



Výfučení: Částicová ZOO

Od atomů k elementárním částicím

Myšlenka, že hmotu můžeme rozdělit na základní částice, je velmi stará, pochází už ze starověkého Řecka. Částice, tvořící různé prvky, byly prokázány v 19. století chemickými metodami a nazvány atomy. Ty byly dlouhou dobu považovány za nejmenší a dále již nedělitelné zlomky hmoty.

Model, ve kterém je atom nejmenší částicí, by ovšem byl velmi složitý, už jen kvůli velkému počtu prvků (co prvek, to jiný atom). Nakonec se tak zjistilo, že atom se skládá z velmi malého jádra, které má kladný elektrický náboj, a obalu, který má záporný, avšak za normálních podmínek stejně velký elektrický náboj. Každý prvek můžeme rozlišit jen na základě míry kladného náboje obsaženého v jádře. Vlastnosti jednotlivých prvků vyplývají ze struktury daného atomu. Podívejme se nejdříve blíže na to, jak se na tento fakt přišlo.

Už v roce 1897 objevil J. J. Thomson záporně nabitý *elektron* jako částici, která musí být lehčí než jakýkoli atom. To způsobilo první významnou pochybnost o tom, že by atomy byly nedělitelné. V novém století pak roku 1911 Rutherford na základě experimentu s ostřelováním zlaté fólie usoudil, že se veškerý kladný náboj atomu nachází ve velmi malém objemu uprostřed něj, v tzv. atomovém jádře. Nejlehčí takové jádro je jádro vodíku, které bylo přejmenováno na *proton*, a je také i částicí, která tvoří každé jiné atomové jádro. Dalším velkým problémem také bylo, že většina atomů prvků má jádro o zhruba dvojnásobné hmotnosti, než jakou má odpovídající počet protonů odvozený z elektrického náboje. To vědce postavilo před dvě možnosti. Buď je v jádru dvojnásobný počet protonů spolu s odpovídajícím počtem elektronů, anebo existuje nová elektricky neutrální částice – *neutron*, která jádru pouze přidává na váze. Neutron byl nakonec experimentálně prokázán až v roce 1932.

Pro shrnutí: v jádru se nachází protony, kladně nabitě částice, a neutrony, částice bez náboje. V obalu se pak nachází všechny elektrony se záporným nábojem. Atomy se většinou nacházejí ve stavu shodného počtu protonů a elektronů.

Obal zaujímá téměř veškerý prostor atomu, má ale velmi malou hmotnost. Elektrony se v něm nachází v různých energetických hladinách, které nazýváme orbitaly. Ty ale nevymezují dráhu elektronů, pouze určují pravděpodobnost, se kterou se elektron může v daném místě nacházet¹. Orbitaly označujeme podle rostoucí energie písmeny: *s*, *p*, *d*, *f*... , a nejlépe je možné princip hladin ilustrovat na orbitalu *s*, který je jádru nejbližší, a tudíž má nejmenší potenciální energii. Orbital *s* má tvar koule. Blízko středu této koule je pravděpodobnost na nalezení elektronu vysoká, zatímco ve velké vzdálenosti od středu je pravděpodobnost téměř nulová. Tam, kde už můžeme pravděpodobnost zanedbat, uvažujeme hranice velikosti atomu. V konkrétních číslech jsou všechny atomy velké zhruba jednu desetinu nanometru. U elektronů nebyla zatím objevena žádná vnitřní struktura, z tohoto důvodu je označujeme jako *elementární* neboli základní částice.

¹V tuto chvíli jde o pojmosloví *kvantové mechaniky*. V souladu s jejími zákony bychom mohli přesněji napsat: „se kterou jej můžeme v daném místě změřit.“

Jádro atomu se nachází v jeho středu. Má kulový tvar a je velmi malé. Kdybychom si jádro představili jako hlavičku špendlíku položenou uprostřed fotbalového hřiště, celý atom by pak velikostně odpovídal samotnému fotbalovému stadionu. I přes jeho velikost se v jádru nachází téměř veškerá hmotnost atomu.

Více o struktuře atomu a uvedené historii jejího výzkumu si můžete přečíst v našem posledním Výfučení 4. ročníku *Atomů*.²

Čtyři interakce

Nyní si uděláme krátkou odbočku. Jak jistě víte, základním hnacím motorem, který v přírodě uvádí věci do pohybu, je síla. Síla působí například, když maminka tlačí kočárek nebo když je auto poháněno tažnou silou motoru. Sil známe v našem okolí mnoho druhů (třecí, odporová, vztlaková...), ale jakákoliv síla se dá rozdělit do jedné ze čtyř kategorií podle svého původu. Těmto kategoriím říkáme čtyři základní interakce nebo síly a nyní uvedeme příklady každé z nich.

V běžném životě se nejčastěji setkáváme s *elektromagnetickou silou*. Ta, jak je již z názvu patrné, zodpovídá za jevy spojené s elektřinou a magnety, ale i za chování elektronového obalu a tedy za chemické vlastnosti látek. Díky elektromagnetické síle se například elektrony v našem těle odpuzují s elektrony v židli, na které sedíte, a vy tak nepropadnete dolů. Druhou nejběžnější silou je *gravitační síla*. Ta způsobuje nejen to, že jsme přitahováni k zemi a Země je přitahována ke Slunci, ale díky ní se přitahují každé dva hmotné předměty. Tato síla je však oproti elektromagnetismu velmi slabá,³ a tak ji běžně pozorujeme jen u velmi hmotných těles. U malých částic je tak slabá, že ji můžeme zanedbat. Se zbylými dvěma druhy sil se v běžném životě příliš často nesetkáváme. Nazývají se *silná a slabá jaderná síla* a mají velký vliv pouze na vzdálenostech odpovídajících rozměru jádra atomu. Přemýšlíte, proč zůstane jádro atomu pohromadě, když jsou v něm jen kladné a neutrální částice, které by se měly odpuzovat? Je to díky silné síle, která je přesto drží. Slabá síla je pak zodpovědná například za radioaktivní beta rozpad, kdy se v jádře mění neutrony na protony a z jádra vyletují elektrony.

Zpátky do atomového jádra

Zde mezi protony působí všechny známé síly neboli *interakce*. Silná a slabá jaderná interakce, které působí významně jen na krátkou vzdálenost právě o rozměru jádra, elektromagnetická interakce, která řídí fyziku atomového obalu a tím i většinu jevů, které v praktickém životě pozorujeme, a samozřejmě také gravitace, která působí přitažlivě na všechny hmotné částice, ale je na našich vzdálenostech velmi slabá, a tak ji v mikrosvětě nemusíme brát příliš v potaz. Proto ji i ve zbytku Výfučení budeme zanedbávat. Neutrony nemají náboj, a tak na ně elektromagnetická interakce nepůsobí. Všechny ostatní na ně ale působí. Protony i neutrony, na rozdíl od elektronu, mají vnitřní strukturu. Jsou tvořeny ještě menšími částicemi – *kvarky*.

²http://vyfuk.mff.cuni.cz/_media/ulohy/r4/vyfucteni/vyfucteni_6.pdf

³Vždyť malý magnet na naší lednici přemůže celou zeměkouli!

Kvarků známe několik druhů. Proton je tvořen dvěma kvarky up (u) – nahoru – a jedním kvarkem down (d) – dolů – a neutron dvěma kvarky down (d) a jedním up (u). Vzhledem k tomu, že hmota, kterou známe, je tvořena atomy, na popis běžné hmoty by nám stačily tři elementární částice – kvarky down a up a elektron. Kvark down má náboj $-\frac{1}{3}e$ a kvark up má náboj $+\frac{2}{3}e$, kde e značí elementární náboj (kladný náboj o velikosti náboje elektronu⁴). Náboj částice tvořené více kvarky získáme jednoduše sečtením nábojů jednotlivých kvarků. To si můžeme ukázat na příkladu protonu a neutronu:

$$-\frac{1}{3}e + \frac{2}{3}e + \frac{2}{3}e = +1 \text{ epro proton (dva up a jeden down)}$$

$$-\frac{1}{3}e - \frac{1}{3}e + \frac{2}{3}e = 0 \text{ epro neutron (dva down a jeden up)}$$

Celkově však existuje více, konkrétně šest kvarků, které jsou uspořádány do tří tzv. *generací* podle hmotnosti. V každé generaci se nachází jeden kvark s nábojem $-\frac{1}{3}e$ a druhý s nábojem $+\frac{2}{3}e$. V první generaci se nachází již zmiňované kvarky down ($-\frac{1}{3}e$) a up ($+\frac{2}{3}e$), ve druhé jsou kvarky strange (podivný) ($-\frac{1}{3}e$) a charm (půvabný) ($+\frac{2}{3}e$) a ve třetí jsou kvarky bottom (spodní) ($-\frac{1}{3}e$) a top (svrchní) ($+\frac{2}{3}e$). Aby originálních pojmenování nebylo málo, částicovní fyzici neříkají jen, že jde o nudných „6 druhů“ kvarků, ale rovnou o 6 různých *vůní* (flavours) kvarků.

Zatímco pro názvy elektronu, protonu a neutronu byly víceméně logické důvody (vždy se jedná o něco + ion, kde ion(t) je ve fyzice používaný pojem pro nabitou částici), názvy kvarků vznikly čistě podle libovůle fyziků. Jedná se zkrátka již o tak abstraktní fenomén, že jej nelze pojmenovat podle nějaké pozorovatelné vlastnosti.

Jak jsme uvedli, neelementární částice, proton, je tvořen kvarky *uud* (up, up, down) a neutron kvarky *udd* (up, down, down). Při vysokých energiích (při zvláštních dějích ve vesmíru nebo ve speciálních pozemských experimentech) ale může vznikat řada dalších částic tvořených ještě jinými kvarky. Pro zajímavost je například částice „záporný hyperon omega“ Ω^- tvořena třemi *s* (strange) kvarky, nebo třeba „dvojitě kladný delta-baryon“ Δ^{++} má všechny tři kvarky horní: *uuu*. Existují také částice tvořené jen dvěma, nebo třeba čtyřmi kvarky. Pojem hmotnost je také zavádějící, protože ne vždy to, co je elementární, musí také být nejlehčí. Například kvark *t* je více než 184krát těžší než proton!

Jak již bylo zmíněno, elektron je také elementární částice. Nepatří ovšem mezi kvarky, nýbrž ho zařazujeme do skupiny *leptonů*. Na rozdíl od kvarků, na leptony nepůsobí silná jaderná síla, ale pouze slabá interakce a v případě nabitých částic síla elektromagnetická. Stejně jako mimo kvarky up a down existují ještě těžší kvarky, které se ale běžně nevyskytují, tak existují i částice podobné elektronu, které jsou těžší a nenajdeme je tak často. Jsou to částice *mion* (μ) a *tauon* (τ). Obě tyto částice nesou náboj stejný jako elektron ($-1 e$).

⁴ Asi jste se učili, že elementární náboj je nedělitelný. Kvarky však mohou mít jeho zlomek, protože se nikdy nevyskytují samostatně, a složené částice v přírodě mají náboj celočíselného násobku e .

Kromě těchto tří částic mezi leptony ještě řadíme *neutrino*. Ta vznikají při jaderných reakcích, a protože nemají elektrický náboj, reagují s hmotou pouze pomocí slabé interakce. Jejich detekce je tudíž velmi obtížná. I neutrino se vyskytují ve třech generacích a jsou pojmenována podle již zmíněných třech leptonů, se kterými vznikají – *elektronové*, *mionové* a *taunové neutrino*. Dlouho se předpokládalo, že neutrino jsou nehmotná, takže se pohybují rychlostí světla. Na konci dvacátého století ale byly objeveny tzv. *oscilace neutrín*. Oscilace neutrino je změna jeho typu (například z elektronového na mionové a podobně). K té by ale při pohybu rychlostí světla nemohlo dojít, protože při dosažení této rychlosti se pro těleso zastavuje podle teorie relativity čas. Neutrino tedy mají nenulovou, i když velmi malou hmotnost. Kvůli tomu se nepohybují rychlostí světla, a tudíž může docházet k jejich oscilacím, za jejichž experimentální prokázání dostali v roce 2015 Takaaki Kadžita a Arthur McDonald Nobelovu cenu.

Na neutrínech je také zajímavé, jak velmi vzácně interagují. Většina neutrín proletí Zemí bez toho, aby s jakoukoliv částicí reagovala. Protože vznikají například při jaderných reakcích přeměny vodíku na helium v našem Slunci, přší jich tak na celý náš svět nesmírné množství. Jedním centimetrem čtverečním čehokoli na naší planetě projde za sekundu okolo 65 miliard neutrín, aniž bychom si toho jakkoli povšimli, nemáme-li obrovské speciální detektory.

	generace	→	bosony		
neutrino	ν_e	ν_μ	ν_τ	W	W
leptony	e	μ	τ	Z	Z
kvarky	u	c	t	g	gluon
	d	s	b	γ	foton
	+ antičástice				

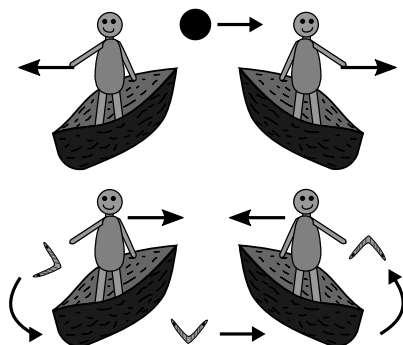
Obr. 1: Přehled elementárních částic kromě Higgsova bosonu, který se od ostatních bosonů poněkud liší, proto se jím v tomto Výfučení nezabýváme. Připomínáme, že proton a neutron jsou složené částice, tudíž v tomto přehledu nejsou uvedeny.

Za zrcadlem

Všechny částice, které byly v tomto Výfučení zatím zmíněny, mají své tzv. *antičástice*. Antičástice má stejnou hmotnost jako její částice, ale opačný elektrický náboj. Antičástice může vznikat v páru s částicí při interakci jiných částic (například z fotonu může vzniknout elektron a *pozitron* (antičástice elektronu) nebo třeba při jaderných reakcích (vznik pozitronu při tzv. β^+ radioaktivní přeměně nebo například vznik *elektronového antineutrino* při radioaktivní přeměně β^-).

Všechny doposud zmíněné částice jsou částicemi tvořícími hmotu. Ty zařazujeme do skupiny *fermionů*. Existuje ale ještě druhá skupina částic – *bosony*. Bosony netvoří hmotu, ale řídí její chování – chování fermionů. Existují čtyři bosony, které zprostředkovávají čtyři základní síly, které už byly v tomto Výfučení dříve zmíněny. Jedná se o *foton* (bez hmotnosti a náboje⁵) pro elektromagnetickou sílu, *gluon* (rovněž bez hmotnosti) pro silnou jadernou sílu a *bosony W* (může mít kladný nebo záporný náboj) a *Z* (ten je neutrální) pro slabou jadernou sílu. Stejně jako fermiony, i bosony mají své antičástice. Většina bosonů je ale zároveň i svými antičásticemi. Výjimkou je boson *W*. Ten totiž může mít kladný nebo záporný náboj. Boson W^+ se pak mění na W^- a naopak. Jak jste si možná všimli, zatím v tomto Výfučení nebyla zmíněna částice, která by zajišťovala gravitaci. Obecně je předpokládáno, že takovou částicí by měl být *graviton*. Ten by měl být nehmotný, díky čemuž by se gravitace šířila rychlostí světla a měla neomezený dosah. Graviton ovšem ještě nebyl objeven, a tak se uvádí pouze jako hypotetická částice.

Uvedeným bosonům se také říká *intermediální částice* – fungují jako „poslové“ fyzikálních interakcí a skrze ně si ostatní částice „povídají“, jak si mezi sebe rozdělí hybnost, energii, náboj a veškeré další veličiny v souladu se známými zákony. Působení elektrické síly tak například můžeme popsat jako výměnu fotonů mezi nabitými částicemi. Můžete si to představit, jako by si lidé na lodičkách házeli míč a v důsledku toho se od sebe oddalovali. Jak je to ale s přitažlivou silou? Stačí si místo míče představit bumerang.



Obr. 2: Ilustrace silového působení výměnou intermediálních částic, přitažlivá a odpudivá interakce.

⁵No opravdu, světlo nic neváží! Proto se také šíří svou rychlostí. Všechny nehmotné částice se mohou pohybovat výhradně jen rychlostí světla.

Dál než světlo

Jak to ale všechno víme? Elementární částice jsou tak malé, že je nevidíme ani pod tím nejlepším mikroskopem. Není to tím, že bychom měli špatné mikroskopy, je to vlastnost přírody, která říká, že bez pomoci nevidíme menší objekty, než je vlnová délka záření, které k tomuto pozorování používáme. Můžeme si to představit jako když měříme svinovacím metrem – nelze rozeznat menší vzdálenosti, než jsou jeho nejmenší dílky. Obvykle je tedy světlo náš „metr“. Díky tomu např. rádiový signál „nevidí“ člověka a vy tak naladíte rádio i když mezi vámi a zdrojem někdo nebo něco stojí (vlnová délka signálu je větší než velikost překážky). Světelným zářením můžeme vidět jen předměty nejméně o velikosti v řádu stovek nanometrů (což je vlnová délka viditelného světla). K tomu, abychom mohli vidět věci ještě menší, potřebujeme základní znalosti z *kvantové mechaniky*.

Když ve fyzice pozorujeme jevy, které se odehrávají v malých škálách (tím je myšleno velikosti řádu jednotek atomových poloměrů), zjistíme, že se dějí věci, které bychom v normálním životě nečekali. Popsáním světa na malých škálách se tedy věnuje speciální oblast fyziky jménem kvantová mechanika. Vysvětluje zvláštní jevy jako např. kvantové tunelování, kdy částice projde stěnou, Heisenbergovy relace neurčitosti, nebo kvantové provázání. Chcete-li vědět, proč se kvantová fyzika jmenuje kvantová, nakoukněte do druhého Výfučení sedmé série.⁶

Nejzákladnější princip kvantové fyziky je tzv. *vlnově-částicový dualismus*. Spočívá v tom, že každá částice se někdy chová jako vlna (např. jako vlna, která vznikne hozením obláčku do jezera) a někdy jako bodová částice. Každé částici můžeme tak přiřadit tzv. De Brogliovu vlnovou délku, kterou označme λ . Vlnová délka dané částice je tím kratší, čím vyšší má částice hybnost. Vlnovou délku tedy vypočítáme jako

$$\lambda = \frac{h}{p},$$

kde p je hybnost částice (pro částice mnohem pomalejší, než je rychlost světla můžeme použít klasický vzorec $p = m \cdot v$) a h je Planckova konstanta, která má hodnotu $h = 6,636 \cdot 10^{-34}$ J·s a je jednou ze základních konstant přírody.

Pro pozorování malých objektů, jako jsou viry nebo velké molekuly, můžeme tedy jako metr použít nějaké částice s jejich vlnovou délkou. Toho využívají elektronové mikroskopy, protože elektrony mají díky své vyšší hybnosti kratší vlnovou délku. Pravidlo, že čím vyšší energie záření, které používáme k pozorování, tím kratší vlnová délka (tím menší dílky na metru) a tím menší objekty můžeme vidět, je také základní myšlenkou urychlovačů.

Urychlovače částic slouží ke studiu mikrosvěta a jejich účelem je urychlit skupinu částic v detektoru nazývanou *svazek* na co nejvyšší energii tak, aby měly co nejkratší vlnovou délku. Urychlovače fungují tak, že nabitou částici urychlují pomocí elektrického pole, které na ni působí silou úměrnou jejímu náboji. Protože k urychlení částic na vysoké energie je musíme urychlovat opravdu dlouho a částice získají rychlosti blízké rychlosti světla, potřebovali bychom mít urychlovače velmi dlouhé. To by bylo velmi nákladné a prakticky neproveditelné, proto jsou u nejvýkonnějších urychlovačů částice magnetickým polem stáčeny, aby obíhaly po kruhu.

⁶http://vyfuk.mff.cuni.cz/_media/ulohy/r7/vyfucteni/vyfucteni_2.pdf

Pak můžeme mít kruh mnohem menší a částice se mohou pohybovat vysokou rychlostí. Velikost kruhu je ale limitovaná silou magnetů. Čím chceme mít při dané energii menší kruh, tím musíme mít silnější magnety. Kvůli tomu jsou současné nejvýkonnější urychlovače velmi velké, protože silnější magnety aktuálně neumíme vyrobit.

Jak ale určovat energii protonů kolujících po urychlovači, když částice mají velmi malé hmotnosti⁷ a velmi vysokou rychlost blízkou rychlosti světla? Pro pohodlnost se v mikro-

světě používá jednotka energie zvaná *elektronvolt*, značka eV. Když totiž napětím jednoho voltu urychlíme elektron nebo částici s elementárním nábojem, tak bude mít energii přesně jeden elektronvolt⁸ a to je pohodlné.⁹ Převedením na klasické jednotky tedy zjistíme, že $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot \text{V} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Energie v urychlovačích jsou však na mikrosvět opravdu velké (i když pro náš běžný svět jsou titěrné), používáme tedy násobné jednotky, především megaelektronvolt MeV (předpona mega znamená milion, tedy 10^6), gigaelektronvolt GeV (předpona giga znamená miliardu, tedy 10^9) a teraelektronvolt TeV (předpona tera znamená bilion, tedy 10^{12}).

Závěr

V tomto Výfučení jste se mohli seznámit s takzvanými elementárními částicemi. Ačkoliv je jich docela dost a jedná se tedy o takovou procházku ZOO s mnoha exponáty, jde o současný nejlepší model světa. Cesta k této skupince byla velmi dlouhá a náročná, protože začátkem éry urychlovačů se objevilo mnoho a mnoho částic, které nemůžeme uspořádat podobně přehledně jako například prvky v periodické soustavě. Zjištění, že takové částice nejsou základní, ale skládají se z ještě menších částí, dalo mnoho práce. Vytvoření standardního modelu zabralo několik desetiletí dvacátého století. Přesto však dnes víme, že náš model není úplný. Především proto, že nezahrnuje gravitaci, temnou hmotu ani temnou energii a nepředpovídá ani oscilaci neutrin.

Aleš Opl

ales@vyfuk.mff.cuni.cz

Kateřina Rosická

kackar@vyfuk.mff.cuni.cz

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported. Pro zobrazení kopie této licence navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.

⁷Proton má hmotnost asi $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg a elektron $9,11 \cdot 10^{-31}$ kg.

⁸Využíváme vztahu $W = E = Q \cdot U$.

⁹Protože nemusíme počítat relativistickou energii, jen vynásobíme napětí na urychlovači a náboj částice.