

RADIOLOGICKÁ FYZIKA

FYZIKA IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ



Online
publikace ve
formátu pdf

FRANTIŠEK PODZIMEK

RADIOLOGICKÁ FYZIKA

Fyzika ionizujícího záření



FRANTIŠEK PODZIMEK

Doc. Ing. František Podzimek, CSc.

Radiologická fyzika - Fyzika ionizujícího záření

Online publikace ve formátu pdf

Vydala Data Agentura INFOPHARM, s.r.o.

1. vydání

2013

Počet stran 335

Copyright © František Podzimek, 2013

Grafika © František Podzimek, SQ Studio, s.r.o.

Cover © SQ Studio, s.r.o.

Lektor: prof. MUDr. Pravoslav Stránský
doc. Ing. Jozef Sabol, DrSc.

ISBN 978-80-87727-05-8



„Původní povolání – jaderný fyzik.“ (c) 1978 V. Renčín

Poděkování

Rád bych poděkoval lektorům, svým bývalým učitelům a nyníjším kolegům, prof. MUDr. Pravoslavu Stránskému z Lékařské fakulty UK v Hradci Králové a doc. Ing. Jozefu Sabolovi, DrSc., z Fakulty biomedicínského inženýrství ČVUT v Praze (se sídlem na Kladně) za odbornou pomoc a cenné rady při zpracování tohoto odborného textu. Zvláštní poděkování patří i MUDr. Vladimíru Mašínovi, Ph.D., z Lékařské fakulty UK v Hradci Králové za velmi pečlivou kontrolu rukopisu.

František Podzimek

Upozornění pro čtenáře této knihy

Publikace je chráněna podle autorského zákona č. 121/2000 Sb., ve znění pozdějších předpisů, a to v plném rozsahu jako zákonem chráněné autorské dílo. Ochrana se vztahuje na informace jak v grafické, tak textové či jiné podobě.

Tato publikace a ani žádná její část nesmí být šířena nebo reprodukována v papírové, elektronické nebo jiné podobě bez předchozího písemného souhlasu autora. Je zakázáno umístění celé publikace nebo její části, včetně grafiky, na servery, ze kterých je možno tyto soubory dále stahovat.

Neoprávněné užití této publikace bude trestně stíháno.

Copyright © František Podzimek

© Všechna práva vyhrazena

Obsah

1	Úvod	9
2	Fyzika ionizujícího záření.....	13
2.1	Počátky vesmíru	14
2.2	Elementární částice	18
2.3	Částice silového působení	20
2.4	Vznik hmoty	22
3	Stavba atomů.....	27
3.1	Modely atomů.....	28
3.1.1	Thomsonův model atomu	29
3.1.2	Rutherfordův model atomu	30
3.1.3	Bohrův model atomu.....	32
3.1.4	Sommerfeldův model atomu	35
3.1.5	Heisenbergův - Ivaněnkův model atomu.....	37
3.1.6	Kvantově mechanický model atomu	38
3.1.7	Standardní částicový model.....	40
3.2	Vlastnosti jader	50
3.2.1	Velikost jádra	52
3.2.2	Hmotnost jádra	54
3.2.3	Stabilita atomových jader.....	57
3.3	Elektron a elektronový obal.....	62
3.4	Hmotnost a počet atomů.....	68
4	Radioaktivní přeměna	71
4.1	Typy radioaktivní přeměny.....	76
4.1.1	Přeměna alfa	82
4.1.2	Přeměna β^-	86
4.1.3	Přeměna β^+	88
4.1.4	Elektronový záchyt	91
4.1.5	Emise protonů	93
4.1.6	Emise neutronů	95
4.1.7	Samovolné štěpení	97
4.1.8	Emise těžkých jader.....	100

4.1.9	Emise záření gama.....	100
4.1.10	Vnitřní konverze.....	102
4.1.11	Procesy probíhající v elektronovém obalu	104
4.2	Přirozená a umělá radioaktivní přeměna.....	106
4.3	Jaderné reakce.....	107
4.4	Zákon radioaktivní přeměny.....	110
4.5	Radioaktivní rovnováha	115
4.6	Alternativní jaderné přeměny	119
5	Vlastnosti ionizujícího záření.....	121
5.1	Rozdělení ionizujícího záření.....	122
5.2	Přímo ionizující záření	128
5.2.1	Těžké nabitě částice	128
5.2.2	Lehké nabitě částice.....	130
5.3	Nepřímo ionizující záření	132
5.3.1	Záření elektromagnetické	132
5.3.2	Neutronové záření	141
6	Zdroje ionizujícího záření.....	145
6.1	Klasifikace zdrojů ionizujícího záření	146
6.2	Přírodní zdroje ionizujícího záření.....	148
6.2.1	Kosmické záření a kosmogenní radionuklidy	148
6.2.2	Přírodní radionuklidy (terestriální) v zemské kůře	150
6.3	Umělé zdroje ionizujícího záření.....	154
6.3.1	Umělé radionuklidy	154
6.3.2	Generátory radionuklidů	156
6.3.3	RTG přístroje.....	160
6.3.4	Urychlovače nabitých částic.....	166
6.3.5	Zdroje neutronů	174
6.3.6	Jaderný reaktor.....	180
7	Interakce ionizujícího záření s hmotou	187
7.1	Interakce přímo ionizujícího záření	188
7.1.1	Těžké nabitě částice	190
7.1.2	Lehké nabitě částice	190

7.2	Interakce nepřímo ionizujícího záření	192
7.2.1	Elektromagnetické záření	193
7.2.2	Neutronové záření	208
8	Dozimetrie ionizujícího záření.....	213
8.1	Soustava dozimetrických veličin a jednotek	214
8.1.1	Veličiny charakterizující zdroje ionizujícího záření	214
8.1.2	Veličiny popisující pole ionizujícího záření v prostoru	216
8.1.3	Veličiny popisující interakce ionizujícího záření s látkou	218
8.1.4	Veličiny popisující interakce nepřímo ionizujícího záření s látkou	219
8.1.5	Veličiny popisující interakce přímo ionizujícího záření s látkou	222
8.1.6	Veličiny dozimetrie ionizujícího záření	224
8.2	Mikrodozimetrie	228
8.3	Veličiny používané v radiční ochraně.....	232
8.4	Vztahy mezi veličinami	241
9	Principy detekce ionizujícího záření	245
9.1	Detekce založená na primárních účincích.....	247
9.1.1	Detekce založená na ionizaci v plynné fázi.....	247
9.1.2	Detekce založená na ionizaci v pevné fázi.....	253
9.1.3	Detekce založená na excitaci v pevné a kapalné fázi	254
9.1.4	Detekce založená na jaderných reakcích.....	256
9.2	Detekce založená na sekundárních účincích	257
9.2.1	Fotografické metody detekce.....	257
9.2.2	Chemické metody detekce.....	257
9.2.3	Dozimetrie pevnou fází	258
9.2.4	Bublinkové a mlžné komory	258
10	Metrologie ionizujícího záření.....	261
10.1	Měření aktivity	264
10.2	Měření emise neutronových zdrojů	265
10.3	Měření dávek.....	266
10.4	Teorie ionizace v dutině.....	267
10.5	Měření expozice	270
10.6	Osobní dozimetrie	272

11	Biologické účinky ionizujícího záření.....	275
11.1	Základní mechanismus biologického účinku ionizujícího záření.....	276
11.2	Účinky ionizujícího záření na molekulární úrovni	278
11.3	Účinky ionizujícího záření na úrovni buněk	280
11.4	Účinky ionizujícího záření na úrovni tkání	281
11.5	Účinky ionizujícího záření na úrovni organismu	282
11.5.1	Akutní nemoc z ozáření	285
11.5.2	Akutní lokální změny.....	286
11.5.3	Nenádorová pozdní poškození	287
11.5.4	Nádorová pozdní poškození	287
11.5.5	Genetické změny	288
12	Ochrana před ionizujícím zářením.....	289
12.1	Principy a cíle radiační ochrany	290
12.1.1	Princip zdůvodnění	294
12.1.2	Princip optimalizace ochrany	295
12.1.3	Princip aplikace dávkových limitů.....	296
12.1.4	Princip zajištění	305
12.2	Ochrana před vnějším ionizujícím zářením	306
12.3	Ochrana před vnitřní kontaminací	310
13	Kontrolní úlohy k jednotlivým kapitolám	313
14	Literatura.....	316
15	Seznam obrázků	321
16	Seznam tabulek	327
17	Rejstřík	329

1 Úvod

„Kdo se učil základům fyziky a chemie na škole před lety a kdo od školních let zůstal o dalším rozvoji moderní fyziky a chemie nepoučen, ani netuší, jaká propast se rozevřela mezi věděním jeho a mezi moderním vlastnictvím vědeckého ducha; propast podobná oné, jež se klade mezi hospodářský život evropský a mezi primitivní dny praobyvatel australských. Ale i ti, kteří se snaží doplnit své poznatky, vzdávají se časem jeden po druhém, bezradní nad záhadnou mluvou moderní vědy“. (Běhounek, 1947)

Už v roce 1947 **František Běhounek**, (v té době doc. dr., později akademik, jinak významný československý radiolog) v populárně vědecké publikaci **Neviditelné paprsky** (Běhounek, 1947) vysvětluje přijatelnou formou nové záhady moderní fyziky – paprsky neviditelného záření. Popisuje např. změnu světla ve hmotu a naopak, kde se rodí prvky radioaktivní z prvků všedních, kde se sprškami částic hmotných projevuje záhadné záření kosmické apod.

Jak konstatuje univerzitní profesor **dr. Vladimír Úlehla**, který knihu redigoval, Běhounkova kniha byla určena pro všechny: pro každého laika, jenž má dobrou vůli, a pro každého odborníka, který právě nepracuje na problémech v knize rozebíraných. Laickou a srozumitelnou formou dovedla každého čtenáře poučit o záhadách moderní fyziky.

V padesátých a šedesátých letech minulého století vznikla celá řada populárně vědeckých knih, např. (Běhounek, 1952), (Joliot-Curie, 1966), které ovlivnily pozdější zaměření řady středoškolských studentů při volbě vysokoškolského studia. Tyto publikace přístupnou, encyklopedicky pojatou formou poskytly i laikovi ucelený pohled na aktuální problémy moderní vědy. Za použití značného množství názorných schémat, grafů a obrázků a s minimálním využitím složitého matematického aparátu dokázaly vysvětlit složité problémy moderní vědy.

Od této doby uplynulo více než 65 let. Rozvoj využívání ionizujícího záření zaznamenal ohromný pokrok. Moderní medicínu si bez využití ionizujícího záření v diagnostice i terapii neumíme vůbec představit. Rozvoj jaderné energetiky nepotřebuje žádný komentář. Kde se však zaostává, jsou všeobecné znalosti vlastností ionizujícího záření, jeho vzniku, interakcí s živou i neživou hmotou, a především znalosti z radiační ochrany. To všechno je živnou půdou pro rozmach **radiofobie** ve společnosti, odporu proti jaderné energetice, zveličování radiačních rizik při různých nehodách apod. V poslední době jsme byli svědky šíření téměř poplašných zpráv o radiačním nebezpečí po závažné nehodě jaderné elektrárny ve Fukušimě v roce 2011, až po nepochopitelné zveličování rizika z kontaminace masa prasete divokého v roce 2012 v ČR (SURO, 2012). Bohužel, v obou případech i seriózní mediální zdroje používaly nesprávné veličiny a jednotky, zaměňovaly pojmy, neuváděly přesné a úplné informace o radiačním pozadí apod. Pro laického čtenáře bylo značně obtížné se dobrat seriózních informací.

Při kritickém pohledu na úroveň středoškolských znalostí z jaderné fyziky musíme konstatovat, že výklad této problematiky na středních školách má minimální rozsah. Objektivně je třeba také přiznat, že není k dispozici mnoho vhodných publikací, kde by se mohl zvědavý čtenář se

středoškolskými znalostmi fyziky, a hlavně matematiky, dozvědět více o této problematice. Zastánci internetu ihned prohlásí, že vše lze najít na webových stránkách. To má však jeden háček. Vedle seriózních a vědeckých článků zde čtenatel najde i značné množství nepřesností, neúplných informací a někdy i chyb. Hlavní problém je v tom, že laický čtenář nedovede rozlišit a posoudit kvalitu těchto zdrojů informací.

Tuto mezeru chce částečně zaplnit publikace **Radiologická fyzika – Fyzika ionizujícího záření**. Primárně je sice určena vysokoškolským studentům v úvodních ročnících bakalářských oborů, ale je předpoklad, že si najde čtenáře i v laické veřejnosti. Publikace je totiž k dispozici i ve formě online publikace ve všech dostupných formátech (pdf, ePub, MOBI) s „tvrdou“ i „sociální“ ochranou DRM vhodnou pro většinu druhů elektronických čteček knih a tabletů, takže pomocí internetu se může rychle dostat i k široké veřejnosti.

Cílem publikace je přístupnou, encyklopedicky pojatou formou, s minimem složitých matematických vzorců a maximem názorných obrázků a schémat poskytnout ucelený pohled na problematiku ionizujícího záření, od jeho původu, možností jeho použití i zneužití až po radiční rizika, včetně popisu ionizujícího záření v legislativě národních a mezinárodních institucích.

Radiologická fyzika – Fyzika ionizujícího záření chce seznámit čtenáře se základy fyziky ionizujícího záření, od jeho vzniku, vlastností, zdrojů, mechanismů interakcí s živou i neživou hmotou, s možností jeho detekce až po jeho aplikace a využití, výskyt v životním prostředí, ochranou před jeho účinky i možnostmi jeho zneužití. Zahrnuje oblast radiologie se zaměřením na fyziku ionizujícího záření.

Už vlastní název publikace může být čtenáři chápán různě. Pojmy radiologie a ionizujícího záření nejsou vždy používány zcela správně. Název „**ionizující záření**“ je někdy zaměňován s názvem „**radioaktivní záření**“. Obecnější pojem je ionizující záření, neboť zahrnuje všechny druhy ionizujícího záření, bez ohledu na jeho původ. Pojem radioaktivní záření se váže pouze na ionizující záření, které je emitováno při jaderných přeměnách z radioaktivních nuklidů.

Radiologie je obecně vědní obor zabývající se především studiem ionizujícího záření, jeho využitím a ochranou před ním. Zahrnuje oblasti od jaderné fyziky, fyziky ionizujícího i neionizujícího záření, detekce a dozimetrie, radiační ochrany až po aplikace se zaměřením především na oblast zdravotnictví. Tento obor je však někdy chybně chápán pouze jako lékařský obor, který využívá ionizujícího záření k určení diagnózy či při léčbě nemocného a zabývá se pouze aplikacemi ionizujícího záření a radionuklidů v lékařských oborech, jako radiodiagnostice, radioterapii a nukleární medicíně.

Publikace je tedy určena všem zájemcům o problematiku ionizujícího záření, především pak studentům bakalářských oborů se zaměřením na fyziku ionizujícího záření, radiační ochranu a využití ionizujícího záření. Využití najde u vysokoškolských studentů bakalářských studijních oborů Fakulty biomedicínského inženýrství ČVUT v Praze (se sídlem na Kladně) - „**Radiologický asistent**“ k prohloubení učiva v základním kurzu radiologické fyziky, dále u studentů studijních oborů „**Zdravotnický záchranář**“ a „**Plánování a řízení krizových situací**“ v předmětech

„radiační ochrana“. Je určen i studentům se zaměřením na fyziku ionizujícího záření a jeho aplikací a studentům ostatních vysokých škol se zaměřením na studijní obory „**Radiologický asistent, technik nebo fyzik**“.

Cílem publikace je poskytnout ucelený základní pohled na problematiku ionizujícího záření, od jeho původu, popisu, jeho vlastností, zdrojů, možnosti detekce. Popisuje interakci ionizujícího záření s hmotou, biologické účinky ionizujícího záření až po základní principy radiační ochrany. Publikace je sice určena především vysokoškolským studentům v úvodních ročnících bakalářských oborů, ale je předpoklad, že si najde čtenáře i v laické veřejnosti. Ke zvládnutí odborného textu stačí znalosti středoškolské matematiky a fyziky.

Text je rozdělen na jedenáct tematických okruhů, které postupně procházejí hlavní problematiku fyziky ionizujícího záření.

Po úvodní kapitole, která čtenáře seznamuje se vznikem hmoty a elementárních částic, následuje deset kapitol, které postupně procházejí hlavní problematiku fyziky ionizujícího záření.

- Stavba atomů
- Radioaktivní přeměna
- Vlastnosti ionizujícího záření
- Zdroje ionizujícího záření
- Interakce ionizujícího záření s hmotou
- Dozimetrie ionizujícího záření
- Principy detekce ionizujícího záření
- Metrologie ionizujícího záření
- Biologické účinky ionizujícího záření
- Ochrana před ionizujícím zářením

Publikace **Radiologická fyzika – Fyzika ionizujícího záření** čerpá jak z nejnovější odborné vědecké literatury uvedené v závěru práce, tak využívá řadu populárně vědeckých knih vydaných v polovině minulého století. Nejstarší literární pramen je už z roku 1947. V konkrétních citacích, dnes již z historických pramenů, lze tak nahlédnout do myšlení průkopníků využití ionizujícího záření a jaderné energie, seznámit se s jejich nadějemi, ale i obavami. Přestože některé citované publikace jsou starší než 60 let, lze v nich nalézt mnoho inspirativních názorů i ilustrativních obrázků.

Zájemci o podrobnější studium jednotlivých kapitol naleznou potřebné informace v literatuře, která je uvedena na závěr.

Tento učební text doplňují skripta **Radiologická fyzika - Příklady a otázky**, vydaná v roce 2012 v nakladatelství ČVUT. Učební text je rozdělen na osm tematických okruhů.

V úvodu každé kapitoly jsou uvedeny základní pojmy, vztahy a vzorce potřebné k řešení 25 modelových příkladů v každé kapitole, z nichž jsou vždy čtyři příklady vzorově vyřešeny. Celkem sbírka obsahuje 230 příkladů, z toho 33 řešených. Na konci textu je soubor 230 kontrolních otázek s mnohočetným výběrem odpovědí. Soubor otázek vychází z předpokládaného rozsahu teoretických znalostí požadovaných pro získání zvláštní odborné způsobilosti pro nakládání se zdroji ionizujícího záření a může sloužit i k dílčí přípravě na zkoušku, která je pro určitý okruh pracovníků požadována Státním úřadem pro jadernou bezpečnost (SÚJB).

Skript **Radiologická fyzika - Příklady a otázky** vyšla na konci září 2012 v tištěné podobě v nakladatelství ČVUT. Jsou připravena i v podobě online publikace ve všech dostupných formátech (pdf, ePub, MOBI) s „tvrdou“ i „sociální“ ochranou DRM vhodnou pro většinu druhů elektronických čteček knih a tabletů. Všechny verze (tištěná i online) jsou dostupné na adrese www.frpo.eu.

Pokračováním bude publikace **Radiologická fyzika – Aplikace ionizujícího záření**, která postupně vysvětlí další části:

- Ionizující záření v životním prostředí
- Využití ionizujícího záření v medicíně
- Využití ionizujícího záření v průmyslu a zemědělství
- Radiační zátěž obyvatelstva
- Monitorování ionizujícího záření
- Radioaktivní odpad a transport radioaktivních materiálů
- Mimořádné události a nehody se zdroji ionizujícího záření
- Zneužití ionizujícího záření
- Ionizující záření v legislativě národních a mezinárodních institucí

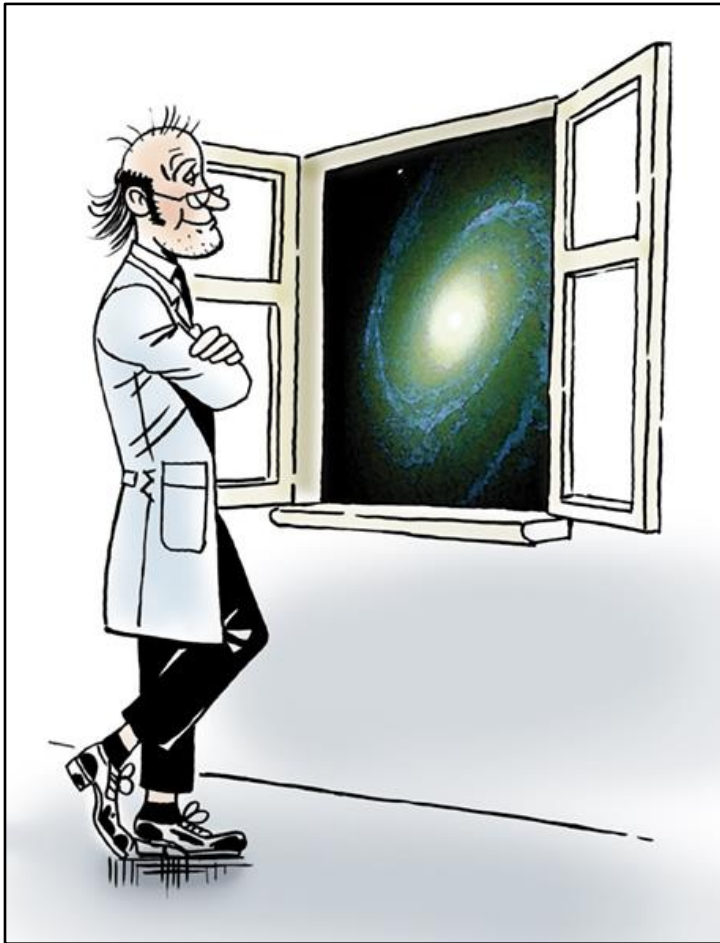
Problematice neionizujícího záření se tyto tři publikace nevěnují.

2 Fyzika ionizujícího záření



2.1 Počátky vesmíru

Jedním z nejpozoruhodnějších aspektů dnešní fyziky je těsné spojení mikrosvěta s makrosvětem. Čím hlouběji se díváme do nitra hmoty, tím se v jistém smyslu díváme i dále do minulosti našeho vesmíru, a naopak. Abychom tedy mohli pochopit současné vědecké poznatky o stavbě hmoty, elementárních částicích, částicích silového působení atd., musíme se podívat úplně na samý počátek dějin kosmu.



Až do 30. let minulého století, kdy většina lidí věřila v neměnný vesmír, měl problém počátku vesmíru značně metafyzický či teologický rozměr. Podle tehdejších astronomických pozorování bylo možné tvrdit, že vesmír vznikl s jistými počátečními parametry, které je činí nerozpoznatelnými od věčného vesmíru.

Tato hypotéza vzala za své v roce **1929**, kdy americký astronom **Edwin Hubble** na základě studia vzdálených galaxií zjistil, že se všechny galaxie bez výjimky od nás rychle vzdalují (Hawking, 2007). Později bylo upřesněno, že to neplatí pro gravitačně vázané blízké galaxie.

Ze skutečnosti, že se vesmír rozpíná, nevyhnutelně plyne, že v minulosti byl menší. To už je krůček k myšlence, že existoval okamžik, dnes nazývaný **Velký třesk**, kdy vesmír byl nekonečně malý

a nekonečně hustý. Z rychlosti vzdalujících se galaxií bylo vypočteno, že tento okamžik nastal před pouhými **13,7 miliardami let**. V tomto okamžiku byla veškerá hmota všech galaxií celého vesmíru soustředěna v jednom bodě. Shoda tohoto místa a okamžiku představuje samotnou definici **času a bodu nula**, v němž velký třesk započal. V tuto chvíli byla hmota tvořena nepatrnými částicemi, které označujeme jako **elementární částice**. Tyto částice byly v původním stavu natolik stlačené, že byly spíše nehmotné než hmotné. V okamžiku velkého třesku se tedy veškerá hmota ve formě energie nesmírné hustoty objevila naráz, v kompaktní podobě a v jednom bodě. Pak se vesmír začal rozpínat velkou rychlostí a ve všech rozměrech.

Rozpínání vesmíru se řídí jednoduchým pravidlem. Každá galaxie se vzdaluje od Mléčné dráhy rychlostí, která je přímo úměrná její vzdálenosti. Galaxie dvakrát vzdálenější od Mléčné

dráhy se od ní vzdaluje dvakrát vyšší rychlostí. Toto je tzv. **Hubbleův zákon** a platí pro každý vesmír, který se zvětšuje a přitom vypadá z každé galaxie stejně. Z toho vyplývá závěr, že i když pozorujeme, že se od nás ostatní galaxie vzdalují, nejsme středem vesmíru. Stejně pozorování totiž probíhá i na jiných galaxiích. Ostatní galaxie se od nich také vzdalují. K velkému třesku tudíž nedošlo v žádném konkrétním bodě, ale došlo k němu všude současně (Chown, 2010).

Dříve, než se začneme věnovat některým etapám ve vývoji od velkého třesku, které mají souvislosti s elementárními částicemi a stavbou hmoty, věnujme pozornost časové ose. Vzhledem k tomu, že náš život je příliš krátký v porovnání s věkem vesmíru, nemáme cit pro časové úseky. V publikaci (Fenwick, 2012), ve které se autor snaží srozumitelně a zároveň dostatečně vysvětlit dějiny vesmíru od velkého třesku po vznik člověka, je použito zajímavé porovnání jednotek času a délky. Zavedme obdobně následující převod časových údajů na délkové jednotky. Nechť jeden rok odpovídá délce jednoho milimetru. Potom platí následující převody:

Délková jednotka	Časová jednotka
1 mm	jeden rok
1 m	tisíc let
1 km	milion let
1 000 km	miliarda let

Takže současné stáří vesmíru, které je momentálně odhadované na 13,7 miliard let, odpovídá v této škále 13 700 km. Toto číslo už umíme porovnat s 80 mm, tj. s ekvivalentem přibližné střední doby života člověka.

Začněme okamžikem exploze a počátkem expanze. První, kdo myšlenku horkého počátku vesmíru publikoval (práce vyšla 1. 4. 1948), byl **George Gamow** a jeho spolupracovníci **Robert Hermann, Ralph Alpher a Hans Bethe**. Jejich teorie nebyla přijata odborníky na nukleosyntézu soustředěných kolem **Fredy Hoylea** vlídně. Sir **Fred Hoyle**, britský vědec, ji označil v radiu BBC jako **Big Bang**, což je pohrdavý termín použitý ve smyslu „prázdný sud nejvíce duní“.

Situace se zcela změnila po téměř 20 letech, kdy bylo objeveno **reliktní záření**. Toto záření vzniklo v závěrečné fázi Velkého třesku a je přímým důkazem horkého počátku vesmíru. Od této doby nikdo nepochybuje o Gamowově teorii. Paradoxně se uchytil i termín **Big Bang**. Sám Fred Hoyle později popíral, že název byl míněn pejorativně (negativně).

Jako **Velký třesk** jsou označovány dvě události. Někteří autoři tímto termínem popisují přímo okamžik $t = 0$, kdy náš vesmír vznikl. Jiní rozumí Velkým třeskem celou jednu etapu vývoje vesmíru od okamžiku vzniku do doby, kdy byl vesmír „starý“ asi 380 000 let. V tomto okamžiku

ku totiž dochází k tvorbě neutrálních atomů a oddělení záření od látky. Záření dále interaguje s látkou již jen sporadicky a z této doby se zachovalo ve formě **reliktního záření** (Havel, a další, 2013). Toto záření má charakter **záření absolutně černého tělesa** o teplotě 2,725 K a je **pozůstatkem (reliktem)** horkého počátku vesmíru.

Ve specializované literatuře zjistíme, že v okamžiku exploze dosáhla teplota hodnoty 10^{32} °C. V prvních několika mikrosekundách existovala veškerá hmota ve formě skupenství hmoty, které označujeme jako **kvarkově gluonové plazma**. Tento pojem je pro většinu čtenářů nový, proto si jej vysvětlíme.

Skupenství **kapalné, pevné a plynné** zná každý. Při zvyšování teploty může látka postupně projít těmito skupenstvími. Dalším zvyšováním teploty a tlaku lze narušit elektronové obaly a látka se stává **plazmatem**. Jsou v ní volné nosiče náboje, látka reaguje jako celek na vnější elektrická a magnetická pole a sama je schopna taková pole vytvářet. Jako celek je ale elektricky neutrální.

Přes 99 % látky je nyní ve vesmíru ve stavu plazmatu. Ať jde o hvězdy samotné, mlhoviny či výtrysky kvasarů. Na naší Zemi je v současné době plazma v menšině, nalezneme ho v ionosféře, v kanálech blesků a v polárních zářích nebo ve výbojkách či plazmových obrazkách.

Velmi podrobnou teoretickou analýzu stavu jaderné hmoty při výrazně vysokých teplotách provedl **E. V. Shuryak**. Navrhl pro toto skupenství název – **kvarkově gluonové plazma** (angl. zkratka **QGP**). Je to stav hmoty, která je složena pouze z **volných kvarků a gluonů**. Vyšel z analogie mezi fázovými přechody v jaderné hmotě a běžné hmotě. V jaderné hmotě přechází hmota složená z hadronů, ve kterých jsou kvarky a gluony uvězněny, ve hmotu složenou z kvarků a gluonů z hadronů uvolněných.

Pojmy **kvark, gluon a hadrony** si později podrobněji popíšeme. Nyní vystačíme s informací, že kvarky jsou nosiči hmoty, gluony drží tuto hmotu pohromadě a hadrony jsou složeny z několika kvarků. V kvarkově gluonovém plazmatu jsou částice tak blízko u sebe (méně než 10^{-15} m), že přestává působit silná interakce, hadrony se rozpadají a vytvářejí velkou směs kvarků a gluonů. V běžné hmotě jsou kvarky pevně svázané, v kvarkově gluonovém plazmatu jsou kvarky uvolněné.

Vraťme se ale na začátek. V následující expanzi po velkém třesku dochází k poklesu teploty **kvarkově gluonového plazmatu**. Hmota brzy po Velkém třesku je tvořena volnými kvarky a gluony. Mezi těmito částicemi můžeme dále nalézt **leptony a bosony jednotlivých interakcí**. Díky narušení symetrie se tvoří o trochu více hmoty než antihmoty. Asi deset mikrosekund po vzniku vesmíru se volné kvarky pospojovaly do dvojic a trojic a vytvořily tak **mezony a baryony**, které označujeme společným názvem **hadrony**. Tomuto procesu pak říkáme **hadronizace hmoty**.

Spolu s hadrony hmoty vznikají i hadrony **antihmoty** a v hustém prostředí nastává jejich **anihilace**. Anihilací se tedy většina směsi hmoty a antihmoty mění na **elektromagnetické záření (fotony)** a jen nepatrná část hmoty zůstává na tvorbu **galaxií, hvězd** a vůbec všech objektů

ve vesmíru. Termín **anihilace** (nihil = nic) není ale příliš přesný. Ve skutečnosti nejde o přeměnu částic v „nic“, ale v částice o **nulové klidové hmotnosti**, tedy v přeměnu ve **fotony**.

Nová struktura, kde se kvarky pohybují a vzájemně na sebe působí prostřednictvím gluonů, se nazývá **nukleon**. Jak si později ukážeme, je to je společný název pro **proton** a **neutron**. Objem nukleonu je 10^4 větší než objem kvarku. Po třech minutách poklesla teplota vesmíru na hodnotu 10^6 °C. Toto chladnutí vesmíru umožňuje spojování protonů a neutronů do jader vodíku a hélia. Přebytečné neutrony se rozpadají s poměrně malým poločasem rozpadu, takže po několika minutách od vzniku vesmíru již najdeme neutrony pouze vázané v atomových jádrech.

Přibližně 1 sekundu po vzniku vesmíru se vesmír stal průhledným pro částice zvané **neutrino**. Od tohoto okamžiku prostupují prostorem bez interakcí a stává se z nich neutrinové pozadí.

Nyní musí uběhnout 380 000 let (380 m), aby se k nukleonům přidala další částice – **elektron**. To už teplota vesmíru byla asi 3 000 °C. Kolem jednoho nukleonu se usadil elektron, ale ve vzdálenosti 10^5 krát větší, než je rozměr nukleonu. Mezi elektronem a nukleonem ale nic není. Obíhající elektron vytváří neproniknutelnou bariéru, která se chová jako ochranná vlna, silové pole, které brání průniku k nukleonu. Vzniklá nová struktura je později nazvána **atomem**.

Kombinací jednoho elektronu a nukleonu vzniká první objekt, který se ve vesmíru nejčastěji vyskytuje, a to **atom vodíku**. Nukleon, který je součástí atomu vodíku, je **proton**. Atom vodíku je tedy tvořen čtyřmi elementárními částicemi – třemi kvarky a jedním elektronem. Objem tohoto atomu je však 10^9 krát větší než objem jednoho kvarku, tzn., že došlo k navýšení objemu miliardkrát. Dalším atomem, který se ve vesmíru objevuje, je atom tvořený čtyřmi nukleony a dvěma elektrony. Čtyři nukleony však nejsou totožné. Dva jsou totožné s nukleony obsaženými v jádře vodíku a dva se nepatrně liší – nemají elektrický náboj. Tyto nukleony nazveme **neutrony**. Nový atom získá název **helium**. Objevují se další dva atomy - **deuterium** a **lithium**. Deuterium je tvořeno jedním protonem, jedním neutronem a jedním elektronem. Lithium je pak tvořeno třemi protony, čtyřmi neutrony a třemi elektrony.

Po 400 tisících letech (400 m) se hmota skládala výlučně z atomů vodíku, hélia, deuteria, lithia. Tyto atomy začaly následně vytvářet oblaky, z nichž se později utvářejí hvězdy. V této době byl vesmír vyplněn látkou o takové hustotě, že elektromagnetické záření velice často interagovalo s hmotou. Fotony neustále narážely do volných elektronů, byly absorbovány a následně zase vyzářeny. Foton v této době má velice krátkou dráhu.

Uvěznění elektronů ve strukturách atomu ale umožnilo volný pohyb **fotonů**, kvant elektromagnetického záření zodpovědného za viditelné světlo. Tím se dostáváme k novému druhu elementárních částic, tzv. **částicím silového působení**. Popišme nyní podrobněji **elementární částice** a **částice silového působení** v samostatných kapitolách, abychom později pokračovali v popisu vzniku hmoty.

2.2 Elementární částice

Standardní částicový model, který si vysvětlíme v kapitole 3.1.7, umožňuje popsat vše ve vesmíru pomocí částic. Jednou z jejich základních vlastností je takzvaný **spin**. Ten nemá přesnou obdobu v klasické fyzice, ale existuje několik možností, jak spin znázornit. Podle práce **Stephena W. Hawkinga** (Hawking, 2007) nás spin informuje o tom, jak částice vypadá z různých směrů. **Částici s nulovým spinem** si můžeme představit jako tečku – ze všech směrů se jeví stejně. Naopak pro částici se **spinem 1** platí, že vypadá stejně pouze pro otočení o plných 360° . Pro částici se **spinem 2** stačí otočení o 180° . Vedle těchto částic s celočíselným nebo nulovým spinem existují i částice, které nevyhlízejí stejně ani po celém jednom obratu. Je třeba je otočit dvakrát, tj. o 720° . Těmto částicím přísluší **spin $\frac{1}{2}$** .

Podle této teorie existují pouze elementární částice s **celočíselným (0, 1, 2) a poločíselným ($\frac{1}{2}$) spinem**. Vědci zjistili, že částice se **spinem $\frac{1}{2}$** tvoří **vše hmotné** kolem nás, tj. od hvězd a planet po nás samotné, a částice se **spinem 0, 1, 2** zprostředkovávají **silové působení** mezi částicemi se spinem $\frac{1}{2}$. První skupině se říká **fermiony** a patří tam např. kvarky, protony, neutrony, elektrony a druhá skupina se jmenuje **bosony** a patří sem např. fotony a gluony.

Jednou ze základních charakteristik **fermionů** je platnost **Pauliho vylučovacího principu**, který říká, že dvě částice téhož druhu v žádném kvantovém systému se nemohou nacházet v tomtéž stavu. Tento princip objevil rakouský fyzik **Wolfgang Pauli** v roce 1925 a v roce 1945 získal za tento objev Nobelovu cenu.

Částice s celočíselným spinem – **bosony** - se **nepodřizují vylučovacímu principu**. Proto počet částic, které se mohou vyměňovat, není omezen. Z tohoto důvodu může vzniknout velmi intenzivní silové působení.

Zjednodušeně můžeme elementární částice, které v současné době známe, rozdělit na dva základní typy:

- na částice, které jsou **součástí hmoty**,
- na částice, které **hmotě vládnou**.

K libovolné elementární částici existuje **antičástice**, která je rovněž elementární částicí a která má určité fyzikální charakteristiky shodné s danou elementární částicí a jiné fyzikální charakteristiky opačného znaménka, resp. směru.

Z kvarků a antikvarků se skládají další subatomární částice hmoty – **hadrony**.

Existují dva typy hadronů:

- **baryony** – jsou složeny ze tří kvarků (mezi ně patří například proton a neutron), a antibaryony – složeny ze tří antikvarků,
- **mezony** – jsou složeny z jednoho kvarku a jednoho antikvarku (mezi ně patří např. piony).

Podrobněji se k těmto novým složeným částicím uvedeným v tabulce 2.1 vrátíme v kapitole 3.1.7.

Tabulka 2.1 Nejznámější mezony a baryony složené z první generace kvarků (d, u).

mezony 1. generace				baryony 1. generace			
částice	stavba	název	spin	částice	stavba	název	spin
π^-	du'	pion	0	n	ddu	neutron	1/2
π^0	$dd'+uu'$	pion	0	p	uud	proton	1/2
π^+	ud'	pion	0	Δ^-	ddd	delta baryon	3/2
ρ^-	du'	róon	1	Δ^0	ddu	delta baryon	3/2
ρ^0	$dd'+uu'$	róon	1	Δ^+	duu	delta baryon	3/2
ρ^+	ud'	róon	1	Δ^{++}	uuu	delta baryon	3/2

Tabulka 2.2 Základní rozdělení elementárních částic

Elementární částice	spin 1/2	fermiony	kvarky	$u \cdot d \cdot c \cdot s \cdot t \cdot b$
			leptony	elektron · mion · tauon · elektronové neutrino – mionové neutrino – tauonové neutrino
	spin 0,1	bozony	foton · gluon · bosony W a Z	

Složené částice	hadrony	fermiony	baryony	nukleony	proton · neutron
				hyperony	$\Delta \cdot \Lambda \cdot \Sigma \cdot \Omega$
		bozony	mezony	pion · kaon · ro ...	

synchrotron, 172, 173
synchrotronové záření, 126, 136, 139,
140, 323

Š

štěpení jader, 76, 97, 141, 155, 179, 208

T

Taplinův dvoufázový dozimetr, 257
tauon, 19, 45
teorie ionizace v dutině, 267
tepelné neutrony, 143
termické ohnisko, 161
termoluminiscenční detektory, 258
termoluminiscenční dozimetr, 258, 273,
274
tetrakvark, 42
těžké nabitě částice, 123, 190
těžkovodní reaktor CANDU, 184
Tháles z Milétu, 62
Thomson, J. J., 29, 63, 72
Thomsonův model atomu, 29, 320
tkáňový váhový faktor, 237
tvorba elektron–pozitronového páru, 197

U

účinný průřez, 219
ultrachladné neutrony, 143, 144
umělá radioaktivita, 76, 106, 315
umělé radionuklidy, 154
umělé zdroje IZ, 147, 148, 154, 313
úvazek efektivní dávky, 239, 240, 302
- **ekvivalentní dávky**, 240

V

Van de Graaffův urychlovač, 167, 168
Velký třesk, 14, 15
velmi významné zdroje IZ, 146
vnitřní konverze, 102, 103, 104, 193, 212
voltampérová charakteristika, 248
vysokofrekvenční lineární urychlovač,
168
významné zdroje IZ, 146
vzrůstový faktor, 206, 207, 313

W

Widerøe, Rolf, 168
Wilsonova mlžná komora, 258, 259, 324

X

X-ray, 135, 140

Z

základní limity, 296, 297
zákon radioaktivní přeměny, 73, 112
záření alfa, 72, 128, 264, 308
- **beta**, 72, 90, 130, 131, 190, 192,
233, 251, 256, 257, 264, 279, 308
- **elektromagnetické**, 125, 132
- **gama**, 72, 75, 79, 100, 103, 104,
109, 122, 128, 131, 132, 133, 135, 148,
153, 173, 176, 180, 193, 195, 200, 207,
210, 225, 226, 232, 254, 257, 258, 264,
265, 272, 273, 274, 307, 308, 322, 324
- **neutronové**, 132
- **RTG**, 126, 136
- **X**, 72, 104, 214, 228
Zweig, George, 40

Doc. Ing. František Podzimek, CSc.

Radiologická fyzika - Fyzika ionizujícího záření

Online publikace ve formátu pdf

Vydala Data Agentura INFOPHARM, s.r.o.

1. vydání

2013

Počet stran 335

Copyright © František Podzimek, 2013

Grafika © František Podzimek, SQ Studio, s.r.o.

Cover © SQ Studio, s.r.o.

ISBN 978-80-87727-05-8