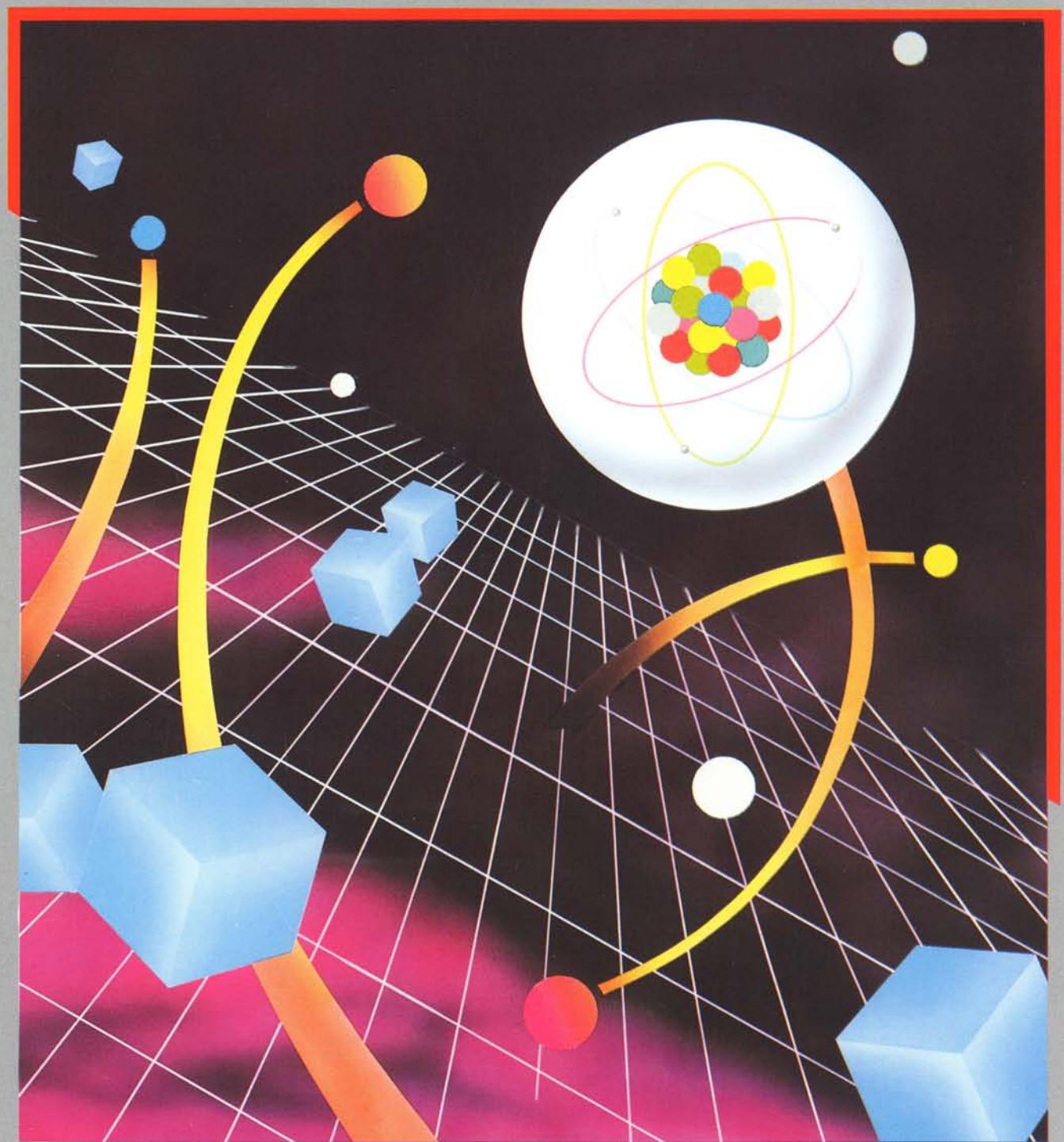


# UŽITEČNÉ ZÁŘENÍ

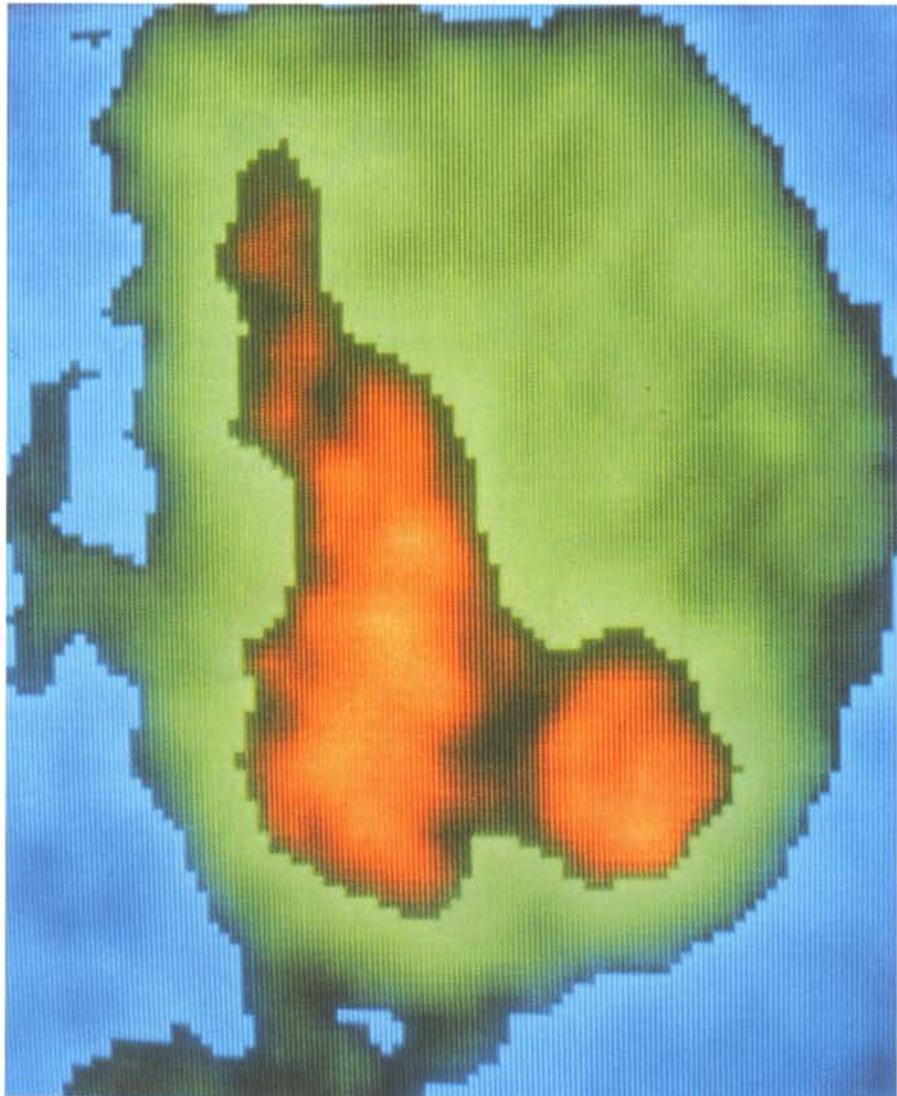


# **UŽITEČNÉ ZÁŘENÍ**

# Úvod

Po celý svůj život a na kterémkoliv místě na Zemi jsme vystaveni záření. Je mnoho druhů záření: světelné, tepelné, dlouhovlnné, krátkovlnné, ultrafialové a také záření ionizující. Umíme si jistě dobře představit užitečnost světla – bez něho by asi nebyl na Zemi život. Elektromagnetické vlny nám přenášejí rozhlas a televizní obraz. Infračervené záření spojujeme s příjemným pocitem tepla. I ionizující záření může být, a také je, velmi dobrým sluhou, užitečným a prospěšným. Tato útlá brožura Vás chce seznámit s možnostmi využití ionizujícího záření v různých oborech lidské činnosti. Autoři se snažili napsat ji co nejsrozumitelněji a všechny používané odborné termíny stručně vysvětlit.

## Trocha historie



Koncem minulého století došlo k několika fyzikálním objevům, které pořádně zatrásly teoriemi o neměnnosti atomů.

1895 W.C.Roentgen objevil paprsky X a svými výzkumy dal podnět k rozvoji studia struktury atomů.

1896 H. Becquerel objevil přirozenou radioaktivitu uranové rudy.

1897 E. Rutherford rozlišil na základě různé pronikavosti radioaktivního záření paprsky alfa a beta.

J.J. Thomson objevil elektrony a zjistil, že jsou částmi atomů.

1898 M. Curieová – Skłodowská a její manžel objevili radioaktivní prvky polonium a radium. V roce 1910 pak vyrobili čisté kovové radium z jáchymovského smolince.

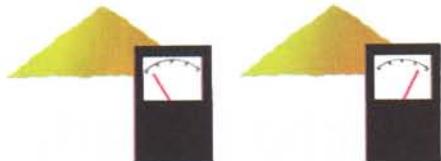
A jak už to bývá, za vědeckými objevy vznikly celé nové vědní disciplíny – fyzika atomů, fyzika elementárních částic. Stále přibývají další objevy odhalující tajemství struktury hmoty. Od samého začátku se zároveň lidé snažili využít teoretických poznatků v praxi.

Nejvyraznějším a nejviditelnějším výsledkem využití znalostí o struktuře hmoty je odhalení možnosti získávat obrovskou energii ukrytou v jádře atomu. O energetickém využití si však vyprávět nebude. Seznámíme se s použitím radioaktivních izotopů a ionizujícího záření v lékařství, zemědělství, průmyslu, potravinářství, biologii, při ochraně životního prostředí a v dalších oborech.

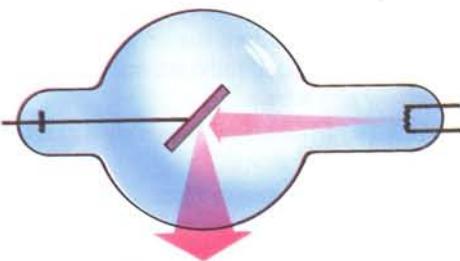
# Co to je, když se řekne:

**Jádro atomu** – je nepatrná centrální část atomu o rozměrech řádově  $10^{-15}$  m, která v sobě soustřeďuje téměř veškerou hmotnost celého atomu. Je tvořeno protony a neutrony, které nazýváme společným názvem nukleony. Poutají je k sobě silné přitažlivé jaderné síly.

**Radioaktivita** – je vlastnost některých atomů samovolně se rozpadat (přeměnovat) na atomy jednodušší, vysílat elektromagnetické záření nebo částice. Našimi lidskými smysly nepoznáme, je-li nějaká látka radioaktivní nebo ne. Radioaktivitu zachytí pouze speciální měřící přístroje, detektory, nebo se pozná podle některých doprovodných jevů: např. při silné ionizaci vzduchu se tvoří ozon, který zaznamenáme čichem. Přičinou nestability některých jader atomů je, že mají nadbytek protonů nebo neutronů v jádře, nebo že jsou tak těžká a složitá, že nemohou existovat ve stabilním stavu.



**Aktivita radioaktivní látky** – je veličina určená počtem radioaktivních přeměn probíhajících v látce za jednotku času. Dojde-li v látce k 1 přeměně za 1 sekundu, má aktivitu 1 Becquerel (Bq). Je to jednotka velmi malá, takže v praxi se setkáváme spíše s jejími násobky (kBq, MBq, GBq, atd.).



Princip rentgenovy trubice: elektrony vystřelené z katody dopadají na anodu, kde při jejich zabrzdění vzniká záření X

**Ionizující záření** – tento pojem zahrnuje jednak záření, které vysílají radioaktivní látky, jednak rentgenové záření (pařsky X), které vzniká zabrzděním elektronů ve speciální rentgenové trubici, dále záření vzniklé v urychlovačích častic a záření neutronové, např. z jaderného reaktoru, nebo ze speciálních jaderných reakcí. Ionizující se nazývá proto, že při průchodu hmotou ionizuje okolní atomy, a to buď přímo, je-li záření tvořeno elektricky nabitémi částicemi, nebo nepřímo, jde-li o částice neutrální, např. neutrony. Zdroje ionizujícího záření jsou přirozené, nebo umělé.

V dalším textu budeme pro zjednodušení používat jen výraz záření.

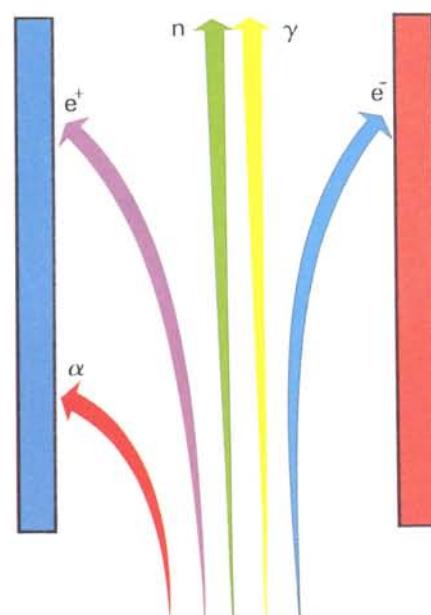
**Záření alfa** – vyskytuje se u těžších atomů. Jádro atomu vysílá dva protony a dva neutrony, v podstatě jádro helia.

**Záření beta** – je vysílání kladného nebo záporného elektronu (kladný elektron se nazývá positron).

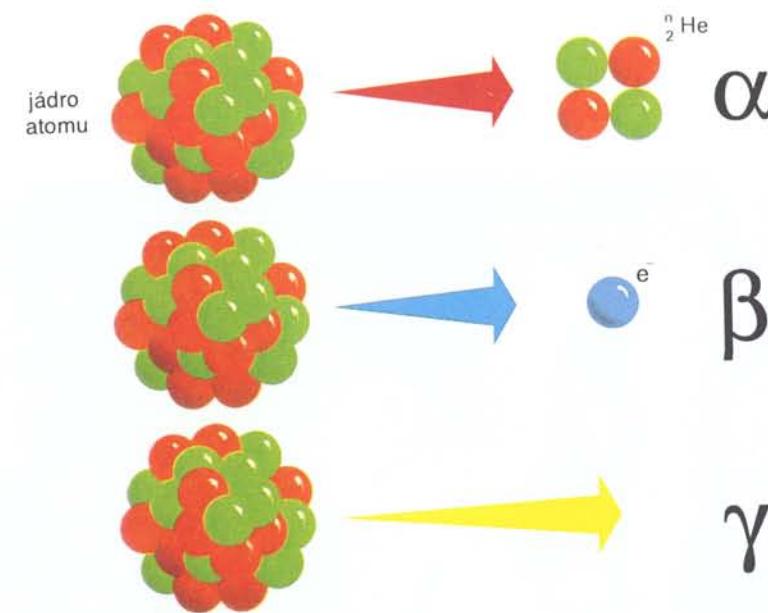
**Záření gama** – je elektromagnetické záření s velmi krátkou vlnovou délkou, jehož vyzářením se vyrovnávají energetické rozdíly mezi různými energetickými stavami atomového jádra.

**Rentgenové záření** (nebo také záření X) – je krátkovlnné elektromagnetické záření, které vzniká v elektronovém obalu jádra bud' zabrzděním elektronu, nebo při interakci elektronu s elektrickým polem jádra nebo elektronovým obalem.

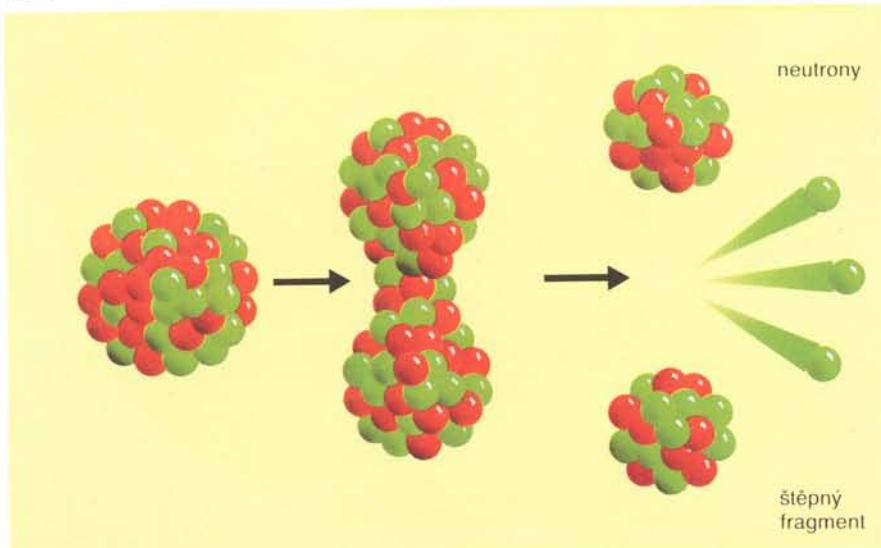
**Samovolné štěpení jader** – je forma radioaktivnosti, při níž se těžké jádro rozpadá na dva nebo tři štěpné fragmenty. Přitom vylétá jeden nebo více neutronů.



Chování různých typů záření v magnetickém poli

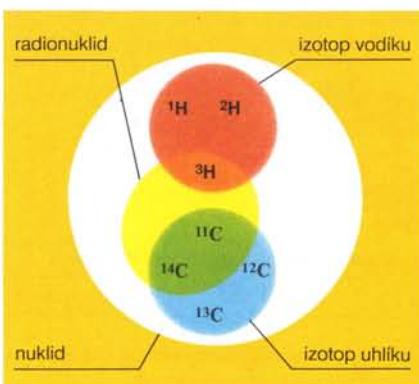


Druhy záření



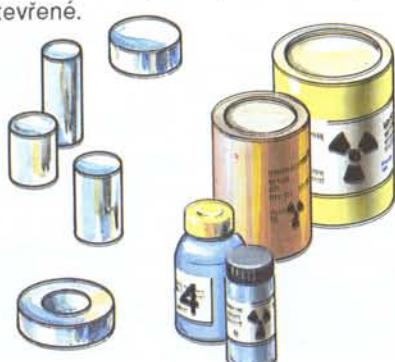
Samovolné štěpení jádra

**Nuklid** – je soubor stejných atomů, které mají jednoznačně určený počet protonů a neutronů. Nuklidy téhož prvku, jejichž atomy mají stejný počet protonů, ale různý počet neutronů se nazývají **izotypy**. **Radionuklid** je nestabilní nuklid, podléhající samovolné radioaktivní přeměně. **Radioizotop** je nestabilní izotop prvku, podléhající samovolné radioaktivní přeměně.

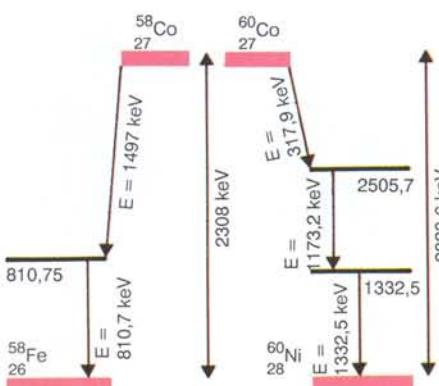


**Energie záření** – je důležitou charakteristikou radionuklidu nebo ionizujícího záření. Každý radionuklid vysílá záření o přesně dané energii (v případě záření alfa nebo gama) nebo s různými energiami až do jisté maximální hodnoty (záření beta). Souhrn všech energií záření daného radionuklidu se nazývá **energetické spektrum**. Některý zářič může vysílat záření několika druhů a s různou energií.

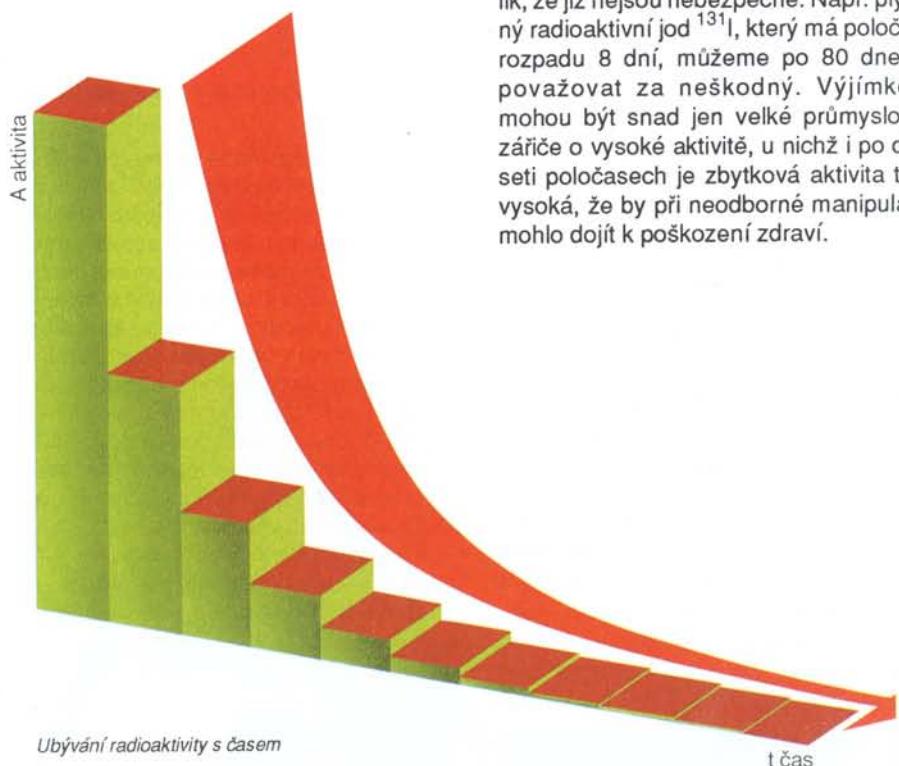
**Radioaktivní zářič** – je látka (pevná, kapalná nebo plynná), která je radioaktivní. Podle takovéto obecné definice je radioaktivním zářičem takřka všechno na světě, např. i lidské tělo, neboť obsahuje radionuklidy. Radioaktivní zářiče jsou charakterizovány jejich aktivitou. Dělí se na uzavřené a otevřené. Uzavřený zářič musí mít takovou povrchovou úpravu, která zajistí jeho těsnost a při běžném zacházení vyloučí únik radioaktivních látek ze zářiče. Výrobci, kteří vyrábějí uzavřené zářiče, musí vyzkoušet těsnost každého zářiče a dát mu osvědčení. Zářiče, které nevyhovují těmto přísným podmínkám, jsou považovány za otevřené.



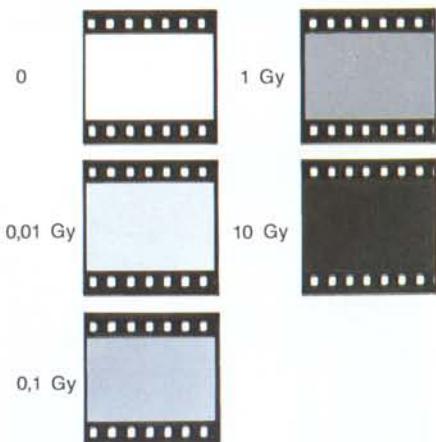
Příklady používaných zářičů



Příklady energetických hladin radionuklidů kobaltu.  $^{58}\text{Co}$  se rozpadá ve dvou stupních na nuklid železa  $^{58}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$  se rozpadá ve třech stupních na nuklid niku  $^{60}\text{Ni}$ . E – energie využálená při rozpadu jádra, keV – jednotka energie (kiloelektronvolt)



Ubývání radioaktivity s časem



Účinek různých dávek se dá pozorovat např. na fotografickém filmu. Při malé dávce je na filmu jen lehký závoj, při větších dávkách je záření intenzivnější. Záleží samozřejmě i na citlivosti fotografického materiálu.

**Poločas rozpadu** – je doba, za kterou se rozpadne polovina radioaktivní látky (přesněji polovina radioaktivních jader, která byla přítomna na začátku). Ze zbývající poloviny se pak za další poločas rozpadne opět polovina (tj. zbývá 1/4 původního množství) atd. Poločas rozpadu je charakteristická konstanta pro daný radionuklid. U známých radionuklidů se poločasy radioaktivních přeměn pohybují od zlomků sekundy po miliardy let. Existuje teorie, že všechny látky na světě jsou radioaktivní. Pouze jejich poločas rozpadu je tak dlouhý, že jej neumíme změřit.

Radioaktivita každého radionuklidu se tedy s časem snižuje, říkáme, že radioaktivní látka "vymírá". Přibližně za dobu deseti poločasů, kdy radioaktivita klesne 1000x, většina radioaktivních látek vymře natolik, že již nejsou nebezpečné. Např. plynný radioaktivní jod  $^{131}\text{I}$ , který má poločas rozpadu 8 dní, můžeme po 80 dnech považovat za neškodný. Výjimkou mohou být snad jen velké průmyslové zářiče o vysoké aktivitě, u nichž i po deseti poločasech je zbytková aktivita tak vysoká, že by při neoborné manipulaci mohlo dojít k poškození zdraví.

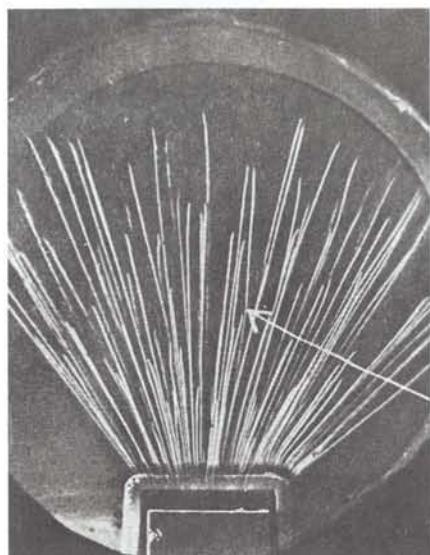
**Účinek ionizujícího záření** – není dán pouze aktivitou zdroje záření, ale závisí také na tom, jakou energii záření nese a jak účinně ji předává prostředí, jímž prochází. Mírou účinku záření je tzv. **dávka**, která se vyjadřuje pomocí energie absorbované v jednotce hmotnosti prostředí. Jednotkou dávky je 1 Gray (1 Gy). Účinek záření na živý organismus je třeba ještě korigovat podle druhu záření. Např. neutrony způsobí v živém tkání větší "škodu" než elektrony a částice alfa zase větší škodu než neutrony. Biologická účinnost jednotlivých druhů záření se vyjadřuje pomocí tzv. **jakostního faktoru**. Dávka vynásobená jakostním faktorem se nazývá **dávkový ekvivalent** a jeho jednotkou je **sievert** (1 Sv).

# Jak se měří radioaktivita

Záření radioaktivních látek je pro lidské oko neviditelné. Ani žádným jiným smyslem nepoznáme, zda nějaký předmět je nebo není radioaktivní. Musíme proto spoléhat na nejrůznější fyzikální měřicí metody. To není neobvyklé: při pohledu na elektrickou zásuvku nebo od někud trčící drát nepoznáme, zda je pod elektrickým napětím, nebo ne. A stejně tak, jako se o elektrickém napětí nebudeme přesvědčovat tím, že budeme strkat prsty do zásuvky, tak ani v případě, že pracujeme s radioaktivními látkami, nelze postupovat laicky a neodborně.

Pro měření radioaktivity se využívají řady různých účinků ionizujícího záření. Nejčastěji se měří ionizace vyvolaná průchodem fotonu nebo částice prostředím, nebo se měří vzniklé poruchy v pevné látce. Protože množství vytvořeného elektrického náboje je velmi malé, různými metodami se zesiluje, aby byl dobře měřitelný (lavinovité rozšíření elektrického náboje v plynu, zesílení signálu v elektronovém fotonásobiči apod.). U některých metod je výsledný elektrický signál úměrný typu a energii záření. Detektory, které toho využívají, se nazývají proporcionální počítadlo. U jiných detektorů signál na původní energii záření nezávisí – např. u Geiger-Müllerovy trubice.

Existují také metody, které umožňují registrovat jedinou částici a sledovat její stopu. Typickým příkladem je Wilsonova mlžná komora, kde se kolem stopy částice vytvoří miniaturní kapičky, címž se stopa zviditelní a lze ji fotograficky zachytit. Jiným příkladem je bublinková komora s kapalným vodíkem, nebo silná vrstva fotografické emulze. Pomocí vnějšího magnetického pole je možné dráhy nabitých častic zakřivit, analyzovat stopy a určit přesně druh částice, která stopu způsobila.



Snímek z Wilsonovy mlžné komory. Šipka ukazuje dráhy častic alfa vyletujících ze zdroje v dolní části obrázku



Ke kalibraci přístrojů se používají etalonové radionuklidů s přesně definovanou hodnotou aktivity, čistotou a geometrickým tvarem

K měření ionizujícího záření lze využívat i jeho další účinky. Např. zčernání fotografické emulze je principem filmové dozimetrie. Je to metoda k určování malých dávek, zejména při dozimetrii osob. Stupeň zčernání je úměrný dávce záření. Pro měření vysokých dávek se zpravidla používají změny optických vlastností látek (změna barvy), nebo množství uvolněného tepla (tzv. kalorimetrie), nebo změny elektrických vlastností polovodičových součástek. Měření se provádí buď relativně, srovnáním hodnoty naměřené pro neznámý vzorek s hodnotou naměřenou za stejných podmínek pro vhodný standard o známé aktivitě, nebo se provádí buď podstatně složitější měření

absolutní, při nichž se naměřená hodnota musí korigovat na řadu známých efektů, které ovlivňují výsledek. Provádějí se korekce na geometrické uspořádání, na pochlcování záření ve vzorku nebo v jeho okolí, na odraz záření od podložky, na náhodné překrývání signálu atd. Tato absolutní měření se provádějí pouze v případech, kdy je to nezbytně nutné. Je k nim zapotřebí velmi složité speciální aparatury.

**Detektory** jsou přístroje k určování přítomnosti záření a k odhadu jeho intenzity.

**Dozimetry** jsou přístroje k měření velikosti dávky, tedy velikosti energie, kterou záření hmotě předalo.



Aparatura pro absolutní měření metodou tzv. manganové lázně

# Příklady používaných detektorů a dozimetru

**Plynové detektory** jsou nejčastěji používanými detektory záření. Jsou založeny na primárních účincích záření – ionizaci a excitaci atomů plynu. Plyn je uzavřen v kovovém obalu s elektrodou uprostřed. Mezi obal a elektrodu je vloženo napětí. Jakmile do detektoru vnikne záření, způsobí ionizaci, která se projeví jako ionizační proud mezi elektrodou a obalem. Podle závislosti proudu na napětí se rozlišují různé typy detektorů, např. ionizační komora, proporcionalní počítací nebo Geiger-Müllerův počítací.



Zesilování impulsu ve fotonásobiči

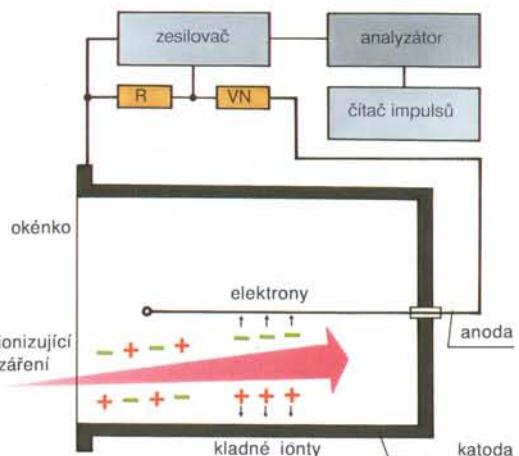


Schéma zapojení plynového detektoru

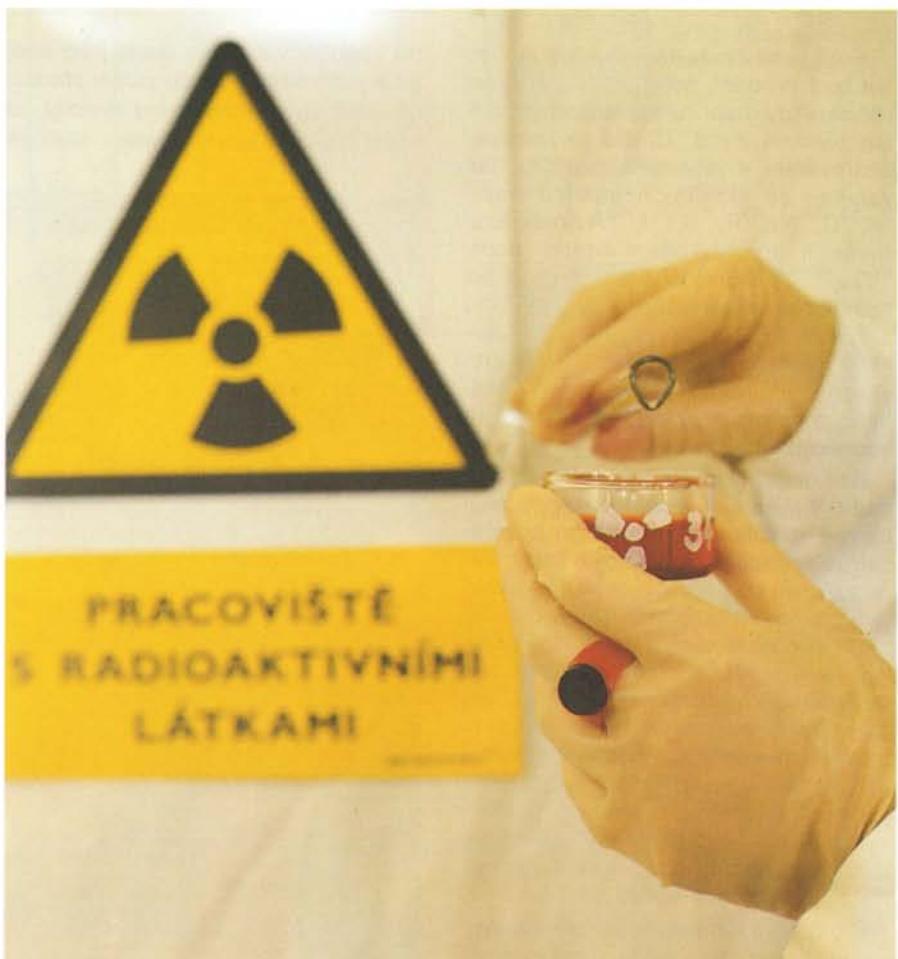
**Moderační detektory** slouží k detekci neutronů a ke stanovení jejich energie. Jsou tvořeny látkou, která účinně zpomaluje (moderuje) neutrony. Je to zpravidla látka s vysokým obsahem vodíku, např. parafín, polyetylén apod.

**Filmový dozimetr** je tvořen speciální fotografickou emulzí. Intenzita jejího zčernání je úměrná dávce záření. Filmovými dozimetry se nejčastěji stanovují nízké dávky v osobní dozimetrii, např. na pracovištích, kde se pracuje se zářičí, nebo u zaměstnanců jaderných elektráren. V naší republice existuje Celostátní služba osobní dozimetrie, která filmové osobní dozimetry centrálně vyhodnocuje a sleduje dodržování hygienických limitů při práci se zářením.

**Termoluminiscenční dozimetr** se také používá jako osobní dozimetr. Ve formě prstýnku ho nosí lidé manipulující ručně s radioaktivními zářiči. Lze tak zjistit dávku, kterou obdržely pracovníkovy ruce. Termoluminiscenční látka má tu vlastnost, že záření v ní vybudí elektrony do vyššího energetického stavu. Když se pak ozářená látka zahřeje (asi na 200 °C), elektrony se vracejí do základního stavu a přebytek své energie vyzáří ve formě světelných záblesků. Světelné záblesky se pomocí fotonásobiče převádějí na napěťové impulsy a měří. Princip fotonásobiče je patrný z obrázku.



Filmový dozimetr jak ho známe z pláště lékařů – rentgenologů a rozebraný na části



Termoluminiscenční prstový dozimetr při práci s otevřenými radioaktivními zářiči

**Scintilační detektory** jsou založeny na podobném principu jako termoluminiscenční dozimetry. Záření vybudí ve scintilátoru elektrony do vysšího energetického stavu a návrat elektronů do základního stavu se projeví jako světelné záblesky, které se měří fotonásobičem. Scintilátory mohou být pevné krystaly sloučenin anorganických (nejčastěji jodidu sodného) nebo organických (např. antracen), nebo roztoky či suspenze organických scintilátorů v organickém rozpouštědle, např. toluenu. Vzorky se pak měří přímo rozpuštěné ve scintilátoru.

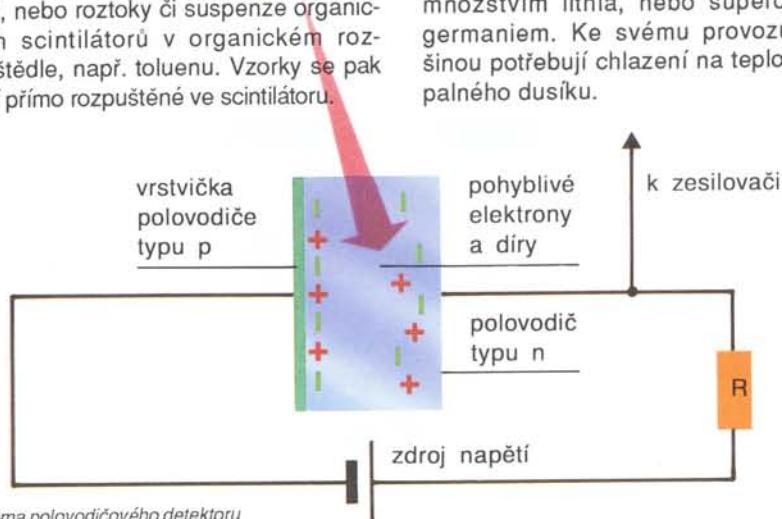


Schéma polovodičového detektoru

**Polovodičové detektory** pracují na tomto principu: záření způsobí v polovodiči přeskok elektronu do tzv. vodivého pásmu polovodiče. Působí-li na polovodič elektrické pole, projeví se tento přeskok jako náhlé zvýšení vodivosti. Vhodné elektronické zařízení zaznamená elektrický impuls. Polovodičové detektory jsou tvořeny většinou monokrystalem křemíku nebo germania se stopovým množstvím lithia, nebo superčistým germaniem. Ke svému provozu většinou potřebují chlazení na teplotu k palného dusíku.



Měření scintilačním detektorem v terénu

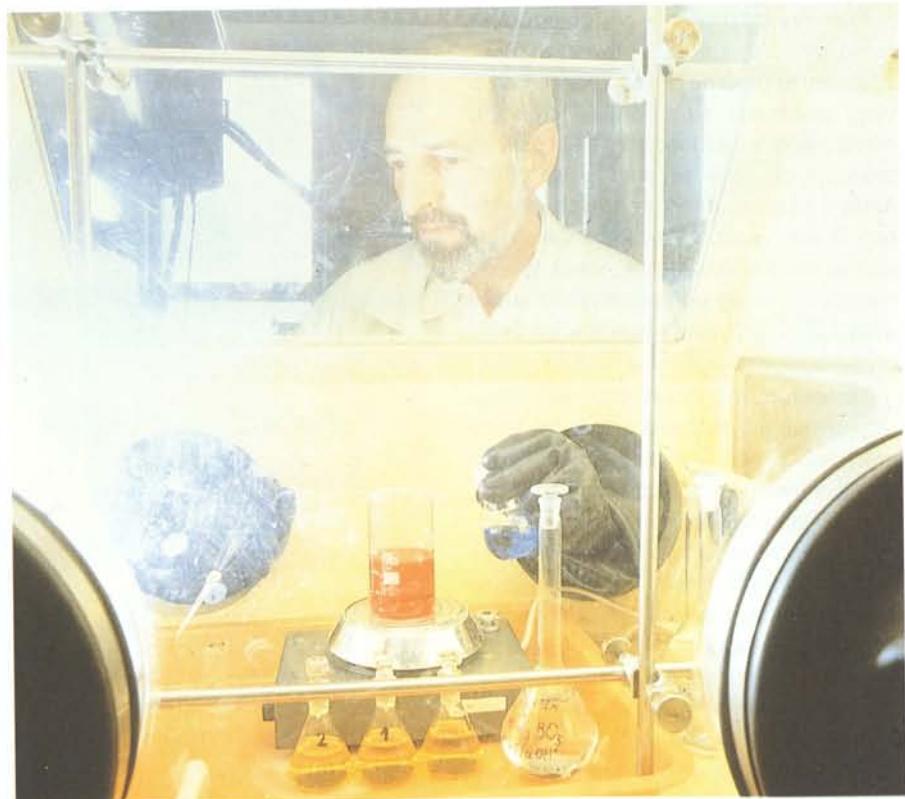
## Příprava radionuklidů a radioaktivních látek

Řekli jsme si, že radionuklidy mohou být buď přírodní, nebo umělé. Přírodní radionuklidy, např. uran, radium a thorium získáme z rud.. Umělé se získávají ozařováním v jaderném reaktoru (tak vznikají ze stabilních nuklidů např.  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{198}\text{Au}$ ) nebo ozařováním urychlovačem částic (např.  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ). Kromě toho je možné oddělit radionuklidy od štěpných produktů z vyhořelého paliva vyjmutého z jaderného reaktoru (např.  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{141}\text{Pm}$ ). Získávané radionuklidy je třeba vždy vhodnými chemickými metodami oddělovat, koncentrovat a čistit.

Radionuklidy mají různé poločasy rozpadu. V nukleárně medicíně se používají hlavně radionuklidy s krátkým poločasem, aby pacientovo tělo bylo zatežováno zářením co nejkratší dobu. Takovéto radionuklidy nelze připravovat "do zásoby" a skladovat je před použitím. Připravují se tedy přímo v nemocnicích v tzv. **radionuklidových generátorech**. Jsou to nádoby naplněné radionuklidem s dlouhým poločasem rozpadu (říká se mu mateřský), jehož rozpadem vzniká žádaný radionuklid s krátkým poločasem. Vhodnou chemickou látkou se tento, tzv. dceřiný radionuklid, vymývá a je k dispozici těsně před použitím.

Pro práci s radioaktivními látkami byly vyvinuty speciální metody práce s dálkovým ovládáním vzorku, měřící metody umožňující stanovit nejen aktivitu vzorku,

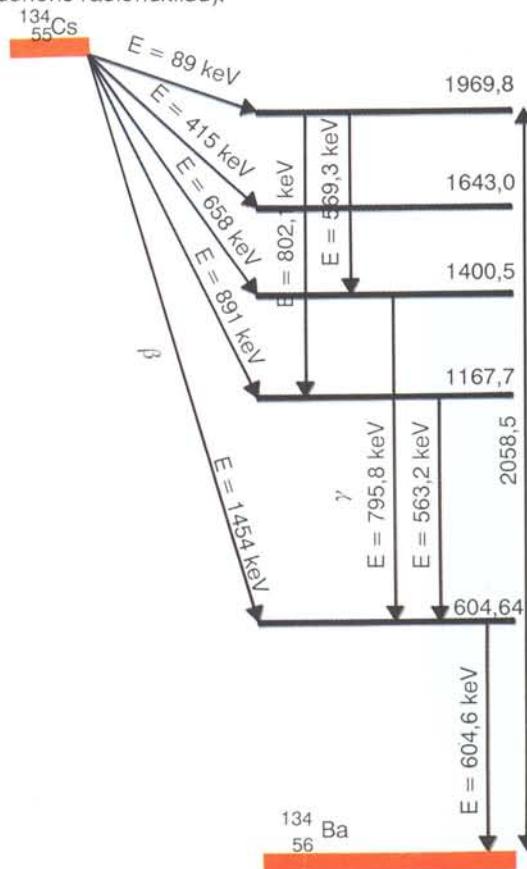
ale i analyzovat záření podle jeho energie a měřit dávku, kterou záření předává do okolí. Byly vypracovány metody, jak vnést radionuklid do předem stanoveného místa v molekule a vytvořit tzv. značené sloučeniny. Princip nejčastěji používaných analytických metod si stručně vysvětlíme.



S radioaktivními materiály se manipuluje v tzv. rukavicové skříně

# Analytické metody

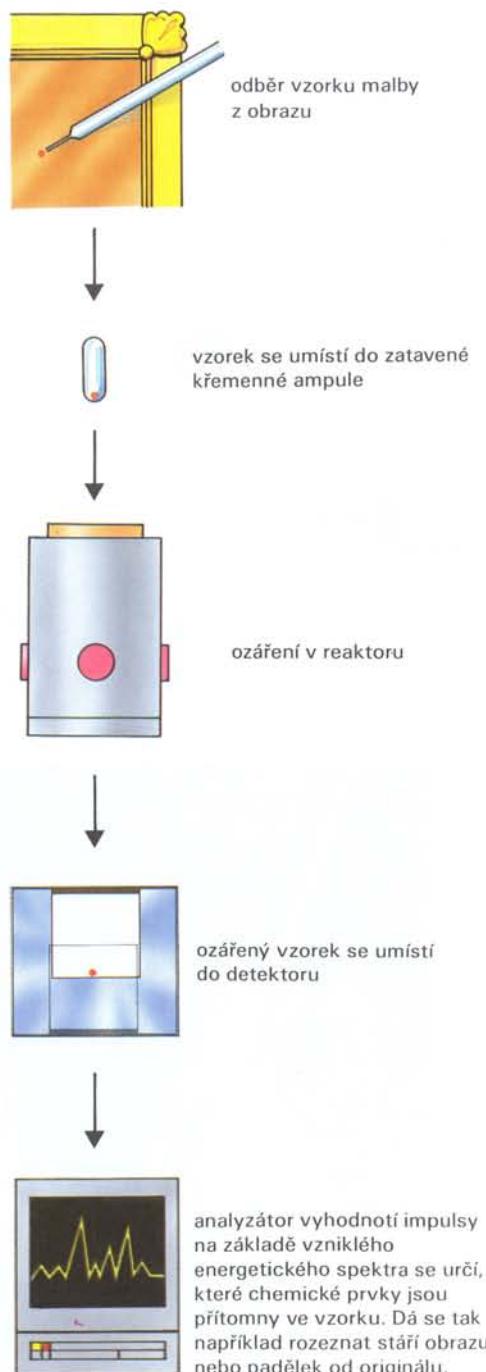
Jaderná spektrometrie se zabývá měřením energie jaderného záření. Rozdělení četnosti emitovaných částic v závislosti na jejich energii nazýváme jaderné spektrum a podle druhu záření je dělíme na alfa, beta a gama spektrum. Spektrum beta je spojité, s určitou maximální hodnotou energie, spektra alfa a gama jsou čárová. Jaderné spektrum je charakteristické pro každý radionuklid a je hlavním zdrojem informací o struktuře atomového jádra. Jaderná spektrometrie se hojně využívá ke kvalitativní chemické analýze (podle energie emitovaných částic a podle poločasu rozpadu) i ke kvantitativní analýze (podle intenzity záření příslušného radionuklidu).



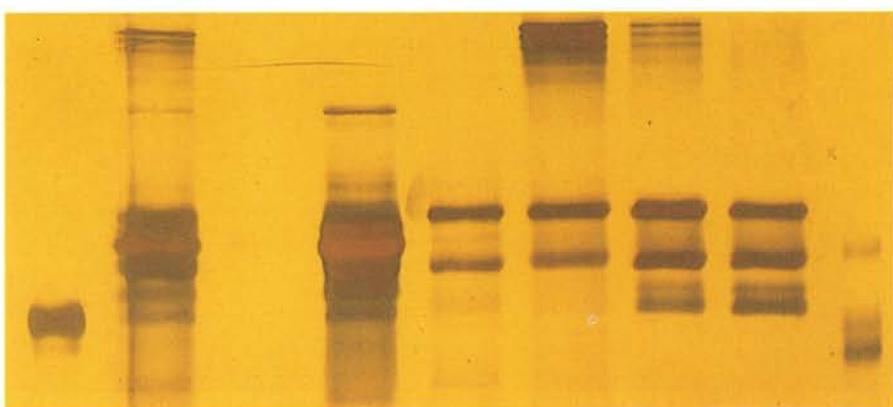
Spektrum beta a gama. Radioaktivní cesium  $^{134}\text{Cs}$  se rozpadá beta rozpadem a vyzařuje kvanta gama o různých energiích, které odpovídají rozdílu energetických stavů jiného jádra při přeměně prochází. Rozdělení četnosti impulsů v detektoru částic podle energie představuje spektrum.

**Autoradiografie** využívá účinků ionizujícího záření na fotografické materiály. Přiložením zaktivovaného zkoumaného předmětu na citlivou vrstvu fotografického materiálu se získá obraz – autoradiogram. Po vhodné době expozice, která se řídí aktivitou látky a citlivostí fotografického materiálu se po vyvolání negativu objeví zčernání v místech odpovídajících rozložení radionuklidů v analyzovaném vzorku. Autoradiogram nás informuje jak o rozmiístění radioaktivních atomů ve vzorku, tak o jejich množství. Hustotu zčernání na autoradiogramu, která je úměrná množství radioaktivity, lze měřit fotometrem.

**Aktivační analýzou** se stanovuje prvkové složení neznámého vzorku. Vzorek se ozáří, nejčastěji neutrony v jaderném reaktoru. Atomy prvků přítomných ve vzorku se aktivují a vzniklé radionuklidy se pak stanovují gama-spektrometrií. Je to jedna z nejcitlivějších analytických metod. Umožňuje detektovat  $10^{-12}\text{ g}$  prvků ( $0,00000000001\text{ g}$ ) v  $1\text{ g}$  vzorku. Tato metoda se nazývá neutronová aktivační analýza. Kromě aktivace pomocí neutronů se používá i aktivace pomocí protonů nebo vysoce energetických fotonů, získaných pomocí urychlovače.



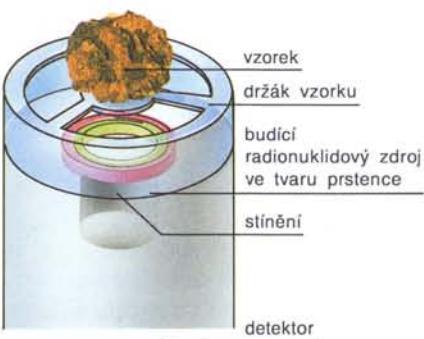
Příklad použití aktivační analýzy



Využití autoradiografie k detekci rozdělených radioaktivních látek na chromatografických destičkách

**Rentgenfluorescenční analýza (RFA)** je založena na měření fluorescenčního záření ve zkoumaném vzorku. Fluorescenční záření se budí ve vzorku buď zářením rentgenové lampy (klasická RFA), nebo zářením vhodného radionuklidu (radionuklidová RFA). Podle vlnové délky (energie) vzniklého fluorescenčního záření lze určit, které prvky jsou přítomny ve zkoumaném vzorku (kvalita-

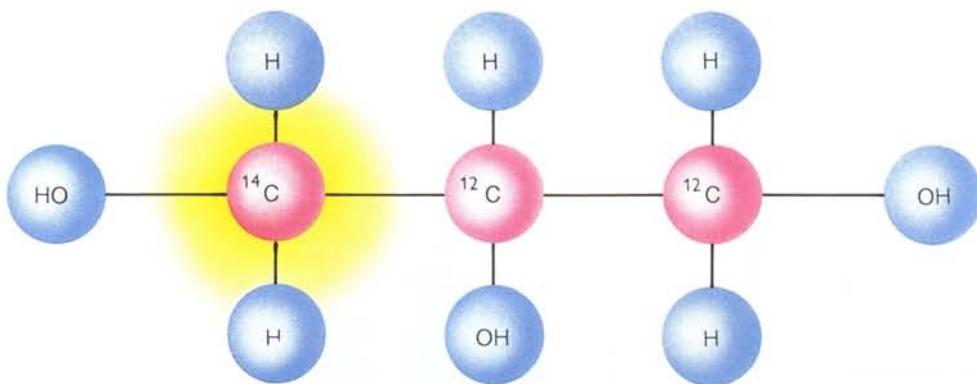
tivní analýza), podle intenzity fluorescenčního záření lze určit množství prvků ve vzorku (kvantitativní analýza). K detekci se používají polovodičové nebo scintilační detektory. RFA se používá, podobně jako neutronová aktivační analýza, k elementární analýze vzorků. Je sice méně citlivá, má však tu přednost, že zkoumaný materiál se nepoškozuje a nedochází v něm ke generování umělé radioaktivnosti.



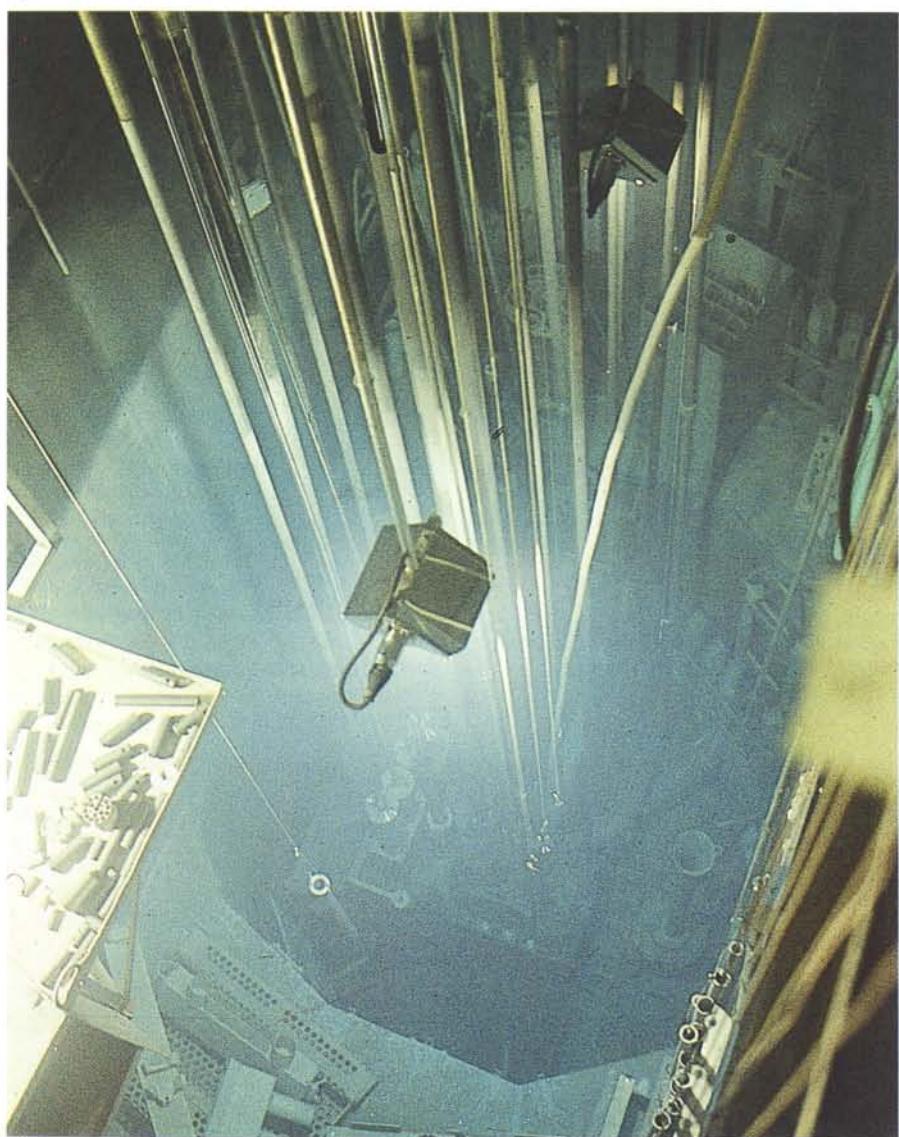
Měření rentgenfluorescenční analýzou

**Značené sloučeniny** jsou takové chemické sloučeniny, v jejichž molekulách je některý původní přírodní nuklid nahrazen radionuklidem. Např. stabilní  $^1\text{H}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^{32}\text{S}$  jsou nahrazeny radionuklidy  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{35}\text{S}$ . Sloučeniny tímto způsobem označené se chovají chemicky úplně stejně jako sloučeniny původní, ale díky odlišným fyzikálním vlastnostem je možno je snadno určit všude tam, kam byly vneseny. To má význam při jejich použití jako indikátorů, "stopovačů", např. při výzkumu průběhu chemických reakcí nebo technologických procesů. Velký význam mají značené sloučeniny v biologii při studiu metabolismu, biogeneze různých látek rostlinného i živočišného původu, kinetiky a mechanismu biochemických reakcí, funkcí živočišných orgánů, atd. Zabudování atomu radionuklidu do molekuly organické sloučeniny může probíhat různými způsoby: např. chemickou syntézou, fotosyntézou, biosyntézou. Jednou z metod přípravy organických značených sloučenin je kultivace nižších biologických organismů, např. řas v prostředí radioaktivního oxidu uhličitého. Značené organické sloučeniny se používají hlavně v lékařském a biochemickém výzkumu (molekulární genetika, genové inženýrství, nukleární medicína).

Některé jaderné analytické metody potřebují silné zdroje záření. Pro neutronovou aktivační analýzu se využívá neutronové záření z jaderného reaktoru, pro analýzu pomocí nabitéch částic se používají urychlovače. Budují se i speciální ozařovny se silnými radionuklidovými zdroji gamma záření, nejčastěji  $^{60}\text{Co}$  nebo  $^{137}\text{Cs}$ . Ozařovny se používají i k výzkumným účelům, ale nejčastěji ke sterilizaci materiálu, k vyvolání chemických reakcí a pro různé průmyslové účely. Silný zářec bývá umístěn ve vodním stínění v nádrži, z níž se vysouvá do pracovní polohy. Ve vodě dochází v přítomnosti silného zářce k zajímavému efektu – Čerenkovovo záření. Je to modré světlo, které vzniká při průletu nabitéch částic prostředím rychlostí větší, než je rychlosť světla v tomto prostředí. Čerenkovovo záření je jednou z mála možností kdy můžeme "vidět" vnější projevy radioaktivnosti.



Glycerol značený uhlíkem  $^{14}\text{C}$



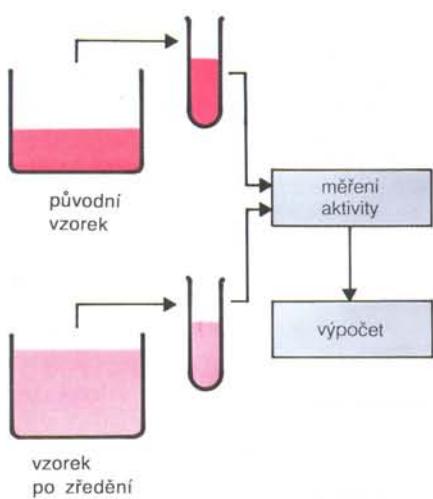
Pohled do bazénu ozařovny ve Veverské Bítýšce se zářicem  $^{60}\text{Co}$ . Modré světélkování je Čerenkovovo záření

**Stopovací analýza** (radioindikátorová metoda) využívá vhodně zvolených značených sloučenin ke studiu pohybu, chování a přeměn chemických látek ve fyzikálních, chemických a biologických procesech. Tyto sloučeniny se nazývají radioindikátory. Stopovací metody jsou velmi citlivé a umožňují jednoduchá a rychlá řešení. Radioindikátor se dávkuje za provozu do technologických procesů a jeho aktivita se měří detektory v různých místech, podle toho, jaký proces sledujeme.

**Zředovací analýza** nebo tzv. metoda izotopového zředování spočívá v tom, že se měrná aktivita radioindikátoru (stanovené látky značené radionuklidem) zřídí stanovenou látkou, chemicky totožnou, ale neradioaktivní. Po přidání měrná aktivita klesne, ale celková aktivita zůstane nezměněna. Ze vzájemného poměru původní aktivity a aktivity po zředění lze vypočítat množství stanovené látky. Tato metoda se používá pro analýzy směsí chemicky si podobných látek.

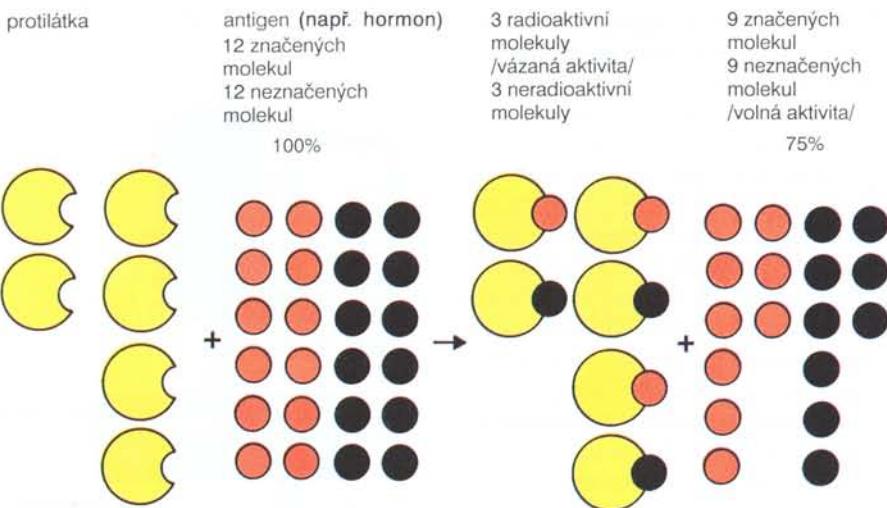


Měření objemových průtoků chladící vody v elektrárně pomocí radioindikátoru



Princip zředovací analýzy

**Radioimunoanalýza a radioenzymová analýza** jsou metody založené rovněž na využití značených sloučenin. Slouží ke sledování biologicky významných látek (např. hormonů) ve vzorcích tělních tekutin, např. v krvi nebo moči. Používají se hlavně v humánní a veterinární medicíně. Obě metody jsou rychlé, specifické a velmi citlivé. Spolehlivě zjistí přítomnost látky již o koncentraci pg/l (0,0000000001 g v 1 litru). Radioimunoanalýza (RIA) je založena na imunitní reakci. Cizí látky, antigeny, vyvolávají v živém organismu tvorbu charakteristických protílátok, které s nimi specificky reagují. Této vlastnosti se využívá ke sta-



Schematické znázornění principu radioimunoanalýzy

novení množství sledované látky v tělní tekutině. Imunizací laboratorního zvířete, např. stanoveným hormonem, vzniknou v jeho krevní plazmě příslušné protílátky, které se izolují a použijí se pak společně s hormonem značeným vhodným radionuklidem (většinou se používá  $^{125}\text{I}$ ). Obě tyto látky se přidají ve známém množství ke vzorku obsahujícímu neznámé množství stanoveného hormonu. Přidaná protílátka reaguje ve stejném poměru se značeným i neznačeným hormonem antigenem. Po oddělení komplexu antigen – protílátka od volného antigenu a po určení poměru jejich aktivit je možné určit množství neznačeného (pů-

vodního) hormonu ve vzorku. Zjištění přítomnosti nebo změny koncentrace hormonů a jiných biologicky významných látek v tělních tekutinách pomáhá včas diagnostikovat chorobu, kontrolovat léčbu nebo slouží k prevenci. Při radioenzymové analýze (REA) specifický enzym přenáší radioaktivní indikátor (značenou organickou sloučeninu) do analyzovaného biologického souboru. Po separaci změřená aktivita určuje koncentraci stanovené látky ve vzorku. Při radioimunoanalýze ani při radioenzymové analýze pacientovo tělo nepřijde do styku s radionuklidů. Analýza se odehrává ve zkumavkách (in vitro).

# Aplikace v průmyslu

Býlo vypracováno již mnoho metod využití radionuklidů a ionizujícího záření v průmyslové praxi. Zdroj záření může být buď trvale instalován v průmyslovém podniku, nebo odborné práce provádějí specializované týmy odborníků pouze podle potřeby. V řadě případů se v průmyslovém procesu pouze odebírají vzorky, které se nukleárními metodami studují a analyzují na speciálních pracovištích. Při různých aplikacích se budou indikovat změny v pohlcování záření (to jsou např. hlásiče požáru, tloušťkomery, hladinoměry, defektoskopy), nebo vytvořené elektricky nabité částice vyvolávají elektrickou vodivost vzduchu, čímž se dá např. odvést nežádoucí elektrický náboj nahromaděný třením na polymerních tkaninách nebo fóliích, díky tomu se zamezí výbuch statické elektřiny v prostorách, kde hrozí výbuch apod. V jiných případech se do potrubí nebo do kabelů vhání plyn s radioaktivním indikátorem, jehož únik je bezpečným ukazatelem, že v daném místě je netěsnost, porucha, trhlina. Finanční částky ušetřené při hledání podobných defektů pomocí radioindikátorů jsou velmi značné.

Značné provozní úspory se také dosáhnou použitím radioanalytických metod při stanovování čistoty procesů a surovin, zejména v provozech vysoko náročných na čistotu, např. při výrobě polovodičových nebo optoelektronických prvků a součástek. Pomocí nich lze sledovat kvalitu prováděných operací a včas zasahovat do technologií výroby. Autoradiografii lze sledovat např. homogenitu nanášených tenkých vrstev apod.

Konečně lze používat ionizující záření k přímému vyvolání žádoucích změn v ozařovaném materiu. Tyto procesy nazýváme radiační technologie. Uplatňují se při nich jak velké zdroje záření gama (s radionuklidem  $^{60}\text{Co}$  nebo  $^{137}\text{Cs}$ ), tak i velké urychlovače elektronů. Radiačně-technologické procesy se průmyslově uplatňují zejména při výrobě a modifikacích polymerů. Například tzv. síťování polymerů znamená, že se vytvářejí příčné vazby mezi vrstvami polymerních molekul, čímž se významně změní vlastnosti ozářeného materiálu (vyšší tepelná odolnost, tvrdost atd.). Při tzv. roubování se na povrch polymerní látky vážou pomocí záření jiné molekuly. Lze tak ovlivnit např. nasákovost tkanin, jejich barvitelnost, snižování elektrostatického náboje apod. Stejným způsobem se připravují i speciální přípravky pro pomalé uvolňování léčiv do tkáně. Paměťový efekt pozorovaný u ozářených výrobků z polyetylenu se využívá v přípravě tzv. termosmrštitelných materiálů.

**Průmyslová defektoskopie** slouží k vyhledávání povrchových i vnitřních vad hutních výrobků a často se používá při kontrole jakosti svarů. Výrobek nebo svar se prozáří radionuklidovým zářičem, např.  $^{192}\text{Ir}$ , a na jeho opačné nebo vnější straně se umístí kazeta s fotografickým filmem. Vzhledem ke schopnosti materiálů absorbovat ionizující záření v závislosti na hustotě materiálu může odborník na vyvolaném filmu určit případné defekty. Tuto metodu lze provádět přímo v terénu, např. při kontrole svarů ropovodů nebo plynovodů.



Defektoskopie kovové součástky

Pomocí záření beta se kontroluje tloušťka vyráběného materiálu v kontinuálních provozech. **Radiační tloušťkomery** lze použít např. ve válcovnách při kontrole stejnoměrnosti tloušťky válcovaného materiálu, nebo v plastikářském průmyslu při kontrole tloušťky lité hmoty. Detektor umístěný pod běžícím pásem a zářič nad ním mohou v hutích kontrolovat stejnoměrný příspun sypkého materiálu do vsázky.

Princip absorpcie záření se dále využívá při kontrole a určování výšky hladiny kapaliny v nádržích a tancích, kde se jiné metody nemohou použít. **Radionuklidový hladinoměr** určuje výšku sloupce kapaliny podle toho, jak je zeslaben signál v detektoru, tedy zda záření prochází kapalinou, nebo vzduchem.

**Stopovací metody** se používají ke sledování pohybu a distribuce hmoty v různých technologických zařízeních a dopravních systémech. Sledují se tak průtoky, míchání směsí, ventilace, filtrace, úniky, opotřebení materiálu a postup koroze. V cementárnách se touto metodou sleduje účinnost míchání v rotačních pecích, ve sklárnách homogenita sklářského kmene. Do pece se přídá značená látka a po promíchání se odeberou vzorky z různých míst. Zjistí se tak "hluchá" místa, kde směs stojí a nepromíchává se apod. V chemickém průmyslu se stejnou metodou dá optimalizovat provoz destilačních kolon. Pomocí radioindikátorů se stanovují optimální průtoky otopné vody v teplárenských rozvodech, zjišťují se netěsnosti v potrubích a povlácích dálkových kabelů apod.

měření výšky hladiny

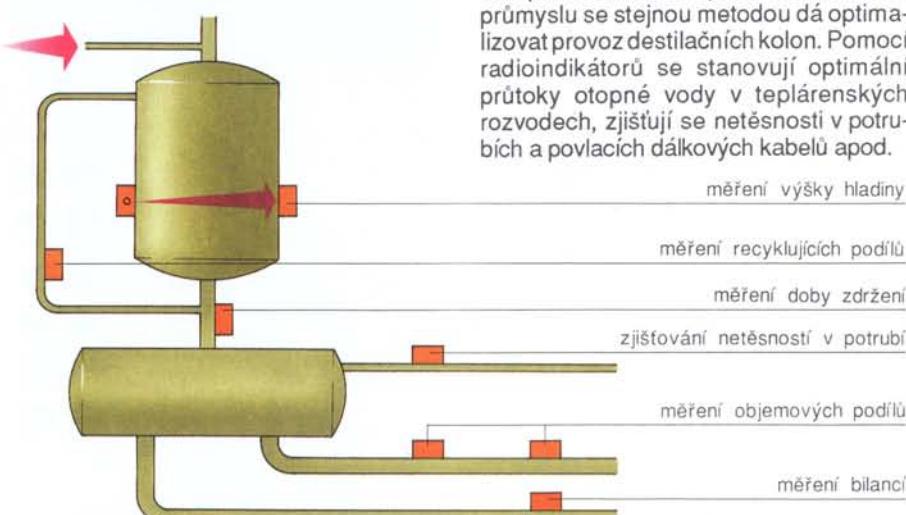
měření recyklujících podílů

měření doby zdržení

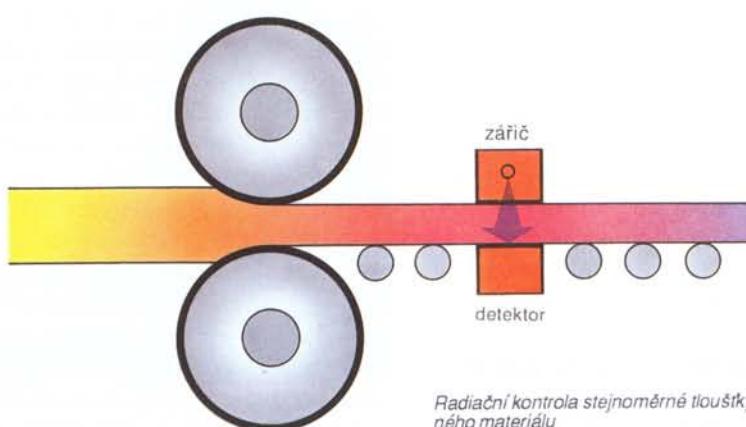
zjišťování netěsností v potrubí

měření objemových podílů

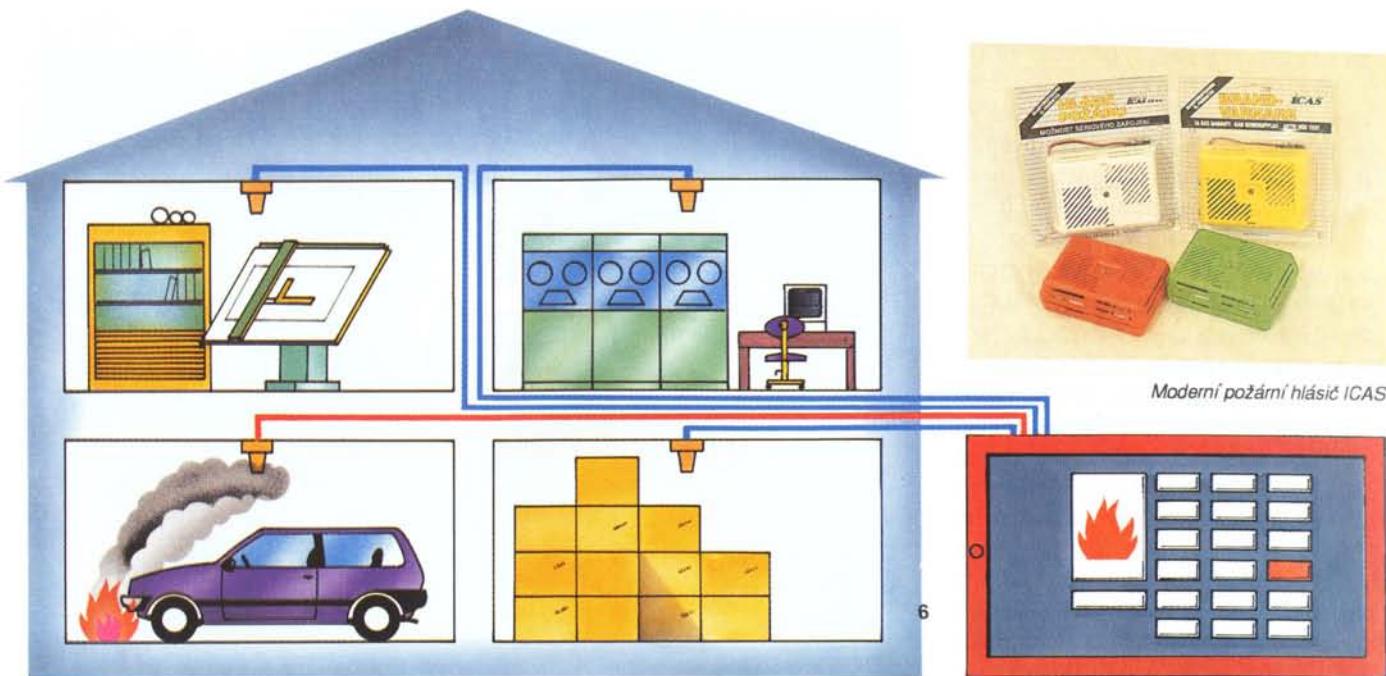
měření bilancí



Různé možnosti použití radionuklidů a záření v průmyslových procesech



Radiační kontrola stejnoměrné tloušťky válcovaného materiálu

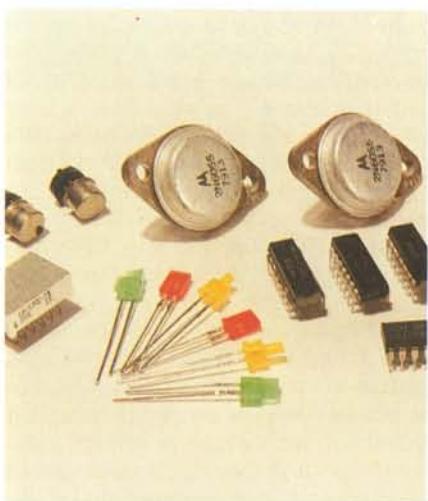


Na různé absorpci záření v různém prostředí jsou založeny **ionizační hlásiče** požáru. V čidle elektrického požární signalizace je umístěn radioaktivní zářič, jehož záření alfa vytváří mezi dvěma elektrodami ionizační proud. V přítomnosti kouře dojde ke změně absorpce prostředí, tím ke změně ionizačního proudu a takto změna se naznamená systémem požární signalizace.

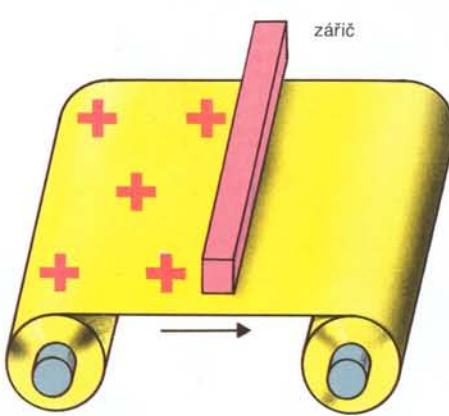
**Opotřebení součástí** se sleduje tak, že se určitá, zkoumaná část zařízení, aktivuje v jaderném reaktoru. Při provozu a opotřebení této součásti se uvolňuje část materiálu, jehož radioaktivita se změří. Příkladem může být sledování opotřebení pístních kroužků spalovacích motorů. Po jejich zaktivování se měří aktivita mazacího oleje, do kterého přecházejí částečky z povrchu opotřebovaných kroužků.

**Ke kontrole čistoty surovin, polotovarů a výsledných materiálů** v těch obozech, kde má vysoká čistota rozhodující roli, se používají radioanalytické metody jako neutronová aktivační analýza a rentgenfluorescenční analýza. Nejčastěji je to při výrobě polovodičů a skleněných vláken pro optoelektroniku, kde je předepsána čistota materiálů na 99,9999 %. Do křemíkových destiček se přidává přesné stopové množství příměsí (dopantů). Jejich rozložení se sleduje autoradiografií.

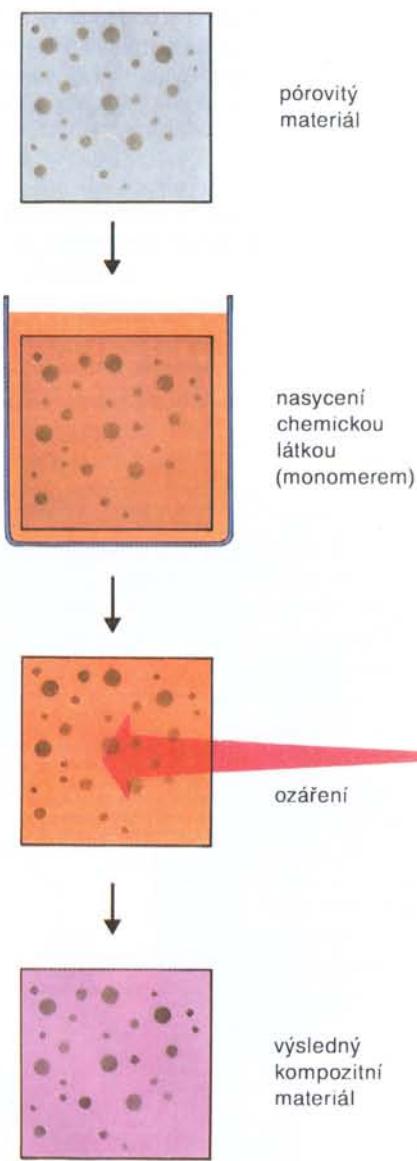
Ionizace vyvolaná radioaktivním plošným zářičem se využívá k **odstranění nahromaděného elektrostatického náboje** při výrobě izolačních materiálů. Takovéto eliminátory se používají v různých průmyslových oborech, např. v gumárenském a plastikářském, papírenském a textilním, při výrobě magnetických pásek apod.



Různé polovodičové součástky, jejichž materiál se při výrobě kontroluje radioanalytickými metodami



Odstraňování elektrostatického náboje z povrchu látek



Výroba kompozitních materiálů

Radiační techniky jsou průmyslové nebo laboratorní postupy, při nichž se ionizující záření využívá k dosažení požadovaných změn fyzikálních, chemických nebo biologických vlastností ozářovaného materiálu. Při této metodě se zpravidla používají velké zdroje záření gama, nejčastěji s radionuklidem  $^{60}\text{Co}$  nebo  $^{137}\text{Cs}$  a s aktivitami až  $10^{16}\text{ Bq}$  i více a urychlovače elektronů s energiemi zhruba od 0,1 do 10 MeV.

Jestliže se vhodný půrovný přírodní nebo umělý materiál (dřevo, kámen, beton, azbest apod.) nechá nasáknout monomerem a poté ozáří vhodnou radiační dávkou, která způsobí polymeraci, lze vyrobit materiál se zcela novými vlastnostmi. Polymer prostupuje celý původní materiál, zachovává jeho strukturu, zpevňuje ho a dodává mu výhodné vlastnosti, např. barvitelnost, leštiteľnost atd. Tyto materiály, označované souhrnným názvem **kompozitní materiály**, nalézají široké využití, např. při výrobě podlahových krytin, parket, dřevěných detailů interiérů, obkládacích cihel, tašek apod. Mohou i nahrazovat drahé dovážené druhy dřeva.

Pomocí ionizujícího záření lze vyrábět různé druhy **pěnových polymerů**, které se používají v čalounění automobilů, při výrobě sportovní obuvi a další výstroje. Polymerace ionizujícím zářením má výhodu v tom, že výsledný materiál není znečištěn chemickými iniciátory, katalyzátory apod.

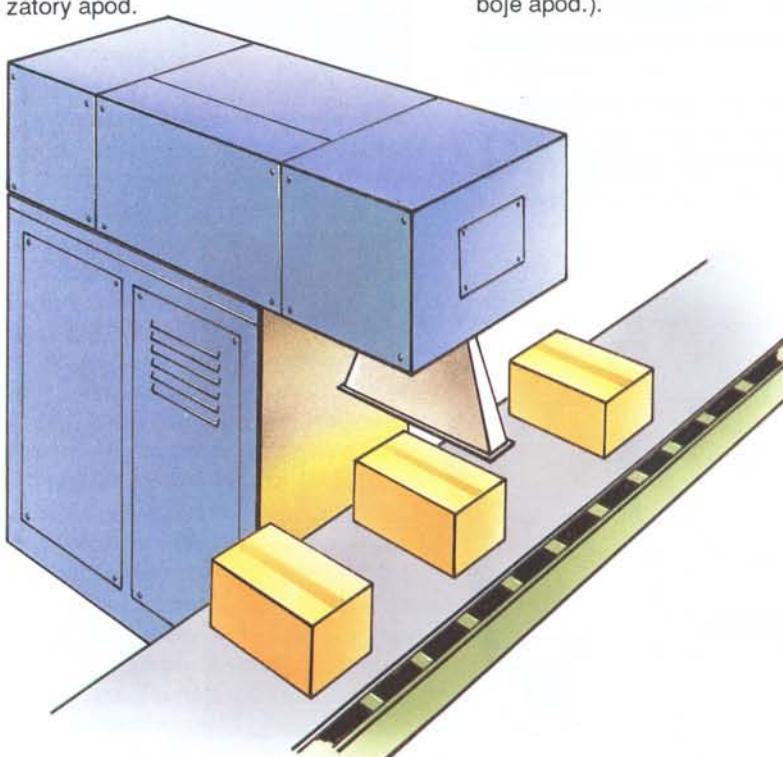


Speciální látky, např. neoprénum pro potápěče, se vyrábějí pomocí radiačních technologií

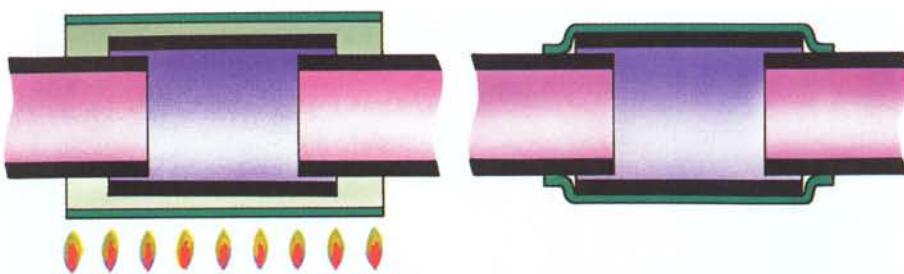
Při výrobě polymerních vláken a podobných materiálů pro **textilní průmysl** se zářením dá dosáhnout naroubování vhodných chemických látek na povrch vláken, která pak vhodným způsobem modifikují vlastnosti výrobku (lepší barvitelnost, nasákovost, nemačkavá úprava, odstraňování statického elektrického náboje apod.).

Velké výhody přináší **radiační polymerace tenkých vrstev laků, barev, lepidel, tiskařských barev** apod. Lze tak vyrábět různé typy laminátů, které se jinak vyrábějí obtížně (polymerní fólie na kovové fólii aj.), obalové materiály, tapety, atd. Vytrzování nátěrových laků na dveřích nebo oknech bez použití zdraví škodlivých rozpouštědel výrazně šetří životní prostředí. K témuž účelu je vhodné využívat elektronové urychlovače s relativně nízkými energiami elektronů. Další výhodou radiační polymerace je to, že ji lze provádět na fóliích nebo předmětech na běžícím pásu, což výrazně zrychluje průmyslovou výrobu.

Některé druhy polyetylenu si po ozáření "pamatují" tvar, který měly při ozáření. Tímto způsobem se dají vyrobit vhodné izolační manžety a spojky pro nejrůznější aplikace, které se po ohřátí smrští do původní velikosti (kterou měly při ozáření) a zajistí tak velice kvalitní spoj, **elektrickou izolaci**, přilnavý obal výrobku apod. Ionizující záření může vyvolávat i **vulkanizaci kaučuku**, ovšem potřebné dávky jsou příliš vysoké. V průmyslové praxi se proto více uplatňuje modifikovaná metoda, kdy se menší dávkou ozařuje polotovar, např. pneumatiky, který při další výrobě lépe udržuje tvar a usnadňuje tak další výrobní proces. Jednou z nejrozšířenějších radiačních technologií je použití elektronových urychlovačů v kabelářství: proudem elektronů se polymerují izolační vrstvy (polyetylén, silikonového kaučuku apod.) na taženém drátu.



Průmyslový urychlovač elektronů při ozářování výrobků přímo na běžícím pásu



Výroba dokonalého těsnění pomocí zahřátého ozářeného termosmrštitelného materiálu



Dodáním různých příměsí do skla a ozářením různými dávkami se docílí mnoha barevných odstínů



Nová scéna ND

Různé druhy speciálních skel se zářením zbarvují do nejrůznějších odstínů žluté, hnědé až kouřově šedé barvy, pouze skla s obsahem mangani získávají ozářením sytě ametystové zabarvení. Barevný tón i životnost zabarvení závisí na složení skla. Ve vhodných případech dosahuje životnost zabarvení desítek let, pokud není zářením vybarvený předmět vystaven vysoké teplotě. Ozářením části skleněného předmětu lze dosáhnout různých, jinak těžko realizovatelných barevných dekorů. Metoda se dá s výhodou využít v různých architektonických skleněných prvcích. Poprvé byla ve větším měřítku aplikována na budově Nové scény Národního divadla v Praze a na stanici Jinonice na trase B pražského metra.

Při výrobě polovodičových součástek se ozařování elektrony uplatňuje při přípravě křemíkových destiček, v nichž radiačně vytvořené defekty zkracují životnost nerovnovážných nosičů náboje a mohou tak nahradit dopováni zlatem nebo platinou. U hotových součástek je možné zářením upravovat komutační dobu diod, spínací dobu tyristorů, používaných např. v tramvajích apod. Získávají se tak součástky s výhodnějšími elektrickými parametry. Ozařovat se mohou i zapouzdřené součástky.

**Radiačně vytvořené radikály** a ionty jsou chemicky velmi reaktivní, záření proto může sloužit k nastartování širokého spektra chemických reakcí. Zejména jsou výhodné reakce řetězové, kdy malá dávka záření stačí vyvolat výrazný efekt. Typickým příkladem takových řetězových reakcí jsou již zmíněné polymerace, ale týká se to také některých druhů chloračních a bromačních reakcí, oxidací apod. Syntéza některých organických látek iniciovaná zářením přináší řadu výhod oproti tradičním postupům. Je základem celého vědního oboru radiační chemie.

Radioaktivní **samosvítící pigmenty** s  $^{147}\text{Pm}$  nebo tritem ve formě laku se nanášejí na číslice a ručky hodinek jako trvale svítící hmota. Využívají se nejen v hodinářství, ale i k označení stupnic měřicích přístrojů, k výrobě orientačních značek používaných v dolech apod.



Hodinky se samosvítícím ciferníkem

# Aplikace ve zdravotnictví a biologii

Radionuklidы i ionizující záření se začaly využívat ve zdravotnictví prakticky již od počátku objevení jejich účinků na lidský organismus. Nejprve k léčebným a později i diagnostickým účelům. Využívání radionuklidů a účinků ionizujícího záření vyústilo ve vznik nových lékařských oborů – nukleární medicíny a radiologie, další aplikace se týkají např. balneologie, základního výzkumu v oblasti medicíny a biologie, sterilizace zdravotnického materiálu, léčiv apod.

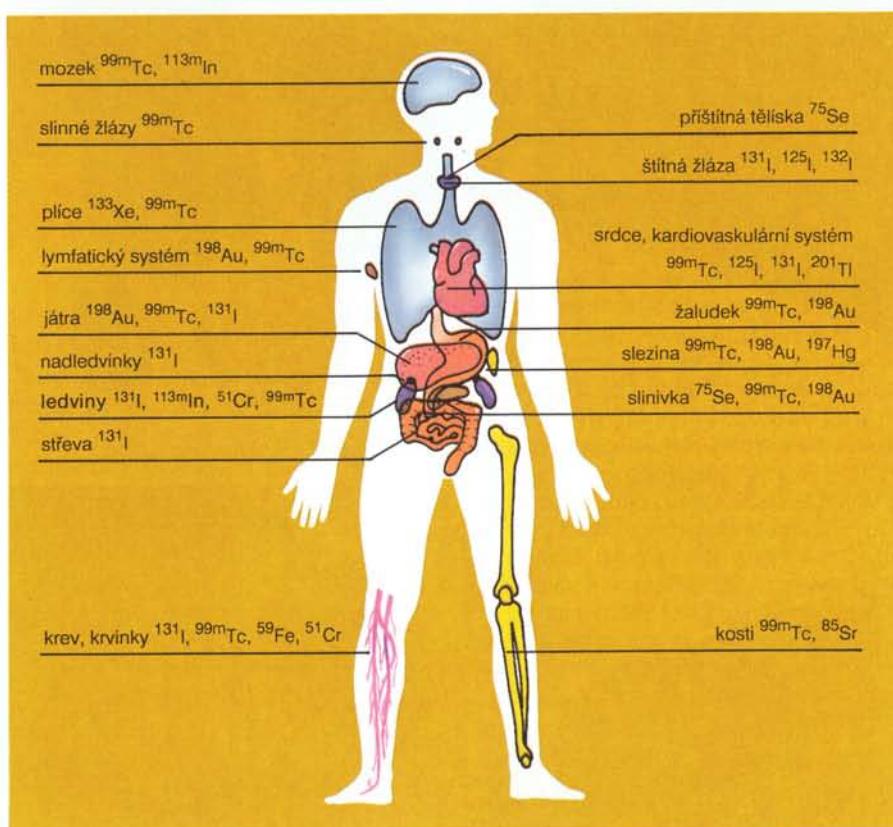
Nukleární medicína nachází uplatnění především v diagnostice chorob, ve studiu jejich vzniku a průběhu a částečně i v jejich prevenci a terapii. Metodiky používané v nukleární medicíně využívají umělých radionuklidů bud' v přímé aplikaci, nebo ke značení farmak používaných k léčebným nebo ke stopovacím metodám v diagnostice (tzv. radiofarmaka). Radiofarmaka se chemicky ani biologicky neliší od příslušného neaktivního farmaka. V praxi se používají takové sloučeniny, které se selektivně zachytávají a koncentrují ve vyšetřovaném orgánu nebo tkáni, a které zase místo zachycení opouštějí podle funkce orgánu nebo metabolických pochodů. V posledních letech se v nukleární medicíně rozšířily diagnostické techniky založené hlavně na principu radioimunoanalyzy (RIA) nebo radioenzymové analýzy (REA). Nukleární medicína umožňuje tzv. vyšetření "in vivo", tj. přímo v organismu pomocí radiofarmak, nebo "in vitro", tj. ve vzorcích tělních tekutin. Kinetická stopovací vyšetření umožňují pomocí vhodných radiofarmak sledovat základní životní pochody, např. proudění krve, činnost ledvin, plic, metabolismus apod. Biochemická vyšetření stanovují hladiny biologicky významných látek, např. hormonů nebo stopových prvků a provádí se metodami RIA, REA nebo NAA. Další vyšetřovací metodou je scintigrafie, při níž se pomocí nahromaděného radiofarmaka v určitém orgánu (játra, mozek, ledviny, štítná žláza apod.) sleduje jeho tvar a tím i např. jeho chorobné změny.



Při radioimunoanalytickém vyšetření se pacient do styku s radionuklidem nedostane. Vyšetřují se tělní tekutiny "in vitro" ve zkumavce.



Radiofarmaka s krátkým poločasem rozpadu pomohou studovat detailně tvar a strukturu vyšetřovaného orgánu "in vivo". Na obrázku je srdeční sval



Jednotlivé orgány lidského těla a radionuklidы používané k jejich vyšetřování

Radiofarmaka se využívají i k terapeutickým účelům při léčení zhoubných nádorů. Výhodou tohoto způsobu je, že se září dostane přímo do ložiska, které chceme ozařovat a účinek ozařování je přesně ohrazen do krátké vzdálenosti určené energií záření použitého radionuklidu (např. do hloubky 2,2 mm pro  $^{131}\text{I}$  nebo 8 mm pro  $^{32}\text{P}$ ).

Dalším oborem, který využívá a studuje účinky ionizujícího záření na živý organismus je radiologie. Její významnou součástí je radioterapie využívající ionizujícího záření k léčení zhoubných nádorů. Ozařují se pomocí zdrojů záření umístěných mimo lidský organismus (záříč s  $^{60}\text{Co}$ , urychlovač elektronů, rentgen) nebo pomocí jehel nebo tub dočasně umístěných v ložisku (tzv. brachyterapeutické záříče s  $^{226}\text{Ra}$  nebo  $^{137}\text{Cs}$ ). Samostatným oborem radiologie je rentgenologie zabývající se studiem účinků rentgenového záření a jeho využití pro léčebné a diagnostické účely. Rentgenová diagnostika se využívá k prosvěcování nebo snímkování vyšetřovaných orgánů, rentgenová terapie slouží k ozařování zhoubných nádorů.

Dokonalejší metodou rentgenové diagnostiky je tzv. **tomografie**. Využívá několika rentgenových zdrojů najednou a následného počítačového zpracování získaného obrazu.

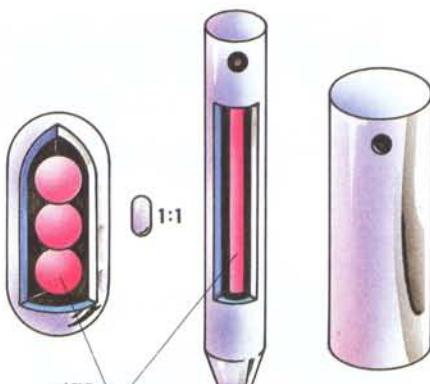


**Tomograf** je zařízení využívající několika svazků záření. Počítačovým zpracováním lze získat zobrazení průseku tělem pacienta nebo zkoumaným orgánem. Lékař sleduje počítačovou rekonstrukci obrazu i pacienta při vyšetření

**Nukleární medicína** využívá umělé radionuklidy (vyrobené v jaderných reaktorech nebo urychlovačích) k diagnostickým nebo léčebným účelům. Radionuklidy se aplikují buď přímo, nebo se používají ke značení látek určených k aplikaci (tzv. radiofarmaka). Detekované záření umožní bezbolestně a rychle posoudit funkce nebo poskytne informace o uložení nebo tvaru vyšetřovaných orgánů pacienta (tzv. vyšetření "in vivo"). Vhodná volba farmaka a radionuklidu umožní vyšetření prakticky všech důležitých orgánů a životních pochodů.

**Balneologie** používá radioaktivní materiály již značně dlouho - vzpomeňme slavné lázně Jáchymov. Jsou to koupele, kde přírodní voda obsahuje radioaktivní plyn radon. Léčí se tak zajména nemoci pohybového ústrojí a revmatická onemocnění. V některých případech se léčba kombinuje s ozařováním postižených míst.

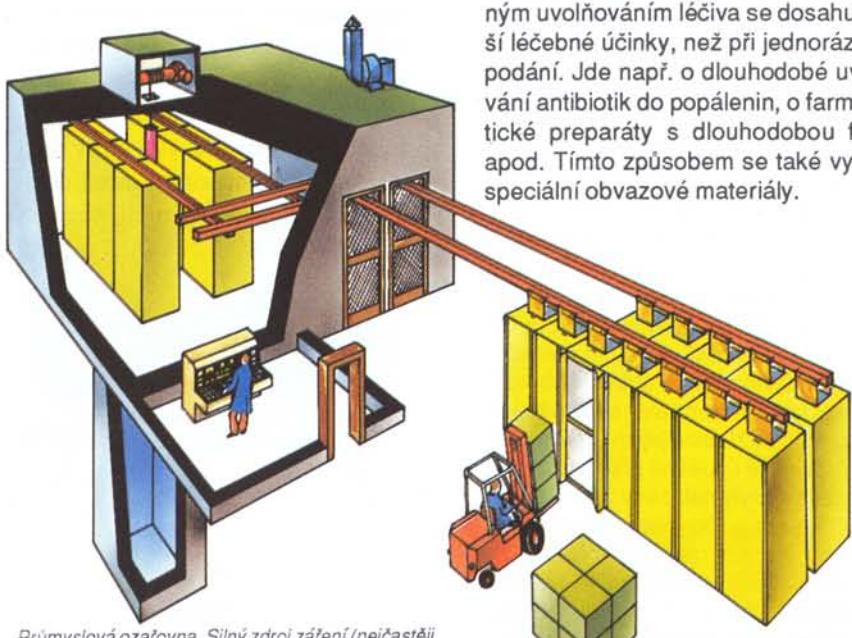
**Radioterapie** je léčebná metoda využívající účinky záření k léčení zhoubných nádorů. Nádory jsou tvořeny mladými buňkami, které se velmi rychle dělí a jsou mnohokrát citlivější vůči záření než zdravá tkáň. K ničení nádorové tkáně se nejčastěji používá rentgenové záření nebo záření gama radionuklidů  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  a  $^{226}\text{Ra}$ . Někdy se k témuž účelu používá svazek urychlených elektronů z betatronu nebo svazek urychlených nabitéch částic z lineárního urychlovače. Na obrázku jsou různé tvary jehel a tub naplněných radioaktivním zářičem. Říká se jim brachyterapeutické zářice a aplikují se přímo do těla pacienta, do nádorového ložiska, nebo tělní dutiny. Potřebná léčebná dávka záření se dosáhne jednak aktivitou aplikovaných zářic, jednak dobou, po kterou jsou v těle pacienta umístěny.



Brachyterapeutické zářice



Radonová lázeň



Průmyslová ozařovna. Silný zdroj záření (nejčastěji  $^{60}\text{Co}$ ) je umístěn v podzemí ve vodním bazénu a jeho vysouvání do pracovní polohy je řízeno z většího ozařovny

V biochemickém, biologickém, genetickém, fyziologickém a lékařském výzkumu se využívají **značené organické sloučeniny**.

Po chemické stránce se chovají stejně, jako příslušné sloučeniny s přírodními nuklidy, ale díky tomu, že emitují záření, mohou být snadno "vystopovány" všude tam, kam byly vneseny.

**Sterilizace zdravotnického materiálu** radiační technikou znamená ničení choroboplodných zárodků ionizujícím zářením. Dezinfikuje se tak např. obvazový materiál, oblečení, chirurgické rukavice a nástroje, injekční stříkačky, endoprotezy apod. Může se tak sterilizovat i materiál, který nelze dezinfikovat horkou vodou nebo párou. Výhodou je možnost sterilizovat již předem hermeticky uzavřené předměty. Radiační sterilizace je většinou plně automatizovaná. Na obrázku je pohled do ozařovny: krabice s materiélem jsou vystaveny silnému ionizujícímu záření. Někdy se krabice pochybují kolem zdroje záření a otácejí kolem své osy, aby se materiál prozářil rovnoměrně.

Ozařováním lze získat **sterilní stravu**, která je vyžadována pro výživu některých těžce nemocných nebo zraněných osob. Zabraňuje se tak dodatečné infekci, zejména u osob se sníženou imunitou. Takto ošetřené potraviny mají také podstatně delší životnost i bez použití chladícího zařízení.

V medicíně se využívá i **radiačního roubování**: na některé polymerní nosiče se naroubují různé preparáty, které se pak velmi pomalu uvolňují. Takovéto léčivo se např. aplikuje pod kůži, nebo do postiženého místa a pomalým postupným uvolňováním léčiva se dosahují lepší léčebné účinky, než při jednorázovém podání. Jde např. o dlouhodobé uvolňování antibiotik do popálenin, o farmaceutické preparáty s dlouhodobou funkcí apod. Tímto způsobem se také vyrábějí speciální obvazové materiály.

# Aplikace v zemědělství a potravinářství

Radionuklidy a ionizující záření hrají významnou roli v moderním zemědělství a to jak ve výzkumu, tak i v praxi. Nejčastěji se využívají ve šlechtitelství, při likvidaci škodlivého hmyzu, v agrotechnice, živočišné výrobě, potravinářském a krmičářském průmyslu.

Ozařování semen plodin za účelem mutace se ve šlechtitelství využívá víc než 50 let.

Účinné využití hnojiv hraje v zemědělství významnou roli nejen vzhledem k jejich ceně nebo závislosti na dovozu, nýbrž i vzhledem k tomu, že přehnojení poškozuje životní prostředí. Cílem je, aby se co nejvíce hnojiva dostalo do plodin při minimálních ztrátách (např. špatným rozmístěním nebo hnojením v nevhodnou dobu). Optimální hnojení lze dosáhnout pomocí modelování s použitím hnojiv značených vhodnými nuklidy. Vhodné radioindikátory se využívají při stanovení optimálních požadavků na výživu zvířat a při přípravě krmných směsí.

Moderní RIA technikou můžeme včas zjistit výskyt různých chorob (např. Aujeszského choroba, Rhinotracheitida aj.) nebo stanovením hladiny hormonů určit vhodnou dobu zabrézutí, a tím zvýšit reprodukci a kvalitu chovu.

Přestože některé druhy hmyzu jsou důležité pro zachování ekologické rovnováhy, každoročně způsobují značné škody na úrodě užitkových plodin (10-30 %). Insekticidy, které se proti hmyzu používají, jsou již v některých případech neúčinné (hmyz se stal vůči nim imunní), v každém případě však jejich použití poškozuje životní prostředí i člověka samotného. K omezení počtu hmyzí populace se v některých případech úspěšně použila radiační technika. Metoda spočívá v tom, že se samečci vypěstovaní v laboratoři ozáří v určitém stádiu jejich vývoje. Zářením sterilizovaní jedinci se potom vypustí do přírody. Samičky, které se s nimi páří, nejsou oplodněny, a tím se postupně jejich reprodukce omezí.

V důsledku hnilobných a jiných procesů jsou každoročně vysoké ztráty skladovaných potravin. Prodloužit skladovatelnost některých potravin (např. ryby, ovoce) i o několik dní může být postačující k jejich uchování do doby jejich konzumace. Ozářením potravin se ve většině případů prodlouží doba jejich skladování. Tento proces se úspěšně provádí již více než 30 let a nebyly nalezeny žádné škodlivé účinky ani u člověka, ani u zvířat. Potraviny se po ozáření v žádném případě nestanou radioaktivními. Záření se nepoužívá pouze k ničení mikrobů, plísní nebo choroboplodných zárodků, ale rovněž k potlačení nežádoucí klíčivosti, např. u brambor nebo cibule.



Ke sledování koncentrace kancero-genních (rakovinotvorných) produktů plísní v potravinách (mykotoxinů) se používá radioimunoanalyza.

**Agrotechnika: K ověření účinnosti hnojení půdy** se používají umělá hnojiva, značená radionuklidem  $^{32}\text{P}$  nebo stabilním nuklidem  $^{15}\text{N}$ . Lze tak sledovat, kolik dusíku z hnojiva je schopna rostlina přijmout, kolik hnojiva se váže efektivně v půdě a kolik nevyužito přechází do okolního prostředí. Tyto znalosti zabrání zbytečnému přehnojování půdy, které poškozuje životní prostředí.

**Šlechtitelství:** Ozářením semen, které způsobuje mutaci, je možné měnit důležité vlastnosti kulturních plodin nebo vytvářet zcela nové odrůdy. Mezi nejvýznamnější ovlivňované vlastnosti patří především: agronomické vlastnosti, odolnost proti chorobám a proti nepřízní počasí, výnosy, doba zralosti a výživná hodnota.

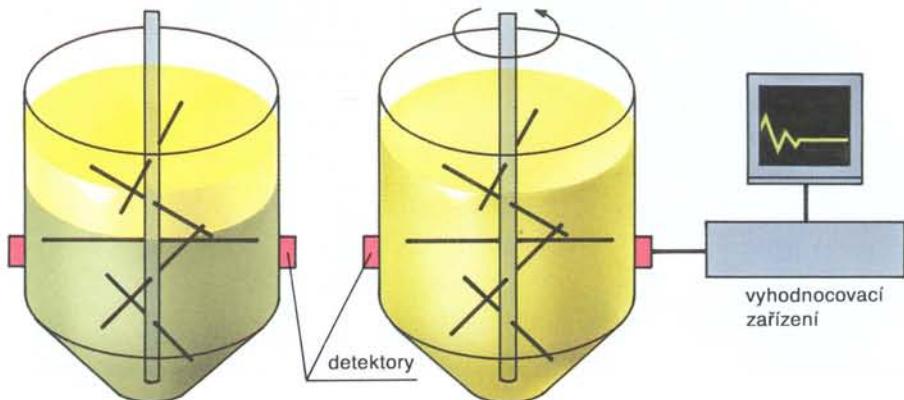


Šlechtitelství je náročné na čas a trpělivost. Radiační mutace pomáhají získat rychlejší výsledky.

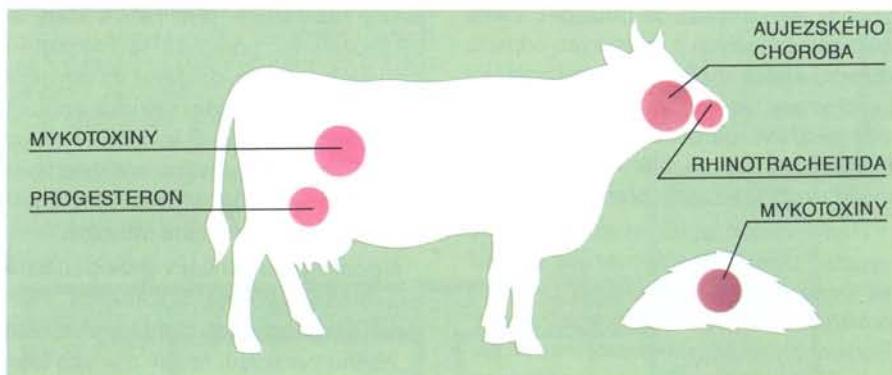


Příklady plodin šlechtěných pomocí ionizujícího záření

**Příprava krmných směsí:** Při přípravě krmných směsí je důležité, aby všechny jejich složky byly rovnoměrně rozmíchány. Nehomogenní rozložení některých složek, např. vitamínů, může způsobit u hospodářských zvířat smrt předávkováním. Jedna složka směsi se označí radioaktivním indikátorem (stopovačem) a detektorem se pak průběh rozmíchávání složek kontroluje.



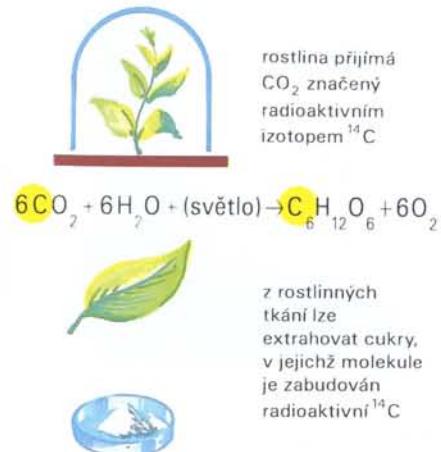
Experimentální značení jedné složky v krmné směsi pomůže také určit nevhodnější tvar míchacího zařízení i optimální režim míchání



Radioimunoanalýza slouží, podobně jako v humánní medicíně k včasnému rozpoznání chorob hospodářských zvířat

**Chov hospodářských zvířat:** Radioimunoanalýza pomáhá sledovat hladiny hormonů, ovlivňujících plodnost zvířat (např. progesteronu). To umožňuje stanovit vhodnou dobu k inseminaci a kontrolovat zaběznotu samic. Jiné soupravy slouží ke stanovení koncentrace rakovinotvorných mykotoxinů v krmivu nebo orgánech zvířat. Mykotoxiny jsou produkty plísni, vyskytujících se v krmivu.

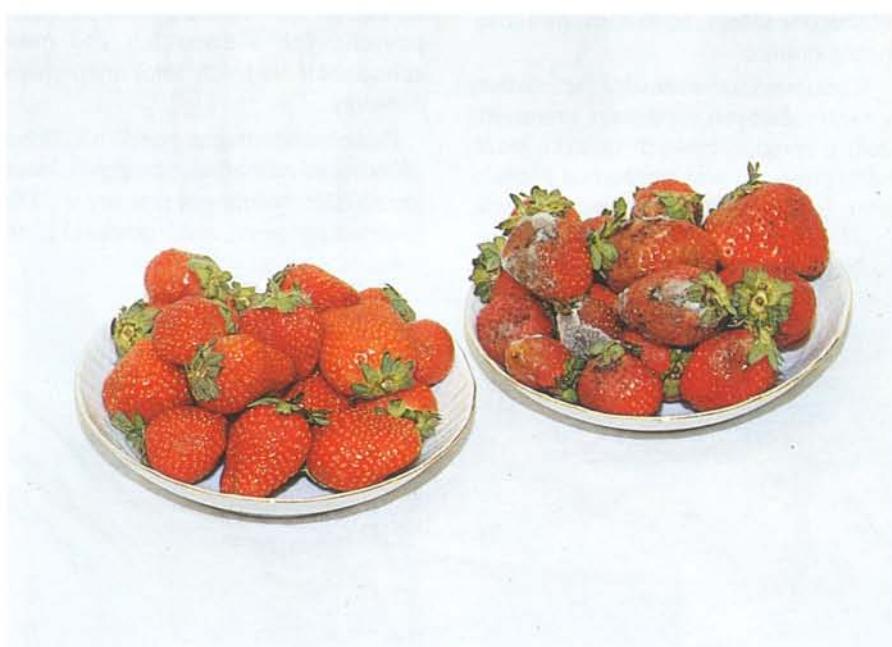
**Ozařování potravin:** Podle statistik přichází nazmar hniliobními procesy nebo předčasným klíčením 25-30 % potravin. Jestliže je ozáříme radiačním zdrojem (např.  $^{60}\text{Co}$ ), zničí se mikroorganismy a škůdci nebo se potlačí klíčivost a tím se i prodlouží doba jejich skladovatelnosti. Nejčastěji se ozařuje cibule, brambory, jahody, tropické ovoce, koření, ryby, česnek aj.



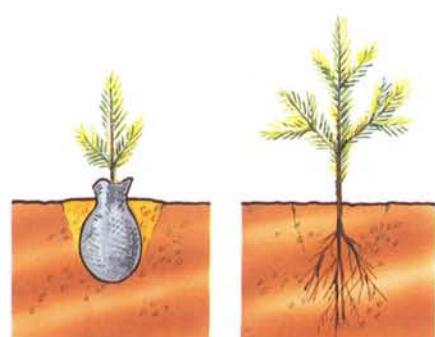
Použití radioaktivního stopovače ke zkoumání fotosyntézy rostlin

Pomocí radioaktivních indikátorů můžeme sledovat vliv stopových prvků na metabolismus rostlin. Nepatrné množství radionuklidu sledovaného stopového prvku umožní sledovat jeho distribuci v tkáňové struktuře rostlinného materiálu.

V lesnictví se výhodně uplatňují materiály z ozářeného polypropylenu. Polypropylen se vlivem záření stane snadno degradovatelným. Obaly sazenic stromu vyrobené z tohoto materiálu usnadňují strojní sázení, po relativně krátké době se však v zemi bez zbytku rozloží a nebrání prorůstání kořenů stromů. Podobné materiály se uplatňují jako tzv. geotextile, zpevňující svahy při rozsáhlých terénních pracích. Za čas, po vytvoření zpevňujícího krytu porostu se snadno rozkládají a nezhoršují životní prostředí.



Ozařené a neozářené jahody skladované po 1 týdnu v chladu



Sazenice v obalu z ozářeného materiálu

# Aplikace při ochraně životního prostředí



Znečištění životního prostředí nejrůznějšími chemicky a biologicky škodlivými produkty současné civilizace je velmi reálnou hrozbou pro zdraví této i příštích generací a v konečném důsledku je i hrozbou pro existenci života na naší planetě vůbec. Současná průmyslová civilizace vypouští do ovzduší tisíce tun oxidů síry a dusíku a s tím spojené kyselé deště ničí lesy v kontinentálním měřítku. Města chrlí do vod tisíce tun odpadních kalů, do vodních toků jsou splachovány chemické prostředky používané v zemědělství jako hnojiva, pesticidy, herbicidy, insekticidy atd. Většina průmyslových podniků, stejně tak jako automobilová doprava, uvolňují do životního prostředí nezanedbatelná množství těžkých kovů (olova, kadmia, rtuti, stříbra, platiny atd.), které mají velmi negativní vliv na zdraví obyvatelstva i ve stopových množstvích. Cílem našeho snažení musí proto být uzavřené výrobní cykly, z nichž by se tyto látky nedostávaly do životního prostředí. Do té doby, než se tyto nákladné úpravy našich průmyslových a zemědělských podniků podaří realizovat, je třeba hledat cesty, jak tyto negativní vlivy maximálně omezit.

Ionizující záření se dá využít v řadě případů k odstranění nežádoucích látek z odpadních vod a plynů. Například urychlovače elektronů se již používají k současnému odstraňování oxidů síry a dusíku ze spalných plynů, k rozkladu chemicky škodlivých látok v odpadních vodách z barvíren, k rozpadu odpadních kyanidů, fenolů apod. Llivem ionizujícího záření lze u některých odpadních polymerů regulovat jejich rychlosť rozpadu, takže mizí ze životního prostředí dříve

než neozářené polymery. Odpadní teflon lze zářením měnit v práškovitý materiál vhodný jako přísada do mazadel. Velká část zemědělských a městských odpadů obsahuje ještě značné množství organické biomasy, která by se mohla využít v krmivářství. Je ovšem třeba ji zbavit škodlivých mikroorganismů a i k tomu se může využít ionizující záření.

Radioindikátorové metody mohou výrazně přispět ke stanovení cest, jimiž se škodlivé látky dostávají do životního prostředí (např. úniky z potrubí apod.). Radioanalytickými metodami lze pak poměrně jednoduše a hlavně včas sledovat koncentrace stop těžkých kovů v životním prostředí a v organismech, takže lze včas učinit potřebná opatření, dříve než koncentrace těchto kovů dosáhne nebezpečné hranice.

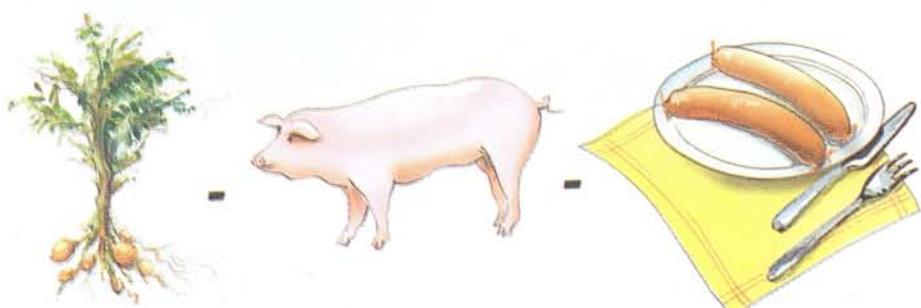
Radiometrické sledování radioaktivity v okolí jaderných elektráren, uranových dolů a zpracovatelských podniků jaderného průmyslu je samozřejmou podmínkou jejich bezpečného provozu. Například popílek z hnědouhelných elektráren obsahuje v některých případech

vysoké koncentrace radioaktivních prvků uranu a thoria. Uvolňuje se z něj nebezpečný radioaktivní plyn radon, který se tak může např. při použití těchto popílků pro výrobu tvárnic, dostávat do obytných prostor. Včasná radiometrická kontrola tomu může předejít. Z komína uhelných elektráren uniká mnoho radioaktivních látok, mnohem víc, než uniká z jaderných elektráren za normálního provozu.

Nejčastější uplatnění v ekologii nachází vhodně zvolené radionuklidy, které slouží jako radioindikátory ke sledování koloběhu pesticidů, hnojiv a jiných látok používaných v moderním zemědělství.

Další použití radioindikátorů je při sledování toku a rozptylu škodlivých exhalací, při zjišťování průsaků, propojení povrchových a spodních vod nebo schopnosti vodních toků rozptylovat nečistoty.

Radioimunoanalýza pomáhá zjišťovat přítomnost některých toxických látok, vznikajících hnělobnými procesy v potravinách a krmivech, např. produktů plísní – mykotoxinů.



Potravní řetězec – radionuklidy nebo škodlivé látky přecházejí z krmiva do masa hospodářských zvířat



**Přítomnost jedovatých prvků v životním prostředí** umožňují zjistit metody neutronové aktivační analýzy (zjistí množství už  $10^{-12}$  g) a rentgenfluorescenční analýzy (zjistí množství až  $10^{-5}$  g). Těmito metodami se např. analyzují vzduchové filtry se zachycenými nečistotami, listy a plody ovoce rostoucího kolem silnic atd.

Při likvidaci škodlivých složek kouřových plynů se využívá ozařování zářičem gama nebo urychlovačem elektronů. Při ozařování spalných plynů z továren, hutí apod. lze zářením vyvolat reakci oxidu sířičitého nebo oxidu dusíku s přidaným amoniakem. Tvorí se pevné částice síranu nebo dusičnanu amonného, které se dají následně využít jako hnojivo, nebo ve stavebnictví. Tento způsob odsířování a denitrifikace spalných plynů má poměrně vysokou účinnost (kolem 90 %) a jeho hlavní předností je to, že se v jednom stupni odstraňuje jak  $\text{SO}_2$ , tak i oxidy dusíku ( $\text{NO}_x$ ).

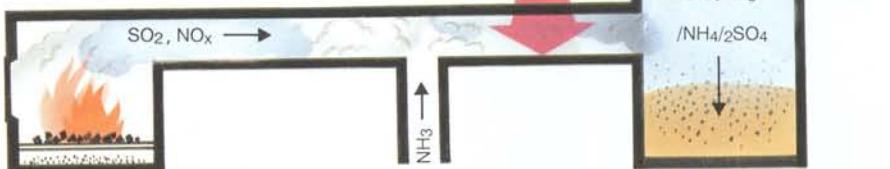


Schéma likvidace oxidů dusíku a síry pomocí ozáření



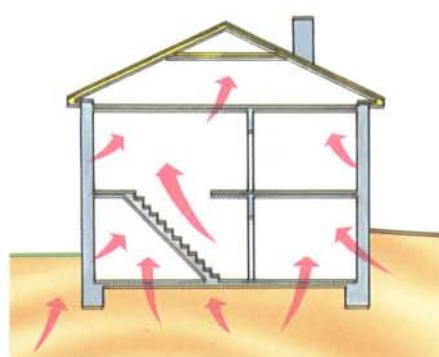
Kontrola čistoty životního prostředí polovodičovým spektrometrem v okolí jaderné elektrárny Dukovany

V řadě novostaveb se ještě dlouhou dobu po ukončení stavby uvolňují páry toxickejich rozpouštidel, používaných při lakování stěn, dveří, oken, rámů apod. Tím se výrazně zhoršuje životní prostředí, což je krajně nežádoucí např. v nemocnicích, školách, tělocvičnách atd. Zde by se mělo používat **vytvrzování laku** na zařizovacích předmětech elektronovým paprskem. Neuvolňují se žádná rozpouštědla a tento radiační proces tedy přispívá k ekologicky přijatelnějším životním podmínkám.



Radiačně vytvrzované laky v moderních bytech neohrozují životní prostředí.

Při ochraně životního prostředí má velký význam i **měření aktivity přírodních materiálů** a měření dávkových ekvivalentů radioaktivního záření z materiálů v životním prostředí. Jde např. o měření vzorků půd, vody, ovzduší v blízkosti jaderných elektráren, aktivity spadů (látek usazených na povrchu venkovních předmětů), aktivity radonu ve stavbách postavených z nevhodných materiálů (panely z elektrárenských popílků), nebo radonu difundujícího z geologického podloží.



Cesty, kterými se dostává radon do obytných budov

# Aplikace v archeologii a při ochraně památek

Izotopy a záření nacházejí uplatnění i v takových oborech, jako jsou archeologie, ochrana a studium historických památek. Zatímco v archeologii se využívá především měření aktivity a radioanalytické metody, při ochraně památek se uplatňují hlavně radiační techniky.

Nejznámější aplikací je využití měření aktivity zbytku izotopu uhlíku  $^{14}\text{C}$  k izotopovému datování stáří předmětů z organických materiálů, např. ze dřeva, kosti, textilií, slonoviny a dokonce i železa (při jehož výrobě bylo použito dřevěné uhlí). Izotopické datování se využívá v archeologii a antropologii.

Moderní archeologický výzkum využívá stále více radioanalytické metody. Mnoho možností nabízí archeologům aktivační analýza. Umožnuje pracovat s malým množstvím vzorku, je citlivá a relativně rychlá. Používá se ke stanovení stopových množství prvků v mincích, keramice, mramoru, obrazech starých mistrů a jiných uměleckých předmětech. V případě kovových a keramických materiálů poskytne analýza informace o metodě výpracování a tím i znalosti o vývojovém stupni dané kultury. Složení mincí pomůže zjistit země jejich původu, což umožní mimo jiné posoudit úroveň obchodních vztahů ve sledované době. Složení skla poskytne informaci o jeho stáří. U ostatních předmětů, např. mramoru, zlata, stříbra nebo u obrazů starých mistrů přítomnost stopových prvků pomůže zjistit místo původu. Aktivační analýza se často kombinuje s rentgenovou fluorescenční analýzou. Použití radioanalytických metod při ověřování pravosti a místa původu uměleckého předmětu metodou srovnání s originálem, kde je autor nebo místo původu známé, se stalo díky své exaktnosti nepostradatelným pomocníkem archeologů a historiků umění.

Z radiačních technik se k ochraně památek využívá zvláště záření gama které ničí plísně, cizopasné houby a hmyz. Výhodou radiační techniky je ve srovnání s chemickými metodami především hlubkový účinek záření. Záření gama proniká celým předmětem a ničí živé organismy. Použitá dávka přitom nijak nepoškozuje materiály ošetřovaného předmětu (dřevo, klih, barvy apod.).

**Určování stáří** odumřelých organismů radiouhlíkovou metodou spočívá v měření aktivity zbytku izotopu uhlíku  $^{14}\text{C}$ , který se do nich dostával ve formě oxidu uhličitého (obsahujícího i radionuklid  $^{14}\text{C}$ , vzniklý reakcí kosmického záření s dusíkem). Zatímco v živém organismu se udržuje množství  $^{14}\text{C}$  v rovnovážném stavu, po jeho zániku se již  $^{14}\text{C}$  (prostřednic-

tvím metabolismu) nedoplňuje a jeho zbytek se rozpadá. Vzhledem k jeho poločasu rozpadu, který je 5730 let, dává tato metoda spolehlivé výsledky pro období 5000 až 20 000 let. Radionuklidová metoda se využívá také v antropologii a geologii.



Zkoumání archeologických nálezů

Významnou pomocí při ověřování pravosti nebo zjišťování původu uměleckých předmětů je zjišťování přítomnosti stopových prvků pomocí neutronové aktivační analýzy nebo rentgenfluorescenční analýzy. Jde o srovnávací metodu, při níž se porovnává přítomnost charakteristických stopových nečistot u originálu a neznámého vzorku.



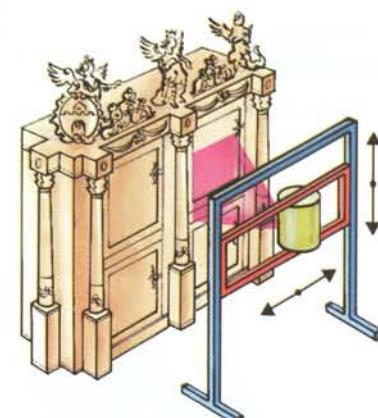
Zkoumání starého obrazu rentgenfluorescenční analýzou

Ionizující záření však pomáhá nejen při výzkumu památek, ale i při jejich ochraně. Nejtypičtějším případem je **odstranění dřevokazného hmyzu**, hub a plísní ozářením radiačním zdrojem s radionuklidem  $^{60}\text{Co}$ . Je zvláště důležité zničit nejen dospělé jedince hmyzu, nýbrž i vaříčka a larvy. K tomuto účelu se hodí dokonalé prozáření celého předmětu ionizujícím zářením, které bezpečně zničí veškeré škůdce. Dávky se přitom volí tak nízké, jak je to jen možné, což zaručuje, že předmět, jeho pigmentace, vzhled atd. se nepoškodí nebo nezmění. Tímto způsobem se zachraňují historické památky nevyčíslitelné hodnoty, např. dřevěné sochy a řezby, rámy obrazů, nábytek, předměty z kůže, papíru, pergamenu apod.



Příprava uměleckých předmětů v ozářovně v Roztokách u Prahy. Uprostřed v místnosti je ve stínění ukryt zářící, který se vysouvá do pracovní polohy až když osoby opustí místnost

V případě, že ozařování nelze technicky provést ve specializované ozářovně (např. není možné demontovat schodiště, zábradlí, obložení stěn, části oltářů atd.), používá se mobilní ozářovací zařízení, které se instaluje v místě zásahu a předměty se ozářují za přísných bezpečnostních opatření přímo na místě. Postup a dobu ozářování v jednotlivých polohách zářiče vypočítává a řídí počítač.

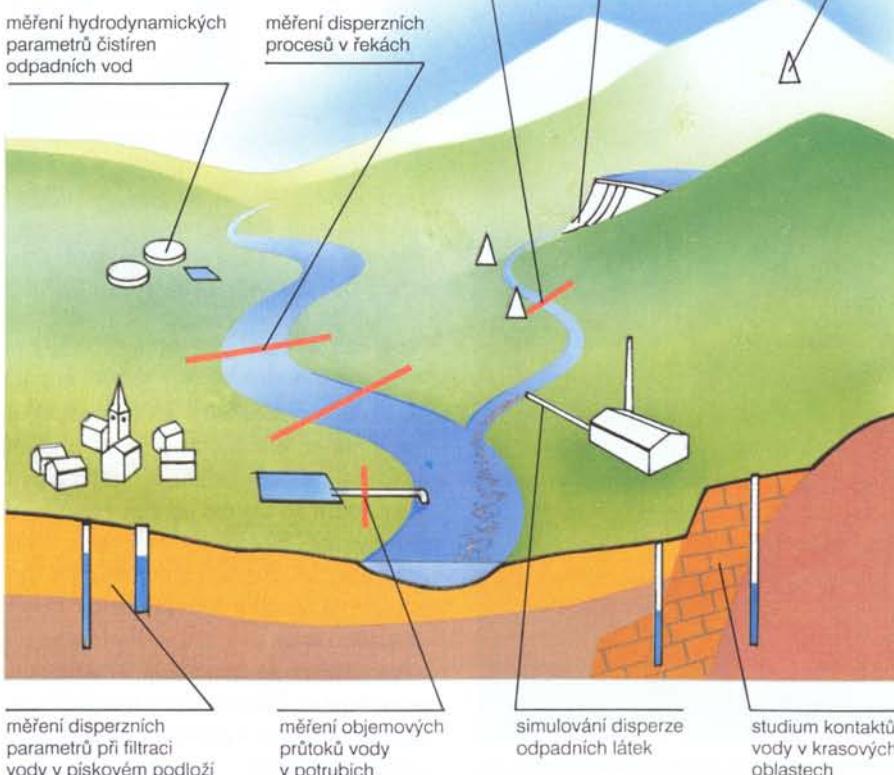


Přenosné ozářovací zařízení

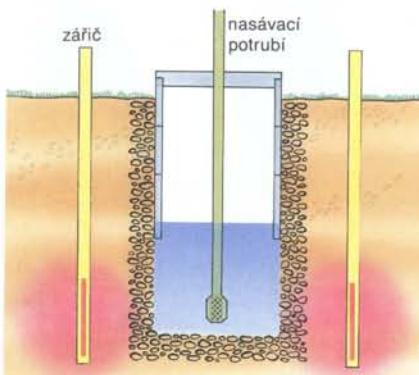
V některých případech je třeba zachránit archeologické nálezy, které po vyzvednutí z místa nálezu mohou rychle podlehnut zkáze (nálezy podmořské archeologie, některé snadno se rozpadají hliněné nálezy, nálezy, které se uchovaly díky nepřístupu vzduchu apod.). V tomto případě se může uplatnit metoda nasycení předmětu monomerem a následná radiační polymerace.

# Aplikace v geologii a vodohospodářství

Převážná část současné průmyslové civilizace závisí na získávání minerálních zdrojů (rud, minerálů, ropy) a vodních zdrojů (pitné i minerální vody) ze zemských hlubin. Při geologických a vodohospodářských průzkumech se také široce používají různé nukleární metody. Jde nejen o stanovení někdy i velmi nízkých koncentrací prvků v horninách pomocí radioanalytických metod, ale i o mnohé další aplikace. Použití radioaktivních indikátorů usnadňuje sledovat propojení spodních vod při určování velikosti využitelných vodních zdrojů, lázeňských pramenů atd. Absorpce ionizujícího záření indikuje tzv. vodní hodnotu sněhu, tj. množství vody ve sněhové pokrývce, což je důležitý údaj pro odhad množství vody získané táním sněhu a z toho vyplývající důsledky pro zavlažování v zemědělství. Indikátorové metody se uplatňují i při sledování opotřebení vrtných hlav u hlubinných vrtů, při stanovení popelnatosti uhlí, rozptyl neutronů se dá použít ke stanovení vlhkosti půdy do značných hloubek, kobaltové zářiče chrání vodní zdroje před tzv. zaokrováním. Radioindikátory sledují prosakování vod sypanými hrázemi přehrada, sledují mísení vod a rozptyl nečistot ve vodních tocích atd. Pomocí těchto metod lze získat mnohem podrobnější znalosti jak o geologickém složení Země, tak i o zásobách vody, lze modelovat procesy probíhající v řekách a nádržích a všechny tyto znalosti přispívají významné k finančním úsporám v geologii i vodohospodářství.



Použití vhodné radionuklidy jako radioindikátory je možné prakticky ve všech oblastech vodohospodářství. Radioindikátorové metody se využívají k **měření průtoků, průsaků, propojení povrchových a spodních vod, disperze (rozptyl nečistot)** a dále ke **sledování účinnosti úpraven pitné a užitkové vody**.

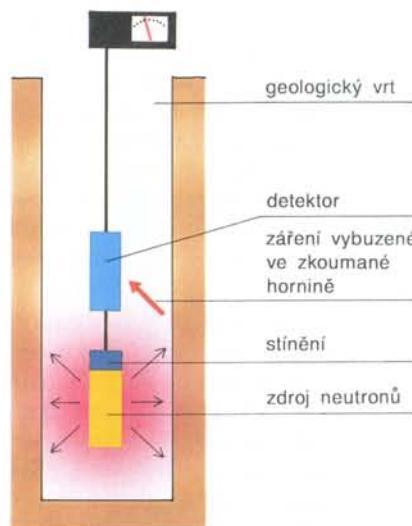


Zářiče poblíž studny pomáhají udržet vodu zdravou a čistou

Studně s pitnou vodou trpí tvorbou hydroxidů železa, které zamezuji přístupu čerstvé vody do studně. Jejich tvorba je důsledkem činnosti některých mikroorganismů. Zářiče s  $^{60}\text{Co}$  umístěné do okolí studní zamezuji růstu těchto mikroorganismů a tak odstraňují problémy s tímto tzv. zaokrováním studní.

**Odpadní voda**, obsahující některé škodlivé látky (např. kyanidy, barviva a další), je možné ošetřit ozářením. Záření gama vyvolává reakce, které tyto nebezpečné látky rozkládají. Také pitná voda se může v některých vhodných případech sterilizovat zářením.

Rovněž odpadní voda z nemocnic bývá jamořené choroboplodnými zárodky. I v tomto případě se mohou uplatnit k jejich odstranění zářiče.



Neutronová karotáž je rychlá metoda stanovení složení hornin na místě. Podle záření prvků zaktivovaných neutrony se určí, které prvky horniny obsahuje

**V geofyzikálním výzkumu** geologického profilu vrtu se využívá radioaktivní karotáž, kdy se měří emise záření gama jednotlivých geologických vrstev (gama karotáž) nebo sekundární záření vrstev po předchozím ozáření tokem neutronů (neutronová karotáž).

Radioanalytické metody se uplatňují při **analýzách geologických vzorků**, např. rentgenfluorescenční analýzou se stanovuje přítomnost S, Ca, F a As v uhlí.

Rozptylu neutronů při průchodu prostředím, které obsahuje atomy vodíku (voda, ropa) se využívá při měření vlhkosti půdy, při hledání ložisek ropy nebo podzemních zásob pitné vody.

Tloušťka vrstvy sněhu nebo ledu se měří prozařovací metodou s použitím gama zářičů s radionuklidy  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  nebo  $^{241}\text{Am}$ . Metoda je založena na absorci záření hmotou.

Podobně jako v archeologii využívá se i v geologii metoda **datování tentokrát stáří hornin**. Princip spočívá v měření aktivity plynného radionuklidu  $^{40}\text{Ar}$ , který se uvolňuje z hornin a vzniká rozpadem radionuklidu  $^{40}\text{K}$ .

# Ochrana při práci s ionizujícím zářením

Ochrana před ionizujícím zářením je důležitou podmírkou práce s radioaktivními materiály. Toto záření vyvolává totiž v ozářené tkáni tvorbu chemicky velmi reaktivních radikálů, jejichž reakce významně konkurují normálním biochemickým procesům v buňce a výsledkem je, v závislosti na dávce záření, poškození nebo zánik buňky. Zánik buňky není pro organismus nenahraditelnou ztrátou, protože existuje poměrně účinný obranný, tzv. reparační mechanismus. Ovšem při ještě vyšších dávkách se může nenepravitelně poškodit některý orgán citlivý na záření (např. oko, krvetvorná tkáň, pohlavní orgány apod.); tyto efekty vyvolávají tzv. nemoc z ozáření a při extrémně vysokých dávkách mohou vést k smrti ozářeného jedince. Obecně lze říci, že čím je organismus složitější, tím je citlivější vůči záření a tím nižší dávka postačuje k jeho zničení. Pro člověka je dávka 5 Gy dávkou, při níž umírá polovina ozářených.

Kromě tohoto existuje ovšem ještě další efekt ionizujícího záření, který spočívá v poškození genetické informace, uložené v buňkách. Protože k takovému poškození stačí jediné kvantum energie, nemá tento efekt žádnou prahovou dávku a nežádoucí mutace se mohou objevit u dalších generací i při velmi nízkých dávkách záření.

Ochrana před ionizujícím zářením není zvlášť složitá. Ke snížení dávky stačí **zvětšit vzdálenost** mezi zdrojem záření a obsluhou (intenzita záření klesá se čtvercem vzdálenosti), **zkrátit dobu** nutnou pro práci s těmito látkami na minimum, **pracovat s minimálními aktivitami**, potřebnými pro daný úkol, a především vkládat mezi obsluhu a zdroj záření materiály, které záření **účinně pohlcují**. Záření alfa a beta se zcela pohlcuje v tenkých vrstvách papíru ( $\alpha$ ) nebo kovu ( $\beta$ ), skla apod. Obtížnější je odstínění záření gama a neutronů. Pro absorpci záření gama se používají vrstvy těžkých kovů (Pb,W,U), při stavebních pracích se používá těžký beton s přísadou barytu, naopak pro odstínění neutronů jsou nejhodnější látky s vysokým obsahem lehkých prvků, zejména vodíku (polyethylen, voda apod.). Přes vrstvu stínícího materiálu pozoruje obsluha manipulaci s radioaktivním materiélem bud' přes zrcadlo, periskopem nebo průzorem ze speciálního olovnatého skla. Manipulace se provádí na dálku pomocí vhodných manipulátorů, dálkových klešťí apod. Nejdokonalejší jsou manipulátory kopírující pohyby lidské ruky.

Nejvážnější hygienické problémy vznikají při práci s tzv. **otevřenými zářicemi**, kdy je naprosto bezpodmínečně nutné



S vysoko radioaktivními materiály se pracuje v tzv. horkých komorách, a to pomocí manipulátorů



Práce s otevřenými zářicemi probíhá ve speciálních digestořích

mít zářic stále v podmínkách, kdy nemůže dojít k jeho rozlití, rozptýlení, rozprášení apod. Při této práci se musí velmi pečlivě dodržovat předpisy bezpečnosti práce, je nutné zamezit nejen vdechnutí či spolknutí částeček prachu se zachycenou radioaktivní látkou (práce s respirátorem), ale i zamoření povrchu těla (použití ochranných rukavic, příp. oděvu, který se dá snadno odmorit nebo zlikvidovat v radioaktivních odpadech). Pokud i přesto vniknou radioaktivní látky do lid-

ského těla (tzv. vnitřní kontaminace), je třeba mít na paměti, že v tomto případě jsou nejnebezpečnější ty radioaktivní látky, které se dlouho udržují v těle (mají dlouhý tzv. biologický poločas), které mají poločas rozpadu srovnatelný s délkou života člověka a které vysílají záření alfa nebo beta, protože veškerá energie tohoto záření se absorbuje v malém objemu tkáně. Záření gama tělo pohlcuje podstatně méně a značnou část energie ukládá mimo tělo.

Orgány a tkáně	Nejvyšší přípustné dávkové ekvivalenty pro pracovníky		Mezní dávkové ekvivalenty pro jednotlivce z obyvatelstva/rok /mSv/
	čtvrtletní /mSv/	roční /mSv/	
Gonády, aktivní kostní dřeň a v případě rovnoměrného ozáření celého těla	30	50	5
kůže, štítná žláza a kost	150	300	30
ruce a předloktí, nohy a kotníky	400	750	75
kterýkoliv ostatní orgán či tkání	80	150	15

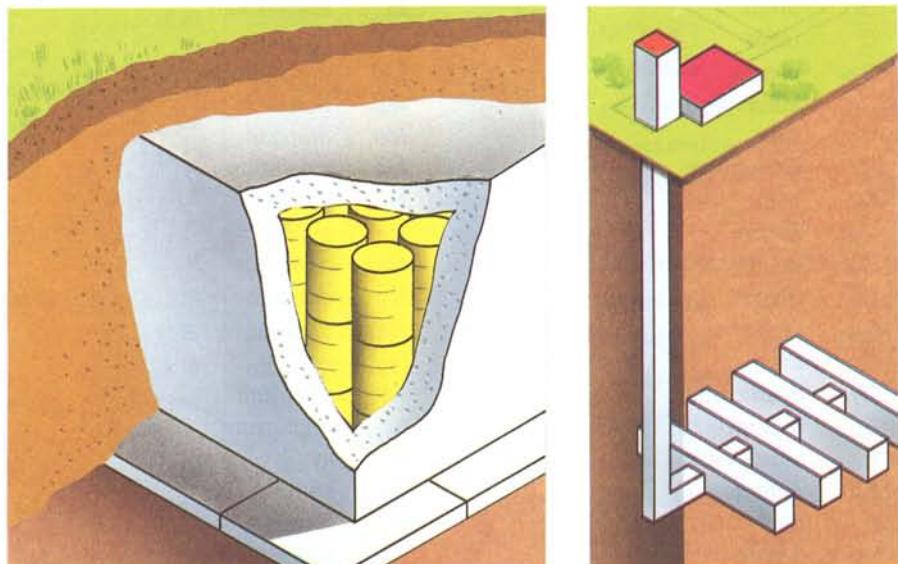
Míra účinků ionizujícího záření je dána dávkovým ekvivalentem. Je to součin dávky a jakostního faktoru jednotlivých druhů záření, který vyjadřuje vliv záření na biologický účinek. Pro účely radiační ochrany jsou stanoveny limity dávkového ekvivalentu, tj. jeho maximální hodnoty, kterými může být jedinec ozářen.

Sledováním dávek (resp. dávkových ekvivalentů) od vnějších zdrojů ionizujícího záření pro jednotlivce se zabývá osobní dozimetrie. Nejpoužívanější metodou osobní dozimetrie je měření dávkových ekvivalentů ze zčernání citlivé vrstvy filmu v osobním filmovém dozimetr. Optická hustota zčernalého filmu se měří citlivým denzitometrem s digitálním výstupem. Pro speciální účely se používají termoluminiscentní dozimetry, kde jako detektor slouží aluminofosfátové sklo se stopami manganu. Tyto dozimetry se často zasazují do obalu ve tvaru prstýnku a používají se tak pro stanovení dávkových ekvivalentů při expozici rukou. Používají se i jako celotělový osobní dozimetr. Vyhodnocení je založeno na principu, že zahřátím ozářené termoluminiscentní sklo vyzařuje viditelné světlo, které se registruje fotonásobičem. Neutronový osobní dozimetr pro registraci dávkových ekvivalentů neutronového záření je založen na tzv. stopovém detektoru (dvojice destiček zhotovených ze štěpitelného materiálu oddělená polyesterovou fólií Mylar), kde v důsledku štěpné reakce vyvolané neutrony prorazí štěpné úlomky polyesterovou fólii. Počet stop, které zanechávají štěpné úlomky ve fólii určuje velikost dávky, kterou pracovník obdržel.

Při zacházení s radioaktivními materiály se uplatňují nejpřísnější opatření, aby se zamezilo radioaktivnímu zamorení životního prostředí. **Radioaktivní odpady**, které vzniknou používáním radionuklidů v lidské činnosti se kontrolovaně ukládají v podzemních prostorách v kontejnerech s několikanásobnou ochranou proti úniku radioaktivity.

Radioaktivní odpady se lisují, spalují, zálevají do betonu a do asfaltu nebo se zatajují do skla (tzv. vitrifikace). Ukládají se do podzemních úložišť, která jsou neustále kontrolovaná. Kontroluje se ovzduší, podzemní vody i vzorky životního prostředí v okolí úložišť. Žádné jiné průmyslové odpady nejsou tak pečlivě sledované a zajišťované, jako radioaktivní odpady.

O radioaktivním záření, stejně jako o ohni, se dá vyslovit známé rčení, že je dobrým sluhou, ale zlým pánem. K tomu, aby zůstalo vždy jen dobrým sluhou člověka, je potřeba více o něm vědět a znát.



Schematické znázornění povrchového a hlubinného úložiště radioaktivních odpadů



Pohled do úložiště radioaktivních odpadů v dole Richard u Litoměřic

# Seznam značek a názvů chemických prvků

Ar	argon	Ge	germanium	Po	polonium
Ac	aktinium	H	vodík	Pr	praseodym
Ag	stříbro	He	helium	Pt	platina
Al	hliník	Hf	hafnium	Pu	plutonium
Am	americium	Hg	rtut'	Ra	radium
As	arsen	Ho	holmium	Rb	rubidium
At	astatium	In	indium	Re	rhenium
Au	zlato	Ir	iridium	Rh	rhodium
B	bor	J	jod	Rn	radon
Ba	baryum	K	draslík	Ru	ruthenium
Be	beryllium	Kr	krypton	S	síra
Bi	vizmut	La	lanthan	Sb	antimon
Bk	berkelium	Li	lithium	Sc	skandium
Br	brom	Lr	lawrencium	Se	selen
C	uhlík	Lu	lutecium	Si	křemík
Ca	vápník	Md	mendelevium	Sm	samarium
Cd	kadmium	Mg	hořčík	Sn	cín
Ce	cer	Mn	mangan	Sr	stroncium
Cf	kalifornium	Mo	molybden	Ta	tantal
Cl	chlor	N	dusík	Tb	terbium
Cm	curium	Na	sodík	Tc	technecium
Co	kobalt	Nb	niob	Te	tellur
Cr	chrom	Nd	neodym	Th	thorium
Cs	cesium	Ne	neon	Ti	titan
Cu	med'	Ni	nikl	Tl	thallium
Dy	dysprosium	No	nobelium	Tm	thulium
Er	erbium	Np	neptunium	U	uran
Es	einsteinium	O	kyslík	V	vanad
Eu	europium	Os	osmium	W	wolfram
F	fluor	P	fosfor	X	xenon
Fe	železo	Pa	protaktinium	Y	yttrium
Fr	francium	Pb	olovo	Yb	ytterbium
Ga	galium	Pd	palladium	Zn	zinek
Gd	gadolinium	Pm	promethium	Zr	zirkon

# Rejstřík odborných výrazů

absolutní měření	6	herbicid	20	otevřený záříč	5,24	rentgenologie	16
agrotechnika	18	hladinoměr	12	oxid siřičitý	.21	rentgenová terapie	16
aktivační analýza	9,21,22	hnojivo	18	oxid uhlíčitý	.22	rentgenová trubice	4
aktivita	4,8,11	hormon	16,18,19	oxidy dusíku	.21	rentgenové záření	4,16,17
aluminofosfátové sklo	25	chromatografické destičky	9	ozařování potravin	.19	reparační mechanismus	24
antigen	11	in vitro	11,16	ozařovna	.17	rukavicová skříň	8
antropologie	22	in vivo	16	ozon	.4	samosvitící pigmenty	15
asfalt	25	insekticid	18,20	pesticid	.20	scintigrafie	16
archeologie	22	inseminace	19	písně	.22	scintilační detektor	8,10
autoradiografie	9,13	ionizace	4,6,7	plodiny	.18	siever	5
autoradiogram	9	ionizační komora	7	plynový detektor	.7	sítování polymerů	12
balneologie	17	ionizující záření	.4 a násł.	poločas rozpadu	.5,22,24	smolinec	3
barvení skla	15	izotopové zředěování	11	polovodič	.13,15	spalné plyny	20,21
Becquerel	4	izotop	5,22	polovodičový detektor	.8,10	spodní vody	23
betatron	17	izotopové datování	22	polymer	.14,17	stabilní nuklid	18
biologický poločas	24	jaderná spektrometrie	9	polymerace	.14,15	statická elektrina	12
biosyntéza	10	jaderné spektrum	9	polypropylén	.19	sterilizace	17,23
brachyterapeutické zářiče	16,17	jaderný reaktor	8,10,13,17	popelnatost	.23	stínění	24
bublinková komora	6	jádro atomu	4	popělek	.20	stopovací metoda	11,12,16
Čerenkovovo záření	10	jakostní faktor	5	positron	.4	stopové množství	22
datování	22,23	kalorimetrie	6	potravinářství	.18	stopové prvky	16,19,22
dávka	5,25	kancerogenní látky	18	potravní řetězec	.20	stopový detektor	25
dávkový ekvivalent	5,21,25	karotáz	23	povrchové vody	.23	šlechtitelství	18
dceřinný radionuklid	8	kličivost	18	požární hlášič	.13	štěpení jader	4
defektoskopie	12	kompozitní materiály	13,14	progesteron	.19	štěpné úlomky	4,25
denitritifikace	21	kouřové plyny	21	proporcionální počítač	.6,7	teflon	20
detektor	4,6,7	krmvářství	20	proton	.4	termonoluminiscenční dozimetr	7,25
diagnostika	16	kyanid	20,23	prozařovací metoda	.23	těžké kovy	20,24
disperze	23	kyselé deště	20	průmysl	.12	tloušťkoměr	12
dozimetru	6	lesnictví	19	přirozená radioaktivita	.3	toluen	8
ekologie	20	manipulátor	24	radiační chemie	.15	tomografie	17
elektrický náboj	6	mateřský radionuklid	8	radiační polymerace	.14,22	účinek záření	5,6,9,25
elektromagnetické záření	4	měření radioaktivity	6	radiační roubování	.12,14,17	umělecké předměty	22
elektron	4,17	měření vlhkosti	23	radiační technika	.14,18,22	urychlovač	8,9,10,14,17,20
elektrostatický náboj	13	metabolismus	19	radikál	.15,24	uzavřený záříč	5
energetické spektrum	5	moderační detektor	7	radioaktivita	.4,6,9	vitrifikace	25
energie záření	5	molekulární genetika	10	radioaktivní indikátor	.23	vnitřní kontaminace	24
exhalace	20	monokrystal	8	radioaktivní odpady	.25	vodní hodnota sněhu	23
etalon	6	mramor	22	radioaktivní přeměna	.4,5	vulkanizace	14
fenol	20	mutace	18,24	radioaktivní záříč	.5,13,17	vytvrzování	14,21
filmová dozimetrie	6	mykotoxin	18,20	radioanalytická metoda	12,13,22,23	Wilsonova mlžná komora	6
filmový dozimetr	7,25	Mylarová folie	25	radioenzymová analýza	.11,16	zamoření	25
filtr	21	nádor	16,17	radiofarmaka	.16,17	zaokrování studní	23
fluorescenční záření	10	nemoc z ozáření	24	radioimunoanalýza	.11,16,18,19,20	záření alfa	4,24
fotometr	9	neutronová aktivační		radioindikátorová metoda	.11,20,23	záření beta	4,24
fotonásobič	6,7,8	analýza	9,10,13,16,21	radioindikátor	.11,12,18,20,23	záření gama	4,22,23,24
fotony	6	neutronová karotáz	23	radioizotop	.5	záření X	4
fotosyntéza	10	neutron	23,25	radiologie	.16	značené sloučeniny	10,17
gama karotáz	23	nukleární medicína	10,16,17	radiometrie	.20	zřeďovací analýza	11
gama spektrometrie	9	nukleony	4	radionuklid	.5,8,9,10	životní prostředí	18,20,25
Geiger-Müllerův počítač	6,7	nuklid	5,18	radionuklidový generátor	.8		
genové inženýrství	10	odpadní vody	20,23	radioterapie	.17		
geofyzikální výzkum	23	odsířování	21	radiouhlíková metoda	.22		
geologie	22,23	ochrana před zářením	24	radon	.17,20		
geotextilie	19	opotřebení	13	rentgenfluorescenční			
Gray	5	osobní dozimetrie	7,25	analýza	.10,13,21,22,23		

# **UŽITEČNÉ ZÁŘENÍ**

Autoři: RNDr. Zdeněk Prášil, CSc.

Ing. Luděk Žilka

Ing. Zdeněk Satorie

Ing. Miroslav Palek

Ing. Marie Dufková

Odborná redakce: Ing. Josef Kits, EURORAD spol. s r. o., Praha 9

Jazyková redakce: RNDr. Marie Bukovová

Fotografie: Ing. Jiří Koten, ČSTK

Ilustrace a obálka: Jaroslav Turek

3. přepracované vydání

Vydal: ČEZ, a. s.

Vytiskl: MM design, grafický závod, a. s., Na Louži 1, Praha 10

tel.: 29 36 11, 29 64 92, 29 57 85

Náklad: 25 000 výtisků

ISBN: 80-7073-047-1