jiné povědomí o přínosu kosmického výzkumu, resp. kosmonautiky jako celku.

Praktický přínos kosmického výzkumu a vývoje můžeme vidět dnes jak v kosmonautice samotné, tak ve všedním životě. Příkladů je celá řada: suchý zip, solární panely, filtrace vody, požární detektory, dehydratované potraviny, čističky vzduchu, laptop atd. Leckteré z těchto technologií by, nebýt kosmického průmyslu, byly pravděpodobně vyvinuty později, nicméně právě kosmonautika vývoj těchto zařízení iniciovala nebo zásadně urychlila.

Vztáhneme-li téma hodiny do širšího kontextu hodin předchozích, v obecné rovině lze dnes říct, že kosmický průmysl se zabývá třemi disciplínami, které spolu těsně souvisejí:

- Mapováním povrchu Země a okolního vesmíru
- Komunikací a telekomunikací
- Vědeckovýzkumnými aktivitami

Mapování a komunikace jsme se již dotkli v předchozích hodinách, vědecký přínos kosmického výzkumu je pak samostatným tématem, kterému se budeme věnovat v [následující hodině](#)) zaměřené na ISS.

Shrnutí

Tato hodina je zaměřena na kosmický výzkum, spojený s pilotovanou kosmonautikou, a jeho historický vývoj a celkový přínos. Do jaké míry zahrneme dílčí témata jako projekty Skylab, Saljut nebo orbitální stanice Mir je ke zvážení. Co by si měli žáci odnést z hodiny především, je zasazení příběhu Vladimíra Remka do kontextu projektu kosmických stanic a povědomí o přidané hodnotě kosmonautiky jako celku. Na dnešní pohled na kosmický výzkum navážeme v [následující hodině](#), která bude věnována Mezinárodní vesmírné stanici.

28. a 29. Výzkum ve vesmíru II.

Téma: Mezinárodní vesmírná stanice

Cíl: Seznámit žáky s Mezinárodní vesmírnou stanicí, jejím specifiky a posláním

Přístup k hodině

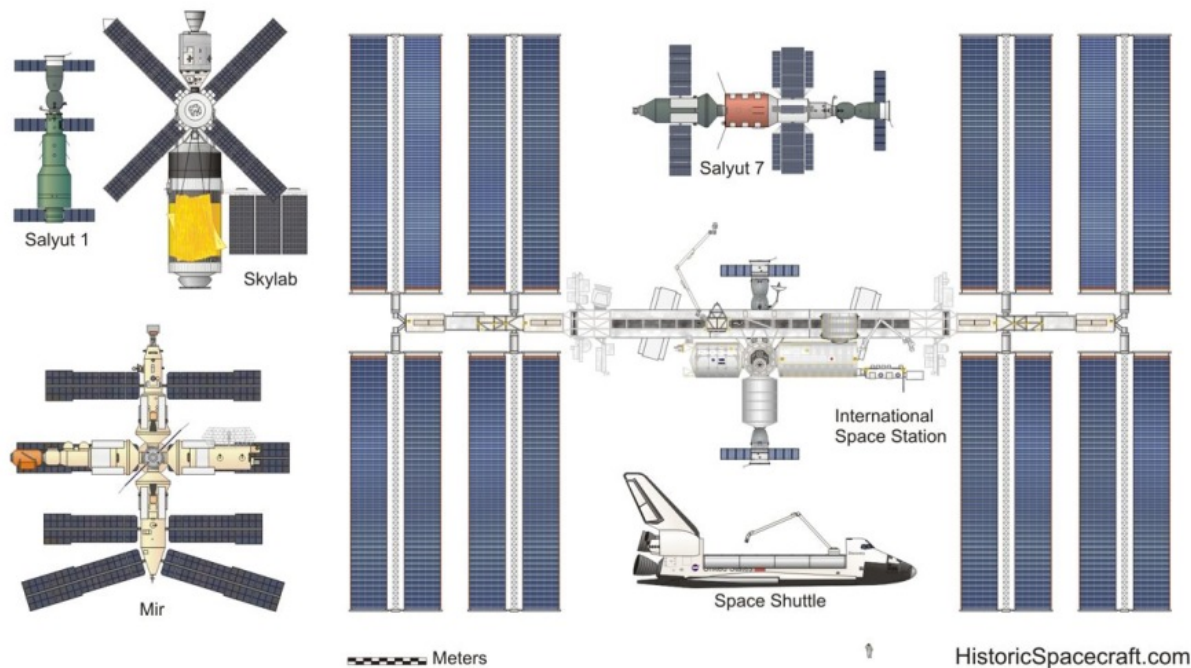
Mluvíme-li dnes o pilotované kosmonautice, jde v naprosté většině o transportní lety na Mezinárodní vesmírné stanici (ISS), která je dnes největší laboratoří ve vesmíru. Dlužno ale dodat, že nejde o jedinou vesmírnou stanici – v době psaní této práce disponuje Čína vlastní vesmírnou stanicí Tchien-kung, která byla vynesena na nízkou orbitu v roce 2021 [124]. Tuto dvouhodinovku nicméně zaměříme výhradně na ISS.

Parametry Mezinárodní vesmírné stanice

Stanice se začala postupně budovat počínaje rokem 1998. Postupným propojením modulů, z nichž naprostou většinu doručily raketoplány Endeavour, Atlantis a Discovery, se stanice rozrostla až do dnešní podoby. ISS je permanentně obydlena od 2. listopadu 2000 s tím, že stálá posádka činí až 7 osob.

Jak si stanici představit?

Jde o skládačku složenou ze segmentů, z nichž každý plní specifický účel. Celkové rozměry stanice jsou 109 x 73 x 27,5 metrů a váží 420 tun. Stanice obíhá Zemi zhruba ve výšce 420 kilometrů, takže jeden oběh trvá 93 minut. Představit si velikost ISS není snadné, proto může pomoci srovnání s jejími předchůdkyněmi nebo s raketoplánem, viz Obrázek 3.52.



Obrázek 3.52: Velikostní srovnání vesmírných stanic a raketoplánu. Převzato z [125].

Specifika života na Mezinárodní vesmírné stanici

Podobně jako u předchozích stanic platí, že z velké části jsou objektem výzkumu na ISS sami kosmonauti. Prostředí stavu beztíže, má celou řadu dopadů na jejich zdraví – klesá jejich krevní tlak, atrofuje svalstvo (ač kosmonauti cvičí 2 až 3 hodiny denně), horší se jejich imunitní systém nebo jsou dlouhodobě vystaveni zvýšené radiaci, hlučnému prostředí a narušení cirkadiálních rytmtů.

Mimo to i život na ISS má celou řadu specifik. Vše je přizpůsobeno omezeným možnostem zásobování a specifikům života ve stavu beztíže. To má dopad na vše, jak na běžné denní

činnosti od elementární hygieny po stravování, tak na technickou vybavenost ISS, například filtrování odpadní vody. Těmto tématům se věnuje například bývalý kanadský astronaut Chris Hadfield ve své knize *Astronautův průvodce životem na zemi* [126], případně na svém youtube kanále [127], celá řada dokumentů s českou podporou, mezi nimi [128][129] nebo cyklus *V kůži astronauta* na youtube kanále *Mobilního planetária* [130].



Obrázek 3.53: Nizozemský kosmonaut André Kuipers vyfocený přes kapku v kapce. Převzato z [131].

Dalším aspektem je pak život po životě na ISS. Na dlouhodobý stav beztíže, ať už může být jakkoli těžko představitelný, si tělo kosmonauta zvyká mnohem rychleji než na návrat do běžného života. Platí tady zhruba jednoduchý příměr, že délka rekonvalescence ve snaze se vrátit zpět do běžného pozemského života odpovídá zhruba délce pobytu na orbitální stanici – tělo si musí zvyknout na to, že běžné činnosti, pro něž nebylo třeba námahy ve stavu beztíže, vyžadují v pozemském prostředí mnoho sil.

Sami kosmonauti procházejí důkladným výběrem, který zohledňuje jejich fyzické a charakterové predispozice pro pozici kosmonauta. Následuje mnohaletý výcvik ve snaze připravit kosmonauty na prostředí stavu beztíže a na jejich náplň na ISS. Kosmonauti mají obvykle za sebou již bohatou vědeckou, inženýrskou nebo armádní kariéru a do kosmu se vydávají na vrcholu své kariéry (věk kosmonautů běžně přesahuje 40 i 50 let). Kosmonauti jsou vždy velmi dobře jazykově vybaveni a jsou svým zaměřením spíše multidisciplinární než úzce zaměření.

Poslání Mezinárodní vesmírné stanice

ISS lze rozdělit na dvě části – provozní a vědeckou. Vědeckou část tvoří především moduly, které sestávají z laboratoří, ať s obecným nebo konkrétním zaměřením. Výzkum realizovaný na ISS můžeme pro naše účely rozdělit do následujících kategorií:

- Biomedicína a biotechnologie, kdy se pozornost zaměřuje jak na kosmonauty samotné, tak na řízené experimenty realizované především v evropském modulu Columbus.
- Materiálové vědy, například vývoj výrobních metod pro stav beztíže, resp. pro mikrogravitaci.
- Kvantová fyzika, kdy se zkoumá kupříkladu chování kvantových mechanismů v teplotách blízkých absolutní nule.
- Astronomie zaměřující se kosmické záření a temnou hmotu.
- V neposlední řadě také behaviorální vědy, kde jsou objektem studia opět kosmonauti, nicméně v kontextu jejich fungování v definovaném kolektivu na omezeném prostoru.

V reálném čase probíhají na ISS desítky až stovky experimentů různé délky. K těmto tématům lze nalézt celou řadu podkladů, a to ať už sumarizačních [132], rekapitulačních [133] nebo konkrétně zaměřených na jednotlivé experimenty [134].

Z pozice člena ESA se účastní dění na ISS i Česká republika, a to jak v rámci realizací experimentů [135], tak i na úrovni vývoje hardwaru pro experimenty Biomission, které se realizují v miniaturizované laboratoři nazývané Kubik. Tyto experimenty zkoumají například vrozenou a adaptivní imunitu nebo testují technologie pro filtrování vody [136].



Obrázek 3.54: Italský kosmonaut Luca Parmitano a Kubik – standardizované zařízení na realizaci experimentů v modulu Columbus. Převzato z [137].

Z hlediska didaktického není snadné jednoznačně říct, jak hodinu zaměřenou na ISS uchopit. Všechna tři podtémata (parametry ISS, život na ISS, výzkum na ISS) mají potenciál velkého multioborového přesahu a se správným přístupem mohou působit motivačně. Na druhou stranu je snadné sklouznout k tématům, která nejsou úplně fyzikální.

Neméně zajímavým tématem je profese kosmonauta. Kosmonauty se stávají lidé, kteří jsou vyrovnaní, důslední a trpěliví, kteří jsou si vědomi všech nástrah této profese. Kosmonautům jde především o úspěch mise, resp. odvětví, jako celku, který nadřazují nad své osobní cíle. Z tohoto úhlu pohledu je tak profese kosmonauta spíše posláním než klasickou profesí. Cílem hodiny by mělo být působit na žáky motivačně, na druhou stranu zároveň je třeba vyhnout se budování iluzorní představy, že kariéra kosmonauta je určena primárně dobrodružně laděným odvážlivcům. Naopak, je to profese především pro klidné a vyrovnané povahy s širokým rozhledem. Pro přiblížení lze žákům předložit test na stránkách NASA [138].

Shrnutí

Mezinárodní vesmírná stanice je vděčné téma, ke kterému toho bylo mnoho napsáno, ale v rámci vzdělávacího systému pro něj standardně není prostoru, ač se těší velké pozornosti jak žáků, tak široké veřejnosti. K tématu ISS lze přistoupit rozličnými způsoby, čímž dává nebývalou volnost ve srovnání s jinými tématy, na druhou stranu vyžaduje určitou multidisciplinární připravenost učitele. Žáci by si měli odnést z hodiny především poznání, co je účelem ISS a jak široká paleta vědeckého výzkumu se zde realizuje.

30. Výzkum ve vesmíru III.

Téma: Nepilotované mise

Cíl: Přiblížit žákům přínos a specifika nepilotovaných misí za hranicí LEO

Přístup k hodině

Téma poslední hodiny první poloviny vzdělávacího plánu v lečtem plní funkci tematického přemostění směrem k následujícím hodinám věnovaným Sluneční soustavě. V této hodině se obšírně zaměříme na nepilotované mise spojené s průzkumem Sluneční soustavy.

Specifika nepilotovaných misí

Nepilotované vědeckovýzkumné mise lze rozdělit do dvou kategorií – družice, kterým jsme se věnovali v [19. hodině](#) a sondy, kterým se budeme věnovat nyní.

Sondy jsou vyslány na svoji misi v naprosté většině případů bez očekávání, že se v jakékoli podobě vrátí na Zemi. Jejich cílem je zmapovat konkrétní lokalitu nebo fenomény na místech, k jejichž dosažení je třeba mise, která trvá několik let. Na sondy jsou proto kladeny vysoké nároky z hlediska spolehlivosti (silná radiační ochrana) a jejich mise, především z hlediska trajektorie letu, jsou precizně plánovány na mnoho let dopředu. Na druhou stranu umožňují použití technologií, které z bezpečnostních důvodů není možné u družic použít, například termoelektrické generátory s dlouhou životností, které fungují na bázi radioaktivního rozpadu některého z transuranů, nejčastěji plutonia, jenž se připravuje uměle bombardováním uranu v jaderných reaktorech.

Zde se dostáváme k velice vděčnému tématu výroby elektřiny ve vesmíru na mnohaletých nepilotovaných misích, resp. do budoucna i těch pilotovaných. Téma je to velice zajímavé, nicméně složité ve středoškolském kontextu a s ohledem na dlouhodobý horizont i v zásadě více vizionářské než vědeckotechnické. Chceme-li se do tohoto tématu opřít, mohou nám být oporou například přednášky Vladimíra Wagnera [[139](#)][[140](#)][[141](#)]. Doporučuji nezabíhat příliš do podrobností – postačí sdílet informaci, že z důvodů délky trvání těchto misí využíváme stále zdroje na bázi radioaktivního rozpadu. K tomuto tématu se vrátíme ještě v [37. hodině](#).

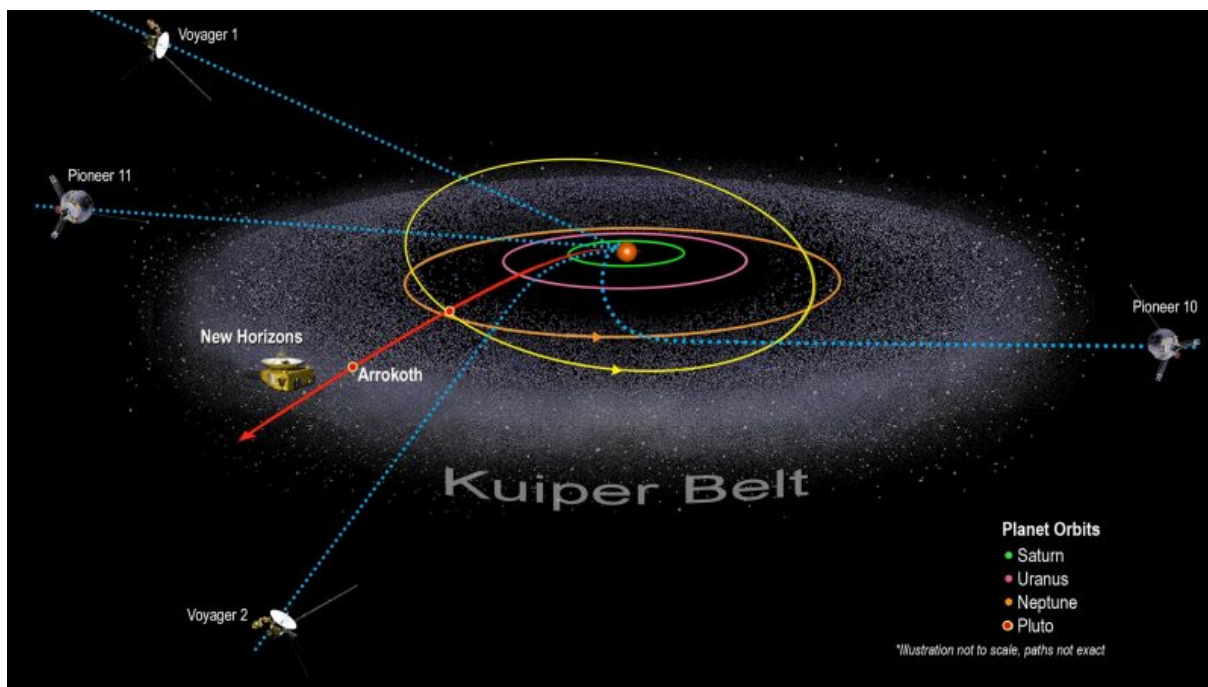
Mise, jež nemíří na některou z kamenných planet (Merkur, Venuše, Mars), můžeme pro naše účely rozdělit do dvou kategorií:

- Mise, jejichž cílem je zkoumání konkrétní planety, měsíce planety případně Slunce.
- Mise, které míří mimo Sluneční soustavu, jejich cílem je primárně mapování prostředí na periferii Sluneční soustavy, sekundárně průzkum vnějších planet.

Mimo toto dělení pak stojí sondy programu Pioneer, které se zaměřovaly na vnitřní i vnější planety Sluneční soustavy i na Slunce.

Do první kategorie se řadí například sondy Cassini-Huygens, Juno, Solar Orbiter nebo Rosetta a Phillae. K těmto sondám se vrátíme v pozdějších hodinách zaměřených na planety vnější Sluneční soustavy ([39. hodina](#)), na komety ([41. hodina](#)) a na Slunce ([45. hodina](#)).

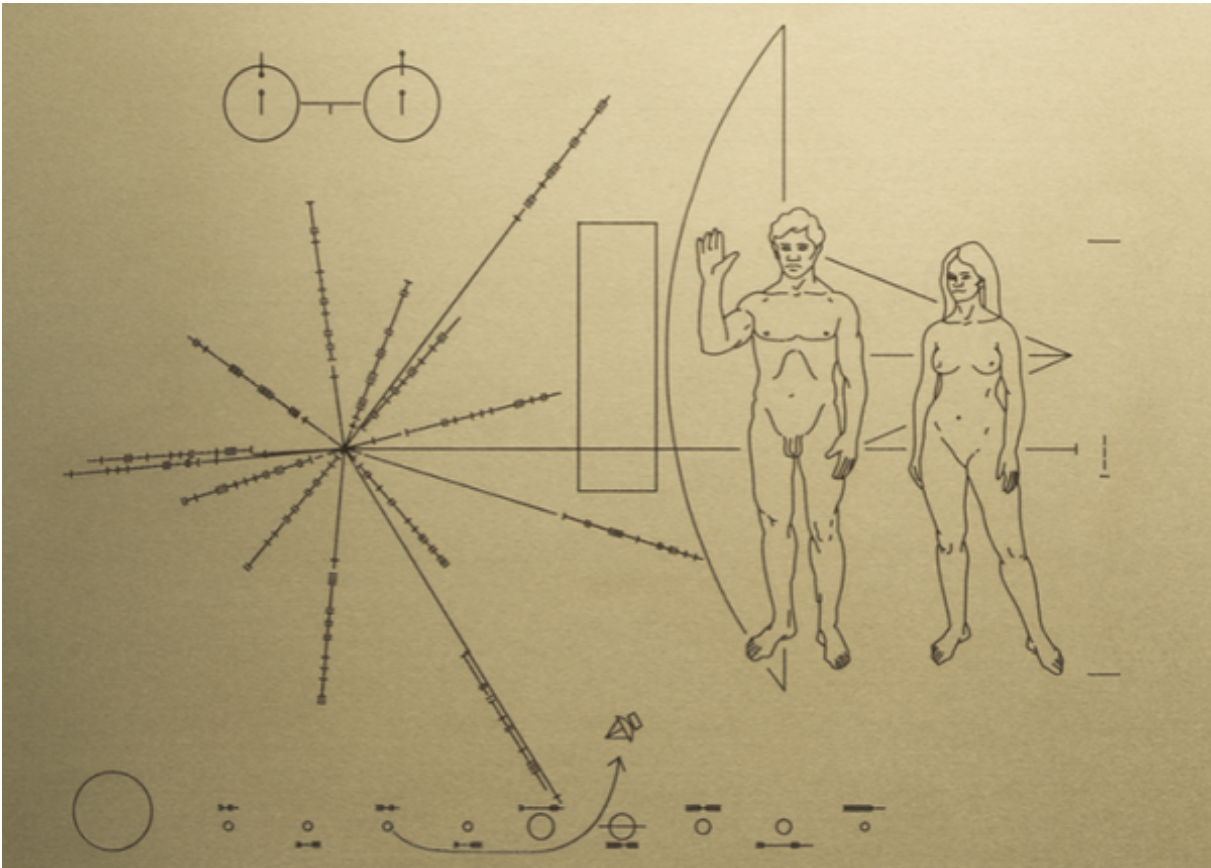
Nyní se zaměříme na sondy z druhé kategorie, mezi něž se řadí sondy Voyager 1, Voyager 2 a New Horizons, dále pak Pioneer 10 a 11. Všechny tyto sondy už jsou daleko za orbitou poslední planety Neptun i za hranicí Kuiperova pásu – pásu planetek na periferii Sluneční soustavy, viz [Obrázek 3.55](#). Díky těmto sondám byla realizována první detailnější pozorování vnějších planet, byly proměřeny vlastnosti polí na periferii Sluneční soustavy a testovány urychlující gravitační manévry (viz [31. hodina](#)).



Obrázek 3.55: Vizualizace polohy sond mířících pryč ze Sluneční soustavy. Převzato z [142].

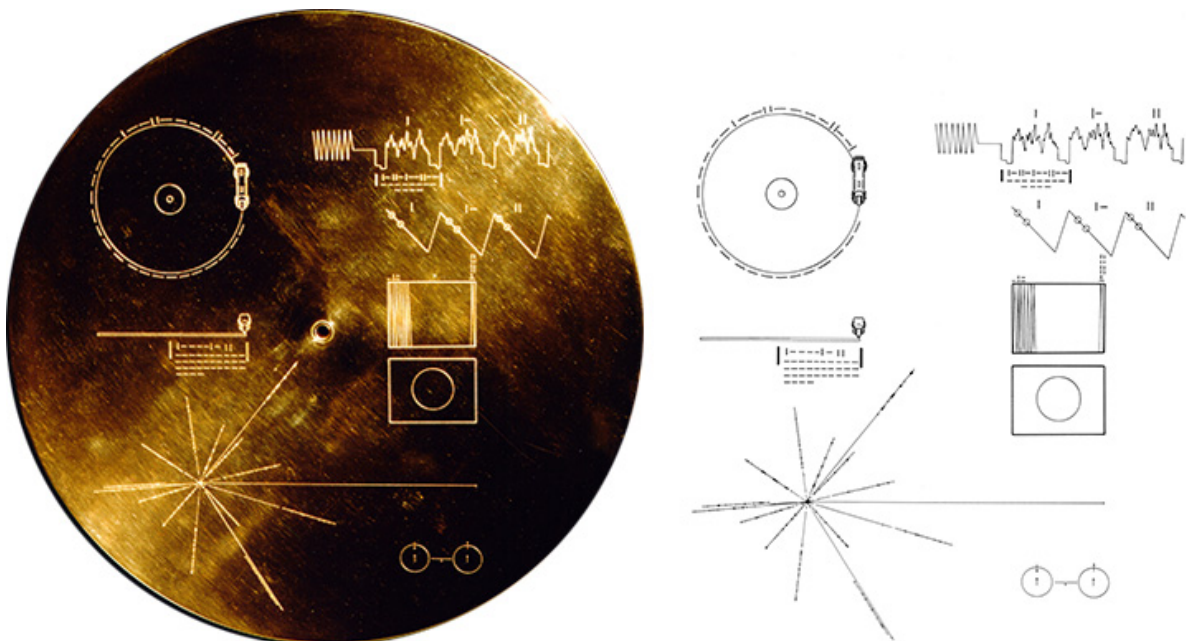
Ze sond Pioneer 10 a Pioneer 11, vypuštěných v roce 1972, resp. v roce 1973, už dnes nedetekujeme žádný signál. Sondy Voyager 1 a Voyager 2, které jsou výrazně větší (startovních 815 kg Voyageru oproti 260 kg Pioneeru) mají dostatek energie zhruba do roku 2025. Kontakt se sondami je možný především díky stále se zlepšující komunikační technice, jejíž vývoj stíhá držet krok se slábnoucím signálem ze sond [143][144]. K vědeckému přínosu sond Voyager 1 a Voyager 2 se ještě vrátíme ve 2. polovině vzdělávacího plánu.

Sondy Pioneer i Voyager s sebou nesou zlatou plaketu s poselstvím pro mimozemské civilizace. Na obrázku 3.56 je poselství nesené sondou Pioneer, které vzbudilo ve své době kontroverze. Plaketa obsahuje informace o vlastnostech vodíku (nejrozšířenějšího prvku ve vesmíru), o lokalizaci Sluneční soustavy, o parametrech Sluneční soustavy, resp. trajektorii letu sondy využívající gravitačního praku Jupiteru, a znázornění lidských postav v relativním srovnání s velikostí sondy.



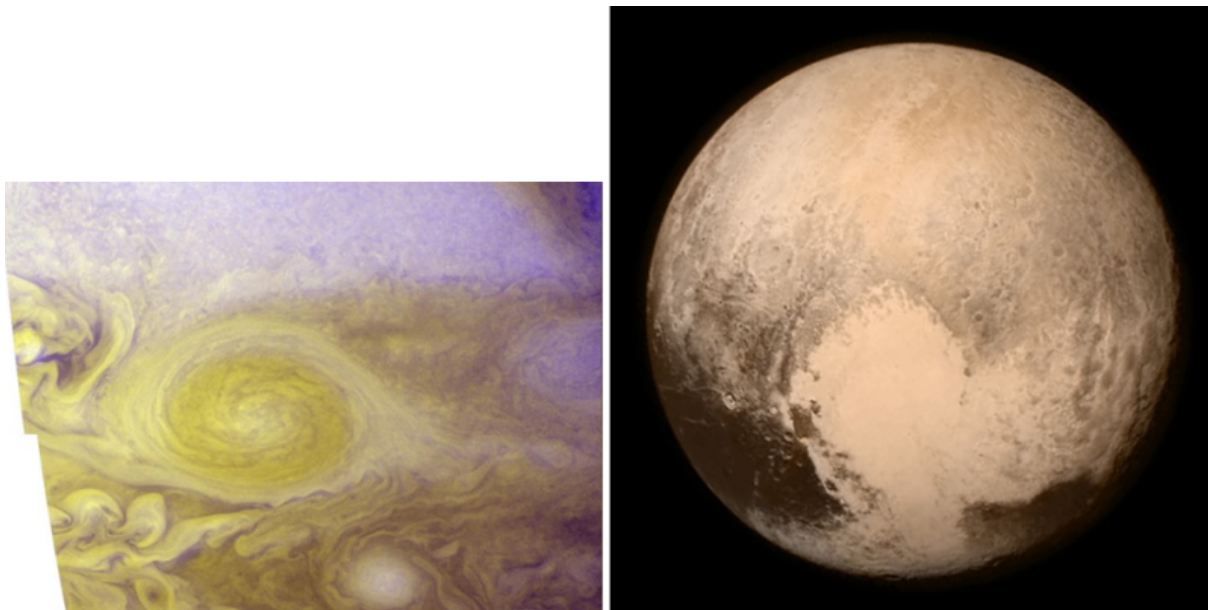
Obrázek 3.56: Plaketa umístěná na sondě Pioneer 10. Převzato z [145].

Vedle toho, sdělení na plaketě sond Voyager, Obrázek 3.57, je mnohem techničtějšího charakteru. Obsahuje zvukové a obrazové materiály odkazující na kulturní, vědecký i technický odkaz lidstva. Na opačné straně je podobně jako u Pioneeru odkaz na lokalizaci Sluneční soustavy a vlastnosti vodíku, k němu je připojen postup k přehrání zvukového a obrazového materiálu.



Obrázek 3.57: Plaketa umístěná na sondě Voyager. Převzato z [146].

Vedle toho sonda New Horizons podobnou plaketu nenesí. New Horizons byla vypuštěna v roce 2006, tedy více než 30 let po sondách Voyager. Vybavena je proto mnohem pokročilejší technikou, která umožnila pořízení kvalitních snímků Jupiteru a Pluta.



Obrázek 3.58: Snímky sondy New Horizons: Vlevo snímek Jupiteru pořízený 1. května 2007, vpravo snímek Pluta pořízený 13. května 2015. Časové rozmezí těchto fotek samo o sobě ilustruje časovou náročnost cestování mezi vnějšími planetami. Převzato z [147] a [148].

Sonda New Horizons má dostatek energie do roku 2037, proto je její budoucnost stále otevřená a vědecké týmy plánují její další zaměření. Naposledy šlo o planetku Ultima Thule z Kuiperova pásu, kterou zmapovala v roce 2019 [149][150]. V době psaní této diplomové práce je budoucí zaměření sondy nejisté.

Příběh sond mířících mimo Sluneční soustavu úzce souvisí s diskuzemi o budoucnosti průzkumu, resp. cestování na velké vzdálenosti. V širším kontextu se tímto tématem zabývá například přednáška Tomáše Příbyla [151], která staví příběh sond Pioneer 10, Pioneer 11 a Voyager do kontextu nerealizovaných a hypotetických projektů.

Shrnutí

Téma sond mířících mimo Sluneční soustavu dobře ilustruje, že kosmonautika zdaleka není jen o misích v trvání několik dní až několika let, ale i o misích na celé generace, které svým způsobem nemají definovaný konec.

Tímto se také uzavírá tematický celek a celá první polovina vzdělávacího plánu. Otevírá se tím o prostor pro testování žáků, které by v kontextu předchozích hodin mělo být zaměřeno především na vědomostní otázky.

Konec 1. poloviny plánu.

31. Doplnění látky klasické mechaniky

Téma: Moment hybnosti a zákon zachování hybnosti

Cíl: Doplnit žákům znalostí, které využijeme v pozdějších hodinách

Přístup k hodině

Některé kapitoly klasické mechaniky jsou na středních školách upozaděny nebo úplně přeskačovány. Typickým příkladem je moment hybnosti, kolem něhož se točí tato hodina a který je pro astronomii klíčový. Tato hodina bude čistě fyzikální a má schopnost stát naprosto samostatně. To s sebou nese určitou výhodu v tom, že ji lze v rámci plánu zařadit i na jiná místa.

Moment hybnosti

Definice říká, že moment hybnosti je vektorová veličina popisující dynamický rotační pohyb tělesa. Značí se L a jedná se o vektorový součin průvodiče r a hybnosti p . Vyjádřeno rovnicí:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} \quad (3.17)$$

Moment hybnosti je ve středoškolské fyzice opomíjen natolik, že v Přehledu středoškolské fyziky od nakladatelství Prometheus [39] není ani zmíněn.

Proč bychom se měli momentu hybnosti věnovat?

Protože s ním souvisí dva naprosto zásadní důsledky, které jsou v těsném vztahu:

- 2. impulsová věta, která říká, že změna momentu hybnosti soustavy se rovná součtu momentů sil, které na ni působí.
- Zákon zachování momentu hybnosti, jenž říká, že nepůsobí-li na soustavu žádný moment sil, moment hybnosti se zachovává.

Na první pohled tu vidíme analogii se zákonem zachování hybnosti a 1. impulsovou větou. Při letmém pohledu na základní vztah pro moment hybnosti lze dospět k závěru, že za předpokladu, že je moment hybnosti zachován, přesuneme-li hmotu od nebo k ose rotace, změní se povaha rotace. Otázkou je: Jak?

Vztah pro moment hybnosti, který tyto principy lépe zohledňuje, je složitější a není tak přímočarý, jako definiční vztah. Má podobu:

$$\vec{L} = I \cdot \vec{\omega} \quad (3.18)$$

kde I je moment setrvačnosti a ω je úhlová rychlost. Uchopit tento vztah na střední škole plnohodnotně není snadné, protože moment setrvačnosti je tenzor (matice 3x3), zatímco úhlová rychlost a moment hybnosti jsou vektory. Naší ambicí nyní není řešit násobení matic, ani se bavit detailně o deviačních momentech (nediagonální prvky matice I). My se spíše na tento vztah zaměříme kvalitativně.

Vyjděme ze situace, kdy se moment hybnosti zachovává, tedy součin momentu setrvačnosti a úhlové rychlosti je konstantní. K čemu to může vést:

- Přesuneme-li hmotu ve směru osy kolmé k ose otáčení blíže k ose otáčení, zmenší se tím moment setrvačnosti a zvýší se rychlost otáčení.
- Naopak přesuneme-li hmotu po stejné ose dále od osy otáčení, zvětší se moment setrvačnosti a sníží se rychlost otáčení.
- Přesun hmoty jakkoli jinak od osy otáčení způsobuje změnu tzv. deviačních momentů a vyvolá síly, které budou nutit objekt k rotaci kolem další osy otáčení.

Co tím máme na mysli, můžeme snadno ukázat demonstrativním experimentem. Svépomocí můžeme zákon zachování momentu hybnosti demonstrovat na otáčející se židli, na kolotoči [152] nebo v pokročilé formě na kole zavěšeném na laně [153].

S internetovými zdroji to ale obecně u tohoto tématu není jednoduché. Jde sice nalézt videa, která popisují problematiku důkladně a mohou být inspirací pro experimenty ve výuce [154][155][156], ale ty už se tolik nevěnují širšímu kontextu. Aplikací a důsledků je přitom celá řada.

Všechny aplikace se dají shrnout pod pojmem setrvačníky. Setrvačníky se snaží maximálně zachovat moment hybnosti tím, že akumulují kinetickou energii. Aplikace lze rozdělit do třech kategorií:

- Stabilizace rychlosti otáček
- Gyroskopický efekt
- Uložení energie

Konkrétních uplatnění je celá řada, od hraček pro děti až po skladování elektrické energie. Pro nás budou klíčové aplikace související s astronomií:

- Za setrvačnick, resp. gyroskop, se dá považovat celá planeta. Planeta se chová podobně jako káča a podobně jako u káči se i u ní objevuje gyroskopická precese. Na příkladu planety Země se tomuto tématu budeme věnovat v [35. hodině](#).
- Gyroskopem může být i hvězda. V hodinách u konce vzdělávacího plánu budeme probírat konec životního cyklu hvězd. Už nyní, lze ale dospět k závěru, že zhroutí-li se hvězda do sebe, zrychlí se její rotace.
- S předešlým souvisejí tzv. gravitační manévry, při nichž je sonda stažena gravitačním polem planety. Při opouštění gravitačního pole díky tomu sonda nabere nebo ztratí rychlost úměrnou rychlosti rotace planety kolem Slunce, přičemž změní směr letu vůči Slunci, což je klíčové k nasměrování sond k jinak těžko dosažitelným destinacím.
- Gyroskopy slouží ke stabilizaci polohy [157] a směru družic nebo i celých kosmických stanic. Toto téma není úplně triviální [158].

Mimo to je i celá řada dalších aplikací, které se projevují v běžném životě, ať už jde o jízdu na kole, kterou zmiňuje jedno z dříve citovaných videí, let helikoptéry [159] nebo využití v pohonných jednotkách ke korekci výkonových výkyvů.

Shrnutí

Téma momentu hybnosti a zákona zachování momentu hybnosti lze rozvíjet různými způsoby a z velké části jej lze postavit na experimentech. Smyslem hodiny je především propojit toto opomíjené téma s astronomií, a demonstrovat moment hybnosti jak na aplikační úrovni, tak ve vztahu k chování nebeských těles. Téma dává velkou volnost i tím, že může být zařazeno ve vzdělávacím plánu dříve.

32. Sluneční soustava I.

Téma: Parametry Sluneční soustavy

Cíl: Seznámit žáky s obecnými informacemi o Sluneční soustavě

Přístup k hodině

Sluneční soustava je největším tematickým celkem 2. poloviny vzdělávacího plánu. Jde o téma, které je probíráno na základních školách a nižším stupni víceletých gymnázií. Díky tomu mají o Sluneční soustavě žáci základní povědomí, byť jejich znalosti nejsou obvykle propojeny s fyzikou. Cílem následujících hodin je především rozšířit stávající znalosti a zanést je do hlubšího fyzikálního kontextu. Přestože téma obvykle není zařazeno do výuky na čtyřletém gymnáziu, v učebnicích je mu věnována pozornost [7][39][40], a o učebnice se proto ve výuce lze částečně opřít.

Obecně o Sluneční soustavě

Sluneční soustavu, jejíž jsme součástí, tvoří Slunce, 8 planet, okolo 150 měsíců a další tělesa menších rozměrů jako jsou trpasličí planety, planetky a komety [160].

Mohli bychom hned zkraje zmínit celou řadu parametrů Sluneční soustavy, nicméně není cílem výuky, aby žáci memorovali tvrdá data bez hlubšího kontextu. Spíše než to, je třeba zmínit nejdůležitější kvalitativní informace, o něž se dále opřeme:

- Centrem Sluneční soustavy je mateřská hvězda – Slunce, jehož hmotnost je 99,87 % hmotnosti Sluneční soustavy. Hmotnost Slunce svojí gravitací udržuje planety na jejich oběžných drahách, neznamena to ale, že by Slunce bylo statické. V důsledku 3. NPZ se i poloha Slunce vzhledem ke středu Sluneční soustavy mění.
- Ani Sluneční soustava jako celek se nedá považovat za statickou, protože rotuje kolem středu galaxie a to s periodou zhruba 200 milionů let.
- Planety obíhají Slunce (téměř) v jedné rovině, kterou nazýváme ekliptika (ta je ztotožněna s rovinou oběhu Země kolem Slunce). Směr oběhu planet je ve smyslu rotace mateřské hvězdy, což je obvyklé i v jiných systémech.
- Soustava je stará 4,5 až 5 miliard let, tedy zhruba třetinu života vesmíru a obdobně dlouho, bude ještě fungovat v podobě srovnatelné s tou dnešní. Poté Sluneční soustava zanikne, protože dohoří palivo ve Slunci, Slunce se zhroutí do bílého trpaslíka, zatímco odhodí vnější obálky, čímž vznikne tzv. planetární mlhovina. O tom více v 51. hodině.
- Definovat rozměry Sluneční soustavy není snadné. Planetární soustava sahá do vzdálenosti 50 astronomických jednotek (au), pásma komet do vzdálenosti 1000 au. Mluvíme-li o relativním srovnání s velikostí Sluneční soustavy, jde o srovnání s rozměry planetární soustavy.
- Systémů jako je Sluneční soustava, je ve vesmíru nespočetně. Jen v naší galaxii je odhadem 100 miliard hvězd, kolem kterých obíhají planety, které nazýváme exoplanetami.

Speciální pozornost bychom měli věnovat specifikům Sluneční soustavy, které mají zásadní vliv na život na Zemi. Na jednu stranu život ve vesmíru nemusí být vzácný, protože živé organismy se dominantně skládají ze 4 prvků (vodík, kyslík, uhlík, dusík), které patří k 5 nejčastěji se vyskytujícím prvkům ve vesmíru (navíc helium). Na druhou stranu Sluneční soustava má i specifika, která nejsou až tak typická:

- Tvoří ji jedna centrální hvězda (mnohem běžnější je, že v centru soustavy je dvojhvězda nebo více hvězd), která je tak akorát velká, aby měla dostatečný zářivý výkon a zároveň délku života v řádu miliard let.
- Velké planety (plynní obři) na periferii Sluneční soustavy plní roli „štítů“ – přitahují nebo odklánějí potenciálně nebezpečné planetky.

- Je ve vhodné vzdálenosti od středu galaxie – blíže ke středu bychom byli v regionu většího výskytu hvězd, což by zvyšovalo riziko kolizí nebo gravitačního roztrhání soustavy, dále od centra galaxie je prostor natolik prázdný, že by se patrně neměla soustava z čeho zformovat [161].

Orientace ve Sluneční soustavě

Žáci obvykle dokáží vyjmenovat všech 8 planet, mnohdy navíc s dovětkem v podobě Pluta. Pluto bylo ze seznamu planet vyřazeno na valném shromáždění Mezinárodní astronomické unie v Praze v roce 2006 a je zařazeno mezi trpasličí planety. K tomuto tématu se ještě vrátíme ve [41. hodině](#).

Pro účely měření ve Sluneční soustavě používáme obvykle astronomickou jednotku (au), která je definována jako střední vzdálenost mezi Sluncem a Zemí. Převodní vztahy jsou:

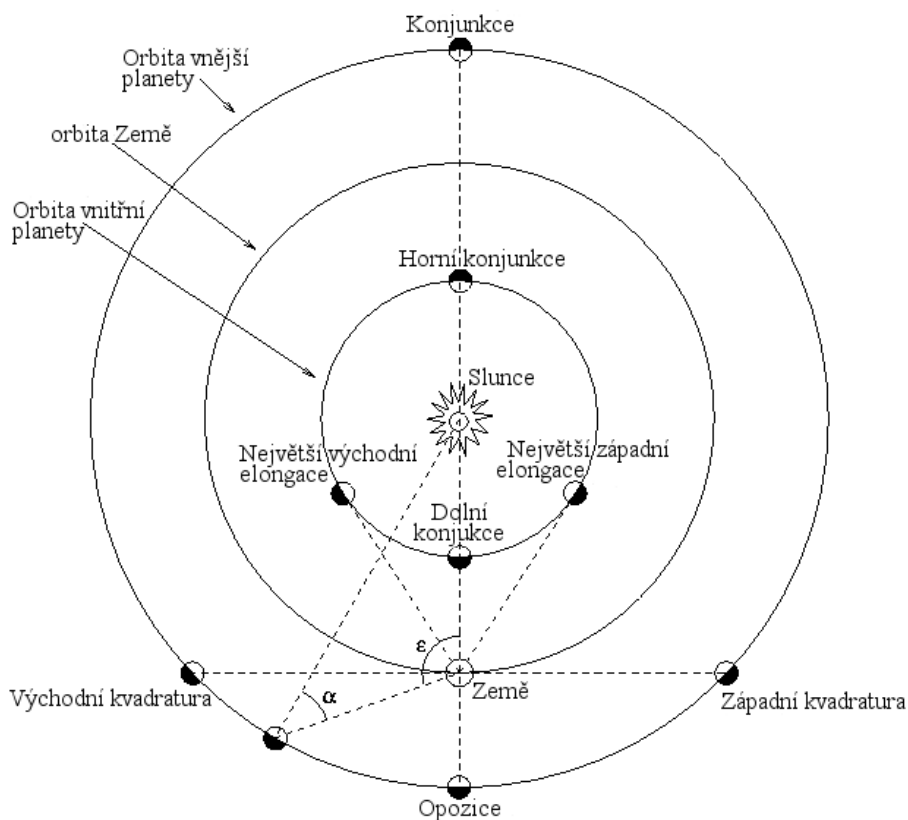
- 1 au = 149 597 870,7 km a odpovídá přibližně 500 světelným sekundám
- 1 světelný rok (značíme ly) je roven zhruba 63 250 au

Je ke zvážení, zda v této hodině zavádět světelné sekundy, resp. roky. Tématům svázaným z rychlostí světla se budeme věnovat v dalších hodinách, nicméně už zde se může hodit zavést, že rychlost světla ve vakuu je fundamentální fyzikální konstanta, jejíž hodnota je přibližně $3 \cdot 10^8$ m/s, jinými slovy světlu trvá vzdálenost ze Země na Měsíc jen o trochu více než 1 sekundu.

Dříve než se zaměříme na jednotlivé planety, hodí se je rozdělit do dvou kategorií:

- **Kamenné planety** (Merkur, Venuše, Země a Mars), z nichž největší je Země. Kamenné planety jsou zároveň vnitřními planetami a od vnějších planet je odděluje pás planetek, v němž se nachází trpasličí planeta Cerés, která se dá považovat za nepovedenou planetu.
- **Plynní obři** (Jupiter, Saturn, Uran a Neptun), kteří jsou zhruba čtyřnásobně až desetinásobně větší než Země, což vede k tomu, že gravitace je dostatečná k zachycení lehkých prvků a tyto planety proto (patrně) nemají pevný povrch. Plynní obři jsou zároveň tzv. vnějšími planetami

Dělit planety na vnitřní a vnější můžeme i podle jiného klíče, kdy za vnitřní planety se považuje Merkur a Venuše, tedy planety, které jsou blíže Slunci než Země. S tímto dělením jsou spojené pojmy konjunkce, elongace, opozice a kvadratura, které se využívají pro pozorování planet, viz [Obrázek 3.59](#).



Obrázek 3.59: Vymezení pojmů konjunkce, elongace, opozice a kvadratura. Převzato z [162].

Na Obrázku 3.59 lze dobře demonstrovat Galileův důkaz o tom, že Země obíhá kolem Slunce, který se opíral o pozorování fází Venuše, viz 14. hodina. Blíže lze vzájemné polohy planet demonstrovat na interaktivních nástrojích [163][164].

V této obecné části ještě zmíníme, že všechny planety spojuje, že mají vlastní rotaci. Jde o důsledek zákona zachování momentu hybnosti z doby jejich formování. Perioda rotace se různí, nicméně existuje negativní korelace mezi periodou rotace kolem vlastní osy planety a její velikostí – nejpomaleji rotuje Venuše a Merkur, jejichž den trvá déle, desítky pozemských dní, zatímco nejkratší den je na Jupiteru, kde trvá necelých 10 hodin. K tématu vlastní rotace planet se budeme ještě vracet v následujících hodinách, nicméně už nyní může sdílet srovnání mezi jednotlivými planetami [165].

Shrnutí

Cílem hodiny je seznámit žáky se základními charakteristikami Sluneční soustavy a propojit je do souvislostí. Spoustu dílčích témat lze zařadit do dalších hodin, kde se budou obecné informace aplikovat. V následujících hodinách budeme procházet celou Sluneční soustavou. Začneme u Měsíce a Země, následovat budou další kamenné planety, plynní obři, planetky a komety až se dostaneme ke Slunci, resp. k hvězdám.

33. a 34. Sluneční soustava II. - Původ Země

Téma: Vznik a vývoj Země

Cíl: Nastínit žákům, kde se vzala Země a proč vypadá, jak vypadá

Přístup k hodině

Tuto dvouhodinovku zaměříme na původ Země. Jde o téma, jenž má z celého vzdělávacího plánu největší multidisciplinární přesah, neb se dotýká v podstatě všech přírodních věd od geologie, přes biologií až po chemii. Je ke zvážení, kterým dílčím tématům se věnovat a do jaké míry téma propojit s dalšími předměty. Proto je v mezích této hodiny zmíněno velké množství informací a na učiteli je, aby zvolil optimální přístup s ohledem na konkrétní třídu.

Vznik Země

Země vznikla zhruba před 4,5 miliardami let z prachu, který obíhal rodící se Slunce. Kde se prach vzal? Patrně šlo o mlhovinu, která byla pozůstatkem po zaniklé hvězdě. Vznik Země byl pomalý proces, kdy prostřednictvím vzájemných srážek vznikaly větší a větší objekty, které pak byly schopny svojí gravitací nabalit na sebe další kamenná tělesa. Tímto procesem vznikly všechny kamenné planety.

Nejstarší horniny nalezené na Zemi jsou staré 4 miliardy let, nicméně tyto nálezy jsou velice raritní. Reálně toho nevíme mnoho o prvních třech miliardách let Země – v té době nebyly na Zemi složitější organismy, nevíme, jak fungovala tektonika nebo jaké byly podmínky na Zemi [166]. Co ale víme je, že na formování Země měl zásadní vliv Měsíc.

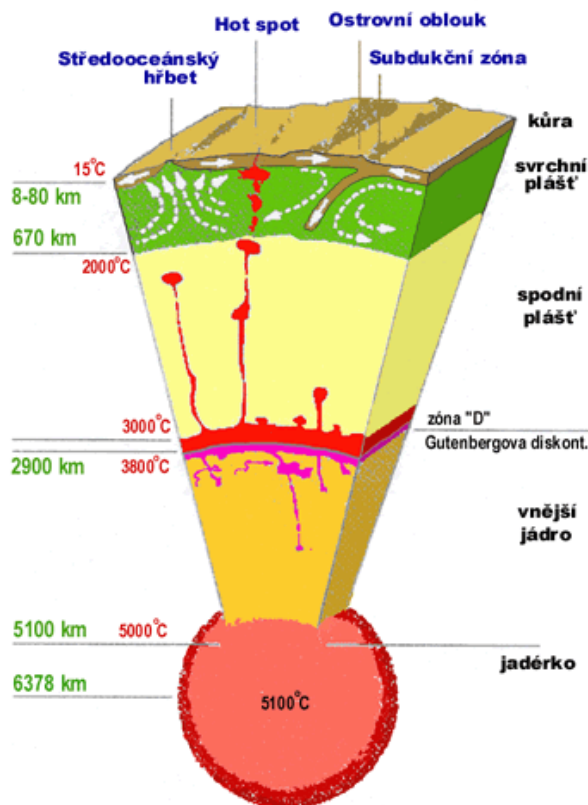
System Země-Měsíc je mnohdy považován za dvojplanetu [167]. Měsíc má zhruba čtvrtinový průměr ve srovnání se Zemí a je přibližně 80x lehčí. To z něj dělá největší a nejtěžší přirozenou družici v poměru k mateřské planetě ve Sluneční soustavě. Zemi s Měsícem také pojí společná historie, kdy Měsíc patrně vznikl jako produkt srážky rodící se Země s jiným objektem. Obecně přijímaná teorie říká, že se Země srazila s objektem zhruba velikosti Marsu, nicméně dnes neumíme rozsoudit, jestli tomu bylo tak, nebo šlo o srážku dvou objektů srovnatelné velikosti, srážku s mnohem větším objektem, než je Země nebo sled více srážek s malými tělesy [168][169]. Co víme ale jistě je to, že Měsíc a Země vznikly ze stejného materiálu. Jedním z důkazů této teorie je, že Měsíc má velice podobné složení jako plášť Země (ve složení hraje dominantní roli křemík), zatímco jádro Země tvoří především železo. Za toto poznání vdčíme velkou měrou programu Apollo.

Složení Země

Země je planeta s největší hustotou ve Sluneční soustavě, konkrétně v průměru 5,5 g/cm³. To je způsobeno velkým výskytem železa, především ve vnitřním a vnějším jádru. Jádro obklopuje tekutý plášť, po němž se pohybují litosférické desky. Tyto poznatky pocházejí především z 20. století a opírají se o seismická měření [170]. Se složením Země souvisejí dva zásadní aspekty, které je třeba zmínit a na které se budou patrně žáci sami ptát:

- Nitro planety je horké – odhaduje se, že v jádře dosahuje teplota okolo 5100 °C. To neumíme změřit, je to spíš kvalifikovaný odhad, nicméně už v nejhlubším dole na světě (Mponeng v Jihoafrické republice), který má hloubku „jen“ 4 km, je teplota hornin okolo 60 °C [171]. Nabízí se otázka: Proč je v nitru Země tak vysoká teplota? Odpovědi jsou 3, ale ani jednu není snadné na střední škole plnohodnotně vysvětlit. Jde o teplo nakumulované z doby vzniku planety, je to důsledek beta rozpadů radioaktivních prvků v jádře (především thoria, uranu a izotopů draslíku) a jde o projev tření mezi vnitřním a vnějším jádrem [170][172]. To nás dostává k druhému bodu.
- Magnetické pole Země. Geomagnetické pole vzniká prouděním tekutého vnějšího jádra kolem pevného vnitřního jádra, čímž vznikají proudové smyčky generující magnetické pole

[170]. Vzhledem k tomu, že žáci v této fázi studia nejsou seznámeni se elektromagnetismem, ani s pokročilou dynamikou, není vhodné u tohoto tématu do podrobností (souvislosti s Coriolisovou silou, Bullardovým geodynamem apod. [170]). Spíše než princip, jsou zde důležité důsledky. Magnetické pole Země plní ochrannou funkci, protože nepouští k povrchu nabitě částice, resp. beta záření, proto by bez něj patrně nebyl vyspělý život na Zemi možný.



Obrázek 3.60: Řez nitrem Země. Převzato z [173].

Vývoj Země

Voda se na Zemi pravděpodobně dostala díky planetkám. Voda sama není vzácnou sloučeninou ve vesmíru – nikde ve Sluneční soustavě se nevyskytuje v takové míře jako na Zemi, nicméně objevena byla i na tak nehostinném místě jako je povrch Merkuru nebo Marsu [174].

Zároveň voda se nachází i pod povrchem Země – polovina zásob vody se nachází v plášti, kam se dostává díky deskové tektonice, na jejíž dynamiku má zásadní vliv. Desková tektonika je taktéž klíčová a specifická pro Zemi – díky deskové tektonice se stabilizuje teplota jádra (teplejší jádro způsobí aktivnější deskovou tektoniku), čímž se i stabilizuje magnetické pole Země [170].

Oceán tvoří zhruba 70 % povrchu Země. Přihlédneme-li k tomu, že horniny a nerosty mají vyšší hustotu, než voda nabízí se prostá, ale zásadní a naprosto legitimní otázka: Proč není celý povrch pokryt oceánem o hloubce 4 km?

Za to vdčíme Měsíci a vulkanické činnosti (vyvolané deskovou tektonikou). Měsíc má naprosto zásadní vliv na Zemi a na její formování.

Důležitým aspektem pro život Země je atmosféra. Ta se vyvíjí po celou existenci Země a dnešní podobu má teprve posledních několik desítek milionů let [166]. V atmosféře dominuje nedýchatelný dusík a kyslík, který se do ní uvolňoval a uvolňuje díky řasám a rostlinám. Nicméně stojí za to zmínit, že existuje teorie, která prvotní nárůst výskytu kyslíku v atmosféře přičítá vulkanické činnosti [175].

Atmosféra je kromě výskytu kyslíku, který dýcháme, pro nás stěžejní i z dalších důvodů, z nichž 3 stojí za zmínku:

- Udržuje klima na Zemi – díky ní jsou výkyvy mezi denními a nočními teplotami maximálně v řádu nižších desítek stupňů.
- Poskytuje ochranu před elektromagnetickým zářením vysokých energií, které má schopnost sterilizace a rozbíjí buněčné struktury.
- Chrání Zemi před srážkami s kosmickými objekty.

Srážky s jinými kosmickými objekty

Především třetí bod z předchozího výčtu neplatí bezvýtku. Na Zemi běžně dopadají tělesa z kosmu, nejčastěji meteoroidy nebo planetky (stále ještě někdy nepřesně nazývané asteroidy, především v anglofonním prostoru), která ale jen naprosto výjimečně způsobí větší škody. Nejznámějším viditelným kráterem na Zemi Barringerův kráter v Arizoně, viz Obrázek 3.61, který vznikl zhruba před 50 000 lety po nárazu meteoroidu o velikosti zhruba 50 metrů.

S velikostí dopadajícího tělesa se zvyšuje vliv dopadu na lokální, resp. globální klima, ale naopak klesá pravděpodobnost srážky se Zemí.

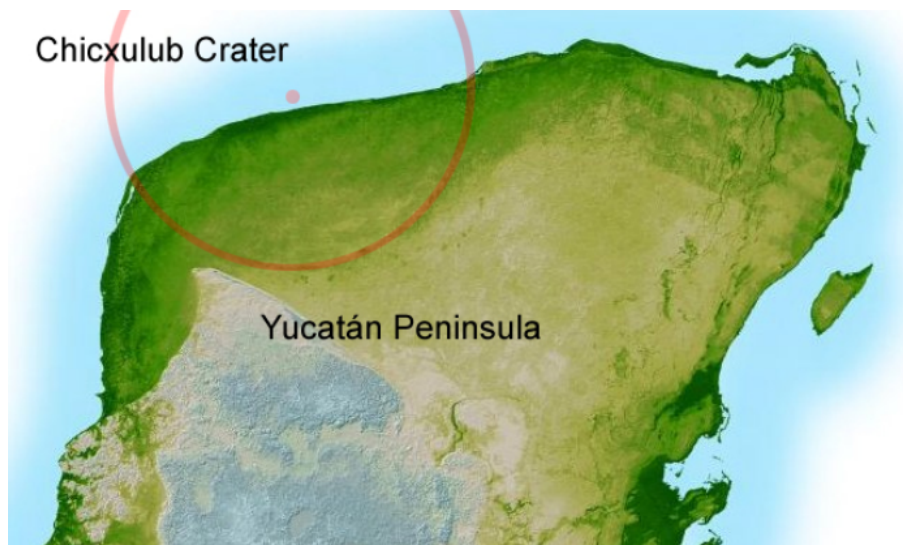
Nicméně jednou za několik desítek milionů let nastane srážka Země s velkým objektem, která má naprosto zásadní důsledky na život na Zemi. Poslední takový náraz patrně vyvolal vymírání dinosaurů na konci druhohor a jeho pozůstatkem je Chicxulubský kráter, který se nachází na poloostrově Yucatan v Mexiku¹¹. Náraz způsobila kolize s planetkou velikosti 10 až 15 km. Tato událost byla vystopována v 80. letech 20. století týmem kolem Luise Alveréze, který nacházel na různých místech na Zemi vrstvy staré zhruba 65 milionů let s vysokou koncentrací iridia, jenž se na Zemi vyskytuje velice vzácně a především v souvislosti s meteoritickou činností [166].



Obrázek 3.61: Barringerův kráter v Arizoně, USA. Převzato z [176].

¹¹Dlužno dodat, že existuje ale i alternativní teorie, že za vymírání dinosaurů mohla vulkanická činnost, která nárazu předcházela.

Na Obrázku 3.62 můžeme vidět lokalizaci kráteru po dopadu planetky Chicxulub, který má průměr zhruba 200 km a hloubku 1 km. Kráter samotný ze země není vidět a jeho mapování a výzkum proběhl geologickým výzkumem a družicovým mapováním [177].



Obrázek 3.62: Kráter Chicxulub na poloostrově Yucatan v Mexiku. Převzato z [178].

Bohužel se nedá jednoduše popsat, jaký objekt už je pro život na Zemi nebezpečný. Roli hraje jeho rychlost, rozměry a složení. Pravděpodobnost kolize s objektem, kometou nebo planetkou, velikosti desítek kilometrů je mizivá, navíc tyto objekty umíme se soudobými technologiemi odhalit.

Potíž nastává s objekty řádově velikosti desítek až stovek metrů, které mohou regionálně způsobit významné škody, ale je téměř nemožné je předem odhalit. Pravděpodobnost takové události je stále poměrně malá, nicméně podobné kolize se statisticky jednou za několik desítek nebo stovek tisíc lze stávají. Toto téma je zpracováno celou řadou autorů a to jak na obecné úrovni přístupné širšímu publiku [179], tak na odborné úrovni z hlediska vyhodnocování rizik [180]. Mimo to se hodí zmínit, že planetární ochrana je významným odvětvím kosmonautiky, na němž se podílejí i čeští vědci, a to z hlediska pozorování [181][182] i z hlediska vývoje technologií, které by mohly odvrátit kataklyzmickou srážku Země s planetkou [183].

Problematika vzniku a vývoje Země má zajímavou historii a ještě poměrně nedávno jsme toho o Zemi nevěděli zdaleka tolik, jako dnes. Pro získání základního vhledu do problematiky lze doporučit dvě knihy:

- Životopis Země od George Gamowa [184] vydaný v roce 1941 je dnes už v lecčem zastaralou a překonanou knihou. Nicméně Gamow jako fyzik přistupoval k tématu velice střídavě a dělal závěry opatrně. Není to úplně kniha pro širší cílovou skupinu. Zaujme především svým přístupem.
- Stručná historie téměř všeho od Billa Brysona [166], na kterou bylo odkazováno již výše, je naopak typickou moderní populárně naučnou knihou, která důkladně popisuje vývoj přístupu ke zkoumání historie Země.

Shrnutí

Je celá řada způsobů jak k látce přistoupit. O Zemi lze vyprávět jak souvisle, tak lze výklad rozdělit na menší celky, kterým lze věnovat pozornost odděleně. Výše jsou nastíněna dílčí témata, která považují za klíčová a kolem nichž se lze točit několik vyučovacích hodin. Témata jsou nadto těsně propojená s následujícími hodinami, především s 36. hodinou věnovanou Měsíci.

35. Sluneční soustava III. - Kinematika Země

Téma: Zemské astronomické cykly

Cíl: Seznámit žáky s kinematikou a dynamikou Země

Přístup k hodině

Po obecném úvodu o Zemi, který měl multidisciplinární povahu, se vrátíme zpět k čistě fyzikálnímu tématu. Tím je popis pohybu Země z pohledu klasické mechaniky, který má vliv jak na klima na Zemi, tak na astronomická pozorování.

Kinematika a dynamika Země

Existuje obecné povědomí o tom, že Země rotuje kolem Slunce (perioda 365,2522 dne) a vlastní osy (perioda 24h) po eliptické dráze, zatímco ji obíhá Měsíc. V přísluní (4. ledna) je vzdálenost od Slunce zhruba 147,1 milionu kilometru, zatímco v odsluní (4. července) je 152,1 milionu kilometru. Střední vzdálenost mezi Zemí a Sluncem je přesně 149 597 870 700 metrů a nazývá se astronomická jednotka. Excentricita dráhy je 0,0167, dráha je tedy velmi blízká kruhové dráze. Tyto informace by měly v hodině zaznít, neb jsou to základní parametry kinematiky Země a částečně se o ně budeme dále opírat.

O čem už není obecné povědomí, jsou precese a nutace, nebo vliv Měsíce na délku dne či stabilitu zemské rotace. Tyto jevy mají přitom nezanedbatelný vliv na zemské klima, na život na Zemi a jeho evoluci, a budeme se jim věnovat tuto hodinu. Na toto téma už nebudeme dále navazovat, a lze je tak považovat za samonosné.

Vliv Měsíce a Slunce na kinematiku Země

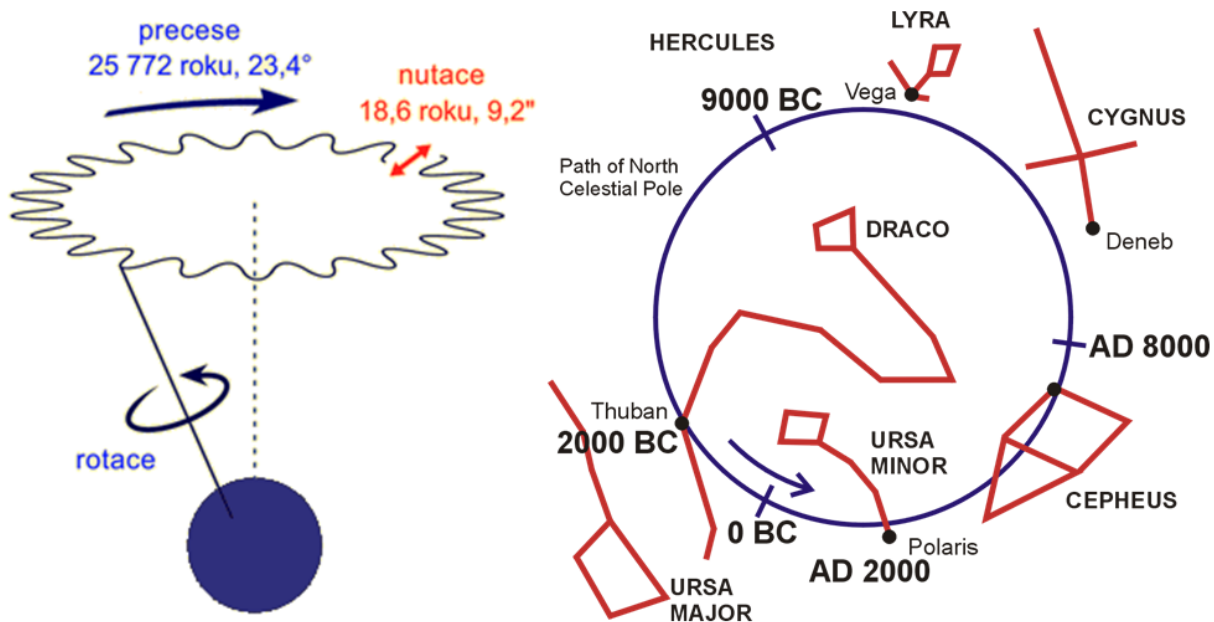
Z hlediska dynamického lze považovat soustavu Země-Měsíc za jeden systém s vysokým momentem setrvačnosti. Právě vysoký moment setrvačnosti, na kterém se nezanedbatelnou měrou podílí Měsíc, zajišťuje stabilitu osy zemské rotace [170]. Moment sil, který by ji narušil, mohou vyvolat, a také vyvolávají, ostatní planety a Slunce. Moment setrvačnosti pak narušuje i samotný Měsíc, který na jednu stranu způsobuje, že osu rotace soustavy jen tak něco nerozhodí, na druhou stranu gravitační působení Slunce a dalších planet na Měsíc způsobuje, že se sklon rotace Měsíce mění a v důsledku toho se mění i sklon rotace Země s periodou 18,61 roku v rozmezí 9,2°. Tento efekt se nazývá **nutace zemské osy** a přičítá se mu vliv na jev El Niño [185][186].

To ovšem neznamená, že sklon zemské rotace (zhruba 23,5°) je z dlouhodobého hlediska ovlivňován jen Měsíční periodou 18,61 let. Dlouhodobě se fluktuace sklonu pohybuje v rozmezí přibližně 21,9° až 24,3° a je vyvolána tzv. planetární precesí zemské osy, která má periodou zhruba 40 000 let a těsně souvisí s dalším, mnohem zásadnějším, jevem, kterým je **všeobecná precese zemské osy**. Všeobecná precese je obdobný pohyb jako v případě roztočené káči, jejíž osa rotace se pohybuje po kruhové dráze. Precesi, podobně jako nutaci, způsobuje především Měsíc a Slunce a je z velké části způsobena geometrií Země a Měsíce, jež nejsou dokonalými koulemi [187].

Všeobecná precese zemské osy má zásadní vliv na globální klima. Její perioda je 25 772 let a nazýváme ji Platónský rok. Jestliže dnes nastává přísluní v době krátce po zimním slunovratu, přibližně za 12 000 let bude nastávat v době letního slunovratu. Změna klimatu s tím spojená nepřichází nárazově, nicméně se má za to, že v důsledku zásadně přispívá ke střídání dob ledových a meziledových. Tyto cyklické fenomény popisují tzv. Milankovičovy cykly¹², které zahrnují i další cykly jako je například změnu excentricity oběžné dráhy Země a vlivy dalších planet [188][189].

Sekundárním projevem všeobecné precese zemské osy je změna noční oblohy, resp. souřadnic hvězd a souhvězdí v závislosti na fázi Platónského roku.

¹²Milutin Milanković (1879 – 1958) byl srbský geofyzik.



Obrázek 3.63: Vlevo precese a nutace zemské osy, vpravo pohyb nebeského pólu po hvězdné obloze v závislosti na fázi Platonského roku. Převzato z [187] a [190].

Problematika Milankovičových cyklů je obsáhlá a je stále předmětem vědeckého bádání. Žáci by si měli z tohoto tématu odnést především dva poznatky:

- Lokální a globální klima zásadně ovlivňují astronomické cykly s dlouhou periodou. Tyto cykly jsou způsobeny gravitačním působením objektů Sluneční soustavy, především Slunce a Měsíce a působí nezávisle na počínání lidstva. To ovšem samo o sobě neznamená, že by lidstvo nemělo vliv na změnu klimatu, která probíhá poslední desítky let. Spíše naopak.
- Důsledky vzájemného gravitačního působení Slunce, planet a měsíců je silně provázáno. Měsíc na jednu stranu měl zásadní podíl na formování mladé Země a dnes především stabilizuje rotaci Země tím, že přispívá k momentu setrvačnosti systému Země-Měsíc, na druhou stranu se podílí na cyklech, které mají vliv na klima na Zemi.

V neposlední řadě má Měsíc vliv na délku dne na Zemi. To je způsobeno slapovými silami, které brzdí rotaci, což v důsledku vede k tomu, že se Měsíc od Země vzdaluje. Tato rychlost vzdalování v čase postupně klesá a dnes odpovídá ve střední hodnotě zhruba 4 cm za rok. Brzdění rotace dnes kompenzujeme tzv. přestupnými sekundami.

Dnes je vzdálenost Měsíce od Země přibližně 60 zemských poloměrů a délka pozemského dne 24 hodin. Před miliardou let byl Měsíc ve vzdálenosti 50 zemských poloměrů a délka dne byla 15 hodin. Naopak přibližně za 100 milionů let se den natáhne na 25 hodin.

Shrnutí

Tak, jak předchozí dvouhodinovka byla přehledová, v této hodině třeba brát zřetel na to, že většina informací bude pro žáky nová. Ohlédneme-li se na poslední 3 hodiny je vidět, že o Zemi a Měsíci se nelze bavit úplně odděleně, proto je po obsahové stránce hranice mezi posledními třemi hodinami a následující hodinou, zaměřenou na Měsíc, jen formální.

36. Sluneční soustava IV. - Měsíc

Téma: Kinematika a vlastnosti Měsíce

Cíl: Seznámit žáky s parametry Měsíce a tím, jak jej pozorujeme

Přístup k hodině

Měsíc už jsme věnovali předchozí hodiny, kde jsme se dotkli především jeho vzniku a jeho vlivu na formování kinematiky Země, resp. systému Země-Měsíc. Nyní se zaměříme přímo na parametry Měsíce, jeho specifické vlastnosti a na jeho pozorování.

Kinematika Měsíce

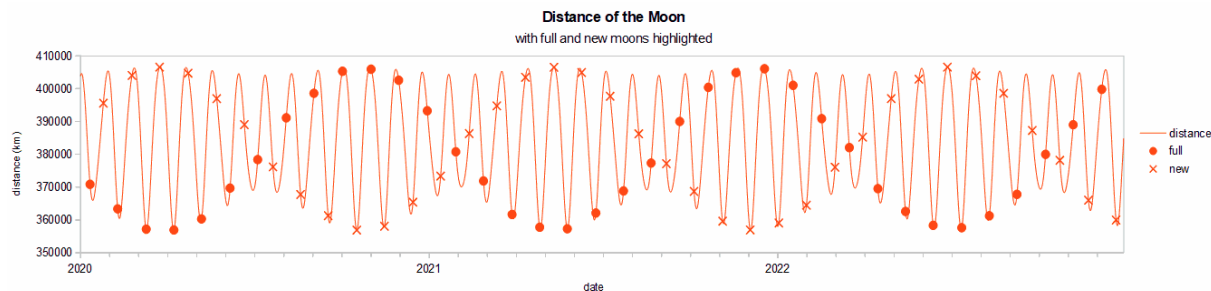
Měsíc obíhá Zemi po ekliptické dráze s excentricitou 0,0549. V řeči konkrétních hodnot to znamená, že v perigeu, kdy je Zemi nejbližší, je vzdálenost mezi Zemí a Měsícem 363 295 km, zatímco v apogeu, kdy je nejdále, je vzdálen 405 503 km. Na první pohled je tak vidět, že dráha je „eliptičtější“ než dráha Země kolem Slunce. Druhým důležitým parametrem je rychlost rotace kolem vlastní osy a perioda oběhu. Tohoto tématu už jsme se částečně dotkli ve 3. hodině.

Měsíc má dvě periody:

- Synodickou periodu, která je 29,53 dne a značí čas, který uplyne od novu k novu.
- Siderickou periodu (27,32 dne), která odpovídá periodě oběhu Měsíce kolem Země.

Kde se tento rozdíl bere? Země se během měsíčního cyklu posune na své dráze kolem Slunce. Aby se Měsíc dostal opět do novu/úplňku, tedy stavu, kdy je Slunce, Země a Měsíc téměř (nebo úplně) na jedné ose, musí Měsíc urazit ještě navíc zhruba 1/14 své periody kolem Země.

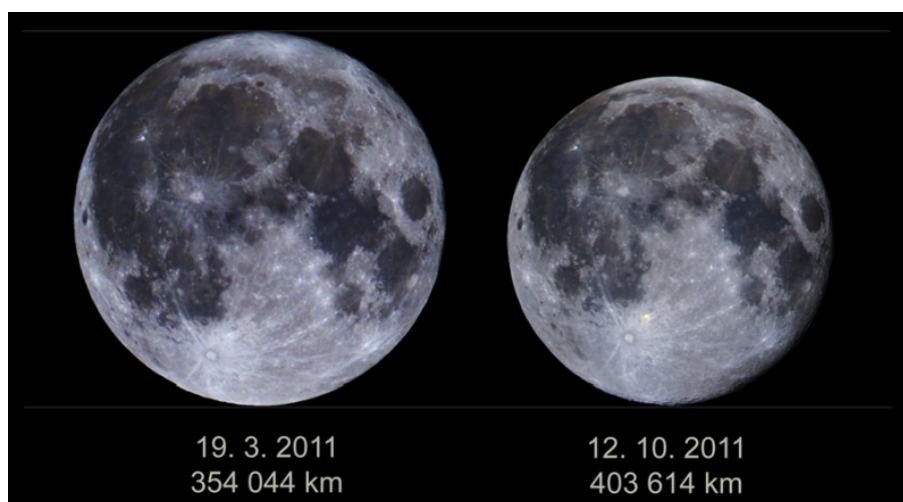
Tento rozkol má za následek střídání superúplňku a mikroúplňků, které nastávají zhruba s periodou 14 měsíčních cyklů, viz Obrázek 3.64, označující dataci úplňků a novu v letech 2020 až 2022.



Obrázek 3.64: Datování úplňků na novu v závislosti na vzdálenosti mezi Zemí a Měsícem. Převzato z [191].

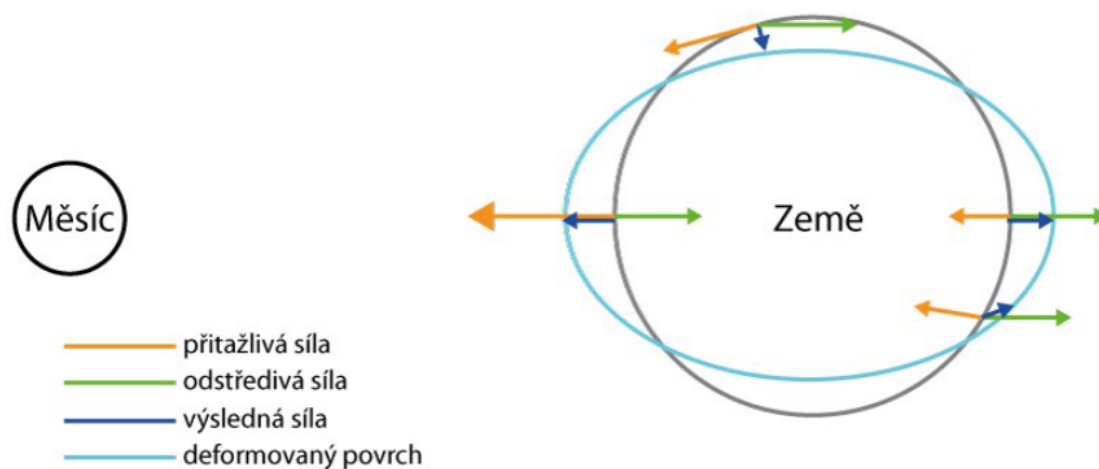
Vliv proměnlivé vzdálenosti v době úplňku je znát i na samotném pozorování. Na Obrázku 3.65 můžeme vidět poměrové srovnání velikosti superúplňku a mikroúplňku.

Superúplněk je atraktivní téma. Měsíc v superúplňku je zhruba o 30 % jasnější než Měsíc v mikroúplňku a zásadně ovlivňuje výšku přílivů a odlivů. Toto téma je v českém jazyce zpracováno celou řadou autorů [192][193].



Obrázek 3.65: Poměrové srovnání velikosti superúplňku a mikroúplňku. Převzato z [192].

Kde se přílivy a odlivy berou? Odpověď nás už po několikáté vrací k 3. NPZ – stejnou silou, kterou působí Země na Měsíc, působí i Měsíc na Zemi. Země je sice o tolik větší, že střed soustavy Země-Měsíc se nachází pod povrchem Země, nicméně gravitace Měsíce se na Zemi projevuje právě střídáním přílivů a odlivů, na kterém se podílí zhruba ze dvou třetin (zbylá třetina jde na vrub působení Slunce)[194]. Perioda přílivů a odlivů je přibližně 12 hodin. Zde je třeba se zastavit a vysvětlit si, proč tomu tak je, protože intuitivně by měla být perioda spíše 24 hodin.



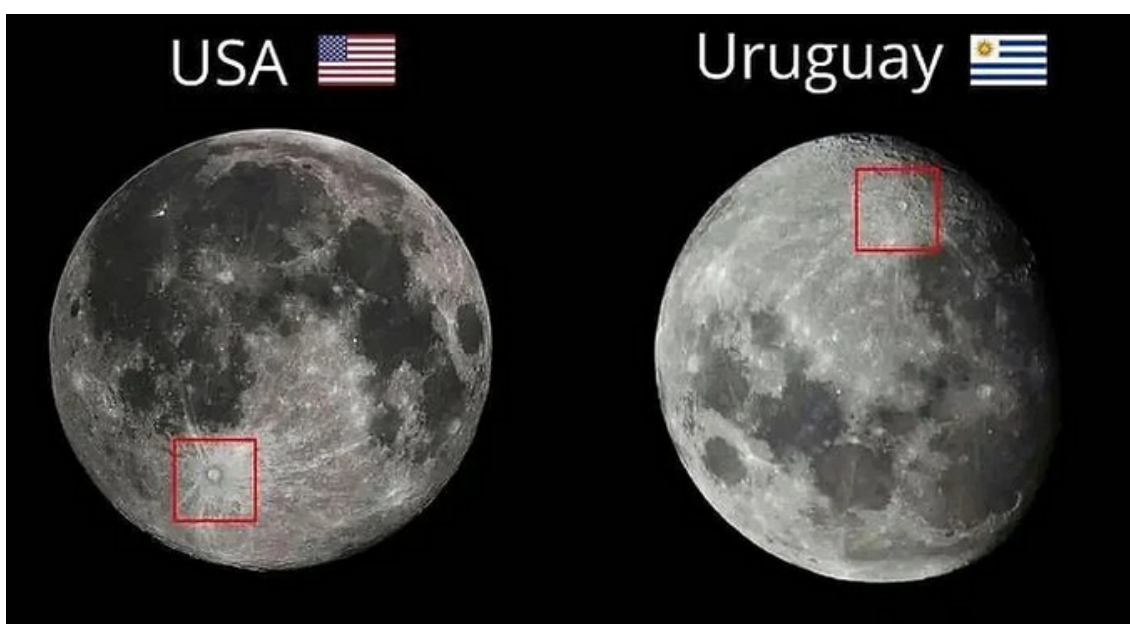
Obrázek 3.66: Síly působící na Zemi v systému Země-Měsíc. Převzato z [195].

Vlastní rotace Měsíce má stejnou periodu jako je siderická perioda. To způsobily slapové síly, které pokřivily tvar Měsíce, což vedlo ke zpomalování jeho rotace až do stavu, kdy nastala tzv. vázaná rotace. Toto téma dobře zpracovává například Derek Muller [196], jenž rozebírá i navázané téma orbitální rezonance, kterou můžeme pozorovat na Galileovských měsících Jupiteru, o nichž se budeme bavit v 39. hodině. Výsledkem vázané rotace je, že pozorujeme stále jednu, přivrácenou stranu Měsíce.

Tím se dostáváme k pozorování Měsíce. Poměrně rozšířeným omylem je, že fáze Měsíce způsobuje stín Země. Není tomu tak. Měsíc je téměř permanentně z poloviny nasvícen Sluncem. Jedinou výjimkou z tohoto pravidla je zatmění Měsíce, jeden ze dvou případů, kdy Slunce, Země a Měsíc jsou na jedné přímce.

Vizualizací měsíčního cyklu lze nalézt celou řadu [197]. V obecnosti lze říct, že pro pozorování Měsíce platí následující pravidla:

- Měsíc můžeme teoreticky pozorovat každý den, z každého bodu na planetě, přibližně po 12 hodin.
- Nastává-li úplňk, Měsíc je na obloze (téměř) celou noc.
- Je-li nov, Měsíc je na obloze pouze ve dne a z důvodu přsvícení oblohy je stěží rozeznatelný.
- Dorůstající Měsíc má v první čtvrti v našich končinách tvar připomínající písmeno D a můžeme jej pozorovat už za dne a dále pak po začátku noci až do jeho západu.
- Couvající Měsíc v poslední čtvrti tvarem připomíná písmeno C, po západu Slunce jej nevidíme – vyjde nad obzor až později v noci a setrvá na ní ještě za dne.
- Mnemotechnické pomůcky o dorůstajícím a couvajícím Měsíci neplatí na jižní polokouli, kde jsou přesně naopak. I samotná orientace na Měsíce je na jižní polokouli naopak než na severní polokouli, viz Obrázek 3.67.



Obrázek 3.67: Rozdíl v orientaci Měsíce při pohledu ze severní a z jižní polokoule. Převzato z [198].

Z didaktického hlediska už zde se může hodit zmínit, že zatmění Měsíce je podobně častým fenoménem jako zatmění Slunce (budeme se mu věnovat v 46. hodině). Zásadní rozdíl z hlediska pozorování je především v tom, že úplné zatmění Měsíce může za dobrého počasí pozorovat většina planety, která má zrovna noc, zatímco zatmění Slunce lze pozorovat jen v úzkém pásu, více v 46. hodině.

Shrnutí

Astronomové většinou nemají rádi Měsíc, protože způsobuje přsvícení noční oblohy. Nicméně na střední škole je Měsíc vděčným tématem, které lze propojit s hodinami o Zemi, Slunci nebo o projektu Apollo. Navíc je jisté, že Měsíc bude přitahovat pozornost do budoucna, a to ať už z hlediska plánů budování měsíční základny pro účely dalšího průzkumu vesmíru, tak z motivace těžby titanu, hliníku nebo Helia 3.

Pro učitele může být silným zdrojem inspirace například přednáška Pavla Gabzdyla, na niž je odkazováno výše, který se dotýká i témat, jako je mapování Měsíce nebo specifika jeho odvrácené strany, jejíž povrch se zásadně přivrácené strany liší. Tolik o Zemi a Měsíci. Následující hodiny budou věnovány planetám Sluneční soustavy.

37. a 38. Sluneční soustava V. - kamenné planety

Téma: Merkur, Venuše a Mars

Cíl: Nastínit žákům specifické vlastnosti kamenných planet, jejich podobnosti a rozdíly

Přístup k hodině

Následující dvě dvouhodinovky budou věnovány planetám Sluneční soustavy. Nyní se zaměříme na tzv. terestrické planety, které mají pevný povrch a ač v lecčem připomínají Zemi, přesto se od Země, i vzájemně od sebe, zásadně liší.

Merkur

Merkur je s průměrem 4 879 kilometrů nejmenší planetou Sluneční soustavy. Je zhruba o 40 % větší, než náš Měsíc na druhou stranu je menší než největší měsíce Sluneční soustavy Ganymed a Titan. Obíhá Slunce s hlavní poloosou 57,9 milionů kilometrů a s poměrně velkou excentricitou 0,206. Den na Merkur je velmi dlouhý, hvězdný den má zhruba 58,5 pozemského dne, sluneční den dokonce 116 dní, přitom rok na Merkur trvá jen 88 dní. Nejde tedy o vázanou rotaci tak, jak v případě systému Země-Měsíc, ač se to dlouhou dobu předpokládalo [199].

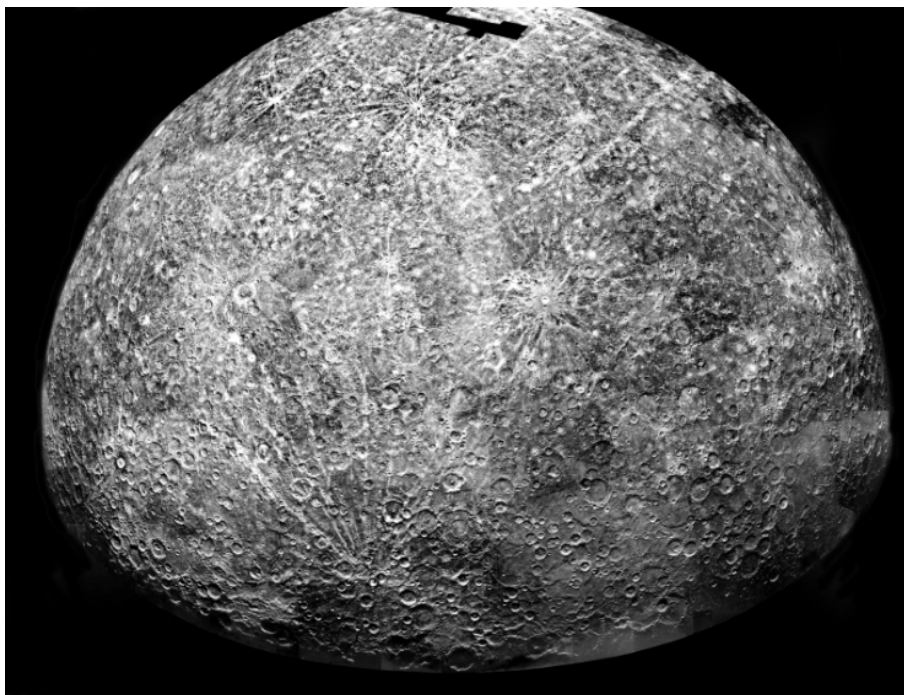
Merkur prakticky nemá atmosféru. To je způsobeno jeho nízkou gravitací, vysokou teplotou na přivrácené straně a slunečním větrem. V kombinaci s pomalou rotací to způsobuje extrémní teplotní rozdíly mezi přivrácenou a nepřivrácenou stranou (420 °C vs. -160 °C), přesto nejde o nejvyšší povrchovou teplotu na planetách Sluneční soustavy.

Jaké závěry z předešlého plynou?

- Pozorování Merkuru má svá specifika – pokud Merkur Slunce dobíhá, pozorujeme jej krátce po západu Slunce nad západním obzorem, předbíhá-li Merkur Slunce, k vidění je nad východním obzorem, krátce před východem Slunce.
- Třináctkrát nebo čtrnáctkrát za století můžeme pozorovat přechod Merkuru přes Slunce. Vzácnost tohoto jevu je způsobena sklonem dráhy Merkuru vůči ekliptice, který je 7°.
- Merkur je velice nehostinné místo, k čemuž přispívá i to, že rotační osa Merkuru je téměř kolmá. Chybějící atmosféra navíc způsobuje, že je podobně jako Měsíc poset impaktními krátery po dopadech meteoroidů a planetek.

Nadto cesta k Merkur je poměrně složitá – vyžaduje celou řadu gravitačních manévru ve snaze uspořit palivo a cesta se tak protahuje na více než 7 let. Proto se k Merkur zatím vydaly jen 3 sondy (Mariner 10, Messenger a BepiColombo), přičemž BepiColombo je momentálně na cestě k Merkur (dorazit by měla v roce 2025 [200]).

Mariner 10, který jako vůbec první sonda použil gravitačního manévru ke korekci dráhy, pořídil v roce 1974 první snímky Merkuru, viz Obrázek 3.68. Dnes Mariner 10 obíhá kolem Slunce jako mrtvé těleso.



Obrázek 3.68: První snímky Merkuru pořízené sondou Mariner 10. Převzato z [201].

Messenger, který dorazil k Merkuru v roce 2008, nesl hned 7 vědeckých přístrojů a díky němu dnes víme více o složení Merkuru, gravitačním a magnetickém poli. Nejznámějším přínosem sondy Messenger jsou výsledky měření, která ukázala možný výskyt vody, resp. ledu na dnech impaktních kráterů poblíž pólů [202], což povzbudilo jinak skeptické vnímání Merkuru jako naprosto nehostinného místa. Messenger se po vyčerpání paliva zřítil na povrch planety. Lze tedy říct, že jsme doposud na Merkuru kontrolovaně nepřistáli.

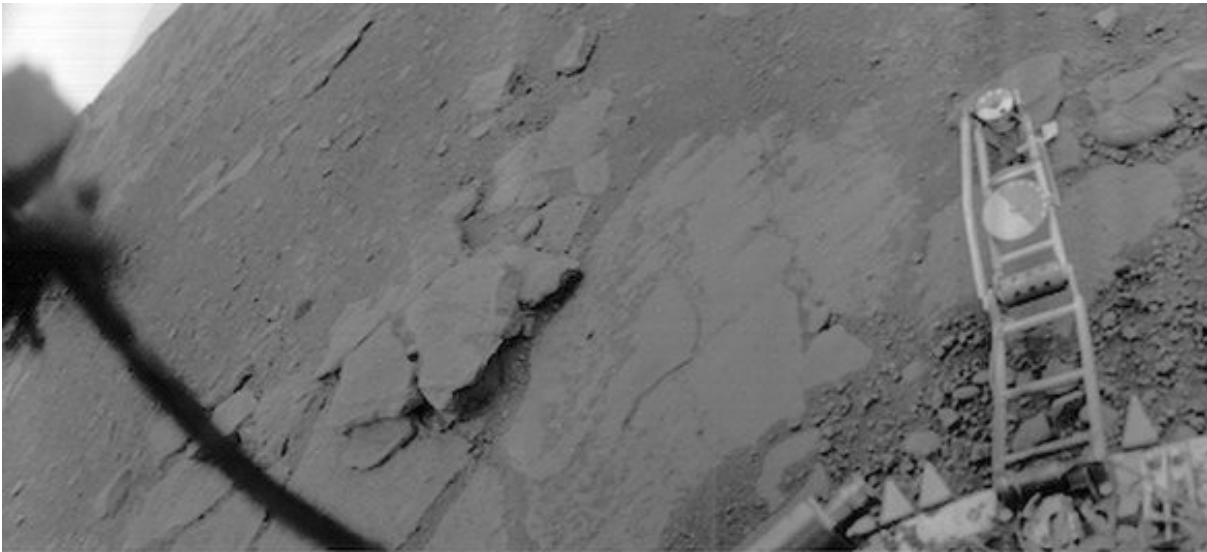
Venuše

Venuše je po Měsíci nejjasnější objektem noční oblohy (až $-4,92$ mag). Obíhá Slunce s velkou poloosou 108,2 milionu kilometrů s excentricitou 0,0067, tedy menší excentricitou než má Země kolem Slunce. Rok na Venuši trvá 225 dní. Den na Venuši trvá téměř 117 pozemských dní, sklon osy rotace $177,4^\circ$, což znamená, že osa je téměř kolmá k oběžné dráze, ale směr rotace je opačná než na Zemi.

Na rozdíl od Merkuru má Venuše atmosféru, která je navíc extrémně hustá. Z hlediska geometrie se Venuše podobá Zemi nejvíce. Má průměr 0,95 průměru Země, minimální zploštění i obdobnou hmotnost [203][204]. Zde zásadní podobnosti ale končí.

Enormní skleníkový efekt oxidu uhličitého, který tvoří 96,5 % atmosféry pod tlakem zhruba 90 barů, v kombinaci s oblaky kyseliny sírové a oxidu siřičitého, udělal z Venuše jedovaté peklo. Povrchová teplota proto atakuje 500°C , což nesevřídčí teoriím o životu na Venuši a komplikuje jakékoli potenciální vědecké mise.

Přesto není Venuše ztraceným případem. K Venuši od 60. let zamířila celá řada misí, z nichž většina byla do 80. let pod vedením Sovětského svazu (především v rámci programu Veněra). Misi Veněra 8 se podařilo úspěšně přistát na povrchu, dalším misím se povedlo pořídit zvukové a obrazové záznamy, viz upravená fotografie na Obrázku 3.69 pořízená sondou Veněra 13.



Obrázek 3.69: Fotografie z povrchu Venuše pořízená sondou Veněra 13. Převzato z [205].

Poznatky z těchto misí vedly ke zjištění, že ač je povrch Venuše nehostinný (krom zmíněného je tu nedostatek vody, resp. vodíku, velké dávky UV záření, turbulence nebo nárazová sopečná činnost), nemusí být Venuše naprosto neobyvatelná a celá řada vědeckých týmů pracuje s ideou obyvatelnosti nebo i terraformace Venuše, a to ať už cestou „plovoucích měst“ ve výšce 55 km nad povrchem, kde není jedovaté prostředí a teploty odpovídají těm pozemským [206][207], nebo hledáním cest, jak ochladit planetu nebo měnit její atmosféru [208].

Proto stojí za to se věnovat Venuši více pozornosti než Merkuru. Venuše je nadto poměrně snadno pozorovatelnou planetou, která je až 15x jasnější než nejjasnější Sirius, nejjasnější hvězda noční oblohy, a za dobrých podmínek může být pozorována i za dne. Vzhledem k tomu, že jde o vnitřní planetu, spolehlivě ji na noční obloze najdeme nad východním obzorem před východem Slunce nebo nad západním obzorem po západu Slunce.

Mars

Na Mars je upřeno nejvíce pozornosti, a to ať už ze strany laické veřejnosti, tak ze strany kosmických agentur i soukromých firem. Proto se hodí mu věnovat nejvíce pozornosti a lze očekávat, že o něj bude největší zájem ze strany žáků.

Mars obíhá Slunce s periodou 689 dní a velkou poloosou 227,9 milionu kilometrů s excentricitou 0,0934. Co to znamená pro pozorování? Jednou za necelé dva roky nastává opozice planet. Vzdálenost v opozici se vinou poměrně velké excentricity mění od zhruba 56 milionů kilometrů (v srpnu 2003, kdy byl Mars blízko perihelia) až po přibližně 100 milionů kilometrů, je-li Mars v aféliu.

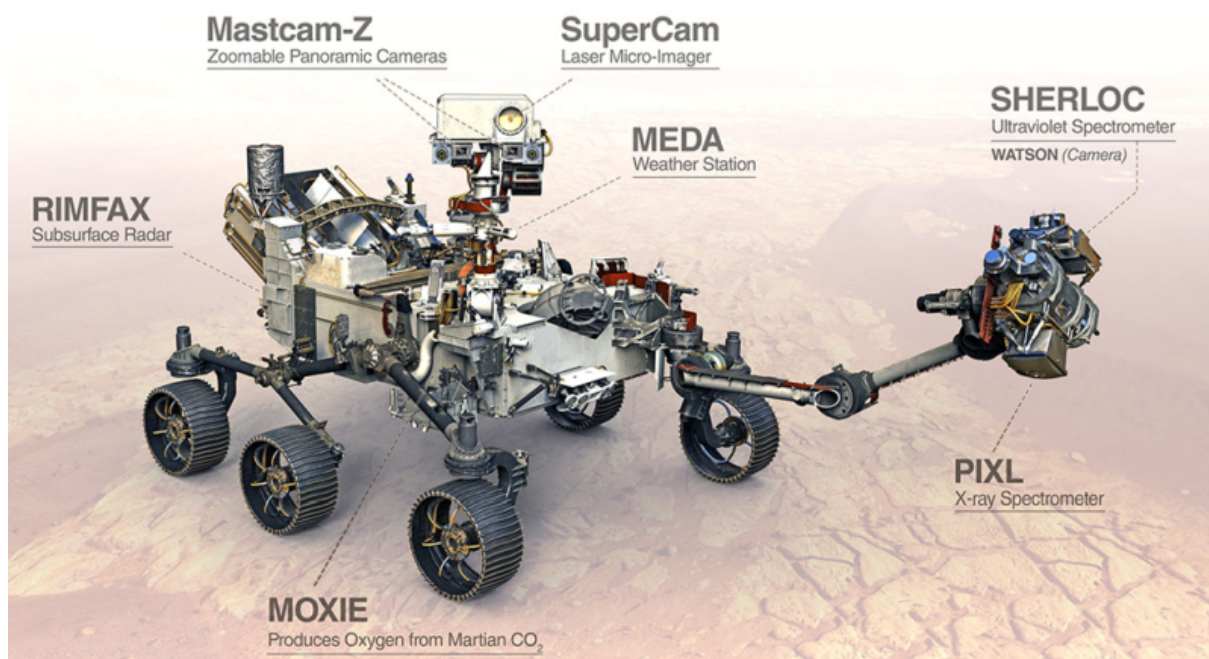
Mars má charakteristické rudé zbarvení, které způsobují oxidy železa, kterými je pokryt povrch. Díky tomu je jako 3 nejjasnější objekt noční oblohy (až -2,94 mag) snadno rozpoznatelný, protože pouhým okem můžeme vidět jeho charakteristické zbarvení.

Mars má velice řídkou atmosféru a postrádá magnetické pole, které by jej chránilo před beta zářením z kosmu. Nicméně díky jeho vzdálenosti od Slunce, resp. od Země, průměrným teplotám okolo -60 °C a periodě rotace 24,5 hodiny, jde o nejlepšího kandidáta na terraformaci ve Sluneční soustavě.

I proto je Mars ze zmíněné trojice planet nejlépe zmapován. Víme mnohé o jeho historii i současnosti – o výskytu vody, polárních čepičkách ze z kondenzovaného oxidu uhličitého nebo o vulkanické činnosti, jejímž produktem je nejvyšší známá hora Sluneční soustavy Olympus Mons

s výškou 21 kilometrů nebo největší kaňon Valis Marineris s šířkou okolo 200 kilometrů a hloubkou až 10 km [209]. Marsem a obecně kamennými planetami se zabývá celá řada předních vědců včetně těch českých, mezi nimi například Miroslav Brož [210] nebo Petr Brož [211], kteří se věnují i popularizační činnosti.

Pozornost stojí za to zaměřit i na technickou stránku průzkumu Marsu. V době finalizace této práce (jaro 2022) platí, že se k Marsu vydalo už 49 misí, které sloužily jak k mapování povrchu, tak k analýze vzorků přímo z povrchu planety pomocí vědeckých přístrojů na marsovských roverech. Na Marsu se nacházejí 3 aktivní rovery (Curiosity, Perseverance a Zhurong), které jsou de facto pojízdnými laboratořemi. Konkrétně Perseverance, viz Obrázek 3.70, s sebou nese i vrtulník Ingenuity, který v průběhu jara 2021 absolvoval 5 letů, během nichž mapoval okolí.



Obrázek 3.70: Rover Curiosity a jeho technické vybavení. Převzato z [212].

Téma průzkumu Marsu je zpracováno celou řadou článků, přednášek a rozhovorů, kde jsou objasňovány i budoucí plány, například že by se po roce 2030 měly vzorky odebrané Perseverance přesunout na Zemi k dalšímu zkoumání [213][214]. Z Perseverance také pocházejí nejpodrobnější snímky, které byly dosud na Marsu pořízeny, viz kolorizovaný Obrázek 3.71.



Obrázek 3.71: Kolorizovaný snímek Marsu pořízený sondou Perseverance. Převzato z [214].

O napájení roverů se stará radioizotopový generátor. Jde o spolehlivý zdroj stejnosměrného napětí, který má sice poměrně malou účinnost (zhruba mezi 5 % a 10 %), nicméně velmi vysokou životnost bez nutnosti údržby. Z těchto důvodů se využívá i na sondách nebo na extrémně odlehlých observatořích na Zemi. Tomuto tématu již jsme se věnovali v [30. hodině](#).

V neposlední řadě zmíníme problematiku letu k Marsu. Plány pilotovaného letu na Marsu počítají s různými scénáři. Energeticky nejméně náročná je Hohmanova trajektorie, po níž by cesta trvala 9 měsíců, následovalo by 500 dní pobytu na Marsu a devítiměsíční cesta zpět. Misi lze absolvovat v kratším čase jen za cenu vyšší energetické náročnosti, resp. využití technologií, o kterých nyní uvažujeme jen teoreticky [\[215\]](#).

Přesto, i kdyby se podařilo délku mise stlačit pod jeden rok, stále pilotovaná mise čelí výzvám, se kterými si dnes nevíme rady nebo o nich máme jen omezené povědomí, jako je dostatečné zásobování pro celou cestu, vliv radiace na zdraví posádky nebo dlouhodobý vliv mikrogravitace [\[73\]](#). Téma pilotované cesty k Marsu je populární i u širší veřejnosti a leckteří vizionáři si kladou cíle, které jsou z časového i technického hlediska nerealizovatelné.

Žáci se na cestu k Marsu ptají, jestli se k němu vydá pilotovaná mise v roce 2025 nebo v roce 2030. Realita bude patrně odpovídat konzervativnějším predikcím, které naznačují, že než se vydá pilotovaná posádka k Marsu, pozornost bude směřována na budování měsíční základny, kde budou probíhat první dlouhodobé experimenty mapující vliv kosmického prostředí na člověka. Je totiž potřeba mít na paměti, že ISS a kosmonauté na ní jsou chráněni magnetosférou a toto prostředí tak není srovnatelné s otevřeným kosmem [\[73\]](#).

Shrnutí

Terestrické planety jsou objemné téma s přesahem do příbuzných oborů astronomie, zvláště ponoříme-li se do diskuzí o Marsu. Spíše, než že by bylo nutno se držet konkrétní kostry, je vhodnější zaměřit se na ta témata, která žáky budou zajímat, přičemž lze očekávat, že pozornost bude věnována především Marsu.

39. a 40. Sluneční soustava VI. - plynní obři

Téma: Jupiter, Saturn, Uran a Neptun

Cíl: Nastínit žákům specifické vlastnosti plynných obrů, jejich podobnosti a rozdíly

Přístup k hodině

Čtyři plynní obři na periferii Sluneční soustavy mají mnohé společné. V této dvouhodinovce se budeme věnovat jejich specifickým vlastnostem, jejich měsícům, na nichž jsou mnohdy velice rozmanitými světy a misím, díky kterým z velké části k našim znalostem o plynných obrech přispěly.

Jupiter

Jupiter je s rovníkovým průměrem 143 984 kilometrů největší planetou Sluneční soustavy. Hmotnost Jupiteru odpovídá 318 hmotnostem Země a váží tak více než všechny ostatní planety dohromady. Hmotnost zároveň odpovídá přibližně jedné tisícině hmotnosti Slunce, pročež, s ohledem na obdobné složení, je mnohdy považován za nepovedenou hvězdu a Sluneční soustava bývá vnímána jako dvojsystém Slunce-Jupiter [216]. Velikost Jupiteru a dalších plynných obrů má celou řadu konsekvencí, z nichž zde zmíníme dvě specifické:

- Jupiter, spolu s dalšími plynnými obry, plní roli „planetárního štítu“, který chrání vnitřní planety mezi potenciálně nebezpečnými planetkami [217].
- V systému Jupiter-Slunce se začíná projevovat tzv. problém tří těles, jehož řešení vede na deterministický chaos. V tomto případě se projevuje vznikem tzv. Kirkwoodových mezer, v hlavním pásu planetek, viz 41. hodina, které jsou v orbitální rezonanci s periodou Jupiteru¹³.

Vzdálenost Jupiteru osciluje mezi 4,95 au a 5,46 au (excentricita 0,048) a rok na Jupiteru trvá necelých 12 pozemských let. Díky jeho velikosti je Jupiter snadno rozpoznatelný na noční obloze, neb jeho jasnost je v maximu srovnatelná s Marsem.

Jupiteru stojí za to věnovat z plynných obrů největší pozornost, protože o něm toho z plynných obrů víme nejvíc a protože na něm lze dobře ilustrovat společné vlastnosti ostatních plynných obrů. Jupiter, stejně jako v případě dalších plynných obrů, nemá jasně definovaný povrch a o jeho vnitřním složení toho s jistotou nevíme mnoho. Jednotícím aspektem je i rychlá rotace, která způsobuje silné proudění v atmosféře dominantně složené z vodíku a helia. Takto vznikají v atmosféře Jupiteru charakteristické pruhy (světlé pruhy odpovídají stoupavým proudům, tmavé sestupným proudům) a masivní bouře v leccem připomínající pozemské hurikány, s tím rozdílem, že jsou silnější a masivnější – velká skvrna na Jupiteru bouře zhruba o velikosti celé planety Země.

Teplota směrem k nitru Jupiteru prudce roste a má se za to, že hluboko pod viditelnou atmosférou (pod velkým tlakem) se nachází vodík v tekutém stavu, který se může chovat jako kov, což by vysvětlovalo vznik magnetického pole, v nitru pak pevné jádro podobně jako u kamených planet [219][220]. Žáky určitě zaujme, že se má za to, že v atmosféře Jupiteru a Saturnu mohou „pršet diamanty“ [221].

Jupiteru a jeho charakteristice bychom mohli zasvětit celou hodinu, přičemž oporou nám může být celá řada kvalitních zdrojů [30][222][223]. My se nyní zaměříme na výzkum Jupiteru a jeho měsíců.

¹³Deterministický chaos je velice vděčné téma, které bývá spojováno spíše kvantovými jevy nebo s motýlím efektem a jeho vlivem například na počasí. Vedle toho gravitace může působit jako dokonale předvídatelná interakce, přesto řešení celé řady gravitačních úloh je doménou teorie chaosu [218]

První bližší průzkum Jupiteru provedly sondy Pioneer a Voyager. Následovaly sondy Ulysses v roce 1992 (primárně zaměřena na měření Slunce), Galileo v roce 1995 (zaměřená na Jupiter a jeho měsíce), Cassini-Huygens v roce 2000 (jejímž cílem byl průzkum Saturnu, o ní později), New Horizons v roce 2007 a Juno v roce 2016 – zatím nejpokročilejší sonda vyslaná k Jupiteru. Obrázek 3.72 níže ukazuje zleva snímky pořízené sondami Voyager 1, Cassini-Huygen a Juno.



Obrázek 3.72: Vlevo snímek Jupiteru s měsícem Ganymed pořízený sondou Voyager 1 v roce 1979, uprostřed snímek Jupiteru pořízený z velké vzdálenosti sondou Cassini-Huygens v roce 2000, vpravo detail bouře na Jupiteru pořízený sondou Juno v roce 2016. Převzato z [224][225][226].

Jupiter, jako všichni plynní obři, má desítky měsíců (učebnice Astronomie [227] uvádí, že Jupiter má 67 měsíců, Saturn 62 měsíců, Uran 27 měsíců a Neptun 14 měsíců). Jupiterovy 4 největší měsíce se nazývají galileovské měsíce. Sestupně dle velikosti jde o měsíce: Ganymed, Callisto, Io a Europa. Kromě Europy jsou měsíce větší než pozemský Měsíc, Ganymed je dokonce větší než Merkur.

Tyto 4 měsíce jsou specifickými světy, které si zaslouží více pozornosti:

- **Ganymed** je jediným měsícem Sluneční soustavy s vlastní magnetosférou, kterou ale překrývá magnetosféra Jupiteru, což způsobuje, že Ganymed absorbuje velké dávky radioaktivního záření [228]. Ganymed má pevný povrch z hornin a vodního ledu o tloušťce přibližně 200 kilometrů, pod nímž je patrně hluboký oceán slané vody.
- **Callisto** je nejdál od Jupiteru z velkých měsíců (střední vzdálenost téměř 2 miliony kilometrů). Callisto má povrch podobný jako Ganymed, je-li pod povrchem oceán, je mělký. Tím, že se nachází daleko od Jupiteru, nepůsobí tu silné slapové síly, proto tu nejsou podmínky tak nehostinné jako na jiných měsících.
- **Io** je vulkanickým měsícem a geologicky nejaktivnějším místem ve Sluneční soustavě. Je nejblíže Jupiteru a proto na něj působí extrémní slapové síly (k nimž přispívá i Europa a Ganymed, s nimiž je v orbitální rezonanci), které vyvolávají tření zahřívající povrch. Prostředí na měsíci Io je prudce jedovaté, plné sloučenin síry, které povrchu Io dávají pestré barvy.
- **Europa** je nejzajímavějším kandidátem na výskyt mimozemského života ve Sluneční soustavě, který by mohl existovat v oceánu pod popraskanou ledovou krustou. Tato idea se opírá o pozorování linií na povrchu, dlouhých až tisíce kilometrů, které by mohly nasvědčovat tomu, že jde o kry na tekutém oceánu, nalámané slapovými silami, a že Europa má aktivní deskovou tektoniku [229].



Obrázek 3.73: Galileovské měsíce ve velikostním srovnání s Jupiterem (vzdálenost měsíců není v měřítku). Převzato z [230].

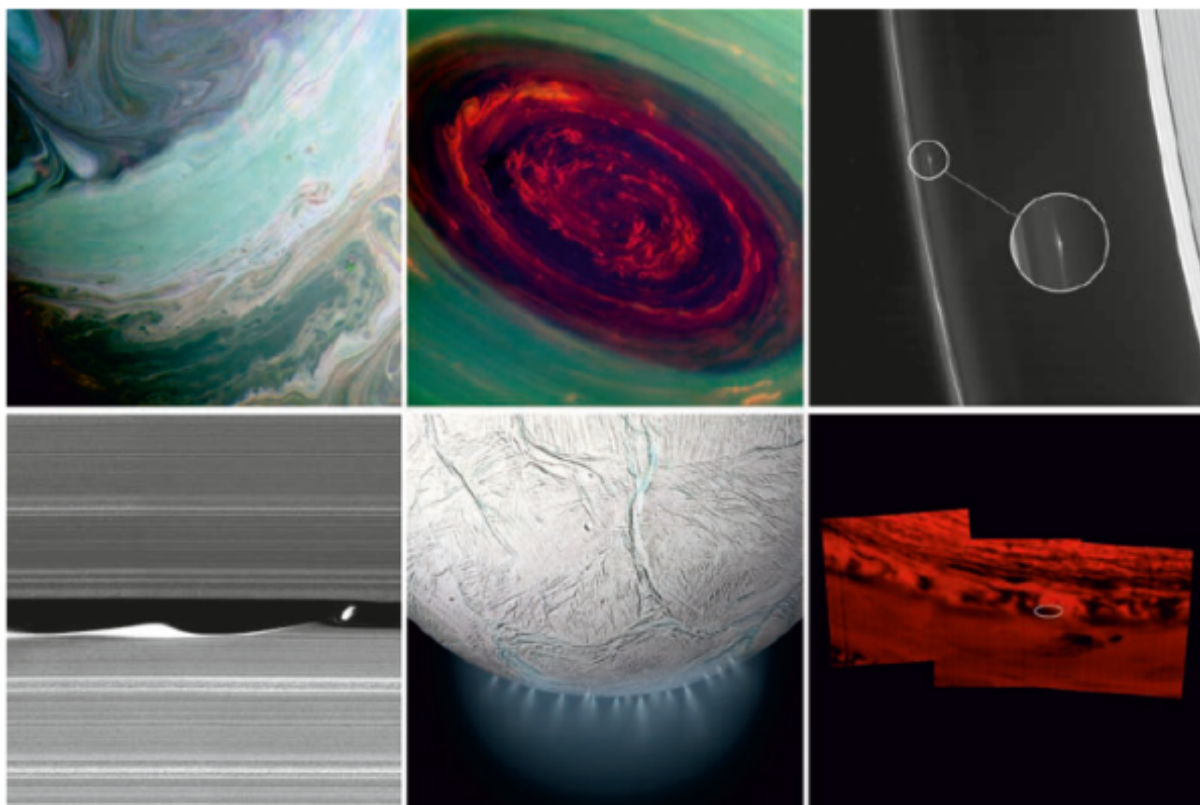
Stojí za to také zmínit, že s pozorováním Galileovských měsíců je spojen příběh prvního měření rychlosti světla. Dánský astronom Ole Roemer (1644 – 1710) pozoroval v roce 1675 oběh měsíce Io kolem Jupiteru. V průběhu roku zjišťoval, že délka zákrytu měsíce se mění v návaznosti na vzdálenost mezi Zemí a Jupiterem. Jeho měření vedla k hodnotě 212 000 km/s, tedy hodnotu o 40 % menší než je skutečná hodnota rychlosti světla.

Saturn

Ač se Saturn Jupiteru v mnoha věcech na první pohled podobá, jsou mezi nimi i velké rozdíly. Saturn má rovníkový průměr 120 536 kilometrů a váží „jen“ 95 hmotností Země, neb má velmi nízkou hustotu, pouhých 0,687 g/cm³ (Jupiter má hustotu 1,326 g/cm³, obdobně Uran a Neptun). Z toho vyplývá žertovný důsledek, který stojí za to s žáky sdílet, totiž že by Saturn ve fiktivním obřím oceánu mohl plavat. Saturn obíhá ve vzdálenosti 9,02 au až 10,05 au (excentricita 0,054) a rok na něm trvá 29,45 pozemský let.

Čím je Saturn známý především, jsou prstence. Prstence mají všichni plynní obři, nicméně Saturn je má nejvýraznější a díky sklonu rotační osy 26,7° jsou prstence snadno rozeznatelné i při amatérském pozorování navzdory jejich tloušťce, která je maximálně několik set metrů. Co Saturnovy prstence tvoří a jak vznikly? Víme, že vznikly mezi 10 až 100 miliony lety a že je tvoří kamení smíšené s kusy ledu. Jak prstence vznikly, není úplně jasné. Jedna z teorií říká, že se jedná o pozůstatek měsíce roztrženého slapovými silami [231][232].

Velká část poznatků, které dnes máme o Saturnu k dispozici, je přínosem mise Cassini-Huygens, která startovala v roce 1997. Po dosažení Saturnu se mise rozdělila – Sonda Cassini, která se primárně soustředila na průzkum Saturnu, zmapovala celou řadu procesů a charakteristik planety a jejích měsíců, viz Obrázek 3.74, zatímco modul Huygens se oddělil a přistál na měsíci Titanu, který prozkoumal. Díky misi víme, že Titan, největší měsíc Saturnu a druhý největší měsíc Sluneční soustavy, je jediným měsícem ve Sluneční soustavě s hustou atmosférou a je po Europě dalším kandidátem na mimozemský život. Přesto je to chladné a nehostinné místo a bude-li vhodné pro život, stane se tomu tak spíše až za několik miliard let až bude Slunce u konce života [233].



Obrázek 3.74: Zleva doprava a shora dolů: 1. Turbulentní struktury v Saturnových oblacích v infračerveném oboru (2016). 2. Detailní pohled na hurikán v severní polární oblasti (2013). 3. Uzlíky prachu v prstenci F nazývané „vrtule“. Tyto útvary vznikají rozvlnění látky prstence vlivem přítomnosti větších objektů (2017). 4. Měsíc Daphnis v Keelerově dělení (mezeře mezi prstenci). Měsíce, které výrazně ovlivňují tvar prstenců, nazýváme pastýřské měsíce (2017). 5. Měsíc Enceladus s gejzíry. Podmínky v podpovrchových oceánech jsou slučitelné s primitivními formami života. To ale neznamená, že zde život musí být (2015). 6. Předpokládané místo dopadu sondy Cassini v infračerveném oboru (2017). Převzato z [223].



Obrázek 3.75: Vizualizace mise Cassini-Huygens. Uprostřed sonda Cassini, vlevo dole oddělený modul Huygens mířící na měsíc Titan, vpravo dole planeta Saturn. Převzato z [234].

Saturn, ač je menší a vzdálenější než Jupiter, je stále snadno rozpoznatelný na noční obloze – jeho zdánlivá magnituda odpovídá nejjasnějším hvězdám noční oblohy.

Uran a Neptun

Ze skupiny plynných obrů je mnohdy vyčleňována podskupina ledových obrů, do níž patří Uran s Neptunem. Důvodem je, že se předpokládá, že jejich pevné nitro, proporčně mnohem větší než u Jupiteru a Saturnu, je složeno z metanu, čpavku a vody [235]. Ač mají ledoví obři podobnou atmosféru jako Jupiter se Saturnem, na první pohled se liší i namodralým zbarvením.

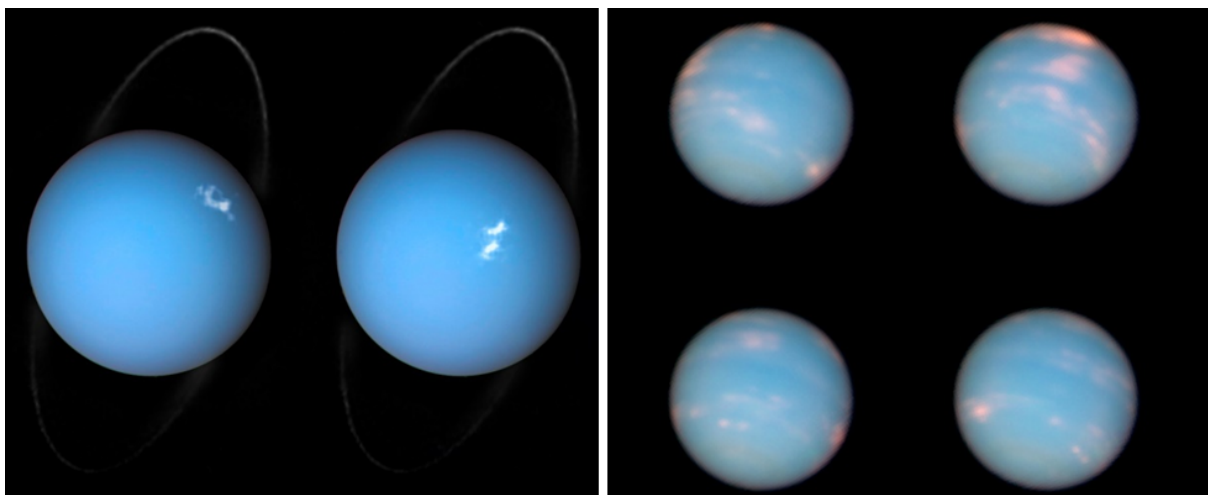
Uran může být za příznivých podmínek vidět pouhým okem, nicméně nebyl rozpoznán až do roku 1781, kdy jej objevil pruský astronom William Herschel (1738 – 1822), který se jinak proslavil například objevem infračerveného záření nebo jako konstruktér dalekohledů. Uran obíhá Slunce ve vzdálenosti 18,29 au až 20,1 au (excentricita 0,047) a rok na Uranu trvá 84 pozemských let.

Uran má nejchladnější atmosféru ve Sluneční soustavě, okolo -224°C , přičemž ve srovnání s Jupiterem a Saturnem je v atmosféře větší podíl metanu, který pohlcuje červenou barvu. Tento efekt je ještě silnější u Neptunu, proto má Uran světlejší barvu, zatímco Neptun sytě modrou barvu [30].

Neptun byl jako jediný objeven na základě matematických výpočtů, a to německým astronomem Johannem Gallem (1812 - 1910) v roce 1846 poté, co jeho existence byla předpovězena na základě měření gravitačních odchylek Uranu. Rok na Neptunu trvá téměř 165 let, jinými slovy od doby objevu dokončil jen jeden oběh. Neptun obíhá s excentricitou jen 0,011 a jeho střední vzdálenost je přibližně 30 au.

Jediná mise, která se v Uranu a Neptunu vydala, byl Voyager 2, v roce 1986, resp. v roce 1989. Využito k tomu bylo specifické konstelace planet, která nastává jednou za 176 let, kdy se všichni plynní obři seřadí téměř do přímky [236].

Mimo to většina našich poznatků o planetách pochází z pozemských pozorování nebo pozorování teleskopů na oběžné dráze Země (Hubblův vesmírný dalekohled a Spitzerův vesmírný dalekohled).



Obrázek 3.76: Vlevo snímky Uranu z Hubblova vesmírného dalekohledu (2011), vpravo snímky Neptunu s Hubblova vesmírného dalekohledu (2011). Převzato z [237] a [238].

Na Obrázku 3.76 zaujme, že sklon rotace vlastní osy Uranu je $97,7^{\circ}$ a dá se tak říct, že planeta se odvaluje po oběžné dráze. Příčinou takřka kolmému náklonu je patrně specifická kombinace gravitačního působení Jupiteru, Saturnu a Neptunu [236].

Neptun má sklon rotační osy $28,3^\circ$, čímž připomíná Saturn, Mars nebo Zemi. I Neptun má svoje specialitky – panují v jeho atmosféře nejsilnější bouře ve Sluneční soustavě, během nichž se objevují a mizí skvrny o velikosti planety Země [236]. Krom toho Neptunův měsíc Triton je jediným Měsícem, který se neotáčí souhlasně s mateřskou planetou, což nasvědčuje tomu, že šlo původně o bloudivé těleso zachycené gravitací Neptunu [239]. Triton je také nejchladnějším pozorovaným tělesem ve Sluneční soustavě.

Shrnutí

Tímto jsme probrali všechny planety Sluneční soustavy. Nejdůležitějším poznatkem pro žáky je, že zatímco terestrické planety se vzájemně zásadně liší, plynní obři mají vícero společných vlastností. I proto lze tuto dvouhodinovku z velké části postavit kolem Jupiteru. Následující dvě hodiny budeme věnovat periférii Sluneční soustavy.

41. Sluneční soustava VII. - hranice Sluneční soustavy

Téma: Trpasličí planety a planetky

Cíl: Seznámit žáky s příběhem Pluta a dalších planetek

Přístup k hodině

Prošli jsme Zemí a Měsíc, další kamenné planety i plynné obry a jejich měsíce. Než se zaměříme na Slunce a hvězdy obecně zbývá ještě několik dílčích témat, na něž se nyní zaměříme, neb jsme se jim doposud věnovali jen velice okrajově. Prvním z nich jsou planetky.

Trpasličí planety

Trpasličí planety jsou podkategorií planetek. Nejznámější trpasličí planetou je Pluto objevené v roce 1930 a záhy zařazené do Sluneční soustavy jako devátá planeta. V roce 2006 ale bylo na kongresu Mezinárodní astronomické unie v Praze opět vyřazeno [240]. Důvodů bylo několik:

- Výrazný sklon dráhy vůči ekliptice (inklinace 17°)
- Výrazná excentricita dráhy (0,246), kdy Pluto zdánlivě protíná dráhu Neptunu (neprotne ji právě z důvodu vysoké inklinace).
- Rozměry Pluta (je menší než všechny kamenné planety i než Měsíc)
- Svoji roli sehrál i objev dalších trpasličích planet nacházejících se za Plutem (Haumea, Makemake a Eris) s obdobnými parametry jako Pluto.

Pluto žáky zajímá a k dohledání je celá řada podkladů, které na něj nabízejí celistvý pohled včetně kontextu jeho vyřazení, například [241][242].

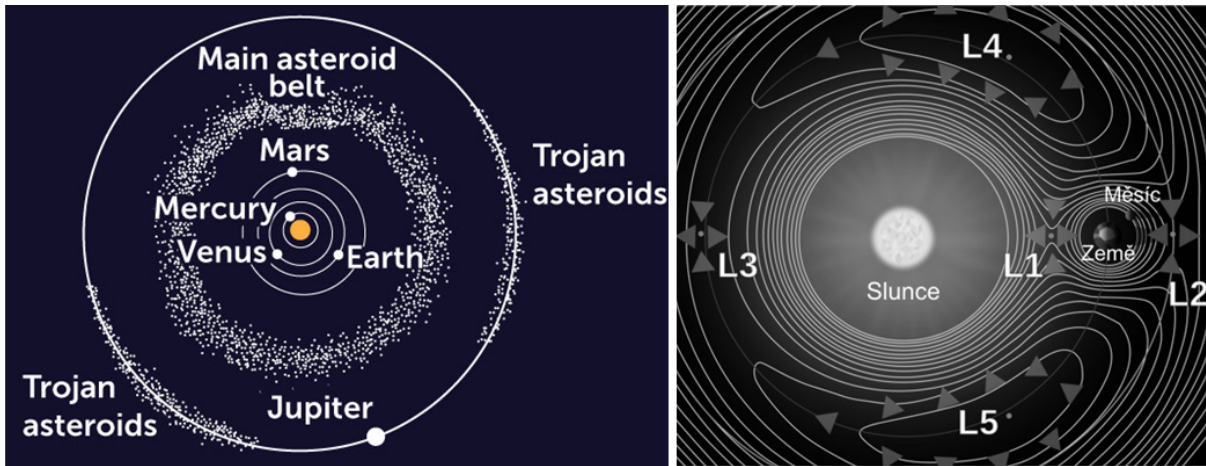
Pro zmíněné planetky byla vytvořena kategorie trpasličích planet – planetek, které obíhají Slunce, jsou dostatečně hmotné na to, aby měly sférický tvar, ale zároveň nejsou dost velké na to, aby se staly ve svém okolí dominantním objektem. Právě poslední podmínka je odlišuje od planet. Trpasličích planet bylo identifikováno ve Sluneční soustavě pět: kromě 4 zmíněných planetek (spadajících do podkategorie plutoidů) je to ještě trpasličí planeta Ceres, která se nachází v hlavním pásu planetek mezi Marsem a Jupiterem.

Pásy planetek

Nejde ale jen o trpasličí planety. Ceres, nejmenší z trpasličích planet, patří k tzv. hlavním pásu planetek, který se nachází mezi Marsem a Jupiterem. Ceres má hmotnost zhruba desetininy promile hmotnosti Země a tvoří přibližně třetinu hmotnosti hlavního pásu planetek. Pás mohl teoreticky vytvořit další planetu, nicméně se má za to, že tomu zamezilo gravitační působení Jupiteru [243]. Hlavní pás planetek je názorně vidět na Obrázku 3.77 vlevo.

Na Obrázku 3.77 vlevo můžeme také vidět dvě skupiny planetek na orbitě Jupiteru. Těm říkáme trojáni a nacházejí se v gravitačně metastabilních bodech, kde se vyrušují gravitační síly Slunce a Jupiteru. Tyto planetky rotují kolem gravitačního centra systému Slunce-Jupiter.

Obdobným přístupem lze nacházet metastabilní body i v jiných soustavách, například Slunce-Země. Těmto bodům se říká librační body a existuje jich celkem 5 v každé soustavě. V případě trojanů se jedná o body L4 a L5, viz Obrázek 3.77 vpravo na příkladu systému Slunce-Země. K tomuto tématu se vrátíme v 57. a 60. hodině.



Obrázek 3.77: Vlevo výskyt planetek na hranici vnitřní Sluneční soustavy, vpravo librační body v systému dvou těles. Převzato z [244] a [245].

Pak je tu Kuiperův pás, v němž se nachází mimo jiné plutoidy. Jedná se o pás planetek v rovině ekliptiky, který je ve vzdálenosti přibližně 30 až 55 au. Je ironické, že se oblast jmenuje podle Gerarda Kuipera (1905-1973), který se ve své práci z roku 1950 proti existenci pásu vymezoval, přesto se existence pásu v 80. letech prokázala [223]. Podobně jako v případě hlavního pásu planetek si můžeme představit Kuiperův pás jako nepovedenou planetu – odhaduje se, že souhrnná hmotnost pásu je zhruba jedna desetina hmotnosti Země [30][241]. Mnohé o Kuiperově páse víme díky sondě New Horizons, která jej bude dále zkoumat v průběhu 20. a 30. let 21. století.

Daleko za Kuiperovým pásem se nachází Oortův oblak, který je podobné povahy, nicméně nachází se až ve vzdálenosti desítek tisíc astronomických jednotek a pravděpodobně má kulovitý tvar. Jeho hmotnost by mohla dosahovat až 10 hmotností Země. Tělesa v Oortově oblaku ale nemůžeme přímo pozorovat – naše znalosti o něm se opírají především o výzkum dlouhoperiodických komet [246].

Na Obrázku 3.78 můžeme názorně vidět celistvý pohled na Sluneční soustavu.



Obrázek 3.78: Schéma sluneční soustavy. Převzato z [247].

Shrnutí

Hodina věnovaná periférii Sluneční soustavy je na jednu stranu samonosná a lze ji tak přeskóčit bez větší újmy na kontinuitě, na druhou stranu nedoporučuji dílčí témata v ní obsažená úplně vynechat, neb zkušenosti praví, že není diskuze o Sluneční soustavě bez zmínky o Plutu. Posláním hodiny je zasadit žákům témata spojená s Plutem a obecně s planetkami do širšího kontextu. S periférií Sluneční soustavy navíc těsně souvisí téma komet, kterým budeme věnovat následující hodinu.

42. Sluneční soustava VIII. - komety

Téma: Charakteristiky komet a jejich výzkum

Cíl: Doplnit žákům celistvý obraz o Sluneční soustavě o komety

Přístup k hodině

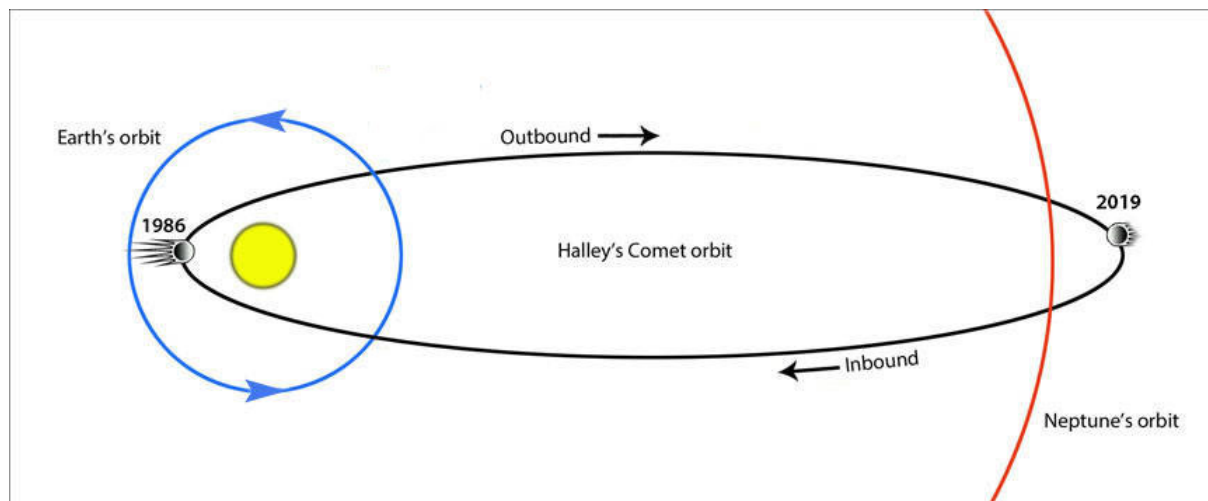
Jestliže o planetkách, Kuiperově pásu a Oortově oblaku toho širší veřejnost mnoho neví, komety zná každý. V poslední hodině bloku o Sluneční soustavě se jim budeme věnovat jak z hlediska charakteristiky, tak z hlediska výzkumu, protože jedním z největších úspěchů kosmonautiky počátku 21. století je zdařilé přistání mise Rosetta na kometárním povrchu.

Co jsou to komety?

Komety jsou zmrzlá tělesa, která se pohybují obrovskými rychlostmi (až 70 km/s) Sluneční soustavou obvykle po drahách s extrémní excentricitou, kdy dráha sahá až daleko do Kuiperova pásu nebo až do Oortova oblaku.

Kometa za sebou zanechává charakteristický prachoplynný ohon, který míří směrem od Slunce, způsobený tlakem slunečního světla. I proto jsou komety snadno pozorovatelné pouhým okem a jejich pozorování jsou zmapována už od starověku.

Nejznámější kometou je Halleyova kometa, která má periodu oběhu 76 let. Její pozorování je spojeno s celou řadou historických událostí a konsekvencí (12 př. n. l – Betlémská hvězda, 1066 – bitva u Hastingsu, 1607 – pozorování Johannese Keplera) a naposledy byla pozorována v roce 1986. S ohledem na délku periody se charakteristika jejího pozorování pokaždé trochu liší, protože kometa nepřilétá vždy ve stejnou roční dobu. Hrubou představu o dráze Halleyovy komety poskytne Obrázek 3.79



Obrázek 3.79: Dráha Halleyovy komety. Převzato z [248].

Pozorování komet

Halleyova kometa měla v roce 1986 jasnost přibližně 2 mag (odpovídá Polárce), byla proto pouhým okem viditelná, nicméně nemáme, i s ohledem na tehdejší techniku, k dispozici fotografie, které by poskytovaly detailní relativní srovnání s jasností hvězd. V roce 2061, při dalším přeletu Halleyovy komety se očekává jasnost -0,3 mag, což odpovídá pozorování nejjasnějších hvězd noční oblohy nebo Saturnu v opozici [249].

Komety můžeme na jejich cestě ke Slunci a od Slunce vidět na noční obloze vždy po několik po sobě jdoucích dní. Ilustrovat to můžeme na příkladu komety Neowise, která byla v České republice k vidění na noční obloze v létě 2020, viz Obrázek 3.80, a jejíž zdánlivá magnituda se pohybovala mezi 1 a 2 [250]. Na Obrázku 3.81 můžeme vidět dlouhoexpoziční fotografii komety.



Obrázek 3.80: Noční obloha severním směrem v českých zeměpisných šířkách v červenci 2020, kdy byla k vidění kometa Neowise. Převzato z [251].



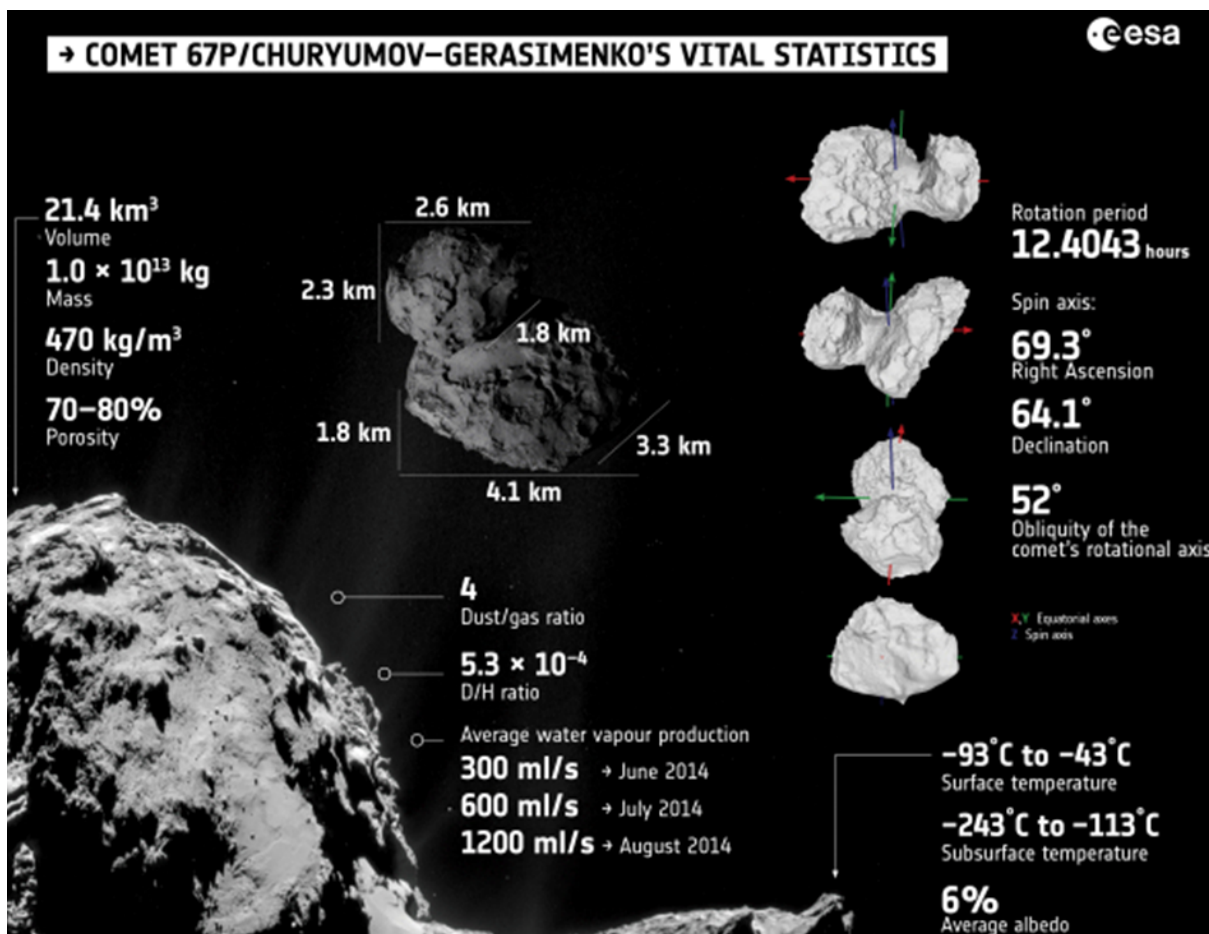
Obrázek 3.81: Dlouhoexpoziční fotografie komety Neowise nad hradem Bezděz. Převzato z [252].

Proč komety zkoumáme?

Komety jsou spojovány s výskytem vody i života na Zemi a pomáhají nám lépe chápat historii Sluneční soustavy. V neposlední řadě komety jsou z důvodu jejich velikosti (jednotky kilometrů) a jejich rychlosti rizikem pro život na Zemi. První bližší průzkum komet probíhal v roce 1986, kdy se k Halleyově kometě vydalo 5 sond. Největšího úspěchu dosáhla evropská sonda Giotto, která se přiblížila k Halleyově kometě až na vzdálenost 600 km [253].

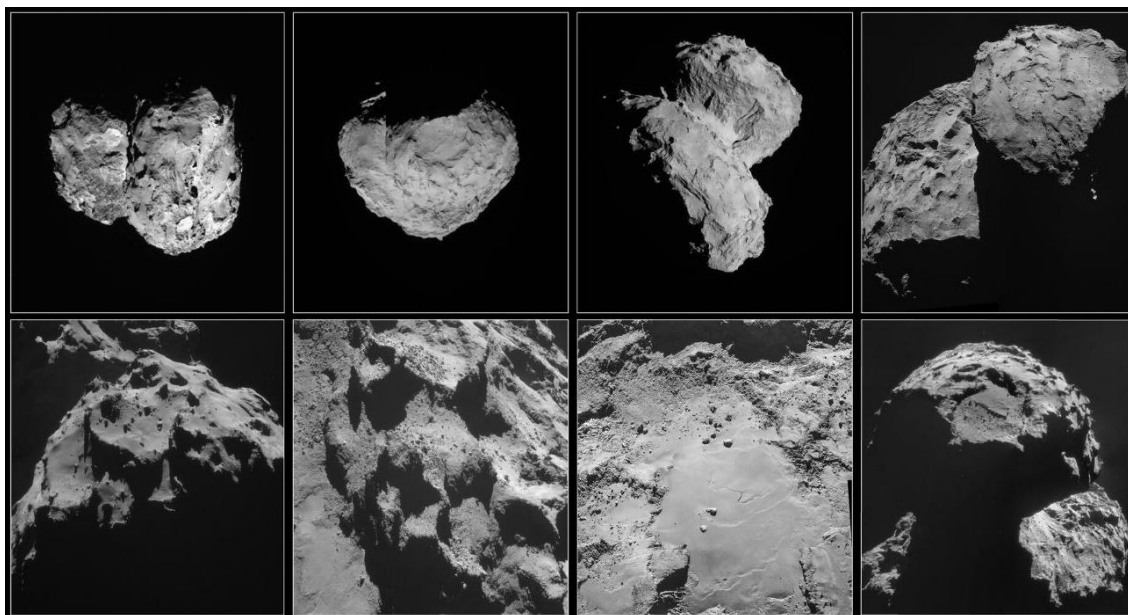
Úspěch mise Giotto byl základem pro misi Rosetta, jejímž cílem bylo přistání na kometě. Jako cíl byla zvolena kometa 67P/Čurjumov-Gerasimenko s průměrem odhadovaným na 2 km a krátkou periodou, s dráhou sahající za oběžnou dráhu Jupiteru. Detailnímu technickému popisu sondy Rosetta a přidruženého landeru Philae se věnuje například zmíněná přednáška Dušana Majera [253], vizualizace dráhy letu je k vidění na stránkách ESA [254]. My se zaměříme na výsledky mise.

Sonda Rosetta dorazila ke kometě v srpnu 2014, v listopadu 2014 se oddělil přistávací modul Philae, který přistál přímo na kometě. Díky Rosettě a Philae máme informace o rozměrech a hmotnosti komety, kompozici komety (včetně výskytu vody, resp. těžké vody, a organických látek) nebo rychlosti vypařování komety, viz Obrázek 3.83. To vše, a další, bylo sledováno po několika letech, proto mohly být zaznamenány změny na kometě v průběhu velké části jejího cyklu.



Obrázek 3.82: Charakteristika komety 67P/Čurjumov-Gerasimenko, kterou prozkoumala mise Rosetta. Převzato z [255].

Na Obrázku 3.83 můžeme vidět snímky pořízené Rosettou. Před misí Rosetta se mělo za to, že kometa může mít tvar kulovitý nebo elipsovité. Snímky ale ukázaly tvar, který spíše připomíná kovadlinu nebo kachničku.



Obrázek 3.83: Snímky komety 67P/Čurjumov-Gerasimenko, pořízené v rámci mise Rosetta. Převzato z [256].

Z holistického hlediska je dobré si uvědomit, jak taková mise v reálném čase probíhá. Podobně jako na jakékoli nepilotované misi, která se vydá daleko za zemské orbity, nelze řídit misi v reálném čase a všechny procesy musí být automatizované.

Stojí za to před žáky zmínit, že o úspěchu nebo neúspěchu přistání na Marsu, Titanu nebo na kometě jsme se dozvěděli až s odstupem několika minut až několika hodin. Co to znamená? Že na elektroniku a její řízení jsou kladeny velké nároky – vše musí fungovat autonomně, na první pokus a po několikaletém letu k cílové destinaci.

Shrnutí

Kometry jsou atraktivní téma, na čemž má podíl i celá řada sci-fi autorů, například Jules Verne (1828 - 1905) nebo Arthur C. Clarke (1918 - 2008). Speciálně příběh mise Rosetta je specifický tím, že se Evropské kosmické agentuře povedlo misi dostat do širšího povědomí – v rámci popularizační činnosti vznikl i animovaný film pro děti přibližující příběh mise [257]. Posláním této hodiny je především přiblížit žákům, co o kometách víme a jakou cestou jsme tyto informace získali.

Hodina věnovaná kometám nám uzavírá tematický celek věnovaný Sluneční soustavě. Sluneční soustava je didakticky probádaným územím na středních školách. Opřít se lze jak o učebnice pro střední školy, tak o celou řadu přednášek a online nástrojů k vizualizaci, například online planetarium [258].

V následujících hodinách se budeme bavit o hvězdách, tedy tématu spadajícím do klasické astrofyziky. Tímto se otevírá také prostor k testování žáků, které by mělo spočívat na vědomostních otázkách, alternativně lze otázky na Sluneční soustavu propojit se 3. Keplerovým zákonem.

43. a 44. Úvod do hvězd

Téma: Charakteristika hvězd

Cíl: Nastínit žákům co jsou to hvězdy, proč a jak svítí

Přístup k hodině

Hvězdy jsou širokým tématem s přesahem do celé řady kapitol fyziky, z nichž mnohé (elektromagnetismus, optika, resp. fotometrie, nebo atomová fyzika) jsou zařazeny až ve vyšších ročnících středoškolské fyziky nebo se na středních školách neučí. Cílem této dvouhodinovky je pokusit se přehledově nahlédnout do těchto témat, přičemž k mnohým z nich se v příštích hodinách vrátíme.

Co jsou to hvězdy

Hvězdy jsou tělesa zhruba kulovitého tvaru z plazmy a plynu dostatečně hmotná na to, aby v jejich nitru byl tlak a teplota pro zažehnutí termojaderné fúze. Hvězdou se stávají objekty s hmotností zhruba od jedné desetiny hmotnosti našeho Slunce, přičemž hmotnost hvězdy má zásadní vliv na její charakteristické vlastnosti a vývoj, o čemž se budeme bavit v následujících hodinách. Nyní je třeba se zastavit a žákům nastínit, co je to plazma a co je to termojaderná fúze.

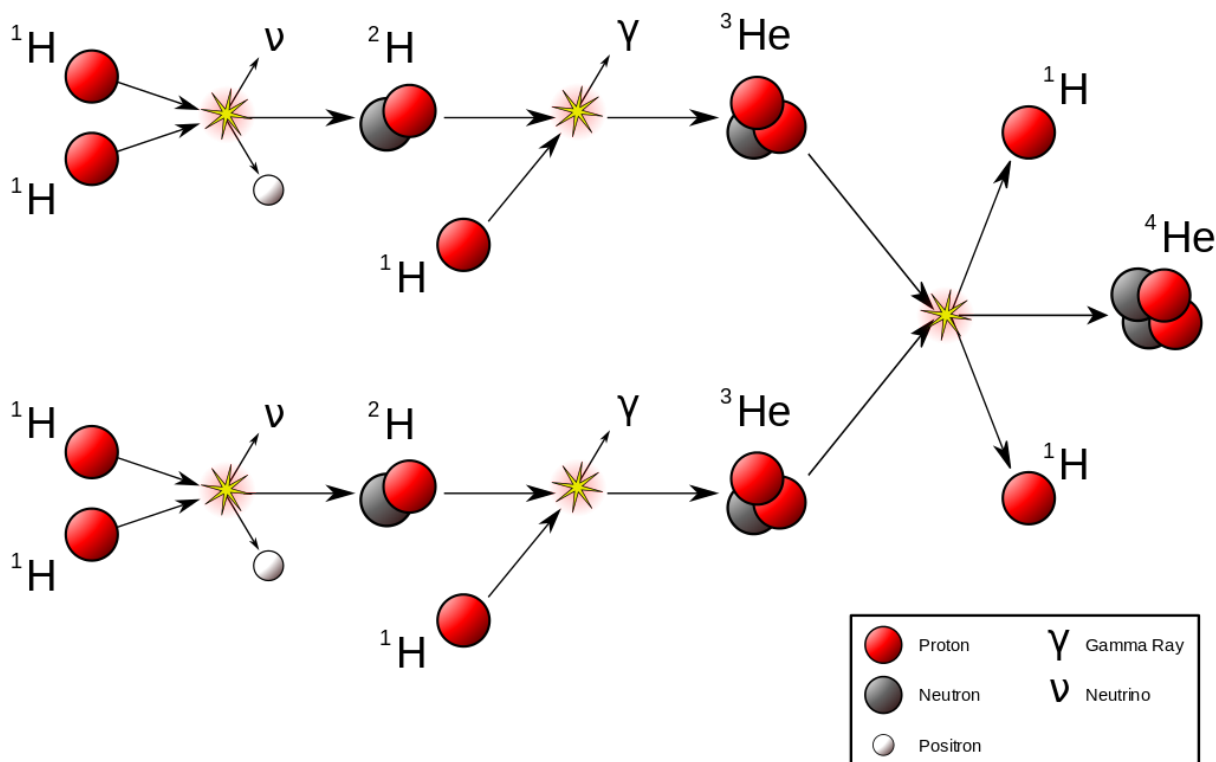
Plazma je tzv. čtvrté skupenství, které ač není zapsáno do širšího povědomí, tvoří 99 % viditelného vesmíru. Jde o ionizovaný plyn, tedy prostředí plné nabitých částic. Rozlišujeme dva typy plazmatu – nízkoteplotní plazma, které vzniká vlivem elektrických polí (například v plamenu nebo zářivce), a vysokoteplotní, které je spojené s vysokým stupněm ionizace a vzniká za teplot řádově milionů stupňů v nitrech hvězd nebo termojaderných reaktorech.

Termojaderná fúze je slučování dvou lehkých atomových jader za vzniku jednoho těžšího jádra, jehož hmotnost je menší než součet hmotností původních dvou jader. Tento hmotnostní rozdíl je částečně vyrovnán uvolněním elementárních částic, zbývající rozdíl se přemění do podoby elektromagnetického záření. Energii záření určíme dle slavného Einsteinova vzorce $E=mc^2$, kde setrvačná hmotnost tělesa je mírou jeho energetického obsahu [259]. Samotná rovnice vychází ze Speciální teorie relativity, o níž se budeme bavit v 55. hodině. Z didaktického hlediska je právě termojaderná fúze nejsnáze uchopitelnou aplikací Einsteinova vztahu.

Procesy v nitrech hvězd jsou poměrně složitou problematikou. V učebnici Astrofyzika od nakladatelství Prométheus [40] je téma popsáno jen velice okrajově, zatímco Přehled středoškolské fyziky [39] blíže nastiňuje mechanismus termojaderné fúze, nicméně bez návaznosti na emisní spektra hvězd. Budeme-li chtít využít studijní opory, která k mechanismům v nitrech hvězd přistupuje více ze široka, je třeba sáhnout po knize Fyzika hvězd a vesmíru od Martina Šolce [260] s vědomím, že je obsahově v leccm překonána a svým přístupem je na hraně mezi střední školou a vysokou školou. My se nyní zaměříme na klíčové aspekty procesů v nitrech hvězd a jejich důsledky.

Fyzika stojící za termojadernou fúzí v jádrech hvězd je poměrně komplikovaná a dalece za hranicí středoškolské fyziky. Navíc nelze říct, že se jedná o jednu reakci, která by se dokola opakovala, ale o celý řetězec reakcí, jejichž produkty jsou dle povahy reakce různé. Na Obrázku 3.84 je k vidění tzv. proton-protonový (p-p) cyklus, který dominantně probíhá ve Slunci a dalších hvězdách podobné velikosti. Nejde ale o jediný cyklus, který ve hvězdách probíhá – v těžkých hvězdách převažuje tzv. CNO cyklus. V CNO cyklu vystupuje uhlík jako katalyzátor, zatímco dusík a kyslík jsou meziprodukty. V obou případech, CNO cyklus i p-p cyklus do reakce vstupuje vodík a vystupuje helium [261].

Ve hvězdách, které jsou na konci svého života, probíhá fúze těžších prvků. Téma termojaderné fúze je na střední škole i na kvalitativní úrovni didakticky poměrně těžko uchopitelné, proto se zaměříme rovnou na praktické důsledky.



Obrázek 3.84: Proton-protonový cyklus v nitru hvězdy. Převzato z [262].

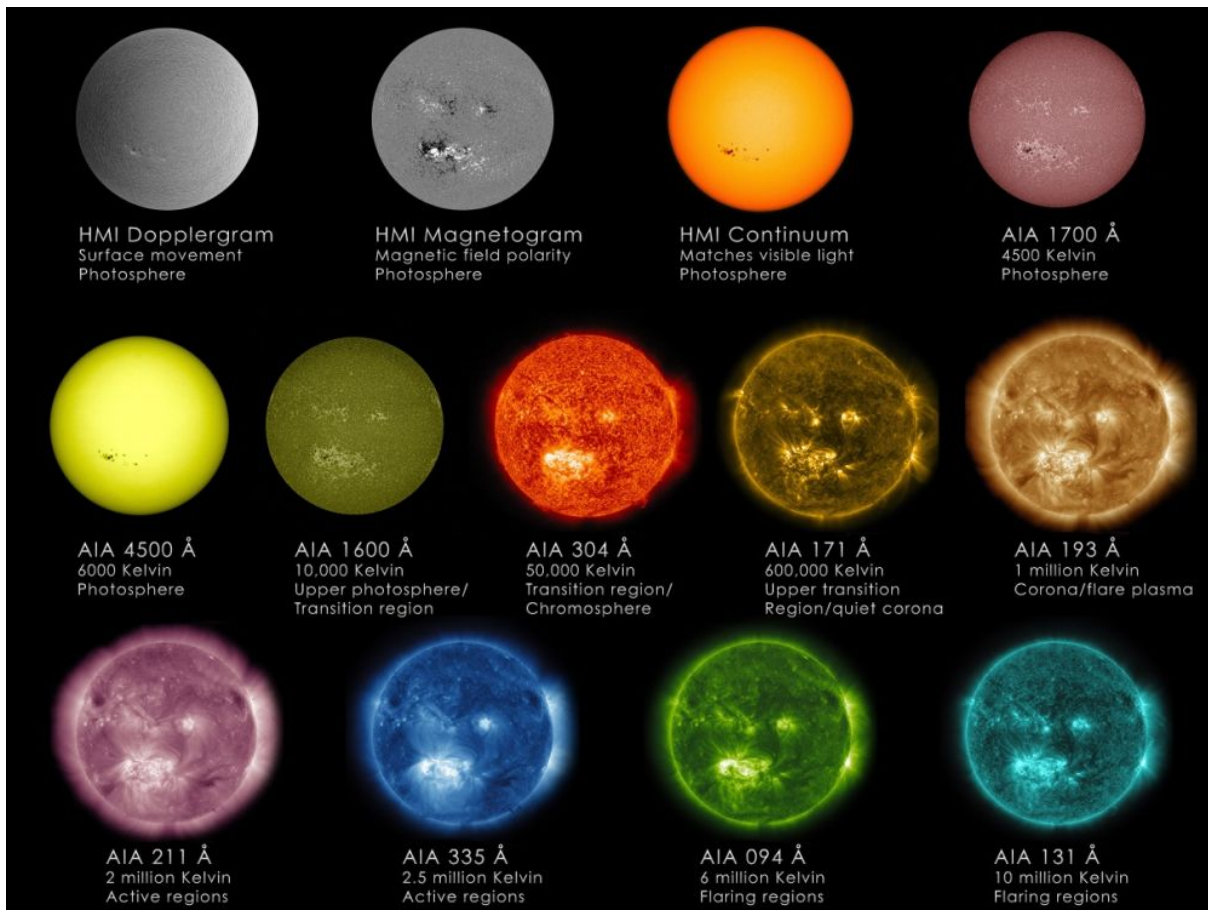
Energie uvolněná z termojaderné fúze má povahu gama záření, které se šíří z nitra hvězdy. Nicméně světlo, které k nám dopadá z hvězd, není gama zářením. Jak tedy tuto informaci uchopit?

V nitru hvězdy je velmi husté prostředí – v jádru našeho Slunce je hustota přibližně 150 g/cm^3 , tedy řádově více, než je v případě nejhustší hmoty, se kterou na Zemi pracujeme. Dále od jádra tlak, hustota a teplota klesají. Než se ale světlo z jádra dostane na povrch, trvá to statisíce let [228][261], kdy záření šířící se z jádra hvězdy se neustále absorbuje a vyzařuje v hustém plazmatickém prostředí, čímž se postupně mění jeho charakteristika.

Narážíme tu na dvě témata, která jsou věci pozdějších ročníků středoškolské fyziky nebo jsou na hraně, případně za hranou, středoškolské fyziky: je to elektromagnetické spektrum a tepelné záření. Elektromagnetické záření je doménou elektrodynamiky a spíše než že bychom se soustředili na mechanismy jeho vzniku a jeho povahu, to je záležitostí 3. ročníku středoškolské fyziky, zaměříme se na spektrum samotné právě na příkladu hvězd. Tím se dostaneme i k tepelnému záření.

Ve hvězdách probíhá celá řada procesů, které souvisejí s jeho plazmovou povahou. Důsledkem těchto procesů je, že hvězdy mají silné magnetické pole a září v širokém spektru od radiových vln [263] po gama záření [264]. Na Obrázku 3.85 můžeme vidět snímky Slunce pořízené různými detekčními metodami, především v závislosti na vlnové délce emitovaného záření, která je svázaná s teplotou, jak uvidíme později.

Z hlediska přímého pozorování hvězd, jsou pro nás klíčové optické charakteristiky, které těsně souvisejí s povrchovou teplotou hvězdy. Zde je potřeba si udělat odbočku a vysvětlit si, kde se u teplých zdrojů světlo bere.



Obrázek 3.85: Snímky Slunce pořízené různými detekčními metodami. Převzato z [262].

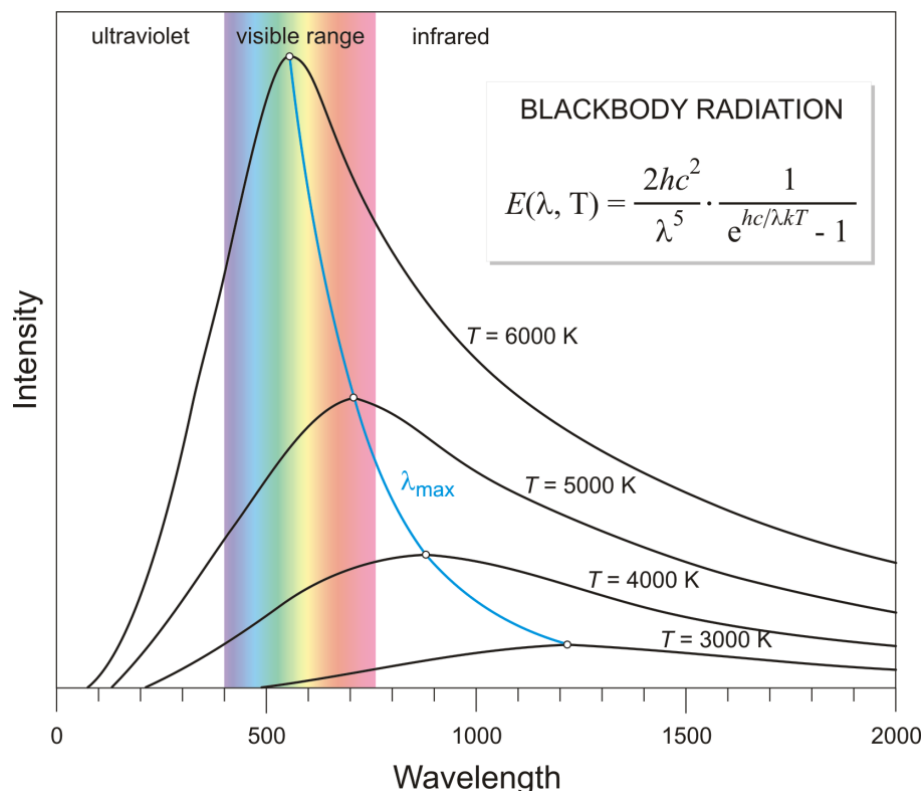
Jedním z důsledků termodynamických a kvantových zákonů je tzv. Planckův vyzařovací zákon, popisující záření absolutně černého tělesa. Absolutně černé těleso je idealizované těleso, které vše pohlcuje a zároveň je ideálním zářičem. Ačkoli běžná tělesa světlo odráží, spektrum tepelného záření se od ideálně černého tělesa nemusí příliš lišit.

Na Planckův vyzařovací zákon jsou navázány další principy, jako kvantová povaha světla, Wienův posunovací zákon a Stefanův-Boltzmannův zákon. Tato problematika se na středních školách probírá jen okrajově, pokud vůbec, a my tu nemáme prostor se jí zabývat detailněji. Proto jen kvalitativní shrnutí výstupů:

- Všechna tělesa emitují širokospektrální elektromagnetické záření.
- Záření se při interakci s hmotou a na to navázaných přeměnách energie chová jako proud částic, tzv. fotonů, při šíření prostorem se chová jako vlnění.
- Energie fotonů je svázána s vlnovou délkou záření vztahem $E = hc/\lambda$, kde h je Planckova konstanta $6,63 \cdot 10^{-34}$ J/s. Čím kratší je vlnová délka, tím vyšší je energie fotonů.
- Zářivý výkon vyjadřuje počet fotonů dané energie – zvyšováním jasu při zachování vlnové délky (například navyšováním počtu zdrojů) zvyšujeme světelný výkon, ale energie jednotlivých fotonů zůstává stejná.
- Intenzita záření a energie fotonů, resp. vlnová délka záření závisí na povrchové teplotě tělesa. S rostoucí teplotou se posouvá zářivé spektrum ke kratším vlnovým délkám a roste intenzita.
- Maximum intenzity nastává pro vlnovou délku definovanou vztahem: $\lambda = b/T$, kde b je konstanta rovná 2,898 mmK a T je teplota tělesa v Kelvinech (jednotka Kelvin je škálována stejně jako jednotka Celsius, začátek stupnice je jen posunutý do absolutní nuly, tedy $0\text{ }^{\circ}\text{C} = 273,15\text{ K}$).

Z šesti bodů zmíněných výše lze vyvodit celou řadu důsledků – je tu nepřímě popsán fotoelektrický jev, z něhož lze dále dovodit, proč se interakce záření s hmotou zásadně liší dle vlnové délky, a proto nám například nemůže ublížit bílé světlo i při velké intenzitě tak jako UV nebo rentgen i při malých dávkách. Tato dílčí témata bychom měli spíše ponechat na obecnou středoškolskou fyziku 3. ročníku. My se nyní zaměříme na Planckův zákon a jeho důsledky.

Planckův vyzařovací zákon (pro záření absolutně černého tělesa) a Wienův posunovací zákon nám ilustrativně přiblíží Obrázek 3.86.



Obrázek 3.86: Planckův vyzařovací zákon pro záření absolutně černého tělesa a Wienův posunovací zákon. Převzato z [266].

Integrací Planckova vyzařovacího zákona dostaneme Stefanův-Boltzmannův zákon. Nejde o snadný výpočet ani v mezích matematiky 4. ročníku. Výsledkem integrace je jednoduchý vztah mezi intenzitou záření a teplotou tělesa:

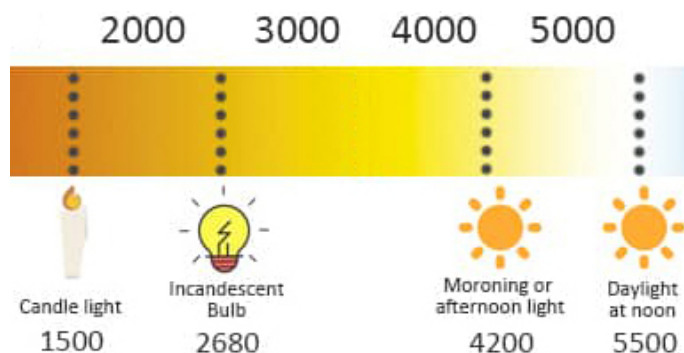
$$I = \sigma T^4 \quad (3.19)$$

kde σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta a má hodnotu $5,68 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$. Stefanův-Boltzmannův zákon se dále v obecné formě upravuje s využitím koeficientu emisivity, která vyjadřuje poměr vyzařování tělesa vůči záření absolutně černého tělesa a je závislá na vlnové délce. Wienův posunovací zákon a Stefanův-Boltzmannův zákon můžeme hned žákům ilustrovat na dobře uchopitelném příkladu.

Dosadíme-li $T = 310 \text{ K}$, což odpovídá teplotě lidské kůže, vyjde nám, že vlnová délka intenzitního maxima je přibližně 10 mikronů, což odpovídá infračervenému záření, které můžeme vidět prostřednictvím infrakamery. Pokud dosadíme do Planckova vyzařovacího zákona, resp. do Stefanova-Boltzmannova zákona, vyjde nám, že člověk, jako černé těleso, by měl zářit 520 W/m^2 , tedy zhruba 1000 W. To je docela hrozné číslo, nicméně je třeba mít na paměti, že září i vše kolem nás a také, že člověk není absolutně černé těleso. Přesto, lidské tělo ztrácí v našich zeměpisných šířkách zářením až 60 % metabolických teplených ztrát [267]. Tepelné ztráty v konkrétní okamžik závisí na celé řadě faktorů od fyzické zátěže po teplotu okolí a vlhkost [268].

Postup by se dal i obrátit a říct si, při jaké teplotě dává Wienův posunovací zákon vlnovou délku, která je viditelná. Tato úvaha je ale zavádějící – Wienův posunovací zákon nám říká závislost maxima intenzity na teplotě. Ve skutečnosti zahřáté objekty viditelně svítí už v teplotách stovek stupňů celsia, ač je jejich vyzařovací maximum pro tyto teploty hluboko v infračerveném oboru.

S rostoucí teplotou začnou ve světelném spektru vedle dlouhých vlnových délek (červená a oranžová) hrát větší roli vlnové délky odpovídající zelené a zelenomodré, což vyvolá vjem bílé až modrobílé barvy. Je třeba si uvědomit, že zde se už dostáváme do roviny vnímání barev lidským okem. Pro tyto účely se zavádí pojem barevná teplota, viz Obrázek 3.87.



Obrázek 3.87: Barevná teplota. Převzato z [269].

Vnímání barev už je více doménou fotometrie a diskuze má potenciál sklouznout daleko od astrofyziky. Dostaneme-li se až k pojmům teplé a studené světlo (pojmy, které se určují dle barevné teploty, přičemž pojmosloví je antiintuitivní – teplé světlo má nižší teplotu než studené světlo), žáky můžeme dokonale zmást. Na druhou stranu nedoporučuji se těmto tématům vyhnout úplně – zasadí problematiku do širšího kontextu, což se nám bude hodit hned v následující hodině.

Mimo to mohou žáci přijít s námitkou, že ne všechny zdroje světla jsou horké. V takové situaci je třeba zmínit, že rozlišujeme teplé zdroje a studené zdroje. Teplými zdroji jsou krom hvězd například žárovka nebo svíčka, studenými zdroji jsou výboje v plynech, luminiscence nebo polovodičové přechody. Téma studených zdrojů jde daleko mimo astronomii a astrofyziku a souvisí s kvantovou povahou hmoty, resp. s přechody mezi energetickými hladinami v atomech. Studené zdroje jsou přímo nebo nepřímo probírány ve 3. a 4. ročníku středoškolské fyziky.

Shrnutí

Termojaderná fúze, procesy v nitrech hvězd a na to navázané emisní charakteristiky jsou ve středoškolském kontextu vydatnou látkou. Žáci by si měli z této hodiny odnést především klíčové kvalitativní výstupy:

- V nitrech hvězd z lehkých prvků vznikají těžší, zatímco se uvolňuje energie.
- Energie v podobě záření se šíří z nitra hvězd až na povrch.
- Z povrchu hvězd se energie vyzáří dominantně v podobě elektromagnetického záření s energií odpovídající teplotě povrchu hvězdy.
- Detekované emisní spektrum hvězdy nese klíčové informace o parametrech hvězdy – procesech v jejím nitru, velikosti a nepřímo i o její vzdálenosti.
- Hvězdy mají omezené zásoby lehkých prvků. Když lehké prvky v nitru hvězdy dojdou, v závislosti na charakteristice hvězdy fúze končí nebo se zažehne fúze těžších prvků.

Poslední dva body úzce souvisejí s dělením hvězd a evolucí hvězd. Těmto tématům se budeme důkladně věnovat v pozdějších hodinách. Následující hodinu zaměříme na Slunce.

45. Slunce I.

Téma: Charakteristika Slunce

Cíl: Seznámit žáky s parametry Slunce a jeho rolí pro život na Zemi

Přístup k hodině

Po obecném Úvodu do hvězd, aplikujeme nově nabyté znalosti na Sluneční soustavu. Tím zároveň doplníme chybějící informace o Sluneční soustavě, která ač má ve svém centru hvězdu, jenž není svými parametry ve vesmíru až tak výjimečnou. Je-li něčím naše Slunce výjimečné tak tím, že jde o samostatnou hvězdu.

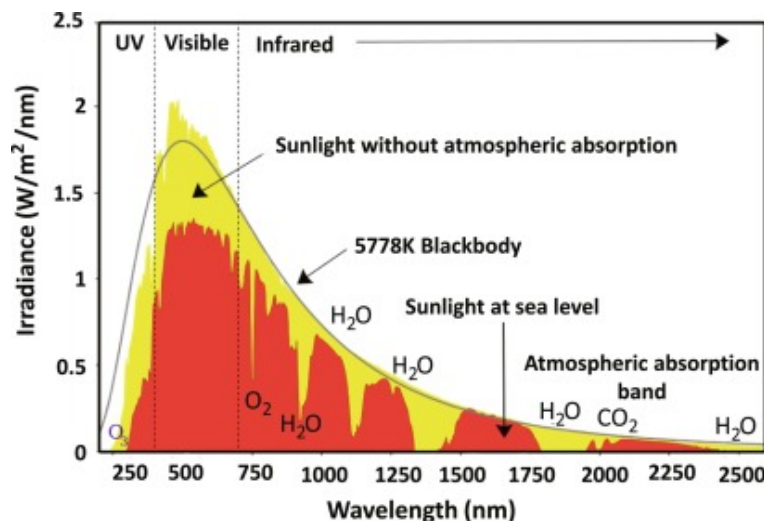
Parametry Slunce

Vzdálenost mezi Zemí a Sluncem odpovídá 500 světelným sekundám. Slunce, a s ním celá Sluneční soustava, obíhá střed naší galaxie (Mléčná dráha) s periodou přibližně 224 milionů let, centrum galaxie je ve vzdálenosti zhruba 25 000 světelných let.

Slunce se řadí do kategorie žlutých trpaslíků. Co to z hlediska řazení hvězd znamená, si přiblížíme v [49. hodině](#). Pro tuto chvíli se omezíme na s tím související vlastnosti:

- Povrchová teplota Slunce je 5778 K, čemuž dle Wienova posunovacího zákona odpovídá maximum vyzařované intenzity pro 500 nm.
- Celkový světelný výkon Slunce je zhruba $4 \cdot 10^{26}$ W. Tuto hodnotu dostaneme pronásobením Stefanova-Boltzmanova zákon plochou Slunce. Vztáhneme-li plošný výkon Slunce ke vzdálenosti astronomické jednotky, dostáváme, že výkon dopadající na Zemi odpovídá $1,4 \text{ kW/m}^2$.

Jaké jsou důsledky? Na Obrázku [3.88](#) můžeme vidět dvě spektra – červeně je spektrum Slunce měřené na povrchu Země, žlutě je spektrum měřené z orbity, obě závislosti jsou porovnány s Planckovým vyzařovacím zákonem pro 5778 K.



Obrázek 3.88: Emisní spektrum Slunce. Převzato z [\[270\]](#).

Na Obrázku [3.88](#) můžeme vidět, že spektrum pozorované na Zemi je narušené absorpcí v atmosféře. Na úrovni viditelného spektra můžeme vidět menší výkyvy v intenzitě. Těmito výchytkám se říká Fraunhoferovy čáry a jsou způsobeny absorpcemi v atmosféře Země, ve fotosféře Slunce (plynný obal Slunce) a v chromosféře Slunce (barevně zářící vrstva nad fotosférou). Dnes jsou těchto čar identifikovány stovky [\[271\]](#).

Spektrum na Obrázku [3.88](#) je zaznamenáno za specifických podmínek – v definovaný čas v definované lokalitě. Naměřené spektrum se zásadně liší podle toho, jak vysoko je Slunce nad obzorem.

Sluneční svit prochází atmosférou, ve které se rozptyluje. Tento rozptyl, Rayleighův rozptyl, způsobuje, že je obloha modrá. Čím delší dráhu musí světlo atmosférou urazit, tím větší má Rayleighův rozptyl vliv na spektrum, resp. tím více jsou rozptýleny krátkovlnné složky světla a barevná teplota, kterou vnímáme, se posouvá směrem k nižším hodnotám, viz Obrázek 3.89.



Obrázek 3.89: Změna emisního spektra Slunce v průběhu dne. Převzato z [272].

Na Obrázku 3.89 můžeme názorně vidět, že na Zemi nejsme od počínajícího soumraku do končího úsvitu přirozeně vystaveni modrému světlu, které na organismus působí stimulačně. Umělému modrému světlu jsou organismy na Zemi vystaveny teprve několik desítek let a v posledních letech vzniká kolem dopadů světla na organismy celá nová vědní disciplína [273]. Jde o velice zajímavé téma, se kterým by měli být středoškoláci seznámeni, nicméně s fyzikou nemá tolik společného a zařazeno by mělo být spíše do biologie.

Výzkum Slunce

Přístupy k pozorování Slunce můžeme rozdělit do 3 kategorií:

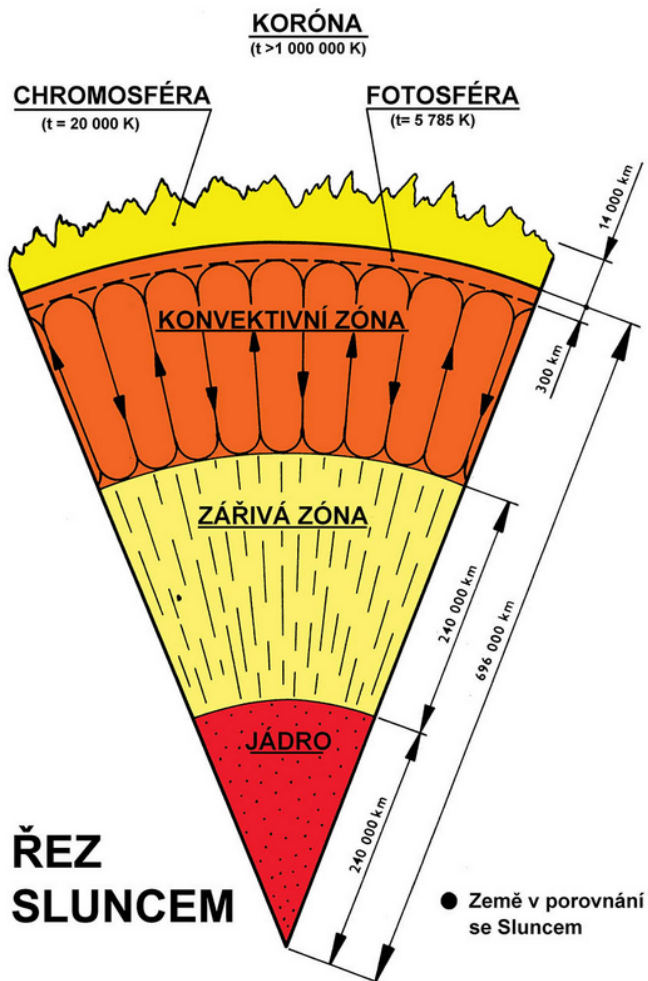
- Dlouhodobá pozorování ze Země nebo ze zemské orbity
- Pozorování prostřednictvím sond vyslaných za účelem specifického výzkumu Slunce
- Pozorování jevů, které můžeme zaznamenat jedině při zatmění Slunce

Dlouhodobá pozorování se zaměřují především na tzv. sluneční počasí, což obnáší pozorování slunečních skvrn, otřesů Slunce nebo slunečních erupcí. Slunečním počasím myslíme především sluneční vítr, který je proudem nabitých částic, před nímž nás chrání magnetosféra Země.

Sluneční počasí má svoji dynamickou složku, kdy se aktivita mění v řádu dnů a týdnů, a periodickou složku, kdy se mění v závislosti na slunečním cyklu. Mírně zvýšená aktivita Slunce se může projevit polárními zářemi mimo polární oblasti, zásadně zvýšená aktivita může už mít neblahý až fatální vliv na infrastrukturu na Zemi a na orbitě Země. Naposledy k podobnému incidentu došlo v roce 1859, tzv. Carringtonova událost, kdy byly pozorovány polární záře až na Kubě, nicméně z hlediska infrastruktury došlo jen k narušení telegrafní sítě [274].

Povaha rizik spojených se slunečním počasím je doménou elektromagnetismu, který se probírá až ve 3. ročníku středoškolské fyziky. Proto zde nebudeme zabíhat do podrobností. Přesto lze očekávat, že téma bude žáky zajímat, proto bych nedoporučoval jej opomenout. Z pozice učitele je nicméně třeba se omezit na sdělení, že dnes by událost podobného rozsahu měla zásadní vliv na život na Zemi, protože by vedla k poškození elektroniky (především té, která bude v provozu) a elektrorozvodné sítě. Nešlo by tedy o blackout, kdy se mohou krátkodobě ocitnout celé regiony bez elektřiny, ale o situaci, kdy by reálně hrozilo, že přijdeme v globálním měřítku o většinu moderních technologií a informační infrastrukturu dost možná na celé týdny [275].

Na druhou stranu není třeba strašit – udává se, že pravděpodobnost podobné události je mezi 0,46 % a 1,88 % za 10 let [276] a ač tomuto riziku širší veřejnost nepřikládá větší váhu, kontinuálně je vyvíjena celá řada bezpečnostních systémů, které mají potenciální dopady podobné události eliminovat.



Obrázek 3.90: Řez Sluncem. Převzato z [277].

Bližší vhléd do procesů uvnitř Slunce nabízí učebnice Martina Šolce [260], který se více zaměřuje i na hydrodynamické děje uvnitř hvězd a problematiku rovnováhy mezi tlakem záření a gravitačními silami. Je však třeba mít na paměti, že tato témata jsou na hranici středoškolské fyziky a k jejich lepšímu objasnění je třeba alespoň matematiky 4. ročníku střední školy.

K pozorování Slunce ze Země se využívá především optických spektrografů a radioteleskopů. Výzkumu a pozorování Slunce se v České republice detailně věnuje Astronomický ústav AV ČR v Ondřejově [278], největšími observatořemi zaměřenými na Slunce jsou ALMA v Chile, viz Obrázek 3.91, v nadmořské výšce více než 5000 metrů nad mořem, a observatoř Teide na ostrově Tenerife.

Druhým zaměřením dlouhodobého pozorování je výzkum struktury Slunce a procesů, které ve Slunci probíhají. Přestože při běžném pozorování vidíme téměř výhradně fotosféru, v kombinaci s měřeními z družic, ze sond a při zatmění Slunce, můžeme získat celistvou představu o struktuře Slunce, viz Obrázek 3.90, v němž probíhá celá řada procesů. Díky tomu víme, že Slunce je z 92,1 % vodík, 7,8 % helium, na všechny ostatní prvky připadá 0,1 %. Přestože hustota plazmatu v jádru Slunce je až zhruba 150 g/cm^3 , celková hustota Slunce je pouze $1,4\text{ g/cm}^3$.

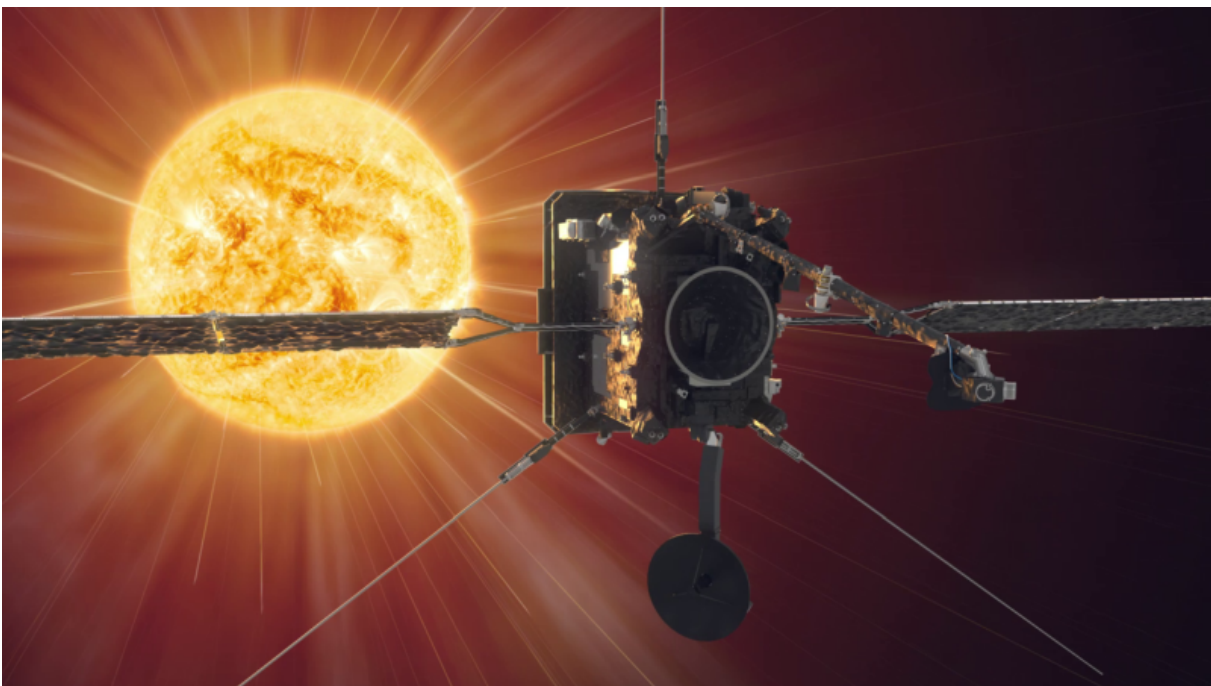
Nabízí se otázka: Kde se bere tato rovnováha v takto horkém a dynamickém prostředí? Zjednodušeně lze říct, že hvězda je jako nafukovací balonek – tlak uvězněného vzduchu resp. tlak zářícího plazmatu jej chce roztáhnout, guma balónku, resp. gravitace, jej stahuje. Vzniká tak rovnováha. Může být proměnlivá? Ano, o tom se bude bavit v případě cefeid ve 47. hodině. Může být narušena? Ano, to se děje na konci života hvězd, o tom se budeme bavit v 51. hodině.



Obrázek 3.91: Observatoř ALMA v poušti Atacama, Chile. Převzato z [279].

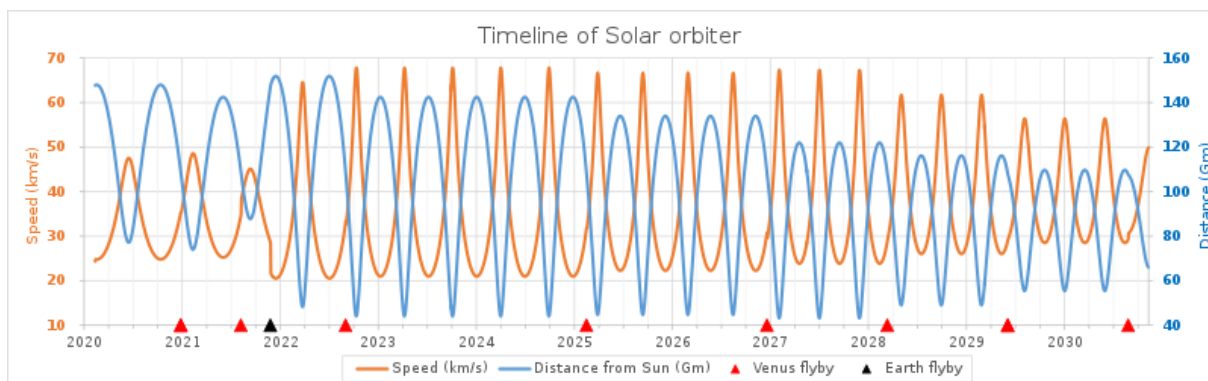
Ze zemské orbity pozoruje Slunce například družice SDO, která nese i detektor EVE zaměřený na extrémní ultrafialovou oblast, díky němuž máme lepší představu o mechanismu slunečních erupcí, které vznikají „přerovnáním“ magnetického pole Slunce, což vede k vyvržení nabitých částic [275].

Na výzkum Slunce byla od 70. let zaměřena celá řada kosmických misí: Helios, Stereo, Soho nebo dříve zmíněná Ulysses. Tyto sondy byly zaměřeny na průzkum korony, magnetického pole nebo na analýzu slunečního větru. V roce 2020 ke Slunci odstartovala sonda Solar Orbiter, viz Obrázek 3.92, s obdobným zaměřením, která by měla opakovaně pozorovat procesy na Slunci ze vzdálenosti až 0,28 au, bude tedy blíže Slunci než Merkur.



Obrázek 3.92: Vizualizace mise Solar Orbiter. Převzato z [280].

Na sondě Solar Orbiter se podílela celá řada českých firem a vědeckých institucí [281]. V době psaní této práce sonda je již v provozu a poskytuje relevantní vědecká data [282], nicméně mise je teprve na počátku, viz Obrázek 3.93.



Obrázek 3.93: Predikce rychlosti a vzdálenosti od Slunce pro sondu Solar Orbiter. Převzato z [283].

Poslední kategorie výzkumu Slunce souvisí těsně s pozorování úplného zatmění Slunce, které umožňuje detailně studovat korónu a chromosféru. Zatmění Slunce je velice vděčným tématem, proto mu budeme věnovat celou následující hodinu.

Shrnutí

Bez Slunce by nebyl život na Zemi. Dává nám téměř veškerou energii a to jak přímo, tak nepřímo – pohání koloběh vody a vzduchu v atmosféře, v předchozích epochách dávalo Slunce život biosféře, což po milionech let vedlo ke vzniku uhlí a ropy.

Profesor Miloslav Druckmüller říká: „Slunce nám může v současné době i ublížit, jenže Slunce za to nemůže, může za to současná civilizace, která se chová tak, že před některými riziky strká hlavu do písku.“ [275]. I proto je třeba Slunci alespoň základně porozumět. Následující hodina bude věnována zatmění Slunce po civilní i vědecké stránce.

46. Slunce II.

Téma: Zatmění Slunce

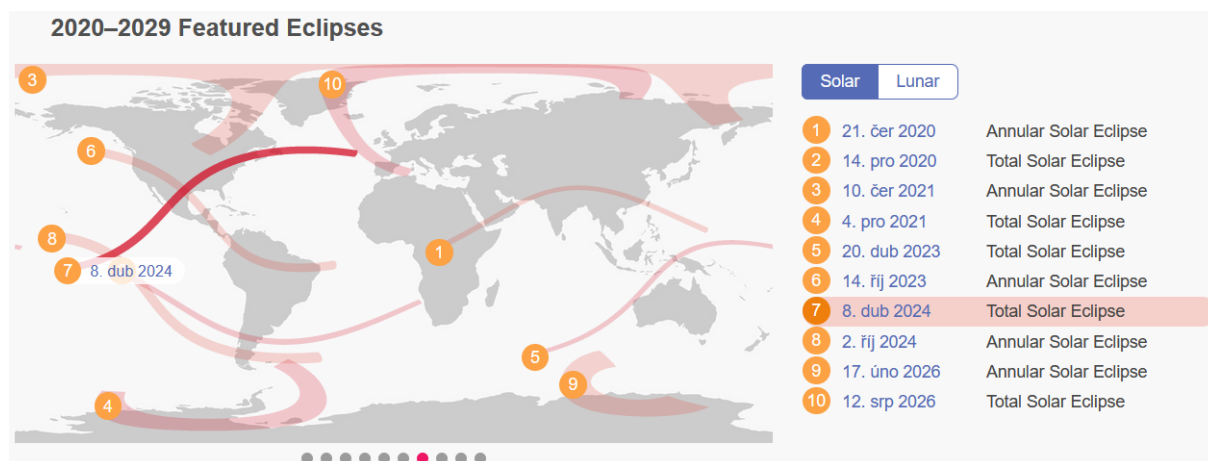
Cíl: Seznámit žáky s průběhem zatmění Slunce a přínosem jeho pozorování

Přístup k hodině

Zatmění Slunce je tím nejvýraznějším astronomickým jevem, který můžeme alespoň několikrát za lidský život na Zemi pouhým okem pozorovat. Nastává obdobně často jako zatmění Měsíce, o němž jsme se již opakovaně bavili. Na rozdíl od zatmění Měsíce můžeme zatmění Slunce v plném rozsahu pozorovat jen v několik kilometrů širokém pásu. Proto bývá zatmění Slunce považováno za mnohem vzácnější jev. My se v této hodině zaměříme na průběh zatmění Slunce i na vědecký přínos jeho pozorování.

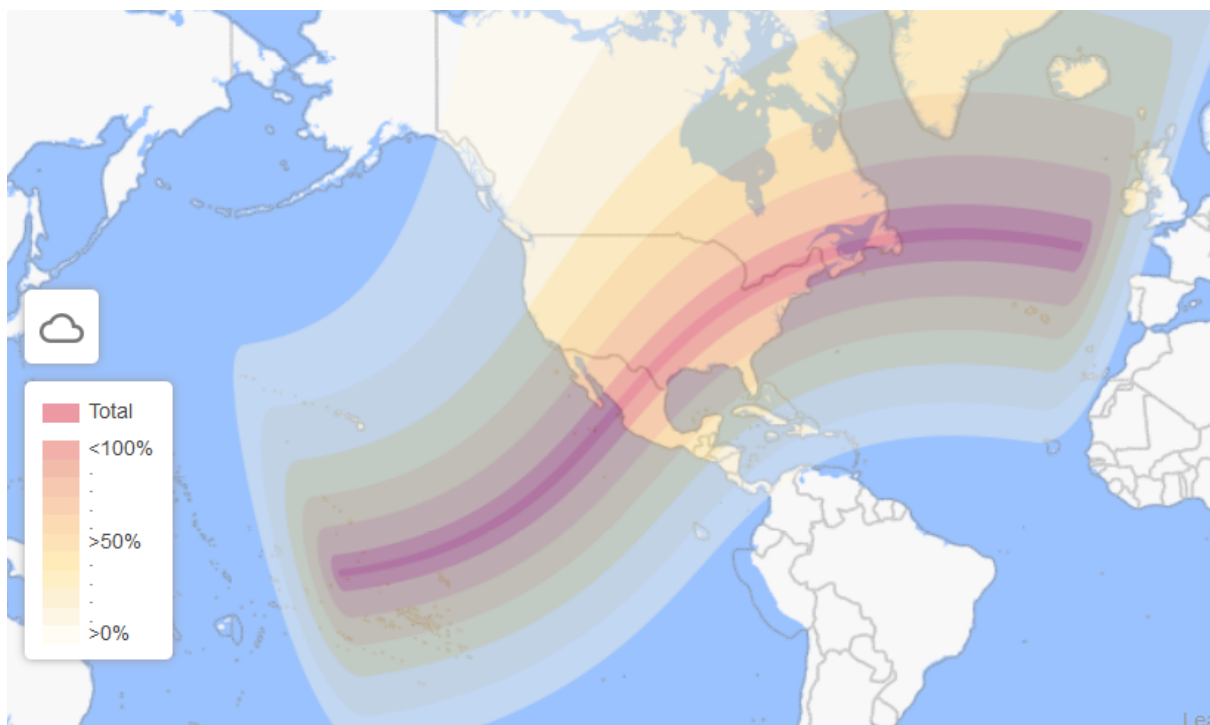
Průběh zatmění Slunce

Zatmění Slunce nastává, když se Slunce, Měsíc v novu a Země srovnají v jedné přímce. Jak bylo zmíněno ve [36. hodině](#), vzdálenost mezi Měsícem a Zemí v novu je proměnlivá, což je způsobeno rozdílem mezi siderickou periodou (27,32 dne) a synodickou periodou (29,53 dne). Tento rozdíl způsobuje, že rozlišujeme úplná zatmění Slunce a prstencová zatmění Slunce. Třetím typem zatmění je částečné zatmění Slunce. Výčet úplných a prstencových zatmění Slunce mezi lety 2020 a 2026 můžeme vidět na [Obrázku 3.94](#).



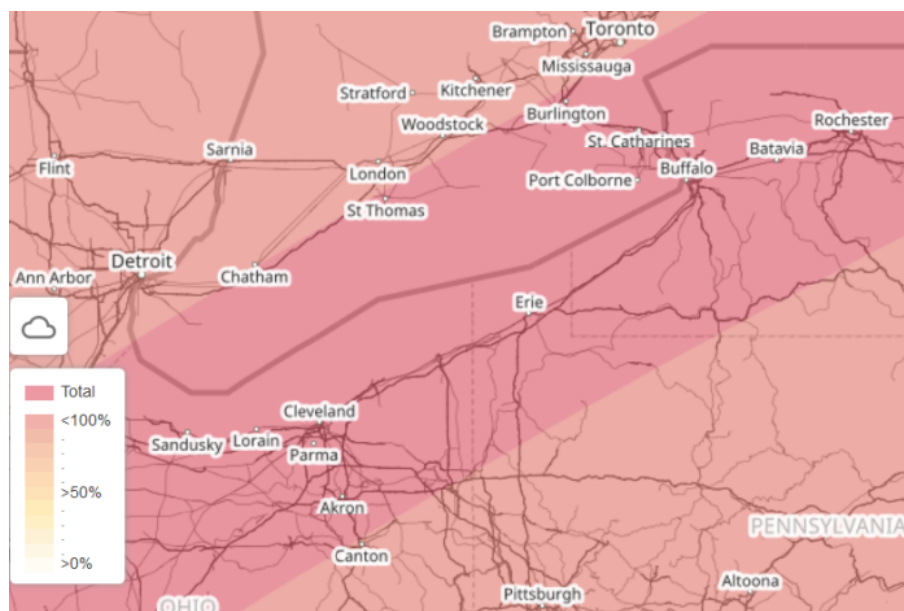
Obrázek 3.94: Úplná a prstencová zatmění slunce mezi lety 2020 a 2026. Převzato z [\[284\]](#).

Zaměříme se na úplné zatmění, které nastane v pondělí 8. dubna 2024 a které bude patrně jednou z nejfotografovanější událostí historie. Na [Obrázku 3.95](#) můžeme vidět, kde bude zatmění pozorovatelné. Centrum vyznačené oblasti je úzký pás, tzv. pás totality, kde dojde k úplnému zatmění. Kolem něj jsou pásy, kde dojde k částečnému zatmění.



Obrázek 3.95: Průběh zatmění Slunce v pondělí 8. dubna 2024. Převzato z [285].

Na větším přiblížení (Obrázek 3.96) můžeme vidět, že pás totality prochází přes známá města Cleveland a Buffalo, největší kanadské město Toronto nebo americký Detroit mívá jen o několik kilometrů. Pokud bychom přiblížili ještě více, uvidíme, že v pásu totality se ocitnou i Niagarské vodopády.



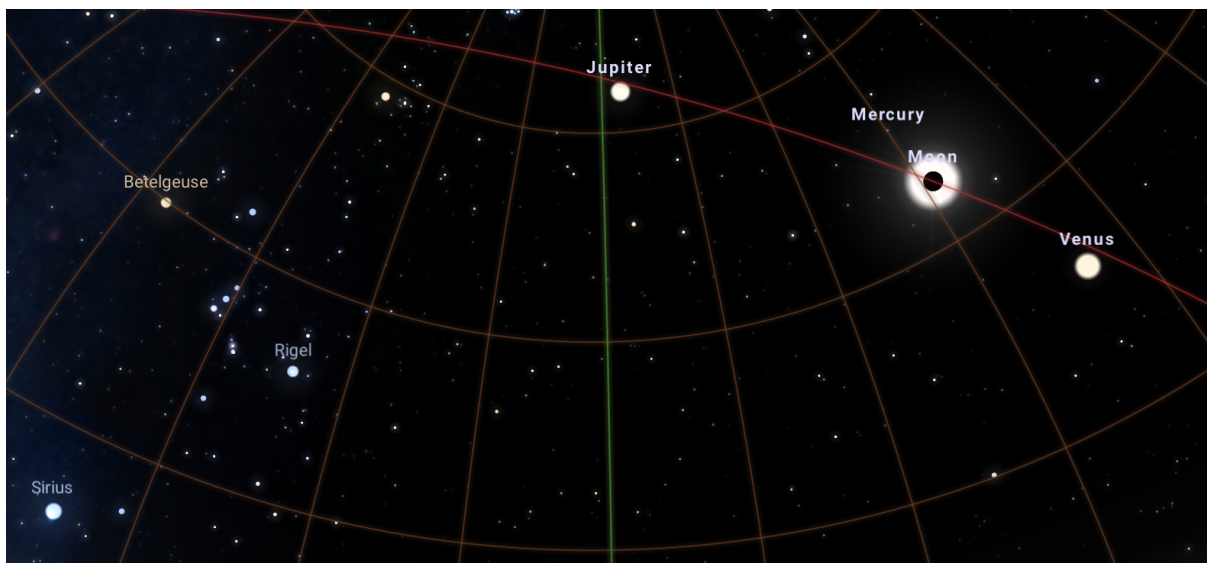
Obrázek 3.96: Pás totality na pomezí USA a Kanady. Převzato z [285].

Pás totality má šířku v tomto případě zhruba 180 kilometrů, obecně se pohybuje v rozsahu 112 až 270 kilometrů. Délka pásu se různí podle konkrétního zatmění [286].

Co při kanadsko-americkém zatmění v roce 2024 uvidíme?

Před zatměním a během něj se projeví celá řada fenoménů – můžeme pozorovat optické jevy podobné camera obscura, klesne výrazně teplota nebo můžeme vidět interferenci světla vznikající v atmosféře [228]. Při samotném zatmění budou pozorovatelné hvězdy a planety, například Sirius

nebo planety Merkur a Venuše, které budou jinak v těchto dnech těžko pozorovatelné na noční obloze, viz Obrázek 3.97 z aplikace Stellarium.



Obrázek 3.97: Denní obloha v průběhu jižním směrem 8. dubna 2024 v Buffalu, USA.

Žáci se mohou ptát, kdy uvidíme zatmění u nás. Vezmeme-li v potaz, že oceán tvoří více než 70 % povrchu Země a ze zbývajících 30 % je zhruba jen 40 % obýváno, pravděpodobnost, že z jednoho místa uvidíte v průběhu života úplné zatmění Slunce, není velká. Díky vysoké přesnosti gravitačních výpočtů, můžeme datovat zatmění Slunce v konkrétní lokalitě s přesností na minuty, a to na stovky let dopředu nebo nazpět. Z výpočtů vychází, že střední doba čekání na úplné zatmění Slunce v náhodné lokalitě je 360 let [228]. Na území České republiky bylo naposledy úplné zatmění Slunce 12. května 1706. Příští úplné zatmění Slunce nastane 7. října 2135 [286].

Délka úplného zatmění Slunce obvykle nepřesáhne 4 minuty, nicméně může trvat až 7,5 minuty [287]. Při zatmění Slunce obloha potmění natolik, že lze pozorovat atmosféru Slunce i hvězdy okolo Slunce, které jinak rozptýl světla v atmosféře přesvítlí. Na Obrázku 3.98 můžeme vidět vzácnou fotografii úplného zatmění vyfoceného z letadla nad Antarktidou 4. prosince 2021. Autorem je Petr Horálek a fotografii NASA vybrala jako fotografii dne.



Obrázek 3.98: Úplné zatmění Slunce vyfoceného z letadla nad Antarktidou 4. prosince 2021. Převzato z [288].

K zatmění Slunce existuje celá řada videí, které ukazují dynamiku zatmění a to jak na předchozím příkladu úplného zatmění nad Antarktidou [289], tak při pozemském pozorování [290].

V minulosti mělo zatmění Slunce přímo mystický význam. Pro nevědeckého člověka šlo o poměrně děsivou podívanou. První existující záznam úplného zatmění Slunce existuje již z roku 2137 před naším letopočtem, kdy bylo zaznamenáno v čínské kronice Šuťing [228]. Přestože dlouho naši předci neznali fyzikální povahu zatmění, dokázali jej předpovídat. Thalés z Milétu předpověděl úplné zatmění Slunce a poradil králi Kroisovi, aby se nevrhal do bitvy s Peršany. Ač nevíme přesně kdy se Thalés narodil a zemřel, víme přesně, že k zatmění došlo 28. května roku 585 př. n. l. [291].

Průběh zatmění a historický kontext jeho pozorování lze zařadit i do kapitol na začátku vzdělávacího plánu věnovaným historickému vývoji astronomie. Důvodem, proč je zatmění Slunce zařazeno až nyní, ve 46. hodině, je jeho kontext vzhledem k výzkumu Slunce.

Vědecký přínos pozorování úplného zatmění Slunce

Díky pozorování úplného zatmění Slunce toho víme mnoho o naší mateřské hvězdě. Abychom mohli Slunce pozorovat, je třeba jej zastínit. K tomu lze použít koronograf, který zakryje clonou Slunce. Problém je, že na okraji clony se projeví difrakce světla, kvůli které ztrácíme obraz z nejbližšího okolí Slunce. Tomuto jevu nelze zabránit, protože je důsledkem vlnové povahy světla. Jediná cesta, jak z toho ven, je použití clony, která je dostatečně velká a dostatečně daleko [275]. K tomu nám poslouží Měsíc při úplném zatmění Slunce.

Už první fotografie úplného zatmění Slunce s použitím spektrografu v roce 1868 ukázaly charakteristické čáry ve spektru, které byly identifikovány jako čáry vodíku, viz Obrázek 3.99. Spektrum ale ukázalo ještě dvě významné čáry. Čára v oranžové části spektra byla identifikována jako nový prvek, jehož spektrum v té době nebylo známo. Protože bylo spektrum pozorováno na Slunci (Helios), byl neznámý prvek pojmenován Helium. Izolovat helium a následně proměřit jeho spektrální vlastnosti se povedlo později v roce 1895.



Obrázek 3.99: Spektrální analýza sluneční korony. Převzato z [275].

Touto cestou bylo zjištěno, z čeho se Slunce dominantně skládá. Potíž byla druhou čarou, která odpovídala výskytu po celém okraji Slunce. Tento domnělý prvek pojmenovaný koronium se spektrální čarou na 530,3 nm se nedal dlouho identifikovat. Čára byla identifikována až v roce 1939, kdy se ukázalo, že jde o 13x zionizované železo.

Těžko lze očekávat, že by měli žáci jakoukoli představu, co může výskyt 13x ionizovaného železa (Fe^{XIV}) v koroně znamenat. Ve 30. letech 20. století to byla pro vědeckou komunitu velká rána, protože v té době už nebylo těžké dopočítat, že k získání Fe^{XIV} je třeba teplot okolo 2 milionu Kelvinů. Kde se ale vezme tak vysoká teplota v koroně a co fyzikálně znamená takto vysoká teplota v takto prázdném prostoru? Na to není jednoduché odpovědět. Co natolik takto ohřívá chromosféru, dodnes přesně nevíme [275]. Nicméně ve snahách o objasnění je silná česká stopa.

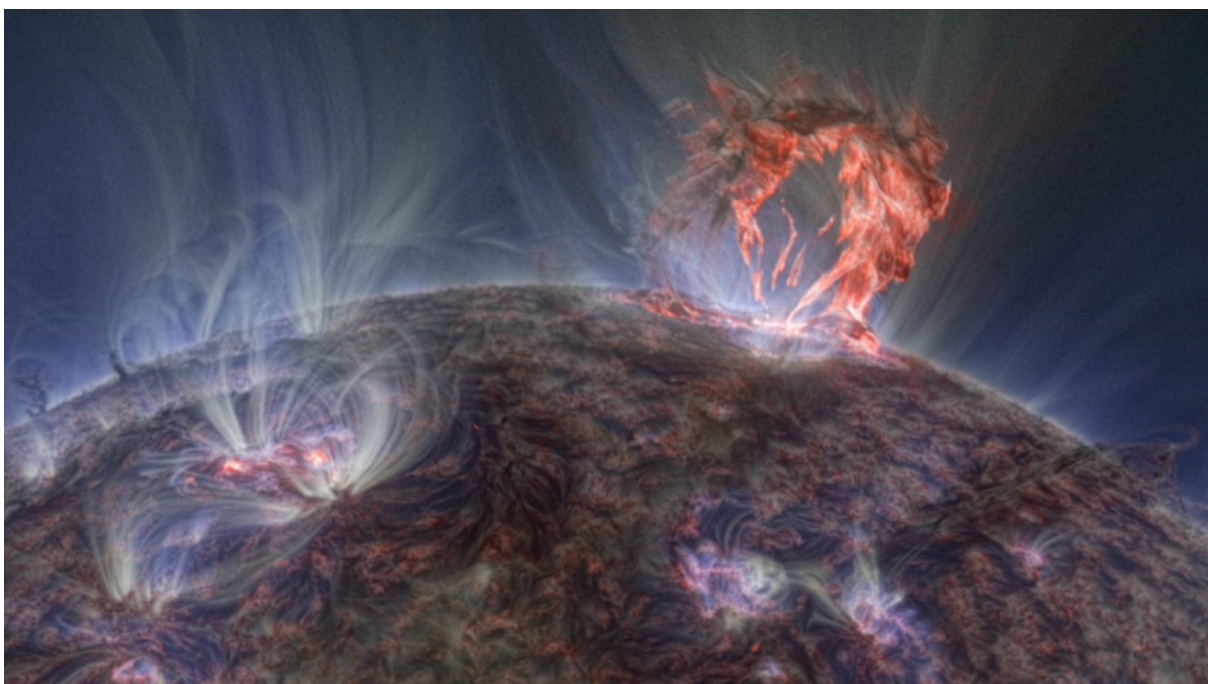
Byl to brněnský profesor matematiky Miloslav Druckmüller (nar. 1954), na kterého v rámci této hodiny čteně odkazují, kdo zásadním způsobem posunul na začátku 21. století pozorování Slunce při zatmění. Metoda spočívá v tom, že na sadu snímků pořízených při zatmění se aplikují pokročilé algoritmy zpracování obrazu. K pořízení snímku přitom postačí komerčně dostupná fotografická technika [275].

Díky těmto metodám zpracování obrazu dnes máme přesnější představu o chování magnetického pole Slunce a o dějích ve fotosféře. Na Obrázku 3.100 můžeme vidět fotografii pořízenou 29. března 2006 v Lybijské poušti.



Obrázek 3.100: Fotografie z úplného zatmění Slunce pořízená 29. března 2006 v Lybijské poušti. Převzato z [292].

Do širšího povědomí se prof. Druckmüller dostal i díky tomu, že jeho fotografie zatmění pořízená 1. srpna 2008 na poušti Gobi se dostala na titulní stranu časopisu Nature. V následujících letech se pak velkou měrou podílel na metodách zpracování obrazu ze sondy SDO, zmíněné 45. hodině, díky čemuž je možné získat detailní komplementární podklady k měření zatmění Slunce, viz Obrázek 3.101.



Obrázek 3.101: Snímky Slunce v extrémní ultrafialové oblasti. Převzato z [293].

Shrnutí

Úplné zatmění Slunce bývá považováno za největší astronomickou podívanou, kterou ze Země můžeme alespoň několikrát za dekádu vidět. Proto se mu stojí za to věnovat, a to ať už nyní v kontextu hodin věnovaných hvězdám nebo hned zkraje vzdělávacího plánu. Touto cestu lze navíc poukázat na to, že úplné zatmění Slunce má i velký přínos pro výzkum samotného Slunce.

Následující hodiny budeme věnovat měření vzdáleností hvězd a klasifikaci hvězd a budou svým přístupem v lecčem připomínat hodiny věnované historii astronomie.

47. První měření vzdáleností hvězd

Téma: Paralaxa a proměnné hvězdy

Cíl: Seznámit žáky s cestou k nalezení metodiky k měření vzdáleností ve vesmíru

Přístup k hodině

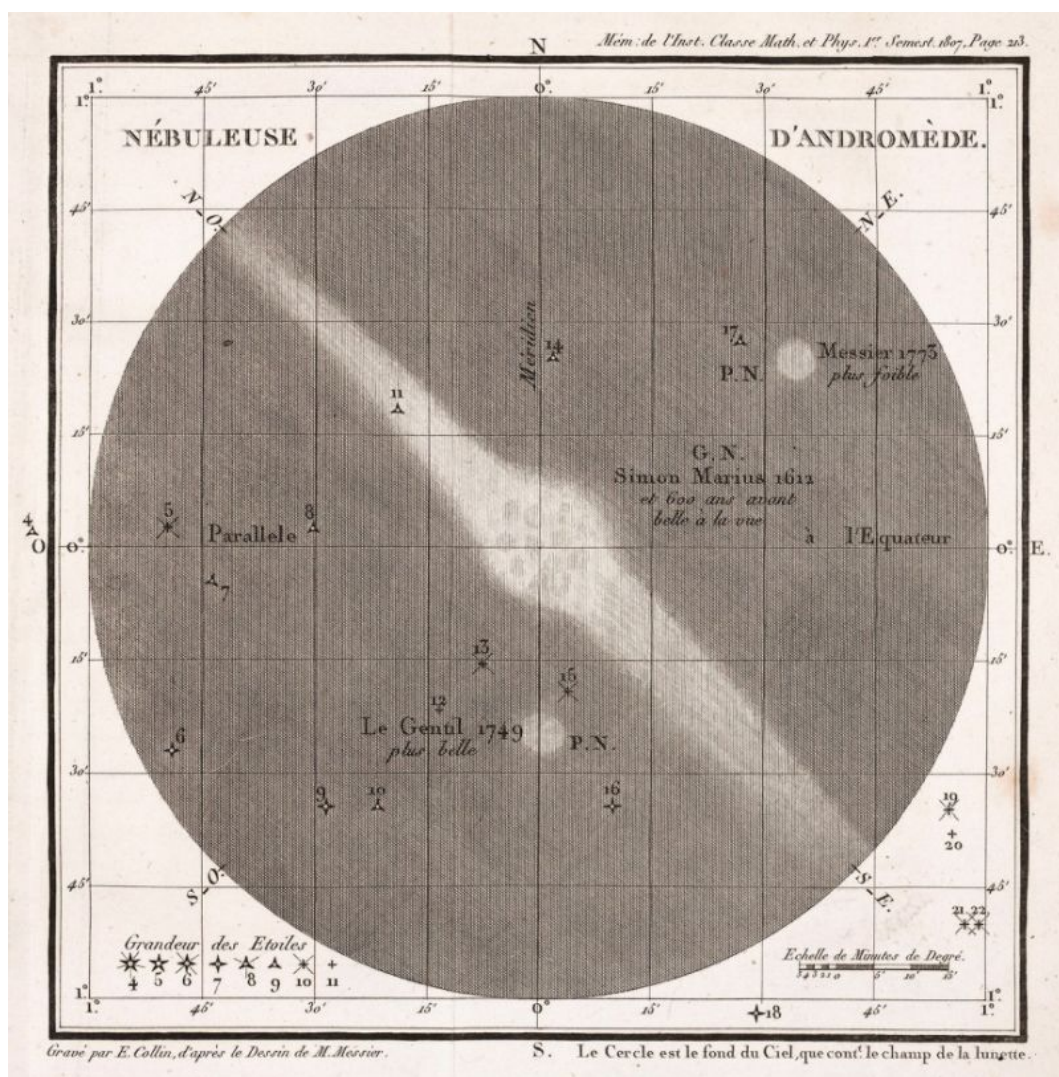
Na začátku první poloviny vzdělávacího plánu jsme se věnovali orientaci na noční obloze a pohybu hvězd po ní. Nezaměřovali jsme se přitom na hvězdy jako takové, na jejich velikost nebo na jejich vzdálenost. Nyní, když víme více o hvězdách a jejich pozorování, zaměříme se na jejich lokalizaci v prostoru. Tato hodina poskytne historický vhled do měřících metod, proto má spíše výkladovou povahu. Následující hodina změřená na hvězdné velikosti bude svým přístupem interaktivnější.

Počátky měření vzdálenosti

V průběhu plánu jsme okrajově zmínili jasnost hvězd, resp. jejich zdánlivé magnitudy, v posledních hodinách jsme řešili spektra a složení hvězd. Jenže jak jsou hvězdy daleko? Ve [12.](#) a [17. hodině](#) jsme se dotkli termínu paralaxa, rozdílu polohy hvězdy na obloze dle ročního období, který pro nás bude nyní klíčový. Abychom žákům dali nejlepší vhled do problematiky, je potřeba postupovat popořadě.

William Herschel, objevitel Uranu, provedl první relevantní měření vedoucí ke změření vzdálenosti hvězd. Byl si dobře vědom toho, že pozoruje pouze relativní jasnost, že bude-li pozorovat dvě stejně jasné hvězdy, přičemž jedna bude dvakrát dále než druhá, bližší hvězda bude svítit 4x jasněji. Proto svůj přístup postavil na tom, že všechny hvězdy září stejně a relativním srovnáním svítivosti hvězd dokáže měřit vzdálenost. Jako etalon použil nejjasnější hvězdu Sirius a vytvořil jednotku siometr. Zjistil také, že hvězdy nejsou rozloženy rovnoměrně, ale že se více shlukují do disku průměru 1000 siometrů a tloušťce 100 siometrů [[19](#)]. Žákům můžeme položit otázku, co tímto diskem je. Byl znám již antickým pozorovatelům, kteří jej nazvali Via Lactea, Mléčná dráha.

Herschel dospěl k závěru, že Mléčná dráha je diskem, v němž se nacházíme a že tvoří celý vesmír. Při pohledu do jiných směrů, nacházel hvězdy rozloženy mnohem řidčeji, mezi těmito hvězdami byly mlhoviny, které na rozdíl od bodových hvězd byly skvrnami. Všechny pozorované hvězdy a mlhoviny byly v průběhu let detailně katalogizovány. Katalog mlhovin sestavil Charles Messier (1730 – 1817), přičemž nejvýraznější mlhovina měla označení M31 – mlhovina v Andromedě, viz [Obrázek 3.102](#). O té se budeme více bavit v [57. hodině](#).



Obrázek 3.102: Mlhovina v Andromedě v Messierově katalogu mlhovin. Převzato z [294].

Klíčová otázka ale byla: Jak kalibrovat sirometr? Tím se vracíme k paralaxe, kterou jako první změřil Friedrich Bessel (1784 – 1846) v roce 1838 na hvězdě 61 Cygni [295].

Jak žákům měření paralaxy přiblížit?

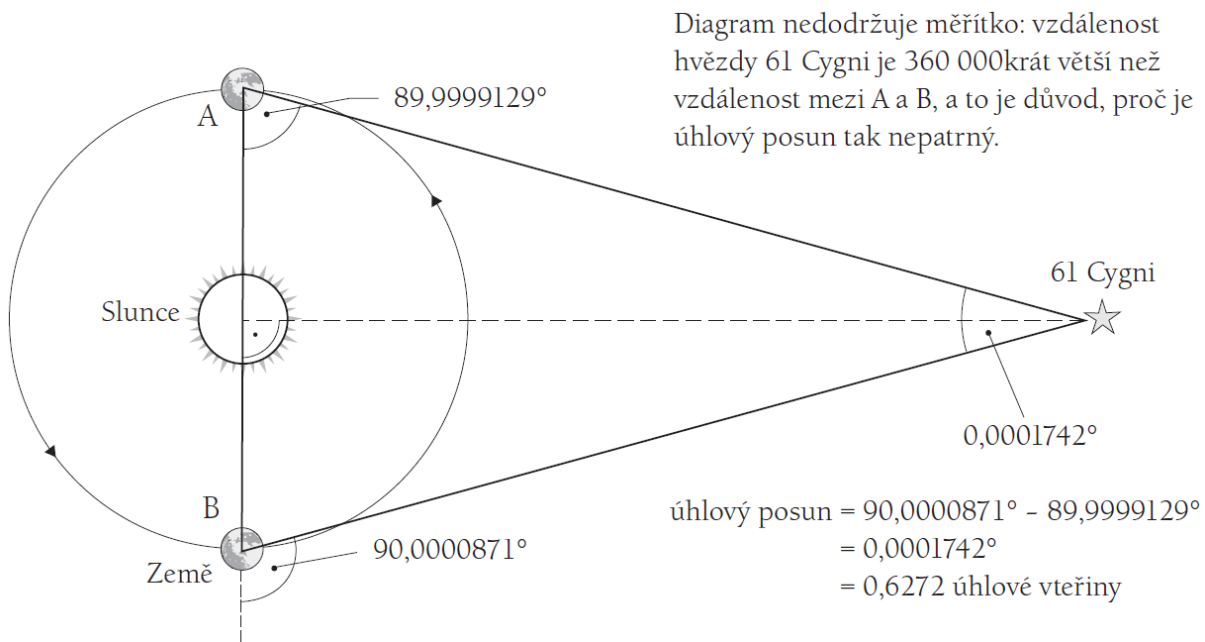
Je to podobné, jako když se pokusíme pozorovat svůj prst nejdříve pouze pravým okem a poté pouze levým okem. Vidíme, že se prst pohne. V případě astronomického měření jsou měřicími pozicemi dvě polohy planety Země v rozmezí poloviny roku. Bessel naměřil rozdíl polohy odpovídající úhlu zhruba $0,0001742^\circ$, viz Obrázek 3.103.

To je těžko představitelné číslo – vrátíme-li se k příkladu s pozorováním vlastního prstu, musela by být při měření posunu vašeho prstu vaše ruka být dlouhá 30 kilometrů [19].

Jaký byl výstup Besselova pozorování?

Vzdálenost 61 Cygni byla stanovena jako 11,4 světelného roku, což velice přesně odpovídá skutečné vzdálenosti. Tloušťka galaxie, dle Herschelových měření, vycházela 1 000 světelných let a průměr 10 000 světelných let, což jsou hodnoty, které jsou o řád menší než skutečné hodnoty. Přesto to byly ve své době naprosto převratné výsledky. Že jsou hvězdy daleko, se vědělo, ale že až tak daleko, to ne.

Metoda měření vzdálenosti s využitím paralaxy se využívá dodnes, nicméně má své limity. Naměřené hodnoty jsou tak malé, že se brzy dostaneme na úroveň nejistoty měření [296]. Proto potřebujeme k měření vzdálenosti lepší metody.



Obrázek 3.103: Geometrie měření paralaxy. Převzato z [19].

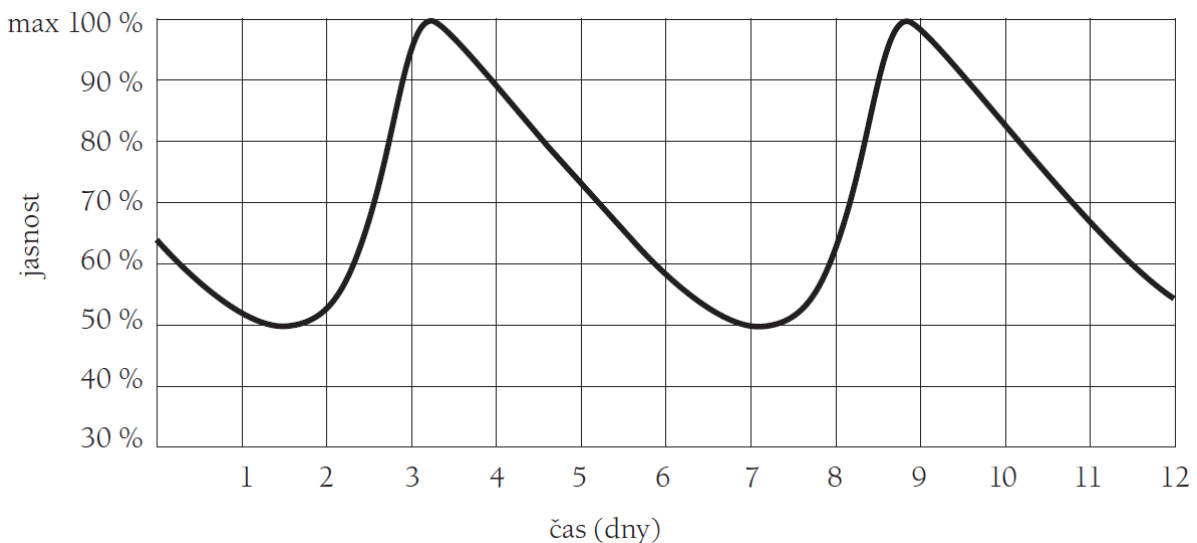
Proměnné hvězdy

Nezávislou cestou, jak se dobrat stanovení vzdálenosti, se ukázalo měření proměnných hvězd. Na obloze se objevovaly proměnné hvězdy dvojího typu:

- Hvězdy, u nichž se měnil jas periodicky a symetricky, například Algol.
- Hvězdy s nesymetrickou změnou jasu, kdy profil jasu připomínal žraločí ploutev, což bylo pozorováno u hvězdy delta Cefeid.

Oba typy hvězd pozoroval John Goodricke (1764 – 1786) a Edward Pigott (1753 – 1825), kteří rychle objasnili první kategorii hvězd. Závěrem bylo, že jev lze vysvětlit tím, že jde o dvojhvězdu a pozorované změny jasu jsou způsobeny vzájemnými zákryty [297].

Druhá kategorie byla větším oříškem. Tyto hvězdy byly nazvány cefeidami. Jejich světelnou křivku můžeme vidět na Obrázku 3.104. Ale byly to právě cefeidy, které se ukázaly být klíčem k nalezení nové metody k určování vzdálenosti hvězd.



Obrázek 3.104: Křivka jasu cefeidy. Převzato z [19].

Dnes víme, že cefeidy mají proměnný jas, protože jde o pulzující proměnné hvězdy. Ve [45. hodině](#) jsme použili analogii mezi hvězdou a balonkem. Cefeida je dle této analogie „balonkem, jehož objem se periodicky mění“. Chvilí má navrch gravitace, která hvězdu smrští, tím se ale zvýší její teplota, která hvězdu opět roztáhne, roztažením se teplota sníží, výsledkem je, že ji gravitace smrští. A tak pořád dokola.

Příběh pozorování cefeid bychom měli neopomenout ze 3 důvodů:

- Výzkum cefeid vedl k objasnění vztahu mezi jejich průměrnou svítivostí a jejich periodou.
- Za objevením vztahu stála Henrietta Leavittová (1868 – 1921), americká astronomka, která se prosadila v jinak výhradně mužském odvětví.
- Vlastnosti cefeid se ukázaly jako klíčové při pozorování mlhoviny v Andromedě, které vedlo k odhalení, že jde o separátní galaxii. O tom více v [57. hodině](#).

Leavittová měla obrovskou výhodu, že pracovala v době, kdy už bylo možné pořizovat fotografické záznamy z měření. Zaměřila se na Malé Magellanovo mračno, kde našla celou řadu cefeid. Analýzou snímků zjistila pevný vztah mezi jasností cefeid a periodou změn jasu. Tím bylo možné porovnat vzdálenost mezi cefeidami. Pak už zbývalo jediné, nalézt cefeidu, u které proměříme paralaxu. To se povedlo i s přispěním Ejnara Hertzsprunga (1873-1967), o němž se budeme bavit v [49. hodině](#).

Ač Leavittová svým objevem pomohla k pozdějšímu zjištění, že neexistuje jen jedna galaxie, resp. že M31 je separátní galaxií, je trochu paradoxní, že k tomu využila pozorování hvězd v Malém Magellanově mračně, které se později ukázalo být trpasličí galaxií vzdálenou 200 000 světelných let.

Shrnutí

Tato hodina svým přístupem připomíná přehledové hodiny ze začátku vzdělávacího plánu, které byly zaměřeny na historii astronomie. Žáci by si měli z hodiny odnést především poznání, že během 19. století a začátku 20. století vytvořili astronomové spolehlivou metodiku k měření vzdálenosti hvězd, která využívala klasické geometrie v případě paralaxy a hledání souvislostí mezi měřitelnými parametry v případě cefeid. Díky vynálezu fotografie získali k tomu astronomové silný nástroj k porovnávání poloh a jasu hvězd.

K tomu, abychom mohli začít klasifikovat hvězdy dle jejich svítivosti, chybí už jen zavedení metodiky dělení hvězd dle jejich magnitudy. Tomu bude věnována následující hodina.

48. Hvězdná magnituda

Téma: Zdánlivá a absolutní hvězdná magnituda

Cíl: Nastínit žákům vztah mezi měřenými parametry hvězd a jejich skutečnými parametry

Přístup k hodině

Zatímco předchozí hodina byla spíše výkladové povahy, tato má více potenciálu být interaktivní, protože v ní budeme propojovat nejen znalosti z předchozích hodin, ale i ze souběžně vyučovaných hodin matematiky, zaměřených na logaritmy.

Zdánlivá hvězdná velikost

Shrňme si, jaké informace lze o hvězdě získat a jak s nimi pracovat:

- Spektrum hvězdy, z něhož umíme pomocí Stefanova-Boltzmannova zákona určit povrchovou teplotu hvězdy. To zatím ponecháme stranou.
- Světelný tok detekovaný z hvězdy – jde o fotometrickou veličinu, kterou budeme značit Φ . Nejde nám ani tak o její hodnotu jako o jeho relativní srovnání mezi pozorovanými hvězdami.
- Díky měřením paralaxy a pozorováním cefeid umíme určit vzdálenost hvězdy.

Jak se těmito informacemi dále naložit?

Nejprve zavedeme bezrozměrnou fotometrickou veličinu, která se nazývá hvězdná velikost, zdánlivá hvězdná velikost nebo zdánlivá magnituda. Označujeme ji m_v , kde index v označuje, že jde o vizuální magnitudu. Vztah mezi zdánlivou magnitudou a světelným tokem ve viditelném spektru popisuje Pogsonova rovnice:

$$m_{v1} - m_{v2} = -2,5 \log_{10}(\Phi_1/\Phi_2) \quad (3.20)$$

kde m_{v1} a m_{v2} jsou zdánlivé magnitudy dvou hvězd, zatímco Φ_1 a Φ_2 jsou světelné toky těchto hvězd dopadající na Zemi, které odpovídají našemu pozorování. Zdánlivé magnitudy neříkají nic o absolutní svítivosti hvězd resp. o absolutní magnitudě, která je úměrná reálné svítivosti hvězdy. Pogsonovu rovnici lze přeformulovat do podoby:

$$m_v = -2,5 \log_{10}(\Phi/\Phi_0) \quad (3.21)$$

kde Φ_0 je světelný tok hvězdy se zdánlivou magnitudou 0, která odpovídá magnitudě hvězdy Vega. Vstupem tedy jsou naměřené světelné toky, výstupem je zdánlivá magnituda, která umožňuje hvězdy, a nejen ty, řadit, dle jejich jasů na obloze.

Nabízejí se 4 otázky, na které je potřeba si odpovědět:

- Co nám to říká o hvězdě?
- Proč logaritmus?
- Proč koeficient 2,5?
- Proč s rostoucí magnitudou klesá jas hvězdy?

Pogsonova rovnice slouží ke srovnání subjektivního vnímání hvězd, nenese přímo informaci o parametrech hvězdy. Jde tedy jen o transformaci naměřeného světelného toku do bezrozměrné stupnice, která poslouží ke srovnávání jasů jednotlivých objektů.

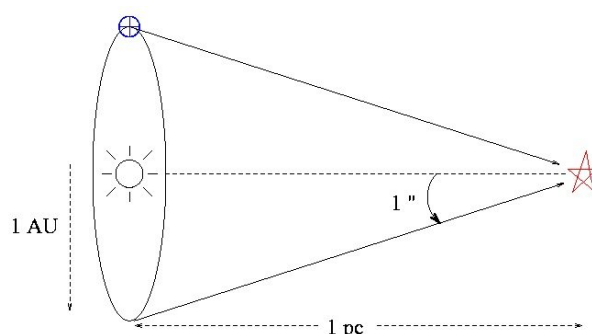
Druhá otázka s první těsně souvisí a je navázána na naše smyslové vnímání – smyslový aparát převádí násobení podnětu na sčítání vjemu. Tomuto pravidlu se říká Weberův-Fechnerův zákon a neplatí jen pro zrakové vjemy, ale i pro sluchové vjemy a přeneseně i pro subjektivní vnímání psychických stimulů [267].

Koeficient 2,5 definuje škálování stupnice zdánlivé magnitudy. Zvolen je defintoricky tak, že rozdíl 5 magnitudy odpovídá poměru jasnosti 1:100. Pro ověření stačí do druhého vztahu dosadit za m_v hodnotu 5, logaritmus podílu světelných toků je pak roven -2.

Odpověď na poslední otázku souvisí s historickým kontextem. Starověcí astronomové dělili hvězdy dle jasnosti do šesti skupin, které dnes zhruba odpovídají magnitudám 0 až 6. Moderní metodika dělení hvězd dle jejich magnitudy proto byla zvolena tak, aby se udržela kontinuita.

Absolutní hvězdná velikost

Dříve, než se pustíme do výpočtu absolutní hvězdné velikosti, je třeba si definovat jednotku parsek. Jednotku parsek definujeme jako „vzdálenost, z níž bychom viděli velkou poloosu Země pod úhlem 1“ . Jinými slovy jde o delší přeponu pravoúhlého trojúhelníku, jehož kratší přeponou je astronomická jednotka a vrcholový úhel proti kratší přeponě má velikost 1“ , vyjádřeno trigonometricky: 1 parsek = 1 au/tg 1“ , viz Obrázek 3.105. 1 parsek odpovídá 3,26 světelného roku.



Obrázek 3.105: Zavedení délkové jednotky parsek. Převzato z [298].

Absolutní magnituda je závislá na vzdálenosti a zdánlivé magnitudě. Definujeme ji jako hvězdnou velikost dané hvězdy ve vzdálenosti 10 parseků (pc) a značíme M_v . Jinými slovy, pokud bychom seřadili všechny hvězdy do vzdálenosti 10 pc, jejich zdánlivá magnituda by se vyrovnala s jejich absolutní magnitudou [261].

Měřený zářivý výkon hvězdy je úměrný kvadrátu jejich vzdálenosti. Dosadíme-li do vztahu 3.20 za m_{v1} absolutní magnitudu M_{v2} a na místo zářivých výkonů ekvivalentní vzdálenosti v parsecích, dostáváme:

$$M_v - m_v = 2,5 \log_{10} (D_0^2 / D^2) \quad (3.22)$$

Mocninu z logaritmu vytkneme a po dosazení 10 pc za D_0 dostáváme výsledný vztah mezi absolutní a zdánlivou magnitudou:

$$M_v = m_v + 5 - 5 \log_{10} D \quad (3.23)$$

S využitím absolutní magnitudy můžeme nyní srovnávat přímo velikosti jednotlivých hvězd. Nejjasnější hvězdy v našich zeměpisných šířkách mají následující parametry [261].

Hvězda	Zdánlivá magnituda	Absolutní magnituda	Vzdálenost
Slunce	-26,6	4,8	1 au
Sirius	-1,44	1,45	9 ly
Arcturus	-0,05	-0,31	37 ly
Vega	0,03	0,58	25 ly
Capella	0,08	-0,48	42 ly
Prokyon	0,38	2,68	11 ly
Rigel	0,18	-6,69	773 ly
Betelgeuse	0,45	-5,14	522 ly

Tabulka 3.2: Srovnání magnitud a vzdáleností nejjasnějších hvězd v našich zeměpisných šířkách.

Nyní už jsme jen pár kroků od toho zjistit, že Slunce není zase tak velkou hvězdou, spíše naopak. Sirius je 25x jasnější než Slunce a Rigel je dokonce 66 000x jasnější než Slunce. Tyto rozdíly se projeví zásadně i na povrchové teplotě hvězd, resp. na jejich rozměrech, délce života a fázi života. O tom v následujících hodinách.

Zatímco absolutní magnituda je klíčová pro astrofyziky, zdánlivá magnituda je klíčová pro pozorování. Lze ji definovat i pro objekty sluneční soustavy [299].

	Maximální zdánlivá magnituda
Měsíc v úplňku	-12,9
Merkur	-2,48
Venuše	-4,92
Mars	-2,94
Jupiter	-2,94
Saturn	-0,55
Uran	+5,38 v roce 2050
Neptun	+7,64 v roce 2042

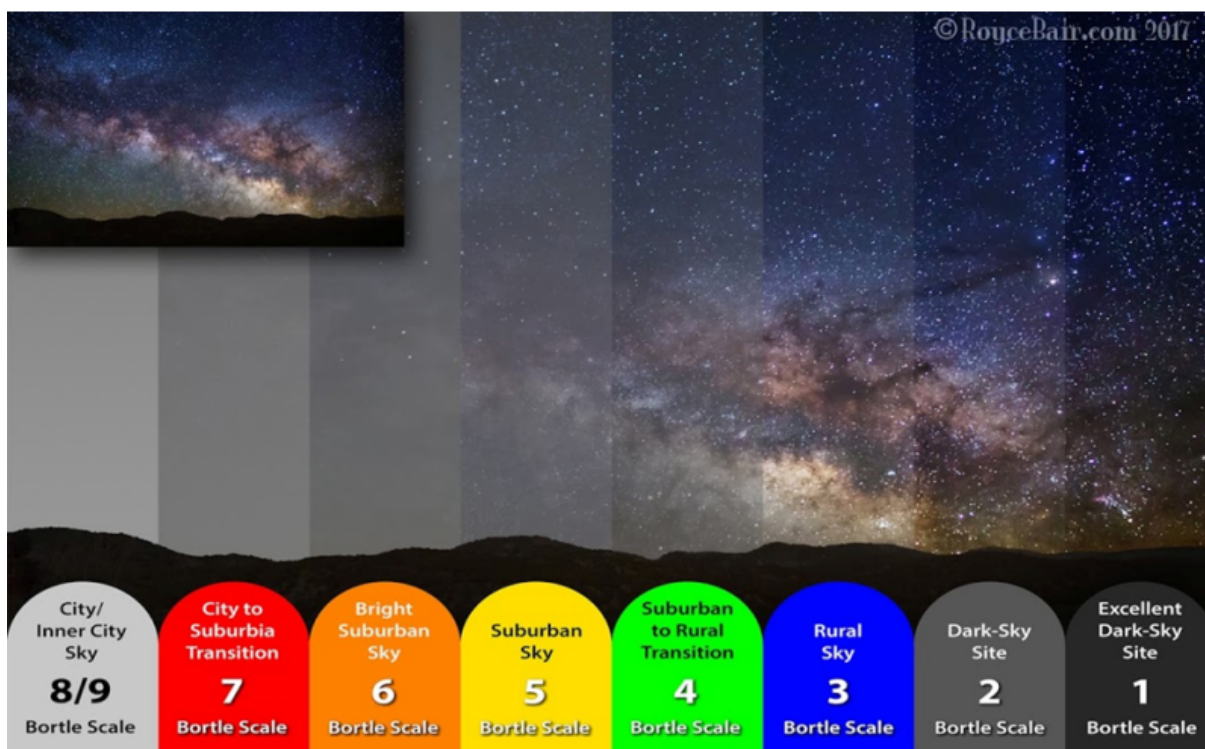
Tabulka 3.3: Srovnání zdánlivých magnitud nejjasnějších objektů noční oblohy.

Výpočet zdánlivé magnitudy se dá adaptovat tak, abychom zjistili, jak bychom viděli Slunce z jiných planet, nebo jak bychom viděli jiné hvězdy, kdyby nahradily Slunce. Například Rigel by měl magnitudu -38 a vzhledem k jeho rozměrům by měl na obloze úhlovou velikost 35° , což není málo ve srovnání se Sluncem a jeho $0,5^\circ$ ¹⁴.

Nabízí se otázka: Co můžeme pouhým okem pozorovat?

Jak již bylo nastíněno v 5. hodině, záleží to na míře světelného znečištění. Míra světelného smogu se měří dle Bortleovy stupnice, ilustrativně na Obrázku 3.106. Nejnižší stupeň (černá) odpovídá optimálním podmínkám, kdy je možné pozorovat objekty až do 8 mag, zatímco na nejvyšším stupni v městských podmínkách mohou být standardně vidět jen Měsíc, planety, nejjasnější hvězdy a po krátké chvíli i družice.

¹⁴Ve všech případech je třeba brát na zřetel parametry pozorování, s nimiž je svázána zdánlivá a absolutní magnituda. V našem případě hovoříme o vizuální magnitudě, analogicky je zaváděna fotovizuální magnituda (v návaznosti na parametrech pořizovacího zařízení) a bolometrická magnituda pro měření přes všechny vlnové délky.



Obrázek 3.106: Srovnání míry světelného smogu dle Bortleovy stupnice. Převzato z [300].

V České republice, v odlehlých lokalitách a za optimálních podmínek, odpovídá světelné znečištění 3. stupni, běžnější jsou ale podmínky odpovídající 4. stupni. Světová mapa světelného znečištění je k vidění na stránkách Coloradské univerzity [300]. Odtud čerpá i mapa na Obrázku 3.107, kde můžeme vidět v jemnější škále míru světelného znečištění v České republice a blízkém okolí.



Obrázek 3.107: Světelný smog nad Střední Evropou. Převzato z [300].

Nejlepší pozorovací podmínky v kontinentální Evropě jsou na severní Ukrajině, v Bělorusku a Rusku. V globálním měřítku má nejlepší pozorovací podmínky sever Chile, Tibet a Namibijská poušť, kde se kombinuje efekt vysoké nadmořské výšky, stabilního počasí, nízké vlhkosti a nulového světelného znečištění.

Pro plnohodnotná pozorování platí celá řada doporučení a pravidel, která je třeba mít na paměti. Kromě vybavení adekvátní k počasí a délce pozorování je třeba mít na paměti, že trvá desítky minut, než se zrak adaptuje na temnotu. Ani za těch nejlepších podmínek ale nebudeme pozorovat to, co můžeme vidět na fotografiích, protože ve tmě používáme skotopické vidění, které má silně potlačené vnímání barev, zatímco CCD čipy fungují principiálně stejně bez ohledu na světelné podmínky. Bližší vhled do problematiky astronomického pozorování poskytnou odborné články [301] nebo kurzy astronomického pozorování [302].

Shrnutí

Tato hodina má dvě nosná témata – hvězdné magnitudy a na to navázané pozorovací podmínky. Nyní, když známe svítivost i vzdálenost hvězd a můžeme měřit jejich spektra, otevírá se prostor pro rozřazování hvězd. Vedle toho zkombinujeme-li měření spekter s Dopplerovým jevem, získáme nástroj k měření pohybu hvězd a na to navázané důsledky, což bude jedním z témat [57. hodiny](#).

49. a 50. Hertzsprungův-Russelův diagram

Téma: Klasifikace hvězd

Cíl: Nastínit žákům proč a jak hvězdy řadíme

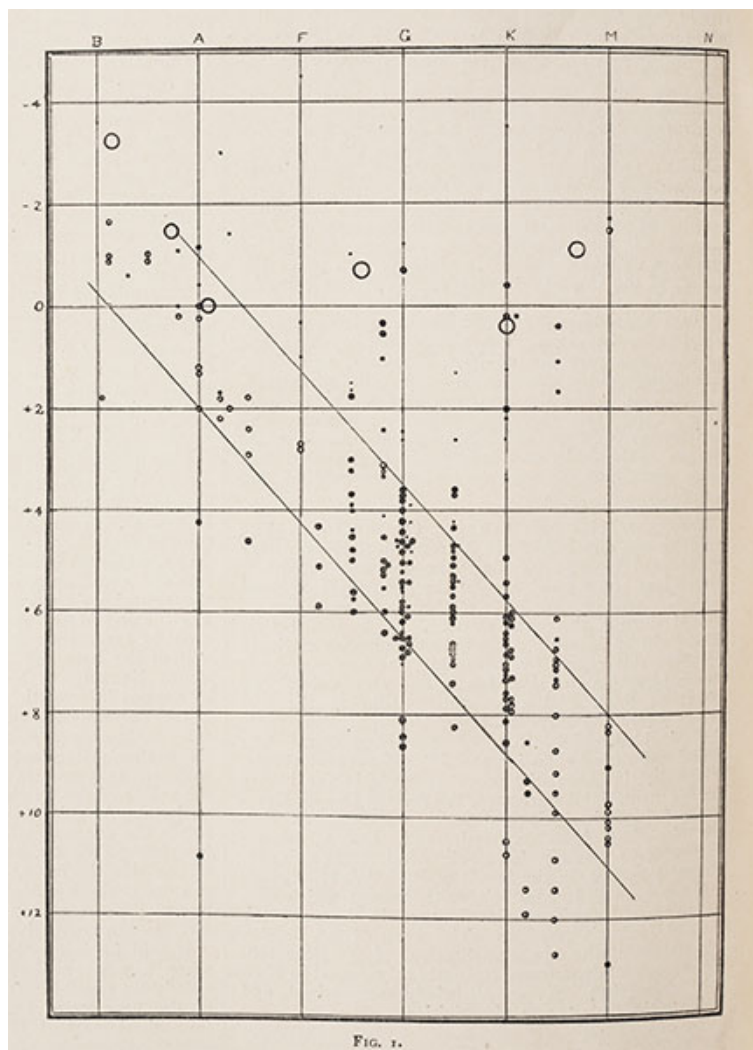
Přístup k hodině

V následujících šesti hodinách se budeme zabývat klasifikací hvězd, vývojem hvězd a jejich finálními stádii. Je třeba brát na zřetel, že tato témata se plynně prolínají, proto tato dvouhodinová bude plná odkazů na následující hodiny.

Klasifikace hvězd, resp. Hertzsprungův-Russelův diagram (dále HR diagram), je téma, kterému se věnují všechny české středoškolské učebnice astronomie a astrofyziky, které byly v průběhu diplomové práce zmíněny [7][40][260]. Byť některé z učebnic zastaraly a míra prostoru, která je látce věnována, se různí, lze se o ně opřít a z větší části z nich vychází i tato dvouhodinová.

Kde se vzal Hertzsprungův-Russelův diagram

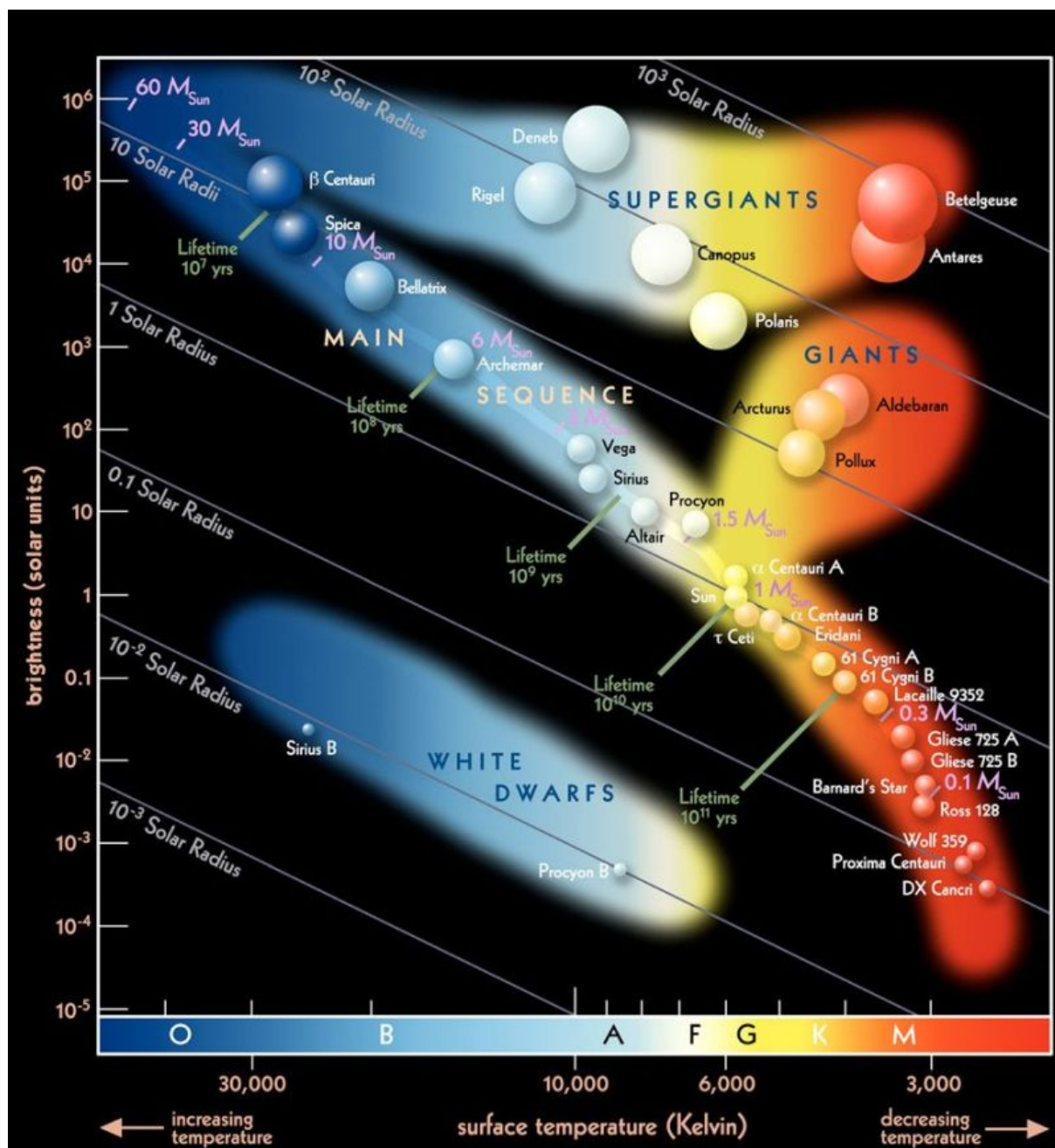
V předchozích hodinách jsme se dobrali k dvěma klíčovým parametrům hvězd: svítivost a spektrum. Na začátku 20. století Ejnar Hertzsprung (1873 – 1967) a Henry Norris Russell (1877 – 1957) nezávisle na sobě začali řadit hvězdy dle těchto dvou parametrů. Postupně do diagramu doplňovali jednotlivé hvězdy a zjišťovali, že hvězdy nevyplňují diagram celý. Na Obrázku 3.108 můžeme vidět první publikovaný diagram z roku 1914.



Obrázek 3.108: První Hertzsprungův-Russelův diagram publikovaný v roce 1914. Převzato z [303].

Hvězdy nebyly zpočátku rozděleny dle teploty, ale dle tzv. spektrálních tříd, které následně byly spektrální analýzou svázány s povrchovou teplotou hvězd. Hertzsprung s Russellem zjistili, že většina hvězd se v grafu nachází podél diagonální linie, nad linií se nachází méně hvězd a pod linií naprosté minimum hvězd. Tato dominantní linie byla později nazvána hlavní posloupností, hvězdy nad linií byly nazvány obry a hvězdy pod ní bílými trpaslíky.

Na Obrázku 3.109 můžeme vidět moderní HR diagram, který je k dohledání v celé řadě podob včetně interaktivní formy [304]. V této podobě diagram vychází z relativního srovnání se Sluncem – svítivost hvězd je udána v násobcích svítivosti Slunce, velikosti hvězd jsou udány v násobcích poloměrů Slunce. Je třeba mít na paměti, že diagram na obrázku 3.109 má být především názorný – svítivost na ose y je škálována dekadickým logaritmem, podobně jako násobky poloměrů Slunce, naopak škálování dle teploty je dle logaritmu od základu dvou.



Obrázek 3.109: Moderní Hertzsprungův-Russelův diagram. Převzato z [305].

Nyní se zaměříme na jednotlivé typy hvězd.

Hvězdy hlavní posloupnosti

Hvězdy hlavní posloupnosti tvoří téměř 95 % všech hvězd, které byly doposud pozorovány. V těchto hvězdách probíhá především termojaderná fúze vodíku na helium. Souhrnně se jim někdy říká trpaslíci, přičemž se k nim přidává přívlastek označující barvu. Tento přístup je ale trochu zavádějící, protože mimo hlavní posloupnost leží bílí a (hypotetičtí) černí trpaslíci, proto je lepší se tomuto přístupu vyhnout.

Proč je většina známých hvězd na hlavní posloupnosti?

Protože na hlavní posloupnosti stráví hvězdy největší část svého života. Délka života hvězdy je od desítek milionů let u těch největších až po triliony let u těch nejmenších. Proto také žlutí trpaslíci (Slunce nebo Alfa Centauri A, kteří se řadí to třídy G), oranžoví trpaslíci (třída K, například Alfa Centauri B) a červení trpaslíci (třída M, například Proxima Centauri) tvoří přes 90 % všech hvězd, které byly zatím ve vesmíru pozorovány, viz Tabulka 3.4. Proč je mezi délkou života hvězdy a její velikostí nepřímá úměra, si povíme v následující dvouhodinovce. Nyní se zaměříme na samotné spektrální třídy.

Spektrální třída	O	B	A	F	G	K	M
Teplota [K]	40 000	20 000	8 5000	6 500	5 700	4 500	3 200
Poloměr [násobky Slunce]	10	5	1,7	1,3	1	0,8	0,3
Hmotnost [násobky Slunce]	50	10	2	1,5	1	0,2	0,01
Zářivý výkon [násobky Slunce]	100 000	1 000	20	4	1	0,2	0,01
Doba života [miliardy let]	0,01	0,1	1	3	10	50	200
Zastoupení [%]	0,00001	0,1	0,7	2	3,5	8	80

Tabulka 3.4: Charakteristické vlastnosti hvězd hlavní posloupnosti dle spektrální třídy (hodnoty jsou brány pouze orientačně, přesnější by bylo rozdělení do překrývajících se intervalů. Mimo to výčet spektrálních tříd není kompletní – nejteplejší, avšak velice raritní, jsou hvězdy třídy W, nejchladnější, a proto těžko pozorovatelné, jsou hvězdy třídy L a T). Převzato z [306]

Z tabulky je zřejmé, že Slunce (třída G) není až tak běžnou hvězdou. Mezi „teplejšími hvězdami“ na hlavní posloupnosti najdeme i tři hvězdy, které jsme zmiňovali v předchozích hodinách: Prokyon (třída F), Sirius a Vega (třída A). Na druhou stranu celou řadu známých hvězd najdeme mimo hlavní posloupnost mezi obry a veleobry.

Obři a veleobři

Ač jsou obři a veleobři vzácní a dohromady netvoří ani polovinu procenta známých hvězd [306], jsou nám díky své vysoké svítivosti dobře známí. Obry a veleobry se hvězdy stávají ke konci svého života, kdy jim dochází fúzní palivo. Hvězda se začne rozpínat, zatímco se její povrchová teplota klesá. Co následuje dále, záleží na hmotnosti hvězdy.

Obři jsou ve většině případů předfinálním stádiem méně hmotných hvězd jako je například Slunce, a proto se vyskytují ve vesmíru častěji. Jejich doba života je v této podobě přibližně miliarda let. Poté, co se palivo u hvězd této velikosti vypotřebuje, odhodí vnější obálku, ze které se stane tzv. planetární mlhovina, a z jádra hvězdy se stane bílý trpaslík. O tomto procesu více v následující dvouhodinovce.

Veleobrů je méně a mají mnohem kratší život. Projdou obdobným vývojem jako obři, ale na rozdíl od nich mají dostatečnou hmotnost, aby v jejich nitru byla teplota umožňující nastartování fúze těžších prvků. Doba trvání fúzního cyklu se postupně zkracuje až do stavu, kdy je v jádru hvězdy železo a fúze už nemůže pokračovat. V tu chvíli gravitace vítězí a následuje výbuch

supernovy typu II¹⁵, který rozmetá atomy z nitra hvězdy do okolí a zbyte po něm neutronová hvězda nebo černá díra. O tom také více v následující dvouhodinovce.

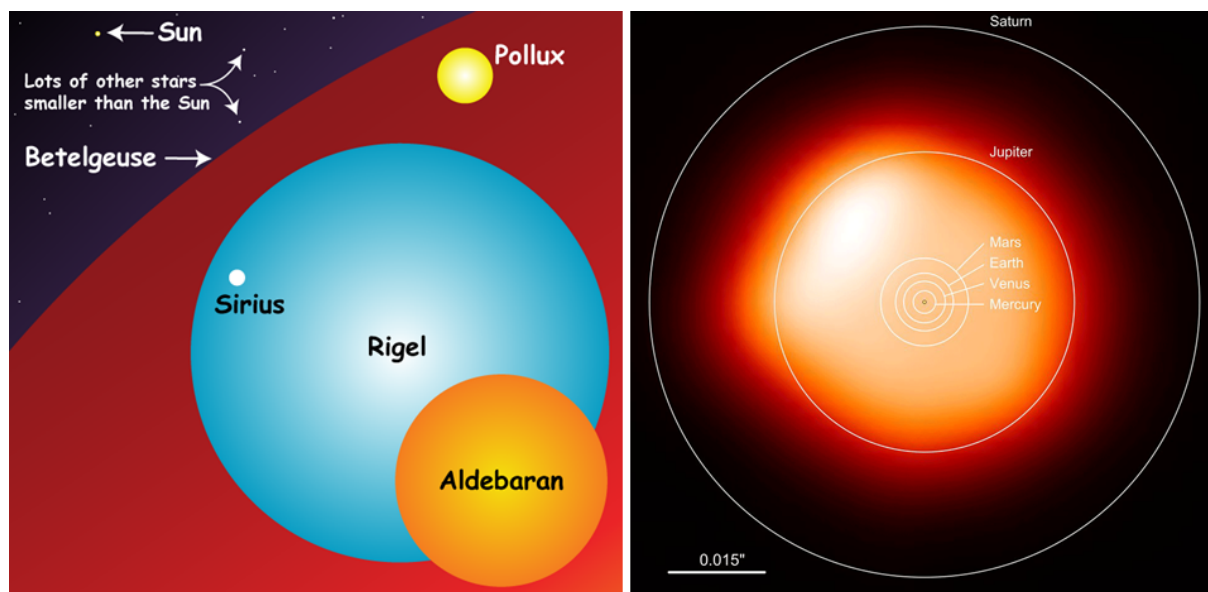
Bílí trpaslíci

Z HR diagramu na Obrázku 3.109 už nám zbývají jen bílí trpaslíci. Bílí trpaslíci jsou finálním stádiem méně hmotných hvězd, které v době života na hlavní posloupnosti měly hmotnost zhruba do osmi hmotností Slunce [307]. V bílých trpaslících už neprobíhá fúze, ale je v nich naakumulováno velké množství energie v malém prostoru. Bílým trpaslíkům se budeme blíže věnovat v 53. hodině zaměřené na finální stádia hvězd.

Velikostní srovnání hvězd

Výše jsme zmínili celou řadu parametrů jednotlivých typů hvězd, které vychází z analýzy HR diagramu. Není snadné se v tom neztratit. Zvláště rozměrové srovnání v grafu, kde jsou ekvidistantní linie svázané s logaritmickým měřítkem, může být zavádějící. Je třeba si uvědomit, že velké hvězdy jsou opravdu velké. To dokáže žákům přiblížit například Obrázek 3.110.

Na Obrázku 3.110 vlevo nemůžeme vidět bílé trpaslíky, které svojí velikostí odpovídají zhruba velikosti planety. Kromě Slunce je Sirius jedinou hvězdou hlavní posloupnosti na Obrázku 3.110 vlevo. Polux a Aldebaran jsou obří, Rigel a Betelgeuse jsou veleobří. Přestože Rigel a Betelgeuse spadají do stejné kategorie, Betelgeuse je výrazně větší a svojí velikostí odpovídá 800 poloměrům Slunce [308]. Pokud bychom měli v centru Sluneční soustavy namísto Slunce Betelgeuse, povrch hvězdy by se nacházel někde u orbity Jupiteru. Nicméně je třeba vzít v potaz, že čím větší hvězda je, tím hůře lze definovat, kde jsou fyzické hranice hvězdy, viz Obrázek 3.110 vpravo.



Obrázek 3.110: Vlevo velikostní srovnání vybraných hvězd, vpravo velikost Betelgeuse v měřítku Sluneční soustavy. Převzato z [309] a [310].

Přitom Betelgeuse není zdaleka největší známou hvězdou. V případě hvězd VY Canis Mayor a KY Cygni, které jsou největšími známými a blíže proměřenými hvězdami v Mléčné dráze, se odhaduje, že jsou ještě zhruba 2x až 3x větší než Betelgeuse. V případě VY Canis Mayor a KY Cygni by povrch hvězdy byl až někde za orbitou Saturnu.

Mimo obrázků výše lze pro srovnání velikosti hvězd využít videí, která poskytují přímá srovnání [311] nebo výkladovou formou dávají velikosti hvězd do širšího kontextu [312].

¹⁵Supernova typu II vzniká za podobných podmínek jako supernovy typu Ib a Ic, které v závěrečném stádiu ještě před výbuchem odhazují obálky z vodíku, resp. z vodíku a helia. O těch se v rámci vzdělávacího plánu blíže bavit nebudeme.

Vrátíme-li se k HR diagramu, nabízí se otázka: Kde jsou neutronové hvězdy a černé díry? Ty v HR diagramu nenajdeme. Neutronové hvězdy se do diagramu nevejdou z důvodu jejich malých rozměrů a vysokých teplot, zatímco černé díry vůbec hvězdami nejsou. O tom více v následujících hodinách.

S HR diagramem se váže ještě jeden důležitý bod, který souvisí s měřením vzdáleností. Pozorování hvězdokup v průběhu 20. století ukázala, že ve hvězdokupách se nachází celé populace hvězd, jejichž poměrové zastoupení odpovídá HR diagramu. Tím se z pozorování hvězdokup a měření jejich zdánlivých magnitud stal nový nástroj k proměřování vzdáleností.

Optikou začátku 20. století tak máme k dispozici tři metody měření: s využitím paralaxy, proměnných cefeid a výskytu populací hvězd v hvězdokupách. K těm se později přidají ještě další tři – pozorování supernov typu Ia, metoda opřená o pozorování galaxií jako celků a metoda vycházející z Dopplerova jevu.

Shrnutí

Přínosem této hodiny by mělo být, že se žáci seznámí s HR diagramem, což je klíčové k porozumění hvězdám a jejich vývoji. Kromě učebnic nám může být oporou celá řada internetových zdrojů, které problematiku sumarizují ať už v podobě obsáhlých článků [306], kurzů astronomie a astrofyziky [313] nebo konkrétních přednášek, které obvykle propojují téma klasifikace hvězd s jejich vývojem [314][315]. I z tohoto důvodu tato dvě témata lze jen těžko oddělovat.

51. a 52. Život hvězd

Téma: Pohyb po HR diagram

Cíl: Nastínit žákům, jakými fázemi hvězdy procházejí v závislosti na jejich velikosti

Přístup k hodině

Zatímco klasifikaci hvězd se výše zmíněné české středoškolské učebnice astrofyziky věnují, jejich vývojem, dějům v jejich nitru a vzniku prvků se zabývají spíš okrajově. Přitom jde o vděčné až třaskavé téma, čemuž odpovídá, že můžeme nalézt celou řadou knih [316], vzdělávacích videí [307] a popularizačních přednášek [261], které se vývojem hvězd zabývají. V této dvouhodinovce se zaměříme na vývoj hvězd velikosti Slunce i hvězd násobně větších, čímž se nám otevře prostor k diskusi o tom, jak vznikají chemické prvky a proč je ve vesmíru nedostatek těžkých prvků. Následující dvě hodiny pak budeme věnovat finálním stadiím hvězd.

Vznik hvězd

Mechanismus zrodu hvězd je obdobný pro malé i velké hvězdy. Hvězdy vznikají v prachoplynových mlhovinách, kde se v nehomogenitách rodí první shluky hmoty, které se na sebe dále nabalují, až vznikne protohvězda. V protohvězdě ještě neprobíhá termojaderná fúze. Protohvězda dále pohlcuje materiál z okolí, zatímco se smršťuje až do chvíle, kdy se zažehne termojaderná fúze. Pokud se tak nestane, protože protohvězda nenabyde dostatečné hmotnosti, z protohvězdy se stává hnědý trpaslík, tedy něco jako nepovedená hvězda [317]. Proces zrodu hvězd můžeme pozorovat například v orlí mlhovině v tzv. sloupech stvoření na jednom z nejznámějších snímků z Hubblova vesmírného dalekohledu, viz Obrázek 3.111.

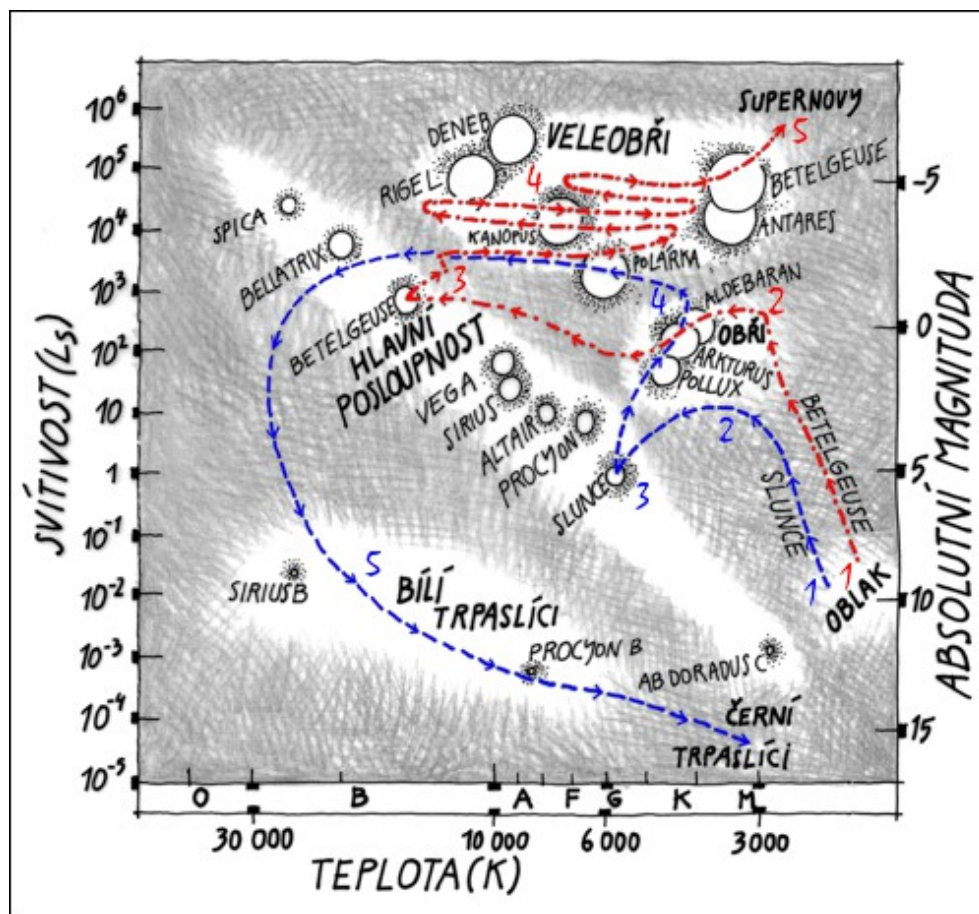


Obrázek 3.111: Sloupy stvoření v Orlí mlhovině. Pořízeno Hubblovým vesmírným dalekohledem. Převzato z [318].

Hvězdy málokdy vznikají osamoceně. Mnohem běžnější je, že se rodí ve větších skupinách. Okolo hvězd se obdobným mechanismem rodí i menší tělesa, která později tvoří planetární systémy. Tento proces je pomalý. Formování hvězdy velikosti Slunce trvá desítky miliónů let, velké hvězdy se naopak dokáží zformovat během několika set tisíc let [319].

Život hvězd

Z protohvězdy se zažehnutím termojaderné fúze stala hvězda, která zakotvila na hlavní posloupnosti, kde stráví většinu života. Na následujících řádcích se budeme držet ilustrace na Obrázku 3.112, která ve zjednodušené podobě nastiňuje dva možné scénáře vývoje hvězd. Jak dlouhý její život bude a jakým způsobem skončí, záleží především na velikosti hvězdy.



Obrázek 3.112: Scénáře vývoje hvězdy na HR diagramu. Převzato z [317].

Nyní jsme v bodě 3. Hvězda spaluje vodík, za vzniku helia. S rostoucí hmotností hvězdy roste i gravitační působení, které udržuje hvězdu pohromadě a v jádře vyvolává tlak a teplotu pro termojadernou fúzi. Tomu, aby se hvězda do sebe nezbortila, brání tlak záření. S rostoucími rozměry hvězdy roste i gravitace, a to navíc s druhou mocninou.

Jaké z toho plynou důsledky:

- Čím je hvězda větší, tím více paliva spaluje, aby zabránila gravitačnímu zhroucení.
- Rychlejší spalování vyžaduje větší aktivní zónu, proto s rostoucí velikostí roste i velikost aktivní zóny proporčně k velikosti hvězdy.
- Se zvětšující aktivní zónou, resp. jádrem, kde probíhá fúze, se zmenšuje vzdálenost mezi povrchem a aktivní zónou .
- Proto s rostoucí velikostí hvězdy hlavní posloupnosti roste i její povrchová teplota (až k 30 000 K).
- S rostoucí velikostí hvězdy klesá její délka života.

Má-li hvězda velikost vyšších násobků velikosti Slunce, její život na hlavní posloupnosti trvá stovky nebo i jen desítky milionů let. Délka života hvězdy o velikosti Slunce je okolo 10 miliard let, v případě červených trpaslíků může jít až o triliony let. Život hvězdy na hlavní posloupnosti končí, když začíná docházet vodík. Jeho spalování se, ve snaze udržet rovnováhu, začíná urychlovat a hvězda se začíná rozpínat do velikosti obra nebo veleobra.

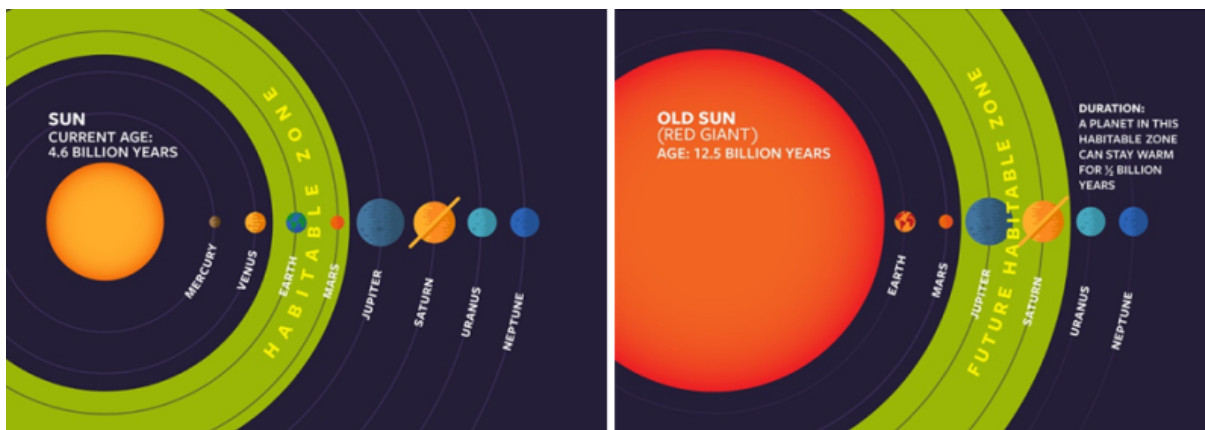
Nyní příběh života hvězd rozdělíme na dvě větve, na příběh Slunce a na příběh Betelgeuse, na nichž si ukážeme dva rozdílné scénáře, podle nichž se konec hvězd může řídit. Cílem není, aby žáci znali detailně celou anabázi, ale spíš aby porozuměli tomu, co ze hvězd vzejde a proč tomu tak je.

Pozdní fáze života Slunce

Vývoj Slunce směřující k jeho konci a tím i konci Sluneční soustavy jak ji dnes známe, je detailně zmapovaným tématem a my se tak můžeme opřít o knihy [316], přednášky [320] a o rozhovory [321]. Příběh konce Slunce může působit chmurně, protože nevyhnutelně vede k zániku života na Zemi a dříve nebo později i Země samotné. Nicméně děje, které budeme popisovat, proběhnou až za stovky milionů až miliardy let, proto se nedá hovořit o tom, že by nás Slunce svojí budoucností, spojenou s pozdními stádii svého života, ohrožovalo.

Co se bude se Sluncem na sklonku jeho života dít?

Jak bude docházet Slunci vodík, bude se jádro smršťovat, vytvářet vyšší teplotu a urychlovat tím fúzi. Ruku v ruce s tímto procesem půjde růst zářivého výkonu. Objem Slunce bude růst, protože se zvýší vztlak plazmatu, který nebude gravitace zvládat kompenzovat. Protože budou vnější obálky expandovat, budou také chladnout. Ze Slunce, které bývalo žlutým trpaslíkem, se stane červený obr, viz Obrázek 3.113.



Obrázek 3.113: Obytná zóna ve Sluneční soustavě nyní a v budoucnosti. Převzato z [322].

Co to znamená pro Zemi?

Nic dobrého. Zvýšení zářivého výkonu nejprve způsobí vypaření veškeré povrchové vody na Zemi, následně dojde k roztavení hornin. Jestli Země v této fázi zanikne, neumí věda s jistotou odpovědět. Mohou nastat dva scénáře – vnější okraje červeného obra budou Zemi na orbitě brzdit a ona se proto zříti do hvězdy nebo se orbita Země naopak bude vzdalovat od hvězdy, protože hvězda se ve fázi červeného obra bude zbavovat hmoty „rozfukováním“ do okolí, což sníží její gravitační působení [321]. Tak či tak, bude Země už dávno neobyvatelnou, přestože bude ve skutečnosti na vzdálenější orbitě, než je dnes, protože se vzdálí v důsledku úbytku hmoty Slunce [53].

Zpět k nitru hvězdy. Poté, co naprostá většina vodíku vyhoří, se jádro, v důsledku přírůstku podílu helia, ještě více do sebe zborťí a může se zažehnout 3-alfa reakce, která spočívá ve fúzi helia na berylium a dále na uhlík. Hvězda se začne opět smršťovat a její spektrum se začne posouvat do modra. V tuto chvíli se hvězda pohybuje horizontálně po HR diagramu.

Tento proces potrvá stovky milionů let, během nichž bude dohořívát zbývající helium. Jakmile většina helia vyhoří, hvězda už nedokáže udržet fúzi, protože v ní není dostatečný tlak na zažehnutí fúze uhlíku na těžší prvky. Hvězda začne expandovat, až nakonec odhodí svoje vnější obaly a zůstane po ní obnažené jádro – bílý trpaslík, zatímco z odhozených obalů hvězdy se stává tzv. planetární mlhovina, viz Obrázek 3.114.



Obrázek 3.114: Mlhovina Helix. Převzato z [323].

Žáci se mohou ptát, jak to můžeme vědět, když do nitra hvězd nevidíme. Reakce v nitrech hvězd, jejich průběh, energetickou bilanci a délku trvání umíme vypočítat díky zákonům jaderné fyziky. K pochopení nukleosyntézy prvků v jádrech hvězd vedla dlouhá cesta. Za jejím objasněním z velké části stojí Fred Hoyle (1915 – 2001), který ač byl odpůrcem Teorie velkého třesku, a dokonce jej takto pokřtil ve snaze teorii zesměšnit, měl zásadní podíl na vybudování teorie, která pomohla objasnit fungování hvězd a v konečném důsledku i podpořila Teorii velkého třesku [19]. O velkém třesku se budeme blíže bavit v 58. hodině.

Jaké je rozuzlení příběhu Slunce?

Bílý trpaslík se stává spolehlivým zdrojem světla pro příští triliony let, byť v něm fúze už neprobíhá (bílým trpaslíkům se budeme blíže věnovat v následující hodině). Vedle toho planetární mlhovina, která může hmotnostně odpovídat až několika hmotnostem Slunce, je právě tím materiálem, ze kterého se mohou rodit nové hvězdy a planetární systémy.

Pozdní fáze života Betelgeuse

Betelgeuse je červený veleobr s hmotností zhruba 15 hmotností Slunce. Jde o hvězdu na konci svého životního cyklu, který skončí výbuchem supernovy typu II, jenž může nastat ještě za našich životů. Vzhledem k tomu, že je Betelgeuse vzdálena přibližně 522 ly, je dost možné, že výbuch už fakticky nastal.

Zatímco menší hvězdy se zhroutí do bílého trpaslíka, ve velkých hvězdách je v jádru tlak dostačující na to, aby byla zažehnuta fúze těžších prvků. Postupně v jádru velkých hvězd vzniká kyslík, dusík, neon, hořčík, křemík a tak dále až k železu. Teplota i hustota v jádru hvězdy

postupně rostou a délka trvání cyklů se postupně zkracuje na stovky let, jednotky let, měsíce a v poslední fázi dokonce na dny [19][324][325].

Hvězdu si v tomto stádiu můžeme představit jako reaktor, který se operativně přestavuje. Ve snaze udržet rovnováhu se spalují těžší a těžší prvky [321]. K tomu je potřeba čím dál vyšších teplot, zatímco paliva je objemově čím dál méně. Na konci svého života připomíná jádro hvězdy strukturou cibuli, v jejichž slupkách jsou produkty fúze seřazeny od těch nejlehčích na periferii po ty nejtěžší ve středu. Jakmile se fúze dostane k železu, prvku s nejvyšší vazebnou energií, gravitace vítězí. Veškerý materiál hvězdy se zhroutí do sebe a následuje výbuch supernovy, který rozpráší materiál z hvězdného jádra do okolí.

Může se na první pohled zdát, že příběh Betelgeuse v lecčem připomíná příběh Slunce, jen tu máme větší rozměry, vyšší teploty a rychlejší průběh. Tuto ideu může podpořit i skutečnost, že i v tomto případě je produktem mlhovina tak jako v případě Krabí mlhoviny na obrázku 3.115, která je reliktem po výbuchu supernovy v roce 1054. Jsou tu ale 3 zásadní rozdíly mezi příběhem Slunce a příběhem Betelgeuse.



Obrázek 3.115: Krabí mlhovina. Převzato z [326].

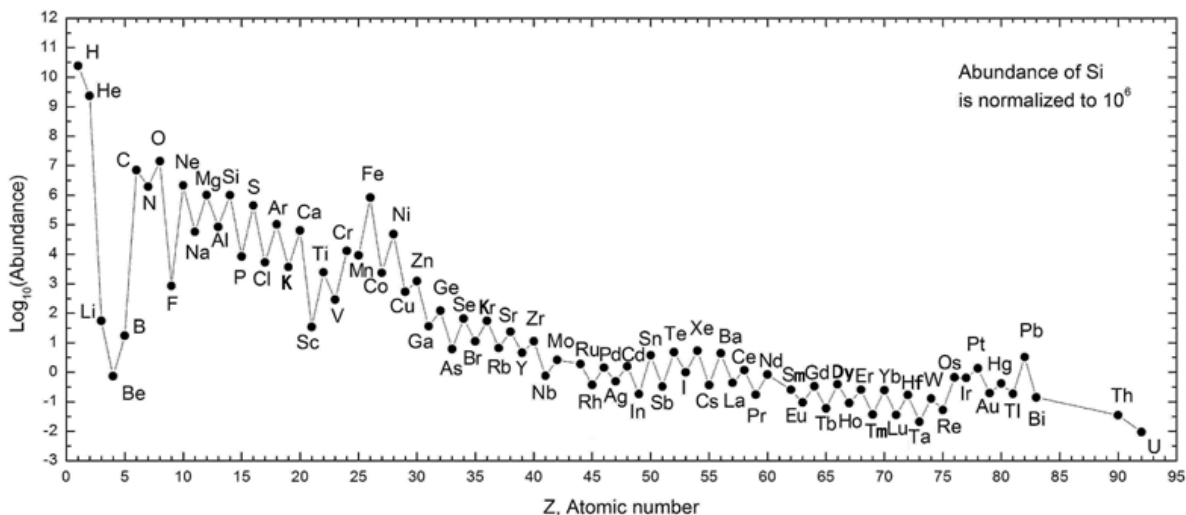
Zatímco příběh Slunce končí odhozením vnějších obálek, což je kontinuální proces, Betelgeuse zakončí svůj život výbuchem, který bude velmi dobře vidět i na vzdálenost 522 ly. Odhaduje se, že by zdánlivá magnituda výbuchu Betelgeuse mohla být okolo -10 až -12 mag, tedy svítivosti srovnatelné s Měsícem v úplňku. Zatímco Měsíc září kolem -10 mag jen po několik dní v rámci svého cyklu, supernova bude zářit jasně po dobu zhruba 100 dní, než její jas pozvolna začne pohasínat [327]. Bude to velkolepá podívaná, která s největší pravděpodobností pro nás nebude nijak nebezpečná [261].

Protože jsou velké hvězdy vzácné, jsou i okem viditelné výbuchy supernov vzácné. Mezi nejznámější zaznamenané výbuchy se řadí výbuchy z roku 1054 (vznik Krabí mlhoviny), 1572 (Braheho supernova) a 1604 (Keplerova supernova). Jen v prvním případě šlo ale o supernovu typu II. V měřítku celého vesmíru není výbuch supernovy tak vzácným jevem, vzácné jsou pouze výbuchy, které jsou pozorovatelné pouhým okem. Na Obrázku 3.116 můžeme vidět výbuch supernovy typu Ia (o nich více v následující hodině) označené SN 1994D, která krátkodobě přesvítala na obloze galaxii v svém sousedství.



Obrázek 3.116: Výbuch supernovy typu Ia, který krátkodobě přesvítal galaxii. Převzato z [328].

Druhým zásadním rozdílem je, že při výbuchu supernovy jsou do okolí rozprášeny prvky vzniklé fúzí v nitru hvězdy. Ale nejen ty. Za velice drastických podmínek v nitru hvězdy těsně před výbuchem vznikají i těžší prvky tzv. rapid procesem [325]. Nejde ale o jediný mechanismus vzniku těžkých prvků, další zmíníme v následujících dvou hodinách. Rapid proces je poměrně složitá problematika, která je stále předmětem výzkumu [329][330]. Žáci by si měli odnést především poznání, že všechny atomy těžší než uhlík prošly nitrem hvězd, kde vznikly za vysokých teplot a tlaků. Lehké prvky po železo mohly vzniknout fúzí v nitrech těžkých hvězd, zatímco na vznik těch těžkých je potřeba tolik energie, že mohou vznikat jen v extrémních podmínkách, které ani fúzní reaktor v nitru hvězdy nemůže zajistit. Tím se vysvětluje i skutečnost, že těžší prvky jsou ve vesmíru vzácnější, viz Obrázek 3.117.



Obrázek 3.117: Četnost výskytu prvků ve vesmíru. Převzato z [331].

Na Obrázku 3.117 si můžeme všimnout dvou významných specifik závislosti výskytu na protonovém čísle. Mezi vzácné prvky můžeme řadit i lithium, beryllium a bor, které z důvodů nestability za vysokých teplot nemohou vzniknout termojadernou fúzí v nitru hvězdy a vznikají rozpadem těžších prvků. Dále můžeme vidět, že výskyt prvků s lichým protonovým číslem je menší než výskyt sousedících prvků se sudým protonovým číslem. Tomuto pravidlu se říká Oddo-Harkinsovo pravidlo. Důvodem je, že vznikající atomy s lichým počtem protonů mají za vysokých teplot snahu navýšit počet protonů na sudý, ve snaze dosáhnout větší stability [332].

Třetí zásadní rozdíl mezi koncem Slunce a koncem Betelgeuse je v tom, co je produktem výbuchu supernovy typu II. Zatímco hvězda velikosti Slunce se na konci svého života stává bílým trpaslíkem, který má zhruba hmotnost malé hvězdy a velikost naší planety, produktem výbuchu supernovy je neutronová hvězda nebo černá díra, které jsou při násobně vyšších hmotnostech o několik řádů menší. O nich se budeme bavit v následujících dvou hodinách.

Shrnutí

Tato dvouhodinovka je především zaměřena na příběh dvou hvězd, Slunce a Betelgeuse, které čeká dost rozdílný osud. Žáci by si měli z hodiny odnést především poznání, že hvězdy (neskončí-li jako supernova typu Ia) čeká jeden ze dvou scénářů – menší hvězdy po vyhoření paliva skončí jako bílí trpaslíci, větší hvězdy míří k výbuchu supernovy typu II, které po nich zanechá jako relikvium neutronovou hvězdu nebo černou díru.

Mám za to, že o vývoji hvězd se nelze bavit bez toho, abychom žákům poskytli alespoň částečný vhled do mechanismu vzniku prvků. Je ke zvážení učitele, do jaké míry půjde do podrobností. Velkou výhodou je, že téma vývoje hvězd nabízí celou řadu kvalitních učebních podkladů zmíněných výše.

Následující dvě hodiny budou věnovány bílým trpaslíkům, neutronovým hvězdám a černým díram. Jde o nejpopulárnější témata astrofyziky, proto stojí za to se jim věnovat samostatně.

53. Finální stadia hvězd I.

Téma: Bílí trpaslíci a neutronové hvězdy

Cíl: Nastínit žákům, jaké jsou parametry bílých trpaslíků a neutronových hvězd

Přístup k hodině

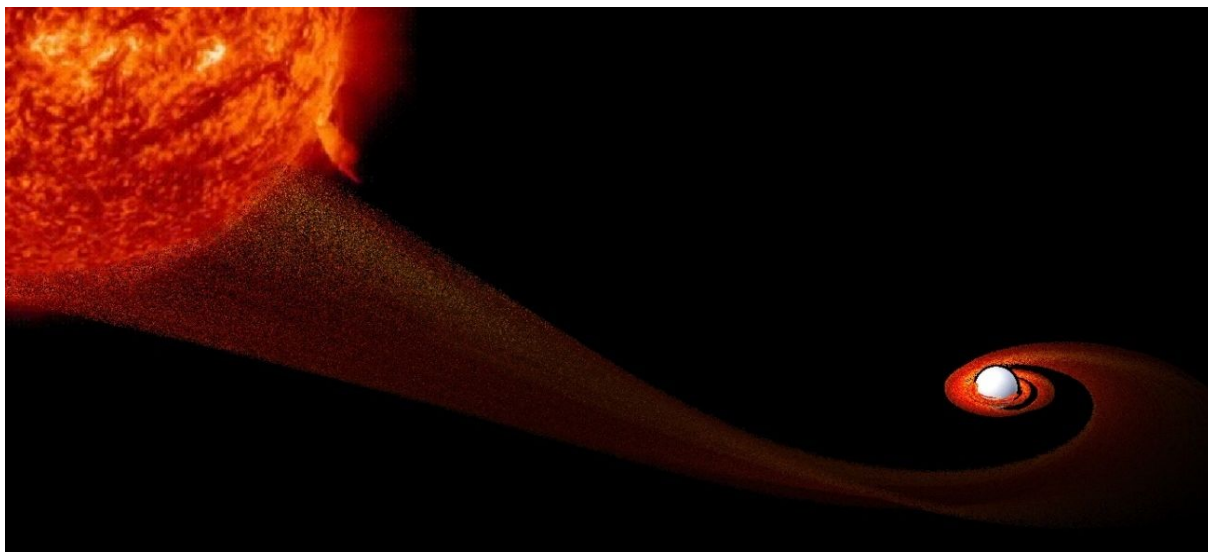
Ať už má hvězda jakoukoli hmotnost, na konci svého života se z ní stane objekt s parametry, které není snadné si v pozemských podmínkách představit. Zvláště neutronové hvězdy a černé díry, kterým je věnována následující hodina, jsou věčným tématem, a to nejen na úrovni astronomie a astrofyziky, ale i u širší veřejnosti. Nejprve se ale podíváme blíže na bílé trpaslíky.

Bílí trpaslíci

V bílém trpaslíkovi jsou po odhození vnějších obálek uvězněna jádra uhlíku a v menším množství i helia a vodíku, nicméně pokud bílý trpaslík nezažije výbuch supernovy typu Ia, zůstanou tam uvězněny na věky. Přestože má bílý trpaslík povrchovou teplotu řádově desítky tisíc Kelvinů, odhaduje se, že chlazení bílého trpaslíka může trvat 10^{18} let [333]. Po jeho vychladnutí by se z něj měl stát tzv. černý trpaslík.

Bílý trpaslík má hmotnost do 1,44 hmotnosti Slunce. Jde o tzv. Chandrasekharovu mez, kterou odvodil indický astrofyzik Subrahmanyan Chandrasekhar (1910 – 1995). Hodnota meze vychází ze strukturní povahy bílého trpaslíka, v němž jsou atomy gravitačně stěsnány na sobě. Chandrasekharova mez je teoreticky odvozeným limitem a říká, že pod tímto limitem dokáží elektrony svým odpuzováním udržet v nitru hvězdy atomární strukturu. Překročí-li se Chandrasekharova mez, atomy se zhroutnou do sebe a bílý trpaslík se svojí povahou stane neutronovou hvězdou [320]. Bližší vysvětlení není složité, vychází především z Pauliho vylučovacího principu, nicméně je za hranicí středoškolské fyziky.

Pokud by hvězda na konci svého života mířila k produktu, jehož hmotnost přesahuje Chandrasekharovu mez, než aby se z ní stal bílý trpaslík, stane se z ní veleobr a vydá se tak cestou, která končí výbuchem supernovy typu II. Nicméně za specifických podmínek bílý trpaslík může zvětšit svoji hmotnost, je-li součástí dvojhvězdy. V takové situaci může ze svého souputníka začít „vysávat“ hmotu, což vede až k opětovnému zažehnutí termonukleární fúze. Pokud přitom hmotnost bílého trpaslíka nepřekročí Chandrasekharovu mez, stává se z něj nova, dříve též nová hvězda. Překročí-li Chandrasekharovu mez, stává se z něj supernova typu Ia. Vizualizace mechanismu přesunu hmoty je k vidění na Obrázku 3.118.



Obrázek 3.118: Vizualizace přesunu hmoty z červeného obra na bílého trpaslíka. Převzato z [334].

Supernova typu Ia nastává za velice specifických podmínek a proto jsou si supernovy typu Ia vzájemně velice podobné. Protože se supernovy typu Ia vyskytují rovnoměrně v pozorovatelném vesmíru, mohou se používat k měření velkých vzdáleností ve vesmíru [335][336].

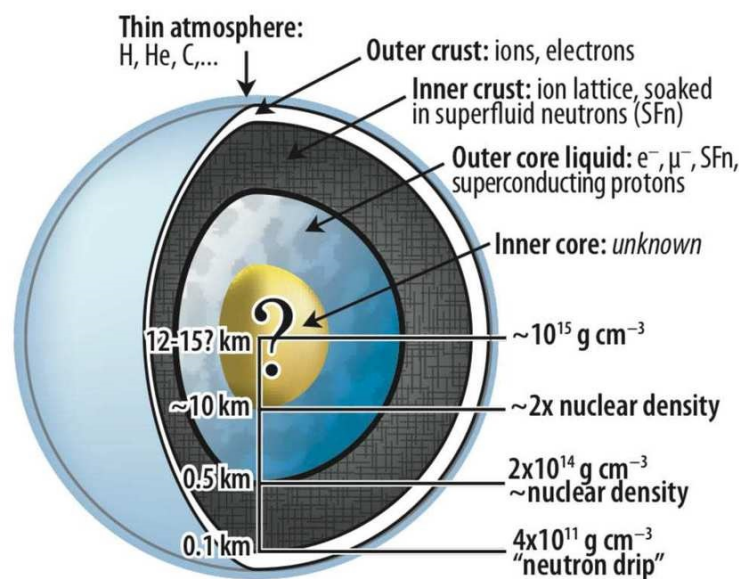
Jaké jsou parametry bílého trpaslíka?

Ač hmotnost odpovídá hvězdě, velikostí je bílý trpaslík srovnatelný s planetou. Jinými slovy, má hustotu okolo $1\,000\,000\text{ g/cm}^3$. To není jednoduché si představit, proto je potřeba dát žákům adekvátní srovnání, například že hrací kostka, z materiálu bílého trpaslíka, by vážila několik tun [261]. Bílý trpaslík se svojí životností stovky miliard let a stabilním výkonem se může zdát jako vhodné útočiště pro naši civilizaci. Nicméně i v idealizovaném scénáři má to svá úskalí: Bílý trpaslík je mnohem menší, proto má menší celkový zářivý výkon. Planeta v obyvatelné zóně by musela být mnohem blíže trpaslíkovi, než jaká je dnes vzdálenost mezi Zemí a Sluncem. Malá vzdálenost mezi planetou a bílým trpaslíkem by vedla ke slapovému uzamčení vlastní rotace planety, která by měla proto jednu stranu permanentně přivrácenou bílému trpaslíkovi a druhou permanentně odvrácenou podobně jako v systému Země-Měsíc [333].

Neutronové hvězdy

Bílí trpaslíci jsou sice svojí povahou dosti extrémní, ale s neutronovými hvězdami, které žáky budou zajímat mnohem více, si nezádají. Neutronová hvězda je v lecčem extrémní formou bílého trpaslíka [337]. Neutronová hvězda váží maximálně tři až pět hmotností Slunce (tzv. Tolmanova-Oppenheimerova-Volkoffova mez), avšak tato hmota je vměstnána do objektu o velikosti několika desítek kilometrů. Pozorovat neutronové hvězdy proto není pro jejich rozměry snadné, a jejich pozorování neusnadňuje ani povrchová teplota, která dosahuje $600\,000\text{ K}$, čemuž dle Wienova posunovacího zákona odpovídá rentgenová část spektra.

Hmota v jádru neutronové hvězdy je na sebe natolik natěsnána, že jsou všechny odpudivé síly překonány, elektrony se zborbí do jádra a z jádra hvězdy se stává masa neutronů. Mechanismus tvorby této hmoty není snadné přiblížit, zvláště ne na středoškolské úrovni, neb jde o důsledek kvantových zákonů. Pro nás je důležité, že takto vzniká hmota o hustotě zhruba 10^{14} g/cm^3 . Jestliže hrací kostka z materiálu bílého trpaslíka odpovídá několika tunám, v případě neutronové hvězdy by vážila desítky milionů tun. Co je v nitru neutronové hvězdy přesně nevíme, nicméně mohou tam být dostatečně extrémní podmínky pro vznik kvarko-glounového plazmatu [261][338] a pochopení neutronových hvězd by tak mohlo být klíčové k bližšímu porozumění mechanismu Velkého třesku (k tomuto tématu se vrátíme v 58. hodině). Na Obrázku 3.119 můžeme vidět současný pohled na možnou kompozici neutronové hvězdy.



Obrázek 3.119: Struktura neutronové hvězdy. Převzato z [339].

Neutronová hvězda má magnetické pole až 10^{11} T, nadto z důvodu zákona zachování hybnosti rotuje s frekvencí několika hertzů. Protože magnetické pole nemusí být souhlasné s osou rotace, mohou tyto neutronové hvězdy vydávat rychlé periodické záblesky. Těmto neutronovým hvězdám říkáme pulsary a byly klíčem k objevení neutronových hvězd [337].

Situace začne být ještě zajímavější, pokud se neutronové hvězdy vyskytují v páru. Jejich kolize mají hned několik klíčových důsledků:

- Jde o další mechanismus vzniku těžkých prvků.
- Při kolizi se uvolní velké množství energie, která se šíří v podobě gama záblesků.
- Kolize zároveň vedou ke vzniku gravitačních vln.
- Produktem kolize je obvykle černá díra, může jím být i větší neutronová hvězda.

Slučování těžkých prvků při kolizích neutronových hvězd, případně kolizí neutronové hvězdy s černou dírou, jsou poměrně novou teorií [339]. Dnes tak můžeme říci, že nejen že hvězdy musely zemřít, aby vznikly těžké prvky, některé musely zemřít dvakrát, dost možná i třikrát. Jak to víme? Díky gravitačním vlnám, které byly poprvé detekovány v roce 2016 [340].

Gama záblesky, resp. gama astronomie, je specifickým odvětvím zaměřeným na studium supernov, neutronových hvězd a černých děr. V mezích tohoto vzdělávacího plánu není prostor se gama záblesky detailněji zabývat, nicméně stojí za to s žáky sdílet, že na výzkumné úrovni se gama zábleskům věnuje v České republice tým Norberta Wernera z Masarykovy Univerzity, který pro účely měření záblesků vyslal na orbitu v březnu 2021 družici GRBAAlpha [341]. První záblesky se podařilo detekovat už v srpnu 2021 [342].

Tématu černých děr a gravitačních vln jsme se doposud nevěnovali. Na černé díry se zaměříme v následující hodině, zatímco gravitačním vlnám se budeme věnovat v 60. hodině.

Shrnutí

Bílí trpaslíci a neutronové hvězdy jsou si v lecčem podobné, ač k nim vede dost rozdílný vývoj. Žáci by si z hodiny měli odnést poznání, že jde na jednu stranu (ve hvězdném měřítku) o malé objekty s extrémními parametry, na druhou stranu tato finální stádia hvězd jsou spolehlivými zdroji světla na příští miliardy let. Pro učitele je výhodou, že bílým trpaslíkům a neutronovým hvězdám je věnována celá řada popularizačních přednášek, v kontextu vývoje hvězd [315], přímo zaměřené na neutronové hvězdy [337] nebo na jejich souvislosti s gravitačními vlnami [340].

54. Finální stadia hvězd II.

Téma: Černé díry

Cíl: Nastínit žákům, jaké jsou parametry nejextrémnějších objektů ve vesmíru

Přístup k hodině

Extrémy přitahují pozornost. Černé díry jsou objekty, které nejsou podobné ničemu jinému ve vesmíru. Nejsou to hvězdy, přestože mohou (nepřímo) svítit díky akrečním disku, který je mnohdy obklopuje. U černých děr se navíc potkává hned několik fyzikálních disciplín – astrofyzika, termodynamika a obecná teorie relativity. V této hodině se blíže podíváme na černé díry z astrofyzikálního pohledu, v [57. hodině](#) se k nim pak ještě jednou vrátíme poté, co probereme obecnou teorii relativity.

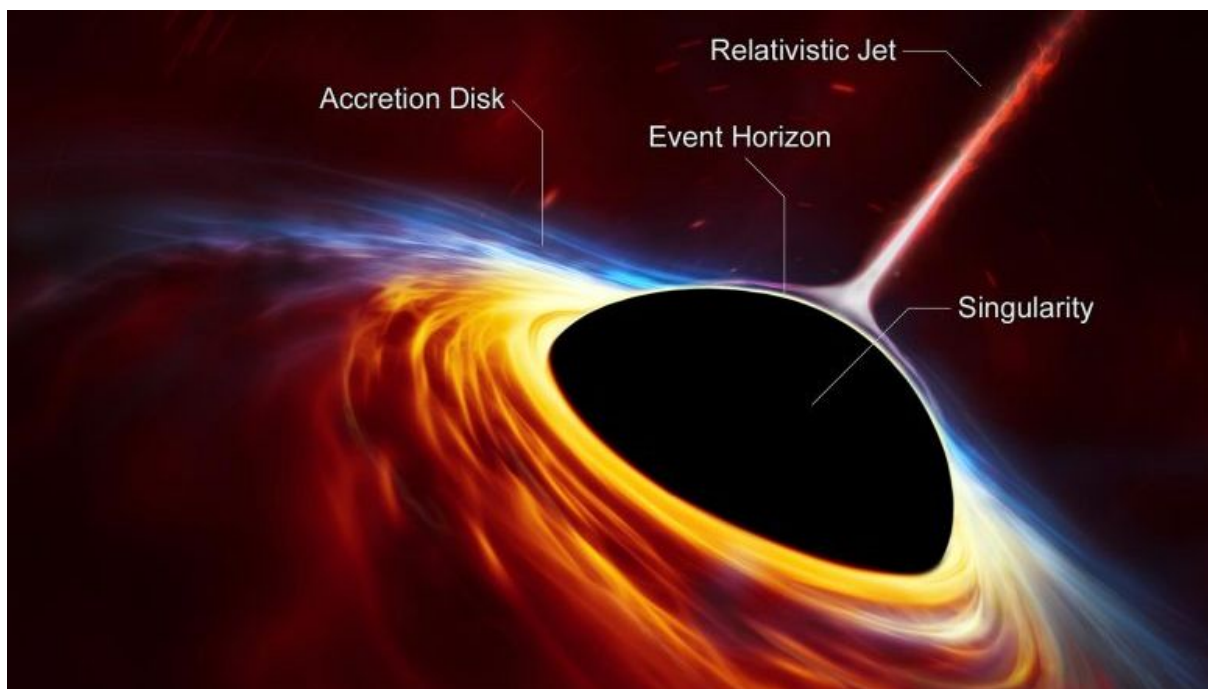
Černé díry

Černá díra je druhým možným produktem výbuchu supernovy typu II. Jde o tzv. stelární černou díru, která má hmotnost zhruba v rozmezí 3 až 15 hmotností Slunce. Znamená to, že těžší černé díry neexistují? Rozhodně ne, jen nemohou vzniknout přímo po výbuchu supernovy. O tom později.

Černá díra je objektem, který je natolik do sebe zhroucen, že vzniká gravitační pole, které nedokáže překonat ani světlo. Proto stelární černé díry jsou objekty velmi malé, s průměrem desítek kilometrů. Co je v nitru černé díry, se neví a patrně se na tom nic nezmění. Víme, že za horizontem události přestávají platit téměř všechny známé fyzikální zákony a hroutí se tu časoprostor. Jediné parametry, jež se u černé díry zachovávají, jsou hmotnost, moment hybnosti a náboj [\[343\]](#). Protože se u černé díry zachovává moment hybnosti, zhroucení hvězdy roztočí černou díru natolik, že hmota v akrečním disku okolo černého nitra se pohybuje rychlostí blízkou rychlosti světla [\[261\]](#).

Ač nic nevíme o nitru černé díry, propojení znalostí z různých odvětví fyziky, především obecné teorie relativity a termodynamiky, umožnilo v průběhu 20. a 21. století zjistit o černých dírách mnohé. Za vybudováním teorie černých děr stojí lidé jako Karl Schwarzschild (1873 – 1916), Robert Oppenheimer (1904 – 1967), Roy Kerr (nar. 1934), Kip Thorne (nar. 1940) nebo Stephen Hawking (1942 – 2018). Jde o velice složitou fyziku, která z velké části vychází z obecné teorie relativity, které se budeme věnovat v [56. hodině](#). Bližší vhled do problematiky nabízí například kniha *Stručná historie času* [\[344\]](#). My se, s ohledem na středoškolskou cílovou skupinu, zaměříme především na kvalitativní konsekvence.

Střed černé díry je obklopen horizontem události, který omezuje oblast kolem singularity, kde je gravitace natolik silná, že odtud nemůže uniknout ani světlo. V blízkosti horizontu černé díry se ale často z okolní hmoty tvoří akreční disk, který je naopak intenzivním zdrojem elektromagnetického záření na různých vlnových délkách, viz [Obrázek 3.120](#).



Obrázek 3.120: Vizualizace černé díry. Převzato z [345].

Poloměr horizontu události se nazývá Schwarzschildův poloměr a jde dán překvapivě jednoduchým vztahem:

$$R_S = \frac{2GM}{c^2} \quad (3.24)$$

$$R_S = M \cdot 1,48 \cdot 10^{-27} \quad (3.25)$$

Tento vztah je důsledkem obecné teorie relativity, nicméně při bližším pohledu zjistíme, že jde zároveň o přeformulovaný vztah pro druhou kosmickou rychlost, v níž namísto hledané rychlosti figuruje rychlost světla. To je koneckonců i důvodem, proč koncept černých děr navrhl John Mitchell (1724 – 1793) už v roce 1783 .

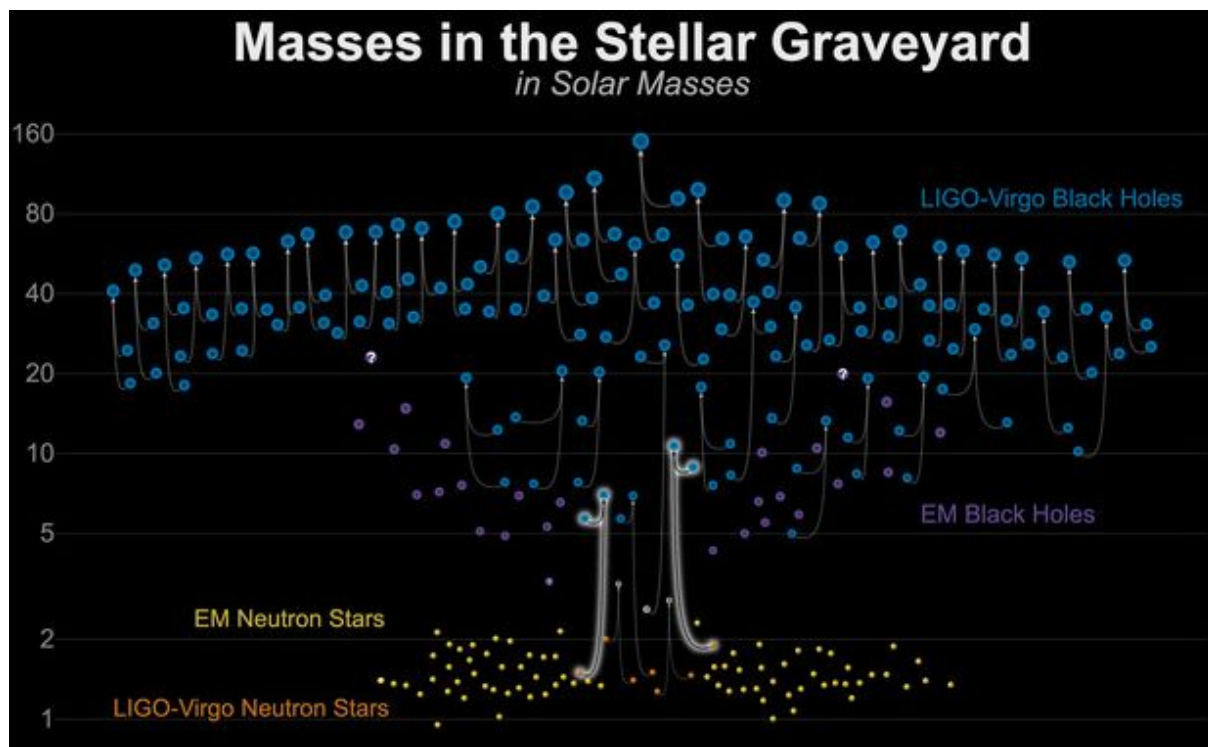
Pokud bychom do vztahu dosadili hmotnost Slunce, zjistíme, že by jako černá díra Slunce mělo poloměr zhruba 3 km a planeta Země by jako černá díra měla poloměr 1 cm. Nejmenší stelární černá díra, která byla doposud pozorována, má poloměr 8 km, zatímco největší pozorovaná stelární černá díra, má poloměr 45 kilometrů [347]. Černá díra, ale není tak úplně černá, a to ze dvou důvodů.

Prvním je zmíněný akreční disk, který tvoří rozptýlený materiál, jenž se o sebe tře, což způsobuje, že září. Samotný akreční disk generuje silné magnetické pole, které strhává látku urychlenou až na rychlost blízkou rychlosti světla do plazmových výtrysků kolmo k rovině akrečního disku [261][349]. Dlužno dodat, že akreční disk není pouze výsadou černých děr. Můžeme je najít i u celé řady hvězd.

Druhý mechanismus záření je mnohem tajuplnější a zatím i hypotetický, neb není experimentálně ověřen. Dle zákonů termodynamiky, žádné těleso nemůže dosáhnout teploty absolutní nuly. Vedle toho každé těleso září s intenzitou a spektrální charakteristikou v závislosti na jeho teplotě. To vede k nevyhnutelnému závěru, že i černé díry by měly zářit. Tomuto záření se říká Hawkingovo záření. Podle Hawkingových výpočtů by mělo jít o velice pomalý proces vypařování, který by u černé díry hmotnosti Slunce trval zhruba 10^{67} let, zatímco ty největší černé díry budou pomalu zářit až 10^{100} let [343].

Tím se dostáváme k velkým černým dírám. Aby černé díry narostly nad hmotnost zhruba 15 Sluncí, musí začít pohlcovat další hvězdy nebo se srážet mezi sebou. Tyto procesy ve většině

případů nemůžeme elektromagneticky detekovat. Zde se dostává ke slovu měření gravitačních vln, kterému se budeme blíže věnovat v 60. hodině. Už nyní se hodí zmínit o jak velké hvězdy se jedná, viz Obrázek 3.121.



Obrázek 3.121: Hmotnosti slučujících se černý děr. Převzato z [350].

Největší pozorované černé díry, které vznikaly mechanismem postupného slučování, mají hmotnost okolo 150 hmotností Slunce. Větší černé díry touto cestou vzniknout nemohly, protože na to není vesmír dost starý. Přesto existují mnohem větší černé díry, které se nachází v centrech galaxií. Tyto černé díry jsou patrně potomky kvazistelárních objektů, tzv. kvasarů, které vznikaly v mladém a horkém vesmíru uvnitř velmi hmotných hvězd [347].

V centru naší galaxie je velmi hmotná černá díra Sagitarius A* o hmotnosti 4 milionů hmotností Slunce a poloměru 17 násobku Slunce. V souvislosti se Sagitarius A* v centru naší galaxie se nabízí 3 otázky:

- Jak o ní víme?
 Díky pozorování hvězd, které ji obíhají. Tyto hvězdy přitom dosahují rychlostí až nižších desetin rychlosti světla. Jde o extrémní příklad k řešení Keplerovými zákony, které je navíc třeba adaptovat s využitím Obecné teorie relativity, o které se budeme bavit v 56. hodině.
- Drží mléčnou dráhu pohromadě gravitační síla černé díry v jejím centru?
 Ne. Zatímco Slunce tvoří 99,86 % hmoty Sluneční soustavy, černá díra v centru galaxie tvoří zhruba jedno promile hmoty galaxie [347][348]. Galaxii pohromadě drží temná hmota, jejíž gravitační působení umíme touto cestou nepřímo pozorovat. Ač o temné hmotě víme velmi málo, dokážeme naměřit, že tvoří 25 % celého vesmíru. Temnou hmotu objevil Fritz Zwicky (1898 – 1974), švýcarsko-americký astronom s bouřlivou pověstí, který se narodil v Bulharsku, české matce a švýcarskému otci [53].
- Existují ještě větší černé díry?
 Ano. Velmi hmotná černá díra v galaxii Messier 87 a váží 6,5 miliard hmotností Slunce. Jde o první černou díru, kterou se podařilo přímo zachytit, proto se o nich budeme ještě bavit v 57. hodině. Existují však ještě mnohem větší černé díry, které pozorujeme na samé periferii pozorovatelného vesmíru a pod jejichž horizont události by se vešla naše Sluneční soustava několikrát [347].

Co se stane, když spadneme do černé díry?

Dle mé zkušenosti tato otázka ze strany žáků zazní. Spolehlivě ji zodpovědět nelze, nicméně určitou představu je možné si udělat. Bez ohledu na to, zda bude černá díra malá nebo velká, překročení horizontu události znamená, že už není cesty zpět.

Bude-li černá díra malá, ještě před překročením horizontu události budou na hmotu působit obrovské slapové síly, které jakýkoli objekt roztrhnou. V případě obrovských černých děr nastane totéž, nicméně tomu patrně bude až po překročení horizontu události [343]. Pro popis pádu do velké černé díry lze použít příměr s plavcem na řece, která končí vodopádem. Řeka postupně zrychluje a v určitý moment už ani při dosažení své maximálních rychlosti nedokáže plavec překonat sílu proudu.

Hmota, kterou černá díra pohltí je ztracena a s ní se ztrácí i informace. Nebo taky ne. To vede na tzv. informační paradox a k teoriím, jako je holografický princip [351][352]. Diskuze o těchto tématech a teorie z nich plynoucí zní zajímavě, nicméně neměli bychom do nich zabředávat, neb se tím dostáváme na hranici mezi fyzikou a filozofií, a fyzika, která za teoriemi stojí je velice pokročilá.

O čem naopak máme poměrně přesnou představu, je to, co se bude dít při enormní akceleraci v průběhu pádu do černé díry. Na to umí odpovědět teorie relativity, které budou věnovány následující dvě hodiny.

Shrnutí

Černé díry, ač nejsou hvězdami, uzavírají tematický blok věnovaný hvězdám. Jde o téma, které má potenciál žáky ohromit, přestože jde o to nejsložitější a nejméně probádané téma související se stelární fyzikou.

Černé díry souvisí s celou řadou témat, ke kterým se budeme v následujících hodinách vracet, především s obecnou teorií relativity. Následující dvě hodiny, věnované relativitě, mohou působit dojmem, že jsou tak trochu krokem stranou. Nicméně jejich doplnění nám v kontextu předchozích hodin umožní podívat se na vesmír holisticky, resp. z kosmologického úhlu pohledu.

55. Speciální teorie relativity

Téma: Nový pohled na chování hmoty za vysokých rychlostí

Cíl: Seznámit žáky se speciální teorií relativity

Přístup k hodině

Následující dvě hodiny budeme věnovat Einsteinově teorii relativity. První hodina bude zaměřena výhradně na speciální teorii relativity. K ní lze přistoupit různě, a to ať už kvantitativně s odvozením všech jejich důsledků, tak kvalitativně, kdy půjde především o vizualizaci.

Motivace k zavedení speciální teorie relativity

Na začátku 20. století už byl plně popsán elektromagnetismus Maxwellovými rovnicemi, z nichž vyplývá, že informace, resp. projev všech elektromagnetických fenoménů, se šíří rychlostí světla. Maxwellův přístup byl poměrně velkou změnou oproti Coulombovu zákonu, který, byť ne cíleně, podsouval, že silové účinky působí na neomezenou vzdálenost okamžitě [353].

Příspěvek Einsteina spočívá v tom, že pochopil, že Newtonovy zákony a jejich „okamžité působení na dálku“, vnáší do fyziky nepřijatelné koncepční důsledky [353]. Tato hodina je zaměřena na speciální teorii relativity, která cílí na řešení konfliktu mezi Maxwellovými rovnicemi a 2. Newtonovým pohybovým zákonem.

Na rozdíl od obecné teorie relativity, která je triumfem Einsteinovy geniality, speciální teorie relativity je do značné míry intuitivní a využívá aparátu nezávisle vytvořeného Hendrikem Lorentzem (1853 – 1928) [354]. To rozhodně nesnižuje Einsteinovy zásluhy, nicméně si z toho lze vzít závěr, že Speciální teorie relativity by patrně přišla i nebýt Einsteinovy práce.

Mimo to z hlediska odvození nejde o teorii využívající složitý matematický aparát, proto k ní lze i na středoškolské úrovni přistoupit bez větší újmy na přesnosti.

Speciální teorie relativity

Speciální teorie relativity (STR) byla publikována v roce 1905 Albertem Einsteinem (1879 – 1955), tehdy ještě úředníkem na patentovém úřadě ve švýcarském Bernu. Teorie stojí na dvou postulátech, opírajících se o inerciální pozorovatele – pozorovatele pohybující se vůči sobě stálou neměnnou rychlostí:

- Pro oba pozorovatele platí stejné přírodní zákony
- Pro oba pozorovatele se světlo pohybuje stejnou rychlostí

První postulát už byl znám jako Galileův princip relativity nebo klasický princip relativity. Druhý postulát vychází z Maxwellových rovnic, které mj. popisují šíření světla, a implikuje dříve nepopsané fenomény pro chování hmoty, pohybující se rychlostí blízkou rychlosti světla.

Výsledkem Einsteinových myšlenkových pokusů bylo zavedení vztahů pro dilataci času, kontrakci délek, relativistickou hmotnost, hybnost a skládání sil. Všechny tyto parametry spojuje, že do nich promlouvá tzv. Lorentzův faktor:

$$\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (3.26)$$

Hodnota Lorentzova faktoru je zanedbatelná pro rychlosti výrazně menší, než je rychlost světla. Jakmile se rychlost přiblíží rychlosti světla, váha Lorentzova faktoru se zvýší. V tu chvíli začíná čas plynout pomaleji, hmotnost roste a geometrie prostoru se mění. Dosadíme-li v extrémním případě za rychlost rychlost světla, která je pro hmotné objekty nedosažitelná, hmotnost roste nade všechny meze, prostor se deformuje nade všechny meze a čas se zastavuje.

K čemu je teorie dobrá, když popisuje jevy v rychlostech, které jsou pro nás nedosažitelné? Ač nejde zrovna o cestovní rychlosti, nelze říci, že by byly nedosažitelné. Jak bylo zmíněno v předchozích hodinách, rychlostí blízkých rychlosti světla dosahuje hmota v extrémních gravitačních polích. Těmito objekty mohou být jak drobné částice v akrečním disku, tak celé hvězdy, které obíhají v blízkosti galaktických jader (zde je ale situace složitější, neb do ní promlouvá samotné gravitační pole a popis jeho projevů je doménou Obecné teorie relativity, které se budeme věnovat v následující hodině).

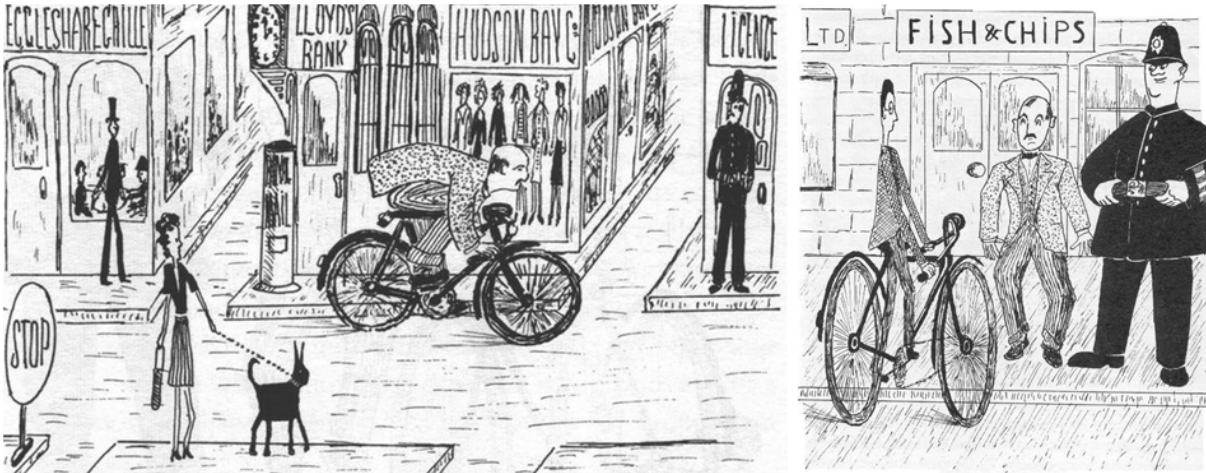
Pro tuto chvíli je lepší sáhnout po více pozemských příkladech. STR se totiž neprojeví jen v kosmických měřících. Relativistických rychlostí dosahují částice v urychlovačích částic, které se využívají pro základní i aplikovaný výzkum. Půjdeme-li blíže k civilním aplikacím, relativistických rychlostí dosahují elektrony v elektronových mikroskopech, které jsou dnes už (kvazi)sériově vyráběnými komerčními zařízeními. Projevy STR můžeme také vidět v jaderných reaktorech nebo ještě obecněji v detektorech, kde se částice pohybují rychleji než rychlostí světla v daném prostředí, což vede ke vzniku obdoby zvukové rázové vlny [355].

Z hlediska didaktického lze přistoupit k STR třemi způsoby:

- Geometrickým odvozením matematických důsledků postulátů (kontrakce délek, dilatace času, relativistický hmotnost atd.), k čemuž lze využít celé řady opor jak v podobě středoškolských učebnic [39], tak popularizačních přednášek [354], kde se zmiňují i pojmy, jako kauzální struktura prostoročasu nebo světelný kužel.
- S využitím vizualizace, která kombinuje kvalitativní přístup a kvantitativní přístup. V tomto případě může jako opora posloužit, podobně jako v případě jiné látky z této diplomové práce, některý z popularizačně naučných kanálů na youtube [356].
- Jen kvalitativně, kdy na pozadí dvou postulátů budeme diskutovat dopady speciální teorie relativity beze zmínky o kvantitativních projevech, resp. beze zmínky o Lorentzově faktoru. Zde může být oporou například edukační video projektu Otevřená věda [355].

Patrně nejoriginálněji si s demonstrací STR poradil George Gamow (1904 – 1968), jeden z otců teorie Velkého třesku, v populárně naučné knize Pan Tompkins v říši divů. Gamow v kapitole věnované relativitě postuloval alternativní vesmír, v němž je velmi nízká rychlost světla, což vede k tomu, že se relativistické jevy projevují v civilních rychlostech, viz Obrázek 3.122.

Tento příklad je dosti zjednodušující, neb například nebere v potaz dopplerovské jevy, nicméně je velice ilustrativní. Samotná kniha Pan Tompkins v říši divů je celá vystavěna na podobně absurdních příkladech (v kvantové džungli je Planckova konstanta rovna 1), které přibližují komplikované fyzikální zákony způsobem srozumitelným i pro žáky střední školy.



Obrázek 3.122: Relativistické jevy za předpokladu, že by rychlost světla byla blízká cestovním rychlostem. Převzato z knihy Pan Tompkin v říši divů [357].

Princip korespondence

Kapitola věnovaná STR může být tou pravou chvílí pro zmínění principu korespondence. Poprvé jej formuloval Niels Bohr (1885 – 1962), který se proslavil především svými průlomovými pracemi v oblasti atomové fyziky. Princip korespondence v obecné rovině říká, že fyzikální zákony popisující chování hmoty ve speciálních případech, ať už jde o teorii relativity, tak třeba o zákony popisující fyziku mikrosvěta, odpovídají zákonům klasické fyziky ve zbývajících případech.

Pro STR jsme jej už naznačili výše při dosazení nízkých rychlostí do Lorenzova faktoru. Dalším příkladem je slavná rovnice $E=mc^2$, která je přímým důsledkem STR. Celkovou energii systému vyjádříme vztahem:

$$E = E_k + E_0 = mc^2 \quad (3.27)$$

Kinetickou energii pak můžeme vyjádřit jako:

$$E_k = mc^2 - m_0c^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) m_0c^2 \quad (3.28)$$

Aplikujeme-li na kinetickou energii Taylorův rozvoj druhého stupně, dostaneme následující:

$$E_k \approx m_0c^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} \frac{v^4}{c^4} \right) - m_0c^2 = \frac{1}{2} m_0v^2 + \frac{3}{8} m_0 \frac{v^4}{c^2} \quad (3.29)$$

Taylorův rozvoj je sám o sobě vysokoškolským učivem a my zde nemáme prostor se věnovat matematice, která za ním stojí. Důležité je, že tu vidíme, že Einsteinův slavný vztah mezi energií a hmotou lze podobně jako vztah pro relativistické jevy převést do podoby dobře známé roviny pro kinetickou energii. V tomto případě stačí vzít první člen rozvoje.

Dalším příkladem principu korespondence je obecná relativita, které bude věnována následující hodina a která celou řadu témat, doposud probraných, postaví do úplně nového světla.

Shrnutí

Speciální teorie relativity je vzácným příkladem pokročilé fyziky vybudované na matematickém aparátu na úrovni střední školy. Žáci by si měli z hodiny odnést poznání, že limit maximální rychlosti v podobě rychlosti světla v kombinaci s rovnocenností inerciálních vztažných soustav má důsledky v podobě změny vnímání času a prostoru, a v podobě dopadu na hmotnost, hybnost a energii hmoty. Ač může celý konstrukt STR působit na první pohled dojmem, že jde o intelektuální cvičení, a ve své době jím i byl, dnes má STR dopad na výskyt fenoménů, které můžeme vidět v celé řadě zařízení nebo je můžeme zaznamenat v astronomických pozorováních.

56. Obecná teorie relativity

Téma: Nová teorie gravitace

Cíl: Objasnit žákům, v čem spočívá Einsteinův hlavní k dnešnímu chápání světa

Přístup k hodině

Speciální teorie relativity popisuje jevy za konstantní rychlosti blízké rychlosti světla. Jenže co když zrychlujeme? Nadto sama gravitace vyvolává síly, které způsobují gravitační zrychlení. Znamená to, že zrychlující soustava je ekvivalentní s gravitačním polem? Tím se dostáváme k Obecné teorii relativity.

Obecná teorie relativity (OTR) je pokročilým vysokoškolským tématem, kterému v České republice plně rozumí zhruba vyšší desítky teoretických fyziků. Zde se ze strany učitele nenabízí zdaleka tolik variability, jako v případě STR. Spíše než na Einsteinovy rovnice gravitačního pole, které zde zmíníme také, je třeba se zaměřit na důsledky teorie a vizualizace.

Motivace k zavedení Obecné teorie relativity:

Tak jako STR řeší konflikt Maxwellových rovnic s 2. Newtonovým pohybovým zákonem a výsledkem jsou termíny jako relativistická hmotnost, dilatace času nebo relativistické skládání rychlostí, OTR se zaměřuje na konflikt s Newtonovým gravitačním zákonem. Idea, která stojí za OTR, je, že principy relativity jsou stejné pro zrychlující tělesa a pro tělesa, na něž působí gravitace. OTR věnoval Albert Einstein deset let práce, z nichž část strávil v Praze [358]. Výsledkem jeho úsilí jsou tzv. Einsteinovy rovnice gravitačního pole, které popisují zakřivený prostoročas a lze je interpretovat jako čistě geometrickou teorii [353].

Obecná teorie relativity (1915)

Zde se hodí zmínit samotné znění obecné teorie relativity, viz Obrázek 3.123. Vztah na Obrázku 3.123 je zápisem systému 10 parciálně diferenciálních rovnic. Proto se o Einsteinových rovnicích gravitačního pole obvykle mluví v plurálu. Není sice naší ambicí s rovnicemi dále pracovat, nicméně i kvalitativně, jen na samotném jejich znění, lze mnohé ukázat.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Ricciho tenzor Skalární křivost Metrický tenzor Kosmologická konstanta Tensor energie-hybnosti

Obrázek 3.123: Obecná teorie relativity. Převzato z [359].

Už STR implikuje, že o prostoru a času nemůžeme mluvit odděleně. OTR explicitně pracuje s pojmem prostoročasu. Levá strana Einsteinova gravitačního zákona popisuje geometrii prostoročasu. Klíčová, a trochu i kontroverzní, je zde kosmologická konstanta, která má zásadní vliv na chování a vývoj prostoročasu.

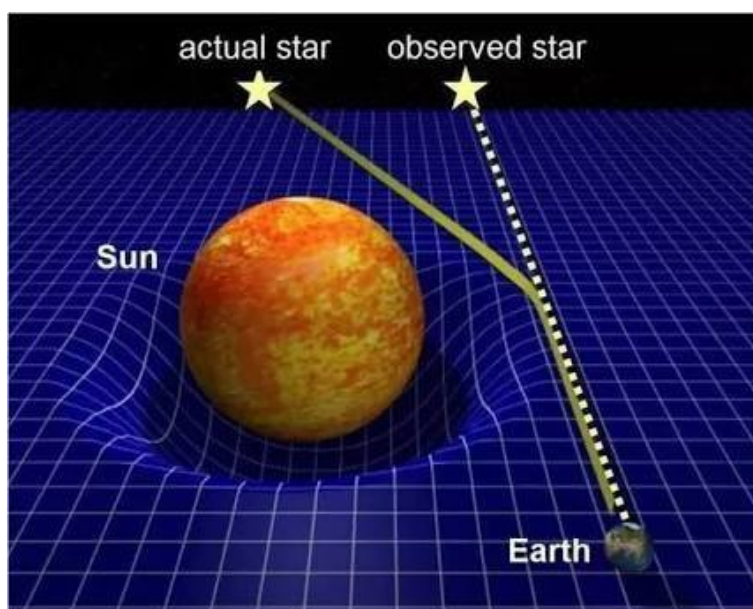
V původní verzi Einsteinova gravitačního zákona kosmologická konstanta nebyla. Einstein ji přidal ve chvíli, kdy si uvědomil, že by se jinak měl vesmír gravitačně zhroutit. To nebylo nic nové, k tomuto důsledku vedl i Newtonův gravitační zákon. Kosmologická konstanta měla zajistit protitlak, který zhroucení zabrání. Šlo proto tak trochu o švindl podobně jako u Ptolemaiových epicyklů a deferentů [19]. K tomuto tématu se ještě vrátíme v následující hodině.

Pravá strana rovnice odpovídá hmotě, která ovlivňuje geometrii prostoročasu. Gravitační konstanta je velikosti $6,67 \cdot 10^{-11}$ a c^4 je velikosti $8,1 \cdot 10^{33}$, z čehož plyne, že tenzor energie-hybnosti musí nabývat obrovských hodnot, aby docházelo k zásadnímu vlivu na geometrii prostoročasu. Proto se tento fenomén projevuje především na úrovni velice hmotných objektů, jako jsou hvězdy, hvězdokupy nebo galaxie.

Zjednodušeně OTR shrnul americký astrofyzik John Archibald Wheeler (1911 – 2008) jednou větou: Hmota říká prostoročasu, jak se má zakřivovat, prostoročas říká, jak se má hmota pohybovat. Jaké jsou důsledky?

OTR přináší celou řadu konsekvencí, které mají dopady jak napříč astrofyzikou, tak dnes už i v běžném životě:

- Ohyb světelného paprsku, kdy se hmotný objekt chová jako gravitační čočka, kolem které se ohýbá světlo, viz ilustrativní Obrázek 3.124. Vznik gravitační čočky kolem Slunce byl experimentálně ověřen už v roce 1919 při zatmění Slunce [360]. Se současnou technikou je možné tento jev pozorovat běžně.



Obrázek 3.124: Slunce jako gravitační čočka. Převzato z [361].

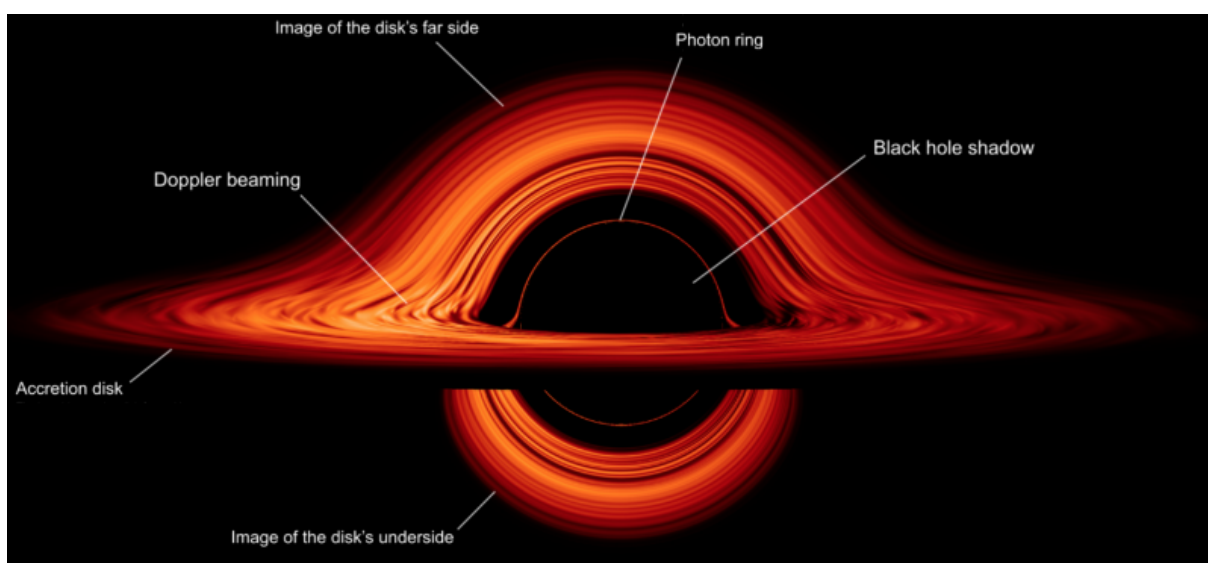
- Precese perihelia Merkuru – do té doby nevysvětlitelné posouvání oběžné dráhy Merkuru lze vysvětlit Einsteinovým gravitačním zákonem. Obdobný jev na úrovni stáčení oběžných drah hvězd v blízkosti centra galaxie je důkazem, že se zde nachází velmi hmotná černá díra.
- Mimo to OTR předpovídala samotnou existenci černých děr dlouho předtím, než byla v roce 1971 první černá díra nepřímě pozorována.
- Podobně OTR předpovídala gravitační vlny jako pozůstatek kolize hmotných objektů, budeme se o nich bavit v 60. hodině.
- Matematická řešení OTR vedou na modely dynamického vesmíru, kdy dle volby okrajových podmínek můžeme dostat kromě statického vesmíru, také vesmír, který se gravitačně bortí nebo vesmír, který expanduje, o tom více v následující hodině.
- V neposlední řadě můžeme vidět celou řadu projevů deformovaného časoprostoru v okolí hmotných objektů.

Pro demonstrování důsledků OTR lze využít celé řady názorných opor [359][362]. My se nyní vrátíme zpět k černým dírám, na nichž lze snadno ilustrovat, jaké budou projevy silného gravitačního pole.

S rostoucím vlivem gravitace budou růst projevy dilatace času. Proto pokud bychom se k černé díře vydali a vysílali k Zemi každou sekundu signál, postupně by na Zemi pozorovali rostoucí prodlevy mezi detekcí námi vyslaného signálu. Náš pád do černé díry by byl rychlý pouze ve vztažné soustavě spojené s námi, zatímco by se všechno v našem okolí začalo urychlovat. Ze Země by náš pád do černé díry vypadal jako zpomalený film [346].

Ještě podivuhodnější by bylo vnímání geometrie prostoru v blízkosti černé díry. Černou díru neobíhá jen hmota, ale i světlo. Pokud bychom se dostali blíže k černé díře, v určitý moment bychom viděli sami sebe, jako obraz, který oběhl černou díru. Po překročení horizontu události by nás temnota začala obklopotvat a náš výhled na okolní vesmír by se zužoval [343].

Podobně jako u STR se může zdát, že tyto úvahy jsou jen intelektuálním cvičením, a podobně jako u STR tomu tak u OTR není. Na Obrázku 3.125 můžeme vidět vizualizaci černé díry s výrazným akrečním diskem.



Obrázek 3.125: Vizualizace černé díry tak, jak bychom ji měli pozorovat. Převzato z [363].

Vysvětlení této vizualizace v prvním přiblížení není složité a detailněji jej poskytuje například Derek Muller na kanále Veritasium [364]. Ve stručnosti lze říct, že vidíme černou díru s akrečním diskem, který je zhruba v rovině mířící k pozorovateli. Pod a nad diskem vidíme obraz akrečního disku za černou dírou.

Na Obrázku 3.126 pak vidíme skutečný snímek černé díry v rentgenovém spektru, publikovaný v roce 2019 [365]. Snímek byl složen z mnoha měření realizovaných na stanicích po celé Zemi včetně observatoře na Antarktidě [366].



Obrázek 3.126: První fotografie černé díry publikovaná v roce 2019. Převzato z [366].

Vrátíme-li se na zpátky na Zemi, nabízí se otázka: Má OTR přínos i ve všednodenním životě? Ano. OTR se neprojevuje ale jen v kosmických měřítkách. I navigační systémy, které využívají družice na MEO ve výšce 20 200 km nad Zemí musí zohlednit, že na oběžné dráze plyne čas rychleji. Rozdíl, který takto vzniká, činí 1600 ns za hodinu, čemuž odpovídá chyba ve vzdálenosti 480 metrů [367]. Podobných korekci je třeba využívat i u komunikačních družic, které spoléhají na přesně měření času.

Shrnutí

Obecná teorie relativity není sama o sobě jednoduchým tématem, tím spíše ve středoškolském kontextu. Nicméně opřeme-li se o poznatky z předchozích hodin věnovaných hvězdám a jejich finálním stádiím, lze OTR uchopit způsobem pro žáky srozumitelným a ukázat, že nejde jen o geometrický konstrukt ke zpřesnění gravitačních výpočtů, ale že jde o teorii, která dává hmatatelné a praktické výsledky. OTR nám nyní otevírá cestu k diskuzi o expanzi vesmíru a velkém třesku, čemuž budou věnovány následující hodiny.

57. Kosmologické důsledky Obecné teorie relativity

Téma: Cesta k Teorii velkého třesku

Cíl: Nastínit žákům, jaká cesta vedla k přijetí Teorie velkého třesku

Přístup k hodině

Tato hodina bude první ze dvou hodin, kdy zabrousíme do kosmologie, a bude svou povahou připomínat přehledové hodiny z historie fyziky. Kosmologie se zabývá vesmírem jako celkem, jeho vznikem, vývojem a budoucností. Jako vědecká disciplína se rozvinula na začátku 20. století v návaznosti na OTR, na které je dodneška z velké části postavena. Kosmologie je specifická tím, že se v ní setkává hned několik na pohled rozdílných témat, kterými jsme se doposud zabývali. Lze tak říct, že žákům hodina nabídne rozuzlení hned několika na sobě nezávisle vyprávěných příběhů.

Kde se vzala kosmologie?

V kapitolách věnovaných hvězdám jsme se bavili o syntéze těžších prvků z lehkých. Na počátku tohoto řetězce byl vodík. Jenže kde se vzal vodík? V minulé hodině jsme se pak věnovali obecné teorii relativity, do které Albert Einstein vsunul kosmologickou konstantu, která měla zabránit gravitačnímu zhroucení vesmíru. Jenže tu tam přidal tak trochu na sílu, aby dospěl ke kýženému závěru. Třetím příběhem je příběh o pozorování pohybujících se hvězd. Tyto tři příběhy se v průběhu 20. století potkaly a vzešla z nich Teorie velkého třesku a kosmologie jako taková. Ale popořadě.

Různá řešení Obecné teorie relativity

Zatímco Albert Einstein zavedl kosmologickou konstantu ve snaze zachovat věčný a statický vesmír, ruský matematik Alexandr Fridman (1888 – 1925) přistoupil k OTR odlišným způsobem. Jako matematik experimentoval s kosmologickou konstantou a tvořil nové dynamické modely vesmíru. Jako první přišel s ideou vesmíru, který počátečním výbuchem dostal impuls k expanzi, jejíž projevy jsou nyní brzděny gravitací. Výsledkem Fridmanovy práce byly 3 modely – model vesmíru, jehož expanze se zastaví a on se zhroutí, model, v němž je nalezena nová rovnováha a model, kdy vesmír expanduje donekonečna.

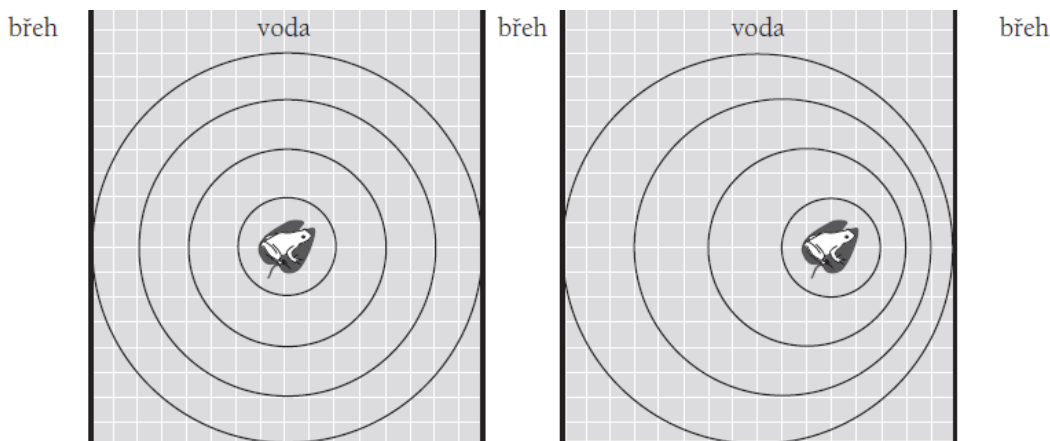
Matematika za těmito modely není složitá [359], nicméně je za hranicí středoškolského kurikula. Proto může tuto ideu pomoci přiblížit analogie s kosmickými lety. Pokud raketa nedosáhne dostatečné rychlosti, zřítí se zpět na Zemi, pokud naopak dosáhne druhé kosmické rychlosti, vymaní se z gravitačního pole Země. Pro rychlosti mezitím dostáváme obdobu rovnováhy.

Tím, kdo Fridmanově matematice dal fyzikální kontext, byl valonský kněz a astronom Georges Lemaître (1894 – 1966). Lemaître přišel s ideou výbuchu prvotního atomu, přičemž “současný vesmír je radioaktivním rozkladem prvotního atomu”. Lemaître tvrdil, že jde o jediný správný model vesmíru a že jeho pozůstatkem by mělo být kosmické záření, které bychom měli být dnes schopni pozorovat. S touto ideou konfrontoval Einsteina, který ho odmítl. Prozatím. Proč? Protože statický vesmír se shodoval s převažující vírou ve věčný vesmír a Einsteinova autorita způsobovala, že jakákoli jiná teorie se těžko mohla prosadit bez empirických dat [19].

Objevy spojené s pozorováním vzdálených objektů

Ve druhém ročníku klasické fyziky je probírán Dopplerův jev, který se nejčastěji demonstruje na změně frekvence zvuku v závislosti na pohybu zdroje. Není to ale zdaleka jediný příklad. Dopplerův jev jde snadno ilustrovat například na žabákovi, co se pravidelně pohupuje na leknínu, viz Obrázek 3.127. Pokud je žabák na stojaté vodě, od žabáka se šíří soustředné vlny. Jakmile se dá žabák do pohybu, začne se projevovat Dopplerův jev. A podobně je to i se světlem.

Dopplerův jev v podobě rudého a modrého posuvu objevil v roce 1912 Vesto Slipher (1875 – 1969), když si všiml posuvu spektrálních čar mlhovin. Že jde o samostatné galaxie ale nevěděl. Tenkrát byla obecně přijímána hypotéza, že tyto mlhoviny jsou součástí naší galaxie. Že by mohly



Obrázek 3.127: Dopplerův jev na příkladu žabáka na leknínu. Převzato z [19].

být mlhoviny samostatnými galaxiemi, nebylo sice novou myšlenkou, přišel s ní mnohem dříve už Imanuel Kant (1724 – 1804), nicméně nebyl proto žádný relevantní důkaz [19]. Slipher si postupně všiml, že většina mlhovin se od nás vzdaluje, a to rychlostmi desítek, stovek i tisíců kilometrů za sekundu. Byl to první krok k zavedení nové metody k měření vzdáleností s využitím relativistického Dopplerova jevu.

K relativistickému Dopplerovu jevu lze v hodině přistoupit i kvantitativně. Detekovanou vlnovou délku λ_0 , v závislosti na rychlosti v , rychlosti světla c a vlnové délce vyzařované zdrojem λ_e , vyjadřuje vztah:

$$\lambda_0 = \lambda_e \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}} \quad (3.30)$$

Relativistický Dopplerův jev lze ilustrovat i na žertovných příkladech, například: jakou rychlostí bychom se museli pohybovat směrem k semaforu, aby se červená barva změnila na zelenou. Na první pohled je vidět, že výsledná rychlost bude blízka rychlosti světla.

Diskuze o Dopplerově jevu nás postupně dostává k Edwinu Hubbleovi (1889 – 1953). Edwin Hubble udělal dva zásadní objevy. V roce 1923 detekoval cefeidu v mlhovině M31, známou jako mlhovina v Andromedě a zjistil, že M31 není mlhovinou v Mléčné dráze, ale samostatnou galaxií vzdálenou 900 000 světelných let. Nyní byl na stole důkaz, že vesmír je mnohem větší než naše galaxie. Co víc, v kombinaci s objevem Sliphera se otevřela nová možnost, jak měřit velké vzdálenosti.

Během následujících let Edwin Hubble proměřil desítky galaxií ve vzdálenosti až desítek milionů světelných let. Čím byla galaxie dále, tím rychleji se vzdalovala. Extrapolací naměřených dat vznikl první odhad stáří vesmíru dle Lemaîtreovy teorie. Odhad ale prozatím dost nepřesný. Protože z něj vyplývalo, že by měl být vesmír mladší než Země, nedala se Teorie velké třesku považovat za potvrzenou [19].

Že vesmír expanduje, potvrzeno bylo, což nakonec přiznal i Einstein. Ač se mu i nadále přičila Teorie velké třesku, přiznal, že Lemaître měl pravdu a konstrukt kosmologické konstanty prohlásil za svůj největší profesní omyl [359]. Lineární závislost mezi rychlostí vzdalování galaxií a jejich naměřenou vzdáleností objevená Edwinem Hubblem byla pojmenována Hubblův zákon, později však přejmenována na Hubblův-Lemaîtreův zákon [368] a někdy je uváděna jako Hubblův-Lemaîtreův-Slipherův zákon [369].

Kosmologická konstanta se ale nakonec vrátila do hry v 90. letech 20. století, kdy se pozorováním supernov typu Ia ukázalo, že expanze vesmíru zrychluje. Tuto zrychlující expanzi nemůžeme

pozorovat uvnitř galaxií ani ve skupinách galaxií. Projevuje se až na velké vzdálenosti mezi skupinami galaxií. Ty se od sebe vzájemně vzdalují a proto, teoreticky, za mnoho miliard let bude vesmír mimo naši galaktickou skupinu pro nás nepozorovatelný. Zrychlenou expanzi způsobuje temná energie a její váha se promítá právě do kosmologické konstanty [53][336].

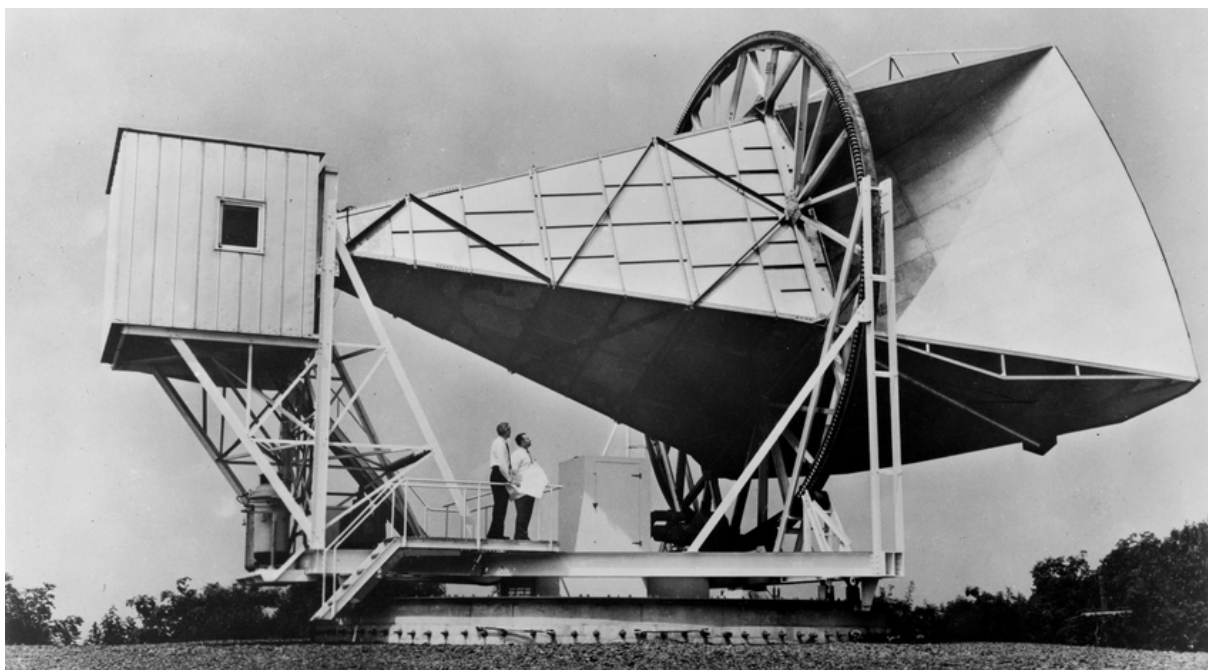
Vznik lehkých prvků

Posledním střípkem do naší skládačky je zodpovězení otázky, kde se vzal vodík a helium. Tuto otázku se pokusila v roce 1948 zodpovědět tzv. $\alpha\beta\gamma$ -teorie pojmenovaná dle oficiálních autorů článku, v němž byla prve nastíněna. Za teorií stojí Ralph Alphere (1921 – 2007), George Gamow (1904 – 1968) a Robert Herman (1914 – 1997), kteří vznik prvků vysvětlovali syntézou v pozdních stádiích velkého třesku. O této teorii a jejich strůjcích toho bylo řečeno a napsáno mnoho [19][53], my se zaměříme především na důsledky.

Teorie vycházela z předpokladu, že vesmír vznikal za obrovských teplot postupnou expanzí a chladnutím. Jakmile vesmír dostatečně vychladl, hmota rozbitá na atomární částice se mohla zformovat do podoby nejjednodušších atomů vodíku a helia. Teorie měla jeden zásadní problém a jeden zásadní důsledek.

Problémem bylo, že nevysvětlovala vznik těžších atomů, pro jejichž syntézu bylo potřeba čím dál vyšších teplot. To objasnil o pár let později až Fred Hoyle, kterého jsme zmiňovali v 51. hodině. Důsledkem bylo, že teorie předpovídal, že v moment, kdy se atomární částice sloučily do atomů, oddělilo se záření od hmoty, toto reliktní záření by jako otisk velkého třesku mělo být všude kolem nás a v jeho otisku bychom měli nalézt nehomogenity, z nichž později vznikly galaxie. To předvídal už Lemaître. Teď už se vědělo, že by se mělo jednat o mikrovlnné záření o vlnové délce v řádu milimetrů.

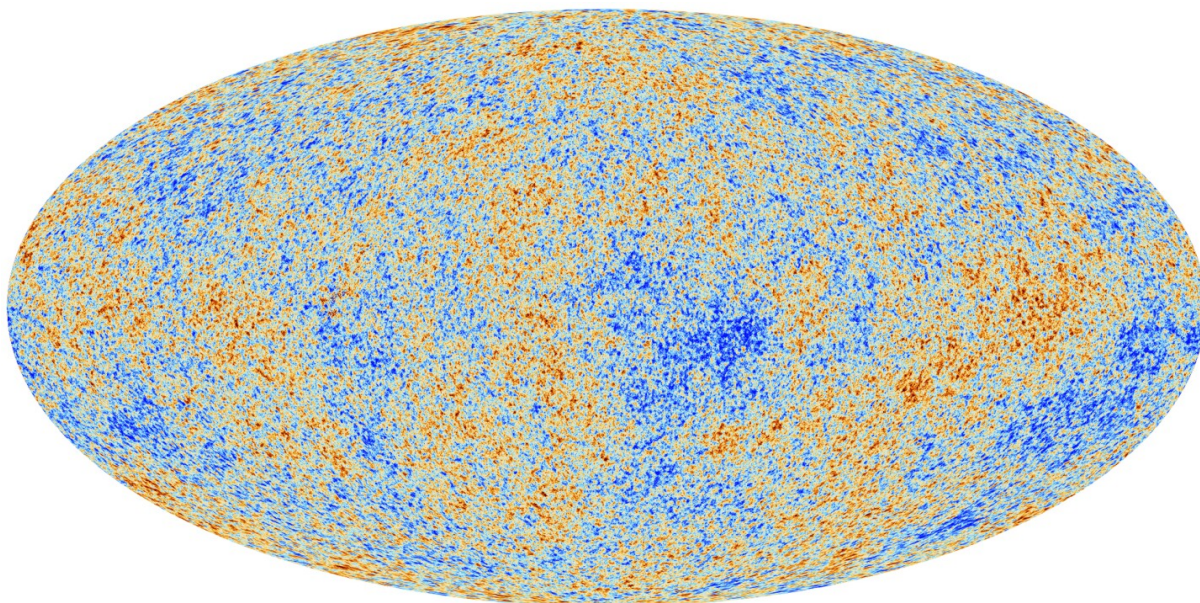
Reliktní záření objevil v roce 1964 Arno Penzias (nar. 1933) a Robert Wilson (nar. 1936). Záření, které původně odpovídalo svojí vlnovou délkou viditelnému spektru, se expanzí vesmíru roztáhlo až na mikrovlny o vlnové délce 1,06 mm, což odpovídá teplotě 2,73 K [53]. Na Obrázku 3.128 je k vidění anténa, kterou se podařilo poprvé reliktní záření detekovat.



Obrázek 3.128: Anténa, kterou se podařilo poprvé reliktní záření detekovat. Převzato z [370].

Reliktní záření nás všude obklopuje, proto s určitou mírou nadsázky lze říct, že teplota 2,73 K je teplotou vesmíru. První detailní mapu nehomogenit reliktního záření přinesla v roce 1992

družice COBE (Cosmic Background Explorer), kterou jsme již zmiňovali ve [24. hodině](#). Nejpodrobnější mapa reliktního záření, která je v době psaní diplomové práce k dispozici, byla pořízena v roce 2013 [\[371\]](#), viz [Obrázek 3.129](#), a pochází ze sondy Planck, která měření prováděla v libračním bodě L2 vzdáleného 1,5 milionu kilometrů od Země, viz [41. hodina](#).



Obrázek 3.129: Mikrovlnná mapa oblohy pořízená sondou Planck. Převzato z [\[372\]](#).

To, co na mapě vidíme, jsou fluktuační vlnové délky reliktního záření, které odpovídají nehomogenitě hmoty na konci velkého třesku. Tyto fluktuační jsou drobné, odpovídají stovkám mikrokelfinů [\[219\]](#).

Temná hmota a temná energie

V [54. hodině](#) jsme pojmenovali temnou hmotu, kterou můžeme pozorovat nepřímo prostřednictvím gravitačního působení. Mimo to se toho o temné hmotě mnoho neví. Snad jen to, že nejde o baryonovou hmotu. V této hodině jsme zmínili také temnou energii, která byla postulována, aby vysvětlila expanzi vesmíru. Dnes víme, že tyto entity nás nejen obklopují, ale že se v nich ukrývá 96 % veškeré energie vesmíru.

Temná hmota, tvořící 23 % vesmíru, byla nepřímo pozorována už ve 30. letech 20. století a dnes se ví, že tvoří vlákna a struktury a že je to především gravitace temné hmoty co se snaží bránit expanzi vesmíru jako celku [\[373\]](#). Vedle toho temná energie je fluidum, co prostupuje celý vesmír a rozfukuje ho, nemá žádnou strukturu, při expanzi se ani nemění hustota temné energie, proto s časem její váha je větší a expanze je zrychlená [\[374\]](#).

Jak to víme?

I tyto odpovědi přináší měření reliktního záření, byť ne přímo. Mimo to jsou výsledky měření reliktního záření vodítkem ke zjištění celé řady kosmologických parametrů jako je stáří vesmíru, hodnoty Hubblových konstant nebo vede k teorii inflace na počátku velkého třesku a odhadu velikosti dnešního vesmíru [\[219\]](#). Na druhou stranu je třeba mít na paměti, že tyto objevy jsou nové a témata jsou otevřená. Lze očekávat, že mnohá měření a výpočty se budou v budoucnu dále zpřesňovat a že z doposud naměřených dat budou extrahovány nové poznatky.

Shrnutí

Propojením tří různých výzkumů jsme se dobrali až k důkazu, že vesmír vznikl jako produkt expanze po velkém třesku. To, co by si žáci z hodiny měli odnést, nejsou ani tak detaily historického kontextu tohoto objevu, jako spíš ponaučení, že k těm nejzásadnějším objevům vede trnitá cesta, na níž je třeba propojovat znalosti z odvětví, která spolu na první pohled nesouvisejí.

Mimo to jsme otevřeli téma temné hmoty a temné energie, které není snadné didakticky uchopit, neb zasahuje do celé řady témat a ač je velmi atraktivní, limitujícím faktorem je, že toho o temné hmotě a temné energii víme stále velmi málo.

Následující hodinu zaměříme na samotný velký třesk a jeho důsledky, čímž se posuneme trochu více do neprobádaných vod moderní fyziky, kam spadají i už zmíněná témata jako temná energie a temná hmota.

58. Vznik a vývoj vesmíru

Téma: Velký třesk

Cíl: Nastínit žákům, co dnes o velkém třesku víme

Přístup k hodině

Hodina věnovaná velkému třesku je poslední hodinou zaměřenou na teoretickou fyziku. Podobně jako v předchozí hodině se nám u velkého třesku potkávají mnohá doposud probraná témata, ke kterým se přidávají další, především z částicové fyziky. Více než kde jinde se zde omezíme na kvalitativní přístup, protože Teorie velkého třesku do sebe zahrnuje ty nejsložitější fyzikální problémy, které dnes známe, problémy, v nichž kolidují zákony mikrosvěta s gravitačními zákony. Vznikají tak dílčí teorie, které není snadné experimentálně ověřit.

Jak zařadit velký třesk

Obecně je zažitá představa, že velký třesk byl výbuchem infinitezimálně malého prostoru, ale není tomu tak. Velký třesk byl procesem trvajícím 380 000 let, na jehož konci bylo oddělení záření od hmoty, tzv. rekombinace.

Jak bylo nastíněno v předchozí hodině, Teorie velkého třesku stojí na zákonech jaderné fyziky, podepřené měřeními reliktního záření, a na extrapolaci měření expanze vesmíru. Teorie dále vychází z obecných principů, které mají skoro až filozofickou povahu:

- Kosmologický princip – vesmír je ve velkých měřítkách homogenní a izotropní.
- Antropický princip – vesmír má takové vlastnosti, aby se v něm mohl vyvinout inteligentní život.
- Koperníkův princip – Země nezaujímá ve vesmíru význačné místo. Přeneseně tento princip platí i pro Sluneční soustavu, galaxii a galaktickou skupinu.

Zejména antropický princip má potenciál být kontroverzní, a to jak z hlediska fyzikálního, kdy jen drobné změny základních fyzikálních konstant mohou mít zásadní dopady (pokud by jaderné vazby byly slabší, nebylo by možné slučovat vodík na helium, pokud by byly silnější, vodík by rychle došel [375]), tak z hlediska filozofického až teologického, kdy se otevírá diskuze mezi vztahem vědy a náboženství.

Obecně dnes můžeme říct, že historie vesmíru se dělí na 3 časové úseky:

- Velký třesk, na jehož konci došlo k rekombinaci a z plazmy stala atomární hmota. Po skončení velkého třesku se vesmír skládal především z vodíku, trochy helia a reliktního záření.
- Doba temna, která trvala zhruba 100 milionů let, kdy se vodík a helium začínají shlukovat, ale ve vesmíru neexistují žádné zdroje světla. Doba temna končí zažehnutím prvních hvězd.
- Éra látky, která trvá dodnes – postupně vznikají galaxie, hvězdy se rodí a umírají, přičemž se zaplňuje periodická tabulka prvků.

Současná observační astronomie nevidí za hranici velkého třesku. Do velkého třesku by mohla nahlédnout pozorování gravitačních vln nebo detekce tzv. reliktních neutrin [53], nicméně v době psaní této diplomové práce nebyly gravitační vlny z velkého třesku ani reliktní neutrina zachyceny. Velký třesk je tak doménou teoretické fyziky a experimentů za vysokých energií, při nichž se simuluje prostředí, v němž mohl být vesmír v průběhu velkého třesku.

Pokud bychom měli shrnout, co víme o velkém třesku do jedné věty, zněla by zhruba takto: Velký třesk byl procesem, během kterého za vysokých teplot z elementárních částic vznikla atomární hmota, z níž se dnes skládá vesmír. Chceme-li tuto genezi blíže objasnit, je třeba zavést klíčovou terminologii.

Co jsou to elementární částice?

Poněkud příkrá definice zní, že elementární částice jsou částice, jejichž vnitřní struktura není známá. Nejuznávanější teorie, která popisuje elementární částice, se nazývá Standardní model. Podle Standardního modelu jsou elementární částice rozděleny na:

- Částice hmoty, tzv. fermiony. Ty se dále dělí na:
 - Kvarky, z nichž se skládají i nukleony (proton a neutron)
 - Leptony, mezi něž se řadí i elektron
- Částice interakcí, tzv. bosony, z nichž nejznámější jsou gluony a fotony

Vidíme tedy, že elektron je elementární částice.

Skládáním kvarků nebo obecněji fermionů dostaneme baryony, mezi které se řadí i nukleony. Nadřazenou kategorií baryonům jsou hadrony.

System je poměrně složitý a částic je mnoho. Pro nás je stěžejní, že elektron je elementární částice, zatímco proton a neutron jsou složené částice - baryony, resp. hadrony.

Přesuňme se k interakcím, které zprostředkovávají bosony. Do interakcí vstupuje celá řada elementární částic. Interakce v současné době rozlišujeme čtyři s následujícími parametry:

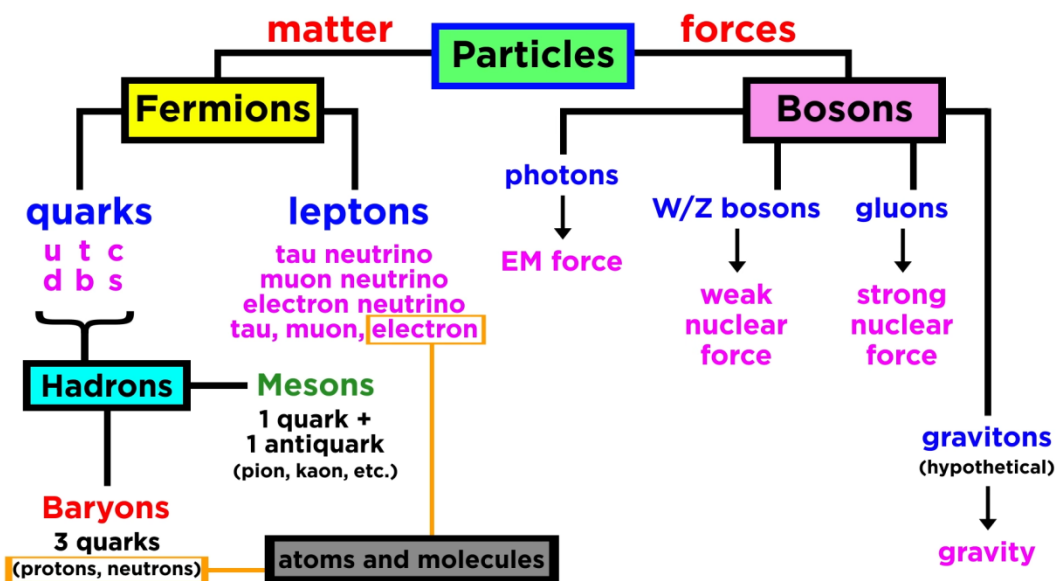
- Gravitační interakce – má nekonečný dosah ale malou relativní velikost ve srovnání s ostatními.
- Elektromagnetická interakce – má také nekonečný dosah ale je o 36 řádů silnější než gravitační.
- Slabá jaderná interakce, která má dosah jen na úrovni atomového jádra a je slabší než elektromagnetická, projevuje se mj. beta rozpadem.
- Silná jaderná interakce, zprostředkovaná gluony, je nejsilnější a drží atomová jádra pohromadě, dosah má jen na úrovni atomového jádra.

Silná interakce má o několik řádů větší velikost než elektromagnetická. Proto jsou atomová jádra mnohem menší než elektronové obaly a proto silná interakce přetlačí elektromagnetické odpuzování nukleonů.

Na druhou stranu, klíčový je i malý dosah jaderných sil. Kdyby na elektrony v atomech a molekulách působily jaderné síly, neexistovala by ani chemie, ani krystalografie nebo biologie, ale jen jaderná fyzika [376].

Nicméně i silná interakce má na úrovni atomových jader své limity a ne všechna jádra jsou stabilní. Jádra mohou být nestabilní kvůli své konfiguraci (rozpad izotopů), mohou být nestabilní za vysokých teplot (lithium, beryllium a bor nevznikají fúzí ve hvězdách) a mohou být nestabilní pro svoji velikost (transurany).

Výše popsaný Standardní model je k vidění na Obrázku 3.130 spolu s dalšími částicemi, které jsme nejmenovali:



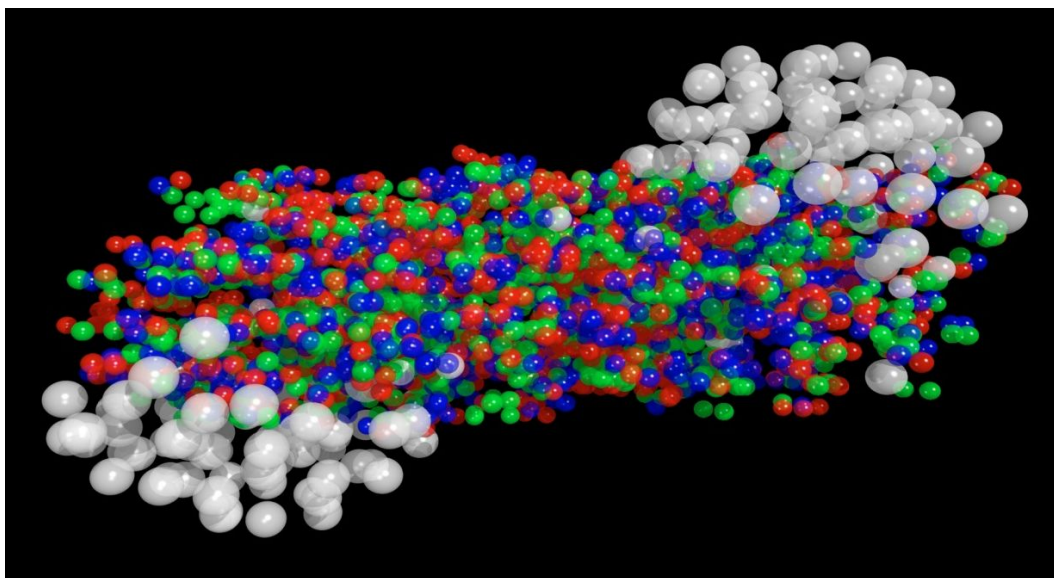
Obrázek 3.130: Standardní model částicové fyziky. Převzato z knihy Pan Tompkin v říši divů. Převzato z [377].

Průběh velkého třesku

Velký třesk byl obdobím, kdy se za stálého chladnutí formoval vesmír. Podíváme-li se pohledem částicové fyziky na velký třesk pozpátku, vidíme, že rostoucí teplota vede k rozpadu atomární hmoty na elementární částice a že interakce se začínají slučovat.

Následující popis průběhu bude velice zjednodušující, mimo jiné protože nebere v potaz anti-hmotu, o které nemáme prostor se zde bavit. Z hlediska našeho poznání můžeme rozdělit časovou osu velkého třesku na dva úseky: Od počátku vesmíru do stavu ve stáří 10^{-13} sekundy a vývoj od stavu v 10^{-13} sekundy staří vesmíru.

Moment 10^{-13} sekundy je milník. V tuto chvíli byl vesmír ve stavu, který umíme experimentálně ověřit vysokoenergetickými srážkami těžkých ionizovaných atomů v největších urychlovačích částic jako je ten v CERNu [53]. Na Obrázku 3.131 můžeme vidět simulaci srážky dvou těžkých jader, kdy na 10^{-22} sekundy vzniklo kvark-gluonové plazma – stavební hmota hadronů.



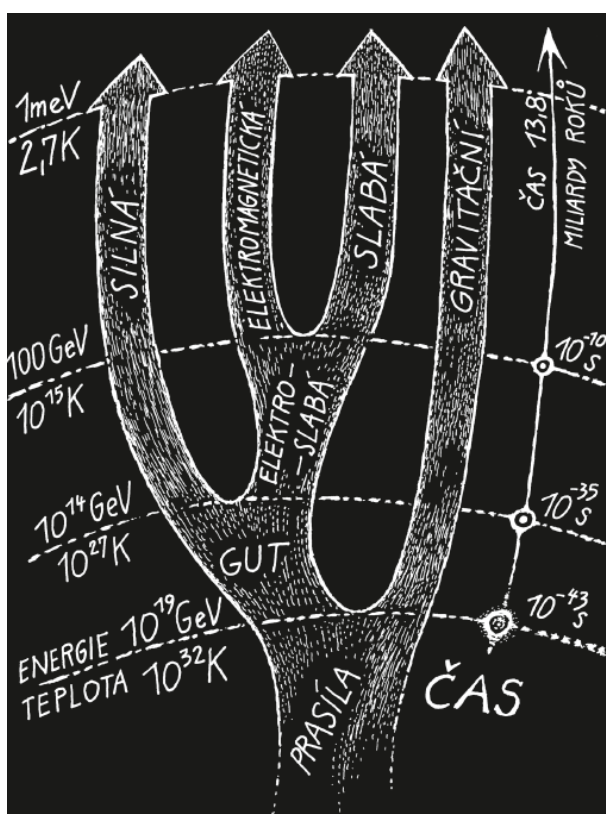
Obrázek 3.131: Simulace srážky dvou těžkých jader, kdy na 10^{-22} sekundy vzniklo kvark-gluonové plazma. Převzato z [378].

Co následovalo po 10^{-13} sekundy?

- V tuto chvíli byl vesmír tvořen kvark-gluonovým plazmatem a elektromagnetická interakce byla sjednocena se slabou interakcí. Jedná se o tzv. kvarkovou epochu.
- V čase 10^{-10} sekundy se oddělila slabá a elektromagnetická interakce a v čase 10^{-6} sekundy se z kvark-gluonového plazmatu začaly formovat se hadrony. Jedná se o tzv. hadronovou epochu.
- V následujících sekundách probíhala tzv. leptonová epocha, v níž se formují leptony. Na konci leptonové epochy byly zformovány hadrony a leptony.
- V následujících minutách vznikla první atomová jádra. Teplota byla ale příliš vysoká, aby vznikly atomy.
- Další stovky tisíc let následně trvalo, než vesmír vychladl dost na to, aby atomová jádra zachytila a udržela elektrony.

Co bylo před 10^{-13} sekundy?

To se snaží vizualizovat Obrázek 3.132. Objektivně můžeme říci, že čím hlouběji půjdeme po časové ose, tím více se z vědeckého přístupu posouváme ke spekulacím.



Obrázek 3.132: Vizualizace časové osy velkého třesku. Převzato z [53].

V 60. letech Steven Weinberg (1933 – 2021) se svými kolegy formuloval teorii sjednocení elektromagnetické a slabé interakce, kterou se podařilo z části experimentálně ověřit v CERNu [53]. Odhaduje se, že elektroslabá epocha, kdy se hmota nacházela v podobě kvarkogluonového plazmatu započala krátkým obdobím inflace, kdy vesmír v krátkém čase expandoval rozměrově o mnoho řádů.

Inflaci mohlo předcházet období sjednocené silné, slabé a elektromagnetické interakce v éře velkého sjednocení (GUT, dle Grand Unification Theory). Zde už jsme v rovině silně hypotetické. Energie velkého sjednocení je odhadována na 10^{14} GeV, což je o 10 řádů více než je maximální dosažitelná energie na urychlovači LHC v CERNu [379].

Hlouběji na časové ose je už jen tzv. Planckova epocha, doba sjednocení všech interakcí. O ní s jistotou nevíme vůbec nic.

Analýza měření sondy Planck v prvním přiblížení ukazuje, že vesmír by měl být zhruba 3x větší než pozorovatelný vesmír. Vesmír jako celek si lze představit jako prostor omezeného objemu, avšak bez hranic. Něco takového neumíme vizualizovat, nicméně analogií je povrch koule, která má konečnou plochu, přestože nemá hranice [219].

Jak do Teorie velkého třesku zapadá temná hmota a temná energie, nevíme. O čem ale máme poměrně velkou představu, je velikost vesmíru a osud vesmíru. Obecně přijímanou hypotézou je tzv. studená smrt vesmíru, který bude pomalu směřovat k termodynamické rovnováze. Dávno po konci naší Sluneční soustavy splyne místní skupina galaxií do jedné. Když bude vesmíru

zhruba 10^{14} let, přestanou vznikat hvězdy, po čase vyhasnou poslední hvězdy a nakonec i černé díry vyzáří veškerou svoji hmotu zhruba za 10^{100} let. Nastane termodynamická rovnováha, kdy se teplota vesmíru ustálí na velmi nízké avšak nenulové teplotě [53].

Shrnutí

Mnoho toho bylo zmíněno v této hodině a nezanedbatelná část se točila kolem těžko ověřitelných až neověřitelných teorií. Nalézt z didaktického hlediska tu správnou rovnováhu mezi popisem současných vědeckých představ o velkém třesku a srozumitelností výkladu nemusí být úplně snadné. Na druhou stranu je to téma velice atraktivní a neměli bychom ho úplně odbýt se slovy, že na počátku byl vesmír horký a z této přehřáté „zárodečné polévky“ se zrodil dnešní vesmír.

Poslední dvě hodiny jsou věnovány astronomické technice. Proto se tato chvíle jeví jako příhodný moment pro poslední testování žáků, které by mělo spočívat ve vědomostních otázkách, které mohou být doplněny jednoduchými výpočty s využitím Pogsonovy rovnice.

59. Pozorovací technika

Téma: Metody k pozorování astronomických jevů

Cíl: Seznámit žáky s technikou stojící za pozemskými pozorováními

Přístup k hodině

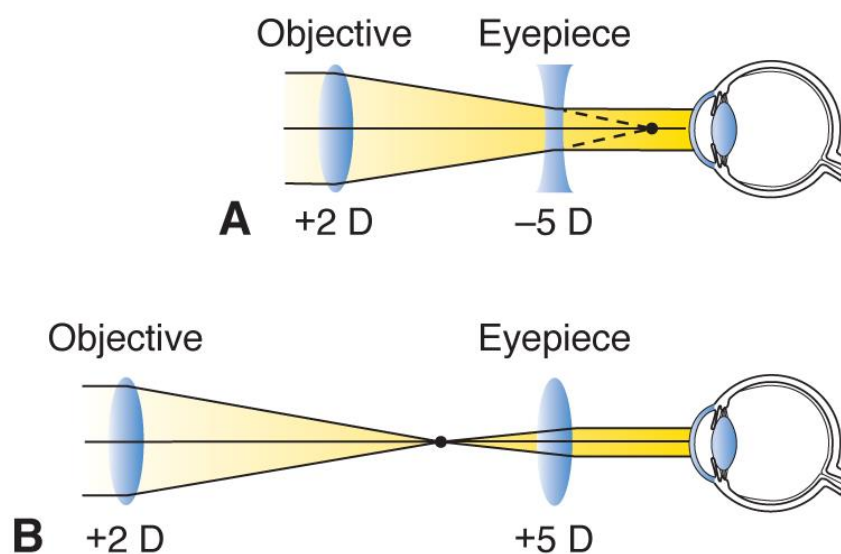
Poslední dvě hodiny zaměříme na astronomickou techniku a budoucnost astronomického výzkumu. První hodina bude zaměřena na dalekohledy, a to od těch nejstarších až po ty současné. Vyjdeme z toho, že žáci mají základní povědomí o optických přístrojích z předchozího studia, a proto se můžeme na téma podívat více z technického pohledu, než že bychom se zabývali geometrickou optikou.

Hodina je rozdělena na dvě části. První část se zaměřuje na obecné principy a na nejstarší typy dalekohledů, tedy na témata, která jsou standardně probírána ve 3. ročníku klasické fyziky, zatímco druhá polovina se zaměřuje na moderní pozorovací techniku.

Refraktorové dalekohledy

Nejstarší dalekohledy, které vznikaly od počátku 17. století, byly refraktorové dalekohledy. V nejjednodušším provedení se jedná se o dalekohledy složené ze dvou čoček - objektivu a okuláru. Nejstarší refraktorové dalekohledy existují dvojího typu:

- Galileův dalekohled, který využívá jedné spojné a jedné rozptylné čočky, Obrázek 3.133 nahoře.
- Keplerův dalekohled, který využívá dvou spojných čoček, Obrázek 3.133 dole.



Obrázek 3.133: Srovnání Keplerova a Galileova dalekohledu. Převzato z [380].

Výhodou Galileova dalekohledu je, že nepřevrací obraz, proto se tato koncepce používá hojně pro neastronomické aplikace. Vedle toho Keplerův dalekohled se spojnými čočkami převrací obraz, navíc je při stejném požadovaném zvětšení rozměrnější. Na druhou stranu Keplerův dalekohled lze snadno adaptovat do podoby triedru – binokuláru, který použitím dvou optických hranolů eliminuje převrácení obrazu, viz Obrázek 3.134 vlevo. Výhodou triedru je, že se pro pozorování hodí více, než tzv. divadelní kukátko, kdy jde de facto o dva malé galileovské dalekohledy vedle sebe, viz Obrázek 3.134 vpravo.



Obrázek 3.134: Konceptní srovnání triedru a divadelního kukátka. Převzato z [381] a [382].

Výhodou refraktorových dalekohledů je především to, že jsou konstrukčně jednoduché a proto i levné. Nevýhody refraktorových dalekohledů jsou především dvě. První nevýhodou je barevná vada čoček. Tu je dnes už možné korigovat použitím různých optických skel a optimalizací optických prvků. Těmto dalekohledům se říká achromáty nebo apochromáty. Druhá nevýhoda už je více omezující a souvisí s výrobou velkých dalekohledů. S rostoucí velikostí dalekohledu roste velikost a hmotnost optických prvků, kvalitní optiku je čím dál těžší vyrobit a sama optika se začíná deformovat pod vlastní vahou.

Největší refraktorový dalekohled pochází z roku 1897 a je na Yerkesově observatoři ve Wisconsinu, na níž začínal svoji kariéru Edwin Hubble. Ohnisková vzdálenost objektivu je téměř 20 metrů, hmotnost 225 kilogramů a objektiv má průměr více než metr [383], viz Obrázek 3.135.



Obrázek 3.135: Největší refraktorový dalekohled na Yerkesově observatoři ve Wisconsinu, USA. Převzato z [384].

Dnes se refraktorové dalekohledy v astronomii používají především pro amatérská pozorování a využívají se spíše mimo astronomii. Abychom zkonstruovali velké dalekohledy, s cílem maximalizovat zvětšení dalekohledu, musíme změnit koncepci a nahradit objektiv v podobě čočky zrcadlem.

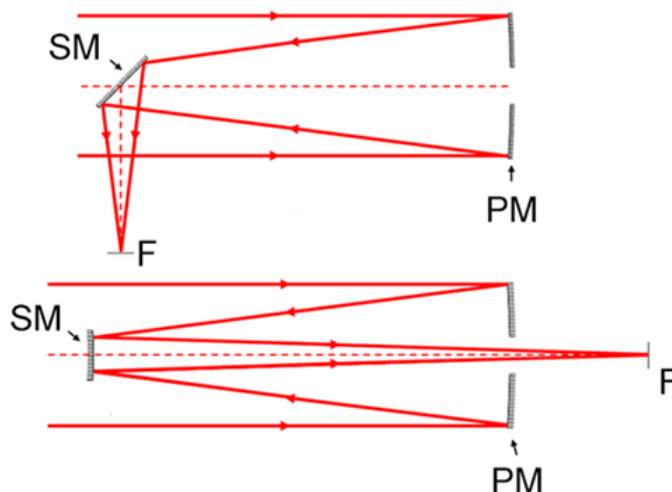
Reflektorové dalekohledy

Je-li využito jako objektiv zakřivené zrcadlo, eliminují se tím oba zásadní problémy refraktorových dalekohledů – zrcadlo nemá chromatickou vadu a jeho precizní výroba a využití je snazší ve velkých rozměrech. Reflexní dalekohledy se různí podle toho, kolik zakřivených zrcadel využívají. Nejstarší reflektorové dalekohledy byly dvojího typu:

- Newtonův dalekohled s jedním dutým a jedním planárním zrcadlem
- Cassagrainův dalekohled s dvěma zakřivenými zrcadly

Newtonův dalekohled (Obrázek 3.136 nahoře) je konstrukčně i opticky nejjednodušším reflektorovým dalekohledem a dnes je využíván hlavně u amatérských dalekohledů. Newtonův dalekohled převrací obraz stranově i pólově, což lze, podobně jako u triedru, eliminovat použitím optických hranolů.

Cassagrainův dalekohled (Obrázek 3.136 dole) je složitější a využívá, v nejjednodušší konfiguraci, jedno duté a jedno vypouklé zrcadlo. Optimalizací optických prvků a přidáváním dalších lze korigovat vady, a proto se s různými modifikacemi používá u všech velkých teleskopů dodnes, a to ať už pro pozorování ze Země, tak i pro pozorování z vesmíru.



Obrázek 3.136: Srovnání Newtonova dalekohledu a Cassagrainova dalekohledu. Převzato z [385].

Vývoj dalekohledů od začátku 20. století

Edwin Hubble udělal svoje nejzásadnější objevy na observatoři Mount Wilson v Kalifornii, na níž měl k dispozici 2,5 metrový reflektorový Hookerův dalekohled, který byl největším dalekohledem své doby [386]. V roce 1928 jej svojí velikostí překonal Haleův dalekohled na Mount Palomar, taktéž v Kalifornii, s průměrem 5 metrů. Tyto a ještě větší dalekohledy jsou tvořeny jedním primárním zrcadlem, které se pokovuje stříbrem, zlatem nebo hliníkem, ve snaze dosáhnout co nejlepší odrazivosti pro vlnové délky, pro které je dalekohled určen.

Dalekohledy se zrcadlem o velikosti řádově metrů už jsou konstrukčně poměrně složitá zařízení, kolem nichž je potřeba postavit celou budovu. Dalekohledy této velikosti jsou precizně vyvážené a mají celou řadu podpůrných systémů, které zajistí nejlepší možnou kvalitu pozorování v závislosti na okolních podmínkách. Na Obrázku 3.137 můžeme vidět Haleův dalekohled, který byl až do roku 1992 největším dalekohledem na světě a má citlivost až do 22 mag.



Obrázek 3.137: Haleův dalekohled na Mount Palomar, USA. Převzato z [387].

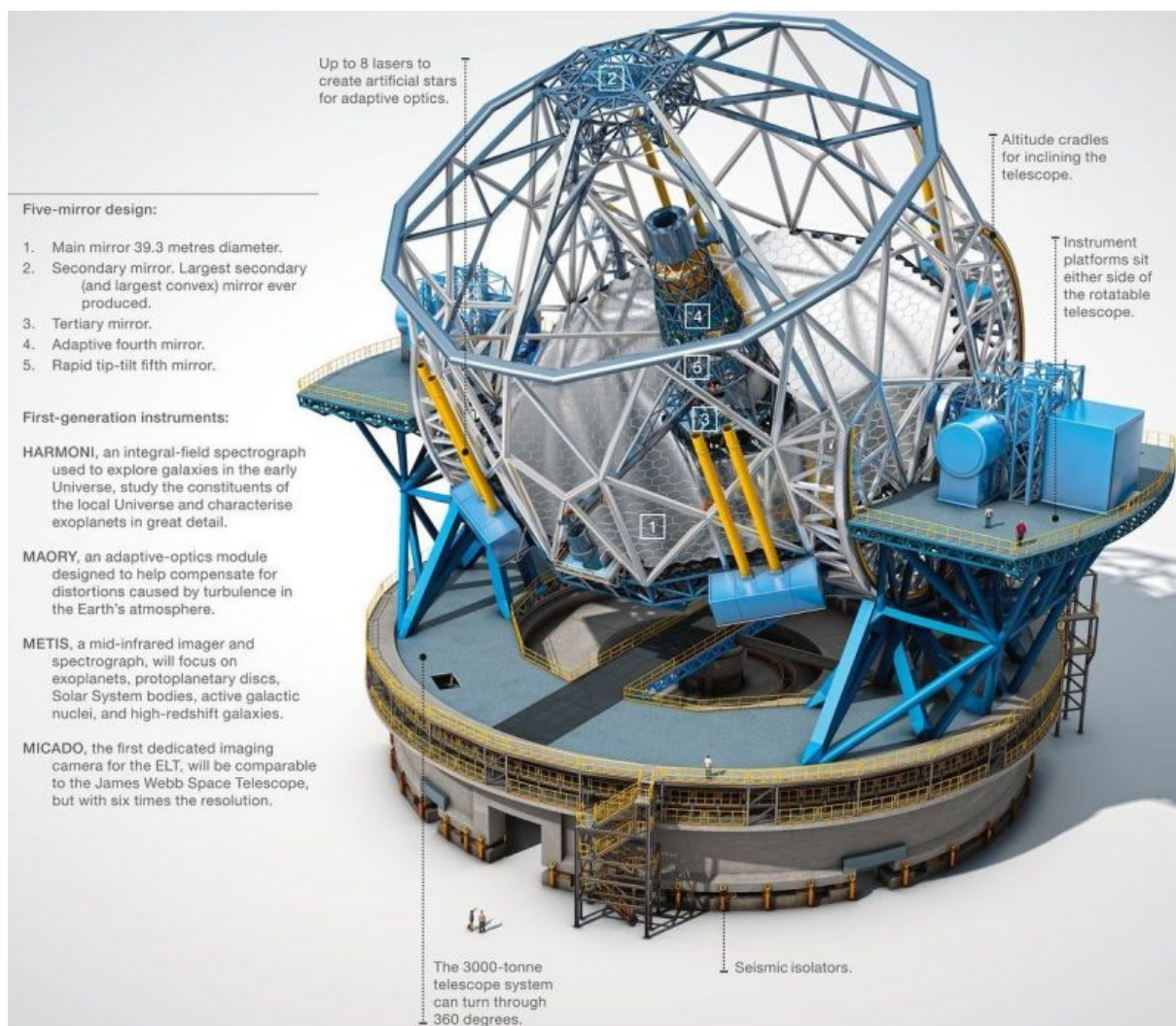
Chceme-li se posunout ještě k větším dalekohledům, dříve nebo později je třeba zvolit trochu jiný přístup, protože precizní zrcadla velikosti desítek metrů není snadné vyrobit ani transportovat. Řešením jsou zrcadla složená z hexagonálních segmentů. Tohoto přístupu využívají dva největší pozemské dalekohledy současnosti, Keckův dalekohled na Mauna Kea na Havaji s průměrem primárního zrcadla 10 metrů a Grand Telescope Canarias (GTC) na ostrově La Palma s průměrem primárního zrcadla 10,4 metrů (Obrázek 3.138).



Obrázek 3.138: Dalekohled Grand Telescope Canarias, Španělsko. Převzato z [388].

Všechny zmíněné dalekohledy spojuje to, že se nacházejí ve vysoké nadmořské výšce a ve velice suchém klimatu. Pro největší optické teleskopy je dnes vyvinuta pokročilá adaptivní optika, díky níž lze dosáhnout na nejmodernějších observatořích kvality pozorování srovnatelné s pozorováním ze zemské orbity. V době psaní této diplomové práce jsou v realizaci 3 velké teleskopy (jeden na Mauna Kea a další dva v Chile), které svojí velikostí předčí všechny teleskopy, které jsou v současnosti v provozu. Největším z realizovaných teleskopů je Extremely Large Telescope (ELT),

viz Obrázek 3.139, který by měl mít primární zrcadlo velikosti 39,3 metrů, složené ze 796 hexagonálních segmentů. Do provozu by měl být uveden v druhé polovině 20. let 21. století.



Obrázek 3.139: Extremely Large Telescope, Chile. Převzato z [389].

Nabízí se otázka: Proč potřebujeme pro pozorování větší a větší dalekohledy?

To souvisí difrakcí světla, kterou jsme zmiňovali už v 46. hodině. Lidské oko se vstupní aperturou o velikosti řádově milimetrů má úhlové rozlišení řádově desítky úhlových sekund [390]. Abychom rozlišení zlepšili, musíme použít optiku, protože jedinou další alternativou by bylo zvětšit oko. Teoretické rozlišení optického systému určuje Abbeho difrakční limit:

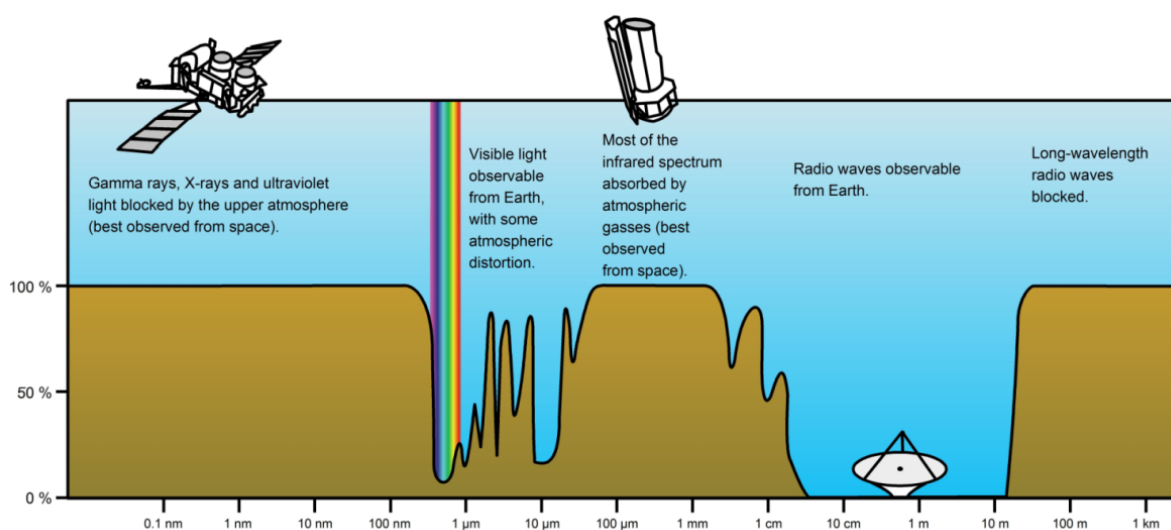
$$d = \frac{\lambda}{2n \sin \theta} \quad (3.31)$$

kde d je průměr apertury, λ je detekovaná vlnová délka, n je index lomu optiky a θ je úhlové rozlišení systému.

Dosadíme-li do vztahu parametry ELT, pro vlnové délky viditelného světla dostaneme rozlišitelnost řádově setin úhlových sekund. I tento limit lze ale částečně obejít. Budeme-li pozorovat jeden objekt více dalekohledy, zvýšíme efektivní rozměr dalekohledu. Toho se využívá na observatořích, kde je k dispozici více stejných teleskopů (například Keckovy teleskopy na Hawai, viz Obrázek 3.142), případně při pozorování z různých míst na Zemi, kdy lze dosáhnout efektivního rozměru srovnatelného z velikostí planety (to byl případ pozorování černé díry, viz 56. hodina).

Observační astronomie ale není jen o optickém spektru a zmíněné teleskopy nejsou zdaleka těmi největšími. Ve 30. letech 20. století americký radioinženýr českého původu Karl Jansky (1905 – 1950), ve snaze optimalizovat radiový přenos, detekoval radiový šum neznámého původu. Maximum neznámého šumu se opakovalo s periodou 23 hodin 56 minut, což odpovídalo siderickému dni. Jansky ztotožnil maximum radiového šumu se středem naší galaxie a položil tak základy novému oboru radioastronomie [19].

Radiové vlny jsou další významnou složkou elektromagnetického spektra, pronikající zemskou atmosférou. Na Obrázku 3.140 můžeme vidět schematicky graf závislosti absorpce atmosféry na vlnové délce. Vidíme, že zemská atmosféra nepropouští souvisle infračervené záření, mikrovlny a dále pak, naštěstí, i vysokoenergetické záření.



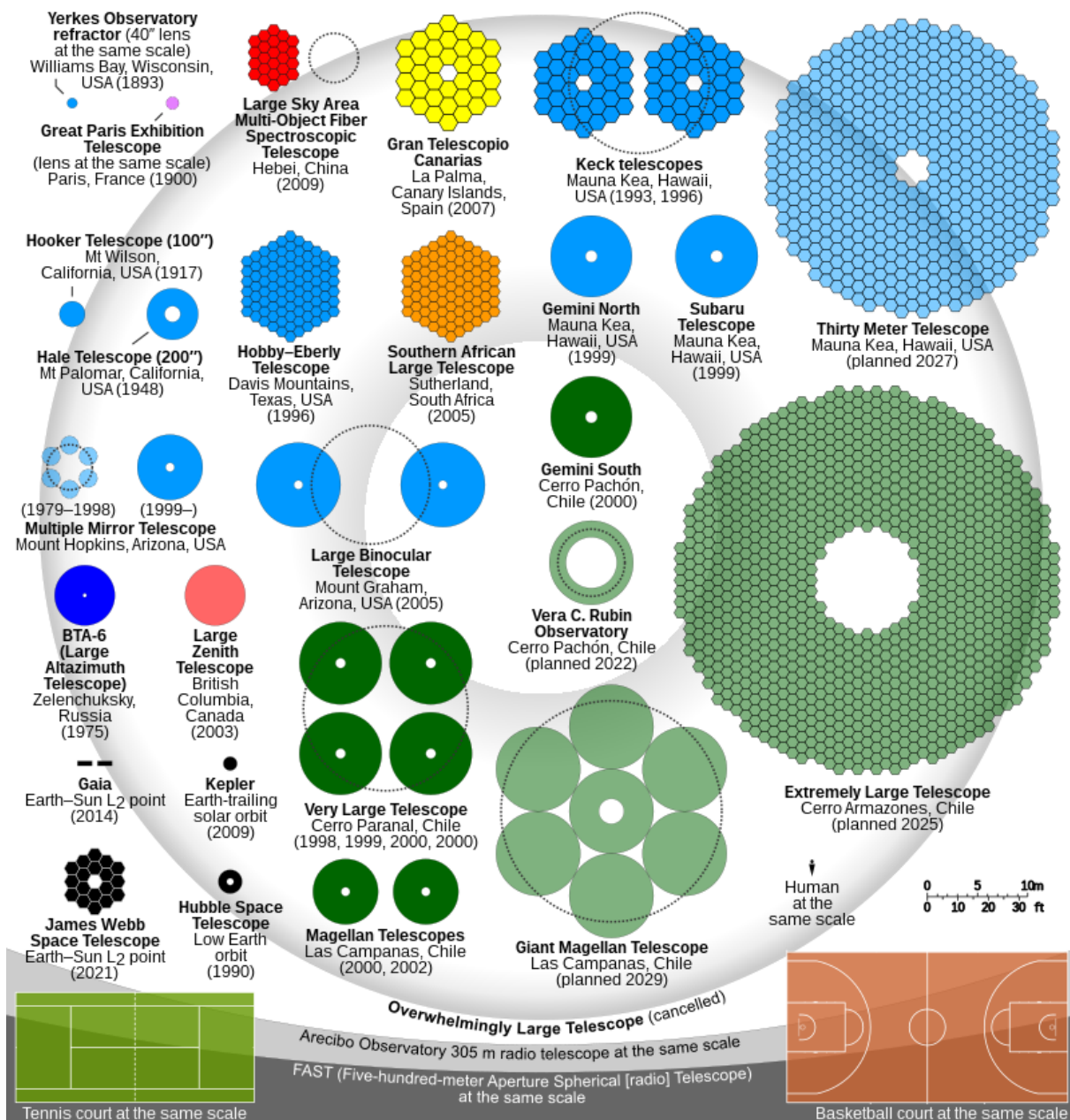
Obrázek 3.140: Schematický graf závislosti absorpce atmosféry na vlnové délce. Převzato z [391].

Radioastronomie je po technické stránce dosti rozdílnou disciplínou. Ve 45. hodině jsme již zmiňovali observatoř ALMA vysoko v chilských horách, která je moderní observatoří pracující na principu simultánního měření stejné oblasti více teleskopy. Alternativním přístupem je budování obrovských teleskopů s průměrem odrazné plochy až stovky metrů. Příkladem takové observatoře bylo do roku 2020 portorické Arecibo s průměrem 305 metrů, viz Obrázek 3.141. Arecibo dnes už není v provozu. Bylo odstaveno poté, co bylo zdevastováno v roce 2017 hurikánem Maria.



Obrázek 3.141: Radioteleskop Arecibo na ostrově Portoriko před jeho zničením hurikánem Maria v roce 2017. Převzato z [392].

Na Obrázku 3.142 můžeme vidět srovnání velikosti největších současných a plánovaných teleskopů. Největší teleskop, který je v době psaní této diplomové práce v provozu, je GTC na ostrově La Palma, který je na obrázku zvýrazněn žlutou barvou.



Obrázek 3.142: Velikostní srovnání optiky minulých, současných a plánovaných teleskopů. Převzato z [393].

Shrnutí

K hodině zaměřené na pozorovací techniku lze přistoupit různě. Může jít o přehledovou hodinu, kdy nastíníme vývoj dalekohledů, od nejstarších ručních dalekohledů, po ty největší současné, kolem nichž se staví celé budovy. Alternativně se můžeme více zaměřit na fyzikální podstatu pozorování, resp. na geometrickou optiku, která je jinak standardně probírána ve 3. ročníku. Žáci by si měli z hodiny odnést především představu o tom, jaká zařízení se skrývají za dnešní světelnou observační astronomií. Pozorovací technice se budeme částečně věnovat i v další hodině, kdy se podíváme blíže na pozorování z kosmu.

60. Současnost a budoucnost astronomického výzkumu

Téma: Teoretický, experimentální a observační výzkum

Cíl: Nastínit žákům, na co se zaměřuje současný astronomický výzkum

Přístup k hodině

V poslední hodině plánu se zaměříme na pozorování z kosmu, na gravitační vlny a obecně na současnost a budoucnost astronomického výzkumu. Přístup k hodině je trochu zrádný, protože zatímco většina předchozích hodin stála především na objektivních nebo alespoň ověřených faktech, zde se vydáváme více směrem k plánům a spekulacím. Nejprve se zaměříme na Hubblův vesmírný dalekohled, který bude určitým přemostěním s předchozí hodinou, následující témata pak budou popisem současného stavu astronomického výzkumu s dalším výhledem. To vše poplatné situaci na jaře 2022.

Soudobý astronomický výzkum

Astronomický výzkum můžeme pro naše účely rozdělit na 3 kategorie:

- Observační astronomie, která obnáší pozemská pozorování, pozorování ze zemské orbity a pozorování sond vyslaných do specifických pozorovacích bodů.
- Experimentální výzkum, který dnes probíhá především na urychlovačích částic, v nichž můžeme díky vysokoenergetickým srážkám simulovat prostředí raného vesmíru.
- Teoretický výzkum, který se snaží objasnit největší záhady astrofyziky a kosmologie. Teoretický výzkum se dnes z velké části soustředí na propojení těžko propojitelných fyzikálních teorií spojených s kvantovým světem a obecnou teorií relativity.

My se v této hodině zaměříme především na observační astronomii. K experimentálnímu a teoretickému výzkumu se dostaneme až v samém závěru.

Hubblův vesmírný dalekohled

Největším dalekohledem na LEO je Hubblův vesmírný dalekohled (HST), který byl na orbitu ve výšce 600 kilometrů vyneseno v roce 1990 raketoplánem Atlantis. HST je dalekohledem s primárním zrcadlem z jednoho segmentu o průměru 2,4 metrů. Díky programu Space Shuttle mohl být dalekohled opakovaně servisován [394], čímž se výrazně modifikoval a prodloužila se jeho životnost. Schéma dalekohledu můžeme vidět na Obrázku 3.143.

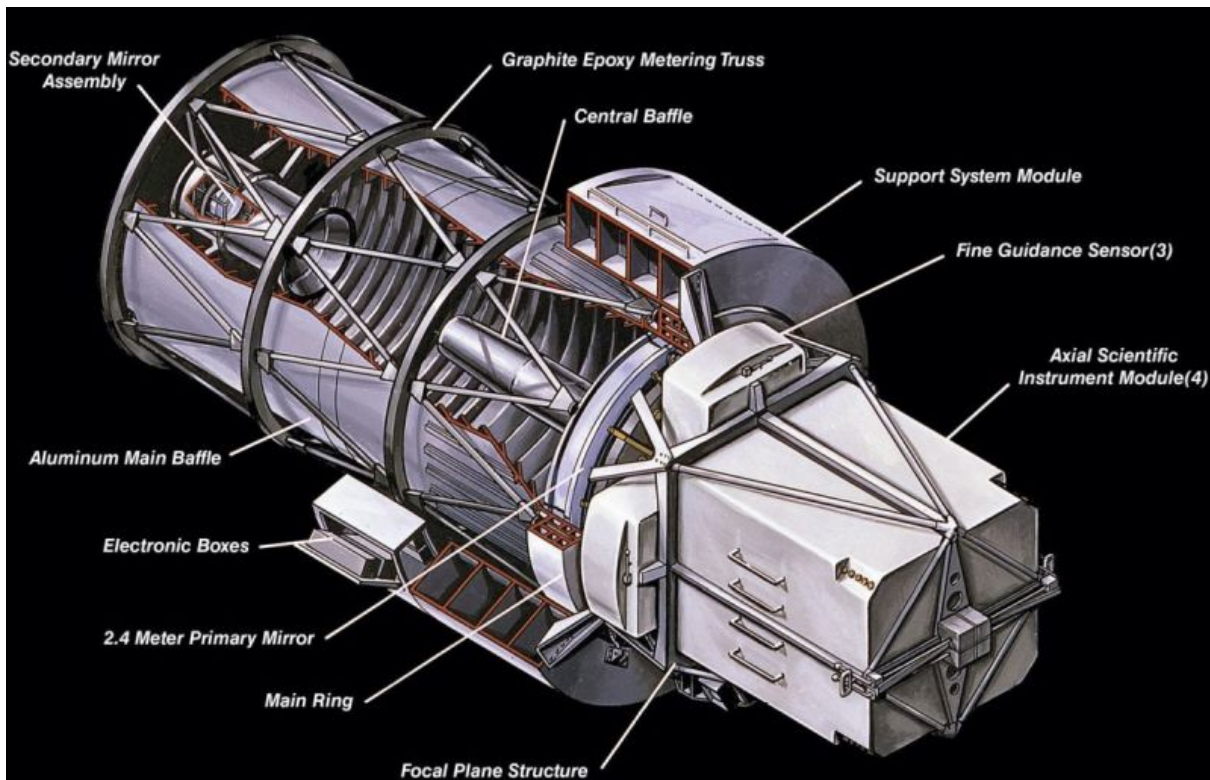
Detekční rozsah HST je ve vlnových délkách 100 až 2500 nanometrů [396]. Z důvodů jeho zaměření na viditelné spektrum tak jde o první a poslední dalekohled svého druhu, neb pozemská pozorování, s využitím adaptivní optiky kompenzující atmosférické vlivy, dnes dokáží dosáhnout obdobné kvality. Proto se jeho nástupce, dalekohled Jamese Webba, zaměřuje na infračervené spektrum, které zemská atmosféra pohlcuje.

Proč viditelné a infračervené spektrum?

To dobře ilustruje Obrázek 3.144, na němž je tentýž snímek Orlí mlhoviny ve viditelném a v infračerveném spektru. Zatímco ve viditelném spektru jde o známý snímek planetární mlhoviny, stejný jako v 51. hodině, v infračerveném spektru se odhaluje, co nemůžeme ve viditelném spektru vidět z důvodu rozptylu na prachoplynových mračnách.

HST za svých více než 30 let provozu pomohl objasnit celou řadu teorií a pomohl vzniku nových: Měření cefeid pomohlo zpřesnit škálování vzdáleností, HST pomohl potvrdit teorii rozpínání vesmíru nebo přispěl k dokazování přítomnosti černých děr. Mimo to HST byl použit ke studiu Sluneční soustavy, viz 39. hodina.

HST se také zaměřil na studium nejvzdálenějších pozorovatelných hvězd, tzv. Hubblovo hluboké pole. Hubblovo hluboké pole zachytilo v roce 1995 tisíce galaxií na snímku pokrývajícím 2,5 úhlové minuty oblohy. Na pozorování z roku 1995 navázala obdobná pozorování v následujících



Obrázek 3.143: Schéma Hubblova vesmírného dalekohledu. Převzato z [395].



Obrázek 3.144: Orlí mlhovina. Vlevo ve viditelném spektru, vpravo v infračerveném spektru. Převzato z [397].

letech. Na Obrázku 3.145 můžeme vidět Hubblovo ultrahluboké pole – pozorování z přelomu let 2003 a 2004. Výsledný obraz je složeninou osmi set snímků s průměrnou expozicí 21 minut. Můžeme tu vidět raný vesmír plný mladých galaxií všech typů. Výsledný obraz pokrývá

11,5 čtverečních úhlových minut, což je 40 miliardtin plochy hvězdné oblohy. Na snímku můžeme vidět přibližně 10 000 galaxií stáří 400 až 800 milionů let [53][394][398]. Opakování téhož měření prokázalo, že obdobný obraz dostaneme kdekoli na obloze. Současné odhady říkají, že ve vesmíru se nachází přibližně 200 miliard galaxií [399].



Obrázek 3.145: Hubbleovo hluboké pole. Převzato z [397].

Budoucnost HST je v současnosti stále otevřená. Dalekohled už dalece přesluhuje svoji původně plánovanou životnost a s ukončením programu Space Shuttle už jej není možné servisovat. Nejslabším článkem HST jsou v současnosti stabilizační setrvačníky. Jakmile se setrvačníky zastaví, HST ztratí schopnost zaměřovat se na jednotlivé objekty [394].

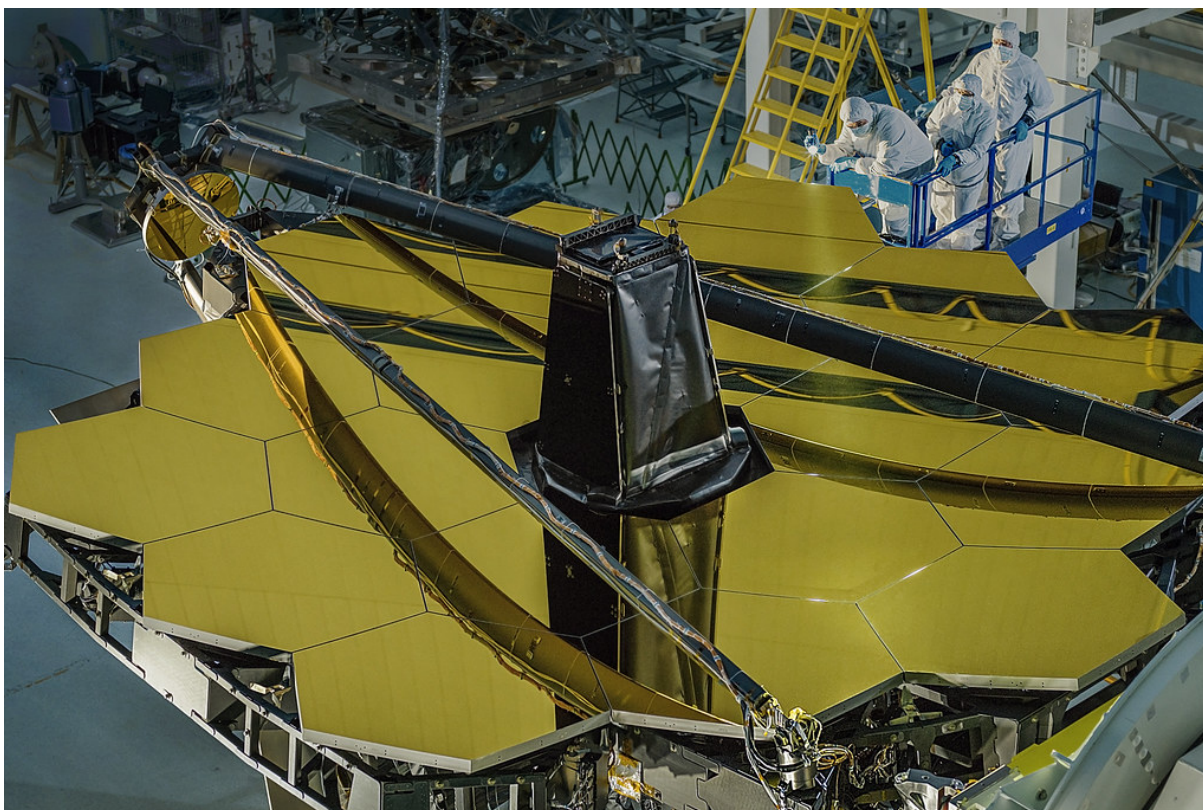
Dalekohled Jamese Webba

Zatímco HST krouží na zemské orbitě a pokud nebude po svém dožití dopraven na Zemi, shoří za mnoho desítek let v atmosféře, dalekohled Jamese Webba (JWST) se vydal v prosinci 2021, podobně jako dříve sonda Planck (viz 47. hodina), do libračního bodu L2, který leží na ose Slunce-Země (viz 41. hodina). Dalekohled byl vynesena evropskou raketou Ariane 5, přičemž transport trval necelý měsíc.

JWST se od HST liší nejen svojí destinací, ale i zaměřením a konstrukcí. HST je kompaktní dalekohled, který byl vynesena na orbitu raketoplánem, vedle toho JWST je složitou konstrukcí, která byla při startu složena do minimálního prostoru [400], viz obrázek 3.146. Primární zrcadlo JWST je složeno z 18 hexagonálních beryliových pozlacených segmentů [401], které dohromady tvoří odraznou plochu o průměru 6,5 metrů, viz obrázek 3.147.



Obrázek 3.146: Mechanismus rozkládání dalekohledu Jamese Webba. Převzato z [402].



Obrázek 3.147: Primární zrcadlo dalekohledu Jamese Webba. Převzato z [401].

I primární zaměření dalekohledu se liší – jeho detekční rozsah je od 600 nm do 28 300 nm. Aby mohl dalekohled pozorovat vzdálený infračervený obor, musí být chlazen na teplotu desítek kelvinů a musí být stíněn tenkou pětivrstvou plachtou [403].

Dalekohled Jamese Webba by se v příštích letech měl zaměřit především na [404]:

- Výzkum cizích planetárních systémů – především na spektroskopické hledání exoplanet ve spolupráci s projektem PLATO [405]. O projektu PLATO něm ještě později.
- Měření objektů vzdáleného vesmíru – studovat vznik a vývoj galaxií, hvězd a planet, resp. navázat na pozorování Hubbleových ultrahlubokých polí.

Po technické stránce je JWST patrně nevyspělejší astronomickou technikou, která je v současnosti v provozu, resp. uváděna do provozu (vědecký program JWST by měl být podle současných plánů zahájen v létě 2022). Za JWST stojí ta nejvyspělejší technika současnosti a technická řešení jsou dokonale adaptována pro účely mise. Příkladem mohou být pozlacená beryliová zrcadla, která jsou lehká a zároveň pevná a teplotně stabilní [401].

Dalekohled Jamese Webba je velice vděčné téma, kterému bude možné věnovat bezesporu celou vyučovací hodinu. V rámci vzdělávacího plánu mu není dopřáno více prostoru, neb v době psaní diplomové práce není prozatím v plném provozu a nelze proto doplnit popis hodiny o vědecké výsledky dalekohledu.

Studium gravitačních vln

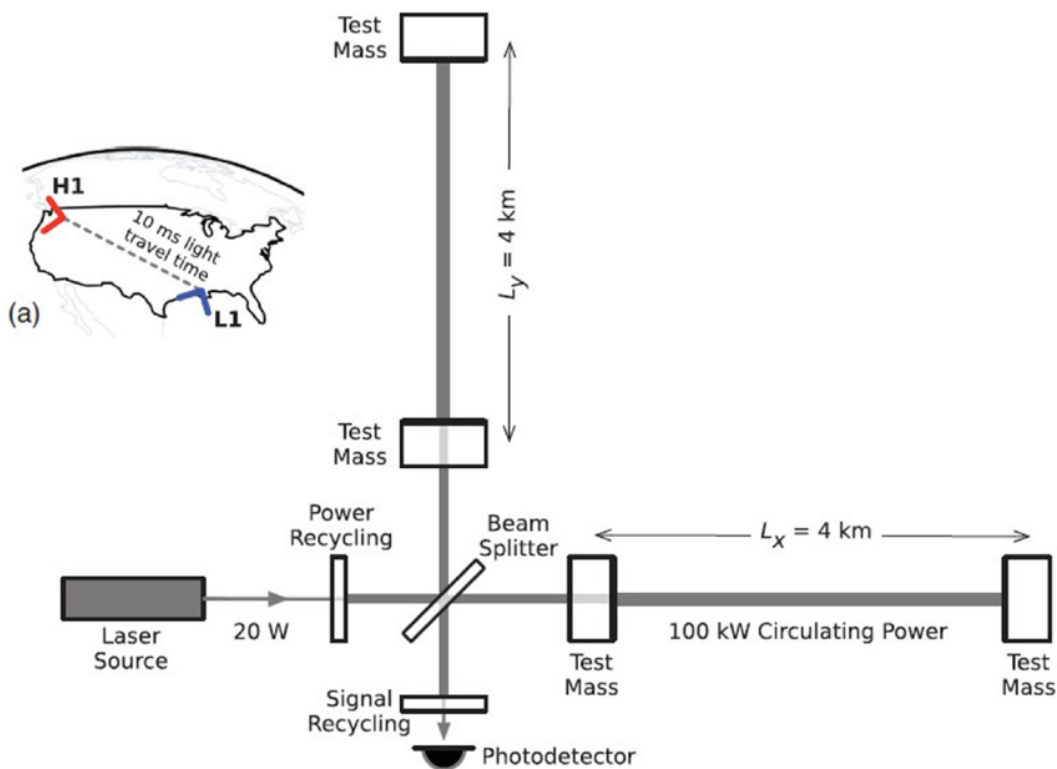
V 57. hodině bylo zmíněno, že jedním z důsledků Obecné teorie relativity je předpověď vzniku gravitačních vln. Gravitační vlny, které umí současná technika detekovat, jsou drobnými záchvěvy prostoročasu, způsobenými pohybem hmotných objektů v binárních systémech. Těmito binárními systémy mohou být dvojice neutronových hvězd, pár neutronová hvězda s černou dírou nebo dvojice černých děr. Doposud byly zachyceny především gravitační vlny způsobené dvojicí černých děr, což napomohlo objevení nového typu černých děr, které nevznikají jako přímý produkt výbuchu supernovy, ale slučováním menších černých děr, viz 54. hodina.

Jak si gravitační vlny představit?

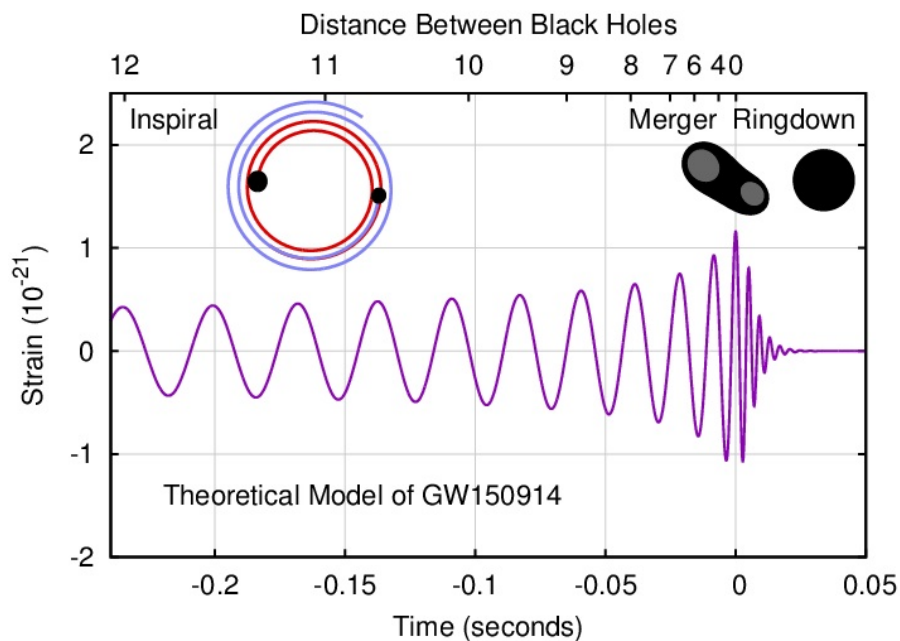
Jde o záchvěvy prostoročasu, jejichž relativní velikost (amplituda) kvůli značné vzdálenosti zdrojů nepřesahuje řád 10^{-18} [406][407] a detektory proto musí dosáhnout srovnatelné citlivosti. Absolutní velikost fluktuace délky ramene detektoru je úměrná této délce, proto je nutné vybudovat interferometry o velikosti alespoň řádově kilometrů, které porovnávají fluktuace prostoru ve dvou na sebe kolmých ramenech, viz Obrázek 3.148 s detektorem LIGO. Jak tyto drobné záchvěvy odlišíme od přirozených otřesů? Klíčem jsou paralelní měření ve dvou různých lokalitách a specifická charakteristika gravitačních vln [407].

Co detektory měří?

Představme si binární systém dvou hmotných neutronových hvězd, dvou černých děr nebo páru neutronová hvězdy a černá díra. Objekty se k sobě přibližují, čímž klesá nepatrně celková kinetická energie systému. V rámci zákona zachování energie je tento rozdíl odnášen v podobě gravitačních vln. Jak se objekty k sobě blíží, zvyšuje se jejich frekvence oběhu kolem společného středu, až se nakonec srazí. Srážka uvolní ohromné množství energie, které se prostorem šíří v podobě gravitačních vln, případně i vysokoenergiového záření (gamma záblesk), to patrně jen za předpokladu, že se v páru vyskytuje neutronová hvězda [408]. Na Obrázku 3.149 můžeme vidět průběh takové kolize na záznamu gravitačních vln z kolize dvou černých děr.



Obrázek 3.148: Geometrie detektoru LIGO. Převzato z [409].



Obrázek 3.149: Záznam gravitačních vln z kolize dvou černých děr. Převzato z [410].

První zdokumentovaná přímá detekce gravitačních vln se udála 14. září 2015. Jednalo se o sloučení dvou černých děr o hmotnosti 36 hmotností Slunce a 29 hmotností Slunce, ve vzdálenosti 410 Mpc. Kolizí vznikla černá díra o hmotnosti 62 hmotností Slunce. Rozdíl hmotnosti, resp. její ekvivalent byl vyzařen jako gravitační vlna v průběhu 0,2 sekundy [411]. Článek popisující výsledky měření byl publikován v lednu 2016. Hned následujícího roku dostali za objev gravitačních vln Kip Thorne (nar. 1940), Reiner Weiss (nar. 1932) a Barry Barish (nar. 1936) Nobelovu cenu.

Téma gravitačních vln je velice pokročilé a dostáváme se s ním k těm nenovějším poznatkům, které má astrofyzika v době psaní této diplomové práce k dispozici. Tímto uzavíráme téma

soudobého astronomického výzkumu a posouváme se směrem k budoucnosti astronomického výzkumu.

Budoucí zaměření astronomického výzkumu

V průběhu léta 2022 by měla být zahájena vědecká mise dalekohledu Jamese Webba, do něhož jsou vkládána velká očekávání. Mimo JWST ve vesmíru pracuje celá řada teleskopů a družic různého zaměření od gama záření (například družice GRBAlpha zmíněná v 53. hodině), přes RTG teleskopy (observatoř Chandra zaměřená na dvojhvězdy, supernovy, pulzary, aktivní jádra galaxií nebo kvasary [412]), až po detektory částic (sonda IBEX, která je součástí programu Explorer [413]).

S dvacátými a třicátými lety 21. století jsou spojeny tři velké projekty, s potenciálně velkým vědeckým přínosem, kterých se účastní i vědci a inženýři z České Republiky:

- Projekt PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of Stars), který je zaměřen na studium exoplanet [414]. Půjde o sondu, která ponese 26 kamer, které budou prostřednictvím měření poklesů jasů hvězd hledat planety v jiných hvězdných systémech. Mise by měla startovat v roce 2026.
- Projekt SLAVIA (Space Laboratory for Advanced Variable Instruments and Applications), který je ryze českou kosmickou misí [415]. Cílem mise je vypuštění družic, která budou mít za úkol prozkoumat materiálové složení meteoroidů vstupujících do zemské atmosféry. V dlouhodobém horizontu se s těmito poznatky otevírá potenciál těžby nerostných surovin z meteoroidů. Start mise je odhadován na konec 20. let 21. století.
- Projekt LISA (Laser Interferometr Space Antenna), zdaleka největší ze zmíněných misí, která spočívá ve vybudování detektoru gravitačních vln s rameny o délce 2,5 milionu kilometrů, v jejímž centru by měla být odrazná krychle ze zlata a platiny. LISA by měla detekovat gravitační vlny o frekvenci až o 6 řádů vyšší než současné pozemské detektory s relativní citlivostí až 10^{-20} [340]. Start mise je nyní plánován na rok 2034.

Nejde ale jen o samostatné mise, ale i o propojování poznatků z různých misí. Vědci si mnohé slibují od tzv. multimessenger astronomy, tedy od pozorování stejných objektů a procesů různými instrumenty. Příkladem by mohlo být pozorování gama záblesků z kolize neutronových hvězd, které by zároveň zachytil detektor gravitačních vln [406][416]. Mimo zmíněných projektů je v plánu celá řada dalších [417].

Z hlediska experimentálního výzkumu jsou limitujícím faktorem velikosti urychlovačů částic. V současné době existují plány na rozšíření urychlovače v CERNu, kdy by mohl vzniknout urychlovač o obvodu až 100 km [418]. Experimenty na větším urychlovači by mohly pomoci lépe pochopit povahu neutrin, elementárních částic atomární hmoty a temné hmoty. Nicméně tyto ideje jsou nyní spíše vizemi, než že by šlo o plány se stanoveným harmonogramem.

Výhodou teoretického výzkumu je, že není vázán těsně na dostupnou techniku. Lze očekávat, že teoretický výzkum se v příštích letech bude zaměřovat na základní kosmologické problémy, jako je snaha porozumět temné hmotě a temné energii, a blíže nahlédnout do mechanismů velkého třesku.

Shrnutí

Poslední, šedesátá, hodina je s přehledem nejrozsáhlejší samostatnou hodinou vzdělávacího plánu. Vracíme se tu k celé řadě témat, která byla v průběhu vzdělávacího plánu otevřena. Nadto je tu nastíněn očekávaný vývoj pro roky budoucí.

Na úrovni této hodiny více než kde jinde platí, že je na individuálním zvážení, která témata do hodiny zařadit, případně je přesunout do navázaných témat v dřívějších hodinách. Je třeba mít na paměti, že žádná jiná hodina nemá tak silný potenciál ztratit aktuálnost, což musí brát učitel na zřetel a doplňovat informace o novém poznání a vývoji pozorovací a experimentální techniky. Na druhou stranu právě svázanost s aktuálním děním dává hodině náboj a otevírá prostor bavit se o tématech, které aktuálně hýbou širší veřejností.

Kapitola 4

Závěr

Na předchozích stranách byl nastíněn návrh volitelného předmětu Astronomie a astrofyzika pro gymnázia adaptovaný pro 2. ročník čtyřletého gymnázia nebo vyššího stupně víceletého gymnázia. Astronomie, astrofyzika a na ně navázaná kosmonautika jsou těsně propojené disciplíny, mezi nimiž neexistují ostré hranice. To nutně vede k tomu, že existuje celá řada způsobů, jak k výuce těchto věd přistoupit, jaká témata akcentovat a jaká naopak upozadit. Přístupem zvoleným v diplomové práci se snažím maximálně udržet kontinuitu a řadit dílčí témata tak, aby na sebe volně navazovala.

Ač je ambicí této práce pojmout volitelný předmět co nejvíce zešíroka a zahrnout všechna klíčová témata, a to co nejlépe v mezích středoškolské fyziky, k mnohým tématům je třeba přistoupit způsobem, který je na hranici mezi středoškolskou a vysokoškolskou fyzikou. Jiná dílčí témata nedostávají prostor z důvodu rozsahu této diplomové práce. Z první poloviny plánu jsou to například polární záře, meteorické roje, zodiakální souhvězdí nebo detailnější přínos soudobé kosmonautiky, především z hlediska pozorování Země. V druhé polovině plánu by mohl někdo postrádat bližší pohled na radioaktivitu, studium exoplanet nebo na UV a RTG dalekohledy a jejich přínos.

Jak je v rámci diplomové práce několikrát zmíněno, jejím cílem není prezentovat přesně definovaný předmět s harmonogramem, kterého by se měl učitel držet. Spíše jde o to nastínit, jak je možné k předmětu přistoupit a sdílet znalosti a postřehy, které mohou být relevantní. V obecné rovině je posláním předmětu především rozvoj klíčových kompetencí, rozšiřování okruhu znalostí a propojování klíčových znalostí do celistvých celků. To se netýká jen předmětu samotného, ale i celkového přístupu k vědeckému poznání.

Na celé řadě příkladů z historie můžeme vidět, jak moc se lidstvo ve svém chápání světa může mýlit. Ptolemaios Aristarchovu ideu Země otáčející se kolem Slunce rozcupoval slovy: „*Země je ve středu vesmíru a nepohybuje se, neboť jinak by za ní vzduchem poletovala zvířata i všechna jednotlivá břemena.*“ Celá řada vědců byla za své poznatky perzekuována – Giordano Bruno byl upálen, Galileo Galilei byl prohlášen kacířem a dílo Mikuláše Koperníka bylo posmrtně zakázáno. A nemusíme se omezovat jen na dávnou minulost.

Albert Michelson (1852 – 1931), vynálezce interferometru a první americký držitel Nobelovy ceny, v roce 1894 prohlásil: „*Všechny nejdůležitější základní zákony a fakta fyzikální vědy již byly objeveny a jsou dnes tak jasně prokázány, že možnost, že budou doplněny v důsledku nových objevů, je nesmírně nepravděpodobná. . . Naše budoucí objevy je třeba hledat na šestém desetinném místě.*“ Trochu z jiného soudku jsou postřehy Freda Hoyla z roku 1958 po návratu z Mezinárodního setkání astronomické unie v Moskvě: „*Představte si můj úžas, když mi při první návštěvě Sovětského svazu ruští vědci se vši vážností tvrdili, že moje ideje by byly v Rusku přijímány snadněji, kdybych byl použil jiná slova. Pojmy jako původ nebo formování hmoty by byly v pořádku, zatímco vznik byl v Sovětském svazu naprosto tabu.*“

Proto mám za to, že posláním předmětu je také vést žáky k pokoře vůči vědeckému poznání, ke kritickému myšlení a oddělování názorů a ideologií od vědeckých fakt. Je třeba si uvědomit, kolik toho dnes nevíme, a připustit si, že naše vnímání vědeckého poznání se může v relativně krátké době zásadně proměnit. V případě astronomie, astrofyziky a věd na ně navázaných to platí více než kde jinde, protože naše poznání se opírá o výzkum, jehož historie je v kosmických měřítcích zanedbatelná.

V neposlední řadě se snažím skrze celou diplomovou práci akcentovat, jak významnou roli České země a dnes Česká republika měly a mají v astronomii a kosmickém výzkumu. V Praze byly formulovány Keplerovy zákony, v Praze také pracoval Albert Einstein na Obecné teorii relativity, později se pak Československo stalo teprve 3. zemí, která vyslala do vesmíru kosmonauta.

Dnes se z Prahy řídí evropský navigační systém Galileo a Češi se podílejí na celé řadě vědeckých misí a kosmických programů, ať už je to výzkum na Mezinárodní vesmírné stanici, stavba družic a nosičů družic, nebo na poli základního výzkumu například při studiu srážek superhmotných těles. Vzdělávání v astronomii tak má potenciál v žácích podpořit i zdravou národní hrdost spojenou s naší bohatou historií a naší významnou rolí v současném dění na poli teoretické i aplikované astronomie.

Seznam použitých zdrojů

- [1] DUHAJSKÝ J., *Didaktika astrofyziky a Úlohy z astrofyziky aneb opravdu stačí cokoliv „progúglovat“?*.
In: <http://www.ceskaskola.cz/2007/03/josef-duhajsky-didaktika-astrofyziky.html> [online].
28. 3. 2007. [cit. 3. 1. 2021]. Dostupné z: www.ceskaskola.cz.
- [2] *Rámcový vzdělávací program pro základní vzdělávání*. In: <http://www.nuv.cz/file/4983> [online]. 2021. [cit. 21. 7. 2021]. Dostupné z: <https://www.nuv.cz>
- [3] *Rámcový vzdělávací program pro gymnázia*. In: <http://www.nuv.cz/file/159> [online]. 2013. [cit. 17. 11. 2020]. Dostupné z: <https://www.nuv.cz>.
- [4] *Rámcový vzdělávací program pro základní vzdělávání*. In: <http://www.nuv.cz/file/41216> [online]. 2017. [cit. 17. 11. 2020]. Dostupné z: <https://www.nuv.cz>.
- [5] POUPOVÁ J., *Výuka o vědě a jejích dějinách: Česko versus Západ*. Časopis: Orbis Scholae, 2018, 12 (1).
- [6] ŠTEFL V., KRTIČKA J., *Didaktika Astrofyziky*. Brno 2003.
- [7] VORONCOV-VELJAMINOV B. A., *Astronomie pro jedenáctý postupný ročník*. Státní pedagogické nakladatelství Praha, 1954, 169 s.
- [8] GRYGAR J., *Lesk a bída školního vzdělávání v astronomii*. Časopis: Školská fyzika [online]. 21/2013. [cit. 17. 11. 2020].
Dostupné z: https://sf.zcu.cz/data/2013/sf2013_06_2.pdf.
- [9] KRÍČEK R., *Astronomie ve škole a mimo školy*. Časopis: Matematika–fyzika–informatika [online]. 25/2016. [cit. 17. 11. 2020].
Dostupné z: http://mfi.upol.cz/files/25/2503/mfi_2503_213_222.pdf.
- [10] PUDIVÍTR P., *Výuka astronomie na středních školách*. Praha: Matematicko-fyzikální fakulty University Karlovy, 2004, 117 s. Vedoucí disertační práce: doc. RNDr. Marek Wolf, CSc.
- [11] *Cansat*. In: <https://www.esa.int/Education/CanSat> [online]. 2021. [cit. 7. 2. 2021].
Dostupné z: <https://www.esa.int>.
- [12] *AstroPi*. In: <https://www.esa.int/Education/AstroPI> [online]. 2021. [cit. 7. 2. 2021].
Dostupné z: <https://www.esa.int>.
- [13] *Labyrinth Space Academy*. In: <https://www.labspaceacademy.com/> [online]. 2021. [cit. 7. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.labspaceacademy.com>.
- [14] PODOLSKÝ J., *Přednášky z moderní fyziky*.
In: <http://utf.mff.cuni.cz/popularizace/PMF/> [online]. 2020. [cit. 28. 12. 2020].
Dostupné z: <http://utf.mff.cuni.cz>.

- [15] VANCE A., *Elon Musk: Tesla, SpaceX a hledání fantastické budoucnosti*. Brno: Jan Melvil Publishing, 2015. Hvězdy (Jan Melvil). ISBN 978-80-87270-73-8.
- [16] *A Dictionary of Physics. (2015)*. Oxford, Great Britain: Oxford University Press, eISBN: 978019178303.
- [17] *Researchers Analyze “Lunar Effect” – Does Crime Increase When the Moon Is Full?*
In: <https://scitechdaily.com/researchers-analyze-lunar-effect-does-crime-increase-when-the-moon-is-full/> [online]. 29. 10. 2019. [cit. 31. 12. 2020].
Dostupné z: <https://scitechdaily.com/>.
- [18] PODOLSKÝ J., *Vesmír - dávná inspirace umění a vědy*.
In: <https://youtu.be/8slywyrOEz0> [online]. 29. 12. 2019. [cit. 31. 12. 2020].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [19] SINGH, S., *Velký třesk: nejdůležitější vědecký objev všech dob a proč o něm musíte vědět*. Praha: Argo, 2007. ISBN 978-80-86569-62-8.
- [20] *National Geographic – Lunar Eclipse 101*. In: <https://youtu.be/VW2xRR751KE> [online]. 30. 1. 2020. [cit. 31. 12. 2020]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [21] HORÁLEK, P., *Nejdelší zatmění Měsíce*. In: <https://youtu.be/uYaAqz1F7mE> [online]. 15. 7. 2018. [cit. 31. 12. 2020]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [22] FARINA D., *History of Astronomy Part 2: Early Measurements of the Earth*.
In: <https://youtu.be/7DITn6GB6SY> [online]. 11. 10. 2018. [cit. 31. 12. 2020].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [23] PODOLSKÝ J., *Astronomie, matka fyziky*. In: <https://youtu.be/Cxu4jiSiX8Y> [online]. 27. 2. 2018. [cit. 25. 12. 2020]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [24] *O času*. In: <https://kalendar.beda.cz/pic/hvezdny-slunecni-den.png> [online]. 2021. [cit. 13. 2. 2021]. Dostupné z: www.kalendar.beda.cz.
- [25] BLÁHOVÁ M., *Historická chronologie*. Praha: Libri, 2001. ISBN 80-7277-024-1.
- [26] AVENI A., *Schody ke hvězdám: astronomie dávných civilizací*. Praha: Dokořán, 2004. Aliter (Argo: Dokořán). ISBN 80-7203-568-1.
- [27] HEATH R., *Similarities between Le Menec and Erdevan Alignments*.
In: <https://sacred.numbersciences.org/tag/carnac/> [online]. 6. 12. 2018. [cit. 2. 1. 2021].
Dostupné z: <https://sacred.numbersciences.org>.
- [28] *Monument aligned with winter solstice among 40 newly discovered near Newgrange*.
In: <https://www.irishcentral.com/news/40-new-ancient-irish-monuments-newgrange> [online]. 7. 8. 2019. [cit. 2. 1. 2021]. Dostupné z: <https://www.irishcentral.com/>.
- [29] *Záhada Stonehenge: Pod kameny možná leží pohřebiště*.
In: <https://ct24.ceskatelevize.cz/svet/1112634-zahada-stonehenge-pod-kameny-mozna-lezi-pohrebiste> [online]. 9. 3. 2013. [cit. 2. 1. 2021].
Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz>.
- [30] ZEJDA M., *Základy astronomie*. Brno, 2018.
- [31] MAŇÁK R., *Rayleighův a Mieův rozptyl*.
In: <http://ukazy.astro.cz/Rayleighuv-a-Mieuv-rozptyl.php> [online]. 24. 4. 2012. [cit. 31. 12. 2020]. Dostupné z: <http://ukazy.astro.cz/>.

- [32] BOWDITCH N., *The American practical navigator: an epitome of navigation*. Bethesda, Md, The Agency.
In: http://geocenter.survey.ntua.gr/main/labs/carto/academic/persons/bnakos_site_nafp/documentation/american_practical_navigator.pdf [online]. 2021. [cit. 2. 1. 2021].
Dostupné z: <http://geocenter.survey.ntua.gr>.
- [33] *V kolik se rozednívá a stmívá?* In: <https://www.meteogram.cz/vychod-zapad-slunce/> [online]. 2021. [cit. 2. 1. 2021]. Dostupné z: www.meteogram.cz.
- [34] In: https://cs.wikipedia.org/wiki/Obzorníkové_souřadnice [online]. 2021. [cit. 14. 3. 2021].
Dostupné z: cs.wikipedia.org.
- [35] In: <http://crab0.astr.nthu.edu.tw/~hchang/gal/ch02-02.htm> [online]. 2021.
[cit. 14. 3. 2021]. Dostupné z: www.nthu.edu.tw.
- [36] In: <https://stellarium-web.org/> [online]. 2021. [cit. 16. 3. 2021]. Dostupné z: <https://stellarium-web.org/>.
- [37] *How To Navigate Using the Stars*. In: <https://youtu.be/Bh5kHTBr0gU> [online].
30. 4. 2018. [cit. 14. 3. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [38] ŠIROKÝ J., ŠIROKÁ M., *Základy astronomie v příkladech*. Vyd. 2. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1973. Vysokoškolské příručky.
- [39] SVOBODA E., *Přehled středoškolské fyziky*. Vyd. 3. Praha: Prometheus, 1998. ISBN 80-7196-116-7.
- [40] MACHÁČEK M., *Fyzika pro gymnázia - Astrofyzika*. Prometheus, 2008. ISBN 80-7196-091-8.
- [41] LAUE M., *Dějiny fyziky*. Vyd. 1. Praha: Orbis, 1959, 169 bns.
- [42] FARINA D., *History of Astronomy Part 3: Copernicus and Heliocentrism*.
In: <https://youtu.be/ZGr1nHdzLyk> [online]. 17. 10. 2018. [cit. 7. 3. 2021].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [43] KRTOUŠ P., *Od Aristotela k Newtonovi*. In: https://youtu.be/n_mSOmb3d6U [online].
10. 3. 2016. [cit. 7. 3. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [44] *Uranienborg*. In: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Uranienborg> [online]. 2021.
[cit. 7. 3. 2021]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org>.
- [45] GRYGAR J., *Pražští exulanti - Tycho Brahe a Johannes Kepler*.
In: <https://youtu.be/Z00m5r1MTEo> [online]. 1. 6. 2018. [cit. 7. 3. 2021].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [46] HARARI Y. N., *Sapiens: stručné dějiny lidstva*. Vyd. 3. Voznice: Leda, 2018. ISBN 978-80-7335-569-2.
- [47] BALCAROVÁ K., *Galileův život v úlohách*. Matematika-Fyzika-Informatika 20 (2010), č. 3, s. 145-155.
- [48] *The Galileo Project*. In: <http://galileo.rice.edu/> [online]. 2021. [cit. 18. 3. 2021].
Dostupné z: www.rice.edu.
- [49] GALILEI G., *Siderius Nuncius*. 1610.
- [50] GALILEI G., *Il Saggiatore*. 1623.

- [51] GRYGAR J., *Případ Galileo Galilei ... a přece se točí*.
In: <https://youtu.be/rrgr9RYSDoE> [online]. 2. 10. 2018. [cit. 18. 3. 2021].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [52] *Marble-ous ellipses - classroom demonstration video*.
In: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2014/07/Marble-ous_ellipses_-_classroom_demonstration_video_VP02 [online]. 2021. [cit. 14. 3. 2021].
Dostupné z: <https://www.esa.int>.
- [53] KULHÁNEK P., *Jak vznikl svět, aneb, Třináctero příběhů o kosmologii*. Praha: AGA, 2019. ISBN 978-80-906638-1-7.
- [54] *Měření vzdálenosti*. In: <https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/struktury/vzdalenosti.php> [online]. 2021. [cit. 14. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz>.
- [55] *BeamNG.drive*. In: <https://store.steampowered.com/app/284160/BeamNGdrive/> [online]. 2021. [cit. 14. 3. 2021]. Dostupné z: <https://store.steampowered.com>.
- [56] *What It's Like to Drive on Other Planets*. In: <https://youtu.be/IfXNjuoqt0Q> [online]. 30. 3. 2020. [cit. 14. 3. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [57] *gravity on different planets*. In: <https://youtu.be/xypBGd86ogw> [online]. 9. 3. 2022. [cit. 19. 3. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [58] GANNON P., *Could the Kessler Syndrome Put an End to NewSpace?*.
In: <https://www.bcsatellite.net/blog/could-the-kessler-syndrome-put-an-end-to-newspace/> [online]. 2021. [cit. 18. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.bcsatellite.net>.
- [59] *High-velocity impact sample*.
In: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2005/03/High-velocity_impact_sample [online]. 2021. [cit. 18. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.esa.int>.
- [60] WHEELER R., *Apollo lunar landing launch window: The controlling factors and constraints*. In: : <https://history.nasa.gov/afj/launchwindow/lw1.html> [online]. 2021. [cit. 18. 3. 2021]. Dostupné z: <https://history.nasa.gov>.
- [61] BRANDOS O., *Kosmické rychlosti (1., 2., 3.), výpočet*.
In: <https://www.treking.cz/astrofyzika/kosmicke-rychlosti.htm> [online]. 27. 10. 2016. [cit. 18. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.treking.cz>.
- [62] DANĚK V., *Mechanika kosmického letu*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2018. ISBN 978-80-7204-984-4.
- [63] LU Y., SHAO Q., YUE H., YANG F., *A Review of the Space Environment Effects on Spacecraft in Different Orbits*.
In: https://www.researchgate.net/publication/334387721_A_Review_of_the_Space_Environment_Effects_on_Spacecraft_in_Different_Orbits [online]. 2019. [cit. 18. 3. 2021].
Dostupné z: <https://www.researchgate.net>.
- [64] In: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b4/Comparison_satellite_navigation_orbits.svg [online]. 2021. [cit. 14. 3. 2021].
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org>.
- [65] *Brněnská vesmírná revoluce na oběžné dráze*. In: <https://www.astro.cz/clanky/kosmonautika/brnenska-vesmirna-revoluce-na-obezne-draze.html> [online]. 16. 6. 2020. [cit. 14. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.astro.cz>.

- [66] ROBERTS T. G., *Spaceports of the World*.
In: <https://aerospace.csis.org/data/spaceports-of-the-world/> [online]. 3. 1. 2022.
[cit. 14. 1. 2022]. Dostupné z: <https://aerospace.csis.org>.
- [67] *Felix Baumgardner's Stratosphere Jump*. In: <https://youtu.be/raiFrxbHxV0> [online].
14. 10. 2013. [cit. 14. 3. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [68] KARIUKI P., *SpaceX vs. Virgin Galactic vs. Blue Origin: What Are the Differences?*
In: <https://www.makeuseof.com/spacex-virgin-galactic-blue-origin-differences/> [online].
30. 11. 2021. [cit. 14. 12. 2021]. Dostupné z: <https://www.makeuseof.com>.
- [69] YAMAGAMI T., *Research on Balloons to Float Over 50km Altitude*.
In: <https://www.isas.jaxa.jp/e/special/2003/yamagami/03.shtml> [online]. 2021.
[cit. 14. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.isas.jaxa.jp>.
- [70] KINSTLE M. F., KINSTLE R. M., *Aerodynamic Characteristics of the German V-2 Rocket: Investigation through a STEM Project*.
In: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2018-5157> [online]. 15. 9. 2018.
[cit. 14. 3. 2021]. Dostupné z: <https://arc.aiaa.org>.
- [71] POST S. L., *Space Shuttle Case Studies: Challenger and Columbia*. 2014. Conference:
ASEE Annual Conference, Indianapolis, IN, USA.
- [72] *How We Are Going to the Moon*. In: https://youtu.be/_T8cn2J13-4 [online]. 19. 10. 2019.
[cit. 18. 3. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [73] VÁCLAVÍK M., *Pilotované lety za nízkou oběžnou dráhu*.
In: <https://youtu.be/NOMk9A9z9IQ> [online]. 16. 5. 2017. [cit. 18. 3. 2021].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [74] *Apollo 17 2008 CZ*. In: <https://youtu.be/cOK4Rla7bzU> [online]. 26. 8. 2012.
[cit. 18. 3. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [75] DETTMER P., *Why Earth Is A Prison and How To Escape It*.
In: <https://youtu.be/RVMZxH1TIIQ> [online]. 1. 2. 2017. [cit. 20. 3. 2021].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [76] MIHULKA S., *SpaceX poprvé zažehli svůj vylepšený raketový motor Raptor*.
In: <https://www.osel.cz/10353-spacex-poprve-zazehli-svuj-vylepseny-raketovy-motor-raptor.html> [online]. 5. 2. 2019. [cit. 26. 3. 2021].
Dostupné z: <https://www.osel.cz>.
- [77] In: https://en.wikipedia.org/wiki/SpaceX_Raptor [online]. 2021. [cit. 26. 3. 2021].
Dostupné z: <https://en.wikipedia.org>.
- [78] *3, 2, 1 Liftoff!* In: https://youtu.be/hellxEOM_nk [online]. 8. 8. 2020. [cit. 20. 4. 2021].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [79] MUNROE R., *Co kdyby?: vážné vědecké odpovědi na absurdní hypotetické otázky*.
Praha: Práh, 2014. ISBN 978-80-7252-539-3.
- [80] *Vega, The Light Launcher*. In: <https://www.arianespace.com/vehicle/vega/> [online]. 2019.
[cit. 20. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.arianespace.com/>.
- [81] *Alternatives for Future U.S. Space-Launch Capabilities*. The Congress of the United States. Congressional Budget Office, October 2006.

- [82] HAEUSSERMANN W., *Description and performance of the Saturn launch vehicles, navigation, guidance and control system*. Dostupné z: <https://nrts.nasa.gov>.
- [83] *Apollo 11 Launch (Original NASA Video)*. In: https://youtu.be/UEXTN3_UOIY [online]. 16. 7. 2017. [cit. 20. 4. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [84] *Vega lifts off*. In: <https://youtu.be/3bYhsdPayi8> [online]. 13. 9. 2017. [cit. 20. 4. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [85] WENZ J., *This Chart Shows the Size of All Our Space Rockets*. In: <https://www.popularmechanics.com/space/rockets/news/a13943/this-chart-shows-every-rocket-thats-been-to-space/> [online]. 5. 2. 2015. [cit. 20. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.popularmechanics.com>.
- [86] *How Not to Land an Orbital Rocket Booster*. In: <https://youtu.be/bvim4rsNHkQ> [online]. 14. 7. 2017. [cit. 20. 4. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [87] In: <https://www.spacex.com/launches/index.html> [online]. 2021. [cit. 20. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.spacex.com>.
- [88] KUBALA P., *Světelná show nad západem USA. V atmosféře shořel druhý stupeň Falconu 9*. In: <https://vtm.zive.cz/clanky/svetelna-show-nad-zapadem-usa-v-atmosfere-shorel-druhy-stupen-falconu-9/sc-870-a-209257/default.aspx> [online]. 26. 3. 2021. [cit. 22. 4. 2021]. Dostupné z: <https://vtm.zive.cz/>.
- [89] *What Was The Apollo 11 Heat Shield Made Of?* In: <https://apollo11space.com/what-was-the-apollo-11-heat-shield-made-of/> [online]. 2021. [cit. 22. 4. 2021]. Dostupné z: <https://apollo11space.com>.
- [90] ŠVANDA M., *Na čem pracujeme: Fragmentace bolidů v první polovině atmosférické dráhy*. In: <https://www.asu.cas.cz/articles/1854/19/na-cem-pracujeme-fragmentace-bolidu-v-prvni-polovine-atmosfericke-drahy> [online]. 2021. [cit. 22. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.asu.cas.cz>.
- [91] PŘIBYL T., *Zvířecí kosmonauti... Aneb na počátku byla Lajka*. In: <https://youtu.be/bK3EOp2ZaEw> [online]. 8. 4. 2018. [cit. 28. 4. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [92] RINCON P., MOSKVITCH K., *ZProfile: Yuri Gagarin*. In: <https://www.bbc.com/news/science-environment-12460720> [online]. 4. 4. 2011. [cit. 28. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.bbc.com>.
- [93] „Vidím Zemi! Je tak nádherná!“ In: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Czech_Republic/Vidim_Zemi!_Je_tak_nadherna! [online]. 12. 4. 2011. [cit. 28. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.esa.int>.
- [94] *Odešel Alexej Leonov, první člověk, který uskutečnil kosmickou vycházku*. In: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Czech_Republic/Odesel_Alexej_Leonov_prvni_clovek_ktery_uskutecnil_kosmickou_vychazku [online]. 11. 10. 2019. [cit. 28. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.esa.int>.
- [95] *Project Mercury: Photos of NASA's 1st Crewed Spaceflights*. In: <https://www.space.com/14498-photos-nasa-mercury-space-capsule-spaceflights.html> [online]. 17. 2. 2012. [cit. 28. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.space.com>.

- [96] LOFF S., *Mercury Spacecraft*.
In: https://www.nasa.gov/mission_pages/mercury/missions/spacecraft.html [online].
17. 10. 2011. [cit. 28. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov>.
- [97] *View Apollo 11 Lunar Module As It Rested on Lunar Surface*.
In: <https://moon.nasa.gov/resources/188/view-apollo-11-lunar-module-as-it-rested-on-lunar-surface/> [online]. 28. 7. 2018. [cit. 30. 4. 2021].
Dostupné z: <https://moon.nasa.gov>.
- [98] PŘIBYL T., *Apollo - Sny a skutečnost*. In: <https://youtu.be/LCYBRZfsqgA> [online].
12. 3. 2013. [cit. 29. 4. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [99] PŘIBYL T., *Apollo: Dobytí Měsíce*. In: <https://youtu.be/2u3ZSvvyPdc> [online].
4. 10. 2019. [cit. 29. 4. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [100] PŘIBYL T., *Dobytí Měsíce: příběh programu Apollo*. Brno: CPress, 2019. ISBN
978-80-264-2626-4.
- [101] HALOUSEK M., *Apollo 11: Malý krok pro člověka a velký skok pro lidstvo*.
In: <https://youtu.be/od5FJHsFkVs> [online]. 22. 12.2019. [cit. 29. 4. 2021].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [102] OWEN J., *What's inside of the Lunar Module?*. In: <https://youtu.be/oX8-IXdABuc>
[online]. 10. 7. 2019. [cit. 30. 4. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [103] OWEN J., *How the Apollo Spacecraft works: Part 1*. In: <https://youtu.be/8dpkmUjJ8xU>
[online]. 16. 2. 2016. [cit. 30. 4. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [104] OWEN J., *How the Apollo Spacecraft works: Part 2*. In: <https://youtu.be/tl1KPjxKVqk>
[online]. 22. 5. 2016. [cit. 30. 4. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [105] OWEN J., *How the Apollo Spacecraft works: Part 3*. In: https://youtu.be/qt_xoCXLXnI
[online]. 13. 7. 2016. [cit. 30. 4. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [106] ŠAMAREK O., *Top 5: Problémy Apolla 11*.
In: <https://kosmonautix.cz/2019/08/top-5-problemy-apolla-11/> [online]. 16. 6. 2019.
[cit. 30. 4. 2021]. Dostupné z: <https://kosmonautix.cz/>.
- [107] *The Apollo 15 Lunar Laser Ranging RetroReflector*.
In: https://www.nasa.gov/mission_pages/LRO/multimedia/lroimages/lroc-20100413-apollo15-LRRR.html [online]. 13. 4. 2010. [cit. 30. 4. 2021].
Dostupné z: <https://www.nasa.gov/>.
- [108] OWEN J., *How did the Space Shuttle launch work?* In: <https://youtu.be/oMeXcBk1x-c>
[online]. 1. 10. 2020. [cit. 10. 5. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [109] *Space Shuttle Launch*. In: <https://youtu.be/OnoNITE-CLc> [online]. 27. 4.2011.
[cit. 10. 5. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [110] *Launch vehicles of the world*.
In: <https://www.britannica.com/technology/launch-vehicle/Launch-vehicles-of-the-world>
[online]. 2011. [cit. 10. 5. 2021]. Dostupné z: <https://www.britannica.com>.
- [111] *Spacelab-1 (SL-1) Mission on Flight STS-9*.
In: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/s/spacelab> [online]. 2021.
[cit. 12. 5. 2021]. Dostupné z: <https://earth.esa.int>.

- [112] PŘIBYL T., *Obtížný návrat z kosmu*.
In: <https://www.respekt.cz/tydenik/2013/1/obtizny-navrat-z-kosmu> [online]. 30. 12. 2012. [cit. 30. 5. 2021]. Dostupné z: <https://www.respekt.cz/>.
- [113] PŘIBYL T., *Smrt měla jméno Challenger*. Brno: Rovnost, 1996. ISBN 80-85826-16-X.
- [114] PŘIBYL T., *Den, kdy se nevrátila Columbia*. Říčany u Prahy: JUNIOR, [2003]. XXL.cz. ISBN 80-7267-108-1.
- [115] *X-37B Extended space flights*.
In: <http://www.boeing.com/defense/autonomous-systems/x37b/index.page> [online]. 2021. [cit. 30. 5. 2021]. Dostupné z: <https://www.boeing.com/>.
- [116] JEDLIČKA M., *Raketoplán Buran – legenda jediného startu*.
In: <http://www.hvezdarna-vsetin.cz/pages/view478d.php> [online]. 26. 11. 2008. [cit. 30. 5. 2021]. Dostupné z: <http://www.hvezdarna-vsetin.cz>.
- [117] MAJER D., *Top 5: Délka pobytu v kosmu*.
In: <https://kosmonautix.cz/2015/08/top5-delka-pobytu-v-kosmu/> [online]. 28. 8. 2015. [cit. 2. 6. 2021]. Dostupné z: <https://kosmonautix.cz/>.
- [118] BELAKOVSKI N., *The little-known Soviet mission to rescue a dead space station*.
In: <https://arstechnica.com/science/2014/09/the-little-known-soviet-mission-to-rescue-a-dead-space-station/> [online]. 16. 9. 2014. [cit. 2. 6. 2021]. Dostupné z: <https://arstechnica.com>.
- [119] SOBOTKA P., *Jak probíhal let Vladimíra Remka*.
In: <https://plus.rozhlas.cz/jak-probihal-let-vladimira-remka-6617889> [online]. 29. 2. 2008. [cit. 2. 6. 2021]. Dostupné z: <https://plus.rozhlas.cz>.
- [120] VÁCLAVÍK M., *Před třiceti roky vzlétl do kosmu československý kosmonaut*.
In: <https://www.kosmo.cz/modules.php?op=modload&name=kosmo&file=article&sid=1120> [online]. 28. 2. 2008. [cit. 2. 6. 2021]. Dostupné z: <https://www.kosmo.cz>.
- [121] *Vladimír Remek ve vesmíru*.
In: <https://edu.ceskatelevize.cz/video/4196-vladimir-remek-ve-vesmiru> [online]. 4. 2. 2015. [cit. 2. 6. 2021]. Dostupné z: <https://edu.ceskatelevize.cz/>.
- [122] PŘIBYL T., *Kritické okamžiky sovětské kosmonautiky*.
In: <https://youtu.be/IuIMLboIePU> [online]. 18. 5. 2020. [cit. 2. 6. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [123] PŘIBYL T., *Prokletí kosmické spolupráce*. In: https://youtu.be/i_yotc-nkFA [online]. 28. 3. 2006. [cit. 2. 6. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [124] MAJER D., *Čína začne budovat svou kosmickou stanici*.
In: <https://kosmonautix.cz/2021/03/cina-zacne-budovat-svou-kosmickou-stanici/> [online]. 5. 3. 2020. [cit. 16. 12. 2021]. Dostupné z: <https://kosmonautix.cz/>.
- [125] *International Space Station*. In: <https://historicspacecraft.com/ISS.html> [online]. 2021. [cit. 16. 12. 2021]. Dostupné z: <https://historicspacecraft.com>.
- [126] HADFIELD C., *Astronautův průvodce životem na Zemi: co mi cesty do vesmíru řekly o lidském důmyslu, odhodlání a o tom, že je třeba být připraven na vše*. Praha: Knižní klub, 2014. Universum (Knižní klub). ISBN 978-80-242-4716-8.
- [127] HADFIELD C., In: <https://www.youtube.com/user/keksdad> [online]. 2021. [cit. 18. 6. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.

- [128] *Na Mezinárodní vesmírné stanici*. In: <https://youtu.be/oUt9oU4hTLM> [online]. 2. 2. 2020. [cit. 18. 6. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [129] *Space Station*. In: <https://youtu.be/R1lXgPp9RJA> [online]. 4. 2. 2016. [cit. 18. 6. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [130] HALOUSEK M., *V kůži kosmonauta - Ep. 1 - Orbitální stanice, vesmírné laboratoře*. In: <https://youtu.be/RwEgtsnD8mo> [online]. 8. 4. 2020. [cit. 18. 6. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [131] In: <https://kosmonautix.cz/2015/10/sumiva-tableta-ve-stavu-beztize/air-bubble-in-water-iss/> [online]. 10. 10. 2015. [cit. 18. 6. 2021]. Dostupné z: <http://www.kosmonautix.cz>.
- [132] *Spaceflight R&D Spans Many Disciplines*. In: <https://www.issnationallab.org/research-on-the-iss/areas-of-research/> [online]. 2021. [cit. 16. 12. 2021]. Dostupné z: <https://www.issnationallab.org>.
- [133] *Five key findings from 15 years of the International Space Station*. In: <https://theconversation.com/five-key-findings-from-15-years-of-the-international-space-station-51540> [online]. 19. 12. 2015. [cit. 16. 12. 2021]. Dostupné z: <https://theconversation.com>.
- [134] *Space Station Research Explorer*. In: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/explorer/ [online]. 2021. [cit. 16. 12. 2021]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov>.
- [135] HEROVÁ M., *Czech Space News podcast #8*. In: <https://youtu.be/aZcuQfJf3QY> [online]. 13. 12. 2021. [cit. 18. 12. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [136] *Brněnská SAB Aerospace vyvíjí vybavení pro vesmírnou stanici*. In: <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/brnenska-sab-aerospace-vyvi-ji-vybaveni-pro-vesmirnou-stanici-138621> [online]. 20. 1. 2021. [cit. 18. 12. 2021]. Dostupné z: <https://www.seznamzpravy.cz>.
- [137] *Luca installs BioRock*. In: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2019/08/Luca_installs_BioRock [online]. 20. 8. 2019. [cit. 16. 12. 2021]. Dostupné z: <https://www.esa.int>.
- [138] In: <https://www.astronaut-test.com/>. 2021. [cit. 16. 12. 2021]. Dostupné z: <https://www.astronaut-test.com/>.
- [139] WAGNER V., *Jaderné technologie pro vesmír*. In: <https://youtu.be/3Ej6LUKsCFM> [online]. 24. 10. 2021. [cit. 18. 12. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [140] WAGNER V., *Jaderné zdroje pro vesmírné aplikace*. In: https://youtu.be/v2u_0YeW8XI [online]. 6. 2. 2021. [cit. 18. 12. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [141] WAGNER V., *Když do vesmíru tak s jádrem*. In: <https://youtu.be/MG1as-qFQYk> [online]. 23. 4. 2019. [cit. 18. 12. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [142] WHITT K. K., *New Horizons passes milestone distance 50 AU*. In: <https://earthsky.org/space/new-horizons-50-au-milestone-photo-voyager-1/> [online]. 20. 4. 2021. [cit. 18. 12. 2021]. Dostupné z: <https://earthsky.org>.
- [143] MAJER D., *Nový plán pro udržení Voyagerů v provozu*. In: <https://kosmonautix.cz/2019/07/novy-plan-pro-udrzeni-voyageru-v-provozu/> [online]. 15. 7. 2019. [cit. 18. 12. 2021]. Dostupné z: <https://kosmonautix.cz/>.

- [144] MAJER D., *Vylepšená anténa se spojila se sondou Voyager 2*. In: <https://kosmonautix.cz/2020/11/vylepsena-antena-se-spojila-se-sondou-voyager-2/> [online]. 5. 11. 2020. [cit. 18. 12. 2021]. Dostupné z: <https://kosmonautix.cz/>.
- [145] *Messages from Earth*. In: <https://www.ceros.com/inspire/originals/pioneer-plaque-design/> [online]. 2021. [cit. 18. 12. 2021]. Dostupné z: <https://www.ceros.com>.
- [146] *The Golden Record*. In: <https://voyager.jpl.nasa.gov/golden-record/> [online]. 2021. [cit. 18. 12. 2021]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov>.
- [147] In: <https://photojournal.jpl.nasa.gov/> [online]. 2021. [cit. 18. 12. 2021]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov>.
- [148] In: <https://solarsystem.nasa.gov/> [online]. 2021. [cit. 18. 12. 2021]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov>.
- [149] MAJER D., *Probuzení New Horizons je tu!* In: <https://kosmonautix.cz/2018/06/probuzeni-new-horizons-je-tu/> [online]. 5. 6. 2018. [cit. 20. 12. 2021]. Dostupné z: <https://kosmonautix.cz/>.
- [150] GEMBEC M., *Tajemství Ultima Thule odhaleno*. In: <https://kosmonautix.cz/2019/01/tajemstvi-ultima-thule-odhaleno/> [online]. 3. 1. 2019. [cit. 20. 12. 2021]. Dostupné z: <https://kosmonautix.cz/>.
- [151] PŘIBYL T., *Klepání na hvězdnou bránu*. In: <https://youtu.be/qoMrv7UBdqq> [online]. 3. 11. 2016. [cit. 20. 12. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [152] TYC T., *Moment hybnosti*. In: <https://edu.ceskatelevize.cz/video/1387-moment-hybnosti> [online]. 16. 7. 2014. [cit. 16. 6. 2021]. Dostupné z: <http://https://edu.ceskatelevize.cz>.
- [153] DVOŘÁK P., *Moment hybnosti*. In: <https://edu.ceskatelevize.cz/video/5478-fyzikalni-laboratore-ceitec-moment-setrvacnosti> [online]. 20. 3. 2017. [cit. 16. 6. 2021]. Dostupné z: <http://https://edu.ceskatelevize.cz>.
- [154] DANN J., *Moment of Inertia Explained*. In: <https://youtu.be/uyU25DdONjo> [online]. 14. 12. 2010. [cit. 20. 6. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [155] YEANNY B., *Feel the moment of inertia-Physics of toys*. In: <https://youtu.be/z19iwclwY14> [online]. 4. 4. 2016. [cit. 20. 6. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [156] MULLER D., *Gyroscopic Precession*. In: <https://youtu.be/ty9QSiVC2g0> [online]. 23. 5. 2012. [cit. 20. 6. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [157] *Gyroscopes in space*. In: <https://youtu.be/xQb-N486mA4> [online]. 21. 3. 2016. [cit. 20. 6. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [158] *ISS Attitude Control - Torque Equilibrium Attitude and Control Moment Gyroscopes*. In: <https://youtu.be/4aF7zwhlDDU> [online]. 6. 9. 2019. [cit. 20. 6. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [159] SANDLIN D., *Are Helicopters Gyroscopes?* In: <https://youtu.be/eTjGTxSevHE> [online]. 11. 4. 2012. [cit. 20. 6. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [160] KARTTUNEN H., KRÖGER P., OJA H., POUTANEN M., DONNER K. J., *Fundamental Astronomy*. Springer 2017

- [161] SHOSTAK S., MARCY G., *Inside the Milky Way*. National Geographics 2010.
- [162] In: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Konjunkce_\(astronomie\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Konjunkce_(astronomie)) [online]. 2021. [cit. 21. 6. 2021]. Dostupné z: cs.wikipedia.org.
- [163] *3D Solar System Simulator*. In: <https://mgvez.github.io/jsorrery/> [online]. 2021. [cit. 21. 6. 2021]. Dostupné z: <https://mgvez.github.io/jsorrery/>.
- [164] *3D Solar System Simulator*. In: <https://theskylive.com/3dsolarsystem> [online]. 2021. [cit. 21. 6. 2021]. Dostupné z: <https://theskylive.com/>.
- [165] *The Planets: Rotation, tilt, sidereal days*. In: <https://youtu.be/t313pgLOQ4Y> [online]. 3. 9. 2019. [cit. 21. 6. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [166] BRYSON B., *Stručná historie téměř všeho*. Praha: Euromedia Group, 2019. ISBN 978-80-7617-590-7.
- [167] *Welcome to the double planet*. In: http://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/SMART-1/Welcome_to_the_double_planet [online]. 5. 10. 2003. [cit. 26. 6. 2021]. Dostupné z: <https://www.esa.int/>.
- [168] BROŽ M., *Co víme (a nevíme) o vzniku Země a Měsíce*. In: https://youtu.be/VQIsu7SR_qM [online]. 22. 10. 2019. [cit. 28. 6. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [169] GABZDYL P., *Vše co jsme věděli o Měsíci je jinak*. In: https://youtu.be/bP1Z7tHw_Ro [online]. 21. 2. 2018. [cit. 28. 6. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [170] ČADEK O., *Stejná, a přece tolik jiná Země*. In: <https://youtu.be/87ZUHvwLpr8> [online]. 12. 12. 2019. [cit. 28. 6. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [171] *The world's deepest gold mine*. In: <https://www.mining.com/web/infographic-the-worlds-deepest-gold-mine/> [online]. 9. 12. 2016. [cit. 28. 6. 2021]. Dostupné z: <https://www.mining.com>.
- [172] *Why is the earth's core so hot? And how do scientists measure its temperature?* In: <https://www.scientificamerican.com/article/why-is-the-earths-core-so/> [online]. 6. 10. 1997. [cit. 28. 6. 2021]. Dostupné z: <https://www.scientificamerican.com/>.
- [173] HÁLA T., *Jak se tvořilo jádro Země*. In: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2003_26_cor.php [online]. 2003. [cit. 28. 6. 2021]. Dostupné z: <http://https://www.aldebaran.cz>.
- [174] ANDERSON G., *NASA Confirms Evidence That Liquid Water Flows on Today's Mars*. In: <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-confirms-evidence-that-liquid-water-flows-on-today-s-mars> [online]. 28. 8. 2015. [cit. 28. 6. 2021]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/>.
- [175] HICKEY H., *Volcanic activity and changes in Earth's mantle were key to rise of atmospheric oxygen*. In: <https://phys.org/news/2020-06-volcanic-earth-mantle-key-atmospheric.html> [online]. 9. 6. 2020. [cit. 28. 6. 2021]. Dostupné z: <https://phys.org/>.
- [176] In: https://meteorcrater.com/info/meteor_crater_outside-hero/ [online]. 2021. [cit. 21. 6. 2021]. Dostupné z: <https://meteorcrater.com/>.

- [177] WHALEN M. T. et al, *Winding down the Chicxulub impact: The transition between impact and normal marine sedimentation near ground zero*.
In: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025322720302565> [online]. 2020. [cit. 30. 6. 2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/>.
- [178] In: https://en.wikipedia.org/wiki/Chicxulub_crater [online]. 2021. [cit. 21. 6. 2021]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org>.
- [179] MULLER D., *These are the asteroids to worry about*.
In: <https://youtu.be/4Wrc4fHSCpw> [online]. 30. 11. 2020. [cit. 30. 6. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [180] SMIL V., *Globální katastrofy a trendy: příštích padesát let*. Praha: Kniha Zlin, 2017. ISBN 978-80-7473-528-8.
- [181] *Planetary Defence*. In: [https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Keywords/System/Planetary_Defence/\(result_type\)/images](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Keywords/System/Planetary_Defence/(result_type)/images) [online]. 14. 2. 2017. [cit. 30. 6. 2021]. Dostupné z: <https://www.esa.int>.
- [182] MELICH, R., *Kosmická optika*.
In: <http://www.toptec.eu/cs/co-delame/kosmicka-optika/> [online]. 2021. [cit. 30. 6. 2021]. Dostupné z: <http://http://www.toptec.eu>.
- [183] *Firma OHB Czechspace se stává součástí mise planetární obrany Hera*.
In: <https://www.businessinfo.cz/clanky/firma-ohb-czechspace-se-stava-soucasti-mise-planetarni-obrany-hera/> [online]. 15. 12. 2020. [cit. 30. 6. 2021]. Dostupné z: <https://www.businessinfo.cz>.
- [184] GAMOW G., *Životopis země: její minulost, přítomnost a budoucnost*. Praha: Svoboda, 1949.
- [185] CERVENY R., SHAFFER J. A., *The moon and El Niño*.
In: <https://asu.pure.elsevier.com/en/publications/the-moon-and-el-nin%C3%B5> [online]. 1. 1. 2001. [cit. 15. 7. 2021]. Dostupné z: <https://asu.pure.elsevier.com/en/>.
- [186] YASUDA I., *Impact of the astronomical lunar 18.6-yr tidal cycle on El-Niño and Southern Oscillation*. In: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-33526-4.pdf> [online]. 12. 12. 2018. [cit. 15. 7. 2021]. Dostupné z: www.nature.com/scientificreports.
- [187] KULHÁNEK P., *Změny rotace Země*.
In: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2021_17_osa.php [online]. 2021. [cit. 15. 7. 2021]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz>.
- [188] SURESH E., *Difference between the precession of the equinoxes and the precession of Earth's axis*. In: <https://sureshemre.wordpress.com/2014/05/03/difference-between-the-precession-of-the-equinoxes-and-the-precession-of-earths-axis/> [online]. 3. 5. 2014. [cit. 15. 7. 2021]. Dostupné z: <https://sureshemre.wordpress.com/>.
- [189] *New research shows Earth's tilt influences climate change*.
In: <https://phys.org/news/2015-12-earth-tilt-climate.html> [online]. 14. 12. 2015. [cit. 15. 7. 2021]. Dostupné z: <https://phys.org/>.
- [190] In: https://cs.wikipedia.org/wiki/Precese_zemské_osy [online]. 2021. [cit. 15. 7. 2021]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org>.
- [191] In: <https://en.wikipedia.org/wiki/Supermoon> [online]. 2021. [cit. 8. 8. 2021]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/>

- [192] GEMBEC M., *Superúplněk 14. listopadu 2016*.
In: <https://www.astro.cz/clanky/ukazy/superuplnek-14-listopadu-2016.html> [online].
13. 11. 2016. [cit. 8. 8. 2021]. Dostupné z: <https://www.astro.cz/>.
- [193] VESELÝ J., *Proč bude zítřejší úplněk ještě jasnější, než ten nejjasnější?*
In: <https://www.astro.cz/clanky/ukazy/proc-bude-zitrejsi-uplnek-jeste-jasnejsi-nez-ten-nejjasnejsi.html> [online]. 12. 12. 2016. [cit. 8. 8. 2021].
Dostupné z: <https://www.astro.cz/>.
- [194] GABZDYL P., *Vše co jsme věděli o Měsíci je jinak*. In: https://youtu.be/bP1Z7tHw_Ro [online]. 21. 2. 2018. [cit. 28. 6. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [195] BIČÍK I., JANSKÝ B. et al., *Příroda a lidé Země. Učebnice zeměpisu pro střední školy*. Nakladatelství České geografické společnosti, Praha (2001), 135 s
- [196] MULLER D., *The Surprising Secret of Synchronization*.
In: https://youtu.be/t_VPRCtiUg [online]. 31. 3. 2021. [cit. 8. 8. 2021].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [197] OWEN J., *Phases of the Moon*. In: https://youtu.be/mQwvHn_qkBAg [online].
15. 11. 2015. [cit. 11. 8. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [198] In: <https://ifunny.co/picture/usa-uruguay-since-earth-is-round-people-living-in-australia-O6uWrkp49> [online]. 11. 11. 2021. [cit. 8. 12. 2021].
Dostupné z: <https://ifunny.co>.
- [199] *Mercury*.
In: <https://web.archive.org/web/19991012021030/http://solarviews.com/eng/mercury.htm> [online]. 2021. [cit. 27. 8. 2021].
Dostupné z: <https://web.archive.org>.
- [200] *Bepicolombo*. In: <https://bepicolombo.esac.esa.int/itl-viewer/where/> [online]. 2021.
[cit. 27. 8. 2021]. Dostupné z: <https://www.esa.int>.
- [201] DAINES G., *Mariner 10 Image of Mercury*.
In: <https://www.nasa.gov/image-feature/mariner-10-image-of-mercury> [online].
13. 7. 2015. [cit. 27. 8. 2021]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/>.
- [202] *Messenger*. In: <https://solarsystem.nasa.gov/missions/messenger/in-depth/> [online].
1. 8. 2019. [cit. 27. 8. 2021]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/>.
- [203] *Venus, the hottest planet in the solar system*.
In: <http://www.astronomytoday.com/astronomy/venus.html> [online]. 2021.
[cit. 29. 8. 2021]. Dostupné z: <http://www.astronomytoday.com>.
- [204] MARTINEK F., *Byla Venuše sestrou Země?*
In: <https://www.astro.cz/clanky/slunecni-soustava/byla-venuse-sestrou-zeme.html> [online]. 7. 12. 2007. [cit. 29. 8. 2021]. Dostupné z: <https://www.astro.cz>.
- [205] GEMBEC M., *Výzkum Venuše – 6. Díl*.
In: <https://www.astro.cz/clanky/kosmonautika/vyzkum-venuse-6-dil.html> [online].
13. 6. 2016. [cit. 29. 8. 2021]. Dostupné z: <https://www.astro.cz/>.
- [206] PETRÁSEK T., *Mise na Venuši*. In: <https://youtu.be/Fww8uywdfRA> [online].
31. 10. 2018. [cit. 29. 8. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [207] NOVÁKOVÁ J., *Venuše: Záhadná planeta*. In: <https://youtu.be/ekvSy0Rs9Eo> [online].
29. 2. 2016. [cit. 29. 8. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.

- [208] DETTMER P., *How To Terraform Venus (Quickly)*.
In: <https://youtu.be/G-WO-z-QuWI> [online]. 6. 7. 2021. [cit. 29. 8. 2021].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [209] *Tharsis a Olympus Mons*.
In: <http://astronomia.zcu.cz/planety/mars/1136-tharsis-a-olympus-mons> [online].
15. 1. 2010. [cit. 31. 8. 2021]. Dostupné z: <http://astronomia.zcu.cz/>.
- [210] BROŽ M., *Jak se rodily planety?* In: <https://youtu.be/KRUcz6P6sr0> [online].
23. 10. 2014. [cit. 31. 8. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [211] BROŽ P., *How To Terraform Venus (Quickly)*. In: <https://youtu.be/tnaGplU5GIE>
[online]. 11. 6. 2015. [cit. 31. 8. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [212] *Science Instruments on NASA's Perseverance Mars Rover*.
In: <https://mars.nasa.gov/resources/25045/science-instruments-on-nasas-perseverance-mars-rover/> [online]. 11. 6. 2020. [cit. 31. 8. 2021].
Dostupné z: <https://mars.nasa.gov>.
- [213] MAJER D., *O Marsu a kosmonautice*. In: <https://youtu.be/Em-CAJISjA> [online].
14. 3. 2021. [cit. 31. 8. 2021]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [214] GEMBEC M., *Mars tak, jak jste ho dosud neviděli*.
In: <https://kosmonautix.cz/2021/02/mars-tak-jak-jste-ho-dosud-nevideli/> [online].
23. 2. 2021. [cit. 31. 8. 2021]. Dostupné z: <https://kosmonautix.cz>.
- [215] FOLTA D. C. et al., *Fast Mars Transfers Through On-orbit Staging. Concepts and Approaches for Mars Exploration*.
Dostupné z: <https://www.lpi.usra.edu/meetings/marsconcepts2012/pdf/4181.pdf>.
- [216] EICHER D. J., *Is Jupiter a Failed Star?* In: <https://astronomy.com/magazine/greatest-mysteries/2019/07/48-is-jupiter-a-failed-star> [online]. 1. 7. 2019. [cit. 19. 1. 2022].
Dostupné z: <https://astronomy.com>.
- [217] *Jupiter's Influence*.
In: https://www.missionjuno.swri.edu/origin?show=hs_origin_story_jupiters-influence
[online]. 2022. [cit. 19. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.missionjuno.swri.edu>.
- [218] STEWART I., *Hraje Bůh kostky?: nová matematika chaosu*. Praha: Argo, 2009. Zip (Argo: Dokořán). ISBN 978-80-257-0024-2.
- [219] KULHÁNEK P., *Novinky z fyziky a astronomie 2021*.
In: <https://youtu.be/KvLWNuoyJB0> [online]. 8. 12. 2021. [cit. 31. 1. 2022].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [220] FLISSAUER J. J., STEVENSON D. J., *Formation of Giant Planets*.
Dostupné z: <https://www.lpi.usra.edu>.
- [221] MORGAN J., *'Diamond rain' falls on Saturn and Jupiter*
In: <https://www.bbc.com/news/science-environment-24477667> [online]. 14. 3. 2013.
[cit. 19. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.bbc.com>.
- [222] *Jupiter*. In: <https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/sunsystem/jupiter.php> [online]. 2022.
[cit. 19. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz>.
- [223] KULHÁNEK P., *Astronomie a fyzika - souvislosti*. Aldebaran, 2018. ISBN 978-80-906638-0-0.

- [224] HOWELL E., *What Voyager 1 Learned at Jupiter 40 Years Ago*.
In: <https://www.space.com/voyager-1-jupiter-flyby-40-years-ago.html> [online]. 5. 3. 2019. [cit. 19. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.space.com>.
- [225] *Cassini Jupiter Portrait*.
In: https://www.nasa.gov/mission_pages/cassini/multimedia/pia04866.html [online]. 7. 8. 2017. [cit. 19. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov>.
- [226] In: https://www.nasa.gov/mission_pages/juno/images [online]. 2017. [cit. 19. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov>.
- [227] FRANKNOI A., MORRISON D. a WOLFF S.C., *Astronomy*. ISBN: 1-938168-28-3. Dostupné z: <https://openstax.org/details/books/astronomy>.
- [228] KULHÁNEK P. a ROZEHNAL J., *Hvězdy, planety, magnety*. Praha: Aldebaran, 2021. ISBN 978-80-906638-6-2.
- [229] NOVÁKOVÁ J., *Oceány ledových měsíců*. In: <https://youtu.be/uOVa1PtHfL4> [online]. 2. 7. 2015. [cit. 22. 1. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [230] *Jovian System*. In: <http://www.seasky.org/solar-system/jupiter-menu.html> [online]. 2016. [cit. 21. 1. 2022]. Dostupné z: <http://www.seasky.org>.
- [231] *Databáze kosmických sond pro průzkum těles Sluneční soustavy*.
In: <http://spaceprobes.kosmo.cz/index.php?sekce=hotnews&month=02-2005> [online]. 2005. [cit. 21. 1. 2022]. Dostupné z: <http://spaceprobes.kosmo.cz>.
- [232] *NASA's Cassini Data Show Saturn's Rings Relatively New*.
In: <https://www.jpl.nasa.gov/news/nasas-cassini-data-show-saturns-rings-relatively-new> [online]. 7. 1. 2019. [cit. 21. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.jpl.nasa.gov>.
- [233] SELVANS M., *Climate Change in the Solar System*.
In: <https://airandspace.si.edu/stories/editorial/climate-change-solar-system> [online]. 7. 3. 2012. [cit. 22. 1. 2022]. Dostupné z: <https://airandspace.si.edu>.
- [234] *The Huygens probe separating from the Cassini spacecraft*.
In: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2002/01/The_Huygens_probe_separating_from_the_Cassini_spacecraft [online]. 8. 2. 2002. [cit. 21. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.esa.int>.
- [235] KAUPA D., *Why do astronomers call Uranus and Neptune ice giants?*
In: <https://astronomy.com/magazine/ask-astro/2019/06/why-do-astronomers-call-uranus-and-neptune-ice-giants> [online]. 24. 6. 2019. [cit. 21. 1. 2022]. Dostupné z: <https://astronomy.com>.
- [236] *Putování k Planetám Uran a Neptun*. In: <https://youtu.be/Sk69IyIMqys> [online]. 26. 4. 2013. [cit. 21. 1. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [237] *Solar System Exploartion*. In: <https://solarsystem.nasa.gov/planets/uranus/overview/> [online]. 2022. [cit. 21. 1. 2022]. Dostupné z: <http://https://www.nasa.gov>.
- [238] In: https://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/science/neptune-circuit.html [online]. 2022. [cit. 21. 1. 2022]. Dostupné z: <http://https://www.nasa.gov>.
- [239] In: <https://currents.ucsc.edu/05-06/05-15/triton.asp> [online]. 15. 5. 2006. [cit. 21. 1. 2022]. Dostupné z: <https://currents.ucsc.edu>.

- [240] HOGEBACK J., *Why Is Pluto No Longer a Planet?*
In: <https://www.britannica.com/story/why-is-pluto-no-longer-a-planet> [online]. 2022.
[cit. 21. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.britannica.com>.
- [241] NOVÁKOVÁ J., *Kuiperův pás a Oortův oblak*. In: https://youtu.be/GMMLnPp_Zzw
[online]. 15. 3. 2016. [cit. 22. 1. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [242] *Pluto* In: <https://https://youtu.be/qEJGN8V8gDo> [online]. 17. 9. 2021. [cit. 21. 1. 2022].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [243] MARTINEK F., *Nová teorie původu hlavního pásu planetek*.
In: <https://www.astro.cz/clanky/slunceni-soustava/nova-teorie-puvodu-hlavniho-pasu-planetek.html> [online]. 25. 9. 2017. [cit. 22. 1. 2022].
Dostupné z: <https://www.astro.cz>.
- [244] GROSSMAN L., *5 cool things to know about NASA's Lucy mission to the Trojan asteroids*. In: <https://www.sciencenews.org/article/nasa-lucy-first-mission-trojan-asteroids-launch-space> [online]. 15. 10. 2021. [cit. 22. 1. 2022].
Dostupné z: <https://www.sciencenews.org>.
- [245] KULHÁNEK P., *Existuje druhý Měsíc?*
In: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2013_26_whi.php [online]. 2013. [cit. 22. 1. 2022].
Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz>.
- [246] RAPP J., *Mysteries of the Oort cloud at the edge of our solar system*.
In: <https://astronomy.com/news/2021/08/mysteries-of-the-oort-cloud-at-the-edge-of-our-solar-system> [online]. 5. 8. 2021. [cit. 22. 1. 2022].
Dostupné z: <https://astronomy.com>.
- [247] THAKUR V., *What Is The Kuiper Belt?*
In: <https://www.scienceabc.com/nature/universe/what-is-the-kuiper-belt.html> [online].
17. 1. 2022. [cit. 22. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.scienceabc.com>.
- [248] MARS K., *955 Years Ago: Halley's Comet and the Battle of Hastings*.
In: <https://www.nasa.gov/feature/955-years-ago-halley-s-comet-and-the-battle-of-hastings>
[online]. 14. 10. 2021. [cit. 24. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov>.
- [249] SCHULTZ K., *Is Seeing a Comet Like Halley's a Once-in-a-Lifetime Event?*
In: <https://www.scientificamerican.com/gallery/is-seeing-a-comet-like-halley-s-a-once-in-a-lifetime-event/> [online]. 11. 6. 2014. [cit. 24. 1. 2022].
Dostupné z: <https://www.scientificamerican.com>.
- [250] IRIZARRY E., *Comet NEOWISE, the best comet of 2020*.
In: <https://earthsky.org/space/how-to-see-comet-c2020-f3-neowise/> [online]. 27. 7. 2020.
[cit. 24. 1. 2022]. Dostupné z: <https://earthsky.org>.
- [251] GEMBEK M., *Kometa NEOWISE výrazně jasná*.
In: <https://www.astro.cz/clanky/slunceni-soustava/kometa-neowise-vyrazne-jasna.html>
[online].]. 2. 7. 2020. [cit. 24. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.astro.cz>.
- [252] BACOVSKÝ V., *Jak fotit a pozorovat kometu Neowise?*
In: <https://krasnesvetlo.cz/blog/2020/07/14/jak-fotit-a-pozorovat-kometu-neowise/>
[online].]. 14. 7. 2020. [cit. 24. 1. 2022]. Dostupné z: <https://krasnesvetlo.cz>.
- [253] MAJER D., *Rosetta - poprvé na kometě*. In: <https://youtu.be/xDHXaxsYuKY> [online].
5. 3. 2019. [cit. 24. 1. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.

- [254] *Where is Rosetta?* In: https://sci.esa.int/where_is_rosetta/ [online]. 2022. [cit. 24. 1. 2022]. Dostupné z: <http://www.esa.int>.
- [255] *Comet 67P/C-G vital statistics.*
In: <https://sci.esa.int/web/rosetta/-/55304-comet-67p-vital-statistics> [online]. 25. 1. 2015. [cit. 24. 1. 2022]. Dostupné z: <http://www.esa.int>.
- [256] *Inside Rosetta's comet.* In: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Rosetta/Inside_Rosetta_s_comet [online]. 4. 2. 2016. [cit. 24. 1. 2022].
Dostupné z: <http://www.esa.int>.
- [257] *The amazing adventures of Rosetta and Philae.*
In: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2016/12/The_amazing_adventures_of_Rosetta_and_Philae [online]. 23. 12. 2016. [cit. 24. 1. 2022].
Dostupné z: <http://www.esa.int>.
- [258] *Solar System.* In: <https://www.solarsystemscope.com/> [online]. 2022. [cit. 24. 1. 2022].
Dostupné z: <https://www.solarsystemscope.com/>.
- [259] EINSTEIN A., *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*
Annalen der Physik 18 (1905), 639-641.
- [260] ŠOLC M., *Fyzika hvězd a vesmíru: učebnice pro volitelný předmět seminář a cvičení z fyziky ve 4. ročníku gymnázia.* Vyd. 3. Praha: SPN, 1988.
- [261] KULHÁNEK P., *Příběh umírající hvězdy Betelgeuse.*
In: <https://youtu.be/ZfdoKXs7FUY> [online]. 30. 12. 2021. [cit. 28. 1. 2022].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [262] *Fusion on the Sun.* In: <https://www.euro-fusion.org/fusion/fusion-on-the-sun/> [online]. 2022. [cit. 25. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.euro-fusion.org>.
- [263] BÁRTA M., *Sluneční radioastronomie v éře ALMA.*
In: <https://www.pozorovanislunce.eu/odborne-clanky/slunecni-radioastronomie-v-ere-alma.html> [online]. 30. 12. 2013. [cit. 25. 1. 2022].
Dostupné z: <https://www.pozorovanislunce.eu>.
- [264] WAGNER V., *Záření gama – okno do nejenergetičtějších částí vesmíru.*
In: <http://hp.ujf.cas.cz/wagner/popclan/neutrina/gamaastropis.htm> [online]. 20. 8. 2010. [cit. 25. 1. 2022]. Dostupné z: <http://www.ujf.cas.cz/cs/>.
- [265] In: https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/science/Sun-Wavelength-Chart.html [online]. 2022. [cit. 25. 1. 2022]. Dostupné z: <http://www.esa.int>.
- [266] In: <https://glossary.periodni.com/dictionary.php?page=4&en=electromagnetic+wave> [online]. 20. 8. 2018. [cit. 25. 1. 2022]. Dostupné z: <https://glossary.periodni.com>.
- [267] NAVRÁTIL L., ROSINA J. et al., *Medicínská biofyzika.* Vyd. 1. Praha: Grada, 2005. 524 s. ISBN 80-247-1152-4.
- [268] *Heat Transfer from the Human Body.*
In: <https://engineer-educators.com/topic/3-heat-transfer-from-the-human-body/> [online]. 2022. [cit. 25. 1. 2022]. Dostupné z: <https://engineer-educators.com>.
- [269] *What is Color Temperature?* In: <https://brandon-lighting.com/color-temperature> [online]. 2022. [cit. 25. 1. 2022]. Dostupné z: <https://brandon-lighting.com>.

- [270] GORJIAN S., *Photovoltaic Solar Energy Conversation*.
In: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/solar-spectrum> [online]. 2020.
[cit. 26. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com>.
- [271] *Fraunhoferovy čáry*.
In: <https://www.pozorovanislunce.eu/vykladovy-slovnicek/fraunhoferovy-cary.html>
[online]. 2022. [cit. 26. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.pozorovanislunce.eu>.
- [272] *How to Measure Light*. In: <https://www.lightology.com/index.php?module=technology-human-centric-measure-light> [online]. 2022. [cit. 26. 1. 2022].
Dostupné z: <https://www.lightology.com>.
- [273] MAIEROVÁ L., *Lidé a jejich světelné prostředí*. In: <https://youtu.be/L0qh1IeVKQ>
[online]. 7. 1. 2019. [cit. 26. 1. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [274] KLEIN C., *A Perfect Solar Superstorm: The 1859 Carrington Event*.
In: <https://www.history.com/news/a-perfect-solar-superstorm-the-1859-carrington-event>
[online]. 22. 8. 2018. [cit. 26. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.history.com>.
- [275] DRUCKMÜLLER M., *Vyřešené i nevyřešené záhady sluneční koróny*.
In: <https://youtu.be/qzlluf1ze58> [online]. 21. 5. 2015. [cit. 26. 1. 2022].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [276] MORINA D., *Probability estimation of a Carrington-like geomagnetic storm*.
In: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-38918-8> [online]. 20. 2. 2019.
[cit. 26. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.nature.com>.
- [277] *Struktura Slunce*. In: <https://pozorovanislunce.eu/slunce/struktura-slunce.html>
[online]. 2022. [cit. 26. 1. 2022]. Dostupné z: <https://pozorovanislunce.eu>.
- [278] *Sluneční oddělení*.
In: <http://www.asu.cas.cz/cz/veda-a-vyzkum/vedecka-oddeleni/slunecni-oddeleni>
[online]. 2022. [cit. 26. 1. 2022]. Dostupné z: <http://www.asu.cas.cz>.
- [279] *Nineteen ALMA antennas on the Chajnantor plateau*.
In: <https://www.eso.org/public/images/eso1137g/> [online]. 2022. [cit. 26. 1. 2022].
Dostupné z: <https://www.eso.org>.
- [280] *Solar Orbiter připraven na vědu koronaviru navzdory*.
In: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Czech_Republic/Solar_Orbiter_pripaven_na_vedu_koronaviru_navzdory [online]. 29. 6. 2020. [cit. 26. 1. 2022].
Dostupné z: <https://www.esa.int>.
- [281] *Ke Slunci míří unikátní sonda. Česko na ní ukazuje, že se vesmíru nebojí*.
In: https://www.idnes.cz/technet/vesmir/solar-orbiter-sonda-vesmir-slunce-esa-cesko.A200206_113200_tec_vesmir_vse [online]. 10. 2. 2020. [cit. 26. 1. 2022].
Dostupné z: <https://www.idnes.cz>.
- [282] MAJER D., *Solar orbiter ukazuje své možnosti*.
In: <https://kosmonautix.cz/2020/12/solar-orbiter-ukazuje-sve-moznosti/> [online].
18. 12. 2020. [cit. 26. 1. 2022]. Dostupné z: <https://kosmonautix.cz/>.
- [283] In: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_Orbiter [online]. 2022. [cit. 26. 1. 2022].
Dostupné z: <https://en.wikipedia.org>.
- [284] *Solar and Lunar Eclipses Worldwide – 2020–2029*.
In: <https://www.timeanddate.com/eclipse/list.html?starty=2020> [online]. 2022.
[cit. 26. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.timeanddate.com>.

- [285] *Great North American Eclipse (Total Solar Eclipse)*.
In: <https://www.timeanddate.com/eclipse/solar/2024-april-8> [online]. 2022.
[cit. 26. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.timeanddate.com>.
- [286] SUCHAN P., *Tiskové prohlášení České astronomické společnosti a Astronomického ústavu AV ČR*. In: <http://www1.asu.cas.cz/cesky/new/tisk.82.html> [online]. 24. 3. 2006.
[cit. 26. 1. 2022]. Dostupné z: <http://www.asu.cas.cz/>.
- [287] *Úplné zatmění Slunce*.
In: <https://pozorovanislunce.eu/vykladovy-slovnicek/uplne-zatmeni-slunce.html>
[online]. 2022. [cit. 26. 1. 2022]. Dostupné z: <https://pozorovanislunce.eu>.
- [288] HORÁLEK P., *Eclipse Air Traffic*. In: <https://www.petrhoralek.com/?p=22916>
[online]. 2022. [cit. 26. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.petrhoralek.com>.
- [289] HORÁLEK P., *Total Solar Eclipse on Dec. 4, 2021 from 40 000 Feet*.
In: <https://youtu.be/a9r8dydoyPk> [online]. 17. 12. 2021. [cit. 26. 1. 2022].
Dostupné z: <https://www.youtube.com>.
- [290] MULLER D., *Total Solar Eclipse (2017)*. In: <https://youtu.be/G10m2ZZRH4U> [online].
22. 8. 2017. [cit. 26. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.youtube.com>.
- [291] SINGH, S., *Velká Fermatova věta: dramatická historie řešení největšího matematického problému*. Praha: Argo, 2010. Aliter (Argo: Dokořán). ISBN 978-80-7363-315-8.
- [292] *Síň slávy – Miloslav Druckmüller*.
In: <https://www.astro.cz/spolecnost/sin-slavy/miloslav-druckmuller.html> [online]. 2022.
[cit. 26. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.astro.cz>.
- [293] HORÁLEK P., *Český matematik ukazuje světu nejostřejší Slunce!*
In: <https://www.astro.cz/clanky/multimedia/cesky-matematik-ukazuje-svetu-nejostrejsi-slunce.html> [online]. 23. 12. 2015. [cit. 26. 1. 2022].
Dostupné z: <https://www.astro.cz>.
- [294] ASWORTH W. B., *Scientist of the Day - Pierre-Simon Laplace*.
In: <https://www.lindahall.org/pierre-simon-laplace/> [online]. 23. 1. 2021. [cit. 26. 1. 2022].
Dostupné z: <https://www.lindahall.org>.
- [295] *The Distances of the Stars: Resolving Long-standing Mysteries About the First Parallaxes in Astronomy*. In: <https://scitechdaily.com/the-distances-of-the-stars-resolving-long-standing-mysteries-about-the-first-parallaxes-in-astronomy/> [online]. 2022.
[cit. 26. 1. 2022]. Dostupné z: <https://scitechdaily.com>.
- [296] *Měříme vesmír: kam až to jde s paralaxou*. In: <https://www.scienceworld.cz/neziva-priroda/merime-vesmir-kam-az-to-jde-s-paralaxou-829/> [online]. 15. 8. 2014. [cit. 26. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.scienceworld.cz>.
- [297] FRENCH L. M., *John Goodricke, Edward Pigott, and Their Study of Variable Stars*.
In: https://www.researchgate.net/publication/224861563_John_Goodricke_Edward_Pigott_and_Their_Study_of_Variable_Stars [online]. 2012. [cit. 26. 1. 2022].
Dostupné z: <https://www.researchgate.net>.
- [298] BRUNETON J. P., *Notes de cours, gravitation relativiste et cosmologie*.
In: https://www.researchgate.net/figure/Definition-du-parsec-AU-Astronomical-Unit-en-anglais_fig1.236661023 [online]. 2012. [cit. 28. 1. 2022].
Dostupné z: <https://www.researchgate.net>.

- [299] MALLAMA A., HILTON J. L., *Computing Apparent Planetary Magnitudes for The Astronomical Almanac*. In: <https://arxiv.org/abs/1808.01973> [online]. 6. 8. 2018. [cit. 28. 1. 2022]. Dostupné z: <https://arxiv.org>.
- [300] FALCHI F. *The New World Atlas of Artificial Sky Brightness*. In: <https://cires.colorado.edu/Artificial-light> [online]. 2022. [cit. 29. 1. 2022]. Dostupné z: www.cires.colorado.edu.
- [301] *Vybavení doporučené pro astronomická pozorování*. In: <https://www.astro.cz/rady/pozorovani-oblohy/vybaveni-doporucene-pro-astronomicka-pozorovani.html> [online]. 2022. [cit. 29. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.astro.cz>.
- [302] *Astronomický kurz*. In: <https://www.hvezdarna.cz/astrokurz/> [online]. 2022. [cit. 29. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.hvezdarna.cz>.
- [303] In: <https://www.lindahall.org/ejnar-hertzsprung/> [online]. 8. 10. 2019. [cit. 29. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.lindahall.org>.
- [304] *Interaktivní Hertzsprungův-Russellův diagram*. In: <http://hvezdy.astro.cz/diagram/23-interaktivni-hertzsprunguv-russelluv-diagram> [online]. 2022. [cit. 31. 1. 2022]. Dostupné z: <http://hvezdy.astro.cz>.
- [305] In: <https://stargazerslounge.com/topic/188649-quite-a-nice-hertzsprung-russell-diagram/> [online]. 18. 6. 2013. [cit. 31. 1. 2022]. Dostupné z: <https://stargazerslounge.com>.
- [306] *Types of Stars*. In: <https://astrobackyard.com/types-of-stars/> [online]. 2022. [cit. 31. 1. 2022]. Dostupné z: <https://astrobackyard.com>.
- [307] FARINA D., *The Life and Death of Stars: White Dwarfs, Supernovae, Neutron Stars, and Black Holes*. In: <https://youtu.be/4xIQGbYur9Q> [online]. 24. 8. 2018. [cit. 31. 1. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [308] JOYCE M. et al., *Standing on the Shoulders of Giants: New Mass and Distance Estimates for Betelgeuse through Combined Evolutionary, Asteroseismic, and Hydrodynamic Simulations with MESA*. In: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/abb8db> [online]. 13. 10. 2010. [cit. 31. 1. 2022]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org>.
- [309] *How Does Our Sun Compare With Other Stars?* In: <https://spaceplace.nasa.gov/sun-compare/en/> [online]. 2022. [cit. 31. 1. 2022]. Dostupné z: <https://spaceplace.nasa.gov>.
- [310] *Size comparison: Betelgeuse and the Sun*. In: <https://www.eso.org/public/images/potw1726b/> [online]. 26. 6. 2017. [cit. 31. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.eso.org>.
- [311] EVETT H., *Universe Size Comparison 3D*. In: <https://youtu.be/i93Z7zljQ7I> [online]. 11. 11. 2017. [cit. 31. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.youtube.com>.
- [312] DETTMER P., *The Largest Star in the Universe – Size Comparison*. In: <https://youtu.be/3mnSDifDSxQ> [online]. 22. 9. 2020. [cit. 31. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.youtube.com>.
- [313] FARINA D., *Professor Dave Explains: Astronomy/Astrophysic*. In: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLybg94GvOJ9E9BcCODbTNw2xU4b1cWSi6> [online]. 2017-2020. [cit. 31. 1. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.

- [314] MARČIŠOVSKÝ M., *Jaderná energetika a hvězdy hlavní posloupnosti*. In: <https://youtu.be/veCBebRwToM> [online]. 7. 8. 2020. [cit. 31. 1. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [315] KULHÁNEK P., *Hvězdní rakve*. In: https://youtu.be/mZBt-KGp_YI [online]. 31. 8. 2020. [cit. 31. 1. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [316] KULHÁNEK P., *Blýskání, aneb, Třináctero vyprávění o plazmatu*. Praha: AGA, 2011. ISBN 978-80-904582-3-9.
- [317] *Vznik a vývoj hvězd*. In: <https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/hvezdy/evolution.php> [online]. 2022. [cit. 31. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz>.
- [318] GARNER R., *Messier 16 (The Eagle Nebula)*. In: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/messier-16-the-eagle-nebula/> [online]. 19. 10. 2017. [cit. 31. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov>.
- [319] PALOUŠ J., *Tvorba hvězd v galaxiích*. In: <https://youtu.be/TPh65Y8GHNE> [online]. 30. 12. 2021. [cit. 2. 2. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [320] MATOUŠ B., *Bílí trpaslíci*. In: https://youtu.be/eC_JPjUa6o [online]. 19. 3. 2020. [cit. 2. 2. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [321] MIKULÁŠEK Z., *O životě hvězd*. In: <https://youtu.be/htn941qPEu4> [online]. 13. 6. 2021. [cit. 2. 2. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [322] FRIEDLANDER B., *Giant red stars may heat frozen worlds into habitable planets*. In: <https://exoplanets.nasa.gov/news/1349/giant-red-stars-may-heat-frozen-worlds-into-habitable-planets/> [online]. 17. 5. 2016. [cit. 2. 2. 2022]. Dostupné z: <https://exoplanets.nasa.gov/>.
- [323] *Mlhovina Helix*. In: <https://www.eso.org/public/czechrepublic/images/eso0907a/> [online]. 25. 2. 2009. [cit. 2. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.eso.org>.
- [324] ROZEHNAL J., *Když vybuchne supernova*. In: <https://youtu.be/pTrMeUGw2L0> [online]. 11. 11. 2021. [cit. 2. 2. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [325] ROZEHNAL J., *Když vybuchne supernova*. In: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2012_09_bum.php [online]. 09/2012. [cit. 2. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz>.
- [326] *The Crab Nebula in Taurus*. In: <https://www.eso.org/public/images/eso9948f/> [online]. 17. 11. 1999. [cit. 2. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.eso.org>.
- [327] BETZ E., *When Betelgeuse goes supernova, what will it look like from Earth?* In: <https://astronomy.com/news/2020/02/when-betelgeuse-goes-supernova-what-will-it-look-like-from-earth> [online]. 14. 2. 2020. [cit. 2. 2. 2022]. Dostupné z: <https://astronomy.com>.
- [328] *Supernova 1994D in the galaxy NGC 4526*. In: <https://www.eso.org/public/czechrepublic/images/ann11014a/?lang> [online]. 31. 3. 2011. [cit. 2. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.eso.org>.
- [329] SRBA J., *Astronomové poprvé identifikovali těžký chemický prvek vzniklý při kolizi neutronových hvězd*. In: <https://www.astro.cz/clanky/vzdaleny-vesmir/astronomove-poprve-identifikovali-tezky-chemicky-prvek-vznikly-pri-kolizi-neutronovych-hvezd.html> [online]. 29. 10. 2019. [cit. 2. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.astro.cz>.

- [330] MIHULKA S., *Galaktický zlatý důl objasňuje původ nejtěžších prvků vesmíru.*
In: <https://www.osel.cz/8871-galakticky-zlaty-dul-objasnuje-puvod-nejtezsich-prvku-vesmiru.html> [online]. 1. 6. 2016. [cit. 2. 2. 2022].
Dostupné z: <https://www.osel.cz>.
- [331] *Why are elements with even atomic number more abundant?*
In: <https://physics.stackexchange.com/questions/340447/why-are-elements-with-even-atomic-number-more-abundant> [online]. 20. 6. 2017. [cit. 2. 2. 2022].
Dostupné z: <https://physics.stackexchange.com>.
- [332] MAE Y., *Neutron Multiple Number as a Factor Ruling Both the Abundance and Some Material Properties of Elements.*
In: https://www.researchgate.net/publication/318075652_Neutron_Multiple_Number_as_a_Factor_Ruling_Both_the_Abundance_and_Some_Material_Properties_of_Elements [online]. 06/2017. [cit. 2. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net>.
- [333] DETTMER P., *The Last Light Before Eternal Darkness – White Dwarfs & Black Dwarfs.*
In: <https://youtu.be/qsN1LglrX9s> [online]. 4. 5. 2017. [cit. 3. 2. 2022].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [334] MENTZL R., *Nové standardní svíčky.*
In: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2021_04_neu.php [online]. 04/2021. [cit. 3. 2. 2022].
Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz>.
- [335] KULHÁNEK P., *Jsou supernovy Ia kvalitními standardními svíčkami?*
In: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2012_04_sni.php [online]. 04/2012. [cit. 3. 2. 2022].
Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz>.
- [336] KRAUSS L., *Vesmír z ničeho.* Praha: Knížní klub, 2013. ISBN 978-80-242-4145-6
- [337] MIKULÁŠEK Z., *Za blankytem neutronových hvězd.*
In: <https://youtu.be/48xIWY8XkFM> [online]. 22. 5. 2020. [cit. 3. 2. 2022].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [338] KONAR S., *Gravity Defied (from potato asteroids to magnetised neutron stars) IV. Neutron Stars (dead stars of the second kind).*
In: https://www.researchgate.net/publication/317230660_Gravity_Defied_from_potato_asteroids_to_magnetised_neutron_stars_IV_Neutron_Stars_dead_stars_of_the_second_kind [online]. 05/2017. [cit. 3. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net>.
- [339] SUTTER P., *How neutron star collisions flooded Earth with gold and other precious metals.* In: <https://www.space.com/neutron-star-collisions-gave-earth-precious-metals> [online]. 27. 9. 2021. [cit. 3. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.space.com>.
- [340] PODOLSKÝ J., *Kosmické poselství gravitačních vln.*
In: <https://youtu.be/DWO7vmVwzmE> [online]. 3. 11. 2020. [cit. 3. 2. 2022].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [341] *Nanosatelit detekoval první záblesk gama záření.*
In: <https://www.em.muni.cz/veda-a-vyzkum/14244-nanosatelit-tymu-norberta-wernera-z-mu-detekoval-prvni-zablesky-gama-zareni> [online]. 13. 8. 2021. [cit. 3. 2. 2022].
Dostupné z: <https://www.em.muni.cz>.
- [342] *Malý velký nanosatelit. GRBAlpha umí zachytit gama záblesky, i když je to práce pro větší stroje.* In: <https://plus.rozhlas.cz/maly-velky-nanosatelit-grbalph-umi-zachytit-gama-zablesky-i-kdyz-je-prace-pro-8581936> [online]. 22. 9. 2021. [cit. 3. 2. 2022].
Dostupné z: <https://plus.rozhlas.cz>.

- [343] DETTMER P., *What If You Fall into a Black Hole?* In: <https://youtu.be/QqsLTNkzvaY> [online]. 27. 4. 2021. [cit. 3. 2. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [344] HAWKING S., *Stručná historie času: od velkého třesku k černým díram*. Praha: Argo, 2015. ISBN 978-80-257-1527-7.
- [345] In: <https://besteducationmanagement.files.wordpress.com/2019/04/black-holes-infographic-v2.jpg?w=875&h=&zoom=2> [online]. 2022. [cit. 3. 2. 2022]. Dostupné z: <https://besteducationmanagement.wordpress.com/>.
- [346] *NEZkreslená věda – Černé díry*. In: <https://youtu.be/4KI7oK7MNw4> [online]. 8. 3. 2021. [cit. 3. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.youtube.com>
- [347] DETTMER P., *The Largest Black Hole in the Universe - Size Comparison*. In: <https://youtu.be/0FH9cgRhQ-k> [online]. 3. 8. 2021. [cit. 3. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.youtube.com>.
- [348] MURDIN P., *ajemství vesmíru: jak jsme objevovali kosmos*. Praha: Argo, 2009. ISBN 978-80-257-0159-1.
- [349] *Černé díry*. In: https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/hvezdy/black_holes.php [online]. 2022. [cit. 3. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz>.
- [350] In: <https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20210629b> [online]. 2022. [cit. 3. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.ligo.caltech.edu>.
- [351] DETTMER P., *Why Black Holes Could Delete The Universe – The Information Paradox*. In: <https://youtu.be/yWO-cvGETRQ> [online]. 24. 8. 2021. [cit. 3. 2. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [352] HSU C., *Black holes don't erase information, scientists say*. In: <https://phys.org/news/2015-04-black-holes-dont-erase-scientists.html> [online]. 2. 4. 2015. [cit. 3. 2. 2022]. Dostupné z: <https://phys.org>.
- [353] BAIS S., *Rovnice: symboly poznání*. Praha: Dokořán, 2009. ISBN 978-80-7363-228-1.
- [354] PODOLSKÝ J., *Einsteinova speciální relativita*. In: <https://youtu.be/B0c3tAYuV9s> [online]. 5. 4. 2018. [cit. 3. 2. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [355] *NEZkreslená vědě – O teorii relativity*. In: <https://youtu.be/ZmpbBoYoA18> [online]. 24. 1. 2017. [cit. 4. 2. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [356] FARINA D., *Professor Dave Explains: Modern Physics*. In: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLybg94GvOJ9FAFBqQGf5-4YbfKpWbJtGn> [online]. 2017-2020. [cit. 4. 2. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [357] GAMOW G., *Pan Tompkins v říši divů*. Praha: Mladá fronta, 1986.
- [358] PODOLSKÝ J., *Einstein v Praze*. In: https://youtu.be/RPGebgA_qSA [online]. 19. 10. 2015. [cit. 5. 2. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [359] DVOŘÁK P., *Hledáme hranice vesmíru*. In: <https://youtu.be/XEyQTsdevL8> [online]. 14. 5. 2020. [cit. 5. 2. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [360] GRYGAR J., *Zatmění Slunce v květnu 1919 a relativita. Pozorování, které rozhodlo o přijetí Einsteinovy teorie*. In: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/1999/cislo-7/zatmeni-slunce-kvetnu-1919-relativita.html> [online]. 5. 7. 1999. [cit. 5. 2. 2022]. Dostupné z: <https://vesmir.cz>.

- [361] *How different is gravitational lensing from optical lensing?*
In: <https://www.quora.com/How-different-is-gravitational-lensing-from-optical-lensing> [online]. 2022. [cit. 5. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.quora.com>.
- [362] *A new way to visualize General Relativity.* In: <https://youtu.be/wrwgIjBUYVc> [online]. 8. 3. 2021. [cit. 5. 2. 2022]. Dostupné z: www.youtube.com.
- [363] RAFFAY A., *NASA's new Black Hole Simulation is awe-inspiring.*
In: <https://www.techjuice.pk/nasas-new-black-hole-simulation-is-awe-inspiring/> [online]. 27. 9. 2021. [cit. 5. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.techjuice.pk>.
- [364] MULLER D., *How to Understand the Black Hole Image.*
In: <https://youtu.be/zUyH3XhpLTo> [online]. 9. 4. 2019. [cit. 5. 2. 2022].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [365] LANDAU E., *Black Hole Image Makes History; NASA Telescopes Coordinated Observations.*
In: https://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/news/black-hole-image-makes-history [online]. 10. 4. 2019. [cit. 5. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov>.
- [366] TODD I., *How we photographed the first image of a black hole.*
In: <https://www.skyatnightmagazine.com/space-science/m87-black-hole-photograph-how/> [online]. 19. 5. 2021. [cit. 5. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.skyatnightmagazine.com/>.
- [367] WAGNER V., *Přesnost atomových hodin, GPS a teorie relativity.*
In: <http://hp.ujf.cas.cz/wagner/popclan/gps/gps.html> [online]. 19. 1. 2008.
[cit. 5. 2. 2022]. Dostupné z: <http://hp.ujf.cas.cz/wagner/>.
- [368] GIBNEY E., *Belgian priest recognized in Hubble-law name change.*
In: <https://www.nature.com/articles/d41586-018-07234-y> [online]. 30. 10. 2020.
[cit. 5. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.nature.com/>.
- [369] ELIZALDE E., *Reasons in Favor of a Hubble-Lemaître-Slipher's (HLS) Law.*
In: <https://www.proquest.com/docview/2550265368> [online]. 2019. [cit. 5. 2. 2022].
Dostupné z: <https://www.proquest.com>.
- [370] BUCHLER M., *Physics of the cosmic microwave background anisotropy.*
In: https://www.researchgate.net/publication/271140622_Physics_of_the_cosmic_microwave_background_anisotropy [online]. 14. 5. 2020. [cit. 5. 2. 2022].
Dostupné z: <https://www.researchgate.net>.
- [371] KULHÁNEK P., *Fenomenální sonda Planck.*
In: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2013_41_pla.php [online]. 2013. [cit. 6. 2. 2022].
Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz>.
- [372] WOOD C., *ESA's Planck reveals spectacular new map of the early Universe.*
In: <https://newatlas.com/esa-planck-cmb-map/26754/> [online]. 21. 3. 2013.
[cit. 6. 2. 2022]. Dostupné z: <https://newatlas.com>.
- [373] HARWIT M., *Astrophysical Concepts.* Springer-Verlag New York Inc. 2006.
- [374] KULHÁNEK P., *Jaký je náš vesmír - milníky současné kosmologie.*
In: <https://youtu.be/hCpe4BqMKpw> [online]. 26. 10. 2012. [cit. 6. 2. 2022].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [375] REES M. J., *Pouhých šest čísel: skryté síly utvářející vesmír.* Praha: Academia, 2004. Mistři vědy. ISBN 80-200-1152-8.

- [376] WEINBERG S., *První tři minuty: moderní pohled na počátek vesmíru*. Praha: Mladá fronta, 1998. Kolumbus. ISBN 80-204-0700-6.
- [377] FARINA D., *The Standard Model of Particle Physics*.
In: <https://youtu.be/2ynMmhqVGx4> [online]. 5. 6. 2017. [cit. 6. 2. 2022].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [378] *Heavy-ion Collision Producing Quark-gluon Plasma*.
In: https://www.nsf.gov/news/mmg/mmg_disp.jsp?med_id=72874 [online]. 26. 9. 2013.
[cit. 6. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.nsf.gov>.
- [379] *Restarting the LHC: Why 13 TeV?*
In: <https://home.cern/science/engineering/restarting-lhc-why-13-tev> [online]. 2022.
[cit. 6. 2. 2022]. Dostupné z: <https://home.cern/>.
- [380] *Galilean and Keplerian telescopes*.
In: <https://www.aao.org/image/galilean-keplerian-telescopes> [online]. 2022.
[cit. 8. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.nsf.gov>.
- [381] *Triedr*. In: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Triedr> [online]. 2022. [cit. 8. 2. 2022].
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org>.
- [382] *Dalekohled*. In: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Dalekohled> [online]. 2022. [cit. 8. 2. 2022].
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org>.
- [383] GINGERICH O., *The General History of Astronomy: Volume 4. Astrophysics and Twentieth-Century Astronomy to 1950: Part A*. ISBN: 9780521135429.
- [384] *Visual Observing With The 40-Inch Yerkes Refractor*.
In: <http://www.theskyscrapers.org/visual-observing-with-the-40-inch-yerkes-refractor>
[online]. 2019. [cit. 8. 2. 2022]. Dostupné z: <http://www.theskyscrapers.org/>.
- [385] PARK W. et al., *Transformable Reflective Telescope for Optical Testing and Education*.
In: https://www.researchgate.net/figure/Optical-layout-of-a-Newtonian-b-Cassegrain-and-c-Gregorian-telescope-PM_fig1_341504091 [online]. 2020. [cit. 8. 2. 2022].
Dostupné z: <https://www.researchgate.net>.
- [386] BARDON Z., *Dalekohledy města andělů*.
In: <https://www.astro.cz/clanky/ostatni/dalekohledy-mesta-andelu.html> [online].
14. 6. 2021. [cit. 8. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.astro.cz>.
- [387] *Hale Telescope, Palomar Observatory*.
In: <https://www.jpl.nasa.gov/images/pia13033-hale-telescope-palomar-observatory>
[online]. 14. 4. 2020. [cit. 8. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.jpl.nasa.gov>.
- [388] *Starry Nights in the Canary Islands*.
In: <https://www.nytimes.com/2016/05/08/travel/canary-islands-astronomy-stargazing.html> [online]. 5. 5. 2016. [cit. 8. 2. 2022].
Dostupné z: <https://www.nytimes.com>.
- [389] *Přístroje pro dalekohled ELT*.
In: <https://www.eso.org/public/czechrepublic/images/elt-instruments-rectangle/> [online].
26. 5. 2017. [cit. 8. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.eso.org>.
- [390] *Diffraction-limited system*. In: https://en.wikipedia.org/wiki/Diffraction-limited_system
[online]. 2022. [cit. 8. 2. 2022]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/>.

- [391] *The Electromagnetic Spectrum*.
In: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_Physics_\(Boundless\)/23%3A_Electromagnetic_Waves/23.1%3A_The_Electromagnetic_Spectrum](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_Physics_(Boundless)/23%3A_Electromagnetic_Waves/23.1%3A_The_Electromagnetic_Spectrum) [online]. 5. 11. 2020. [cit. 8. 2. 2022]. Dostupné z: <https://phys.libretexts.org>.
- [392] *Nekrolog za Arecibo (1963–2020)*.
In: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2020_46_are.php [online]. 2020. [cit. 8. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz>.
- [393] *Extremely large telescope*. In: https://en.wikipedia.org/wiki/Extremely_large_telescope [online]. 2022. [cit. 8. 2. 2022]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/>.
- [394] PŘIBYL T. a WERNER N., *30 let Hubbleova komsického dalekohledu*.
In: <https://youtu.be/-uVLNiO3Adc> [online]. 24. 4. 2020. [cit. 12. 2. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [395] GARNER R., *Hubble Space Telescope*.
In: <https://www.nasa.gov/content/goddard/hubble-space-telescope-optics-system> [online]. 16. 12. 2021. [cit. 12. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov>.
- [396] *Webb vs Hubble Telescope*.
In: <https://www.jwst.nasa.gov/content/about/comparisonWebbVsHubble.html> [online]. 16. 12. 2021. [cit. 12. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.jwst.nasa.gov>.
- [397] *A View of the Pillars of Creation in Visible and in Near-Infrared Light*.
In: <https://hubblesite.org/contents/media/images/2015/01/3474-Image.html> [online]. 5. 1. 2015. [cit. 12. 2. 2022]. Dostupné z: <https://hubblesite.org>.
- [398] *The Hubble eXtreme Deep Field*. In: <https://esahubble.org/images/heic1214a/> [online]. 25. 9. 2012. [cit. 12. 2. 2022]. Dostupné z: <https://esahubble.org>.
- [399] LAUER T. R. et al., *New Horizons Observations of the Cosmic Optical Background*. 01/2021, The Astrophysical Journal, Volume 906, Issue 2
- [400] MAJER D., *O teleskopu Jamese Webba*. In: <https://youtu.be/U3BHmHPAUhs> [online]. 7. 11. 2021. [cit. 12. 2. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [401] *Webb's Mirrors*. In: <https://webb.nasa.gov/content/observatory/ote/mirrors/index.html> [online]. 2022. [cit. 12. 2. 2022]. Dostupné z: <https://webb.nasa.gov>.
- [402] *The \$10 billion James Webb Space Telescope has to unfold itself in space — a nail-biting maneuver NASA's never attempted*. In: <https://www.businessinsider.com/nasa-james-webb-space-telescope-to-unfold-after-launch-2021-12> [online]. 21. 12. 2021. [cit. 12. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.businessinsider.com>.
- [403] *Webb Innovations*.
In: <https://www.jwst.nasa.gov/content/about/innovations/coating.html> [online]. 2022. [cit. 12. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.jwst.nasa.gov>.
- [404] HAVRÁNEK M., *Dalekohled Jamese Webba*. In: https://youtu.be/IA_6vTubY4U [online]. 17. 9. 2021. [cit. 12. 2. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [405] *Plato*. In: <https://sci.esa.int/web/plato> [online]. 2022. [cit. 12. 2. 2022]. Dostupné z: <https://sci.esa.int>.
- [406] DVOŘÁK P., *Surfování na gravitačních vlnách*. In: <https://youtu.be/MIUFsD-ILJs> [online]. 25. 6. 2020. [cit. 12. 2. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.

- [407] MULLER D., *The Absurdity of Detecting Gravitational Waves*.
In: <https://youtu.be/iphcyNWFD10> [online]. 5. 1. 2017. [cit. 12. 2. 2022].
Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [408] *Searching for weak gamma-ray bursts paired with gravitational-wave events*.
In: <https://www.ligo.org/science/Publication-O2GWGBM> [online]. 2. 3. 2020.
[cit. 12. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.ligo.org>.
- [409] CATTANI M. S. D., BASSALO J. M. F., *Gravitational waves observation: Brief comments*.
In: https://www.researchgate.net/publication/308958121_Gravitational_waves_observation_Brief_comments [online]. 2016. [cit. 12. 2. 2022].
Dostupné z: <https://www.researchgate.net>.
- [410] GEROSA D., MOORE C. J., *Recoil detectives: searching for black hole kicks using gravitational waves*. In: <https://astrobites.org/2018/03/08/recoil-detectives-searching-for-black-hole-kicks-using-gravitational-waves/> [online]. 8. 3. 2018. [cit. 13. 2. 2022].
Dostupné z: <https://astrobites.org>.
- [411] ABBOTT B. P. et al., *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*. Physical Review Letter, 2016, 116.
- [412] *Chandra X-ray Observatory*. In: <https://chandra.harvard.edu/> [online]. 2022.
[cit. 13. 2. 2022]. Dostupné z: <https://chandra.harvard.edu/>.
- [413] *IBEX*. In: https://www.nasa.gov/mission_pages/ibex/index.html [online]. 2022.
[cit. 13. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov>.
- [414] *Příprava mise Plato pokračuje, pomůže najít obyvatelné zóny ve vesmíru*.
In: <https://www.avcr.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/Priprava-mise-Plato-pokracuje-pomuze-najit-obyvatelne-zony-ve-vesmiru/> [online]. 15. 4. 2021. [cit. 13. 2. 2022].
Dostupné z: <https://www.avcr.cz>.
- [415] *První česká kosmická mise bude zkoumat možnosti těžby surovin na asteroidech*.
In: <https://www.mdcz.cz/Media/Media-a-tiskove-zpravy/Prvni-ceska-kosmicka-mise-bude-zkoumat-moznosti-te> [online]. 19. 7. 2021. [cit. 13. 2. 2022].
Dostupné z: <https://www.mdcz.cz>.
- [416] WERNER N., *Sedmikrásky online*. In: <https://youtu.be/u.lQpA42iVA> [online].
10. 1. 2021. [cit. 13. 2. 2022]. Dostupné z: <http://www.youtube.com>.
- [417] *Voyage 2050: Long-term planning of the ESA Science Programme - White Papers*.
In: <https://www.cosmos.esa.int/web/voyage-2050/white-papers> [online]. 17. 2. 2022.
[cit. 18. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.cosmos.esa.int>
- [418] BENEDIKT M., ZIMMERMANN F., *The Future Circular Collider study*.
In: <https://cerncourier.com/a/the-future-circular-collider-study/> [online]. 28. 3. 2014.
[cit. 13. 2. 2022]. Dostupné z: <https://cerncourier.com>.