

Rozhledy matematicko-fyzikální

Zdeněk Hubáček
Mionový urychlovač

Rozhledy matematicko-fyzikální, Vol. 97 (2022), No. 4, 36–43

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/151638>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2022

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



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

Mionový urychlovač

Zdeněk Hubáček, FJFI ČVUT, Praha

Úvod

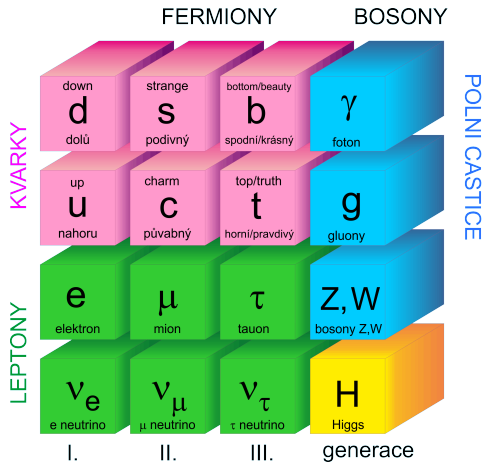
Urychlovače částic slouží v částicové fyzice k dodání kinetické energie a následnému srážení částic. Produkty vzniklé v těchto srážkách poskytují fundamentální informace o struktuře hmoty a o zákonitostech mikrosvěta. Velký hadronový urychlovač [1] (Large Hadron Collider (LHC)) v Evropské laboratoři pro částicovou fyziku CERN je největší vědecký přístroj, který byl kdy postaven. Ve srážkách částic na tomto urychlovači byl poprvé pozorován Higgsův boson, poslední chybějící elementární částice ve Standardním modelu, teorii popisující chování částic v mikrosvětě. V současnosti probíhají diskuze o tom, jaký urychlovač by ho měl v budoucnosti doplnit. Jednou z možných alternativ by mohl být urychlovač mionů, těžších sourozenců elektronů.

Je vůbec možné takový urychlovač zkonstruovat? V následujícím textu popíšeme miony, urychlovače částic a probereme výhody a nevýhody potenciálního urychlovače mionů.

Mion

Mion je jednou z elementárních částic, které známe. Elementární částice obecně dělíme podle jejich vlastností. Základními stavebními kameny hmoty jsou leptony a kvarky, které nazýváme fermiony, tj. částice s poločíselným spinem (např. $1/2$). Fermiony se navzájem ovlivňují pomocí 4 druhů interakcí, gravitační, elektromagnetickou, slabou a silnou jadernou. Tyto síly jsou zprostředkovány výměnou interakčních částic, tzv. bosonů, částic s celočíselným spinem (foton pro elektromagnetickou, bosony W a Z pro slabou jadernou a gluony pro silnou jadernou interakci, viz. obr. 1). Gravitační interakci nebudeme na úrovni elementárních částic uvažovat. Kvarky, jediné elementární fermiony, které interagují silně, spolu dohromady mohou vytvořit mezony (pár kvark–antikvark) nebo hadrony (z trojice kvarků, sem patří například proton a neutron). Mezi leptony (které interagují elektromagneticky nebo slabě) patří elektron, právě mion, τ -lepton a ke každému jeho neutrino. Mion je tedy něco jako těžší sourozenec elektronu – ve většině ohledů se chová úplně

stejně jako elektron, jen jeho hmotnost je zhruba 200krát větší. Díky své podobnosti může mion například nahradit elektron v atomovém obalu. Kvůli své hmotnosti takový mion obíhá blíže atomovému jádru (v kvantově mechanickém popisu přesněji řekneme, že pravděpodobnost jeho výskytu v blízkosti jádra je vyšší) a tím pádem i tyto „exotické“ atomy mohou mít i jiné chemické vlastnosti. Například exotický atom odvozený od normálního atomu helia ${}^4\text{He}$ (kde 4 udává hmotnostní číslo – 2 protony a 2 neutrony, protože hmotnost elektronů vůči nim je zanedbatelná) by mohl být vtipně přejmenován na ${}^{4,1}\text{He}$.



Obrázek 1: Částice Standardního modelu, převzato z [2]

Mion byl objeven v roce 1936 Carlem D. Andersonem a Sethem Nedermeyerem při zkoumání kosmického záření dopadajícího z vesmíru na Zemi. Při průchodu částic magnetickým polem pozorovali dráhy částic zakřivené jinak, než by odpovídalo v té době známým částicím. Poloměr zakřivení dráhy v magnetickém poli je závislý na elektrickém náboji částice a její hmotnosti. Za předpokladu, že by tato nově pozorovaná částice měla stejný elektrický náboj jako elektron, by její hmotnost musela být výrazně větší než hmotnost elektronu, ale zároveň o dost menší než hmotnost protonu. Její původní název byl mesotron – ve smyslu střední. Zároveň v té době existoval první model silné interakce mezi protony a neutrony. V tomto modelu Hideki Yukawa předpokládal, že tato interakce je zprostředkována částicí, kterou nazval mezon a jejíž hmotnost by zhruba odpovídala tomuto nově pozorovanému mesotronu. Postupně se

ale zjistilo, že tento mesotron nemá správnou hmotnost a jde tedy o dvě různé částice. Yukawův mezon byl pojmenován jako mezon π (pion) a mesotron jako mezon μ (mí, anglicky mu). A jelikož se přišlo na to, že mezon μ ani neinteraguje silně a nejde proto o mezon, byl nakonec přejmenován na mion (anglicky muon).

Mion je tedy lepton, elementární částice, která nemá vnitřní strukturu. Stejně jako elektron interaguje elektromagneticky a slabě, na rozdíl od něj ale nejde o stabilní částici. Mion se rozpadá, pomocí slabé interakce, jeho střední doba života je $2,2 \mu\text{s} = 2,2 \cdot 10^{-6}$ s. Tento čas, z našeho pohledu zanedbatelný okamžik, je obrovský z pohledu fyziky elementárních částic, kde typické časy mohou být 10^{-23} s, a je způsoben tím, že jde o slabou jadernou interakci. Vyvstává tudíž otázka, jestli je možné vůbec uvažovat o stavbě urychlovače mionů, když se miony během zlomku sekundy rozpadají? Vysvětlení toho, že to v principu možné je, a i vysvětlení toho, jak jsme vlastně mohli miony na zemském povrchu pozorovat, přináší Einsteinova speciální teorie relativity. Miony jsou produkovány, když přilétávající částice kosmického záření (např. protony) interagují s atomy ve vyšších vrstvách atmosféry. Při těchto interakcích vznikají například piony, ty se rozpadají a při jejich rozpadech vznikají miony. Tyto miony mají rychlost blízkou rychlosti světla, ale i tak by se jich polovina měla za $1,5 \mu\text{s}$ rozpadnout – podobně jako u radioaktivního rozpadového zákona – některé uletí jen metry, jiné stovky metrů, po kilometru je jich zhruba pětina. Speciální teorie relativity předpověděla a naše pozorování potvrzují tzv. dilataci času, tj. to, že výše zmíněná střední doba života platí v klidové soustavě mionu, zatímco ve vztažné soustavě spojené se Zemí pozorovatel vidí letící mion žít déle.

Miony jsme původně pozorovali z kosmického záření, ale podobným způsobem jsme se je naučili produkovat i na Zemi. Vezmeme například protony, urychlíme je na dostatečnou energii a necháme je narazit do vhodného terče. Při těchto interakcích budou vznikat například piony. Vhodným magnetickým polem bychom si je mohli usměrnit a počkat, až se piony rozpadnou, a vybrat si z jejich rozpadů právě miony. Ty bychom následně urychlovali v mionovém urychlovači a nechali je srážet s dalšími částicemi. Experimentální výzvou ale je, jestli toto dokážeme udělat efektivně – dostatečně rychle a v dostatečném množství.

Nová fyzika za Standardním modelem

Experimentální motivací k budování nových, výkonnějších urychlovačů je objevit nové částice nebo fyzikální jevy, které jsme zatím nepo-

zorovali nebo nedokážeme popsat pomocí teorie Standardního modelu. Ta je jednou z nejúspěšnějších vědeckých teorií. Přestože vypadá, že dokáže popsat většinu jevů ve srážkách, které dokážeme v laboratoři vytvořit, víme, že nejde o tzv. finální teorii. Standardní model obsahuje zhruba dvacet parametrů, které sám není schopen vysvětlit a my je musíme dodat z experimentu. V tzv. redukcionistickém pohledu doufáme, že objevíme ultimátní teorii, která by měla jednu částici, jeden fyzikální zákon, případně jednu rovnici. V širším pohledu hledání této teorie ale můžeme Standardní model chápat jako přibližnou, efektivní teorii, která při energiích, které jsme dnes schopni vytvořit, výborně aproximuje tuto zatím neznámou teorii.

Fascinující otázkou ale zůstává, jaké nové jevy a částice se mohou vyskytovat při energetických škálách až po tzv. Planckovu energii $E_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c^5 / G} = 1,96 \cdot 10^9 \text{ J}$ (v mikrosvětě jde o energii v podstatě o 15 řádů vyšší než umíme prozatím vyrobit). Za předpokladu, že se nám povede dostatečně urychlit částice, tak bychom při srážkách těchto částic mohli vytvořit potřebnou hustotu energie k vytvoření nových, těžkých částic z tohoto intervalu a tím se pokusit zaplnit chybějící místa.

Urychlovače částic

Využití urychlovačů je široké, od základního výzkumu v částicové fyzice, po aplikovaný výzkum ve studiu materiálů, v chemii, biologii až po využití v medicíně. V tomto článku se ale budeme zabývat jejich využitím ve fyzice elementárních částic.

Proč tedy potřebujeme nové a výkonnější urychlovače? Chceme zkoumat nové a neznámé jevy, které jsme doteď pozorovat nemohli. To, že jsme takové jevy prozatím nepozorovali, může být způsobeno tím, že je tzv. účinný průřez produkce těchto jevů (přeneseně pravděpodobnost, že daný jev nastane) hodně malý. Pak by to znamenalo, že bychom museli na daný proces hodně dlouho čekat (experiment – srážku mnohokrát opakovat). Nebo je účinný průřez daného jevu přímo nulový, daný proces nemůže fyzikálně nastat – chceme vyprodukovat novou částici s určitou hmotností M_X , ale nemáme dostatečně výkonný urychlovač – dostatek energie k vyprodukování částice X . Einsteinova populární rovnice $E = mc^2$ poukazuje na ekvivalenci hmoty a energie. Ze zákonů zachování energie a hybnosti pak vyplývá, že musíme mít v těžišтовém systému srážky dostatek energie k vyprodukování nové částice X . Z Einsteinovy teorie také plyne, že při urychlování částic nemůžeme překročit rychlost světla ve vakuu, takže v případě urychlovačů částic většinou neříkáme

rychlost částice, která může být např. $0,9999c$, ale udáváme (kinetickou) energii, na kterou jsme částice urychlili.

Urychlovače částic podle typu urychlovaných částic můžeme rozlišit na leptonové a hadronové. Urychlovače obecně urychlují elektricky nabitě částice pomocí elektrického pole – pole na částici vyvíjí sílu a tím ji urychluje. Podle typu a vlastností tohoto elektrického pole bychom mohli urychlovače dále rozlišovat, ale prozatím bude stačit, že nabitá částice (s elektrickým nábojem rovným velikosti elektrického náboje elektronu) získá kinetickou energii $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, když projde rozdílem elektrického potenciálu 1 V . Jakkoliv se může zdát energie v J malá, z pohledu elementárních částic jde o obří energii a vytvořit takový rozdíl potenciálů není triviální, nemůžeme si představit, že by bylo možné urychlit částici na takovou energii na krátkém úseku – místo toho potřebujeme urychlovací elementy skládat nějakým způsobem za sebe a částice urychlovat postupně. Důležitým parametrem urychlovače pak bude urychlovací gradient. V případě urychlovače LHC dosahují urychlovací prvky gradientu zhruba 5 MV/m . To je důvod, proč je urychlovač LHC kruhový, místo stavění jednotlivých urychlovacích prvků za sebe (urychlovač obdobných parametrů by musel mít zhruba 1000 kilometrů) necháme částici oběhnout kruh, a když se dostane zpět do urychlovacího prvku, tak postupně získá další a další kinetickou energii. Tyto urychlovací prvky tvoří jen malou část celkové délky urychlovače, při jednom jeho oběhu získá proton asi 16 MeV energie.

Začněme urychlovači leptonů: například v tunelu, kde se teď nachází urychlovač LHC, se dříve nacházel urychlovač Large Electron-Positron Collider (LEP), který urychloval a srážel elektrony s pozitrony (antičástice elektronu). Urychlování elektronů má ale své technologické limity. Abychom udrželi nabitou částici obíhat v kruhovém urychlovači, je potřeba silných magnetů, které dráhu částice zakřivují. Tím, že na částici působí tato magnetická síla, částice ztrácí část své energie pomocí takzvaného synchrotronového záření. Bohužel tato energie závisí nepřímo úměrně na čtvrté mocnině hmotnosti částice (energetické ztráty elektronu urychleného na stejnou energii v urychlovači o stejném poloměru jsou 10^{13} krát větší než obdobné ztráty u protonu), takže v určitý okamžik už bychom elektronu dodali stejně energie, kterou by vzápětí zase ztratil. Synchrotronové záření může být velmi vhodné například pro zkoumání vlastností materiálů, ale z pohledu částicového fyzika je energeticky nemožné urychlit elektrony na dostatečně vysoké energie v kruhovém urychlovači.

Hadronovým urychlovačem je pak například výše zmiňovaný urychlovač LHC, který je v současnosti nejvýkonnějším urychlovačem na světě. Tento urychlovač umožňuje urychlovat protony (případně i těžší jádra některých prvků) na energie až $6,5 \text{ TeV} = 6,5 \cdot 10^{12} \text{ eV} = 1,04 \cdot 10^{-6} \text{ J}$. Nevýhodou hadronového urychlovače je to, že srážíme objekty, které samy o sobě nejsou elementární, tj. v každé srážce máme něco navíc – zbytky protonů, které musíme být schopni odfiltrovat od potenciálně zajímavějšího signálu, a jen zlomek celkové energie srážky je k dispozici k produkci nových částic.

Budoucí urychlovače

Vymyšlení a vybudování těchto urychlovačů je nesmírně náročný problém. Ať už z pohledu vědeckého, tak i inženýrského a v neposlední řadě i finančního. Pojďme se podívat na některé z budoucích plánů, kde by urychlovač mionů mohl být vhodnou alternativou.

Magnety, které udržují částice v kruhové dráze urychlovače LHC, jsou elektromagnety, kde proud je veden supravodivými vodiči. Těmi protéká elektrický proud až $13\,000 \text{ A}$ a musí být chlazený na teplotu $-271 \text{ }^\circ\text{C}$. Jejich magnetické pole je přes 8 T (magnet na ledničku má zhruba $0,001 \text{ T}$, magnetické pole Země je $25\text{--}65 \mu\text{T}$). Pokud bychom chtěli dát budoucí výkonnější urychlovač do tunelu po urychlovači LHC (obvod přibližně 27 km), potřebovali bychom ještě daleko silnější magnety. Výhledem do budoucna jsou tzv. vysokoteplotní supravodiče, které by nemusely potřebovat chlazení kapalným heliem, ale mohly by fungovat při teplotách kapalného dusíku ($-196 \text{ }^\circ\text{C}$) nebo vyšších. Další alternativou je vybudování většího tunelu – v případě projektu Budoucího kruhového urychlovače (Future Circular Collider, FCC) se v CERN plánuje vybudování tunelu až 100 km dlouhého. Předtím, než by se takový tunel budoval, by mohlo být výhodnější postavit menší lineární urychlovač elektronů. Diskutovanými projekty jsou například Mezinárodní lineární urychlovač (International Linear Collider, ILC) [4], případně Kompaktní lineární urychlovač (Compact Linear Collider, CLIC) [5]. V obou případech i tak půjde o lineární urychlovače dlouhé až desítky kilometrů.

Pokud bychom chtěli udělat urychlovač podobného typu menší, tak bychom museli být schopni vyvinout urychlovací prvky s vyšším urychlovacím gradientem. Zde je ale v případě standardního urychlování technologický limit v řádu 100 MV/m . Jinou potenciální možností se zabývá urychlování částic v plazmatu. Plazma je skupenství hmoty, kde je plyn ionizován, rozdělen na elektrony a ionty. V tomto prostředí je například

laserem vyprodukovaná elektromagnetická vlna, která může urychlovat nabité částice. Tímto způsobem bylo dosaženo urychlovacích gradientů i o několik řádů vyšších (GV/m) než v případě obvyklých urychlovacích metod. V současné době je ale takto možné dosáhnout urychlení jen omezeného množství částic a na relativně krátké vzdálenosti. Do budoucna ale tyto metody mají velký potenciál.

Pokud by fyzikálními vlastnostmi nepostačoval lineární urychlovač elektronů nebo kruhový urychlovač protonů, tak se nabízí alternativa, kterou by mohl být kruhový urychlovač mionů. Jak již bylo řečeno, miony jsou leptony, takže nemají vnitřní strukturu a jejich srážky jsou tím pádem čistší. Díky tomu, že jsou 200krát těžší než elektrony, tak dává smysl je urychlovat v kruhovém urychlovači a mělo by být možné je urychlit na energie srovnatelné s urychlovačem ILC.

Je nutné podotknout, že v současné době jde spíše o koncepty než reálně postavitelné urychlovače, ale přesto již bylo dosaženo zajímavých výsledků. V produkci mionů existují dva nezávislé koncepty. V jednom je mionový svazek produkován z výkonného svazku protonů oštělujícího terče z grafitu, případně kapalné rtuti (již ukončený MAP projekt v USA), z kterého jsou silným magnetickým polem vybírány piony, které se posléze rozpadají a produkují miony. Druhým je experiment LEMMA (Itálie), který produkuje miony v interakci pozitronů s energií 45 GeV s elektrony v terči. V těžišťovém systému této srážky je dostatek energie přímo na produkci mion-antimionového páru. Miony produkované v takových procesech vylétávají různými směry a různými rychlostmi. Aby bylo možné takový svazek mionů urychlit jedním směrem, je nutno miony tzv. ochladit (myšleno snížit kinetickou energii jejich chaotického pohybu a usměrnit jejich let). V této oblasti bylo v nedávné době dosaženo pokroku, když byl ověřen princip tzv. ionizačního chlazení (anglicky ionization cooling) v experimentu MICE [7]. Při ionizačním chlazení dochází ke snížení této energie mionového svazku při jeho průchodu určitým materiálem (obecně lehké prvky jako vodík nebo lithium), kde miony předávají energii elektronům (ionizují je) v atomovém obalu tohoto materiálu. Existuje sice více způsobů jak ochladit svazek nabitých částic, ale v podstatě jen ionizační chlazení funguje na časových škálách srovnatelných se střední dobou života mionů.

Závěr

V současné době probíhají diskuze, kterým směrem by se měla ubírat částicová fyzika – fyzika vysokých energií – jaký další, výkonnější urych-

lovač by bylo možné postavit k tomu, abychom odkryli další neznámé v naší teorii o tom, jak vznikl a funguje vesmír. Mionový urychlovač je jednou z možných alternativ pro budoucí urychlovače.

Kruhový mionový urychlovač nabízí urychlování leptonů jako alternativu k lineárním elektronovým urychlovačům. Kruhový urychlovač by byl kompaktnější než lineární, zároveň by leptonový urychlovač přinášel fyzikálně vhodnější prostředí než urychlovač hadronový. Zároveň jde ale o ohromnou experimentální výzvu, jestli bychom dokázali vybudovat urychlovač mionů s parametry obdobnými s urychlovačem protonů nebo elektronů, s kterými už máme veliké zkušenosti.

Literatura

- [1] CERN: *The Large Hadron Collider*. [online] <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>.
- [2] Aldebaran Group for Astrophysics: *Částice a interakce, Standardní model*. [online] <https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/interakce/standard-model.php>.
- [3] CERN: *Future Circular Collider*. [online] <https://home.cern/science/accelerators/future-circular-collider>.
- [4] ILC International Development Team: *International Linear Collider*. [online] <https://linearcollider.org/>.
- [5] CERN: *Compact Linear Collider*. [online] <https://home.cern/science/accelerators/compact-linear-collider>.
- [6] CERN: *The Advanced Proton Driven Plasma Wakefield Acceleration Experiment (AWAKE)*. [online] <https://home.cern/science/accelerators/awake>.
- [7] MICE Collaboration: Demonstration of cooling by the Muon Ionization Cooling Experiment. *Nature*, 578 (2020), s. 53–59, [online] <https://www.nature.com/articles/s41586-020-1958-9>.
- [8] CERN: *Muon Collider Overview*. [online] <https://muoncollider.web.cern.ch/node/25>.