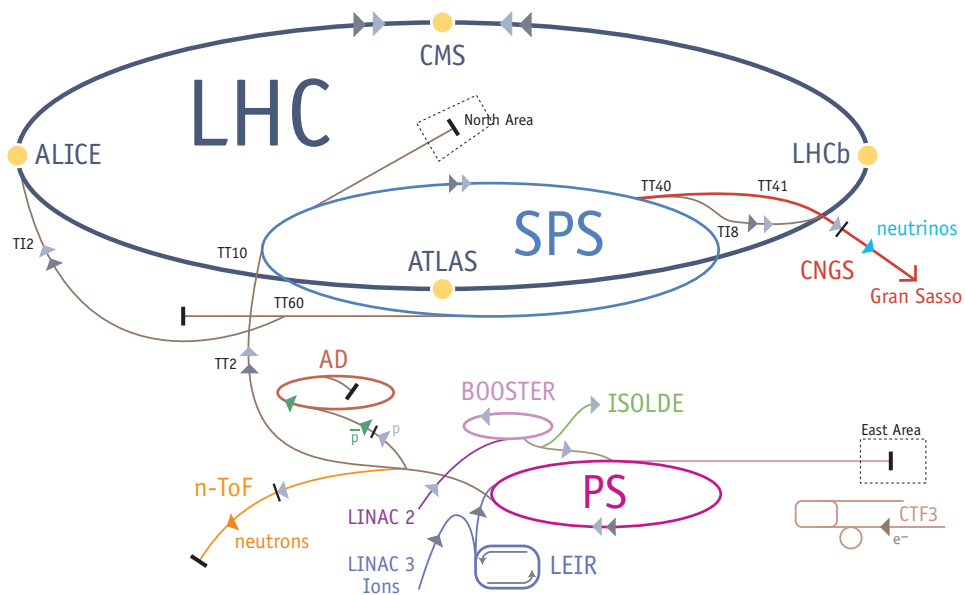


# CERN

# Otázky a odpovědi

## Co je to LHC



Tento soubor informací a údajů o urychlovači LHC (Large Hadron Collider, česky doslova Velký srážecí hadronů) je usprádan ve formě otázek a odpovědí. Otázky jsou rozděleny do bloků podle témat. Odpovědi jsou často dvouúrovňové, přičemž druhá úroveň jde více do hloubky.

*Překlad: Jitka Klusáčková, Jiří Rameš*

*Písmena faq, která stojí v záhlaví kapitol, představují v angličtině běžně užívanou zkratku pro běžné spojení „frequently asked questions“ – nejčastější (doslova ‘často kladené’) otázky. Tento výraz je součástí anglického názvu publikace a zkratka faq je součástí grafické úpravy.*

*Česká verze této brožury vznikla s podporou CERN.*

*Tento materiál je pravidelně aktualizován. Nejnovější verzi lze nalézt na adrese*

*<http://multimedia-gallery.web.cern.ch/multimedia-gallery/Brochures.aspx>*

*Základní fyzikální pojmy* 1

*Obecně o urychlovači  
LHC* 15

*Urychlovač* 27

*Detektory* 37

*Životní prostředí* 47

*10 fascinujících údajů  
o LHC* 52

*Příloha 1* 53

*Příloha 2* 54



## Mocniny 10

Ve fyzice a informatice se běžně používají mocniny 10 a jim odpovídající předpony. Pro velmi malé či naopak velmi velké hodnoty představují velmi praktické vyjádření.

Mocnina 10	Numerický zápis	Předpona a její zkratka
$10^{-12}$	0,000000000001	p (piko)
$10^{-9}$	0,000000001	n (nano)
$10^{-6}$	0,000001	μ (mikro)
$10^{-3}$	0,001	m (mili)
$10^{-2}$	0,01	
$10^{-1}$	0,1	
$10^0$	1	
$10^1$	10	
$10^2$	100	
$10^3$	1000	k (kilo)
$10^6$	1 000 000	M (mega)
$10^9$	1 000 000 000	G (giga)
$10^{12}$	1 000 000 000 000	T (tera)
$10^{15}$	1 000 000 000 000 000	P (peta)

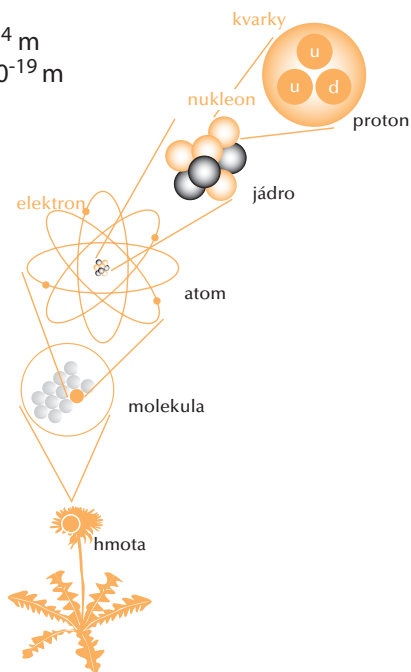
# Uvnitř atomu



Částicová fyzika studuje nejmenší objekty v přírodě, snaží se najít její nezákladnější stavební kameny. Zkoumáním těchto velmi malých objektů se zároveň vrací zpět v čase, ke zkoumání toho, jak vypadal náš svět v prvních okamžicích po velkém třesku. Zde je jako příklad uvedeno několik typických velikostí, kterými se částicovní fyzici zabývají.

Atom:  $10^{-10}$  m  
Jádro atomu:  $10^{-14}$  m  
Kvarky: méně než  $10^{-19}$  m

*Pokud by protony a neutrony měřily v průměru 10 cm, kvarky a elektrony by byly menší než 0,1 mm a celý atom by měl v průměru 10 km. Více než 99,99 % atomu je prázdný prostor.*



## Jednotky energie ve fyzice

Energie se ve fyzice měří v nejrůznějších jednotkách. Podle okolností se používají jouly, kalorie nebo kilowatthodiny. Do mezinárodní soustavy jednotek SI patří pouze joule, další jednotky lze na tuto základní jednotku převést podle příslušných vztahů. V částicové fyzice je nejpoužívanější jednotkou elektronvolt (eV) a jeho násobky keV ( $10^3$  eV), MeV ( $10^6$  eV), GeV ( $10^9$  eV) a TeV ( $10^{12}$  eV). Elektronvolt je velmi vhodnou jednotkou, poněvadž v částicové fyzice jsou hodnoty energie v běžných jednotkách velmi malé. Pro ilustraci: v LHC je energie srážky dvou protonů 14 TeV, což z něj činí nejvýkonnější urychlovač na světě. Pokud však tuto energii převedeme na jouly, dostaneme hodnotu:

$$14 \times 10^{12} \times 1,602 \times 10^{-19} = 22,4 \times 10^{-7} \text{ J.}$$

Tato hodnota je velmi malá třeba ve srovnání s energií tělesa o hmotnosti 1 kg padajícího z výšky 1 m, která činí

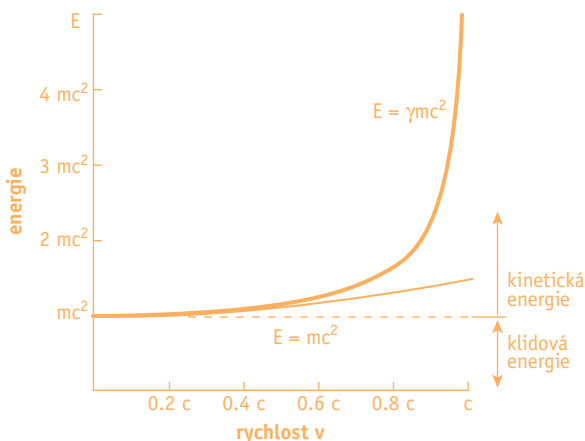
$$9,8 \text{ J} = 6,1 \times 10^{19} \text{ eV.}$$

*Definice elektronvoltu vychází z jednoduché představy: 1 eV je energie, kterou získá elektron (nesoucí elementární náboj  $1,602 \times 10^{-19}$  C) urychlený v elektrickém poli potenciálovým rozdílem 1 V ( $E = QU$ ). Tedy  $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$ .*

## Energie a rychlost částice

Žádná částice se nemůže pohybovat rychlostí větší než rychlost světla ve vakuu, avšak pro energii částice žádné omezení neexistuje. Ve vysokoenergetických urychlovačích se částice běžně pohybují rychlostmi, které jsou blízké rychlosti světla. Za těchto podmínek již nemůže při zvyšování energie docházet k významnějšímu nárůstu rychlosti. Například v LHC se částice pohybují při vstupu do urychlovače (při energii 450 GeV) rychlostí 0,999 997 828 rychlosti světla, zatímco při maximální energii 7000 GeV je jejich rychlost 0,999 999 991 rychlosti světla. To je hlavní důvod, proč částicovní fyzikové nehovoří o rychlosti částic, ale o jejich energii.

*Klasický newtonovský vztah pro kinetickou energii  $E_K = \frac{1}{2} mv^2$  platí pouze pro rychlosti mnohem menší, než je rychlost světla. Pro částice pohybující se téměř rychlostí světla musíme používat Einsteinův vztah speciální teorie relativity  $E_K = (\gamma - 1) mc^2$ , kde  $c$  je rychlost světla (299 792 458 m/s) a  $\gamma$  je spojeno s rychlostí světla vztahem  $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ , kde  $\beta = v/c$ . Symbol  $m$  označuje klidovou hmotnost částice.*



*Viz: <http://www.phys.unsw.edu.au/einsteinlight/jw/module5 equations.htm>*



Kinetická energie protonu ( $E_K$ )	Rychlost (% c)	Urychlovač
50 MeV	31,4	Linac 2
1.4 GeV	91,6	PS Booster
25 GeV	99,93	PS
450 GeV	99,9998	SPS
7 TeV	99,9999991	LHC

Vztah mezi kinetickou energií a rychlostí protonu v jednotlivých urychlovačích v CERN. Klidová hmotnost protonu je  $0,938 \text{ GeV}/c^2$ .

## Energie a hmotnost







Energie a hmotnost představují dvě strany téže mince. Hmotnost se může měnit v energii a naopak ve shodě se slavnou Einsteinovou rovnicí  $E = mc^2$ . V urychlovači LHC se to děje zcela běžně, při každé srážce. Díky této ekvivalenci můžeme hmotnost i energii měřit ve stejných jednotkách. Energie typické pro částicovou fyziku se vyjadřují v elektronvoltech a jejich násobcích.

## Standardní model





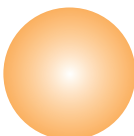
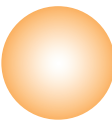
Standardní model je soubor teorií vyjadřujících všechny naše současné znalosti a představy o základních částicích a jejich vzájemném silovém působení. Podle této teorie, která je podepřena mnoha experimentálními důkazy, jsou základními stavebními částicemi hmoty kvarky a leptony. Síly (interakce) mezi nimi jsou zprostředkovány dalšími částicemi, tzv. nosiči síly, které si částice hmoty vyměňují. Jednotlivé druhy sil se liší v intenzitě a dosahu. Následující obrázky shrnují základní charakteristiky standardního modelu:

*I když je standardní model velmi mocná teorie, některé nedávno pozorované jevy, jako přítomnost temné hmoty a nepřítomnost antihmoty ve vesmíru, nemohou být v jeho rámci uspokojivě vysvětleny (Více viz v části věnované hlavním cílům urychlovače LHC na str. 22).*

## LEPTONY (stavební částice hmoty)

Make up matter	<b>Elektron</b> Spolu s jádrem tvoří atom 	<b>Elektronové neutrino</b> Částice bez elektrického náboje, s velmi malou hmotností, každou sekundu jich vaším tělem proletí několik miliard 
	<b>Mion</b> Těžší příbuzný elektronu, žije pouhé 2 miliontiny sekundy 	<b>Mionové neutrino</b> Vzniká spolu s mionem při rozpadu některých částic 
	<b>Tauon</b> Je ještě těžší a extrémně nestabilní. Objeven v roce 1975 	<b>Tauonové neutrino</b> Objeveno v r. 2000 

## KVARKY (stavební částice hmoty)

Make up matter	<b>Up</b> Má elektrický náboj o hodnotě $2/3 e$ . Proton obsahuje 2 tyto kvarky, neutron jeden 	<b>Down</b> Elektrický náboj $-1/3 e$ . Proton obsahuje jeden, neutron 2 tyto kvarky 
	<b>Charm</b> Těžší příbuzný kvarku up, objeven v roce 1974 	<b>Strange</b> Těžší příbuzný kvarku down. 
	<b>Top</b> Nejtěžší kvark, objeven v roce 1995 	<b>Bottom</b> Těžší než strange; zkoumání těchto kvarků představuje důležitý test platnosti elektroslabé teorie 

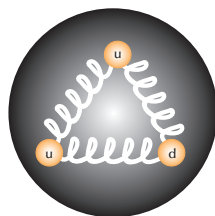
## SILNÁ INTERAKCE

Působí na: kvarky  
Nosiče: gluony



### Související jevy

Silná interakce k sobě váže kvarky a vytváří tak protony a neutrony (a další částice). Váže také protony a neutrony v jádře, kde překonává ohromné elektrické odpudivé síly mezi protony.



## ELEKTROMAGNETICKÁ INTERAKCE

Působí na: kvarky  
a elektricky nabitě leptony  
Nosiče: fotony



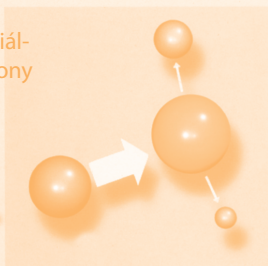
### Související jevy

Váže elektrony k jádru, atomy do molekul a je zodpovědná za vlastnosti pevných látek, kapalin a plynů.



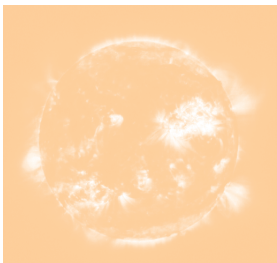
## SLABÁ INTERAKCE

Působí na: kvarky a leptony  
Nosiče: intermediální vektorové bosony



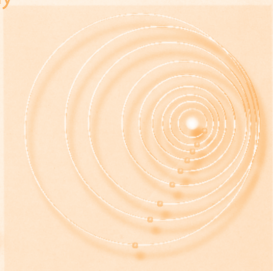
### Související jevy

Slabá interakce může za jeden typ přirozené radioaktivity (záření beta – setkáme se s ním třeba u některých hornin). Hraje také zásadní roli v jaderných reakcích v centrech hvězd, jako je i Slunce, ve kterých se vodík přeměňuje na helium.



## GRAVITACE

Působí na: všechny částice  
Nosič: graviton



### Související jevy

Gravitace způsobuje, že jablka padají k zemi. Je to síla přitažlivá. V astronomickém měřítku váže hmotu v planetách a hvězdách a drží hvězdy pohromadě v galaxiích.



# Zpět k velkému třesku

## Vývoj vesmíru

13,7 miliardy let

**Současnost**

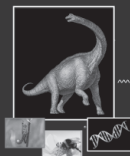


V současnosti se v CERN snažíme pohlédnout nazpět v čase a studovat původ hmoty

-270°C

10 miliard let

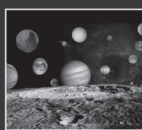
**Na Zemi se objevuje život**



Na Zemi, malé modré planetě ztracené v nekonečném vesmíru, vzniká „polévka“ organických molekul

9.2 miliardy let

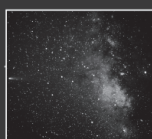
**Sluneční soustava**



Gravitace vytváří z trosek hvězd planety

200 milionů let

**Hvězdy a galaxie**



Gravitace vytváří z mraků atomů hvězdy.

V srdcích hvězd vznikají atomy těžších prvků, stavební materiál živých organismů

4000°C

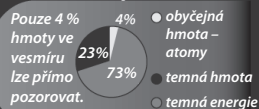
380 000 let

**Lehké atomy**



Elektrony se vážou k jádrům, vznikají atomy vodíku a helia

Fotony přestávají interagovat s elektrony, vesmír se stává průhledným a plným světla

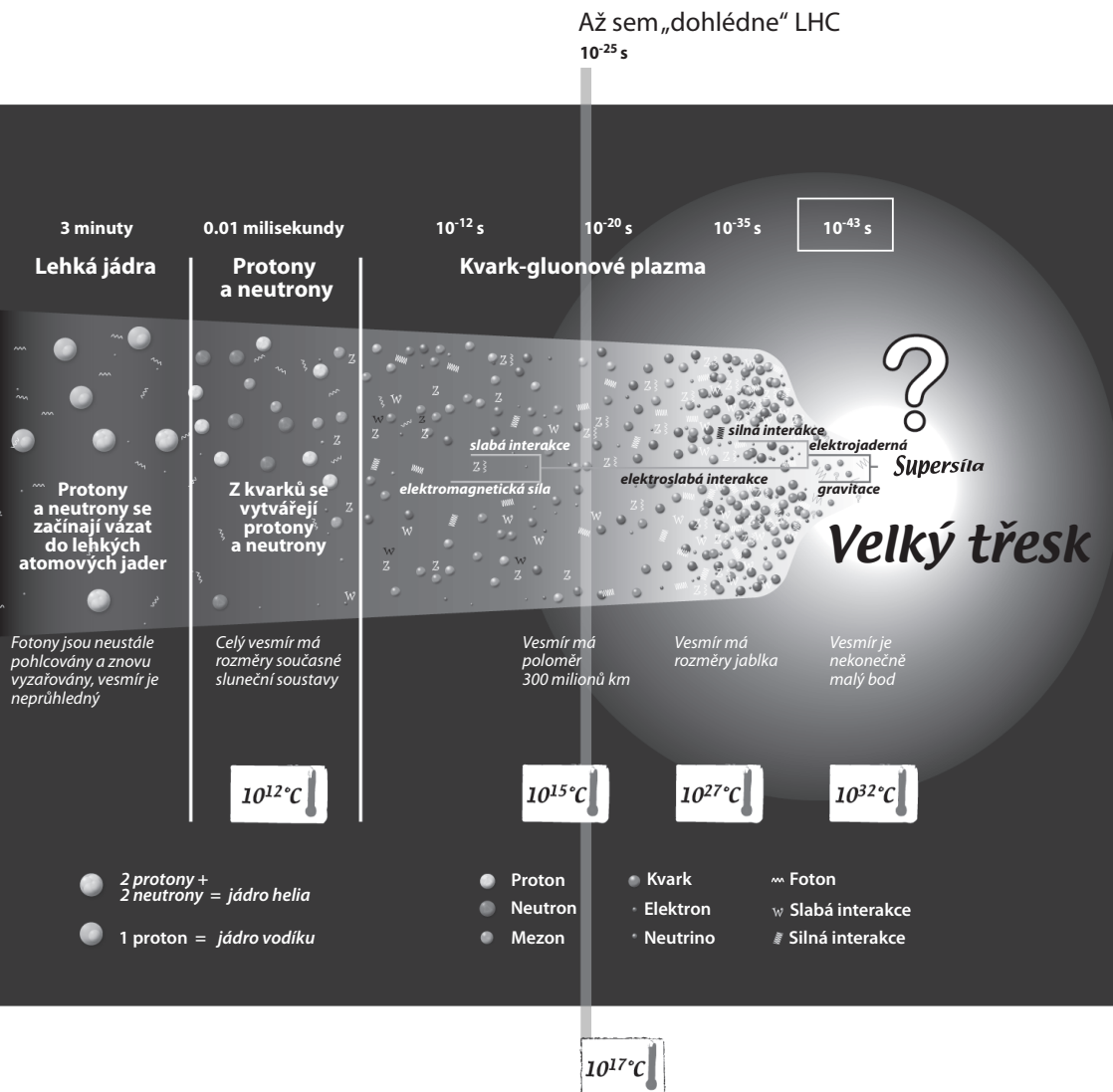


Atom helia



Atom vodíku

Hustota energie a teplota, kterých bude dosaženo při srážkách v urychlovači LHC, budou podobné podmínkám, které panovaly pouhý zlomek sekundy po velkém třesku. Fyzikové tak doufají, že získají další poznatky o tom, jak se vesmír vyvíjel.



## Komplex urychlovačů v CERN

Komplex urychlovačů v CERN je soustava zařízení, která jsou schopna dodávat částicím vyšší a vyšší energie. Každé z těchto zařízení postupně posílá svazek částic do zařízení následujícího, které částicím dodá další energii. Posledním členem této řady je urychlovač LHC, který urychlí svazek částic až na rekordních 7 GeV. Většina urychlovačů v tomto řetězci má navíc své vlastní experimentální haly, kde se svazky částic využívají v experimentech při nižších energiích.

*Stručný příběh protonu urychlovaného soustavou urychlovačů v CERN:*

- ▶ *Vodíkové atomy z tlakové lahve s vodíkem se zbaví elektronů. Získáme tak protony.*
- ▶ *Po průchodu urychlovačem Linac 2, kde získají energii 50 MeV, jsou zavedeny do boosteru protonového synchrotronu (PSB).*

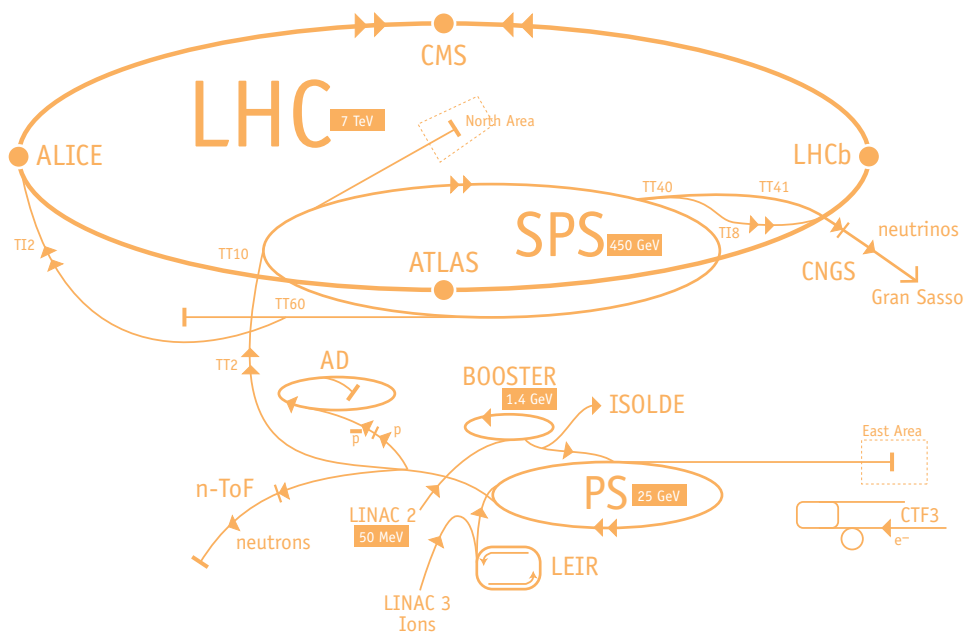
*Zde jsou protony urychleny na 1,4 GeV. Svazek pak přechází do protonového synchrotronu (PS), který protony urychlí na 25 GeV. Následuje urychlení na 450 GeV v superprotonovém synchrotronu (SPS). Poté jsou protony konečně poslány do LHC, a to ve směru i proti směru pohybu hodinových ručiček (plnění každého z prstenců trvá 4 minuty a 20 sekund), kde jsou po dobu 20 minut urychlovány až na nejvyšší dosažitelnou energii 7 TeV. Za normálních pracovních podmínek bude takto urychlený svazek obíhat v LHC urychlovači až několik hodin.*

*Protony přicházejí do LHC ve shlucích, které jsou připravovány v předcházejících urychlovačích soustavy. Kompletní schéma plnění a časové závislosti magnetických polí a proudů částic v jednotlivých stupních řetězce urychlovačů lze najít v přílohách 1 a 2.*



Kromě urychlování protonů bude celý komplex sloužit i k urychlování iontů olova.

Tyto ionty se získávají z vysoce čistého vzorku olova zahřátého na 550 °C. Páry olova jsou proudem elektronů ionizovány. Tím se získají ionty s mnoha různými hodnotami náboje, z nichž nejvyšší náboj mají ionty  $Pb^{29+}$ . Ty jsou dále vybrány a urychleny na 4,2 MeV/u (energie připadající na 1 nukleon) a poté procházejí uhlíkovou fólií, která většinu z nich „oloupe“ až na ionty  $Pb^{54+}$ . Jakmile je těchto iontů dostatečné množství, jsou odeslány do urychlovače LEIR (Low Energy Ion Ring – prstenec pro ionty s nízkou energií) a urychleny na 72 MeV/u. Odtud dále putují do PS, kde jejich svazek získá energii 5,9 GeV/u, a po průchodu další fólií, kde přijdou o zbytek elektronů a stanou se z nich holá jádra – ionty  $Pb^{82+}$  – jsou poslány do SPS, který je urychlí na 177 GeV/u. Pak už může svazek vstoupit do samotného LHC, kde jsou ionty urychleny na 2,76 TeV/u.





## Co znamená zkratka LHC?

LHC označuje v angličtině Large Hadron Collider, česky doslova Velký srážecí hadronů. Velký díky svým rozměrům (obvod tohoto urychlovače je přibližně 27 km), „srážecí“ proto, že částice obíhají v opačných směrech (ve dvou oddělených trubcích) a ve 4 bodech, kde se trubice protínají, se spolu srážejí, a konečně hadronů z toho důvodu, že urychluje protony, případně ionty, což jsou částice patřící mezi hadrony.

*Hadrony (z řeckého „adros“ – tlustý, silný) jsou částice složené z kvarků. Do této rodiny patří např. protony a neutrony, které tvoří atomová jádra. Naopak leptony (z řeckého „leptos“ – tenký) jsou částice, které nejsou složené z kvarků, např. elektron nebo mion.*

## Kdy byl LHC vymyšlen a schválen?

Již počátkem 80. let, v době, kdy byl navržen a stavěl se velký elektron-pozitronový urychlovač (LEP – Large Electron-Positron collider), existovaly v CERN skupiny fyziků zabývající se vzdálenější budoucností. Po mnoha letech práce na technických aspektech i fyzikálních možnostech nového zařízení se jejich sny splnily v prosinci 1994, kdy Rada CERN schválila stavbu LHC. Tento projekt dostal zelenou pod podmínkou, že nový urychlovač bude postaven bez navyšování běžného rozpočtu a že k vylepšování či urychlení projektu mohou být využity případné příspěvky nečlenských zemí. Zpočátku tato omezení rozpočtu znamenala, že LHC se měl stavět ve 2 etapách. Avšak po příspěvku Japonska, USA, Indie a dalších nečlenských zemí přijala Rada v roce 1995 rozhodnutí, že se celý projekt uskuteční v jedné jediné fázi. V letech 1996 –1998 byly oficiálně schváleny 4 hlavní experimenty na LHC – ALICE, ATLAS, CMS a LHCb – a na 4 místech začaly stavební práce. Od té doby přibyly ještě 2 menší experimenty – TOTEM, instalovaný v blízkosti CMS, a LHCf, jenž je umístěn poblíž experimentu ATLAS (viz část věnovanou experimentům).

*Více informací o významných meznících výstavby LHC lze najít na <http://www.cern.ch/LHC-Milestones/>*

## Kolik to všechno stojí?

Samotné vybudování urychlovače LHC stojí kolem 5 miliard švýcarských franků (zhruba 3 miliardy eur). Přibližnou informaci o rozdělení celkových nákladů udává následující tabulka:

Náklady na výstavbu (v milionech CHF)	Personální zajištění	Materiál	Celkem
LHC - urychlovač a příslušenství*)	1224	3756	<b>4980</b>
Podíl CERN na detektorech	869	493	<b>1362</b>
Výpočetní středisko (podíl CERN)	85	83	<b>168</b>
<b>Celkem</b>	<b>2178</b>	<b>4332</b>	<b>6510</b>

*\*) Do nákladů je zahrnut výzkum a vývoj urychlovače a injektorů, testy a přípravu na spuštění.*

Jednotlivé experimentální skupiny fungují jako samostatné útvary financované z vlastních rozpočtů. CERN jako instituce je členem každého z experimentů a přispívá na materiální rozpočet CMS a LHCb 20 %, u ALICE 16 % a u experimentu ATLAS 14 %. Experiment TOTEM je mnohem menší, celkové materiální náklady činí asi 6 milionů švýcarských franků. CERN k nim přispívá 30 %.

## Proč velký?

Velikost urychlovače souvisí s velikostí energie, které se má dosáhnout. V případě kruhového urychlovače je tato energie funkcí poloměru zařízení a síly magnetického pole dipólů, které udržuje částice na kruhové dráze. LHC využívá tunelu o obvodu 27 km, který byl postaven již pro předchozí velký urychlovač LEP. Dipólové magnety a urychlovací dutinové rezonátory, které jsou součástí LHC, patří k nejvýkonnějším, jaké lze dnes sestrojít. Rozměry tunelu, magnety, dutinové rezonátory a další základní prvky zařízení představují hlavní technická omezení, jež určují maximální dosažitelnou energii na LHC – 7 TeV na 1 proton v každém svazku.

## Proč srážecí?

Tento typ urychlovače – srážecí (collider), kde se srážejí svazky částic obíhající v navzájem opačných směrech – má oproti jiným typům urychlovačů, ve kterých urychlené částice narážejí na pevný cíl, velkou výhodu. Když se totiž srazí dva svazky, energie srážky je součtem energií jednotlivých svazků. V případě svazku se stejnou energií narážejícího do pevného terče je energie srážky mnohem menší.

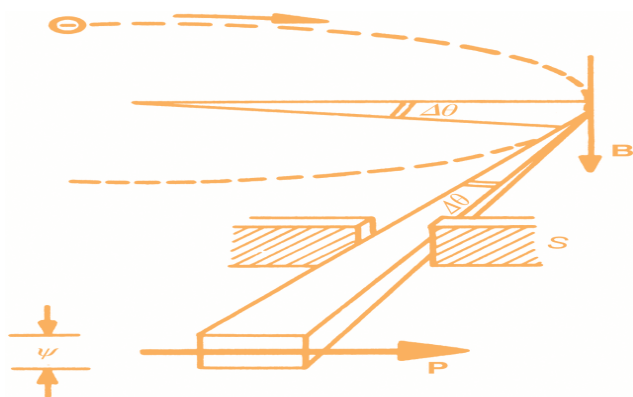
*Využitelná energie (například pro vytváření nových částic) je v obou případech tzv. „energie v těžiškové soustavě souřadnic“. V prvním případě představuje jednoduše součet energií obou srážejících se svazků ( $E = E_{sv1} + E_{sv2}$ ), zatímco v druhém je získaná energie úměrná druhé odmocnině z energie částice narážející na pevný terčik ( $E \sim \sqrt{E_{sv}}$ ).*

## Proč hadrony?

LHC bude urychlovat dva svazky stejných částic, buď protony, nebo ionty olova. V obou případech jde o hadrony. Urychlovač může urychlovat pouze určité typy částic: za prvé to musí být částice s elektrickým nábojem (protože svazky jsou ovládány elektromagnetickým polem, které má vliv pouze na nabitě částice) a za druhé kromě speciálních případů se tyto částice nesmějí rozpadat. To omezuje výběr částic, které lze reálně urychlovat, na elektrony, protony, ionty a jejich antičástice.

V kruhovém urychlovači, jako je LHC, ztrácejí nabitě částice energii synchrotronovým zářením. Těžké částice jako protony (ty jsou zhruba 2000x hmotnější než elektrony) ztratí synchrotronovým zářením mnohem méně energie na jeden oběh než lehké elektrony. Proto se v kruhových urychlovačích dosáhne velmi vysokých energií srážek mnohem efektivněji při urychlování těžkých částic. Tak je tomu i v případě LHC.

*Synchrotronové záření je záření, které vydává nabitá částice urychlovaná na kruhové dráze. Představuje pro částice ztrátu energie, což znamená, že urychlovač musí částicím dodávat další energii, aby se tato ztráta vykompenzovala a energie svazku zůstávala konstantní.*



## Proč je LHC pod zemí?

LHC využívá tunel, který byl vyražen pro předchozí urychlovač LEP, jenž ukončil svou činnost a byl rozmontován v roce 2000. Podzemní tunel představoval nejlepší řešení pro umístění sedmadvacetakilometrového kruhového urychlovače, protože je mnohem levnější vykopat tunel než vykupovat pozemky potřebné ke stavbě na povrchu a navíc dopad na vzhled krajiny zůstává minimální. Zemská kůra kromě toho poskytuje velmi dobrou ochranu před zářením.

Tunel je kvůli geologickým poměrům (posuzovaným s ohledem na náklady) umístěn v průměrné hloubce 100 m, s mírným sklonem 1,4 %. Jeho hloubka se pohybuje mezi 175 m (pod pohořím Jura) a 50 m (směrem k Ženevskému jezeru).

*Mírný sklon tunelu má především finanční důvody. V době, kdy se razil tunel pro urychlovač LEP, byla stavba svislých šachet velmi nákladná. Proto byla minimalizována délka části tunelu pod pohořím Jura. Další omezení, která bylo nutno při stavbě tunelu brát v úvahu, byla tato:*

- ▶ *bylo třeba, aby tunel byl v hloubce nejméně 5 m pod svrchním rozhraním vrstvy zeleného pískovce („molasy“);*
- ▶ *tunel musel procházet v blízkosti tzv. pilotního (zkušebního) tunelu, ve kterém se testovaly razicí techniky;*
- ▶ *tunel musel být napojen na urychlovač SPS, což znamenalo, že byl k dispozici pouze jeden stupeň volnosti (náklon; bod napojení byl pevně dán). Úhel náklonu byl získán minimalizací hloubek šachet.*



## Jaká je energie srážek v LHC a co je na nich pozoruhodného?

Každý protonový svazek obíhající v LHC bude mít energii 7 TeV, energie srážky dvou protonů tedy bude 14 TeV. Ionty olova obsahují mnoho protonů, takže získají energii ještě větší: dva ionty budou mít při srážkách energii 1150 TeV. V obou případech se jedná o hodnoty, kterých nebylo doposud při urychlování částic v laboratorních podmínkách dosaženo.

To, co je na těchto srážkách podstatného a pozoruhodného, je koncentrace energie. Když tleskneme, bude energie „srážky“ našich dlaní pravděpodobně větší než u protonů v LHC, ale zdaleka nebude tak koncentrovaná! Představte si však, co byste udělali, kdybyste měli držet v jedné ruce jehlu. Určitě byste před tlesknutím značně zpomalili.

*V absolutních hodnotách nejsou tyto energie ve srovnání s energiemi, s nimiž se setkáváme v našem každodenním životě, nijak ohromující. Energie 1 TeV odpovídá zhruba energii letícího komára. Na LHC je výjimečné to, že dokáže natěsnat energii do prostoru asi tisíc miliardkrát menšího, než je komár.*

## Jaké jsou hlavní cíle LHC?

Naše současné chápání vesmíru je neúplné. Standardní model fundamentálních částic a interakcí (viz první kapitolu) shrnuje, co všechno dnes víme o fyzice částic. Tento model byl ověřen v nejrůznějších experimentech a obzvláště úspěšný byl při předpovídání existence dříve neznámých částic. Mnoho otázek však ponechává nevyřešených a LHC by měl pomoci na některé z nich odpovědět.

- ▶ Standardní model nevysvětluje, odkud se bere hmotnost částic, ani to, proč některé částice jsou velmi těžké, zatímco ostatní mají hmotnost velmi malou. Odpovědí může být tzv. Higgsův mechanismus. Podle teorie Higgsova mechanismu je celý vesmír vyplněn „Higgsovým polem“ a částice získávají svou hmotnost interakcemi s tímto polem. Částice, jejichž interakce jsou intenzivní, mají hmotnost velkou, zatímco ty, jejichž interakce je slabá, jsou lehké. Higgsovo pole obsahuje nejméně jednu novou částici spojenou s těmito interakcemi – Higgsův boson. Pokud taková částice existuje, experimenty na LHC ji budou schopny detekovat.
- ▶ Standardní model nenabízí jednotný popis všech fundamentálních sil, poněvadž se stále nedaří vytvořit teorii gravitace podobnou teoriím ostatních sil. Sjednocení základních sil by mohla napomoci supersymetrie – teorie předpovídající existenci hmotnějších partnerů základních částic standardního modelu. Pokud je teorie supersymetrie správná, nejlehčí supersymetrické částice by měly být na LHC nalezeny.
- ▶ Kosmologická a astrofyzikální pozorování prokázala, že veškerá viditelná hmota se podílí na celkové hmotě a energii vesmíru pouhými 4 %. Velmi důležitým úkolem současné fyziky je vysvětlit, co tvoří zbytek – temnou hmotu (23 %) a temnou energii (73 %). Velice populární myšlenkou je, že temná hmota je tvořena neutrálními, dosud neobjevenými supersymetrickými částicemi.

První náznaky existence **temné hmoty** se objevily v roce 1933, kdy astronomická pozorování a jejich srovnání s výpočty naznačovaly, že ve vesmíru musí být mnohem víc „materiálu“, než se nám daří přímo pozorovat. Vědci nyní věří, že gravitační efekt temné hmoty vede k rychlejší rotaci galaxií, než se očekávalo, a že její gravitační pole odchyluje světlo objektů, které se nacházejí za ní. Měření těchto jevů prokazuje existenci temné hmoty a lze tak odhadnout i její hustotu, a to i přes to, že ji nelze přímo pozorovat.

**Temná energie** je forma energie, která je podle všeho spojena s vakuem a tvoří přibližně 70 % vesmíru. Temná energie je rovnoměrně rozložena v prostoru i v čase. Jinými slovy, její působení není ovlivněno rozpínáním vesmíru (není jí „ředěna“). Toto rovnoměrné rozdělení znamená, že temná hmota nezpůsobuje žádné lokální gravitační jevy, ale působí globálně – na vesmír jako celek. Jejím důsledkem je odpudivá síla, která má tendenci urychlovat rozpínání vesmíru. Míra rozpínání a jeho urychlování se měří v experimentech využívajících Hubbleův zákon. Tato měření spolu s dalšími vědeckými daty potvrdila existenci temné hmoty a byla použita k odhadu jejího množství ve vesmíru.

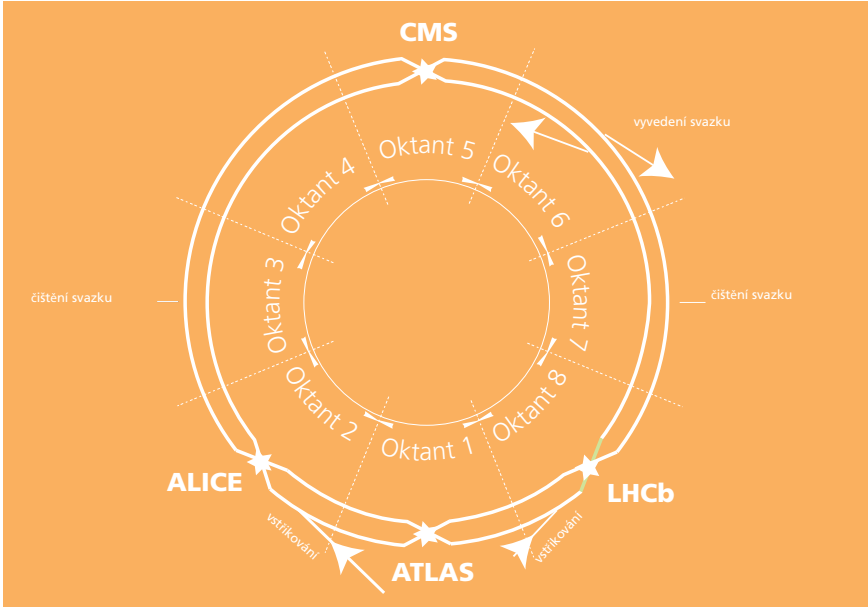
- ▶ LHC nám také pomůže zkoumat záhady antihmoty. V okamžiku velkého třesku musely hmota a antihmota vzniknout ve stejném množství, ale podle toho, co zatím pozorujeme, je vesmír tvořen pouze hmotou. Proč? LHC nám může pomoci najít odpověď.

Vědci se dříve domnívali, že antihmota je dokonalým „odrazem“ hmoty – pokud zaměníte hmotu za antihmotu a podíváte se na výsledek jako v zrcadle, nebudete schopni rozpoznat žádný rozdíl. Nyní víme, že odraz není dokonalý, což mohlo vést k nerovnováze mezi hmotou a antihmotou v našem vesmíru.

Na základě výsledku analýzy difúzního záření gama a anizotropie kosmického reliktního záření (CMB – cosmic microwave background) vědci soudí, že ve vesmíru není prakticky žádná antihmota. Pokud bychom předpokládali, že vesmír se po velkém třesku nějak rozdělil do odlišných oblastí – domén, kde převládá buď hmota, nebo antihmota, v hraničních oblastech těchto domén by mělo docházet k anihilacím produkujícím kosmické (gama) záření. Vezmeme-li v úvahu účinný průřez anihilace, vzdálenosti ve vesmíru a rudý posuv, můžeme předpovědět množství difúzního záření gama, které by mělo přicházet na Zemi. Volným parametrem v modelu jsou rozměry domén. Po srovnání s pozorovaným tokem záření gama docházíme k závěru, že rozměr domén nemůže být menší než 3,7 miliardy světelných let, což je hodnota nepříliš menší než velikost celého vesmíru. Další omezení pochází z analýzy anizotropie reliktního záření – v oblastech (doménách) antihmoty (libovolných rozměrů) by docházelo k zahřívání hraničních oblastí, což by se v reliktním záření projevilo jako fluktuaace jeho hustoty. Pozorované hodnoty v řádu  $10^{-5}$  však určují pevné hranice pro množství antihmoty v raném vesmíru.

- ▶ Kromě studia srážek protonů umožní LHC při srážkách těžkých iontů studovat i stav hmoty, který existoval v období raného vesmíru – tzv. „kvark-gluonové plazma“. Když se totiž těžké ionty srazí při vysokých energiích, vytvoří na okamžik „ohnivou kouli“ z velmi horké a husté hmoty, která může být v experimentech na LHC studována.

Podle současných teorií prošel vesmír po svém zrodu z velkého třesku stadiem, ve kterém hmota existovala ve formě extrémně horké a husté „polévky“ zvané kvark-gluonové plazma (QGP), kterou tvořily základní stavební částice hmoty. Jak vesmír chladl, začaly kvarky vytvářet složené částice, jako jsou protony a neutrony (tento jev se nazývá „uvěznění kvarků“). LHC je schopen při srážkách urychlených svazků těžkých iontů kvark-gluonové plazma znovu vytvořit. Při těchto srážkách bude teplota více než 100 000x vyšší, než je teplota v nitru Slunce. Za takových podmínek budou kvarky opět na okamžik volné a tuto prvopočáteční „polévku“ bude možné s pomocí detektorů studovat. Tím získáme poznatky o základních vlastnostech částic i o tom, jak se skládají dohromady, když vytvářejí běžnou hmotu.



## Co Co jsou sektory a oktanty v urychlovači?

Urychlovač LHC netvoří dokonalou kružnici. Skládá se z osmi oblouků a osmi rovných úseků, tzv. inzercí. V každém oblouku je 154 dipólových magnetů, které udržují částice na dráze. Na přechodech mezi obloukovými a rovnými částmi jsou prvky zaostřující svazek. Konkrétní uspořádání rovných úseků závisí na tom, k čemu slouží. V jednotlivých rovných úsecích dochází ke srážkám v detektorech, zavádění svazků, jejich likvidaci nebo „čištění“ (udržování vhodných parametrů svazku). Kromě různých typů magnetů jsou v jednom z rovných úseků umístěny také urychlovací prvky.

Sektor je definován jako část urychlovače mezi dvěma středy rovných úseků. Každý z osmi sektorů představuje dílčí pracovní jednotku urychlovače. Instalace magnetů a dalších aparatur probíhá po jednotlivých sektorech, všechny dipóly jednoho sektoru jsou zapojeny v sérii a jsou chlazeny jediným společným kryostatem. Napájení každého sektoru je v podstatě nezávislé.

Oktant začíná uprostřed oblouku a končí ve středu sousedního oblouku. Každý oktant tak obsahuje jeden celý rovný úsek. Tento způsob popisu je vhodnější, když jde o funkci magnetů přivádějících částice ke srážkám nebo při zavádění, likvidaci či čištění svazku.

## Jaké jsou důležité parametry urychlovače?

Urychlovače se staví proto, aby vědci mohli studovat procesy, jejichž pravděpodobnost závisí na energii srážek částic a které jsou často velmi vzácné. To znamená, že pro fyziky jsou nejdůležitějšími parametry urychlovače energie svazku a počet „zajímavých“ srážek. Konkrétně, v urychlovači, jako je LHC, záleží pravděpodobnost určité události na veličině, které se říká luminozita. Ta závisí na počtu částic v každém shluku, frekvenci oběhů v prstenci urychlovače, celkovém počtu shluků a na příčném průřezu svazku. Stručně řečeno, v oblasti srážky je třeba natěsnat co nejvíc částic do co nejmenšího prostoru.

## Bez čeho se urychlovač neobejde?

V urychlovači obíhají částice v trubici, ve které je vakuum. Jejich pohyb se ovládá pomocí elektromagnetických prvků: dipólové magnety udržují částice na (téměř) kruhové dráze, kvadrupólové magnety „zaostřují“ svazek do malého průřezu, vysokofrekvenční rezonátory dodávají svazkům energii – nejprve je urychlují a později jejich energii udržují na konstantní hodnotě tím, že kompenzují energetické ztráty.



**Vakuum v LHC:** LHC má ne 1, ale hned 3 vakuové systémy:

- izolační vakuum pro kryogenní magnety,
- izolační vakuum pro distribuční kanál kapalného helia,
- vakuum v urychlovacích trubcích.

V samotných urychlovacích trubcích bude tlak  $10^{-13}$  atm, tedy ultra-vysoké vakuum, aby nedocházelo ke srážkám částic s molekulami plynu. Největší objem vzduchu se v LHC musí vyčerpat při vytváření izolačního vakuu pro kryogenní magnety (zhruba  $9000 \text{ m}^3$ , což odpovídá objemu tří standardních horkovzdušných balónů).

**Magnety:** V LHC se používají nejrůznější typy magnetů – dipóly, kvadrupóly, šesti-, osmi-, desetipólové magnety atd. – celkem téměř 9600 magnetů. Každý typ magnetu přispívá k optimalizaci trajektorií částic. Většina korekčních magnetů je umístěna a chlazena pohromadě s hlavními dipóly a kvadrupóly. Magnety LHC mají buď dvojitou aperтуру (tj. v jednom tělese magnetu jsou obě svazkové trubice, jde o jakýsi magnet-dvojče – např. hlavní dipóly) nebo jednoduchou, jako některé kvadrupóly v rovných úsecích urychlovače, kde oba svazky letí jedinou trubicí. To jsou speciální magnety, jejichž úkolem je soustředit svazek v oblasti srážky do nejmenší oblasti tak, aby pravděpodobnost čelní srážky dvou protonů byla co největší. Největších magnetů – dipólů – je 1232.

**Dutinové rezonátory:** Hlavním úkolem těchto prvků je udržet protony v každém z 2808 shluků těsně pohromadě, aby byla při srážce zajištěna vysoká luminozita a počet srážek byl tudíž co největší. Dodávají také svazku při urychlování energii. Nejlepším řešením jsou supravodivé rezonátory s minimálními ztrátami a schopností nashromáždit velkou energii. V LHC se pro každý svazek používá 8 vysokofrekvenčních rezonátorů, každý přispívá 2 MV (urychlovací pole má intenzitu 5 MV/m) při frekvenci 400 MHz. Jejich provozní teplota je 4,5 K, tj.  $-268,7 \text{ }^\circ\text{C}$ . (Magnety LHC jsou chlazeny supratekutým heliem na 1,9 K, tj.  $-273,1 \text{ }^\circ\text{C}$ .) Rezonátory v LHC jsou sestaveny po 4 do kryomodulů, 2 kryomoduly na každý svazek. Jsou umístěny umístěny v jednom z dlouhých rovných úseků urychlovače, kde je vzdálenost mezi svazky zvětšena z obvyklých 195 mm na 420 mm.

Důležité parametry urychlovače LHC jsou uvedeny v následující tabulce:

<i>Veličina</i>	<i>Číselná hodnota</i>
<i>Obvod</i>	26 659 m
<i>Operační teplota dipólů</i>	1,9 K (-271.3°C)
<i>Počet magnetů</i>	9593
<i>Počet hlavních dipólů</i>	1232
<i>Počet hlavních kvadrupólů</i>	392
<i>Počet dutinových rezonátorů</i>	8 pro každý svazek
<i>Nominální energie – protony</i>	7 TeV
<i>Nominální energie – ionty</i>	2,76 TeV/u (*)
<i>Maximální magnetické pole dipólů</i>	8,33 T
<i>Minimální vzdálenost mezi shluky částic</i>	~7 m
<i>Plánovaná luminozita</i>	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
<i>Počet shluků v protonovém svazku</i>	2808
<i>Počet protonů ve shluku</i>	$1,1 \times 10^{11}$
<i>Počet oběhů za sekundu</i>	11 245
<i>Počet srážek za sekundu</i>	600 millionů

(\*) energie na jeden nukleon

## **Bude energie svazku v LHC ovlivněna Měsícem, jako tomu bylo u urychlovače LEP?**

Slapové síly Měsíce budou energii svazků v LHC ovlivňovat stejným způsobem, jako tomu bylo u urychlovače LEP. Hodnota absolutní energie srážky nebude ovšem pro experimenty na LHC natolik klíčovou položkou jako u LEP. Kolísání velikosti slapových sil však je třeba brát v úvahu při vstřikování částic do urychlovače.

*Příliv a odliv, k němuž dochází v mořích a oceánech působením slapových sil Měsíce (a do menší míry i Slunce), je jev dostatečně známý. Způsobuje vzestup a pokles vodní hladiny u mořských břehů s přibližně dvanáctihodinovou periodou. Přitažlivé působení Měsíce ovlivňuje i pevný zemský povrch, neboť horniny, které ho tvoří, jsou elastické. Za úplňku a při novu se vlivem těchto sil zemská kůra v ženevské oblasti zdvíhá zhruba o 25 cm. Tento pohyb má za následek periodickou změnu obvodu LHC o 1 mm (při celkovém obvodu 26,6 km), a tím je ovlivněna i energie svazku částic. Vědci tedy musí brát tento vliv Měsíce při svých přesných měřeních v úvahu.*

## Proč jsou dipóly LHC jedinečné?

Dipóly pro LHC představovaly při jeho konstrukci největší technologickou výzvu. V protonovém urychlovači, jako je LHC, je maximální energie, které lze dosáhnout při daném obvodu urychlovače, přímo úměrná velikosti magnetického pole dipólů. V LHC se jako dipóly používají supravodivé elektromagnety, které jsou schopny vytvořit velmi silné pole o indukci 8,3 T po celé své délce. Při použití „teplých“ magnetů místo supravodivých by se ničeho podobného nedalo prakticky dosáhnout.

Dipóly LHC jsou tvořeny niob-titanovými (NbTi) kabely, které se stávají při teplotách nižších než 10 K (-263,2 °C) supravodivými – to znamená, že vymizí jejich elektrický odpor. Ve skutečnosti budou magnety LHC chlazeny na teplotu 1,9 K (-273,1 °C), což je hodnota nižší než teplota mikrovlnného záření vesmíru (2,7 K čili -270,5 °C). Vodiči dipólů bude protékat proud 11 700 A, jenž bude vytvářet silné magnetické pole o indukci 8,3 T. Takové je potřeba k udržení svazků o energii 7 TeV v sedmadvacetikilometrovém prstenci urychlovače. Pokud by magnety byly konstruovány pro pracovní teplotu 4,5 K (-268,7 °C), indukce jimi vytvořeného magnetického pole by byla pouze 6,8 T. Pro srovnání, celkový maximální proud v průměrném rodinném domku dosahuje hodnoty asi 100 A.

Teploty 1,9 K (-271,3 °C) se dosahuje použitím supratekutého helia v systémech magnetů. Každý dipól je 15 m dlouhý a váží kolem 35 tun.

*Magnetické cívky v LHC jsou navinuty z kabelů obsahujících až 36 zkroucených patnáctimilimetrových pramenů, z nichž každý je vytvořen z 6400 jednotlivých vláken o průměru pouhých 7 μm (pro srovnání, lidský vlas má tloušťku asi 50 μm). Pro 27 km dlouhý okruh LHC bylo potřeba 7600 km kabelů, což odpovídá délce pramenů 270 000 km – dost na to, aby byla Země šestkrát omotána kolem rovníku. Pokud bychom rozpletli prameny na jednotlivá vlákna, mohli bychom je natáhnout pětkrát ke Slunci a zpět a ještě by zbylo dost na několik propojení s Měsícem (viz oddíl 10 fascinujících údajů o LHC na str. 53).*

## Proč je kryogenní systém LHC jedinečný?

LHC je vybaven největším kryogenním systémem na světě a bude jedním z nejchladnějších míst na Zemi. Tak nízká teplota je potřebná pro činnost supravodivých magnetů, které udržují protony na kruhové dráze (viz otázku „Proč jsou dipóly LHC jedinečné?“). Aby bylo možné udržet celý 27 km dlouhý prstenec (4700 tun materiálu v každém z 8 sektorů) na teplotě supratekutého helia (1,9 K, -271,3 °C), bude muset chladicí (kryogenní) systém LHC dodávat bezprecedentní chladicí výkon – kolem 150 kW u systémů chladících na 4,5 K a 20 kW u těch, kde se dosahuje 1,9 K. Celá chladicí soustava je uspořádána do 5 „kryogenních ostrovů“. Každý „ostrov“ musí zajistit distribuci chladících látek a přenášet kilowatty chladicího výkonu na dlouhé vzdálenosti. Celý ochlazovací proces trvá několik týdnů.

Ochlazování probíhá ve třech fázích:

- 1) ochlazení na 4,5 K (-268,7 °C),
- 2) plnění „studených“ částí magnetů tekutým heliem,
- 3) konečné ochlazení na 1,9 K (-271,3 °C).

Samotná první fáze proběhne ve dvou krocích: nejprve bude ve výměnících tepla chladicích zařízení pomocí zhruba 10 000 t kapalného dusíku ochlazen helium na 80 K. Poté turbíny chladičů ochladí helium na 4,5 K (-268,7 °C) a to je tak připraveno pro plnění do „studených“ částí magnetů. Po naplnění magnetů se sníží teplota až na 1,9 K (-271,3 °C). Celkem bude potřeba asi 120 t helia, z nichž asi 90 tun bude v supravodivých magnetech a zbytek v trubkách a chladicích jednotkách.

Aby se vyloučila možnost úniku a naplnění tunelu urychlovače nedýchatelným plynem, kapalný dusík se nikdy neocetne přímo v LHC.

## Proč potřebujeme supratekuté helium?

Volba pracovní teploty pro urychlovač LHC souvisí jak s pozoruhodnými vlastnostmi helia, tak s vlastnostmi niob-titanové supravodivé slitiny v cívkách magnetů. Při atmosférickém tlaku získáme kapalné helium za teplot kolem 4,2 K (-269,0 °C). Při dalším ochlazování však projde při teplotě 2,17 K (-271,0 °C) dalším fázovým přechodem a stane se supratekutým. Kromě mnoha jiných jedinečných vlastností má supratekuté helium velmi vysokou tepelnou vodivost, což z něj činí ideální médium pro chlazení a stabilizaci velkých supravodivých systémů (viz také otázku „Proč je kryogenní systém LHC jedinečný?“).

Součástí kryogenního systému LHC je celkem 40 000 speciálních těsných spojů trubek. K udržení operační teploty magnetů (1,9 K) bude urychlovač potřebovat 120 tun helia. 75 % bude v samotných „studených“ částech magnetů, zatímco zbývajících 25 % bude kolovat v chladicích zařízeních a distribučním systému. Během normální činnosti urychlovače bude většina helia cirkulovat v uzavřených smyčkách. Určitá část se ovšem bude pravidelně ztrácet, třeba při odstavení urychlovače, úpravách a opravách nebo operačních problémech. Tyto ztráty bude třeba doplňovat.

## Proč mluvíme o shlucích?

Protony v urychlovači LHC budou obíhat v oddělených shlucích. S tímto uspořádáním částic se v moderních urychlovačích setkáváme proto, že se urychluje vysokofrekvenčním polem. Protony jsou urychlovány pouze v okamžiku, kdy má elektrické pole ve chvíli průletu částic urychlovací dutinou správnou orientaci, což se děje v přesně určených momentech vysokofrekvenčního cyklu.

Za normálních operačních podmínek LHC bude každý protonový svazek sestávat ze 2808 shluků a v každém z nich bude přibližně  $10^{11}$  protonů.

Rozměry takového shluku nejsou během oběhu konstantní. Každý z nich se při obíhání v urychlovači střídavě stlačuje a rozšiřuje – například ve srážkových bodech je co nejvíce stlačen, aby pravděpodobnost srážky byla maximální. V místech vzdálených od srážkových bodů jsou shluky několik centimetrů dlouhé a asi milimetr široké. Jakmile se přiblíží k místu srážky, jsou stlačeny na průměr zhruba 16  $\mu\text{m}$  (lidský vlas má asi 50  $\mu\text{m}$ ), aby se zvýšila pravděpodobnost srážek protonů. Vyšší počet shluků je jedním ze

způsobů, jak zvětšit luminozitu urychlovače. V LHC bude rozestup jednotlivých shluků 25 ns (neboli asi 7 m), což je značně technicky náročné ke zvládnutí. (V urychlovači LEP, předchůdci LHC, obíhaly pouhé 4 shluky.)

*Rozestupy shluků v intervalech 25 ns odpovídají frekvenci 40 MHz, což znamená, že shluky by měly projít každým ze srážkových bodů v LHC čtyřicetmilionkrát za sekundu. Z praktických důvodů však mezi nimi budou čas od času rozestupy větší, aby byl čas například na zapojení speciálních magnetů pro vstříknutí nebo likvidaci svazku. Průměrný počet setkání shluků v jednom bodě v LHC za sekundu se rovná celkovému počtu shluků vynásobenému počtem oběhů za sekundu:  $2808 \times 11\,245 = 31,6$  MHz.*

## Kolik srážek se uskuteční v LHC za jednu sekundu?

Každý svazek bude sestávat z téměř 3000 shluků a v každém z nich bude zhruba 100 miliard částic. Ty jsou tak nepatrné, že pravděpodobnost srážky dvou částic je velmi malá. Při jednom setkání shluků dojde mezi 200 miliardami částic pouze asi ke 20 srážkám. Shluky obíhající proti sobě se každou sekundu setkají v průměru 30milionkrát (viz předchozí otázku), takže v LHC bude docházet v každém srážkovém bodě asi k 600 milionům srážek za sekundu.

## Jak dlouho bude svazek v urychlovači obíhat?

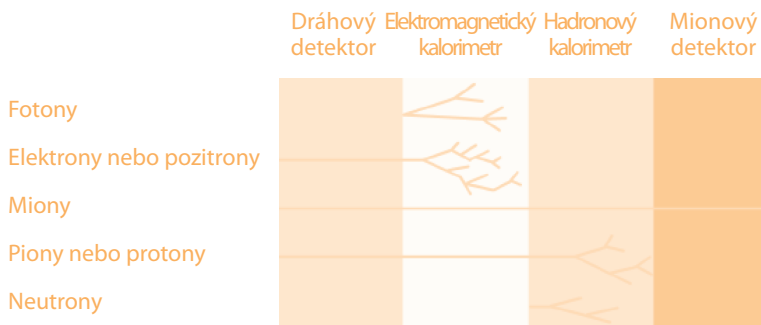
Svazek může v urychlovači obíhat až 10 hodin. Urazí přitom více než 10 miliard kilometrů, což představuje vzdálenost větší než ze Země k Neptunu a zpět. Proton pohybující se téměř rychlostí světla vykoná v LHC každou vteřinu 11 245 oběhů.





## Jak částice pozorujeme?

Cílem fyziků je zaznamenat při každé srážce co nejvíc informací o počtu vzniklých částic, jejich drahách a dalších vlastnostech, aby bylo možné co nejlépe zrekonstruovat celý proces. Už jen samotný záznam drah částic poskytuje velmi užitečné informace, zvláště tehdy, je-li detektor umístěn v magnetickém poli. Je například možné stanovit elektrický náboj – částice s kladným nábojem se stáčí v magnetickém poli na opačnou stranu než částice s nábojem záporným. Lze určit i hybnost částice (hybnost je rovna součinu hmotnosti a rychlosti částice) – částice s velkou hybností se pohybují v téměř rovných liniích, zatímco částice s malou hybností vytvářejí úzké spirály.



## Jaké detektory jsou na LHC?

Na urychlovači LHC je umístěno šest experimentů (pokus o překlad jejich „dlouhých“ anglických názvů, které daly vzniknout zkratkám, by asi vyzněl bizarně; snad bude vše jasné z následujících odstavců): ALICE (A Large Ion Collider Experiment), ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus), CMS (Compact Muon Solenoid), LHC b (the Large Hadron Collider beauty), LHC f (the Large Hadron Collider forward) a TOTEM (The TOTAl Elastic and diffractive cross section Measurement). ALICE, ATLAS, CMS a LHCb jsou umístěny ve čtyřech obrovských podzemních prostorách vybudovaných v místech srážkových bodů. Experiment TOTEM je umístěn v blízkosti CMS a LHCf nedaleko experimentu ATLAS.

## Co je to ALICE?

ALICE je detektor zaměřený na analýzu dat ze srážek iontů olova. Bude studovat vlastnosti kvark-gluonového plazmatu – stavu hmoty, kdy za extrémně vysoké teploty a hustoty nejsou kvarky a gluony svázány (či uvězněny) uvnitř hadronů. Hmota v takovémto stavu pravděpodobně existovala krátce po velkém třesku, ještě předtím, než se vytvořily částice jako protony a neutrony. Na projektu se v mezinárodní spolupráci podílí více než 1500 vědců ze 104 institucí z 31 zemí (údaj z července 2007).

<i>Rozměry</i>	<i>délka 26 m, výška 16 m, šířka 16 m</i>
<i>Hmotnost</i>	<i>10 000 t</i>
<i>Technické provedení</i>	<i>centrální barel + jednoramenný dopředný mionový spektrometr</i>
<i>Materiální náklady</i>	<i>115 milionů CHF</i>
<i>Umístění</i>	<i>St Genis-Pouilly, Francie.</i>

*Více informací na <http://aliceinfo.cern.ch/Public/>*

## Co je to ATLAS?

ATLAS je víceúčelový detektor zkonstruovaný tak, aby mohl studovat co nejširší okruh fyzikálních jevů na LHC – od Higgsových bosonů až po supersymetrii (SUSY) nebo další prostorové dimenze. Charakteristickým prvkem detektoru je systém mohutných toroidálních magnetů. Ten se skládá z osmi podlouhlých supravodivých cívek o délce 25 m sestavených tak, že vytvářejí magnetické pole v podobě tlustého válce provlečeného cívkami a obepínajícího trubici urychlovače. ATLAS je vůbec největším detektorem pro srážkový experiment, který byl kdy postaven. Na experimentu spolupracuje více než 1900 vědců ze 164 institucí z 35 zemí (duben 2007).

<i>Rozměry</i>	<i>délka 46 m, výška 25 m, šířka 25 m</i>
<i>Hmotnost</i>	<i>7000 t</i>
<i>Technické provedení</i>	<i>centrální barel + koncové „poklice“ (endcaps)</i>
<i>Materiální náklady</i>	<i>540 milionů CHF</i>
<i>Umístění</i>	<i>Meyrin, Švýcarsko.</i>

*Více informací na <http://atlas.ch/>*

## Co je to CMS?

CMS je víceúčelový detektor se stejnými fyzikálními cíli jako ATLAS, liší se však technickým řešením a konstrukcí. Je postaven kolem obrovského supravodivého solenoidu. Ten má tvar válcovité cívky ze supravodivého kabelu a vytváří magnetické pole o indukci 4 T, což je hodnota asi stotisíckrát větší než u magnetického pole Země. Experimentu CMS se účastní více než 2000 vědců ze 181 instituce ze 38 zemí (květen 2007).

<i>Rozměry</i>	<i>délka 21 m, výška 15 m, šířka 15 m</i>
<i>Hmotnost</i>	<i>12 500 t</i>
<i>Technické provedení</i>	<i>centrální barel + koncové „poklice“</i>
<i>Materiální náklady</i>	<i>500 milionů CHF</i>
<i>Umístění</i>	<i>Cessy, Francie.</i>

*Více informací na <http://cmsinfo.cern.ch/outreach/>*

## Co je to LHCb?

LHCb se specializuje na studium nepatrné asymetrie mezi hmotou a antihmotou, která se projevuje při interakcích B-částic (částic obsahujících kvark b). Přesné pochopení jejího mechanismu by pomohlo vysvětlit zásadní otázku, proč je náš vesmír tvořen právě touto hmotou, kterou pozorujeme. Namísto toho, aby zcela obklopoval srážkový bod, využívá LHCb řadu subdetektorů určených převážně k detekci částic letících po srážce dopředu – ve směru svazku. V bodě srážky je pouze první ze subdetektorů, další jsou umístěny v řadě za sebou a celkem pokrývají vzdálenost asi 20 m. Na experimentu se podílí více než 650 vědců ze 47 institucí ze 14 zemí (květen 2007).

<i>Rozměry</i>	<i>délka 21 m, výška 10 m, šířka 13 m</i>
<i>Hmotnost</i>	<i>5600 t</i>
<i>Technické provedení</i>	<i>dopředný spektrometr s planárními detektory</i>
<i>Materiální náklady</i>	<i>75 milionů CHF</i>
<i>Umístění</i>	<i>Ferney-Voltaire, Francie.</i>

*Více informací na <http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/>*

## Co je to LHCf?

LHCf je malý experiment, který bude zaznamenávat částice letící po srážkách protonů velmi blízko směru pohybu původních svazků. Záměrem je testovat modely používané k odhadu primární energie kosmického záření nejvyšších energií. Detektory LHCf budou umístěny ve vzdálenosti 140 m od srážkového bodu experimentu ATLAS. Na projektu spolupracuje 21 vědců z 10 institucí ze 6 zemí (květen 2007).

<i>Rozměry</i>	<i>2 detektory, každý 30 cm dlouhý, 10 cm vysoký a 10 cm široký</i>
<i>Hmotnost</i>	<i>každý z detektorů 40 kg</i>
<i>Umístění</i>	<i>Meyrin, Švýcarsko</i>

## Co je to TOTEM?

TOTEM bude měřit efektivní velikost či „účinný průřez“ protonů na LHC. Aby to bylo možné, musí jeho detektory zachytit a rozpoznat částice vytvořené ve velmi malé vzdálenosti od protonových svazků v LHC. Jeho součástí jsou proto detektory umístěné ve speciálních vakuových komorách zvaných „římské hrnce“, které

jsou připojeny k samotným trubicím LHC. Osm těchto římských hrnců bude rozmístěno v párech na čtyřech místech v blízkosti srážkového bodu experimentu CMS. Projektu TOTEM se účastní více než 70 členů z 10 institucí ze 7 zemí (květen 2007).

<i>Rozměry</i>	<i>délka 440 m, výška 5 m, šířka 5 m</i>
<i>Hmotnost</i>	<i>20 t</i>
<i>Technické provedení</i>	<i>římský hrnec, detektory GEM,</i>
<i>Materiální náklady</i>	<i>6,5 milionu CHF</i>
<i>Umístění</i>	<i>Cessy, Francie</i>

*Více informací na <http://totem.web.cern.ch/Totem/>*

## **Co určuje základní tvar částicových detektorů na LHC?**

Moderní víceúčelový detektor pro fyziku vysokých energií, jako je ATLAS nebo CMS, musí být postaven tak, aby prakticky žádné zaznamenatele částice nemohly uniknout detekci průchodem přes „mrtvé“ oblasti, kde není aparatura. Z konstrukčních důvodů je dnes většina moderních detektorů na srážecích, jako je LHC, sestrojena ve tvaru válce s koncovými „poklicemi“, kde válcový detektor sleduje centrální oblast a dvě ploché kruhové „poklice“ sledují částice letící blízko směru svazku, tzv. „dopřednou“ oblast. Detektory ALICE a LHCb, jež jsou zaměřené na specifické oblasti fyziky, mají tvar asymetrický.

## Jaké jsou hlavní součásti detektoru?

Úkolem velkých detektorů na urychlovači LHC je identifikace částic vznikajících při srážkách, měření jejich polohy, nábojů, rychlostí, hmotností a energií. Aby to bylo možné, mají detektory mnoho vrstev či dílčích detektorů (subdetektorů), z nichž každý má při rekonstrukci srážky částic specifickou roli. Celý detektor je doplněn systémem magnetů. Ten slouží k určování nábojů částic a měření jejich hybnosti – fyzikální veličiny spojené s hmotností a rychlostí příslušné částice.

Existují dva důležité typy subdetektorů:

- ▶ **Dráhové detektory** zaznamenávají dráhy elektricky nabitých částic prostřednictvím stop, které částice zanechávají při ionizaci hmoty. V magnetickém poli se dá měřit zakřivení dráhy částice a tím i její hybnost. To pomáhá sledovanou částici identifikovat. Většina moderních dráhových detektorů nezobrazuje dráhy částic přímo, nýbrž tak, že vytváří elektrické signály zaznamenávané v počítači. Počítačový program následně dráhy částic podle záznamu zrekonstruuje.

Dva specializované typy dráhových detektorů jsou vnitřní či vrcholové detektory a mionové komory. Vnitřní detektory jsou umístěny blízko bodu srážek (primárního vrcholu), mionové komory jsou umístěné jako vnější vrstva celého detekčního zařízení, protože miony jsou jediné nabitě částice schopné proniknout mnoha metry materiálu s velkou hustotou.

Pro konstrukci dráhových detektorů se používají dvě základní techniky:

- ▶ *Plynové detektory, v nichž se jako ionizační médium používá plyn a ionty nebo elektrony se shromažďují na elektrodách majících obvykle tvar drátů nebo desek, na nichž je vysoké elektrické napětí. Poloha dráhy se určuje měřením času, za který se elektrony dostanou na anodový drát. Tyto detektory umožňují prostorové rozlišení 50–100  $\mu\text{m}$ .*
- ▶ *Polovodičové detektory, ve kterých částice při průchodu polovodičem (obvykle křemíkem) zapojeným v závěrném směru vytváří volné elektrony a díry, čímž vznikají proudové impulsy. Tyto detektory mají podobu integrovaného souboru pruhů nebo pixelů – jednotlivých detekčních jednotek malých rozměrů – na křemíkové desce. Typické rozlišení je 10  $\mu\text{m}$ .*

- ▶ **Kalorimetry** jsou zařízení, která měří energii částic tím, že je zastaví a změří množství zachycené energie. Existují dva druhy kalorimetrů: elektromagnetický a hadronový. Při jejich konstrukci se používají různé materiály podle toho, jaký typ částic mají zastavit. Elektromagnetický kalorimetr plně absorbuje elektrony a fotony, které interagují elektromagneticky. Silně interagující částice (hadrony) jako protony, neutrony a piony také mohou v elektromagnetickém kalorimetru ztratit část energie, ale zastaví je až kalorimetr hadronový. Miony (a také neutrina) projdou oběma kalorimetry. Kalorimetry poskytují prakticky jediný způsob, jak zaznamenat neutrální částice (fotony, neutrony). Ty projdou dráhovými detektory nepozorovány, zatímco v kalorimetrech je prozradí energie, kterou tam zanechají.

*Kalorimetry jsou složeny z vrstev „pasivního“ či „absorpčního“ materiálu o velké hustotě (např. olovo), které se střídají s vrstvami „aktivního“ média, jako například olovené sklo nebo tekutý argon.*

Detektory také často obsahují další subdetektory, které měří rychlost nabitých částic, což je důležité pro jejich identifikaci.



Pro měření rychlosti částic existují dvě důležité metody:

- ▶ Čerenkovovo záření: Prochází-li nabitá částice vhodným prostředím rychlostí větší než jistá mezní hodnota, emituje fotony pod určitými úhly, jejichž velikost závisí na rychlosti částice. V kombinaci s měřením hybnosti je pak tato rychlost klíčem k určení hmotnosti částice a tím k její identifikaci. K emisi Čerenkovova záření dochází pouze tehdy, prochází-li částice daným prostředím rychlostí větší, než je rychlost světla v tomto prostředí.
- ▶ Přechodové záření: Objevuje se, když relativistická nabitá částice prochází nehomogenním prostředím, třeba rozhraním mezi látkami s odlišnými elektrickými vlastnostmi. Částice vyzařuje úměrně tomu, jakou má energii, takže je možné rozlišit jednotlivé druhy částic.

## Kolik Higgsových bosonů bude vznikat na LHC?

Ačkoliv celkový počet srážek v urychlovači LHC bude velmi vysoký, počet Higgsových bosonů bude tak malý, že statisticky průkazné výsledky budou podle předpokladu vědců k dispozici až po 2–3 letech sběru dat. Odhad počtu vznikajících Higgsových bosonů závisí na teoretickém modelu a způsobu výpočtu. Za příznivých podmínek lze očekávat, že se Higgsovův boson vyskytne vždy jednou za několik hodin. Totéž platí i pro supersymetrické částice. Fyzikové očekávají, že první smysluplné výsledky získají zhruba za jeden rok po spuštění experimentu.

## Jaký je očekávaný objem dat z experimentů na LHC?

Experimenty na urychlovači LHC – to je zhruba 150 milionů senzorů, které dodávají data 40milionkrát za sekundu. Po výběru „zajímavých“ událostí se bude zaznamenávat asi 100 případů každou sekundu.

Celkový objem toku dat ze všech čtyř experimentů bude asi 700 MB/s, tedy 15 000 000 GB (= 15 PB) za rok, což každý rok představuje sloupec cédéček o výšce 20 km. Toto obrovské množství dat bude zpracovááno a analyzováno tisíckami vědců po celém světě prostřednictvím nově vytvářené počítačové sítě nazvané GRID. Jejím hlavním úkolem je vybudovat a udržovat infrastrukturu pro ukládání a zpracování dat pro celosvětovou komunitu částicových fyziků, která bude LHC využívat.

Objem toku dat z jednotlivých experimentů:



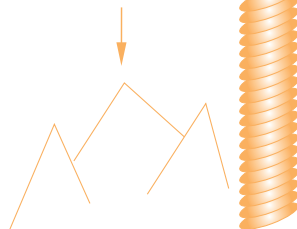
Meteorologický balón (30 km) →  Věž z CD s daty z LHC za 1 rok (20 km)

- ▶ ATLAS vyprodukuje zhruba 320 MB/s
- ▶ CMS vyprodukuje zhruba 300 MB/s
- ▶ vyprodukuje zhruba 50 MB/s
- ▶ vyprodukuje zhruba 100 MB/s při srážkách protonů a 1,25 GB/s při srážkách těžkých iontů

Letadlo Concorde (15 km)



Mont-Blanc (4,8 km)



## Jaká je spotřeba energie LHC?

Příkon LHC je asi 120 MW (pro celý CERN je to 230 MW), což víceméně odpovídá spotřebě všech domácností v Ženevském kantonu. Za předpokladu, že urychlovač bude pracovat 270 dní v roce (v zimním období v provozu nebude), je odhadovaná roční spotřeba LHC a souvisejících experimentů pro rok 2009 asi 800 000 MWh. Celkové roční náklady na energii pro provoz LHC tak činí asi 19 milionů eur. Energie je do CERN převážně dodávána ze sítě francouzské společnosti EDF (švýcarské společnosti EOS a SIG se připojují pouze v případech nedostatečné dodávky elektrického proudu z Francie).

*Značná část spotřebované elektrické energie bude sloužit k udržení magnetického supravodivého systému LHC na provozních teplotách (1,9 K nebo 4,2 K podle typu magnetů). Díky supravodivé technologii použité v magnetech nebude celková spotřeba LHC o mnoho vyšší než spotřeba superprotonového synchrotronu (SPS), i když je LHC mnohem větší a částice v něm dosáhnou podstatně vyšších energií.*

## Jsou srážky v LHC nebezpečné?

V LHC bude dosahováno energií jako nikdy předtím v žádném jiném urychlovači. Zatím uměla dosáhnout tak vysokých energií při srážkách částic pouze příroda. Jedině při použití takto výkonného urychlovače mohou ovšem fyzikové proniknout hlouběji do tajů přírody a vesmíru. Někteří lidé vyjadřují obavy, zda něco z toho, co třeba vznikne při srážkách, nemůže být nebezpečné. Není se však třeba ničeho bát.

- ▶ *Srážky při nevidaných energiích?* Ano, avšak pouze na Zemi! Urychlovače pouze znovu vytvářejí v kontrolovaných laboratorních podmínkách přírodní jevy, jež se běžně odehrávají v kosmickém záření. Kosmické záření je proud částic vznikajících při procesech v hlubokém vesmíru, jako třeba výbuch supernovy nebo vznik černé díry, při nichž částice získávají energie mnohem větší než energie dosahovaná v LHC. Kosmické částice putují vesmírem a bombardují atmosféru Země nepřetržitě od jejího vzniku před 4,5 miliardy let. Navzdory velkému výkonu LHC v porovnání s jinými urychlovači v něm bude docházet ke srážkám při energii, kterou částice kosmického záření podstatně překračují. Srážky při mnohem vyšších energiích způsobované samotnou přírodou po několik miliard let ovšem Zemi nijak nepoškodily, takže není důvod se domnívat, že by to mělo být jinak v případě LHC. Kosmické záření bombarduje také Měsíc, Jupiter, Slunce a další vesmírná tělesa. Celkový počet těchto srážek je ve srovnání s tím, jaký se předpokládá pro LHC, obrovský. Skutečnost, že planetám a hvězdám srážky s částicemi z kosmu nijak neublížily, nás utvrzuje v přesvědčení, že srážky v LHC jsou bezpečné. Energie dosahované v LHC jsou sice obrovské pro urychlovač, ale podle měřítek přírody jsou poměrně skromné.
- ▶ *Miniaturní velký třesk?* Ačkoliv je koncentrace (či hustota) energie při srážkách částic v LHC velmi vysoká, její absolutní velikost je ve srovnání s energiemi, se kterými se setkáváme v každodenním životě, či s energiemi srážek způsobených kosmickým zářením velmi malá. Avšak při nepatrném průřezu protonového svazku je tato koncentrace energie srovnatelná

s hustotou energie, která existovala jen pár okamžiků po velkém třesku – proto se srážkám v LHC někdy říká malý velký třesk.

- ▶ **Černé díry?** Obrovské černé díry vznikají ve vesmíru při zhroucení velmi hmotných hvězd, které obsahují velké množství gravitační energie, jež přitahuje a pohlcuje okolní hmotné objekty. Gravitační působení černé díry závisí na množství hmoty či energie, kterou černá díra obsahuje, čím je jí méně, tím je menší i gravitační působení. Někteří fyzikové zastávají názor, že při srážkách v LHC mohou vznikat miniaturní černé díry. Ty by však mohly mít pouze energii srážejících se částic (která odpovídá zhruba kinetické energii letícího komára), takže žádná miniaturní černá díra vzniklá v LHC nemůže vytvořit tak silnou gravitační sílu, aby přitáhla okolní hmotu. Pokud by v LHC vznikaly miniaturní černé díry, mnohem energetičtější kosmické záření by jich už stačilo vytvořit mnohem víc. Poněvadž Země je pořád tady, není žádný důvod věřit, že srážky částic uvnitř LHC nás nějak ohrožují.

*Černé díry ztrácejí hmotu vyzařováním energie v procesu, který objevil Stephen Hawking. Jakákoliv černá díra, která si nemůže přitáhnout hmotu, jako by byly černé díry, jež možná budou vznikat v LHC, se vypaří a zmizí. Čím je černá díra menší, tím se vypaří rychleji. Pokud by se opravdu mikroskopické černé díry v LHC objevily, existovaly by jen po krátký okamžik. Jejich doba života by byla tak krátká, že by bylo možno zaznamenat jejich existenci pouze prostřednictvím detekce produktů jejich rozpadu.*

- ▶ **Podivnůstky?** Podivnůstky (strangelets) jsou hypotetické malé kousky hmoty, jejichž existence nebyla nikdy dokázána. Byly by tvořeny kvarky s (strange, česky se nazývají též „podivné“), což jsou těžší a nestabilní příbuzní základních kvarků (u a d), které tvoří stabilní hmotu (protony a neutrony). Pokud by podivnůstky existovaly, byly by nestabilní. Navíc by jejich elektromagnetický náboj odpuzoval normální hmotu a místo toho, aby docházelo ke kombinacím se stabilní hmotou, by se tyto částice rozpadaly. Pokud by opravdu podobné částice v LHC vznikly, žádnou pohromu by to nezpůsobilo. Pokud existují, jsou vytvářeny i vysokoenergetickým kosmickým zářením a nepřineslo to žádné škodlivé následky.

- ▶ *Radiace?* Radioaktivnímu záření se u urychlovačů, jako je LHC, nelze vyhnout. Vzniká přímo při srážkách částic, které nám umožňují studovat podstatu hmoty. V CERN se na ochranu před radiací používají aktivní i pasivní prvky. Ozáření se pečlivě monitoruje a nejrůznějšími postupy je zajištěno, že zaměstnanci CERN i obyvatelé v okolí jsou mu vystaveni v naprosto minimální míře, která je hluboko pod platnými mezinárodními normami. Pro srovnání: přirozená radioaktivita způsobená kosmickým zářením a přirozeným zářením geologického podloží je ve Švýcarsku asi 2400  $\mu\text{Sv}$  ročně. Zpáteční let z Evropy do Los Angeles představuje dávku 100  $\mu\text{Sv}$ . Tunel LHC je 100 m pod zemí, což je tak hluboko, že ani rozptýlené záření způsobené činností LHC, ani zbytkovou radioaktivitu nelze na povrchu vůbec zaznamenat. Vzduch čerpaný z tunelu bude filtrován. Studie prokázaly, že radioaktivita, která se takto dostane do vzduchu, přispěje k celkové dávce pro obyvatelstvo hodnotou maximálně 10  $\mu\text{Sv}$  za rok.

*Vnitřní předpisy CERN týkající se ochrany životního prostředí a osob splňují švýcarské i francouzské právní normy i směrnici Evropské rady 96/29 EURATOM. Podle francouzských i švýcarských předpisů nesmí povolená účinná dávka záření při pracovních aktivitách za žádných okolností přesáhnout hodnotu 20 mSv za rok u zaměstnanců přímo pracujících s radioaktivitou a hodnotu 1 mSv za rok u ostatních zaměstnanců a veřejnosti.*

## Jaká jsou pravidla pro přístup k LHC?

Pokud nebudou obíhat svazky, bude větší část tunelu LHC pouze slabě radioaktivní. Většina zbytkové radioaktivity se bude vyskytovat ve specifických oblastech urychlovače, jako jsou místa, kde je svazek na konci každého fyzikálního cyklu likvidován a pohlcen (dump caverns), nebo oblasti, kde se svazky soustřeďují.

Do tunelu LHC bude mít přístup pouze několik technických pracovníků s příslušným oprávněním.

Jako první bude vždy vstupovat specializovaný radiační technik, který změří radioaktivitu na konkrétním místě vyžadujícím technický zásah či opravu a určí, kdy a jak dlouho je možné na daném místě provádět příslušné práce.

## Jaká je v LHC spotřeba helia?

Přesné množství ztrát helia při provozu LHC není dosud známo. Konkrétní hodnota bude záviset na mnoha faktorech, třeba na možných problémech s magnety, výpadcích elektrické energie a dalších. Známé je množství helia, které bude zapotřebí k prvnímu naplnění a ochlazení magnetů na provozní teplotu. Bude to zhruba 120 t.

## Co se stane, ztratí-li svazek stabilitu?

Množství energie uložené ve svazcích LHC je obrovské, takže kdyby se vymkly kontrole, mohlo by to na zařízeních urychlovače způsobit nenahraditelné škody. Bylo uděláno všechno pro to, aby k tomu nikdy nedošlo. Bezpečný provoz LHC vyžaduje bezchybnou souhru několika systémů, které se starají o udržování svazků v trubici urychlovače v žádoucí poloze, o kontrolu stavu svazků, o zaostření svazků v oblastech srážek, o zastavení svazků v případě potřeby a o ochranu před náhodným přechodem magnetů ze supravodivého stavu. Pokud se svazek stane nestabilním, speciální čidla to okamžitě zjistí a během 3 oběhů (za dobu

menší než 0,3 ms) systém magnetů vyvede svazek z urychlovače ven. Ten pak projde speciálním tunelem do zastavovacího bloku, což je jediné zařízení v LHC schopné odolat nárazu svazků. Jádro tohoto zastavovacího bloku je tvořeno vrstvou grafitových desek o různé hustotě.

*Celková energie každého ze svazků je po dosažení maximální energie asi 350 MJ, což odpovídá energii čtyřistatunového vlaku, jakým je například francouzský TGV, jedoucího rychlostí 150 km/h. To představuje množství energie postačující k roztavení asi 500 kg mědi. Celková energie nashromážděná v magnetech LHC je zhruba 30x větší (11 GJ).*



# 10 fascinujících údajů o LHC

**1)** Při ražbě 27 km dlouhého kruhového tunelu mezi Ženevským jezerem a pohořím Jura se jeho dva konce setkaly s přesností 1 cm.

**2)** Každé ze 6400 niob-titanových supravodivých vláken v kabelu vyrobeném speciálně pro LHC má v průměru 0,007 mm, což je asi 10x méně než lidský vlas! Pokud byste všechna tato vláčkénka spojili, pokryla by pětkrát vzdálenost ze Země ke Slunci a zpět a ještě by zbylo na několikánásobné spojení Země a Měsíce.

**3)** Všechny protony urychlované v CERN se získávají z obyčejného vodíku. I když jsou protonové svazky velmi intenzivní, každý den se urychlí pouze 2 nanogramy vodíku (méněna je klidová hmotnost). Urychlení 1 g vodíku v LHC by tedy trvalo asi milion let.

**4)** Centrální část LHC bude největší ledničkou na světě. Při teplotách nižších, než jaké panují hluboko ve vesmíru, je v ní „uloženo“ železo, ocel a všechny důležité supravodivé cívky.

**5)** Tlak v trubicích LHC, kde budou protony (či jádra olova) obíhat, bude asi 10x menší než na Měsíci, což představuje ultravysoké vakuum.

**6)** Protony budou v LHC při nejvyšší energii obíhat rychlostí odpovídající 0,999 999 991 rychlosti světla. Každý proton oběhne 27kilometrový prstenec více než 11 000x za sekundu.

**7)** Při nejvyšší energii bude mít každý z protonových svazků obíhajících proti sobě v LHC celkovou energii rovnající se kinetické energii 400tunového vlaku (např. francouzský TGV) jedoucího rychlostí 150 km/h. Tato energie by stačila k roztavení 500 kg mědi.

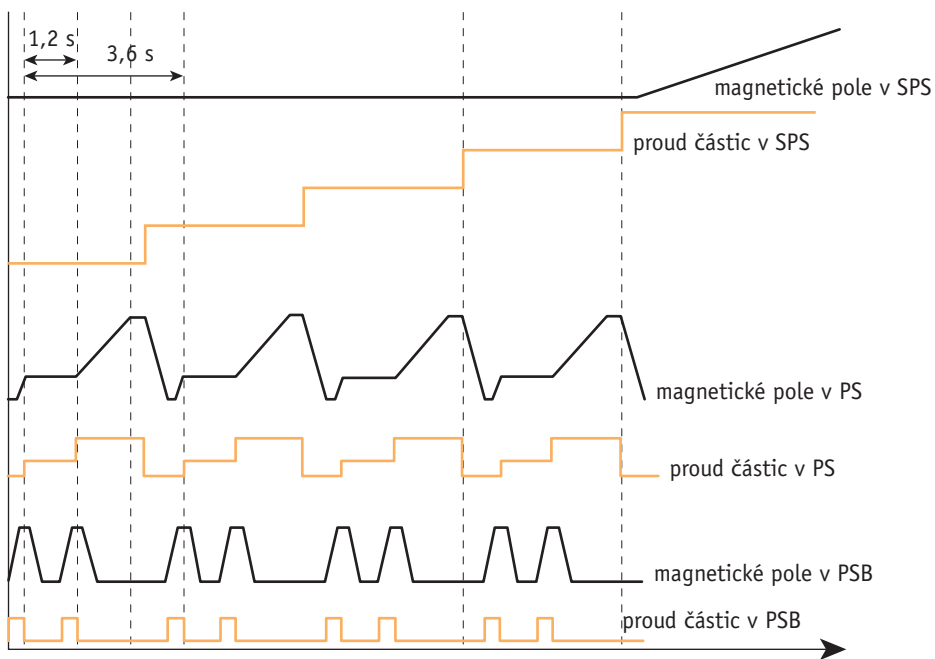
**8)** Nad společným projektem ATLAS Slunce nikdy nezapadá. Vědci pracující na tomto experimentu pocházejí ze všech kontinentů světa s výjimkou Antarktidy.

**9)** Systém magnetů CMS obsahuje asi 10 000 t železa, což je víc železa, než bylo potřeba na stavbu Eiffelovy věže v Paříži.

**10)** Data zaznamenaná každým z velkých experimentů na LHC by naplnila každý rok na 100 000 nosičů DVD.

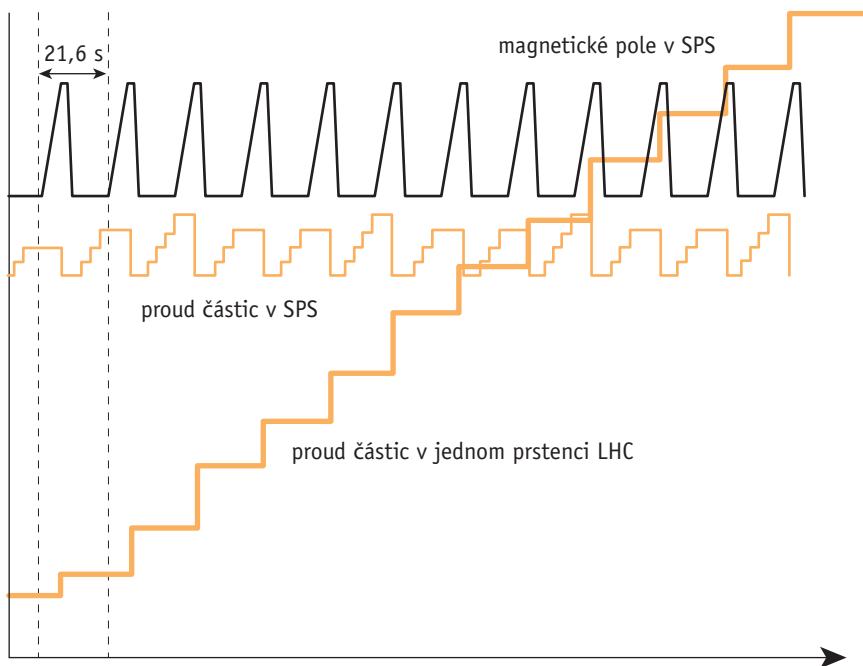
# Příloha 1

## Schéma plnění, magnetického pole a proudu částic v urychlovačích PSB, PS a SPS



# Příloha 2

## Schéma plnění, magnetického pole a proudu částic v urychlovačích SPS a LHC





*Sekce publikací děkuje všem  
pracovníkům oddělení AB, AT,  
PH a SC v CERN, kteří pomohli při  
vytváření tohoto materiálu.*

