

UNIVERZITA HRADEC KRÁLOVÉ

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyziky

## VYUŽITÍ FYZIKÁLNÍCH METOD V ARCHEOLOGII

Bakalářská práce

Autor: Markéta Šiklová

Studijní program: B1701 Fyzika

Studijní obor: Fyzika se zaměřením na vzdělávání  
Historie se zaměřením na vzdělávání

Vedoucí práce: RNDr. Michaela Křížová, Ph.D.

Hradec Králové

červenec 2016

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

### **Zadání bakalářské práce**

<b>Autor:</b>	<b>Markéta Šiklová</b>
Studijní program:	B 1701 Fyzika
Studijní obor:	Fyzika se zaměřením na vzdělávání Historie se zaměřením na vzdělávání
Název práce:	Využití fyzikálních metod v archeologii
Název práce v AJ:	Physics at the service of archeology
Cíl a metody práce:	Cílem této práce je podat základní přehled a princip fungování fyzikálních metod, které napomáhají archeologům v jejich práci. Nejprve při samotném vyhledávání artefaktů a archeologických objektů a v další fázi práce i v jejich následném hodnocení (určování stáří, složená apod.). Práce má rešeršní charakter.
Garantující pracoviště:	Katedra fyziky Přírodovědecké fakulty UHK
Vedoucí práce:	RNDr. Michaela Křížová, Ph.D.
Oponent:	RNDr. Daniel Jezbera
Datum zadání práce:	23. 5. 2014
Datum odevzdání práce:	29. 7. 2016

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a že jsem v seznamu použité literatury uvedla všechny prameny, ze kterých jsem vycházela.

V Hradci Králové dne 29. 7. 2016

Markéta Šiklová

## Poděkování

Děkuji paní RNDr. Michaele Křížové, Ph. D. za motivaci, podporu, poskytnuté rady a odborné vedení během psaní této práce. Dále bych ráda poděkovala panu doc. PhDr. Jaromíru Kovárníkovi, CSc. za rady poskytnuté ohledně výběru odborné literatury.

## **Anotace**

V posledních desetiletích došlo k velkému nárůstu a zpřesnění metod používaných v archeologii. Cílem této bakalářské práce bylo podrobně popsat s ohledem na historický vývoj základní fyzikální metody, které archeologie využívá při hledání a určování stáří nalezených artefaktů. Konkrétně byly mimo jiné popsány metody geofyzikální, termoluminiscenční a radiouhlíková. K některým metodám byla pro ilustraci uvedena reálně naměřená data některých artefaktů a archeologických situací.

## **Klíčová slova**

Archeologie, aktivační analýza, geofyzikální metody, jaderné metody, nedestruktivní metody, radiouhlíkové datování, rentgenofluorescenční datování, termoluminiscence.

## **Annotation**

In the recent decades there has been a large increase and refinement of the methods used in archeology. The goal of the thesis was to describe in details basic physical methods used in archeology to search artifacts and determine their age, with regard to the historical development. Specifically there are described e.g. geophysical, thermoluminescence and carbon method. For some methods the real measured data of some artifacts and archaeological situations are presented for illustration.

## **Keywords**

Archaeology, activation analysis, geophysical methods, nuclear methods, non-destructive methods, radiocarbon dating, rentgenofluoresce dating, thermoluminescence.

# Obsah

Úvod.....	9
<b>1 V terénu aneb geofyzika v archeologii .....</b>	<b>11</b>
1.1 Magnetometrie.....	16
1.1.1 Měření .....	18
1.1.2 Příklady aplikace metody .....	21
1.2 Gravimetrie.....	23
1.2.1 Měření .....	23
1.2.2 Příklady aplikace metody .....	25
1.3 Geoelektrické metody.....	26
1.3.1 Stejnosměrné odporové metody .....	26
1.3.2 Příklady aplikace metod .....	30
1.3.3 Elektromagnetické metody.....	32
1.3.4 Příklady aplikace metod .....	34
1.4 Seismické metody.....	35
1.4.1 Měření .....	35
1.5 Geotermické metody.....	37
1.6 Radionuklidové metody (radiometrické).....	37
1.7 Možné problémy při aplikaci geofyzikálních metod.....	38
<b>2 V laboratoři .....</b>	<b>40</b>
2.1 Radiouhlíková metoda.....	40
2.1.1 Oxid uhličitý a $^{14}\text{C}$ v přírodě .....	40
2.1.2 Měření .....	43
2.1.3 Problémy .....	47
2.1.4 Dendrochronologie a Urano-Thoriové datování .....	51
2.2 Termoluminiscenční datování (Radiačně indukovaná termoluminiscence).....	52
2.2.1 Měření .....	54

2.2.2	Problémy .....	59
2.3	Opticky stimulovaná luminiscence (OSL) .....	60
2.3.1	Měření .....	61
2.4	Rentgenofluorescenční metoda (X-ray fluorescence (XRF)) .....	61
2.4.1	Měření .....	66
2.5	Neutronová aktivační metoda (NAA).....	77
2.5.1	Měření .....	77
2.6	Využití urychlovačů .....	82
2.6.1	Metoda PIXE (Proton Induced X-ray Emission) .....	83
2.6.2	Metoda PIGE (Particle Induced Gamma-ray Emission) .....	84
2.6.3	Metoda RBS (Rutherford Backscattering Spectroscopy) .....	85
2.6.4	Metoda ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis) .....	85
<b>3</b>	<b>Zhodnocení metod.....</b>	<b>86</b>
	<b>Závěr.....</b>	<b>88</b>
	<b>Seznam použité literatury a zdrojů .....</b>	<b>89</b>
	<b>Seznam obrázků a tabulek .....</b>	<b>92</b>
	<b>Příloha .....</b>	<b>95</b>



## Úvod

Kombinace humanitního oboru, jakými jsou historie či archeologie a přírodovědného oboru, jakým je fyzika, se stále považují za neobvyklé. Téma práce bylo zvoleno právě jako příklad, jak důležité je propojování takovýchto oborů v situacích, kde by se jeden bez druhého neobešly. Fyzika stejně jako každá věda potřebuje prostor pro uplatnění. Právě toto uplatnění umožnilo v posledních desetiletích velký posun v aplikovaných archeologických metodách a jejich možnostech, jak při samotném pátrání po nových nalezištích, tak i v jejich následné interpretaci. Archeologie byla před nástupem fyzikální metod odkázána na nástroje, jako např. krumpáč či lopata (samozřejmě tyto nástroje stále zůstávají součástí archeologické práce). Geofyzikální metody umožňují vyselektovat místa s minimální či žádnou pravděpodobností nálezů, aniž by bylo třeba velkého pátrání a kopání bez výsledku. Dovolují archeologům také prohledávat naleziště s možností vyhnout se nechtěnému porušení objektů uložených pod povrchem, odhalit případná rizika, urychlit práci a všeobecně rozšířit možnosti. V laboratoři pak za pomoci moderních fyzikálních a případně i jiných přírodovědných metod (nelze zapomenout na chemii, biologii, matematiku a počítačové technologie) mohou archeologové přesněji určovat nálezy (dříve se museli spoléhat na dochované záznamy, porovnávání se známými předměty apod., odhalování falsifikátu jen dle vnějšího ohledání a svých odborných znalostí, hrubé datování). Historikové pak mohou aplikací fyzikálních principů objasňovat, případně rekonstruovat, i některé z historických událostí. Škála možností je široká. Bohužel literatura zabývající se tímto tématem je nedostatečně zastoupena, navíc často zahraniční a tak pro mnoho lidí nedostupná ať už možností výpůjčky či jazykovou bariérou (už při hledání podkladů pro tuto práci toto byla značná komplikace). Dalším problémem bývá nezaměřenost prací na potřeby archeologie a s tím související přehlacení příliš složitou fyzikálně-matematickou terminologií. Mnohé práce jsou navíc zastaralé. V principu metod to nebývá problém, ovšem po technické stránce došlo k značnému posunu.

Fyzikalizace archeologie je na vzestupu a na mnohých odborných pracovištích už bývají součástí týmu i fyzikové (přínos zmíněných, i dalších metod, v praxi je tak velký, že některá muzea a galerie mají i vlastní jaderná pracoviště, např. francouzské „Centre de Recherche at Restauration des Musées de France“) [1].

Metod, které by bylo v této práci možné vyjmenovat je spousta, cílem této práce je však souhrnně uvést pouze ty nejčastěji využívané a objasnit základní principy jejich fungování, případně možnosti aplikace těchto metod. Pro ilustraci a lepší představu budou v této práci uvedeny i některé reálné artefakty (objekty) a archeologické situace a výstupy z jejich měření (grafy, modely, snímky).

## 1 V terénu aneb geofyzika v archeologii

Zjednodušeně se dá prospekční práce archeologa v terénu rozdělit na pracovní metody destruktivní a nedestruktivní. A právě nedestruktivní metody umožňují archeologům nahlédnout pod povrch, aniž by došlo k narušení naleziště, metody usnadňující možné naleziště vytipovat, získat předběžný pojem o jeho rozložení apod. Tyto metody využívají poznatků a technologických možností, jež poskytují fyzikální principy.

Geofyzika se jako přírodovědný obor zabývá studiem fyzikálních vlastností Země, resp. studiem fyzikálních polí v zemském tělese a jeho okolí. [2] Uplatňuje se v mnoha oblastech včetně archeologie, a právě toto zaměření nás bude zajímat (samostatná oblast archeologického bádání – archeogeofyzika). Dnes se tato oblast stává samostatně se rozvíjející oblastí aplikované geofyziky. Díky jejímu rozvoji a ověřené funkčnosti se v rámci archeologie stala archeogeofyzika samostatnou subdisciplínou umožňující využívat geofyzikálních poznatků bez zatížení celým rozsahem geofyziky jako takové.

Ještě by bylo vhodné dodat jeden nesporný klad zařazení geofyzikálního průzkumu do archeologické prospekce a tím je i přijatelná finanční náročnost.

### Specifika geofyziky v rámci archeologie

Metody geofyziky patří mezi tzv. nedestruktivní metody a jejich účelem je během archeologických výzkumů odhalit podpovrchové archeologické situace a možné objekty.

Konkrétně sem patří jednotlivé metody: geoelektrické metody, magnetometrie, gravimetrie, radionuklidové metody, seismika, termometrie, aerogeofyzikální měření<sup>i</sup>, geofyzikální měření na moři<sup>ii</sup>, geofyzikální měření ve vrtech (katronáž) a petrofyzička<sup>iii</sup>. [2] V této práci není prostor věnovat se všem, a tak zde budou zastoupeny pouze nejčastěji aplikované metody.

Tyto metody fungují na základě sledování a pátrání po fyzikálních změnách, nehomogenitách, v prostoru, pro potřeby archeologie se omezují čistě na hloubku několika metrů pod zemským povrchem.

---

<sup>i</sup> Aerogeofyzikální metody – využívány při leteckém geofyzikálním průzkumu s hlavním využitím mapování větších pevninských území, strukturní a ložiskovou geologii či v rámci dálkových průzkumů Země.

<sup>ii</sup> Geofyzikální měření na moři – magnetometrie, radiometrie, elektromagnetické metody, seismika, gravimetrie.

<sup>iii</sup> Petrofyzička – mladý vědní obor zabývající se výzkumem fyzikálních vlastností hornin závisících na jejich mineralogickém složení.

Aby bylo možné aplikovat geofyzikální metody na danou lokalitu, musí být splněny následující předpoklady:

- Objekty, po kterých archeologové pátrají, musí mít dostatečnou odlišnost od podloží, aby se mohly tyto odlišnosti řádně projevit změnou fyzikálních vlastností, resp. některých veličin.
- Objekty pod povrchem musí být dostatečně zachovány, aby bylo možné je odhalit.
- Úspěšnost záleží i na množství, rozměrech daných objektů nemluvě o jejich tvaru (odlišnost od přirozeně se vyskytujících jevů).
- Odpovídající stav terénu a vegetace na dané lokalitě.
- Povaha půdních procesů, homogenita půdního horizontu a jeho typ či mocnost.
- Archeolog, který lokalitu zkoumá, musí znát i geologické a hydrologické vlastnosti tohoto prostoru (mohou značně ovlivnit výstup měření).
- Absence rušivých vlivů aktivitami na dané lokalitě či jejím okolí.
- Pokud je třeba provádět měření dlouhodoběji, např. v rámci několika dní je třeba mít k tomuto měření stabilní klimatické podmínky.
- Výběr správné metody vhodné pro danou lokalitu či typ předpokládaných nálezů.

Dále jsou uvedeny hlavní motivy vedoucí archeology využít geofyzikální metody. Prvním může být čistě otázkou ověření určité lokality na základě určitých předpokladů (letecké snímkování, povrchové sběry, dokumentace apod.). Dále může těmito metodami být mapována lokalita se zaměřením na předpokládané pozůstatky lidské činnosti, tedy zaniklé fortifikace a jiné stavby, lineární ohrazení či výrobní areály. Geofyzikální metody mohou také sloužit jako určitý předběžný archeologický výzkum pro zefektivnění dalších prací. Někdy nemusejí být tyto metody hlavními aktéry výzkumu, ale mohou sloužit pouze jako doplněk samotného terénního výzkumu (již odhalený objekt – třeba zjistit některá jeho specifika, jako např., kterým směrem stavba pokračovala atd.). V případě, že archeologové nemají v úmyslu vykopat celý, třeba již částečně odhalený objekt, mohou pomocí geofyzikálních metod vymežit a zmapovat okolní oblast, aniž by bylo třeba ji fyzicky narušovat.

ZÁKLADNÍ ČLENĚNÍ	HLAVNÍ METODY	HLAVNÍ OBLASTI VYUŽITÍ
geoelektrické metody	geoelektrické odporové metody	ložisková a strukturní geologie, hydrogeologie, ochrana životního prostředí, <b>archeologie</b>
	elektromagnetické metody (včetně radaru a detektorů)	inženýrská a strukturní geologie, hydrogeologie, ochrana životního prostředí, <b>archeologie</b>
gravimetrie	sledování tíhového pole	fyzika Země
	sledování rozložení hmot, resp. hustot	ložisková, inženýrská a regionální geologie, hydrogeologie
	mikrogravimetrie	hornictví, speleologie, <b>archeologie</b>
magnetometrické metody	sledování geomagnetického pole	fyzika Země
	sledování regionální/lokálních změn magnetického pole	inženýrská, ložisková a regionální geologie, ochrana životního prostředí, vulkanologie, <b>archeologie</b>
	sledování magn. susceptibility	ložisková geologie, <b>archeologie</b>
	paleomagnetický výzkum	strukturní a regionální geologie
radionuklidové metody	radiometrické metody/sledování přirozené radioaktivity	ložisková, regionální a strukturní geologie, ochrana životního prostředí a <b>ojedinele archeologie</b>
	metody jaderné geofyziky	ložisková geologie
seismické metody	sledování odražených vln/reflexní seismika	ložisková a strukturní geologie, fyzika Země
	sledování lomených vln/refrakční seismika	ložisková a inženýrská geologie, ochrana životního prostředí, hornictví
	mělká refrakční seismika	inženýrská geologie, hornictví a <b>archeologie</b>
geotermické metody	sledování toku tepelné energie	fyzika Země, strukturní geologie
	sledování lokálních změn geotermálního pole	ložisková geologie, hydrogeologie, speleologie, vulkanologie, hornictví a <b>archeologie</b>
aerogeofyzikální měření	aeromagnetometrie, aeroradiometrie a dálkový průzkum Země (včetně termometrie)	geofyzikální mapování, ložisková a strukturní geologie, ochrana životního prostředí
geofyzikální měření na moři	gravimetrie, magnetometrie, seismoakustika, termometrie, seismika a radiometrie	geofyzikální mapování, ložisková a strukturní geologie
petrofyzika	laboratorní sledování fyzikálních vlastností minerálů a hornin	ložisková, regionální a strukturní geologie
geofyzikální měření ve vrtech	sledování fyzikálních vlastností hornin, kapalin, stavu vrtů souborem geofyzikálních metod	ložisková, regionální a strukturní geologie, hydrogeologie, hornictví

Tab. 1. - Geofyzikální metody a jejich oblast aplikace. [2]

Samotná měření se provádějí v předem vytyčeném prostoru, v archeologii se používá vytyčená síť přímek nazývaná profily. V jednotlivých částech tohoto prostoru pak probíhají měření s různou hustotou sítě s ohledem na potřeby daného měření, lokality a archeologické situace. Nesmí být opomenuto, že tyto body, tuto síť je třeba taktéž zmapovat (přesně zaměřit

jejich polohu), aby bylo možné následně přesně zdokumentovat oblast nálezů. V rámci geofyzikálního výzkumu se daná lokalita zkoumá plošně, tzv. plošný výzkum, umožňující vracet se na místa s větším potenciálem (aplikuje se zde hustší síť, tzv. zahušťovací profily).

Cílem archeologů je zjistit při těchto měřeních archeologické objekty, které mívají tu vlastnost, že se během měření projevují odlišně než jejich okolí (magneticky, vodivostí, jiným složením apod.)

Data získávaná během měření se zpracovávají na počítači (vylepšení zobrazení, rozlišení atd.). Výstupem jsou poté diagramy v 1D, 2D či 3D rozlišení. Na základě získaných údajů pak archeologové interpretují zkoumané naleziště.

Fáze geofyzikálního výzkumu uvádí následující tabulka.:

<b>FÁZE VÝZKUMU</b>	<b>HLAVNÍ NÁPLŇ</b>
<b>příprava</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• formulace cílů geofyzikálního měření</li> <li>• zhodnocení dosavadních archeologických informací o lokalitě</li> <li>• informace o prostředí lokality (geologie oblasti, staré mapy, současný reliéf terénu)</li> <li>• informace o současném stavu prostředí na lokalitě a v okolí (aktuální mapy či plány, rušivé vlivy, novodobé aktivity na ploše, stav dochování původního terénu)</li> <li>• výběr vhodné metody (metod) geofyzikálního měření</li> </ul>
<b>terénní práce</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• výběr vhodné metodiky geofyzikálního měření (orientace profilů, síť měření atd.)</li> <li>• vytyčení zájmové plochy (situační či geodetické zaměření, GPS, synchronizace s plány archeologického výzkumu)</li> <li>• testovací geofyzikální měření (úprava metodiky, posouzení rentability průzkumu)</li> <li>• systematický geofyzikální průzkum (při vícedenních měřeních hodnocení průběžných výsledků)</li> <li>• detailní geofyzikální výzkum (opakovaná a podrobná měření vybraných ploch)</li> <li>• odebírání vzorků pro laboratorní geofyzikální měření</li> </ul>
<b>zpracování dat</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• přehrávání dat do PC (zálohování, úpravy i opravy dat před zpracováním)</li> <li>• počítačové zpracování (geofyzikální a geodetické softwary, filtrace dat, GIS)</li> <li>• výstupy měření (2D - mapy, profily, pseudořezy, 3D - zobrazení, zasazení geofyzikálních výsledků do map a plánů, modelování)</li> <li>• interpretace výsledků (srovnání geofyzikálního a archeologického výkladu)</li> </ul>
<b>prezentace a využití výsledků</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• závěrečné zprávy, posudky, zprávy o archeologické akci (ZAA pro archiv ARÚ Praha, resp. zpráva pro Přehledy výzkumů)</li> <li>• publikace, prezentace výsledků (v archeologii, ve sféře památkové péče, na veřejnosti)</li> <li>• propojení výsledků s dalšími metodami archeologického výzkumu (komplexní hodnocení, ověření výsledků)</li> <li>• návrh dalšího postupu průzkumu lokality (doplňková měření, jiné metody)</li> </ul>

Tab. 2. - Fáze výzkumu. [2]

## Fyzikální vlastnosti hornin

Znalost naprosto nezbytná pro správnou aplikaci geofyzikálních metod i následnou interpretaci dat získaných z provedených měření.

Fyzikální vlastnosti hornin zapadajících do zájmových struktur archeologické činnosti byly stanoveny měřením provedeným na vzorcích jak v laboratoři, tak i v terénu. Vzorky hornin, které byly odebrány pro účely laboratorních měření, zde mohou být následně pečlivě prozkoumány z mineralogického hlediska a struktury, ovšem s tou nevýhodou, že takto získané údaje mohou být ovlivněny (porušením přirozeného složení horniny, změnou její vlhkosti, teploty apod.). Přímo v terénu se měření provádějí na známých archeologických strukturách a často se liší od údajů získaných z laboratoře. [3]

Během archeologického průzkumu odebraných vzorků hornin se zaměřujeme na následující fyzikální vlastnosti: přirozená hustota  $\rho_o$  (základní parametr; ovlivněná mineralogickým složením, strukturou a texturou horniny), porozita  $p$  (mladší sedimenty mají oproti těm starším hloubkově závislou vysokou pórovitost), magnetická susceptibilita  $\kappa$ , popřípadě remanentní magnetizace (stejně jako susceptibilita odvisí od obsahu feromagnetických minerálů: magnetit, titanomagnetit, ilmenit, pyrrhotin), dále rychlost šíření podélných elastických vln  $v_p$  a nakonec úhrnná aktivita  $\gamma$  (součet záření různých energií a intenzit řadou radioaktivních prvků, hlavně U, K, Th). Změny fyzikálních parametrů jsou důsledkem změn v látkovém složení, vnitřní stavbě či některým z geologických faktorů (zvětrání). [3]

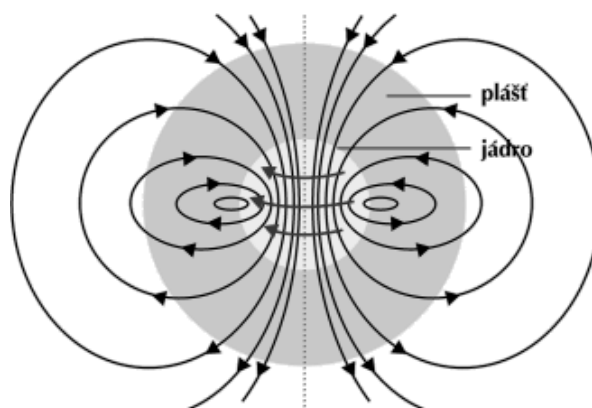
Dále uvedeme odporové vlastnosti půd odvíjející se od jejich složení, vlhkosti, obsahu solí, zuhelnatění a teplotě. Protože písčnatá půda se rozpadá a netvoří hroudy, dešťová voda jí snadno proteče, snadno vysychá a její vodivost je takto snižena, zatímco jílovitá půda udržující vláhu je vodivá (než vyschne). Dále dobře vedou jíly vápenaté. Hlinito-písčnaté, hlinito-jílové či písčito-jílové půdy vodí v závislosti na konkrétním složení a vlhkosti. Nesporně nejvodivější jsou půdy s vysokým podílem humusu.

GEOFYZIKÁLNÍ METODY	FYZIKÁLNÍ VELIČINY	JEDNOTKY
geoelektrické odporové profilování / sondování (SOP, VES)	zdánlivý měrný odpor $\rho_z$	[ $\Omega$ m]
elektromagnetické profilování (DEMP) metoda VDV	zdánlivý měrná vodivost $\gamma_z$ (resp.) zdánlivý měrný odpor $\rho_z$ magn. složky EM-pole $Re$ (nebo) zdánlivý m. odpor $\rho_z + \text{fázový posun } \varphi$	[mS/m] [ $\Omega$ m] Hz/ImHz [%] [ $\Omega$ m] [ $^\circ$ ]
radar (GPR)	průběhový čas $t$ rychlost šíření impulsu v prostředí $v$	[ns] [m/s]
mikrogravimetrie	relativní tíhové zrychlení (resp.) $g$ hustota $\rho$	[ $\mu\text{m/s}^2$ ] [kg/m $^3$ ]
magnetometrické profilování	velikost totálního magn. pole $T$ gradient magnetického pole $\Delta T$	[nT] [nT/m]
měření magn. susceptibility	zdánlivá/objemová magnetická $\kappa$ susceptibilita	[n · 10 $^{-4}$ SI]
radiometrie	expoziční příkon u $\gamma$ -spektrometrie $X$ (nebo) koncentrace K $Q_K$ , U, Th $Q_{U/Th}$	[pA/kg] [%], [ppm]
mělká refrakční seismika	rychlost šíření elastických vln $v_p/v_L$ (resp.) průběhový čas $t$	[m/s] [s]
termometrie	teplota $t$ teplotní gradient $G$	[ $^\circ\text{C}$ ] [ $^\circ\text{C/m}$ ]

Tab. 3 - Jednotlivé metody, jejich zájmové veličiny včetně uvedení jejich jednotek. [2]

## 1.1 Magnetometrie

Zájmem zkoumání je magnetické pole Země a jeho lokální, případně regionální poruchy geomagnetického pole a v tomto případě zkoumání jejich příčin pro potřeby archeologie (skrytý objekt apod.). Anomálie archeologických objektů se pohybují v hodnotách menších, než 10 nT (středová hodnota magnetického pole Země asi  $5 \cdot 10^3$  nT (nano Tesla).



Obr. 1 - Zobrazení magnetického pole Země se siločárami. [4]



Jak už bylo naznačeno, dají se magnetometrická měření v archeologii využít k pátrání po objektech s kamennou konstrukcí, tedy základech staveb, kamenných mohylách, částí valů atd., případně po zahloubených objektech, jakými jsou jámy a příkopy a v neposlední řadě také při pátrání pro „dutých“ prostorách. Magnetometrické metody jsou ideální při vyhledávání a zkoumání zahloubených objektů, jako jsou jámy, palisády či hroby, neboť většina těchto objektů se od svého okolí nejvíce odlišuje právě magnetickými vlastnostmi. Již podle názvu je nasnadě, že metoda je vhodná i pro průzkum oblastí s objekty, v nichž jsou zabudovány materiály s vyšším obsahem magnetických minerálů.

Jako jediná (myšleno z geofyzikálních metod) a navíc perspektivní se dá magnetometrická metoda aplikovat pro zkoumání objektů s vypálenými materiály, tedy pecí, ohnišť, spálených objektů či odpadních hald. Největší podíl na magnetických anomáliích má termoremanentní magnetizace materiálu (velice stabilní), který byl vypálen či opakovaně vystaven vysokým teplotám (cihly, keramika, jíl apod.). Anomálie takto způsobené bývají poměrně výrazné a ve srovnání s anomáliemi vyskytujícími se u zahloubených objektů jsou tak lehce identifikovatelné, přičemž jejich hodnota a velikost závisí na délce tepelnému vystavení zkoumaného objektu. Čím déle je objekt tepelnému namáhání vystaven či čím vyšší byl počet opakovaného vystavení výpalu, tím vyšší dostaneme amplitudy magnetických anomálií.

Plošná měření magnetometrickou metodou lze v průběhu výzkumu ještě doplnit detailním proměřením magnetické susceptibility kapametrem v odkryté archeologické situaci *in situ*<sup>iv</sup>. [2]

Je možné také provést na místě nálezů vzorek a ten následně detailně proměřit v laboratoři (laboratorní magnetometrickou metodou lze provést archeomagnetické datování).

Vzhledem k rychlosti, produktivitě a ekonomičnosti patří mezi nejčastěji aplikované geofyzikální metody.

### **Magnetické vlastnosti hornin**

Horniny o vyšším magnetismu mohou vytvářet lokální magnetické pole a způsobovat anomálie, které se projeví během měření. Přírozená remanentní magnetizace závisí na složení

---

<sup>iv</sup> *In situ* – z latiny, v překladu „na místě“, používané v archeologii ve významu, že je něco na svém původním místě a tam je to i zkoumáno.

horniny, nejedná se tedy o konstantu. Celková magnetizace je vektorovým součtem přirozené magnetizace  $M_n$  a indukované magnetizace  $M_i$  a koeficient  $Q$  udává, kolikrát k celkové magnetizaci přispívá vektor  $M_n$ . Tuto skutečnost vyjádříme vztahem:

$$Q = \frac{M_n}{M_i}. \quad [4]$$

Magnetismus hornin závisí na výskytu feromagnetických minerálů v hornině (dle indukované magnetizace lze horniny dělit na diamagnetické se zápornou susceptibilitou, paramagnetické s intenzitou rovnou primárnímu poli a feromagnetické s vysokou a kladnou susceptibilitou). [4]

### 1.1.1 Měření

Díky úrovni a technologiím magnetometrického zkoumání je v současné době možné provést měření v krátkém časovém úseku a provést tak proměření i rozsáhlých ploch a přitom podrobně sledovat jejich detailní charakteristiku.

Pro tato měření máme následující základní veličiny: absolutní či relativní totální magnetické pole  $T$ , jeho (vertikální) gradient<sup>v</sup>  $\Delta T$  resp. zdánlivá či objemová magnetická susceptibilita  $\kappa^{vi}$ . Její měření probíhá kontaktním způsobem a hodnoty získané měřením můžeme uvažovat jen pro několikacentimetrový okruh. Hodnota totálního magnetického pole bývá obvykle souhrnem faktorů působících v okolí měřicího přístroje, proto se zde projevují i faktory působící ve větší hloubce a také vnější zdroje. Na měření mohou mít nepříznivý vliv silné magnetické zdroje, i když se nacházejí ve větší vzdálenosti od měřicí aparatury. Příkladem takového zdroje je vedení vysokého napětí. Hodnotu magnetického pole ovlivňuje obsah feromagnetických<sup>vii</sup> minerálů, chemické složení, obsah organických složek v hornině nebo půdě v oblasti našeho měření.

V měření se nám bude promítat jak přirozená remanentní<sup>viii</sup> magnetizace hornin a půd, tak i vliv vnější termoremanentní magnetizace, podmíněné intenzitou a délkou zahřátí materiálu.

---

<sup>v</sup> Gradient – rozdíl mezi naměřenou hodnotou blíže k povrchu a hodnotou naměřenou ve větší vzdálenosti.

<sup>vi</sup> Susceptibilita - magnetismus určitého materiálu, jeho schopnost magnetizovat se.

<sup>vii</sup> Feromagnetika - látky značně zesilují magnetické pole, do kterého jsou vloženy.

<sup>viii</sup> Magnetická remanence – zbytek magnetismu, který si podrží feromagnetický materiál, když bylo dosaženo nasycení magnetizace, jestliže vnější magnetické pole je redukováno na nulovou hodnotu z hodnoty dostatečné k nasycení.

Vektor celkové magnetizace horniny je vyjádřen jako:

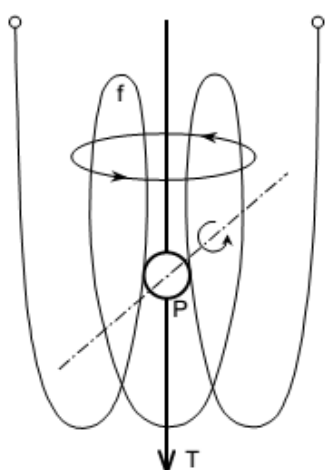
$$\vec{M} = \vec{M}_i + \vec{M}_r = \kappa \cdot \vec{T} + \vec{M}_r, [4]$$

kde  $\vec{M}_i$  představuje vektor indukované magnetizace a  $\vec{M}_r$  vektor remanentní magnetizace (získáme při krystalizaci magnetitu),  $\vec{T}$  totální vektor intenzity současného zemského magnetického pole a  $\kappa$  magnetická susceptibilita (závislost na složení horniny, u diamagnetických minerálů záporná hodnota  $10^{-6}$  až  $10^{-5}$ , u paramagnetických  $10^{-5}$  až  $10^{-3}$  a u látek feromagnetických se dostává až na hodnoty řádově  $5 \cdot 10^4$ ). [5]

## Magnetometry

Přístroje, které se k měření používají, se nazývají magnetometry. Existuje několik variant těchto přístrojů: protonové magnetometry k měření magnetického pole, gradiometry. K měření magnetické susceptibility se používá tzv. kapametr. [2] Citlivost kapametrů se dnes pohybuje v řádu  $10^{-8}$ . Změření jednoho vzorku trvá 2 - 3 minuty.

K používanějším magnetometrům patří i gradiometry měřící magnetický gradient  $G$ . Jejich konstrukce sestává ze sondy, v níž jsou od sebe na určité vzdálenosti umístěny dva senzory, na nichž naměřené hodnoty se od sebe odečítají, čímž dostaneme diferenciální gradient. Takováto soustava do určité míry kompenzuje přirozené výkyvy geomagnetického pole. Hodnota gradientu  $G$  je často velmi malá, proto je nezbytné, aby součástí měřicího přístroje byly velmi citlivé detektory, což není v současné době problém.



Obr. 2 - Schéma principu fungování protonového magnetometru. [5]

V současnosti se používají především protonové magnetometry (precesní) schopné změřit absolutní hodnoty magnetického pole v řádu nT. Fungují na principu polarizace os rotace protonů vloženým polem cívky do směru její osy. V okamžiku, kdy je polarizační impuls vypnut dojde k návratu osy rotace protonu (na obrázku P) do směru totálního vektoru zemského magnetického pole  $T$ . Tyto magnetometry nahradily starší, pomalejší a ještě méně přesné magnetické váhy, ať šlo o váhy torzní či břitové. Přesněji by konstrukce magnetometru vypadala následovně. Jádra vodíku

v kapalině (nachází se v uzavřené nádobě), která je bohatá na vodík, se zde chovají jako malé magnetické dipóly. Tyto magnety se zde dočasně polarizují, jak již bylo zmíněno výše, působením silného magnetického pole generovaného cívkou. Po vypnutí polarizačního proudu se protony opět přizpůsobí vnějšímu magnetickému poli a generují v cívce signál o frekvenci úměrné indukci tohoto pole. Rozlišovací schopnost těchto přístrojů se pohybuje kolem 0,1 nT a registrace geomagnetického pole trvá několik sekund. [4]

Měření je prováděno v pravidelné síti profilů a bodů s hustotou rozložení odvíjející se od potřeb daného měření a lokality, kde je realizováno.

Paralelně k samotnému měření se provádí také ve vhodném bodě na neporušeném území registrace krátkodobých variací, tedy časových změn elektromagnetického pole, které jsou důsledkem magnetického efektu systému elektrických proudů v ionosféře. Tato měření se pak využívají ke korekci šumů. Měření se provádí v pravidelných intervalech, přičemž krok registrace se v závislosti na velikosti krátkoperiodických poruch (pulsace, průmyslové proudy) pohybuje v intervalu 30 – 120 s. [3]

Normální relativní pole  $T_{nr}$  zjišťujeme pro každou naměřenou plochu statisticky (maximum Gaussovy křivky rozdělí četnosti naměřených dat).

$$\Delta T = T_{mr} - T_{nr} \quad [3]$$

V uvedeném vzorci  $T_{mr}$  představuje relativní hodnotu geomagnetického pole opravenou s ohledem na vliv variací.

### **Interpretace měření**

Anomálie zjištěného totálního vektoru magnetického pole se interpretuje kvalitativně či kvantitativně. V prvním případě provádí archeolog vyhodnocení rozdělením naměřeného pole na jednotlivé anomálie lokální (archeologické objekty, různé zdroje rušení), dále regionální (hlubší geologické zdroje) a nakonec na anomálie vyvolané šumem (umělé zdroje, nepřesnosti měření apod.).

Separace archeologicky zájmových anomálií se dá provádět více způsoby. Lze tak učinit měřením na vysoké tyči či za pomoci matematických metod. V rámci matematických metod

by se jednalo např. o konvoluce<sup>ix</sup> ve volitelném klouzajícím okně podle Griffinova vzorce, dále polynomiální aproximací<sup>x</sup> apod.. [3]

Následuje Griffinův vzorec definující separaci tíhového pole na reziduální a regionální složky:

$$\Delta T_{reg} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N A_i, \quad [3]$$

kde  $A_i$  představuje hodnoty anomálií  $\Delta T$  ve vybraných  $N$  bodech čtvercové sítě s krokem  $s$ .

Odtud pak:

$$\Delta T_{rez} = \Delta T_{měř} - \Delta T_{reg}, \quad [3]$$

kde  $\Delta T_{rez}$  je pole původních hodnot anomálií.

Hodnoty se následně různě zpracovávají podle potřeb konkrétní archeologické situace a charakteristik provedeného měření.

Kvantitativní interpretace je řešení obrácené úlohy. Ta spočívá v nalezení parametrů hledaných zdrojů magnetických anomálií (tvar, hloubka, poloha, rozměry). Možná je buď přímá analýza naměřených dat, nebo analýza odvozených dat.

### 1.1.2 Příklady aplikace metody

Měření proběhla, kromě níže uvedených příkladů také v Sedleci (okres České Budějovice) při identifikaci rozorávaných relikvů zahloubených sídlištních objektů z doby římské. Zkoumaná plocha měla rozlohu asi 2,1 ha. Dále se takto měřilo v Hvožděanech (okres Tábor) na části sídliště z doby bronzové. Zkoumaná plocha měla rozměry 45 x 80 m. V Březnicích (okres Tábor) napomohla magnetometrická měření při identifikaci silně vypálených výplní úzkých žlabů a dalšího osídlení na rozoraném sídlišti z doby bronzové. [6]

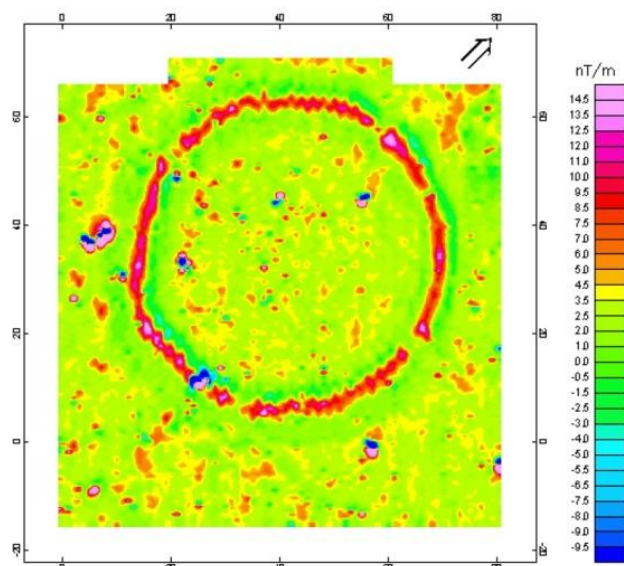
#### Rondel z Želíz na Mělnicku

Účelem geofyzikálního výzkumu bylo prokázat předpokládanou existenci rondelu. Provedeno tak bylo za pomoci magnetometrického průzkumu. Měření existenci prokázalo.

---

<sup>ix</sup> Konvoluce – matematická operace kombinující dva signály tak, aby vznikl signál třetí.

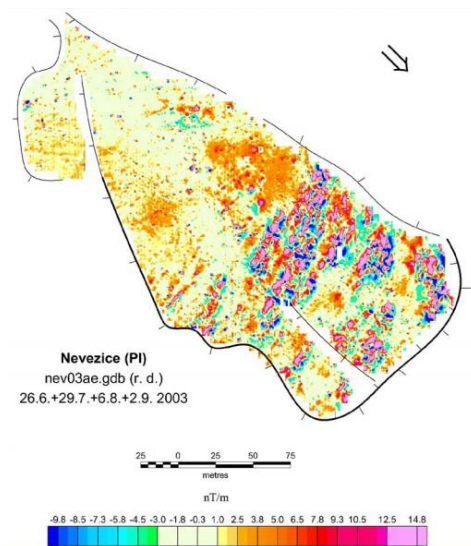
<sup>x</sup> Polynomiální aproximace – v rámci tzv. polynomiální regrese se provede proložení (aproximace) zadaných hodnot polynomem (mnohočlen).



**Obr. 3 - Zobrazení rondelu získané magnetometrickým měřením. [19]**

### Pozůstatky osídlení na oppidu Nevězice na Písecku

V tomto případě bylo úkolem archeologů za pomoci geofyzikálních metod prozkoumat větší část oppida Nevězice na Písecku. Z naměřených hodnot archeologové identifikovali pozůstatky obydlí, komunikací, dokonce náznaky vnitřního členění tohoto oppida. Podařilo se zmapovat i stopy geologických změn této lokality. V oblasti o velikosti 1,5 ha byl magnetometrický průzkum úspěšný také v nalezení komunikace, která z oppida v době laténské vedla.



**Obr. 4 - Oppidum Nevězice na Písecku, reálný výstup měření pomocí magnetometrie. [19]**

## 1.2 Gravimetrie

Tato metoda se zaměřuje na změny tíhového pole Země v závislosti na rozložení hmot s odlišnými hustotami geologického prostředí. Pro potřeby archeologie sleduje tyto aspekty čistě v zemské kůře (ne v zemském nitru). Gravimetrie je nápomocná při pátrání po nevyplněných prostorách, jako jsou dutiny, hrobky, krypty, sklepy chodby apod.. Tyto prostory jsou pomocí gravimetrických měření identifikovány díky rozlišení jejich fyzikálních vlastností, případně sekundárně fyzikálními vlastnostmi jejich výplně (voda apod.).

Pro proměrování malých plocha a hloubek, stejně jako objektů malých rozměrů je nevhodnější metoda mikrogravimetrie (velká hustota bodů průzkumného pole).

### Tíhové zrychlení $\vec{g}$

Tíhové zrychlení je definováno jako vektorový součet gravitačního a odstředivého zrychlení vyvolaného hmotou Země a její rotací. Tíže se mění v homogenním prostředí s nadmořskou a zeměpisnou šířkou zatímco v nehomogenním prostředí jsou změny ovlivňovány hustotními nehomogenitami vyskytujícími se v okolí proměřovaného bodu.

Tíhový účinek anomálních přípovrchových hustotních nehomogenit získáme z naměřené tíže odečtením teoretického tíhového účinku homogenní Země a také redukcí tíže na danou nadmořskou výšku. Výsledek pak označujeme jako tíhovou anomálii. [3]

### 1.2.1 Měření

Gravimetrická měření věnují pozornost především relativnímu tíhovému zrychlení  $g_r$ , případně hustotě hornin  $\rho$  (závislá na zaplnění sledovaných prostor, mineralogickém složení, struktuře, textuře, stupni diagenese<sup>xi</sup>, nevětrání či metamorfóze hornin). [2]

Fyzikálním základem pro gravimetrii jsou gravitační zákon a druhý Newtonův zákon (pohybový). Z těchto zákonů pro nás vyplývá vztah mezi gravitačním (tíhovým) zrychlením, gravitační konstantou  $\kappa$  ( $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$ ), dále objemem  $V$  tělesa, které působí tíhový účinek, dále hustotou tělesa  $\rho$  a vzdáleností tohoto tělesa od bodu pozorování.

---

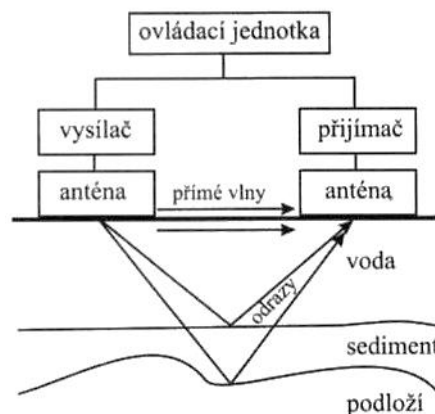
<sup>xi</sup> Diagenese – zpevnění nesoudržných usazenin za nízké teploty nerostným tmelem (vápenitým, křemičitým, železitým) nad slehnutím.

Tento vztah je vyjádřen následovně:

$$g_r = \kappa \cdot \frac{\rho \cdot V}{r^2} \cdot [4]$$

## Gravimetr

Měřicí přístroj, v tomto případě gravimetr, jehož základním konstrukčním prvkem je vahadlo (mechanický gravimetr) na jehož konci je umístěna hmota  $m$ . Otočnou osou pro vahadlo je torzní vlákno v horizontální poloze, děje se tak hlavní pružinou. Poloha, ve které se systém během měření nachází je odpovídající součtu všech hustotních nehomogenit, na něž působí hmotnost  $m$ . Rozlišovací schopnost gravimetru závisí na velikosti nehomogenity, konkrétně je dána jejím poměrem k bodu měření (obvykle k její hloubce úměrně  $\frac{1}{r^2}$ ) a dále hustotním kontrastem vzhledem k okolnímu prostředí. [5] Přístroje jsou vyráběny tak, aby byly dobře tepelně kompenzované, aby byly minimálně závislé na barometrických změnách a také na orientaci k magnetickému severu.



Obr. 5 - Schéma funkce gravimetru. [4]

## Interpretace naměřených dat

Důležitá je řádná interpretace tíhových anomálií. Hlavním úkolem je oddělit užitečné anomálie od relativně hladkého pozadí vyvolaného hlubšími nehomogenitami a také



rozsáhlejšími nehomogenitami a v neposlední řadě je nezbytné oddělit šum vznikající náhodnými chybami měření. Problémem bývá skutečnost, že amplituda i vlnová délka vyvolaná hledanými anomáliemi je často blízká hodnotám šumu. Úkolem archeologa je velmi pečlivě tyto jevy oddělit. Superpozice tíhových účinků hustotních nehomogenit je zanesena v mapě tíhových izonomál<sup>xii</sup>. [3]

Pro separaci pro archeology podstatných anomálií je možné použít metody odečítání tíhových účinků známých nehomogenit od naměřených tíhových anomálií, metody grafické separace jednotlivých anomálií nebo je to možné metodou aproximace tíhového pole plochou polynomu n-tého stupně použitá opakovaně. Poslední možností je vynechání anomálních bodů. [3]

Součástí interpretace je také modelování tíhového účinku známých nebo předpokládaných hustotních nehomogenit odpovídajících skutečným horninám či archeologickým objektům v jejich okolí. [3]

### **1.2.2 Příklady aplikace metody**

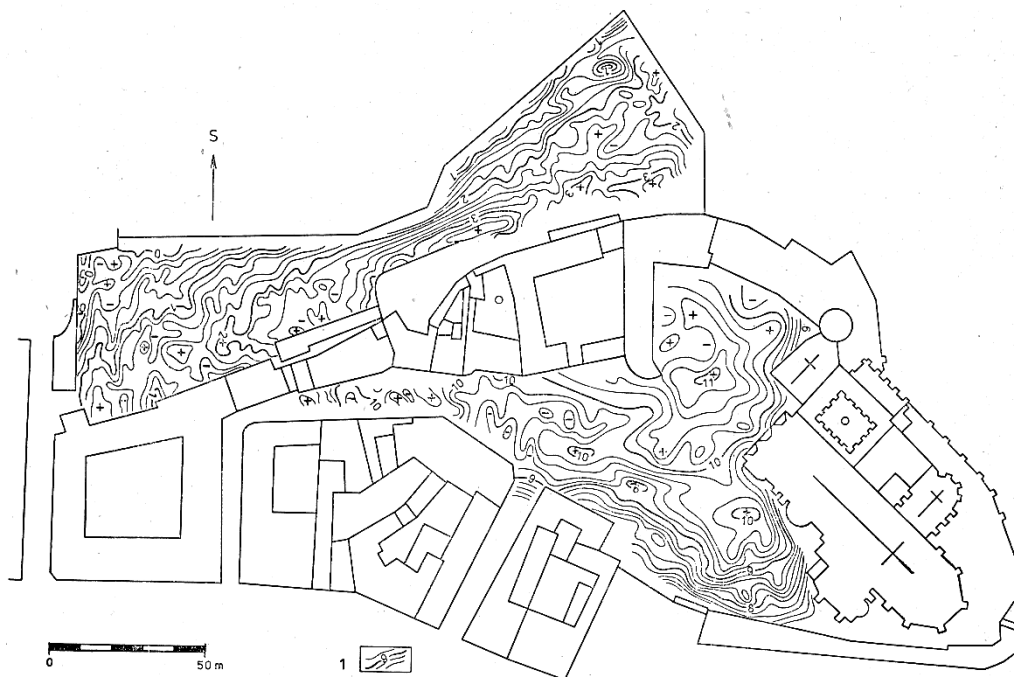
Gravimetrií bylo měřeno na dómském návrší v Olomouci (viz níže), dále např. v Sovinci (okres Bruntál) v areálu hradu, opět mikrogravimetricky.

#### **Dómské návrší a přilehlé dělostřelecké šance v Olomouci**

Průzkum zde byl realizován roku 1978 po dobu dvou měsíců a to konkrétně formou mikrogravimetrie. Cílem tohoto průzkumu bylo určit polohu předpokládaných chodeb. Z měření byla sestavena mapa tíhových izanomál, na jejímž základě byl prováděn další průzkum. Bylo prokázáno, že anomálie jsou v okolí bastionu důsledkem existence chodeb částečně či úplně průchozími, dutinami, jež jsou pozůstatkem zhroutených chodeb či malých vojenských shromaždišť. Mikrogravimetrie prokázala i chodby z hradu do šance a zbytky gotického zdiva. [3]

---

<sup>xii</sup> Izonomála - čára spojující místa stejné velikosti geofyzikální anomálie.



Obr. 6 - Olomouc. Mikrogravimetrický průzkum dómského návrší a přilehlé dělostřelecké šance. 1 - tíhové izonomály [ $\mu\text{ms}^{-2}$ ]. [3]

### 1.3 Geoelektrické metody

Pod tímto pojmem se skrývá hned několik odlišných metod. Všeobecně fungují na principu hledání lokálních odchylek elektrického pole Země prostřednictvím, jak přirozených, tak i umělých geoelektrických polí. Pod pojmem přirozených si představme stejnosměrné odporové metody či elektrochemickou metodu polarizace, zatímco pod pojmem umělých elektromagnetické metody a elektrochemickou metodu vyzvané polarizace. [2]

Geoelektrické metody jsou nejrozsáhlejší průzkumnou skupinou geofyzikálních metod. Dále jsou uvedeny ty metody, které mají své uplatnění v archeologii.

#### 1.3.1 Stejnosměrné odporové metody

Tyto metody, vhodné spíše pro proměrování menších ploch a výraznějších objektů, jsou založené na odlišnosti měrného odporu, resp. vodivosti (případně magnetické susceptibility  $\kappa$ ) výplní zahloubených objektů, což nám umožňuje sledovat podpovrchové situace i ve větších hloubkách. Geoelektrické odporové metody aplikované na vyhledávání větších lineárních objektů ve větších hloubkách vyžadují delší roztažení elektrod.

Měrné vodivosti, resp. odpory půd, jsou podstatně závislé, kromě jiného, na mineralogickém složení, zrnitosti a vlhkosti půd, protože např. šterkopísky jsou nevodivé, zatímco humosní hlinité půdy jsou vodivé. Různě vodou nasycené horniny mají za následek různé výsledky odporových měření (ovlivňuje i roční období a úhrn srážek). Příkladem jsou vysokoodporové nevodivé kamenné objekty, které jsou v oblastech bohatých na srážky dobře odlišitelné v porovnání s vodivými zahloubenými objekty (v suchých obdobích a na srážkový úhrn chudých oblastech je to obráceně).

Stejnoseměrné metody se aplikují pro potřeby podrobného a systematického průzkumu vybraných částí zkoumaných lokalit, ideálně v kombinaci s magnetometrickým proměřováním. Protože tyto metody jsou archeology aplikovány poměrně často, bude věnován větší prostor i jejich fyzikálnímu základu ve větší šíři.

### **Fyzikální základ**

Již podle názvu metody, základem bude veličina nazývaná elektrický odpor, jehož jednotkou je ohm [ $\Omega$ ]. Tato veličina vyjadřuje schopnost bránit průchodu elektrickému proudu  $I$ , jehož jednotkou je ampér [A]. Pro měření aplikovaná archeology v rámci geoelektrických metod je objektem zájmu především tzv. měrný elektrický odpor<sup>xiii</sup>, udávající fyzikální vlastnosti materiálu v tomto směru. Udáván bývá v jednotkách, ohm-metrech [ $\Omega \cdot m$ ]. Jeho rozměr a velikost určuje vztah mezi odporem vodiče  $R$ , délkou vodiče  $l$ , déle průřezem vodiče  $S$  a měrným odporem  $\rho$ :

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad [4]$$

Velikost měrného odporu ovlivňuje teplota (čím vyšší teplota tím vyšší hodnota odporu).

Někdy je namísto měrného odporu udávána měrní vodivost neboli konduktivita (jeho převrácená hodnota). Udává se obvykle v jednotkách siemens na metr [ $S \cdot m^{-1}$ ].

Vyjádřená vztahem:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

---

<sup>xiii</sup> Měrný odpor - fyzikální veličina, odpor vodiče jednotkové délky (1m) a jednotkového průřezu (1m<sup>2</sup>).

Elektrická vodivost patří k nevelkému množství látek, jejichž fyzikální vlastnosti se mění v tak širokém rozmezí.

U homogenních látek bývá dobře splněna platnost Ohmova zákona  $U = I \cdot R$ , kde  $U$  je elektrické napětí,  $I$  elektrický proud a  $R$  elektrický odpor až do vysokých hodnot elektrického pole. V reálné lokalitě, kde archeologové provádějí svá měření je homogenita prostředí často nesplněna.

Izotropní materiál má stejný měrný odpor ve všech směrech. Většina hornin je přiměřeně izotropní, ovšem velmi často se vyskytnou i horniny anizotropní<sup>xiv</sup> kladoucí v různých směrech různě velký odpor. Proto se pro anizotropní prostředí zavádí koeficient anizotropie, který je vyjádřen následovně:

$$\rho_m = \sqrt{\rho_t \cdot \rho_l} \quad [4]$$

Je zde příčný měrný odpor v kolmém směru k vrstevnatosti  $r_t$  a odpor paralelní s vrstevnatostí nazývaný podélná měrná odpor  $r_l$ .

Dále by bylo vhodné zmínit relativní permitivitu  $\epsilon_r$ . Jedná se o konstantu vyjadřující, kolikrát se elektrická síla zmenší, pokud jsou tělesa s elektrickým nábojem místo ve vakuu umístěna do látkového prostředí.

## Měření

Veličina, kterou tyto metody sledují, se nazývá zdánlivý měrný odpor  $\rho_z$ <sup>xv</sup>. Pokud použijeme dvě proudové elektrody, označme je A a B, dvě potenciálové elektrody označené M a N, získáme tak vyhodnocení dat (když měříme nad odporově homogenními horninami) hodnoty tohoto zdánlivého měrného odporu. [4]

Vyjádřeno rovnicí:

$$\rho_z = k \cdot \frac{\Delta U}{I}$$

---

<sup>xiv</sup> Anizotropie – vlastnost krystalů, které na rozdíl od izotropních, mají ve směru svých os různé fyzikální, případně chemické vlastnosti.

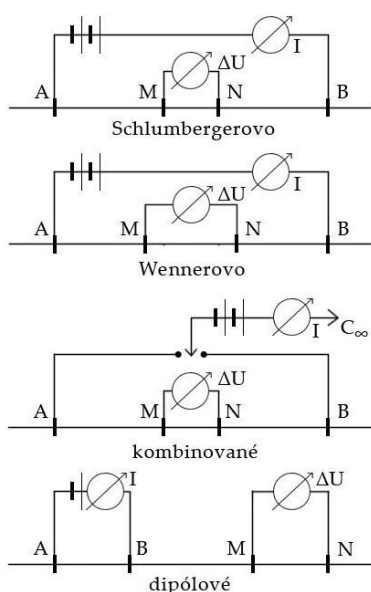
<sup>xv</sup> Zdánlivý – respektive relativní, znamená, že je vztažen k určitému prostředí.

kde  $\Delta U$  je měrné napětí,  $I$  měrný elektrický proud a  $k$  konstanta vyjadřující uspořádání elektrod, závislá na vzdálenostech mezi jednotlivými elektrodami. Tuto konstantu bychom vyjádřili následovně:

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{AN}} \quad [4]$$

Dříve používané geoelektrické odporové metody nelze aplikovat na velkou plochu, neboť jsou náročné jak časově, tak i finančně a personálně, proto byly aplikovány jen na oblasti o rozloze v řádu zlomků hektarů. Pravdou však je, že tyto metody umožňovaly sledovat naměřené hodnoty pro více hloubkových úrovní, což je dáno vzdálenostmi mezi elektrodami, a nesporná je také jejich velká přesnost a možnost vertikálního elektrického sondování. V současnosti už jsou k dispozici mobilní aparatury s pamětí o velké kapacitě umožňující archeologům měření větších ploch.

Geoelektrické odporové měření funguje, již podle názvu za využití stejnosměrného proudu. Konstrukce měřící aparatury je v zásadě jednoduchá. Sestává z několika elektrod (počty se liší



**Obr. 7 - Základní schémata uspořádání elektrod používaná v archeologii. [3]**

přístroj od přístroje od několika kusů až po několik desítek elektrod) umístěných v zemi v pevných vzdálenostech od sebe (tvoří jednu linii). Elektrody jsou v geoarcheologických aparaturách v podstatě kovové hřeby, přes něž je pouštěn zmíněný stejnosměrný proud a voltmetr pak zaznamená napětí mezi jednotlivými elektrodami. Na základě těchto údajů je pak stanovena rezistivita, tedy odpor. Pro toto měření existují různá schémata (např. Schlumbergerovo, Wennerovo). Důvodem je potřeba lepších výsledků potenciálové diference za použití čtyř elektrod v jednom bodě.

Odporové metody se dále dělí na sondážní a profilovací. V archeologii se často používá metoda vertikálního odporového profilování (VES).

### **1.3.2 Příklady aplikace metod**

Vzhledem k tomu, že tyto metody patří k nejčastěji používaným, lokalit, kde byl s jejich pomocí realizován archeologický výzkum je mnoho. Podrobné popisy jednotlivých nalezišť a postupu při práci lze najít v literatuře. Velký prostor jim byl věnován v sice starší, přesto zajímavé publikaci Vladimíra Haška a Zdeňka Měřinského Geofyzikální metody v archeologii na Moravě [3] či novější publikaci Ondřeje Chvojky Archeologické prospekce a nedestruktivní archeologie [6].

#### **Staré Brno, okres Brno**

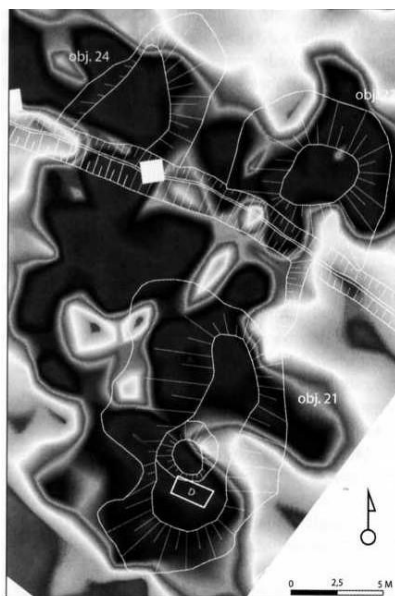
Za pomoci geoelektrických metod byl prováděn archeologický výzkum např. pro Muzeum města Brno na domovních parcelách na Starém městě v Brně. Jeho úkolem bylo zjistit pokračování, již odkryté vrstvy do červena propáleného jílu. Provedeno bylo konkrétně měření zdánlivé vodivosti na sedmi profilech při kroku 1m. Z údajů, které měření poskytla, archeologové vydedukovali, že se zřejmě jedná o tělesa valu a příkopy. [3]

#### **Mohyla z raného (?) středověku v Želeči**

V Želeči (okres Tábor) došlo roku 2008 k objevu většího pohřebiště, jehož součástí byla i mohyla. Měření proběhlo geoelektrickou odporovou metodou. Měření měla ukázat vnitřní konstrukci mohyly a případná zájmová místa pro další výzkum. Měření odhalila pravděpodobné pozůstatky vnitřní kamenné konstrukce. [6]

#### **Plochy mezi usedlostmi na zaniklé středověké vesnici Žďár (okres České Budějovice)**

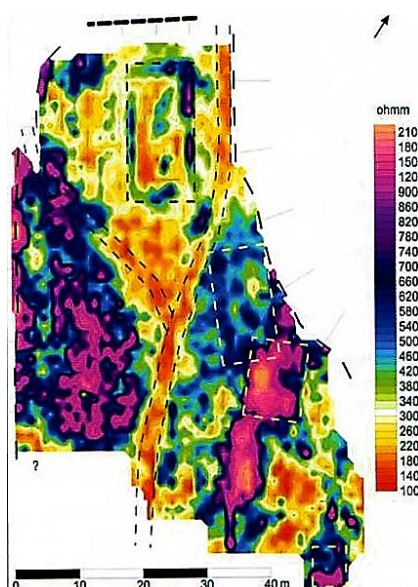
Výsledky průzkumu této zajímavé archeologické situace pod povrchem odhalily jámy, pozůstatky stěn nějakého objektu, fragmentovanou keramiku. [6]



Obr. 8 - Výsledky geoelektrického odporového měření v podobě mapy izonomál zdánlivých měrných odporů. [6]

### Přiběničky (okres Tábor)

Zkoumání bylo zacíleno na oblast zaniklého hradu v podmínkách poměrně členitého terénu, proto byla měření provedena ve vytipovaných, relativně dobře dostupných oblastech. Konkrétně se zde jednalo o metodu mělkého symetrického odporového profilování. Variabilita nízkých a vysokých odporů odhalila několik míst pravděpodobných zbytků osídlení. Na obrázku zkoumaná plocha měla rozměr asi 35 – 75 m.



Obr. 9 - Identifikace kamenných destrukcí po možném osídlení a linií komunikací. [6]

### 1.3.3 Elektromagnetické metody

Stejně jako předchozí metoda jsou elektromagnetické metody měření vhodné pro zkoumání menších ploch a výraznějších objektů (např. průzkum objektů s kamennou konstrukcí).

Předmětem zájmu těchto metod jsou: zdánlivá měrná vodivost  $\gamma_z$ , relativní permitivita  $\epsilon_r$ , pro radar to může být rychlost šíření impulsu v prostředí  $v$ . Hodnoty všech těchto veličin, bývají závislé na vodivosti vyskytujících se minerálů, struktuře, pórovitosti a textuře hornin, případně jejich puklinatosti, navětrání nebo jejich nasycení vodou.

V současnosti mají archeologové k dispozici elektromagnetické měřicí aparatury, které jim umožňují bezkontaktní měření, díky čemuž je měření rychlejší. Problémem těchto aparatur je nižší rozlišení, dále také hloubkový limit daný pevnou vzdáleností zdrojové a měřicí cívky a větší citlivostí na rušivá elektromagnetická pole a bodové náboje. [2]

Směrem do hloubky také dochází k absorpci elektromagnetických vln. Maximální hloubka, které lze dosáhnout (při nižších frekvencích s větším rozlišením) je asi 500 m. Redukce amplitudy do hloubky je exponenciální. Z tohoto důvodu je zaváděna tzv. kořenová hloubka, tedy vzdálenost, kdy dojde ke zmenšení amplitudy o  $\frac{1}{e}$  a tato hloubka je potom vyjádřena vztahem:

$$\text{Kořenová hloubka (m)} = 500 \cdot \sqrt{\frac{1}{\sigma \cdot v}} = \sqrt{\frac{\lambda}{\sigma \cdot v}} = 500 = \sqrt{\frac{\rho}{f}} = \sqrt{\frac{\rho \lambda}{v}} \quad [4]$$

Zastoupena je tu konduktivita  $\sigma$ , rychlost světla  $v$ , vlnová délka  $\lambda$ , frekvence  $f$  a měrný odpor  $\rho$ .

#### Georadar

Měření, které se dá zařadit mezi geoelektrické reflexní metody, archeologové používají při mělké podpovrchové prospekci. Dokáže provádět měření odlišných elektromagnetických vlastností v hloubce až několika metrů. Výstup měření vypovídá o změně ve složení materiálu či změnách profilu.

Tento přístroj funguje na základě opakovaného šíření elektromagnetických impulsů produkovaných vysílací anténou (rozmezí od 25 do 1000 MHz) do podloží, kde dojde k jejich



odrazu na různých rozhraních a na povrchu pak přístroj registruje jejich odezvu. Rychlost jakou se impulsy v podloží (konkrétně na elektrické konduktivitě, tedy vodivosti a dielektrické konstantě) šíří je ovlivněna dielektrickými vlastnostmi podloží a frekvenci  $f$  vysílací antény.

Registrace je zajištěna přijímací anténou. Oblast, z níž je ke georadaru emitována většina odražené energie se nazývá první Fresnelova zóna a nachází se pod samotným měřicím přístrojem. Poloměr této oblasti udává vlnová délka vysílaných impulsů  $\lambda$ , dále rychlost  $v$  a nakonec také hloubka, v níž se nachází odrazová plocha. [4] Závislost vlnové délky  $\lambda$  na použité frekvenci  $f$  je podle vztahu, kde  $v$  bude rychlost světla:

$$v = \lambda \cdot f \quad [4]$$

Časový záznam vysílaného impulsu se nazývá stopa a výsledný model se označuje radagram.

Materiál	Relativní permitivita $\epsilon_r$	Konduktivita	Rychlost	Vlnová délka $\lambda$	
				Frekvence 50 Hz	Frekvence 1000 Hz
vzduch	1	0	0,30	6	0,3
voda	81	0,5	0,033	0,66	0,033
mořská voda	81	3000	0,01	0,2	0,01
led	3,2	0,01	0,16	3,2	0,16
nasycený jíl	25-40	50-100	0,5-0,6	10-12	0,5-0,6
granit	4-6	0,01	0,1-0,12	2-2,4	0,1-0,12
vápenec	4-8	0,5-2	0,1-0,12	2-2,4	0,1-0,12
nenasycený písek	3-6	0,01	0,15	3	0,15
nasycený písek	20-30	0,1-1	0,06	1,2	0,06
břidlice	5-15	1-100	0,09	1,8	0,09
prachovec	5-30	1-100	0,07	1,4	0,07

Tab. 4. - Rychlost šíření elektromagnetických vln, permitivita a konduktivita v různých prostředích. [4]

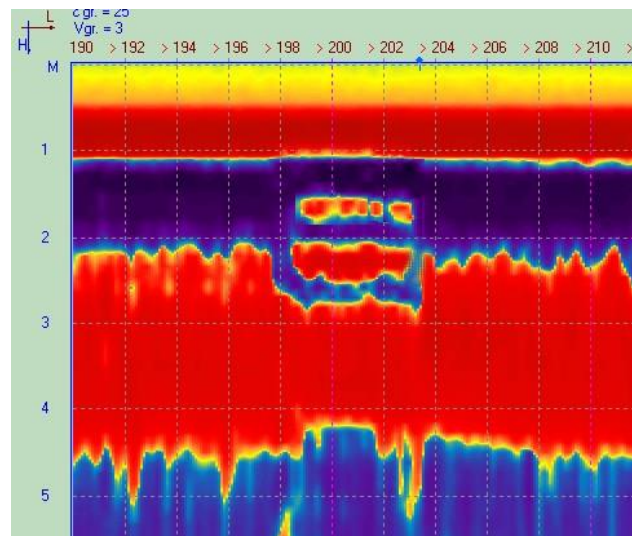
Funkce georadaru je založena na konstrukci sestávající z vysílače a přijímače. Vysílač, čili anténa, produkuje elektromagnetické vlny vznikající transformací elektrického signálu vydávaného napájecím vedením. Impulsy emitované anténou jsou extrémně krátké, řádově se jedná o nanosekundy ( $10^{-9}$ s). Jak už bylo zmíněno výše, rozsah vysílané frekvence  $f$  se pohybuje mezi 25-1000 MHz, přičemž nízké frekvence umožňují lepší prostorové rozlišení, než standardní geofyzikální techniky. Odražené vlny detekuje přijímací anténa. V konstrukci jsou možné dvě variace. První, kdy vysílač i přijímač je jedna anténa a druhá, kdy vysílač

a přijímač jsou dva samostatné boxy. Anténa se v průběhu měření posouvá podél profilové linie, měření se opakuje ve spojitých intervalech a jeho výsledkem je 2D podpovrchové zobrazení. K tomuto zobrazení slouží ovládací jednotka převádějící přijímaná elektromagnetický signál v reálném čase do obrazovkové podoby a umožňuje tak přímou vizuální kontrolu během proměřování. Jednotka je napájena baterií, proto nesmí tým archeologů provádějící měření nikdy zapomenout a náhradní zdroj (baterii). [4]

### 1.3.4 Příklady aplikace metod

#### Hroby na Hané na Jižní Moravě

V tomto prostoru bylo nalezeno velké množství bronzových předmětů a keramiky. V oblasti byl nejdříve proveden orientační průzkum. Podrobné měření bylo následně provedeno georadarem Loza se zvolenou frekvencí 200 MHz a posunem antén po 10 cm. Zachyceny byly větší objekty (zřejmě hroby, obydlí, jámy). Objekty se nacházejí v hloubce 2-2,5 m a jsou dobře rozeznatelné. Na základě výsledků bylo rozhodnuto o provedení podrobnějšího průzkumu.



Obr. 10 - Měření geraddarem. Na obrázku jsou zřejmě vidět hroby. [7]

## 1.4 Seismické metody

Základem těchto metod je práce s uměle vytvořenými elastickými vlnami v zemském tělese. Podle „typu“ vln se jedná, v případě odražené vyvolané vlny o reflexní seismiku, nebo v případě lomené vlny o refrakční seismiku. V archeologii se využívají omezeně.

Odpálením velmi malé nálože dojde k vytvoření seismických vln<sup>xvi</sup>, na jejichž následné deformaci zjistíme anomálie, charakter daného zkoumaného terénu.

Nehomogenní jednotky oddělují rozhraní a v jejich důsledku dochází ke změně chování seismických vln, a právě tyto změny jsou předmětem archeologovy pozornosti.

### Refrakční seismika

Refrakční seismika se dá využít např. při průzkumech objektů ukrytých pod zemí s kamennou konstrukcí či objektů exploatačních center (užitkových) jako jsou šachty či štoly. Konkrétně mělká refrakční seismika je vhodná pro zkoumání nezaplňených objektů o hloubce více než 10 m. Měří se na podélných a příčných profilech. Podle reakce po průchodu přes rozhraní dochází k lomu, odrazu či přeměně, v některých případech vlna pokrčuje přes rozhraní.

#### 1.4.1 Měření

V tomto případě se sledují veličiny: rychlost šíření podélných a příčných vln  $v_p/v_L$  nebo průběhový čas  $t$  (veličiny závislé na struktuře, mineralogickém složení, zrnitosti hornin a nasycení jejich pórů vodou). [2]

Rychlost šíření seismických vln je závislá na prostředí, ve kterém se pohybují. Šíření není přímočaré, vlivem nehomogenity reálného prostředí dochází k zakřivování, lomu či odrazu.

Rychlost šíření seismických vln je dána vztahem:

$$v_p = \sqrt{\frac{j}{\rho}} \cdot v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Rychlost podélné vlny je ovlivněna hustotou ( $\rho$ ), mezí pružnosti ( $j$ ) zatímco u příčné (sekundární) vlny je to opět hustota ( $\rho$ ) a modul pružnosti ve smyku ( $\mu$ ).

---

<sup>xvi</sup> Seismické vlny – mechanické vlnění přenášené vibracemi horninovým prostředím.

Pozn.: Z rovnice vyplývá, že horniny o vysoké hustotě by měly mít nízké seismické rychlosti, ale ve skutečnosti je to opačně.

Rychlost šíření v nehomogenním prostředí získáme průměrováním „cestovních časů“.

## **Geofony**

Zařízení sestavená k detekci seismických vln. Konstruovány jsou z pevné a pohyblivé části. Pevnou část tvoří plášť geofonu. Pohyblivá část je složena z cívky (má vysoce permeabilní<sup>xvii</sup> magnetické jádro pružiny v poli permanentního magnetu), která se relativně pohybuje vzhledem k magnetu během registrace seismických vln. Během toho dochází k indukci napětí a externím okruhem prochází proud. [4]

Použitý typ geofonu se odvíjí od potřeb měření.

## **Interpretace měření**

Z rozboru vlnového obrazu, konfigurace hodochron<sup>xviii</sup> a pak také analýzy rychlostí registrovaných vln je možné určit na hloubku seismického rozhraní (výplň příkopu apod.) a jeho charakteristiky. Údaje, které dostaneme, jsou závislé na hloubce. Archeolog dostane požadované výsledky pouze v případě, že je hledaný objekt v hloubce, kde ještě nedochází k pohlcení užitečného signálu. Pro příklad následuje rovnice pro vliv tlumení signálu pro skalní horniny:

$$A = A_0 \cdot \frac{1}{x} \cdot e^{-\alpha \cdot x} \quad [3]$$

Na levé straně rovnice vystupuje amplituda přijatého signálu  $A$ . Na pravé straně amplituda vyslaného signálu  $A_0$ , dále vzdálenost objektu  $x$  a koeficient absorpce  $\alpha$  ( $\text{m}^{-1}$ ).

---

<sup>xvii</sup> Permeabilita – veličina vyjadřující vliv prostředí na magnetické pole.

<sup>xviii</sup> Hodochrona - křivka udávající závislost doby šíření seismické vlny určitého typu na vzdálenosti od epicentra.

## 1.5 Geotermické metody

Sledují tepelné pole Země a jeho změny, resp. poruchy na určité lokalitě.

Pro potřeby archeologie slouží tato měření k pátrání po nezaplňených prostorách ukrytých nehluboko pod povrchem. Mohlo by se jednat o krypty, dutiny, sklepy, hrobky.

Veličina sledovaná při těchto měřeních je, jak se dá očekávat, teplota  $t$  případně vertikální teplotní gradient  $G$  (závisí na složení, struktuře a textuře hornin, popřípadě tektonických poměrech či míře zaplnění zkoumaného prostoru).

Geotermické metody lze v základu podle techniky měření rozdělit na kontaktní a bezkontaktní.

Problémem pro aplikaci této metody může nastat v blízkosti zemského povrchu (interakce s teplotním polem atmosféry).

V současné době dochází ke značnému rozvoji bezkontaktních měření v souvislosti s technologickým pokrokem.

## 1.6 Radionuklidové metody (radiometrické)

Opět sem patří principiálně odlišné metody. Pokud je předmětem zájmu přirozená radioaktivita hornin, jsou to metody radiometrické. Jedná-li se o využití uměle vzbuzených polí jaderného záření, jde o metody jaderné geofyziky.

V archeologii se tyto metody uplatňují ve velmi omezeném měřítku (průzkum výrobních objektů).

Tyto metody sledují následující veličiny: úhrnnou aktivitu  $\gamma$  (charakterizuje ji expoziční příkon  $\chi$ ) nebo koncentraci  $Q$  radioaktivních prvků nejčastěji se vyskytujících v hornině (z dílčích koncentrací draslíku (konkrétně  $^{40}\text{K}$ ), uranu (konkrétně  $^{238}\text{U}$ ) a thoria (konkrétně  $^{232}\text{Th}$ )). Rozpadové produkty uranu a thoria jsou nestabilní a rozpady pokračují dále v tzv. rozpadových řadách, zatímco radioaktivní draslík  $^{40}\text{K}$  produkuje v rozpadu již stabilní řady.

## 1.7 Možné problémy při aplikaci geofyzikálních metod

### Signál a šum

Signál, který chceme během měření zaregistrovat, může být často narušen nežádoucím jevem, šumem (nežádoucí variace nebo fluktuace) a proto je nutné vždy učinit kroky k co největšímu omezení jeho vlivu na naše měření (opakování měření, průměrování).

Zdroje tohoto nežádoucího rušení dělíme na dvě skupiny. První představují antropogenně způsobené šumy. Do této skupiny se řadí elektrické vedení, inženýrské sítě a uzemnění (příčina vzniku tzv. bludných proudů způsobených vznikajícími proměnnými elektrickými poli), automobilový provoz, stavební a průmyslová činnost, tedy produkty vlivu lidské činnosti. Tyto zdroje mohou produkovat pro měření nežádoucí elektrická a elektromagnetická pole, případně seismický šum (otřesy, vibrace). A nesmíme zapomenout na šum od vlastního měření. Druhou skupinou jsou zdroje šumu s původem v přirozených jevech, kam patří extrémní jevy počasí (déšť, bouře apod.).

Uváděno bývá někdy i dělení na koherentní (známe fyzikální parametry a je možné ho na základě těchto parametrů filtrovat) a nekoherentní (náhodné zdroje).

### Vliv geologické stavby

Geologické útvary při povrchu mohou být, vzhledem k velké litologické<sup>xix</sup> rozmanitosti různých znaků hornin, značně nejednotné (nehomogenní) ve směru horizontálním i vertikálním v porovnání s jejich podložím. To se projeví na měřených fyzikálních parametrech. Například velikost měrných odporů ovlivňuje zrnitost půdy, hladina podzemní vody či mineralizace. Odporů povrchové vrstvy (písečná či jílovitá hlína) mívají obvykle nižší odpory vzhledem k zrnitosti, obsahu vody a jejich složení, zatímco odpory písků a štěrkopísků patří k nejvyšším. Tyto skutečnosti pak mohou ovlivnit interpretaci naměřených výsledků. [3]

Problémem je také příliš malá odlišnost objektu zájmu archeologie od jeho geologického okolí.

---

<sup>xix</sup> Litologie – nauka o sedimentárních horninách.

### **Vliv archeologické situace**

Výsledek a už i samotný způsob práce ovlivňují fyzikální vlastnosti samotných objektů zájmu archeologického výzkumu. Vliv má velikost daného objektu, jeho složení, hloubka uložení, orientace.

Příkladem problematické archeologické situace by byl antropologický objekt zakrytý tímž materiálem či uložen v materiálu stejného složení jako on sám. V takovém případě by se nám na výstupu měření neobjevily žádné anomálie magnetického pole apod.. Pak je tu i druhý případ, kdy je anomálie vlastnostmi archeologické situace ještě zvýrazněna.

### **Vliv recentní činnosti**

Do této skupiny patří pozdější zásahy do archeologických objektů. Patří sem různé výkopy, hrubá orba apod., což ovlivní charakter měřeného pole a může dojít k naměření dalších, ovšem pro archeologa nepotřebných, anomálií. Dále průběh kabelů či potrubí může naprosto znemožnit jakoukoliv aplikaci ze zmíněných metod. Pro využití magnetometru by se jako problematické jevíly recentní kovové předměty a jejich koncentrace jak na povrchu, tak i v podpovrchové vrstvě.

## 2 V laboratoři

Fyzikálních poznatků archeolog nevyužívá pouze při hledání artefaktů. Pomáhají mu i při práci, která následuje, v získávání bližších informací o daném předmětu, obvykle především datace jejich stáří (tzv. absolutní datování udávané v datech, oproti chronologii datování relativní ((poměrné stáří (starší-mladší))).

### 2.1 Radiouhlíková metoda

Určování stáří pomocí rozpadu radioaktivního uhlíku bezesporu můžeme označit za nejznámější jadernou metodu využívanou v archeologii, možná za nejproslulejší metodu v tomto směru vůbec, v rámci široké veřejnosti především díky mediální „propagaci“ (filmy, televizní pořady).

Radiokarbonová metoda slouží k určování stáří nálezů z organického materiálu<sup>xx</sup> (kosti, dřevo či dřevěné uhlí, papír, kůže, rašelina, ulity apod.). Bezpečná aplikace této metody vzhledem k zatížení měření chybou je asi do 50 000 let, kdy se chyba měření pohybuje v ideálním případě i jen kolem 1%. Pokud by byl použit jako hmotnostní spektrometr urychlovač, bylo by možné jít do minulosti ještě o něco dál, ovšem v takovém případě už musíme počítat s měřením zatíženým mnohem větší chybou.

První výsledky přinesla aplikace této metody při určování stáří dřevěných předmětů ze staroegyptských hrobů, dále pak pomohla odhalit i velmi podařený padělek faraonského sarkofágu.

#### 2.1.1 Oxid uhličitý a $^{14}\text{C}$ v přírodě

Valná většina laiků jednoduše přijímá předložený fakt, že existuje jakýsi uhlík  $^{14}\text{C}$  a metoda, která s jeho pomocí určí stáří archeologického nálezů. Možná by proto nebylo špatné zmínit, kde se tento izotop radioaktivního uhlíku vlastně bere a čím je jeho výskyt ovlivněn, neboť obě tyto skutečnosti stojí v pozadí radiouhlíkové metody určování stáří.

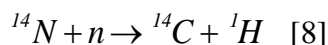
Odpovědí na vznik a přirozené doplňování izotopu radioaktivního uhlíku  $^{14}\text{C}$  je interakce kosmického záření, k níž dochází v zemské atmosféře. Protony, jakožto hlavní složka

---

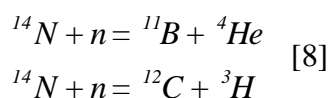
<sup>xx</sup> Výjimkou jsou anorganické materiály, při jejichž vzniku se do jejich struktury začlenil atmosférický dusík ve formě uhličitanů (např. krápníkové jeskyně).



kosmického záření, se sráží se vzdušnými jádry a dochází k vyrážení nukleonů s vysokou energií z jádra a vzniku tzv. pí mezonů, které pak dále mohou opět reagovat se vzdušnými jádry a způsobovat tzv. hadronové spršky (protony, neutrony, pí mezony), ale mohou být uvolněny i, pro nás a tvorbu  $^{14}\text{C}$  podstatné, neutrony s nižší energií. Proč? Protože mohou nahradit proton ve stabilním dusíku  $^{14}\text{N}$  a stát se tak hlavním „zdrojem“  $^{14}\text{C}$  v atmosféře.



Následně mohou nastat další dvě reakce:



Radioaktivní uhlík se ovšem nehromadí nepřetržitě. Rovnováha mezi produkcí  $^{14}\text{C}$  v atmosféře (pokud bereme tok kosmického záření jako neměnný v čase) se nastoluje díky jeho postupnému úbytku radioaktivní přeměnou, jeho rozpadem. Jako poločas přeměny radioaktivního uhlíku  $^{14}\text{C}$  se udává 5730 let. Poločas rozpadu  $T$  (s):

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

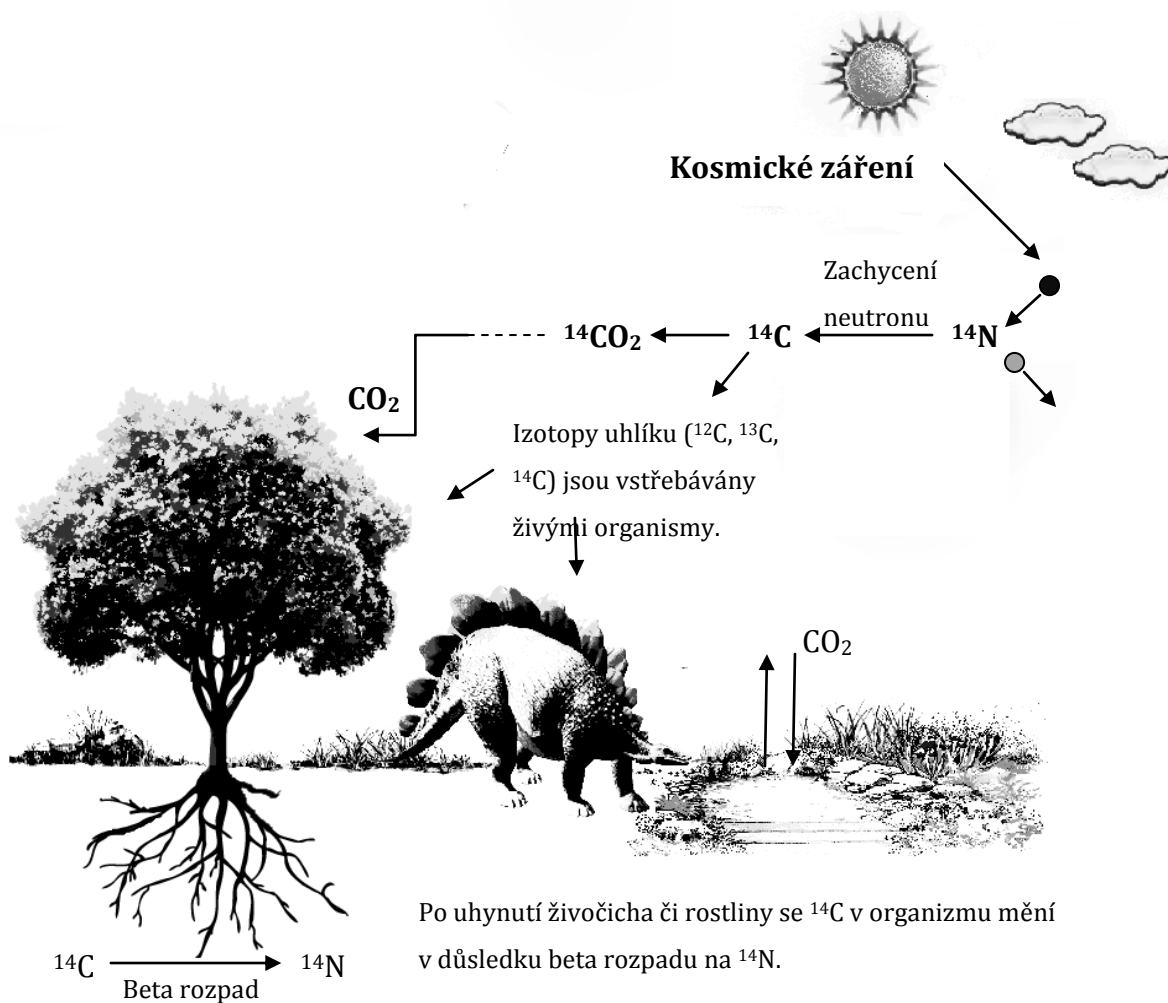
Co je důležité pro nás je radioaktivní uhlík vstřebávaný biologickými organismy, který se do jejich těl dostává ve formě  $\text{CO}_2$ , tedy oxidu uhličitého, dýcháním či s potravou a během této doby je hladina radioaktivního uhlíku  $^{14}\text{C}$  v jejich tělech odpovídající jeho zastoupení v atmosféře. Po odumření biologického organismu (rostliny či živočicha) se tento přísun  $^{14}\text{C}$  do organismu přirozeně zastaví a koncentrace radioaktivního uhlíku  $^{14}\text{C}$  se mění s radioaktivní přeměnou  $^{14}\text{C}$ , který v daném organismu zůstal z doby jeho života. Tato přeměna odpovídá vztahu:

$$C(t) = C(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Levá strana rovnice  $C(t)$  představuje změřenou hodnotu současné koncentrace (míněno koncentrace  $^{14}\text{C}$  po čase  $t$  od smrti organismu), zatímco na pravé straně figuruje  $C(0)$ , tedy

hodnota, kterou získáme ze „současných vzorků“<sup>xxi</sup> (rovnovážná koncentrace  $^{14}\text{C}$  v době smrti organismu), dále fyzikální přeměnová konstanta  $^{14}\text{C}$   $\lambda$ . Změřením požadovaných hodnot výpočtem stanovíme čas  $t$ .

Spolu s tímto rozpadem se mění i poměr mezi radioaktivním izotopem uhlíku  $^{14}\text{C}$  (zastoupení asi 0,000000001%) a stabilními izotopy uhlíku, dominantním  $^{12}\text{C}$  (98,89%) a  $^{13}\text{C}$  (asi 1,11% v atmosféře). [9] Díky těmto skutečnostem pak z poměru mezi zastoupením těchto izotopů uhlíku dokážeme určit dobu od vyřazení organismu z biologického cyklu (uhynutí).



Obr. 11 - Schéma cyklu uhlíku v přírodě.

<sup>xxi</sup> Současný vzorek - získané hodnoty mohou být v současné době lehce kontroverzní v důsledku lidské aktivity, která narušila rovnováhu. Mluvíme zaprvé o velkém množství produkce neaktivního uhlíku ve zplodinách ze spalování fosilních paliv (snižuje koncentraci  $^{14}\text{C}$ ), zadruhé produkce  $^{14}\text{C}$  v důsledku jaderných testů (zvýšilo koncentraci  $^{14}\text{C}$ ). Z těchto důvodů musíme být opatrní, jaký současný vzorek vybereme (obvykle jde o vzorky kyseliny oxalové připravené americkým National Bureau of Standards).

### 2.1.2 Měření

U běžných typů vzorků je radiouhlíková metoda datace více méně nedestruktivní metodou (pokud nejde pouze např. o drobný úlomek, střep atd., jehož testování touto metodou by vyžadovalo jeho úplné zničení).

Prvně je samozřejmě nutné ze zkoumaného objektu čistý uhlík (záření  $^{14}\text{C}$  slabé), ideálně spálením vzorku odebraného ze zkoumaného objektu, což může být v mnoha případech značná komplikace. Při spalování vznikne oxid uhličitý následně snadno redukovatelný na uhlík.

Podle kvality dostupného vzorku (množství vzorku a zastoupení  $^{14}\text{C}$  v něm) volíme jednu ze dvou dále uvedených metod.

#### **Měření pomocí detekce záření emitovaného radioaktivním uhlíkem v rozpadu beta**

Tato metoda se používá, pokud máme pro měření k dispozici dostatečné množství vzorku (několik gramů) obsahujícího zároveň přijatelné množství  $^{14}\text{C}$ . V takovémto případě nám pak měření na výstupu určí aktivitu radioaktivního uhlíku  $^{14}\text{C}$  a jeho zastoupení v uhlíku v procentuální hodnotě.

Po beta rozpadu  $^{14}\text{C}$  je nutné se zaměřit na detekci elektronů s maximální energií okolo 156 keV, většinou však ještě mnohem nižší, proto je pro tato měření nutná i vhodná aparatura. Vhodnou aparaturou je myšlen velmi účinný detektor, přičemž nesmí být opomenuto brát zřetel na případné pohlcování elektronů v necitlivých částech detektoru (tomu je třeba zabránit) a na zajištění nízkého radioaktivního pozadí.<sup>xxii</sup>

Na měření je třeba mít připraveno mezi 1 až 10 gramy vzorku uhlíku ve formě vhodné k přímému vpravení do citlivého objemu detektoru. Obvykle jsou užívány kapalné scintilační detektory, v nichž elektrony ionizují a excitují atomy a molekuly v látce. Z formy uhlíku vhodné k provedení datace se syntetizuje benzen, který pak umožní vznik scintilace<sup>xxiii</sup>, jež následně zachytí fotonásobiče. Druhou možností je plynem plněný proporcionální detektor.

---

<sup>xxii</sup> Pozadí detektoru - tím je myšlen signál vydávaný detektorem způsobený kosmickým zářením, přírodními radionuklidy v okolí detektoru, šumem způsobeným elektronikou atd. Toto „rušení“ je třeba odstínit (úpravou elektronických obvodů zpracovávajících signál, vhodným materiálem použitým na měřiči, odstínění vnějšího záření apod.)

<sup>xxiii</sup> Scintilace – světelné záblesky vznikající v některých látkách při průletu ionizujícího záření.

V tomto případě nabitá částice, tudíž elektron, ionizací produkuje ionty a elektrony, které napětí svádí k elektrodám a dojde tak k vyvolání elektrického signálu. [10]



**Obr. 12 - Převedení uhlíku do vhodné formy pro měření radioaktivního uhlíku (zde benzen). Aparatura v Oddělení dozimetrie ÚJF AVČR. [10]**

Časové rozpětí připouštějící užití této metody se pohybuje mezi 20 až 25 tisíci let, kdy množství radioaktivního uhlíku  $^{14}\text{C}$  klesne přibližně šestnáctkrát, číselně je to z původního poměru  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  kolem 0,0000000001 % (na každých  $10^{12}$  atomů  $^{12}\text{C}$  odpovídá jeden atom  $^{14}\text{C}$ ) po 25 tisících let na hodnotu menší než 0,00000000001 %. Tato doba 25 tisíc let už je opravdu hraniční, neboť metody založené na tomto principu už nemají dostačující citlivost pro detekci takto malého množství radioaktivního uhlíku ve vzorku. Pro tyto hodnoty nastupuje na řadu následující metoda.

### **Urychlovačová hmotnostní spektrometrie (AMS – Accelerator mass spectrometry)**

Používána je v případě, že dostupný vzorek je příliš malý stejně jako množství radioaktivního uhlíku  $^{14}\text{C}$  v něm zastoupeném (dostačující je méně než miligram uhlíku, v extrémním případě pouhé desítky mikrogramů, což jsou hodnoty tisíckrát menší, než jaké umožňovala výše uvedená metoda) pro měření předchozí metodou. V takové situaci již nelze měřit aktivitu  $^{14}\text{C}$ , nýbrž je nutné spočítat samostatně každé jednotlivé jádro daného izotopu. Užitím této

metody lze stanovit hodnotu poměru izotopů uhlíku  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  na úrovni hodnot okolo  $10^{-12}$  (dokonce až  $10^{-15}$ ).

Materiál	Suchá hmotnost [g]		
	Detekce radioaktivních přeměn $^{14}\text{C}$ (optimální)	Detekce radioaktivních přeměn $^{14}\text{C}$ (minimální)	AMS
Dřevo, dřevěné uhlí	8 - 12	1,000	0,005 - 0,010
Uhličitany	35	5,000	0,015
Rašelina	5 - 10	1,000	0,100 - 1
Kosti	100 - 200	20 - 80	1
Jezerní usazeniny	30 - 100	10 - 20	1

Tab. 5. - Ukázka potřebné velikosti vzorků pro porovnání potřeb metody detekce radioaktivních přeměn  $^{14}\text{C}$  a AMS. Požadavky se mohou lišit dle potřeb a možností různých laboratoří. [11]

Samotné měření probíhá následovně:

Ze zkoumaného vzorku připravíme záporné ionty pomocí cesia, z něhož se odeberou elektrony. Díky skutečnosti, že dusík netvoří záporně nabitě ionty, se nemusíme obávat rušení atmosférickým dusíkem (jinak by docházelo k rušení i ve vysokém vakuu zbytky atomů  $^{14}\text{N}$ . To je i důvod proč nelze používat pro měření  $^{14}\text{C}$  klasickou hmotnostní spektrometrii). Dále se využívá tandemový urychlovač. Ten umožní urychlit těžké ionty na rychlosti odpovídající několika procentům rychlosti světla. Tandemový urychlovač je kladně nabitou elektrodou rozdělen na dvě poloviny, napětí má hodnotu několika milionů voltů, přičemž elektroda přitahuje záporně nabitě ionty. Poté, co se tyto ionty dostanou k elektrodě, proletí velmi tenkou vrstvou materiálu, jež sebou strhne několik elektronů. Dojde k přechodu záporných iontů v kladné ionty, které jsou od elektrody naopak odpuzovány. Za urychlovač je umístěn rychlostní filtr. Jeho úkolem je za pomoci elektrických a magnetických polí oddělit ionty se stejnou rychlostí. Další magnetické pole poté vytřídí ionty izotopů stejného prvku podle jejich hmotnosti (na ní je závislý poloměr dráhy těchto iontů v magnetickém poli). Nakonec je tak možné spočítat jádra jednotlivých izotopů. [10]

Tuto metodu lze aplikovat pro časový rozsah asi 50 tisíc let (v extrémních případech i o něco více, měření ovšem zatíží větší chyba). Vyloženě starší vzorky už však uhlíková metoda určit nedokáže.

Právě tato metoda je zatížena vlivem lidské činnosti, což způsobilo, že ji není možné aplikovat pro artefakty pocházející z posledních asi dvou století, období přibližně od nástupu průmyslové revoluce, kdy se spalováním uhlí a ropy do atmosféry dostalo množství uhlíku s původem v prastarých „organismech“, lépe řečeno jejich zbytků, neobsahujících radioaktivní izotop uhlíku  $^{14}\text{C}$ . Pokud bychom takový vzorek testovali, výstupní hodnoty z měření by mu přisoudily mnohem větší stáří, než jaké odpovídá realitě. Po průmyslové revoluci zase testování ztěžují i jaderné testy, jejichž problematika je rozebrána níže.

Kdybychom měli obě metody porovnat, ukázalo by se, že měření za pomoci hmotnostní spektrometrie (AMS) je mnohem efektivnější, už kvůli vyšší citlivosti oproti měření starší metodou radioaktivní přeměny při rozpadu beta a také díky značnému zkrácení času potřebnému k měření i menšímu množství vzorku, které je ze zkoumaného předmětu třeba odebrat. Na druhou stranu nevýhodou AMS je finanční zatížení na vybavení laboratoře a potřebu urychlovače.

### **Kde měření probíhají a příklad jejich aplikace**

Článek z dubna 1951 v *Physics today* uvádí, že podle informací získaných z Yale, se suterén jedné z budov univerzity v New Havenu přestavuje v dobře stíněné laboratoře, kde bude techniku radiokarbonového datování studovat skupina vědců a historiků z Yale. Propagátorem je fyzik W. F. Libby<sup>xxiv</sup> z University Chicago z Ústavu pro jaderné studie. Projekt v Yale by se měl zabývat především ověřováním a vylepšováním techniky pro radiouhlíkové testování. Hlavní část programu má zahrnovat experimenty, jejichž cílem bude ověřit výsledky vůči již zavedeným archeologickým datům. [11] Tehdy se jednalo v podstatě o novinku, první pracoviště, jež tato měření prováděla. V současnosti je plně funkční a prodělalo značný posun.

Možná je to s podivem, ale laboratoří zabývajících se v současnosti takovýmito měřeními bychom napočítali dokonce o něco více než sto. Objem zkoumaných vzorků je také vysoký, může se pohybovat kolem tisíce vzorků historických objektů ročně.

V České republice se takováto měření provádějí v Ústavu jaderné fyziky Akademie věd České republiky (dále jen AV ČR) na Oddělení jaderné dozimetrie, které je pro tyto účely v přímém

---

<sup>xxiv</sup> W. F. Libby – fyzik a chemik, který objevil a zdokonalil radiouhlíkové datování. Roku 1960 za ni získal Nobelovu cenu.

spojení s Archeologickým ústavem AV ČR. Pro detekci radioaktivního uhlíku se zde využívají scintilační detektory.

Hmotnostní spektrometr k datování využívají nejbližze např. ve Vídni.

## Turýnské plátno



Obr. 13 - Zařízení pro AMS v laboratoři University v Oxfordu. [1]

Turýnské plátno je jedním z proslulých a velmi diskutovaných objektů, nejvýznamnějších církevních relikvií, zkoumaných touto metodou, konkrétně AMS. Zkoumáno bylo v druhé polovině osmdesátých let ve třech na sobě nezávislých laboratořích s cílem získat, co nejobektivnější výsledky (např. Pracoviště urychlovačové hmotnostní spektrometrie na

Oxfordské Univerzitě, Curychu a Arizonské Univerzitě v Tusconu). Výsledky se vzájemně shodovaly na stáří plátna odpovídajícímu období mezi léty 1260 - 1390 n. l.. Přesto tyto testy spekulace plně neutišily, naopak se začalo ještě spekulovat o možnostech, co ovlivnilo tyto výsledky. Nové podrobení plátna dalším testům církev odmítla.

### 2.1.3 Problémy

#### Destrukce



Tuto metodu lze aplikovat pouze v případě, že artefakt, který zkoumáme, nám umožňuje odebrat vzorek dostatečně velký pro test, ovšem aniž by došlo k nepřijatelnému či úplnému poškození (zničení) tohoto artefaktu. Ze zkoumaného vzorku se uhlík chemicky separuje a tak dochází ke zničení vzorku.

Obr. 14 - Spalovací systém připravující CO<sub>2</sub> z organického materiálu. [1]

## **Suessův efekt**

Jev doprovázený snížením podílu radioaktivního uhlíku v oxidu uhličitém v atmosféře vůči stabilním izotopům  $^{12}\text{C}$  a  $^{13}\text{C}$ . Tuto anomálii způsobuje přísun fosilního uhlíku pocházejícího ze spalování fosilních paliv.

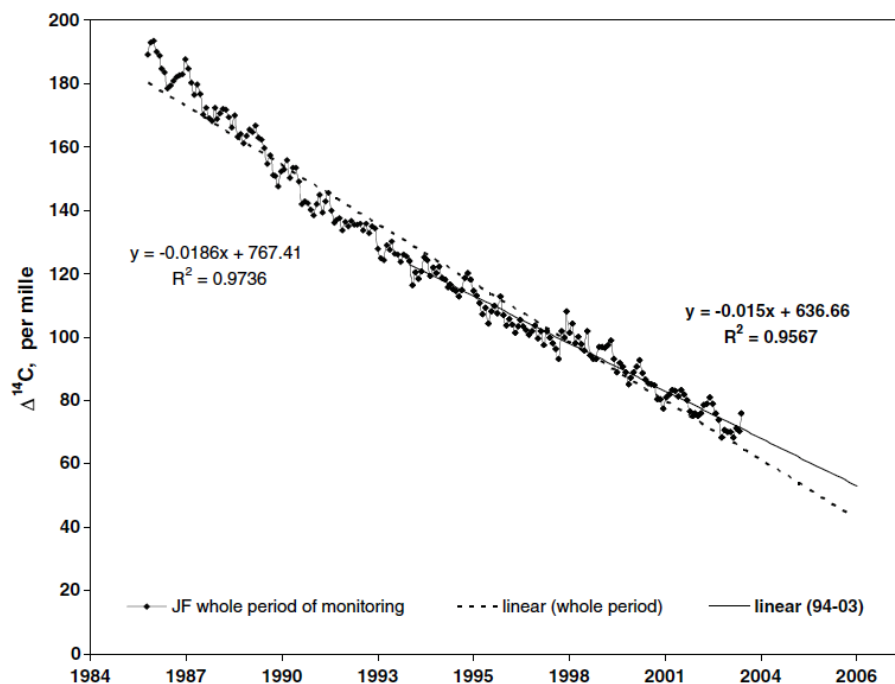
Pro tento případ sice poměr radioaktivního  $^{14}\text{C}$  v izotopické směsi uhlíku klesá, avšak celkové množství v atmosféře zůstává zachováno, pouze se snižuje poměr přísunem stabilních izotopů (jde vlastně o ředění  $^{14}\text{C}$  v uhlíkové izotopické směsi). [10]

## **Jaderné testy**

Fenomén, který můžeme sledovat přibližně v rozmezí padesátých a šedesátých let minulého století. Jaderné testy. Spolu s nimi stoupl i příliv radioaktivních prvků, včetně  $^{14}\text{C}$ , do atmosféry. V šedesátých letech (konkrétně mezi roky 1963 a 1964) stoupla na severní polokouli v důsledku jaderných testů aktivita radioaktivního uhlíku na dvojnásobek běžné (přirozené) hladiny. Poté došlo k exponenciálnímu poklesu, který už nebyl určen poločasem rozpadu radioaktivního uhlíku  $^{14}\text{C}$ , nýbrž se značně urychlil a v důsledku této skutečnosti se tak reálný pokles pohyboval kolem poločasu rozpadu asi osm let.

Po ukončení jaderného testování začalo přirozeně docházet k postupnému nastolování rovnováhy mezi pohybem radioaktivního uhlíku  $^{14}\text{C}$  s původem v jaderných testech mezi atmosférou a biosférou a dlouhodobějšími rezervoáry uhlíku (např. oceán). K vyrovnávání docházelo během osmdesátých let. Po postupném vyrovnání už poločas rozpadu udávající pokles množství  $^{14}\text{C}$  v atmosféře opět odpovídal normálnímu poločasu rozpadu samotného  $^{14}\text{C}$ . Z provedených měření je patrné, že objemová aktivita  $^{14}\text{C}$  klesala asi do roku 1993 díky úbytku uhlíku vyprodukovaného jadernými testy a dále už se projevovala jako stabilní, což naznačuje, že za neustálým nárůstem množství oxidu uhličitého, stojí fosilní zdroje. Zhruba lineární pokles obsahu  $^{14}\text{C}$  v atmosférickém uhlíku tedy způsobuje Suessův efekt, nikoliv dozvuky jaderného testování.





Obr. 15 - Z grafu je vidět změna poměru  $^{14}\text{C}$  vůči stabilnímu  $\text{CO}_2$  v atmosféře. Asi do roku 1993 projev úbytku  $^{14}\text{C}$  vlivem jaderných testů. Po roce 1993 zřejmě vliv přibývání fosilního uhlíku. Průběh blízký lineárnímu poklesu. Měření ze stanice Jungfraujoch. [10]

### Následná datace nálezů

Provedené měření určí pouze dobu, kdy došlo k úmrtí organismu, ať už se jedná o člověka, zvíře či rostlinu. Archeolog (historik) musí určit na základě svých znalostí a dalších údajů o zkoumaném předmětu vztah předmětu k době, z níž pochází (např. v případě papyru, doba, kdy došlo k odumření rákosu (z něho se vyráběl) a jeho zpracování se může lišit i v řádu století od doby, kdy na něj byl proveden záznam (docházelo i k opakovanému užívání, přepisování)).

### Nestejná izotopová frakcionace při přechodu jednotlivých izotopů uhlíku do některých biologických organismů

#### Obtížná detekce obsahu $^{14}\text{C}$

Úskalí spočívá v obtížné měřitelnosti záření. Radioaktivní uhlík po beta rozpadu není následován vyzářením gama, můžeme tedy detekovat pouze elektron. Řešením je detekce emitovaných částic  $\beta$  za pomoci detektorů částic s velmi nízkým pozadím, v nichž je třeba

radioaktivní uhlík převést přímo do jejich citlivého objemu, nebo užitím hmotnostního spektrometru na bázi urychlovače nabitých částic. Řešení jsou ovšem nákladná s ohledem na vybavení i finance.

### **Proměnná rychlost vzniku $^{14}\text{C}$**

Jde o efekt způsobený změnami zemského magnetického pole a v důsledku toho i změn rychlosti produkce neutronů v atmosféře (potom přichází na řadu nutná korekce jako např. dendrochronologie).

Zatímco množství dusíku v atmosféře se nemění, tvorba radioaktivního izotopu uhlíku  $^{14}\text{C}$  může být ovlivněna změnami v intenzitě toku kosmického záření, které může značně ovlivňovat činnost Slunce, ačkoliv vzhledem k přihlídnutí na poločas rozpadu tohoto izotopu způsobené změny jsou krátkodobé. [9] Sluneční cyklus trvá jedenáct let, proto pro prvek s poločasem rozpadu 5730 let je z dlouhodobého hlediska střední hodnota intenzity kosmického záření v atmosféře stabilní (tedy i množství  $^{14}\text{C}$  v atmosféře). Přesto je nutné brát v úvahu zastoupení  $^{14}\text{C}$  v atmosféře v různých dobách, a proto se krátce budu zabývat i touto problematikou. Během tzv. slunečního maxima sluneční vítr vytlačuje ze Sluneční soustavy kosmické záření, a proto jeho intenzita klesá přibližně na poloviční hodnotu slunečního minima. Tyto změny způsobují změny v zastoupení  $^{14}\text{C}$  v atmosféře menší, než 0,1%. Z dlouhodobého hlediska se pak za poslední tisíciletí změny pohybovaly v rozsahu do 3%. [10]

V úvahu je třeba brát i další aspekty, kupříkladu skutečnost, že radioaktivní izotop uhlíku  $^{14}\text{C}$  se také předává z atmosféry i do jiných zásobníků, než je biosféra, značnou část přijme například také oceán.

Dalším takovým aspektem je i vznik radioaktivního izotopu uhlíku  $^{14}\text{C}$  mimo atmosféru, pod zemským povrchem, kde stabilní izotopy dusíku, kyslíku, uhlíku a bóru reagují s neutrony či alfa částicemi (vznikají při rozpadu těžkých radioaktivních prvků spadajících do radioaktivních řad souvisejících s izotopy uranu a thoriem pod zemským povrchem). [10] Ovlivnění tímto způsobem je tak lokální, odvislé od přítomnosti takových prvků v daném místě, a tím i koncentrací radioaktivního izotopu uhlíku (i paleohistorické uhlí, v němž by

izotopy  $^{14}\text{C}$  neměly být kvůli jejich rozpadu detekovatelné, mohou obsahovat jisté, i když velmi malé množství  $^{14}\text{C}$ ).

#### 2.1.4 Dendrochronologie a Urano-Thoriové datování

Data získaná radiouhlíkovým datováním mohou být různými způsoby zkreslena či nemají z rozličných důvodů dostatečnou výpovědní hodnotu. Pro takové případy je nutná kalibrace, která by pomohla výstupní výsledky testování zpřesnit.

Jednou z možností je dendrochronologie. Jde v podstatě o datování za pomoci letokruhů stromů, která funguje na základě rozlišování jednotlivých letokruhů podle následujícího klíče. Pokud jsou letokruhy více vzdáleny od sebe, považujeme je za přírůstky z teplých a vlhkých období podporujících růst a na druhou stranu letokruhům soustředěným blíže u sebe přisuzujeme sušší a chladnější léta. Letokruhy jsou jako otisk věků, které strom prožil, naprosto charakteristické následností let. Když za sebe naskládáme vzájemně na sebe navazující vzory letokruhů ve dřevě z různých období, sestavíme tak časovou osu, stupnici, kterou můžeme následně srovnávat s letokruhy ve dřevě nalezených objektů.

Takto získaná data můžeme vůči údajům radiouhlíkového datování postavit pouze pro období posledních 8 až 9 tisíc let, dále už nemáme dostupné vzorky.

Z časového omezení aplikace dendrochronologie vyplývá, že byla třeba jiná metoda korekce. Tou se nakrátko stal nový chronometr umožňující kalibraci až pro desítky tisíc let př. n. l. založený na měření rozpadu uranu na thorium a ačkoliv se takto materiály datovaly po mnoho let, tato metoda se ukázala jako ne příliš přesná (každý odběr vzorků nebyl dosti systematický pro použití ke kalibraci  $^{14}\text{C}$ ). Bylo proto třeba dalšího vývoje a zlepšování. V roce 1987 adaptoval tým Caltech hmotnostní spektrometrické techniky k získání vysoce přesných uran-thorium výsledků s malými vzorky a stanovil tak platnost uran-thoriového datování. V roce 1990 skupina z Kolumbijské univerzity Lamont-Doherty geologické observatoře použila novou techniku použitím vzorků podmořských korálů shromažďovaných na Barbadosu, a byla tak schopna kalibrovat metodu  $^{14}\text{C}$  s datací dosahující přinejmenším 40 tisíc let. [12]

## 2.2 Termoluminiscenční datování (Radiálně indukovaná termoluminiscence)

V první řadě bych ráda poznamenala, že z fyzikální definice je označení termoluminiscence nepřesné, ačkoliv tento výraz se ujal. Luminiscence je definována jako přebytek záření tělesa nad tepelným zářením, a tak lze tepelnou luminiscenci brát čistě jako stimul samotné luminiscence, avšak samotný excitační účinek musí vyvolat jiný druh energie (záření – radiotermoluminiscence). V oboru se tohoto, již dlouho známého jevu začalo využívat až v průběhu 60. let.

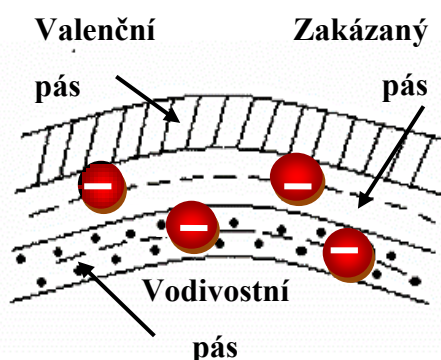
V půdě, a všeobecně v každém materiálu, je obsaženo určité množství radioaktivních prvků (pro měření luminiscenčními metodami musíme změřit radioaktivitu pozadí a provést korekce, neboť míra luminiscence bude závislá na míře radioaktivity v okolní půdě kolem zkoumaného nálezu). Tyto prvky pak produkují radioaktivní záření, které má tu vlastnost, že dokáže ze struktury minerálu uvolnit elektrony  $e^-$ , které se pak hromadí v místech, kde je „porušena“ krystalová mřížka. Zahřátím vzorku, v tomto případě budeme mluvit o termoluminiscenci, nebo jeho ozářením viditelným světlem, pak se jedná o opticky stimulovanou luminiscenci (OSL), dojde k návratu elektronů do elektronových obalů. Během tohoto procesu dochází k uvolňování energie viditelné části spektra, zkoumaný vzorek tedy světélkuje, přičemž čím starší zkoumáme nález, tím větší množství elektronů bylo od posledního zahřátí či osvětlení uvolněno.

Termoluminiscenční metodu datování užíváme pro určování stáří předmětů, které byly v době svého vzniku, případně pozdější době své existence vystaveny vysokým teplotám. Mluvíme tak tedy o vypalované keramice, sklu, porcelánu (ať už se jednalo o nádoby či sošky), pálených cihlách, případně i kamenech z ohniště. Právě pro tyto předměty, nalézané v poměrně velkém množství, po dlouhou dobu činilo obtíže určit jejich stáří. Důvodem byla absence vhodné metody datace pro tyto materiály (výše zmíněná metoda  $^{14}\text{C}$  sloužila pouze k určování stáří organických materiálů).

Termoluminiscenční dozimetrie umožňuje stanovit stáří daného nálezu v rozsahu od 1 roku asi do  $10^6$  let (délka života zachycených elektronů). [13]

Neopomenutelným kladem jsou nižší náklady na aparaturu, než je tomu např. u výše zmíněné metody a tato skutečnost napomohla poměrně rychlému rozšíření.

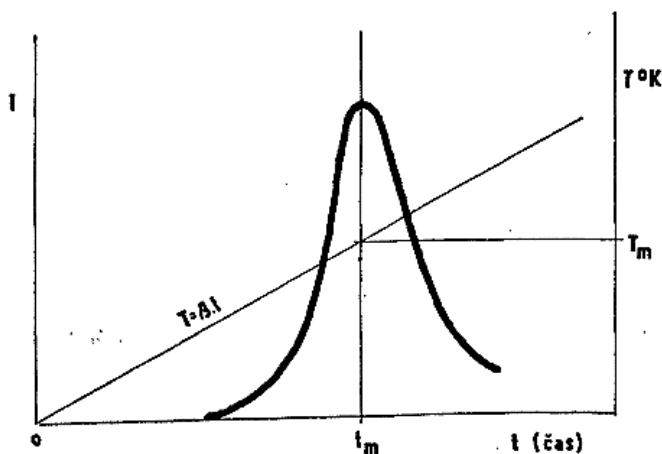
## Princip (podrobněji)



Obr. 16 - Schéma vnější vrstvy atomu (resp. lokálních energetických hladin v atomu).

Elektrony nacházející se ve valenční vrstvě atomu za dostatečně nízké teploty excitují v důsledku absorpce zářivé energie v luminoforu. Excitace<sup>xxv</sup> probíhá z valenční hladiny do elektronových pastí (resp. záchytných center) v tzv. zakázaném pásu<sup>xxvi</sup> a zde setrvávají do doby, než je v laboratoři opět prudkým (ale ne příliš) vyhřátím uvolníme. Elektrony se pak vracejí a rekombinují s děrovými centry a během tohoto procesu dochází k emisi světla, termoluminiscenci.

Během zahřívání vzorku (luminoforu) na stále vyšší teplotu stoupá i tepelný jas. V určitém okamžiku projde jas maximem, přičemž je dodávaná tepelná energie odpovídající aktivační energii. Dále dochází k postupnému poklesu k nule v důsledku vyčerpání zásoby zachycených elektronů.



Obr. 17 - Termoluminiscenční křivka v případě lineárního vzestupu teploty  $T = \beta \cdot t$ . [13]

Z měření pak máme záznam jasů luminoforu v závislosti na čase při konstantní rychlosti vyhřívání, který představuje termoluminiscenční křivka. Často se stává, že tato křivka má v důsledku více typů záchytných hladin, celého pásu, obsažených v luminoforu více maxim. Plocha v grafu je pak omezena touto křivkou a souřadnicí  $x$  a zastupuje zde míru koncentrace zachycených elektronů v pastech (míra

<sup>xxv</sup> Excitace – excitovaný stav, stav s vyšší energií vznikající pohlcením nějaké částice (kvanta energie, např. fotonu). Tyto stavy jsou v přírodě obvykle nestabilní, a tak se energie zpravidla samovolně vyzáří a systém se pak vrátí opět do základního stavu.

<sup>xxvi</sup> Zakázaný pás – mezi valenčním a vodivostním pásem.

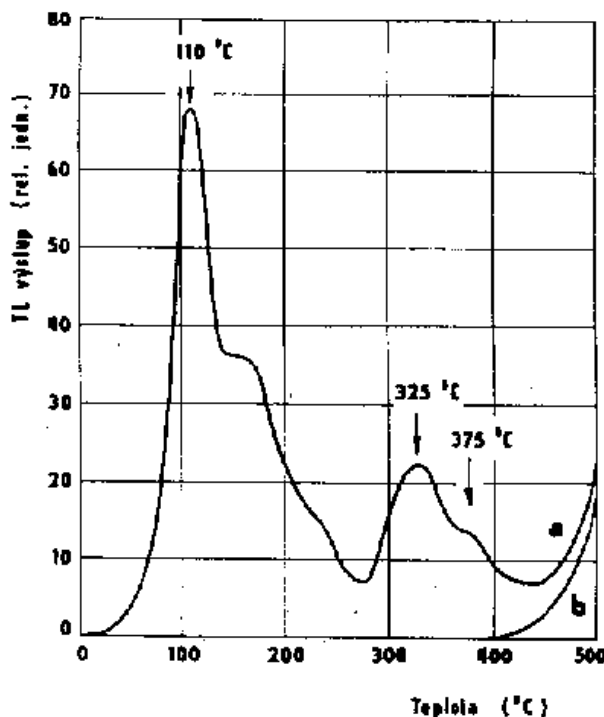
předchozího ozáření – dávky). [13]

Pokud předpokládáme, že luminofor je udržován při stálé teplotě okolí  $T$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) vyjádříme pravděpodobnost úniku elektronů  $e^{-}$  z pastí podle Arrheniova vztahu. Převrácená hodnota tohoto vztahu představuje pravděpodobnou délku života elektronů v dané zachycené hladině, tedy:

$$\frac{1}{p} = s^{-1} \cdot e^{\frac{E}{kT}} \quad [13]$$

V uvedeném vzorci představuje  $s$  frekvenční faktor,  $E$  aktivační energii a  $k$  Boltzmannovu konstantu<sup>xxvii</sup>.

### 2.2.1 Měření



Obr. 18 - TL vyhřívací křivka křemene. [9]

draslíku  $^{40}\text{K}$ ), nakonec i jistou částí kosmického záření (v závislosti na hloubce uložení artefaktu). [13]

Vzorky, které bývají touto metodou datovány, tedy keramika, stavebniny, sklo či porcelán jsou z chemického hlediska křemičitanové povahy se zásobou mikrokrystalů schopných radiační excitace s dostatečnou hloubkou elektronových pastí. Díky této vlastnosti mohou elektrony zachycené v těchto pastích setrvat v tomto stavu i při teplotě okolí kolem  $40^{\circ}\text{C}$ . V přírodě jsou objekty ozařovány ze tří zdrojů, konkrétně: zářením radionuklidů půdy v jeho okolí a zářením radionuklidů v samotném vzorku (radionuklidy uranové a thoriové řady a radionuklid

<sup>xxvii</sup> Boltzmannova konstanta – představuje podíl plynové konstanty a Lochsmidtova čísla,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

Předpoklady pro zkoumání: vzorek během vzniku vypálen (vyhřát), což vedlo k zrekombinování dříve „zamrzlých“ elektronů a „časovému vynulování“, dále předpokládáme, že byl zkoumaný vzorek celý čas ozařován neměnnou dávkovou rychlostí. Posledním předpokladem je lineární hromadění elektronu v pastech  $\Sigma TL$ , a právě podle tohoto údaje je měřeno stáří předmětu. K zjištění stáří musíme znát ještě jednu veličinu, a to tzv. roční přírůstek luminiscence  $\frac{\Delta TL}{Gy}$  <sup>xxviii</sup>.

Stáří je pak stanoveno podle vzorce jako:  $S_r = \frac{\Sigma TL}{\Delta TL \cdot r^{-1}}$ .

Během celého procesu probíhají tři samostatná měření: měření celkové termoluminiscence, stanovení přírůstku excitovaných elektronů na jednotku absorbované dávky, tedy  $\frac{\Delta TL}{Gy}$

a stanovení dávkové rychlosti ozařovaného předmětu  $\frac{Gy}{r}$ , přičemž:

$$\frac{\Delta TL}{Gy} \cdot \frac{Gy}{r} = \frac{\Delta TL}{Gy} \cdot [13]$$

Velké množství luminoforů má hlavní maximum vyhřívací křivky mezi 200 – 400 °C a jejich aktivační energie se pohybuje v řádu jednotek eV.

Nejobtížnější částí práce je stanovení veličiny  $\frac{Gy}{r}$ , tedy roční dávkové rychlosti. Můžeme tak učinit pomocí výpočtu, či experimentálního stanovení, s tím, že oba postupy mají své pro a proti.

Experimentální stanovení bývá přesnější a je prováděno za pomoci vhodného, ideálně opět termoluminiscenčního, dozimetru. Postup je poměrně náročný. Dozimetr je vložen do vyhloubené dutiny ve vzorku, zatmělí se práškem z téhož vzorku a na nějaký čas se musí uložit do stejného místa a stejné hloubky archeologického naleziště. Po uplynutí stanovené

---

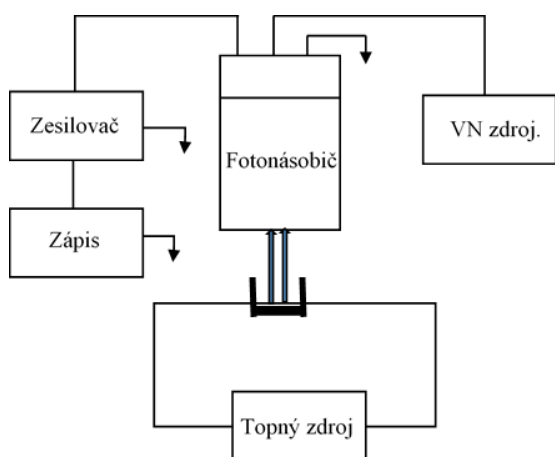
<sup>xxviii</sup> Gy – jednotka grey. 1 Gy = 100 rad.

doby se vyhodnotí dávková rychlost  $\frac{Gy}{r}$  už obvyklým dozimetrickým způsobem. [13] Jde o postup časově náročný, i při použití velmi citlivého dozimetru se doba stanovení výsledku pohybuje kolem 1 roku.

Pokud bychom zvolili druhou možnost, a to výpočet, je třeba znát následující údaje: frakci dávkové rychlosti (asi 10% celkové hodnoty), která je vyvolána kosmickým zářením a je tedy závislá na zeměpisné šířce, nadmořské výšce naleziště a hloubce, v níž byl předmět nalezen. Dále je třeba znát množství a druh radionuklidů nacházejících se v okolí nálezů, jakož i vlhkost a brzdou schopnost (30% dávky), nakonec musíme zjistit ještě množství a druh radionuklidu vyskytujících se v samotném nálezů a brzdě schopnosti vzorku (60% dávky). Poté už můžeme provést výpočet. Tento způsob je jak rychlejší (stanovuje se koncentrace pouze tří radionuklidů, a to uranu (U), thoria (Th) a draslíku (K)) ovšem méně přesný. [13]

Pozn.: Některé zdroje, např. [14], uvádějí odlišně vypadající vztah (jednodušší):  $T = \frac{R_{nat}}{S \cdot \dot{D}}$ , kde  $R_{nat}$  je termoluminiscenční odezva daného vzorku materiálu (od přírodního záření za dobu, kterou chceme stanovit),  $S$  představuje termoluminiscenční citlivost daného materiálu (odezva na jednotkovou dávku,  $\dot{D}$  je dávkový příkon (dávka za jednotku času – obvykle 1 rok) od přírodního záření působícího po čas jeho existence.

### Termoluminimetr



Obr. 19 - Zjednodušené schéma termoluminimetru.

Termoluminimetr použitý k měření může být jak komerční, tak i ve srovnání s ním „kvalitnější“ (vzhledem k citlivosti měření), laboratorní soustava, která se skládá v základu z části vyhřívací, části detekční a dalšího nezbytného příslušenství. Konkrétně vyhřívací část termoluminimetru obvykle sestává z elektricky vytápěné kovové podložky, vytápění je zde uskutečněno nízkonapěťovým transformátorem, zatímco další součástka,



fotonásobič<sup>xxix</sup>, je napájena stabilizovaným zdrojem vysokého napětí a jako poslední samozřejmě nesmí chybět detektor. Proud z fotonásobiče je ještě dále třeba zesílit a nakonec je graficky zaznamenán.

Pokud bychom měli srovnat klasické dozimetrické přístroje založené na tomto principu s aparaturou používanou pro potřeby archeologie, jsou na tento přístroj kladeny zdaleka vyšší nároky, především z hlediska možnosti dlouhodobé stabilizace, zesílení, rychlosti zahřívání, spektrální citlivost a v neposlední řadě na chlazení fotonásobiče. [13]

K měření je zapotřebí mít připravený vzorek z daného artefaktu, potřebné množství k měření je asi 5-50 mg vzorku, který se nejprve spráší ve třecí misce, dále pomocí sít roztřídí na jednotnou velikost zrn a následně sedimentuje na vhodnou podložku. [13]

Nejprve je třeba zjistit „původní“ termoluminiscenční signál (následně použijeme při zjišťování  $\Sigma TL$ ). Dále vzorek několikrát ozáříme, jde o kalibrační ozařování, známou dávkou s opětovným zaznamenáním termoluminiscenční křivky. Z takto získaných hodnot dávkové závislosti, zobrazených na termoluminiscenčních křivkách, sestavíme graf, z něhož je ve výsledku odčítána hodnota  $\frac{\Delta TL}{Gy}$ .

### **Kde měření probíhají a příklad jejich aplikace**

Testovány touto metodou byly na Univerzitě v Oxfordu datovány předměty vyrobené z keramiky s původem na Sicílii, Sibiři či cihly středověké italské katedrály, dále byla tato metoda aplikována např. na keramické sošky z Oaxacy v Mexiku, benátské vily, pontská amfora se scénou Hektorovy smrti, polychromovaná terakotová soška stojící dámy.

---

<sup>xxix</sup> Fotonásobič – zařízení (elektronická součástka) k registraci a zesílení účinků světelného záření: jde o druh elektronky, uvnitř níž je citlivá fotokatoda, která po dopadu světla uvolňuje elektrony, jež jsou pak elektrickým napětím přitahovány na sekundární katodu, tzv. dynodu, s povlakem majícím vysoký koeficient sekundární emise. Dopadající elektrony vyrážejí z dynody 3x až 5x větší množství elektronů, díky čemuž dostaneme na výstupu dobře zpracovatelný a měřitelný elektrický signál.

## Sošky z Oaxacy v Mexiku



**Obr. 20 -** Od leva: soškaí z přechodného Monte Albanského období kolem let 100-200 n. l. s ověřenou pravostí., soška stylově odpovídající pozdně klasickému Monte Albanskému období kolem let 400-800 n. l. ovšem v tomto případě se jedná o padělek. [9]

Tyto sošky pocházejí z doby předkolumbovské a v současnosti se nacházejí ve sbírkách St. Louis Art Museum. Sošek podobného typu existuje značné množství a je těžké zaručit, zda se nejedná o padělky. Konkrétně z této sbírky bylo testováno 117 sošek. Výsledky testování jsou následující.: Sošky, u kterých již podle vnějšího ohledání historikové předpokládali, že jsou falešné, se i jako falešné také potvrdily (2 kusy). Pak tu byly sošky, u nichž se také předpokládalo, že budou falešné, testování však

prokázalo jejich pravost (14 kusů). Naopak v této sbírce byly i kusy, které sice vypadaly jako pravé, ovšem výstupem termoluminiscenčního datování bylo, že se jedná o autentická díla (5 kusů). A nakonec právě vypadající sošky, které zároveň obstály v testování (96 kusů).

## Pontská amfora se scénou Hektorovy smrti



**Obr. 21 - Amfora.** [9]

Amfora se nachází ve sbírce Dánského národního muzea v Kodani. Autenticita byla zpochybněna kvůli její výzdobě, konkrétně figurální dekoraci zobrazující Hektorovu smrt. Měření termoluminiscenční metodou ovšem potvrdilo předpokládanou dobu její výroby, tedy 6. století př. n. l..

## Polychromovaná terakotová soška stojící dámy



Obr. 22 - Soška. [9]

Polychromovaná terakotová soška stojící dámy (autorství připisováno Agnolo di Polo (1469-150)) patřící do sbírek Metropolitan Museum of Art v New Yorku má pravost ověřenou termoluminiscenčním datováním k roku 1485 s chybou  $\pm 50$  let. Testování bylo nezbytné, neboť během poloviny 19. století bylo jejich padělání velmi populární (mistrem v padělání těchto předmětů byl např. Giovanni Bastiani, jehož práce nebylo bez testování v podstatě možné od originálů rozeznat (např. jeho busta Girolama Savanory, jež byla takéž podrobena termoluminiscenční analýze)).

### 2.2.2 Problémy

Tato metoda je poměrně náročná a závislá na mnoha proměnných, které je třeba zvážit a které mohou narušit spolehlivost a přesnost této metody, v jejichž důsledku bývají často využívány pro určení stáří i jiné metody založené na radionuklidech a ionizujícím záření.<sup>xxx</sup>

### Vyzvednutí nálezu a příprava vzorku

Komplikovaná je už sama příprava a následné zpracování vzorků pro toto měření. Problém často způsobí už samo vyzvednutí (neopatrný odběr, změny vlhkosti v okolí nálezu apod.) či následné uskladnění. U materiálu vykazujícího termoluminiscenci je také třeba dávat si pozor na citlivost tohoto materiálu na různé druhy záření (záření  $\beta, \gamma$ , kosmické záření). Další, čemu bychom se měli vyhnout, je také příliš prudké vyhřívání vzorku. Problém však může být už sám vzorek. Pokud bychom se tímto způsobem snažili datovat vzorek (ideální je předpoklad, že po jeho vzniku zachovávalo celé historické období stejnou relativně nízkou teplotu), který byl nalezen např. v místě pozdějšího požáru, značně by to zkomplikovalo měření i následnou interpretaci.

### Přesnost

Přesnost výsledků získaných termoluminiscenčním datováním závisí nejvíce právě na samotném výsledku, konečném čísle. Pokud bychom použili výsledky získané touto metodou

---

<sup>xxx</sup> Elektronová spinová rezonance či některý z postupů založených na radionuklidech patřících do přírodních přeměnných řad.

pouze pro rozeznávání stáří nálezů a jejich následného třídění či určení zda se nejedná o falsifikát, bude stačit menší přesnost. Pokud však potřebujeme mnohem citlivější datování, je třeba např. doplnit jinou metodou.

Z posledních údajů, které se pro tuto práci podařilo získat, se přesnost metody neukázala lepší, než  $\pm 10\%$  (samozřejmě je třeba brát v úvahu vývoj a pokroky techniky do budoucna a znalost daného předmětu, pak se může jednat i jen o  $\pm 3\%$ ). Někomu by se číslo mohlo zdát zanedbatelné, ovšem pokud si to promítneme na konkrétní příklad, např. u předmětu starého 3000 let je to už  $\pm 300$  let, na obě strany tedy získáme rozsah asi 600 let, což z historického hlediska zahrnuje značný úsek, během něhož se mnoho změnilo a odehrálo.

### **Předpoklad lineárního vzrůstu zachycených elektronů v čase**

Tento předpoklad není velmi často během měření splněn, a proto je třeba provést s ohledem na to i potřebné korekce.

### **Fading**

Dalším problémem je spontánní vyprazdňování výše zmíněných záchytných center, k nimž může samovolně docházet např. už při pokojové teplotě. Z toho důvodu je třeba se při aplikování této metody datování zaměřovat na centra, která vyprazdňují až vysoké teploty, alespoň  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  (zachycené  $e^-$  jsou při těchto teplotách dostatečně stabilní).

## **2.3 Opticky stimulovaná luminiscence (OSL)**

Jedná se o obdobu předchozí metody. Minerály jako křemen, případně živec, které jsou vždy obsaženy ve vrstvách s archeologickými materiály, vstřebávají záření radionuklidů ze svého okolí a elektrony se v nich též zachycují v metastabilních polohách. Světelnou stimulací dojde k uvolnění těchto elektronů, které je opět možné měřit.

Na rozdíl od termoluminiscence, kde se měří čas, který uplynul od tepelného zpracování předmětu, se v případě opticky stimulované luminiscence měří čas, který uběhl od posledního vystavení předmětu slunečnímu záření. Metoda se používá v případech, kdy zkoumáme nálezy starší 40 000 let, pro něž už je datování za pomoci radiouhlíkovou metodou nedostačující.

OSL patří mezi metody v aplikované pro potřeby archeologie (archeometrie) nové a nepříliš používané (už kvůli samotné komplikaci nevystavit nálezu světlu při jeho odhalování či vyzvednutí).

### 2.3.1 Měření

Při pořizování vzorků pro dataci opticky stimulovanou luminiscencí je neopomenutelnou podmínkou zajistit, aby se tyto vzorky nedostaly do kontaktu se slunečním světlem, které by vyvolalo luminiscenci a v důsledku jeho vystavení slunci by tak došlo k vynulování údajů o stáří zkoumaného vzorku pro tuto metodu.

Stejně jako výše uvedená radiačně indukovaná luminiscence je OSL založena na principu dozimetrie a měření probíhá v podstatě stejně, jen s tím rozdílem, že zde se zkoumaný vzorek nezahřívá, nýbrž ozařuje světlem z viditelného spektra.

Jak už bylo zmíněno, aplikuje se tato metoda tam, kde je například radiouhlíková metoda  $^{14}\text{C}$  nedostačující, či jako doplňkové měření klasické termoluminiscence. Nejčastěji se při aplikaci této metody zaměřuje na zrnka křemene (běžně zastoupena).

Prozatím byly touto metodou testovány např. nálezy z moravských nalezišť či v Dzeravé skále (na území Slovenska).

## 2.4 Rentgenofluorescenční metoda (X-ray fluorescence (XRF))

Účelem této, stejně tak i níže následující metody je určení prvkového (dokonce i v případě stopového množství prvku) složení zkoumaného vzorku. Metoda, kterou lze zařadit mezi metody atomové, funguje na principu vyrážení elektronů z vnějších slupek atomového obalu s využitím rentgenového záření, jak už ostatně napovídá sám název.

Základem této metody zaměřující se na emisi charakteristického záření X jsou již zjištění učiněná r. 1913 Henrym Moseleyem<sup>xxxi</sup>, popsána Moseleyho zákonem:

$$\sqrt{\frac{v}{R}} = \frac{Z - S_n}{n}$$

---

<sup>xxxi</sup> Moseleyova zjištění – anoda rentgenky emituje záření X s energiemi charakteristickými pro prvky, které jsou v ní obsažené. Závěrem bylo, že energie jsou funkcí protonového čísla Z.

Ve vzorci představuje  $\nu$  frekvenci spektrální čáry, jež je charakteristická pro daný prvek, dále je zde  $R$  – Rydbergova konstanta, kvantové číslo náležící orbity v atomovém obalu  $n$ ,  $S_n$  zastupuje stínící parametr. Výstupem je, že např. pro čáru  $K$  závisí energie emitovaného charakteristického záření  $E_K$  na  $Z$  podle vztahu:  $E_K = 10,25 \cdot (Z - 1)^2$  eV.  $Z$  vypočítané energie dané čáry pak lze určit, kterému prvku náleží (její zastoupení ve spektru bude úměrné množství tohoto prvku). [9]

Nejčastěji je rentgenofluorescenční metoda aplikována při studiu vzácných fresek, obrazů a maleb [1] (k výrobě barev se v různých dobách používaly různé látky a často si barvy míchali sami malíři a tak se mohou barvy stát jejich rozpoznávacím znakem), ke zjištění složení materiálu zkoumaného historického předmětu.

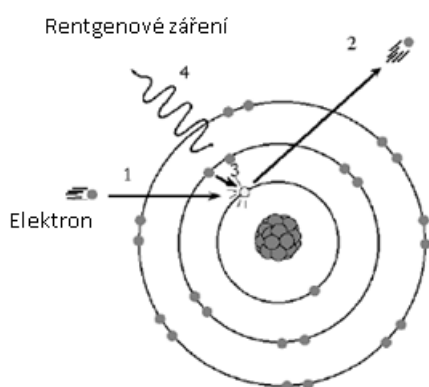
Prvek	Z	Energie $K_\alpha$ čáry [keV]
S	16	2,3
Fe	26	6,4
Sn	50	25,2
Pb	82	75

Tab. 6. - Energie K čar některých prvků. [11]

### Rentgenové záření (X-ray)

Jde o vysoce energetický krátkovlnný svazek elektromagnetického spektra vznikající při reakcích elementárních částic, rozpadu radioaktivních prvků apod.

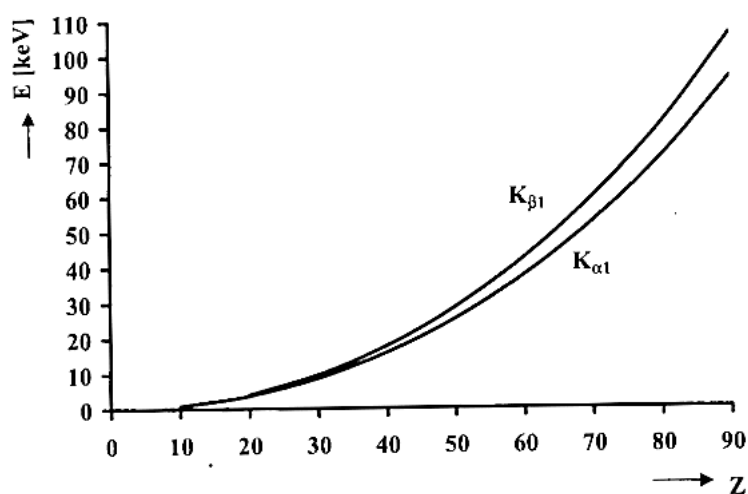
Fluorescenční rentgenové záření s čárovým charakterem, které potřebujeme pro provedení měření, vzniká vysokoenergetickou ionizací atomu.



Obr. 23 - Schéma atomu s přichozím rentgenovým zářením. [22]

První možností, jak toho docílit, je primární ionizace proudem nabitých částic. Pokud bychom hovořili čistě o ionizaci proudem elektronů  $e^-$ , dojde při jejich kontaktu s hmotou buď k tzv. pružné srážce (elektron narazí na jádro atomu, změní svůj směr, ale ne svou energii; jejich množství stoupá se vzrůstem atomového čísla  $Z$ ), nebo tzv. nepružné srážce, při níž elektron  $e^-$

ztratí část či veškerou svou energii. Způsoby, jak může elektron  $e^-$  ztratit svou energii, jsou v podstatě tři. První, kdy dojde k vyražení elektronu  $e^-$  z vnitřní energetické hladiny atomu a zmenšení jeho kinetické energie o součást ionizační energie hladiny se vznikající vakancí a kinetické energie vyraženého elektronu. Následně dojde k emisi rentgenového záření nebo Augerových elektronů<sup>xxxii</sup>. Druhý, při němž dojde ke ztrátě energie elektronu v důsledku brzdění v elektrickém poli a tomu (na tomto principu vzniká spojitě tzv. brzdné záření). Třetí je excitace valenčních elektronů  $e^-$  a jejich následné deexcitaci, jež je spojena s emisí záření náležejícího do viditelné a ultrafialové (UV) části spektra. Tento jev nazýváme katodoluminiscence.



Obr. 24 – Graf závislosti energie některých čar charakteristického záření na protonovém čísle. [14]

Druhým způsobem vysokoenergetické ionizace atomu je tzv. sekundární ionizace. Sekundární rentgenové záření vzniká vlivem vysokoenergetických, respektive rentgenových, fotonů opět umělým nebo přirozeným zdrojem záření. Vzniká např. ozářením vhodným primárním zdrojem rentgenového záření a tento jev označovaný rentgenová fluorescence je právě základem rentgenové fluorescenční spektroskopie (XRF-X-ray fluorescence). Během průchodu záření hmotou dochází k jeho zeslabení a během tohoto procesu může dojít k: absorpci fotonu vnitřní slupky a uvolnění elektronu (fotoefekt) a následnému vzniku vakancí vyvolávající relaxační děje (emise záření / Augerova elektronu), koherentnímu neboli

<sup>xxxii</sup> Augerovy elektrony – v excitovaném elektronovém obalu se jim přidává excitační energie a jsou z atomu emitovány (alternativa k emisi záření X).

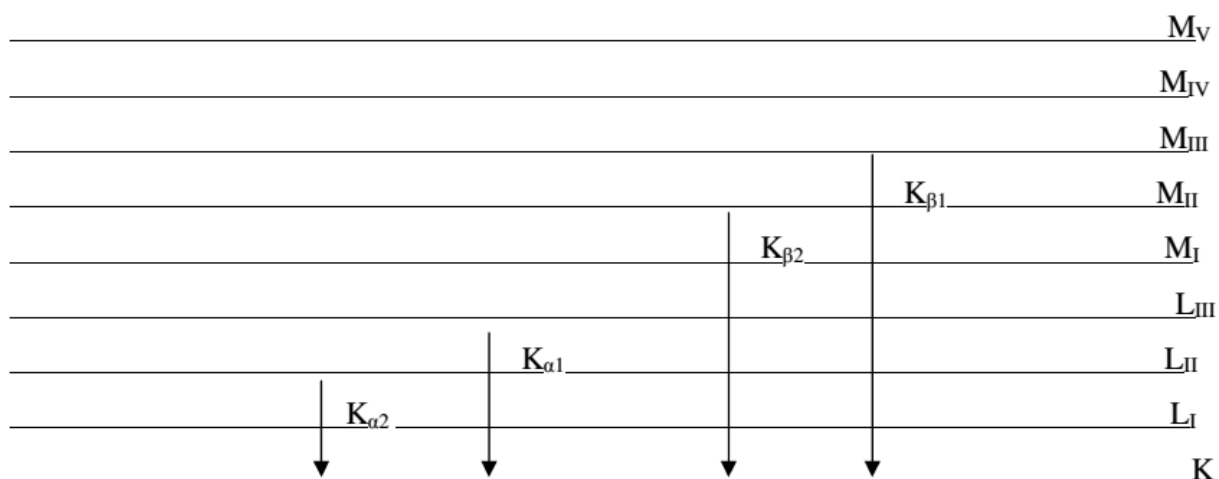
Rayleighovu rozptylu, nekoherentnímu neboli Comptonovu rozptylu. V případě tohoto způsobu ionizace obsahuje vzniklé záření pouze čárovou složku. Jevy spojené s vysokoenergetickou ionizací se aplikují např. v:

- Rentgenofluorescenční spektroskopii – viz tato práce.
- Fotoelektronová spektroskopie – ionizace probíhá za pomoci rentgenového nebo ultrafialového záření. Detekujeme kinetickou energii elektronů  $e^-$ , využívaná metoda na tomto principu je metoda ESCA (Elektron Spectroscopy for Chemical Analysis) především pro analýzu povrchů.
- Rentgenová mikroanalýza – ionizace probíhá úzkým svazkem urychlených elektronů.
- Augerova spektrometrie – opět ionizujeme svazkem urychlených elektronů, ovšem tentokrát nedetekujeme rentgenové záření, ale Augerovy elektrony.
- PIXE – viz tato práce str. 83.
- Rentgenová absorpční spektrometrie – zájmem našeho měření je spektrum absorbovaného záření zkoumaným vzorkem.
- Rentgenová difrakční analýza – měříme úhly difrakce rentgenového záření.

### **Fluorescenční rentgenová spektroskopie (princip podrobněji)**

Pokud dojde k nepružné srážce atomu s dostatečně rychlým elektronem, případně vysokoenergetickým fotonem, dojde mnohdy k vytržení elektronu, např. ze slupky  $K$  (na vzniku rentgenových spekter se podílejí  $e^-$  z vnitřních slupek (rozdíl od optických spekter)) a takto uvolněné místo pak může být zaplněno elektronem  $e^-$  z jiné slupky ( $L, M, N, \dots$ ). Tímto procesem vznikne skupina spektrálních čar  $K$  a následně i další série  $L, M, \dots$  (skupiny čar příslušející přechodům, které končí na příslušné hladině). Pořadí čáry v sérii je označováno řeckým písmenem odpovídajícím změně hlavního kvantového čísla  $\alpha: \Delta n = 1, \beta: \Delta n = 2, \gamma: \Delta n = 3$ ) a i tyto jednotlivé čáry pak mohou mít i vlastní jemné struktury. Nejintenzivnější čára vznikají přechodem na slupku  $K$ , tedy série  $K$ , a na slupku  $L$ , tedy série  $L$ . [15]





Obr. 25 - Schéma hladin v elektronovém obalu atomu. [14]

Dále o rozeznávání spekter. Protože uspořádání vnitřních elektronových slupek atomů různých prvků se značně podobají, je nutné odlišovat je velmi pečlivě podle polohy jednotlivých sérií a vzdáleností jednotlivých čar v těchto sériích. Konvenční značení čar vypadá pak ve výsledku např. takto: Cu K<sub>α1</sub> (připisujeme i označení prvku). Rozdíly ve spektrech jednotlivých prvků jsou dány velikostí vazebných sil mezi elektrony a různě nabitými jádry atomů různých prvků, polohy čar ve spektrech jsou zase závislé na atomovém čísle prvku  $Z$ , což vyjadřuje už zmíněný Moseleyův zákon, pro frekvenci pak platí:  $\nu = k \cdot (Z - 1)^2$ , kde faktor  $k$  je konstantní pro danou čaru. Z výše uvedených informací vyplývá, že právě poloha čar ve spektru je hlavní pro provedení kvalitativní analýzy. Intenzita čar je úměrná k množství jader určitého druhu a množstvím zastoupením prvku ve zkoumaném vzorku. Pro kvalitní využití této metody je nezbytné, aby zde byl dostatečně velký počet vakancí zaplněných zářivým přechodem, což nám vyjadřuje veličina označovaná jako rentgenový fluorescenční výtěžek:  $\omega_q = \frac{n_Z}{n_q}$ ,

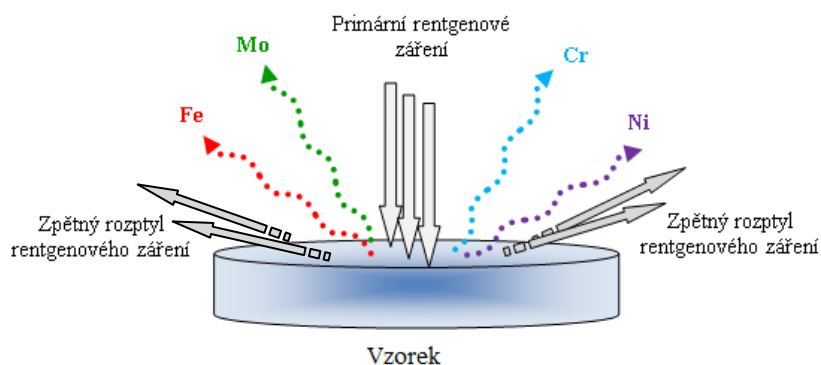
který vyjadřuje pro sérii označenou  $q$  podíl mezi počtem zářivých přechodů  $n_Z$  a celkovým počtem vakancí  $n_q$  na dané hladině  $q$ .

Pro lehké prvky je citlivost (vzhledem k rentgenovému fluorescenčnímu výtěžku) nízká z důvodu značného rušení nezářivými přechody, jako je např. emise Augerova elektronu,

proto se tento způsob měření aplikuje pro prvky s atomovým číslem vyšším, než 20 nebo v dobře vybavené laboratoři s velmi citlivými detektory.

### 2.4.1 Měření

Budící rentgenové záření je absorbováno zkoumaným vzorkem a jak už bylo zmíněno v úvodu, za pomoci rentgenového záření dojde k vyražení elektronů z elektronového obalu



atomu a dojde tak k uvolnění místa, které je zaplněno přeskakujícími elektrony z vnitřních slupek elektronového obalu atomu. Tyto přeskakující elektrony pak vyzařují rentgenové záření. Každý prvek má,

Obr. 26 - Schéma ozáření vzorku rentgenovým zářením.

pro sebe charakteristickou energii, díky čemuž můžeme podle vydaného záření daný prvek ve zkoumaném vzorku určit.

Možné zdroje generující charakteristické záření X potřebné k měření: záření gama ( $\gamma$ ) z radionuklidových zdrojů, záření X z rentgenky či svazky nabitých částic, ať už jde o elektrony, protony nebo těžší částice. [9]

Detekce charakteristického pro daný prvek se provádí spektrometricky. Výstupním údajem je pro nás distribuce fotonu onoho charakteristického záření, které určujeme podle jeho energie. Můžeme k tomu využít difrakci na krystalu s ohledem na Braggův zákon<sup>xxxiii</sup> popsaný rovnicí  $n\lambda = 2d \sin \theta$ , kde  $n=1,2,\dots$  a  $\lambda$  zastupuje vlnovou délku (známa – dáno materiálem rentgenky), dále  $d$  je vzdálenost rovnoběžných atomových rovin,  $\theta$  představuje úhel dopadu rentgenového záření (musíme změřit). Další, častější, možností je polovodičový spektrometr fotonů. [9]

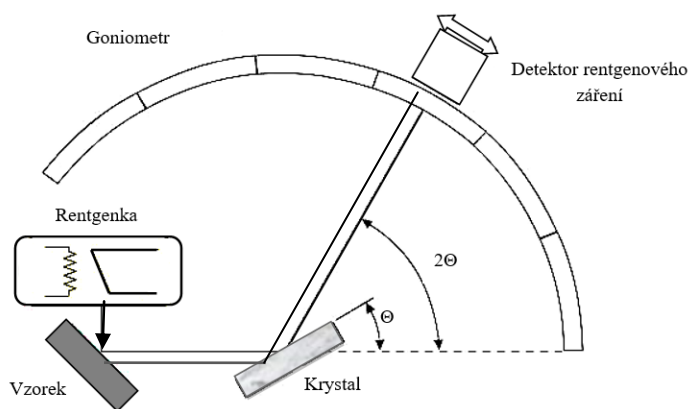
<sup>xxxiii</sup> Sir William Henry (otec) a sir William Lawrence (syn) Braggovi se zabývali rentgenovou krystalografií (rozložení atomů v krystalové mřížce pomocí rentgenového záření. V roce 1915 získali Nobelovu cenu.

## Základní konstrukční prvky rentgenově fluorescenčních spektrometrů

V zásadě se k detekci spekter tohoto druhu používají dva typy přístrojů. Prvním jsou přístroje vlnově disperzní, skládající se ze zdroje budícího záření, monochromátoru, který toto rentgenofluorescenční záření rozkládá, a nakonec je tu ještě detektor. Druhým typem přístrojů užívaných k detekci jsou energeticky disperzní přístroje, které se od prvního typu liší absencí monochromátoru, naproti tomu je však jejich součástí detektor se schopností registrovat jak dopadající fotony rentgenového záření, tak i určit jejich energii.

Rentgenová trubice, hovorově označovaná rentgenka, je sestavena z evakuové baňky do níž jsou umístěny elektrody katoda K (záporná) a anoda A (kladná). Katoda je žhavana přichozím elektrickým proudem a následně emituje elektrony. Tyto elektrony urychluje anodové napětí označované  $U_a$ . Katoda je navíc obklopena a vodivě spojena s tzv. Wehneltovým válcem (označme W), díky čemuž dojde k soustředění emitovaného svazku elektronů do malé oblasti na anodě. V tomto místě pak vzniká ono zmiňované rentgenové záření, jež je následně třeba detekovat. Díky technologickému postupu došlo i k jejímu vývoji (např. značné zmenšení) umožňujícímu sestavit i přenosný ruční přístroj.

Dále podrobněji rozebereme již zmiňované dva druhy přístrojů sloužící k detekci rentgenově fluorescenčního spektra.



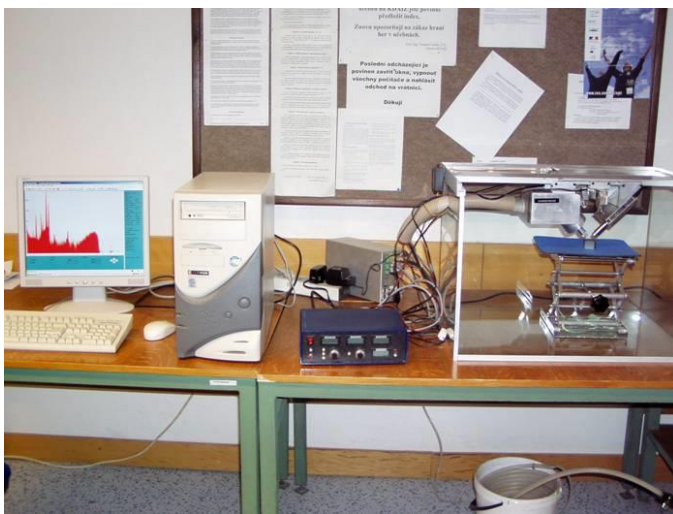
Obr. 27 - Schéma vlnově disperzního spektrometru.

(úhel dopadu rovná se úhlu odrazu) stejný úhel  $\theta$ . Difraktované záření různých atomů jedné roviny se skládá (překrývá) se stejnou fází zatímco záření, které je difraktované atomy sousední roviny ve vzdálenosti  $d$ , má dráhový rozdíl roven  $2d \sin \theta$ . Závěrem tedy bude, že

**Vlnově disperzní** přístroje rozkládají emitované záření difrakcí na krystalu, resp. na krystalové mřížce podle Braggova zákona uvedeného v úvodu rentgenofluorescenční metody. Difraktovaný paprsek vznikne odrazem od soustavy rovnoběžných rovin a svírá, stejně jako paprsek dopadající podle zákona odrazu

záření difraktované různými rovinami se skládá se stejnou fází v případě, že je splněna podmínka  $2d \sin \theta = n \cdot \lambda$  (platí Braggova rovnice, kde  $n \in Z$  a zastupuje zde řád difrakce). Pokud by podmínka splněna nebyla, klesla by intenzita difraktovaného záření velkým počtem rovin k nule.

Naproti tomu tu máme druhý typ, **energeticky disperzní spektrometry** (ED-XRF), v nichž bychom nenalezli pohyblivé prvky (díky fungování bez potřeby monochromátoru), naproti tomu však vyžadují, aby součástí jejich konstrukce byl také proporcionální detektor k rozlišení jak počtu fotonů, tak jejich energie.



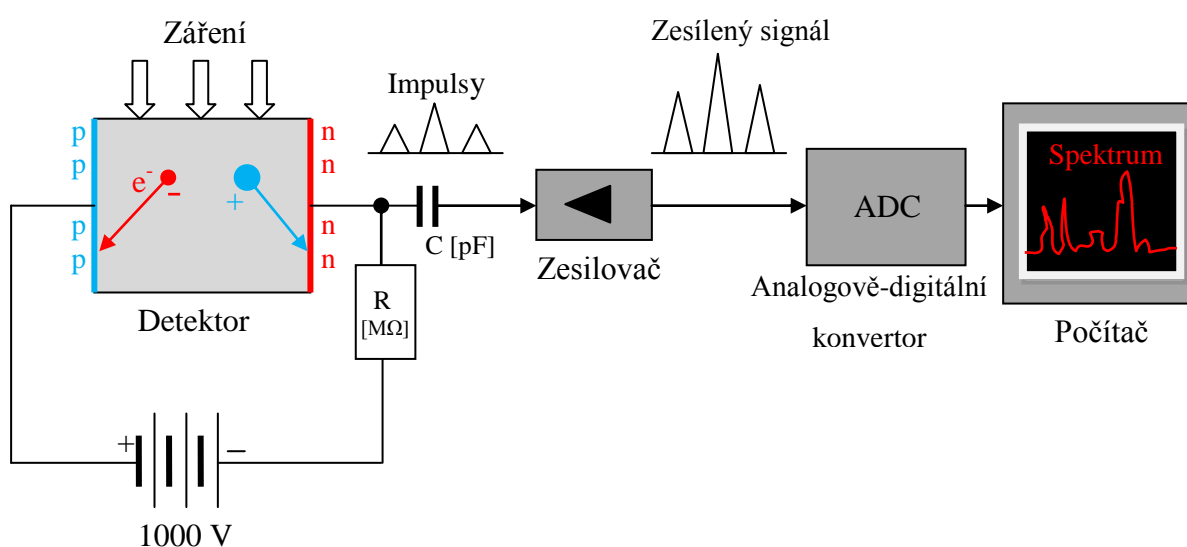
**Obr. 28 - Aparatura i s napojením na počítač katedry Dozimetrie a aplikace ionizujícího záření CVUT. [21]**

V současnosti používané detektory jsou především polovodičové (velmi čisté germanium, nebo křemík dotovaný lithiem (Si (Li))). Ve chvíli, kdy se do aktivní vrstvy detektoru pronikne kvantum ionizujícího záření, způsobí pak ionizační energie v polovodiči přeskok určitého množství elektronů  $e^-$  do tzv. vodivého pásma a vzniknou tzv.

elektron-děrové páry. Elektrony  $e^-$  se následně pohybují směrem k anodě a díry naopak směrem ke katodě, díky čemuž projde obvodem krátký proudový pulz a na pracovním odporu  $R$  vznikne napěťový úbytek a tento elektrický pulz je pak přes kondenzátor  $C$  veden k předzesilovači. Na výstupu zesilovače bude časový integrál, tedy amplituda proudového pulzu přímo úměrná celkově sebranému náboji, tedy energii detekovaného záření. Takto lze tedy provádět spektrometrickou analýzu energie detekovaného záření. Měření samozřejmě potřebujeme co nejpřesnější, nesmíme proto v tomto případě zapomenout na chlazení detektoru, aby došlo k omezení šumu a tak i citlivé detekci nízkoenergetických fotonů (v případě, že analyzujeme lehké prvky). [15] Je třeba dodat, že polovodičové detektory (laboratorní aparatura) je třeba chladit. Chladí se na teplotu kapalného dusíku, tedy

asi  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ , přičemž k detektoru je napojena měděná tyč ponořená v Dewarově nádobě<sup>xxxiv</sup> s kapalným dusíkem.

Dnes už existují spektrometry tohoto typu ruční, stolní a laboratorní s různým rozsahem měřených prvků, citlivostí, možností kalibrace umožňující analýzu jak pevných tak i kapalných a sytkých vzorků. Umožňují měřit širokou škálu prvků od fluoru ( $^{19}\text{F}$ ) až po uran ( $^{238}\text{U}$ ) s limitem detekce pohybující se na úrovni pmm. Mohou měřit koncentrace ve zkoumaném vzorku od deseti tisíc procenta až do sta procent.



Obr. 29 - Schéma fungování polovodičového detektoru.

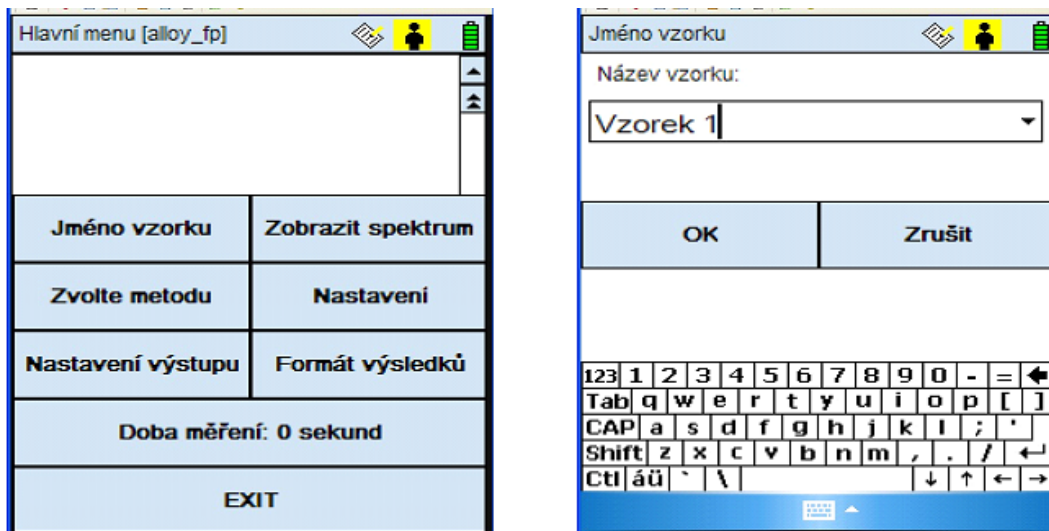
Jako příklad energeticky disperzního rentgeno fluorescenčního spektrometru uvedu přenosný a bateriově napájený přístroj X-Met 5100 od firmy Oxford Instruments a práci s programem X-MET. Energetickým zdrojem tohoto spektrometru je dobíjecí baterie, zdrojem budícího záření je Rh (rhodiová) rentgenka. Tato rentgenka pracuje kolem napětí 45 kV a dosahuje výkonu přibližně 2 W. Detektor je zde polovodičový, konkrétně se jedná o křemíkový driftový detektor (SDD) a jako chladící médium se používá Peltierův článek<sup>xxxv</sup>. Detektor má rozlišení lepší, než 150 eV a umožňuje i detekci lehkých prvků jako jsou hořčík (Mg), hliník

<sup>xxxiv</sup> Dewarova nádoba – dokonale tepelně izolující nádoba s dvojitými stěnami se vzduchoprázdným meziprostorem (užívá se jako kalorimetr a k uchování zkapalněných plynů).

<sup>xxxv</sup> Peltierův článek – navzájem propojené větší množství polovodičových elementů pomocí kovových můstků, celek opatřen keramickými destičkami, přes něž je odebíráno teplo a chlad. Tzv. Peltierův jev byl „objeven“ fyzikem J. Ch. A. Peltierem žijícím na přelomu 18. a 19. století a spočívá v pozorování, že spájené místo dvou různých kovů se při průchodu proudu buď nepatrně ohřívá, nebo ochlazuje. O ohřevu či ochlazení rozhoduje směr proudu.

(Al) a křemík (Si), aniž by bylo třeba pracovat ve vakuu či heliové (He) atmosféře. Používá se pro analýzu kovových slitin, nerostných surovin, zeminy apod. [15]

Program X-MET a práce s ním vypadá následovně:



Obr. 30 - Hlavní menu programu X-MET. [15]

V hlavním menu se nám objeví kolonka **Výběr metody**, pod níž se zobrazují dostupné metody měření (zde jsou tři lišící se druhem kalibrace): Screeningové metody, které typ vzorku detekují automaticky a vyberou nejvhodnější metodu s kalibrací empirickou případně kalibrací fundamentálními parametry. Empirické metody jsou závislé na daném typu vzorku, pro něž jsou, dá se říci jedinečné, a je třeba k tomuto měření provést také analýzu vhodných standardů. Fundamentální parametry metody se řadí mezi metody bezkalibrační hodící se pro rozsáhlé množství materiálu. Pod kolonkou **Doba měření** musíme počítat s časem od stisknutí spouště spektrometru až do jejího uvolnění. Pro slitiny se doba, po níž měříme, pohybuje kolem 2-20 s, pro měření půd se jedná alespoň o 1 minutu trvajícím měření. Kolonka **Zobrazit spektrum** umožňuje prohlížení spektra posledního měřeného vzorku s možností zvětšení či zmenšení a umístění identifikačních čar prvků. [15]



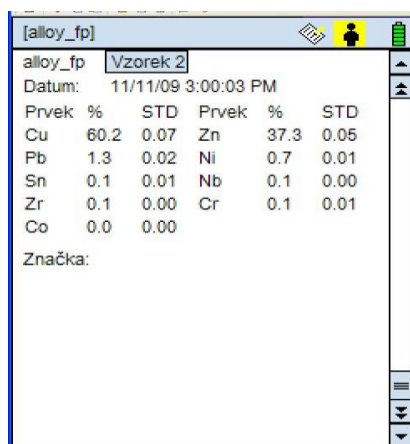
Obr. 31 - Zobrazení spekter v programu X-MET. [15]

Samotným spektrometrem typu X-Met 5100, stejně i jinými ručními spektrometry tohoto typu měříme přitisknutím nosu analyzátoru na zkoumaný vzorek nebo opačně (pod pravým úhlem pokud možno, pro zajištění co nejpresnějšího měření) a stiskneme měřicí spoušť (držíme ji během měření nebo dobu měření přednastavíme v případě, že měření bude dlouhodobé). Je nezbytné, aby byl buď měřeným vzorkem, nebo bezpečnostním krytem pro měření malých vzorků, překryt infračervený senzor. Analyzátor lze při vhodném umístění pro usnadnění dlouhodobější práce umístit do stojanu. Pokud měříme práškové vzorky, probíhá toto v tzv. PE sáčku s možností použití speciálního pouzdra pro takovýto typ vzorků.



Obr. 32 - Spektrometr X- MET 5100 a příslušenství. [15]

Výsledné zobrazení provedeného měření včetně data jeho provedení a všech potřebných údajů:



The screenshot shows a software window with the following content:

[alloy_fp]					
alloy_fp Vzorek 2					
Datum: 11/11/09 3:00:03 PM					
Prvek	%	STD	Prvek	%	STD
Cu	60.2	0.07	Zn	37.3	0.05
Pb	1.3	0.02	Ni	0.7	0.01
Sn	0.1	0.01	Nb	0.1	0.00
Zr	0.1	0.00	Cr	0.1	0.01
Co	0.0	0.00			

Značka:

Obr. 33 - Ukázka výsledků analýz provedených měření. [15]

### Výhody a nevýhody rentgenofluorescenční spektrometrie

Tato metoda má hned několik výhod. První výhodou už je sám proces, díky jehož rychlému průběhu může zároveň se samotným ozařováním probíhat také měření. Například, na rozdíl od radiouhlíkové metody, není třeba odebírat ze zkoumaného předmětu vzorek (lze ho tedy zkoumat jako celek) a případně ho tak poškodit, což lze označit za další nepopiratelnou výhodu. Díky možnosti úzkého směřování paprsku rentgenového záření je pak možné daný předmět skenovat a všimnout si i různých změn ve složení vyskytujících se prvků, na různých místech zkoumaného objektu.

Co jistě ocení archeologové pracující v terénu je možnost sestavení kompaktního přenosného zařízení, které mu umožní zkoumat daný objekt přímo na místě či zkoumat předmět, který neumožňuje převoz z místa nálezů apod.

Rentgenofluorescenční analýza je v porovnání s aktivační analýzou také levnější, především díky skutečnosti, že není třeba jako zdroj záření jaderný reaktor, na druhou stranu je však nutno podotknout, že má menší citlivost pro detekci většiny prvků.



## Kde měření probíhají a příklad jejich aplikace

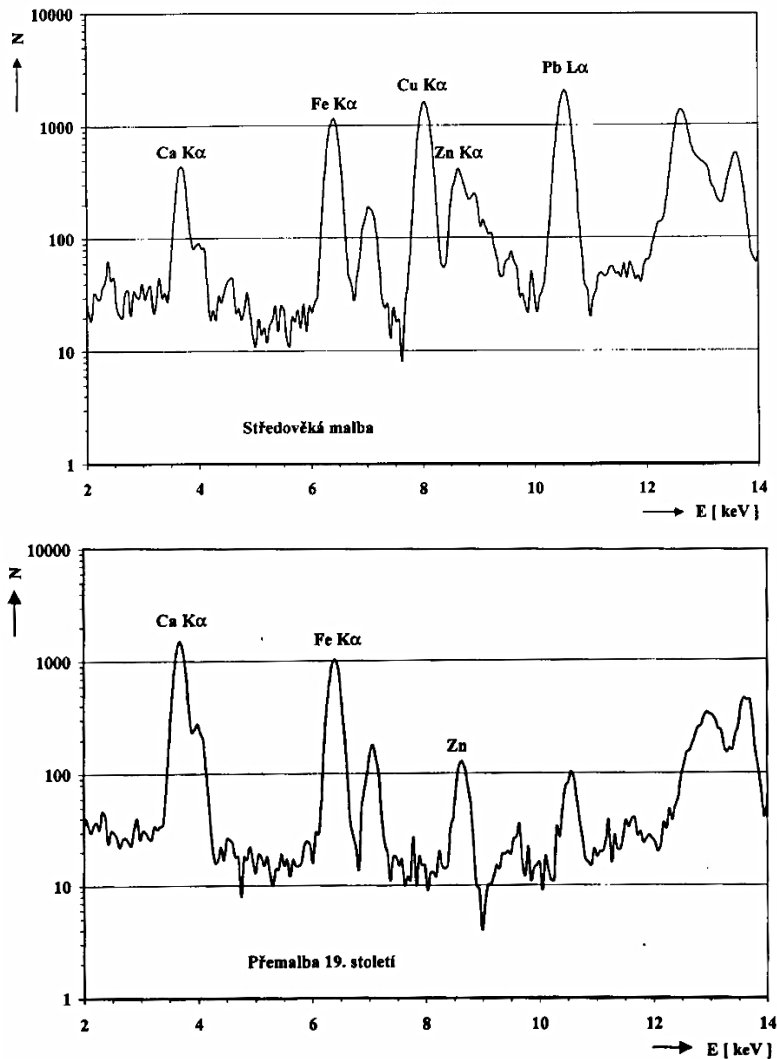


Obr. 34 - Zkoumání hlavy Krista z morového sloupu v Olomouci. [1]

Měření využívající tuto metodu provádí skupina vědců z ÚJF AVČR v Řeži nebo Katedra dozimetrie na FJFI ČVUT v Praze, kde tuto metodu aplikovali na jedny ze známějších objektů jako Relikviář svatého Maura během jeho restaurování či ke zkoumání karlštejnských fresek, nebo, jak můžeme vidět na obrázku, byla tímto způsobem zkoumána i hlava Krista z morového sloupu v Olomouci (skupinu vedl prof. Ing. Tomáš Čechák, CSc). [1] Dále má ozařovací pracoviště Středočeské muzeum v Roztokách u Prahy.

## Fresky na Karlštejně

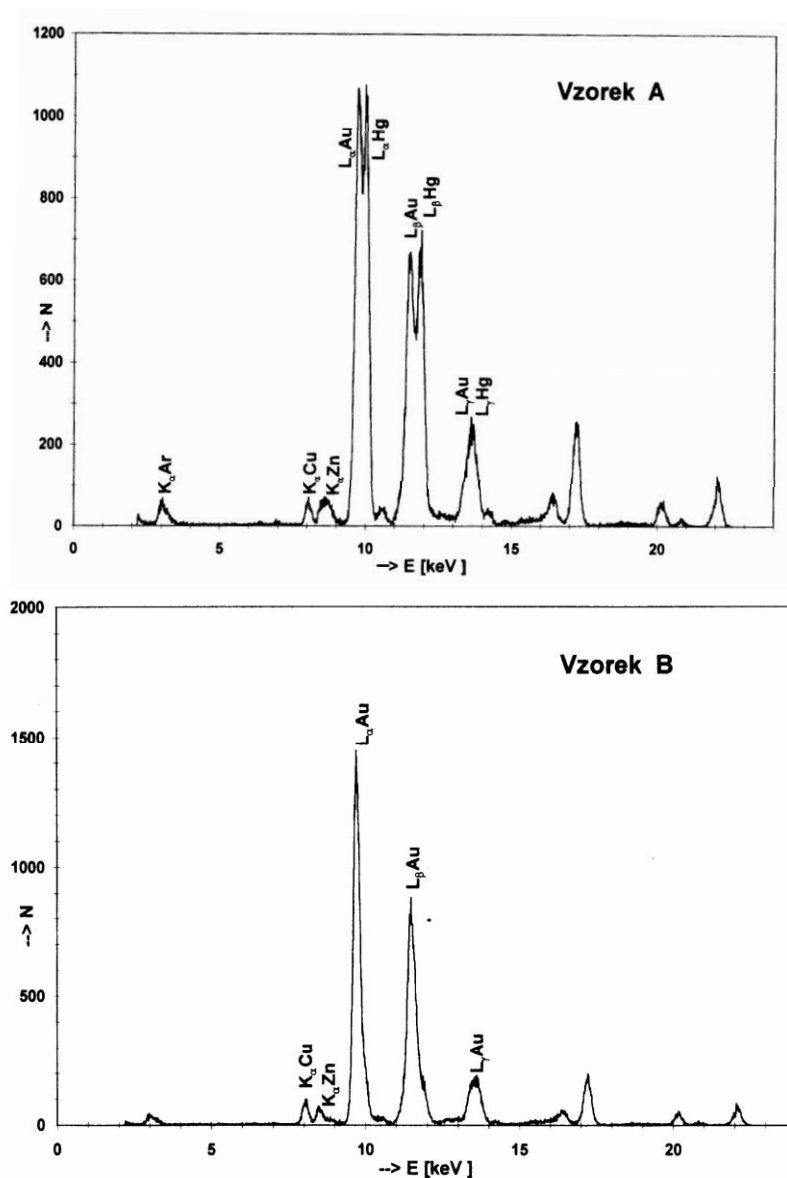
Gotický hrad Karlštejn postavený císařem Karlem IV. roku 1348 jako císařské sídlo a pokladnice korunovačních klenotů s jedinečnou uměleckou výzdobou, mezi níž patří i známé fresky pocházející ze 14. století. Dle určitých záznamů víme, že v 19. století došlo k jejich restaurování. Díky použití této metody bylo možné určit, které konkrétní části bylo třeba restaurovat a které jsou stále původní.



Obr. 35 - Spektrum původní černé barvy použité na fresce a spektrum černé barvy použité při restauraci. [14]

## Relikviář sv. Maura

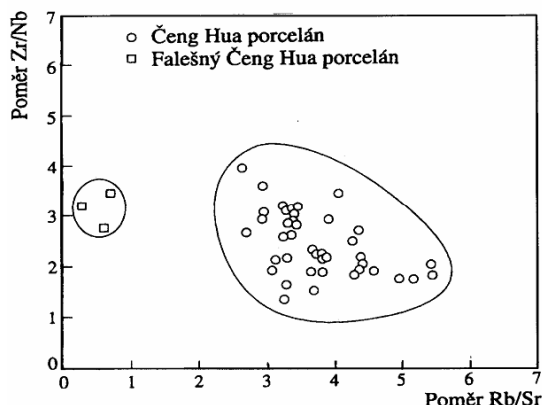
Relikviář pocházející ze 13. století byl při jeho objevu r. 1988 v zámecké kapli v Bečově nad Teplou značně poškozen, a tak ho bylo třeba restaurovat. Pomocí rentgenofluorescenční analýzy došli restaurátoři k závěru, že schránka byla zdobena stříbrným materiálem potíraným amalgamem, který byl poté různým způsobem žíhán, jak bylo vyvozeno z analýz provedených na více místech zkoumaného předmětu.



Obr. 36 - Charakteristická spektra záření vzorku z dvou různých částí relikviáře. [14]

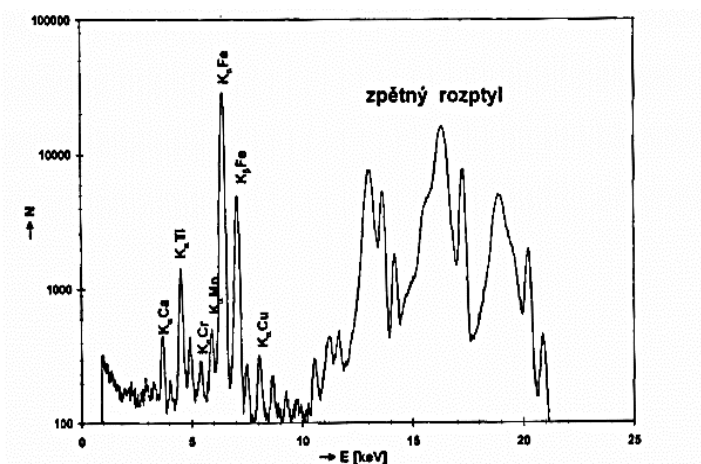
## Čínský porcelán císaře Čcheng-hua

Jeden z nejkvalitnějších porcelánů období dynastie Ming vyznačující se modrobílou barvou byl vyzdvižen na místě potopené španělské galeony<sup>xxxvi</sup> r. 1978, jež ho vezla jako součást svého nákladu. Nález je o to vzácnější, že mnohé kusy vyzvednuté ze dna byly naprosto nepoškozené (lze u nich určit pravost – odpovídal i styl a značky na porcelánu – lze ho tedy používat jako standart při ověřování jinde nalezených kusů).



Obr. 37 - Korelační graf vyjadřující složení pravého a padělaného porcelánu. V padělcích je patrná odchylka v poměru rubidia a stroncia (Rb/Sr) a stejně tak i zirkonia a niobu (Zr/Nb). [14]

## Grafický výstup měření



Obr. 38 - Spektrum charakteristického záření vzorku, v tomto případě uhlí. [14]

Graf na Obr. 38 zobrazuje elektrické impulsy zachycené pomocí detekční aparatury. Výška impulsů je úměrná energii, která byla v detektoru absorbována. Naměřené spektrum odpovídá čarám vlastním pro záření určitého prvku a má na grafu charakter tzv. Gaussových pík.

<sup>xxxvi</sup> Španělská galeona *Nuestra Señora de la Pura y Limpia Concepción* ztroskotala během hurikánu r. 1641 během plavby z Vera Cruz (Mexiko) do Seville (Španělsko) spolu s nákladem cenného zboží (zlato, stříbro, perly, drahé kameny, zboží z Orientu) severně od Dominikánské republiky.

## 2.5 Neutronová aktivační metoda (NAA)

Na rozdíl od předcházející metody se zde jedná o metodu jadernou, pro jejíž aplikaci je třeba odebrat malý vzorek ze zkoumaného objektu (jistá destrukce), na druhou stranu je tato metoda citlivější ohledně detekce některých prvků. Opět zde využíváme charakteristické hodnoty energie záření, tentokrát však izotopu prvku a pro někoho charakteristického záření gama ( $\gamma$ ).

Mezi možné příklady využití (ráda bych poznamenala, že tyto příklady lze použít i jako další možnosti aplikace také pro rentgenofluorescenční analýzu) lze zařadit výzkum starověkých nálezů, například výrobků z mědi (od zbraní přes různé nástroje, šperky, ozdoby až po její využití jako platidla). Jak neutronovou aktivační analýzu tak i rentgenofluorescenční metodu lze obecně využít k rozboru a detekci prvků, s čímž přichází možnost odhalit původ, výrobní postup či pravost zkoumaného předmětu.

### 2.5.1 Měření

Pro měření je prvně nutné odebrat vzorek, stačí velmi malé množství (miligramy, popřípadě řádově desítky miligramů), ze zkoumaného objektu. Pečlivě připravený vzorek je vložen do pole neutronů, které vznikají v ozařovacím, případně výzkumném jaderném reaktoru (používá se s ohledem na potřebu, vzhledem k citlivosti, co největšího toku tepelných neutronů<sup>xxxvii</sup>) a jejich reakcemi s jádry atomů zkoumaného prvku pak vzniknou radioaktivní izotopy. Dalším krokem po ozáření vzorku je jeho umístění do detektoru záření gama ( $\gamma$ ). Vzniklá radioaktivní jádra se rozpadají a to konkrétně rozpadem beta ( $\beta$ ). Vzniklá jádra se obvykle nacházejí v tzv. vybuzeném stavu s přebytkem energie, již se zbavují vyzařováním již výše zmíněného záření gama ( $\gamma$ ) s hodnotami energie typickými pro daný izotop prvku.

Výše zmíněný postup poskytuje dostatečně dlouhý poločas rozpadu radioaktivních jader, která vznikla reakcí s neutrony a umožňuje tak měřit toto záření po ozáření vzorku a jeho přesunu k detektoru. K detekci gama záření ( $\gamma$ ) se obvykle pro tyto účely používá polovodičový spektrometr umožňující následnou jak kvalitativní, tak i kvantitativní analýzu spekter, jež byly registrovány. Nespornou výhodou měření neutronovou aktivační analýzou je možnost měření jak samotných chemických prvků, tak i jejich různých izotopů. [1]

---

<sup>xxxvii</sup> Tepelné neutrony – jejich energie je zpomalena na hodnoty, které odpovídají hodnotám energií při tepelném pohybu za dané teploty, protože při těchto hodnotách je pravděpodobnost reakce vysoká.

Ve složitých materiálech dochází ke vzniku různých radionuklidů aktivací více prvků, které takový zkoumaný materiál obsahuje, proto je nutné dbát na jejich identifikaci jak na úrovni kvalitativní, tak i kvantitativní. Nejčastěji k tomuto účelu bývá používána spektrometrie záření gama ( $\gamma$ ), případně radiochemická separace). [9]

Pro určení míry aktivity<sup>xxxviii</sup> daného vzorku nám slouží následující vztah:

$$A = \phi \cdot \sigma \cdot \frac{\Theta \cdot m \cdot N_A}{A_r} \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \quad [14]$$

Ve výše uvedeném vzorci je zastoupena fluence částic  $\phi$ , kterými odstřelujeme (příkon fluence částic bychom definovali jako derivaci fluence částic podle času, tedy  $\frac{d\phi}{dt}$ , lze si ji tedy představit jako počet částic, jež za jednotku času prošly plochou terčiku postaveného kolmo ke svazku procházejících částic), dále zde figuruje účinný průřez interakce  $\sigma$ <sup>xxxix</sup> a zastoupení terčového nuklidu v přírodní směsi izotopů daného prvku  $\Theta$ . Malým písmenem  $m$  označujeme hmotnost určitého prvku ve vzorku, dále se ve vzorci objevuje Avagadrova konstanta  $N_A$  a molární hmotnost prvku  $A_r$ , přeměnová konstanta  $\lambda$  a jako  $t$  značíme čas, během něhož zkoumaný vzorek ozařujeme.

Po ukončení ozařování označíme čas, který od jeho ukončení uběhl  $t'$ . V tomto čase pak vyjádříme aktivitu sledovaného vzorku jako (nuklidu v něm):

$$A' = A \cdot e^{-\lambda t'} \quad [14]$$

Hmotnost daného prvku ve zkoumaném vzorku pak můžeme spočítat právě po změření výše uvedené aktivity  $A'$  po uplynutí času  $t'$  od ukončení ozařování. Důvodem výpočtu vycházejícímu právě z této veličiny je, že ostatní veličiny figurující ve vzorci jsou ovlivněny podmínkami, za nichž byl experiment prováděn, nebo se jedná o konstanty.

K tomuto postupu měření by ještě bylo vhodné dodat, že pro zajištění přesnosti výsledků se provádí tzv. srovnávací měření, během něhož se současně s daným vzorkem ozařují také

<sup>xxxviii</sup> Aktivita – jedna aktivační reakce na jednom terčovém nuklidu (jádre).

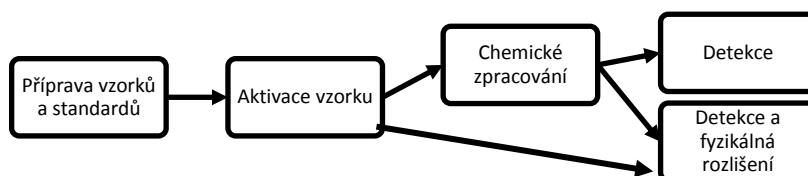
<sup>xxxix</sup> Účinný průřez – veličina popisující pravděpodobnost jaderných reakcí či jiných interakcí v mikrosvětě, pro tuto práci jde konkrétně o pravděpodobnost, že dojde k aktivační reakci na daném terčovém jádře, máme-li vzorek ozářen jednotkovou fluence částic jimiž je bombardován.

standarty, jež obsahují přesně známá množství prvků, které chceme zjistit. Pro vyjádření použijeme následující vzorec:

$$m_x = \frac{A_x}{A_s} \cdot m_s \quad [14]$$

Hmotnost prvku v neznámém vzorku  $m_x$  je tedy vyjádřena jako podíl aktivity prvku v neznámém vzorku  $A_x$  a aktivity téhož prvku ve standardu  $A_s$  násobené hmotností daného prvku ve standardu. Zmíněný postup formou srovnávacího měření zajistí, že se v měření neprojeví nepřesnost účinného průřezu  $\sigma$  ani nepřesnost ve stanovení příkonu fluence  $\phi$ .

Jako zdroj částic se využívá výzkumný či ozařovací jaderný reaktor, případně může jako zdroj neutronů posloužit i neutronový generátor, který funguje na principu samovolného štěpení  $^{252}\text{Cf}$  (Kalifornium).



Obr. 39 - Schéma postupu měření.

### Kde měření probíhají a příklad jejich aplikace

Měření touto metodou probíhají v České republice v již mnohokrát zmíněném ÚJF v Řeži, kde pro tyto účely využívají reaktor LWR-15 pro aktivační analýzu vybavené ozařovacími kanály (tím se liší od jaderných reaktorů užívaných např. v elektrárnách).

Pomocí této metody byly studovány například depoty<sup>x1</sup> obsahující měděné nálezy pracovníky Jihočeského muzea v Českých Budějovicích (Doc. Mgr. Ondřej Chvojka, Ph. D. a další) spolu s RNDr. Jaroslavem Fránou, CSc. a Ing. Markem Fikrlem, Ph. D. z ÚJF AVČR v Řeži. Předmětem jejich výzkumu bylo zastoupení příměsí různých prvků v mědi (stříbro, arsen,

<sup>x1</sup> Depot – hromadný nálezn minimálně dvou, obvykle více předmětů, jednoho či více druhů artefaktů uložených záměrně a najednou.

nikl, antimon, cín atd.) [1] Proč zkoumat u takových nálezů právě příměsi? Důvodem nebylo zkoumat znečištění původní rudy, z níž byla měď získávána, nýbrž předpoklad, že příměsi se do mědi dostaly úmyslně. Ze získaných dat lze předpokládat, že příměsi jsou důsledkem legování, jehož cílem bylo zlepšit vlastnosti suroviny pro následné zpracovávání. Takováto měření a studie nám mohou mnohé napovědět o výrobních a zpracujících postupech našich předků napříč různými regiony a epochami. Další příklady aplikace této metody jsou uvedeny níže.

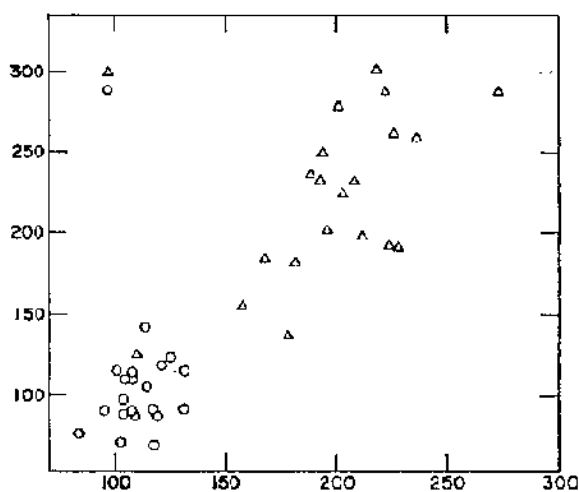
### Kratér mykénského typu



Obr. - 40 Kratér [9]

Nádoba, tzv. kratér, pochází z pozdní doby bronzové. Nalezena byla v Tel Dan (v Izraeli). Za pomoci aktivační analýzy bylo zjišťováno, z které oblasti původně keramika pochází (kde byla vyrobena). Stopové prvky, a to především vzácných zemin, obsažené v nálezů byly následně porovnávány s refrakčními vzorky podobné keramiky z různých míst světa. Vyloučen tak byl původ na blízkém Východě či na Kypru (po Mykénách další velké centrum mykénské kultury) a jako místo původu byla určena argoská oblast na Peloponésském poloostrově. [9]

### Keramické střepy z archeologických nálezů v Knóssu a v Mykénách



Obr. 41 - Korelační graf. Obsah chromu a niklu ve střepech. [9]

Z uvedeného grafu je jasná odlišnost obou skupin. Během testování byly stanoveny i obsahy dalších prvků jako europium (Eu) a cesium (Cs), jejichž koncentrace zde byla vyšší než v jiných knósských vzorcích, zatímco koncentrace železa (Fe) byla naopak nižší. Touto analýzou bylo tedy prokázáno, že nalezené střepy nemají původ na Knóssu. [9]



## Římské mince



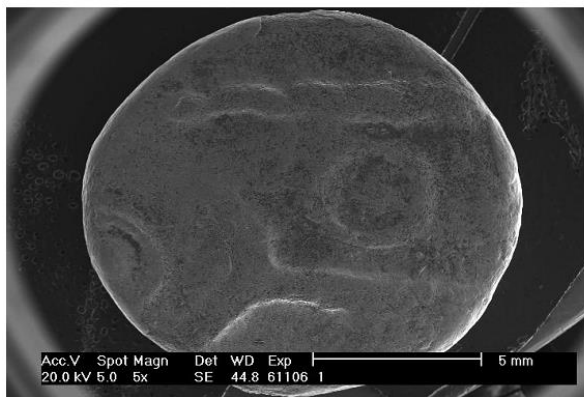
Obr. 42 - Mince. [9]

Neutronová aktivační analýza zde byla použita za cílem zjištění obsahu stříbra (Ag), zlata (Au), mědi (Cu) a cínu (Sn) v těchto mincích pocházejících z doby vlády císaře Konstantina I. (306-337). Za tímto účelem bylo testům podrobena více, než 200 různých mincí. Jako radionuklidový zdroj neutronů obsahující 1 mg  $^{252}\text{Cf}$  (Kalifornium) bylo k aktivaci použito poměrně jednoduché zařízení, proto toky neutronů byly v porovnání s jaderným reaktorem značně nižší, ovšem pro tyto účely dostačující. Chyba měření se i přes tyto okolnosti pohybovala u stanovení obsahu stříbra (Ag) 0,1% a u obsahu zlata (Au) dokonce jen kolem 0,05%. Poměrů kovů a všeobecně složení mincí bylo tedy poctivě dodržováno, alespoň v tomto případě, se značnou přesností. Tato skutečnost pak historikům napovídá o kvalitě císařských mincoven. [9]

## Zlaté a stříbrné keltské mince [16]<sup>xli</sup>

### MINCE 1.

Wt (%)	Ag	Cu	Pb	Fe
Měření 1	86,4	6,3	6,4	0,9



Obr. 1. Mince 1, plošná analýza pomocí SEM/EDX byla provedena na aversu mince

Obr. 43 - Mince. [17]

Tyto mince byly nalezeny při archeologických výzkumech na Bratislavském hradě. Úkolem zkoumání bylo zjistit jejich přesné chemické složení. Zkoumání bylo provedeno pomocí skenovacího elektronového mikroskopu a energiově-disperzním mikroanalyzátozem (SEM-EDX).

<sup>xli</sup> Další měření si lze prohlédnout na: <http://mck.technicalmuseum.cz/analyticke-pruzkumy>.

Takto bylo naměřeno 19 mincí. Výsledky ukazuje následující tabulka.:

Wt (%)	Au	Ag	Cu	Pb	Cl	Fe
Mince 1	-	86,4	6,3	6,4	-	0,9
Mince 2	-	89,1	5,6	5,3	-	-
Mince 3	84,3	15,7	stopy	-	-	-
Mince 4	86,7	13,3	stopy	-	-	-
Mince 5a	89,3	8,5	2,2	-	-	-
Mince 5b	92,1	6,1	1,8	-	-	-
Mince 6	86,4	11,6	2,0	-	-	-
Mince 7	85,2	14,8	stopy	-	-	-
Mince 8	88,6	9,7	1,7	-	-	-
Mince 9	86,4	11,6	2,0	-	-	-
Mince 10	92,0	7,0	1,0	-	-	-
Mince 11	-	76,8	-	-	23,2	-
Mince 12	84,5	12,7	2,8	-	-	-
Mince 13	85,9	14,1	stopy	-	-	-
Mince 14	87,2	10,5	2,3	-	-	-
Mince 15	87,1	11,3	1,6	-	-	-
Mince 16	85,5	12,6	1,9	-	-	-
Mince 17	83,4	16,6	stopy	-	-	-
Mince 18	85,2	13,1	1,7	-	-	-
Mince 19	-	76,4	-	-	23,6	-

Tab. 7 - Tabulka výsledků reálně proměřených mincí. [17]

## Keltský náramek

Náramek vyrobený z modrého skla byl nalezen severně od Prahy, konkrétně v Tursku, a předpokládaná doba jeho původu je pozdní laténské období (asi 150 – 0 př. n. l.). Spolu s dalšími čtyřiceti dvěma vzorky skla nalezených na českém území byl tento náramek zkoumán v rámci jediného projektu za účelem zjistit místa původu surovin a místo jeho produkce. Získané výsledky jednoznačně odlišily sklo pocházející z doby pozdně halštatské, raně laténské a pozdně laténské (sklo z doby laténské by bylo zřejmě možno podle obsahu manganu (Mn) časově rozlišit i mnohem jemněji), tak i sklo původem z doby římské. [9]

## 2.6 Využití urychlovačů

Málokdo by to očekával, ale urychlovače částic lze využít nejen k objevování nových částic, ale využít je můžeme i pro analýzu složení či struktury zkoumaného materiálu. Podle toho, jaký předmět podrobujeme analýze a v závislosti na tom, jaké záření potřebujeme zkoumat,

užíváme kromě samotného urychlovače také detektory záření rentgenového, gama ( $\gamma$ ), popřípadě různých druhů nabitých částic.

Podstatou metody je skutečnost, že elektronový obal atomu lze zbavit jednoho elektronu  $e^-$ , ionizaci pak způsobuje nabitá částice z urychlovače. Podle toho, jak upravíme dodávku energie či geometrii svazku produkovaného urychlovačem, můžeme ovlivnit hloubku, v níž dochází ke vzniku iontů či radioaktivních jader a díky této vlastnosti můžeme získat informace o strukturálních změnách vrstev.

Těchto vlastností se hojně využívá pro studium artefaktů z hlediska jejich výrobních postupů, na první pohled neodhadnutelného stupně poškození nálezů, historie daného předmětu (zda už byl někdy upravován, jak jsou původní vrstvy apod.). Mimo archeologii se tento postup využívá především pro studium vrstev obrazů a odhalování případných falz.

Konkrétní metoda spadající do tohoto okruhu se liší v závislosti na materiálu, strukturách a prvcích, na něž má být aplikována.

### 2.6.1 Metoda PIXE (Proton Induced X-ray Emission)



Obr. 44 - Pracoviště Tanderonu ÚJF AVČR. [18]

Podle charakteristického rentgenového záření lze díky této metodě určit chemické složení nalezeného vzorku.

Máme svazek urychlených protonů, které při svém průletu vzorkem ionizují jeho atomy. Takto vzniklé ionty v atomovém obalu obsahují díry po elektronech, které byly vyraženy elektrickým polem protonu. Díry jsou dále zaplňovány

elektrony s původem ve vnějších slupkách elektronového obalu a právě tyto elektrony během svého přeskoku způsobují ono, pro nás potřebné, charakteristické rentgenové záření. [18]

Abychom mohli toto záření detekovat, využíváme polovodičový detektor.

## Příklad aplikace této metody

V České republice tuto metodu využívají v Oddělení neutronové fyziky ÚJ AVČR, kde pracují s urychlovačem Tandetron 4130MC, což jim umožňuje vytvořit opravdu úzký protonový svazek o průměru 1,5 mikrometru. Mohou tak velice detailně skenovat rozložení prvků v daném vzorku. Metoda je označována jako microPIXE. Přístup jak českých, tak případně i zahraničních vědců k různým přístrojům včetně urychlovače Tandetron 4130MC by měl být zlepšen díky projektu CANAM<sup>xlii</sup>, který byl spuštěn v Řeži.



Obr. 45 – Fotografie ze zkoumání korespondence Galilea Galileiho metodou PIXE. [1]

Tato metoda byla stejně jako aktivizační analýza užitá při zkoumání pozůstatků Tychona Braha, konkrétně jeho vousů. Díky využití výše zmíněného urychlovače mohl tým v čele s Vladimírem Havránkem velice detailně skenovat rozložení prvků obsažených ve vousu, dokonce tak detailně a s takovým rozlišením, že bylo možné odlišit i jeho povrchové znečištění. Připravené, velmi jemné vzorky vousů musely být nejprve šetrně a pečlivě upevněny do držáků a následně umístěny do komory, kde byly podrobeny zmíněnému skenování tenkým svazkem protonů.<sup>xliii</sup> Touto metodou také např. testovaly korespondenci Galilea Galileiho.

### 2.6.2 Metoda PIGE (Particle Induced Gamma-ray Emission)

Zaměřujeme se na radioaktivní jádro vyprodukované jadernou reakcí částic či iontů. Pro naše účely se pak soustředíme na vyzařované charakteristické gama záření.

Další způsob využívající princip urychlovače Jde o rozptyl nabitých částic a iontů na jádrech, z něhož se pak dá podle potřeby určit, o jaký prvek se podle náboje jader jedná, případně také jaká je struktura daného materiálu.

<sup>xlii</sup> Více o projektu CANAM na webových stránkách projektu: <http://canam.ujf.cas.cz/>

<sup>xliii</sup> Ke zkoumání pozůstatků Tycha de Brahe fotodokumentace v přílohách.

### **2.6.3 Metoda RBS (Rutherford Backscattering Spectroscopy)**

U lehčích částic věnujeme pozornost zpětnému rozptylu, který způsobilo samo elektrické pole jader.

„RBS channeling“ (ztv. kanálování nabitých částic) je metoda aplikovaná pro potřeby zkoumání krystalických materiálů, protože umožňuje využití pohybu iontů v krystalické mřížce.

### **2.6.4 Metoda ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis)**

Pod tímto anglickým názvem se skrývá metoda, jež se zaměřuje na jádro odražené z materiálu, který je předmětem zkoumání, tedy odklání pozornost od rozptýleného iontu svazku, jak tomu bylo u předchozí metody.

### 3 Zhodnocení metod

Začlenění fyzikálních metod do práce archeologů, historiků i muzeí je nesporným přínosem. Pomocí těchto metod, postupů založených na fyzikálních principech bylo odhaleno mnoho jinak nedostupných tajemství minulosti.

Z metod, které byly zmíněny pro práci v terénu, se jako jedna z nejčastěji používaných ukázala magnetometrie. Je finančně dobře dostupná, jak z hlediska používané techniky tak i nenáročnosti na personální obsluhu. Umožňuje poměrně rychlé proměření zkoumaných oblastí o větší rozloze a přitom přináší uspokojivé výsledky.

Magnetometrická měření bývají často doplněna o měření geoelektrickými metodami (odporové metody) pro podrobnější ověření, již vytipovaných, archeologických situací. Díky technologickému rozvoji je možné geoelektrickými metodami prozkoumat větší plochy, než jak tomu bylo v minulosti.

Pokud bychom měli zkoumat plochu malého výměru, často bychom sáhli po metodě gravimetrie, konkrétněji mikrogravimetrie.

Mezi archeology nejčastěji používanou elektromagnetickou metodou je měření za pomoci georadaru. Nevýhodou elektromagnetických metod je jejich nižší rozlišení v zobrazování naměřených dat.

Nejznámější metodou pro datování je radiouhlíková metoda, která ač je stále nejčastěji používanou metodou v tomto směru, má mnoho nevýhod. Vyskytují se zde faktory ovlivňující výsledky a navíc je pro její aplikaci nezbytné narušení, mnohdy ne-li přímo zničení vzorku. V rámci této metody je nejspolehlivější a nejefektivnější měření AMS, hmotnostní spektrometrií, ovšem na druhou stranu je zde značné finanční zatížení a nároky kladené na potřebné vybavení.

Datování za pomoci termoluminiscence je perspektivní metoda s dobrými výsledky, měření a jeho příprava však bývají náročná. Nutný je také další technologický vývoj pro zlepšení přesnosti metody (zmenšení rozsahu časové odchylky).

Rozšířená jsou měření zacílená na využívání rentgenového záření. Měřicí aparatury jsou poměrně dobře dostupné a princip je relativně jednoduchý. Rentgenofluorescenční spektrometrie je přínosná jak v rámci archeologie, tak i jako nepostradatelný pomocník v oblasti umění (pravost obrazů, složení apod.). Metoda je navíc naprosto nedestruktivní (v porovnání s aktivační analýzou), finančně přijatelná a umožňuje i přímá měření v terénu za pomoci přenosných měřících přístrojů.

Přínos těchto metod prodávajících v posledních desetiletích značný rozvoj je nepopíratelný. Za pomoci metod využívajících fyzikální principy bylo odhaleno a prozkoumáno nepřehledné množství nalezišť a objasněno mnoho otázek. Nezbytné a přínosné je i rozšiřování jejich uplatnění a budoucí rozvoj.

## Závěr

Tato práce se zabývala využitím fyzikálních metod a jejich aplikací v archeologii. Již od začátku bylo jasné, že sehnat podklady v literatuře bude komplikované. Značnou část zdrojů, které jsem použila, tvoří články odborníků uveřejněné na internetu ve snaze tuto informační bublinu zaplnit nebo poněkud starší publikace, u nichž bylo třeba brát ohled na technologický pokrok od jejich vydání.

Práce popsala nejčastěji používané metody, ovšem škála aplikovaných metod v tomto okruhu a jejich podmetod je mnohem širší a stále jde o v literatuře poměrně neprozkoumanou oblast. Stejně tak by se jistě dalo mnohem hlouběji pracovat i s metodami zde uvedenými. Během zpracovávání práce se ukázalo, že možnosti tohoto tématu jsou mnohem širší, než se původně zdálo a bylo by zajímavé v něm pokračovat.

Vzhledem k tomu, že téma není v naší literatuře řádně rozebrané a sjednocené ve vhodné a dostupné publikaci, bylo cílem této práce vytvořit základní přehled. K jednotlivým metodám byl uveden jejich základní princip, situace, v nichž je lze aplikovat a možné komplikace omezující či přímo nedovolující jejich využití. Popsány byly i aparatury, s jejichž pomocí měření probíhají, jejich dostupnost a základní přehled míst, kde se využívají (především u nás). K některým metodám byly pro ilustraci uvedeny konkrétní situace a zpracované výsledky, reálně naměřená data, kde bylo těchto metod využito.

Dobrou příležitostí k rozšíření tématu by mohla být diplomová práce, v jejímž rámci by bylo vhodné a zajímavé provést některá měření osobně na půdě Univerzity. Jistě by zasloužily větší prostor a řádný rozbor, než umožňuje bakalářská práce. Díky průzkumu prováděnému při vyhledávání zdrojů se podařilo navázat kontakt i s ČVUT a objevit tak možnost navštívit temnější pracoviště v rámci Týdne vědy a prohlédnout si vybavení či si zkusit osobně něco naměřit pod odborným dohledem.



## Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] WAGNER, Vladimír. *Jaderná fyzika a kulturní dědictví* [online]. [cit. 2016-06-8]. Dostupné z: <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/vystava/vystava.html>
- [2] KUNA, Martin. *Nedestruktivní archeologie: Non-destructive archaeology : teorie, metody a cíle*. Praha: Academia, 2004, 555 s., ix obr. na příl. ISBN 80-200-1216-8. str. 555.
- [3] HAŠEK, Vladimír a Zdeněk MĚŘÍNSKÝ. *Geofyzikální metody v archeologii na Moravě*. Brno: Muzejní a vlastivědná společnost, 1991, 190 s. ISBN 80-85048-33-7.
- [4] SEDLÁČEK, Jan. *Úvod do užití geofyziky*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013, 81 s. Studijní texty. ISBN 978-80-244-3832-0.
- [5] MACHÁČEK, J. *Geofyzikální průzkumné metody* [online]. [cit. 2015-09-17]. Dostupné z: <http://departments.fsv.cvut.cz/k135/wwwold/ge10/gfvskript.pdf>
- [6] CHVOJKA, Ondřej. *Archeologické prospekce a nedestruktivní archeologie v Jihočeském kraji, kraji Vysočina, Jihomoravském kraji a v Dolním Rakousku: sborník z konference, Jindřichův Hradec 6.3.-7.3.2013*. České Budějovice: Jihočeské muzeum v Českých Budějovi.
- [7] *Jižní Morava - Haná, hroby* [online]. [cit. 2016-07-16]. Dostupné z: <http://www.georadar.rtg-tengler.cz/>
- [8] Aitken, Martin Jim. *Physics and archaeology*. Oxford : Clarendon Press, 1974. 80-7275-014-3.
- [9] ŠIŇOR, Milan. [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www-troja.fjfi.cvut.cz/~drska/edu/webfyz/iz/node1.html>
- [10] WAGNER, Vladimír. *Co nám může říci měření radioaktivního <sup>14</sup>C v atmosféře?* [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/ekologie/izotop14C.htm>
- [11] KLUIBER, Zdeněk. *Moderní směry ve fyzice: Modern topics in physics*. Praha: ARSCI, 2003, 301 s. ISBN 80-86078-28-0.
- [12] New Laboratories. *Physics Today* [online]. [cit. 2015-09-17]. Dostupné z: <http://scitation.aip.org/content/aip/magazine/physicstoday/article/4/4/10.1063/1.3067207>

- [13] LEVI, Barbara Goss. New Laboratories. *Physics Today*[online]. [cit. 2015-09-17]. Dostupné z: Uranium-Thorium Dating Sets the Clock Back on Carbon-14 Ages
- [14] Spurný, Zdeněk. Nové využití termoluminiscence: datování. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1979, roč. 24, č.1, str. 21-25. ISSN 0032-2423
- [15] MESTEK, Oto. *Stanovení prvků pomocí přenosného rentgenově fluorescenčního analyzátoru* [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: [http://old.vscht.cz/anl/josef/LabAtom/Navod\\_XRF\\_2010.pdf](http://old.vscht.cz/anl/josef/LabAtom/Navod_XRF_2010.pdf)
- [16] *Chemické analýzy zlatých a stříbrných keltských mincí z Bratislavského hradu metodou SEM-EDX*[online]. [cit. 2016-05-3]. Dostupné z: [http://mck.technicalmuseum.cz/images/stories/clanky/metodika/zlate\\_a\\_stibrne\\_keltske\\_mince.pdf](http://mck.technicalmuseum.cz/images/stories/clanky/metodika/zlate_a_stibrne_keltske_mince.pdf).
- [17] *Analytické průzkumy* [online]. [cit. 2016-07-76]. Dostupné z: <http://mck.technicalmuseum.cz/analyticke-pruzkumy>.
- [18] WAGNER, Vladimír. *Tycho Brahe rtuť otráven nebyl*[online]. [cit. 2015-15]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/6572-tycho-brahe-rtuti-otraven-nebyl.html>
- [19] *Archeologie a geofyzika* [online]. [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://www.archeologienadosah.cz/clanky/archeologie-geofyzika>
- [20] SVĚTLÍK, Ivo, Dagmar DRESLEROVÁ a Lenka TOMÁČKOVÁ. *Postupy zpracování vzorků a radiouhlíkové datování* [online]. [cit. 2016-03-1]. Dostupné z: [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/41/084/41084175.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/084/41084175.pdf)
- [21] SALAJOVÁ, Gabriela a Ondřej POLÍVKA. *Rentgenová fluorescenční analýza* [online]. [cit. 2016-3-1]. Dostupné z: [http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:7hJv2EU\\_rkAJ:veda.gymjs.net/archiv/web\\_06-08/dokumenty/Vystupy/Prednasky/KDAIZ-RFA\\_zavpred.ppt+&cd=7&hl=cs&ct=clnk&gl=cz](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:7hJv2EU_rkAJ:veda.gymjs.net/archiv/web_06-08/dokumenty/Vystupy/Prednasky/KDAIZ-RFA_zavpred.ppt+&cd=7&hl=cs&ct=clnk&gl=cz). [Online]

- [22] MICHÁLEK, Tomáš. Princip vzniku RTG záření v rentgence [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z:  
[http://www.rtg.fbmi.cvut.cz/index.php%3Foption=com\\_content&view=article&id=56&Itemid=62.html](http://www.rtg.fbmi.cvut.cz/index.php%3Foption=com_content&view=article&id=56&Itemid=62.html)
- [23] ČECHÁK, Tomáš. Použití rentgenfluorescenční analýzy při výzkumu památek: Application of X-ray fluorescence analysis in investigation of historical monuments. Praha: České vysoké učení technické, 2004, 29 s. Profesorské přednášky. ISBN 80-01-03086-5.
- [24] PÁTEK, Karel. Luminiscence: fyzikální poznatky a technické aplikace. Praha: SNTL, 1962, 164 s. Řada teoretické literatury.
- [25] HLOŽEK, Martin. Encyklopedie moderních metod v archeologii: archeometrie. Praha: Libri, 2008, 230 s., xvi s. barev. obr. příl. ISBN 978-80-7277-230-8.
- [26] BEZVODA, Václav and LANGER, Jiří, 1979, Teorie pole v užití geofyzice. Praha : Státní pedagogické nakladatelství.
- [27] BEZVODA, Václav. Geoelektrické metody průzkumu. Praha: Univerzita Karlova, 1968, 117 s.
- [28] GAJDOŠ, Vojtech. Geofyzika pre archeológov. Bratislava: Univerzita Komenského, 1976, 55 s. Vysokoškolské skriptá.
- [29] VÁLEK, Rostislav. Gravimetrie. Praha: SPN, 1968, 75 s. Učební texty vysokých škol.
- [30] BOUZEK, Jan. Nové archeologické metody II: prospekce. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1974, 165 s.
- [31] HAŠEK, Vladimír a Zdeněk MĚŘÍNSKÝ. Geofyzikální metody v archeologii na Moravě. Brno: Muzejní a vlastivědná společnost, 1991, 190 s. ISBN 80-85048-33-7.
- [32] Ve službách archeologie: Im Dienst der Archäologie : sborník k 60. narozeninám RNDr. Vladimíra Haška, DrSc. : příspěvky z konference Přírodovědecké metody v archeologii, Kravsko 5.-6. března 1998. Brno: Archeologický ústav Akademie věd České republiky, 19.
- [33] Archeologie východních Čech: recenzovaný časopis. Hradec Králové: Muzeum východních Čech v Hradci Králové, 2013. ISSN 1805-4676.

## Seznam obrázků a tabulek

Tab. 1. - Geofyzikální metody a jejich oblast aplikace. [2] .....	13
Tab. 2. - Fáze výzkumu. [2] .....	14
Tab. 3 - Jednotlivé metody, jejich zájmové veličiny včetně uvedení jejich jednotek. [2] .....	16
Tab. 4. - Rychlost šíření elektromagnetických vln, permitivita a konduktivita v různých prostředích. [4] .....	33
Tab. 5. - Ukázka potřebné velikosti vzorků pro porovnání potřeb metody detekce radioaktivních přeměn $^{14}\text{C}$ a AMS. Požadavky se mohou lišit dle potřeb a možností různých laboratoří. [11].....	45
Tab. 6. - Energie K čar některých prvků. [11] .....	62
Tab. 7 - Tabulka výsledků reálně proměřených mincí. [17] .....	82
Obr. 1 - Zobrazení magnetického pole Země se siločárami. [4] .....	16
Obr. 2 - Schéma principu fungování protonového magnetometru. [5] .....	19
Obr. 3 - Zobrazení rondelu získané magnetometrickým měřením. [19] .....	22
Obr. 4 - Oppidum Nevězice na Písecku, reálný výstup měření pomocí magnetometrie. [19].	22
Obr. 5 - Schéma funkce gravimetru. [4].....	24
Obr. 6 - Olomouc. Mikrogravimetrický průzkum dómského návrší a přilehlé dělostřelecké šance. 1 - tíhové izonomály [ $\mu\cdot\text{ms}^{-2}$ ]. [3] .....	26
Obr. 7 - Základní schémata uspořádání elektrod používaná v archeologii. [3].....	29
Obr. 8 - Výsledky geoelektrického odporového měření v podobě mapy izonomál zdánlivých měrných odporů. [6].....	31
Obr. 9 - Identifikace kamenných destrukcí po možném osídlení a linií komunikací. [6].....	31
Obr. 10 - Měření geraddarem. Na obrázku jsou zřejmě vidět hroby. [7].....	34
Obr. 11 - Schéma cyklu uhlíku v přírodě. ....	42
Obr. 12 - Převedení uhlíku do vhodné formy pro měření radioaktivního uhlíku (zde benzen). Aparatura v Oddělení dozimetrie ÚJF AVČR. [10].....	44
Obr. 13 - Zařízení pro AMS v laboratoři University v Oxfordu. [1] .....	47
Obr. 14 - Spalovací systém připravující $\text{CO}_2$ z organického materiálu. [1].....	47

Obr. 15 - Z grafu je vidět změna poměru $^{14}\text{C}$ vůči stabilnímu $\text{CO}_2$ v atmosféře. Asi do roku 1993 projev úbytku $^{14}\text{C}$ vlivem jaderných testů. Po roce 1993 zřejmě vliv přibývání fosilního uhlíku. Průběh blízký lineárnímu poklesu. Měření ze stanice Jungfraujoch. [10].....	49
Obr. 16 - Schéma vnější vrstvy atomu (resp. lokálních energetických hladin v atomu. ....	53
Obr. 17 - Termoluminiscenční křivka v případě lineárního vzestupu teploty $T = \beta \cdot t$ . [13]..	53
Obr. 18 - TL vyhřívací křivka křemene. [9].....	54
Obr. 19 - Zjednodušené schéma termoluminimetru. ....	56
Obr. 20 - Od leva: soška z přechodného Monte Albanského období kolem let 100-200 n. l. s ověřenou pravostí., soška stylově odpovídající pozdně klasickému Monte Albanskému období kolem let 400-800 n. l. ovšem v tomto případě se jedná o padělek. [9].....	58
Obr. 21 - Amfora. [9] .....	58
Obr. 22 - Soška. [9] .....	59
Obr. 23 - Schéma atomu s příchozím rentgenovým zářením. [22] .....	62
Obr. 24 – Graf závislosti energie některých čar charakteristického záření na protonovém čísle. [14] .....	63
Obr. 25 - Schéma hladin v elektronovém obalu atomu. [14] .....	65
Obr. 26 - Schéma ozáření vzorku rentgenovým zářením. ....	66
Obr. 27 - Schéma vlnově disperzního spektrometru. ....	67
Obr. 28 - Aparatura i s napojením na počítač katedry Dozimetrie a aplikace ionizujícího záření CVUT. [21].....	68
Obr. 29 - Schéma fungování polovodičového detektoru.....	69
Obr. 30 - Hlavní menu programu X-MET. [15].....	70
Obr. 32 - Spektrometr X- MET 5100 a příslušenství. [15] .....	71
Obr. 31 - Zobrazení spekter v programu X-MET. [15].....	71
Obr. 33 - Ukázka výsledků analýz provedených měření. [15].....	72
Obr. 34 - Zkoumání hlavy Krista z morového sloupu v Olomouci. [1].....	73
Obr. 35 - Spektrum původní černé barvy použité na fresce a spektrum černé barvy použité při restauraci. [14].....	74
Obr. 36 - Charakteristická spektra záření vzorku z dvou různých částí relikviáře. [14].....	75

Obr. 37 - Korelační graf vyjadřující složení pravého a padělaného porcelánu. V padělcích je patrná odchylka v poměru rubidia a stroncia (Rb/Sr) a stejně tak i zirkonia a niobu (Zr/Nb). [14] .....	76
Obr. 38 - Spektrum charakteristického záření vzorku, v tomto případě uhlí. [14] .....	76
Obr. 39 - Schéma postupu měření. ....	79
Obr. 41 - Korelační graf. Obsah chromu a niklu ve střepech. [9] .....	80
Obr. - 40 Kratér [9] .....	80
Obr. 42 - Mince. [9] .....	81
Obr. 43 - Mince. [17] .....	81
Obr. 44 - Pracoviště Tanderonu ÚJF AVČR. [18] .....	83
Obr. 45 – Fotografie ze zkoumání korespondence Galilea Galileiho metodou PIXE. [1].....	84
Obr. 46 - Dánský archeolog Jens Velle (iniciátor).....	95
Obr. 47 - Otevírání cínové rakve.....	95
Obr. 48 - Nahoře vzorek odebrané kosti, dole vzorek chomáče vousů.....	96
Obr. 49 - Vzorek vousu pod mikroskopem (zleva kořínek).....	97
Obr. 50 - Chemické úpravy vzorků (Jan Kameník) .....	97
Obr. 51 - Jan Kučera a Jens Velle na reaktoru LVR-15.....	98
Obr. 52 - Jan Kameník a Jan Kučera prohlížíjí gama spektrum vzorků po aktivaci neutrony z reaktoru v řežském areálu. ....	98
Obr. 53 - Graf ukazující obsah rtuti ve dvou vousech. NA ose x dny před smrtí. Na ose y koncentrace rtuti. Čerchovaná čára představuje střední hodnotu normálního obsahu rtuti a tečkovaná čára rozpětí normálních hodnot.....	99
Obr. 54 - Umístování vousu do držáku, aby bylo možné provést měření v tanderonu a následné umístění vzorku do komory před ozařováním (Vladimír Havránek).....	99
Obr. 55 - Zobrazení analýzy vousu pomocí metody PIXE. ....	100

## Příloha

Příloha č. 1 – Fotodokumentace a testování pozůstatků astronoma Tycho de Brahe [18].



Obr. 46 - Dánský archeolog Jens Vellev (iniciátor).

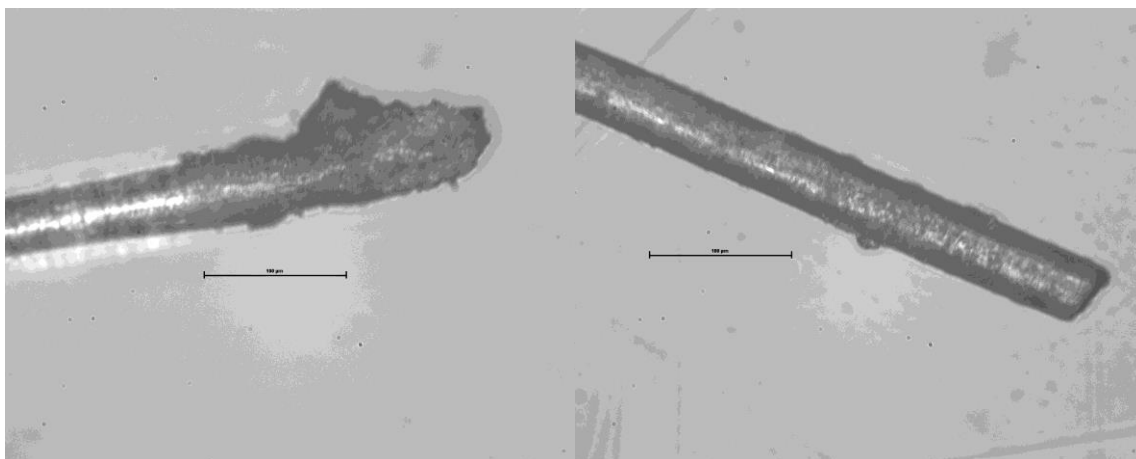


Obr. 47 - Otevírání cínové rakve.



Obr. 48 - Nahoře vzorek odebrané kosti, dole vzorek chomáče vousů.





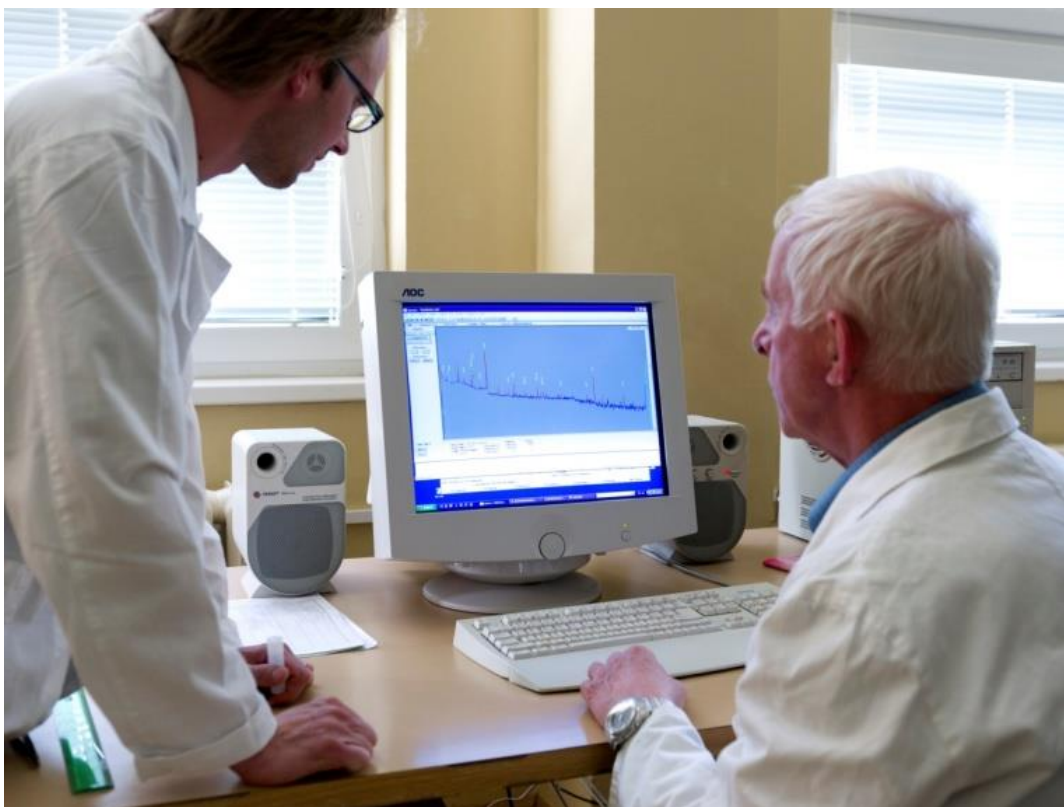
**Obr. 49 - Vzorek vousu pod mikroskopem (zleva kořínek).**



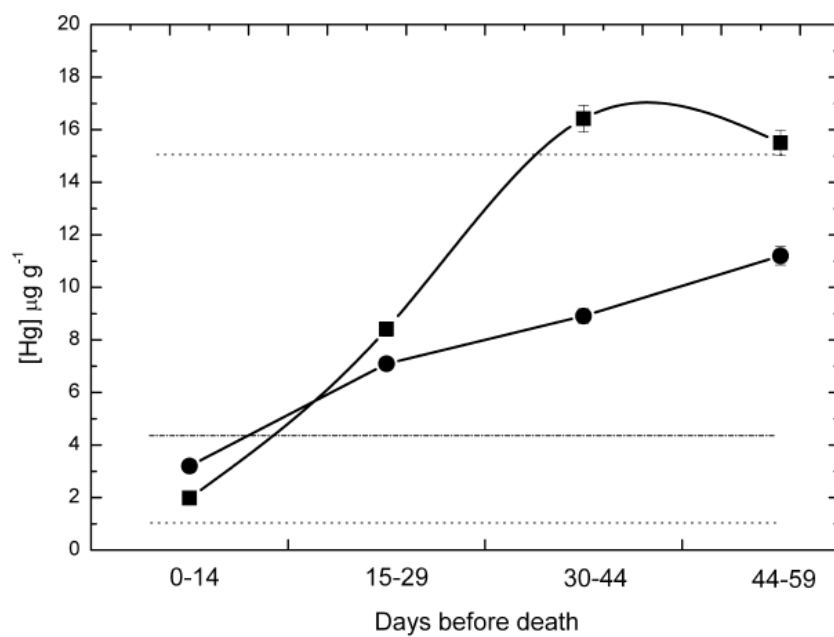
**Obr. 50 - Chemické úpravy vzorků (Jan Kameník)**



Obr. 51 - Jan Kučera a Jens Vellev na reaktoru LVR-15.



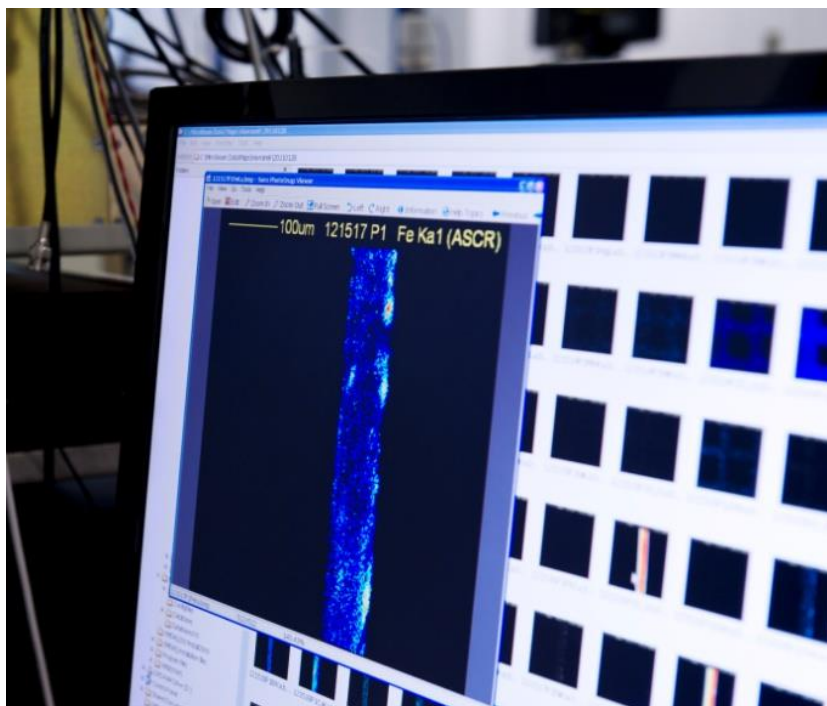
Obr. 52 - Jan Kameník a Jan Kučera prohlížejí gama spektrum vzorků po aktivaci neutrony z reaktoru v režském areálu.



Obr. 53 - Graf ukazující obsah rtuti ve dvou vousech. NA ose x dny před smrtí. Na ose y koncentrace rtuti. Čerchovaná čára představuje střední hodnotu normálního obsahu rtuti a tečkovaná čára rozpětí normálních hodnot.



Obr. 54 - Umisťování vousu do držáku, aby bylo možné provést měření v tanderonu a následné umístění vzorku do komory před ozařováním (Vladimír Havránek).



**Obr. 55 - Zobrazení analýzy vousu pomocí metody PIXE.**