

Co s energií? Investujme jí do nového poznání!

Otázku i návrh v nadpisu lze chápat symbolicky a věcně. Symbolická otázka je vyvolána pohledem kolem sebe, kdy lidé daleko méně než dříve fyzicky pracují, a často i vůbec méně pracují. Nemají do čeho investovat svou energii, takže ji maří například ve speciálních strojích ve fitness centrech nebo ještě horším způsobem. Přitom pocit, že není co dělat, je alespoň ve vědě naprosto nepatřičný. Nemusíme mluvit ani o složitých systémech, stačí zcela fundamentální otázky: například nám stále scházejí některé stavební kameny do obrazu mikrosvěta, jakým je třeba Higgsův boson, který hraje podstatnou roli při vysvětlení hmotností částic.

Věcně můžeme otázku v nadpisu chápat také tak, že energie zatím produkujeme dostatek a je tedy možné uvažovat o tom, jaká zařízení jí můžeme napájet. Jedním druhem rafinovaných spotřebičů jsou urychlovače částic, které energii vyždímanou z vody, uhlí nebo jádra koncentrují do kinetické energie nejmrvnějších objektů, které známe – elektronů a protonů.

Současný nejmohutnější urychlovač Tevatron ve Fermiho národní urychlovačové laboratoři (FNAL) v USA urychluje protony a antiprotony na energie skoro $1 \text{ TeV} = 0,16 \mu\text{J}$ ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). To je energie malá v našem makrosvětě (kinetická energie napitého 5 mg komára letícího rychlostí jen asi 0,25 m/s) ale na proton slušně velká – je zhruba tisíckrát větší než klidová energie protonu. Takový proton letí rychlostí 0,999 999 5 rychlosti světla.



K čemu ale protony s tak vysokou energií jsou? V druhém desetiletí minulého století provedl Ernest Rutherford a jeho kolegové první „částicový experiment“ – α -částice

vylétající z rozpadu radonu prolétaly zlatou fólií a různě se odkláněly díky interakci s atomy zlata. Pravděpodobnost odklonění α -částic do různých úhlů se zdařilo přesně vysvětlit jedině modelem atomu s kladně nabitým malým jádrem a elektrony hemžícími se kolem. Podobný způsob zkoumání mikrosvěta a jeho zákonitostí se v dalších letech nesmírně osvědčil, zvláště když byly vynalezeny urychlovače, které dokázaly projektily (elektrony, protony, atomová jádra) urychlovat na stále vyšší a vyšší energie. Princip experimentů byl jednoduchý – urychlenými částicemi ostřelujete terč (třeba kapalný vodík nebo nějaký kov, projektily se srážejí s terčovými protony nebo jádry použitého kovu) a díváte se, co z oblasti srážky vylétne. Realizace tohoto jednoduchého principu už tak jednoduchá není.

Urychlovače využívají působení elektrického a magnetického pole na nabitou částici. Když vyrobíme vysoké napětí U , stačí náboji Q proběhnout vytvořeným potenciálovým rozdílem a získat energii QU . Například v televizoru jsou elektrony urychleny napětím desítek kV, elektrony dopadající na obrazovku pak mají energie desítek keV. Relativně snadno se dají dosáhnout napětí několika milionů voltů, nabitou částici je takto možné urychlit na energie řádu MeV. Na větší energie to jde například pomocí dlouhé řady elektrod, mezi nimiž se napětí vhodně střídá tak, aby letící nabitou částici stále urychlovalo, nebo spíše pomocí dlouhého vlnovodu, kde se částice nesou „na příboji elektromagnetické vlny“. Už v šedesátých letech urychloval Stanfordský lineární urychlovač (USA) o délce 3 km elektrony na energie přes 20 GeV ($40\,000 \times$ klidová hmotnost elektronu). Velkých energií lze také dosáhnout opakovaným urychlováním – stačí urychlované částice uvěznit do kruhového prstence, ve kterém magnetické pole zakříví jejich dráhu, a při každém oběhu je na několika místech elektrickým polem „nakopnout“. Urychlovací pole je zde vytvářeno v dutinových rezonátorech a musí být synchronizováno s přiletem jednotlivých shluků urychlovaných částic. Právě tak pracuje již zmíněný Tevatron.

Urychlování částic na velmi vysoké energie však není bezproblémové. Gradienty polí použitých v lineárních urychlovačích nejsou nekonečné a tak si cesta k vyšším energiím vyžaduje delší urychlovače. Kruhové urychlovače potřebují na zahnutí drah částic magnetické pole, které neumíme vyrobit libovolně velké – v supravodivých magnetech se umí udělat pole necelých 10 T (4,4 T v Tevatronu, 8,3 T v budoucím LHC), proto i zde vyšší energie znamenají větší rozměry (Tevatron má obvod 6,3 km, budovaný LHC 27 km). Magnetické pole je limitujícím faktorem pro těžké částice, například protony a jádra. Při urychlování elektronů se objevuje jiný efekt – elektrony pohybující se po kruhové dráze vyzařují elektromagnetické vlny (podobně jako kmitající elektrony v anténě mobilu vyzařují elektromagnetické vlny přenášející naše řeči a elektrony pohybující se ve šrouboviciích v magnetronu vyzařují elektromagnetické vlny do prostoru mikrovlnné trouby) a tím se dodávané energie zbavují. Zmenšit vyzařování elektronů na únosnou míru znamená je co nejméně zakřivovat, takže opět postavít kruhový urychlovač co největší (LEP v ústavu CERN v Ženevě měl obvod 27 km).

Vedle zmíněného základního principu, urychlenými částicemi ostřelovat terč, byl vymyšlen další krok, vedoucí k větším využitelným energiím: Místo ostřelování terče nechat čelně srazit dva proti sobě letící svazky částic (morbidní inspirací k takovému uspořádání jsou zkušenosti ze srážek aut i vlaků, racionální argumenty poskytuje odpovídající relativistický výpočet). Pro vstříčné svazky se hodí urychlovat částice skoro stejné, jen s opačným nábojem – pak je může zahýbat stejné magnetické pole. Tevatron je urychlovač se vstříčnými svazky protonů a antiprotonů, LEP urychloval svazky elektronů a pozitronů.

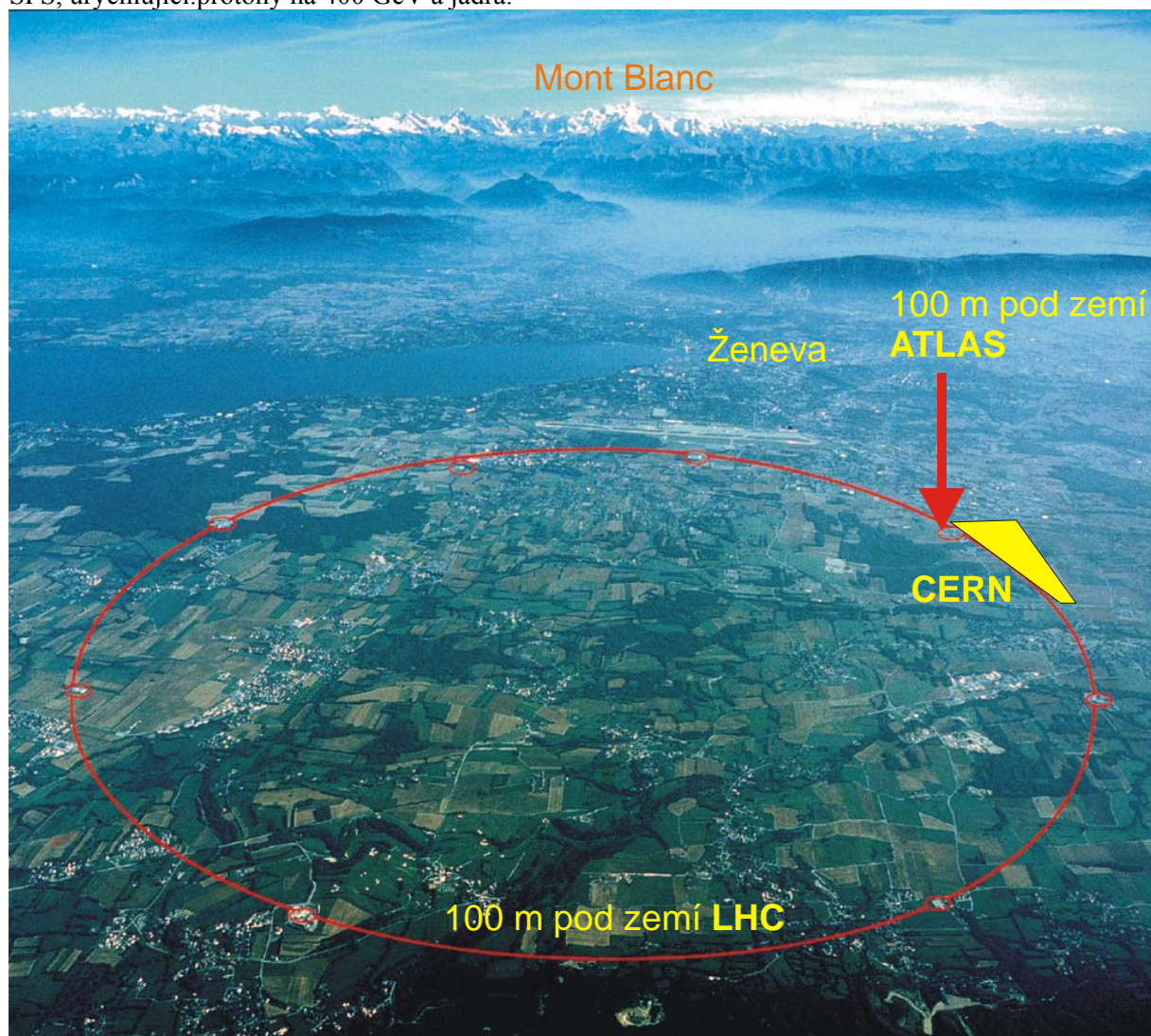
Při vysokých energiích dosažitelných ve vstříčných svazcích se dostává do popředí důležitý jev – už zdaleka nedochází jenom k tomu, že by se srážející částice jenom odchýlily, a také (pokud nejde o srážky jader) k tomu, že by se ve srážce roztříštily na nějaké své další části – s velkou pravděpodobností se rodí NOVÉ částice. Ve srážce dvou protonů se zpravidla narodí spousta pionů (ve starší literatuře označované jako π -mezony), několik dalších protonů a antiprotonů i jiných částic. Chcete-li narodit nějakou konkrétní částici, je klíčové mít na to ve srážce dostatečnou energii (i s uvažováním takových komplikací, jako například že proton a antiproton se vždy rodí jako dvojčata, stejně jako elektrony). Kromě toho, že potřebujete dostatečnou energii, potřebujete dostatečnou frekvenci srážek, svazky musí být dostatečně „husté“, přesněji dostatečně zaostřené v místech srážek. Většina zajímavých událostí ve srážkách se děje s malou pravděpodobností (kterou charakterizujeme tzv. účinným průřezem – veličinou rozměru plochy, podobně jako pravděpodobnost zásahu třeba míčem můžeme charakterizovat plochou, kterou mu vystavujeme). Abychom málo pravděpodobný děj uviděli, musíme sledovat velký počet srážek. Veličina, která charakterizuje výkon urychlovače v tomto smyslu je luminozita (se standardně užívanou jednotkou $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$). Počet událostí, které pak můžeme vidět za jednotku času je pak luminozita \times účinný průřez. Typická luminozita dnes navrhovaných urychlovačů je $10^{33} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$. Rok práce (s nutnými přestávkami) znamená 10^7 s, takže zajímá-li nás výsledek srážky s účinným průřezem 10^{-38}cm^2 , můžeme jich očekávat v tomto případě asi 100 za rok.

Abychom mohli sledovat částice vyletující z míst srážek, potřebujeme nějaké detektory. Jak takové detektory zkonstruovat, je ale další zajímavá otázka, kterou odložíme až na nějaký další článek.

Zatím jsme se zmínili jen o Tevatronu v daleké laboratoři FNAL (i tam však pracují čeští fyzikové, podílejí se na experimentu D0). Tevatron prodělal v posledních letech omlazovací kúru, která o trochu zvýšila jeho maximální energii a hlavně luminozitu. Na Tevatronu byl v roce 1995 objeven poslední očekávaný kvark („top“) a dnes na něm fyzikové pokračují v bádání. Blíže k nám je mezinárodní laboratoř CERN v Ženevě (Česká republika je členskou zemí této organizace) a německá laboratoř se silnou mezinárodní účastí (opět i českých fyziků) DESY v Hamburku.

V CERN pracoval do roku 2000 urychlovač vstříčných svazků elektronů a pozitronů na energii 100+100 GeV, který přinesl spoustu detailních poznatků upřesňujících současný pohled na mikrosvět – současný „standardní model“. Tento urychlovač je dnes již rozmontován a v jeho tunelu 100 metrů pod zemí by měl v roce 2007 začít fungovat nový urychlovač LHC (Large Hadron Collider) vstříčných svazků protonů s energií 7+7 TeV a později až olověných jader. V současnosti se vyrábějí a tes-

tují magnety a další komponenty tohoto urychlovače. V CERN ale stále ještě pracuje starší urychlovač SPS, urychlující protony na 400 GeV a jádra.



Počítačový obrázek tunelu LHC.

V DESY v Hamburku pracuje urychlovač vstřícných svazků protonů a elektronů HERA ($p:920 \text{ GeV}+e:30 \text{ GeV}$), čeští fyzikové se podílejí na experimentu H1. DESY projektuje 33 km dlouhý lineární urychlovač TESLA, kde by se měly srážet elektrony s pozitrony s energií 250+250 GeV či vyšší. Tento projekt ještě není schválen.

Na světě je mnoho dalších urychlovačů, zmínili jsme se jen o těch největších. Z jejich rozměrů vidíte, že jde o monstrózní zařízení. Neméně monstrózní jsou detektory už fungující nebo připravované. Zajímá-li vás tento způsob utrácení energie (ať už v symbolickém nebo konkrétním smyslu), podívejte se na stránky částicové fyziky v ČR: <http://www-hep2.fzu.cz/~rames/outreach/castice.html>, kde také najdete odkazy na všechny zmíněné laboratoře)

Jiří Dolejší

Ústav částicové a jaderné fyziky MFF UK
V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8
jiri.dolejsi@mff.cuni.cz

Použity materiály FNAL, DESY, CERN.