

6. Ionizující záření v archeometrii a dějinách umění

Ladislav Musílek

Úvod

Pohlédneme-li do některé i poměrně nedávno vydané encyklopedie, zpravidla se setkáme s více či méně podrobným vysvětlením pojmu „archeologie“. Tak např. Akademický slovník cizích slov [1] ji definuje jako „historickou vědu zkoumající na základě hmotných pramenů zákonitosti a průběh nejstarších dějin lidstva“. Dále následují hesla „archeomagnetismus“, „archeopteryx“, atd. Podobné pořadí hesel nalezneme i v dalších encyklopediích (např. [2]). Pojem „archeometrie“, použitý v názvu našeho článku, zde chybí. A přitom právě archeomagnetické datování je jednou z metod v archeometrii používaných. Ve dnech 22.–26. dubna 2002 se v holandském Amsterdamu konalo již 33. mezinárodní sympozium o archeometrii, od roku 1958 vychází mezinárodní vědecký časopis *Archeometry*. Jde tedy o vědní obor poměrně mladý, ale není to žádná žhavá novinka, na kterou encyklopedie nestačily zareagovat. Co se tedy vlastně skrývá pod pojmem „archeometrie“?

Archeologické studie již po řadu let nevystačí jenom s klasickým průzkumem nálezů a studiem hmotných pramenů. Zkušenosti historiků umění nemohou též zjistit všechna fakta o místu a době vzniku, technologiích výroby nebo pozdějším osudu různých uměleckých děl, zvláště pokud nejsou dokumentována v písemných pramenech. Do souboru poznatků tak již po více než půl století stále významněji přispívá studium archeologických nálezů a uměleckých děl metodami přírodních věd – fyziky, chemie, biologie, biochemie, metalurgie, geologie a dalších. Tyto studie významně přispěly do pokladnice našeho vědění i k rozvoji interdisciplinární spolupráce mezi přírodovědci, archeology a historiky, a přinášejí také cenné podklady pro restaurování různých památek. Postupně vznikla samostatná vědní disciplína, jejíž název nás odkazuje ke studiu dávné minulosti a zároveň k exaktnímu měření.

Rozvoj archeometrie umožnil určování stáří různých organických i anorganických materiálů metodami jako je radiouhlíkové datování, dendrochronologie¹, termoluminiscence, opticky stimulovaná luminiscence, již zmíněný archeomagnetismus atd. Je možné přispět k poznání životních podmínek a stravovacích zvyklostí dávných národů a kmenů na základě

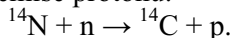
¹ *Datování na základě posloupnosti šířek letokruhů stromů.*

chemických a biochemických analýz lidských a zvířecích pozůstatků, zbytků organických materiálů a odpadů. Fyzikální a chemické analytické metody pomáhají k poznání materiálů, technologií výroby, míst původu a dávných obchodních cest pro široké spektrum uměleckých děl i užitkových výrobků. Přesné metody vyhodnocování leteckých snímků umožňují lépe zjistit rozsah dávných sídel i nalézat nová místa zajímavá z hlediska archeologického výzkumu. To vše je možné zahrnout do vědní oblasti, která dostala název „archeometrie“, a která se, snad pro svoji mezioborovost, snad proto, že vědecké disciplíny nejsou v popředí zájmu tvůrců všeobecných encyklopedií, ve většině z těchto encyklopedií ani neobjevuje. Není však proto méně zajímavá a méně důležitá pro rozvoj lidského poznání.

Pokusíme se alespoň na několika metodách a příkladech aplikací ukázat, jakých výsledků se dá s využitím poznatků přírodních věd při studiu historických a uměleckých památek dosáhnout. V archeometrii jsou velmi hojné a užitečné metody, využívající ionizujícího záření (viz např. [3]). Vzhledem k odbornému zaměření autora se omezíme na některé z těchto metod. Příklady si vybereme z celého světa se snahou o jejich názornost a zajímavost, aniž bychom tím chtěli nějak snižovat význam prací konaných v českých zemích obecně nebo na ČVUT v Praze speciálně. Na FJFI ČVUT byla mimo jiné při katedře dozimetrie a aplikace ionizujícího záření založena laboratoř zabývající se studiem památek. Ostatně některé výsledky prací této laboratoře jsou zmíněny v následujícím článku v této publikaci [4].

Radiouhlíkové datování

Radiouhlíková metoda datování je patrně nejznámější archeometrickou metodou, starší než sám pojem archeometrie. Vypracoval ji ve druhé polovině čtyřicátých let prof. Willard F. Libby jako výsledek svého studia účinků kosmického záření na zemskou atmosféru a v roce 1960 za ni obdržel Nobelovu cenu za chemii. Kosmické záření vyvolává řadu jaderných reakcí, ve kterých se kontinuálně vytvářejí různé radioaktivní nuklidy. Nejdůležitější a nejlépe zastoupené jsou nejtěžší izotop vodíku ^3H a jeden z izotopů uhlíku ^{14}C . Ten vzniká v reakci atomových jader atmosférického dusíku s neutrony za současné emise protonu:



Poločas přeměny ^{14}C je 5730 roků, proto se v atmosféře nehromadí bez omezení. Předpokládáme-li, že tok kosmického záření dopadající do atmosféry byl po dlouhá časová období konstantní², znamená to, že se časem

² Tento předpoklad není zcela přesný a ve skutečnosti na změny toku kosmického záření s časem musí být při vyhodnocování výsledků radiouhlíkového datování prováděna korekce.

utvořila rovnováha – kolik ^{14}C v ovzduší vzniká působením kosmického záření, tolik ho zároveň ubývá jeho radioaktivní přeměnou³. Uhlík se v ovzduší zabudovává do oxidu uhličitého, který přijímají dýcháním živé organismy, rostliny i živočichové, a rovněž v nich se ustaví rovnováha mezi radioaktivním ^{14}C a stabilními izotopy uhlíku ^{12}C a ^{13}C . Jakmile biologický organismus odumře, zastaví se přísun nového ^{14}C a rovnováha se poruší. Uhlík, který byl v organismu v okamžiku jeho smrti, zůstává v něm zabudován bez další látkové výměny. ^{14}C počne díky své radioaktivní přeměně postupně ubývat podle vztahu:

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

kde $C(0)$ je rovnovážná koncentrace ^{14}C v organismu v okamžiku jeho smrti, $C(t)$ jeho koncentrace po čase t od smrti uvažovaného organismu, λ přeměnová konstanta ^{14}C . Hodnotu $C(0)$ lze získat ze „současných“ vzorků⁴, λ je fyzikální konstanta, takže změřením současné koncentrace $C(t)$ a jednoduchým výpočtem se dá stanovit čas t . Metoda je v principu použitelná na všechny materiály organického původu, výjimečně lze takto datovat i anorganické materiály, do nichž se při jejich vzniku zabudovával atmosférický uhlík, nejčastěji do formy uhličitánů (např. krápníkové útvary), a dále již nedocházelo k jeho výměně. Měření koncentrace $C(t)$ ovšem není jednoduchou záležitostí.

W. F. Libby a řada jeho následovníků měřili koncentraci radionuklidu ^{14}C na základě jeho radioaktivní přeměny a emitovaného záření. **^{14}C je však zářič beta** s poměrně nízkou energií emitovaných elektronů, navíc je ve vzorcích měřených materiálů přítomen v extrémně nízkých aktivitách. Musí být proto extrahován ze vzorků a převeden přímo do detekčního média v detektoru ionizujícího záření. Pokud je používán plynem plněný proporcionální detektor, převádí se zpravidla uhlík do formy CO_2 nebo acetylénu, při použití kapalných scintilátorů do benzenu. To ovšem znamená destrukci alespoň části datovaného nálezů (nejčastěji několika jednotek až desítek gramů). U cennějších předmětů to může představovat značné omezení použitelnosti metody. Detektor je navíc konstrukčně složitý a je náročný z hlediska minimalizace obsahu přírodních radionuklidů v konstrukčních

³ Je ho nepatrné množství v porovnání se stabilními izotopy uhlíku, pouze asi 0,000000001 % přírodní směsi izotopů.

⁴ Vzhledem k uvolnění značného množství ^{14}C do ovzduší při pokusných jaderných explozích a naopak k značným emisím neaktivních izotopů uhlíku do ovzduší při spalování fosilních paliv po nástupu průmyslové revoluce je ovšem rovnováha nyní porušena a nelze vzít jakýkoli současný organický materiál – pojem současný vzorek se vztahuje k pečlivě proměřenému standardu přechovávanému v americkém National Institute for Standards and Technology.

materiálech, protože musí vykazovat velmi nízké pozadí⁵. Má-li být dosaženo přiměřené přesnosti, jsou potřebné doby měření každého vzorku řádu desítek i stovek hodin.

Od sedmdesátých let minulého století se proto prosazuje do radiouhlíkového datování jiná detekční metoda, **hmotnostní spektrometrie na urychlovačích** (Accelerator Mass Spectrometry – AMS). Je založena na přímém počítání ionizovaných atomů uhlíku z měřeného vzorku. Svazek ionizovaných atomů urychlených na urychlovači iontů je magnetickým polem vychylován z přímé dráhy, přitom se lehčí ionty vychylují více a lze tak od sebe oddělit různě těžké izotopy uhlíku a měřit jejich poměrné zastoupení. Citlivost AMS je v porovnání s detekcí radioaktivních přeměn ^{14}C i s „klasickými“ hmotnostními spektrometry několikařádově vyšší, takže je možné podstatně zmenšit velikost potřebných vzorků a zkrátit doby měření (tab. 2). Lze to demonstrovat na jednoduchém příkladu: V 1 mg 5000 let starého uhlíku je asi 20 milionů atomů ^{14}C . Aby se napočítalo 10 000 impulsů při detekci záření beta, což odpovídá standardní odchylce 1 %, bylo by třeba měřit po dobu čtyř roků. Při použití urychlovače lze z takového vzorku napočítat 10 000 iontů ^{14}C k dosažení stejné statistické chyby za méně než hodinu. Nevýhodou je ovšem vysoká cena potřebného urychlovače a dalšího vybavení laboratoře.

Tab. 2: Typické velikosti vzorků potřebné pro datování při detekci radioaktivních přeměn ^{14}C (DRP) a při použití AMS (podle [5]). Údaje jsou pouze orientační, požadavky se mohou lišit podle jednotlivých laboratoří.

Materiál	Suchá hmotnost (g)		
	DRP (optimální)	DRP (min.)	AMS
Dřevo, dřevěné uhlí	8 – 12	1	0,005 – 0,010
Uhličitany	35	5	0,015
Rašelina	5 – 10	1	0,100 – 1,000
Kosti	100 – 200	20 – 80	1
Jezerní usazeniny	30 – 100	10 – 20	1

Jedním z nejčastěji diskutovaných případů aplikace AMS je datování tzv. **Turínského plátna**. Jedná se o lněné plátno o rozměrech 4,36 x 1,10 m, uložené v katedrále sv. Jana v Turíně, o němž církevní autority, ale i řada vědců věří, že do něj bylo zabaleno Kristovo tělo po jeho sejmutí z kříže.

⁵ Tj. musí mít nízkou detekovanou četnost impulsů vznikajících z jiných příčin než detekci záření z měřeného vzorku.

Jde o jednu z nejvýznamnějších církevních relikvií. Plátno nese negativně otištěný temně hnědý obrys mužské postavy bez přesných kontur, obr. 6. Jasně ohraničené jsou pouze rezavé skvrny od krve. Způsob, jak otisk vznikl, zůstává dosud nevysvětlen.



Obr. 6: Kristova tvář z tzv. Turínského plátna (v negativu – vzhledem k tomu, že na plátně je negativní otisk postavy, dostává se tak pozitivní obraz)

V roce 1988 byl z plátna oddělen proužek o délce 70 a šířce 10 mm, rozdělen na tři části a ty zaslány do AMS laboratoří v Oxfordu, Zurichu a na University of Arizona v Tusconu. Výsledky shodně vedly na hladině spolehlivosti 90 % k rozmezí dat 1290–1360 n. l. [6], což je v dobré shodě s rokem 1353, kdy se plátno poprvé objevuje v historických záznamech. Otázka autenticity plátna je nicméně stále diskutována a výsledky radiouhlíkového datování zpochybňovány, např. tím, že množství uhlíku pozdějšího data může pocházet ze sazí od svící a olejových lamp, nebo je mladší datum vysvětlováno vlivem bakterií a mikroorganismů.

Jiným příkladem je datování železné koruny Karla Velikého. Původ a stáří této koruny, přechovávané v katedrále v Monze v Itálii, jsou nejspíše. Historické prameny dávají pro dobu jejího vzniku rozmezí několika století. V roce 1996 bylo zjištěno, že drahé kameny jsou v koruně upevněny směsí jílu a včelího vosku, tedy materiálem, který umožňuje radiouhlíkové datování. Měření bylo možné vzhledem k malému množství materiálu realizovat pouze pomocí AMS, výsledkem bylo rozmezí let 700–780 n. l., což je v souladu s historicky doloženým datem korunovace Karla Velikého (800 n. l.) [7].

Termoluminiscenční datování

Radiačně indukovaná termoluminiscence (TL) je jev, který úzce souvisí s přechody elektronů mezi různými energetickými hladinami v anorganických pevných látkách, zejména v iontových krystalech. Stručně a zjednodušeně jej lze popsat následujícím modelem.

Vzájemným působením jednotlivých atomů v krystalu se energetické hladiny, na kterých mohou být umístěny elektrony v atomu, rozšiřují na energetické pásy. Poslední obsazený – valenční – pás je oddělen zakázaným pásem od vodivostního pásu, ve kterém se mohou pohybovat volné elektrony. V ideálním krystalu zakázaný pás nemůže obsahovat žádné elektrony. V reálném případě však mohou různé nečistoty a nepravidelnosti v krystalové mřížce vyvolávat vznik lokálních energetických hladin, které jsou obsazovány elektrony, i v zakázaném pásu. Některé z těchto hladin mají charakter „pastí“, ve kterých mohou být působením ionizujícího záření zachyceny elektrony v metastabilní poloze. Uvolní se teprve při dodání energie zvnějšku, např. ohřevem látky. Při následných přechodech mezi jednotlivými energetickými hladinami mohou tyto elektrony přecházet přes tzv. luminiscenční centra a emituje se elektromagnetické záření, často ve viditelné oblasti. Závislost intenzity emitovaného světla na teplotě se nazývá vyhřívací křivka. Počet elektronů zachycených v pastech je úměrný v širokém rozmezí dávce ionizujícího záření, světelný tok je úměrný počtu zachycených elektronů, proto výška maxim na vyhřívací křivce nebo plocha pod ní jsou úměrné dávce. Známe-li tedy TL citlivost daného materiálu, tj. TL odezvu na jednotkovou dávku, můžeme změřením světelného výstupu při ohřevu stanovit dávku, kterou byl daný materiál ozářen. Tohoto jevu se hojně využívá v dozimetrii ionizujícího záření. K podrobnějšímu popisu je nutné odkázat čtenáře na některou ze specializovaných publikací jako je např. [8].