

*Už před prvním atomovým výbuchem prosili někteří vědci vojáky, aby zároveň s bombou dali shodit letáky, které by upozornily na radioaktivitu. Bylo to nebezpečí zcela neznámé, které se u žádné dosa-
vadní zbraně neobjevovalo. Armáda odmítla. Obávala se, že by tím přiznala – ano, použili jsme zbra-
ně podobně otravným plynům.*

Biologické poškození tkáně

Pod zářením (radiací) obecně rozumíme procesy, při nichž dochází k přenosu energie prostorem „na dálku“ prostřednictvím fyzikálních polí (záření vlnové – elektromagnetické vlny či prozatím hypotetické vlny gravitační, což jsou kvanta vlnění, pohybující se rychlostí světla; pokud je zabrzdíme, odevzdají veškerou svou energii a zaniknou) nebo mikročástic (záření korpuskulární – např. proud rychle letících elektronů, tj. β záření, nebo proud helio-
vých jader, tj. záření α , kdy se jedná o proud hmotných částic pohybujících se rychlostí menší než rychlost světla, které si zachovávají svou existenci i po zastavení pohybu). Studium radio-
aktivních jevů ukázalo, že různé druhy emitovaného záření mají zpravidla značně vysokou energii, mnohem větší než běžné světlo. Tato vysoká energie kvant radioaktivního záření a záření X (záření rentgenové) je důležitou vlastností, rozhodující o účincích záření na hmotu – jedná se o záření ionizující. Ionizujícím zářením nazýváme takové záření, jehož kvanta mají natolik vysokou energii, že jsou schopna vyrážet elektrony z atomového obalu a tím látku ionizovat, tj. měnit atomy na elektricky nabitě ionty.

Nejznámější druhy ionizujícího záření jsou záření α , β , γ , X (rentgenové) a neutronové. Pro běžné druhy záření fotonového (X a γ) a elektronového (β^- a α) se za energetickou hranici ionizujícího záření bere energie 5 keV. Složitější situace je u neutronového záření, kde i velmi pomalé neutrony vstupují do jader a prostřednictvím jaderných reakcí mohou vyvolávat sekundárně ionizaci (a to i zpožděně či dlouhodoběji – aktivace jader, vznik radionuklidů). Podobně není definována prahová energie u záření β^+ , kde i velmi pomalé pozitrony anihilují s elektrony za vzniku tvrdého ionizujícího záření γ .

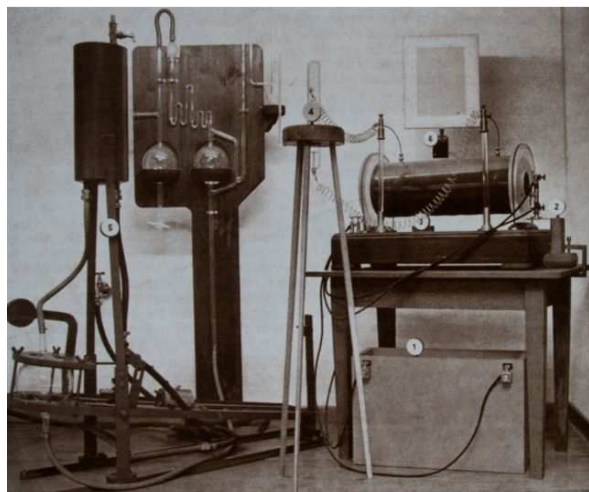
Konkrétní mechanismy interakce záření s hmotou jsou však pro každý druh záření speci-
fické. Přímo ionizují (přímo vytrhávají elektrony z atomů) ta záření, která nesou elektrický náboj (α , β^- , β^+ , protonové záření p^+ , ...). Kvanta, která nejsou elektricky nabitá (fotonové záření rentgenové a γ , záření neutronové), ionizují nepřímo, neboť svou kinetickou energii předávají v látce nejprve nabitým částicím (většinou elektronům) a ty teprve přímými účinky na atomy látku ionizují.

Nyní do praxe. A připomeňme si, že klasická fyzika je orientována na jevy našeho makrosvěta. Ale pro pochopení a popis atomárních a subatomárních procesů, tj. pro cestu do hlubin mikrosvěta stavby hmoty, bylo potřeba principiálně změnit základní klasické představy a zákony – a vybudovat novou fyziku mikrosvěta, kvantovou fyziku. Kvantová fyzika pochopitelně nevyvrací klasickou fyziku, pouze ji upřesňuje a doplňuje v oblasti těch jevů, které již není klasická fyzika schopna vysvětlit.

Pan Curie s oblibou říkával, že kilogram radia by člověka spolehlivě zabil už jen svou přítomností. Jeho manželka Marie měla práci s radiovými sloučeninami prsty úplně zmrzačené. I proto pomníky zdaleka nepatří jen padlým vojákům. V roce 1936 byl v parku nemocnice sv. Jiří v Hamburku odhalen pomník obětem z řad rentgenologů a radiologů, včetně jmen několika českých lékařů. A lidé, bezprostředně přeživší atomový výbuch, se neměli proč radovat. Ještě o tom nevěděli, ale už byli mrtví.

I počáteční pokusy o komerční využití radioaktivity zaváděním do volného prodeje různých léčebných specialit, kosmetických či potravinářských výrobků se „zaručenou radioaktivitou“ vycházely z přesvědčení, že záření v malých dávkách je stimulující nebo při nejhorším neškodné. Tutéž ideu vyznávala i prvotní radiačně-hygienická opatření při pokusech či aplikacích ionizujícího záření, ale hranici velkých a zhojných dávek s těmi malými ještě nebyla

schopna přesněji vymezit. Primitivní rentgenové diagnostické aparatury se brzy staly součástí vybavení státních i soukromých lékařských zařízení, demonstrace rentgenových paprsků byly i oblíbenou veřejnou atrakcí. Nadšené praktické aplikace rentgenového záření však předběhly znalosti o jeho biologických účincích. Rentgenující lékaři a rentgenovaní pacienti tak bohužel vytvořili první skupinu obyvatelstva ohroženou nežádoucími účinky ionizujícího záření (např. rtg expozice pacientů trvala až dvě hodiny).



Röntgenova objevná aparatura z roku 1895



RTG snímkování roku 1901

Éra „blažené“ nevědomosti trvala až do poloviny 20. století. S rozvojem aplikací ionizujícího záření rostl počet osob vystavených jeho působení jak v rámci výkonu zaměstnání, tak i z řad civilního obyvatelstva. Jednalo se především o horníky a dělníky zaměstnané při těžbě a zpracování radioaktivních surovin, o pracovníky výzkumných ústavů a lékařských zařízení s rentgenem a radioaktivními látkami, o vyšetřované a léčené pacienty či o osoby zlákané komerční reklamou na módní radioaktivní výrobky. S radioaktivitou se setkávali i zaměstnanci podniků užívajících radioaktivní barvy ke značení číselníků hodinek a přístrojů, či pracovníci provádějící výstupní kontrolu při výrobě rentgenových lamp většinou prosvícením vlastní ruky. Poválečná doba získala další zkušenosti po svržení atomových bomb na japonská města, takže novou problematikou, v souvislosti s rozvojem využití atomové energie, se stalo sledování radiační zátěže obyvatelstva pocházející z umělých i přírodních zdrojů záření (zkoušky jaderných zbraní, stavba, provoz i havárie jaderných zařízení, výroba a využití radioizotopů...). Byl institucionalizován obor radiační ochrany.

(V r. 1958 byla u nás zjištěna radiační dermatitida u nanášeček svítící barvy, dříve nepozorovaná. U rozsáhlé skupiny těchto osob byla zjištěna vnitřní kontaminace ^{226}Ra a ^{90}Sr . Barva Lumastabil, dovezená ze Švýcarska, byla deklarována jako zcela neškodná barva a tak unikla hygienické kontrole. Protože tato barva byla používána v mnoha evropských státech, stalo se studium tohoto problému jedním z důležitých úkolů, podporovaných Mezinárodní agenturou pro atomovou energii ve Vídni. Mezinárodní projekt (1961-1967) byl veden prof. R. Evansem, který se otázkami vnitřní kontaminace lidí zabýval již v Projektu Manhattan.)

Při ionizaci dochází k předávání energie malým objemům hmoty, což může (ale nemusí) vyvolat změny v její struktuře. Např. při zásahu buněčného jádra může



svítící barvy si nechal patentovat i ing. Kobic, bývalý správce jáchymovské uran-radiové továrny

buňka ztratit schopnost svého dělení (dojde k buněčné smrti), nebo dojde k „přestavění“ buněčného jádra, což může vést k trvalé změně vlastností buňky i všech dalších „potomků“ vzniklých jejím dělením. To může znamenat dědičné poškození dětí (při poškození zárodečné buňky rodičů), nebo rozvinutí procesu vzniku nádorových onemocnění.

U různých tkání, ale i u různých lidí, se liší citlivost buněk na poškození ionizujícím zářením. Jedná se o tzv. radiosenzitivitu. Proto nelze objektivně stanovit obecnou reálnou prahovou hodnotu.

Pro poškození organismu je významné zejména to, jak je dávka rozdělena. U velkých dávek během krátkého časového úseku dochází k hromadné buněčné smrti ve tkáních a orgánech – vzniká akutní nemoc z ozáření, která má svůj dávkový práh. Tělo už není schopno mrtvé buňky nahradit. Se stoupající dávkou jsou postihovány další a další orgány, ve své podstatě méně citlivé na záření. Při nižších dávkách je sice tělo schopné mrtvé buňky vyloučit a nahradit, ale neumí zvládnout takové poškození buňky, které vede ke změně jejich vlastností a chování, tj. k možnému vzniku zhoubného bujení nebo dědičného poškození. Zvyšující se dávky zvyšují tuto pravděpodobnost, i když zdánlivě k závažnějšímu poškození organismu nedochází.

„Mladý fyzik experimentoval s malým množstvím štěpného materiálu. Na zlomek vteřiny vyvolal řetězovou reakci. Za půl hodiny byl v nemocnici, ale zprvu ho nic nebolelo. Jen prsty trochu svrběly. Pak začaly otékat ruce a začal blouznit. Vypadaly mu vlasy a v krvi nabyly převahu bílé krvinky. Po dvaceti čtyřech dnech byl utrpení konec. Zemřel.“

Značný stupeň názorové nejistoty stále panuje u nízkých dávek (pokud jde o celkové účinky). Jsou názory, že i malé ozáření, např. na úrovni přírodního pozadí, může znamenat určité riziko. Opačné mínění vychází z předpokladu, že malé dávky ionizujícího záření jsou organismu naopak prospěšné, neboť stimulují v buňkách vlastní opravné mechanismy. Buňka je pak vedle malých poškození schopna opravit i takové poškození, které by jinak mohlo vyústit v rakovinné bujení. Na „blahodárném“ účinku nízkých dávek je mj. založeno i léčení pacientů v jáchymovských či jiných radioaktivních lázních.

Z dlouhodobě (cca 100 let) pozorovaných účinků záření na člověka se odvodila závislost mezi dávkou a objektivně zjistitelnými důsledky na lidský organizmus, který lze chápat jako optimalizaci míry přijatelného rizika.

Jako u každého fyzikálního jevu, který chceme kvantifikovat, je nutno i u radioaktivity stanovit veličiny a jednotky, ve kterých budeme měřit její „sílu“, intenzitu či velikost. Zdroj ionizujícího záření charakterizuje tzv. aktivita, což je počet radioaktivních přeměn probíhajících v látce za jednotku času. Aktivitě je tudíž úměrný i počet emitovaných částic za jednotku času, tj. intenzita radioaktivního záření. Jelikož radioaktivita je jev, kdy se nám v čase přeměňují atomová jádra jednoho prvku na jádra jiného prvku, přičemž čas měříme v sekundách, je přirozenou jednotkou aktivity jedna přeměna (rozpad) za jednu sekundu. Tato jednotka byla na počest Henri Becquerela nazvána jeden Becquerel – Bq. Dřívější jednotkou aktivity byl jeden Curie (Ci), kdy za etalon byl vzat 1 gram radia ^{226}Ra ($1\text{Ci} \cong 37\text{GBq}$).

Např. nejdůležitějším radionuklidem v nukleární medicíně je metastabilní technecium $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Tento čistý gama-zářič s krátkým poločasem rozpadu 6 hodin umožňuje, bez rizika významně zvýšené radiační zátěže, aplikovat pacientům značně vysokou aktivitu $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (řádu stovek MBq až jednotek GBq) potřebnou pro získání kvalitních obrazů. Radiační zátěž je relativně nízká proto, že není přítomno korpuskulární záření, které by se pohltilo v tkáni a zde svou energii odevzdalo. Vlastní záření γ pak díky své pronikavosti většinou vylétá z organismu ven, jen část se pohlcuje.

Čím vyšší je aktivita zářiče, tím intenzivněji září. Část energetického výkonu zářiče se mění na teplo, vlastní radiační výkon zářiče tvoří ionizující záření, při absorpci záření pak

dávkový příkon. Veličinou popisující účinek záření je dávka, která udává množství energie pohlcené v jednotce hmotnosti prostředí. Její jednotkou je gray – Gy.

Protože různé dávky záření mají při shodné dávce odlišné účinky na lidský organizmus, zavedla se veličina zvaná efektivní dávkový ekvivalent, jehož jednotkou je sievert – Sv. Důležitým údajem je intenzita působení záření v čase, tj. příkon dávkového ekvivalentu, vyjádřený v jednotkách sievert za hodinu. V běžné praxi se používá jednotka tisíckrát menší – milisievert (mSv) za hodinu, neboť základní jednotka je příliš velká (příp. mikrosievert μSv – milionkrát menší).

Světový roční průměr radiační dávky se pohybuje kolem 2-3 mSv. Za nízké radiační dávky se považují hodnoty do 250 mSv/rok, tj. do stonásobku průměrné dávky na světě. Lékařsky zjistitelné účinky záření na lidský organizmus se projeví při hodnotách nad 500 mSv/rok.

Kolem 80 % středního ročního dávkového ekvivalentu pro jednotlivce poskytují přírodní zdroje. Zbytek má na svědomí lidská činnost. Z pozemského záření obdržíme přibližně 0,35 mSv. Dalším zdrojem je potrava (0,25 mSv) a vzduch, který dýcháme (1-3 mSv). Radiační zátěž ovlivňuje i naše vlastní chování. Přestěhujeme-li se do o 30 m vyšší nadmořské výšky, „získáme“ 0,01 mSv ročně navíc, podobně, jako když zvýšíme spotřebu potravy o 4-5 %. Tutéž dávku nám poskytne i týdenní dovolená ve vysokých horách, či 2,5 hodinový let ve výšce 10 km. Důležitou část přirozeného radiačního pozadí totiž tvoří kosmické záření, kterému je vystaven veškerý život na Zemi, od jeho vzniku dodnes. Tok částic kosmického záření činí cca 200 částic/ m^2 za sekundu, průměrná roční efektivní dávka z kosmického záření pro člověka je asi 0,4 mSv. Dávkový příkon z kosmického záření však závisí na nadmořské výšce – při mořské hladině činí asi 0,3 mSv/rok, v 1 000 metrech nad mořem 0,45 mSv/rok, ve výšce 5 km cca 2 mSv/rok, v 8 km je to již cca 10 mSv/rok. Dále závisí i na zeměpisné šířce – vlivem působení magnetického pole Země je větší v oblasti pólů a menší na rovníku.

Z těchto i dalších okolností vyplývá, že pro účinky ionizujícího záření neexistuje objektivní prahová hodnota. Lze se domnívat, že během života se obdržené dávky sčítají do doby, než ten či onen lidský organizmus dostane svou „poslední“ dávku, v jejímž důsledku vypukne např. zhoubné bujení.

Že to není jednoduché dokazuje okolnost, že existují oblasti s vysokým přírodním pozadím záření. Radiační dávky, kterým jsou tamější obyvatelé vystaveni, jsou mnohonásobně vyšší než zmíněný světový průměr (např. Guapari v Brazílii až 175 mSv/rok či Ramsar v Íránu až 400 mSv/rok, apod.). Přesto zde nebyly zaznamenány žádné zjistitelné negativní zdravotní účinky.

Jedno z nejradioaktivnějších míst Země leží v brazilském Minas Gerais (Morro de Ferro – Železný kopec). Rostliny, rostoucí na povrchu zdejšího ložiska thoria (a jeho rozpadových produktů), absorbují tolik radia ^{228}Ra , že když se položí na fotografickou desku, vytvoří samy svůj vlastní obraz.

Paradoxem našťastí dosud jediných atomových explozí nad obydlenými místy je neuvěřitelný fakt, že se našli nešťastníci, kteří se nacházeli v obou nebohých městech (Hirošima, Nagasaki) právě v době výbuchu jaderné bomby, a přežili to. Jeden z nich, Cutumu Jamaguči, zemřel po boji s rakovinou žaludku ve věku 93 let 4. ledna 2010.

Jestliže dnes lidé o záření vůbec přemýšlejí, pak v naprosté většině případů více s obavami, než se snahou tomuto jevu objektivně porozumět a využívat ho pro svůj vlastní prospěch. Co tedy v nás slovo záření vyvolává? Téměř automaticky představu jaderných zbraní, jaderných reaktorů, radioaktivního odpadu, radonu a následně i děs z rakoviny. Z nedostatku znalostí bývá vztah mezi ozářením a rizikem často překrucován, nezřídka dokonce účelově. Jde totiž o riziko dosud málo poznané a pochopené, potenciálně ohrožující mnoho lidí. Překrucování fakt pak vyvolává zbytečné obavy a v důsledku působí větší škody, než účinky radioaktivního záření samotného. Odborná osvěta prakticky neexistuje, snad i pro-

to, že málokdo této problematice opravdu rozumí. Jako tonoucí se chytáme stébel informací, které pocházejí z denního tisku, televize či obrázkových časopisů a zapomínáme přitom, že náplní masmédií zaručeně není nás vzdělávat, nýbrž působit na naše emoce a upoutat nás zdůrazňováním pouze toho nebezpečného, tudíž vzrušujícího a obvykle negativního pohledu na problém. Pak nejsme schopni rozlišovat mezi následky velkých dávek záření v důsledku výbuchu jaderné bomby nebo jaderné havárie, tedy mezi těmito velmi málo pravděpodobnými příhodami, a běžným používáním zdrojů záření např. ve zdravotnictví či při vystavení organismu každodenní přírodní radioaktivitě.

Cílem oboru radiační prevence je postarat se ochranu zdraví nejen každého jednotlivce, nýbrž i lidské populace jako celku. Příslušná dávka pokory a obezřetnosti je jistě na místě, ale současně je třeba používat rozum a neklást neodůvodněné překážky využití zdrojů záření ve prospěch člověka. Ochrannou ruku nad námi prozatím drží i Příroda. Před nepříznivými účinky vnějšího ionizujícího záření chrání pozemský život mohutná vrstva atmosféry, která nepropouští rentgenové ani gama záření, navíc silně brzdí a absorbuje i vysokoenergetická kvanta. Ozón v horních vrstvách atmosféry nás chrání před ultrafialovým zářením ze Slunce, magnetické pole Země zase před částicemi „slunečního větru“, které by mohly naopak destruovat tuto ozónovou vrstvu.

Co by se však stalo, kdyby v naší Galaxii, u některé z relativně blízkých hvězd, došlo ke katastrofickému procesu, při němž se náhle uvolní obrovské množství zářivé energie (výbuch supernovy, gravitační kolaps a vznik černých děr, srážky či splynutí neutronových hvězd a černých děr)? Za mohutným zábleskem záření gama by za několik dní dorazil k Zemi ještě ničivější proud korpuskulárního kosmického záření. Každá jeho částice o energii řádově GeV by kaskádou interakcí s atomy v atmosféře vyvolala spršku energetického sekundárního záření, které by proniklo nejen na zemský povrch, ale i hluboko pod hladinu vody a pod zemský povrch. Radiační dávka by mnohonásobně převýšila smrtelnou dávku pro všechny vyšší organismy, přežít by snad mohly jen radiačně vysoce odolné druhy. Částice vysokých energií by dále způsobovaly jaderné reakce v atmosféře i na zemském povrchu, přičemž by vznikala i radioaktivní jádra, z nichž mnohá by měla poločasy rozpadu řadu let, některá i miliony let. Zemský povrch a povrchové i spodní vody by po dlouhou dobu zůstaly radioaktivně zamořené a dlouhodobě buď zcela neobyvatelné, nebo by naopak zvýšenými mutacemi probíhal urychlený vývoj nových druhů. Některé hypotézy o náhlém vyhynutí druhů na Zemi, opírající se o největší paleontologické změny v prehistorii Země, naznačují, že k takovýmto katastrofám v relativně blízkém okolí Sluneční soustavy by mohlo docházet zhruba jednou za 100 miliónů let. Narozdíl od možného dopadu asteroidu na Zemi patrně nikdy nebude v našich silách se před nimi uchránit.