

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

EXPERIMENTÁLNÍ A VÝPOČETNÍ VÝZKUM VLASTNOSTÍ SOLÍ PRO JADERNÉ REAKTORY TYPU MSR Z POHLEDU JADERNÝCH DAT

EXPERIMENTAL AND CALCULATIONAL SALTS' PROPERTIES INVESTIGATION FOR MSR REACTORS
FROM NUCLEAR DATA POINT-OF-VIEW

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Burian

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Karel Katovský, Ph.D.

BRNO 2021

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Jiří Burian

ID: 186418

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Experimentální a výpočetní výzkum vlastností solí pro jaderné reaktory typu MSR z pohledu jaderných dat

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zpracujte aktuální podrobnou rešerši na problematiku solných jaderných reaktorů.
2. Provedte podrobnou analýzu účinných průřezů a moderačních vlastností materiálů solných reaktorů.
3. Provedte integrální experimenty s chloridovými solemi a externím neutronovým zdrojem.
4. Srovnajte experimenty s výpočty.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- 1) T.J.Dolan: Molten Salt Reactors and Thorium Energy
- 2) SAMOFAR project results
- 3) nuSTEM project results
- 4) ARE, MSRE, MSBR a další

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: doc. Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Konzultant: Ing. Ondřej Šťastný

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

V současné době probíhá výzkum reaktorů s tekutými solemi. Počítá se s použitím solí na bázi chloru, které by byly dostupnější než známé sole fluoridové. Předmětem zkoumání jsou tedy nejenom chemické a fyzikální vlastnosti chloridových solí, ale také jejich chování v neutronovém poli a ovlivnění neutronové bilance uvnitř reaktoru. Mnohé vlastnosti lze určit také pomocí výpočtů, které čerpají informace z vědeckých jaderných knihoven (endf). Náplní této práce je porovnání významných jaderných knihoven mezi sebou navzájem, a také porovnat reakční rychlosti vypočítané z údajů knihoven s reakčními rychlostmi získané vlastním měřením. K náhledu bude popis nezbytných činností spojených s přípravou měření, návod na sestavení výpočetního programu NJOY a proces samotného měření. V závěru práce budou shrnuty výsledky a sdělení, která jaderná knihovna je svými hodnotami nejbliže k výsledkům z experimentů.

KLÍČOVÁ SLOVA: diplomová práce; endf; gama spektrometrie; HPGe; mikroskopický účinný průřez; NJOY; reakční rychlosti; reaktor s tekutým solemi; VUT

ABSTRACT

Nowadays there is research into molten salt reactors. The use of chlorine-based salts, which would be more available than known fluoride salts, is envisaged. The subject of research is not only the chemical and physical properties of chloride salts, but also their behavior in the neutron field and the influence of neutron balance inside the reactor. Many properties can also be determined using calculations that draw information from scientific nuclear libraries (endf). The purpose of this work is to compare important nuclear libraries with each other, and also to compare the reaction rates calculated from the library data with the reaction rates obtained by self-measurement. The preview will include a description of the necessary activities associated with the preparation of measurements, instructions for compiling the computer program NJOY and the process of the measurement itself. At the end of the work will be summarized the results and statements of which nuclear library is the closest in its values to the results of experiments.

KEY WORDS: thesis; endf; gamma spectroscopy; HPGe; cross section; NJOY; reaction rate molten salt reactors; BUT

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou semestrální práci na téma „Experimentální a výpočetní výzkum chování jaderného reaktoru s tekutými solemi z pohledu jaderných dat.“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Karlu Katovskému, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Další díky směřuje k panu Ing. Dušanovi Královi za aktivní pomoc a ochotu během praktického měření. V neposlední řadě bych si dovolil poděkovat panu Ing. Ondřeji Šťastnému za přípravu vstupů a zprostředkování výpočtu v programu MCNP.

Obsah

Seznam symbolů, veličin a zkratek	17
Úvod	19
1 Popis jaderného reaktoru s tekutými solemi	21
1.1 Schéma MSR	21
1.2 Výhody MSR	22
1.3 Nevýhody MSR	23
1.4 Používané sole	24
1.5 Konstrukční materiály	25
1.6 Historie a vývoj	26
1.7 Současné projekty	27
2 Praktická část	29
2.1 Příprava na měření	29
2.1.1 Tabulky solí	29
2.1.2 Prvky, jejich jaderné reakce a účinné průřezy	31
2.1.3 Moderační vlastnosti solí	31
2.1.4 Program NJOY	35
2.1.5 Příprava vzorků	41
2.2 Průběh měření	44
2.2.1 Solná prisma	44
2.2.2 Ozařování	46
2.3 Naměřená data	47
2.4 Zpracování dat	53
2.4.1 Reakční rychlosti	53
2.5 NJOY	54
2.5.1 Výpočet v MCNP	55
3 Výsledky práce	57
3.1 Výsledky měření	57
3.2 Výsledky z NJOY	61
3.3 Porovnání naměřených a vypočítaných hodnot	66
Závěr	69
Literatura	71

Seznam příloh	75
A Prvky, jejich jaderné reakce a účinné průřezy	77
A.1 Chlor	77
A.2 Fluor	79
A.3 Hliník	80
A.4 Berylium	81
A.5 Vápník	83
A.6 Draslík	89
A.7 Lithium	90
A.8 Hořčík	93
A.9 Sodík	97
A.10 Zirkonium	98
B Porovnání naměřených a vypočítaných hodnot	103
C Procentuální odchylky vypočítaných hodnot od změřených	139

Seznam obrázků

1.1	Schéma MSR.	22
2.1	Terminál Ubuntu v režimu SU.	37
2.2	Spuštěný program NJOY21.	40
2.3	Mikroskopické účinné průřezy jaderných reakcí pro ^{115}In	42
2.4	Očíslované vzorky india před ozařováním.	43
2.5	Fotografie solné prisky.	44
2.6	3D model solné prisky.	45
2.7	3D model solé prisky s vyznačenými kanály.	45
2.8	Zabalené vzorky india připravené k měření.	46
2.9	Grafické rozhraní programu GAMWIN.	47
3.1	Reakční rychlosti v měřicím kanále 1 (n,n').	57
3.2	Reakční rychlosti v měřicím kanále 1 (n, γ).	58
3.3	Reakční rychlosti v měřicím kanále 2 (n,n').	58
3.4	Reakční rychlosti v měřicím kanále 2 (n, γ).	59
3.5	Reakční rychlosti v měřicím kanále 3 (n,n').	59
3.6	Reakční rychlosti v měřicím kanále 3 (n, γ).	60
3.7	Mikroskopické účinné průřezy různých knihoven pro ^{35}Cl (n, γ).	61
3.8	Mikroskopické účinné průřezy různých knihoven pro ^{35}Cl (n,n').	62
3.9	Mikroskopické účinné průřezy různých knihoven pro ^{37}Cl (n, γ).	62
3.10	Mikroskopické účinné průřezy různých knihoven pro ^{37}Cl (n,n').	63
3.11	Mikroskopické účinné průřezy různých knihoven pro ^{23}Na (n, γ).	63
3.12	Mikroskopické účinné průřezy různých knihoven pro ^{23}Na (n,n').	64
3.13	Srovnání účinných průřezů izotopů NaCl.	65
3.14	Srovnání účinných průřezů izotopů NaCl.	65
A.1	Účinné průřezy ^{35}Cl	78
A.2	Účinné průřezy ^{37}Cl	79
A.3	Účinné průřezy ^{19}F	80
A.4	Účinné průřezy ^{27}Al	81
A.5	Účinné průřezy ^9Be	82
A.6	Účinné průřezy ^{40}Ca	84
A.7	Účinné průřezy ^{42}Ca	85
A.8	Účinné průřezy ^{43}Ca	86
A.9	Účinné průřezy ^{44}Ca	87
A.10	Účinné průřezy ^{46}Ca	88
A.11	Účinné průřezy ^{39}K	89
A.12	Účinné průřezy ^{41}K	90
A.13	Účinné průřezy ^6Li	92

A.14	Účinné průřezy ${}^7\text{Li}$	93
A.15	Účinné průřezy ${}^{24}\text{Mg}$	94
A.16	Účinné průřezy ${}^{25}\text{Mg}$	95
A.17	Účinné průřezy ${}^{26}\text{Mg}$	96
A.18	Účinné průřezy ${}^{23}\text{Na}$	97
A.19	Účinné průřezy ${}^{90}\text{Zr}$	98
A.20	Účinné průřezy ${}^{91}\text{Zr}$	99
A.21	Účinné průřezy ${}^{92}\text{Zr}$	100
A.22	Účinné průřezy ${}^{94}\text{Zr}$	101
B.1	Porovnání reakčních rychlostí MK1 Cl (n,n').	121
B.2	Porovnání reakčních rychlostí MK1 Cl (n, γ).	122
B.3	Porovnání reakčních rychlostí MK2 Cl (n,n').	123
B.4	Porovnání reakčních rychlostí MK2 Cl (n, γ).	124
B.5	Porovnání reakčních rychlostí MK3 Cl (n,n').	125
B.6	Porovnání reakčních rychlostí MK3 Cl (n, γ).	126
B.7	Porovnání reakčních rychlostí MK1 Na (n,n').	127
B.8	Porovnání reakčních rychlostí MK1 Na (n, γ).	128
B.9	Porovnání reakčních rychlostí MK2 Na (n,n').	129
B.10	Porovnání reakčních rychlostí MK2 Na (n, γ).	130
B.11	Porovnání reakčních rychlostí MK3 Na (n,n').	131
B.12	Porovnání reakčních rychlostí MK3 Na (n, γ).	132
B.13	Porovnání reakčních rychlostí MK1 NaCl (n,n').	133
B.14	Porovnání reakčních rychlostí MK1 NaCl (n, γ).	134
B.15	Porovnání reakčních rychlostí MK2 NaCl (n,n').	135
B.16	Porovnání reakčních rychlostí MK2 NaCl (n, γ).	136
B.17	Porovnání reakčních rychlostí MK3 NaCl (n,n').	137
B.18	Porovnání reakčních rychlostí MK3 NaCl (n, γ).	138

Seznam tabulek

2.1	Chloridové soli a jejich vlastnosti.	30
2.2	Fluoridové soli a jejich vlastnosti.	30
2.3	Moderační vlastnosti izotopů.	33
2.4	Moderační vlastnosti chloridových solí.	34
2.5	Moderační vlastnosti fluoridových solí.	34
2.6	Zisky z jaderných reakcí izotopu ^{115}In	41
2.7	Čísla a hmotnosti válečků.	43
2.8	Naměřená data z ozářených vzorků z MK1.	48
2.9	Naměřená data z ozářených vzorků z MK2 (1/3).	49
2.10	Naměřená data z ozářených vzorků z MK2 (2/3).	50
2.11	Naměřená data z ozářených vzorků z MK2 (3/3).	51
2.12	Naměřená data z ozářených vzorků z MK3.	52
2.13	Reakční rychlosti získané z naměřených hodnot.	54
3.1	Celkové odchylky knihoven od experimentálních hodnot (n, n')	66
3.2	Celkové odchylky knihoven od experimentálních hodnot (n, γ).	67
3.3	Souhrnné odchylky knihoven od experimentálních hodnot.	67
A.1	Izotop chloru 35.	77
A.2	Izotop chloru 37.	78
A.3	Izotop fluoru 19.	80
A.4	Izotop hliníku 27.	81
A.5	Izotop berylia 9.	82
A.6	Izotop vápníku 40.	83
A.7	Izotop vápníku 42.	83
A.8	Izotop vápníku 43.	83
A.9	Izotop vápníku 44.	84
A.10	Izotop vápníku 46.	85
A.11	Izotop draslíku 39.	89
A.12	Izotop draslíku 41.	90
A.13	Izotop lithia 6.	91
A.14	Izotop lithia 7.	92
A.15	Izotop hořčíku 24.	93
A.16	Izotop hořčíku 25.	95
A.17	Izotop hořčíku 26.	96
A.18	Izotop sodíku 23.	97
A.19	Izotop zirkonia 90.	98
A.20	Izotop zirkonia 91.	99
A.21	Izotop zirkonia 92.	100

A.22 Izotop zirkonia 94.	101
B.1 Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK1 (n,n') Cl.	103
B.2 Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK1 (n,γ) Cl.	104
B.3 Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK2 (n,n') Cl.	105
B.4 Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK2 (n,γ) Cl.	106
B.5 Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK3 (n,n') Cl.	107
B.6 Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK3 (n,γ) Cl.	108
B.7 Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK1 (n,n') Na.	109
B.8 Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK1 (n,γ) Na.	110
B.9 Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK2 (n,n') Na.	111
B.10 Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK2 (n,γ) Na.	112
B.11 Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK3 (n,n') Na.	113
B.12 Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK3 (n,γ) Na.	114
B.13 Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK1 (n,n') NaCl.	115
B.14 Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK1 (n,γ) NaCl.	116
B.15 Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK2 (n,n') NaCl.	117
B.16 Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK2 (n,γ) NaCl.	118
B.17 Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK3 (n,n') NaCl.	119
B.18 Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK3 (n,γ) NaCl.	120
C.1 Odchytky vypočítaných hodnot od změřených MK1 Cl (n,n').	139
C.2 Odchytky vypočítaných hodnot od změřených MK1 Cl (n,γ).	139
C.3 Odchytky vypočítaných hodnot od změřených MK2 Cl (n,n').	140
C.4 Odchytky vypočítaných hodnot od změřených MK2 Cl (n,γ).	140
C.5 Odchytky vypočítaných hodnot od změřených MK3 Cl (n,n').	141
C.6 Odchytky vypočítaných hodnot od změřených MK3 Cl (n,γ).	141
C.7 Odchytky vypočítaných hodnot od změřených MK1 Na (n,n').	142
C.8 Odchytky vypočítaných hodnot od změřených MK1 Na (n,γ).	142
C.9 Odchytky vypočítaných hodnot od změřených MK2 Na (n,n').	143
C.10 Odchytky vypočítaných hodnot od změřených MK2 Na (n,γ).	143
C.11 Odchytky vypočítaných hodnot od změřených MK3 Na (n,n').	144
C.12 Odchytky vypočítaných hodnot od změřených MK3 Na (n,γ).	144
C.13 Odchytky vypočítaných hodnot od změřených MK1 NaCl (n,n').	145
C.14 Odchytky vypočítaných hodnot od změřených MK1 NaCl (n,γ).	145
C.15 Odchytky vypočítaných hodnot od změřených MK2 NaCl (n,n').	146
C.16 Odchytky vypočítaných hodnot od změřených MK2 NaCl (n,γ).	146
C.17 Odchytky vypočítaných hodnot od změřených MK3 NaCl (n,n').	147
C.18 Odchytky vypočítaných hodnot od změřených MK3 NaCl (n,γ).	147

Seznam symbolů, veličin a zkratk

AVČR	Akademie věd České republiky
AZ	aktivní zóna
HPGe	vysoce čisté germanium – high purity germanium
I. O.	primární okruh
II. O.	sekundární okruh
IZ	ionizující záření
MSR	reaktory s tekutými solemi – molten salt reactors
MSRE	experimentální solný reaktor – Molten Salt Reactor Experiment
ORNL	národní laboratoř v Oak Ridge – Oak Ridge National Laboratory
PG	parogenerátor
RA	radioaktivní, radioaktivita
R_R	reakční rychlosti
SMR	malý modulární reaktor – small modular reactor
ŽP	životní prostředí

Úvod

V poslední době reaktorům s tekutými solemi dostává stále větší pozornosti. V budoucnosti by měly být součástí zdrojové základny získávání energie a to nejen elektrické.

Pro použití solných reaktorů v energetice a průmyslu hovoří jejich výhody spojené s nízkým provozním tlakem, možností provozu při vysokých teplotách a toto teplo dále využívat v průmyslu a mnoho dalších. Pro naplnění vizí se pracuje na projektech, jež zkoumají chování a další možnosti využití reaktorů s tekutými solemi.

V reaktorech se nejčastěji setkáme s použitím fluoridových solných směsí. Možnostem využít dostupnější sole na bázi chloru se věnují výzkumy i tato diplomová práce. Jiná sůl má totiž odlišné nejen chemické a fyzikální vlastnosti z pohledu korozivity, teploty tání a varu, ale liší se také vlastnostmi jadernými. Jedná se především o ovlivnění neutronové bilance v solném reaktoru, čemuž se musí přizpůsobit složení paliva, jeho obohacení nebo konstrukce reaktoru.

Pro výzkum se čerpá z knihoven obsahující jaderná data, která se používají ve výpočtech. Různých knihoven však existuje více, jsou vydávány odlišnými výzkumnými ústavy a jejich obsažená data se mohou mezi sebou lišit. V práci bude porovnáno pět základních jaderných knihoven nejen mezi sebou navzájem, ale i s výsledky vlastního laboratorního měření. Cílem je najít takový zdroj dat, který se bude svými hodnotami nejvíce přibližovat hodnotám získaným z měření.

1 Popis jaderného reaktoru s tekutými solemi

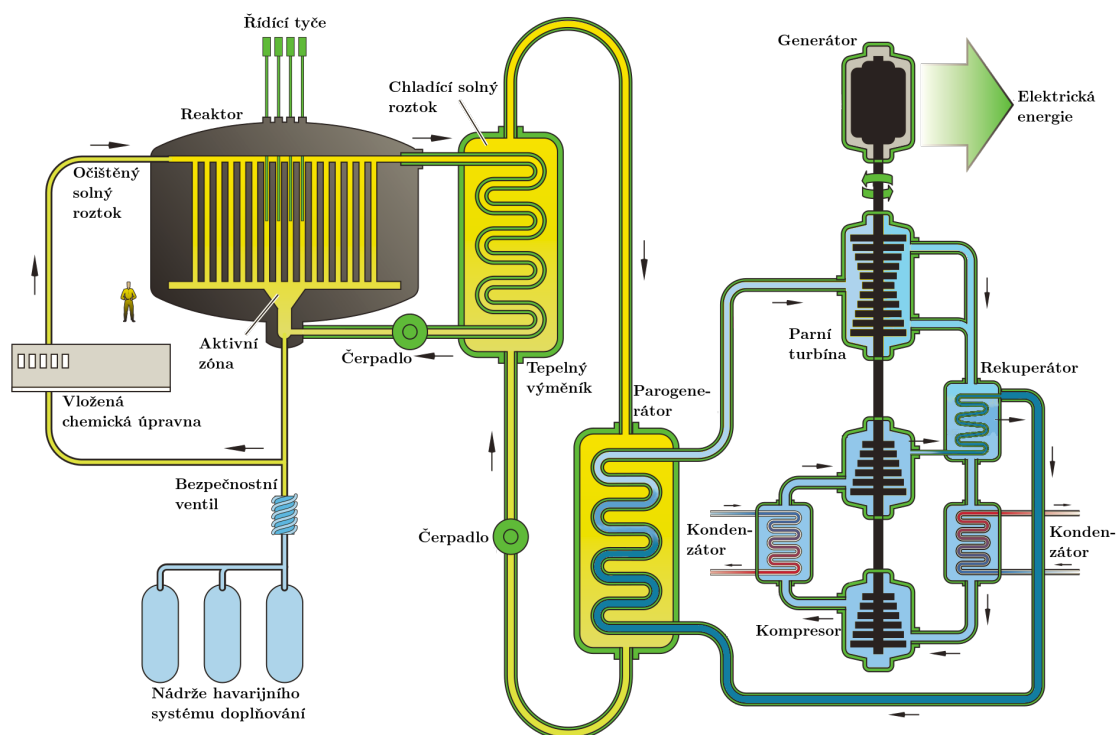
Reaktory s tekutými solemi – „*Molten salt reactors*“ (ve zkratce MSR) – jsou jaderné štěpné reaktory, ve kterých se používá roztavených solí jako chladicího média. Výhodou těchto reaktorů je možnost jejich provozu vyšších teplotách ve srovnání s tlakovodními reaktory. Získávané teplo lze využít k výrobě páry o vysokých parametrech nebo v chemickém průmyslu. Naopak za nevýhody lze označit problémy spojené s odstávkami a servisem reaktoru a agresivních vlastností (roztavených) solí k technologii.

Reaktory s tekutými solemi je možné provozovat v širším energetickém spektru neutronů. Kromě tepelných reaktorů (tj. reaktory, ve kterých je štěpení způsobováno tepelnými neutrony) se v případě MSR můžeme setkat také s rychlými reaktory, kde štěpení probíhá díky rychlým neutronům. Rychlý solný reaktor pozbývá moderátoru, neutrony ze štěpení tak nejsou zpomalovány. Jako chladivo pro rychlé solné reaktory lze použít chloridových solí, kterými se bude zabývat tato práce. Nevýhodou reaktorů pracujících s rychlými neutrony je jejich kratší životnost, neboť jsou konstrukční materiály těchto reaktorů vystavovány silnějším destruktivním účinkům rychlých neutronů.

1.1 Schéma MSR

Reaktory chlazené tekutými solemi bývají projektovány jako víceokruhové s nejméně třemi smyčkami a to z bezpečnostních důvodů. Kromě primárního a sekundárního okruhu se ve schématu solemi chlazených reaktorů nachází ještě jeden vložený okruh, který odděluje radioaktivní primární okruh od sekundárního. Pokud by došlo v tepelném výměníku (parogenerátoru) k drobnému úniku roztavené soli do vodního prostředí (např. vlivem netěsnosti), mohlo by to způsobit větší poškození výměníku a další úniky kvůli reakci s vodou. Pokud by reagující sůl pocházela rovnou z primárního okruhu (I. O.), dostaly by se RA látky do sekundárního okruhu (II. O.) a následně by hrozilo jejich uvolnění do životního prostředí. Proto se I. O. od II. O. odděluje vloženým okruhem, ve kterém cirkuluje tavenina nosné soli bez obsahu uranu. Ta se nachází pod stejným nebo lehce vyšším tlakem, jako chladivo v primárním okruhu s radioaktivní solí. Případná netěsnost na tepelném výměníku pak způsobí únik neradioaktivního solného roztoku z vloženého okruhu do primáru, případně dojde-li k poruše na PG, nehrozí uvolnění RA látek do okolí přes sekundární okruh.

Solné reaktory mají větší průměr než výšku kvůli rozměrům aktivní zóny. Palivo



Obr. 1.1: Schéma reaktoru s tekutými solemi. [4]

pro solné reaktory se může vyskytovat v pevné formě, nebo kapalně, je heterogenní, či homogenně rozpuštěné v celém objemu I. O. V případě použití paliva v kapalném skupenství a jeho homogenní rozpuštění v I. O. lze s výhodou použít vloženého chemického procesu.

Primární okruh i sekundární (první tepelný výměník) se mohou celé nacházet v nádobě reaktoru. Z té je potom vyvedeno už jen potrubí s cirkulující sekundární solí. Díky této možnosti lze solné reaktory konstruovat o kompaktních rozměrech, díky čemuž se MSR nabízí jako vhodní kandidáti pro malé modulární reaktory (SMR). [5]

1.2 Výhody MSR

Jak již bylo naznačeno v úvodu této kapitoly, mezi výhody reaktorů s tekutými solemi lze zařadit jejich provoz při vyšších teplotách (ve srovnání s tlakovodními reaktory). Zatímco u tlakovodních reaktorů je maximální teplota chladiva (lehké vody) omezena na 647 K (374 °C) při tlaku 22,064 MPa, v případě reaktorů chla-

zených tekutými solemi se může teplota chladiva dosahovat teplot přesahujících i 1 000 °C v závislosti na použité sloučenině (více v tabulkách 2.1 a 2.2).

Další dobrou vlastností MSR je nízký tlak v primárním okruhu. Díky použití solí jakožto chladiva se kapalného skupenství dosahuje při vyšších teplotách za normálního tlaku. To snižuje pravděpodobnost vzniku netěsnosti a úniku chladiva a RA látek z I. O. Současně s tím je také snazší provozovat vložený okruh pod vyšším tlakem než primární (z bezpečnostních důvodů, viz kapitola 1.1). Nižší pracovní tlak I. O. dovoluje snížit nároky na použité konstrukční materiály a stavební postupy v této oblasti. Při případné vzniknuvší netěsnosti nehrozí díky absenci vysokého tlaku primárního okruhu velký únik chladiva.

Za výhodu reaktorů s tekutými solemi lze označit také možnost vložit do palivové cesty chemický proces, který v reálném čase dokáže odstraňovat ze směsi nežádané prvky („*on-line reprocessing*“). Zejména je-li palivo reaktoru v kapalném skupenství, je možné touto cestou odebírat nežádoucí štěpné produkty přímo z jaderného paliva a dosáhnout tak jeho lepšího využití. Obecně se nabízí široké možnosti s využitím vloženého chemického procesu jako na příklad plynulé řízení koncentrace absorptorů neutronů, odjímání štěpných produktů a zabránění reaktorové otravě, změna složení a koncentrace chladící solné taveniny apod. Také je možné kontinuálně doplňovat palivo do reaktoru, čímž se výrazně prodlouží doba provozu a odstávky se provedou jen za účelem revizních a servisních prací.

K výhodách spojených s palivem patří také možnost využití thoriového palivového cyklu. Tato výhoda spočívá především v hojném zastoupení thoria, kterého se na světě dle odhadů vyskytuje 3 až 4 krát více, než uranu. To je dáno skutečností, že thorium má 3× delší poločas přeměny než uran. [5, 6, 19, 20]

1.3 Nevýhody MSR

K nevýhodám reaktorů chlazených roztavenými solemi patří převážně agresivní vlastnosti solí. V důsledku toho je nutné použít při konstrukci takového reaktoru používat materiály, na které jsou kladeny vysoké nároky na antikorozi odolnost proti působením solí. Schopnost odolávat korozivním účinkům je na prvním místě před požadavky na tepelnou odolnost. Teploty, kterých je při normálním provozu MSR dosahováno, nepředstavují v dnešní době významnou překážku pro konstrukci a volbu vhodných materiálů.

Dalším významnějším problémem provozu reaktorů s tekutými solemi je existence rizika tuhnutí (zamrzání) chladícího solného roztoku. Pokud teplota chladiva poklesne pod bod tání, dojde k přirozenému tuhnutí roztavené soli. Při špatně navrženém potrubí může v některých kolenech a záhybech docházet k víření solné směsi, zpomalení proudu a v důsledku toho k usazování pevné soli na okraji potrubí. Tím

dojde ke zúžení prostoru, kudy chladivo protéká, dalšímu usazování a v extrémním případě může dojít k až úplnému ucpání potrubí. Proto se při odstávkách a servisních pracích musí chladicí roztok naředit, nebo přemístit do neustále vyhřívaných nádrží a je třeba dbát na správné navržení potrubí.

V případě tekutého paliva, roztaveného v celém objemu I. O., hrozí nechtěné uvolnění radioaktivních látek z primárního okruhu do ŽP s vyšší pravděpodobností. Zejména použití vloženého chemického procesu s sebou přináší tato úskalí. Aby bylo vyhověno všem bezpečnostním požadavkům i předpisům, je nezbytné učinit náročná a nákladná opatření. [5, 8]

1.4 Používané sole

V reaktorech chlazených tekutými solemi je roztavená sůl klíčem ke kategorizaci těchto reaktorů a zároveň jim dává jejich pojmenování.

Nejjednodušším rozdělením solí používaných v solných reaktorech je podle jejich aniontového prvku, nejčastěji chlor (Cl^-) a fluor (F^-). Takto potom hovoříme o „chloridových“ nebo „fluoridových“ solích. Sloučením chloru či fluoru s různými kationty (např. sodík – Na^+ , draslík – K^+ , ...) se získají sloučeniny s odlišnými vlastnostmi.

Sledovanými vlastnostmi chloridových i fluoridových solí jsou kromě teploty tání, bodu varu a hustoty, také jejich vlastnosti v oblasti jaderných reakcí. Jedná se o pravděpodobnost zachytu neutronu, pružného i nepružného rozptylu, apod. Změnám odehraných se v různých solích vystaveným působení neutronového zdroje a jejich vlastnostech se bude zabývat experiment této diplomové práce.

Obecné požadavky na chladicí směs reaktorů s tekutými solemi jsou dobrá tepelná vodivost, co nejnižší účinný průřez pro absorpci neutronů, nízká teplota tání soli a co nejvyšší bod varu.

Pro dosažení požadovaných vlastností se užívá sloučenin solných roztoků, namísto použití jediné samostatné soli. Použitím směsi se získá především nižší bod tání, díky čemuž se snižuje riziko tuhnutí roztavené soli a ucpávání potrubí. V minulosti byly používány především směsi fluoridových solí, neboť fluor má oproti chloru menší účinný průřez pro zachyt neutronu v tepelné oblasti.

Jako příklad lze uvést směs NaF-NaBF_4 na bázi fluoru. Bod tání této směsi se nachází v hodnotě $384\text{ }^\circ\text{C}$. Výhodami této směsi je zmíněný nízký bod tání, dobrá tepelná kapacita, nízká viskozita a cenová dostupnost. Hlavní nevýhodou je omezení pracovní teploty (v praxi od $550\text{ }^\circ\text{C}$ do $700\text{ }^\circ\text{C}$), neboť při teplotách vyšších než $900\text{ }^\circ\text{C}$ dochází k rozkladu směsi.

Dalším příkladem může být KF-BF_4 , jež je svými vlastnostmi podobná směsi zmíněné v odstavci výše. Hodí se zejména do sekundárního chladicího okruhu. Tep-

lota tání 460 °C a nižší tepelná kapacita, než má NaF–NaBF₄ jsou hlavními nevýhodami směsi ve srovnání se směsí předchozí, ovšem k výhodám patří lepší snášenlivost vyšších teplot.

LiF–BeF₂ (často nazývána „FliBe“) je další z uvedených solných směsí. Této soli byla věnována velká pozornost během výzkumů v minulosti a posloužila také u prvních pokusů s reaktory s tekutými solemi v ORNL. Mezi stěžejní dobré vlastnosti FliBe lze uvést velkou tepelnou kapacitu, příznivý koeficient tepelné vodivosti a vysoký bod varu.

Pro úplnost lze zmínit ještě následující solnou směsí na bázi fluoru a lithia: LiF–NaF–KF („FLiNaK“). S horší schopností moderovat neutrony bylo zvoleno její použití co by sůl sekundárního chladícího okruhu. Ostatní parametry jsou podobné jako u FliBe, ovšem horší. Dále lze zmínit sole NaF–ZrF₄, NaF–BeF₂ nebo NaF–LiF–BeF₂. [18, 19, 21]

1.5 Konstrukční materiály

Na materiály, ze kterých se skládá jaderný štěpný reaktor s tekutými solemi, jsou kladeny vysoké nároky z hlediska mechanické pevnosti, tepelné odolnosti a hlavně odolnosti proti korozivním účinkům solí a destruktivnímu působení ionizujícího záření (IZ). Zároveň však musí být takovýto materiál cenově i technologicky dostupný.

Z praxe se nejvíce osvědčily slitiny na bázi niklu a chromu, byly prováděny také pokusy s nerezovou ocelí. Hastelloy N patří ke známým nikl–molybdenovým slitinám. Materiál byl vyvinut v ORNL v 60. letech 20. století a posloužil jako základ pro vývoj dalších slitin pro reaktory s tekutými solemi. Hastelloy N má dobrou tepelnou i antikoroziční odolnost proti působení fluoridových solných směsí a je dobře zpracovatelný.

MoNiCr patří také mezi zástupce nikl–molybdenových slitin a byl vyvinut v České republice ve spolupráci se Škodou JS a společností COMTES FHT. MoNiCr se oproti Hastelloy N liší v množství železa, molybdenu a manganu ve slitině, a také s příměsí titanu v hliníku. Česká slitina vykazuje podobně, jako americký vzor, dobré vlastnosti v oblasti odolnosti proti vysokým teplotám a korozi.

Dalším z výčtu konstrukčních materiálů je HN80MTY mající svůj původ v Rusku. Pod jiným názvem K–50 je tato slitina na bázi niklu výsledkem vývoje z HN80MT, což je ruská verze amerického Hastelloy N. Slitina HN80MTY obsahuje příměsí titanu a hliníku.

Čínská slitina GH3535 je dalším výsledkem vývoje z Hastelloy N. Materiál GH3535 byl vybrán jako kandidát pro pokročilé jaderné technologie, čínský projekt TSMR. Vysoká teplota tavení této slitiny z ní činí hůře zpracovatelný materiál, nicméně technologické postupy pro zpracování však již byly vyvinuty.

Mezi konstrukčními materiály pro MSR nalezneme také nerezové oceli. Mezi jejich zástupce patří typ 316L nebo EUROFER 97. Nerezová ocel 316L obsahuje vysoký podíl chromu a niklu. Vyznačuje se odolností proti vysokým teplotám a korozi, její uplatnění se nachází mimo jiné v aviatice a kosmonautice, ve zdravotnictví apod.

EUROFER 97 je výsledkem dlouholetého výzkumu materiálu pro fúzní reaktory. Jeho použití je plánováno v konstrukci první stěny fúzního reaktoru DEMO. Díky malému množství niklu a niobu v materiálu EUROFER 97 nedojde k vysoké aktivitaci nerezové oceli a po použití s ní bude možné nakládat jako s nízkoaktivním radioaktivním odpadem.

Dalšími materiály pro konstrukci MSR mohou být Hastelloy B nebo Incoloy 800HT, či Inconel 600 a 625, poslední dvě zmíněné na bázi niklu.

V České republice byly provedeny statické korozní testy vybraných konstrukčních materiálů v tavenině NaF–NaBF₄ při teplotě 550 °C po dobu jednoho a tří měsíců. Experimenty byly provedeny pod Ústavem energetiky strojní fakulty ČVUT v Praze ve výzkumném centru v Řeži. Tomuto tématu se věnuje práce pana *Michala Cihláře* nesoucí název „Vliv doby expozice v tavenině NaF–NaBF₄ na konstrukční materiály“. Výsledky práce ukazují, dobrou odolnost u materiálů na bázi niklu a molybdenu (MoNiCr, HN80MTY). Největší míra koroze byla pozorována ze začátku měření, později nedocházelo k výraznému rozšiřování. Doba expozice tedy neprokázala významný vliv na poškození materiálů. [18, 19, 21]

1.6 Historie a vývoj

První zmínky o jaderném reaktoru s tekutými solemi pochází ze druhé poloviny čtyřicátých let dvacátého století. Hlavním cílem bylo vyvinout letadla na jaderný pohon. Pro tento účel bylo zvoleno použití právě solemi chlazených reaktorů.

Experimenty započaly v roce 1947, o jejichž realizaci se zasloužili pánové *V. P. Calkins*, *Kermit Anderson* a *E. S. Bettis*. V roce 1950 bylo na základě naléhání *Bettise* a doporučení *W. R. Grimese* rozhodnuto *Raymondem Clare Briantem* o použití fluoridových solí coby hlavní vývojové větve reaktorů s tekutými solemi v laboratořích v Oak Ridge, nacházejících se ve státě Tennessee v USA.

Během šedesátých let dvacátého století byl v ORNL vyvinut koncept množivého solného reaktoru s tepelným výkonem 8 MW zvaný *Molten Salt Reactor Experiment* (ve zkratce MSRE). V první kampani mezi lety 1965 a 1968 bylo použito paliva obsahujícího izotop ²³⁵U obohaceného na 33 %. Druhá kampaň z let 1968 až 1969 užila poprvé uran ²³³U jako palivo. V tomto MSRE patří světové prvenství. ²³³U však byl dodáván a v reaktoru nevznikal množivými reakcemi. Výsledky experimentu

však připravily cestu pro množivý solný reaktor používající thorium jako palivo a pracující v tepelném neutronovém spektru.

Ve Velké Británii byl navržen rychlý reaktor chlazený roztaveným olovem s výkonem na výstupu 2,5 GWe. Palivem bylo plutonium rozpuštěné v roztavené chloridové soli. Experimenty byly prováděny v letech 1968 až 1973, projekt byl ukončen v roce 1974.

Použití jaderné energie k pohonu letounů se ukázalo jako slepá cesta vývoje a zájem o solné reaktory upadl na úkor lehkovodních reaktorů, které se hojně používaly a dodnes používají zejména v energetice.

Po útlumu zájmu o reaktory s tekutými solemi se k nim v současné době vrací pozornost. Solné reaktory hrají významnou roli v designu reaktorů čtvrté generace. Výzkumu se věnují Japonsko, Rusko, Čína, Francie, USA, a také Česká republika. Mezi návrhy dominují dvě hlavní vývojové větve: rychlý solný reaktor a pokročilý vysokoteplotní reaktor, známý též pod zkratkou FHR – fluoride-salt-cooled high temperature reactor. Užití MSR je také plánováno jako malé modulárního reaktoru (SMR).[1, 2, 3]

1.7 Současné projekty

Jak je uvedeno v závěru předchozí kapitoly, v poslední době se navrácí zájem o reaktory s tekutými solemi.

Čínský projekt TMSR (Thorium-breeding Molten-Salt-Reactors) má být řešením pro severozápadní část země s nižší hustotou obyvatel. Nízké nároky na vodní zdroje jsou zaručeny díky technologii chlazení bez použití vody. Budování v suchých oblastech je plánováno na rok 2025.

V Ruské federaci se pracuje na reaktoru, který dokáže „recyklovat“ vyhořelé jaderné palivo z tlakovodních reaktorů. Projekt nese název MOSART (Molten Salt Actinide Recycler and Transmuter) a jedná se o rychlý množivý reaktor chlazený roztavenou fluoridovou solí, FLiBe, nebo F-Li-Be-Na. Uvažovaný tepelný výkon reaktoru se udává 2 400 MWt.

V Evropě se problematikou solných reaktorů věnuje např. Dánská společnost *Reactive IVS*, která vyvíjí reaktor, který bude spalovat použité jaderné palivo z konvenčních jaderných elektráren s tlakovodními reaktory. Také projekt SAMOFAR (Safety Assessment of the Molten Salt Fast Reactor), financován Evropskou unií, se řadí k evropským projektům zabývajících se MSR. Na projektu spolupracují země Evropy (vč. České republiky) a jeho cílem je vyvinout bezpečný množivý reaktor na bázi thorium–uranového palivového cyklu.

ADAR je název projektu, na kterém se v současnosti podílí také VUT v Brně. Ve spolupráci s texaskou univerzitou v College Station, dalšími českými vysokými ško-

lami a vědeckým pracovištěm AVČR je cílem rozšířit poznatky pokročilého solného reaktoru řízeného urychlovačem, který disponuje možností použít vyhořelé jaderné palivo z konvenčních elektráren, spalovat thorium, ochuzený uran nebo plutonium z jaderných zbraní. K bezpečnosti přispěje minimální množství generovaných dlouze žijících vysoce radioaktivních odpadů. Český tým má na starost prohloubení znalostí málo známých oblastí v problematice funkce, designu, neutronického, termohydraulického i multifyzikálního výpočtu.

„Obecně chybí zkušenosti a znalosti v oblasti fyziky reaktorových systémů s tekutými solemi, v oblasti fyziky urychlovačem řízených reaktorových systémů; v oblasti jaderných dat pro vysoké energie neutronů; v oblasti metod detekce neutronů a gama a zpracování signálů z měření neutronových energetických spekter v oblasti nad 20 MeV; v oblasti korozní stálosti a odolnosti materiálů v prostředí směsí chloridových, fluoridových či uhličitanových solí.“ [3, 22, 23]

2 Praktická část

Tato kapitola se bude věnovat měření. K nalezení zde bude popis samotného experimentu, dále se zde nachází nahlédnutí k nezbytným přípravám a činnostem nutným před zahájením samotného měření. Mimo prací v laboratoři je důležité připravit také software potřebný ke zpracování dat, jehož sestavení je též popsáno v této kapitole

2.1 Příprava na měření

Před zahájením měření na školním neutronovém AmBe zdroji je potřeba provést kvalitní přípravu na toto měření, aby bylo možné získané hodnoty co nejkvalitněji zpracovat za co nejkratší dobu. Proto byly dopředu zpracovány tabulky různých solí, které obsahují jejich důležité vlastnosti, výsledky případných jaderných reakcí a průběhy mikroskopických účinných průřezů, které udávají pravděpodobnost dané jaderné reakce pro různé energie neutronu. Pro zpracování získaných dat bylo nezbytné nainstalovat program NJOY21. Tento nástroj dokáže zpracovat naměřená data do vhodného formátu pro budoucí použití. Na HPGe detektoru byla provedena energetická kalibrace.

2.1.1 Tabulky solí

V tomto pododdílu jsou k nahlédnutí celkem dvě tabulky s různými solemi. V první tabulce (tabulka 2.1) se nacházejí sole chloridové, tabulka druhá je věnována solím fluoridovým (tabulka 2.2). Tabulky obsahují ke každé soli její teplotu tání a teplotu varu (ve °C) a hustotu. Nachází-li se u některé ze solí vyšší teplota varu než tání, znamená to, že daná látka sublimuje, jakmile její teplota dosáhne bodu tání za normálního tlaku. Příkladem sublimující soli z chloridových je chlorid hlinitý (AlCl_3) a chlorid zirkoničitý (ZrCl_4).

Jako vhodná chloridová sůl se jeví chlorid lithný (LiCl), který má vhodný teplotní rozsah mezi body tání a varu a současně má lithium malé účinné průřezy pro jaderné reakce, takže nebude v reaktoru absorbovat volné neutrony. Celkový souhrn chloridových solí se nachází v tabulce níže. [7]

Tab. 2.1: Chloridové soli a jejich vlastnosti. [7]

Sloučenina	Bod tání (°C)	Bod varu (°C)	Hustota (g/cm ³)
AlCl ₃	192	180	2,48
BeCl ₂	399	482	1,89
CaCl ₂	772	1 935	2,15
KCl	770	1 420	1,98
LiCl	605	1 382	2,07
MgCl ₂	714	1 412	2,32
NaCl	801	1 465	2,16
ZrCl ₄	437	331	2,80

Výhodami chloridových solí jsou jejich dostupnost i cena. Na příklad chlorid sodný (NaCl) je běžná kuchyňská sůl.

Druhá tabulka obsahuje různé fluoridové soli. Fluorid hlinitý (AlF₃) je další sublimující látkou. Pro fluorid zirkoničitý (ZrF₄) se nepodařilo zjistit teplotu varu. Důvodem k chybějícím údajům může být příliš vysoká hodnota bodu varu. Podrobný výčet solí se nachází v tabulce pod tímto odstavcem.

Tab. 2.2: Fluoridové soli a jejich vlastnosti. [7]

Sloučenina	Bod tání (°C)	Bod varu (°C)	Hustota (g/cm ³)
AlF ₃	1 290	1 280	2,88
BeF ₂	554	1 169	1,99
CaF ₂	1 418	2 500	3,18
KF	858	1 503	2,48
LiF	870	1 681	2,64
MgF ₂	1 263	2 260	3,15
NaF	993	1 695	2,56
ZrF ₄	910	–	4,43

Výhodou fluoridových solí z pohledu využití v jaderném reaktoru coby chladiwa je jejich menší účinný průřez pro zachyt neutronů ve srovnání se solemi chloridovými. Díky tomu stačí nižší obohacení paliva, pokud bude reaktor chlazen fluoridovou solí.

Nutné je zmínit, že ne všechny uvedené soli budou zahrnuty v našem experimentu. Zejména fluoridové soli, které jsou náročné a nákladné na pořízení nebudou zahrnuty všechny. Některé soli jsou nebezpečné, a proto také nebudou měřeny.

2.1.2 Prvky, jejich jaderné reakce a účinné průřezy

Celý následující oddíl bude věnován prvkům solí, jejich jaderným reakcím, zejména (n,α) , (n,γ) , dále pak (n,p) a $(n,2n)$. Vzhledem k nízkým energiím neutronů emitovaných školním laboratorním AmBe zdrojem jsou reakce $(n,2n)$ málo pravděpodobné. Nejvyšší energie neutronů ze zmíněného zdroje nabývají hodnot okolo 10 MeV.

Dále zde budou k nalezení grafy účinných průřezů pro každý izotop sledovaného prvku a pro zmíněné jaderné reakce. Grafy jsou doplněny také průběhem mikroskopického účinného průřezu pro elastický (pružný) rozptyl.

Opět platí, že ne všechny prvky uvedené v tabulkách v příloze budou změřeny v rámci této diplomové práce. Některé jsou náročné a nákladné na získání, u jiných setkáme s velice krátkou, nebo naopak dlouhou dobou života vzniknuvších radioaktivních prvků, pro jejichž měření nedisponujeme dostatečnou výbavou. Za již neaktivní se považuje ten izotop, u kterého již uplynula doba vyšší nebo rovna desetinásobku jeho poločasu rozpadu. Je-li proto u některého radioizotopu $10 \times T_{1/2} < 15$ s, nebude možné uskutečnit jeho změření.

Vznikne-li z některé jaderné reakce plynný prvek, je jeho změření taktéž nereálné, neboť nám tento prvek vyprchá. Jako zdroj pro uvedené tabulky i grafy bylo použito on-line databází.

Některé radioizotopy se rozpadají $e+\beta+$ přeměnou, což emituje neutrino a pozitron (antičástice k elektronu). Pokud se pozitron střetne s elektronem, tyto dvě částice se sloučí a anihilují, přičemž dojde k uvolnění energie o velikosti 511 keV s intenzitou 200 %, 2×100 % pro každou částici. Tuto energii potom zaznameneáme na detektoru γ záření. Pokud se radioizotop mění ještě jinou přeměnou, bude mít linka 511 keV intenzitu odpovídající dvojnásobku procentuální šance $e+\beta+$ přeměny.

Prvky s hvězdičkou (např. $^{34*}\text{Cl}$) značí excitované jádro chloru 34, tedy v energeticky vzbuzeném stavu.

Podrobný výpis jednotlivých prvků, jejich stabilní izotopy, jaderné reakce a grafy průběhů mikroskopických účinných průřezů jsou umístěny v příloze tohoto dokumentu. [9, 14]

2.1.3 Moderační vlastnosti solí

Roztavená sůl ovlivňuje v jaderném reaktoru neutronovou bilanci. Svým výskytem přispívá k moderaci neutronů nebo volné neutrony pohlcuje. Míra jednoho či druhého jevu závisí na složení taveniny, jejich izotopů a účinných průřezů pro rozptyl nebo absorpci neutronu. Znalost těchto vlastností je důležitá pro správný výběr vhodné soli pro jaderný reaktor. Lehčí jádra mají lepší moderační schopnosti, než jádra těžší [10].

Pro porovnání moderačních vlastností solí budeme sledovat hodnotu logaritmické ztráty energie neutronu při jedné srážce, kterou udává *průměrný logaritmický dekrement energie* ξ . Další používanou veličinou je tzv. *zpomalovací schopnost* daná výrazem $\xi \cdot \Sigma_s$. Nakonec *koefficient zpomalení* $\xi \cdot \Sigma_s / \Sigma_a$ respektuje i účinný průřez pro absorpci neutronů. Dobrý moderátor neutrony zpomaluje, aniž by je pohlcoval. Čím vyšší hodnoty *koefficient zpomalení* dosahuje, tím je lepším moderátorem [10].

Výpočet ξ se provede pomocí rovnice

$$\xi = 1 + \frac{\alpha \cdot \ln(\alpha)}{1 - \alpha} \quad (2.1)$$

hodnota ξ je bezrozměrné číslo. α se vypočítá ze vztahu

$$\alpha = \frac{(A - 1)^2}{(A + 1)^2} \quad (2.2)$$

Kde A značí nukleonové číslo izotopu. Pro výpočet Σ_s i Σ_a je potřeba znát hodnoty mikroskopických účinných průřezů σ_s a σ_a . Ty byly stanoveny pro každý izotop s využitím databáze IAEA, čerpány z ENDF knihovny JEFF-3.3 [11]. Mikroskopický účinný průřez se v obou případech, rozptylu i absorpci, určil pro hodnotu energie tepelného neutronu $E = 0,025$ eV při teplotě $T = 293$ K. Mikroskopický účinný průřez se vypočítá podle

$$\Sigma = N \cdot \sigma \quad (2.3)$$

kde N značí počet atomů v 1 m^3 dané látky, *sigma* je mikroskopický účinný průřez (pravděpodobnost reakce neutronu s jedním jádrem prvku na terčové ploše 1 m^2). Mikroskopický účinný průřez se udává v jednotkách b (barn). Tato velikost odpovídá $1 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$ Hodnotu N dostaneme po dosazení do vztahu

$$N = \frac{m_x}{m_{1a(x)}} \cdot \frac{P}{100} \quad (2.4)$$

kde

m_x udává v kilogramech hmotnost 1 m^3 daného prvku ($m_x = \rho_x \cdot V_x$)

ρ_x je hustota daného prvku (kg/m^3)

V_x značí objem daného prvku (m^3)

$m_{1a(x)}$ je potom hmotnost jednoho atomu daného prvku ($m_{1a(x)} = A_x \cdot u$)

A_x je nukleonové číslo daného prvku

u označuje atomovou hmotnostní konstantu ($u = 1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$)

P potom udává procentuální zastoupení pro každý jeden izotop

Po výpočtech z výše uvedených rovnic byla vytvořena tabulka zpomalovacích schopností pro jednotlivé izotopy solí.

Tab. 2.3: Moderační vlastnosti izotopů.

Izotop	ξ (-)	$\xi\Sigma_s$ (m^{-1})	$\xi\Sigma_s/\Sigma_a$ (-)
^{35}Cl	0,0561	0,0049	0,0268
^{37}Cl	0,0531	0,0001	0,1401
^{19}F	0,1017	0,0020	39,4405
^{27}Al	0,0723	0,6325	0,4467
^9Be	0,2066	16,6264	152,3001
^{40}Ca	0,0492	0,3108	0,3319
^{42}Ca	0,0469	0,0008	0,0842
^{43}Ca	0,0458	0,0010	0,0535
^{44}Ca	0,0448	0,0096	0,2404
^{46}Ca	0,0429	0,0000	0,0991
^{39}K	0,0504	0,1026	0,0390
^{41}K	0,0480	0,0181	0,1461
^6Li	0,2990	0,0936	6,0075
^7Li	0,2602	1,1509	5,9279
^{24}Mg	0,0811	1,0691	6,1329
^{25}Mg	0,0779	0,0864	1,0768
^{26}Mg	0,0750	0,0959	5,6136
^{23}Na	0,0845	0,6560	0,4895
^{90}Zr	0,0221	0,2687	12,1496
^{91}Zr	0,0218	0,1028	0,1767
^{92}Zr	0,0216	0,1109	0,6690
^{94}Zr	0,0211	0,1304	3,6443

Pro vypočítání moderačních vlastností solí bylo nutné vypočítat jejich relativní atomovou hmotnost A , mikroskopický účinný průřez pro rozptyl a absorpci (σ_s , σ_a), určit jejich hustotu a vypočítat *průměrný logaritmický dekrement energie* ξ . Makroskopické účinné průřezy se potom vypočítají jako v případě pro izotopy podle rovnice 2.3.

Pro mikroskopický účinný průřez platí sumační zákon, výsledná hodnota pro sůl se proto vypočítá součtem mikroskopických účinných průřezů všech izotopů dané soli, násobené jejich procentním zastoupením a počtem atomů. Příklad pro MgCl_2 je uveden v následující rovnici.

$$\sigma_{s,\text{MgCl}_2} = \frac{P_{24\text{Mg}}}{100} \cdot \sigma_{s,24\text{Mg}} + \frac{P_{25\text{Mg}}}{100} \cdot \sigma_{s,25\text{Mg}} + \frac{P_{26\text{Mg}}}{100} \cdot \sigma_{s,26\text{Mg}} + 2 \cdot \left(\frac{P_{35\text{Cl}}}{100} \cdot \sigma_{s,35\text{Cl}} + \frac{P_{37\text{Cl}}}{100} \cdot \sigma_{s,37\text{Cl}} \right) \quad (2.5)$$

Hodnota A pro sole se vypočítá také součtem, podílem jsou však násobena nukleonová čísla izotopů. Logaritmický dekrement energie ξ bylo nutno vypočítat pomocí váhového průměru, kde váhou je mikroskopický účinný průřez pro rozptyl. Bylo nezbytné respektovat také zastoupení každého izotopu v soli a počet atomů. Příklad pro BeCl_2 se nachází níže.

$$\xi_{\text{BeCl}_2} = \frac{\frac{P_{9\text{Be}}}{100} \cdot \xi_{9\text{Be}} \cdot \sigma_{s,9\text{Be}} + 2 \cdot \left(\frac{P_{35\text{Cl}}}{100} \cdot \xi_{35\text{Cl}} \cdot \sigma_{s,35\text{Cl}} + \frac{P_{37\text{Cl}}}{100} \cdot \xi_{37\text{Cl}} \cdot \sigma_{s,37\text{Cl}} \right)}{\sigma_{s,9\text{Be}} + \sigma_{s,35\text{Cl}} + \sigma_{s,37\text{Cl}}} \quad (2.6)$$

Určení *zpomalovací schopnosti a koeficientu zpomalení* se provede stejným způsobem jako u výpočtu pro izotopy. Po výpočtech byly získané hodnoty zaznamenány do tabulek, které se nacházejí pod tímto textem.

Tab. 2.4: Moderační vlastnosti chloridových solí.

	ξ (-)	$\xi \Sigma_s$ (m^{-1})	$\xi \Sigma_s / \Sigma_a$ (-)
AlCl_3	0,1197	6,6982	0,0597
BeCl_2	0,1102	6,0977	0,0642
CaCl_2	0,0488	2,0202	0,0256
KCl	0,0354	1,0182	0,0180
LiCl	0,0490	2,4786	0,0252
MgCl_2	0,0667	5,6082	0,0359
NaCl	0,0462	1,9775	0,0262
ZrCl_4	0,0706	3,6886	0,0377

Tab. 2.5: Moderační vlastnosti fluoridových solí.

	ξ (-)	$\xi \Sigma_s$ (m^{-1})	$\xi \Sigma_s / \Sigma_a$ (-)
AlF_3	0,2399	6,275665	11,52
BeF_2	0,2054	7,310658	102,2203
CaF_2	0,0416	1,052574	0,948319
KF	0,0481	0,687988	0,128594
LiF	0,1166	3,403891	10,12807
MgF_2	0,0801	2,702234	10,74785
NaF	0,0939	2,340707	1,188943
ZrF_4	0,0476	1,669911	4,49419

Z výsledků je patrné, že fluoridové sole mají lepší moderační schopnosti, než sole chloridové. Za dobrý moderátor lze označit berylium ^9Be , ^{19}F nebo ^{90}Zr . Chlor naopak není příliš dobrý moderátor zejména jeho izotop ^{35}Cl . Také proto se chloridové soli nabízí pro použití ke chlazení rychlých solných reaktorů, kde je moderace neutronů nežádoucí.

2.1.4 Program NJOY

Program NJOY je nástroj ke zpracování jaderných dat z měření. Tento software dokáže překompilovat vstupní údaje do formátu, který je vhodný k dalšímu zpracování v jiných programech.

Program byl vyvinut v laboratořích v Los Alamos, které se nacházejí ve státě Nové Mexiko ve Spojených státech amerických. K dispozici jsou dvě verze programu, *NJOY2016* a *NJOY21*.

NJOY2016 je starší verze, která je však dobře známá dlouhodobým uživatelům. Verze 2016 je již zastaralá, neprobíhá na ní tedy žádný aktivní vývoj, pouze vycházejí záplaty opravující vyskytnuvší se chyby.

NJOY21 je nová verze programu napsaná v programovacím jazyku C++ a je zpětně kompatibilní s NJOY2016. Pro tuto verzi probíhá i v současné době aktivní vývoj. [12]

Instalace programu

Nainstalovaná a zprovozněná verze programu je novější, NJOY21. Jako cílové zařízení byl zvolen přenosný počítač DELL Latitude E6500, jelikož se na něm nachází vhodný operační systém. Na počítači běží nativní Linux Ubuntu 20.04 LTS (Long Time Support), který se ukázal být vhodnější, než emulované či virtualizované linuxové verze. A to i když byla emulace provedena na zařízení s vyšším výpočetním výkonem. Doporučuje se proto vždy instalovat program NJOY21 (případně NJOY2016) právě na zařízení s nativním operačním systémem Linux.

Program NJOY21 je distribuován ve formě zdrojových kódů, z nichž je nutné nejprve sestavit (zkompilovat) spustitelný soubor. Postup uvedený v této kapitole je platný na čisté instalaci operačního systému Linux Ubuntu 20.04 LTS. Předpokladem pro úspěšnou instalaci programu NJOY21 je funkční připojení k internetu.

Samotná instalace programu NJOY21 až po jeho spuštění se sestává z osmi důležitých kroků. Jsou to:

1. Aktualizace balíčků v repositářích Ubuntu.
2. Instalace závislostí.
3. Stažení NJOY21.
4. Příprava na sestavení.
5. Kontrola závislostí a sestavení instrukcí pro kompilaci.
6. Sestavení NJOY21.
7. Spuštění testů.
8. Spuštění NJOY21.

Každý z výše uvedených bodů slouží současně jako hypertextový odkaz na příslušný odstavec s popisem činností nezbytných pro správnou instalaci programu.

Aktualizace balíčků v repositářích Ubuntu

Před instalací závislostí potřebných k sestavení NJOY21 je nutné stáhnout / aktualizovat seznam balíčků poskytovaných v repositářích operačního systému. Ubuntu 20.04 LTS využívá balíčkovací systém APT, jež si na pevném disku uchovává lokální seznam repositářů a balíčků. Automatické stažení, případně aktualizaci tohoto seznamu lze provést příkazem z terminálu:

```
sudo apt update
```

Je vhodné přepnout terminál do režimu s plným oprávněním (tzv. „super uživatele – SU“) pomocí příkazu

```
sudo su
```

a následně potvrdit požadavek heslem.¹ Podoba terminálu přepnutého do režimu SU je zobrazena na obrázku 2.1. Terminál lze spustit klávesovou zkratkou **Ctrl+Alt+T**, nebo si explicitně jeho vyhledáním mezi nainstalovanými aplikacemi.

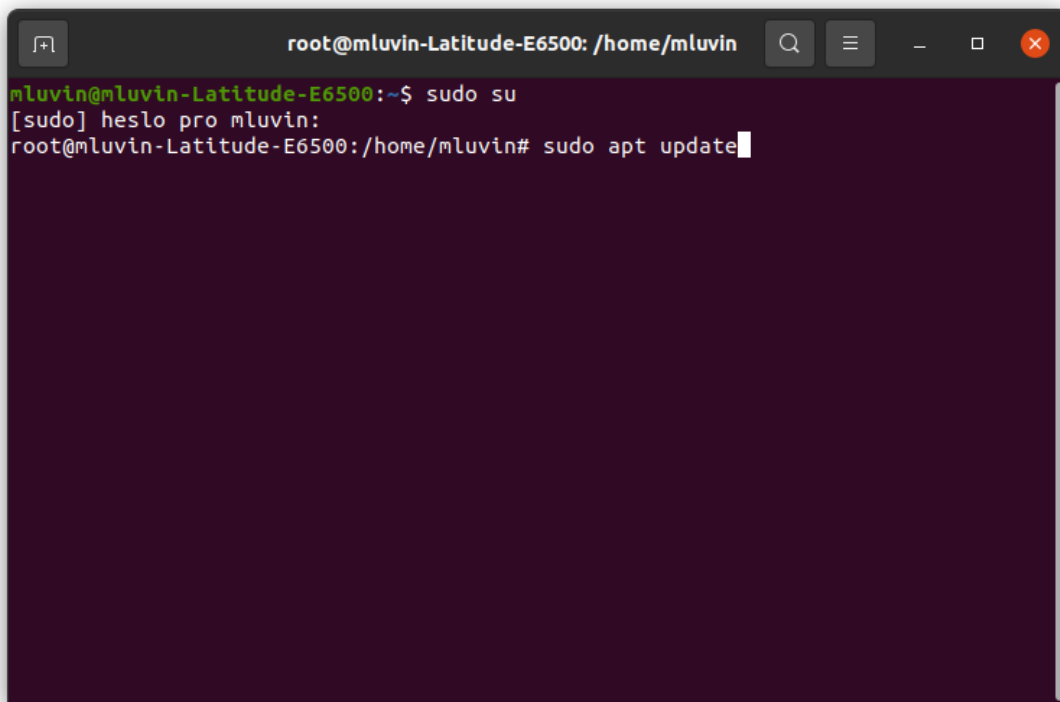
Instalace závislostí

Pro úspěšné stažení a sestavení NJOY21 je nutné do systému nainstalovat příslušné nástroje:

- Git – populární systém verzování souborů, pomocí něž lze jednoduchým způsobem stáhnout zdrojové kódy NJOY21
- GCC – kompilátor programovacího jazyka C
- C++ – kompilátor programovacího jazyka C++
- GFortran – kompilátor programovacího jazyka Fortran
- Python 3 – interpret skriptovacího jazyka Python verze 3
- CMake – program sestavující instrukce pro kompilaci
- Make – program vykonávající instrukce pro kompilaci

Veškeré výše uvedené závislosti lze nainstalovat příkazem v terminálu:

¹Při psaní hesla v terminálu Ubuntu se nezobrazují puntíky reprezentující zadané znaky hesla. Ani kurzor se nikterak nepohybuje během zadávání hesla. Tento jev je v pořádku, takto totiž funguje terminál v OS Linux.



Obr. 2.1: Terminál operačního systému Linux Ubuntu 20.04 LTS v režimu superuživatele a příkaz pro aktualizaci.

```
sudo apt install git gcc g++ gfortran python3 cmake make
```

V případě potřeby se potvrdí požadavek a nástroje se už do systému nainstalují automaticky.

Stažení NJOY21

Zdrojové kódy NJOY21 jsou umístěny na serveru GitHub. Lze je jednoduše stáhnout pomocí klienta Git příkazem:

```
git clone --branch v1.2.1 https://github.com/njoy/NJOY21.git
```

Zdrojové kódy se samočinně stáhnou do podadresáře *NJOY21*. Příkaz je stále zadáván do terminálu operačního systému Linux.

Příprava na sestavení

Nejprve přejdeme do podadresáře se zdrojovými kódy NJOY21 příkazem:

```
cd NJOY21
```

V tomto adresáři vytvoříme další podadresář *bin*, do kterého bude po kompilaci umístěn spustitelný soubor. Vytvoření složky provedeme v terminálu Linuxu pomocí:

```
mkdir bin
```

A do vytvořeného adresáře se přesuneme příkazem:

```
cd bin
```

Kontrola závislostí a sestavení instrukcí pro kompilaci

Před samotnou kompilací je nutné sestavit tzv. *Makefile*. V tomto souboru budou uvedeny instrukce pro program *make*, který NJOY21 zkompile. *Makefile* lze sestavit příkazem:

```
cmake -D CMAKE_BUILD_TYPE=Release ..
```

V případě, že potřebujeme kompilaci zrychlit a netrváme na sestavení testů sloužících k ověření správné funkčnosti sestaveného NJOY21, spustíme namísto výše uvedeného příkazu následující:

```
cmake -D CMAKE_BUILD_TYPE=Release -D njoy21_unit_tests=OFF ..
```

Sestavení testů je paměťově náročný proces. Pokud se na provedení všech testů netrvá, doporučuje se využít k sestavení *Makefile* druhý příkaz.

Sestavení NJOY21

Samotnou kompilaci programu NJOY21 provedeme příkazem:


```
make
```

Proces kompilace je velice náročný a může trvat několik desítek minut až jednotek hodin v závislosti na výpočetním výkonu počítače, na kterém kompilace probíhá. Pokud chceme kompilaci urychlit, můžeme ji spustit na více procesorových vláknech. K tomu nám poslouží příkaz:

```
make -jX
```

kde X je počet vláken procesoru, na kterém chceme kompilaci spustit.

Spuštění testů

Pokud chceme spustit testy ověřující bezchybnost kompilace NJOY21, zadáme do terminálu příkaz:

```
make test
```

Očekáváme výstup potvrzující bezchybnost kompilace. Pokud se přesto objeví potíže, najdeme si ve vygenerované zprávě (logu) příčinu problému. Nejčastěji se může jednat o nedostatek operační paměti (RAM). Proto je lepší provádět kompilaci na počítači disponujícím dostatečným výpočetním výkonem.

Spuštění NJOY21

Po dokončení kompilace byl do aktuálního adresáře *bin* umístěn spustitelný soubor *njoy21*. Jeho spuštění provedeme příkazem:

```
./njoy21
```

Neustále však musíme být v terminálu přítomni v adresáři *bin* umístěném ve složce NJOY21. Pro ověření přítomnosti spustitelného souboru můžeme napsat příkaz:

```
ls
```

nebo

Pokud jsme postupovali celou dobu správně, zobrazí se nám v Linuxovém terminálu úvodní nápis „NJOY21“, pod kterým blikající kurzor značí připravenost programu k práci. NJOY21 nemá grafické rozhraní a pracuje se s ním prostřednictvím příkazů zadávaných do terminálu. Pokud chceme program ukončit, napíšeme:

```

mluvn@mluvn-Latitude-E6500:~$ ./njoy21
+++  +++  '+'  '#000;  ,000  +000  '000+  :;0
0000 000: 0000 000000000 000: 000# 0000000+ 000000
0000 000: 0000 000000000 000; 000 000000000 000000
000# 000: 0000 000000000 ,000 0000 000000000 000000
0000 000: 0000 +000 ,000 0000 000, 000, 000 ++0000
000000 000: 0000 +000 '000 000, 000+ 000' 000. 0000
000000 000: 0000 +000 '000 0000,000+ 000' 000. 0000
000000 000: 0000 +000 '000 0000,000 ... 000. 0000
000000 000: 0000 +000 '000 0000000 000. 0000
000000 000: 0000 +000 '000 000000 :0000 0000
0000+00:000: 0000 +000 '000 0000: 000000; 0000
000 000000: 0000 +000 '000 0000 000000+ 0000
000 000000: ... 0000 +000 '000 #000 00000# 0000
000 ;0000: 0000 +000 '000 #000 0000 0000 0000
000 00000: 0000 +000 '000 #000 000 000 ... 0000
000 00000: 000+ 0000 +000 '000 #000 000' 0000
0000 ,0000: 0000 +000 '000 #000 000' 000. 0000
0000 0000: 0000000000 '0000000000 #000 0000000000 0000
0000 0000: 0000000000: 0000000000 #000 0000000000 0000
0000 000: 00000000 #00000000 #000 0000000000 0000
000+ 000. :000#,  ;++++, .+++ ++++++ ;+++
000+

```

Obr. 2.2: Úspěšně spuštěný program NJOY21 – úvodní nápis v terminálu.

stop

a pro uzavření samotného terminálu se použije příkazu:

exit

Příkaz `exit` bude možná potřeba použít dvakrát: jestliže se nacházíme v režimu superuživatele (SU), první zadání příkazu `exit` ukončí tento režim plného oprávnění, a až následující opakovaný příkaz ukončí spuštěný terminál.

V případě jakýchkoli nesrovnalostí se doporučuje vrátit se zpět na výpis kroků k instalaci programu a vyhledat si bod, ve kterém došlo k potížím. Jestliže počítač, na který má být program NJOY21 nainstalován, nedisponuje dostatečným výkonem pro kompilaci, existuje možnost kompilace na jiném zařízení (druhý počítač nebo server) a zkopírovat získaný binární soubor přes přenosné paměťové médium (např. flash disk), on-line prostřednictvím FTP, nebo odesláním v příloze elektronické pošty.

2.1.5 Příprava vzorků

Pro experimenty bylo zvoleno indium. To v přírodní formě obsahuje dva izotopy: ^{113}In a ^{115}In . Obsah izotopu ^{113}In je pouhé 4,3 %, zastoupení ^{115}In je tedy 95,7%. Z tohoto důvodu můžeme počítat pouze s ^{115}In , neboť se nám ^{113}In v měření neprojeví.

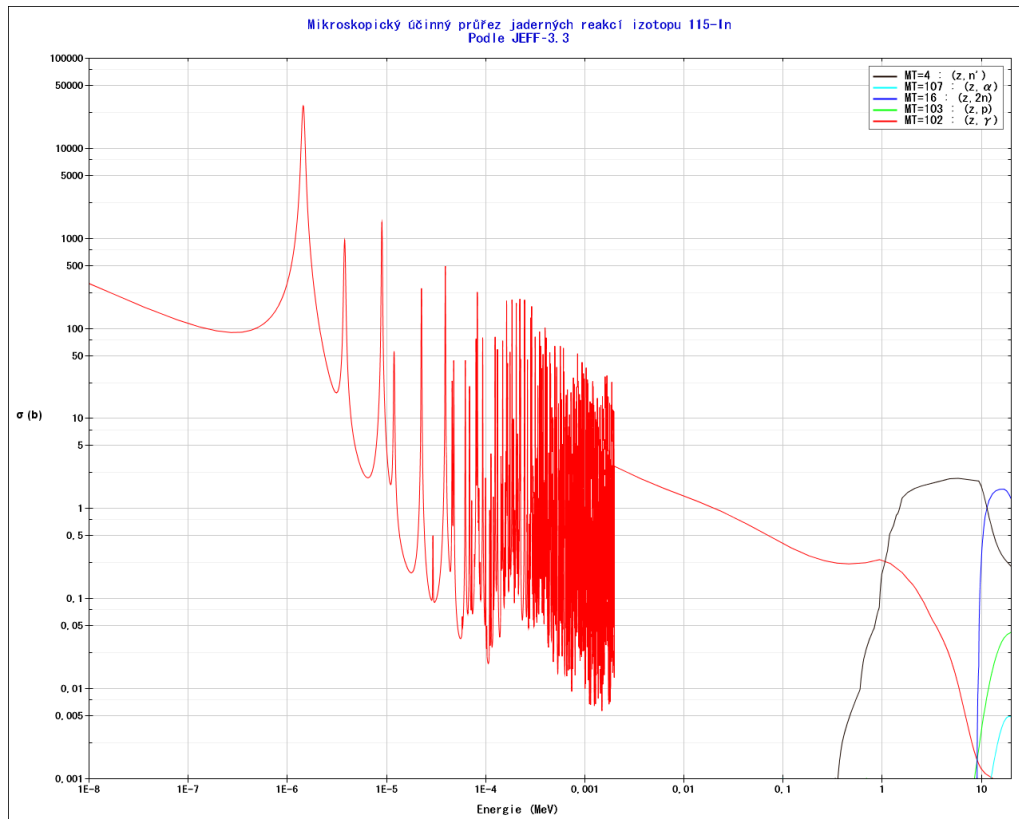
Jaderné reakce

Na následujícím obrázku se nachází průběhy mikroskopických účinných průřezů různých jaderných reakcí pro izotop ^{115}In . Zdrojem dat byla evropská knihovna JEFF-3.3.

Jak si lze povšimnout, v daném energetickém spektru neutronů jsou zcela dominantní dvě jaderné reakce: nepružný rozptyl (n,n') a neutronový záchyt (n,γ). Z těchto reakcí obdržíme po vystavení vzorků india neutronovému zdroji následující prvky:

Tab. 2.6: Zisky z jaderných reakcí izotopu ^{115}In [9].

^{115}In				
Reakce	(n,n')	(n, γ)		
Prvek	$^{115*}\text{In}$	^{116}In	$^{116*}\text{In}$	$^{116**}\text{In}$
$T_{1/2}$	4,486 h	14,10 s	54,29 m	2,18 s
Přeměna 1	IT (95,0%)	β^- (>99,94%)	β^- (100%)	IT (100%)
Přeměna 2	β^- (5,0%)	ϵ (<0,06%)	–	–
γ (keV)	336,244 100,00 %	– –	416,860 27,70 %	162,393 37,20 %



Obr. 2.3: Mikroskopické účinné průřezy jaderných reakcí pro ^{115}In .

Z tabulky vyplývá, že v našich podmínkách budeme schopni změřit ^{115}In v případě nepružného rozptylu a ^{116}In u zachytu neutronu. Ostatní produkty ozáření budou neměřitelné z důvodu krátkých poločasů přeměny, nízkých intenzit γ záření, nebo energie γ v necitlivém poli HPGe detektoru.

V získaných spektrech budeme očekávat dominující pík s energií 336,224 keV, neboť ten má 100% intenzitu a jeho zdrojem je β záření z izotopu s delším poločasem přeměny.

Vzorky

Vzorky, které budou ozařovány neutronovým zdrojem v solné prismě, jsou válečky z india. Průměrná výška každého válečku je 24 mm s průměrem 15 mm. Rozměry jednotlivých válečků se mírně liší.

Celkový počet vzorků je 12. Každý váleček byl zvážen a jeho hmotnost byla zaznamenána do tabulky (tabulka 2.7). Průměrná hmotnost všech válečků činí 31,9112 g. Pro kontrolu byla vypočítána také hustota vzorků. Hustotu získáme výpočtem po dosazení do následující rovnice:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\pi \cdot r^2 \cdot h} \quad (2.7)$$

Tab. 2.7: Čísla a hmotnosti válečků.

Vzorky india	
Číslo	Hmotnost (g)
1	31,4752
2	31,0254
3	32,2752
4	31,8419
5	32,5969
6	32,2280
7	31,3487
8	31,7032
9	31,3321
10	32,5646
11	31,9215
12	32,6217

Po výpočtu jsme obdrželi hodnotu $7,524185511 \text{ g/cm}^3$. Po srovnání s tabulkovou hodnotou (zdroj: <http://www.prvky.com/49.html>), která udává hustotu $7,31 \text{ g/cm}^3$ můžeme potvrdit, že se skutečně jedná o indium.

Rozdíly vypočítané hodnoty proti tabulkové jsou způsobeny teplotou, při níž byly získávány rozměry válečků ($t_{LAB} \doteq 23 \text{ }^\circ\text{C}$), nepřesnost odečítání hodnoty z posuvného měřidla, nepřesnosti při měření hmotnosti a celkově drobné odchylky různých zdrojů.

Ještě před zahájením ozařování byly vzorky očíslovány, aby je bylo možné při každém ozařování seřadit vždy ve stejném pořadí (obrázek 2.4). Vzhledem k odlišným hmotnostem a drobným rozdílům v geometrii jednotlivých válečků tak získáme pro každý vzorek tutéž chybovost.



Obr. 2.4: Očíslované vzorky india před ozařováním.

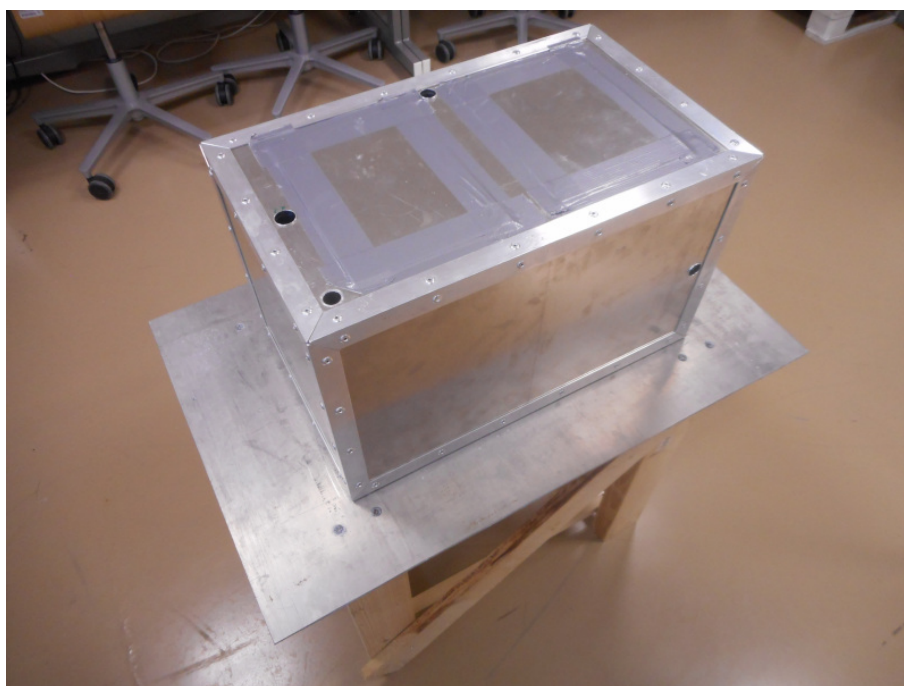
2.2 Průběh měření

Samotný experiment se sestával ze tří částí: ozařování, nabírání spektra ozářených vzorků a zpracování získaných dat.

Ozařování proběhlo celkem devětkrát, z toho dvakrát v prvním měřicím kanálu, pětinásobně ve druhém kanálu a opět dvakrát ve třetím měřicím kanálu. Práce v laboratoři byly prováděny od 19. 2. roku 2021 do 29. 3. Vzorky byly ozařovány během víkendů, vždy od pátečního odpoledne do pondělního rána. Vzhledem k poločasům přeměn stačila doba ozařování k nasycení vzorků ($10 \times T_{1/2}$). Současně se kladl důraz na bezpečnost, aby se v čase ozařování nenacházely osoby v blízkosti solné prisma s vloženým neutronovým zdrojem. Jelikož se v prostoru nad laboratoří IZ nachází jiná laboratoř, nemohlo být ozařování prováděno v průběhu pracovního dne. Pouze pro doplnění hodnot bylo přistoupeno k ozařování během noci, což stačilo k nasycení ^{116}In z (n,γ) reakcí.

2.2.1 Solná prisma

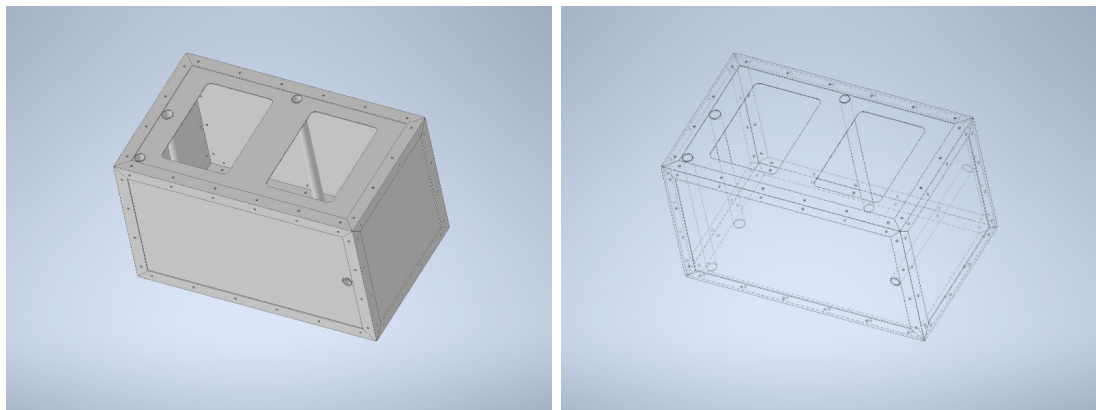
Solná prisma je označení pro konstrukci, v níž probíhalo ozařování vzorků india. Má tvar kvádrů a je zhotovena z nerezového plechu s výztuhami na hranách v podobě L-profilu. Na obrázku 2.5 je vidět reálná podoba prisma a její umístění v laboratoři IZ.



Obr. 2.5: Fotografie solné prisma.

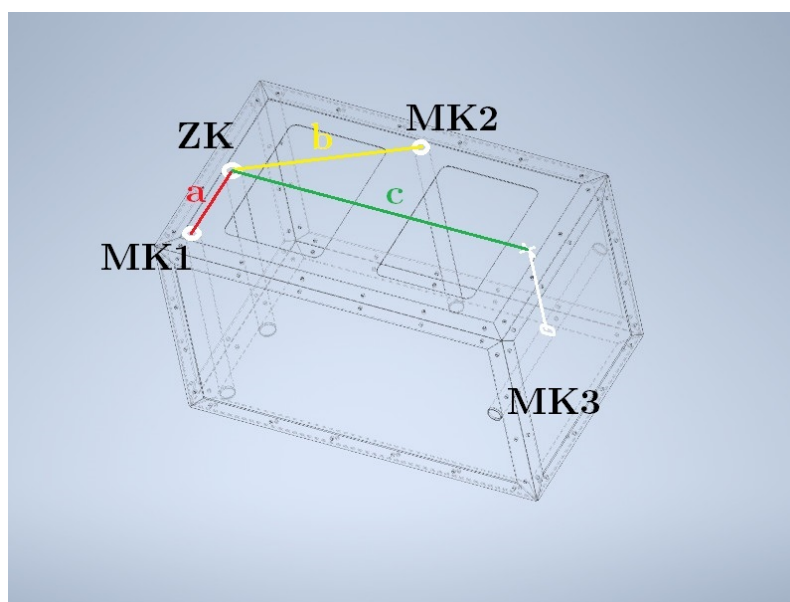
Rozměry konstrukce jsou $297 \times 297 \times 497$ mm (šířka \times výška \times délka), síla plechu po stěnách činí 1,5 mm a úhelníky s mocností 2 mm mají délku stran 25×25 mm.

Prostor uvnitř solné prismy je prázdný a slouží k naplnění libovolné soli či solné směsi podle potřeb experimentu. Tělesem prismy procházejí celkem čtyři trubice, jedná se o zdrojový kanál (ZK) a tři měřicí kanály (MK). Vnitřní průměr ZK pro AmBe má 20 mm, hodnota vnějšího průměru je 22 mm. Vnitřní průměr měřicích kanálů má hodnotu 18 mm a síla stěny činí 1 mm.



Obr. 2.6: 3D model solné prismy (autor Ing. Dušan Král).

Obrázek 2.6 ukazuje 3D model solné prismy. Autorem modelu je Ing. Dušan Král. Modely umožní nahlédnout do (vnitřního) uspořádání kanálů a jejich vzájemných pozic. Další obrázek (obr. 2.7) pak zobrazuje upravený drátový model se zvýrazněným označením jednotlivých kanálů a vyznačením jejich vzdálenosti.



Obr. 2.7: 3D model solé prismy s vyznačenými kanály a jejich vzdálenostmi.

Vzdálenost MK1 od zdrojového kanálu (ZK) $a = 115$ mm, rozměr $b = 244$ mm a $c = 430$ mm.

V průběhu ozařování byla solná prisma naplněna NaCl a utěsněna, aby nedocházelo k pohlcování vzdušné vlhkosti solí a tím k jejímu znehodnocování a změně vlastností. Jiná sůl při experimentech použita nebyla.

2.2.2 Ozařování

Při ozařování se AmBe neutronový zdroj nacházel ve zdrojovém kanále (ZK) a válečky india byly poskládány do sloupce jeden na druhý v pořadí 1 až 12 (vzorek č. 1 nejvýše, číslo 12 nejnižše). Takto vzniklý komín ze vzorků se zabalil do papíru, kterým byly válečky drženy při sobě, a vsunul do jednoho ze tří měřících kanálů. Během ozařování se všechny vzorky nacházely pouze v jednom měřícím kanále. Doba trvání každého ozařování byla zaznamenána pro pozdější výpočty.

Po ukončení ozařování a vložení neutronového zdroje do stínění bylo nezbytné v co nejkratší době vybalit vzorky z papírového obalu a umístit je do HPGe detektoru, neboť po odebrání zdroje neutronů doházelo k poklesu aktivity ozářeného india. Ještě před vložením do detektoru se musel každý váleček umístit do plastové fólie, protože indium zanechává stopy („špiní“). Bez zabalení by došlo ke znečištění detektoru nebo zanechání částic RA india na prstech ruky během manipulace se vzorky. Na obrázku 2.8 se nachází fotografie vzorků v plastových fóliích.

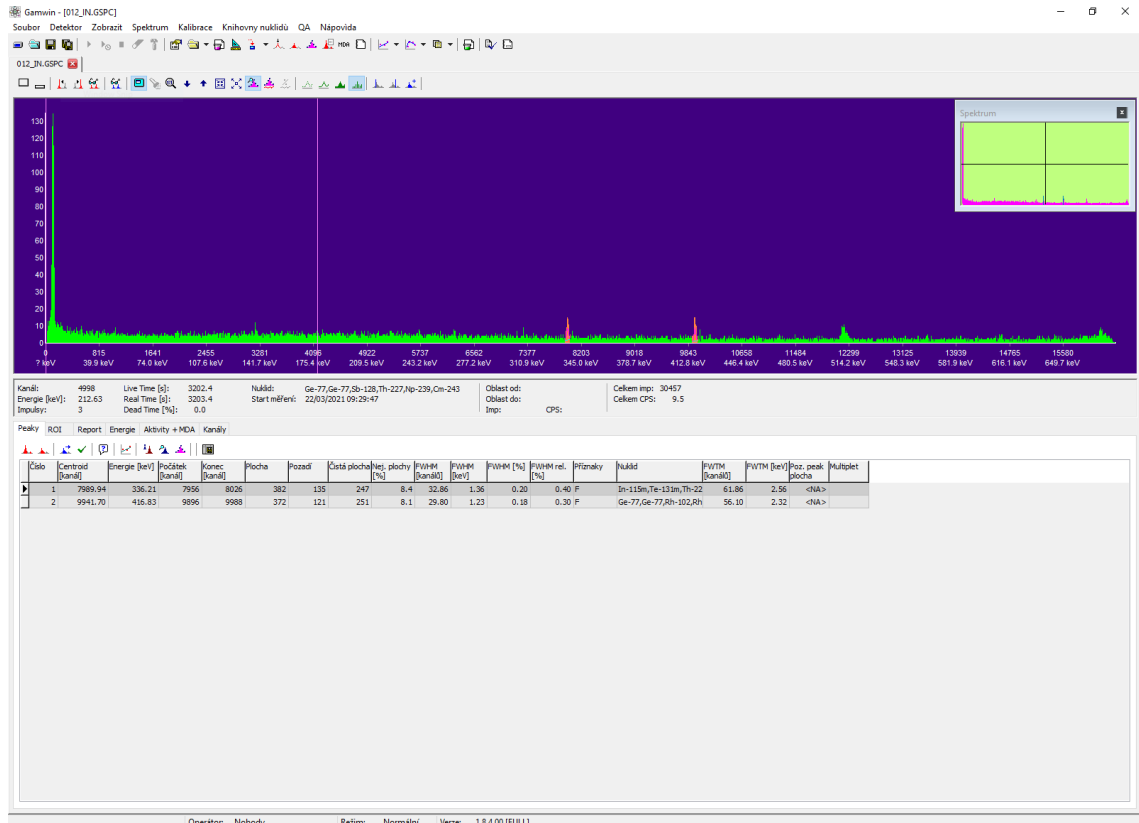


Obr. 2.8: Zabalené vzorky india připravené k měření v HPGe detektoru.

2.3 Naměřená data

Nasbíráno bylo dohromady 61 spekter. Na první měřicí kanál (MK1) připadá 18, ze druhého měřicího kanálu bylo získáno 32 spekter a ze třetího (posledního) měřicího kanálu jich bylo 11.

Ve spektrech byly odečítány plochy píků gama linek s energií odpovídající vzniklým radionuklidům z ozářeného india. Konkrétně se jedná o 336,244 keV ze $^{115}\text{*In}$ po nepružném rozptylu (n,n') a 416,86 keV ze $^{116}\text{*In}$ po (n, γ) reakci.



Obr. 2.9: Grafické rozhraní programu GAMWIN.

Všechna získaná spektra byla zpracována v programu GAMWIN jehož grafické uživatelské rozhraní se nachází na obrázku 2.9. Mimo samotné velikosti plochy píků jsme se zajímali také o nejistotu každé plochy, reálnou dobu měření (τ_{REAL}) dobu aktivního snímání detektoru (τ_{LIVE}) a dobu zahájení měření.

Všechna naměřená data byla zaznamenána do tabulek a nachystána k dalšímu zpracování. Tabulky se zaznamenanými hodnotami ke zhlédnutí se nacházejí níže.

Tab. 2.8: Data naměřená z ozářených vzorků z MK1.

1. měření – 22. 2. 2021							
Vzorek	Plocha 336,244 keV		Plocha 416,86 keV		t_{REAL} (s)	t_{LIVE} (s)	Start měření (hh:mm:ss)
	Čistá	Nejistota (%)	Čistá	Nejistota (%)			
001_In	369	5,8	134	9,6	1 522,5	1 522,0	9:20:37
002_In	609	4,3	127	10,1	1 805,5	1 805,0	10:05:57
003_In	583	4,4	41	18,3	1 870,9	1 870,4	11:08:39
004_In	769	3,8	29	24,2	2 160,9	2 160,3	12:25:24
005_In	1295	3,0	–	–	4 140,8	4 139,8	13:53:46
006_In	657	4,2	–	–	2 690,3	2 689,7	16:05:55
007_In	963	3,5	–	–	3 675,7	3 674,8	15:03:55
008_In	605	4,5	–	–	3 580,2	3 579,4	16:51:25
009_In	754	4,0	33	26,6	2 976,6	2 975,8	13:02:29
010_In	710	4,0	45	22,7	2 599,6	2 598,9	11:41:10
011_In	423	5,1	25	27,2	1 802,3	1 801,8	10:37:12
012_In	182	8,9	108	11,0	1 021,3	1 020,9	9:47:44
2. měření – 26. 2. 2021							
001_In	–	–	–	–	–	–	–
002_In	–	–	–	–	–	–	–
003_In	–	–	–	–	–	–	–
004_In	913	3,4	127	9,5	2 213,9	2 213,3	11:24:58
005_In	819	3,7	181	8,1	1 745,7	1 745,1	10:34:54
006_In	677	3,9	103	11,7	1 149,7	1 149,3	11:04:43
007_In	1164	3,2	312	6,6	1 791,5	1 790,7	10:04:14
008_In	925	3,4	87	13,2	1 825,6	1 825,1	12:03:28
009_In	1344	2,9	68	16,6	4 548,0	4 546,9	12:34:49
010_In	–	–	–	–	–	–	–
011_In	–	–	–	–	–	–	–
012_In	–	–	–	–	–	–	–

Tab. 2.9: Data naměřená z ozářených vzorků z MK2 (1/3).

1. měření – 1. 3. 2021							
Vzorek	Plocha 336,244 keV		Plocha 416,86 keV		t_{REAL} (s)	t_{LIVE} (s)	Start měření (hh:mm:ss)
	Čistá	Nejistota (%)	Čistá	Nejistota (%)			
001_In	105	11,5	87	12,6	1347,6	1347,3	9:37:36
002_In	–	–	–	–	–	–	–
003_In	196	9,0	89	12,0	2369,7	2369,1	10:34:59
004_In	325	6,3	43	23,8	3579,5	3578,6	12:12:45
005_In	435	5,8	–	–	7882,2	7880,5	15:09:57
006_In	–	–	–	–	–	–	–
007_In	340	6,9	–	–	8058,9	8057,1	17:22:48
008_In	429	6,1	43	27,0	6970,4	6968,9	13:13:02
009_In	351	6,0	55	21,5	3414,5	3413,6	11:15:08
010_In	228	7,3	79	14,7	1999,8	1999,2	10:00:59
011_In	–	–	–	–	–	–	–
012_In	–	–	–	–	–	–	–
2. měření – 5. 3. 2021							
001_In	–	–	–	–	–	–	–
002_In	–	–	–	–	–	–	–
003_In	–	–	–	–	–	–	–
004_In	187	8,8	99	11,7	1655,4	1654,9	8:51:50
005_In	303	6,9	59	19,0	3906,8	3905,9	9:56:00
006_In	374	5,7	36	33,8	4693,7	4692,7	11:53:42
007_In	366	5,9	55	20,9	3906,8	3905,9	10:47:42
008_In	239	7,7	88	12,1	3032,2	3031,5	9:20:04
009_In	–	–	–	–	–	–	–
010_In	–	–	–	–	–	–	–
011_In	–	–	–	–	–	–	–
012_In	–	–	–	–	–	–	–

Tab. 2.10: Data naměřená z ozářených vzorků z MK2 (2/3).

1. měření – 1. 3. 2021							
Vzorek	Plocha 336,244 keV		Plocha 416,86 keV		t_{REAL} (s)	t_{LIVE} (s)	Start měření (hh:mm:ss)
	Čistá	Nejistota (%)	Čistá	Nejistota (%)			
3. měření – 19. 3. 2021							
001_In	–	–	–	–	–	–	–
002_In	–	–	–	–	–	–	–
003_In	–	–	–	–	–	–	–
004_In	–	–	–	–	–	–	–
005_In	477	5,2	116	10,0	3296,7	3295,9	11:01:05
006_In	416	5,8	–	–	4440,6	4439,6	11:56:38
007_In	389	6,0	85	10,1	3192,9	3192,0	10:06:48
008_In	–	–	–	–	–	–	–
009_In	–	–	–	–	–	–	–
010_In	–	–	–	–	–	–	–
011_In	–	–	–	–	–	–	–
012_In	–	–	–	–	–	–	–
4. měření – 22. 3. 2021							
001_In	–	–	–	–	–	–	–
002_In	224	7,6	89	12,6	2295,7	2295,1	10:23:49
003_In	507	5,4	–	–	6615,9	6614,3	11:48:26
004_In	386	5,7	–	–	7486,1	7484,4	15:39:37
005_In	375	8,0	–	–	14400,0	14397,0	19:37:56
006_In	–	–	–	–	–	–	–
007_In	–	–	–	–	–	–	–
008_In	–	–	–	–	–	–	–
009_In	229	9,1	–	–	7277,0	7275,4	17:35:07
010_In	339	7,9	–	–	6586,9	6585,4	13:39:20
011_In	192	9,3	48	19,1	2711,8	2711,2	11:02:40
012_In	247	8,4	251	8,1	3203,4	3202,4	9:29:46

Tab. 2.11: Data naměřená z ozářených vzorků z MK2 (3/3).

1. měření – 1. 3. 2021							
Vzorek	Plocha 336,244 keV		Plocha 416,86 keV		t_{REAL} (s)	t_{LIVE} (s)	Start měření (hh:mm:ss)
	Čistá	Nejistota (%)	Čistá	Nejistota (%)			
5. měření – 29. 3. 2021							
001_In	–	–	–	–	–	–	–
002_In	–	–	–	–	–	–	–
003_In	193	8,4	65	17,6	1801,5	1801,0	9:11:34
004_In	214	7,9	26	27,1	2274,0	2273,5	10:22:12
005_In	385	5,9	–	–	3999,5	3998,5	11:00:33
006_In	475	5,8	–	–	5136,0	5134,9	13:03:56
007_In	349	6,1	–	–	5556,0	5554,7	14:30:02
008_In	246	7,5	–	–	3334,0	3333,2	12:07:51
009_In	270	6,6	47	20,1	2364,6	2364,0	9:42:07
010_In	194	9,2	84	13,2	1800,9	1800,3	8:40:52
011_In	–	–	–	–	–	–	–
012_In	–	–	–	–	–	–	–

Tab. 2.12: Data naměřená z ozářených vzorků z MK3.

1. měření – 8. 3. 2021							
Vzorek	Plocha 336,244 keV		Plocha 416,86 keV		t_{REAL} (s)	t_{LIVE} (s)	Start měření (hh:mm:ss)
	Čistá	Nejistota (%)	Čistá	Nejistota (%)			
001_In	–	–	–	–	–	–	–
002_In	–	–	–	–	–	–	–
003_In	–	–	–	–	–	–	–
004_In	64	20,4	43	24,5	7395,0	7393,4	14:00:56
005_In	98	14,2	44	20,3	5183,6	5182,4	10:33:42
006_In	36	32,3	127	8,9	2966,0	2965,2	8:42:10
007_In	98	13,3	42	25,3	3627,2	3626,3	9:32:29
008_In	129	12,4	69	15,2	7162,6	7161,0	12:00:48
009_In	78	18,0	43	29,7	7140,0	7138,5	16:04:52
010_In	–	–	–	–	–	–	–
011_In	–	–	–	–	–	–	–
012_In	–	–	–	–	–	–	–
2. měření – 15. 3. 2021							
001_In	–	–	–	–	–	–	–
002_In	–	–	–	–	–	–	–
003_In	112	15,5	33	27,6	7834,9	7833,3	14:00:45
004_In	120	13,5	78	15,1	5126,7	5125,5	10:44:28
005_In	–	–	–	–	–	–	–
006_In	–	–	–	–	–	–	–
007_In	–	–	–	–	–	–	–
008_In	37	34,1	118	9,9	3749,9	3748,9	9:41:10
009_In	64	25,1	63	15,6	6549,1	6547,6	12:11:04
010_In	66	18,4	31	27,0	7664,6	7663,0	16:11:54
011_In	–	–	–	–	–	–	–
012_In	–	–	–	–	–	–	–

2.4 Zpracování dat

Počet zpracovaných dat je celkem 106, v případě reakce (n,n') z MK1 se jedná o 18 spekter, pro reakci (n, γ) pak 14 ze vzorků ozařovaných v prvním měřicím kanálu. Z reakcí (n,n') z druhého měřicího kanálu (MK2) potom bylo 32 a 20 z (n, γ). Nakonec v případě MK3 bylo zpracováno 11 spekter pro každou ze sledovaných reakcí (dohromady 22 pro MK3).

2.4.1 Reakční rychlosti

Z naměřených hodnot byly vypočítány reakční rychlosti podle následující rovnice. Po výpočtu obdržíme hodnoty v jednotkách ($\text{atom}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) [24]

$$R_{R,In} = \frac{M \cdot S(E_\gamma) \cdot \lambda \cdot \frac{t_{REAL}}{t_{LIVE}}}{N_A \cdot m \cdot \varepsilon_{FEP}(E_\gamma) \cdot I_\gamma(E_\gamma) \cdot (1 - e^{-\lambda t_{IRR}}) \cdot e^{-\lambda t_{COOL}} \cdot (1 - e^{-\lambda t_{REAL}})} \cdot \frac{1}{\eta_A} \quad (2.8)$$

kde

M	je molární hmotnost india (g/mol)
$S(E_\gamma)$	je plocha píku (-)
λ	je rozpadová konstanta (s^{-1})
t_{REAL}	je skutečný čas měření (s)
t_{LIVE}	je čas měření bez mrtvé doby (s)
N_A	je Avogadrova konstanta ($N_A = 6,02214076 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)
m	značí hmotnost vzorku (g)
$\varepsilon_{FEP}(E_\gamma)$	je účinnost detekce píku plného pohlcení (-)
$I_\gamma(E_\gamma)$	je intenzita linky gama záření (-)
t_{IRR}	značí dobu ozařování (s)
t_{COOL}	je čas od konce ozařování a začátku každého měření (s)
$\frac{1}{\eta_A}$	je korekce na samostínění (-)

Píková efektivita pro energie 336,244 keV a 416,86 keV byla získána lineární interpolací dvou nejbližších hodnot z autorské bakalářské práce.

Následně bylo nutné provést korekci na počet atomů ^{115}In , ve kterém ke sledovaným reakcím dochází. To se provede tak, že se hodnota reakčních rychlostí (pro přírodní směs india) vynásobí procentním podílem izotopu ^{115}In v indiu.

$$R_R = R_{R,In} \cdot \frac{95,7}{100} \left(\text{atom}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \right) \quad (2.9)$$

Všechny vypočítané hodnoty byly zapsány do tabulky a pro každý měřicí kanál a reakci byl vytvořen graf.

Tab. 2.13: Reakční rychlosti získané z naměřených hodnot.

Vzorek	MK1		MK2		MK3	
	R_R (atom ⁻¹ ·s ⁻¹) (n,n')	(n,γ)	R_R (atom ⁻¹ ·s ⁻¹) (n,n')	(n,γ)	RR (atom ⁻¹ ·s ⁻¹) (n,n')	(n,γ)
001_In	$7,37 \cdot 10^{-22}$	$6,64 \cdot 10^{-23}$	$7,40 \cdot 10^{-23}$	$9,73 \cdot 10^{-24}$	–	–
002_In	$1,56 \cdot 10^{-21}$	$1,99 \cdot 10^{-22}$	$1,04 \cdot 10^{-22}$	$1,28 \cdot 10^{-23}$	–	–
003_In	$1,63 \cdot 10^{-21}$	$2,43 \cdot 10^{-22}$	$1,1 \cdot 10^{-22}$	$3,19 \cdot 10^{-23}$	$5,84 \cdot 10^{-23}$	$1,43 \cdot 10^{-23}$
004_In	$2,42 \cdot 10^{-21}$	$2,83 \cdot 10^{-22}$	$1,27 \cdot 10^{-22}$	$7,68 \cdot 10^{-23}$	$1,24 \cdot 10^{-22}$	$1,83 \cdot 10^{-23}$
005_In	$2,83 \cdot 10^{-21}$	$3,16 \cdot 10^{-22}$	$1,38 \cdot 10^{-22}$	$1,17 \cdot 10^{-22}$	$1,48 \cdot 10^{-22}$	$2,09 \cdot 10^{-23}$
006_In	$3,05 \cdot 10^{-21}$	$3,94 \cdot 10^{-22}$	$1,53 \cdot 10^{-22}$	$1,58 \cdot 10^{-22}$	$2,09 \cdot 10^{-22}$	$3,25 \cdot 10^{-23}$
007_In	$2,97 \cdot 10^{-21}$	$3,21 \cdot 10^{-22}$	$1,47 \cdot 10^{-22}$	$2,54 \cdot 10^{-22}$	$2,61 \cdot 10^{-22}$	$4,54 \cdot 10^{-23}$
008_In	$2,52 \cdot 10^{-21}$	$3,14 \cdot 10^{-22}$	$1,28 \cdot 10^{-22}$	$1,74 \cdot 10^{-22}$	$2,45 \cdot 10^{-22}$	$3,26 \cdot 10^{-23}$
009_In	$2,09 \cdot 10^{-21}$	$2,67 \cdot 10^{-22}$	$1,11 \cdot 10^{-22}$	$1,28 \cdot 10^{-22}$	$1,54 \cdot 10^{-22}$	$2,85 \cdot 10^{-23}$
010_In	$1,57 \cdot 10^{-21}$	$2,33 \cdot 10^{-22}$	$1,04 \cdot 10^{-22}$	$9,24 \cdot 10^{-23}$	$1,25 \cdot 10^{-22}$	$1,92 \cdot 10^{-23}$
011_In	$1,15 \cdot 10^{-21}$	$1,56 \cdot 10^{-22}$	$8,7 \cdot 10^{-23}$	$5,98 \cdot 10^{-23}$	–	–
012_In	$9,79 \cdot 10^{-22}$	$1,56 \cdot 10^{-22}$	$7,37 \cdot 10^{-23}$	$1,35 \cdot 10^{-23}$	–	–

Hodnoty pro (n,γ) reakce jsou však zatíženy chybou, neboť po ukončení ozařování docházelo k prudkému poklesu aktivity radionuklidu ^{116*}In z důvodu jeho krátkého poločasu přeměny a malé intenzity gama linky. Z časových důvodů tak byly odečítány i nevýrazné plochy píků, které by byly za jiných okolností ignorovány.

Pouze v případě MK2 vykazují hodnoty reakčních rychlostí pro (n,γ) vyšší přesnosti oproti (n,n'), neboť právě na výsledky z (n,γ) pro tento měřicí kanál byla kladena nejvyšší pozornost.

2.5 NJOY

NJOY je nástroj pro zpracování jaderných dat z ENDF knihoven. Nejčastěji slouží k vytvoření grafů účinných průřezů pro různé nuklidy a jejich reakce. NJOY lze též použít k přepracování údajů do vstupního souboru pro jiné (jadené) programy, např. MCNP.

Samotný program se skládá z několika modulů, které se volají v případě potřeby zadáním jejich názvů a parametrů ve vstupním souboru. Námi používané modly byly *RECONR* – pro rekonstrukci dat účinných průřezů z ENDF knihovny do bodového průběhu podle energie neutronů, *BROADR* – přepočítání rekonstruovaných dat na teplotu $T = 296$ K (odpovídá 23°C v laboratoři), *PLOTR* – vytvoření grafu, *VIEWR* – převede graf z datového formátu do post-script souboru k prohlížení a *ACER* –

pro vytvoření vstupních souborů pro výpočet v programu MCNP. [13]

Pomocí programu NJOY byly zpracovány jaderné knihovny – data účinných průřezů pro reakce s neutrony. Pro porovnání bylo vybráno pět knihoven v jejich aktuální verzi: ruská (BROND–3.1), čínská (CENDL–3.2), americká (ENDF B–VIII.0), evropská (JEFF–3.3) a japonská (JENDL–4.0). Porovnávány byly průběhy (n,n') a (n,γ) reakcí pro NaCl, tedy izotopy ³⁵Cl, ³⁷Cl a ²³Na, což byla sůl umístěná v solné prismě, ve které probíhalo ozařování india.

2.5.1 Výpočet v MCNP

Z nachystaných dat pomocí NJOY a spolu s vedoucím práce byl pro výpočet použit model vytvořený Ing. Ondřejem Štastným. Teoretické hodnoty reakčních rychlostí byly vypočítány vedoucím práce v programu MCNP ve verzi 6.2. Referenční výpočet vychází z doporučených dat této verze MCNP, která se opírá zejména o knihovnu ENDF B–VII.1.

Ve výpočtu byly zahrnuty všechny sledované knihovny, přičemž se pro každou knihovnu provedl výpočet (n,n') a (n,γ) reakcí při čerpání vstupních dat z referenční knihovny, ze sledovaných knihoven specificky pro každý izotop sodíku a chloru zvláště nebo celou sloučeninu NaCl.

Hodnoty reakčních rychlostí ve výstupních souborech jsou vztaženy na jednu zdrojovou částici (neutron) a objem vzorku. Pro porovnání výsledků z výpočtu a experimentu musely být hodnoty reakčních rychlostí z MCNP přepočítány na (atom⁻¹ · s⁻¹). Přepočet se provedl podle následujícího vztahu:

$$R_{R,V} = R_{R,MCNP} \cdot V_{In} \cdot \frac{N_n}{N_{In}} \quad (\text{atom}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (2.10)$$

kde

$R_{R,MCNP}$ jsou reakční rychlosti z výstupního souboru MCNP (n⁻¹ · cm⁻³)

B_{In} je objem vzorku (cm³)

N_n značí emisi neutronů z AmBe zdroje ($N_n \doteq 5,55521 \cdot 10^6$ n/s)

N_{In} je počet atomů india ve vzorku

Abychom vypočítali počet atomů v daném objemu, musíme podělit hmotnost vzorku hmotností jednoho atomu a nezapomenout započítat poměrný obsah izotopu ¹¹⁵In.

$$N = \frac{m}{m_{In}} \cdot \frac{95,7}{100} \quad (-) \quad (2.11)$$

zde

m značí vypočítanou hmotnost vzorku (g)

m_{In} udává hmotnost jednoho atomu india (g)

$$m = \rho_{In} \cdot V_{In} \quad (2.12)$$

$$m_{In} = A_{r,In} \cdot u \cdot 10^3 \quad (2.13)$$

ρ_{In} je hustota india (hodnota z tabulek: $\rho_{In} = 7,31 \text{ g/cm}^3$)

V_{In} je objem vzorku (v modelu MCNP $V_{In} = 4,41786 \text{ cm}^3$)

$A_{r,In}$ je relativní atomová hmotnost india (hodnota z tabulek: $A_{r,In} = 114,818u$)

u značí atomovou hmotnostní konstantu ($u = 1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$)

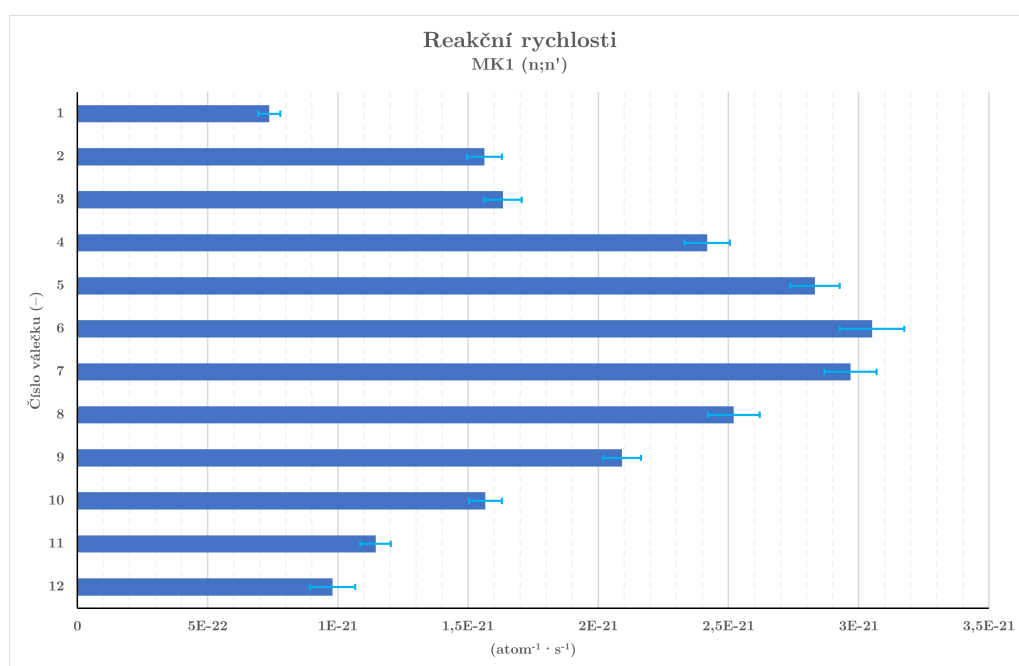
Hodnoty konstant byly čerpány z <http://www.prvky.com> a matematicko-fyzikálních tabulek. Emisivita zdroje byla dodána vedoucím práce z dokumentace školního AmBe neutronového zdroje. Po zpětném dosazení a výpočtu byly získané hodnoty zaznamenány do tabulek, porovnány mezi sebou a experimentem. Pro názornost byly sestaveny grafické průběhy reakčních rychlostí. Ty jsou k nahlédnutí v kapitole 3.

3 Výsledky práce

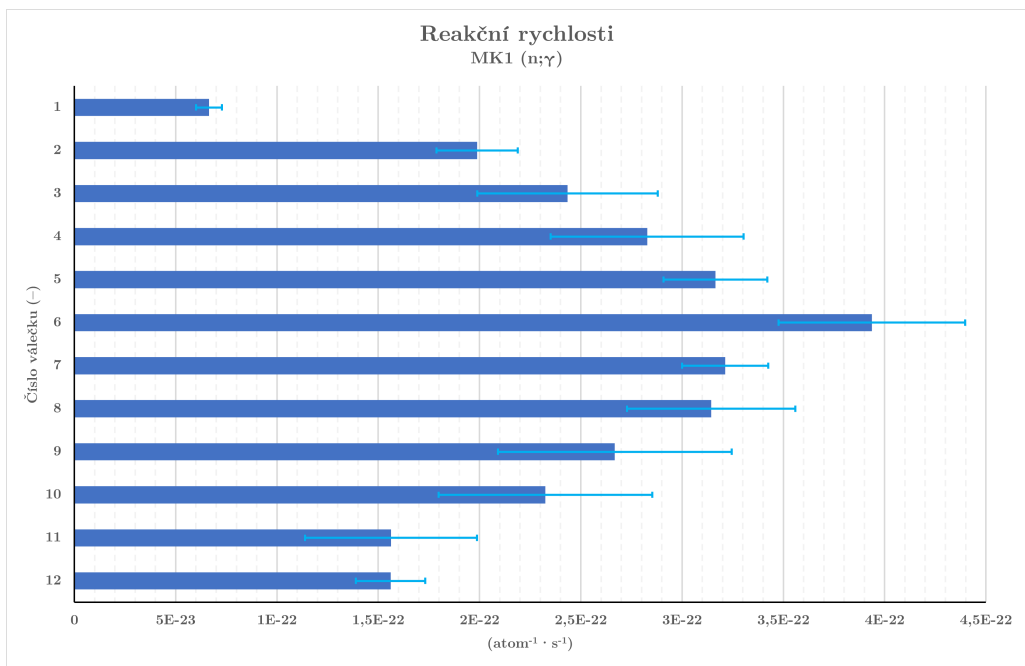
Po vypočítání reakčních rychlostí z naměřených hodnot podle vztahů 2.8 a 2.9 byly vytvořeny grafy pro každou reakci a měřicí kanál samostatně. Zobrazené průběhy obsahují také odchylky hodnot zapříčiněné zejména nejistotou plochy píku.

Hodnoty pro (n,γ) vykazují větší nepřesnosti, neboť plochy píku na energii 416,86 keV byly nevýrazné a skládaly se z malého počtu impulsů. Grafy jsou k nahlédnutí pod tímto odstavcem.

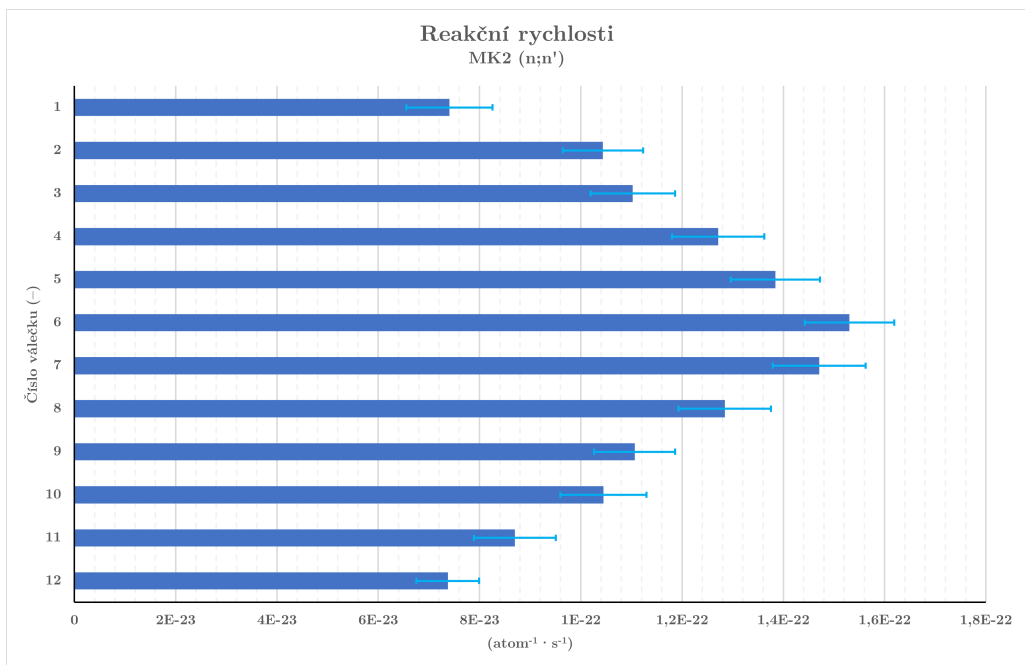
3.1 Výsledky měření



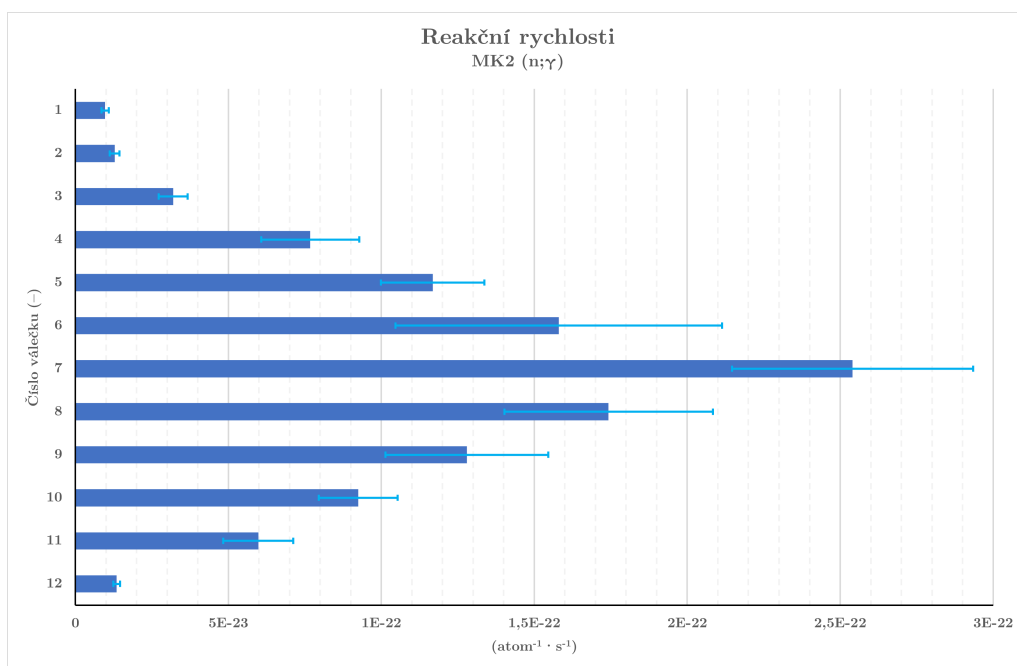
Obr. 3.1: Reakční rychlosti v měřicím kanále 1 (n,n').



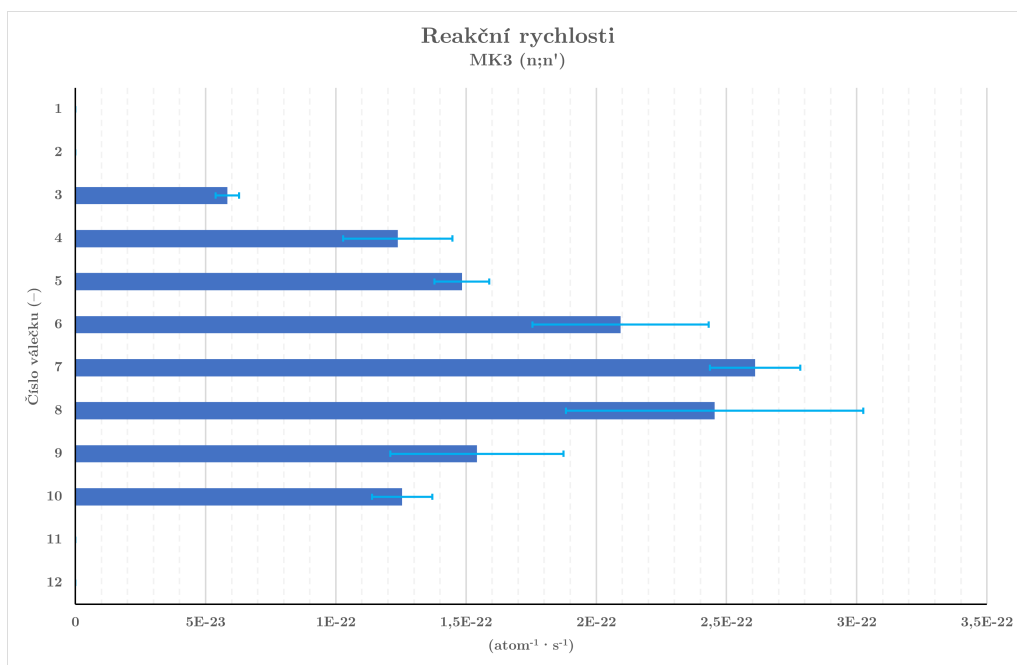
Obr. 3.2: Reakční rychlosti v měřicím kanále 1 (n, γ).



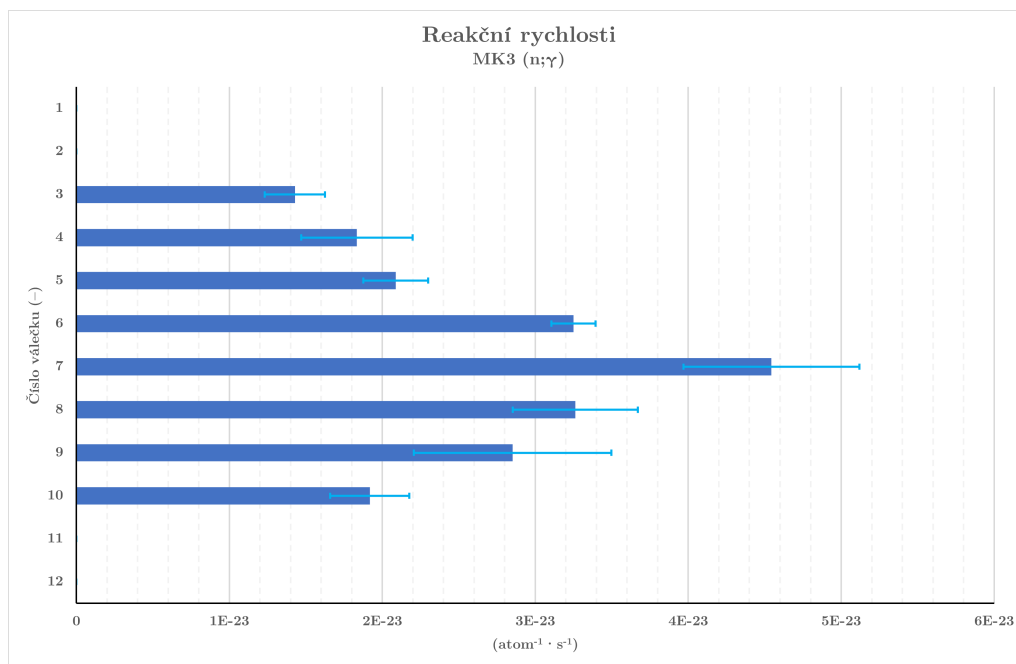
Obr. 3.3: Reakční rychlosti v měřicím kanále 2 (n,n').



Obr. 3.4: Reakční rychlosti v měřicím kanále 2 (n, γ).



Obr. 3.5: Reakční rychlosti v měřicím kanále 3 (n,n').



Obr. 3.6: Reakční rychlosti v měřicím kanále 3 (n,γ).

Data pro třetí měřicí kanál jsou neúplná, neboť v důsledku malé aktivity ozářených vzorků nebylo možné změřit válečky z okrajů sloupce. S nedostatečnou aktivitou jsme se setkali již při měření vzorků ze druhého měřicího kanálu, proto jsou hodnoty reakčních rychlostí zatíženy značnou nejistotou.

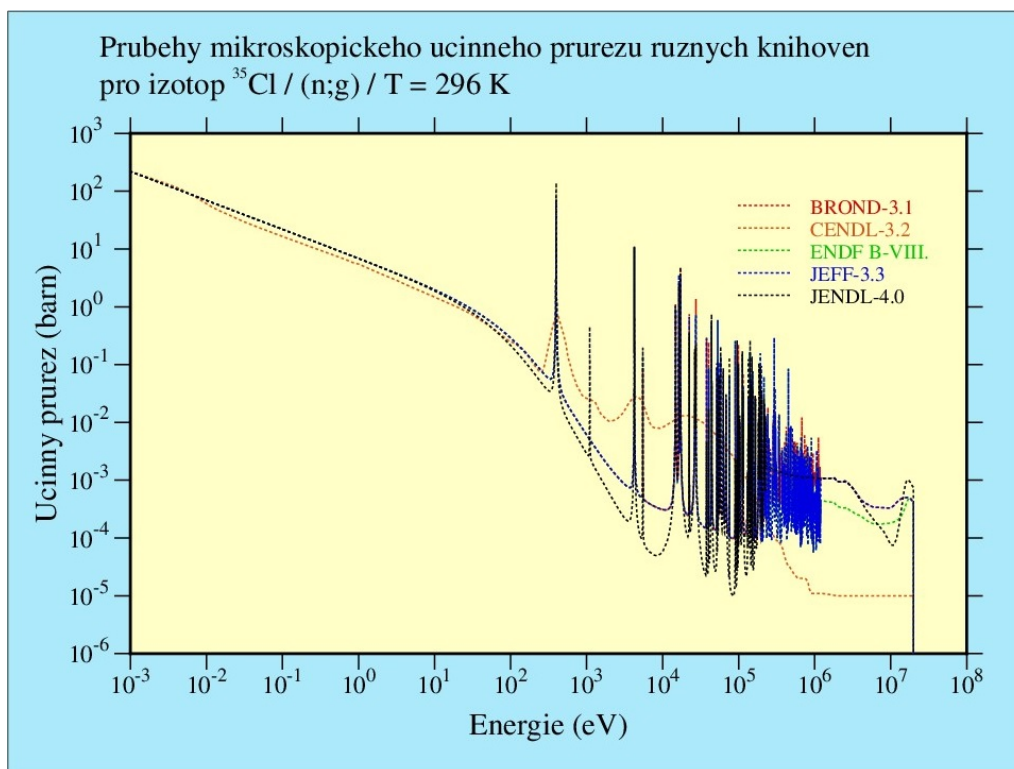
Proto také proběhlo nejvíce pokusů právě na druhém měřicím kanále. Tímto krokem byl alespoň částečně kompenzována nižší aktivita vzorků. Vícenásobné měření v případě třetího kanálu však nepřipadalo v úvahu kvůli natolik nízké aktivitě vzorků po skočení ozařování, že by potenciálně nově získané hodnoty nepřinesly v porovnání s vykonaným úsilím efektivní zlepšení.

Ideální by bylo několikrát opakovat měření pro každý měřicí kanál, bohužel však nebylo možné tento krok uskutečnit z časových důvodů.

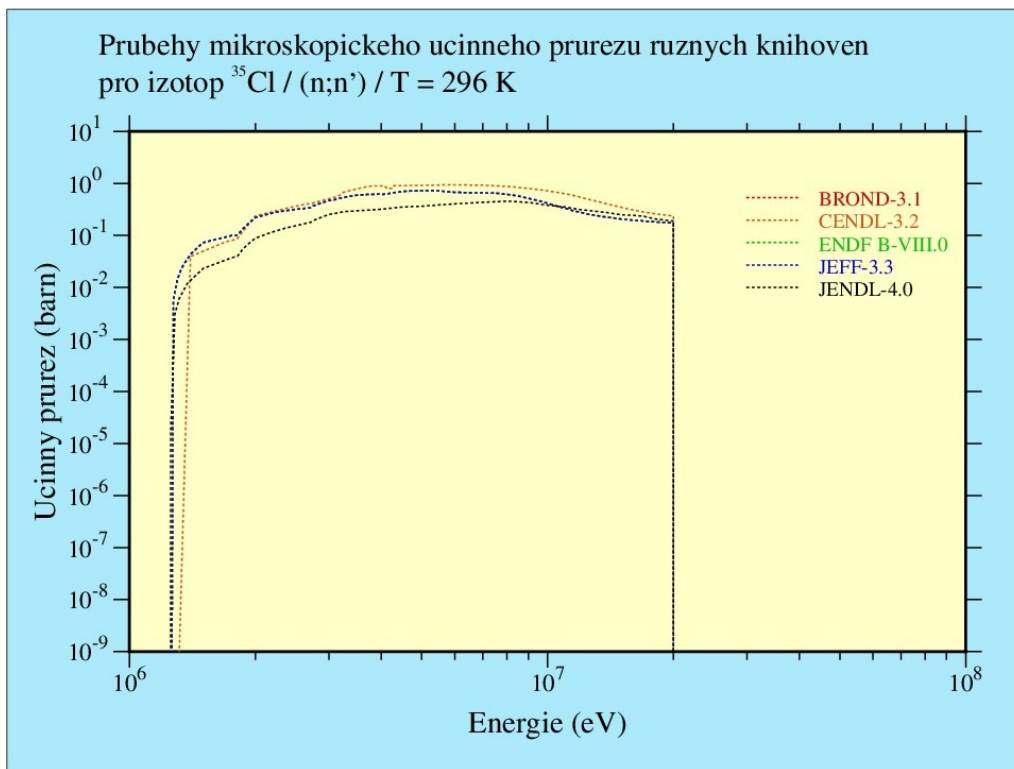
U všech získaných průběhů je patrná nesymetrie reakčních rychlostí, kdy poslední vzorek dosahuje vyšších hodnot R_R , než vzorek první. To je způsobeno nesouměrným umístěním neutronového zdroje vůči vzorkům, kde geometrický střed postavených válečků se nachází na rozhraní šestého a sedmého, nikoli ve středu šestého válečku. Dále se promítl vliv odrazu neutronů od spodní stěny a podstavy solné prismy na rozdíl od prvního válečku. V neposlední řadě se projevila skutečnost, že celková výška vzorků naskládaných na sobě byla o málo vyšší, než celková výška měřicího kanálu i celé solné prismy. Současně s tím obsahoval balící soubor vzorků na spodní části zpevnění nezanedbatelných geometrických rozměrů, v důsledku čehož došlo k mírnému posunutí všech válečků směrem nahoru.

3.2 Výsledky z NJOY

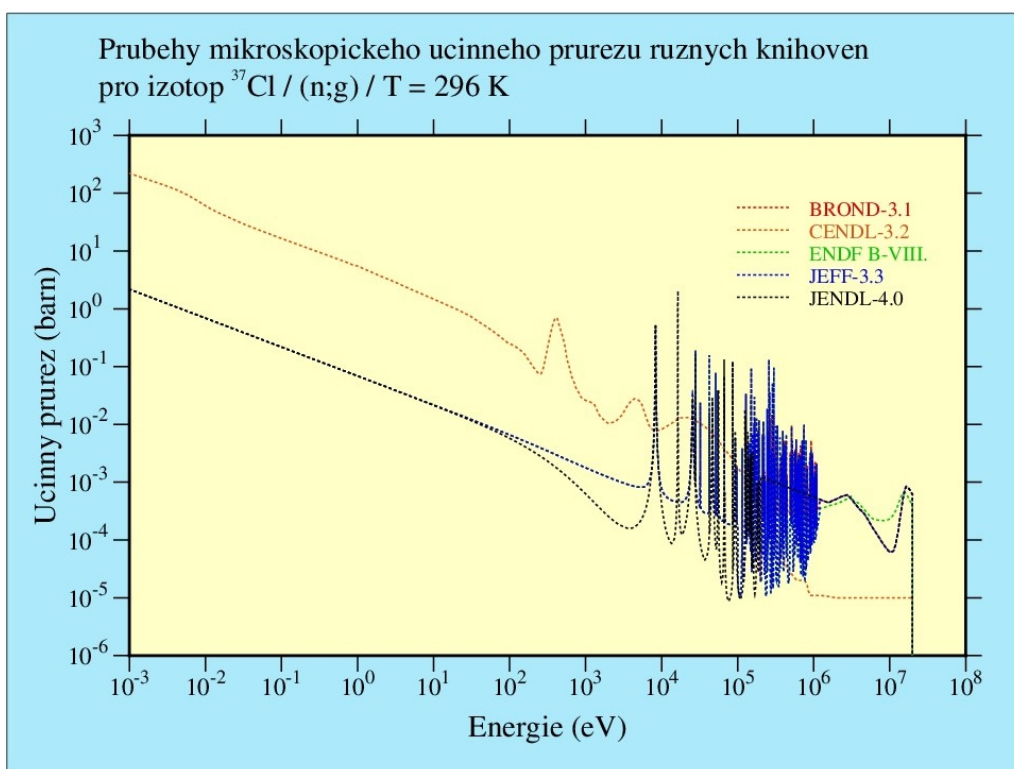
Programem NJOY byly vytvořeny grafické průběhy mikroskopického účinného průřezu pro (n,n') a (n,γ) reakce u každého izotopu soli NaCl. Výsledky porovnání se nacházejí k nahlédnutí níže:



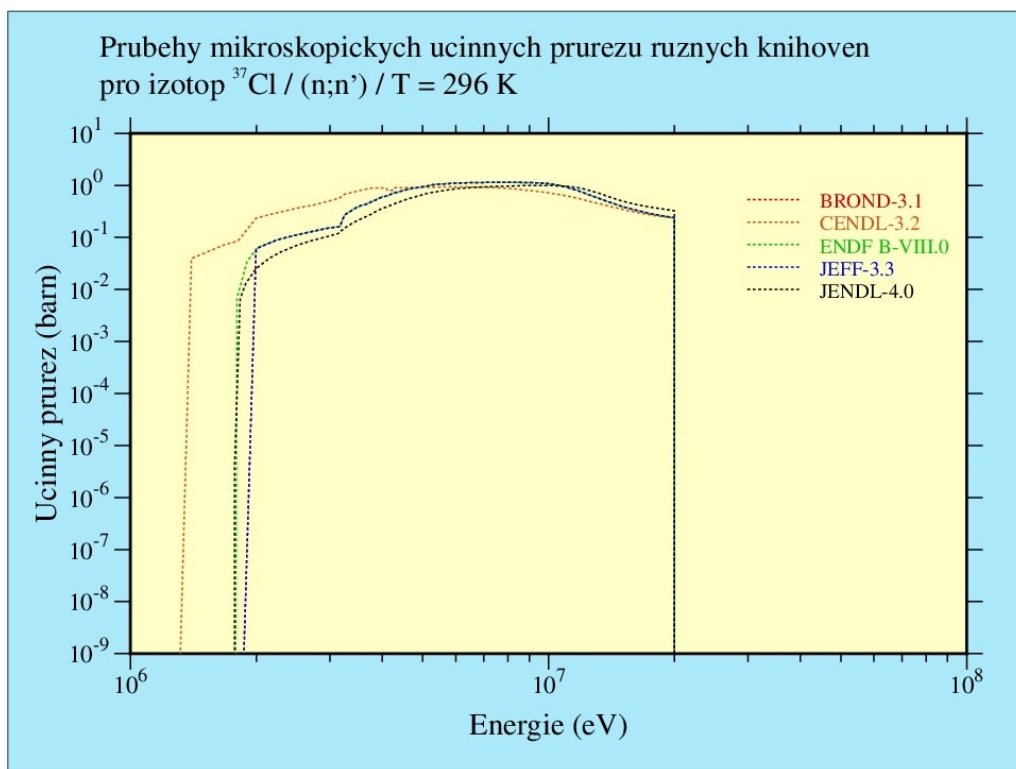
Obr. 3.7: Mikroskopické účinné průřezy různých knihoven pro ^{35}Cl (n,γ) .



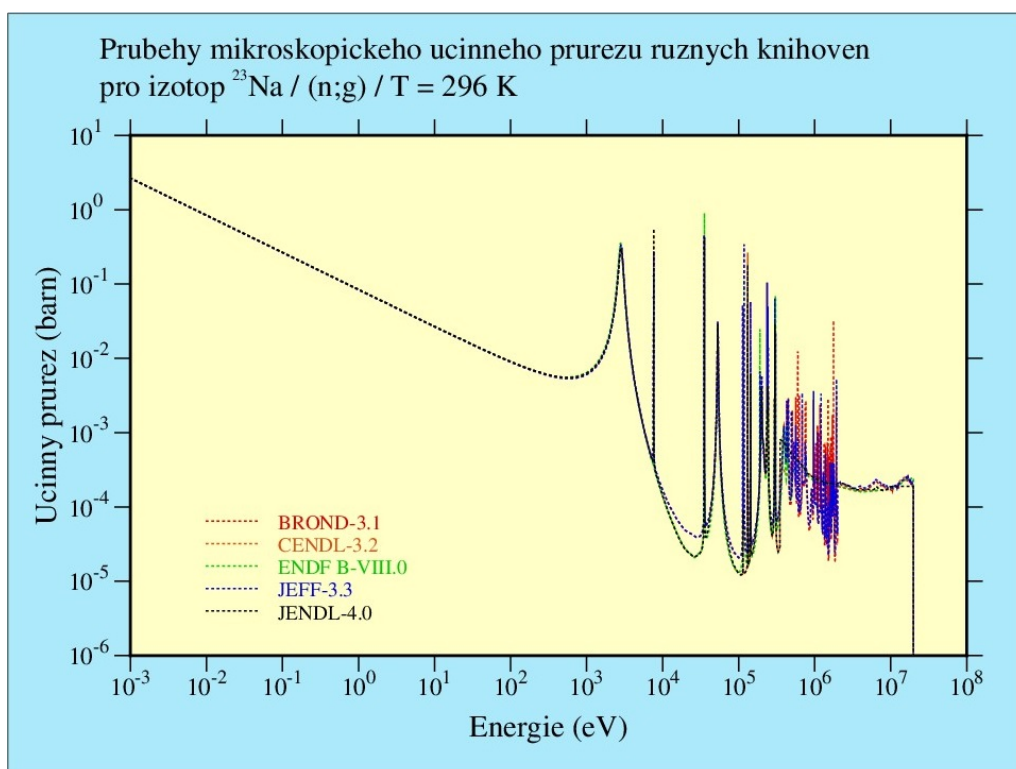
Obr. 3.8: Mikroskopické účinné průřezy různých knihoven pro ^{35}Cl (n,n').



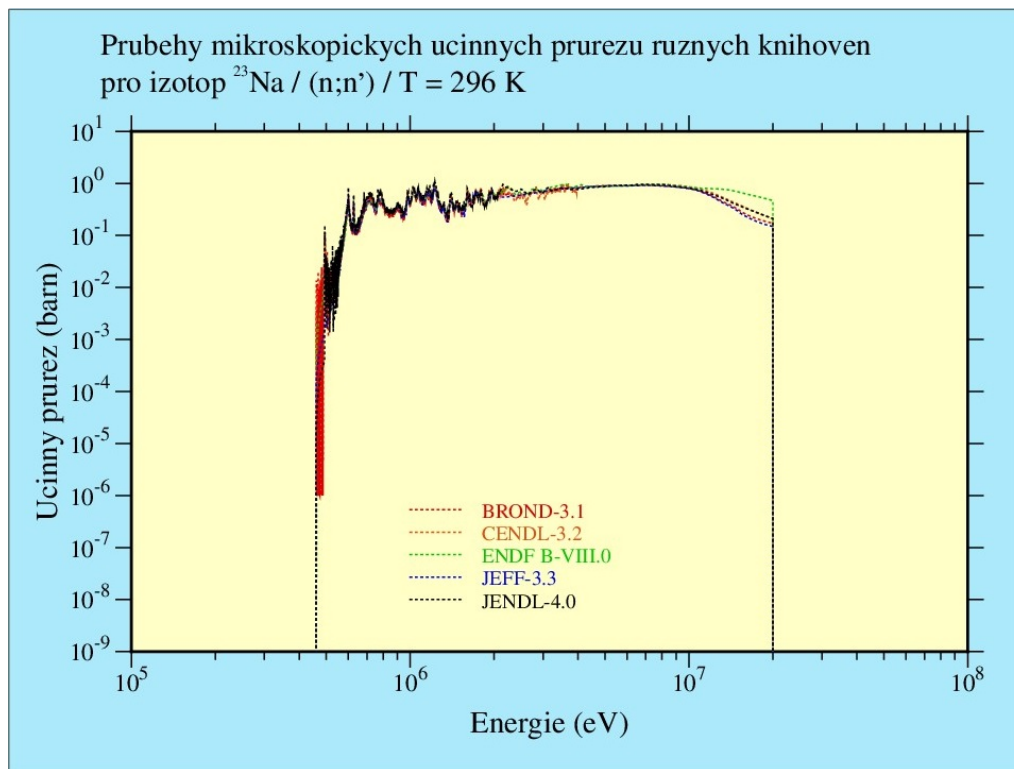
Obr. 3.9: Mikroskopické účinné průřezy různých knihoven pro ^{37}Cl (n,γ).



Obr. 3.10: Mikroskopické účinné průřezy různých knihoven pro ^{37}Cl (n,n').



Obr. 3.11: Mikroskopické účinné průřezy různých knihoven pro ^{23}Na (n,γ).



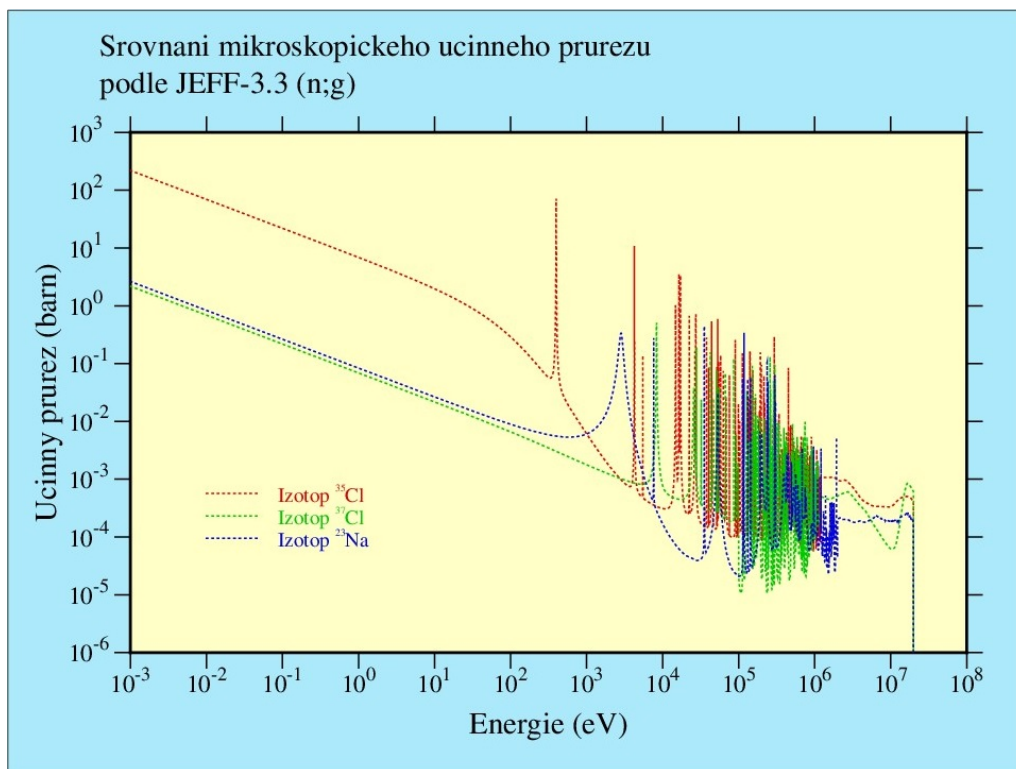
Obr. 3.12: Mikroskopické účinné průřezy různých knihoven pro ^{23}Na (n,n').

V průbězích jsou patrné drobné rozdíly mezi jednotlivými knihovnami, v některých bodech se průběhy naopak překrývají.

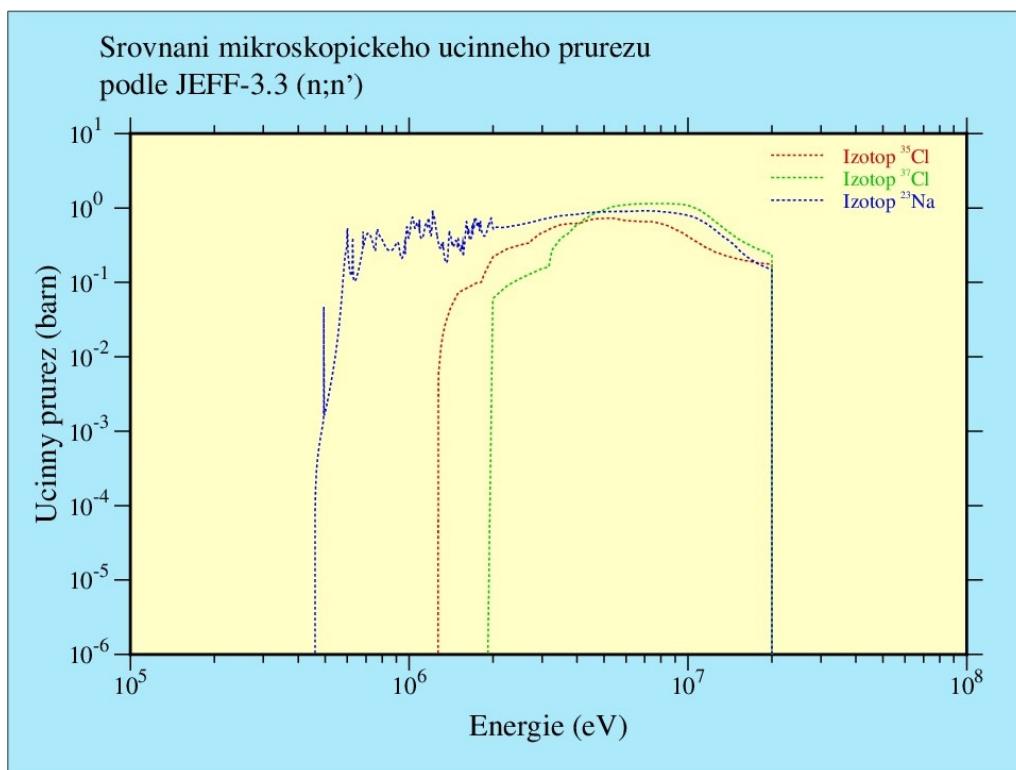
Rozdílné hodnoty mají původ v měření z laboratoří, ze kterých pochází knihovny ENDF. V praxi se změří několik bodů a ostatní se dopočítají nebo se čerpá z naměřených z dalších knihoven. Toto vědomé používání sdílených dat na vědecké úrovni je příčina shodných průběhů pro různé knihovny v určitém energetickém spektru neutronů.

Za zmínku stojí průběh účinného průřezu v případě chloru u čínské knihovny CENDL-3.2. Ta totiž nerozlišuje chlor na jeho izotopy, avšak používá jej v jeho přírodní směsi.

Pro úplnost budou ještě přidány průběhy mikroskopických účinných průřezů pro izotopy NaCl, tedy ^{23}Na , ^{35}Cl a ^{37}Cl . Jako zdroj dat posloužila evropská knihovna JEFF-3.3.



Obr. 3.13: Srovnání účinných průřezů izotopů NaCl.



Obr. 3.14: Srovnání účinných průřezů izotopů NaCl.

3.3 Porovnání naměřených a vypočítaných hodnot

Po výpočtech reakčních rychlostí z experimentu a modelu v MCNP byly sestaveny tabulky, do kterých byly souhrnně umístěny všechny výsledky.

Sledovány byly všechny tři měřicí kanály a obě jaderné reakce. Ve výpočtech v MCNP byly explicitně nahrazovány hodnoty jednotlivých prvků NaCl ze sledovaných knihoven (pro každou knihovnu zvlášť) za hodnoty výchozí referenční knihovny pro program MCNP-6.2. Pokud tabulka obsahuje v názvu např. „Cl“, znamená to, že při výpočtu v MCNP byla referenční data chloru nahrazena daty z konkrétní jaderné knihovny (BROND-3.1, CENDL-3.2, ...). Obdobně to platí u sodíku, v případě „NaCl“ došlo k úplnému nahrazení referenčních dat.

Na základě vytvořených tabulek byly následně sestrojeny grafy ukazující hodnoty reakčních rychlostí podle experimentu, referenčního výpočtu MCNP a při změně dat pro každý prvek NaCl i celou sloučeninu. V každém porovnání jsou referenční data a data z experimentů shodná. Vytvořené tabulky i grafické průběhy jsou součástí přílohy této práce.

Dále byly vypočítány podíly, ze kterých bylo zjištěno, kolikrát se každá vypočítaná hodnota liší od hodnoty z měření. Následně se ve všech případech a pro každou knihovnu určila průměrná odlišnost.

Pro seřazení knihoven bylo zvoleno použití bodového systému, kdy na základě průměrné velikosti odchylky obdržela každá knihovna body tak, že nejmenší odchylce bylo uděleno nejméně bodů, největší odchylce nejvíce. Body byly udělovány v rozmezí 1 až 6, nejméně tedy bylo možné udělit 3 body a nejvíce 18 bodů.

Níže se nacházejí tabulky, v nichž jsou zapsány všechny knihovny i s jejich přidělenými body pro každý případ. Pro názornost byly vypočítány také procentuální odlišnosti vypočítaných reakčních rychlostí od experimentálních a získané hodnoty zapsány do tabulek, které se nacházejí na stránce 139.

Tab. 3.1: Celkové odchylky knihoven od experimentálních hodnot (n,n').

	Reference	BROND-3.1	CENDL-3.2	ENDF B-VIII.0	JEFF-3.3	JENDL-4.0
Bodů Cl	17	4	10	8	8	16
Bodů Na	13	4	14	16	5	11
Bodů NaCl	18	4	9	11	6	15
Celkově	48	12	33	35	19	42

Jak si lze tedy povšimnout, v případě nepružného rozptylu se změřeným reakčním rychlostem nejvíce blíží ruská knihovna BROND-3.1, následována evropskou JEFF-3.3. Za evropskou knihovnou se nachází čínská CENDL-3.2, po té americká

Tab. 3.2: Celkové odchylky knihoven od experimentálních hodnot (n, γ).

	Reference	BROND-3.1	CENDL-3.2	ENDF B-VIII.0	JEFF-3.3	JENDL-4.0
Bodů Cl	18	8	15	8	11	3
Bodů Na	5	13	12	8	11	12
Bodů NaCl	18	9	12	10	11	3
Celkově	41	30	39	26	33	18

Tab. 3.3: Souhrnné odchylky knihoven od experimentálních hodnot.

	Reference	BROND-3.1	CENDL-3.2	ENDF B-VIII.0	JEFF-3.3	JENDL-4.0
Bodů	89	42	72	61	52	60

ENDF B-VIII.0, dále japonská JENDL-4.0 a na závěr s největší odchylkou referenční průběh podle starší americké knihovny ENDF B-VII.1.

U radiačního zachytu se nejbližší nachází knihovna japonská JENDL-4.0, dále americká ENDF B-VIII.0, třetí je ruská BROND-3.1 následována evropskou JEFF-3.3. Na předposledním místě se nachází čínská jaderná knihovna a poslední je opět referenční ENDF B-VII.1.

Po součtu bodů potom obecně vychází knihovny v následujícím pořadí:

1. ruská BROND-3.1
2. evropská JEFF-3.3
3. japonská JENDL-4.0
4. americká ENDF B-VIII.0
5. čínská CENDL-3.2
6. referenční (starší americká) ENDF B-VII.1

Závěr

Diplomová práce byla zaměřena především prakticky, proto bylo nejvíce úsilí věnováno měření v laboratoři.

Před zahájením experimentů však bylo nezbytné provést pečlivou přípravu zahrnující kompilaci výpočetního programu NJOY, naučit se s tímto programem pracovat, seznámit se s používanými solnými směsi v jaderných reaktorech a poznat významné projekty ve výzkumu reaktorů s tekutými solemi. Z porovnání moderačních vlastností solí v kapitole 2.1.3 vyplývá skutečnost, že chloridové sole mají ve srovnání se solemi fluoridovými daleko menší schopnost moderovat neutrony. Proto se nabízí využít právě chloridových solí v rychlých reaktorech.

Samotné měření bylo významně ovlivněno probíhající pandemií SARS–Covid-19, v jejímž důsledku nebylo možné získat dostatečné množství kvalitních dat. I přesto se podařilo stanovit reakční rychlosti z ozařovaného india v solné prismě naplněné solí NaCl. Kvůli malému počtu měření jsou získané průběhy reakčních rychlostí zatíženy chybou a vykazují značné rozdíly ve srovnání s vypočítanými průběhy podle jaderných knihoven.

Při výpočtech reakčních rychlostí se objevily komplikace, kdy výpočetní program MCNP spadl a bylo nutné výpočty zopakovat. Po zpracování veškerých údajů byly porovnány průběhy reakčních rychlostí ze simulace s reakčními rychlostmi vypočítanými z naměřených hodnot. V uvedených grafech je patrný stejný trend průběhu reakčních rychlostí. U simulovaných průběhů se však nevyskytuje vyšší hodnota u 12. vzorku, která je u hodnot z měření způsobena geometrickou nesymetrií, drobným posunem indiových válečků v měřicích kanálech a odrazem neutronů od podlahy, spodní stěny a podstavky solné prismy.

Experimentálními hodnotám se v případě nepružného rozptylu [reakce (n,n')] nejvíce blíží ruská knihovna BROND–3.1. Za ní se nachází evropská JEFF–3.3, dále čínská CENDL–3.2 následovaná americkou ENDF B–VIII.0. Méně přesná byla pak japonská knihovna JENDL–4.0 a nejnižší přesnost vykazují reakční rychlosti vypočítané podle referenční knihovny programu MCNP–v 6.2.0. Jedná se o starší americkou knihovnu ENDF B–VII.1. Poslední zmíněná knihovna je používána kvůli konzervativnímu přístupu v oboru jaderné fyziky, kdy daná knihovna obsahuje známé a prověřené nepřesnosti, zatímco novější verze má přesnější, ale méně známé a méně ověřené hodnoty.

U neutronového zachytu [reakce (n,γ)] se experimentu nejvíce blíží japonská knihovna JENDL–4.0, potom americká ENDF B–VIII.0, dále ruská BROND–3.1, následována evropskou JEFF–3.3, po které se nachází čínská CENDL–3.2. Na posledním místě se opět umístila referenční knihovna ENDF B–VII.1.

Celkově se po našem srovnání experimentu nejvíce přiblížila ruská knihovna

BROND-3.1, druhá je evropská JEFF-3.3, třetí japonská JENDL-4.0, čtvrtá americká ENDF B-VII.0, pátou knihovnou je čínská CENDL-3.2 a poslední šestá knihovna, tedy knihovna s největší celkovou odlišností od naměřených průběhů, je referenční (starší americká) ENDF B-VII.1. Podrobné srovnání se nachází v tabulkách 3.1, 3.2 a 3.3.

V porovnání jaderných knihoven mezi sebou navzájem si lze všimnout nejmenších rozdílů mezi čínskou a ruskou knihovnou (CENDL-3.2 a BROND-3.1). To odkazuje výměnu dat a spolupráci mezi těmito dvěma zeměmi. V rámci jedné knihovny se největší rozdíly vyskytovaly u (n,γ) reakcí po dosazení různých prvků do simulace (např CENDL-3.2 Cl, CENDL-3.2 Na a CENDL-3.2 NaCl). Obecně nejmenší rozdíly mezi knihovnami jsou pro první měřicí kanál (MK1), naopak největších rozdílů bylo zaznamenáno v nejvzdálenějším třetím měřicím kanále MK3.

Do budoucna je plánováno pokračování v experimentech nad rámec této diplomové práce. Cílem bude rozšíření a upřesnění současně nabytých hodnot pro NaCl a také pokusy s jinou solí v solné prismě. Celkově tak bude možné provést porovnání jaderných knihoven s vyšší přesností a pro více prvků.

Literatura

- [1] ROSENTHAL, M.W. a R.B. KASTEN. *MOLTEN-SALT REACTORS—HISTORY, STATUS, AND POTENTIAL* [pdf]. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37830, 1969 [cit. 13. 11. 2020]. Dostupné z: <http://moltensalt.org/references/static/downloads/pdf/NAT_MSRintro.pdf>
- [2] *ATOMIC HERITAGE FOUNDATION: Oak Ridge, TN* [online]. 2019 [cit. 13. 11. 2020]. Dostupné z: <<https://www.atomicheritage.org/location/oak-ridge-tn>>
- [3] World Nuclear Association. *Molten Salt Reactors* [online]. prosinec 2020 [cit. 29. 3. 2021]. Dostupné z: <<https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/molten-salt-reactors.aspx>>
- [4] Obrázek [png]. [cit. 27. 12. 2020]. Dostupné z: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/08/Molten_Salt_Reactor.svg/1200px-Molten_Salt_Reactor.svg.png>
- [5] KATOVSKÝ, Karel. *MJEL: Jaderné elektrárny*. 15. 4. 2020. Přednáška. VUT v Brně.
- [6] Pressurized water reactor. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021, 11. 1. 2021 [cit. 12. 1. 2021]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Pressurized_water_reactor>
- [7] *Wikipedia (EN), Wikipedia (CZ)*. [online]. 2021 [cit. 29. 10. 2020]. Dostupné z: <<https://en.wikipedia.org>>,<<https://cs.wikipedia.org>>
- [8] RADIL, Lukáš. *NPE: Nekonvenční přeměny energie*. 12. 10. 2020. Přednáška. VUT v Brně.
- [9] *The Lund/LBNL Nuclear Data Search: Version 2.0* [online]. 1999 [cit. 2. 11. 2020]. Dostupné z: <<http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/index.asp>>
- [10] FLEISCHHANS, J., R. HEJZLAT, B. HEŘMANSKÝ, et al. STÁTNÍ ÚŘED PRO JADERNOU BEZPEČNOST. *Jaderná energetika v otázkách a odpovědích: VYBRANÉ ŠTÁTÉ Z TEORIE REAKTORU*. Praha: Ústav jaderných informací, 1994. ISBN 80-7073-005-6. CZ9425339-34525350-351.

- [11] Evaluated Nuclear Data File (ENDF): Database Version of 2021-05-14. *Nuclear Data Service* [online]. Vídeň: International Atomic Energy Agency, 2004 [cit. 24. 5. 2021]. Dostupné z: <<https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>>
- [12] *NJOY: Software* [online]. Los Alamos National Laboratory. Dostupné z: <<http://www.njoy21.io/>>
- [13] MacFARLANE, R. E. a A. C. KAHLER. *The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 2016*. Los Alamos National Laboratory, 2019, 802 s. LA-UR-17-20093.
- [14] N. Soppera, M. Bossant, E. Dupont, *JANIS 4: An Improved Version of the NEA Java-based Nuclear Data Information System*, Nuclear Data Sheets, Volume 120, červen 2014. Dostupné z: <https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_39910/janis>
- [15] Isotopes of lithium. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021, 5. 1. 2021 [cit. 16. 1. 2021]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Isotopes_of_lithium>
- [16] Beryllium-8. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020, 13. 10. 2020 [cit. 16. 1. 2021]. Dostupné z: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Beryllium-8>>
- [17] Isotopes of helium. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021, 6. 1. 2021 [cit. 16. 1. 2021]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Isotopes_of_helium>
- [18] W . D. Manly, J . W. Allen, W . H. Cook, J . H. DeVan, D . A . Douglas, H. Inouye, D . H. Jansen, P . Patriarea, T . K. Roche, G . M. Slaughter, A . Taboada, a G . AI. Tolson .*CONSTRUCTION MATERIALS FOR MOLTEN-SALT REACTORS* [pdf]. strany 595 – 625. Dostupné z: <http://moltensalt.org/references/static/downloads/pdf/FFR_chap13.pdf>
- [19] CIHLÁŘ, Michal. *Vliv doby expozice konstrukčních materiálů v tavenině NaF-NaBF₄ při statických korozních testech*. [přednáška].
- [20] SVOBODA, J. *Možnosti využití thoria jako součásti jaderného paliva v klasické jaderné energetice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 72. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Katovský, Ph.D.

- [21] CIHLÁŘ, Michal. *Technologie solných reaktorů a testování materiálů sekundárního okruhu reaktoru Energy-Well*. Praha, 2020. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Jan Prehradný, Ph.D.
- [22] KELAITA, Yousif. *Molten Salt Reactors* [online]. Stanford University, 18. 2. 2015 [cit. 29. 3. 2021]. Dostupné z: <<http://large.stanford.edu/courses/2015/ph241/kelaita1/>>
- [23] *ADAR: Pokročilý jaderný reaktor řízený urychlovačem* [online]. VUT v Brně, 1. 1. 2019 [cit. 6. 4. 2021]. Dostupné z: <<https://www.vutbr.cz/vav/projekty/detail/30005>>
- [24] KRÁL, Dušan *Studium využití thoria v jaderných reaktorech řízených urychlovačem*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2017. 92 s. Vedoucí práce byl Ing. Miroslav Zeman
- [25] MIKULČÁK, Jiří, Bohdan KLIMEŠ, Jaromír ŠIROKÝ, Václav ŠŮLA a František ZEMÁNEK. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2007. Pomocné knihy pro žáky (Prometheus). ISBN 978-80-7196-345-5.
- [26] BEZDĚK, Z., J. HESOUN, Z. MAREŠ a Z. VALVODA. Anglicko-český, česko-anglický slovník z oboru jaderná fyzika a jaderná technika. Český Těšín: SNTL–Nakladatelství technické literatury, 1985, 344 s. ISBN L28-S1-VI-31/11928. 04-024-85.

Seznam příloh

A Prvky, jejich jaderné reakce a účinné průřezy	77
A.1 Chlor	77
A.2 Fluor	79
A.3 Hliník	80
A.4 Berylium	81
A.5 Vápník	83
A.6 Draslík	89
A.7 Lithium	90
A.8 Hořčík	93
A.9 Sodík	97
A.10 Zirkonium	98
B Porovnání naměřených a vypočítaných hodnot	103
C Procentuální odchylky vypočítaných hodnot od změřených	139

A Prvky, jejich jaderné reakce a účinné průřezy

A.1 Chlor

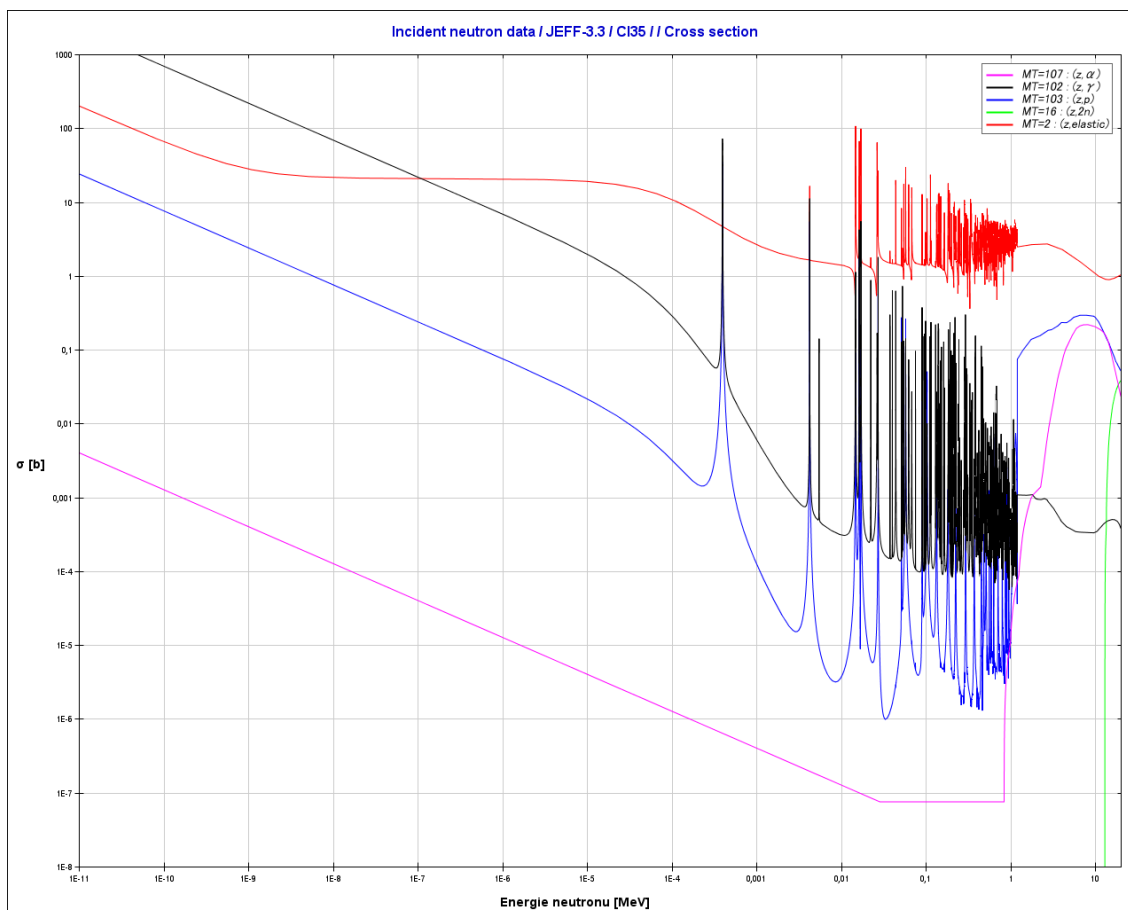
Jako první prvek je uveden chlor. Ten je možné v přírodě se vyskytuje ve formě dvou stabilních izotopů: ^{35}Cl a ^{37}Cl . Chlor ^{35}Cl je zastoupen 75,77 %, zatímco podíl izotopu ^{37}Cl činí 24,23 %.

Chloru se v praxi hojně používá pro výrobu PVC, bělidel a mnohých rozpouštědel. Významnou roli hraje chlor ve vodohospodářství, kde je používán pro sterilizaci pitné vody. Je obsažen v mořské soli ve vazbě se sodíkem coby chlorid sodný (NaCl).

Možné jaderné reakce s izotopy chloru a průběhy jejich účinných průřezů se nacházejí v tabulkách A.1 a A.2.

Tab. A.1: Izotop chloru 35. [9]

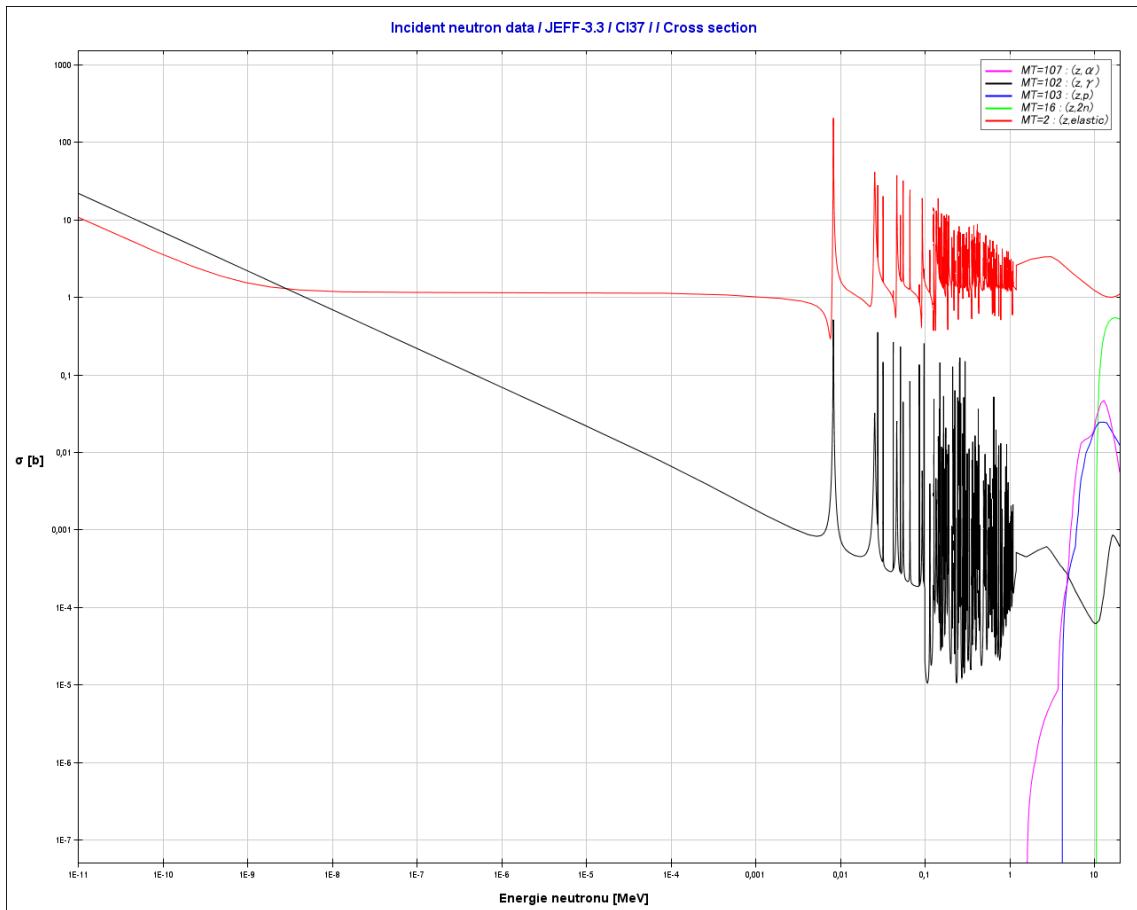
^{35}Cl (75,77 %)							
Prvek	(n, α) ^{32}P	(n, γ) ^{36}Cl	(n,p) ^{35}S	^{34}Cl	(n,2n) $^{34*}\text{Cl}$		
$T_{1/2}$	14,262 d	$3,01 \cdot 10^5$ let	87,32 d	1,526 s	32,00 m		
Rozpad 1	100% β^-	98,1% β^-	100% β^-	100% e+ β^+	55,4% e+ β^+		
Rozpad 2	–	1,9% e+ β^+	–	–	44,6% IT		
γ (keV)	– –	511 3,80%	– –	511 200%	146,36	40,50%	
γ (keV)	– –	– –	– –	– –	511	110,80%	
γ (keV)	– –	– –	– –	– –	1176,626	14,09%	
γ (keV)	– –	– –	– –	– –	2127,492	42,80%	
γ (keV)	– –	– –	– –	– –	3304,039	12,29%	



Obr. A.1: Průběh účinných průřezů izotopu ^{35}Cl pro různé jaderné reakce. [14]

Tab. A.2: Izotop chloru 37. [9]

^{37}Cl (24,23 %)										
Prvek	(n,α) ^{34}P		(n,γ)				(n,p) ^{37}S		$(n,2n)$ ^{36}Cl	
$T_{1/2}$	12,43 s		^{38}Cl 37,24 m		$^{38*}\text{Cl}$ 715 ms		5,05 m		$3,01 \cdot 10^5$ let	
Rozpad 1	100% β^-		100% β^-		100% IT		100% β^-		98,10% β^-	
Rozpad 2	-		-		-		-		1,90% $e+\beta^+$	
γ (keV)	2127,492	15,00%	1642,714	31,90%	671,355	99,95%	3103,36	94%	511	3,80%
γ (keV)	-	-	2167,405	42,40%	-	-	-	-	-	-



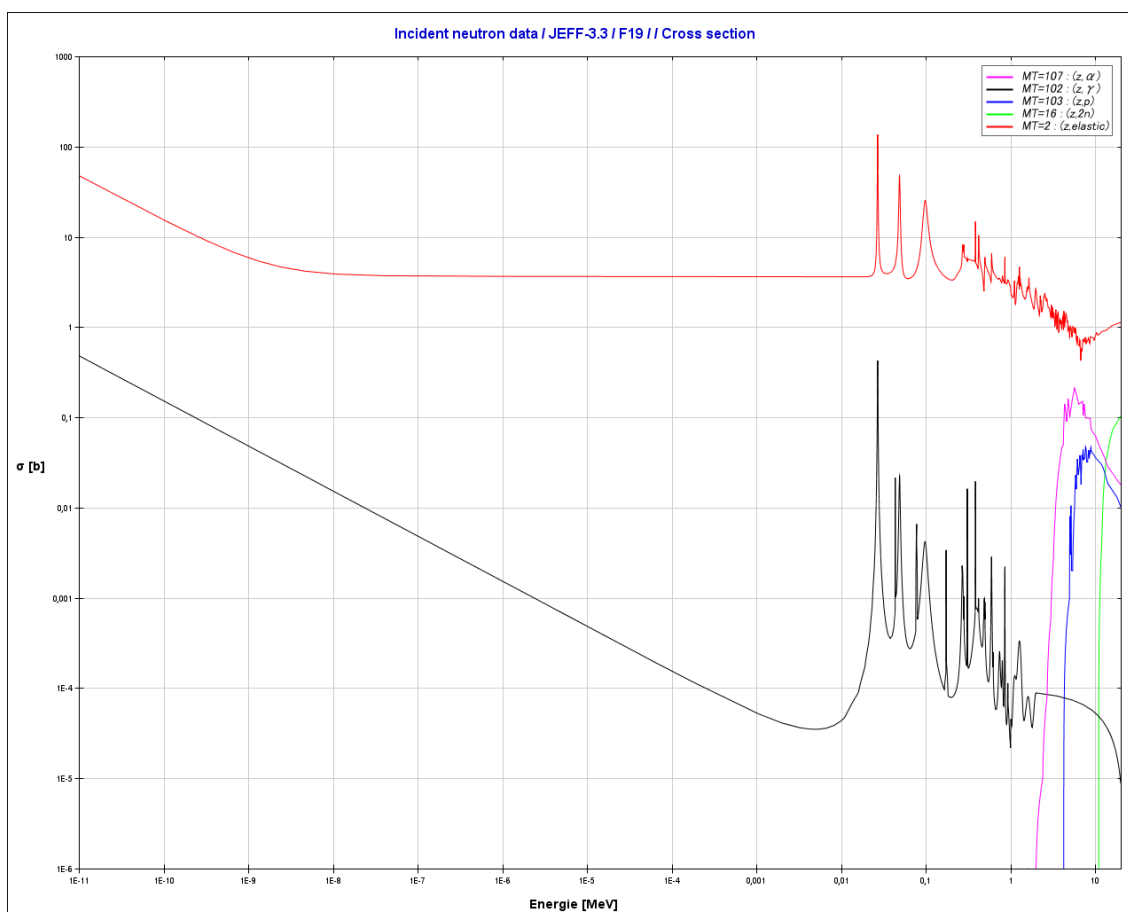
Obr. A.2: Průběh účinných průřezů izotopu ^{37}Cl pro různé jaderné reakce. [14]

A.2 Fluor

Na rozdíl od chloru, fluor má pouze jeden stabilní izotop (^{19}F). Z grafických průběhů mikroskopických účinných průřezů si lze povšimnout, že fluor má nepatrně nižší účinný průřez pro absorpci neutronu. Z tohoto hlediska se proto jeví jako vhodnější prvek pro použití v reaktorech s tekutými solemi.

Tab. A.3: Izotop fluoru 19. [9]

^{19}F (100 %)				
Prvek	(n,α) ^{16}N	(n,γ) ^{20}F	(n,p) ^{19}O	$(n,2n)$ ^{18}F
$T_{1/2}$	7,13 s	11,00 s	26,91 s	109,77 m
Rozpad 1	100% β^-	100% β^-	100% β^-	100% $e+\beta^+$
Rozpad 2	0,0012% $\beta^- \alpha^-$	–	–	–
γ (keV)	6128,63 67,00%	1633,602 100%	197,1 95,90%	511 200%
γ (keV)	– –	– –	1356,9 50,40%	– –



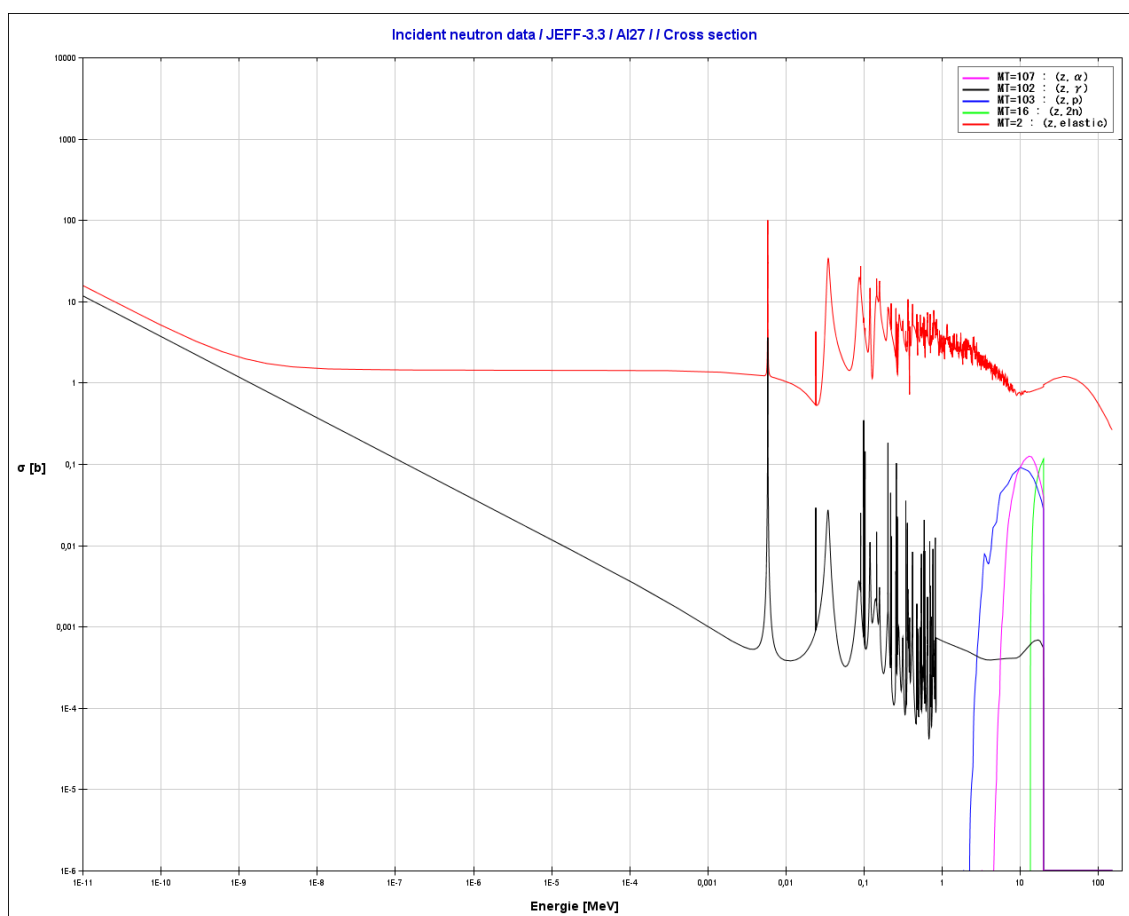
Obr. A.3: Průběh účinných průřezů izotopu ^{19}F pro různé jaderné reakce. [14]

A.3 Hliník

Stabilním izotopem hliníku je ^{27}Al . Do solných sloučenin se hliník váže s chlorem i s fluorem. Opět zde bude k nahlédnutí tabulka jaderných reakcí a graf průběhu účinných průřezů.

Tab. A.4: Izotop hliníku 27. [9]

^{27}Al (100%)										
Prvek	(n,α) ^{24}Na		(n,γ) ^{28}Al		(n,p) ^{27}Mg		$(n,2n)$ ^{26}Al $^{26*}\text{Al}$			
$T_{1/2}$	14,959 h		2,2414 m		9,458 m		7,17·10 ⁵ let 6,3452 s			
Rozpad 1	100% β^-		100% β^-		100% β^-		100 % e+ β^+ 100% e+ β^+			
Rozpad 2	-		-		-		-			
γ (keV)	1368,633	100%	1778,969	100%	843,74	71,80%	511	200%	511	200%
γ (keV)	2754,028	99,94%	-	-	1014,42	28,00%	1808,65	99,76%	-	-



Obr. A.4: Průběh účinných průřezů izotopu ^{27}Al pro různé jaderné reakce. [14]

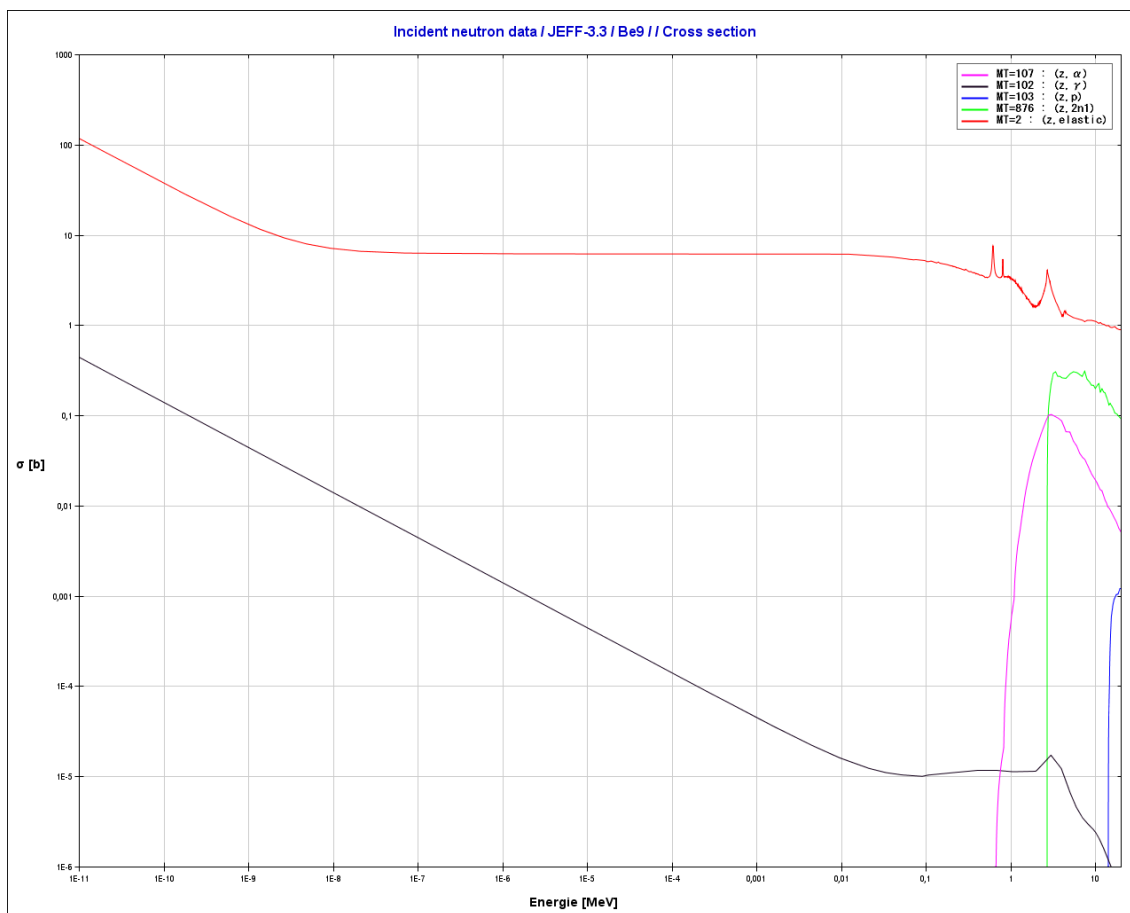
A.4 Berylium

U berylia se setkáváme s případem, kdy neexistuje měřitelná gama linka, nebo je neznámá. To může být způsobeno také velmi malým mikroskopickým účinným průřezem pro absorpci neutronu. Z tohoto pohledu je berylium vhodné k použití v solemi chlazených reaktorech.

Prvek ^{10}Li , který vzniká z (n,p) reakce, má velice krátký poločas rozpadu. Jeho přesná hodnota není známa, podle anglické na wikipedie činí $T_{1/2}$ pro ^{10}Li $2,0 \cdot 10^{-21}$ s. Podobně je tomu v případě izotopu ^8Be , kde je poločas rozpadu udáván o hodnotě $8,19 \cdot 10^{-17}$ s. [15, 16]

Tab. A.5: Izotop berylia 9. [9]

^9Be (100%)				
Prvek	(n, α) ^6He	(n, γ) ^{10}Be	(n,p) ^9Li	(n,2n) ^8Be
$T_{1/2}$	806,7 ms	$1,51 \cdot 10^6$ let	178,3 ms	neznámý
Rozpad 1	100% β^-	100% β^-	100% β^-	100% 2α
Rozpad 2	–	–	49,5% β^- n 2α	–
γ (keV)	– –	– –	– –	– –



Obr. A.5: Průběh účinných průřezů izotopu ^9Be pro různé jaderné reakce. [14]

A.5 Vápník

Vápník je prvek, který má celkem pět stabilních izotopů. Jsou jimi ^{40}Ca , ^{42}Ca , ^{43}Ca , ^{44}Ca a ^{46}Ca . Tabulky i grafy byly vypracovány pro každý izotop zvlášť. V přírodě se nejvíce vyskytuje vápník-40, nejmenší zastoupení má pak izotop ^{46}Ca .

Tab. A.6: Izotop vápníku 40. [9]

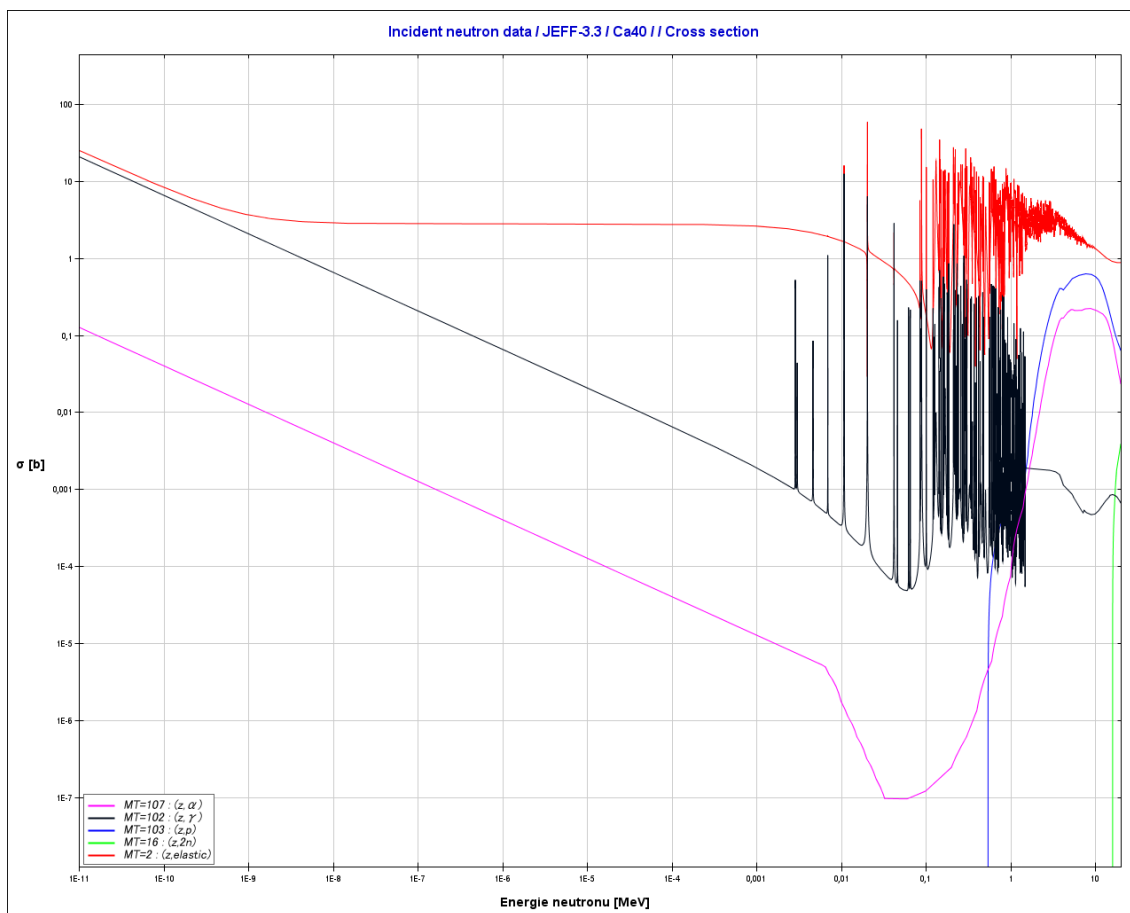
^{40}Ca (96,941 %)				
Prvek	(n, α) ^{37}Ar	(n, γ) ^{41}Ca	(n,p) ^{40}K	(n,2n) ^{39}Ca
$T_{1/2}$	35,04 d	$1,03 \cdot 10^5$ let	$1,277 \cdot 10^9$ let	859,6 ms
Rozpad 1	100% e	100% e	89,28% β^-	100% e+ β^+
Rozpad 2	–	–	10,72% e+ β^+	–
γ (keV)	– –	– –	511 21,44%	511 200%
γ (keV)	– –	– –	1460,83 11,00%	– –

Tab. A.7: Izotop vápníku 42. [9]

^{42}Ca (0,647 %)				
Prvek	(n, α) ^{39}Ar	(n, γ) ^{43}Ca	(n,p) ^{42}K	(n,2n) ^{41}Ca
$T_{1/2}$	269 let	Stabilní	12,36 h	$1,03 \cdot 10^5$ let
Rozpad 1	100% β^-	–	100% β^-	100% e
Rozpad 2	–	–	–	–
γ (keV)	– –	– –	1524,7 18%	– –

Tab. A.8: Izotop vápníku 43. [9]

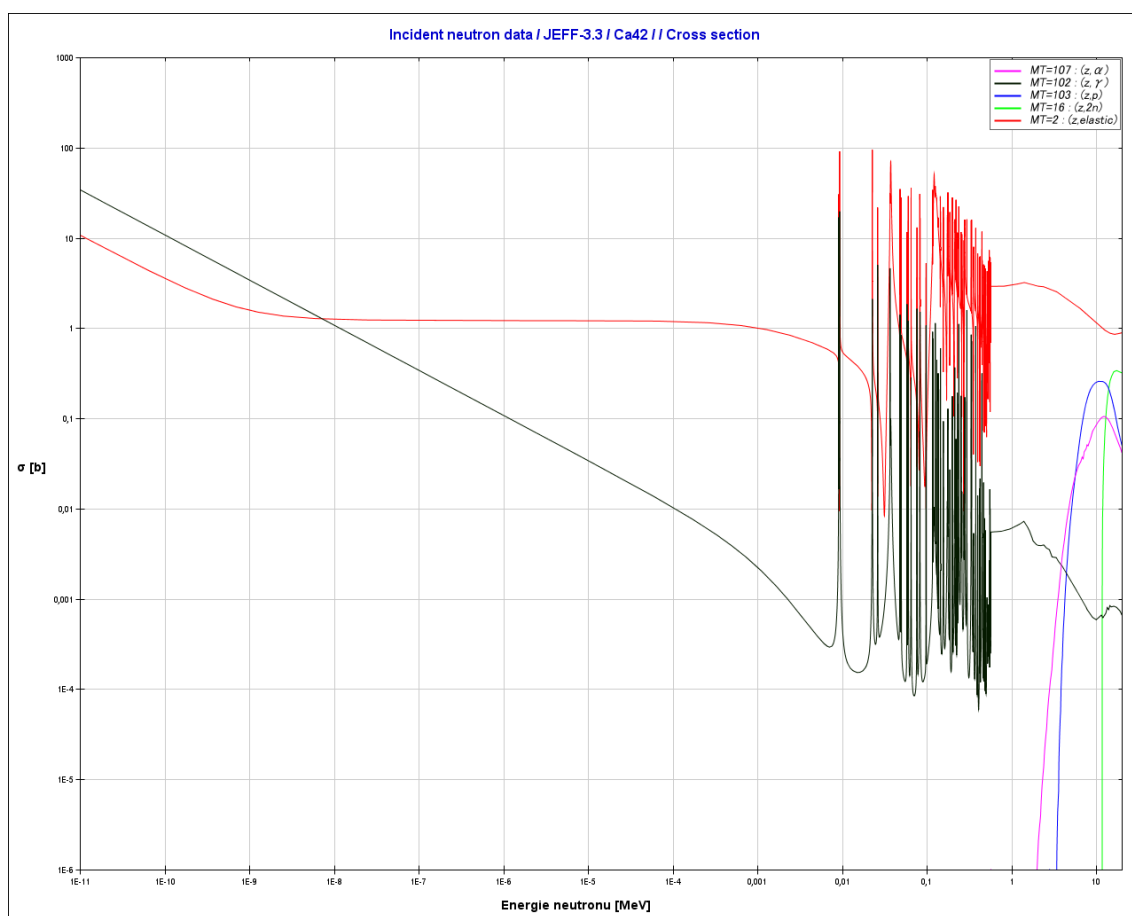
^{43}Ca (0,135 %)				
Prvek	(n, α) ^{40}Ar	(n, γ) ^{44}Ca	(n,p) ^{43}K	(n,2n) ^{42}Ca
$T_{1/2}$	Stabilní	Stabilní	22,3 h	Stabilní
Rozpad 1	–	–	100% β^-	–
Rozpad 2	–	–	–	–
γ (keV)	– –	– –	372,76 87,00%	– –
γ (keV)	– –	– –	396,861 11,85%	– –
γ (keV)	– –	– –	593,39 11,26%	– –
γ (keV)	– –	– –	617,49 79,20%	– –



Obr. A.6: Průběh účinných průřezů izotopu ^{40}Ca pro různé jaderné reakce. [14]

Tab. A.9: Izotop vápníku 44. [9]

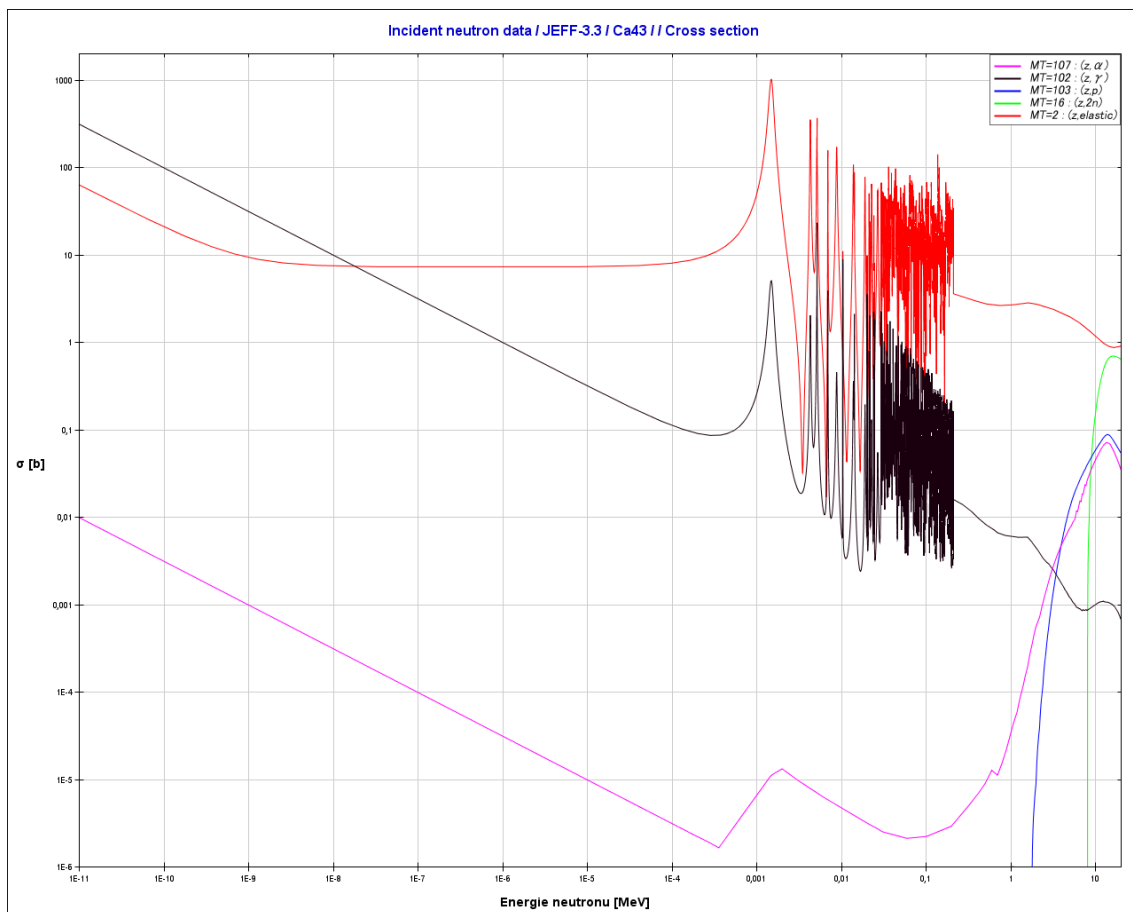
^{44}Ca (2,086 %)						
Prvek	(n,α) ^{41}Ar		(n,γ) ^{45}Ca		(n,p) ^{44}K	
$T_{1/2}$	109,3 m		162,61 d		22,13 m	
Rozpad 1	100% β^-		100% β^-		100% β^-	
Rozpad 2	-		-		-	
γ (keV)	1293,587	99,10%	-	-	1157,031	58,00%
γ (keV)	-	-	-	-	2150,76	23,00%
γ (keV)	-	-	-	-	2518,95	9,69%
						Stabilní



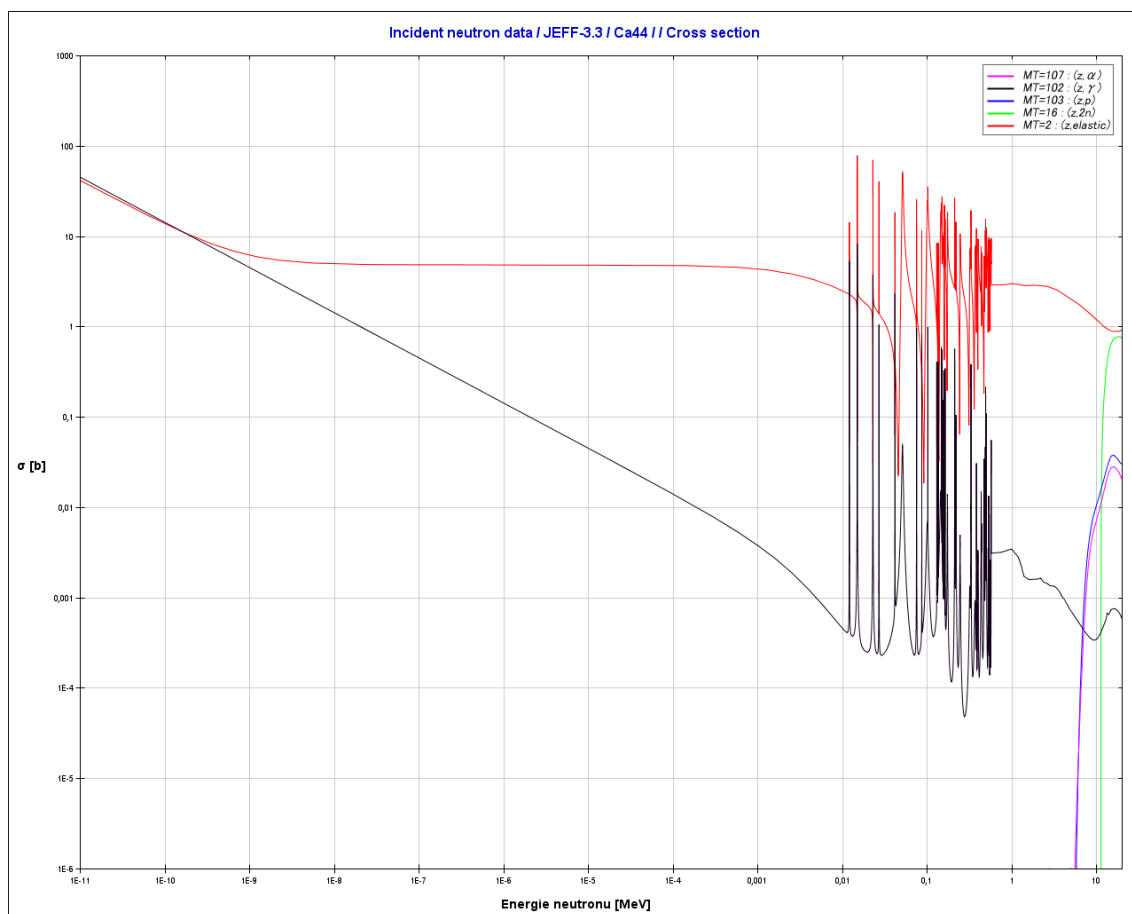
Obr. A.7: Průběh účinných průřezů izotopu ^{42}Ca pro různé jaderné reakce. [14]

Tab. A.10: Izotop vápníku 46. [9]

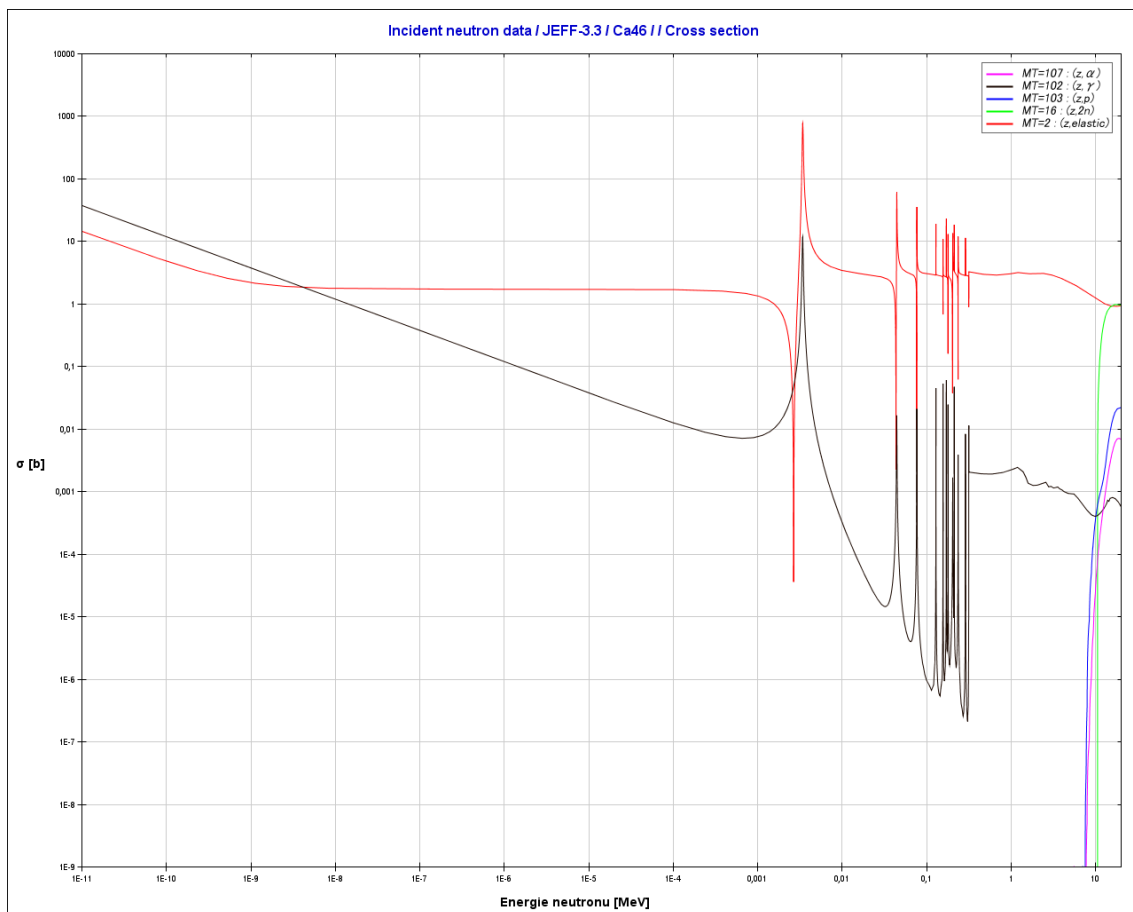
^{46}Ca (0,004 %)								
Prvek	(n,α) ^{43}Ar		(n,γ) ^{47}Ca		(n,p) ^{46}K		$(n,2n)$ ^{45}Ca	
$T_{1/2}$	5,37 m		4,536 d		105 s		162,6 d	
Rozpad 1	100% β^-		100% β^-		100% β^-		100% β^-	
Rozpad 2	-		-		-		-	
γ (keV)	738,1	15%	1297,09	71%	1346,00	100%	-	-
γ (keV)	975	34%	-	-	-	-	-	-
γ (keV)	1439,5	13%	-	-	-	-	-	-



Obr. A.8: Průběh účinných průřezů izotopu ^{43}Ca pro různé jaderné reakce. [14]



Obr. A.9: Průběh účinných průřezů izotopu ^{44}Ca pro různé jaderné reakce. [14]



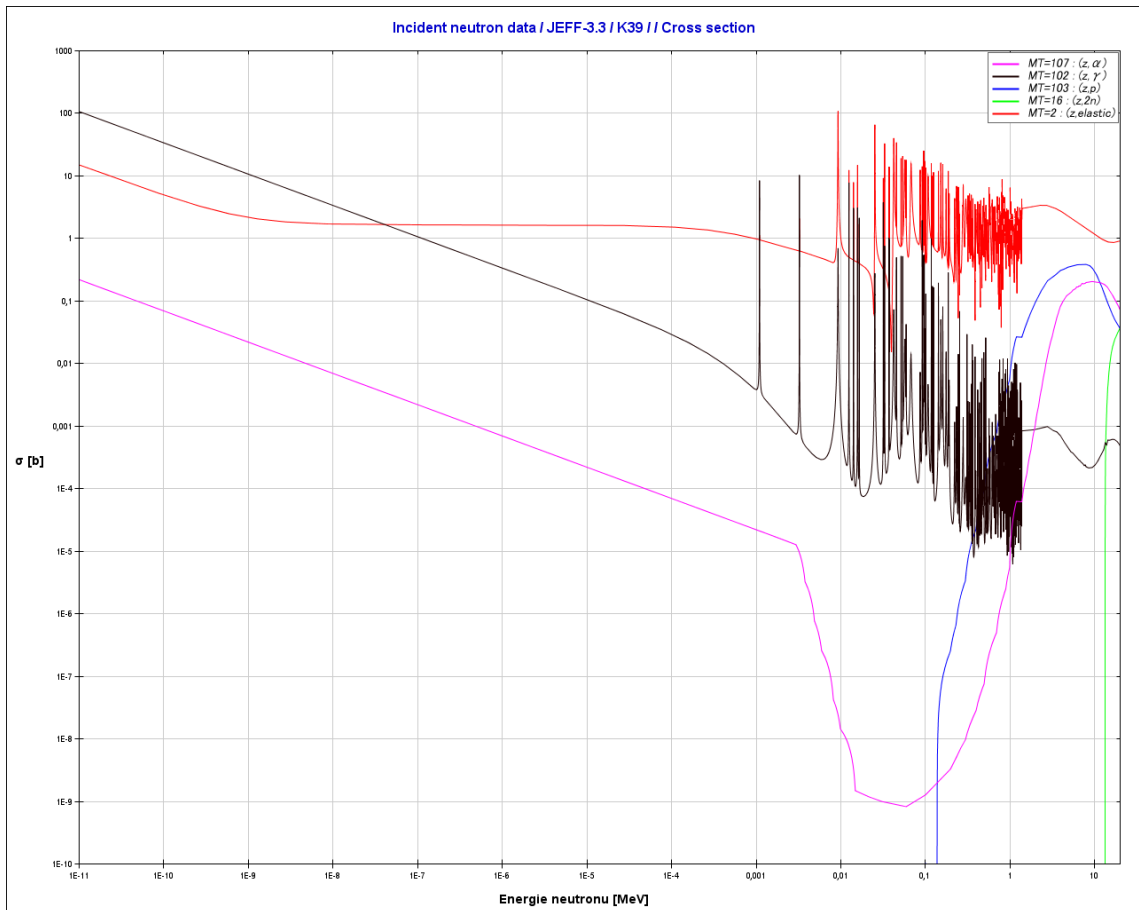
Obr. A.10: Průběh účinných průřezů izotopu ^{46}Ca pro různé jaderné reakce. [14]

A.6 Draslík

Pro draslík byly vypracovány tyto tabulky:

Tab. A.11: Izotop draslíku 39. [9]

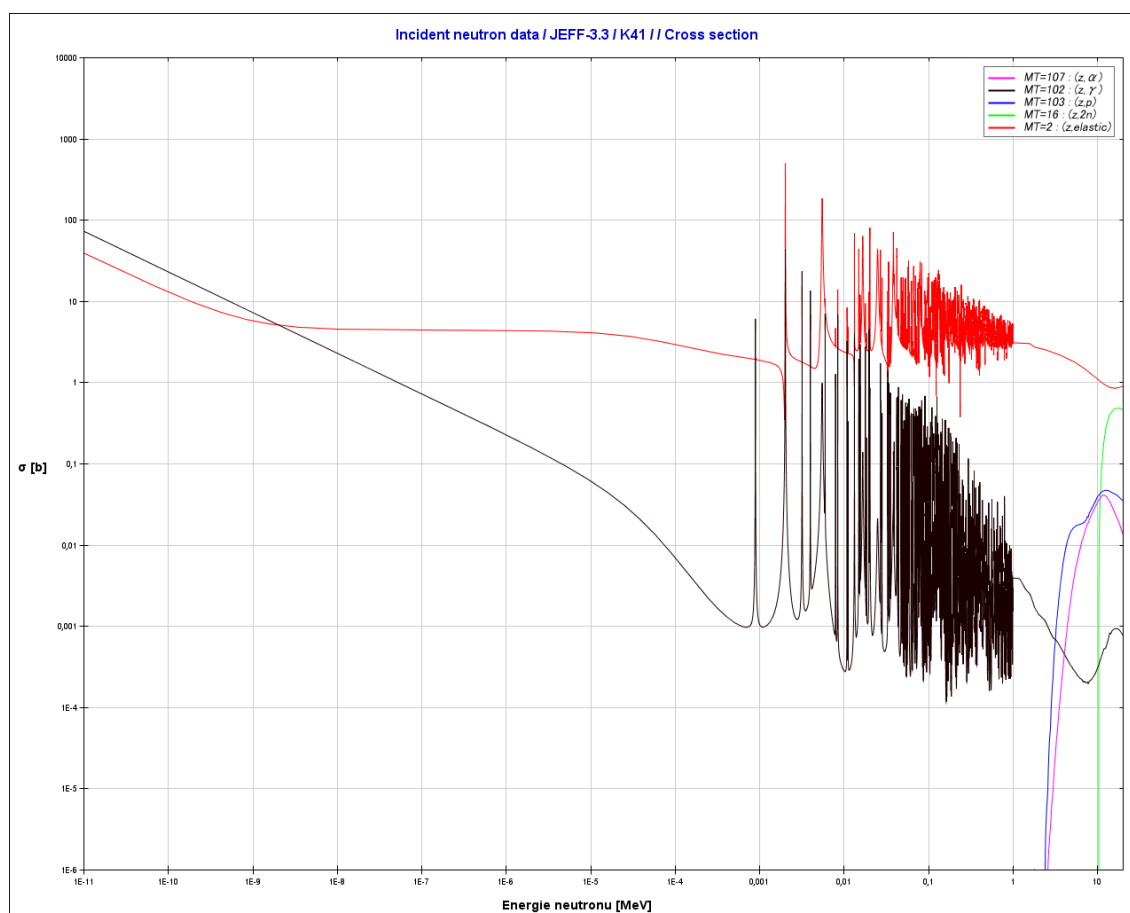
^{39}K (93,2581 %)										
Prvek	(n,α) ^{36}Cl		(n,γ) ^{40}K		(n,p) ^{39}Ar		$(n,2n)$			
							^{38}K		$^{38*}\text{K}$	
$T_{1/2}$	$3,01 \cdot 10^5$ let		$1,277 \cdot 10^9$ let		269 let		7,636 m		923,9 ms	
Rozpad 1	98,1% β^-		89,28% β^-		100% β^-		100% $e+\beta^+$		100% $e+\beta^+$	
Rozpad 2	1,9% $e+\beta^+$		10,72% $e+\beta^+$		-		-		-	
γ (keV)	511	3,80%	511	21,44%	-	-	511	200%	511	200%
γ (keV)	-	-	-	-	-	-	2167,405	99,86%	-	-



Obr. A.11: Průběh účinných průřezů izotopu ^{39}K pro různé jaderné reakce. [14]

Tab. A.12: Izotop draslíku 41. [9]

^{41}K (6,7302 %)					
Prvek	(n, α)		(n, γ)	(n,p)	(n,2n)
	^{38}Cl	$^{38*}\text{Cl}$	^{42}K	^{41}Ar	^{40}K
$T_{1/2}$	37,24 m	715 ms	12,36 h	109,34 m	$1,277 \cdot 10^9$ let
Rozpad 1	100% β^-	100% IT	100% β^-	100% β^-	89,28% β^-
Rozpad 2	–	–	–	–	10,72% e+ β^+
γ (keV)	1642,714 31,90%	671,355 99,95%	1524,7 18%	1293,587 100%	511 21,44%
γ (keV)	2167,405 42,40%	–	–	–	–



Obr. A.12: Průběh účinných průřezů izotopu ^{41}K pro různé jaderné reakce. [14]

A.7 Lithium

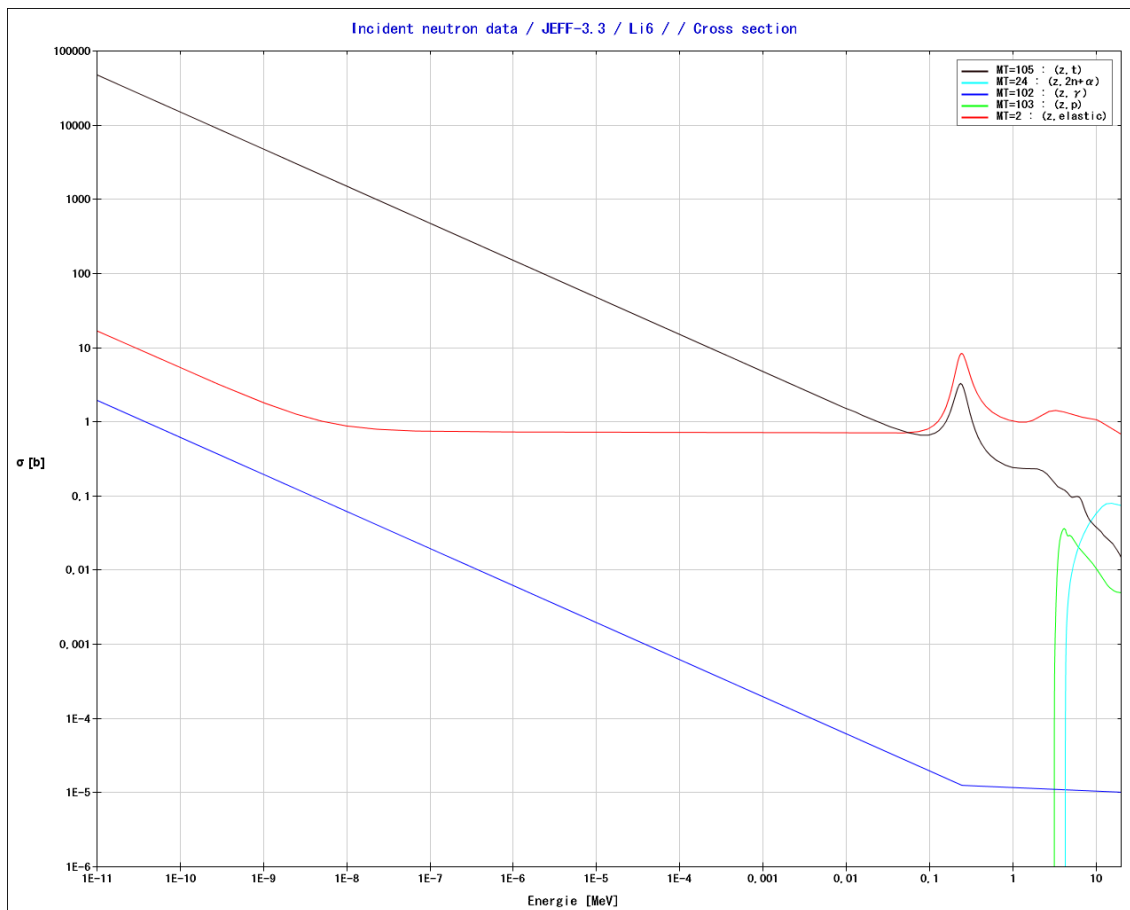
Lithium je dalším prvkem, u kterého nebude možné získat žádná data. Některé jaderné reakce jsou navíc fyzikálně nemožné nebo náročné na zjištění, proto se v grafech nenacházejí všechny (např. nelze uskutečnit reakci (n, α) u ^7Li , vznikl by ^4H).

U lithia ${}^6\text{Li}$ pozorujeme významnou dominanci (n,t) reakcí v energetickém spektru dosahující horní hranice tepelných neutronů. Přibližně od 0,08 MeV dochází k mírnému převládání pružného rozptylu. ${}^6\text{Li}$ se však v přírodě vyskytuje pouze v 7,5 % na úkor zastoupenějšího ${}^7\text{Li}$. Izotop ${}^7\text{Li}$ na rozdíl od ${}^6\text{Li}$ s neutrony příliš nereaguje. Proto se také lithium užívalo v solných taveninách pro chlazení reaktorů

Z primárního zdroje byly opět neznámé údaje o poločasu přeměny pro ${}^7\text{He}$ a ${}^5\text{Li}$. Wikipedie opět uvádí $T_{1/2} = 370 \cdot 10^{-24}$ s pro ${}^5\text{Li}$ a $T_{1/2} = 2,51 \cdot 10^{-21}$ s v případě ${}^7\text{He}$. [15, 17]

Tab. A.13: Izotop lithia 6. [9]

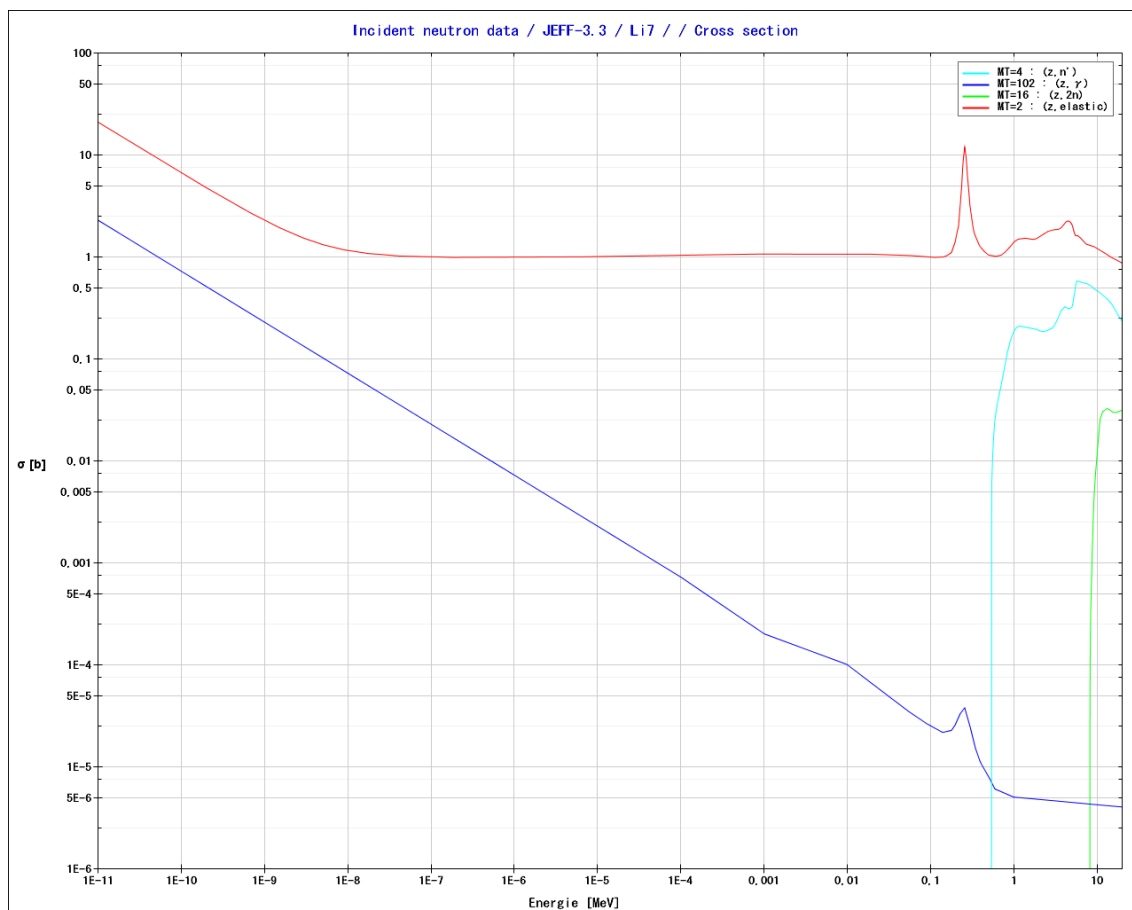
${}^6\text{Li}$ (7,5 %)				
Prvek	(n, α) ${}^3\text{H}$	(n, γ) ${}^7\text{Li}$	(n,p) ${}^6\text{He}$	(n,2n) ${}^5\text{Li}$
$T_{1/2}$	12,33 let	Stabilní	806,7 ms	neznámý
Rozpad 1	100% β^-	–	100% β^-	100% p
Rozpad 2	–	–	–	–
γ (keV)	– –	– –	– –	– –



Obr. A.13: Průběh účinných průřezů izotopu ${}^6\text{Li}$ pro různé jaderné reakce. [14]

Tab. A.14: Izotop lithia 7. [9]

${}^7\text{Li}$ (92,5 %)				
	(n, α)	(n, γ)	(n,p)	(n,2n)
Prvek	–	${}^8\text{Li}$	${}^7\text{He}$	${}^6\text{Li}$
$T_{1/2}$	–	838 ms	$2,51 \cdot 10^{-21}$ s	Stabilní
Rozpad 1	–	100% β^-	100% n	–
Rozpad 2	–	100% $\beta^- 2\alpha^-$	–	–
γ (keV)	– –	– –	– –	– –



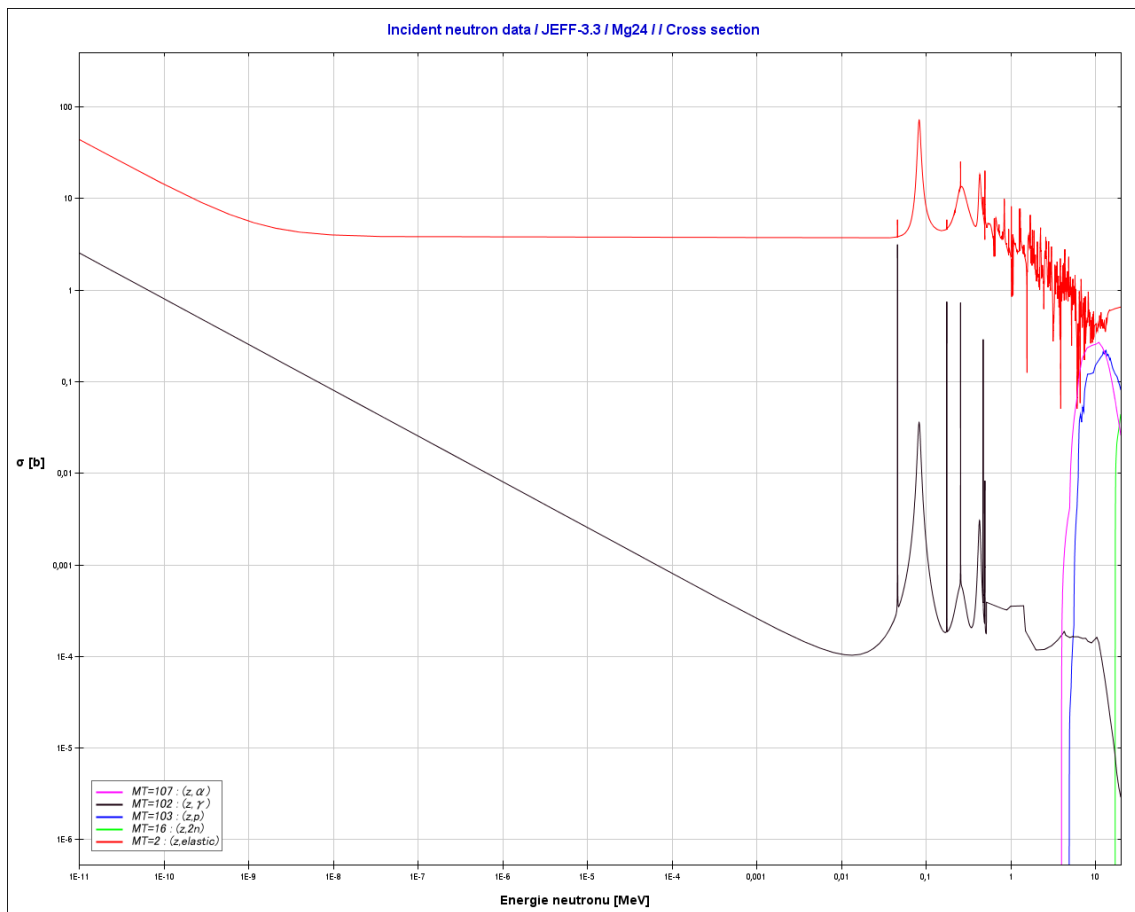
Obr. A.14: Průběh účinných průřezů izotopu ${}^7\text{Li}$ pro různé jaderné reakce. [14]

A.8 Hořčík

Hořčík má celkem tři stabilní izotopy, ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{25}\text{Mg}$ a ${}^{26}\text{Mg}$. Pro každý byla vypracována samostatná tabulka. Tabulky i grafy účinných průřezů se nacházejí pod tímto textem.

Tab. A.15: Izotop hořčíku 24. [9]

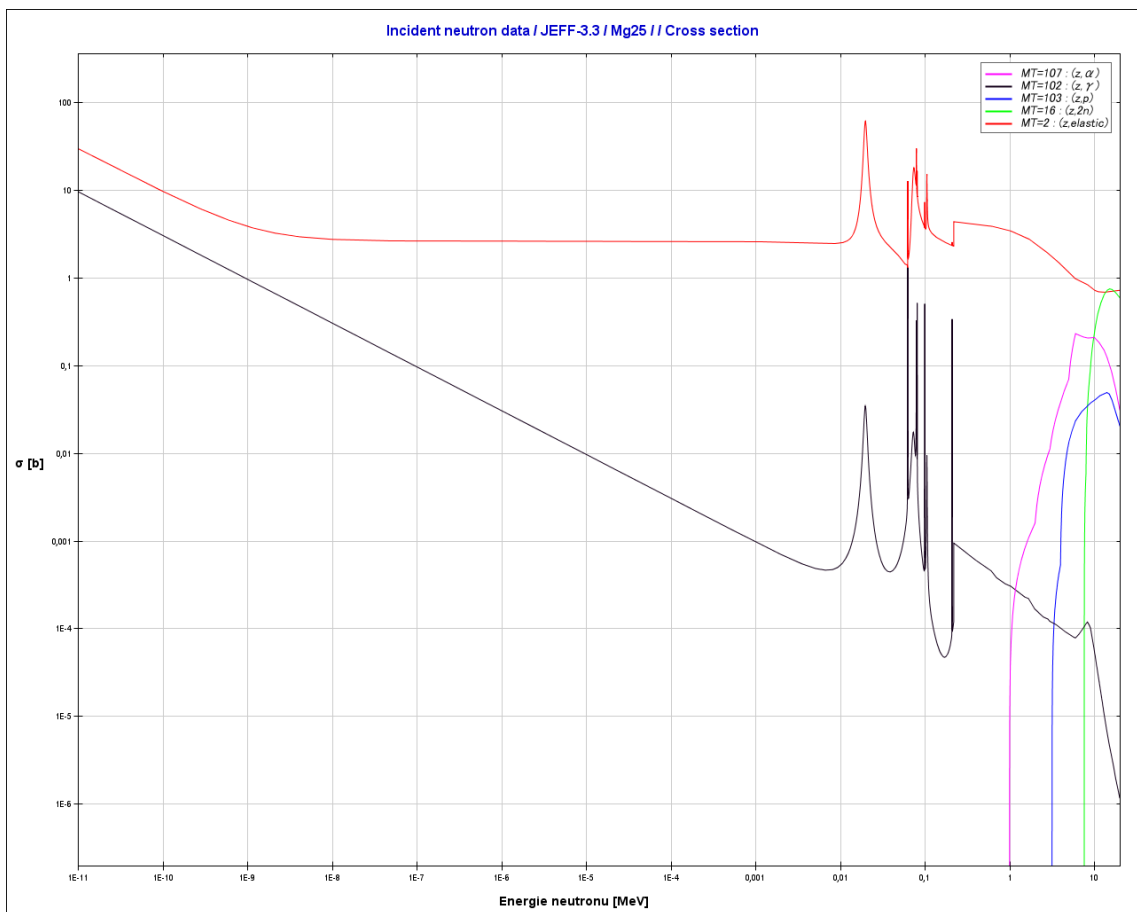
${}^{24}\text{Mg}$ (78,99 %)							
Prvek	(n,α) ${}^{21}\text{Ne}$	(n,γ) ${}^{25}\text{Mg}$	(n,p)				(n,2n) ${}^{23}\text{Mg}$
T1/2	Stabilní	Stabilní	${}^{24}\text{Na}$ 14,959 h	${}^{24*}\text{Na}$ 20,20 ms			11,32 s
Rozpad 1	–	–	100% β–	99,95% IT			100% e+β+
Rozpad 2	–	–	–	0,05% β–			–
γ (keV)	–	–	1368,633	100,00%	472,202	100,00%	439,986
γ (keV)	–	–	2754,028	99,94%	–	–	–
							8,20%



Obr. A.15: Průběh účinných průřezů izotopu ^{24}Mg pro různé jaderné reakce. [14]

Tab. A.16: Izotop hořčíku 25. [9]

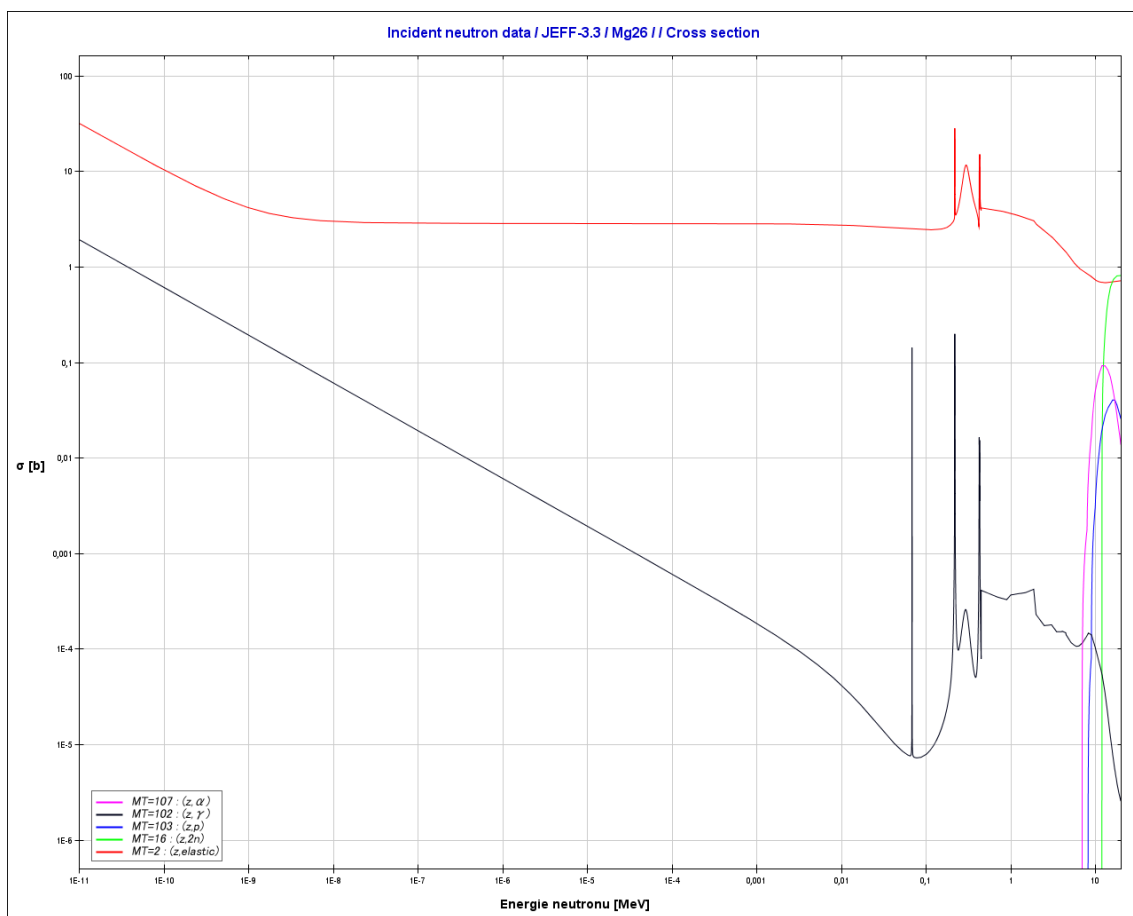
^{25}Mg (10,00 %)				
Prvek	(n, α) ^{22}Ne	(n, γ) ^{26}Mg	(n,p) ^{25}Na	(n,2n) ^{24}Mg
$T_{1/2}$	Stabilní	Stabilní	59,1 s	Stabilní
Rozpad 1	–	–	100% β^-	–
Rozpad 2	–	–	–	–
γ (keV)	–	–	389,70 12,68%	–
γ (keV)	–	–	585,03 13,00%	–
γ (keV)	–	–	974,72 14,95%	–
γ (keV)	–	–	1611,711 9,48%	–



Obr. A.16: Průběh účinných průřezů izotopu ^{25}Mg pro různé jaderné reakce. [14]

Tab. A.17: Izotop hořčíku 26. [9]

^{26}Mg (11,01 %)				
Prvek	(n, α) ^{23}Ne	(n, γ) ^{27}Mg	(n,p) ^{26}Na	(n,2n) ^{25}Mg
$T_{1/2}$	37,24 s	9,458 m	301 ms	Stabilní
Rozpad 1	100% β^-	100% β^-	100% β^-	–
Rozpad 2	–	–	–	–
γ (keV)	439,986 33%	843,74 71,80%	1808,65 99,0%	– –
γ (keV)	– –	1014,42 28,00%	– –	– –



Obr. A.17: Průběh účinných průřezů izotopu ^{26}Mg pro různé jaderné reakce. [14]

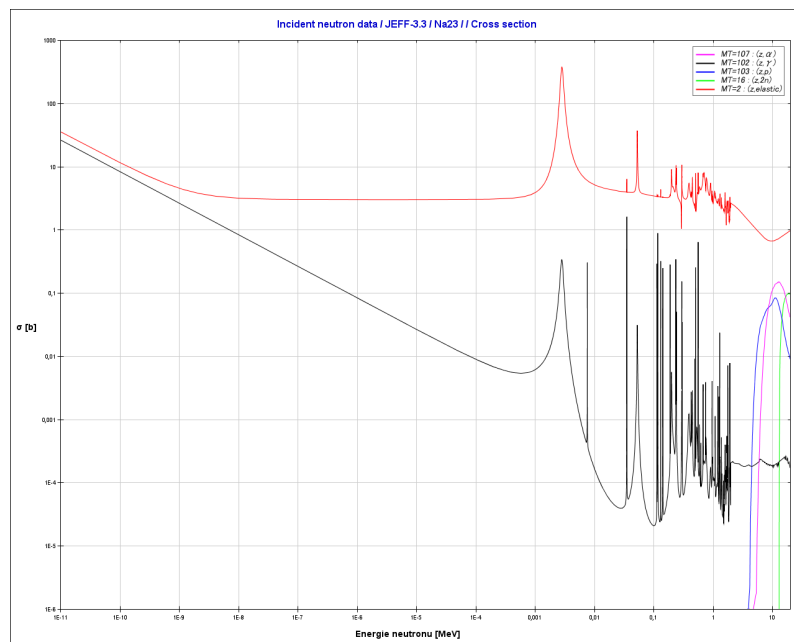
A.9 Sodík

Sodík je velice známý prvek a v případě soli je ve sloučenině s chlorem používán i v domácnostech (NaCl – kuchyňská sůl). Sodík má pouze jeden stabilní izotop ^{23}Na .

Z reakce (n,p) vzniká neon 24, jehož γ linky nezměříme, neboť se jedná o plyný prvek.

Tab. A.18: Izotop sodíku 23. [9]

^{23}Na (100 %)										
Prvek	(n, α) 20F		(n, γ) ^{24}Na $^{24*}\text{Na}$				(n,p) ^{23}Ne		(n,2n) ^{22}Na	
$T_{1/2}$	11,00 s		14,96 h		20,20 ms		37,24 s		2,602 le	
Rozpad 1	100% β^-		100% β^-		99,95% IT		100% β^-		100% e+	
Rozpad 2	–		–		0,05 β^-		–		–	
γ (keV)	1633,602	100%	1368,633	100%	472,202	100%	439,986	33,0%	511	200
γ (keV)	–	–	2754,028	99,94%	–	–	–	–	–	–



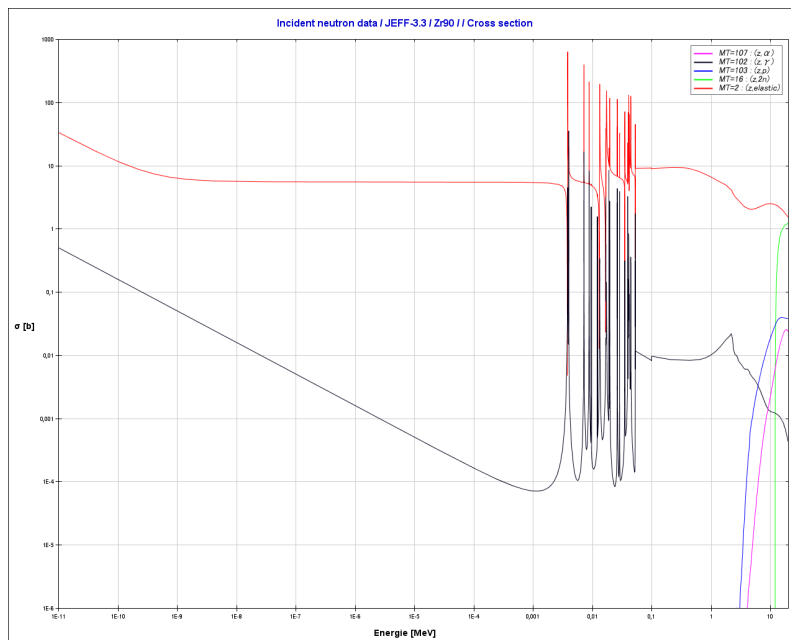
Obr. A.18: Průběh účinných průřezů izotopu ^{23}Na pro různé jaderné reakce. [14]

A.10 Zirkonium

Na závěr bude uvedeno zirkonium se svými čtyřmi stabilními izotopy ^{90}Zr , ^{91}Zr , ^{92}Zr a ^{94}Zr . Zirkonium je zde uveden, neboť zirkoniové soli byly také použity v praxi.

Tab. A.19: Izotop zirkonia 90. [9]

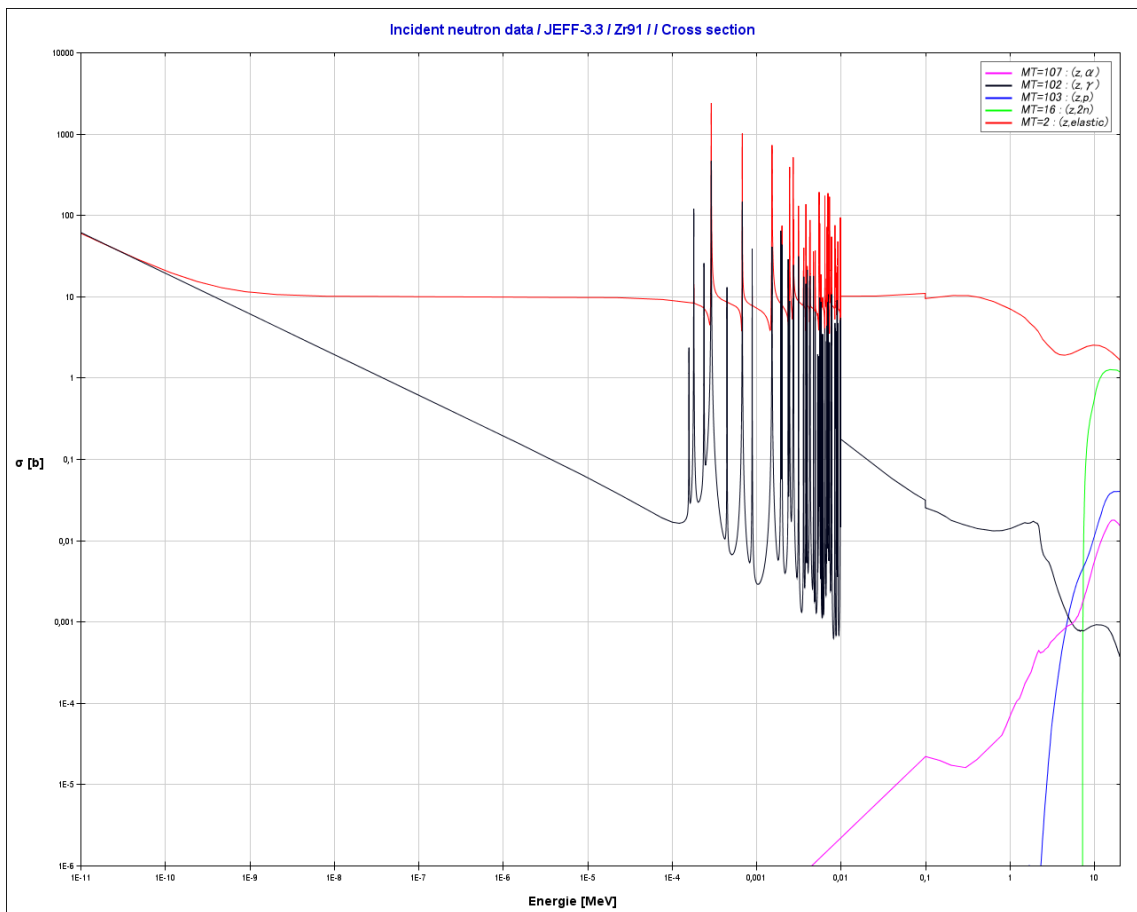
^{90}Zr (51,45 %)														
Prvek	^{87}Sr	(n, α) ^{87}Sr		(n, γ) ^{91}Zr	(n,p) ^{90}Y				(n,2n) ^{89}Zr					
$T_{1/2}$	Stabilní	2,803 h		Stabilní	64,00 h	3,19 h		78,41 h	4,18 m					
Rozpad 1	–	99,70% IT		–	100% β^-	99,9982% IT		100% $e+\beta^+$	93,77% IT					
Rozpad 2	–	0,30% e		–	–	0,0018% β^-		–	6,23 $e+\beta^+$					
γ (keV)	–	–	388,531	81,90%	–	–	1760,7	?%	202,51	97,30%	511	200%	511	12,46%
γ (keV)	–	–	–	–	–	–	–	–	479,17	90,74%	908,96	100%	587,83	90%



Obr. A.19: Průběh účinných průřezů izotopu ^{90}Zr pro různé jaderné reakce. [14]

Tab. A.20: Izotop zirkonia 91. [9]

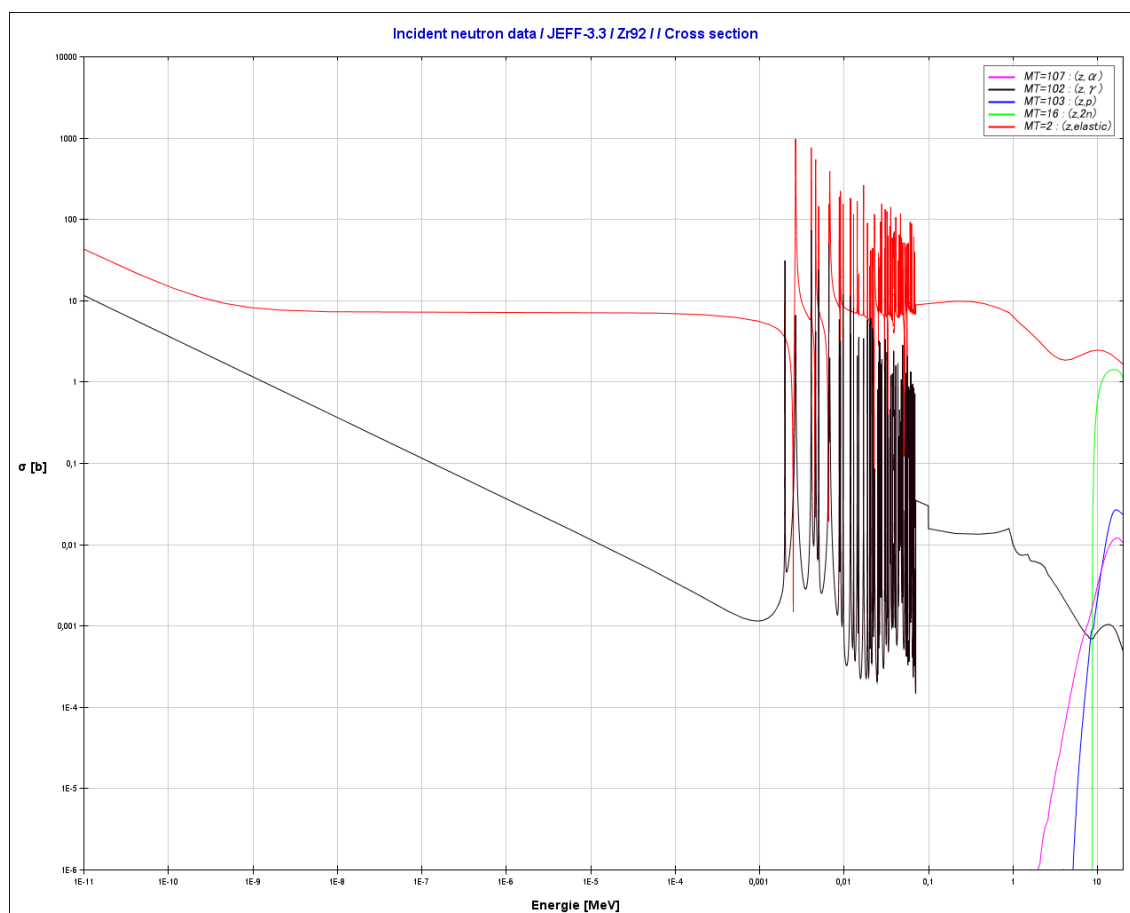
^{91}Zr (11,22 %)					
Prvek	(n, α) ^{88}Sr	(n, γ) ^{92}Zr	(n,p)		(n,2n) ^{90}Zr
$T_{1/2}$	Stabilní	Stabilní	^{91}Y 58,51 d	$^{91*}\text{Y}$ 49,71 m	Stabilní
Rozpad 1	–	–	100% β^-	100% IT	–
Rozpad 2	–	–	–	< 1,5% β^-	–
γ (keV)	– –	– –	1207,77 0,30%	555,57 95,00%	– –



Obr. A.20: Průběh účinných průřezů izotopu ^{91}Zr pro různé jaderné reakce. [14]

Tab. A.21: Izotop zirkonia 92. [9]

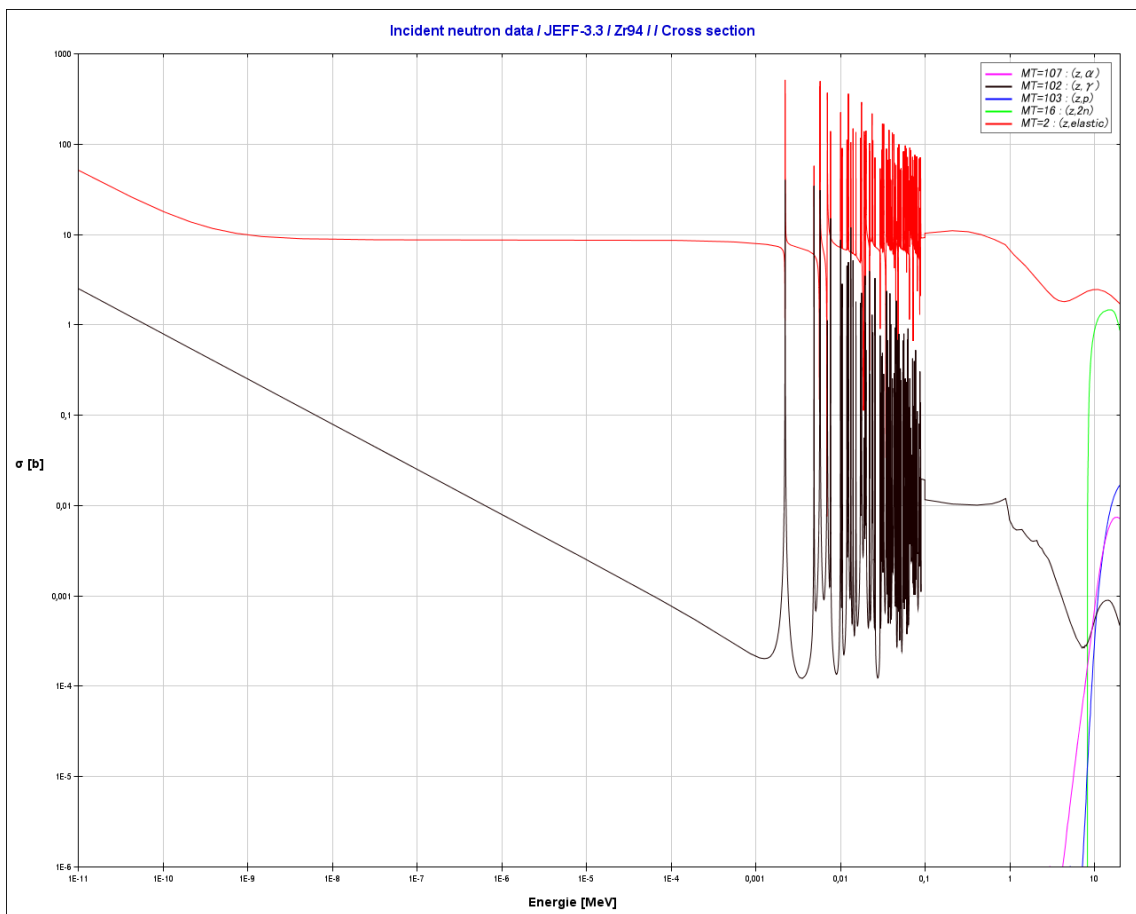
^{92}Zr (17,15 %)				
Prvek	(n, α) 89Sr	(n, γ) ^{93}Zr	(n,p) ^{92}Y	(n,2n) ^{91}Zr
$T_{1/2}$	50,53 d	$1,53 \cdot 10^6$ let	3,54 h	Stabilní
Rozpad 1	100% β^-	100% β^-	100% β^-	–
Rozpad 2	–	–	–	–
γ (keV)	908,96 0,01%	30,77 *	934,46 13,90%	– –



Obr. A.21: Průběh účinných průřezů izotopu ^{92}Zr pro různé jaderné reakce. [14]

Tab. A.22: Izotop zirkonia 94. [9]

^{94}Zr (17,38 %)				
Prvek	(n, α) ^{90}Sr	(n, γ) ^{95}Zr	(n,p) ^{94}Y	(n,2n) ^{93}Zr
$T_{1/2}$	28,79 let	64,02 d	18,7 m	$1,53 \cdot 10^6$ let
Rozpad 1	100% β^-	100% β^-	100% β^-	100% β^-
Rozpad 2	–	–	–	–
γ (keV)	– –	724,199 44,17%	918,74 56%	– –
γ (keV)	– –	756,729 54,00%	– –	– –



Obr. A.22: Průběh účinných průřezů izotopu ^{94}Zr pro různé jaderné reakce. [14]

B Porovnání naměřených a vypočítaných hodnot

Tab. B.1: Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK1 (n,n') Cl.

Číslo vzorku	Experiment (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	Reference (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	BROND-3.1 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	CENDL-3.2 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	ENDF B-VIII.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JEFF-3.3 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JENDL-4.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)
1	7,37·10 ⁻²²	1,56·10 ⁻²¹	1,53·10 ⁻²¹	1,54·10 ⁻²¹	1,54·10 ⁻²¹	1,54·10 ⁻²¹	1,557·10 ⁻²¹
2	1,56·10 ⁻²¹	2,17·10 ⁻²¹	2,14·10 ⁻²¹	2,16·10 ⁻²¹	2,15·10 ⁻²¹	2,14·10 ⁻²¹	2,177·10 ⁻²¹
3	1,63·10 ⁻²¹	2,89·10 ⁻²¹	2,84·10 ⁻²¹	2,86·10 ⁻²¹	2,85·10 ⁻²¹	2,84·10 ⁻²¹	2,882·10 ⁻²¹
4	2,42·10 ⁻²¹	3,71·10 ⁻²¹	3,66·10 ⁻²¹	3,68·10 ⁻²¹	3,65·10 ⁻²¹	3,66·10 ⁻²¹	3,697·10 ⁻²¹
5	2,83·10 ⁻²¹	4,47·10 ⁻²¹	4,42·10 ⁻²¹	4,43·10 ⁻²¹	4,41·10 ⁻²¹	4,42·10 ⁻²¹	4,459·10 ⁻²¹
6	3,05·10 ⁻²¹	4,93·10 ⁻²¹	4,87·10 ⁻²¹	4,89·10 ⁻²¹	4,87·10 ⁻²¹	4,87·10 ⁻²¹	4,919·10 ⁻²¹
7	2,97·10 ⁻²¹	4,96·10 ⁻²¹	4,91·10 ⁻²¹	4,94·10 ⁻²¹	4,92·10 ⁻²¹	4,91·10 ⁻²¹	4,963·10 ⁻²¹
8	2,52·10 ⁻²¹	4,48·10 ⁻²¹	4,43·10 ⁻²¹	4,45·10 ⁻²¹	4,43·10 ⁻²¹	4,43·10 ⁻²¹	4,473·10 ⁻²¹
9	2,09·10 ⁻²¹	3,73·10 ⁻²¹	3,68·10 ⁻²¹	3,7·10 ⁻²¹	3,69·10 ⁻²¹	3,68·10 ⁻²¹	3,726·10 ⁻²¹
10	1,57·10 ⁻²¹	2,92·10 ⁻²¹	2,89·10 ⁻²¹	2,91·10 ⁻²¹	2,9·10 ⁻²¹	2,89·10 ⁻²¹	2,928·10 ⁻²¹
11	1,15·10 ⁻²¹	2,22·10 ⁻²¹	2,18·10 ⁻²¹	2,19·10 ⁻²¹	2,18·10 ⁻²¹	2,18·10 ⁻²¹	2,211·10 ⁻²¹
12	9,79·10 ⁻²²	1,65·10 ⁻²¹	1,61·10 ⁻²¹	1,62·10 ⁻²¹	1,61·10 ⁻²¹	1,61·10 ⁻²¹	1,638·10 ⁻²¹

Tab. B.2: Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK1 (n,γ) Cl.

Číslo vzorku	Experiment (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	Reference (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	BROND-3.1 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	CENDL-3.2 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	ENDF B-VIII.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JEFF-3.3 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JENDL-4.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)
1	6,64·10 ⁻²³	2,26·10 ⁻²²	2,23·10 ⁻²²	2,22·10 ⁻²²	2,24·10 ⁻²²	2,25·10 ⁻²²	2,14·10 ⁻²²
2	1,99·10 ⁻²²	3,38·10 ⁻²²	3,33·10 ⁻²²	3,38·10 ⁻²²	3,34·10 ⁻²²	3,34·10 ⁻²²	3,29·10 ⁻²²
3	2,43·10 ⁻²²	4,55·10 ⁻²²	4,46·10 ⁻²²	4,5·10 ⁻²²	4,46·10 ⁻²²	4,46·10 ⁻²²	4,41·10 ⁻²²
4	2,83·10 ⁻²²	5,79·10 ⁻²²	5,71·10 ⁻²²	5,74·10 ⁻²²	5,71·10 ⁻²²	5,73·10 ⁻²²	5,58·10 ⁻²²
5	3,16·10 ⁻²²	6,90·10 ⁻²²	6,83·10 ⁻²²	6,86·10 ⁻²²	6,83·10 ⁻²²	6,84·10 ⁻²²	6,64·10 ⁻²²
6	3,94·10 ⁻²²	7,61·10 ⁻²²	7,49·10 ⁻²²	7,51·10 ⁻²²	7,48·10 ⁻²²	7,48·10 ⁻²²	7,26·10 ⁻²²
7	3,21·10 ⁻²²	7,63·10 ⁻²²	7,51·10 ⁻²²	7,54·10 ⁻²²	7,52·10 ⁻²²	7,52·10 ⁻²²	7,33·10 ⁻²²
8	3,14·10 ⁻²²	6,99·10 ⁻²²	6,91·10 ⁻²²	6,93·10 ⁻²²	6,91·10 ⁻²²	6,89·10 ⁻²²	6,73·10 ⁻²²
9	2,67·10 ⁻²²	5,91·10 ⁻²²	5,77·10 ⁻²²	5,79·10 ⁻²²	5,77·10 ⁻²²	5,76·10 ⁻²²	5,65·10 ⁻²²
10	2,33·10 ⁻²²	4,74·10 ⁻²²	4,67·10 ⁻²²	4,74·10 ⁻²²	4,68·10 ⁻²²	4,68·10 ⁻²²	4,59·10 ⁻²²
11	1,56·10 ⁻²²	3,64·10 ⁻²²	3,58·10 ⁻²²	3,59·10 ⁻²²	3,59·10 ⁻²²	3,59·10 ⁻²²	3,52·10 ⁻²²
12	1,56·10 ⁻²²	2,65·10 ⁻²²	2,59·10 ⁻²²	2,64·10 ⁻²²	2,61·10 ⁻²²	2,61·10 ⁻²²	2,53·10 ⁻²²

Tab. B.3: Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK2 (n,n') Cl.

Číslo vzorku	Experiment (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	Reference (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	BROND-3.1 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	CENDL-3.2 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	ENDF B-VIII.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JEFF-3.3 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JENDL-4.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)
1	7,40·10 ⁻²³	5,03·10 ⁻²²	4,93·10 ⁻²²	4,93·10 ⁻²²	4,93·10 ⁻²²	4,92·10 ⁻²²	5,058·10 ⁻²²
2	1,04·10 ⁻²²	6,21·10 ⁻²²	6,02·10 ⁻²²	5,99·10 ⁻²²	5,99·10 ⁻²²	6,03·10 ⁻²²	6,117·10 ⁻²²
3	1,10·10 ⁻²²	7,05·10 ⁻²²	6,85·10 ⁻²²	6,89·10 ⁻²²	6,86·10 ⁻²²	6,87·10 ⁻²²	6,996·10 ⁻²²
4	1,27·10 ⁻²²	7,80·10 ⁻²²	7,67·10 ⁻²²	7,65·10 ⁻²²	7,7·10 ⁻²²	7,69·10 ⁻²²	7,789·10 ⁻²²
5	1,38·10 ⁻²²	8,33·10 ⁻²²	8,16·10 ⁻²²	8,2·10 ⁻²²	8,12·10 ⁻²²	8,15·10 ⁻²²	8,306·10 ⁻²²
6	1,53·10 ⁻²²	8,68·10 ⁻²²	8,41·10 ⁻²²	8,46·10 ⁻²²	8,39·10 ⁻²²	8,41·10 ⁻²²	8,59·10 ⁻²²
7	1,47·10 ⁻²²	8,61·10 ⁻²²	8,38·10 ⁻²²	8,47·10 ⁻²²	8,37·10 ⁻²²	8,39·10 ⁻²²	8,597·10 ⁻²²
8	1,28·10 ⁻²²	8,34·10 ⁻²²	8,17·10 ⁻²²	8,23·10 ⁻²²	8,2·10 ⁻²²	8,19·10 ⁻²²	8,389·10 ⁻²²
9	1,11·10 ⁻²²	7,88·10 ⁻²²	7,71·10 ⁻²²	7,72·10 ⁻²²	7,72·10 ⁻²²	7,73·10 ⁻²²	7,853·10 ⁻²²
10	1,04·10 ⁻²²	7,14·10 ⁻²²	7,07·10 ⁻²²	7,04·10 ⁻²²	7,02·10 ⁻²²	7,04·10 ⁻²²	7,182·10 ⁻²²
11	8,70·10 ⁻²³	6,28·10 ⁻²²	6,13·10 ⁻²²	6,12·10 ⁻²²	6,11·10 ⁻²²	6,13·10 ⁻²²	6,274·10 ⁻²²
12	7,37·10 ⁻²³	5,34·10 ⁻²²	5,24·10 ⁻²²	5,21·10 ⁻²²	5,28·10 ⁻²²	5,23·10 ⁻²²	5,362·10 ⁻²²

Tab. B.4: Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK2 (n,γ) Cl.

Číslo vzorku	Experiment (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	Reference (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	BROND-3.1 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	CENDL-3.2 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	ENDF B-VIII.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JEFF-3.3 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JENDL-4.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)
1	9,73·10 ⁻²⁴	9,74·10 ⁻²³	9,69·10 ⁻²³	9,75·10 ⁻²³	9,73·10 ⁻²³	9,76·10 ⁻²³	9,422·10 ⁻²³
2	1,28·10 ⁻²³	1,35·10 ⁻²¹	1,32·10 ⁻²¹	1,33·10 ⁻²¹	1,33·10 ⁻²¹	1,32·10 ⁻²¹	1,276·10 ⁻²¹
3	3,19·10 ⁻²³	1,65·10 ⁻²¹	1,6·10 ⁻²¹	1,62·10 ⁻²¹	1,61·10 ⁻²¹	1,61·10 ⁻²¹	1,556·10 ⁻²¹
4	7,68·10 ⁻²³	1,90·10 ⁻²¹	1,83·10 ⁻²¹	1,86·10 ⁻²¹	1,84·10 ⁻²¹	1,84·10 ⁻²¹	1,748·10 ⁻²¹
5	1,17·10 ⁻²¹	2,07·10 ⁻²¹	1,98·10 ⁻²¹	2,03·10 ⁻²¹	1,99·10 ⁻²¹	2·10 ⁻²¹	1,96·10 ⁻²¹
6	1,58·10 ⁻²¹	2,18·10 ⁻²¹	2,15·10 ⁻²¹	2,14·10 ⁻²¹	2,14·10 ⁻²¹	2,15·10 ⁻²¹	2,041·10 ⁻²¹
7	2,54·10 ⁻²¹	2,18·10 ⁻²¹	2,08·10 ⁻²¹	2,13·10 ⁻²¹	2,07·10 ⁻²¹	2,08·10 ⁻²¹	2,041·10 ⁻²¹
8	1,74·10 ⁻²¹	2,13·10 ⁻²¹	2,07·10 ⁻²¹	2,08·10 ⁻²¹	2,07·10 ⁻²¹	2,08·10 ⁻²¹	2,01·10 ⁻²¹
9	1,28·10 ⁻²¹	1,97·10 ⁻²¹	1,94·10 ⁻²¹	1,93·10 ⁻²¹	1,93·10 ⁻²¹	1,93·10 ⁻²¹	1,825·10 ⁻²¹
10	9,24·10 ⁻²³	1,77·10 ⁻²¹	1,74·10 ⁻²¹	1,72·10 ⁻²¹	1,73·10 ⁻²¹	1,74·10 ⁻²¹	1,665·10 ⁻²¹
11	5,98·10 ⁻²³	1,51·10 ⁻²¹	1,46·10 ⁻²¹	1,47·10 ⁻²¹	1,46·10 ⁻²¹	1,46·10 ⁻²¹	1,413·10 ⁻²¹
12	1,35·10 ⁻²³	1,18·10 ⁻²¹	1,15·10 ⁻²¹	1,15·10 ⁻²¹	1,15·10 ⁻²¹	1,15·10 ⁻²¹	1,114·10 ⁻²¹

Tab. B.5: Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK3 (n,n') Cl.

Číslo vzorku	Experiment (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	Reference (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	BROND-3.1 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	CENDL-3.2 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	ENDF B-VIII.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JEFF-3.3 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JENDL-4.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)
1	–	2,41·10 ⁻²²	2,33·10 ⁻²²	2,33·10 ⁻²²	2,31·10 ⁻²²	2,33·10 ⁻²²	2,405·10 ⁻²²
2	–	2,85·10 ⁻²²	2,77·10 ⁻²²	2,76·10 ⁻²²	2,74·10 ⁻²²	2,77·10 ⁻²²	2,827·10 ⁻²²
3	5,84·10 ⁻²³	3,26·10 ⁻²²	3,14·10 ⁻²²	3,09·10 ⁻²²	3,14·10 ⁻²²	3,15·10 ⁻²²	3,202·10 ⁻²²
4	1,24·10 ⁻²²	3,49·10 ⁻²²	3,38·10 ⁻²²	3,41·10 ⁻²²	3,4·10 ⁻²²	3,39·10 ⁻²²	3,527·10 ⁻²²
5	1,48·10 ⁻²²	3,68·10 ⁻²²	3,54·10 ⁻²²	3,56·10 ⁻²²	3,57·10 ⁻²²	3,54·10 ⁻²²	3,68·10 ⁻²²
6	2,09·10 ⁻²²	3,73·10 ⁻²²	3,65·10 ⁻²²	3,64·10 ⁻²²	3,63·10 ⁻²²	3,65·10 ⁻²²	3,794·10 ⁻²²
7	2,61·10 ⁻²²	3,74·10 ⁻²²	3,65·10 ⁻²²	3,62·10 ⁻²²	3,65·10 ⁻²²	3,63·10 ⁻²²	3,765·10 ⁻²²
8	2,45·10 ⁻²²	3,70·10 ⁻²²	3,59·10 ⁻²²	3,62·10 ⁻²²	3,61·10 ⁻²²	3,6·10 ⁻²²	3,721·10 ⁻²²
9	1,54·10 ⁻²²	3,54·10 ⁻²²	3,43·10 ⁻²²	3,47·10 ⁻²²	3,44·10 ⁻²²	3,45·10 ⁻²²	3,533·10 ⁻²²
10	1,25·10 ⁻²²	3,18·10 ⁻²²	3,09·10 ⁻²²	3,14·10 ⁻²²	3,12·10 ⁻²²	3,1·10 ⁻²²	3,27·10 ⁻²²
11	–	2,91·10 ⁻²²	2,84·10 ⁻²²	2,83·10 ⁻²²	2,82·10 ⁻²²	2,84·10 ⁻²²	2,939·10 ⁻²²
12	–	2,49·10 ⁻²²	2,41·10 ⁻²²	2,4·10 ⁻²²	2,39·10 ⁻²²	2,41·10 ⁻²²	2,476·10 ⁻²²

Tab. B.6: Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK3 (n,γ) Cl.

Číslo vzorku	Experiment (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	Reference (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	BROND-3.1 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	CENDL-3.2 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	ENDF B-VIII.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JEFF-3.3 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JENDL-4.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)
1	–	5,94·10 ⁻²³	5,85·10 ⁻²³	5,69·10 ⁻²³	5,9·10 ⁻²³	5,87·10 ⁻²³	5,526·10 ⁻²³
2	–	8,24·10 ⁻²³	7,84·10 ⁻²³	7,86·10 ⁻²³	7,97·10 ⁻²³	7,98·10 ⁻²³	7,541·10 ⁻²³
3	1,43·10 ⁻²³	9,96·10 ⁻²³	9,77·10 ⁻²³	9,53·10 ⁻²³	9,79·10 ⁻²³	9,8·10 ⁻²³	9,309·10 ⁻²³
4	1,83·10 ⁻²³	1,14·10 ⁻²²	1,12·10 ⁻²²	1,13·10 ⁻²²	1,13·10 ⁻²²	1,11·10 ⁻²²	1,063·10 ⁻²²
5	2,09·10 ⁻²³	1,23·10 ⁻²²	1,18·10 ⁻²²	1,16·10 ⁻²²	1,17·10 ⁻²²	1,16·10 ⁻²²	1,153·10 ⁻²²
6	3,25·10 ⁻²³	1,26·10 ⁻²²	1,22·10 ⁻²²	1,28·10 ⁻²²	1,22·10 ⁻²²	1,23·10 ⁻²²	1,192·10 ⁻²²
7	4,54·10 ⁻²³	1,27·10 ⁻²²	1,23·10 ⁻²²	1,22·10 ⁻²²	1,23·10 ⁻²²	1,24·10 ⁻²²	1,19·10 ⁻²²
8	3,26·10 ⁻²³	1,22·10 ⁻²²	1,2·10 ⁻²²	1,16·10 ⁻²²	1,2·10 ⁻²²	1,21·10 ⁻²²	1,13·10 ⁻²²
9	2,85·10 ⁻²³	1,14·10 ⁻²²	1,09·10 ⁻²²	1,11·10 ⁻²²	1,1·10 ⁻²²	1,1·10 ⁻²²	1,048·10 ⁻²²
10	1,92·10 ⁻²³	1,00·10 ⁻²²	9,81·10 ⁻²³	1,02·10 ⁻²²	9,67·10 ⁻²³	9,71·10 ⁻²³	9,529·10 ⁻²³
11	–	8,23·10 ⁻²³	7,95·10 ⁻²³	7,84·10 ⁻²³	7,98·10 ⁻²³	7,97·10 ⁻²³	7,612·10 ⁻²³
12	–	5,96·10 ⁻²³	5,84·10 ⁻²³	5,66·10 ⁻²³	5,83·10 ⁻²³	5,78·10 ⁻²³	5,612·10 ⁻²³

Tab. B.7: Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK1 (n,n') Na.

Číslo vzorku	Experiment (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	Reference (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	BROND-3.1 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	CENDL-3.2 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	ENDF B-VIII.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JEFF-3.3 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JENDL-4.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)
1	7,37·10 ⁻²²	1,56·10 ⁻²¹	1,56·10 ⁻²¹	1,57·10 ⁻²¹	1,56·10 ⁻²¹	1,56·10 ⁻²¹	1,56·10 ⁻²¹
2	1,56·10 ⁻²¹	2,17·10 ⁻²¹	2,16·10 ⁻²¹	2,17·10 ⁻²¹	2,17·10 ⁻²¹	2,16·10 ⁻²¹	2,169·10 ⁻²¹
3	1,63·10 ⁻²¹	2,89·10 ⁻²¹	2,88·10 ⁻²¹	2,88·10 ⁻²¹	2,88·10 ⁻²¹	2,88·10 ⁻²¹	2,881·10 ⁻²¹
4	2,42·10 ⁻²¹	3,71·10 ⁻²¹	3,7·10 ⁻²¹	3,72·10 ⁻²¹	3,71·10 ⁻²¹	3,7·10 ⁻²¹	3,72·10 ⁻²¹
5	2,83·10 ⁻²¹	4,47·10 ⁻²¹	4,45·10 ⁻²¹	4,48·10 ⁻²¹	4,48·10 ⁻²¹	4,45·10 ⁻²¹	4,483·10 ⁻²¹
6	3,05·10 ⁻²¹	4,93·10 ⁻²¹	4,91·10 ⁻²¹	4,93·10 ⁻²¹	4,92·10 ⁻²¹	4,91·10 ⁻²¹	4,936·10 ⁻²¹
7	2,97·10 ⁻²¹	4,96·10 ⁻²¹	4,95·10 ⁻²¹	4,98·10 ⁻²¹	4,97·10 ⁻²¹	4,95·10 ⁻²¹	4,976·10 ⁻²¹
8	2,52·10 ⁻²¹	4,48·10 ⁻²¹	4,46·10 ⁻²¹	4,48·10 ⁻²¹	4,48·10 ⁻²¹	4,46·10 ⁻²¹	4,481·10 ⁻²¹
9	2,09·10 ⁻²¹	3,73·10 ⁻²¹	3,71·10 ⁻²¹	3,73·10 ⁻²¹	3,73·10 ⁻²¹	3,71·10 ⁻²¹	3,739·10 ⁻²¹
10	1,57·10 ⁻²¹	2,92·10 ⁻²¹	2,92·10 ⁻²¹	2,93·10 ⁻²¹	2,93·10 ⁻²¹	2,92·10 ⁻²¹	2,93·10 ⁻²¹
11	1,15·10 ⁻²¹	2,22·10 ⁻²¹	2,21·10 ⁻²¹	2,22·10 ⁻²¹	2,22·10 ⁻²¹	2,2·10 ⁻²¹	2,222·10 ⁻²¹
12	9,79·10 ⁻²²	1,65·10 ⁻²¹	1,64·10 ⁻²¹	1,65·10 ⁻²¹	1,65·10 ⁻²¹	1,65·10 ⁻²¹	1,647·10 ⁻²¹

Tab. B.8: Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK1 (n, γ) Na.

Číslo vzorku	Experiment (atom ⁻¹ · s ⁻¹)	Reference (atom ⁻¹ · s ⁻¹)	BROND-3.1 (atom ⁻¹ · s ⁻¹)	CENDL-3.2 (atom ⁻¹ · s ⁻¹)	ENDF B-VIII.0 (atom ⁻¹ · s ⁻¹)	JEFF-3.3 (atom ⁻¹ · s ⁻¹)	JENDL-4.0 (atom ⁻¹ · s ⁻¹)
1	6,64 · 10 ⁻²³	2,26 · 10 ⁻²²	2,28 · 10 ⁻²²	2,27 · 10 ⁻²²	2,27 · 10 ⁻²²	2,29 · 10 ⁻²²	2,267 · 10 ⁻²²
2	1,99 · 10 ⁻²²	3,38 · 10 ⁻²²	3,41 · 10 ⁻²²	3,38 · 10 ⁻²²	3,36 · 10 ⁻²²	3,41 · 10 ⁻²²	3,38 · 10 ⁻²²
3	2,43 · 10 ⁻²²	4,55 · 10 ⁻²²	4,63 · 10 ⁻²²	4,62 · 10 ⁻²²	4,59 · 10 ⁻²²	4,61 · 10 ⁻²²	4,638 · 10 ⁻²²
4	2,83 · 10 ⁻²²	5,79 · 10 ⁻²²	5,87 · 10 ⁻²²	5,86 · 10 ⁻²²	5,85 · 10 ⁻²²	5,85 · 10 ⁻²²	5,854 · 10 ⁻²²
5	3,16 · 10 ⁻²²	6,90 · 10 ⁻²²	6,95 · 10 ⁻²²	6,95 · 10 ⁻²²	6,9 · 10 ⁻²²	6,94 · 10 ⁻²²	6,986 · 10 ⁻²²
6	3,94 · 10 ⁻²²	7,61 · 10 ⁻²²	7,58 · 10 ⁻²²	7,64 · 10 ⁻²²	7,58 · 10 ⁻²²	7,58 · 10 ⁻²²	7,629 · 10 ⁻²²
7	3,21 · 10 ⁻²²	7,63 · 10 ⁻²²	7,66 · 10 ⁻²²	7,69 · 10 ⁻²²	7,64 · 10 ⁻²²	7,66 · 10 ⁻²²	7,691 · 10 ⁻²²
8	3,14 · 10 ⁻²²	6,99 · 10 ⁻²²	6,95 · 10 ⁻²²	6,98 · 10 ⁻²²	6,93 · 10 ⁻²²	6,93 · 10 ⁻²²	6,972 · 10 ⁻²²
9	2,67 · 10 ⁻²²	5,91 · 10 ⁻²²	5,9 · 10 ⁻²²	5,94 · 10 ⁻²²	5,93 · 10 ⁻²²	5,91 · 10 ⁻²²	5,936 · 10 ⁻²²
10	2,33 · 10 ⁻²²	4,74 · 10 ⁻²²	4,76 · 10 ⁻²²	4,79 · 10 ⁻²²	4,76 · 10 ⁻²²	4,76 · 10 ⁻²²	4,779 · 10 ⁻²²
11	1,56 · 10 ⁻²²	3,64 · 10 ⁻²²	3,71 · 10 ⁻²²	3,69 · 10 ⁻²²	3,67 · 10 ⁻²²	3,7 · 10 ⁻²²	3,68 · 10 ⁻²²
12	1,56 · 10 ⁻²²	2,65 · 10 ⁻²²	2,69 · 10 ⁻²²	2,67 · 10 ⁻²²	2,67 · 10 ⁻²²	2,68 · 10 ⁻²²	2,672 · 10 ⁻²²

Tab. B.9: Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK2 (n,n') Na.

Číslo vzorku	Experiment (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	Reference (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	BROND-3.1 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	CENDL-3.2 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	ENDF B-VIII.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JEFF-3.3 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JENDL-4.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)
1	7,40·10 ⁻²³	5,03·10 ⁻²²	4,99·10 ⁻²²	4,99·10 ⁻²²	5,04·10 ⁻²²	5,02·10 ⁻²²	4,997·10 ⁻²²
2	1,04·10 ⁻²²	6,21·10 ⁻²²	6,11·10 ⁻²²	6,12·10 ⁻²²	6,15·10 ⁻²²	6,1·10 ⁻²²	6,151·10 ⁻²²
3	1,10·10 ⁻²²	7,05·10 ⁻²²	6,99·10 ⁻²²	7·10 ⁻²²	7,07·10 ⁻²²	6,98·10 ⁻²²	7,022·10 ⁻²²
4	1,27·10 ⁻²²	7,80·10 ⁻²²	7,76·10 ⁻²²	7,78·10 ⁻²²	7,79·10 ⁻²²	7,76·10 ⁻²²	7,765·10 ⁻²²
5	1,38·10 ⁻²²	8,33·10 ⁻²²	8,2·10 ⁻²²	8,21·10 ⁻²²	8,27·10 ⁻²²	8,21·10 ⁻²²	8,238·10 ⁻²²
6	1,53·10 ⁻²²	8,68·10 ⁻²²	8,58·10 ⁻²²	8,67·10 ⁻²²	8,64·10 ⁻²²	8,6·10 ⁻²²	8,659·10 ⁻²²
7	1,47·10 ⁻²²	8,61·10 ⁻²²	8,52·10 ⁻²²	8,58·10 ⁻²²	8,6·10 ⁻²²	8,55·10 ⁻²²	8,562·10 ⁻²²
8	1,28·10 ⁻²²	8,34·10 ⁻²²	8,31·10 ⁻²²	8,3·10 ⁻²²	8,33·10 ⁻²²	8,32·10 ⁻²²	8,284·10 ⁻²²
9	1,11·10 ⁻²²	7,88·10 ⁻²²	7,83·10 ⁻²²	7,9·10 ⁻²²	7,9·10 ⁻²²	7,83·10 ⁻²²	7,869·10 ⁻²²
10	1,04·10 ⁻²²	7,14·10 ⁻²²	7,16·10 ⁻²²	7,11·10 ⁻²²	7,17·10 ⁻²²	7,15·10 ⁻²²	7,12·10 ⁻²²
11	8,70·10 ⁻²³	6,28·10 ⁻²²	6,3·10 ⁻²²	6,31·10 ⁻²²	6,32·10 ⁻²²	6,3·10 ⁻²²	6,279·10 ⁻²²
12	7,37·10 ⁻²³	5,34·10 ⁻²²	5,38·10 ⁻²²	5,38·10 ⁻²²	5,38·10 ⁻²²	5,4·10 ⁻²²	5,364·10 ⁻²²

Tab. B.10: Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK2 (n,γ) Na.

Číslo vzorku	Experiment (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	Reference (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	BROND-3.1 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	CENDL-3.2 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	ENDF B-VIII.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JEFF-3.3 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JENDL-4.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)
1	9,73·10 ⁻²⁴	9,74·10 ⁻²³	9,92·10 ⁻²³	9,88·10 ⁻²³	9,78·10 ⁻²³	1·10 ⁻²²	9,76·10 ⁻²³
2	1,28·10 ⁻²³	1,35·10 ⁻²²	1,35·10 ⁻²²	1,36·10 ⁻²²	1,35·10 ⁻²²	1,35·10 ⁻²²	1,353·10 ⁻²²
3	3,19·10 ⁻²³	1,65·10 ⁻²²	1,64·10 ⁻²²	1,63·10 ⁻²²	1,62·10 ⁻²²	1,65·10 ⁻²²	1,627·10 ⁻²²
4	7,68·10 ⁻²³	1,90·10 ⁻²²	1,92·10 ⁻²²	1,89·10 ⁻²²	1,87·10 ⁻²²	1,93·10 ⁻²²	1,897·10 ⁻²²
5	1,17·10 ⁻²²	2,07·10 ⁻²²	2,08·10 ⁻²²	2,06·10 ⁻²²	2,06·10 ⁻²²	2,08·10 ⁻²²	2,06·10 ⁻²²
6	1,58·10 ⁻²²	2,18·10 ⁻²²	2,19·10 ⁻²²	2,18·10 ⁻²²	2,19·10 ⁻²²	2,17·10 ⁻²²	2,161·10 ⁻²²
7	2,54·10 ⁻²²	2,18·10 ⁻²²	2,22·10 ⁻²²	2,26·10 ⁻²²	2,23·10 ⁻²²	2,23·10 ⁻²²	2,243·10 ⁻²²
8	1,74·10 ⁻²²	2,13·10 ⁻²²	2,13·10 ⁻²²	2,15·10 ⁻²²	2,14·10 ⁻²²	2,11·10 ⁻²²	2,15·10 ⁻²²
9	1,28·10 ⁻²²	1,97·10 ⁻²²	2,01·10 ⁻²²	2·10 ⁻²²	1,93·10 ⁻²²	1,99·10 ⁻²²	1,983·10 ⁻²²
10	9,24·10 ⁻²³	1,77·10 ⁻²²	1,77·10 ⁻²²	1,79·10 ⁻²²	1,76·10 ⁻²²	1,77·10 ⁻²²	1,753·10 ⁻²²
11	5,98·10 ⁻²³	1,51·10 ⁻²²	1,5·10 ⁻²²	1,54·10 ⁻²²	1,5·10 ⁻²²	1,5·10 ⁻²²	1,522·10 ⁻²²
12	1,35·10 ⁻²³	1,18·10 ⁻²²	1,17·10 ⁻²²	1,17·10 ⁻²²	1,17·10 ⁻²²	1,16·10 ⁻²²	1,165·10 ⁻²²

Tab. B.11: Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK3 (n,n') Na.

Číslo vzorku	Experiment (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	Reference (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	BROND-3.1 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	CENDL-3.2 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	ENDF B-VIII.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JEFF-3.3 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JENDL-4.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)
1	–	2,41·10 ⁻²²	2,4·10 ⁻²²	2,43·10 ⁻²²	2,42·10 ⁻²²	2,39·10 ⁻²²	2,41·10 ⁻²²
2	–	2,85·10 ⁻²²	2,89·10 ⁻²²	2,88·10 ⁻²²	2,89·10 ⁻²²	2,88·10 ⁻²²	2,853·10 ⁻²²
3	5,84·10 ⁻²³	3,26·10 ⁻²²	3,25·10 ⁻²²	3,26·10 ⁻²²	3,27·10 ⁻²²	3,23·10 ⁻²²	3,248·10 ⁻²²
4	1,24·10 ⁻²²	3,49·10 ⁻²²	3,48·10 ⁻²²	3,5·10 ⁻²²	3,53·10 ⁻²²	3,48·10 ⁻²²	3,5·10 ⁻²²
5	1,48·10 ⁻²²	3,68·10 ⁻²²	3,68·10 ⁻²²	3,66·10 ⁻²²	3,69·10 ⁻²²	3,7·10 ⁻²²	3,64·10 ⁻²²
6	2,09·10 ⁻²²	3,73·10 ⁻²²	3,74·10 ⁻²²	3,74·10 ⁻²²	3,77·10 ⁻²²	3,73·10 ⁻²²	3,734·10 ⁻²²
7	2,61·10 ⁻²²	3,74·10 ⁻²²	3,72·10 ⁻²²	3,72·10 ⁻²²	3,77·10 ⁻²²	3,72·10 ⁻²²	3,725·10 ⁻²²
8	2,45·10 ⁻²²	3,70·10 ⁻²²	3,66·10 ⁻²²	3,66·10 ⁻²²	3,66·10 ⁻²²	3,67·10 ⁻²²	3,669·10 ⁻²²
9	1,54·10 ⁻²²	3,54·10 ⁻²²	3,56·10 ⁻²²	3,58·10 ⁻²²	3,55·10 ⁻²²	3,56·10 ⁻²²	3,569·10 ⁻²²
10	1,25·10 ⁻²²	3,18·10 ⁻²²	3,17·10 ⁻²²	3,18·10 ⁻²²	3,16·10 ⁻²²	3,18·10 ⁻²²	3,184·10 ⁻²²
11	–	2,91·10 ⁻²²	2,9·10 ⁻²²	2,94·10 ⁻²²	2,94·10 ⁻²²	2,87·10 ⁻²²	2,925·10 ⁻²²
12	–	2,49·10 ⁻²²	2,43·10 ⁻²²	2,46·10 ⁻²²	2,46·10 ⁻²²	2,45·10 ⁻²²	2,459·10 ⁻²²

Tab. B.12: Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK3 (n,γ) Na.

Číslo vzorku	Experiment (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	Reference (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	BROND-3.1 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	CENDL-3.2 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	ENDF B-VIII.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JEFF-3.3 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JENDL-4.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)
1	–	5,94·10 ⁻²³	5,98·10 ⁻²³	6,14·10 ⁻²³	5,82·10 ⁻²³	5,79·10 ⁻²³	6·10 ⁻²³
2	–	8,24·10 ⁻²³	8,27·10 ⁻²³	8,16·10 ⁻²³	8,11·10 ⁻²³	8,2·10 ⁻²³	8,039·10 ⁻²³
3	1,43·10 ⁻²³	9,96·10 ⁻²³	1,02·10 ⁻²²	1,02·10 ⁻²²	9,98·10 ⁻²³	1,03·10 ⁻²²	1,008·10 ⁻²²
4	1,83·10 ⁻²³	1,14·10 ⁻²²	1,12·10 ⁻²²	1,14·10 ⁻²²	1,16·10 ⁻²²	1,12·10 ⁻²²	1,174·10 ⁻²²
5	2,09·10 ⁻²³	1,23·10 ⁻²²	1,23·10 ⁻²²	1,23·10 ⁻²²	1,24·10 ⁻²²	1,24·10 ⁻²²	1,25·10 ⁻²²
6	3,25·10 ⁻²³	1,26·10 ⁻²²	1,26·10 ⁻²²	1,3·10 ⁻²²	1,29·10 ⁻²²	1,26·10 ⁻²²	1,297·10 ⁻²²
7	4,54·10 ⁻²³	1,27·10 ⁻²²	1,28·10 ⁻²²	1,26·10 ⁻²²	1,28·10 ⁻²²	1,28·10 ⁻²²	1,291·10 ⁻²²
8	3,26·10 ⁻²³	1,22·10 ⁻²²	1,25·10 ⁻²²	1,23·10 ⁻²²	1,25·10 ⁻²²	1,23·10 ⁻²²	1,224·10 ⁻²²
9	2,85·10 ⁻²³	1,14·10 ⁻²²	1,14·10 ⁻²²	1,12·10 ⁻²²	1,15·10 ⁻²²	1,12·10 ⁻²²	1,13·10 ⁻²²
10	1,92·10 ⁻²³	1,00·10 ⁻²²	1,01·10 ⁻²²	1,01·10 ⁻²²	1,01·10 ⁻²²	1,01·10 ⁻²²	1,016·10 ⁻²²
11	–	8,23·10 ⁻²³	8,36·10 ⁻²³	8,31·10 ⁻²³	8,27·10 ⁻²³	8,31·10 ⁻²³	8,14·10 ⁻²³
12	–	5,96·10 ⁻²³	6,03·10 ⁻²³	5,94·10 ⁻²³	5,83·10 ⁻²³	5,92·10 ⁻²³	5,885·10 ⁻²³

Tab. B.13: Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK1 (n,n') NaCl.

Číslo vzorku	Experiment (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	Reference (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	BROND-3.1 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	CENDL-3.2 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	ENDF B-VIII.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JEFF-3.3 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JENDL-4.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)
1	7,37·10 ⁻²²	1,56·10 ⁻²¹	1,54·10 ⁻²¹	1,54·10 ⁻²¹	1,53·10 ⁻²¹	1,53·10 ⁻²¹	1,55·10 ⁻²¹
2	1,56·10 ⁻²¹	2,17·10 ⁻²¹	2,15·10 ⁻²¹	2,15·10 ⁻²¹	2,14·10 ⁻²¹	2,13·10 ⁻²¹	2,17·10 ⁻²¹
3	1,63·10 ⁻²¹	2,89·10 ⁻²¹	2,86·10 ⁻²¹	2,86·10 ⁻²¹	2,85·10 ⁻²¹	2,84·10 ⁻²¹	2,88·10 ⁻²¹
4	2,42·10 ⁻²¹	3,71·10 ⁻²¹	3,68·10 ⁻²¹	3,68·10 ⁻²¹	3,66·10 ⁻²¹	3,65·10 ⁻²¹	3,7·10 ⁻²¹
5	2,83·10 ⁻²¹	4,47·10 ⁻²¹	4,43·10 ⁻²¹	4,43·10 ⁻²¹	4,41·10 ⁻²¹	4,41·10 ⁻²¹	4,46·10 ⁻²¹
6	3,05·10 ⁻²¹	4,93·10 ⁻²¹	4,91·10 ⁻²¹	4,91·10 ⁻²¹	4,87·10 ⁻²¹	4,86·10 ⁻²¹	4,94·10 ⁻²¹
7	2,97·10 ⁻²¹	4,96·10 ⁻²¹	4,95·10 ⁻²¹	4,95·10 ⁻²¹	4,92·10 ⁻²¹	4,89·10 ⁻²¹	4,97·10 ⁻²¹
8	2,52·10 ⁻²¹	4,48·10 ⁻²¹	4,45·10 ⁻²¹	4,45·10 ⁻²¹	4,43·10 ⁻²¹	4,41·10 ⁻²¹	4,47·10 ⁻²¹
9	2,09·10 ⁻²¹	3,73·10 ⁻²¹	3,70·10 ⁻²¹	3,7·10 ⁻²¹	3,69·10 ⁻²¹	3,67·10 ⁻²¹	3,73·10 ⁻²¹
10	1,57·10 ⁻²¹	2,92·10 ⁻²¹	2,91·10 ⁻²¹	2,91·10 ⁻²¹	2,9·10 ⁻²¹	2,88·10 ⁻²¹	2,93·10 ⁻²¹
11	1,15·10 ⁻²¹	2,22·10 ⁻²¹	2,19·10 ⁻²¹	2,19·10 ⁻²¹	2,18·10 ⁻²¹	2,17·10 ⁻²¹	2,22·10 ⁻²¹
12	9,79·10 ⁻²²	1,65·10 ⁻²¹	1,62·10 ⁻²¹	1,62·10 ⁻²¹	1,62·10 ⁻²¹	1,61·10 ⁻²¹	1,64·10 ⁻²¹

Tab. B.14: Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK1 (n,γ) NaCl.

Číslo vzorku	Experiment (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	Reference (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	BROND-3.1 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	CENDL-3.2 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	ENDF B-VIII.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JEFF-3.3 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JENDL-4.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)
1	7,37·10 ⁻²²	1,56·10 ⁻²¹	1,53·10 ⁻²¹	1,54·10 ⁻²¹	1,53·10 ⁻²¹	1,53·10 ⁻²¹	1,55·10 ⁻²¹
2	1,56·10 ⁻²¹	2,17·10 ⁻²¹	2,13·10 ⁻²¹	2,15·10 ⁻²¹	2,14·10 ⁻²¹	2,13·10 ⁻²¹	2,17·10 ⁻²¹
3	1,63·10 ⁻²¹	2,89·10 ⁻²¹	2,83·10 ⁻²¹	2,86·10 ⁻²¹	2,85·10 ⁻²¹	2,84·10 ⁻²¹	2,88·10 ⁻²¹
4	2,42·10 ⁻²¹	3,71·10 ⁻²¹	3,65·10 ⁻²¹	3,68·10 ⁻²¹	3,66·10 ⁻²¹	3,65·10 ⁻²¹	3,70·10 ⁻²¹
5	2,83·10 ⁻²¹	4,47·10 ⁻²¹	4,41·10 ⁻²¹	4,43·10 ⁻²¹	4,41·10 ⁻²¹	4,41·10 ⁻²¹	4,46·10 ⁻²¹
6	3,05·10 ⁻²¹	4,93·10 ⁻²¹	4,86·10 ⁻²¹	4,91·10 ⁻²¹	4,87·10 ⁻²¹	4,86·10 ⁻²¹	4,94·10 ⁻²¹
7	2,97·10 ⁻²¹	4,96·10 ⁻²¹	4,89·10 ⁻²¹	4,95·10 ⁻²¹	4,92·10 ⁻²¹	4,89·10 ⁻²¹	4,97·10 ⁻²¹
8	2,52·10 ⁻²¹	4,48·10 ⁻²¹	4,41·10 ⁻²¹	4,45·10 ⁻²¹	4,43·10 ⁻²¹	4,41·10 ⁻²¹	4,47·10 ⁻²¹
9	2,09·10 ⁻²¹	3,73·10 ⁻²¹	3,66·10 ⁻²¹	3,70·10 ⁻²¹	3,69·10 ⁻²¹	3,67·10 ⁻²¹	3,73·10 ⁻²¹
10	1,57·10 ⁻²¹	2,92·10 ⁻²¹	2,88·10 ⁻²¹	2,91·10 ⁻²¹	2,90·10 ⁻²¹	2,88·10 ⁻²¹	2,93·10 ⁻²¹
11	1,15·10 ⁻²¹	2,22·10 ⁻²¹	2,17·10 ⁻²¹	2,19·10 ⁻²¹	2,18·10 ⁻²¹	2,17·10 ⁻²¹	2,22·10 ⁻²¹
12	9,79·10 ⁻²²	1,65·10 ⁻²¹	1,60·10 ⁻²¹	1,62·10 ⁻²¹	1,62·10 ⁻²¹	1,61·10 ⁻²¹	1,64·10 ⁻²¹

Tab. B.15: Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK2 (n,n') NaCl.

Číslo vzorku	Experiment (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	Reference (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	BROND-3.1 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	CENDL-3.2 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	ENDF B-VIII.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JEFF-3.3 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JENDL-4.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)
1	7,40·10 ⁻²³	5,03·10 ⁻²²	4,88·10 ⁻²²	4,83·10 ⁻²²	4,93·10 ⁻²²	4,89·10 ⁻²²	5,04·10 ⁻²²
2	1,04·10 ⁻²²	6,21·10 ⁻²²	5,95·10 ⁻²²	6·10 ⁻²²	6,02·10 ⁻²²	5,97·10 ⁻²²	6,146·10 ⁻²²
3	1,10·10 ⁻²²	7,05·10 ⁻²²	6,83·10 ⁻²²	6,91·10 ⁻²²	6,9·10 ⁻²²	6,83·10 ⁻²²	7,019·10 ⁻²²
4	1,27·10 ⁻²²	7,80·10 ⁻²²	7,57·10 ⁻²²	7,58·10 ⁻²²	7,61·10 ⁻²²	7,6·10 ⁻²²	7,69·10 ⁻²²
5	1,38·10 ⁻²²	8,33·10 ⁻²²	8,06·10 ⁻²²	8,16·10 ⁻²²	8,06·10 ⁻²²	8,05·10 ⁻²²	8,215·10 ⁻²²
6	1,53·10 ⁻²²	8,68·10 ⁻²²	8,4·10 ⁻²²	8,42·10 ⁻²²	8,39·10 ⁻²²	8,4·10 ⁻²²	8,605·10 ⁻²²
7	1,47·10 ⁻²²	8,61·10 ⁻²²	8,3·10 ⁻²²	8,47·10 ⁻²²	8,36·10 ⁻²²	8,33·10 ⁻²²	8,588·10 ⁻²²
8	1,28·10 ⁻²²	8,34·10 ⁻²²	8,16·10 ⁻²²	8,22·10 ⁻²²	8,19·10 ⁻²²	8,16·10 ⁻²²	8,328·10 ⁻²²
9	1,11·10 ⁻²²	7,88·10 ⁻²²	7,66·10 ⁻²²	7,71·10 ⁻²²	7,73·10 ⁻²²	7,68·10 ⁻²²	7,848·10 ⁻²²
10	1,04·10 ⁻²²	7,14·10 ⁻²²	6,99·10 ⁻²²	7,02·10 ⁻²²	7,05·10 ⁻²²	6,97·10 ⁻²²	7,139·10 ⁻²²
11	8,70·10 ⁻²³	6,28·10 ⁻²²	6,14·10 ⁻²²	6,18·10 ⁻²²	6,16·10 ⁻²²	6,14·10 ⁻²²	6,272·10 ⁻²²
12	7,37·10 ⁻²³	5,34·10 ⁻²²	5,23·10 ⁻²²	5,24·10 ⁻²²	5,3·10 ⁻²²	5,24·10 ⁻²²	5,366·10 ⁻²²

Tab. B.16: Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK2 (n,γ) NaCl.

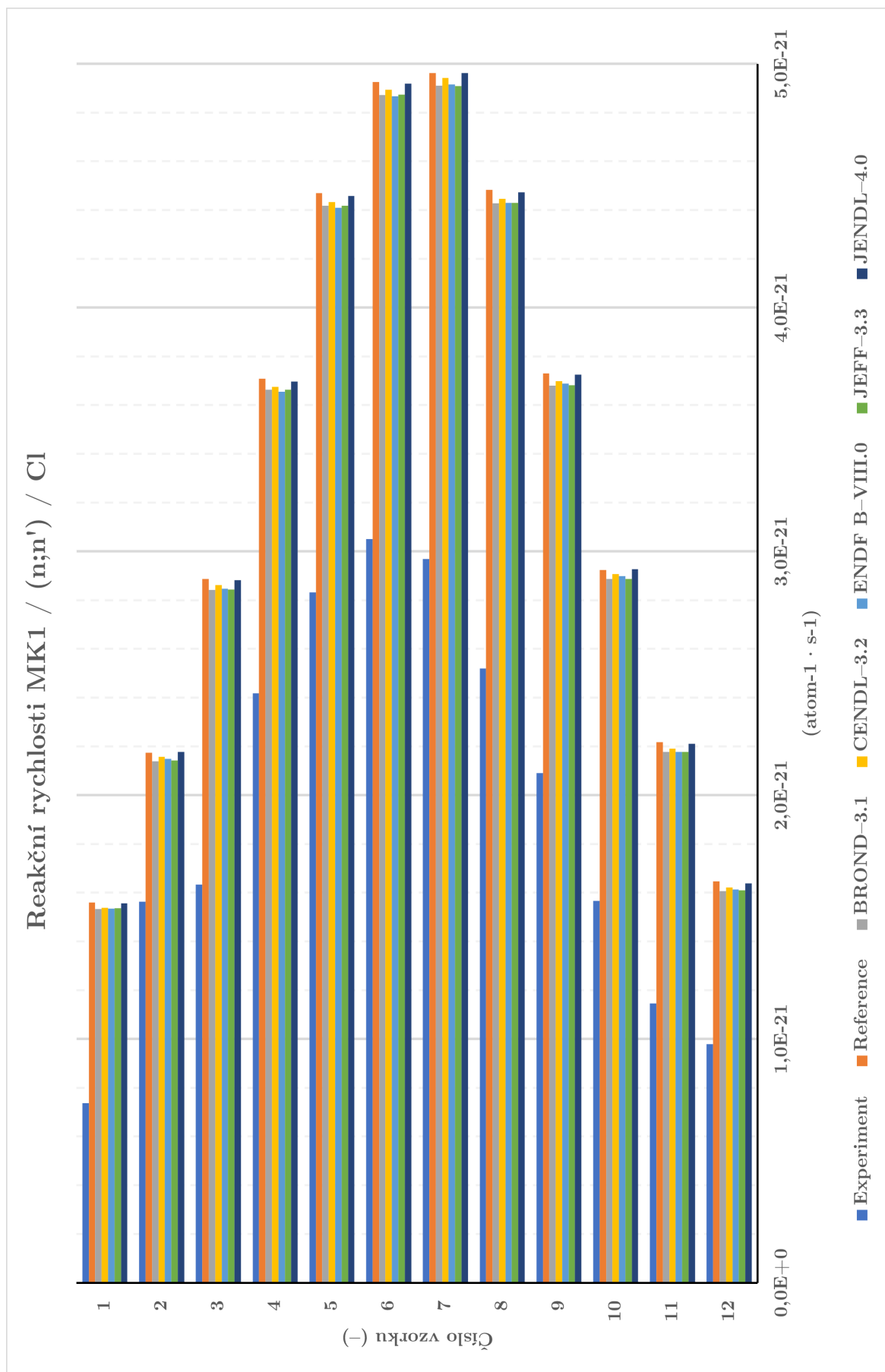
Číslo vzorku	Experiment (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	Reference (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	BROND-3.1 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	CENDL-3.2 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	ENDF B-VIII.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JEFF-3.3 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JENDL-4.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)
1	9,73·10 ⁻²⁴	9,74·10 ⁻²³	9,64·10 ⁻²³	9,46·10 ⁻²³	9,67·10 ⁻²³	9,7·10 ⁻²³	9,085·10 ⁻²³
2	1,28·10 ⁻²³	1,35·10 ⁻²²	1,35·10 ⁻²²	1,34·10 ⁻²²	1,36·10 ⁻²²	1,34·10 ⁻²²	1,3·10 ⁻²²
3	3,19·10 ⁻²³	1,65·10 ⁻²²	1,62·10 ⁻²²	1,6·10 ⁻²²	1,62·10 ⁻²²	1,61·10 ⁻²²	1,56·10 ⁻²²
4	7,68·10 ⁻²³	1,90·10 ⁻²²	1,89·10 ⁻²²	1,84·10 ⁻²²	1,85·10 ⁻²²	1,87·10 ⁻²²	1,791·10 ⁻²²
5	1,17·10 ⁻²²	2,07·10 ⁻²²	2,01·10 ⁻²²	2,02·10 ⁻²²	2·10 ⁻²²	2,02·10 ⁻²²	1,957·10 ⁻²²
6	1,58·10 ⁻²²	2,18·10 ⁻²²	2,08·10 ⁻²²	2,09·10 ⁻²²	2,13·10 ⁻²²	2,1·10 ⁻²²	2,027·10 ⁻²²
7	2,54·10 ⁻²²	2,18·10 ⁻²²	2,13·10 ⁻²²	2,14·10 ⁻²²	2,13·10 ⁻²²	2,13·10 ⁻²²	2,089·10 ⁻²²
8	1,74·10 ⁻²²	2,13·10 ⁻²²	2,09·10 ⁻²²	2,1·10 ⁻²²	2,04·10 ⁻²²	2,07·10 ⁻²²	2,031·10 ⁻²²
9	1,28·10 ⁻²²	1,97·10 ⁻²²	1,91·10 ⁻²²	1,93·10 ⁻²²	1,93·10 ⁻²²	1,91·10 ⁻²²	1,856·10 ⁻²²
10	9,24·10 ⁻²³	1,77·10 ⁻²²	1,73·10 ⁻²²	1,73·10 ⁻²²	1,71·10 ⁻²²	1,73·10 ⁻²²	1,698·10 ⁻²²
11	5,98·10 ⁻²³	1,51·10 ⁻²²	1,48·10 ⁻²²	1,47·10 ⁻²²	1,47·10 ⁻²²	1,5·10 ⁻²²	1,418·10 ⁻²²
12	1,35·10 ⁻²³	1,18·10 ⁻²²	1,15·10 ⁻²²	1,19·10 ⁻²²	1,17·10 ⁻²²	1,16·10 ⁻²²	1,125·10 ⁻²²

Tab. B.17: Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK3 (n,n') NaCl.

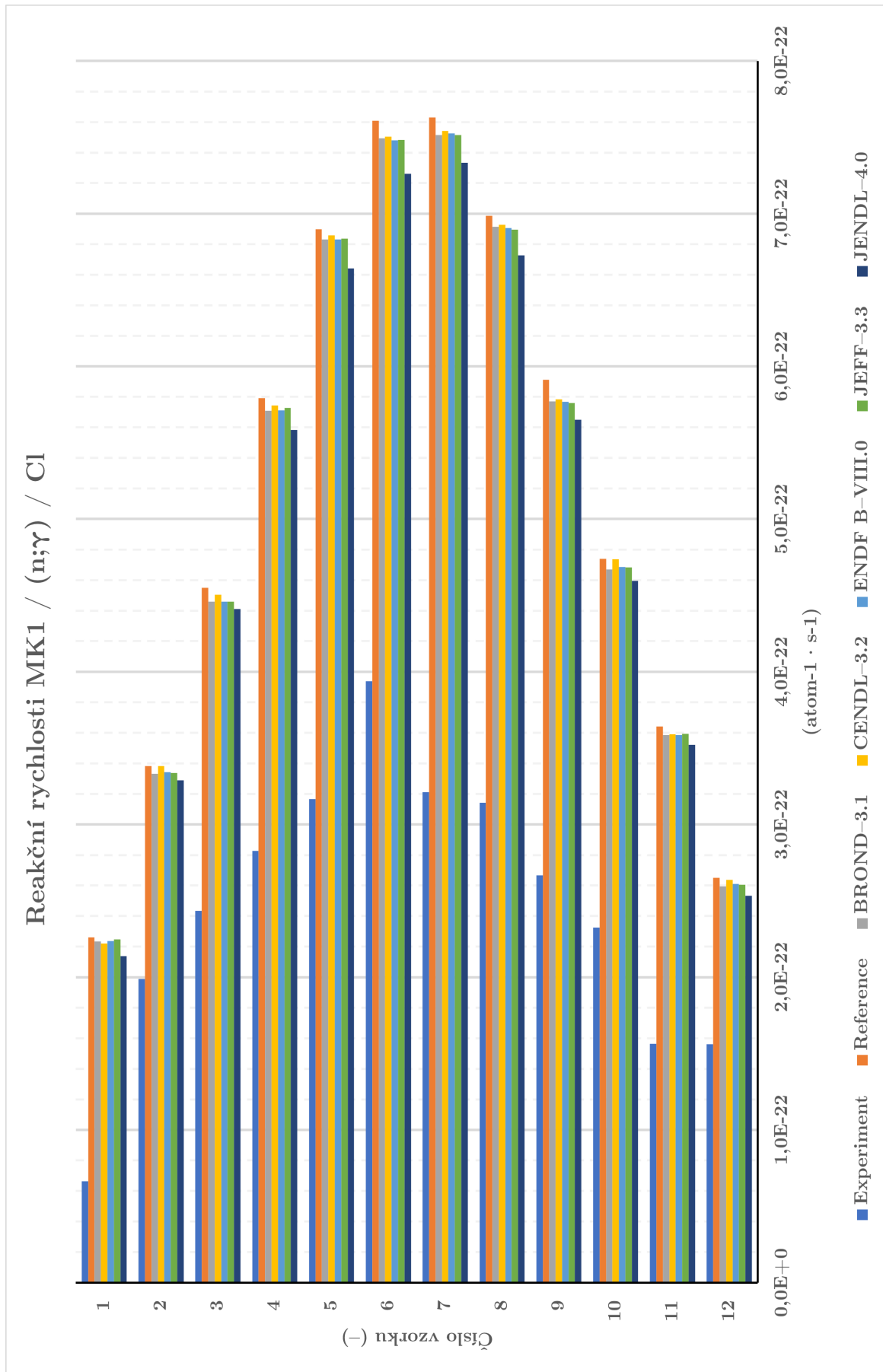
Číslo vzorku	Experiment (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	Reference (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	BROND-3.1 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	CENDL-3.2 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	ENDF B-VIII.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JEFF-3.3 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JENDL-4.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)
1	–	2,41·10 ⁻²²	2,31·10 ⁻²²	2,33·10 ⁻²²	2,31·10 ⁻²²	2,31·10 ⁻²²	2,369·10 ⁻²²
2	–	2,85·10 ⁻²²	2,74·10 ⁻²²	2,75·10 ⁻²²	2,74·10 ⁻²²	2,76·10 ⁻²²	2,809·10 ⁻²²
3	5,84·10 ⁻²³	3,26·10 ⁻²²	3,17·10 ⁻²²	3,14·10 ⁻²²	3,17·10 ⁻²²	3,18·10 ⁻²²	3,216·10 ⁻²²
4	1,24·10 ⁻²²	3,49·10 ⁻²²	3,39·10 ⁻²²	3,43·10 ⁻²²	3,42·10 ⁻²²	3,4·10 ⁻²²	3,517·10 ⁻²²
5	1,48·10 ⁻²²	3,68·10 ⁻²²	3,56·10 ⁻²²	3,56·10 ⁻²²	3,52·10 ⁻²²	3,56·10 ⁻²²	3,636·10 ⁻²²
6	2,09·10 ⁻²²	3,73·10 ⁻²²	3,63·10 ⁻²²	3,63·10 ⁻²²	3,66·10 ⁻²²	3,63·10 ⁻²²	3,718·10 ⁻²²
7	2,61·10 ⁻²²	3,74·10 ⁻²²	3,63·10 ⁻²²	3,62·10 ⁻²²	3,67·10 ⁻²²	3,63·10 ⁻²²	3,725·10 ⁻²²
8	2,45·10 ⁻²²	3,70·10 ⁻²²	3,58·10 ⁻²²	3,59·10 ⁻²²	3,6·10 ⁻²²	3,59·10 ⁻²²	3,715·10 ⁻²²
9	1,54·10 ⁻²²	3,54·10 ⁻²²	3,41·10 ⁻²²	3,47·10 ⁻²²	3,45·10 ⁻²²	3,43·10 ⁻²²	3,532·10 ⁻²²
10	1,25·10 ⁻²²	3,18·10 ⁻²²	3,1·10 ⁻²²	3,15·10 ⁻²²	3,14·10 ⁻²²	3,11·10 ⁻²²	3,238·10 ⁻²²
11	–	2,91·10 ⁻²²	2,8·10 ⁻²²	2,82·10 ⁻²²	2,86·10 ⁻²²	2,79·10 ⁻²²	2,94·10 ⁻²²
12	–	2,49·10 ⁻²²	2,36·10 ⁻²²	2,39·10 ⁻²²	2,36·10 ⁻²²	2,38·10 ⁻²²	2,445·10 ⁻²²

Tab. B.18: Reakční rychlosti z experimentu a výpočtu pro MK3 (n,γ) NaCl.

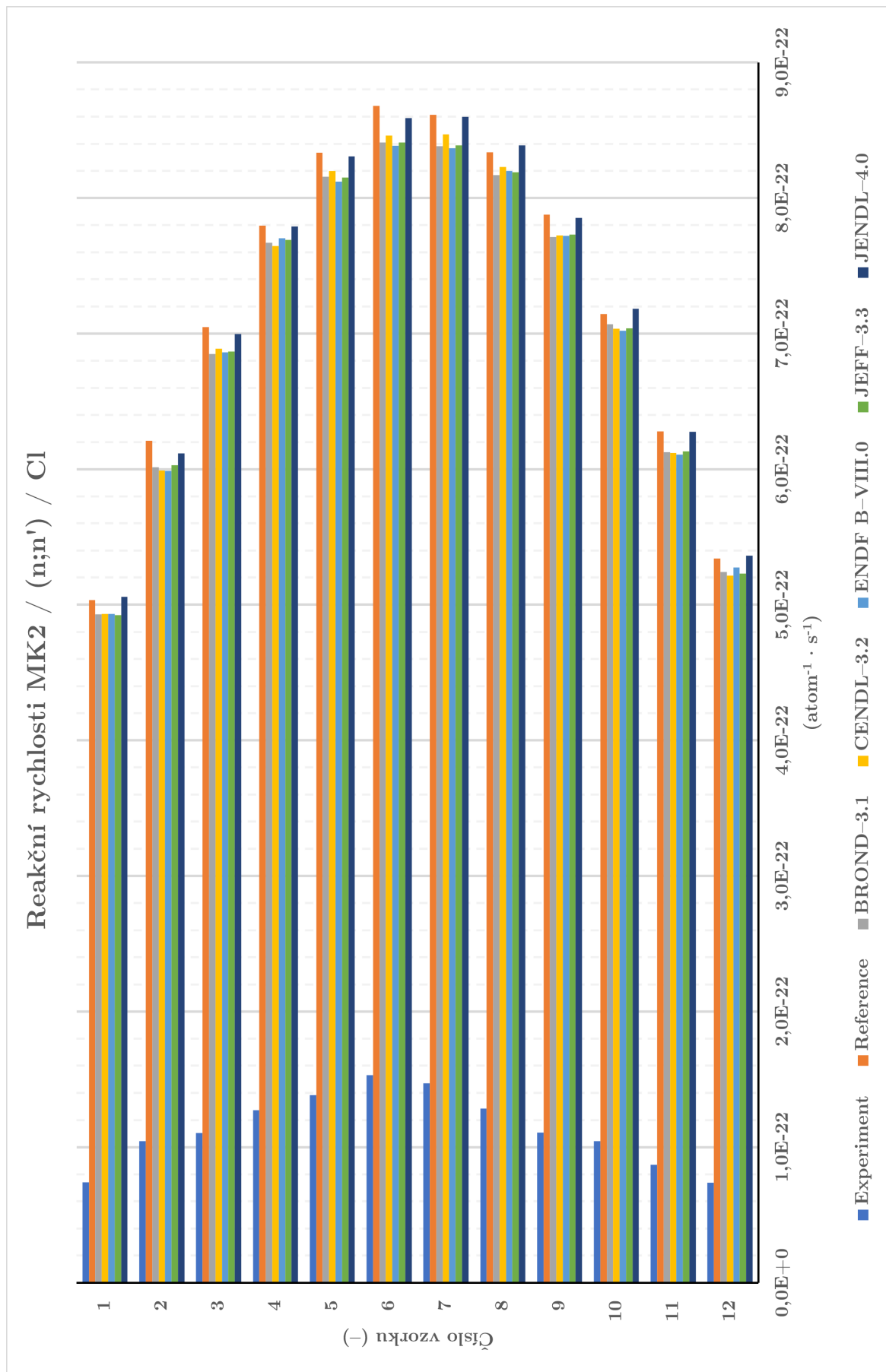
Číslo vzorku	Experiment (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	Reference (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	BROND-3.1 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	CENDL-3.2 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	ENDF B-VIII.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JEFF-3.3 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)	JENDL-4.0 (atom ⁻¹ ·s ⁻¹)
1	–	5,94·10 ⁻²³	5,68·10 ⁻²³	5,82·10 ⁻²³	5,91·10 ⁻²³	5,74·10 ⁻²³	5,334·10 ⁻²³
2	–	8,24·10 ⁻²³	8,01·10 ⁻²³	8,2·10 ⁻²³	7,97·10 ⁻²³	7,97·10 ⁻²³	7,637·10 ⁻²³
3	1,43·10 ⁻²³	9,96·10 ⁻²³	9,77·10 ⁻²³	9,78·10 ⁻²³	9,49·10 ⁻²³	9,74·10 ⁻²³	9,681·10 ⁻²³
4	1,83·10 ⁻²³	1,14·10 ⁻²²	1,11·10 ⁻²²	1,12·10 ⁻²²	1,12·10 ⁻²²	1,11·10 ⁻²²	1,067·10 ⁻²²
5	2,09·10 ⁻²³	1,23·10 ⁻²²	1,2·10 ⁻²²	1,2·10 ⁻²²	1,19·10 ⁻²²	1,21·10 ⁻²²	1,158·10 ⁻²²
6	3,25·10 ⁻²³	1,26·10 ⁻²²	1,18·10 ⁻²²	1,23·10 ⁻²²	1,23·10 ⁻²²	1,2·10 ⁻²²	1,207·10 ⁻²²
7	4,54·10 ⁻²³	1,27·10 ⁻²²	1,28·10 ⁻²²	1,25·10 ⁻²²	1,25·10 ⁻²²	1,27·10 ⁻²²	1,222·10 ⁻²²
8	3,26·10 ⁻²³	1,22·10 ⁻²²	1,18·10 ⁻²²	1,21·10 ⁻²²	1,22·10 ⁻²²	1,2·10 ⁻²²	1,168·10 ⁻²²
9	2,85·10 ⁻²³	1,14·10 ⁻²²	1,11·10 ⁻²²	1,12·10 ⁻²²	1,1·10 ⁻²²	1,12·10 ⁻²²	1,126·10 ⁻²²
10	1,92·10 ⁻²³	1,00·10 ⁻²²	9,9·10 ⁻²³	1·10 ⁻²²	1·10 ⁻²²	9,8·10 ⁻²³	9,585·10 ⁻²³
11	–	8,23·10 ⁻²³	8,15·10 ⁻²³	8,17·10 ⁻²³	7,71·10 ⁻²³	7,92·10 ⁻²³	7,823·10 ⁻²³
12	–	5,96·10 ⁻²³	5,91·10 ⁻²³	6·10 ⁻²³	5,79·10 ⁻²³	5,83·10 ⁻²³	5,455·10 ⁻²³



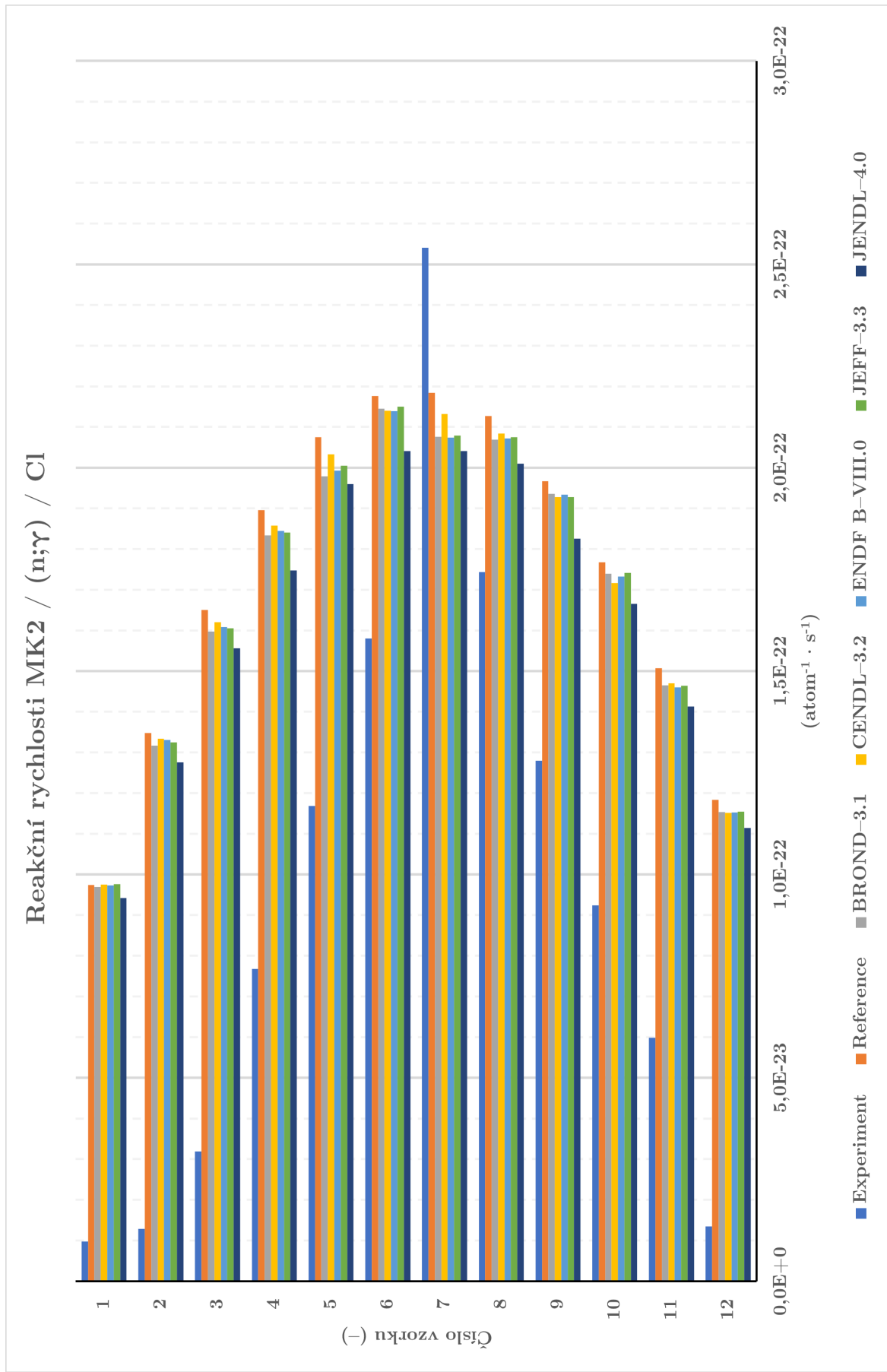
Obr. B.1: Porovnání reakčních rychlostí MK1 Cl (n,n').



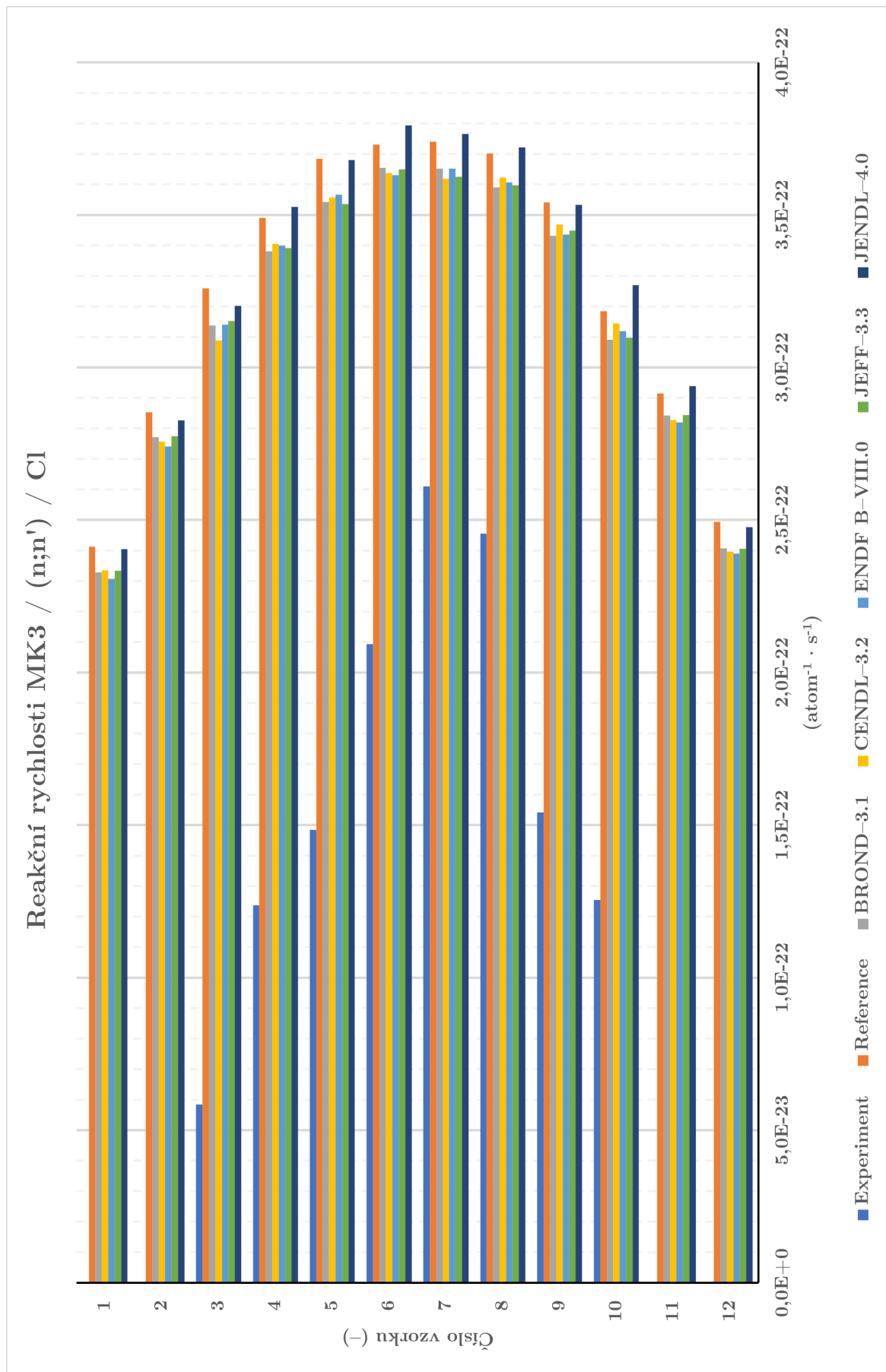
Obr. B.2: Porovnání reakčních rychlostí MK1 Cl (n,γ).



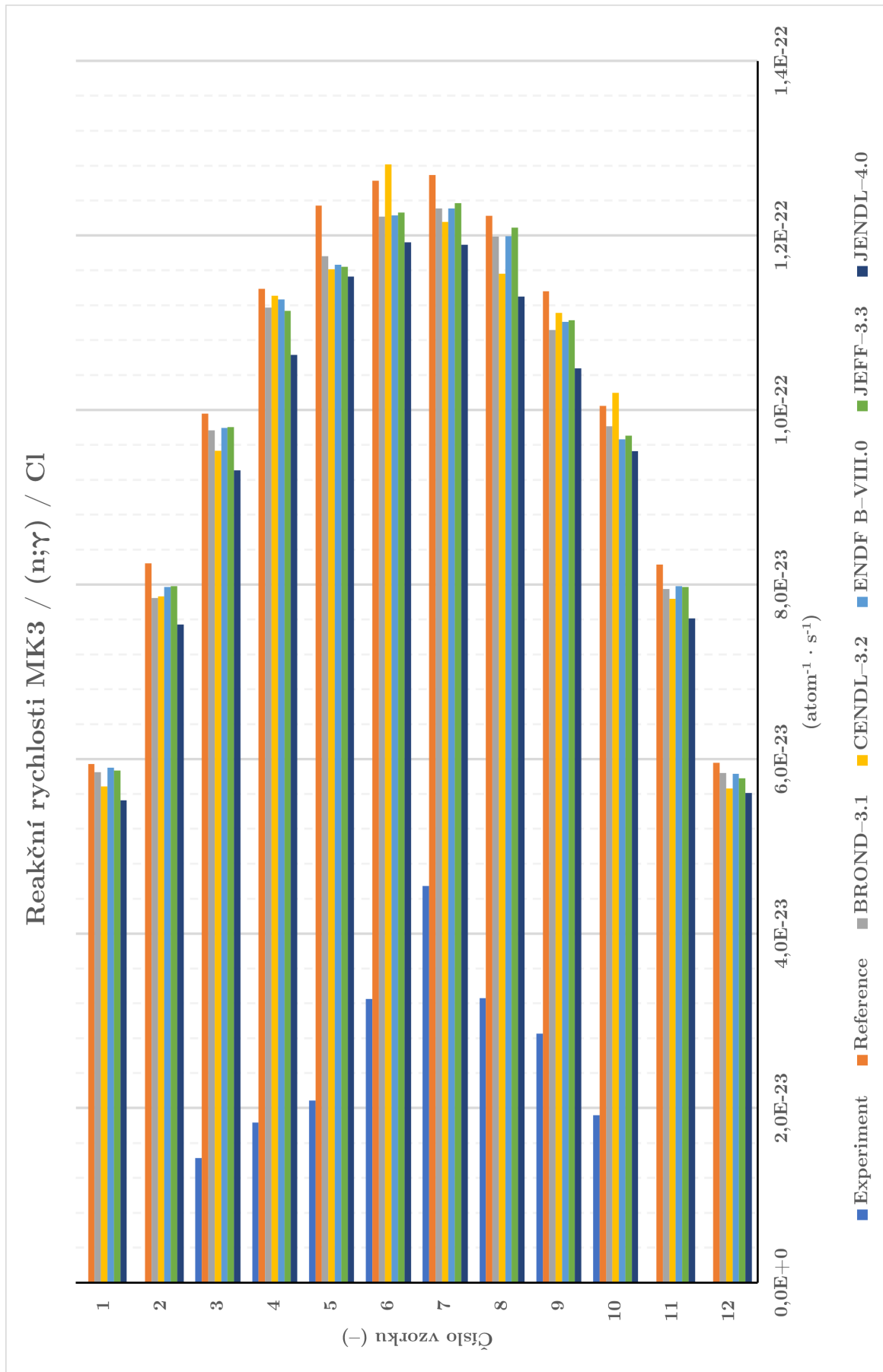
Obr. B.3: Porovnání reakčních rychlostí MK2 Cl (n,n').



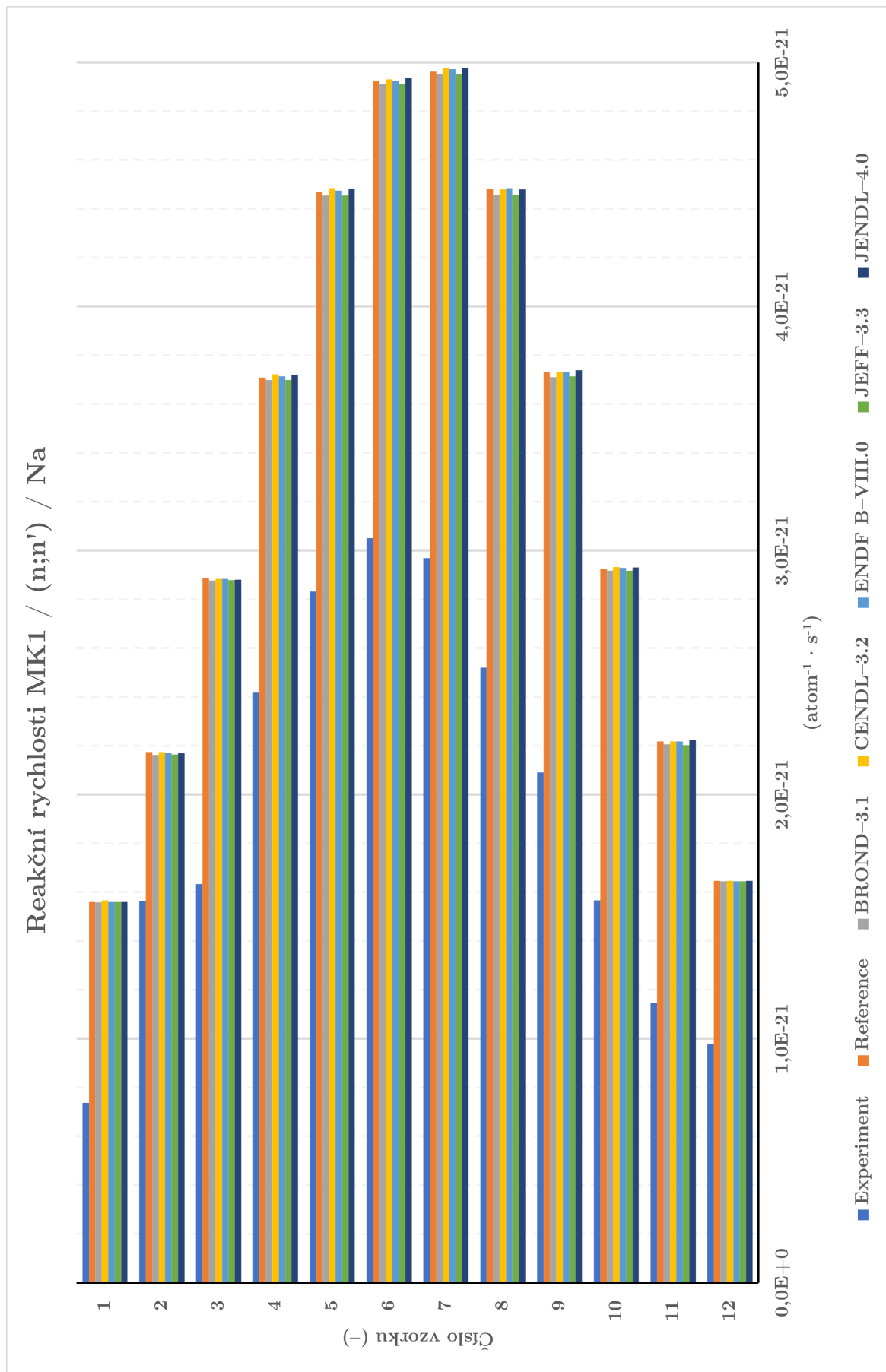
Obr. B.4: Porovnání reakčních rychlostí MK2 Cl (n,γ).



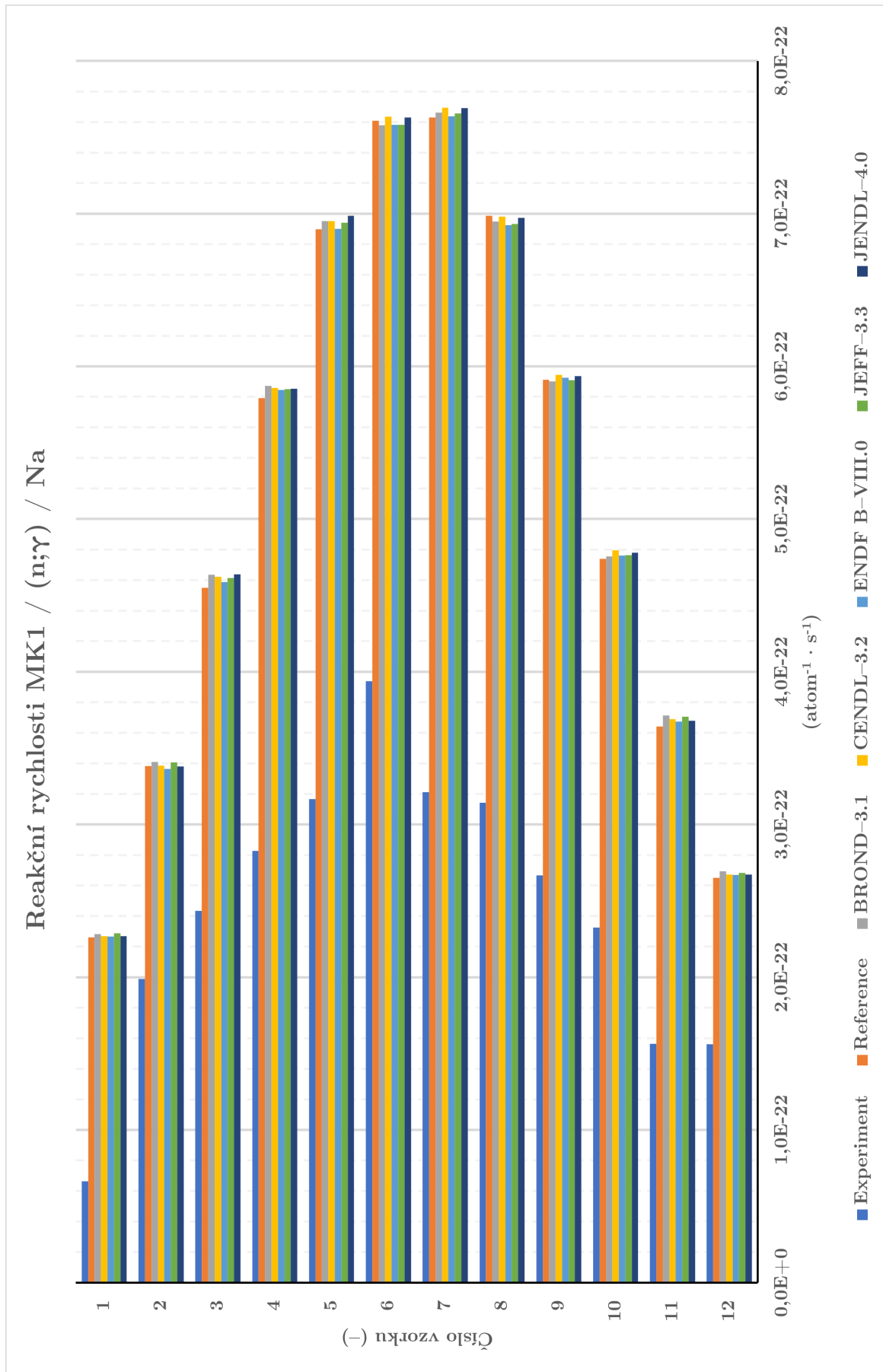
Obr. B.5: Porovnání reakčních rychlostí MK3 Cl (n,n').



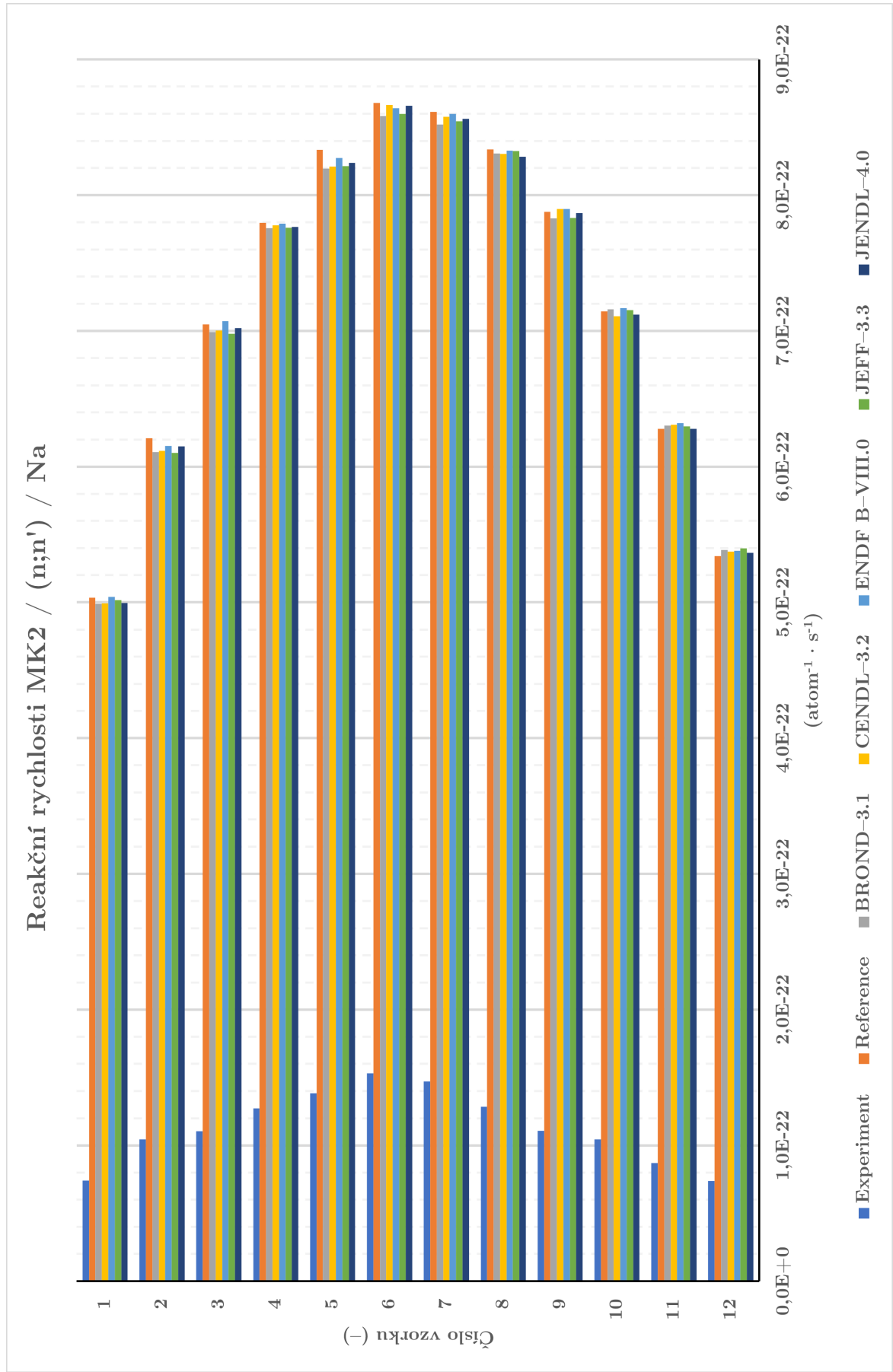
Obr. B.6: Porovnání reakčních rychlostí MK3 Cl (n,γ).



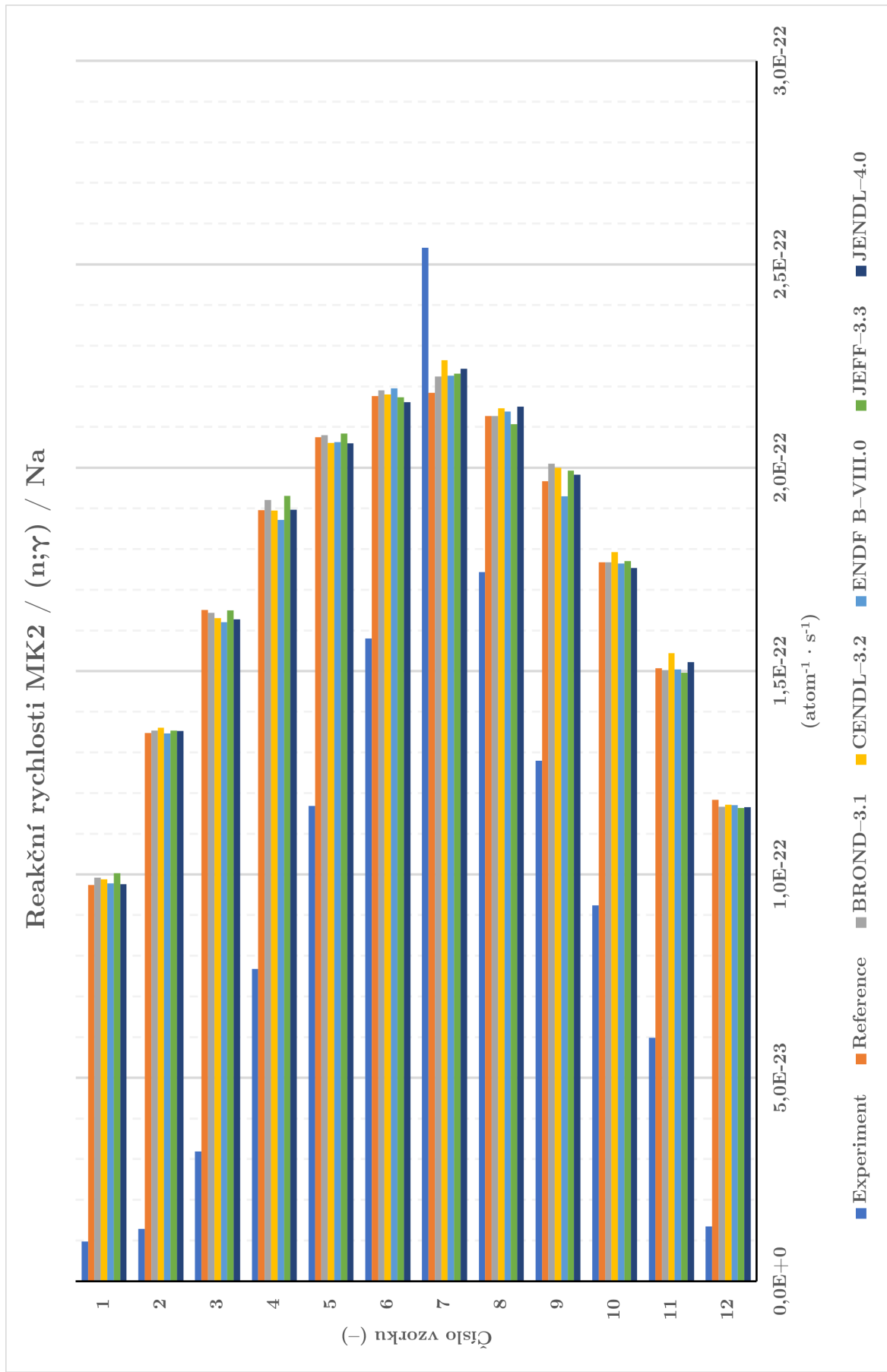
Obr. B.7: Porovnání reakčních rychlostí MK1 Na (n,n').



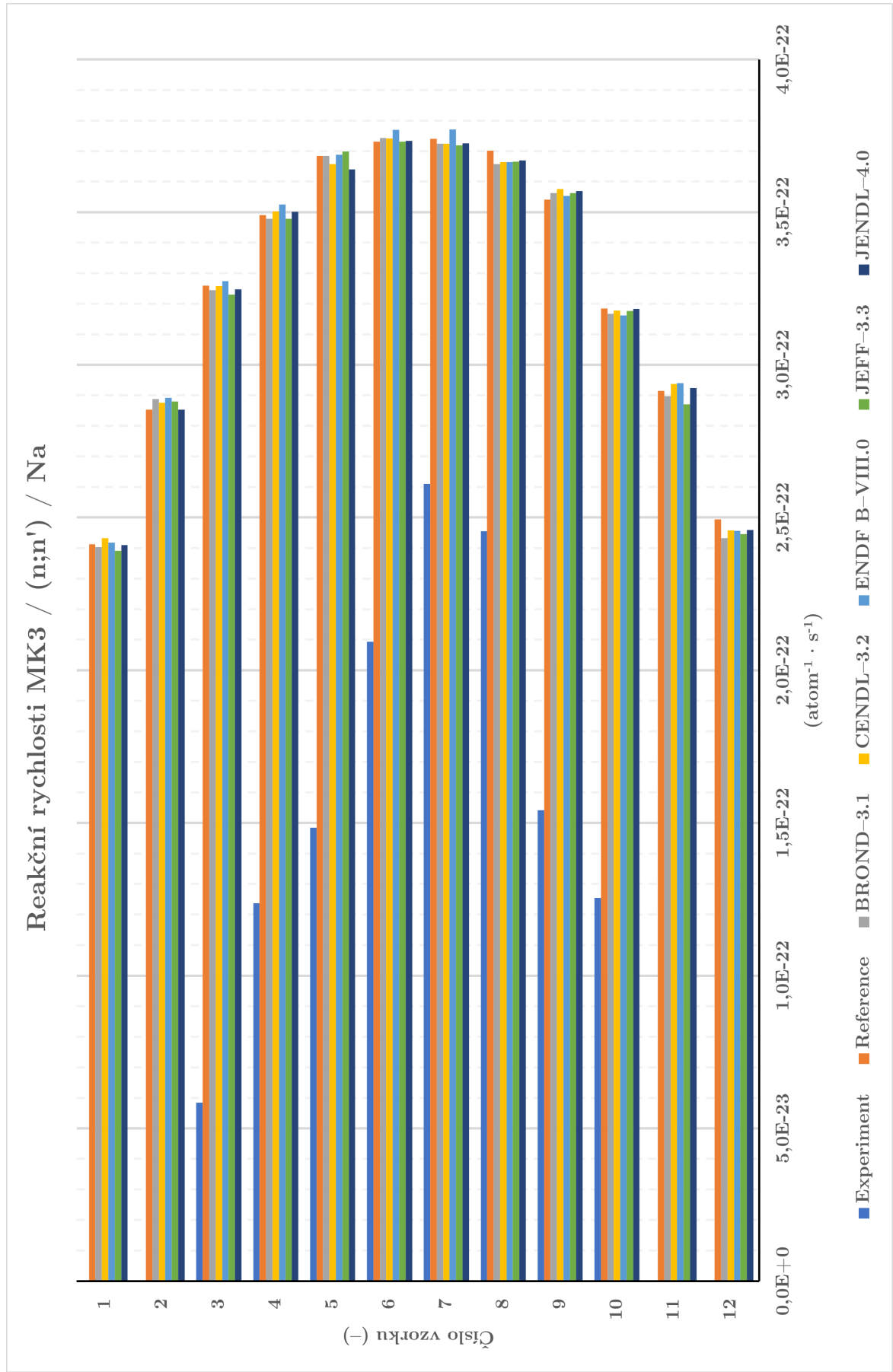
Obr. B.8: Porovnání reakčních rychlostí MK1 Na (n,γ).



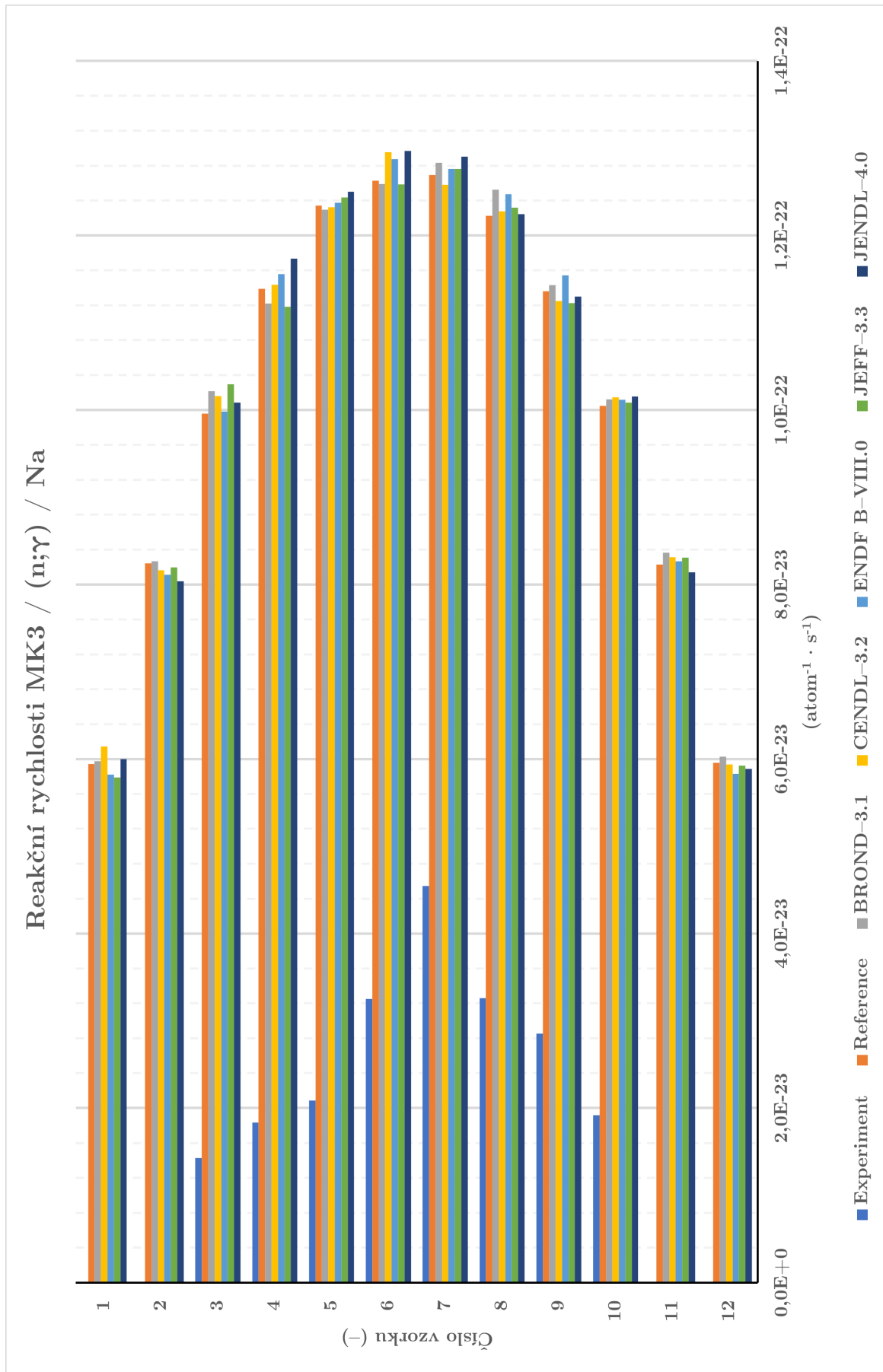
Obr. B.9: Porovnání reakčních rychlostí MK2 Na (n,n').



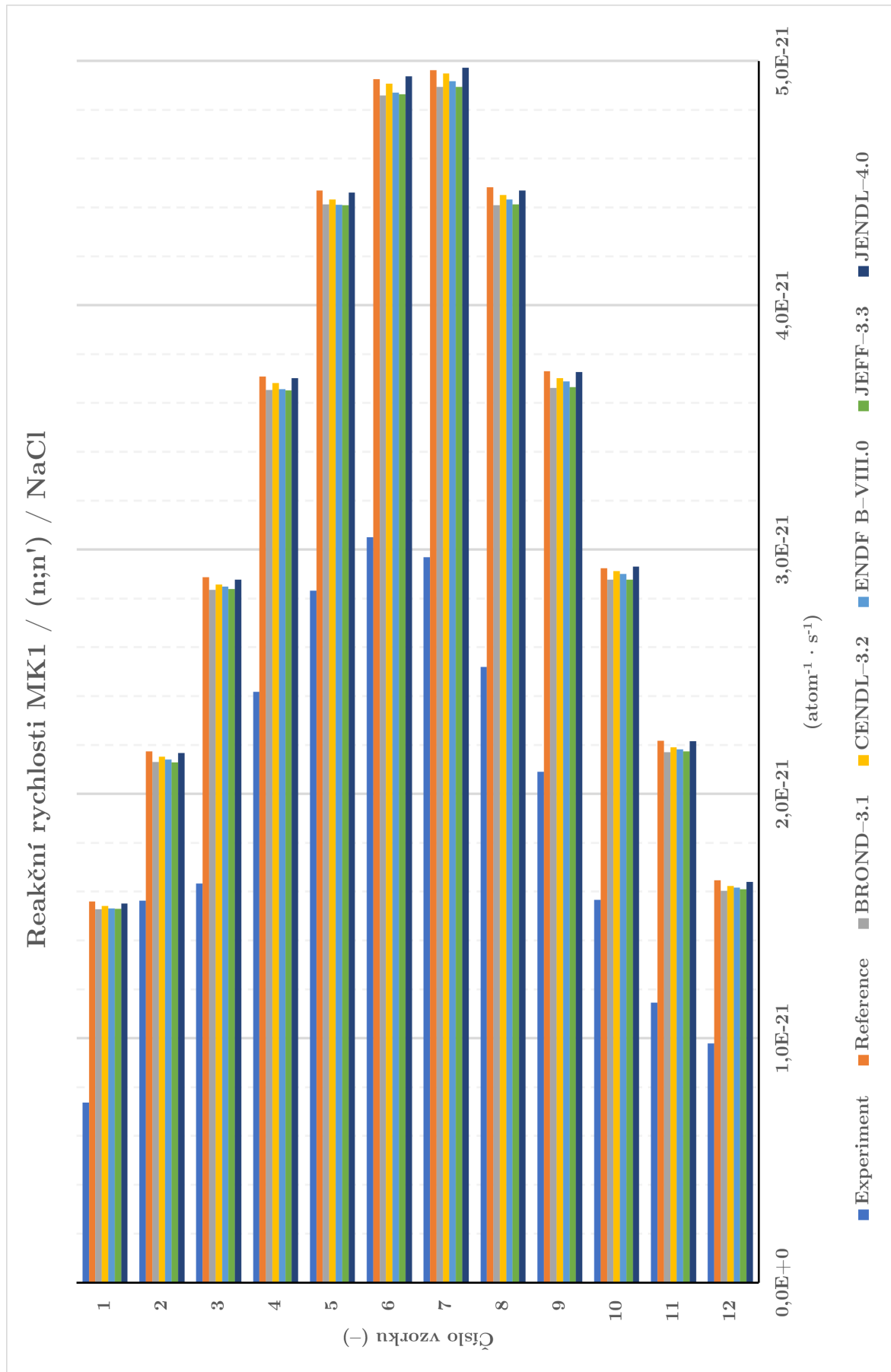
Obr. B.10: Porovnání reakčních rychlostí MK2 Na (n,γ) .



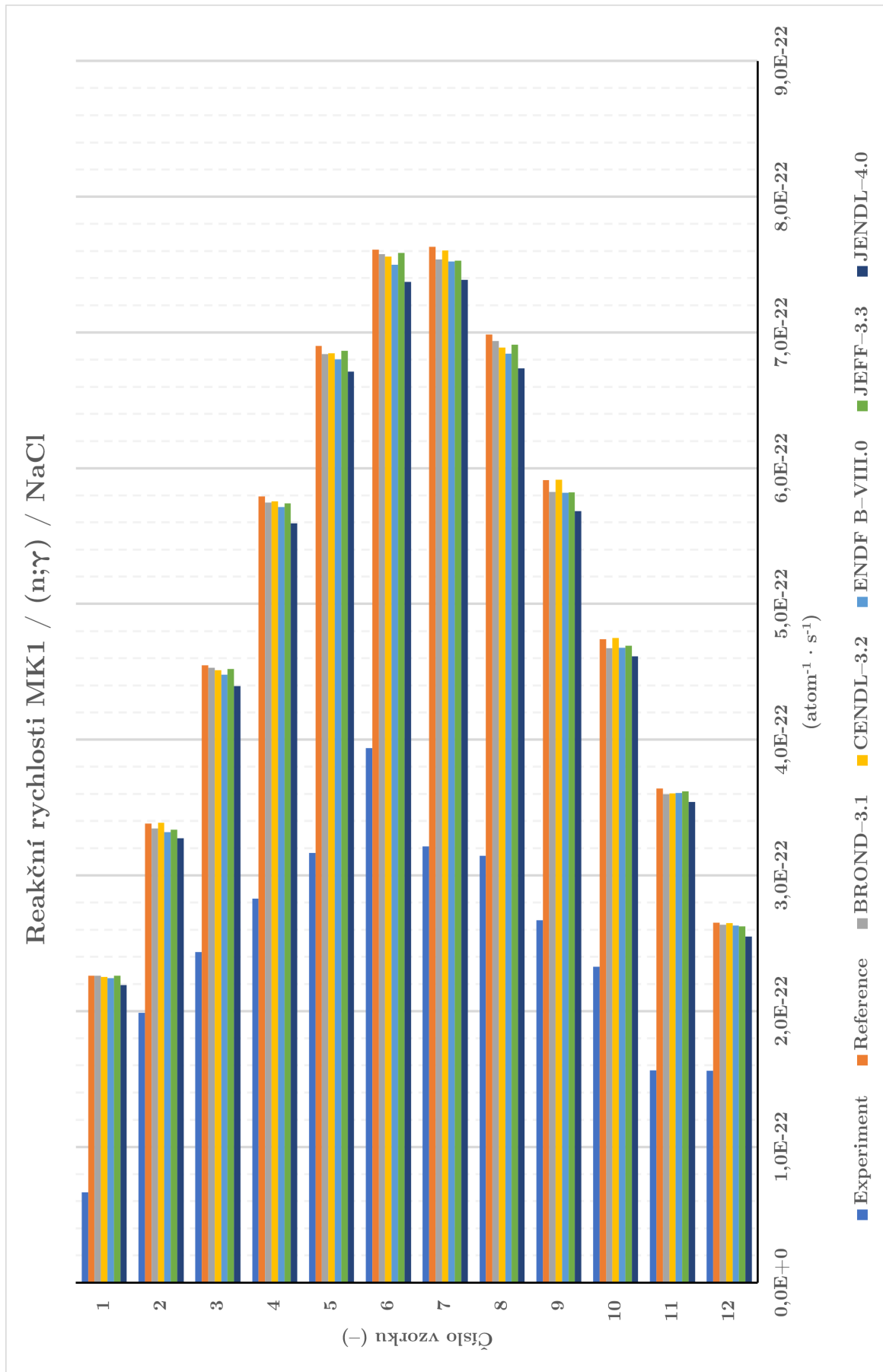
Obr. B.11: Porovnání reakčních rychlostí MK3 Na (n,n').



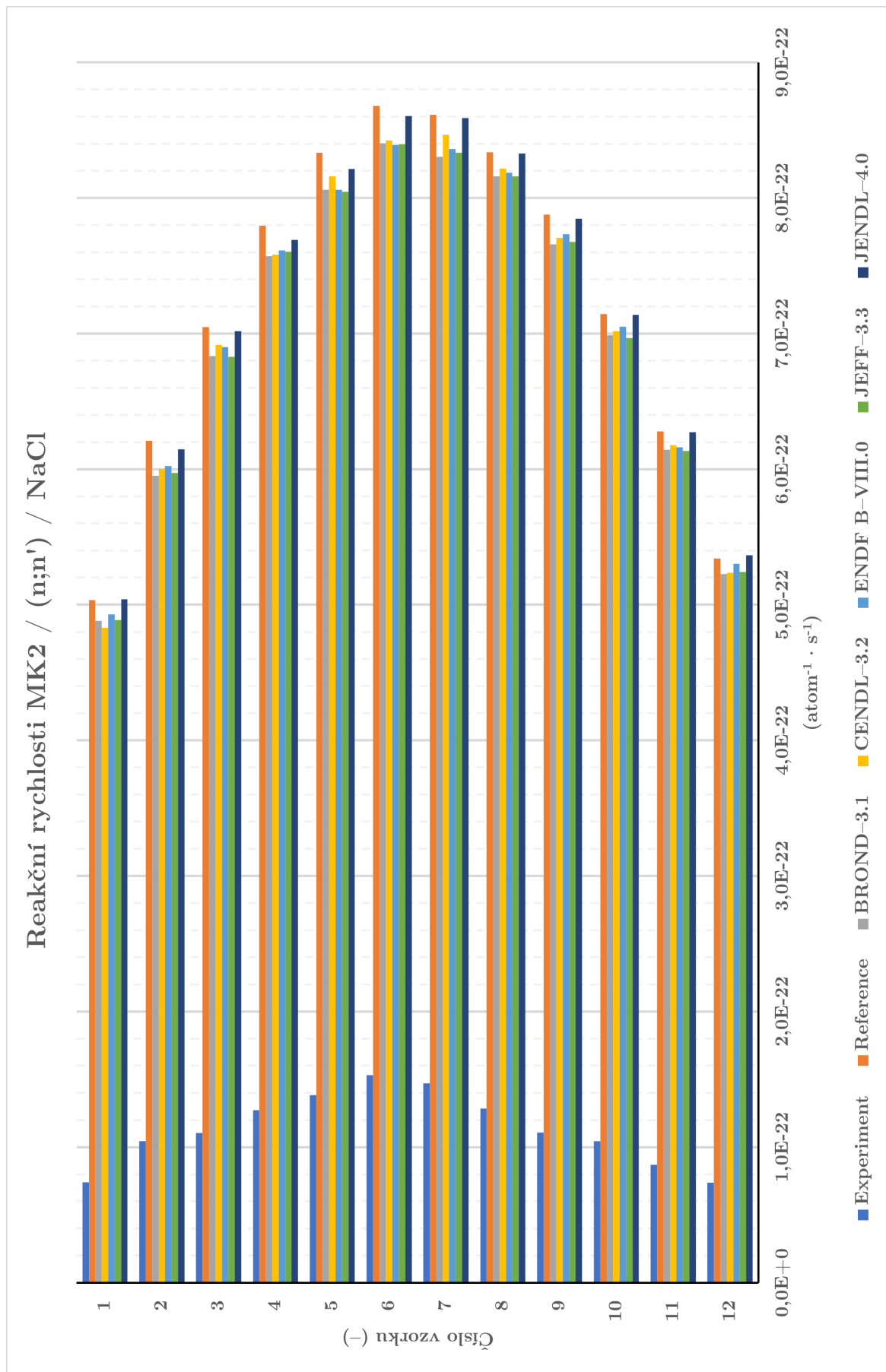
Obr. B.12: Porovnání reakčních rychlostí MK3 Na (n,γ).



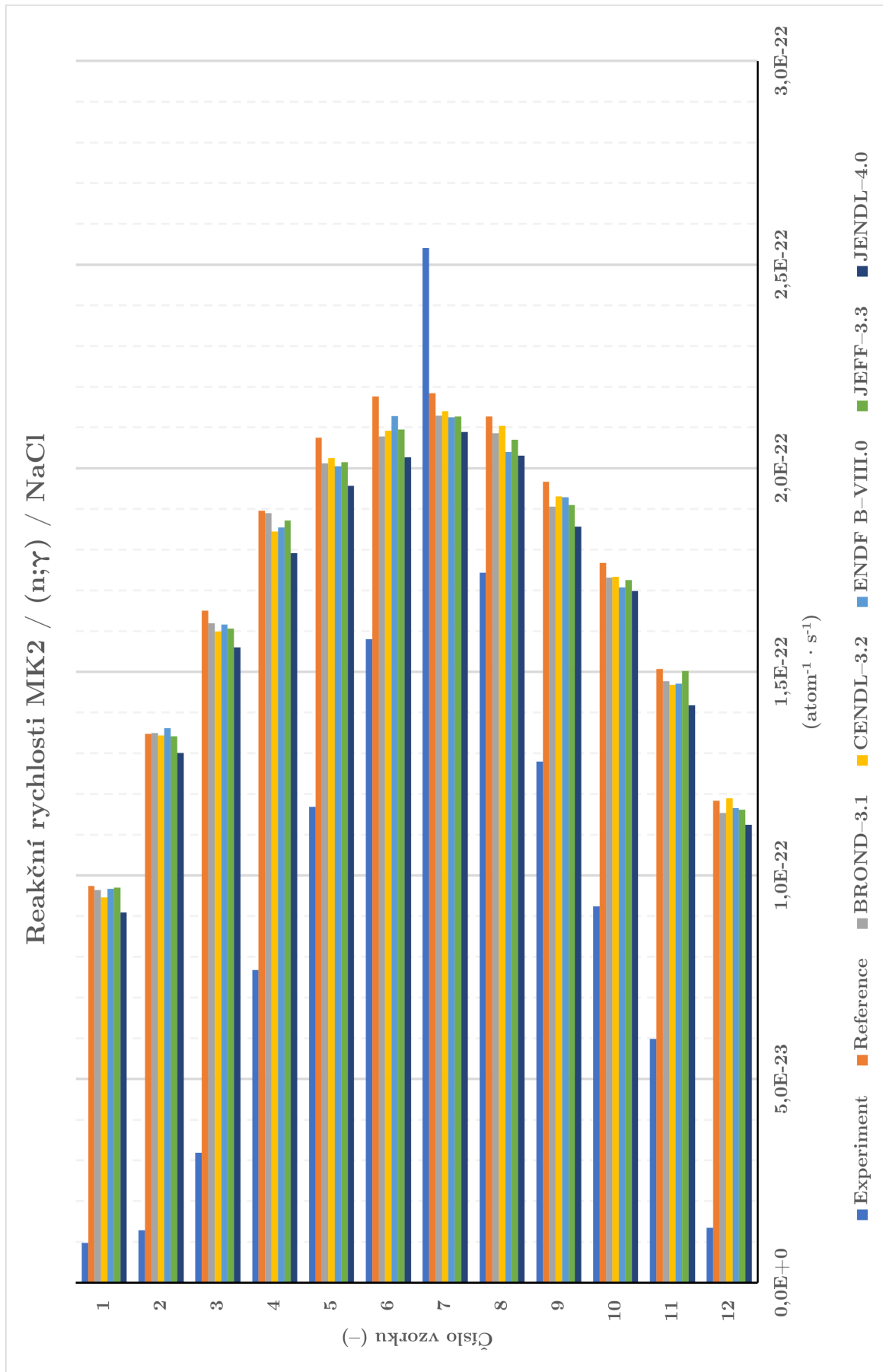
Obr. B.13: Porovnání reakčních rychlostí MK1 NaCl (n,n').



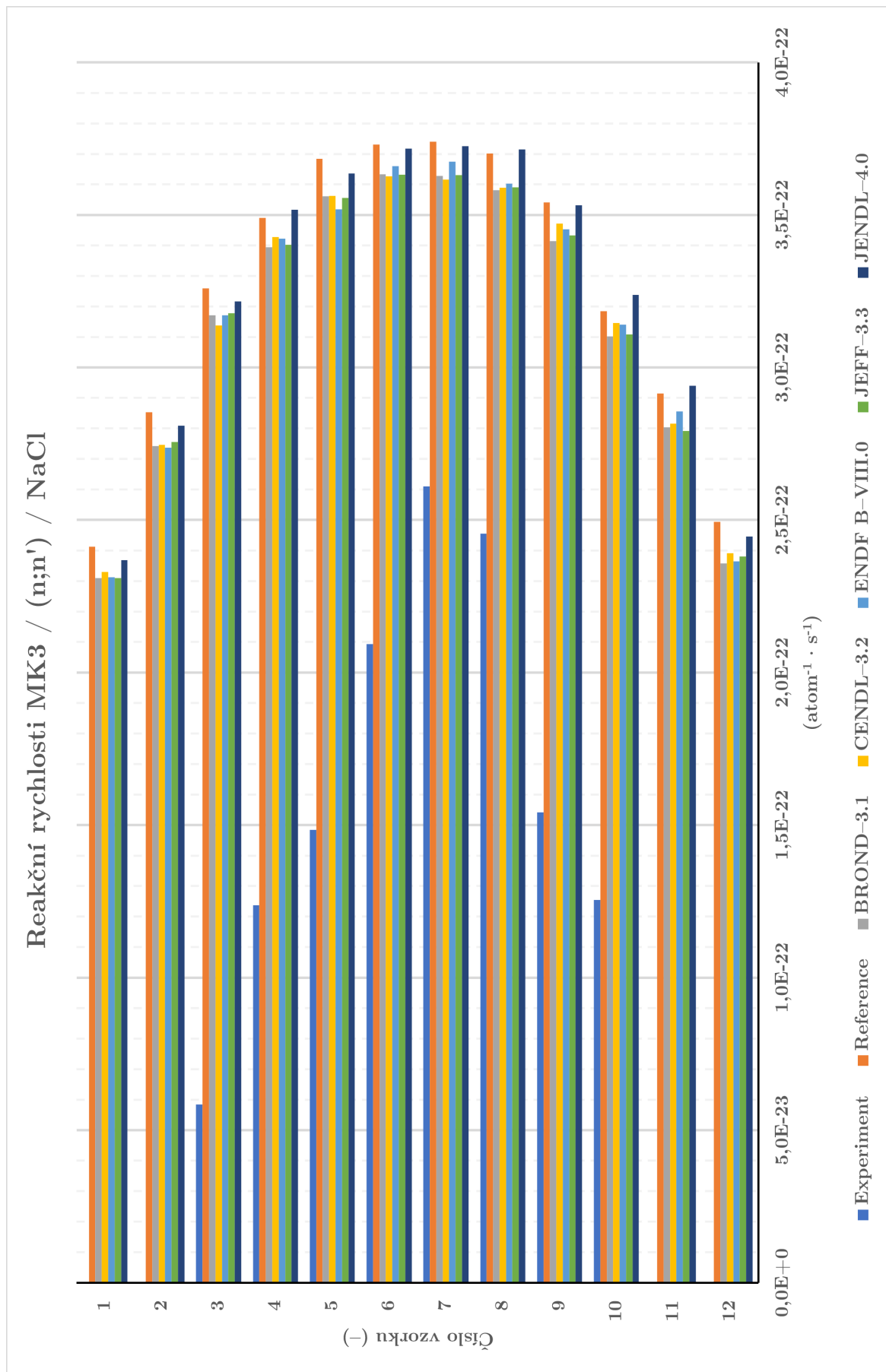
Obr. B.14: Porovnání reakčních rychlostí MK1 NaCl (n,γ).



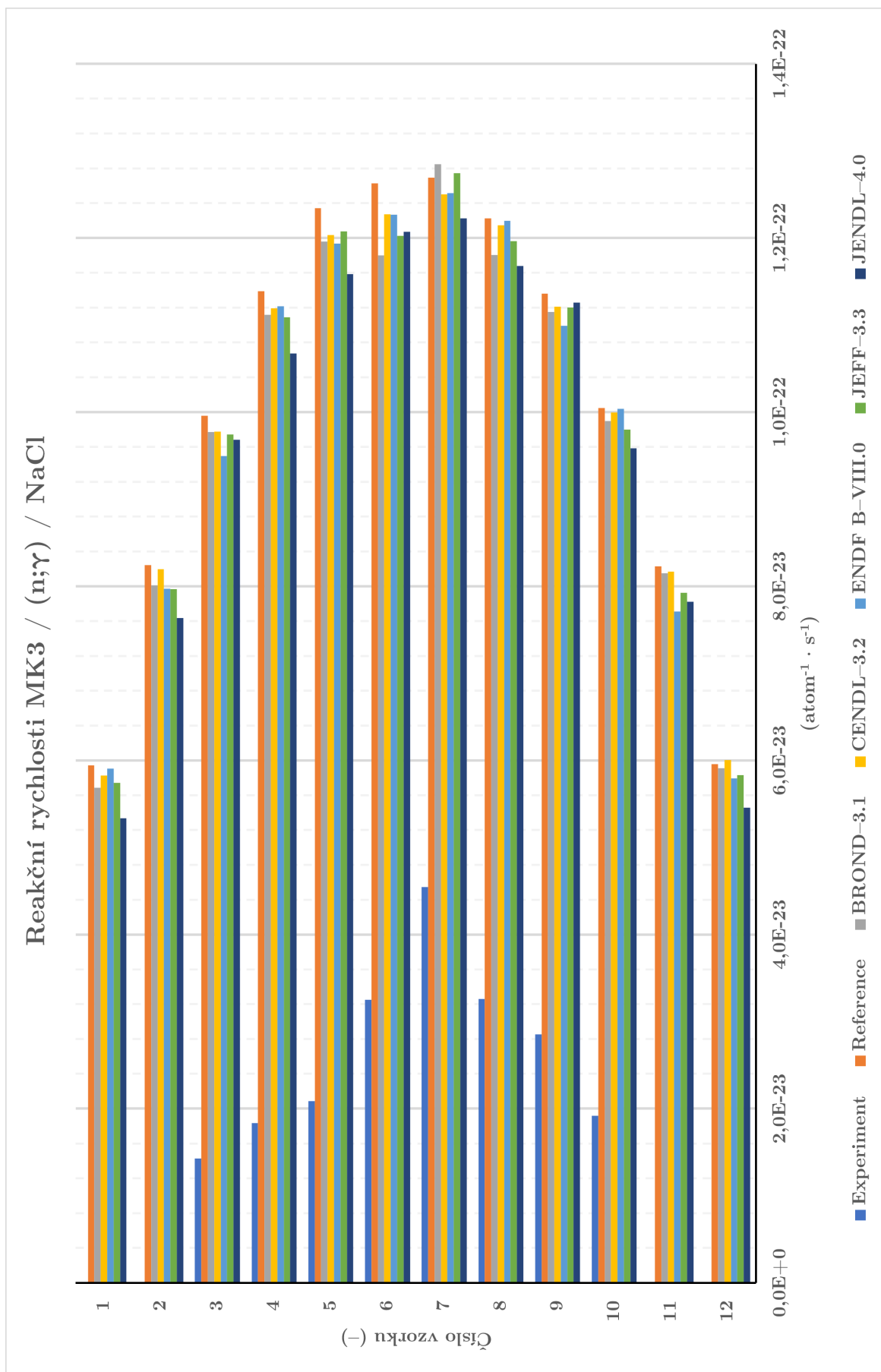
Obr. B.15: Porovnání reakčních rychlostí MK2 NaCl (n,n').



Obr. B.16: Porovnání reakčních rychlostí MK2 NaCl (n,γ).



Obr. B.17: Porovnání reakčních rychlostí MK3 NaCl (n,n').



Obr. B.18: Porovnání reakčních rychlostí MK3 NaCl (n,γ).

C Procentuální odchylky vypočítaných hodnot od změřených

Tab. C.1: Odchylky vypočítaných hodnot od změřených MK1 Cl (n,n').

Číslo Vzorku	Reference (%)	BROND-3.1 (%)	CENDL-3.2 (%)	ENDF B-VIII.0 (%)	JEFF-3.3 (%)	JENDL-4.0 (%)
1	52,74	51,95	52,07	51,99	52,04	52,66
2	28,12	26,95	27,56	27,28	27,05	28,21
3	43,41	42,51	42,92	42,62	42,55	43,32
4	34,77	33,99	34,19	33,83	33,98	34,59
5	36,63	35,90	36,11	35,77	35,90	36,49
6	38,05	37,38	37,65	37,31	37,40	37,97
7	40,18	39,55	39,93	39,61	39,52	40,18
8	43,78	43,08	43,32	43,09	43,09	43,65
9	43,94	43,18	43,45	43,30	43,19	43,87
10	46,42	45,74	46,10	45,94	45,74	46,48
11	48,35	47,41	47,71	47,38	47,39	48,20
12	40,54	39,03	39,60	39,33	39,21	40,21

Tab. C.2: Odchylky vypočítaných hodnot od změřených MK1 Cl (n, γ).

Číslo Vzorku	Reference (%)	BROND-3.1 (%)	CENDL-3.2 (%)	ENDF B-VIII.0 (%)	JEFF-3.3 (%)	JENDL-4.0 (%)
1	70,64	70,26	70,09	70,32	70,44	68,93
2	41,24	40,33	41,23	40,54	40,42	39,58
3	46,48	45,39	45,95	45,40	45,40	44,79
4	51,18	50,47	50,76	50,49	50,64	49,35
5	54,13	53,66	53,85	53,67	53,70	52,35
6	48,25	47,47	47,54	47,36	47,39	45,78
7	57,89	57,24	57,40	57,30	57,25	56,20
8	55,00	54,53	54,62	54,49	54,41	53,27
9	54,88	53,77	53,88	53,74	53,68	52,79
10	50,94	50,20	50,92	50,36	50,34	49,38
11	57,08	56,40	56,46	56,40	56,50	55,60
12	41,10	39,84	40,84	40,18	40,10	38,37

Tab. C.3: Odchylyky vypočítaných hodnot od změřených MK2 Cl (n,n').

Číslo Vzorku	Reference (%)	BROND-3.1 (%)	CENDL-3.2 (%)	ENDF B-VIII.0 (%)	JEFF-3.3 (%)	JENDL-4.0 (%)
1	85,29	84,98	84,99	84,99	84,96	85,36
2	83,19	82,65	82,57	82,57	82,69	82,94
3	84,35	83,90	83,99	83,93	83,94	84,24
4	83,69	83,42	83,37	83,49	83,47	83,68
5	83,39	83,03	83,11	82,96	83,02	83,33
6	82,37	81,80	81,91	81,75	81,80	82,18
7	82,93	82,45	82,63	82,42	82,47	82,89
8	84,60	84,28	84,39	84,34	84,32	84,69
9	85,95	85,65	85,67	85,67	85,68	85,91
10	85,38	85,22	85,15	85,12	85,16	85,45
11	86,15	85,80	85,78	85,75	85,81	86,13
12	86,19	85,93	85,86	86,02	85,90	86,25

Tab. C.4: Odchylyky vypočítaných hodnot od změřených MK2 Cl (n,γ).

Číslo Vzorku	Reference (%)	BROND-3.1 (%)	CENDL-3.2 (%)	ENDF B-VIII.0 (%)	JEFF-3.3 (%)	JENDL-4.0 (%)
1	90,01	89,96	90,02	90,00	90,03	89,67
2	90,48	90,26	90,38	90,36	90,32	89,95
3	80,65	80,00	80,29	80,14	80,10	79,47
4	59,51	58,13	58,68	58,39	58,29	56,07
5	43,70	40,97	42,53	41,38	41,73	40,41
6	27,38	26,35	26,17	26,14	26,52	22,57
7	16,34	22,41	19,15	22,52	22,23	24,50
8	18,04	15,76	16,38	15,89	16,01	13,27
9	34,92	33,90	33,63	33,83	33,63	29,89
10	47,71	46,86	46,14	46,65	46,92	44,49
11	60,31	59,17	59,30	59,03	59,15	57,66
12	88,60	88,30	88,28	88,29	88,31	87,89

Tab. C.5: Odchyly vypočítaných hodnot od změřených MK3 Cl (n,n').

Číslo Vzorku	Reference (%)	BROND-3.1 (%)	CENDL-3.2 (%)	ENDF B-VIII.0 (%)	JEFF-3.3 (%)	JENDL-4.0 (%)
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3	82,09	81,40	81,10	81,41	81,49	81,77
4	64,54	63,40	63,65	63,59	63,51	64,90
5	59,71	58,11	58,29	58,38	58,03	59,67
6	43,90	42,73	42,46	42,35	42,64	44,83
7	30,22	28,53	27,89	28,54	28,02	30,68
8	33,69	31,64	32,23	31,94	31,75	34,03
9	56,46	55,06	55,55	55,12	55,29	56,36
10	60,59	59,42	60,10	59,77	59,50	61,63
11	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
12	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tab. C.6: Odchyly vypočítaných hodnot od změřených MK3 Cl (n,γ).

Číslo Vzorku	Reference (%)	BROND-3.1 (%)	CENDL-3.2 (%)	ENDF B-VIII.0 (%)	JEFF-3.3 (%)	JENDL-4.0 (%)
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3	85,66	85,37	85,01	85,41	85,43	84,65
4	83,89	83,58	83,78	83,72	83,53	82,75
5	83,08	82,25	82,02	82,10	82,06	81,89
6	74,26	73,40	74,64	73,42	73,50	72,73
7	64,21	63,09	62,62	63,09	63,27	61,80
8	73,33	72,79	71,80	72,80	73,02	71,14
9	74,90	73,88	74,34	74,10	74,14	72,78
10	80,91	80,45	81,19	80,16	80,24	79,87
11	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
12	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tab. C.7: Odchyly vypočítaných hodnot od změřených MK1 Na (n,n').

Číslo Vzorku	Reference (%)	BROND-3.1 (%)	CENDL-3.2 (%)	ENDF B-VIII.0 (%)	JEFF-3.3 (%)	JENDL-4.0 (%)
1	52,74	52,68	52,94	52,76	52,74	52,76
2	28,12	27,70	28,10	27,98	27,77	27,94
3	43,41	43,22	43,36	43,34	43,25	43,29
4	34,77	34,61	35,01	34,88	34,61	34,98
5	36,63	36,43	36,85	36,73	36,43	36,82
6	38,05	37,87	38,11	38,05	37,88	38,19
7	40,18	40,07	40,34	40,30	40,05	40,34
8	43,78	43,47	43,74	43,79	43,44	43,75
9	43,94	43,64	43,94	43,95	43,69	44,06
10	46,42	46,29	46,55	46,51	46,29	46,52
11	48,35	48,05	48,34	48,36	47,99	48,45
12	40,54	40,46	40,52	40,50	40,50	40,55

Tab. C.8: Odchyly vypočítaných hodnot od změřených MK1 Na (n,γ).

Číslo Vzorku	Reference (%)	BROND-3.1 (%)	CENDL-3.2 (%)	ENDF B-VIII.0 (%)	JEFF-3.3 (%)	JENDL-4.0 (%)
1	70,64	70,91	70,74	70,70	70,97	70,71
2	41,24	41,67	41,26	40,90	41,67	41,19
3	46,48	47,46	47,32	46,92	47,24	47,51
4	51,18	51,84	51,73	51,62	51,66	51,69
5	54,13	54,48	54,48	54,14	54,41	54,69
6	48,25	48,06	48,43	48,08	48,07	48,39
7	57,89	58,06	58,24	57,94	58,03	58,23
8	55,00	54,76	54,96	54,61	54,65	54,91
9	54,88	54,79	55,12	54,98	54,85	55,05
10	50,94	51,11	51,49	51,16	51,19	51,33
11	57,08	57,91	57,64	57,46	57,81	57,52
12	41,10	42,07	41,55	41,49	41,80	41,59

Tab. C.9: Odchyly vypočítaných hodnot od změřených MK2 Na (n,n').

Číslo Vzorku	Reference (%)	BROND-3.1 (%)	CENDL-3.2 (%)	ENDF B-VIII.0 (%)	JEFF-3.3 (%)	JENDL-4.0 (%)
1	85,29	85,16	85,17	85,31	85,24	85,18
2	83,19	82,90	82,93	83,03	82,90	83,03
3	84,35	84,23	84,25	84,41	84,20	84,30
4	83,69	83,61	83,65	83,68	83,62	83,63
5	83,39	83,11	83,14	83,27	83,15	83,20
6	82,37	82,17	82,34	82,29	82,20	82,32
7	82,93	82,74	82,85	82,89	82,79	82,82
8	84,60	84,54	84,53	84,58	84,57	84,50
9	85,95	85,87	85,99	85,99	85,88	85,94
10	85,38	85,40	85,30	85,42	85,39	85,33
11	86,15	86,19	86,21	86,24	86,18	86,14
12	86,19	86,30	86,28	86,29	86,34	86,25

Tab. C.10: Odchyly vypočítaných hodnot od změřených MK2 Na (n,γ).

Číslo Vzorku	Reference (%)	BROND-3.1 (%)	CENDL-3.2 (%)	ENDF B-VIII.0 (%)	JEFF-3.3 (%)	JENDL-4.0 (%)
1	90,01	90,19	90,15	90,05	90,30	90,03
2	90,48	90,52	90,57	90,48	90,53	90,52
3	80,65	80,57	80,41	80,28	80,63	80,37
4	59,51	60,03	59,48	58,98	60,24	59,52
5	43,70	43,84	43,33	43,37	43,95	43,31
6	27,38	27,84	27,53	28,01	27,30	26,87
7	16,34	14,24	12,19	14,14	13,89	13,28
8	18,04	18,04	18,78	18,47	17,29	18,93
9	34,92	36,32	36,01	33,68	35,78	35,46
10	47,71	47,71	48,43	47,63	47,79	47,29
11	60,31	60,19	61,27	60,23	60,03	60,71
12	88,60	88,43	88,48	88,47	88,40	88,42

Tab. C.11: Odchylyky vypočítaných hodnot od změřených MK3 Na (n,n').

Číslo Vzorku	Reference (%)	BROND-3.1 (%)	CENDL-3.2 (%)	ENDF B-VIII.0 (%)	JEFF-3.3 (%)	JENDL-4.0 (%)
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3	82,09	82,01	82,08	82,17	81,93	82,03
4	64,54	64,42	64,66	64,89	64,41	64,64
5	59,71	59,71	59,42	59,75	59,87	59,23
6	43,90	44,09	44,05	44,48	43,91	43,94
7	30,22	29,92	29,94	30,79	29,81	29,94
8	33,69	32,88	33,01	33,01	33,03	33,10
9	56,46	56,71	56,87	56,60	56,73	56,80
10	60,59	60,38	60,52	60,32	60,50	60,59
11	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
12	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tab. C.12: Odchylyky vypočítaných hodnot od změřených MK3 Na (n,γ).

Číslo Vzorku	Reference (%)	BROND-3.1 (%)	CENDL-3.2 (%)	ENDF B-VIII.0 (%)	JEFF-3.3 (%)	JENDL-4.0 (%)
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3	85,66	86,01	85,94	85,69	86,12	85,83
4	83,89	83,65	83,96	84,13	83,60	84,37
5	83,08	83,02	83,06	83,13	83,21	83,30
6	74,26	74,19	74,91	74,75	74,17	74,94
7	64,21	64,60	63,88	64,39	64,39	64,79
8	73,33	73,96	73,44	73,86	73,53	73,36
9	74,90	75,06	74,65	75,30	74,59	74,77
10	80,91	81,05	81,10	81,04	80,98	81,11
11	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
12	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tab. C.13: Odchyly vypočítaných hodnot od změřených MK1 NaCl (n,n').

Číslo Vzorku	Reference (%)	BROND-3.1 (%)	CENDL-3.2 (%)	ENDF B-VIII.0 (%)	JEFF-3.3 (%)	JENDL-4.0 (%)
1	52,74	51,74	52,20	51,85	51,84	52,50
2	28,12	26,65	27,38	26,98	26,61	27,89
3	43,41	42,37	42,81	42,64	42,44	43,22
4	34,77	33,81	34,31	33,86	33,77	34,66
5	36,63	35,83	36,11	35,81	35,78	36,52
6	38,05	37,21	37,82	37,36	37,26	38,20
7	40,18	39,34	40,02	39,62	39,34	40,30
8	43,78	42,84	43,38	43,15	42,88	43,62
9	43,94	42,89	43,51	43,29	42,95	43,90
10	46,42	45,53	46,19	45,99	45,53	46,54
11	48,35	47,24	47,70	47,52	47,30	48,31
12	40,54	38,95	39,66	39,45	39,17	40,30

Tab. C.14: Odchyly vypočítaných hodnot od změřených MK1 NaCl (n,γ).

Číslo Vzorku	Reference (%)	BROND-3.1 (%)	CENDL-3.2 (%)	ENDF B-VIII.0 (%)	JEFF-3.3 (%)	JENDL-4.0 (%)
1	70,64	70,64	70,49	70,37	70,61	69,70
2	41,24	40,59	41,32	40,11	40,41	39,28
3	46,48	46,25	46,03	45,63	46,14	44,59
4	51,18	50,80	50,87	50,50	50,74	49,45
5	54,13	53,74	53,77	53,46	53,89	52,85
6	48,25	48,03	47,92	47,49	48,11	46,59
7	57,89	57,37	57,75	57,29	57,33	56,52
8	55,00	54,68	54,36	54,07	54,51	53,32
9	54,88	54,20	54,90	54,14	54,16	53,06
10	50,94	50,23	51,04	50,28	50,45	49,60
11	57,08	56,56	56,65	56,65	56,82	55,87
12	41,10	40,77	41,09	40,67	40,52	38,74

Tab. C.15: Odchyly vypočítaných hodnot od změřených MK2 NaCl (n,n').

Číslo Vzorku	Reference (%)	BROND-3.1 (%)	CENDL-3.2 (%)	ENDF B-VIII.0 (%)	JEFF-3.3 (%)	JENDL-4.0 (%)
1	85,29	84,83	84,67	84,98	84,85	85,31
2	83,19	82,46	82,61	82,67	82,52	83,02
3	84,35	83,86	84,05	84,02	83,85	84,29
4	83,69	83,21	83,23	83,30	83,28	83,47
5	83,39	82,83	83,04	82,83	82,80	83,15
6	82,37	81,78	81,83	81,76	81,77	82,21
7	82,93	82,29	82,62	82,41	82,35	82,87
8	84,60	84,26	84,37	84,31	84,26	84,58
9	85,95	85,55	85,64	85,69	85,58	85,90
10	85,38	85,05	85,11	85,18	85,00	85,36
11	86,15	85,84	85,92	85,88	85,82	86,13
12	86,19	85,89	85,91	86,09	85,93	86,26

Tab. C.16: Odchyly vypočítaných hodnot od změřených MK2 NaCl (n,γ).

Číslo Vzorku	Reference (%)	BROND-3.1 (%)	CENDL-3.2 (%)	ENDF B-VIII.0 (%)	JEFF-3.3 (%)	JENDL-4.0 (%)
1	90,01	89,91	89,72	89,93	89,97	89,29
2	90,48	90,50	90,46	90,58	90,44	90,14
3	80,65	80,27	80,03	80,25	80,12	79,53
4	59,51	59,37	58,38	58,60	58,99	57,14
5	43,70	41,93	42,31	41,74	42,04	40,30
6	27,38	23,97	24,48	25,76	24,59	22,05
7	16,34	19,33	18,70	19,55	19,44	21,64
8	18,04	16,45	17,17	14,54	15,79	14,17
9	34,92	32,85	33,72	33,66	33,01	31,07
10	47,71	46,63	46,66	45,86	46,44	45,58
11	60,31	59,51	59,27	59,35	60,19	57,82
12	88,60	88,30	88,66	88,42	88,38	88,00

Tab. C.17: Odchyly vypočítaných hodnot od změřených MK3 NaCl (n,n').

Číslo Vzorku	Reference (%)	BROND-3.1 (%)	CENDL-3.2 (%)	ENDF B-VIII.0 (%)	JEFF-3.3 (%)	JENDL-4.0 (%)
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3	82,09	81,59	81,39	81,59	81,63	81,85
4	64,54	63,53	63,89	63,83	63,63	64,80
5	59,71	58,33	58,34	57,82	58,26	59,18
6	43,90	42,39	42,28	42,81	42,37	43,70
7	30,22	28,07	27,84	28,97	28,13	29,95
8	33,69	31,46	31,60	31,86	31,63	33,92
9	56,46	54,85	55,59	55,34	55,09	56,35
10	60,59	59,55	60,12	60,06	59,64	61,26
11	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
12	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tab. C.18: Odchyly vypočítaných hodnot od změřených MK3 NaCl (n,γ).

Číslo Vzorku	Reference (%)	BROND-3.1 (%)	CENDL-3.2 (%)	ENDF B-VIII.0 (%)	JEFF-3.3 (%)	JENDL-4.0 (%)
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3	85,66	85,37	85,39	84,95	85,33	85,24
4	83,89	83,51	83,62	83,65	83,46	82,81
5	83,08	82,54	82,65	82,51	82,71	81,98
6	74,26	72,45	73,52	73,50	72,97	73,08
7	64,21	64,64	63,65	63,70	64,35	62,83
8	73,33	72,38	73,15	73,26	72,74	72,08
9	74,90	74,42	74,57	74,06	74,55	74,67
10	80,91	80,62	80,81	80,89	80,42	79,99
11	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
12	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00