

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Rudolf Janál

Některé vztahy a problémy použití radioisotopů

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 4 (1959), No. 1, 53--65

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137858>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1959

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

délky a jednotlivé spektrální čáry jsou tak široké, že navzájem splývají. Pro vlnové délky v okolí 5 mm způsobují tyto rozšířené spektrální čáry kyslíku takový útlum, že vysokofrekvenční signál po proběhnutí 1 km ve vzduchu je zeslaben více než desetkrát. Tuto vlastnost atmosféry je nutno brát v úvahu při výběru vlnových délek pro milimetrovou radiolokaci nebo pro jiné spojovací účely používající milimetrových vln: pro tento účel se vlnových délek v okolí 5 mm nemůže používat. Obdobná situace je i s absorpcí elektromagnetických vln s vlnovou délkou v okolí 1,25 cm parami vody v ovzduší, o které jsme se zmínili již v úvodu. Absorpce čára molekul vody obsažených ve formě par v ovzduší je rovněž silně rozšířena a obsáhne proto dosti široký obor vlnových délek, přibližně od 1 cm do 1,5 cm vlnové délky.

Z toho je zřejmé, že fyzikální vlastnosti molekul v oboru centimetrových a milimetrových vln mají i bezprostřední význam ve sdělovači technice a v radiolokaci.

(Dokončen)

NĚKTERÉ VZTAHY A PROBLÉMY POUŽITÍ RADIOISOTOPŮ

RUDOLF JANÁL, *Vysoká škola strojní, Liberec*

Velmi často se hovoří o použití radioisotopů a málokdo ví, jaké vztahy platí pro radioisotopy a jejich použití. Proto jsou v článku uvedeny jednotky a definice, a provedeny příklady propočtu vztahu mezi rentgenem, curiem, gramem miligramem-ekvivalentem radia. Současně je zde hovořeno o absorpci záření α , β , γ , a výpočty tloušťek různých materiálů stínění, a bezpečnosti provedení jednotlivých pokusů.

Při studiu radioaktivního záření se zjistilo, že sestává vlastně ze tří druhů záření, ze záření α , β , γ . Nejčastěji využíváme záření γ , např. v defektoskopii, jako tloušťkoměru aj., zatím co záření α pro jeho malý doběh a malou pronikavost vůbec nepoužíváme až na zvláštní případy. Záření β se dá použít např. k odstraňování elektrostatických nábojů a pod.

Radioaktivitu zjišťujeme tím, že se nějakou metodou přesvědčíme o přítomnosti záření, které radioaktivní rozpad doprovází. Ve velké většině případů používáme ionizačních schopností paprsků či částic a to buď přímo anebo i nepřímo. Při průchodu látkou vyrazí částice z vnějšího obalu atomu elektron, atom se tak stává kladně elektrickým, a nastává ionisace. Tato ionisace je úměrná množství ionisujícího záření. Uspořádáme-li vhodně pokusné podmínky, můžeme různými způsoby měřit ionisaci, kterou záření vyvolává, a tím nejen zjistit přítomnost ionisujícího záření, ale i jeho množství.

V praxi využíváme této vlastnosti ionisace vedle vlastnosti hmotového rozdílu nebo schopnosti emitovat záření. Důležitou podmínkou je, aby se radioaktivní isotop svými vlastnostmi nijak nelišil od stejného neaktivního prvku. Jako příklad uveďme sodík o hmotovém čísle 22, 23, 24, kde se liší hmotová čísla vždy o jednotku. Rozdíl mezi nimi bude v tom, že radioaktivní sodík 22 bude vysílat záření pozitronové a γ s poločasem rozpadu 2,6 roku, a sodík 24 záření negatronové a γ s poločasem rozpadu 15 hodin. Tedy kuchyňská sůl z různých sodíků se bude různě chovat a při použití v lidském těle se bude svým zářením projevovat jako stopovači látka.

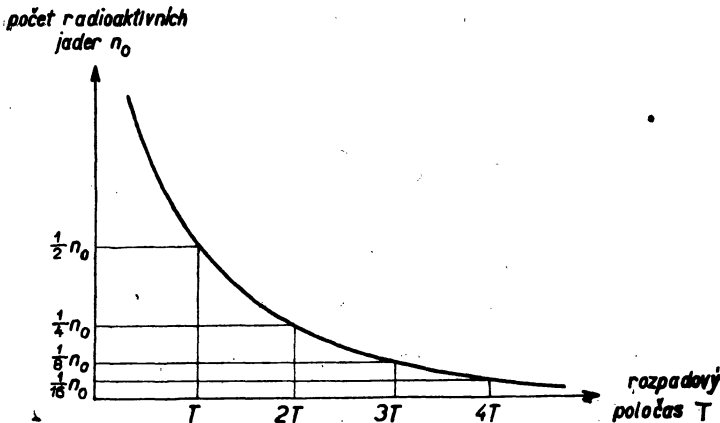
Radioisotopy mají nejrůznější poločasy. Dnes máme na 1000 radioisotopů s poločasy řádu 10^{-7} sec až 10^{14} let. Z přirozených prvků uveďme thorium C'

(ThC') s poločasem $3 \cdot 10^{-7}$ sec a indium (In) s poločasem $6 \cdot 10^{14}$ let. Nezáleží na gramové velikosti prvků a nezáleží na procentuálním složení isotopu v látce (s určitou chybou), ale záleží na poločasu rozpadu, při čemž víme, že se prvky rozpadají nezávisle na vnějších podmínkách. Doposud se nepodařilo nějakým způsobem rozpad prvku ovlivnit, urychlit nebo zpomalit. Poločas rozpadu prvku nám říká, že se za stejnou dobu rozpadne vždy stejná poměrná část počtu všech atomů. Rozpadová rovnice má tvar

$$n = n_0 e^{-\lambda t},$$

kde λ je rozpadová konstanta, která souvisí se střední dobou života vztahem $\tau = 1/\lambda$. Místo λ se často zavádí T , znamenající poločas života. Tím rozumíme dobu, za kterou se rozpadne polovina atomů, tedy pro $t = T$ je $n = n_0/2$ a uvedená rovnice má po dosazení tvar

$$\frac{n_0}{2} = n_0 e^{-\lambda T}.$$



Obr. 1.

Z ní plyne $\ln 2 = \lambda T$ nebo $T = \frac{\ln 2}{\lambda} \left(= \frac{0,693}{\lambda} \right)$. Hodnoty λ a T jsou pro různé radioaktivní prvky a isotopy různé, ale pro týž prvek nebo isotope jsou stejné. Platnost tohoto exponenciálního zákona byla experimentálně dokázána pro všechny tři známé druhy záření α, β, γ . Průběh tohoto zákona je znázorněn na následujícím grafu (obr. 1).

Jednotky a definice

Při práci s radioisotopy je velmi důležité znát dávku záření v závislosti na hmotě příslušného radioisotopu. Nejprve je nutné stanovit nejběžnější používané jednotky. Rentgen r používáme jako jednotky dávky Roentgenova záření; curie C jako jednotku množství radioaktivních látek; gramekvivalent prvků rad jako jednotku pohlcené energie v 1 g hmoty; rep jako jednotku určitého množství absorbované energie; rem jako jednotku člověkem absorbované dávky v rádech a podobně.

Máme-li preparát umístěn v ionizační komoře tak, aby se v ní absorbovalo veškeré záření, pak záření ionisuje vzduch a vyvolává nasycený proud, jehož intenzitu vyjadřujeme v elektrostatických jednotkách proudu. Jedna elektrostatická jednotka ($\text{g}^{1/2} \text{cm}^{3/2} \text{sec}^{-2}$) se rovná $3,336 \cdot 10^{-10}$ A. Je to jednotka značně malá, v poměru ke curie je rovna $3,64 \cdot 10^{-7}$ C. Je tedy $1 \text{ C} = 2,75 \cdot 10^6$ elst. j.

Jednotka, vycházející z množství radioaktivních atomů přeměněných za časovou jednotku se vztahuje tedy k radioisotopům. Základní jednotkou je curie, což je takové množství radioisotopu, z něhož se přemění za jednu vteřinu $3 \cdot 7 \cdot 10^{10}$ atomů. Velmi často se počet radioaktivně přeměněných atomů kryje i s počtem částic, vyzářených za stejnou dobu, což znamená, že přeměna jednoho atomu je spojena s vyzářením jedné částice α , nebo jednoho pozitronu nebo jednoho elektronu. Chceme-li však tímto způsobem dávkovat radioisotop, tj. na základě změřené intenzity jeho záření usuzovat i na množství atomů přeměněných za jednu vteřinu, musíme znát přesně rozpadové schéma radioisotopu. Pokud jde o záření γ , jen zřídka kdy přísluší každému přeměněnému atomu jen jediný foton.

Dávku záření, pohlceného v určitém místě absorpčního prostředí, vyjadřujeme měřením pohlcené energie a tuto hodnotíme absolutně v energetických jednotkách, jimiž jsou erg nebo calorie. Platí tu vztah, že 1 eV je ekvivalentní $1,60 \cdot 10^{-12}$ ergu nebo $3,82 \cdot 10^{-20}$ gramcalorie. Velmi citlivými kalorimetry bychom mohli také dávky záření měřit, tato metoda se však pro praxi nehodí a je velmi málo citlivá. V praxi měříme dávku záření na základě ionisace, kterou vzbudí, a k měření užíváme k tomu přizpůsobených přístrojů. Základní jednotka je rentgen r . Definujeme ho jako množství záření X nebo γ , které v $0,001293$ g vzduchu vytvoří ionty nesoucí úhrnem jednu elektrostatickou jednotku kladného a jednu elektrostatickou jednotku záporného náboje. Zde se rozumí hmotou $0,001293$ g vzduchu hmota jednoho cm^3 za normální teploty a normálního tlaku. Jednotku r můžeme také definovat počtem párů iontů, vytvořených v 1 mililitru standartního vzduchu ($2,08 \cdot 10^9$ párů iontů). Násobíme-li toto číslo průměrnou hodnotou energie, potřebné k vytvoření 1 páru iontů, tj. 35 eV, vyjádříme absorbovanou energii v eV. Provedeme-li výpočet, dostaneme hodnotu $7,28 \cdot 10^4$ MeV/ml a nebo $5,64 \cdot 10^7$ MeV/g. Vynásobíme-li toto číslo ekvivalentem eV a ergu, dostaneme pro 1 r hodnotu 90,1 ergu.

Poněvadž poslední tři čísla závisí na přesnosti hodnoty pro průměrnou energii, potřebnou k vytvoření jednoho páru iontů (neboť se uvádí 83 ergy až 93 ergy podle různé literatury), zavedl VII. mezinárodní radiologický sjezd, který se konal v Kodani v roce 1953, novou jednotku pro dávku záření. Je to *rad* a odpovídá 100 ergům zářivé energie, pohlceným v 1 g látky. Podle této nové definice by jeden r odpovídal 0,901 rad, vycházíme-li z čísla 35 eV/pár iontů.

Definitoricky vztahujeme dávky záření na bodový zářič, jehož množství je 1 mc na 1 ml standartního vzduchu vzdálený 1 cm od zářiče, a na dobu 1 hodiny. Uvedme příklad:

1 mc = 1 mg Ra (filtrovaného 0,5 mm Pt)	8,4 r/cm hod,
1 mc Co ⁶⁰	13,5 r/cm hod,
1 mc Na ²⁴	18,8 r/cm hod.

Jako další používaná jednotka jsou *rem* a *rep*. *Rep* je roentgen-ekvivalent-

-*physical* a znamená pohlcení záření energie, odpovídající 83 erg/g. Jednotka *rem* je doslova *roentgen-ekvivalent-man* a znamená množství zářivé energie relativní biologické účinnosti. Je to absorbovaná dávka v radech pro určitý živý organismus.

Pohltní-li např. 1 gram tkáně 10^8 částic β , které mají průměrnou energii 0,52 MeV, rovná se úhrnná absorbovaná energie $52 \cdot 10^6$ MeV/g. Převědeme-li to na ergy, odpovídá tato energie 1 rep. Nutno poznamenat, že absorpce energie je v různých částech lidského těla různá, např. energetické ztráty v kostech jsou dvakrát větší než např. ve svalech a pod.

Za ekvivalent 1 mg radia se považuje aktivita kteréhokoli preparátu, jehož bodový zdroj dává ve vzduchu ve vzdálenosti 1 cm intenzitu fyzikální dávky rovné 8,35 rentgenů za 1 hod.

Při měření aktivity přírodních vod se dříve často používala „Macheova jednotka“. Koncentrace roztoku byla pak rovna této jednotce, jestliže po oddělení radonu z 1 litru roztoku byla intenzita ionizačního proudu ve vzduchu při úplném využití ionizačních účinků α radonu $1 \cdot 10^{-3}$ abs. j. elst. (v systému CGSE). Jedna Macheova jednotka je rovna $3,64 \cdot 10^{-10}$ c/l nebo $3,64 \cdot 10^{-4}$ μ c/l.

V poslední době se také používá ke stejným účelům nová jednotka *eman e*, která činí $1 \cdot 10^{-10}$ c/l. Vztah mezi emanem a Macheovou jednotkou je $3,64 e = Mj$.

$$\begin{aligned} 1 \text{ elst. j. (g}^{\frac{1}{2}} \text{ cm}^{\frac{3}{2}} \text{ sec}^{-2}) &= 3,336 \cdot 10^{-10} \text{ A} \\ &= 3,64 \cdot 10^{-7} \text{ C} \\ &= 1,10^3 \text{ Mj.} \\ &= 3,6 \cdot 10^3 e \end{aligned}$$

$$1 \text{ Mj} = 3,6 \cdot e$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ C} &= 2,75 \cdot 10^8 \text{ elst. j.} \\ &= 0,90 \cdot 10^{-3} \text{ A} \\ &= 0,275 \cdot 10^{10} \text{ M. j.} \\ &= 1 \cdot 10^{10} e \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ eV} &= 1,60 \cdot 10^{-12} \text{ erg} \\ &= 3,82 \cdot 10^{-20} \text{ gramcalorie} \\ &= 1,6 \cdot 10^{-14} \text{ rad} \\ &= 1,8 \cdot 10^{-14} \text{ rep} \\ 1 \text{ erg} &= 0,237 \cdot 10^{-7} \text{ gramcalorie} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ r} &= 5,64 \cdot 10^{13} \text{ eV/g} \\ &= 90 \text{ erg/g} \\ &= 0,901 \text{ rad} \\ &= 1,1 \text{ rep} \\ 1 \text{ rep} &= 83 \text{ erg/g} \\ &= 5,2 \cdot 10^{13} \text{ eV/g} \end{aligned}$$

$$* 1 \text{ gramekvivalent radia} = 8,35 \text{ r/hod. cm.}$$

Vztahy mezi jednotkami r, c, g

Jeden gram atomu se skládá z $6 \cdot 10^{23}$ atomů, tzn. že 1 g uhlíku s hmotou 14 je obsažen 1/14 tohoto množství, tj. $4,28 \cdot 10^{22}$ atomů. Poločas uhlíku C^{14} je 5100 roků, tzn. $0,166 \cdot 10^{12}$ sec. Známe tedy poločas příslušného radioisotopu a počet atomů v 1 g hmoty příslušného isotopu. Poločas T a rozpadová konstanta jsou ve vztahu $\lambda T = \ln 2$, $\lambda = \frac{0,693}{T}$, a v našem případě je $\lambda =$

$= \frac{0,693}{0,166 \cdot 10^{12}} \text{ } 12$, $\lambda = 4,3 \cdot 10^{-12} \text{ sec}^{-1}$. 1 g C^{14} má $4,3 \cdot 10^{22}$ atomů a rozpadová konstanta je $4,3 \cdot 10^{-12} \text{ sec}^{-1}$, tzn. že za jednu vteřinu se rozpadne $4,3 \cdot 10^{-12} \cdot 4,3 \cdot 10^{22}$ atomů, tj. $18,5 \cdot 10^{10}$ atomů za sec. Jelikož jeden curie 1 c = $3,7 \cdot 10^{10}$ at/sec, bude záření $18,5 \cdot 10^{10}$ at/sec odpovídat 5 c. Tedy 1 g C^{14} odpovídá záření 5 c.

To znamená, že z poločasu příslušného isotopu můžeme vypočítat vztah mezi počtem rozpadajících se atomů za vteřinu a hmotou příslušného prvku.

Váhu použitého radioisotopu vypočteme z počtu rozpadu jader atomů podle vztahu

$$m = zIA\tau \text{ (gramů)},$$

kde z je hmota jednoho atomu s jednotkovou hmotou (přibližně tedy rovna hmotě vodíku), I značí počet radioaktivních rozpadů za vteřinu, A hmotové číslo isotopu a τ tzv. střední dobu života příslušného radioisotopu ve vteřinách. Použijeme-li T místo τ z rovnice $\tau = 1/\lambda = T/0,693$, lze rovnici psát ve tvaru $m = 2,4 \cdot 10^{-24} IAT$ (gramů), kde je dosazeno za hodnotu z .

Použijme stejného příkladu s C^{14} a provedme zároveň kontrolu. Z předcházejícího výpočtu jsme dostali, že 1 g C^{14} odpovídá záření 5 c, z čehož plyne, že 1 mc váží 0,2 mg. Dosaďme do vzorce tyto hodnoty: $T = 0,166 \cdot 10^{12}$ sec (5100 let), $A = 14$, $I = 3,7 \cdot 10^{10}$ at/vt a dosaďme pro 1 mc C^{14} do uvedeného vzorce $m = 2,4 \cdot 10^{-24} \cdot 3,7 \cdot 10^{10} \cdot 14 \cdot 0,166 \cdot 10^{12}$ (g) = $2 \cdot 10^{-4}$ g. To znamená, že 1 mc C^{14} váží 0,2 mg, což je v plné shodě s předcházejícím výpočtem. Je tedy možno u všech prvků stanovit hmotu použitého zářiče podle počtu rozpadů.

Uvedme příklad natria Na^{24} s poločasem rozpadu 15 hodin. $m = 2,4 \cdot 10^{-24} IAT$, kde $A = 24$, $T = 15$ hod, (54 000 sec), $I = 3,7 \cdot 10^7$ at/sec = $= 2,4 \cdot 10^{-24} \cdot 3,7 \cdot 10^7 \cdot 24 \cdot 54 000 = 1,1 \cdot 10^{-10}$ gramů. Z toho plyne, že 1 mc Na^{24} váží $1 \cdot 10^{-4}$ μ g. Počítejme obráceně pro kontrolu, jaké množství se rozpadne z 1 g Na^{24} . Jeden gram Na^{24} má $2,5 \cdot 10^{22}$ atomů $\left(\frac{6 \cdot 10^{23}}{24}\right)$ a roz-

padovou konstantu $\lambda = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ sec}^{-1} \left(\frac{0,693}{54000}\right)$. Za 1 sec se rozpadne $3,25 \cdot 10^{17}$ atomů ($2,5 \cdot 10^{22} \cdot 1,3 \cdot 10^{-5}$), což je zhruba 10^7 c ($3,2 \cdot 10^{17}$). Tedy z jednoho gramu Na^{24} se rozpadá množství desíti milionů curie.

Vedle vztahu mezi curie a gramy je možno najít vztah mezi gramy a rentgeny. Je k tomu nutno znát gramekvivalenty prvků. Vraťme se k uhlíku C^{14} .

Jeho ekvivalent je 0,2 mg Ra. Pak dosaďme do vzorce $r/h = \frac{8,47 \cdot \text{mg Ra}}{a^2}$,

kde mg Ra je příslušný ekvivalent radia a a je vzdálenost terče od zářiče v cm. V této vzdálenosti měříme dávky ionizačního záření v určitém časovém inter-

valu. Dosaďme tedy hodnoty C^{14} do uvedeného vzorce: $\frac{8,47 \cdot 0,2}{1} = 1,694$ r/h (ve

vzdálenosti 1 cm). V závislosti na vzdálenosti bude klesat dávka ionizačního záření takto: ve vzdálenosti 1 dm = $1,69 \cdot 10^{-2}$ r/h,
 1 m = $1,69 \cdot 10^{-4}$ r/h,
 10 m = $1,69 \cdot 10^{-6}$ r/h nebo lépe $1,69 \mu\text{r/h}$.

Bezpečnostní dávka a jako nejvýše přípustná dávka byla schválena 0,05 r denně, tzn. 0,006 r za hodinu. V našem případě je tedy vzdálenost výše 1 dm naprosto bezpečná a vyhovuje státní normě.

Pro objasnění vztahu mg ekvivalentu radia, mc, a mg látky uveďme příklad s isotopem sodíku Na^{24} .

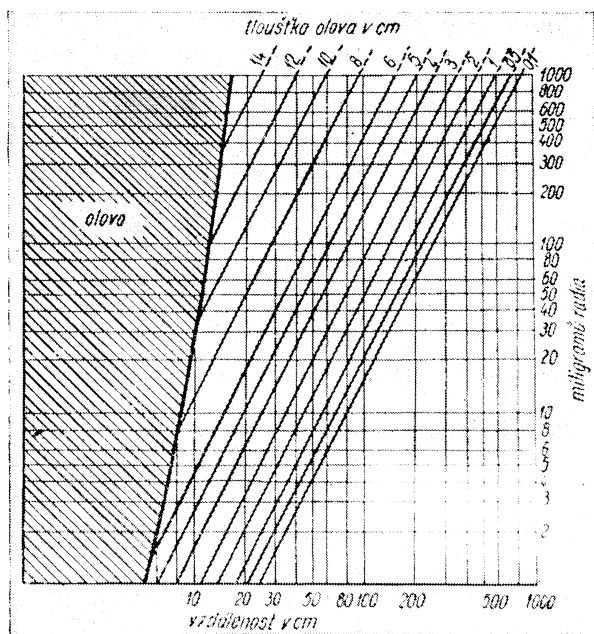
Mějme zdroj Na^{24} aktivity $M = 50$ mg ekvivalentu radia. Z tabulky najdeme, že $\text{Na}^{24} = 2,29$, což je aktivita 1 mc v miligramekvivalentech radia. Z toho plyne, že příslušný zdroj odpovídá 22 mc Na^{24} . Z této hodnoty můžeme vypočítat bezpečnou tloušťku materiálu, neškodnou vzdálenost nebo dovolenou aktivitu. Výpočtem zjistíme, že 1 g sodíku odpovídá 10^7 c a tedy 1 mc odpovídá 10^{-10} g Na^{24} . Naše hodnota v tomto případě odpovídá $22 \cdot 10^{-10}$ g Na^{24} . Ve vzdálenosti 1 m dává záření 42 mr za hodinu.

Na závěr této kapitoly je nutno říci: Zdroj Na^{24} aktivity 50 miligram ekvivalentu radia je váhově $22 \cdot 10^{-10}$ g a odpovídá množství 22 mc radioisotopu Na^{24} . Ve vzdálenosti 1 m dává 42 mr za hodinu. Toto vše, co bylo řečeno, platí jen pro čistý isotop daného prvku a v případě procentuálního zastoupení musíme provádět přepočty.

Absorpce záření a výpočet ochranných vrstev

Z uvedených hodnot se snadno dají počítat absorpční vrstvy a stínění pro určité záření. Procházejí-li částice různého druhu hmotou, nastává absorpce

dopadajícího záření, což se projevuje snížením jeho energie. Vedle zmenšení energie jde často i o změnu směru a o snížení počtu částic. U částic α jde o zánik helionů přitážením dvou elektronů, částice β se spojí s kladným iontem na neutrální atom, pozitron zaniká společně s elektronem vytvořením dvou kvant γ . Záření γ vzhledem ke své energii se dá nese snadno stínit, zatím co částice α a β se dají snadno odstínit listem papíru (u částic α) a folií hliníku (u částic β).



Obr. 2. Diagram k určení tloušťky krytů k ochraně před zářením gama při různém množství radia a pro různou pracovní vzdálenost.

Fotony ztrácejí svou energii při průchodu hmotou fotoelektrickým zjevem, při čemž sám foton zaniká, nebo Comptonovým zjevem, při čemž se původní foton odchyluje od původního směru současně se změnou energie, nebo ve třetím případě při vyšších energiích záření γ vznikají elektronové páry.

Úbytek intenzity záření, způsobený absorpcí, lze vyjádřit závislostí

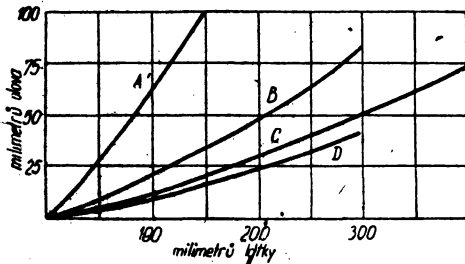
$$I = I_0 e^{-\mu d},$$

kde d je tloušťka v cm s absorpčním koeficientem μ , I_0 intenzita záření vstupujícího do absorbátoru a I je intenzita prošlého záření. Na obrázku 2 jsou vyznačeny potřebné tloušťky olověného stínění pro různé vzdálenosti pracovníka od zářiče s různým obsahem radia.

Další obrázek 3 udává ekvivalenty jiných stínících hmot vzhledem k olovu. A zde znamená železo, B omítku obsahující značné procento BaSO_4 , C je beton a D cihlová zeď. Barytová omítka bývá namíchána v poměru dvou dílů jemnějšího barytu, jednoho dílu cementu a dvou dílů hrubého barytu. Specifická váha takové omítky je $2,7 \text{ g/cm}^3$.

Vedle toho přichází v úvahu ještě doba ozáření v hodinách, neboť bezpečnostní dávka pro člověka je maximálně $0,05$ rentgen za pracovní den. Při překročení této dávky není možné, aby pracovník dále setrval na pracovišti. Následující diagram na obrázku 4 ukazuje přípustnou pracovní dobu bez stínění s γ zářivým radioaktivním materiálem vždy v určité vzdálenosti.

Pro záření β různých isotopů je nutno provádět ochranu podle energie částic β . Níže je uvedena příslušná tabulka 1.



Obr. 3. Diagram udávající tloušťku různého materiálu k stavbě krytu, ekvivalentní určité tloušťce olova.

Tab. 1

E Me V	Vrstva		
	vzduchu (m)	voody (mm)	hliníku (mm)
0,01	0,0013	0,0020	0,0006
0,10	0,101	0,158	0,050
1,0	3,06	4,80	1,52
2,0	7,07	11,10	3,51
3,0	11,08	17,40	5,50

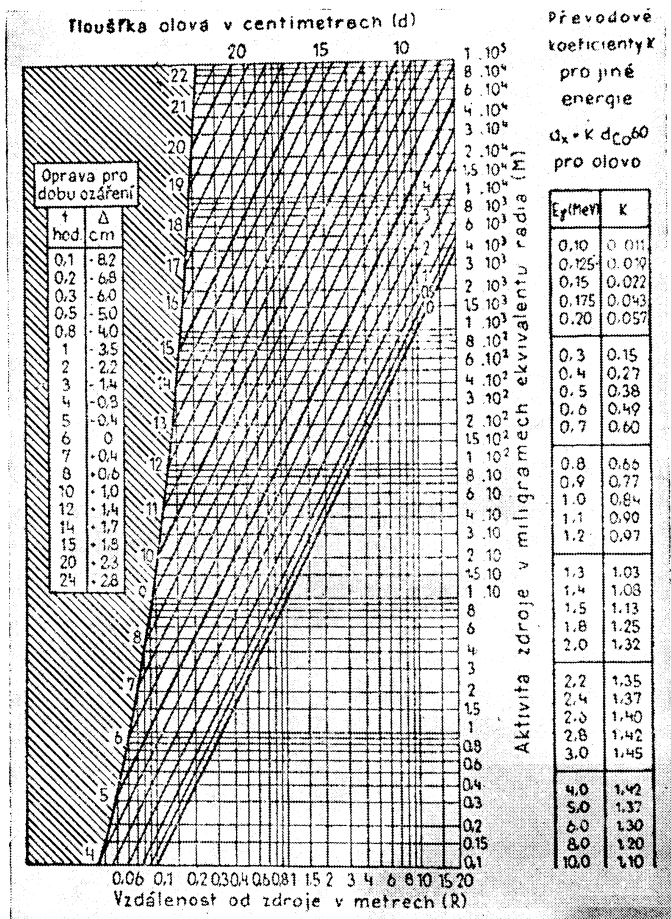
Použijeme-li ke krytí záření β jiných hmot, bude jejich tloušťka tolikrát větší nebo menší než tloušťka krytu hliníkového, uvedeného v tabulce, kolikrát je hustota příslušné hmoty těchto nových krytů menší nebo větší než hmota hliníku. U hliníku bereme hustotu $2,7 \text{ g/cm}^3$.

U záření α je mechanismus absorpce jiný. Určitá tloušťka materiálu buď absorbuje veškeré záření α , nebo se záření α určité energie neabsorbuje vůbec. Dolet částic α ve vzduchu je od $2,6$ – $8,6$ cm. Měření tohoto doletu slouží k charakterisování a identifikaci zářiče α .

Velikost doletu závisí na počáteční rychlosti pohybu částice α a tedy na

energii, a jelikož tato energie závisí na povaze radioaktivního prvku, závisí i dolet částic na poločase rozpadu prvku takto:

V závislosti na počáteční rychlosti je doběh určen vztahem $R = Kv_0^3$, kde R je dolet částice α v cm, v_0 počáteční rychlost v cm/sec, K je konstanta ($9,25 \cdot 10^{-28} \text{ s}^3 \text{ cm}^{-2}$). Závislost energie a doběhu částic α se dá vyjádřit vzorcem $R = kE^{3/2}$, kde R je opět dolet částic α v cm, E energie částic v MeV, k koefi-



Obr. 4. Stínění olovem proti záření gama radioaktivního kobaltu (Co^{60}) a převodové koeficienty pro olověné ochranné kryty proti záření gama libovolného radioaktivního isotopu (nejvyšší přípustná dávka ozáření 0,05 r za pracovní den).

cient úměrnosti. Závislost doletu na poločase rozpadu se dá vyjádřit vztahem $\ln \lambda = A + B \ln R$, kde λ je rozpadová konstanta a A i B koeficienty, charakterisující radioaktivní řadu. Nutno ovšem poznamenat, že záření α bylo poněkud pozorováno u těžkých a především přirozeně radioaktivních prvků. Pro určitý emitující prvek mají prakticky stejnou energii. Dolet částic se zmenšuje s rostoucí atomovou vahou i atomovým číslem absorbujícího prvku.

Z příslušných grafů je ovšem vidět, že u slabých zářičů je možno zeslabit záření prostou vzdáleností, poněvadž intenzita záření klesá se čtvercem vzdálenosti. Podle grafu na obr. 4 je vidět, že je možno tuto bezpečnostní dávku překročit, ale snížit dobu výskytu v prostoru, kde se vyskytuje záření. Takovým způsobem je možno i bez krytů snižovat nebezpečí záření.

Uvedme příklad: Mějme zdroj o aktivitě 10 miligramů ekvivalentu radia a pracovní doba t nechť se rovná 6 hodinám. Podle grafu 4 je bezpečná vzdálenost 1 m bez chránění. Budeme-li pracovat ve vzdálenosti 0,2 m, pak smíme pracovat jen 0,25 hodiny z důvodů bezpečnostních, což je vlastně časová ochrana. Obráceně, je-li podle grafu dána pracovní doba 8 hodin a vzdálenost od stroje 0,5 m, je maximálně možná aktivita zdroje 2 mg ekvivalentu radia. Tato vzájemná závislost se dá vyjádřit i početně vztahem.

$$At = 60R^2,$$

kde A je aktivita v mg ekvivalentech radia, t je čas výskytu ve vzdálenosti R od zářiče. Pro hodnoty již uvedené vychází $A = 10$ mg ekvivalentu radia, $t = 6$ hodin, $R = At/60$ a v našem případě $= 1$ (m). Vypočtená hodnota je v souhlase s hodnotou, plynoucí z grafu, a dává stejný výsledek pro bezpečnou vzdálenost bez ochrany.

Použijeme-li však silnějšího zdroje, musíme (nechceme-li snížit pracovní dobu na vteřiny, a nebo se vzdálit od zdroje do vzdálenosti stovek metrů) použít chránění podle grafu na obr. 2, případně přepočíst na jiný materiál podle obr. 3. Použijeme-li ve vzdálenosti 0,5 m zdroje o aktivitě 2 mg ekvivalentu radia, nemusíme ještě použít stínění pro 8 hodinovou pracovní dobu. Hodnoty stínění, vyjádřené v závislosti na mg ekvivalentech radia, jsou uvedeny v tabulce 2.

Tab. 2.

Pracovní doba	Vzdálenost	mg ekvivalent radia	olovem
hodiny	metry		cm
8	0,5	2	0
		3	0,1
		4	0,5
		10	2
		100	6
		1000	11

Místo stínění olovem můžeme stínit jinými materiály, ale správnou hodnotu musíme příslušně zvýšit.

Využití radioaktivních isotopů jako zdroje záření

Do této skupiny můžeme zahrnout případy použití radioisotopů jako zářičů, tzn. jako zdrojů dlouhého záření, které se svými vlastnostmi překrývá s velmi krátkým zářením roentgenovým. Intenzita záření se zeslabuje průchodem, odrazem nebo rozptylem na zkoumaném materiálu.

Odražené záření nebo prošlé záření musí nutně být závislé na materiálu, na kterém se odráží nebo kterým prochází. Vložíme-li do cesty radioaktivního záření destičku materiálu o určité tloušťce, zeslabí se intenzita záření v závislosti na tloušťce destičky. Existuje celá řada použití a využití této závislosti, ať už hovoříme o prozařování materiálu obdobně jako u mikrostrukturálního a makrostrukturálního rentgenu, o radiografii nebo o defektoskopii, což je vlastně zjišťování vad odlitků a jiných (kde se pro běžné účely používá Co^{60} do hloubky asi 40 mm a In^{112} do hloubky až 150 mm), nebo měření tlouštěk v celé řadě oborů, např. v gumárenství, při nanášení jednotlivých vrstev, v chemickém průmyslu při výrobě umělých hmot a pod. Obdobně můžeme využít této závislosti i v lékařství při prozařování lidského organismu jako rentgenem. Po vhodné úpravě nebo při vhodném výběru zářiče se dá použít této vlastnosti i k počítání jako čítačů nebo k zjišťování hustoty nebo jiných vlastností hmoty.

Pro průmyslové účely byl u nás vyvinut průmyslový tloušťkoměr k bezdotykovému měření tlouštěk. S pomocí záření radioaktivních isotopů můžeme měřit tloušťku materiálů buď absorpční nebo odrazovou metodou.

Při absorpční metodě záření, vycházející ze zdroje, prochází měřeným materiálem a dopadá na detektor. Za předpokladu homogenity měřeného materiálu se intenzita prošlého záření mění úměrně změně tloušťky d materiálu. Vzorec $I = I_0 e^{-\mu d}$, v němž je I intenzita záření, prošlého měřeným materiálem, I_0 intenzita záření dopadajícího na materiál a μ lineární koeficient, který závisí na druhu a na energii použitého záření a na vlastnosti absorpčního materiálu, vyjadřuje závislost prošlého záření na tloušťce materiálu. Vhodným výběrem radioisotopů je možno dosáhnout pro ocelové plechy přesnosti v měření tloušťky až $\pm 1\%$ základní tloušťky prakticky v celém rozsahu tlouštěk, vyjma oblast asi 2–8 mm, pro kterou nebyl dosud nalezen vhodný radioisotop.

Při odrazové metodě měření tlouštěk je zdroj záření i detektor umístěn na téže straně měřeného materiálu. Záření dopadající ze zdroje záření na měřený materiál je rozptylováno a část dopadne zpět na detektor záření. Touto metodou měříme tloušťky materiálu nepřístupného s obou stran (stěny trubky, vrstvy na základním materiálu, povlaky, laky, nátěry aj.). Rozptyl záření závisí na tloušťce, atomovém čísle a na energii záření. Přesnost měření vrstev povlaků je poměrně značná, byla změřena i tloušťka oloveného pokrytí $0,025 \mu$.

Jako detektorů se používá dnes Geigerových-Müllerových počítačů nebo ionizačních komor, spojených s dekadickým počítačem, nebo scintilační počítače s fotonásobičem. Dnes se těchto měřičů tlouštěk s počítači a s automatickou regulací používá (u nás v ČSR začíná používat) u válcovacích stolic a tratí, v papírnách, v textilkách, pilách a jinde, kde jde o přesnou tloušťku materiálu a kde nejde jiných metod použít (gumárenství a umělé hmoty).

V poslední době se dá touto metodou kontrolovat i síla stěn potrubí a všech nepravidelných materiálů (do jisté míry). Nerovnost v tloušťce se odstraní při absorpční metodě použitím stejného materiálu vykompensováním.

Vedle počítačových metod se velmi často používají k hodnocení i filmy. Zde mluvíme potom o radiografii nebo o defektoskopii. Na fotografickém materiálu vidíme potom vady a trhlinky, případně nehomogenitu, což se projeví různým zžernáním fotografického materiálu.

Využití ionizačních schopností radioaktivních isotopů

Do této skupiny můžeme zahrnout průmyslově vyvinutý elektrostatický eliminátor na odstraňování elektrostatických nábojů. Tyto náboje vznikají při suchém zpracování vláken všude tam, kde dochází ke tření vláken o sebe, o potahy z gumy nebo umělých pryskyřic nebo také o vyleštěné povrchy kovových válců a vodičů. Způsobují ulpívání odvinovaného materiálu na podložkách nebo trhání čtených tenkých vláken v textilním průmyslu, v papírnách aj. Jindy dostupují vysokých potenciálů a vyrovnávají se s okolními vodiči dlouhými jiskrami, které způsobují mnohdy i požáry. Náboje statické elektřiny se hromadí v prostředí, kde je relativní vlhkost vzduchu velmi malá. Náboje se zmenšují nebo dokonce i mizí s rostoucí relativní vlhkostí vzduchu. Toho lze ovšem použít k odstranění náboje, avšak jen v dřevoobráběcích podnicích, v papírnách, gumárenském, kožedělném a jiném průmyslu, kde vlhkost nevadí výrobkům, ale nejde toho použít v textilních továrnách. Vlhkost vzduchu nesmí překročit určitou mez, neboť pak je neúnosná nejen pro zdraví, ale znemožňuje také udržovat stroje v dobrém stavu. Proto je mnohem výhodnější použít radioaktivních isotopů k odstranění elektrostatických nábojů.

V textilním průmyslu se vůbec nedá použít vlhkosti k odstranění náboje, spíše naopak je nutno odstranit vlhkost, která vzniká přitahením mikroskopických kapiček mlhy na vlákna, mající určitý statický náboj. Toto přilnutí vodních kapiček k vláknům se nedá zjistit ani normálním mikroskopem.

Při dalším zpracovávání ztěžuje vlhkost barvení, mění barvy, ruší výrobní proces a pod. Trpí tím zvláště osnovy, které značnou dobu nepracují.

V obou případech odvedení nábojů statické elektřiny z vláken v textilních továrnách a v obdobných případech i jinde použitím radioaktivních isotopů záleží v tom, že se směs obsahující vhodný isotope, nanese na kovový vodič, který je dobře uzemněn nebo vhodně vodivě spojen se zemí. Záření vyslané radioaktivním isotopem ionisuje vzduch, který se stává vodivým prostředníkem mezi nábojem statické elektřiny a radioaktivním sběračem, který odvádí statickou elektřinu. Protože většinou nelze sběrač umístit v těsné blízkosti zkoušeného předmětu, zůstane vždy vzdálenost několika centimetrů. Musí se tedy volit takový isotope, jehož energie záření může danou vzdálenost překonat a na druhé straně nutno volit tuto vzdálenost co nejmenší, protože se vzrůstající vzdáleností se musí zvyšovat energie záření. To vede za prvé ke zvýšení pořizovacích nákladů a za druhé se zvyšuje nebezpečí ozáření pracovníků. Technicky nejvhodnější jsou isotopy, vyzařující částice α , a to ze dvou důvodů. Za prvé pro svou schopnost intenzivní ionisace, a za druhé pro svůj malý dolet ve vzduchu. Užívá se často i zářičů β , ale jejich aktivita je pro daný účel velmi malá. Zářičů γ se doposud nepoužilo pro jejich velkou pronikavost. Běžně v průmyslu se používá radioaktivního thallia Tl_{81}^{204} s poločasem 2,7 roku. Musí se s ním však nakládat velmi opatrně, protože mimo radioaktivní záření je nebezpečné tím, že je prudce jedovaté. Pomocí tohoto isotopu se úspěšně podařilo odstranit mlhovinu, vznikající přitahením nečistot ze vzduchu. Je vhodné použít vždy takový isotope s poločasem značně dlouhým, aby se intenzita záření neměnila s časem nijak znatelně a nemusil se isotope často vyměňovat. Dnes máme u nás v Československu sestaven pro jmenované účely odstranění elektrostatických nábojů přístroj s radioisotopem, zvaný eliminátor. Vyrábí se tak, že se na zlaté nebo platinové folie (v poslední době se již používá

i umělých hmot) nanášejí soli radia nebo jiných radioaktivních isotopů nebo prvků (v SSSR ve Ščerbakovově textilním kombinátu používají radioaktivní síry). Jako zářiče se též někdy používá $Po^{205-206}_{84}$. Z folií vychází usměrněné záření, odstíněné olověnými deskami tak, aby bylo do stran zastíněno a záření vycházelo jen daným směrem. U eliminátoru naší výroby se uvádí z 1 mg Ra nasycený ionizační proud $1 \cdot 10^6$ A, dolet záření α 7 cm, použité množství 5–200 mg radia a dávka ve vzdálenosti 1 m za 8 hodin je 13 mr.

Ionizačních účinků záření můžeme dále použít ve všech radiometrických přístrojích a indikátorech, ať už jde o Geigerovy-Müllerovy počítáče nebo ionizační komůrky a pod. Poměrně málo je známé využití ionizačních účinků záření ke zlepšování zapalování ve výbušných motorech, Přidá-li se do elektrody svíčky $4 \cdot 10^{-11}$ g polonia, což je asi jeden mikrocurie, pak je usnadněno spouštění a i studený motor hned naskočí. Baterie se tím ušetří, neboť se zmenší její zatížení. Podobně se použilo ionizačních účinků radioisotopů při konstrukci doutnavek pro citlivé měřicí přístroje. Studená katoda je pokryta thoriem a stačí pak impuls 10^{-11} V k jejímu zapálení. Někdy se místo thoria používá jako zářiče β prvků Sr 90 a Y 90 ke stejným účelům v zářivkách. Je celkem výhodné použít zářiče β , neboť již skleněný obal zářivky pohltí naprosto veškeré záření, takže nemůže dojít k poškození lidského organismu.

Další využití ionizačních účinků radioaktivního záření je při studiu ionisace plynu v závislosti na tlaku, na chemickém složení a pod. Tak vznikla myšlenka na sestavení manometrů, pracujících pomocí ionizačních účinků radioaktivního záření. Na stejném principu vznikly ionizační plynové analyzátoary, které vedle automatické analýsy registrují a dokonce i řídí složení některých směsí. Stejným způsobem je řešen i automatický hlásič požárů, nebo automatický měřič teploty, hlásič kouřových plynů ve vzduchu a pod. Každá stopa prachu nebo změna teploty má za následek změnu ionisace v kontrolní komoře, a okamžitě uvádí v činnost automatický zapisovatel.

Ionizačních účinků radioaktivního záření je využito i v iontových čerpadlech k dosažení extrémně vysokého vakua. V čerpaném prostoru se zbylé molekuly plynů ionisují pomocí radioisotopů a vzniklé ionty se pak odstraní elektrickým a magnetickým polem.

Vedle uvedených úkonů můžeme provádět také vážení a zjišťování mikroskopických částic, neboť radioaktivní metody jsou tak citlivé, že zaznamenejeme i 10^{-16} g hmoty.

Pomocí ionisace můžeme měřit rychlost proudění u kapalin a plynů. Zařízení pro měření rychlostí se skládá z ionizační komory, jejíž elektrody jsou pokryty tenkou vrstvou radioaktivní látky. Mezi elektrodami vznikají kladné i záporné ionty, které jsou odváděny k elektrodám. Při konstantní vzdálenosti elektrod a konstantním napětí mezi elektrodami teče mezi elektrodami určitý proud, který způsobí na odporu spád napětí, dávající po zesílení zesilovačem výchylku na galvanometru. Necháme-li popsanou ionizační komoru procházet proud vzduchu rychlostí v , nastává odchylka iontů z jejich dráhy směrem k elektrodám. Tento pokles iontů se projeví sníženou výchylkou na galvanometru, který může být oceňován přímo již v jednotkách, udávajících rychlost proudící látky.

Poněvadž proud iontů, tekoucí k elektrodám, závisí na druhu a na hustotě plynů, lze ionizační komorou stanovovat jednotlivé druhy a současně i hustotu jednotlivých druhů plynu.

Využití radioaktivních izotopů ke stopování

Do této skupiny zahrnujeme případy použití radioaktivních izotopů, kde nás nezajímá změna po průchodu hmotou, ani změna hmoty, způsobená průchodem radioaktivního záření hmotou. Zajímá nás toliko záření dané hmoty daného izotopu, který tímto zářením můžeme sledovat v technologických pochodech, v lidském organismu nebo chemických reakcích. Radioaktivní izotopy vyzařují záření, které lze zjistit z velmi nepatrného množství látky, řádově 10^{-12} g, a dá se zjistit množství 10^{-16} g příslušného aktivovaného prvku. Z toho plyne, že tato metoda je vysoce citlivá a velmi přesná. V jednom gram-atomu látky je $6 \cdot 10^{23}$ atomů, a použití radioaktivní techniky umožňuje změřit 10^5 – 10^6 atomů. Toto sledování lze provést i tehdy, jestliže jsou označené atomy rozptýleny na velké ploše. Vysoká citlivost umožňuje vedle zjišťování značených atomů a jejich pochodů i vážit mikrohmotu, zjišťovat procentuální zastoupení použitím různých záříčů, zjišťovat jediné vadné místo v materiálu, jedinou oblast nečistoty v látce atd. Touto metodou se dá sledovat zanášení tkacích trysek v textilních strojích, zarůstání sprádacích trysek při výrobě viskosového hedvábí, usazování látek v kapilárách, v potrubích, zanášení výtokových potrubí, usazeniny na lopatkách turbin a pod.

Radioaktivní vápník např. pomohl rozhodnout o původu v mšku v kuličkových ložiskách. Tak bylo zjištěno, že vměsky mají svůj původ v ohnivzdorném materiálu pece a ne v desoxydačních přísadách.

Literatura

Předpisy pro pracoviště s umělými radioaktivními látkami.

S. M. Gorodinskij a G. M. Patchomenko: *Hygiena při práci s radioaktivními izotopy* (nomo-gram na obr. 4).

J. Kotrba: *Laboratoře pro práci s radioaktivními izotopy* (diagram na obr. 2 a 3).

GRAFICKÉ URČOVANIE KONCENTRÁCIÍ A SUSCEPTIBILÍT ZMESÍ ALEBO ROZTOKOV SLABOMAGNETICKÝCH LÁTKOK

MATEJ RÁKOŠ,

Katedra fyziky VŠT, Košice

Je navrhnutý grafický spôsob určovania koncentrácií susceptibilit zmesí alebo roztokov slabomagnetických látok, pričom sa vychádza z Wiedemannovho zákona aditivity. Grafické určovanie slúži k urýchleniu počtárskeho zhodnotenia série meraní, resp. ku rýchlejšej kontrole numerického výpočtu.

V laboratórnej praxi so slabomagnetickými látkami je často potrebné určovať výslednú susceptibilitu roztokov známej látky v známom rozpustidle, alebo určovať koncentráciu roztoku známej susceptibility a známych zložiek atd. Medzi iným je to potrebné pri zhotovovaní zrovnávacích vzorkov väčšej susceptibility ako má destilovaná voda, a to k meraniu, ku kalibrácii a preskúšaní nových meracích zariadení, pri meraní vzorkov nepravidelných tvarov metódou roztoku rovnakej susceptibility [1] a i.

V takýchto prípadoch aplikujeme Wiedemannov zákon aditivity, dľa ktorého susceptibilita p percentného roztoku sa dá určiť dľa vzťahu ([1], [2], [6]):

$$\alpha = \frac{p}{100} \alpha_1 + \frac{100 - p}{100} \alpha_2, \quad (1)$$