

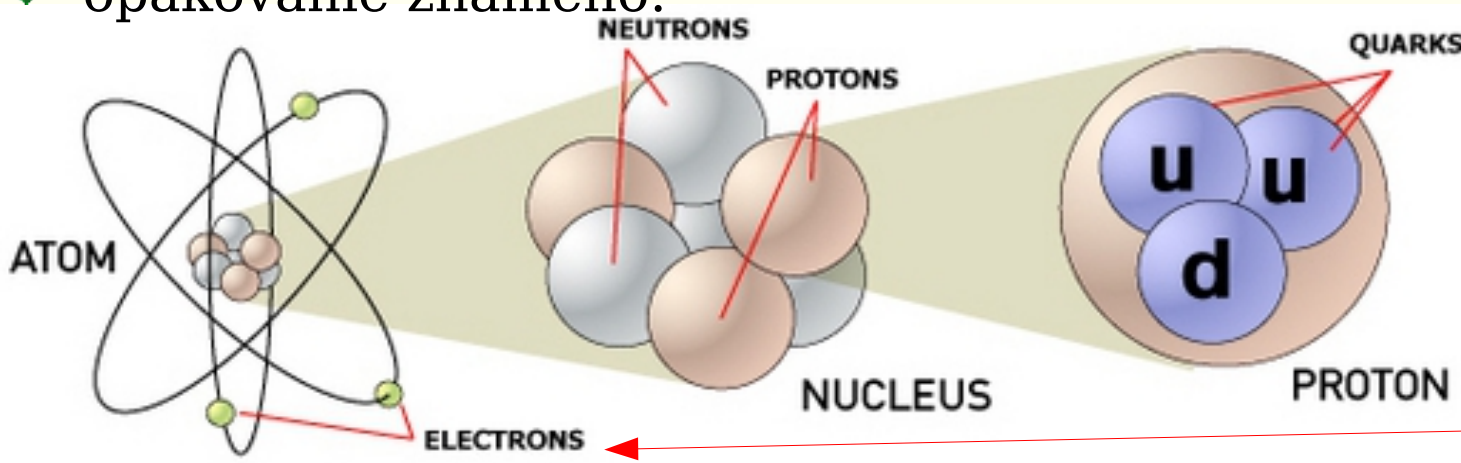
Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

P. Stríženec, Ústav experimentálnej fyziky SAV, Košice

- ♦ Prečo vlastne hľadáme Higgsov bozón a čo to vlastne je ?
 - ♦ niečo o tom, ako terajšia fyzika popisuje svet
 - ♦ musí Higgsov bozón existovať ?
 - ♦ niečo o alternatívnych teóriách
- ♦ Ako hľadáme Higgsov bozón ?
 - ♦ najväčší “mikroskop” sveta - LHC
 - ♦ najväčšie “okuláre”
 - ♦ uloženie a spracovanie dát
 - ♦ dáta nestačia, potrebujeme informáciu (znalosť - fyzikálne výsledky)
- ♦ Čo sme vlastne doteraz na LHC uvideli ?
 - ♦ o Higgsovom bozóne zatiaľ nie to, čo písali v novinách
- ♦ Čo myslíme, že čoskoro uvidíme ?
- ♦ Ako spočítame čo vlastne vidíme

Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

- ◆ Prečo vlastne hľadáme Higgsov bozón a čo to vlastne je ?
- ◆ vo svete pôsobia 4 interakcie (sily) - silná (1), elektromagnetická (EM) (10^{-3}), slabá (10^{-5}) a gravitačná (10^{-38})
- ◆ gravitáciu rieši zatiaľ teória relativity
- ◆ ostatné tri popisuje tzv. “Štandardný Model” (ŠM)
- ◆ ŠM je “štandardný” pretože väčšina časticových fyzikov ho považuje za správny
- ◆ ŠM chce popísať, ako je z elementárnych častíc zostavená viditeľná hmota
- ◆ Higgsov bozón je v súčasnosti nevyhnutnou časťou ŠM, bez neho nedáva model zmysel
- ◆ opakovanie známeho:



elementárne,
bezrozmerné
 $< 10^{-18} \text{m}$

Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

◆ Prečo vlastne hľadáme Higgsov bozón a čo to vlastne je ?

- ◆ objavovanie “základných kameňov” hmoty je staré ako civilizácia sama, vieme že o “atómoch” hovorili už starí Gréci
- ◆ ŠM bol vyvinutý za posledných 50 rokov, samozrejme postupne, nebol objavený či vymyslený naraz
- ◆ vďaka nemu sme veľmi dobre pochopili ako mikrosvet funguje a mohli uviesť do praxe take užitočné technológie ako magnetickú rezonanciu, protónovú terapiu nádorov a začať rozvíjať kvantové počítače
- ◆ ŠM zatiaľ veľmi úspešne popisuje všetky experimenty, ktoré fyzici uskutočnili, s veľkou presnosťou, nemáme zatiaľ meranie, ktoré by mu vyslovene protirečilo
- ◆ nie je ešte finálnou “teóriou všetkého”, keďže nie je v ňom zahrnutá gravitácia
- ◆ má aj “estetické” nedostatky, napr. príliš veľa “voľných” parametrov, ktoré treba “dodať” z merania a nevyplývajú zo samotného modelu
- ◆ takisto nedokáže zatiaľ vysvetliť niektoré astrofyzikálne pozorovania (problém temnej hmoty a temnej energie, prečo hmota prevláda nad antihmotou)
- ◆ veríme však (väčšina z časticových fyzikov), že bude podmnožinou, prípadne hraničným prípadom budúcej “teórie všetkého”

Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

◆ Prečo vlastne hľadáme Higgsov bozón a čo to vlastne je ?

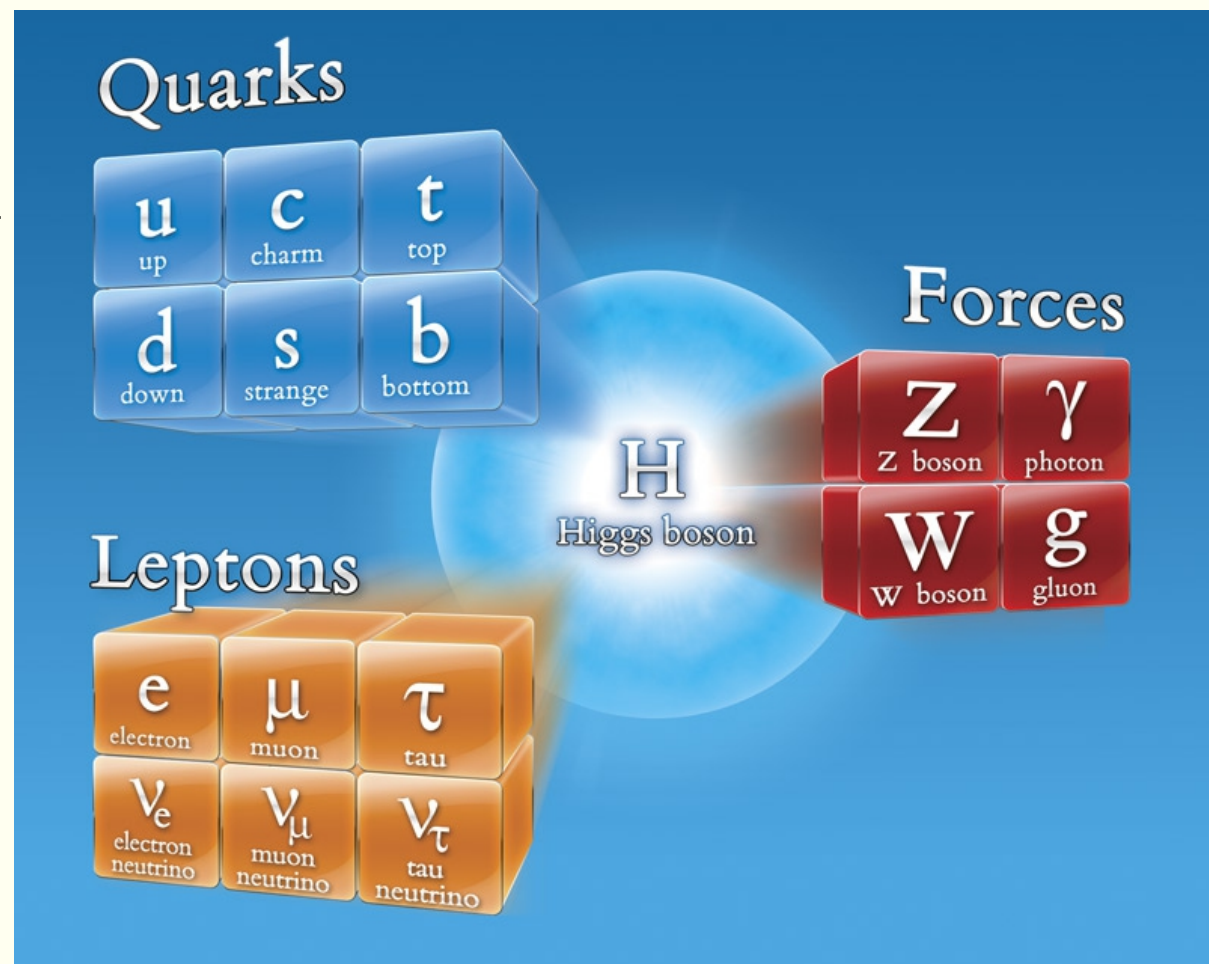
◆ Takže obrázok ŠM bude teraz vyzeráť asi takto:

◆ pozor na častú chybu pri populárnom vysvetľovaní k čomu Higgsov bozón slúži:

◆ hmotnosť časticiam nedodáva Higgsov bozón

◆ ale pole, s ktorým je tento zviazaný

◆ dá sa to predstaviť podobne, ako je fotón zviazaný s elektromagnetickým poľom



◆ skúsime vysvetliť na analógii (ako každá analógia bude trochu nepresná) s pohybom po “snehovom poli” (kresby od Nigel Holmes, publikované v NYT)

Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

♦ Prečo vlastne hľadáme Higgsov bozón a čo to vlastne je ?

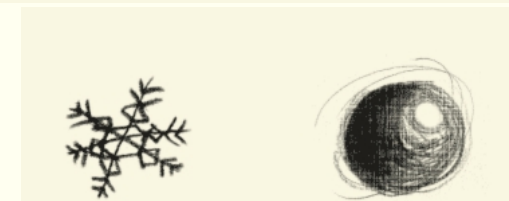
- ♦ lyžiar sa pohybuje po snehu ľahko, bez odporu (má malú hmotnosť):
- ♦ osoba na snežniciach už ťažšie (má väčšiu hmotnosť):
- ♦ v čižmách to pôjde veľmi ťažko (máme veľkú hmotnosť):



- ♦ ale vták vôbec necíti sneh (má nulovú hmotnosť):



- ♦ v tejto analógii Higgsov bozón je ako jedna snehová vločka:



Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

- ◆ Prečo vlastne hľadáme Higgsov bozón a čo to vlastne je ?
 - ◆ aké problémy má ŠM s hmotnosťami ?
 - ◆ rovnice predpokladajú 0 hmotnosť bozónov nesúcich interakcie
 - ◆ nenulová hmotnosť leptónov a kvarkov narúša potrebné symetrie
 - ◆ riešenie, použitím tzv. Higgsovho mechanizmu, spočíva v “dodaní” do modelu 4 častíc, ktoré sa zatiaľ nepozorovali - tri majú 0 hmotnosť a 1 spin, jedna nenulovú hmotnosť a 0 spin
 - ◆ tri “dodané” častice s 0 hmotnosťou sú “pohltené” W a Z bozónmi, ktoré tak získajú hmotnosť - toto pohltenie nie je dynamické (a ak, tak nastalo len raz pri veľmi vysokých energiách hneď po BigBangu)
 - ◆ zvyšná “dodaná” častica reaguje s fermiónmi a kvarkami tak, že “obnoví” potrebné symetrie
 - ◆ táto “dodaná” častica je práve hľadaný Higgsov bozón, túto by sme mali byť schopní pozorovať
 - ◆ nie je to teda žiadna “božská” častica, ako ju niektoré médiá propagujú
 - ◆ lebo je to častica ako každá iná v ŠM modeli, nemá žiadne zvláštne vlastnosti, je len trochu odlišná tým, ako sa do modelu “dostala” - všetky ostatné boli buď priamo zmerané, alebo ich existencia vyplynula z nutnosti vysvetliť nejaké merania

Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

♦ Prečo vlastne hľadáme Higgsov bozón a čo to vlastne je ?

♦ musí Higgsov bozón existovať ?

♦ nemusí, vysvetlenie problémov s hmotnosťami môže mať aj iné riešenia

♦ ak ale neexistuje, ŠM v súčasnej verzii neplatí, treba ho prerobiť

♦ ale

♦ ak existuje, ak ho uvidíme => ŠM je úplný model, máme skoro istotu, že náš popis prírody je správny (v oblasti, ktorú model popisuje, ktoré doteraz pozorujeme)

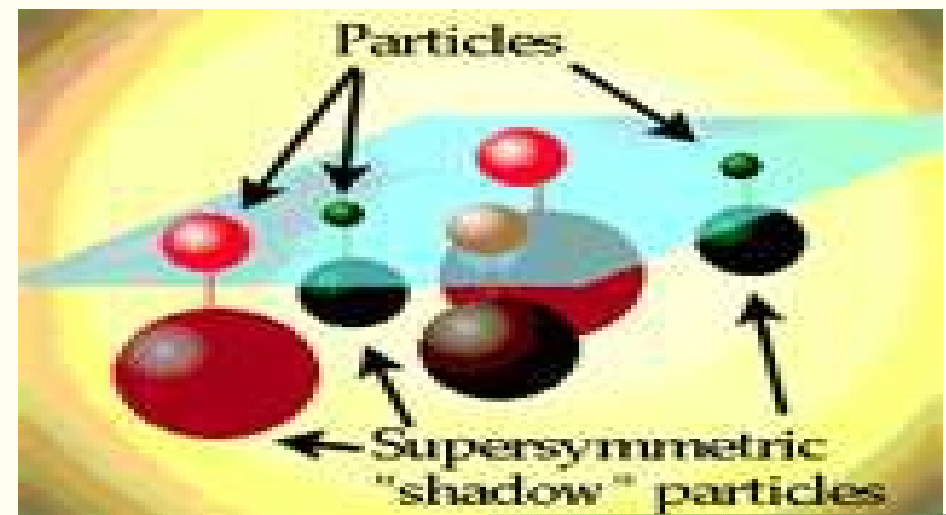
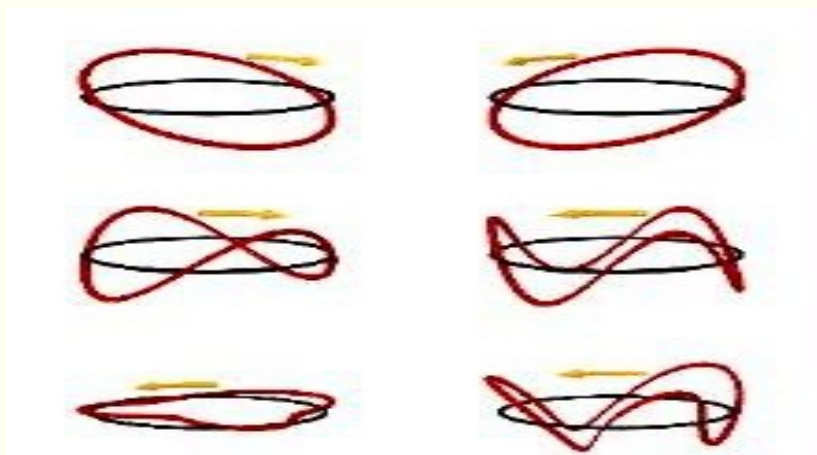
♦ dokázaná existencia Higgsovho bozónu (a zmeranie jeho vlastností) významne ohraničí možnosti existencie iných modelov, tzv. *fyziky za ŠM* – viac o chvíľu

♦ existencia Higgsovho bozónu výrazne zúži priestor ďalšieho pátrania po objasnení doteraz nevyriešených otázok

♦ v neposlednom rade objav a zmeranie Higgsovho bozónu bude dôležitým potvrdením správnosti rozhodnutia postaviť a prevádzkovať tak drahý a zložitý projekt ako LHC a detektory na ňom

Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

- ♦ Prečo vlastne hľadáme Higgsov bozón a čo to vlastne je ?
 - ♦ niečo o alternatívnych teóriách (v zmysle že ŠM je len limitným prípadom väčšieho modelu):
 - ♦ Teória veľkého zjednotenia - EM, slabé a silné interakcie sa zjednotia pri vysokých energiách - nejaký spôsob iného typu "Higgsovho mechanizmu"
 - ♦ Technicolour - narušenie symetrie bez existencie Higgsovho bozónu
 - ♦ Supersymetria - každá častica má "supersymetrického" partnera, rovnakých vlastností, ale s iným druhom spinu (k fermiónu bozón a naopak), zahrňuje aj gravitáciu - v minimálnej verzii obsahuje až 5 Higgsových bozónov
 - ♦ Teória superstrún - elementárne objekty nie sú častice ktoré pozorujeme, ale "superstruna" v mnohorozmernom časopriestore (10, 26 rozmerov), nadbytočné rozmery sú skompaktifikované, čo vedie k diskrétnym hmotnostiam



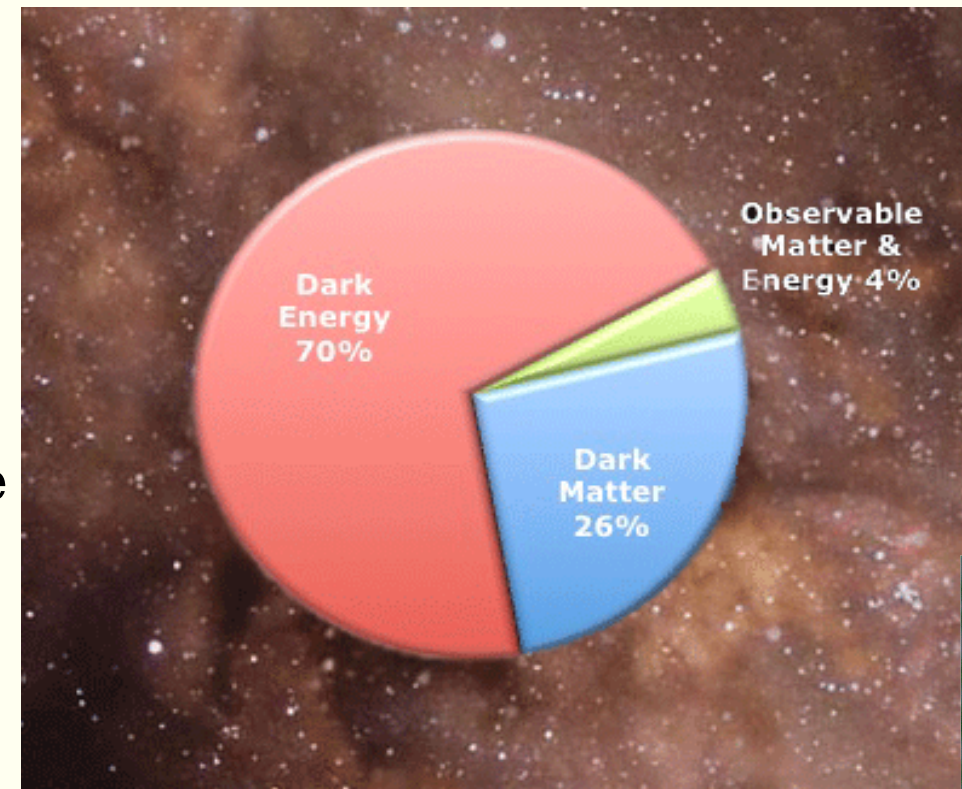
Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

♦ Čo myslíme že čoskoro uvidíme ?

- ♦ finálne potvrdenie toho, že vidíme Higgsov bozón ŠM
- ♦ dokončenie “premerania ŠM”, u väčšiny parametrov dúfame v spresnenie (zmenšenie chýb merania)
- ♦ ďalšie posunutie hraníc modelov za ŠM
- ♦ mnohí dúfajú, že pri novej energii sa objavia náznaky “fyziky za ŠM” (ja osobne som skeptický, podľa mňa ešte nebude stačiť energia na objavenie “novej fyziky”)

♦ Čo tým pádom tak skoro neuvidíme ?

- ♦ riešenie astrofyzikálneho problému
- ♦ väčšinu Vesmíru nevidíme
- ♦ nevieme z čoho sa skladá
- ♦ vidíme len jeho gravitačné účinky
- ♦ nemáme potuchy ako zmerať čo nevidíme
- ♦ pokiaľ sme naozaj uvideli ŠM Higgs, vieme len že ŠM nám tmavú energiu nevysvetlí
- ♦ ale tým máme istotu že “fyzika za ŠM” musí existovať



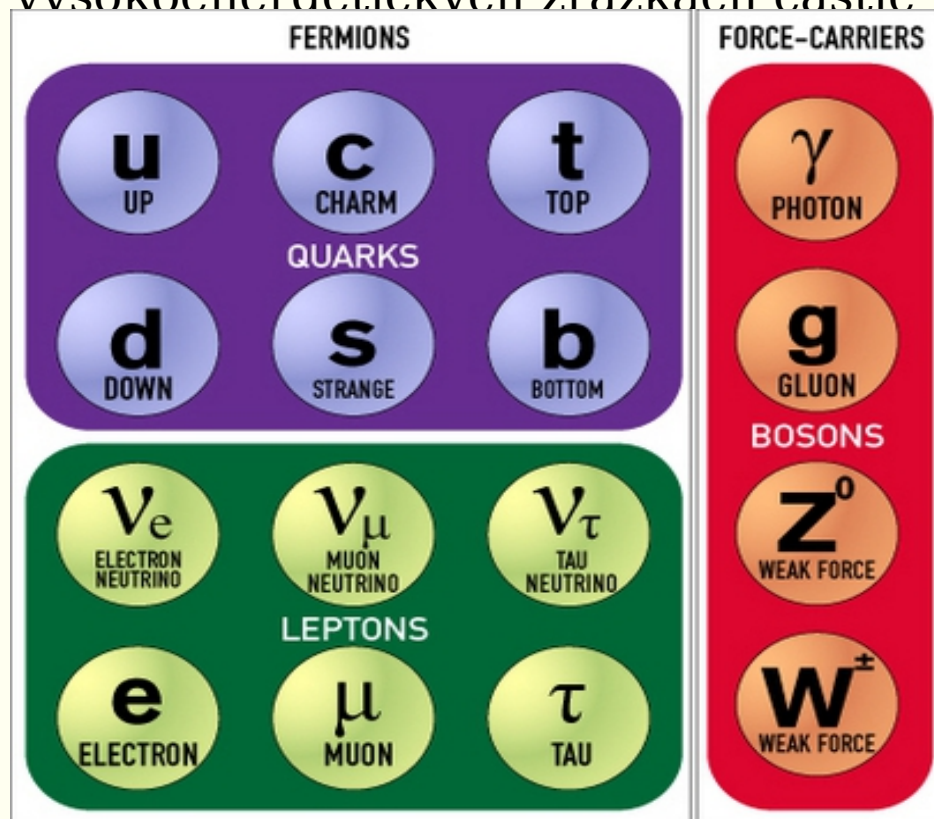
Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

- ♦ Prečo vlastne hľadáme Higgsov bozón a čo to vlastne je ?
- ♦ objavenie a zmeranie parametrov Higgsovho bozónu má veľký význam pre existenciu a platnosť alternatívnych teórií, nielen na skompletizovanie ŠM samotného
- ♦ potrdí nám, že doterajšie úsilie o vypracovanie teórie popisujúcej náš svet išlo správnou cestou
- ♦ objavenie a zmeranie parametrov Higgsovho bozónu nám aj vytýči cestu, kam sa uberať v poznávaní hmotného sveta ďalej, výrazne ohraničí možnosti, ktorým smerom ďalej bádať
- ♦ okrem samotnej časticovej fyziky, povie veľa aj astrofyzikom, ktorí sa snažia pochopiť pôvod a zloženie tmavej hmoty a energie
- ♦ objavením a zmeraním parametrov Higgsovho bozónu sa naše poznávanie základných pravidiel ktorými sa riadi náš Vesmír zďaleka nekončí

Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

Prečo vlastne hľadáme Higgsov bozón a čo to vlastne je ?

- častice v ŠM kategorizujeme rôzne, najdôležitejšie je ale delenie na “fermióny” (s poločíselným spinom) a “bozóny” (s celočíselným spinom) (spin je kvantová vlastnosť častíc, veľmi vzdialenou analógiou je “vrtenie sa okolo vlastnej osi” u mechanických objektov)
- fermióny v ŠM sú vlastne častice vytvárajúce “látku”, bozóny sú sprostredkovateľmi síl medzi nimi
- náš viditeľný svet (látku, ktorú normálne pozorujeme) je tvorený vlastne len štyrmi fermiónmi (e , ν_e , u , d) a bozónmi, ostatné fermióny vidíme len vo vysokoenergetických zrážkach častíc



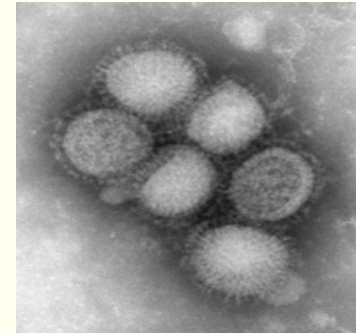
- kde tu figuruje Higgsov bozón ? Nikde.
- aby sa vysvetlila nenulová hmotnosť bozónov (symetrie na ktorých je teória a rovnice založené, potrebujú, aby bozóny mali nulovú hmotnosť, bol navrhnutý tzv. Higgsov mechanizmus
- Higgsov mechanizmus používa “spontánne narušenie symetrie” na vyriešenie problémov s hmotnosťami v ŠM
- Higgsov bozón je “vedľajší produkt” tohto mechanizmu

Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

♦ Ako hľadáme Higgsov bozón ?

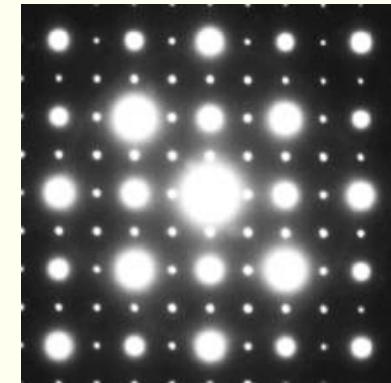
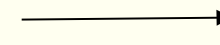
- ♦ podľa rozmeru objektu potrebujeme správny mikroskop:

- ♦ optický (svetlo) do 10^{-6} m

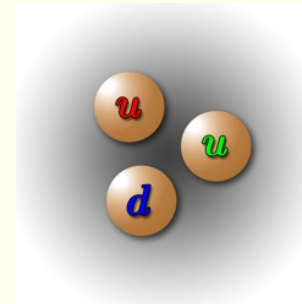


- ♦ elektrónový (elektrón s $E = 100$ keV) do 10^{-9} m

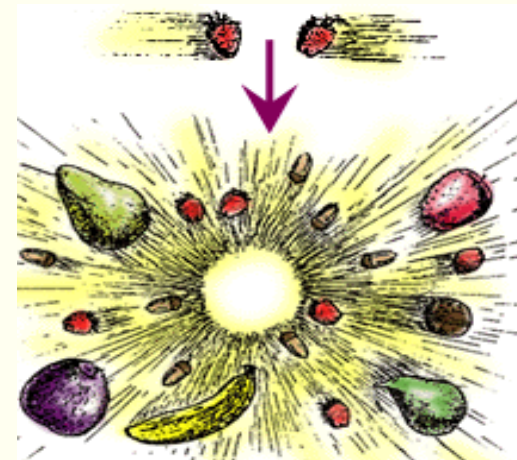
SrRuO₃ kryštál



- ♦ urýchľovač častíc (napr. LEP, elektróny s $E = 100$ GeV) do 10^{-18} m



- ♦ Higgsov bozón čakáme ešte menší, preto je potrebný urýchľovač s ešte väčšou energiou



Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

♦ Ako hľadáme Higgsov bozón ?

♦ najväčší “mikroskop” sveta - LHC

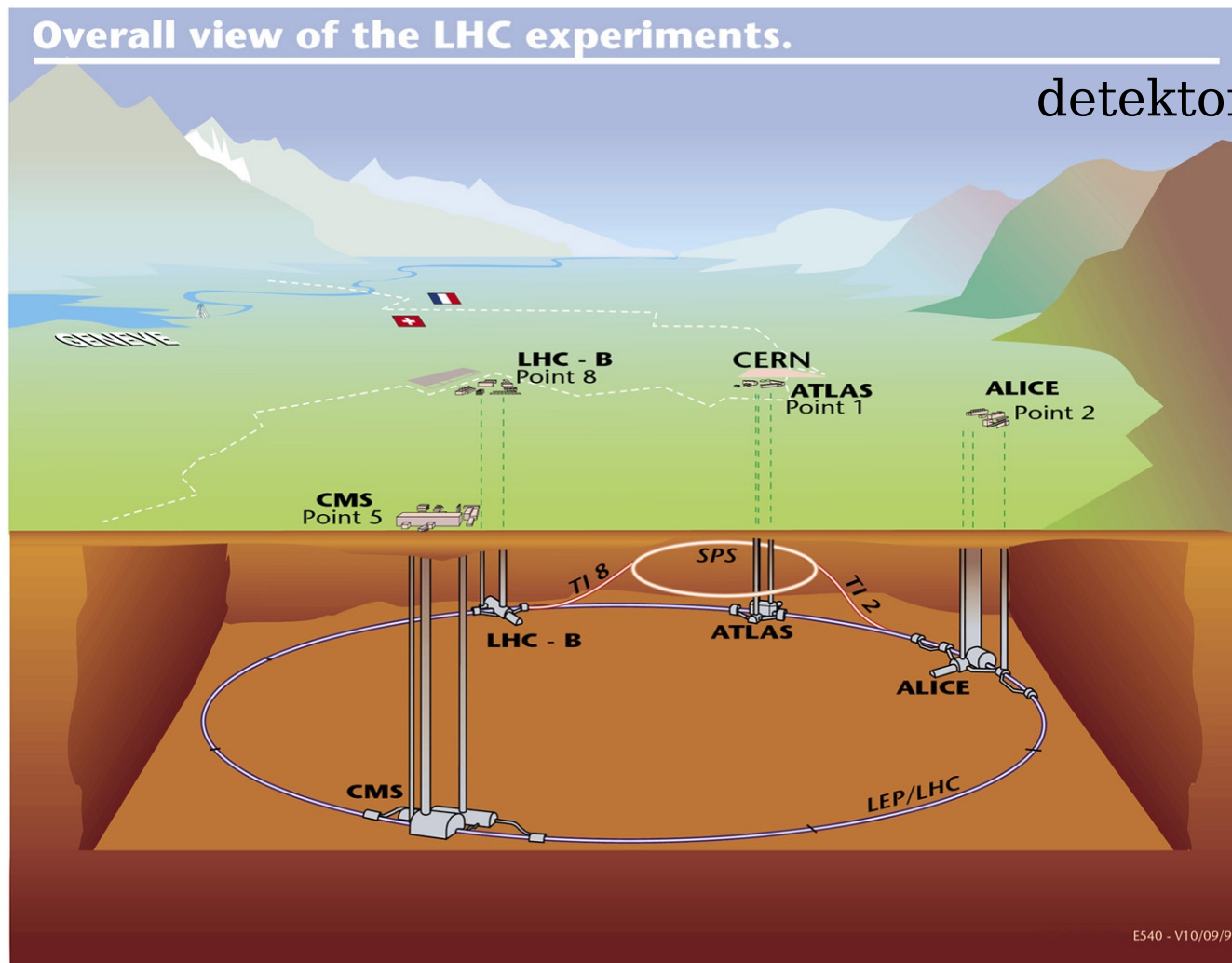
*urýchľovač zasadený
do švajčiarskej
krajiny*

- ♦ obvod (dĺžka) urýchľovača - 27 km, 50-175 m hlboko pod zemou
- ♦ 1232 supravodivých magnetických dipólov, magnetické pole = 8.36 T, celkovo 9600 magnetov
- ♦ zrážky $p + p$, 2×7 TeV, 600 miliónov zrážok za sekundu, jadrá olova 1150 TeV
- ♦ 60 ton kvapalného hélia pri min. teplote -271.3°C (1.9 K)



Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

- ♦ Ako hľadáme Higgsov bozón ?
 - ♦ najväčšie “okuláre” - detektory vybudované na LHC
 - ♦ po zrážke protónov vznikne množstvo častíc, ktoré necháme prejsť prostredím detektora, kde zanechajú “stopy”, ktoré analyzujeme



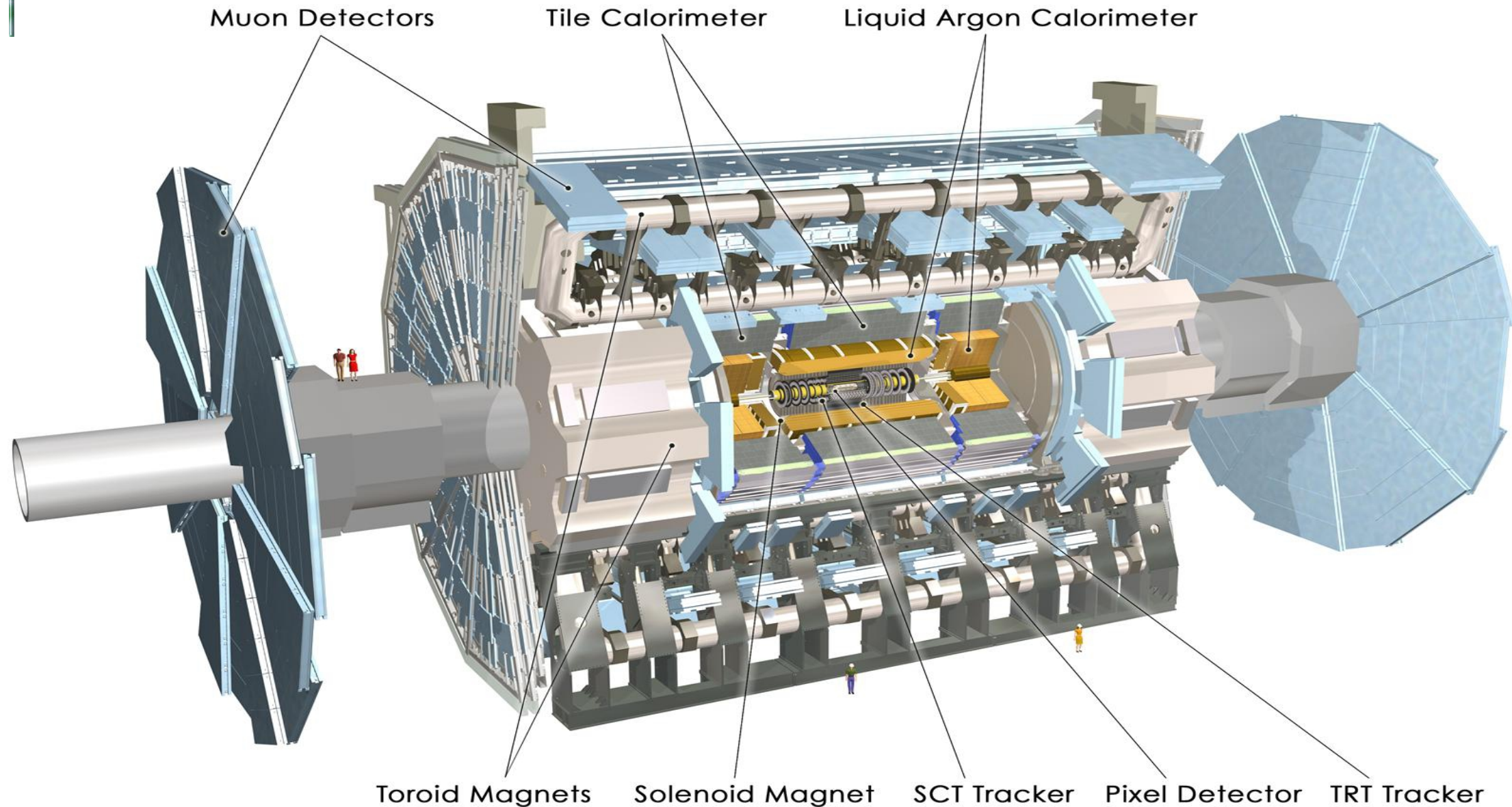
radiace centrá na povrchu



Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

♦ Detektor ATLAS, základné parametre

- ♦ 46 m dlhý, 25 m vysoký, váži viac ako 7000 ton, meria pomocou viac ako 100 miliónov elektronických kanálov (3000 km káblov)



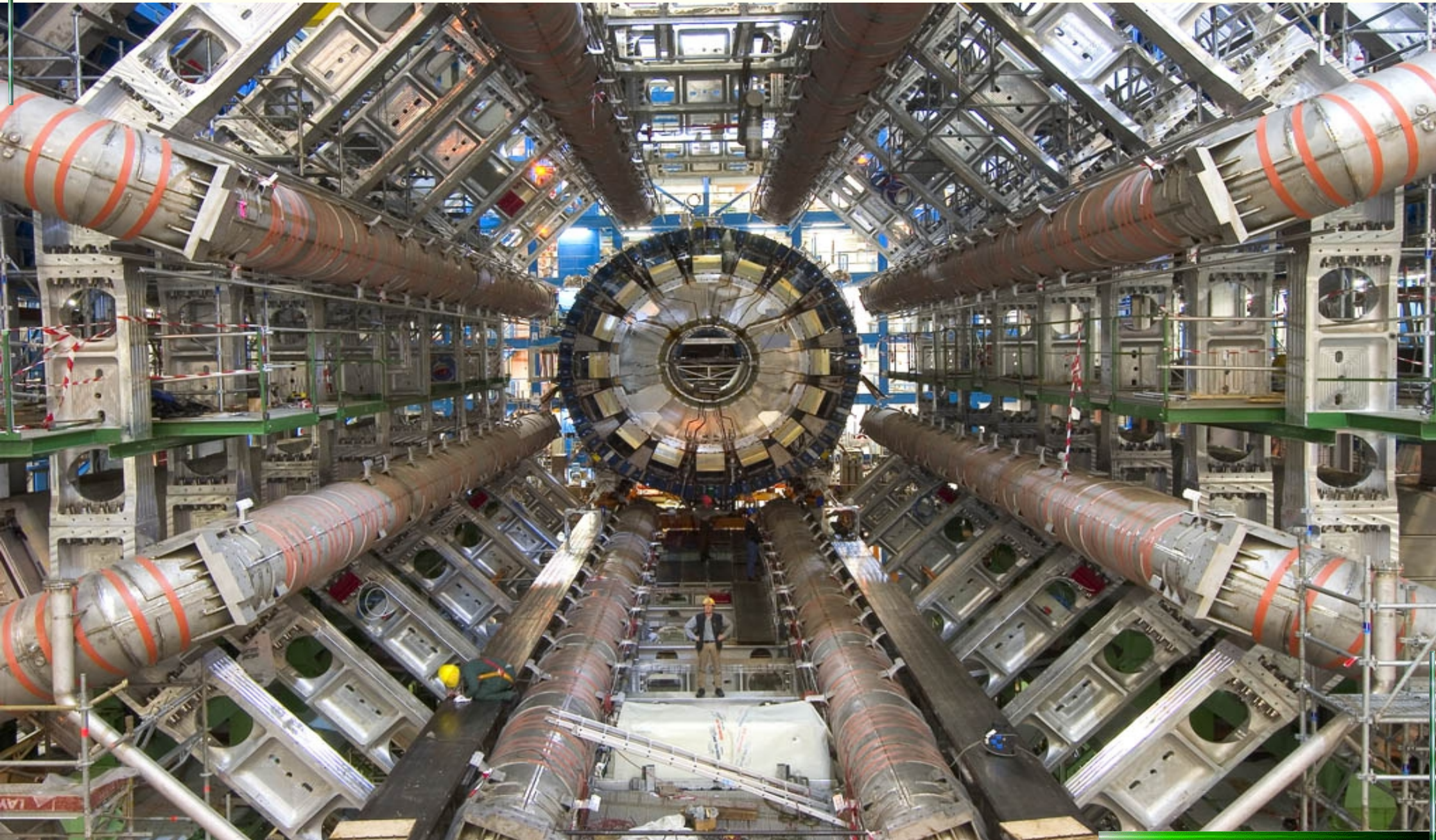
Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

- ◆ Detektor ATLAS experimentálna hala pred inštaláciou



Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

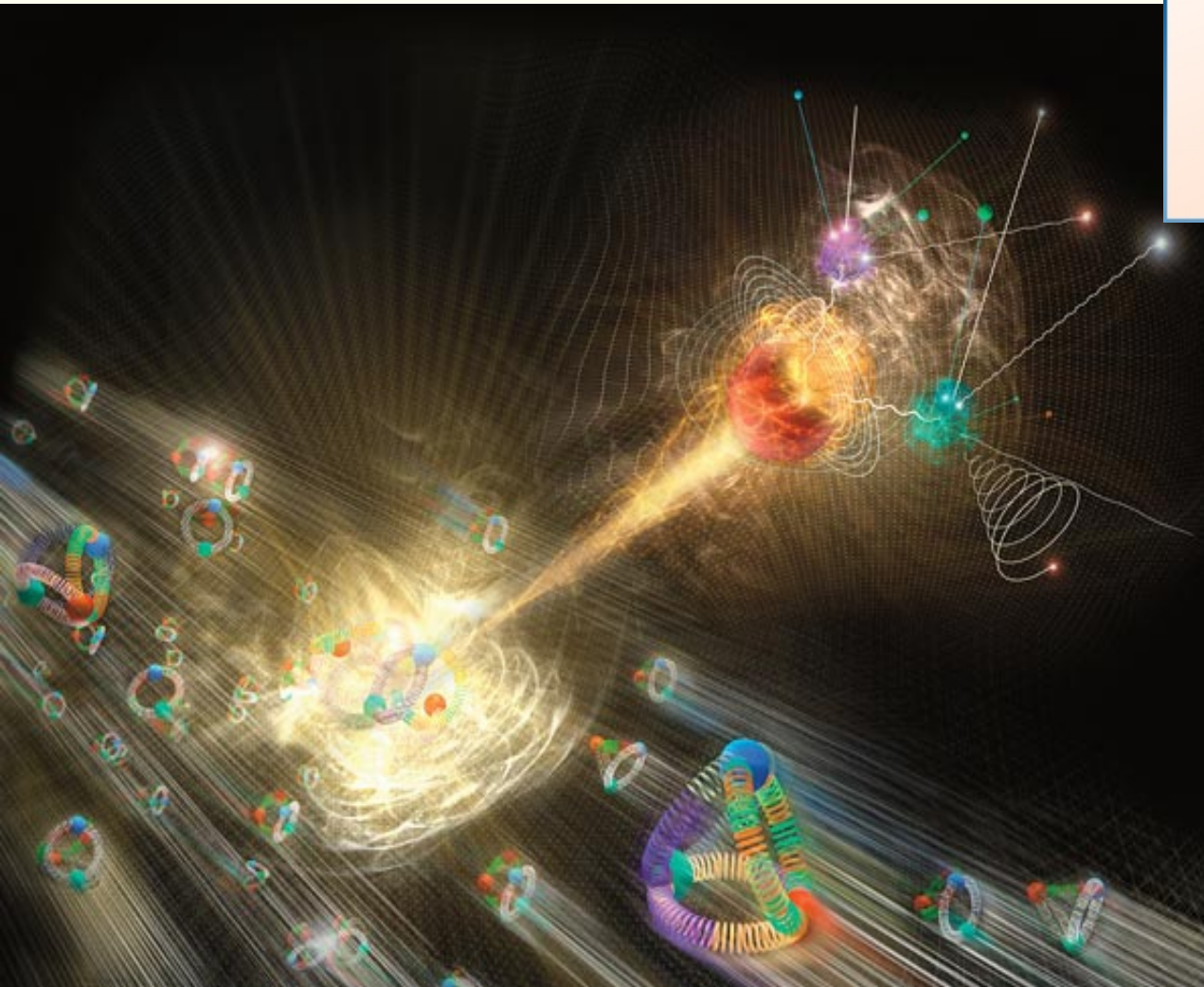
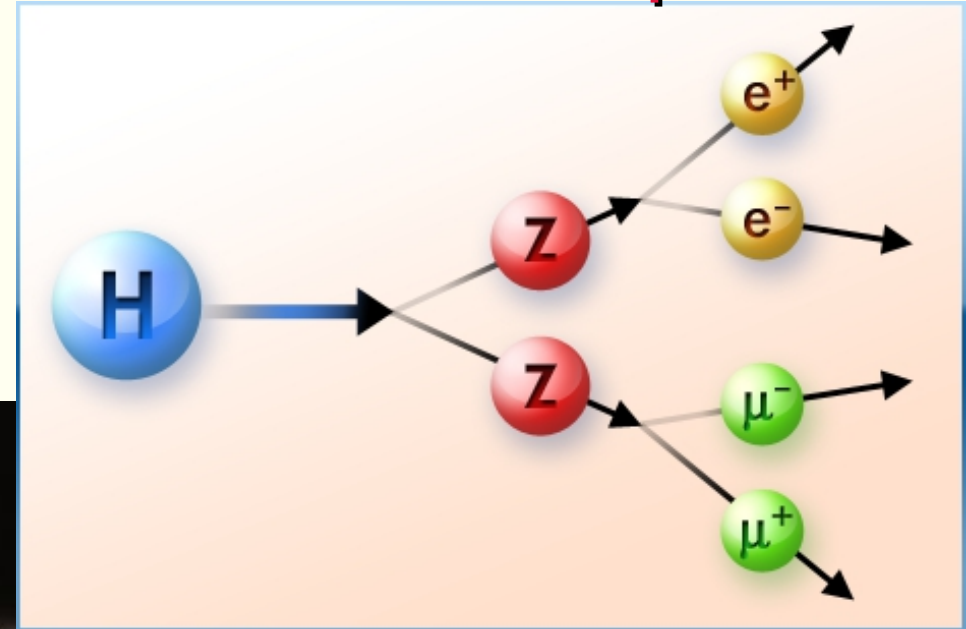
- ◆ Detektor ATLAS po inštalácii magnetu



Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

♦ Ako hľadáme Higgsov bozón ?

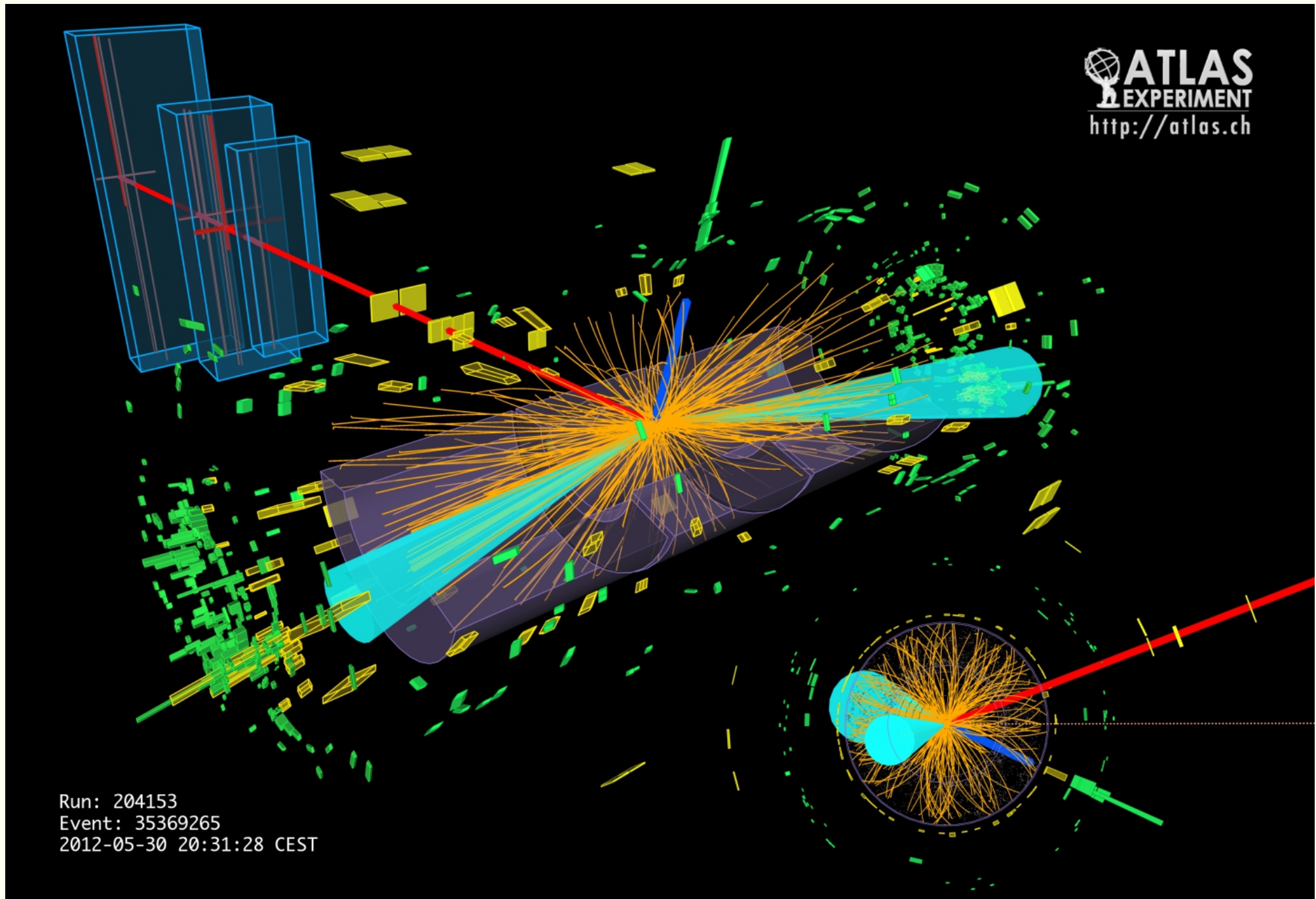
- ♦ jeden z procesov, kde očakávame, že môžeme zmerať Higgsov bozón



- ♦ umelecká predstava, ako to asi pri takej zrážke vyzerá

Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

◆ Ako hľadáme Higgsov bozón ?

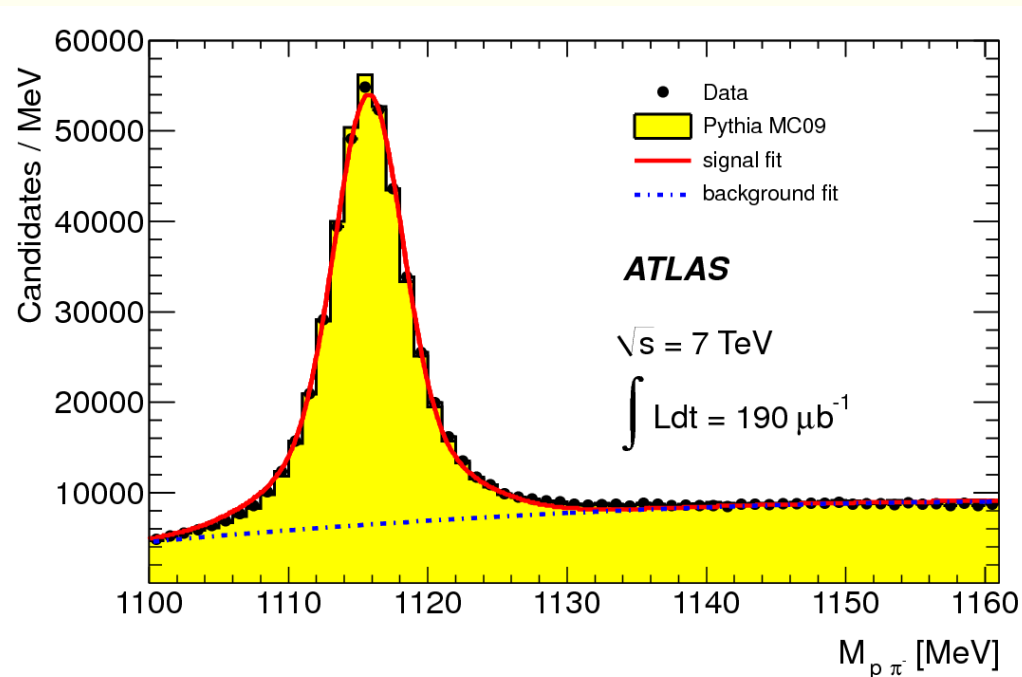


Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

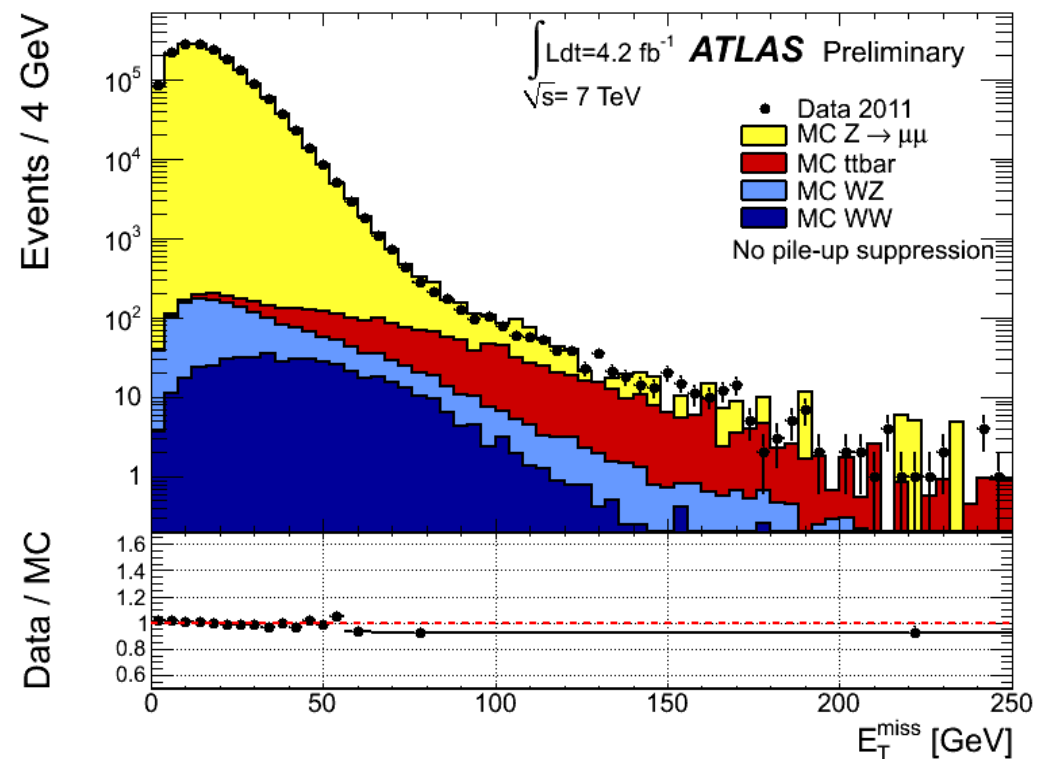
♦ Ako hľadáme Higgsov bozón ?

- ♦ dáta nestačia, potrebujeme informácie spracovať, získať z nich “fyzikálne výsledky”
- ♦ to je momentálne pracovnou náplňou mnohých fyzikov a študentov, preverujú parametre detektora, vyťahujú z dát tú správnu informáciu
- ♦ v prvom rade sa presvedčiť, že meriame, to, čo merať chceme (znovupremeraním už známych vecí):

vidíme známe častice (Λ) správne ?



meriame energiu správne ?



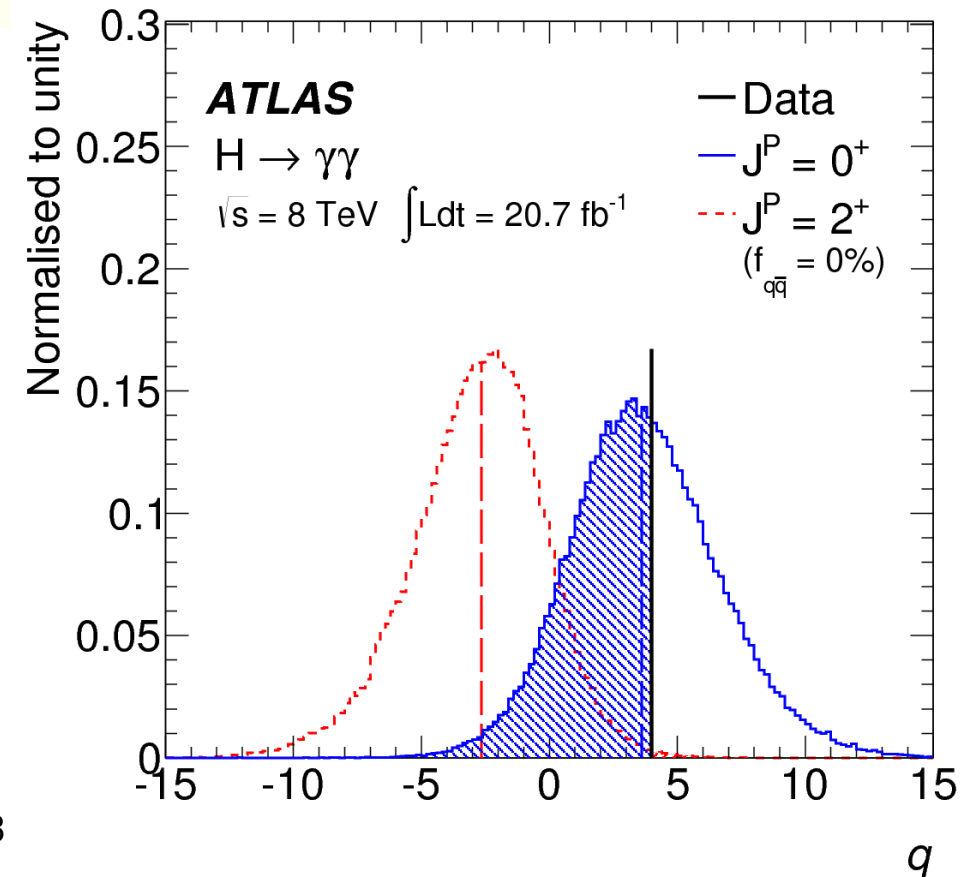
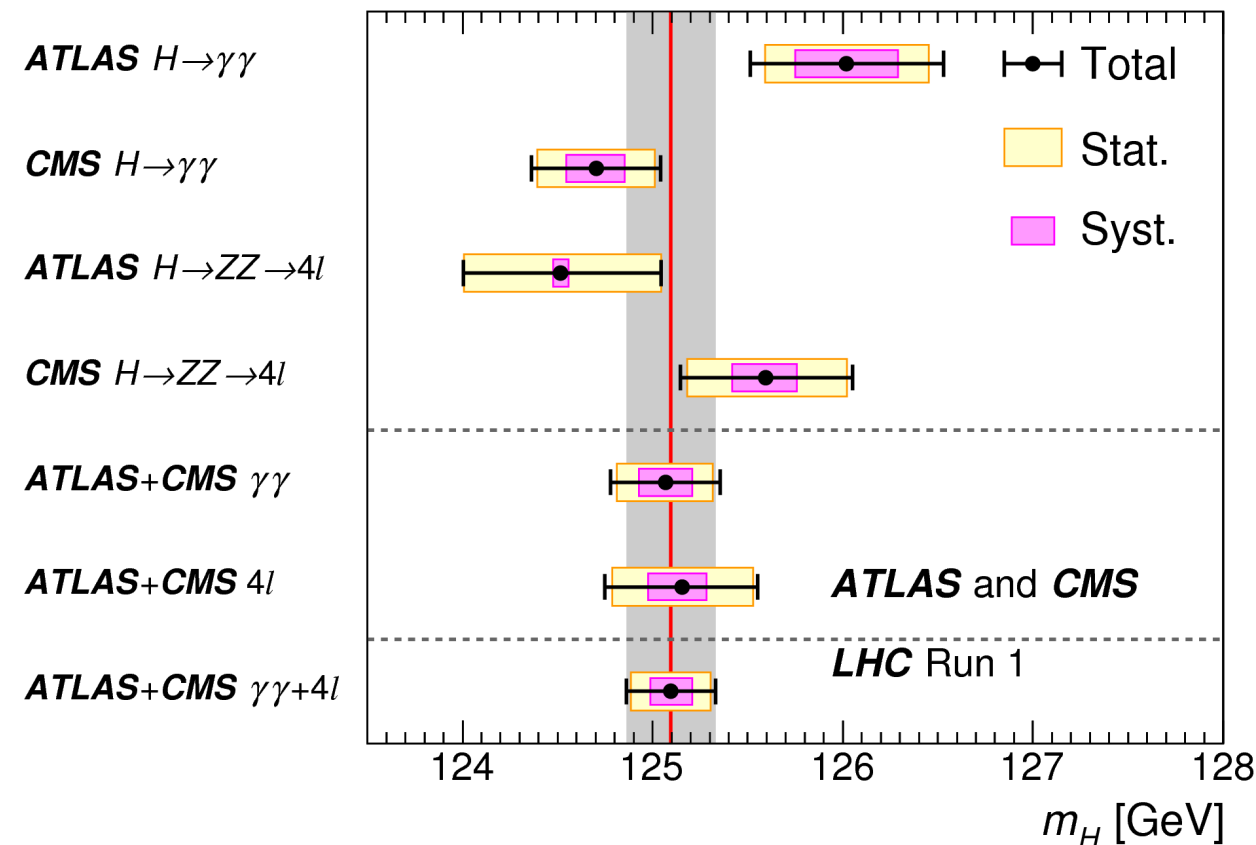
Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

♦ Ako hľadáme Higgsov bozón ?

- ♦ pokiaľ všetky previerky “známych” procesov dopadli dobre, môžeme veriť, že aj “neznáme” procesy meriame správne
- ♦ naprvé a najdôležitejšie je zmerať samozrejme hmotnosť a spin novej častice, takže pre nájdený Higgsov bozón máme najnovšie výsledky:

Hmotnosť (ATLAS+CMS):

Spin:



Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

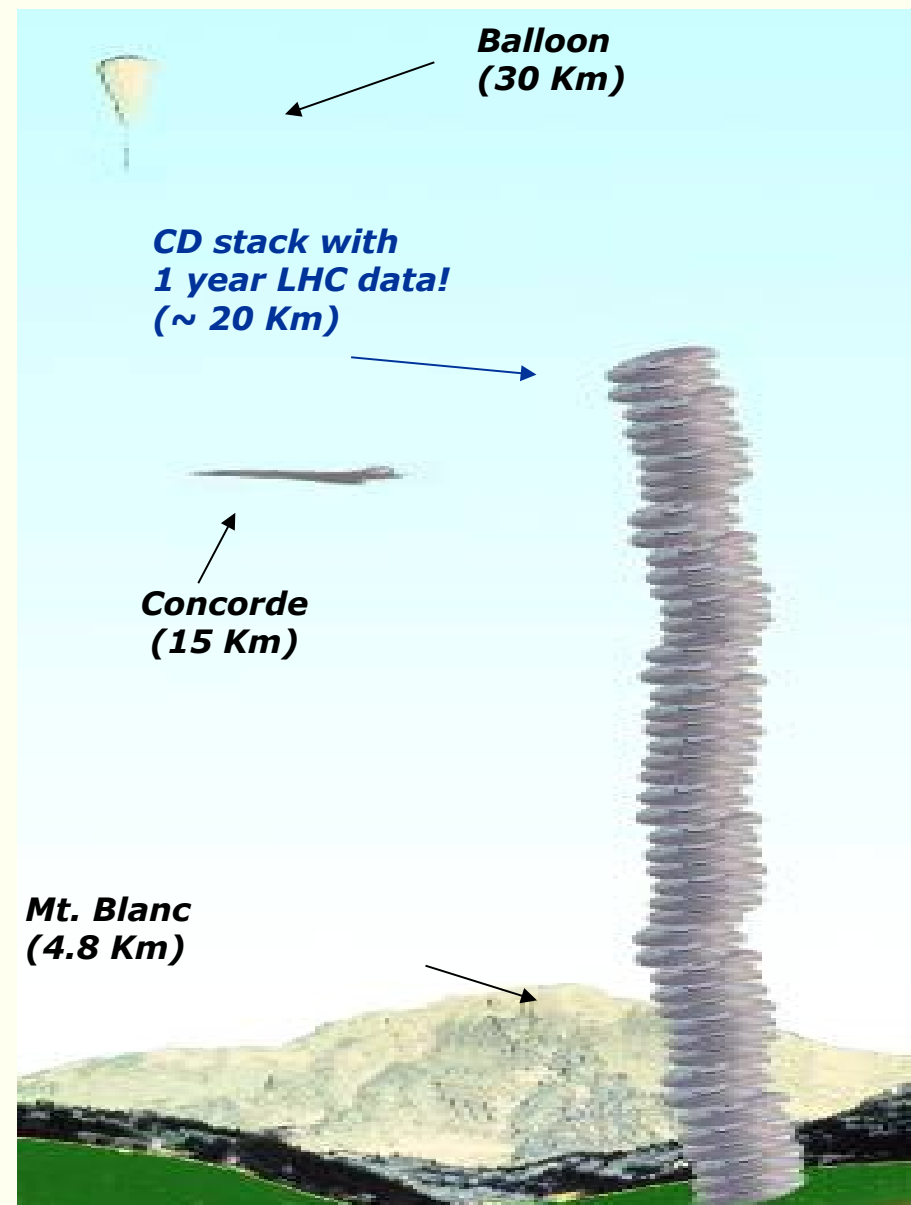
♦ Čo sme vlastne na LHC uvideli ?

- ♦ spresnili staré informácie, premerali znovu mnohé parametre ŠM s väčšou presnosťou
- ♦ získali nové hranice možnej platnosti iných modelov - LHC svojou vysokou energiou prakticky vo všetkých meraných parametroch posunula hranice platnosti týchto modelov
- ♦ zatiaľ sú všetky výsledky v úplnom súlade so ŠM, všetky modely “za ŠM” dostali nové, užšie oblasti platnosti
- ♦ žiaden priamy dôkaz o existencii javu mimo ŠM sa neobjavil
- ♦ pri analýze celej doteraz nameranej štatistiky vidíme existenciu elektricky neutrálnej častice so spinom 0 a hmotnosťou asi 125 GeV
(1 GeV = $1,602 \cdot 10^{-10}$ J = $3,8 \cdot 10^{-14}$ kcal = $4,45 \cdot 10^{-17}$ kWh)
- ♦ podľa našich predpokladov, je táto častica hľadaný Higgsov bozón
- ♦ vlastnosti tejto častice nie sú ešte podrobne zmerané, zatiaľ všetko nasvedčuje tomu, že vidíme Higgsov bozón ŠM
- ♦ LHC a detektory prešli za posledné dva roky dôkladným updatom, aby sme pri vyššej energii zrážok získali istotu o charaktere objavenej častice

Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

♦ Ako spočítame čo vlastne vidíme ?

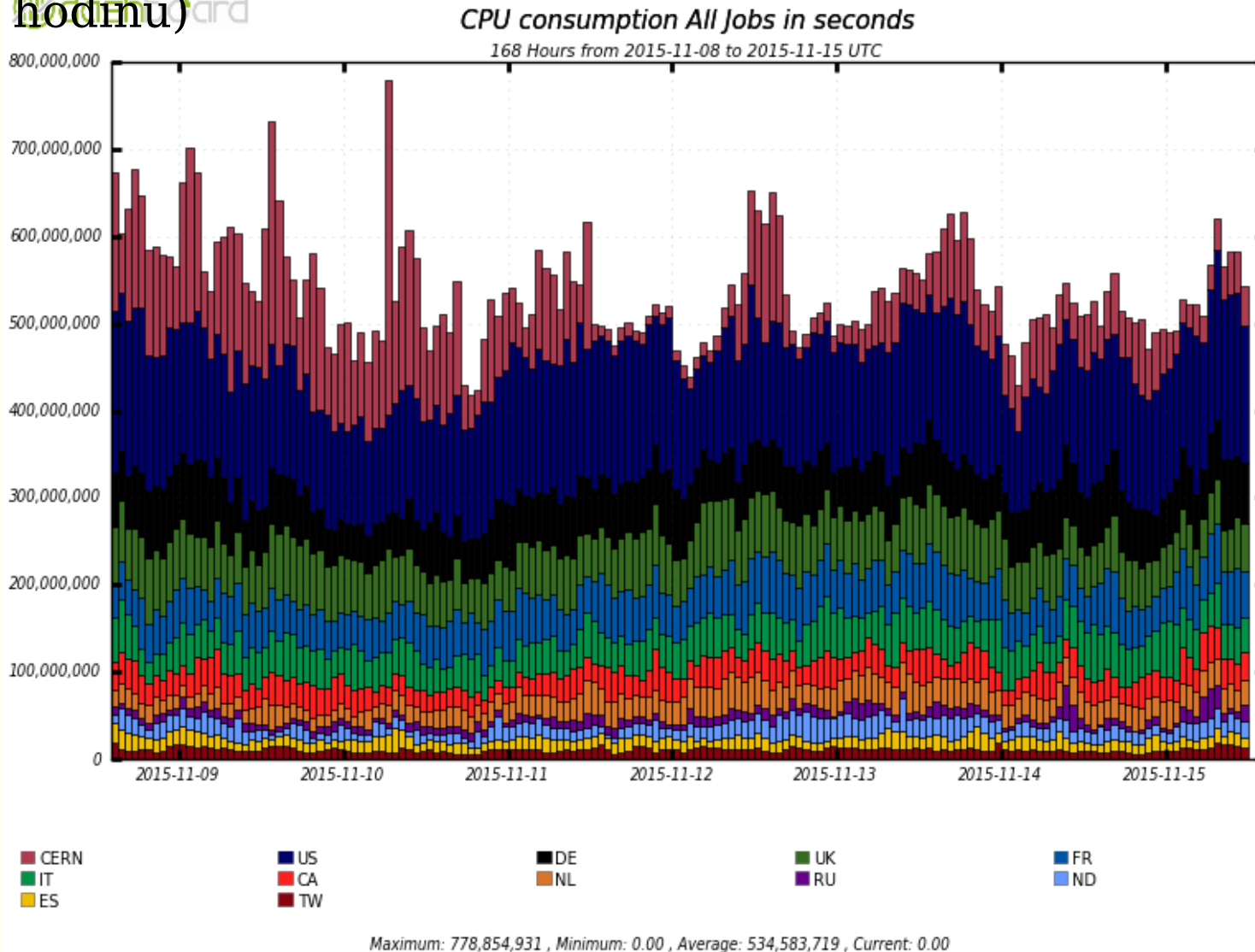
- ♦ dôležitou časťou je výpočtová technika, konkrétne spôsob a organizácia rekonštrukcie a analýzy dát
- ♦ veľkosť jedného zapísaného eventu 1.6 MB => 1 CD sa zaplní za 7 sekúnd
- ♦ zapísané eventy (tzv. RAW dáta) treba rekonštruovať (na to treba ďalší asi 1MB/event) a analyzovať (potrebných asi 0.1 MB), okrem toho sú potrebné aj simulácie
- ♦ za rok tak jeden detektor potrebuje uložiť asi 5.5 PB (Petabyte – 1000 TB - 1 mil. GB – 1 miliarda MB), čo je asi 8.5 mil. CD, a podobné množstvo simulovaných dát
- ♦ tieto čísla sú pre jeden detektor (ATLAS), pre celkový objem z LHC treba ich vynásobiť asi 4 krát
- ♦ najväčší problém nie je ani tak uložiť niekam také množstvo dát, ale sprístupniť ich tak, aby mnoho fyzikov mohlo s nimi naraz pracovať
- ♦ technické riešenie uvedených požiadaviek sa našlo v Grid computingu (virtuálne výpočtové centrum, založené na distribuovanom systéme centier)



Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

♦ Ako spočítame čo vlastne vidíme ?

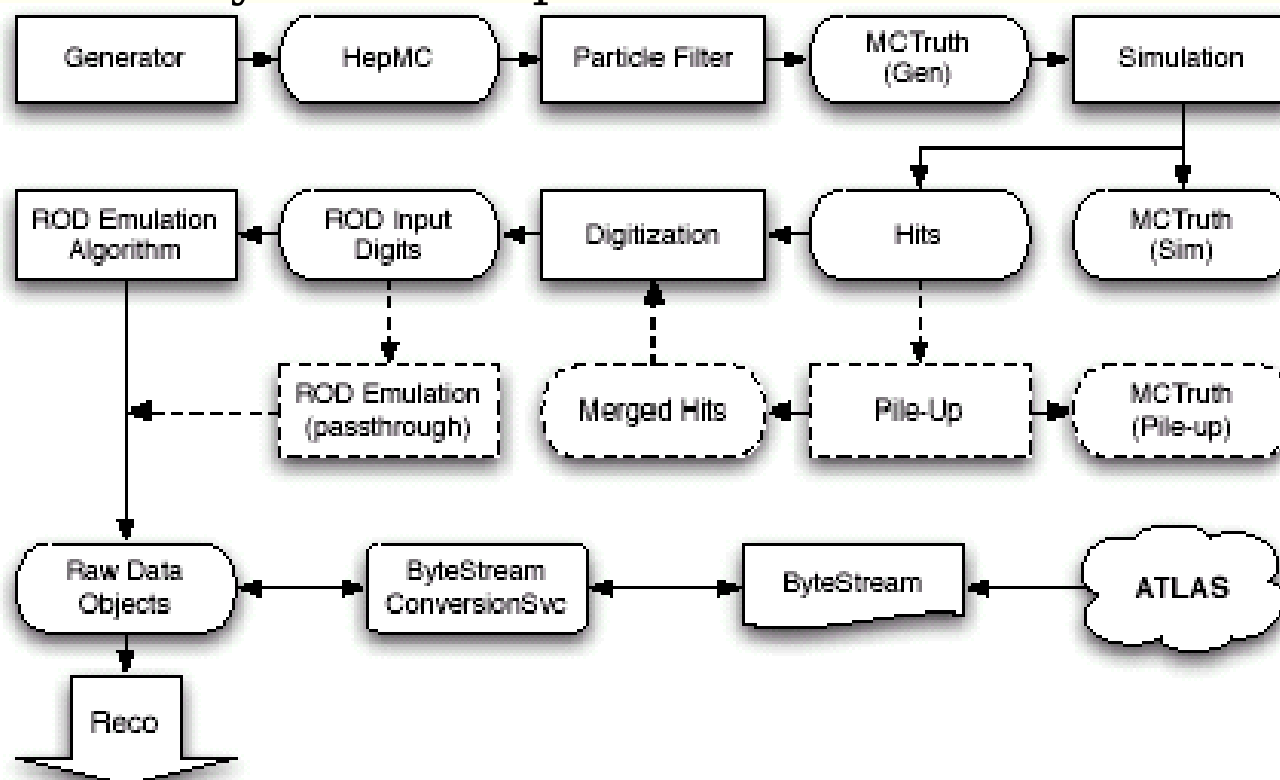
- ♦ veľké množstvo dát, s ktorými musí pracovať veľa ľudí paralelne – WLCG je jedno z fungujúcich riešení, príklad spotreby CPU pre ATLAS v minulom týždni (vidíme okolo 500 miliónov CPU sekúnd spotrebovaných každú hodinu)



Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

♦ Ako spočítame čo vlastne vidíme ?

- ♦ o WLCG viac v príspevku kolegu M. Straku)
- ♦ okrem veľkej výpočtovej kapacity je nevyhnutný aj dostatočne stabilný, ale súčasne flexibilný softwarový systém na simuláciu, rekonštrukciu a analýzu všetkých dát veľkou kolaboráciou (tzv. offline software)
- ♦ veľmi stabilný a bezpečný musí byť tzv. online software zodpovedný za riadenie a monitoring detektora, takéto zariadenie sa nedá ovládať "rukami", všetko je riadené softwarovo....
- ♦ príklad štruktúry softwaru pre detektor ATLAS



Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

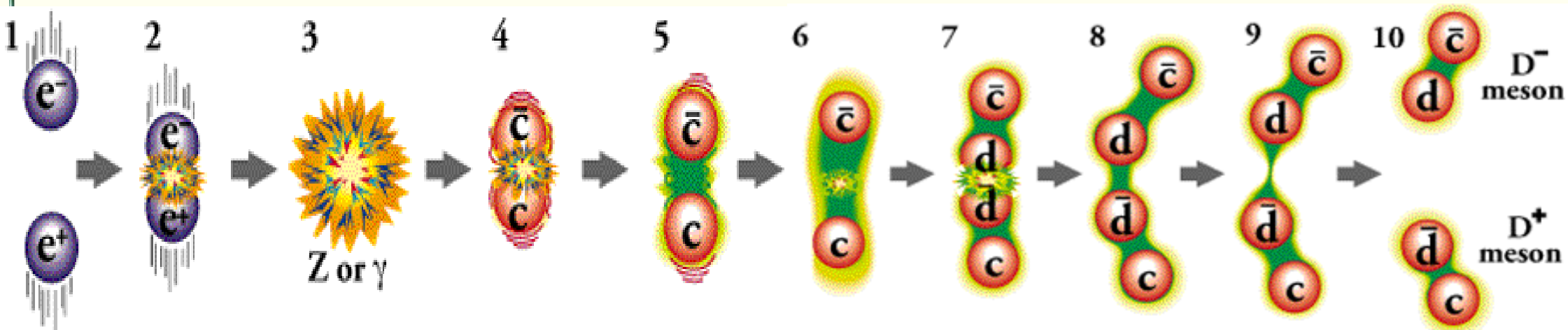
♦ Ako spočítame čo vlastne vidíme ?

- ♦ niekoľko čísel ilustrujúcich komplexnosť offline softwaru pre ATLAS:
 - ♦ 5.4 milióna riadkov kódu (C++ a python)
 - ♦ 2200 softwarových balíkov
 - ♦ 7000-8000 zmien v kóde komitnutých mesačne
 - ♦ približne 400 aktívnych vývojárov
 - ♦ okolo 50 rôznych smerov vývoja paralelne
 - ♦ okolo 400 stabilných produkčných releasov ročne
- ♦ taký systém samozrejme potrebuje veľmi dôkladné testovanie, paralelne s vývojom, inak by sa nedalo všetko stihnúť
- ♦ rovnako infraštruktúra potrebná na podporu celého procesu je hodne komplikovaná, veľmi podobná infraštruktúre veľkých softwarových firiem
- ♦ detaily softwaru nebudem rozvádzať ide väčšinou o vysoko-špecializované výpočty, napísané a prispôsobené na mieru detektoru, takže nepoužiteľné inde (samozrejme používa štandardizované komponenty, ako GEANT4 na simuláciu....)

BACKUP SLIDES

Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

- ♦ zrážka 2 elektrónov



Higgsov bozón a čo všetko k nemu treba spočítať ?

- ◆ počítačové zobrazenie jednej zmeranej zrážky v detektore ATLAS

