

Urýchľovače a detektory: Časticová fyzika na LHC v CERNe

Mgr. Michal Dubovský, PhD.

Katedra jadrovej fyziky a biofyziky
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Univerzita Komenského v Bratislave

10. jún 2024



O čom budeme hovoriť:

- Historický vývoj predstáv ľudí o zložení hmoty
- Urýchľovače, CERN, ako prebieha experiment
- Súčasný výskum v CERNe
- Čo ďalej? Čo sa ešte dá skúmať?
- Načo je to dobré?

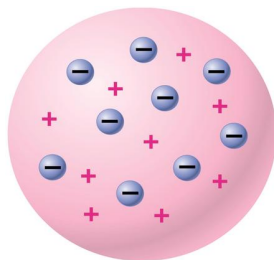
John Dalton (1766-1844), anglický chemik/fyzik:

- Pre každý chemický prvok existuje jeden druh atómov
- Atómy rôznych prvkov sa líšia hmotnosťou, veľkosťou ...
- Atómy sú ďalej nedeliteľné
- Počas chemických reakcií sa atómy preskupujú

Atómy

Joseph John Thompson (1856-1940), britský fyzik:

- 1897 - objav elektrónu (Nobelova cena 1906)
- 1904 - pudingový model atómu
- Atómy sa skladajú z kladne nabitých rovnomerne rozloženej látky (puding) a v tejto látke sa pohybujú záporne nabité elektróny (hrozienka)
- Atóm je navonok neutrálny
- Elektróny môžu v atóme kmitať a vydávať tak elektromagnetické žiarenie (svetlo)



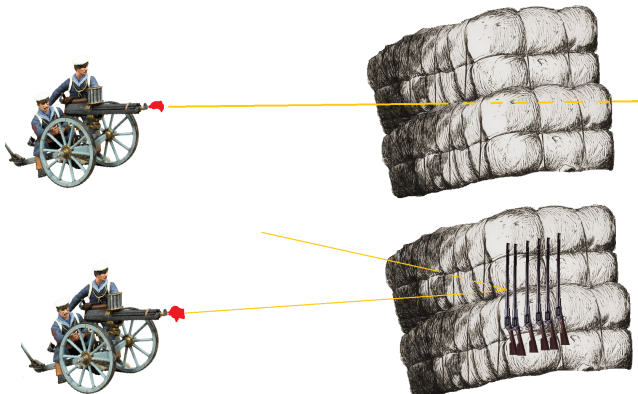
Objav atómového jadra

Ako skúmať štruktúru atómu, keď je tak malý?

Podobný problém: Počas americkej občianskej vojny pašovali ľudia cez hranice zbrane v balíkoch s bavlnou. Ako zistiť, či je v balíku len bavlna, alebo sú v ňom aj zbrane? (Rontgen, ani detektor kovov vtedy ešte neboli objavené)

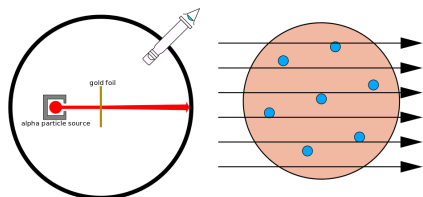


Objav atómového jadra

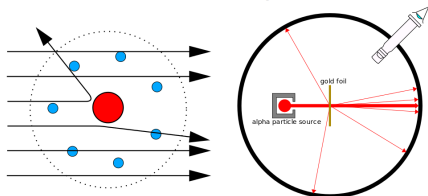


Objav atómového jadra, Rutherfordov experiment

Pudingový model (očakávanie)



Rutherfordov model = jadro + obal



Rutherfordov experiment (1911)

- Ostreľovanie zlatej fólie alfa časticami (${}^4_2\text{He}$)
- Cieľom bolo merať polomer atómu (predpokladal sa pudingový model)
- Prekvapivý výsledok. Niektoré alfa častice sa "odrazili" naspäť!
- Vysvetlenie → kladný náboj nie je rozptýlený po celom atóme, ale len v malom centre (atómové jadro)

Objav atómového jadra

Rutherfordov model atómu

- Kladne nabité jadro ($\approx 10^{-15}$ m).
- Záporne nabité elektróny tvoria obal ($\approx 10^{-10}$ m).

Objav neutrónu Chadwickom (objav 1932, Nobelova cena 1935)

- Jadro sa skladá z neutrónov a protónov.

Prečo sa kladne nabité jadro nerozpadne? Existuje sila oveľa silnejšia ako elektromagnetická (silná jadrová sila), ktorá ho drží pokope.

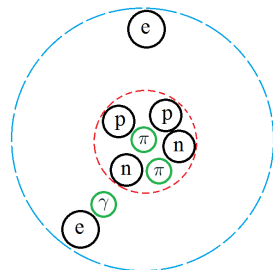
Stav v 30tych rokoch

Známe sily:

Gravitačná, elektromagnetická, jadrové sily (silná a slabá)

Známe častice:

- Elektróny (obal), protóny a neutróny (jadro)
- Neutríno ν (ťažko detekovateľné, vzniká pri jadrových reakciách)
- Fotón: γ (prenáša elektromagnetickú silu)
- Pióny: π^- , π^+ a π^0 (prenášajú silnú jadrovú silu)

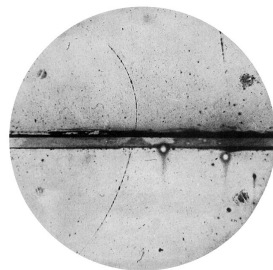


Všetko vieme vysvetliť 8 časticami. Perfektná teória. Objavme pióny a máme všetko!

Pátranie po pióne

1937 - Objav novej častice vo kozmickom žiarení

- Hmotnosť približne taká, ako sa očakávala pre pión
- Ale nie je to pión!
- Je to mión (μ) "ťažší brat" elektrónu
- Čo s ním? Kam ho zaradiť?



Isidor Isaac Rabi:

"Who ordered that?" ("Kto si to objednal?")

1947 - Objav piónu v kozmickom žiarení

Štandardný model

Feynman a Gell-Man (60te roky)

- Experimenty naznačovali, že protóny a neutróny sa skladajú z nejakých menších častíc (kvarky)
- Kvarky sa nikdy nemôžu vyskytovať samotné, preto ich v prírode nepozorujeme
- Kvarky sa v prírode vyskytujú len vo dvojiciach (napr. pióny) a trojiciach (napr. protóny a neutróny)¹

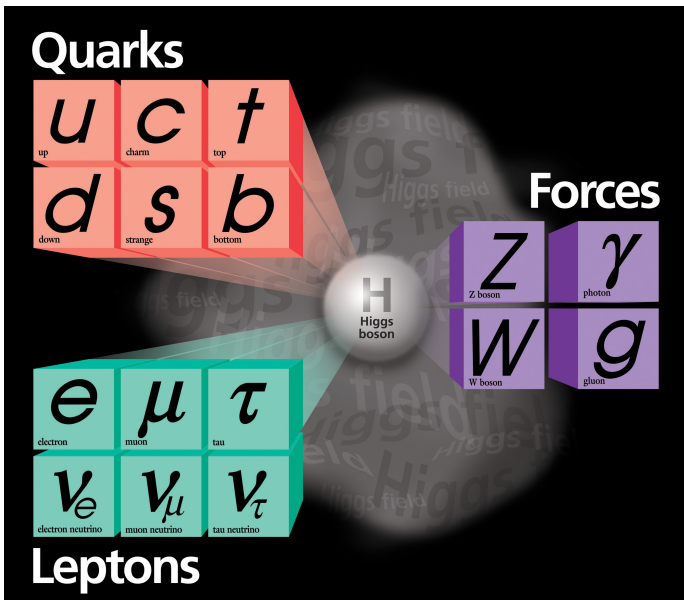
protón: uud

neutrón: udd

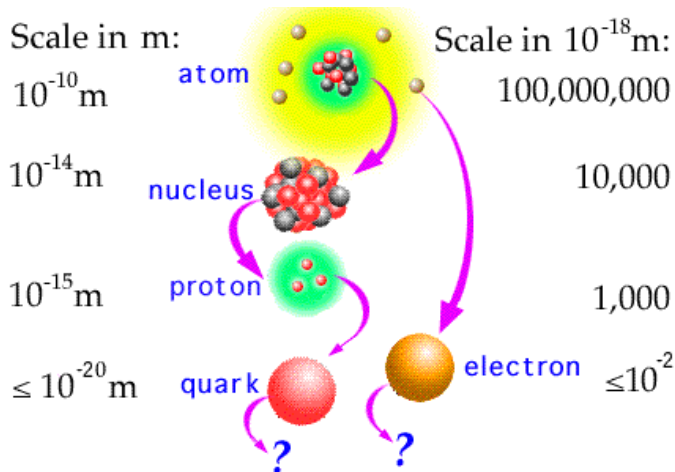
Feynmannova myšlienka bola všeobecne prijatá a neskôr rozšírená na tzv. Štandardný model.

¹Na LHC boli už pozorované aj pentakvarky, vyskytujú sa ale len v extrémnych podmienkach.

Štandardný model



Štandardný model



Slabé stránky Štandardného modelu

Aj napriek tomu, že Štandardný model je najlepšou a najpresnejšou fyzikálnou teóriou ktorú máme, má svoje slabé stránky:

- Nedáva odpoveď na otázku čo je to tmavá energia (cca 70% hmotnosti vo vesmíru) a tmavá hmota (cca 26% hmotnosti vo vesmíru).
- Nevysvetľuje hierarchiu hmotnosti častíc a to prečo má Higgsov bozón hmotnosť ≈ 125 GeV.
- Nedokáže vysvetliť prevahu hmoty nad anti-hmotou, ktorú vidíme.
- Nedokáže vysvetliť hmotnosti neutrín.
- Nezahŕňa gravitáciu.

Urýchľovače

Na produkciu nových ťažkých častíc potrebujeme zraziť častice s vysokou energiou ($E = mc^2$)

- Približne do roku 1950 sa na objav nových častíc používalo vesmírne žiarenie.
- Jeho intenzita (našťastie) nie je príliš vysoká
- Je vhodnejšie vybudovať umelý zdroj vysokoenergetických častíc (**urýchľovač \approx továreň na častice**)

Urýchľovače:

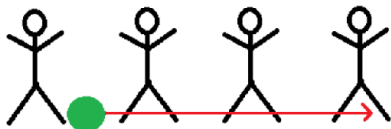
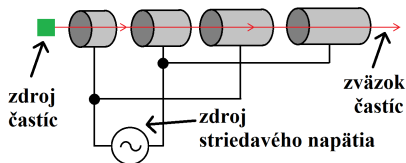
- lineárne (rovné)
- cyklické (kruhové)



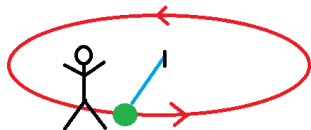
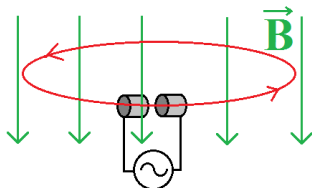
Zdroj (obrázok): <https://classroomclipart.com/image/vector-clipart/red-factory-buildings-with-smoke-stacks-and-smoke-59872.htm>

Urýchľovače

Lineárny urýchľovač



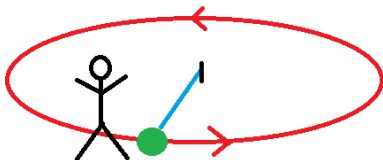
Cyklický urýchľovač



Lopta = urýchľovaná častica
Futbalista = elektrické pole
Lano = magnetické pole

Urýchľovače

Prečo stavať veľký urýchľovač?



Odstredivá sila:

$$F = \frac{mv^2}{r} \rightarrow v_{max} = \sqrt{\frac{F_{max}r}{m}}$$

Pri rovnakej pevnosti lana (čiže pri rovnakej intenzite magnetického poľa):

Dlhšie lano = vyššia rýchlosť

Väčší urýchľovač = vyššia energia

LHC (Large Hadron Collider)

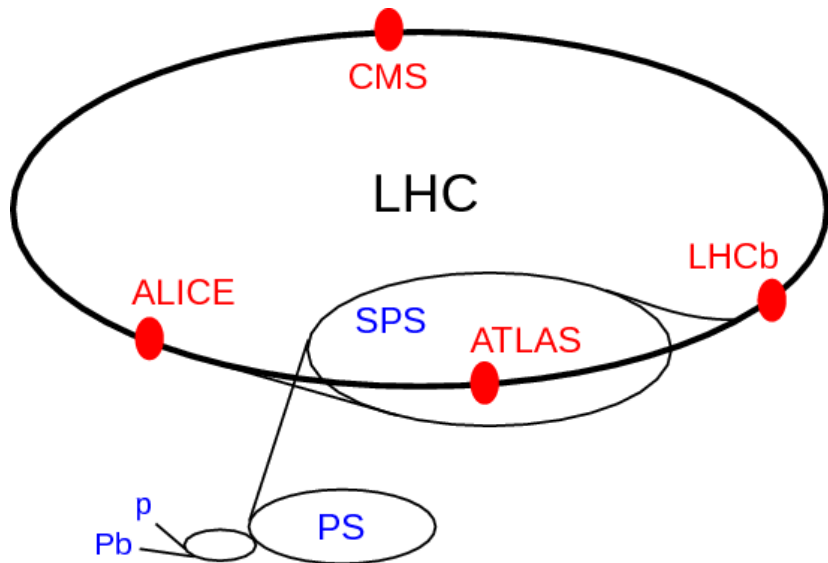
- najväčší a najvýkonnejší urýchľovač na svete
- tunel dlhý 27 km, je cca 150 m pod zemou
- umiestnený na francúzsko-švajčiarskej hranici v CERNe pri Ženeve
- urýchľuje protóny $(6,8 \text{ TeV})^2$ a jadrá olova (cca 560 TeV)

História LHC

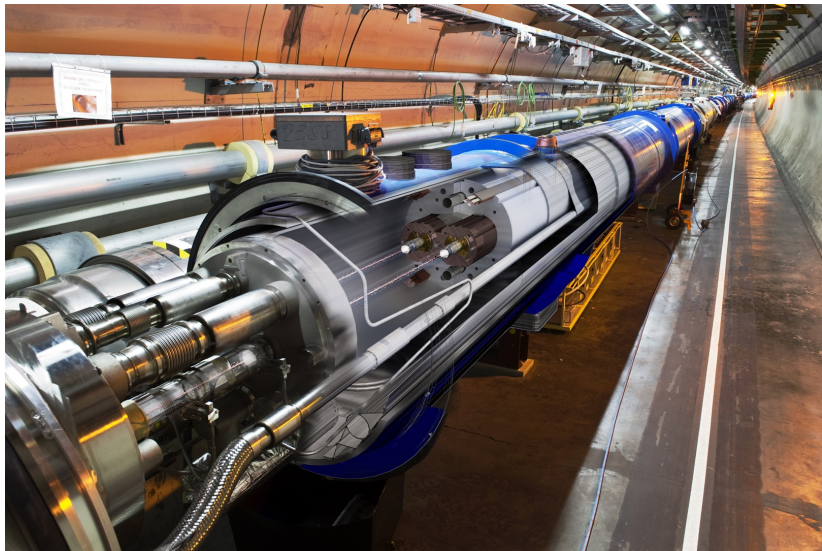
- **2008-2011**: 3.5 TeV + 3.5 TeV = **7 TeV**
- **2012**: 4 TeV + 4 TeV = **8 TeV**
- **2015-18**: 6.5 TeV + 6.5 TeV = **13 TeV**
- **2021-2025** : 6.8 TeV + 6.8 TeV = **13.6 TeV**
- **2029-2041** : HL-LHC (HL= high luminosity = intenzívnejší zväzok; energia $\sim 14\text{TeV}$)

$${}^2_1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,78 \cdot 10^{-37} \text{ kg} \cdot \text{c}^2$$

LHC - urýchľovací komplex

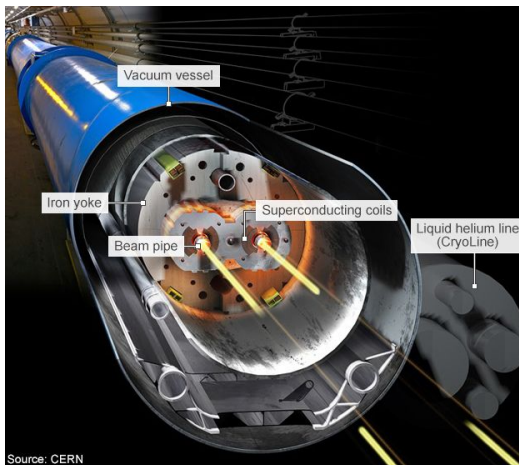






LHC - magnety

- Častice sú udržiavané na kruhovej dráhe supravodivými magnetmi - 8.3 Tesla, chladené tekutým héliom (1.9 K)
- Ďalšie magnety sa používajú na fokusáciu zväzku



LHC - urýchľovanie

- Urýchľovacie napätie 16 MV na zväzok na jeden obeh
- Pri rýchlosti svetla častice obehnú ≈ 11000 -krát za sekundu, cieľovú energiu 6.8 TeV dosiahnu po ≈ 15 minútach
- Energia 1 protónu pri max. energii: energia letiaceho komára
- To je ako zrunko piesku urýchlené atómovou bombou!
- 2808 'bunchov' po 100 miliárd protónov - zväzok je nebezpečný. Ak traťí stenu urýchľovača, je to ako výbuch 50 kg TNT.

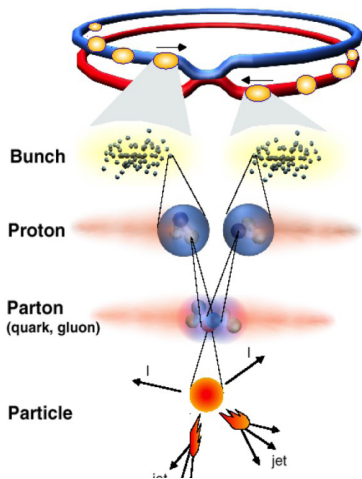


x 2808 x 100 miliárd \Rightarrow 50 kg



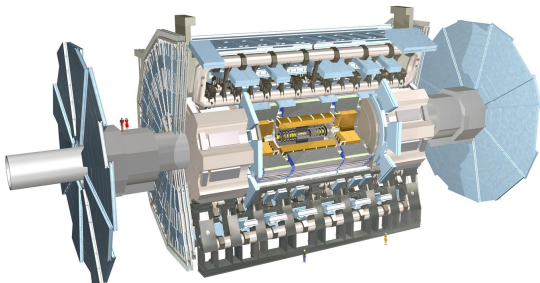
LHC - zrážky

- Po dosiahnutí maximálnej energie sa obidva zväzky navedú proti sebe: zrážky
- Interagujú partóny, najmä: gg , ale aj $q\bar{q}$ a qg
- Zrážky môžu trvať aj viac ako 10 hodín
- Pri jednom 'bunch-crossingu' (každých 25 ns) desiatky interakcií, spolu miliarda za sekundu ($\approx 8 \text{ TB/s}$) - nie je možné zaznamenať
- Trigger vyberie ≈ 1000 zrážok za sekundu ktoré sú zaujímavé ($\approx 200 \text{ MB/s}$)



Detektor ATLAS

- 4 základné časti:
 - **dráhové detektory** - zmerajú hybnosť častice, pričom jej energiu veľmi nezmenia
 - **kalorimetre (elektromagnetický, hadrónový)** - zmerajú energiu častice tak, že časticu pohltia
 - **magnety** - vytvárajú silné magnetické pole (2 až 4 Tesla), ktoré zakrivuje dráhu nabitých častíc
 - **miónové spektrometre** - detekcia miónov (veľmi prenikavé častice)



- Priemer 25 metrov
- Dĺžka 44 metrov
- Váha 7 000 ton
- \approx 100 miliónov elektronických kanálov (čísel popisujúcich zrážku)

Ako prebieha typicky objav novej častice?

- Nech sa častica rozpadá napríklad na 2 fotóny.
- Hladáme zrážky (eventy) s 2 fotónmi v dátach.
- Ak taký event nájdeme, zrátame hmotnosť častice, ktorá by sa na tieto dva fotóny mohla rozpadnúť.

$$m = \frac{1}{c^2} \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - c^2(\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2} \quad (1)$$

Pre častice s hmotnosťou $<126 \text{ GeV}, 128 \text{ GeV}>$

- Z teórie očakávame: 4200 eventov
- V dátach pozorujeme: 4500 eventov

Nová častica, alebo iba náhoda? Čo nám hovorí štatistika?

Trochu štatistiky

Podobný problém:

Máme hernú kocku. Pravdepodobnosť hodiť číslo šesť by mala byť $1/6 = 16,67\%$. Hráč sa sťažuje, že šestka padá častejšie, podľa neho pravdepodobnosť hodiť číslo 6 je 20% . Koľko krát musíme kocku hodiť, aby sme to potvrdili/vyvrátili?

Počet hodov	Očakávanie		Pravdepodobnosť náhody
	normálna kocka	20%	
60	10	12	60,4 %
600	100	120	2,9 %
6 000	1 000	1 200	$4 \times 10^{-10} \%$
60 000	10 000	12 000	$2,5 \times 10^{-104} \%$

Poučenie: Na to aby sme s dostatočnou štatistickou významnosťou videli malý efekt (signál), potrebujeme veľa dát.

Počet hodov	"meranie"	očakávanie (N_6)	$\sigma \approx \sqrt{N_6}$
6	0	1	1
60	12	10	3
600	96	100	10
6 000	1 016	1 000	31
60 000	9 957	10 000	100

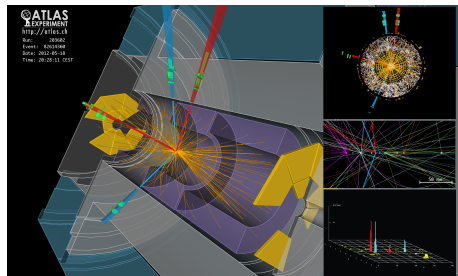
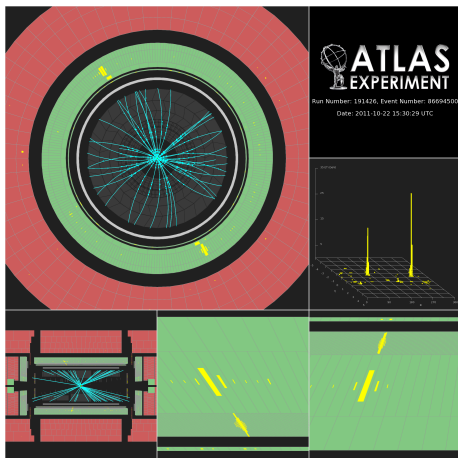
Rozdiel	Pravdepodobnosť väčšieho rozdielu
1σ	31,7 %
2σ	4,5 %
3σ	0,3 %
4σ	$6,3 \times 10^{-3}$ %
5σ	$5,73 \times 10^{-5}$ %
6σ	$1,97 \times 10^{-7}$ %

Toto už považujeme za príliš nepravdepodobné a môžeme hovoriť objave.

Všeobecne prijatá dohoda:

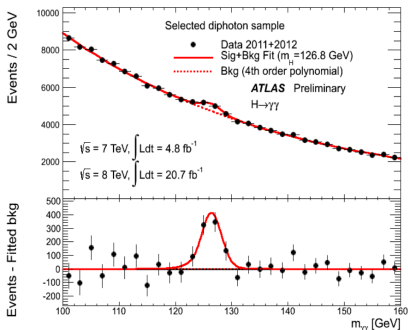
Za objav sa považuje to, u čoho je pravdepodobnosť náhody menšia ako $5,73 \cdot 10^{-5} \%$, čiže odchýlka od priemeru je 5σ , alebo viac.

Objav Higgsovho bozónu (júl 2012)

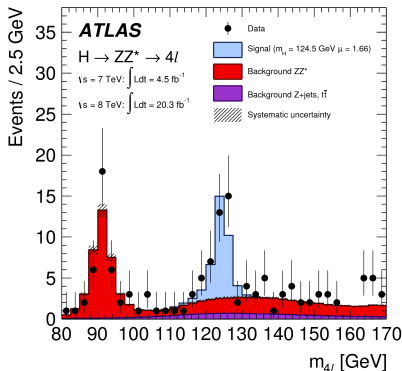


Objav Higgsovoho bozónu

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



$$H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell^- \ell^+ \ell^- \ell^+$$



- Prebytok dát nad simuláciou pre pozadie je spôsobený Higgsovým bozónom.
- Objav v roku 2012 → Pravdepodobnosť náhody menšia ako $5,73 \times 10^{-5} \%$
- Nobelova cena za fyziku z roku 2013.

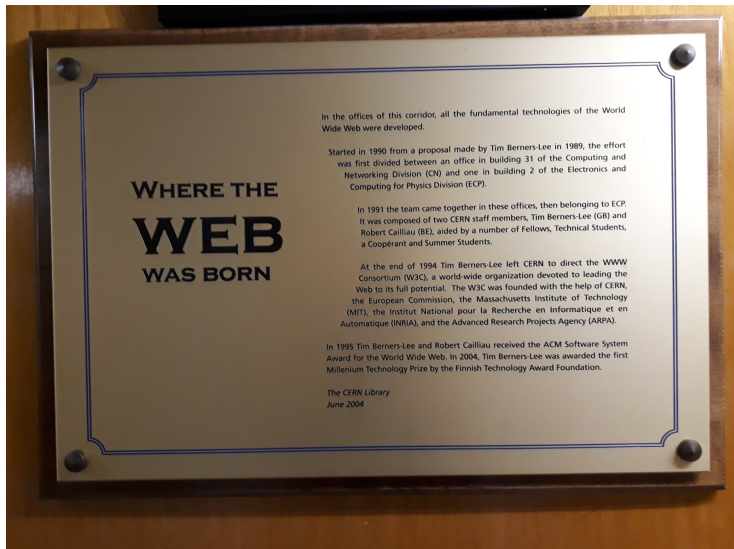
Súčasný výskum na urýchľovači LHC:

- Ďalšie skúmanie už objavených častíc
- b-kvark a top-kvark
- Higgsov bozón
- Kvark-gluónová plazma
- Hľadanie novej fyziky za Štandardným Modelom

A načo to je celé dobré?

"Vznikajú také otázky, že načo nám je dobrý CERN. Či to zvýši dojivosť kráv. A odpoveď na túto otázku je prekvapivá ... Áno, zvýši. Vďaka CERNU máme web a tam už si nájdete niečo, ako tú dojivosť zvýšiť."

A načo to je celé dobré?



A načo to je celé dobré?

Okrem webu:

- Využitie urýchľovačov v medicíne (napr. protónová terapia)
- Pozitrónová emisná tomografia (PET) - diagnostika.
- Dotykový displej
- Vývoj elektroniky a ďalších technológií
- Základný výskum. Lepšie porozumenie štruktúre hmoty a základným fyzikálnym princípom.
- Objav Higgsovho bozónu, W a Z bozónov.
- Vyše 1 000 PhD študentov končiacich každý rok - vyškolení odborníci (IT, data science, hardware ...) pre firmy.

BACK-UP

Trochu relativity

Pri rozpadoch častíc platí zákon zachovania energie a zákon zachovania hybnosti. S narastajúcou rýchlosťou rastie hmotnosť častice (m_0 je kludová, alebo invariantná hmotnosť častice):

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2)$$

Pre energiu a pre hybnosť platí:

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3) \quad \vec{p} = m\vec{v} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4)$$

Pre kludovú hmotnosť m_0 teda dostaneme:

$$m_0^2 = \frac{1}{c^4} (E^2 - p^2 c^2) = \frac{1}{c^4} \left(\frac{m_0^2 c^4}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{m_0^2 v^2 c^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right) = m_0^2 \left(\frac{1 - \frac{v^2}{c^2}}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right) \quad (5)$$

V bratislavskej ATLAS skupine sa venujeme fyzike top-kvarku. Čo to je top-kvark a prečo je zaujímavý?

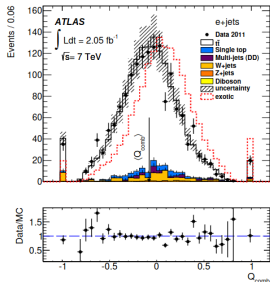
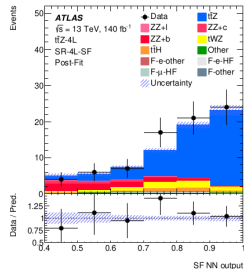
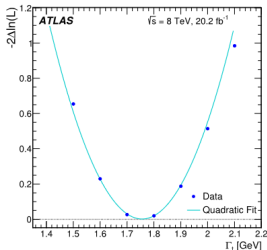
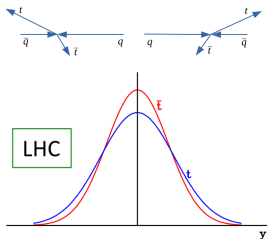
- Objavený v roku 1995 na urýchľovači Tevatron v USA (experiemy CDF a D0).
- Najťažšia elementárna častica. Je 180-krát ťažší ako protón (173.4 GeV) - hmotnosť približne ako jadro wolfrámu.
- Polčas rozpadu $\approx 10^{-25}$ s - rozpadá sa skôr ako stihne vytvoriť hadrón (viazaný stav). Toto nám umožňuje študovať vlastnosti holého kvarku (bare quark).
- Silná väzba na Higgsov bozón.

Bratislavská skupina na experimente ATLAS:

Štúdium vlastností top-kvarku:

- spoločná produkcia top-kvarku Z bozónu
- asymetria v produkcii top-kvarkových párov
- meranie rozpadovej pološírky top-kvarku (polčasu rozpadu)
- meranie náboja top-kvarku

*Už dokončené analýzy na ktorých nepokračujeme.



Bratislavská skupina na experimente ATLAS:

Čomu sa venujeme okrem fyziky top-kvarku:

- Bose-Einsteinove korelácie
- **Skúmanie štruktúry protónu**
- Detektorová fyzika a servisné práce:
 - kalibrácia jetovej energetickej škály
 - testovanie fotonásobičov
 - Technické práce na detektore ATLAS (vývoj softwaru)

*Už dokončené analýzy na ktorých nepokračujeme.

