Rozhledy matematicko-fyzikální

Matěj Tonka

Co se děje v CERNu

Rozhledy matematicko-fyzikální, Vol. 101 (2026), No. 3, 62–69

Persistent URL: http://dml.cz/dmlcz/153812

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2026

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

Co se děje v CERNu

Matěj Tonka, FJFI ČVUT

Evropská organizace pro jaderný výzkum CERN je jedna z nejprestižnějších institucí v oblasti výzkumu jaderné a částicové fyziky. Areál stojící na hranici dvou členských států, Francie a Švýcarska, v ženevském kantonu poblíž městečka Meyrin na švýcarské straně a na území obce Saint-Genis-Pouilly na straně francouzské, je výzkumné středisko zaměřené na výzkum v oblasti jaderné a částicové fyziky. I přes to, že je CERN organizace proslulá díky mediální a popkulturní přítomnosti, je dobré si připomenout několik základních informací o této Mekce současné vědy.

Myšlenka CERNu se zrodila v letech po 2. světové válce v hlavách evropských vědců. Díky odlivu mozků z Evropy ať už kvůli obavám z perzekuce nebo z nevole se účastnit ozbrojeného konfliktu, Evropa přišla o status vědeckého centra. Když v roce 1949 Louis de Broglie přišel s nápadem založit organizaci, která by soustřeďovala špičkový výzkum a mezinárodní spolupráci států v Evropě, měl se tento úpadek obrátit k lepšímu a znovu poskytnout Evropě ztracenou prestiž. Během následujících let se věci dávaly do pohybu, což vyvrcholilo v roce 1951 usnesením UNESCO, které dávalo stavbě a zřízení organizace pro jaderný výzkum zelenou. Nedlouho poté, v roce 1953, vzniklo usnesení, které mimo jiné zavazovalo členské státy k příspěvkům a podílu na výzkumu v nové organizaci. V roce 1955 byl konečně položen první stavební kámen, ale první práce na zařízení započaly o rok dříve.

V roce 1957 spustil CERN svůj první urychlovač, synchrocyklotron. Ten je určen hlavně k urychlování iontů, pro lehké částice, jako jsou elektrony, není ideální. Do detailů nemusíme zabíhat, protože o pár let později, v listopadu roku 1959, byl spuštěn protonový synchrotron (PS). Další urychlovače přibývaly, v roce 1976 byl spuštěn super protonový synchrotron (SPS) a o 13 let později velký elektron-pozitron urychlovač (Large Electron-Positron collider LEP), synchrotron určený ke kolizím elektronů a pozitronů, v jehož tunelu dnes stojí velký hadronový urychlovač (Large Hadron Collider – LHC), který byl spuštěn v roce 2008.

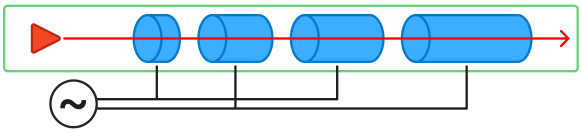
Součástí CERNu je několik experimentů, tedy skupin vědců čítajících několik tisíc osob z celého světa, kteří se podílejí na stejném výzkumném cíli. Některé experimenty jsou detektory na LHC, zkoumající stavy

hmoty po velkém třesku nebo produkci exotických částic, jako například toroidální detektor ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS), velký iontový experiment ALICE (A Large Ion Collider Experiment), LHC krása LHCb (LHC beauty) nebo CMS (Compact Muon Solenoid). Další experimenty se týkají ostřelování terčů jako například AMBER nebo experimenty pro výzkum antihmoty jako AEGIS. V CERNu se také nachází zařízení na testování detektorů a materiálů, například zařízení na cílené ozařování IRRAD, které využívá svazek protonů k ozařování vzorků nejrůznějších materiálů.

Historie CERNu ale sahá dále, než by se mohlo na první pohled zdát. Rozmach jaderné a částicové fyziky v první polovině dvacátého století je hlavním důvodem, proč tato organizace byla založena. A potom nesmíme zapomenout na urychlovače, jejichž vývoj, díky stále přísnějším požadavkům výzkumu jader a částic, rychle pádil kupředu. Svým způsobem započala cesta Evropské organizace pro jaderný výzkum už v roce 1944, kdy byl vyvinut první synchrotron, typ urychlovače, který využívá LHC v CERNu.

Urychlovače v CERNu

V CERNu je a v minulosti bylo mnoho různých typů urychlovačů. V současné době jsou pro CERN důležité dva typy; synchrotron a lineární urychlovač. Tyto dva typy dominují v oblasti částic, kterou se CERN zabývá.

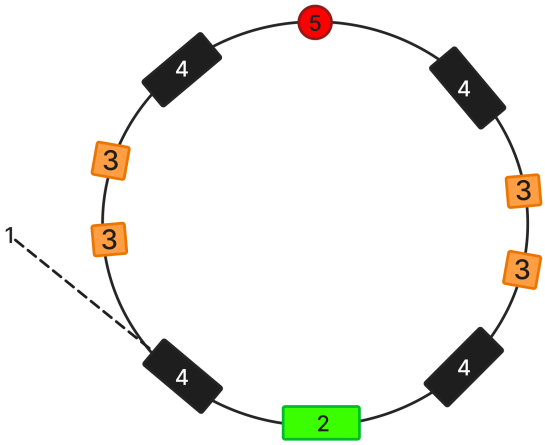


Obr. 1: Schéma nejjednoduššího lineárního urychlovače – oranžový trojúhelník reprezentuje zdroj částic, červená šipka potom svazek částic letící urychlovačem. Modré válce reprezentují jednotlivé trubice, které jsou připojené na vysokofrekvenční zdroj střídavého napětí. Celá aparatura je uzavřena ve vakuové komoře, reprezentované zeleným obdélníkem.

Lineární urychlovač je druh urychlovače, který využívá vysokofrekvenční zdroje k urychlení subatomárních částic. Aparatura sestává ze zdroje napětí a kovových trubic (modré válce na obr. 1), kterými svazek částic prolétá. Trubice jsou napojené na zdroj střídavého napětí tak, že ve chvíli, kdy se svazek nachází v prostoru mezi trubicemi, je jedna nabita kladně a druhá záporně a částice ve svazku je tím urychlována.

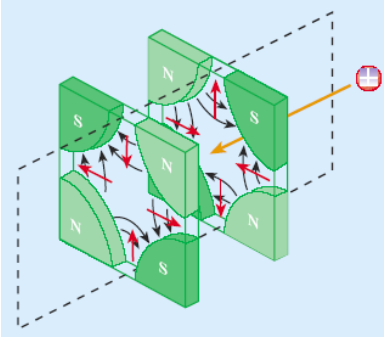
Uvnitř trubice je potom svazek stíněn od elektromagnetického pole, aby se částice vyhnula fázi urychlovacího napětí, ve které by byla zpomalována. Protože svazek postupně zrychluje, trubice se zvětšují, aby zůstal urychlovaný svazek ve fázi s napětím tak, že stále zrychluje. Prakticky si to lze představit na zrychlujícím autu projíždějícím tunelem. Aby auto vždy strávilo v tunelu stejnou dobu, musíme každý další tunel natahovat. V lineárním urychlovači jde o ten samý princip. Skutečné urychlovače v CERNu jsou komplikovanější, ale tento klíčový koncept zůstává stejný. Jediné, co je přidáno navíc, jsou radiofrekvenční dutiny. Trubice lineárního urychlovače od určité frekvence vysílají energii jako antény. Tato skutečnost vede ke ztrátám energie, které nejdou při vyšších energiích zanedbat. Tím, že celé zařízení dáme do dutiny, držíme energii uvnitř systému a při vhodné volbě frekvence lze tuto energii využít k urychlování. Lineární urychlovače používáme k prvotnímu urychlení částic z nízkých energií (a tedy i rychlostí).

Druhým typem urychlovače, který CERN využívá, jsou synchrotrony. Synchrotron je kruhový urychlovač určený k urychlování částic na relativistické rychlosti (rychlosti blízké rychlosti světla c). Tento urychlovač změnou magnetického pole drží částici na kruhové trajektorii o konstantním poloměru (obr. 2).



Obr. 2: Schéma synchrotronu. 1 reprezentuje příchozí částice, které jsou do urychlovače vstřikovány, 2 místo, kde jsou částice urychlovány, 3 kvadrupólové magnety, 4 dipólové magnety a 5 místo, kde jsou částice buď vynášeny ven nebo kde se mohou dva svazky srážet.

Protože například LHC dosahuje energií jednotek TeV (teraelektronvoltů, jeden teraelektronvolt je přibližně $1{,}6 \cdot 10^{-7}$ J), je potřeba vytvořit velice vysoké gradienty magnetického pole v magnetech, které fokusují svazek. Kromě dipólových magnetů (vyobrazených na obr. 2 jako 4), které slouží ohýbání, obsahuje synchrotron kvadrupólové magnety (na obr. 2 jako 3), interakční bod nebo kicker (na obr. 2 jako 5 – záleží na typu zařízení, obrázek je pouze zjednodušení) a místo, kde urychlujeme svazek (na obr. 2 vyobrazený jako 2). Částice je proto urychlována v jednom bodě na obvodu celého urychlovače a zbytek zařízení slouží k udržení svazku na kruhové dráze. Kvadrupólové magnety používáme k fokusaci svazku, čímž svazek držíme v příčném průřezu stále na kruhové trajektorii. Svazek nejsme schopni fokusovat v obou příčných směrech najednou, proto musí jít dva kvadrupólové magnety po sobě, abychom mohli fokusovat v obou směrech. Aby byla zajištěna fokusace v obou příčných směrech, musí magnety jdoucí po sobě být otočené vůči sobě tak, aby probíhala výsledná fokusace v obou směrech. Toto je zobrazeno na obr. 3.



Obr. 3: Dva po sobě jdoucí kvadrupólové magnety, které se používají v LHC. Černé šipky jsou magnetické indukční čáry a červené šipky reprezentují směr, kterým je svazek fokusován. Obrázek převzat z [1].

Situaci si lze představit jako používání hadice na zalívání květin. Pokud ústí hadice zmáčkneme mezi dvěma prsty, hadice se ve směru, ve kterém mačkáme, zploští a ve směru kolmém na směr mačkání roztáhne. Voda potom vytvoří vějíř a proud se roztáhne do stran a smrští se ve směru mačkání. V urychlovačích takto mačkáme jak vertikálně tak horizontálně, aby proud pomyslné vody měl co nejmenší průřez. Urychlujeme pomocí radiofrekvenčních dutin, které fungují na stejném principu jako lineární urychlovač. Kicker slouží k plnění nebo vytahování (ex-

trakci) částic z urychlovače. Obvykle jsou synchrotrony doplněny o lineární urychlovač, který slouží k prvotnímu urychlení, protože synchrotrony nelze použít k urychlování takříkajíc od nuly.

Synchrotrony používají vědci pro dva účely. Prvním je zařízení zvané collider, kterým je například velký hadronový urychlovač. Jak už název napovídá, jedná se o synchrotron určený ke srážkám částic. V collideru máme dva svazky částic, které urychlujeme separátně a na určitém bodě v urychlovači jim umožňujeme interagovat na místě zvaném interaction point, který v collideru reprezentuje červený kruh na obr. 2. V tomto bodě pouštíme svazky proti sobě a snažíme se srazit co nejvíce částic. Částice v collideru nejsou urychlovány v jedné urychlovací dutině, ale jedná se o dva synchrotrony vedle sebe nebo na sobě. Vzhledem k tomu, o jak malých rozměrech mluvíme, trefíme se jenom malým množstvím celkového počtu částic ve svazku, při energiích jako na LHC to ale stačí. Další význam synchrotronu je storage ring, doslovně přeloženo jako uchovávací prstenec. Tento typ urychlovače slouží k tomu, když svazky nesrážíme, ale potřebujeme za nějakým účelem několik hodin držet svazek na určité energii. Díky tomu můžeme svazek postupně na cíl pouštět tak, jak potřebujeme. Částice potom odcházejí kickerem, který je na obr. 2 reprezentován červeným kruhem.

Oba typy urychlovačů se používají i v jiných odvětvích, například v medicíně pro protonovou terapii. Lze vidět, že urychlovače nejsou jen hříčkou hrstky vědců, ale pomáhají lidem v každodenním životě.

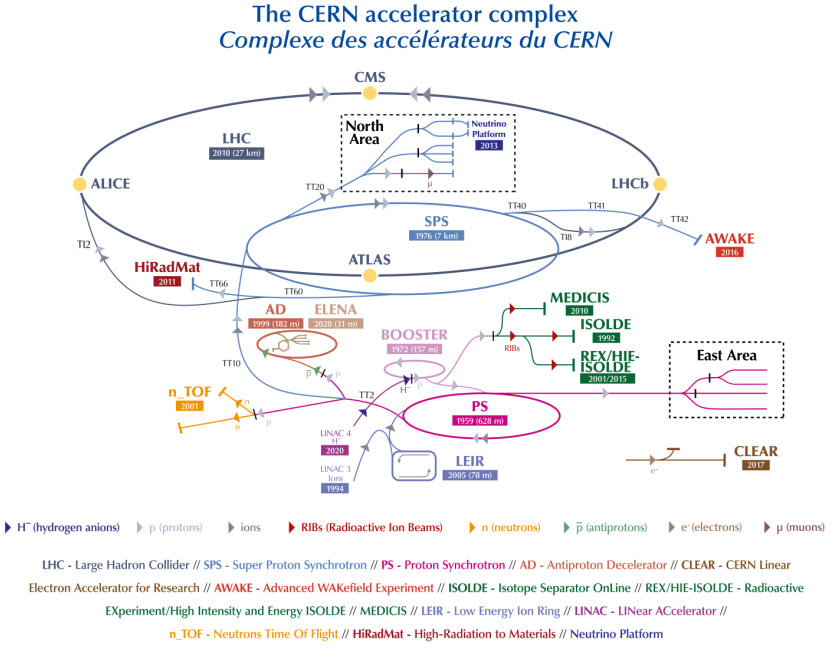
Kudy cestuje svazek

Pokud bychom v LHC chtěli urychlit proton, naše cesta započne v tlakové lahvi s vodíkem. Vžijeme se teď do situace, kdy můžeme jako pozorovatelé cestovat s jedním konkrétním protonem, i přes to, že tato modelová situace je díky zákonům mikrosvěta nerealizovatelná. Začínáme záporně nabitým iontem vodíku, který pomocí lineárního urychlovače Linac4 urychlíme na 160 MeV. Před dalším urychlováním očešeme z elektronového obalu všechny elektrony, čímž dostaneme kladně nabitý iont, což je proton. Odteď už používáme k urychlení jen synchrotrony. Tento proton vstoupí do Proton Synchrotron Boosteru (PSB), kde je urychlením na 2 GeV připraven na vstup do PS a urychlen na 26 GeV. Dalším krokem je urychlení v SPS, kde dosáhne svazek energií až 450 GeV. Poté protony vstoupí do LHC, kde jsou dva svazky urychlovány v opačných směrech, aby bylo možno provést srážku v interakčním bodě. V LHC dosahují protony energií až 7 TeV.

V CERNu se ovšem používají i jiná jádra než jenom jádra vodíku. Ke studiu kvark-gluonového plazmatu musí vědci používat jádra těžších prvků, např. olova. Jádra olova jsou produkována vypařováním a následným výbojem v plynu olova. Ionty produkované tímto způsobem jsou potom urychleny na Linac3 a v nízkoenergetickém iontovém prstenci LEIR (Low Energy Ion Ring). Z tohoto urychlovače putují dále po stejné cestě jako protony.

Objemy dat z jedné srážky dosahují nepředstavitelných rozměrů. Díky tomu musí každý z detektorů používat systémy, které třídí data ihned po zaznamenání srážky a triggery, které rozhodují o tom, jaká srážka se zaznamená a jaká je vyhozená jako neplatná nebo nechtěná. Fyzicky k tomu slouží mnoho poddetektorů, které poskytují informace nezbytné pro učinění této volby. Celý systém potom funguje jako švýcarské hodinky.

Kompletní systém urychlovačů v CERNu je zobrazen na obr. 4.



Obr. 4: Komplex urychlovačů v CERNu. Obrázek převzat z [2].

K čemu je LHC dobré

Zatím jsme odpověděli na otázku jak, otázkou proč jsme se moc nezabývali. Cílem textu je informovat více o metodách než o cílech, obojí je ale stejně důležité. Co se tedy děje na LHC a proč je to dobré?

Na obr. 4 jsou vidět hlavní experimenty LHC, ALICE, ATLAS, CMS a LHCb. Každý z těchto experimentů slouží k jinému účelu, ale všechny pokrývají oblasti nejmodernějšího výzkumu v částicové fyzice od pochopení struktury vesmíru po velkém třesku po studium temné hmoty. Kromě LHCb jsou všechny experimenty stavěny tak, že detektory obklopují celý bod, kde spolu dva svazky interagují.

ALICE využívá nejmodernějších způsobů detekce nabitých částic ke studiu kvark-gluonového plazmatu. Kvark-gluonové plazma odpovídá skupenství, ve kterém se nacházela hmota bezprostředně po velkém třesku, a to znamená, že na LHC kolizemi iontů olova studujeme podmínky a nahlížíme do minulosti vesmíru. Projekt zaznamenal první data z olovo-olovo (tak se označuje srážka dvou svazků tvořených jádry olova) srážky v roce 2010, od té doby učinil mnoho úspěchů ve studiu této oblasti fyziky.

Z trochu jiného soudku jsou ATLAS a CMS. Oba experimenty se zabývají studiem Higgsova bosonu, který byl potvrzen v roce 2012, nebo částicemi, které jsou kandidáty na temnou hmotu. Tyto experimenty se soustředí na studium produktů srážek svazků. Oba experimenty mají stejné cíle, ale jejich metody se liší stavbou nejdůležitější komponenty aparatury – magnetů, které ohýbají trajektorii nabitých částic vyprodukovaných ve srážce, z čehož lze určit charakter produktů srážky.

LHCb se také liší od ostatních svými cíli. LHCb se zabývá studiem konkrétního kvarku b, takzvaného krásného kvarku. Částice obsahující tento kvark jsou takzvaně půvabné a umožňují nám studovat, v jakých procesech je CP symetrie narušená nebo chování hmoty a antihmoty. Namísto obklopení celého bodu interakce jedním detektorem, v tomto experimentu se vědci zaměřují na produkci částic ve směru svazku. Částice při kolizi nejsou produkovány jen okolo bodu srážky, ale i ve směru, ve kterém přilétají. Studujeme tedy pasažéry uvnitř částic, kteří nebyli připoutaní a vyletěli během srážky ven z nabité částice.

Všechny tyto experimenty i mnoho dalších a hlavně vědci se zázemím v CERNu přispěli svými objevy vědecké komunitě i široké veřejnosti. Objevy přenašečů slabé interakce $W^{\pm}$ a Z^0 bosony nebo objev Higgsova bosonu přispěli k pochopení světa a fyziky standardního modelu, což je

nejkompletnější teorie popisující mikrosvět, kterou fyzika zná. Poznatky o chování a výrobě antihmoty přispívají k vědě a komerčnímu využití v mnoha sektorech. A v neposlední řadě World Wide Web je dílem fyzika zaměstnaného v CERNu.

Všechny tyto objevy a poznatky přinášejí další a další otázky. Co je to temná hmota? Jsou to snad přenašeči temné hmoty? Co nastalo po velkém třesku a jak se tehdy hmota chovala? Proč pozorujeme ve vesmíru více hmoty než antihmoty? To jsou všechno problémy, se kterými se potýká současná věda včetně pracovníků v CERNu. Dveře této komunity jsou otevřeny každému, kdo má chuť bádat, a proto je možné, že některý ze čtenářů těchto řádků by mohl přispět k průlomu v některých z otázek, nad kterými si dnešní věda láme hlavu.

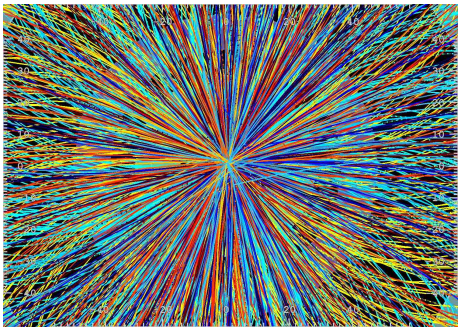
Literatura

[1] Cid Vidal, X., Cid, R.: *Taking a closer look at LHC – Magnetic multipoles.* LHC Closer Website [online]. Dostupné z: `https://www.lhc-closer.es/taking_a_closer_look_at_lhc/0.magnetic_multipoles`, 2010.

[2] *Our History.* CERN, 2026, `https://home.cern/about/who-we-are/our-history`.

[3] Alesini, D.: *LINAC. Proceedings of the CERN-Accelerator-School course: Introduction to Accelerator Physics*, `https://cas.web.cern.ch/previous-schools`.

[4] Lee, S. Y.: *Accelerator Physics.* 4. vydání, World Scientific, 2018.



Rekonstrukce jedné z prvních srážek iontů olova na LHC v rovině ortogonální na trajektorii iontů zaznamenaných detektorem ALICE. (zdroj: `https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alicelead3.jpg`)