

Nové výsledky LHC a co říká ke kosmologii

Vladimír Wagner

Ústav jaderné fyziky AVČR, 250 68 Řež, E_mail: WAGNER@UJF.CAS.CZ, WWW: ojs.ujf.cas.cz/~wagner/

1. Úvod

2. Ověřování kosmologických teorií

2.1 Hypotéza, model a teorie

2.2 Standardní kosmologický model

3. Proč potřebujeme LHC?

3.1 K čemu velký urychlovač?

3.2 Testy Standardního modelu struktury
hmoty a interakcí

3.3 Symetrie ve fyzice

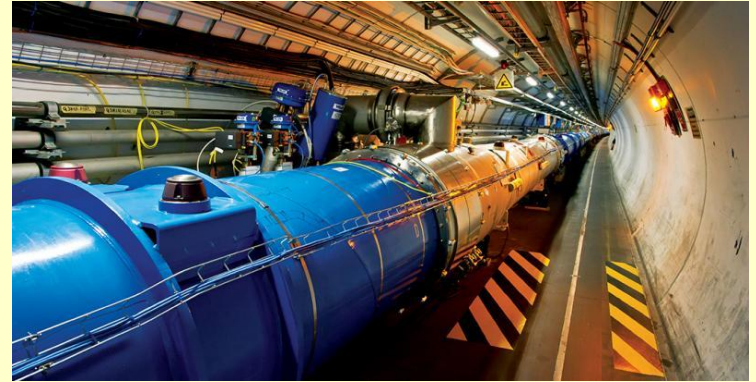
4. Hledání exotické fyziky

4.1 Nová částice? Nová interakce?

4.2 Vzácné rozpady a procesy

4.3 A teď opravdu produkce horké a
husté hmoty

5. Závěr



Úvod - hypotéza, model a teorie

Jednotlivé stupně lidského poznání:

Hypotéza - návrh hlavních předpokladů popisu, zatím neověřeno experimentálně
příklad: Koperníkova hypotéza heliocentrické soustavy

Model - soubor pravidel umožňujících zjednodušený popis - příklad:
Keplerův model Sluneční soustavy vypracovaný na základě pozorování
Tycho Brahe

Teorie - soubor pravidel, který umožňuje kvantitativně popsat přesně a komplexně
experimentální data - příklad:
Newtonův popis Sluneční soustavy na základě Newtonovy teorie gravitace

!!! SPRÁVNOST OVĚŘÍ JEN EXPERIMENT !!!

**Dráhy všech současných meziplanetárních sond
se počítají pomocí Newtonovy teorie gravitace**

**Obecnější teorie gravitace – Einsteinova obecná
teorie relativity – je nutná až v „extrémnějších“
podmínkách**

Sonda New Horizons u Pluta



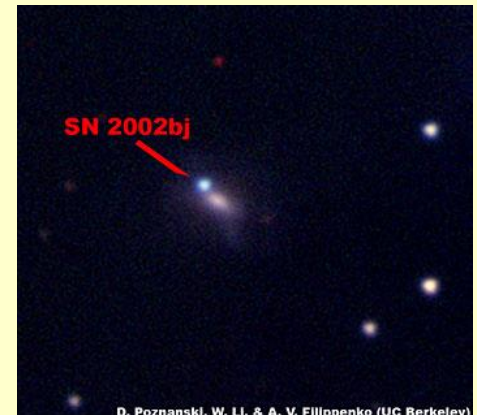
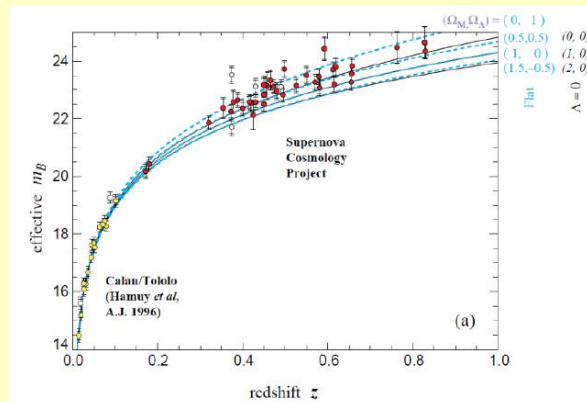
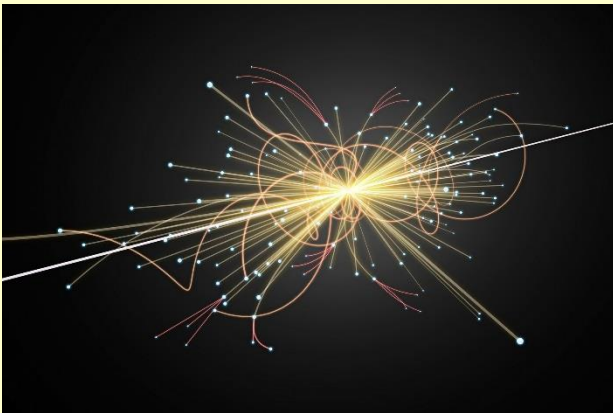
Platnost teorií potvrzuje pouze experimentální pozorování

Klíčová pro budování kosmologických modelů a testování hypotéz, modelů a teorií jsou experimentální data – jejich co největší přesnost a spolehlivost

- Důležité události:
- 1) Zahájení experimentů na LHC
 - 2) Zvyšování statistiky pozorování gravitačních vln – start nového běhu měření LIGO a VIRGO, start detektoru Kagra
 - 3) Zpracování obrovské množství přesných astrometrických dat z observatoře Gaia, zahájení provozu Webbova teleskopu
 - 4) Zahájení měření hmotnosti neutrina experimentem KATRIN

Standardní kosmologický model založen na platnosti Standardního modelu hmoty a OTR

Zatím nová data spíše potvrzují platnost Standardního modelu hmoty a OTR
Různé pozorované limity na projevy nové exotické fyziky spíše vyřazují stále další alternativní teorie



Navázání na existující teorie a jejich zobecnění

Přirozený přístup, který se osvědčil v minulosti – předpoklad platnosti stejné fyziky v různých místech i systémech.

Vychází se z platnosti stávajících teorií a hledají se odchylky, které nás přivedou k novým teoriím.

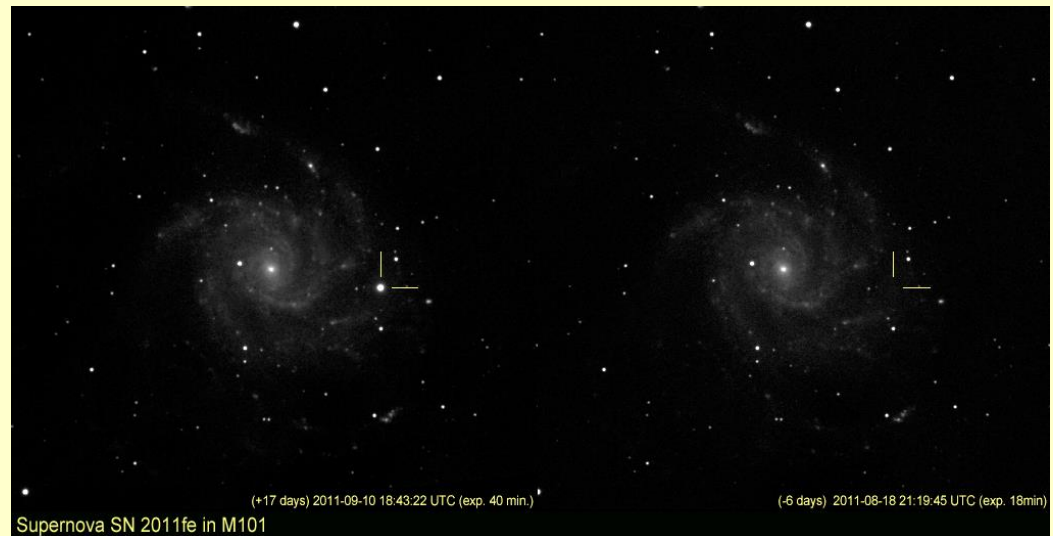
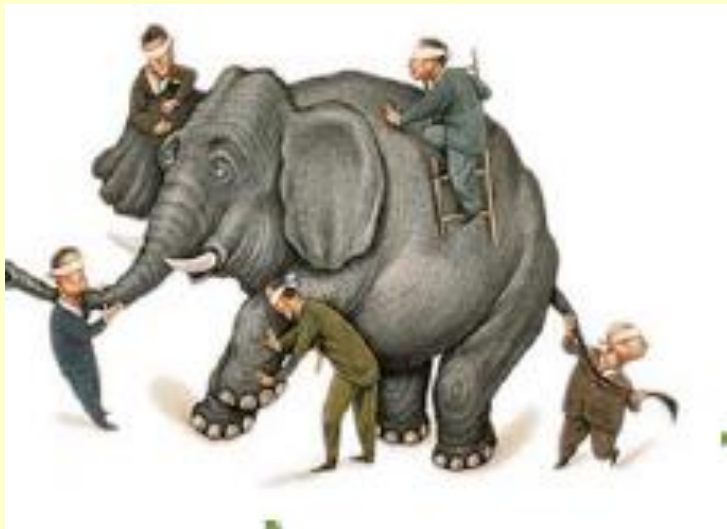
Předpoklad správnosti Standardního modelu hmoty a OTR
Platí koperníkovský princip (homogenita a izotropie na velkých škálách), nízká hustota

Současný standardní kosmologický model – rozpory jsou vysvětleny chladnou temnou hmotou a temnou energií

Jako jediný dává jednotný, konzistentní popis komplexu známých experimentálních dat.



Baryony: 4,9 %
(4,5 % plyn, 0,4 % hvězdy)
Temná hmota: 25,8 %
Temná energie: 69,2 %



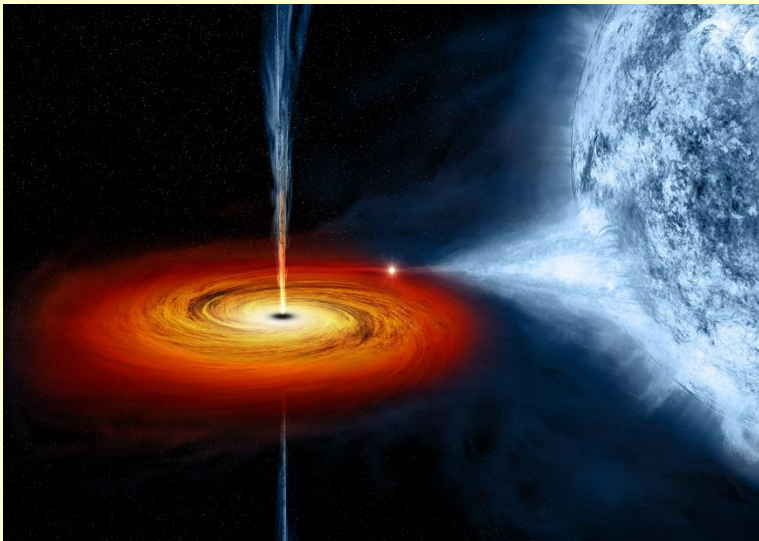
Nutnost extrapolace

Pokud ze chceme dostat za hranice známého, musíme extrapolovat (extrapolace v čase, v rozměrech – extrémně malých či extrémně velkých, k extrémně velkým hodnotám intenzit různých polí, k extrémně malým hodnotám veličin)

Přírozeně se vždy začíná s extrapolací známé ověřená teorie do oblasti nově otevřené – ověřuje se, zda i v oblasti extrapolace funguje – v případě rozporu se hledá nová

Pár příkladů:

- 1) Extrapolace Newtonovy teorie na Sluneční soustavu – velmi úspěšné
- 2) Extrapolace klasické fyziky do mikrosvěta – objev kvantové fyziky



Extrémní intenzita gravitačního pole v blízkosti černých děr testuje gravitační teorie



LHC testuje extrémně malé rozměry a extrémní hustoty energie

Přesnost měření je vždy omezená

Každé fyzikální měření má svou nejistotu

I z toho plyne, že fyzikální model, teorie je něco jiného než model a teorie matematická
– **důkaz platnosti ve fyzice je něco jiného, než důkaz platnosti v matematice**

Ve fyzice nelze principiálně dokázat, že měřená veličina je přesně dělitelná třemi

Nejpřesnější test teorie – kvantové elektrodynamiky
(magnetický dipólový moment elektronu):

Experiment: 1,001 159 652 180 91(26) μ_B

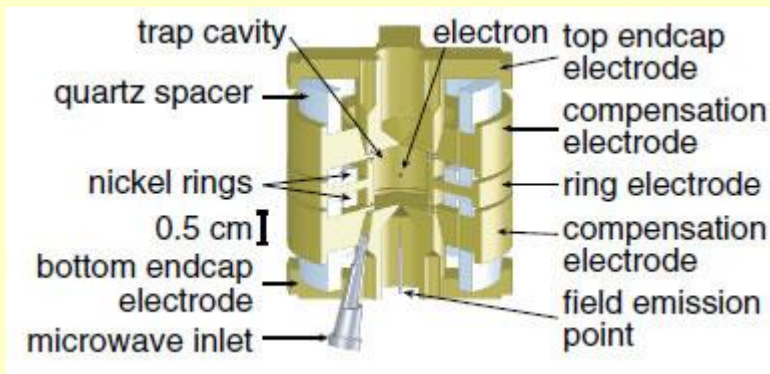
QED: 1,001 159 652 180 13(86) μ_B

Poznámka:

Výpočet proveden s řadou zanedbání, aproximací a zaokrouhlení, využívaje poruchové metody

Přesto nelze říci, že je QED absolutně přesná – spíše víme, že ne

Většinou i teoretický výpočet má nejistotu (ať už danou aproximací matematického výpočtu nebo modelu)



Penningova magnetická past

Magnetický moment mionu

Experiment: 1,001 165 920 9(6) μ_B

QED: 1,001 165 918 04(51) μ_B

Zde už rozdíl, ale pouze na úrovni 3,5 σ

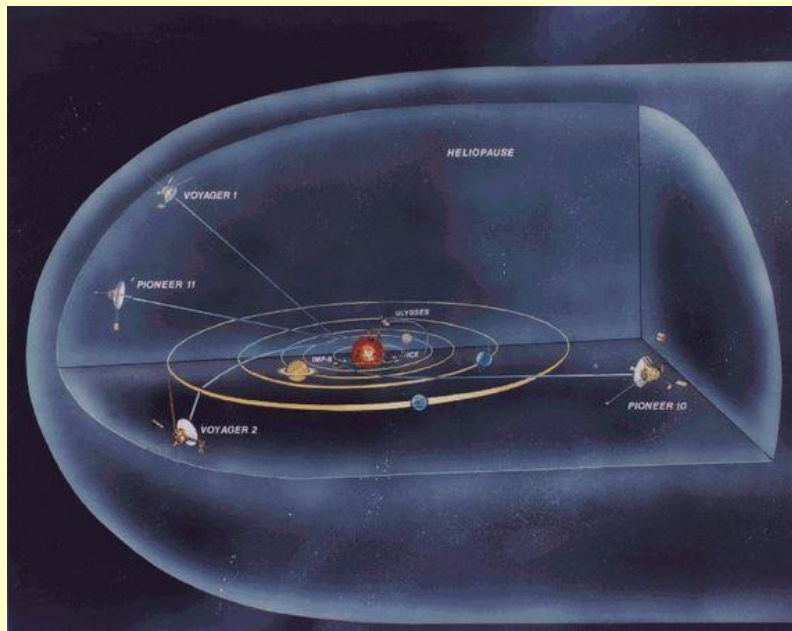
Nutnost zanedbání a aproximace

Fyzikální úlohy jsou většinou extrémně komplexní – při řešení reálných úloh máme vždy obrovský počet zanedbání.

Vždy je třeba testovat a posuzovat, na jaké úrovni přesnosti nám příslušná zanedbání neovlivní správnost získaného výsledku.

Pro úspěšný výpočet drah sondy ve Sluneční soustavě opravdu nevádí, že neznáme počet, rozměry a hmotnosti všech těles v ní, často stačí zahrnutí hmotností a vlastností jen pár a ostatní zanedbat.

!!! Aproximace a zanedbání dělají při popisu dějů ve vesmíru všichni !!!



Také cesta sond mimo Sluneční soustavu využívající gravitační prak byla vypočtena s využitím řady zanedbání a aproximací.

Jejich oprávněnost testuje experiment (fyzikální realita)

Singularita je známkou limity platnosti teorie

Standardní model – bodové částice → nekonečné hustotu hmoty a náboje → singularita

Černá díra – nic nezastaví v černé díře kolaps do bodu → nekonečná hustota → singularita

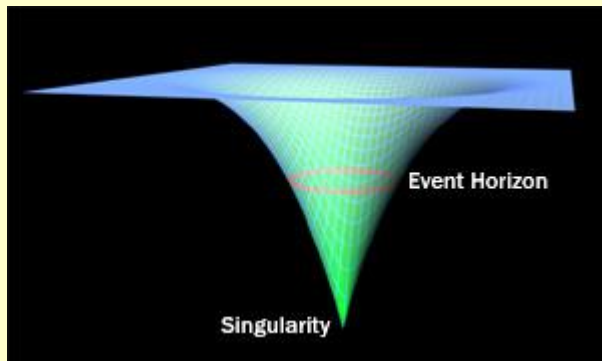
Jak standardní model hmoty a interakcí, tak obecná teorie relativity mají své limity

Pro podmínky blízké vzniku singularity (extrémně malý rozměr, extrémní intenzita gravitačního pole) nutno nalézt obecnější teorii

Obecnější teorie musí zahrnovat tu původní (platí pro „normální“ podmínky)

Příklady:

- 1) Newtonova teorie → vysoké rychlosti → nefunguje → **speciální teorie relativity**
- 2) Newtonova teorie → silná gravitace → nefunguje → **obecná teorie relativity**
- 3) Obecná relativita → extrémní gravitace → nefunguje → **kvantová gravitace?**
- 4) Standardní model → extrémní hybnosti → nefunguje → **supersymetrie, struny?**

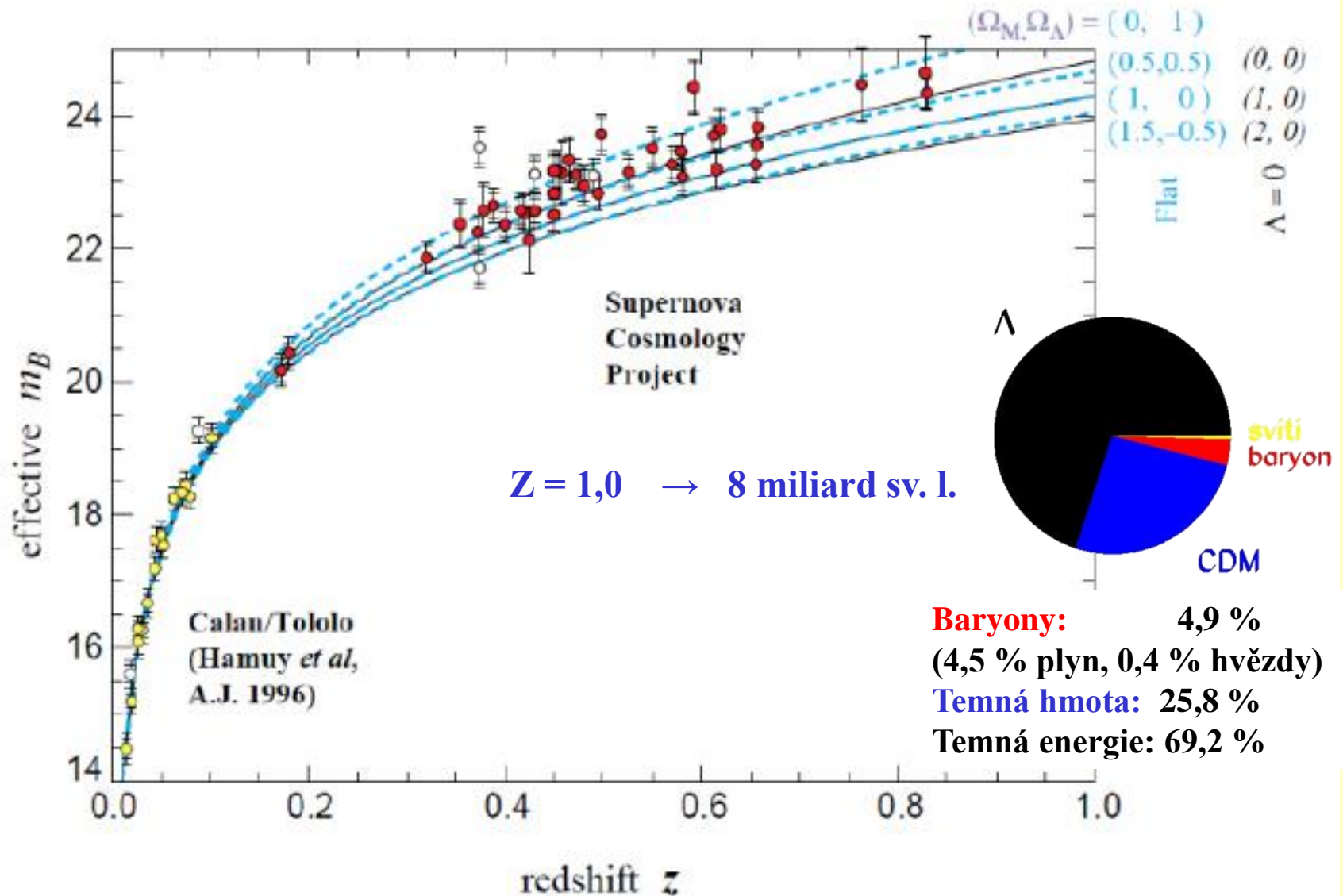


Singularita reálně neexistuje



Na kvantové gravitaci pracuje Hawking

Pozorování vzdálených → mladých částí vesmíru – změny rozpínání v čase
 (pozorování supernov Ia → **zrychlování rozpínání** – ? temná energie vakua ?)



LHC - start experimentování s vyšší luminositou energií

Energie svazku 7 TeV znamená dosažení plánovaného maxima

Začátek běhu 3 se zpozdil i vinou koronaviru pilotní testy svazku koncem října

Reálné experimentování začalo 22. dubna, maximální energie od 5. července 2022



Velín urychlovače LHC při přípravě systému pro pilotní experimenty

Z čeho se urychlovač skládá

Iontový zdroj – produkce nabitých částic

Elektrostatické nebo proměnné elektrické pole – urychlení částice – urychlovací systém

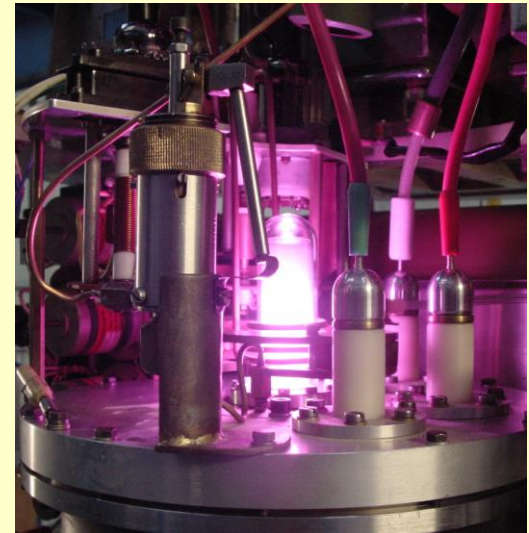
Magnetické pole – určuje dráhu částice, provádí fokusaci svazku – magnetické čočky vedou svazek a snaží se co nejvíce jej zúžit

Vakuový systém – částice se při urychlování musí pohybovat ve vysokém vakuu – nutný systém vývěv

Chlazení – supravodivé magnety potřebují heliové teploty

Radiační ochrana – zajištění bezpečnosti pomocí stínění

Řídicí systém – ovládání, řízení a kontrola práce urychlovače



Zdroj plazmy – elektrický výboj



Kryogenní systém pro LHC

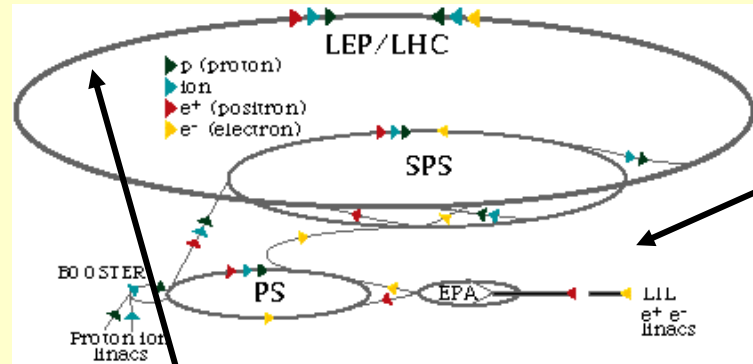


Řídicí centrum urychlovačů v CERNu



Vedení svazku magnetickými čočkami

LHC navazuje na systém menších urychlovačů (několik synchrotronů – PS, SPS, LHC)



Soustava urychlovačů v CERNu (Švýcarsko)

Pohled na rozmístění urychlovačového komplexu v CERNu

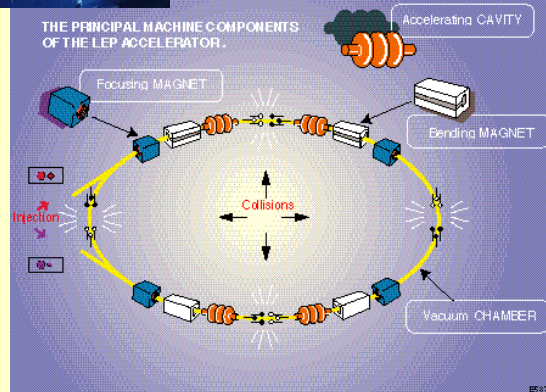
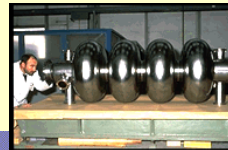
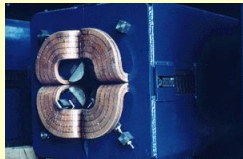
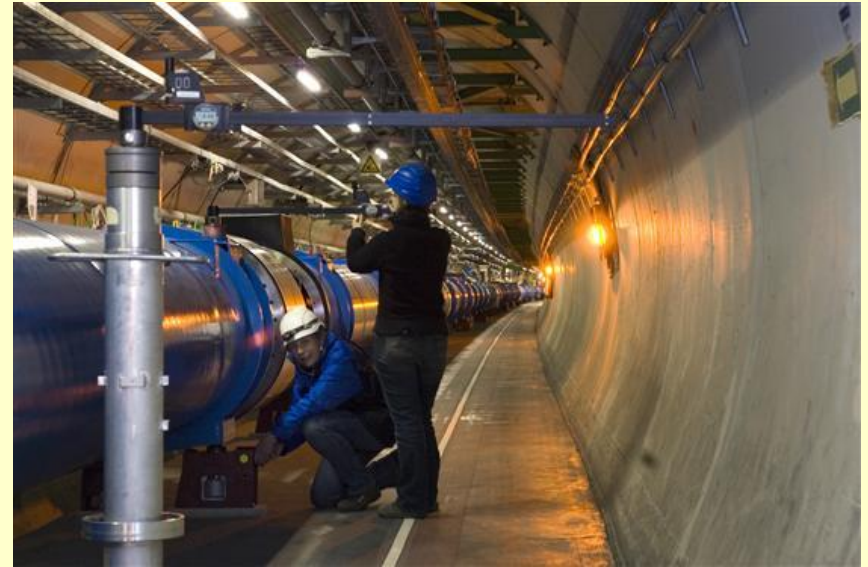


Schéma synchrotronu

V současnosti největší urychlovač na světě je LHC



Větší detaily, energie a teploty, produkce těžších částic

Experimentální pozorování je rozhodujícím kritériem pro uznání platnosti hypotézy a její přeměnu v teorii

Stěžejní nástroj – srážka urychlených částic

1) Nárůst energie → větší detaily

Zatím největší urychlovače $E \sim 100 \text{ GeV} \rightarrow 10^{-18} \text{ m}$

2) Produkce částic s vyšší klidovou energií (hmotností)

Klidová hmotnost protonu: $\sim 1 \text{ GeV}$

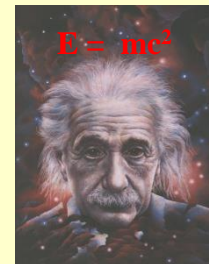
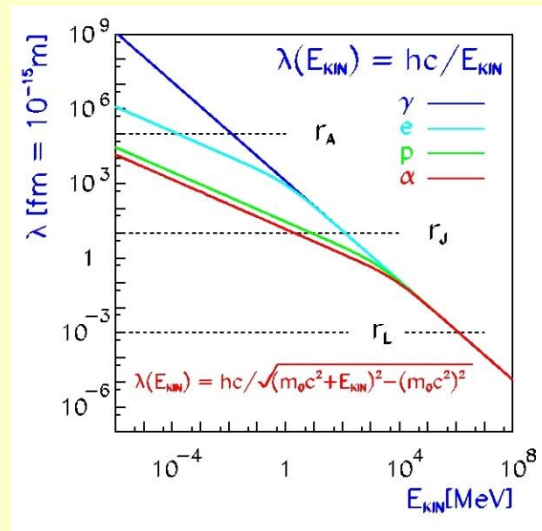
LHC – srážka protonů s energiemi 7000 GeV

Jádra olova (208 nukleonů) na každý $2700 \text{ GeV} \rightarrow 1\,123\,200 \text{ GeV} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ J}$

3) Dosažení co nejvyšších hustot a teplot

$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Celkové energie už přímo makroskopické – pád $0,02 \text{ g}$ z výšky $1 \text{ m} \rightarrow$ srážka dvou menších much nebo větších komárů



Hmotnost 1 g se stejnou rychlostí $\rightarrow 5 \cdot 10^{17} \text{ J}$ (10 000 hirošimských bomb)

Třetí perioda experimentování → vylepšení LHC

Provoz s maximální energií v těžišti – 14 TeV ↔
↔ je třeba „vycvičit“ magnety

Zvýšení intenzity svazku ↔ je třeba vyměnit
Linac2 za Linac4,
zlepšení fokusace a práce se svazkem,
Rekonstrukce experimentů

Původně 5 milionů higgsů ročně po vylepšení 15 milionů



Část Linac2

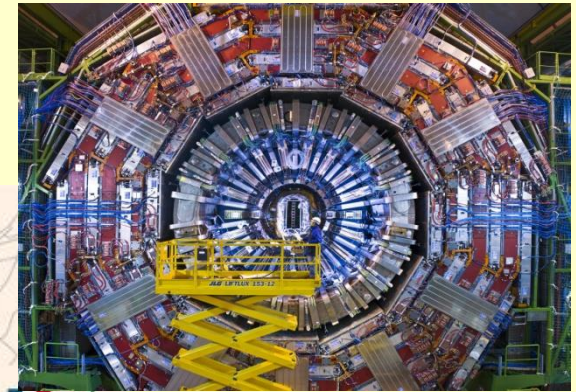


Část Linac4

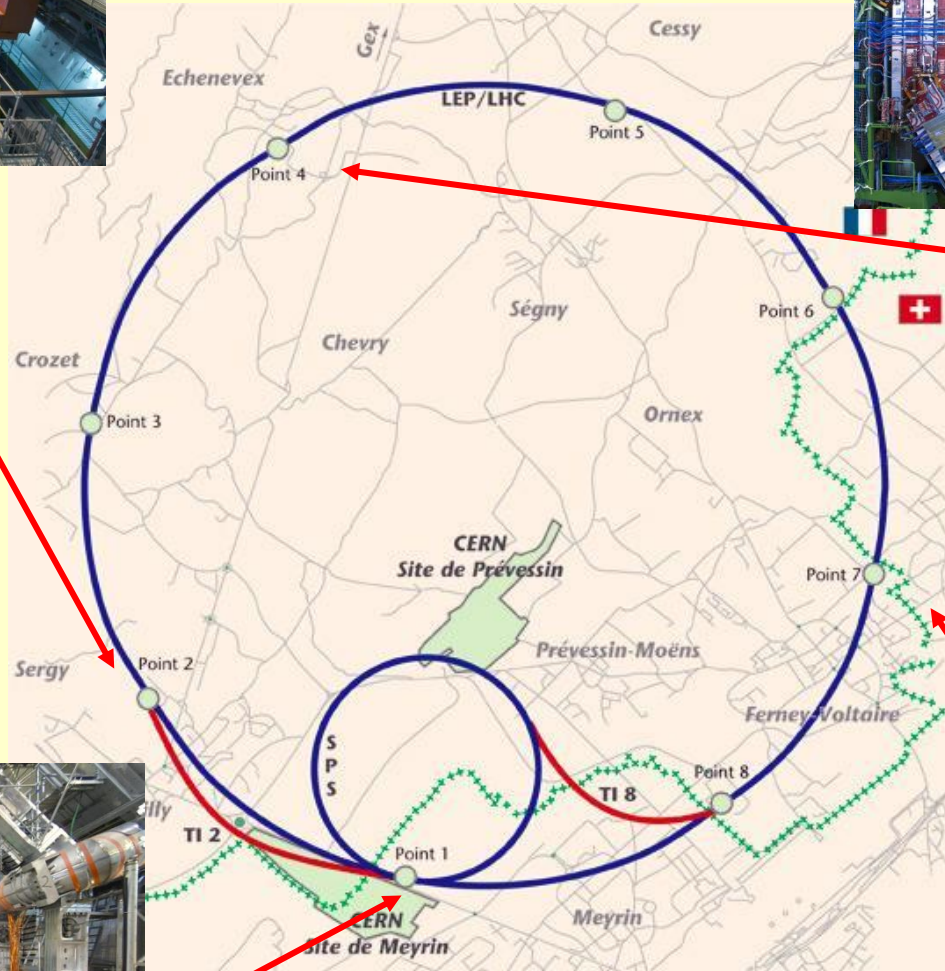




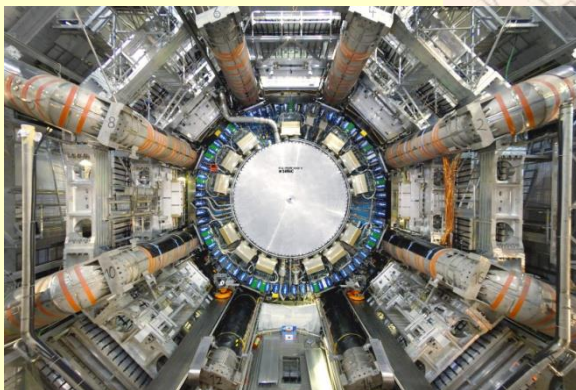
ALICE



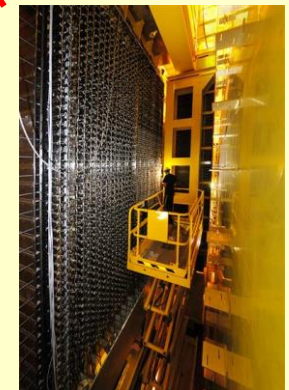
CMS



ATLAS



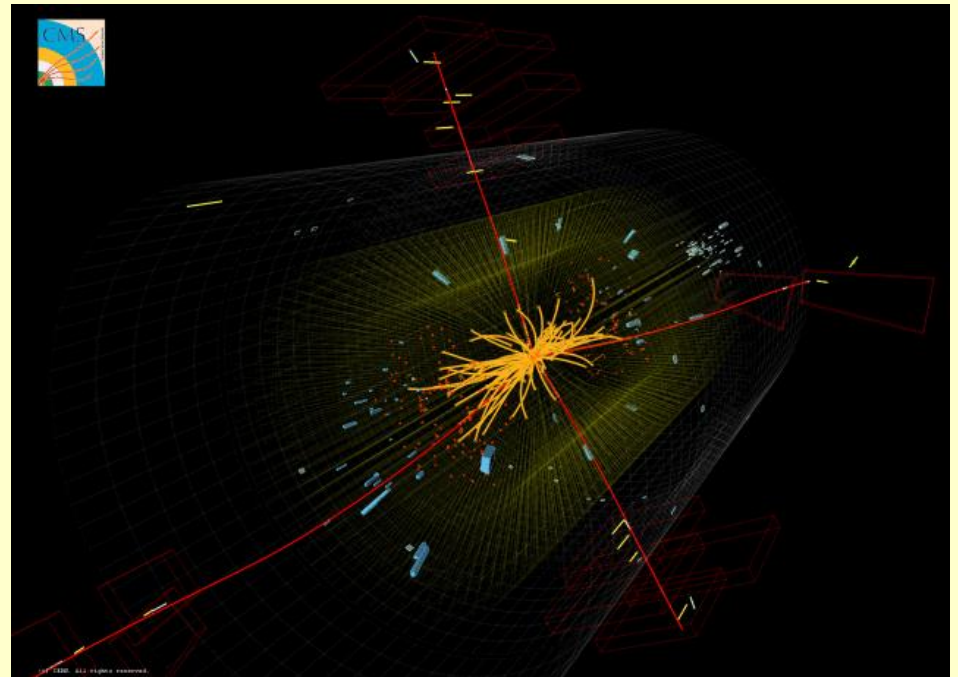
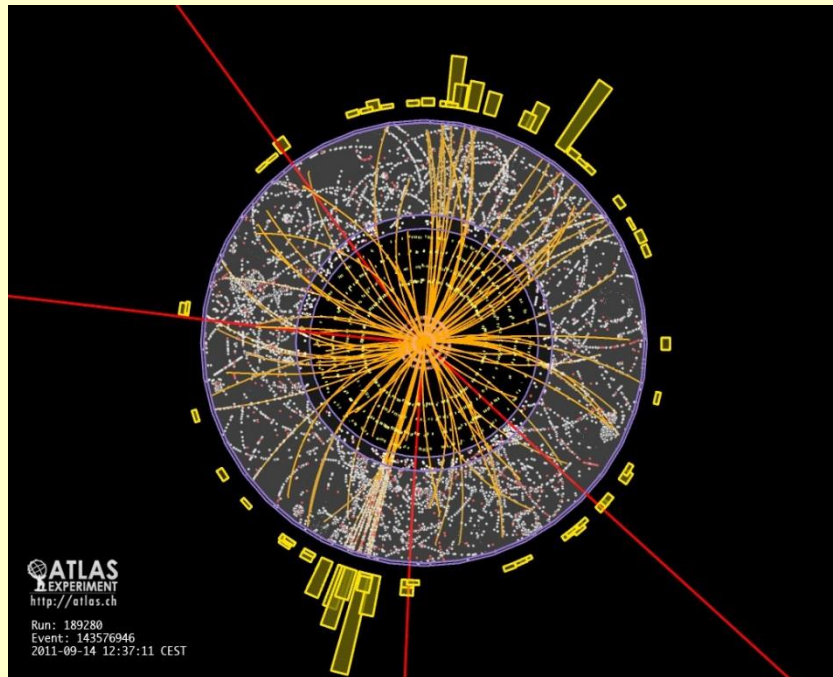
LHCb



Jak identifikovat částici detekcí produktů rozpadu?

$$\left(\sum_{i=1}^n E_i \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \vec{p}_i \right)^2 c^2 = (mc^2)^2$$

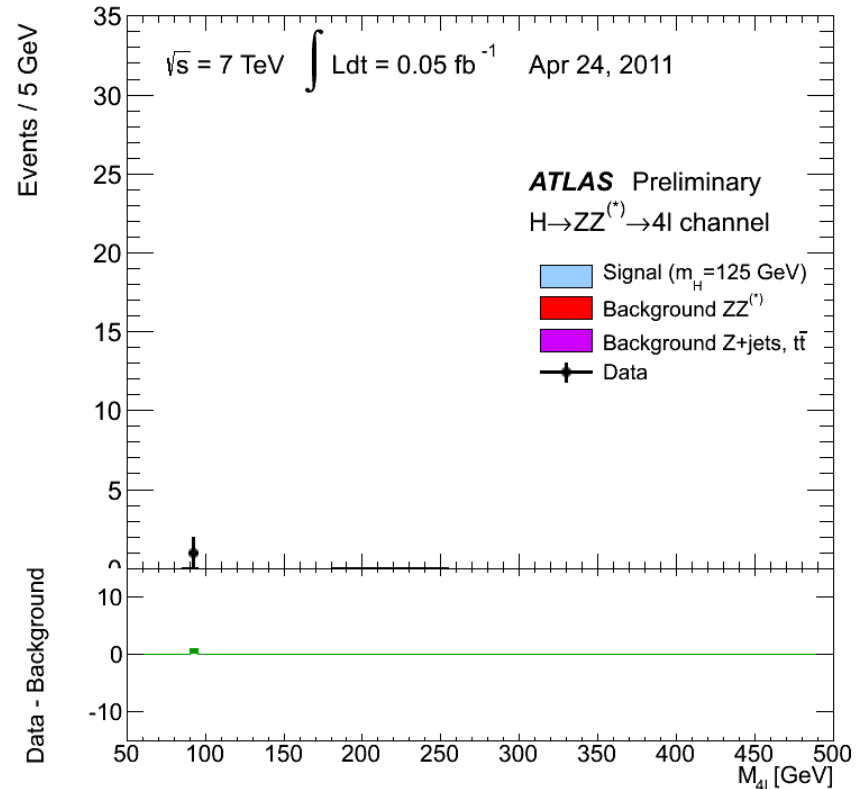
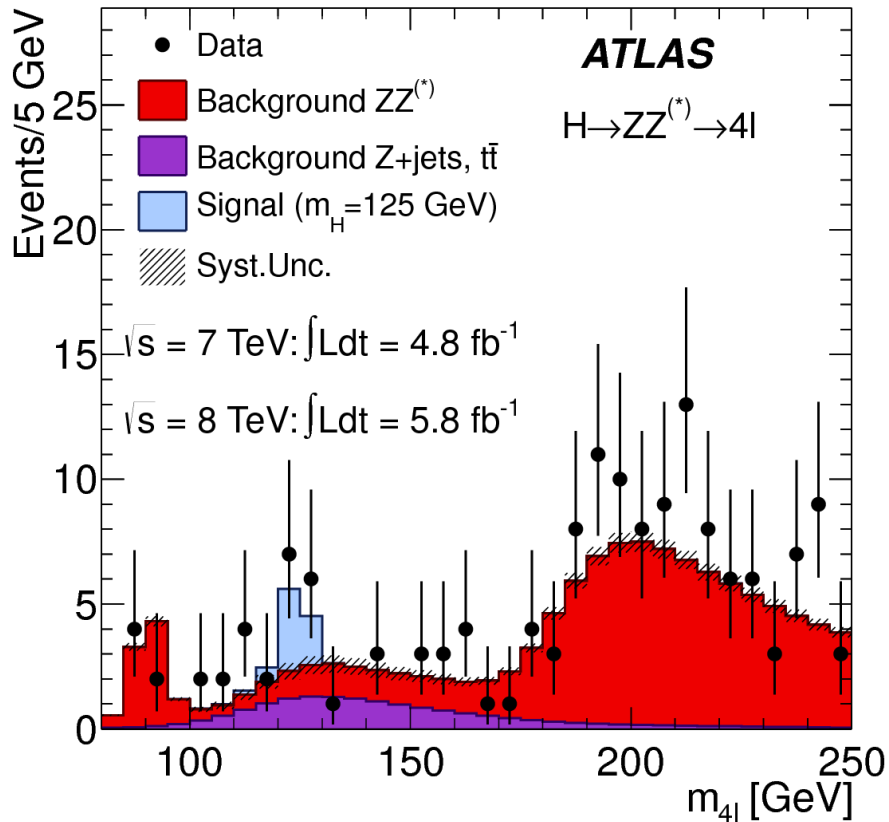
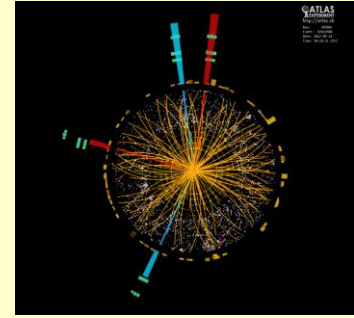
Určit hybnosti a energie produktů rozpadu a z nich spočítat klidovou hmotnost původní částice



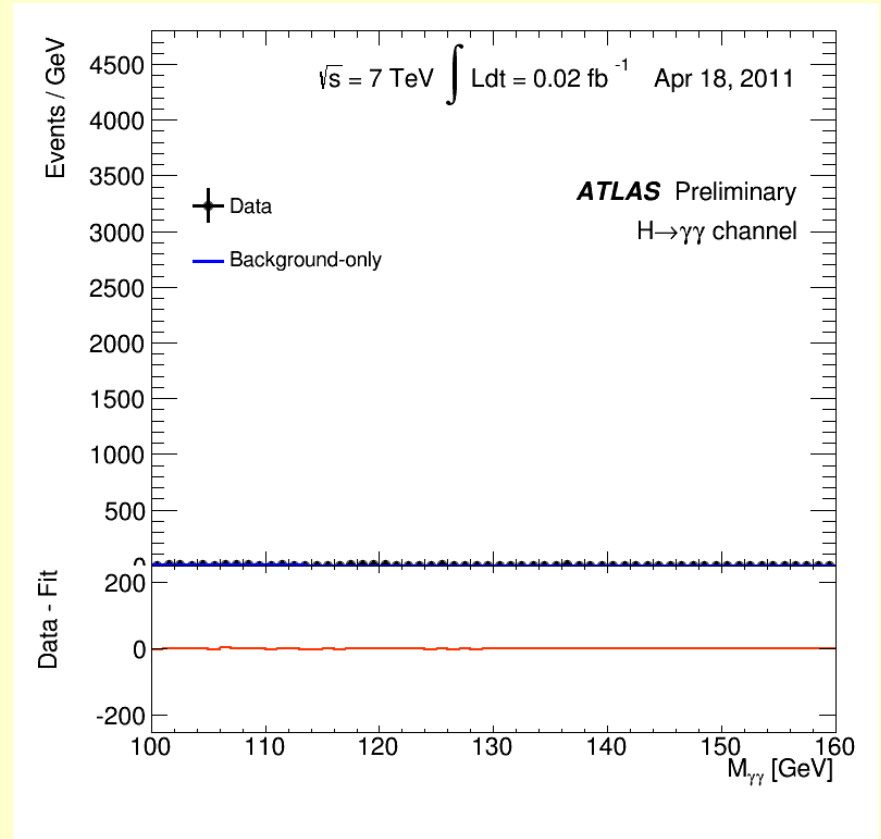
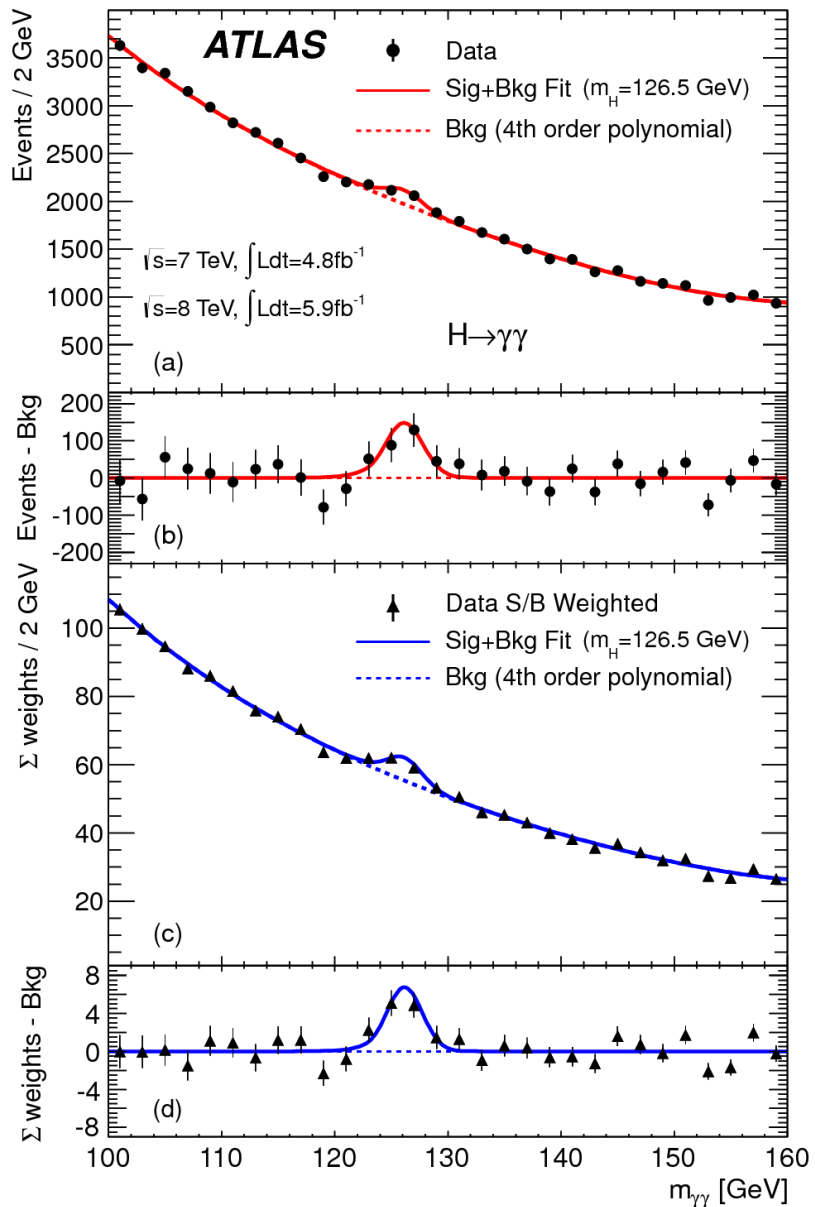
Zlatý odpor – přes dva Z

Velmi čistý, téměř bez pozadí

ATLAS – výsledky:



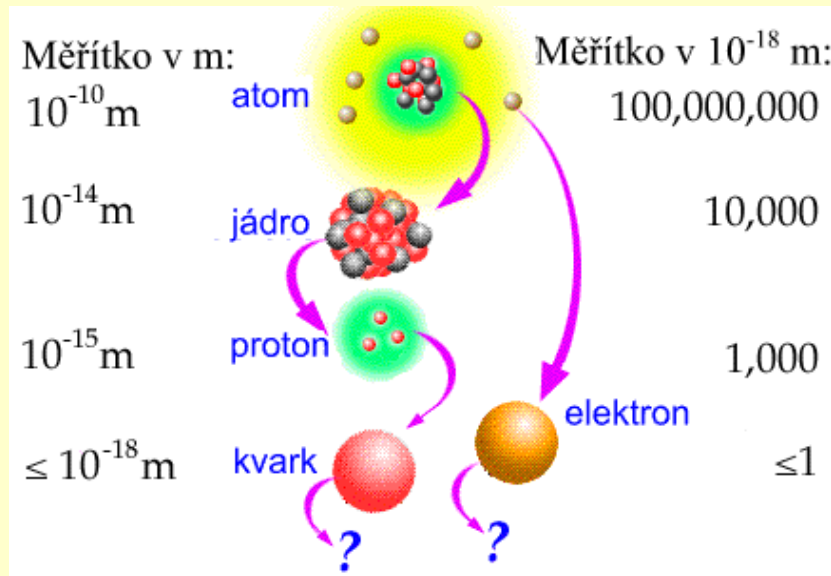
Rozpad na dvě gama



Foton a Z a W bosony mají spin 1. Pak spin mateřské částic nemůže být 1

Složení hmoty

Hmota je složena z částic - mezi nimi působí interakce



Atomová fyzika, fyzikální chemie

Jaderná fyzika

Fyzika elementárních částic

Superstrunové teorie? (rozměr 10^{-35} m)?

Hustota vody 10^3 kg/m³ $\xleftarrow{R_{\text{ATOM}}/R_{\text{JÁDRO}} \sim 10^5 \rightarrow V_{\text{ATOM}}/V_{\text{JÁDRO}} \sim 10^{15}}$ Hustota jádra $\sim 10^{18}$ kg/m³

Důležité nástroje pro popis mikrosvěta:

- 1) **Speciální teorie relativity** - rychlosti blízké rychlosti světla, kinetická energie srovnatelná s klidovou
- 2) **Kvantová fyzika** - velmi malé hodnoty veličin \rightarrow kvantový a pravděpodobnostní charakter, Heisenbergův princip neurčitosti

Standardní model

Hmota je tvořena částicemi (fermiony $s=1/2$), mezi kterými působí interakce, které jsou zprostředkovány výměnou částic (bosony $s=\text{celé číslo}$)

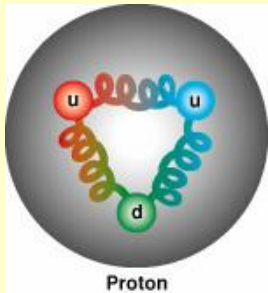
Tři druhy interakcí:

- 1) Silná - kvantová chromodynamika (působí pouze na kvarky a z nich složené hadrony – baryony a mezony)
- 2) Elektromagnetická - kvantová elektrodynamika
- 3) Slabá - elektroslabá teorie

barevný náboj

elektrický náboj

baryony – tři kvarky



Částice hmoty

Fermiony (spin 1/2)

Kvarky Leptony

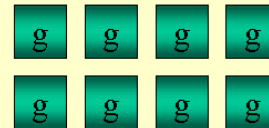
První rodina	d	u	e^-	ν_e
Druhá rodina	s	c	μ^-	ν_μ
Třetí rodina	b	t	τ^-	ν_τ

+ antičástice

Částice interakcí

Bozony (celočíslný spin)

Silná interakce:



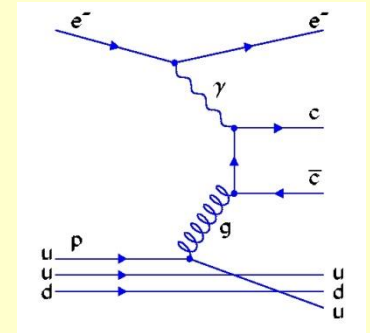
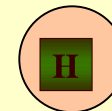
Elektromagnetická interakce:



Slabá interakce:



Higgsovo pole:



výměnný charakter interakcí

Tady je Higgs

Je spojený s generací části hmotnosti

tvorí běžnou hmotu za normálních podmínek

Gravitace stojí mimo standardní model – je velmi slabá a v mikrosvětě se neprojevuje

Objev a velmi přesné měření vlastností higgse

(Dominantně ATLAS a CMS)

Výsledkem je stále zpřesňování hmotnosti, doby života a kanálů rozpadu

Snaha co nejpřesněji určit míchání této částice s jinými těžkými částicemi standardního modelu

Různé kanály rozpadu higgse:

$H \rightarrow bb$ 58,1%

$H \rightarrow WW^*$ 21,5%

$H \rightarrow \text{gluon gluon}$ 8,25%

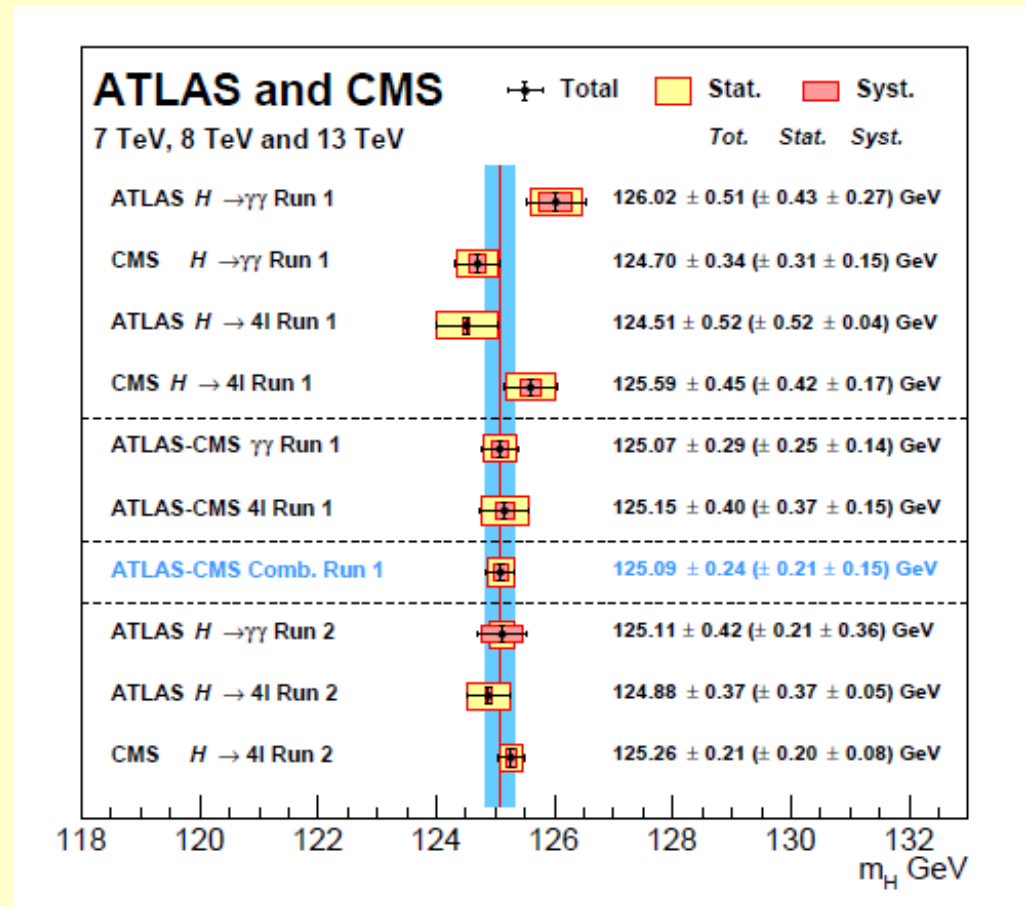
$H \rightarrow \text{tau tau}$ 6,25%

$H \rightarrow ZZ^*$ 2,64%

$H \rightarrow cc$ 2,89%

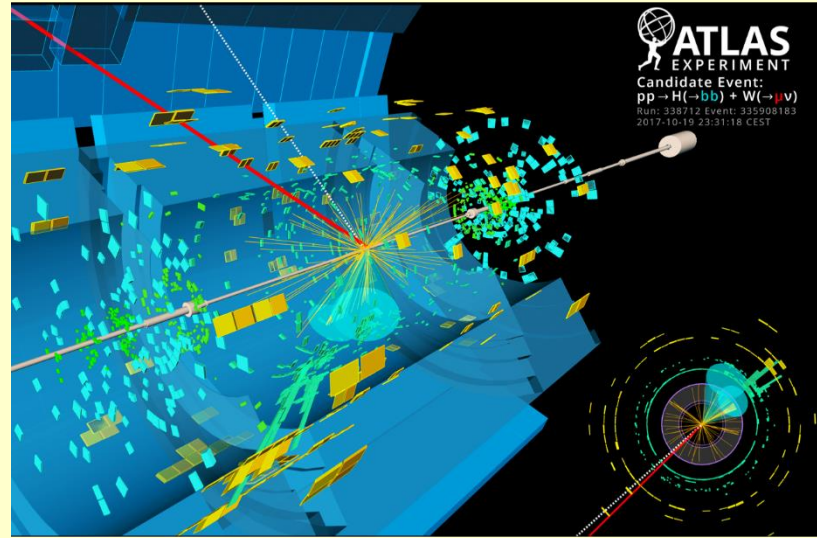
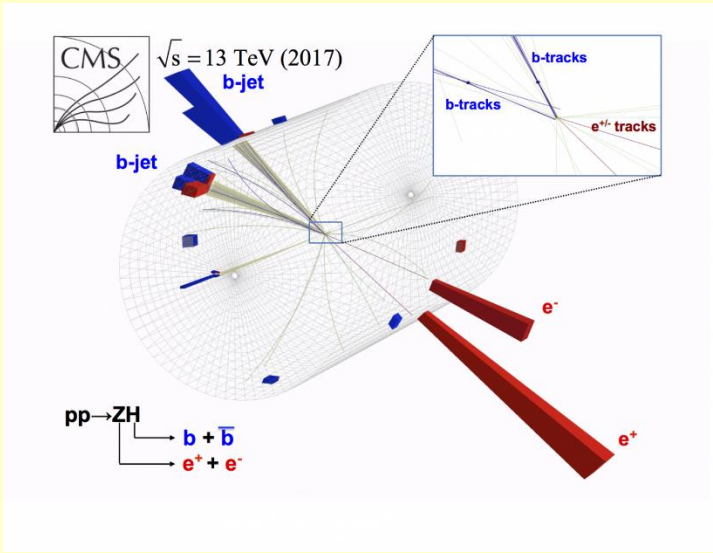
$H \rightarrow \text{gamma gamma}$ 0,23%

**Ověřování předpovědi
Standardního modelu**



Rozpad higgse na b a anti-b

Konečně pozorován nejčastější rozpad higgse (60 %) na pár kvark a antikvark b
 srpen 2018 - velmi náročná identifikace na jiných zdrojů b kvarků
 Předpověď pravděpodobnosti v soulase s teorií standardního modelu

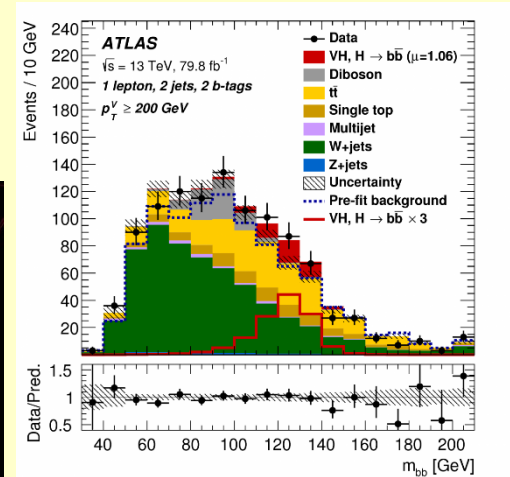
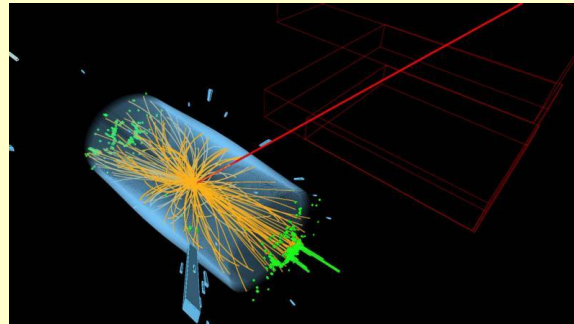


Příklad kandidátů na rozpad higgse na dvojici kvarku a antikvarku b

Rozpad higgse na pár tau leptonu a antileptonu

První pozorování v březnu 2017

Opět pozorování na velmi velkém pozadí

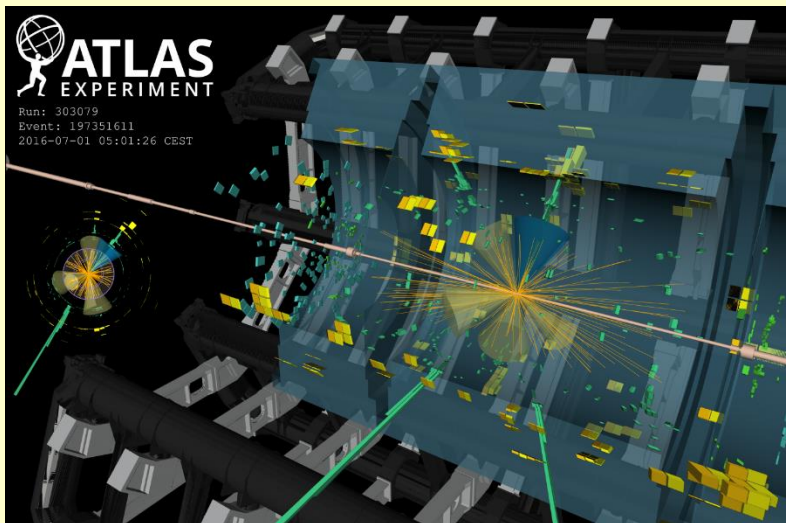
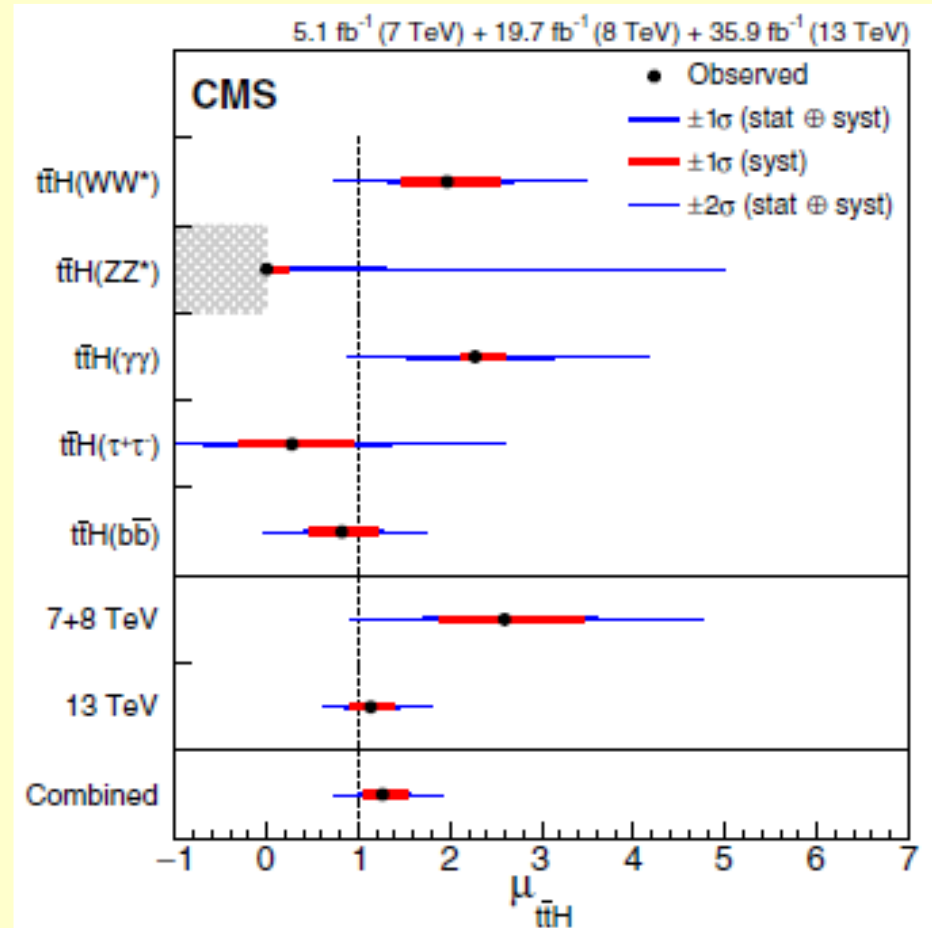
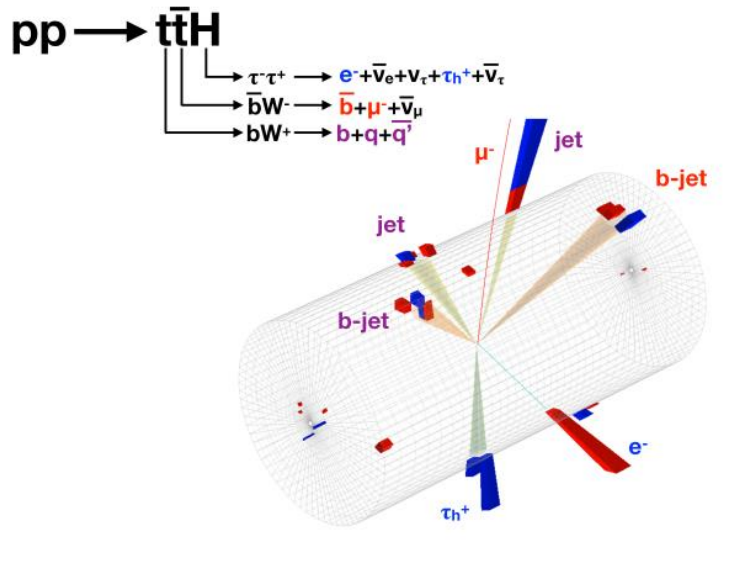


Silná vazba higgse s top kvarkem

Společná produkce higgse a páru t a anti-t

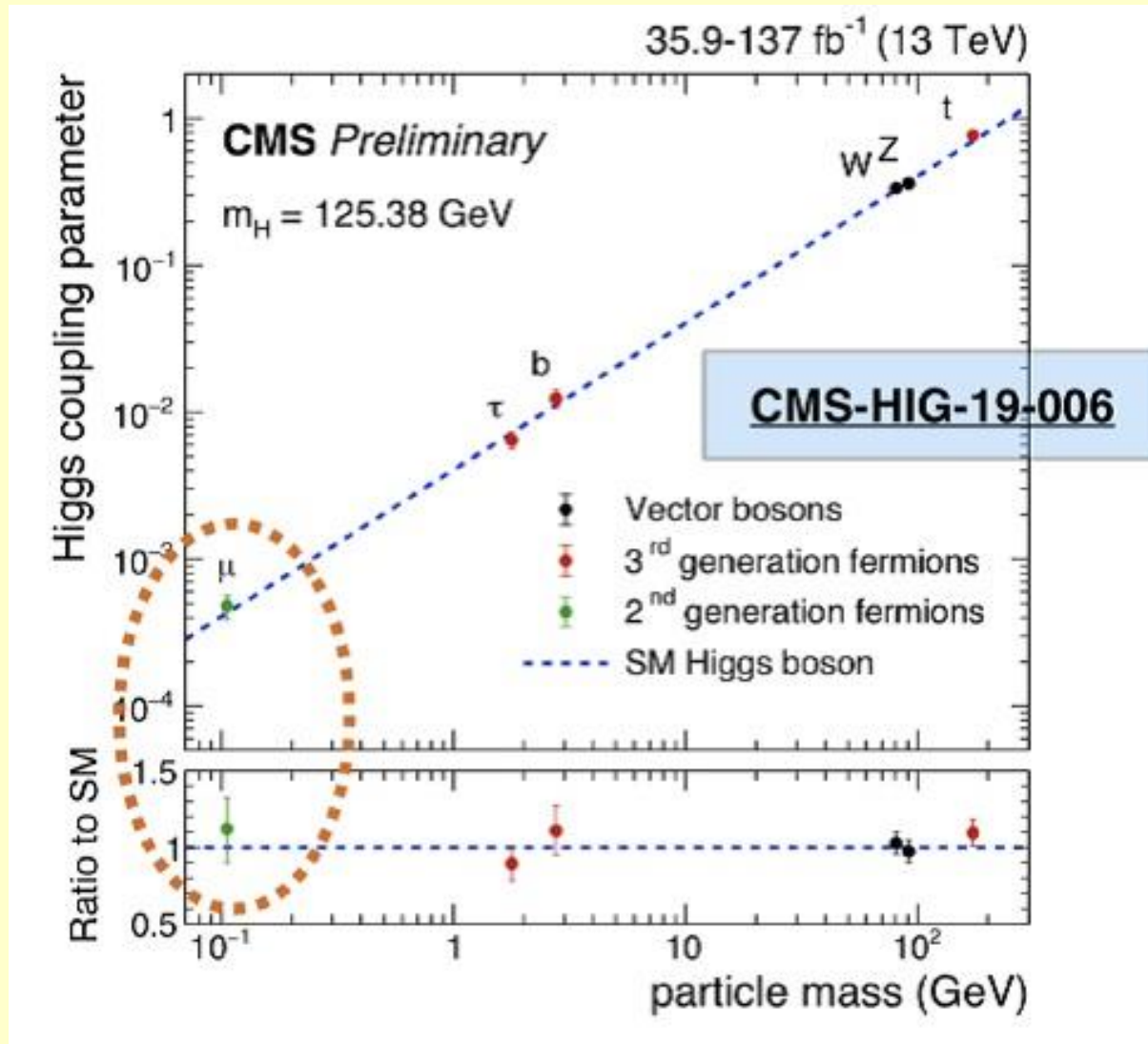
Publikováno 4. července 2018

Velmi přesné potvrzení Standardního modelu



Závislost velikostí míchání higgse s částicí na její hmotnosti

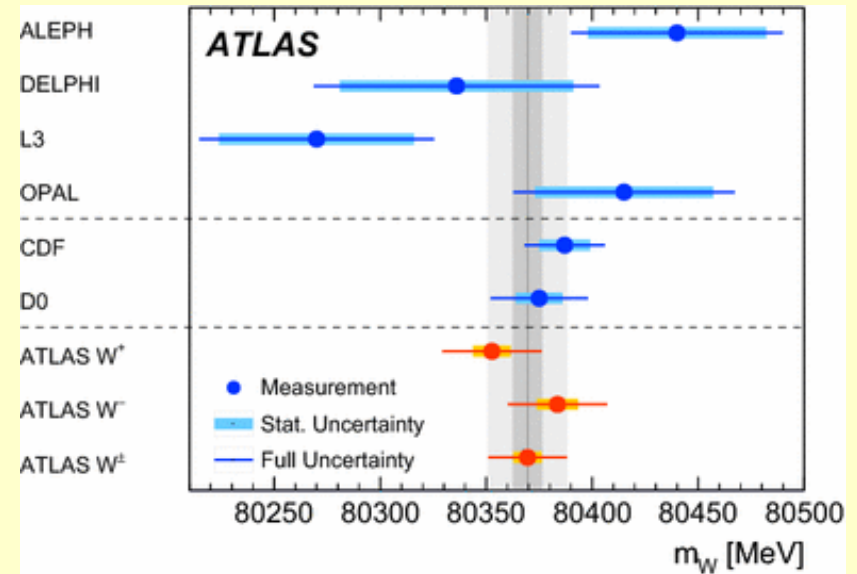
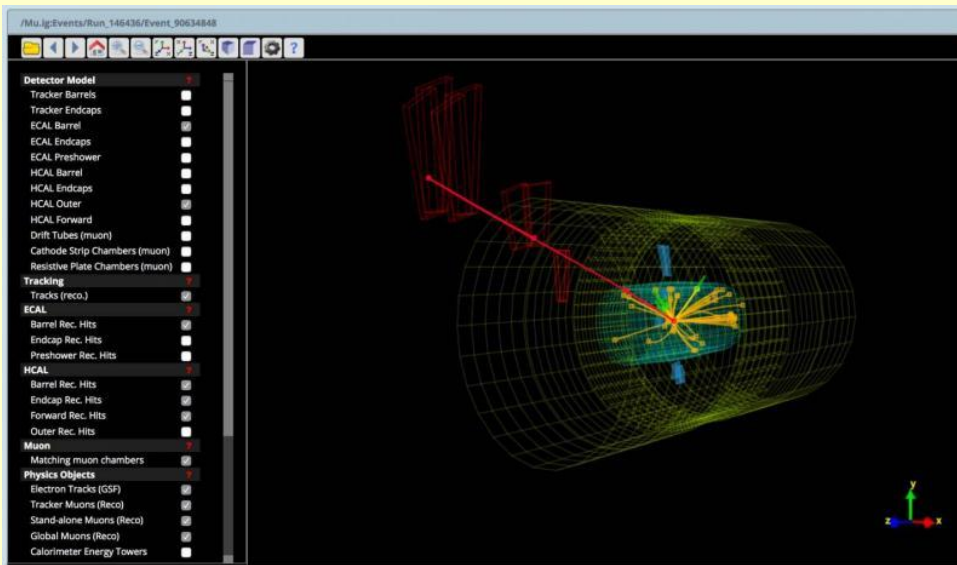
!!! Je to přesně ten správný higgs ze standardního modelu !!!



Velice pečlivé zkoumání všech dalších procesů ve Standardním modelu dosažitelných pomocí LHC

- 1) Produkce těžkých hadronů (obsahujících těžké kvarky b a c)
- 2) Produkce a rozpad nejtěžšího t kvarku (LHC stroj na tyto kvarky)
- 3) Intenzivní produkce Z a W bosonů
- 4) Velmi vzácné rozpady některých částic

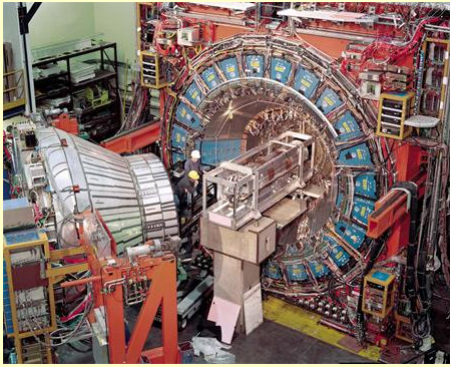
Přesné měření hmotnosti W bosonu



Data z LHC jsou nyní volně k dispozici na veřejných stránkách <http://opendata.cern.ch/>

Nová fyzika? – analýza dat z CDF (Tevatron) – nejpřesnější hmotnost W

Publikováno na jaře 2022



CDF experiment

Všechna data: 1985 - 2011

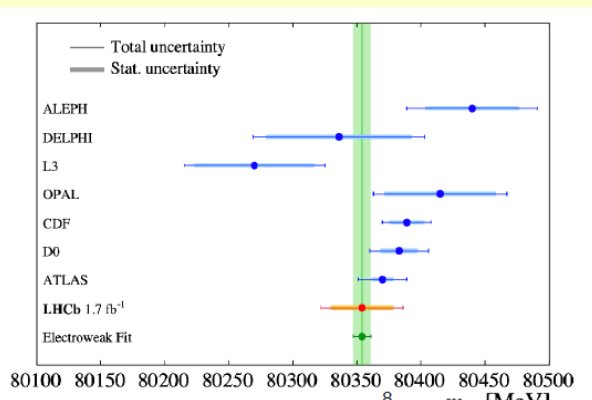
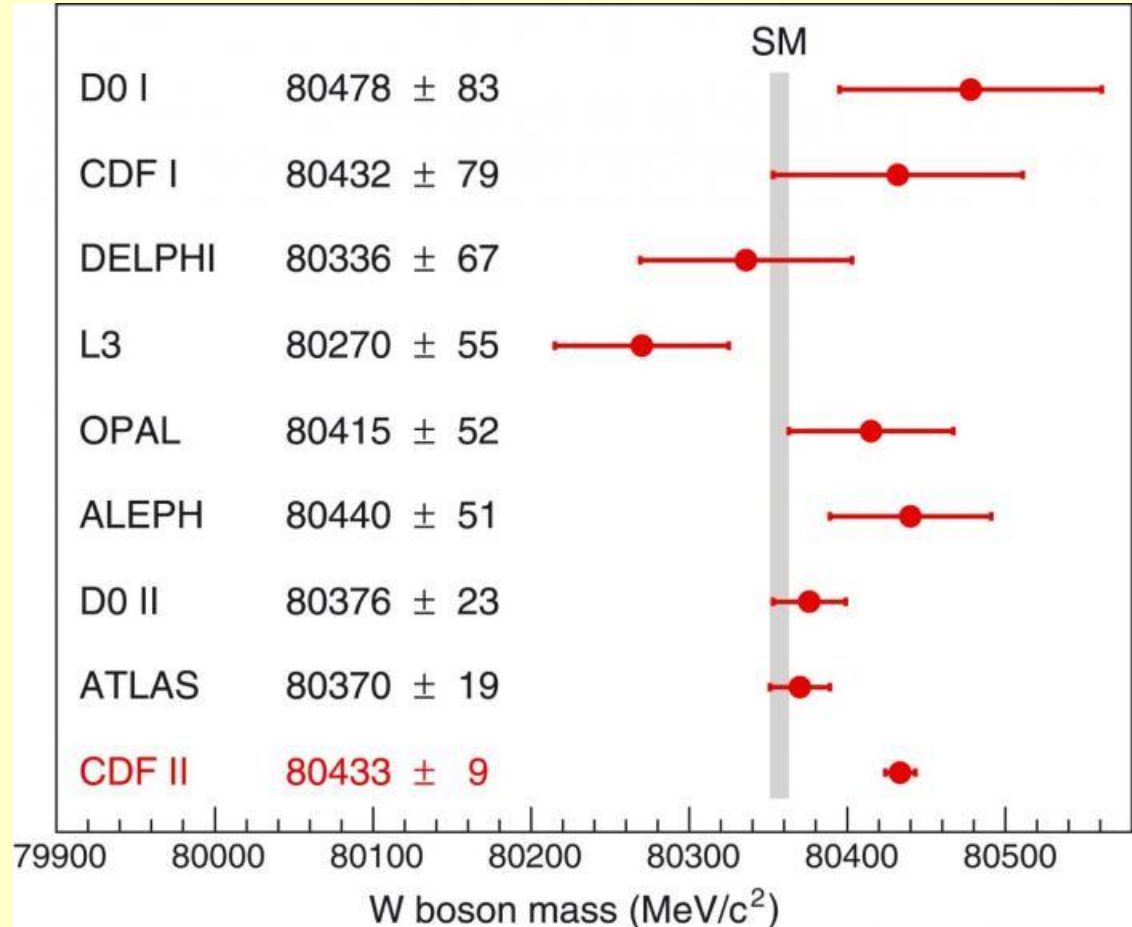
Rozdíl od

Standardního modelu

Liší se však i od

výsledků D0 a ATLAS

Je nutné objasnit

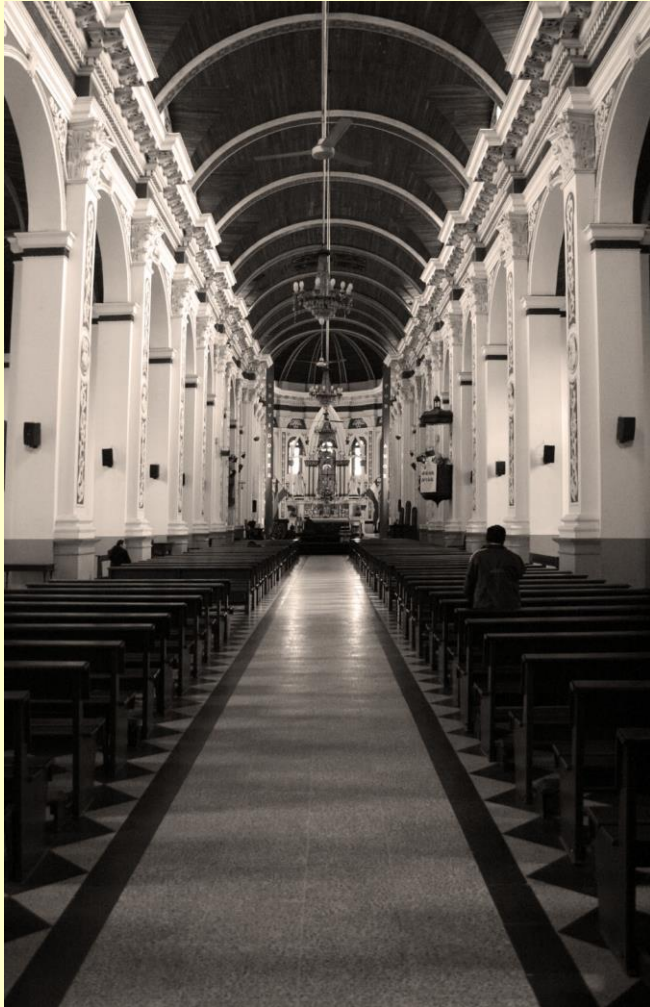


Výsledek LHCb (Moriond 2022):

$$m_W = 80354 \pm 23_{\text{stat}} \pm 10_{\text{exp}} \pm 17_{\text{theory}} \pm 9_{\text{PDF}} \text{ MeV}$$

Co a k čemu jsou symetrie?

Při změně jedné vlastnosti (fyzikální veličiny) se nezmění jiné vlastnosti (třeba fyzikální popis)



Řada symetrií ve stavbě katedrály po posunutí je stejný tvar

Vzhled dvojhlavé karty se po otočení o 180° nezmění

Symetrie ve fyzice souvisí se zákony zachování

Některé symetrie se zachovávají vždy (aspoň zatím)

Zákon zachování hybnosti ↔ fyzikální popis světa se nemění, když se posuneme o kus dále

Zákon zachování momentu hybnosti ↔ fyzikální popis světa se nemění, když je pootočíme

Zákon zachování energie ↔ fyzikální popis světa se nemění, pokud uplyne nějaký čas



Energie a hybnost se
nám neztrácí
Perpetum mobile
nefunguje



Bez narušení některých by byl svět hrozně nudný

Zrcadlení a zobecněné zrcadlení $P^2\psi=\psi$, $C^2\psi=\psi$, $T^2\psi=\psi$

Fyzikální popis světa se nemění při jeho zobrazení v zrcadle ↔ **zákon zachování parity P**

Fyzikální popis světa se nemění při záměně částic za antičástice ↔ **zákon zachování C-symetrie**

Fyzikální popis světa se nemění při otočení časové šipky ↔ **zákon zachování T-symetrie**

Proč je důležité zkoumání narušení základních symetrií?

Odpověď na otázky: 1) Proč vzniklo ve vesmíru více hmoty než antihmoty?
2) Jak sdělit mimozemské civilizaci, která ruka je levá a že jsem s hmoty a ne antihmoty?



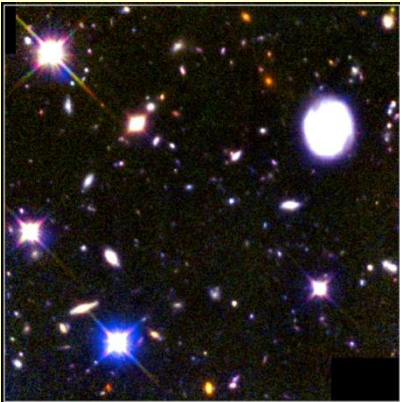
P – symetrie → šup za zrcadlo

C – symetrie → zaměnit částice za antičástice

T – symetrie → obrátit tok času

Přebytek hmoty nad antihmotou = baryonová asymetrie = poměr mezi počtem baryonů a fotonů reliktového záření (předpoklad: reliktní fotony vznikly při anihilaci) $n_b/n_\gamma = 10^{-9}$.

Pochopení zmíněných symetrií a jejich narušení klíčové pro pochopení rozdílu mezi hmotou a antihmotou (Tři podmínky A. Sacharova)



**Nutné pro pochopení vzniku našeho světa
(hvězd, planet i lidí)**

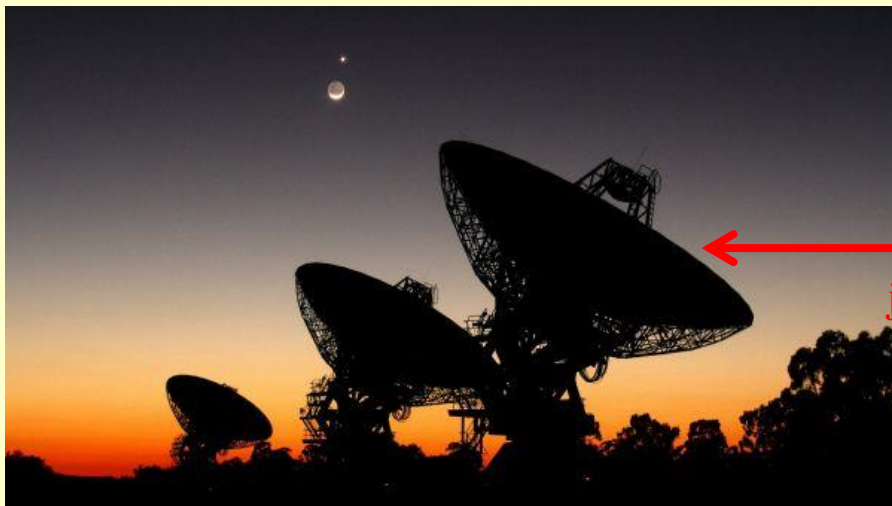


Komunikujeme s mimozemšťanem pouze radiově

Jak vysvětlit, co je levá a pravá ruka?



Na blízko
není problém



Na dálku
je problém

Zrcadlová symetrie a její narušení

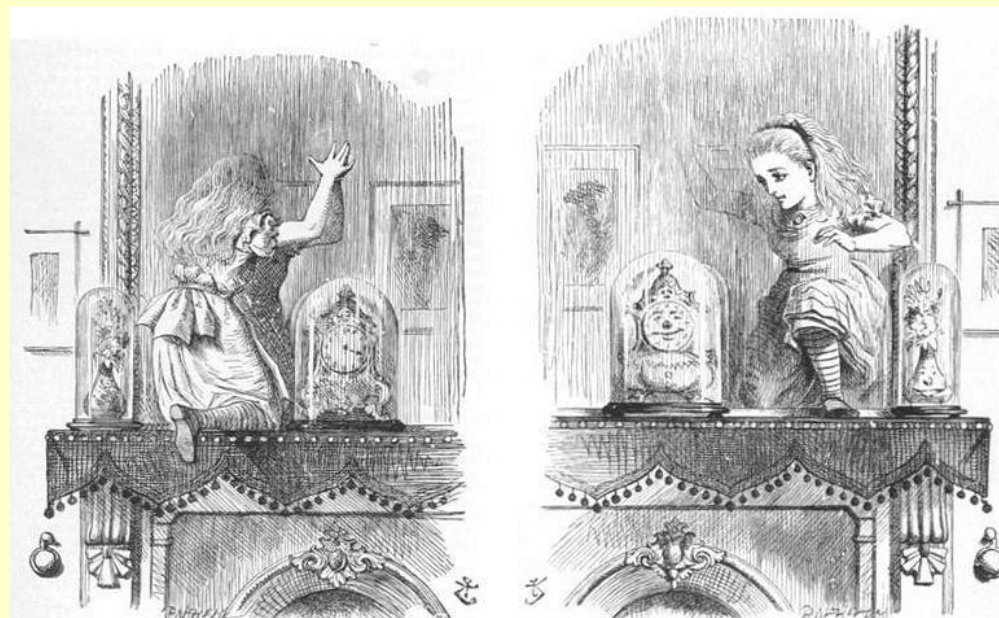
Možnost jak sdělit mimozemšťanům jaká je naše levá a pravá strana dává

Nezachování parity – narušení zrcadlové symetrie

Fyzikální procesy probíhají jinak v levotočivé a pravotočivé souřadné soustavě
levá a pravá strana se liší
obraz v zrcadle je jiný než zobrazovaný jev



Pokud vidíme stejné objekty, na které můžeme ukázat – není problém

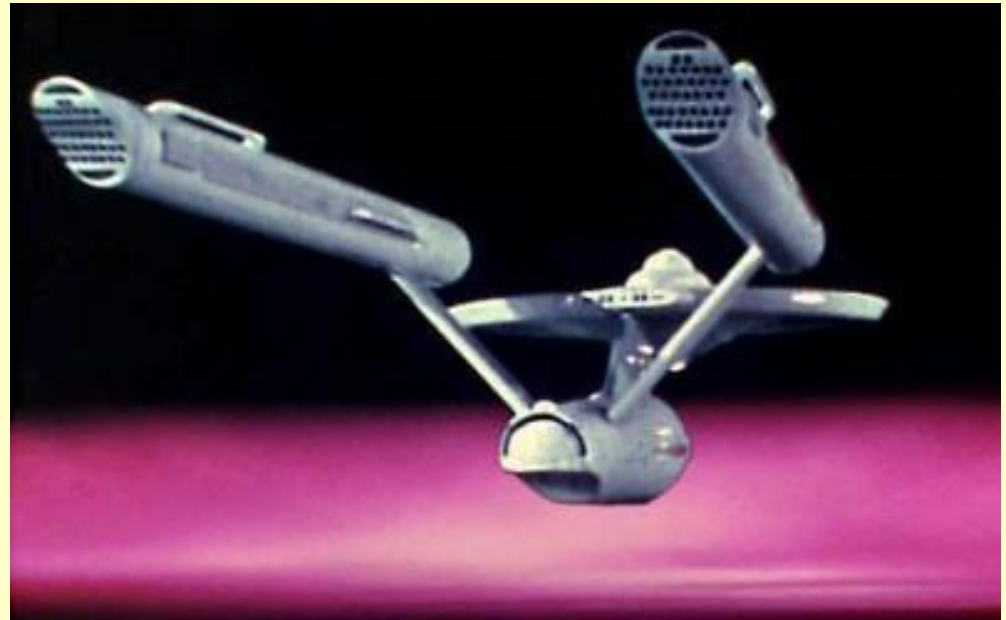


Jinak: šup s Alenkou za zrcadlo – Jaký je tam svět?

Jak definovat levou a pravou stranu pro mimozemšťana?

Lehká neutrální částice, která se pozoruje při rozpadu neutronu je pravotočivá

!!! Pozor !!! Platí jen pokud víme, že je z hmoty !!! Pozor !!!



Symetrie vůči záměně částic za antičástice

Záměna znamének nábojů (záměna částic za antičástice a naopak)

Šup ze světa do antisvěta a naopak

Pokud symetrie platí – fyzika je stejná pro svět i antisvět

V mikrosvětě se narušuje – viz existence pouze pravotočivého antineutrína a levotočivého neutrína

Rozpad antijádra ^{60}Co má opačnou asymetrii v emisi elektronu vůči spinu antijádra



Pokud lze definovat levou a pravou stranu (například se mimozemšťané podívají na stejné galaxie) stačí se zeptat, jestli je neutrální částice vznikající při rozpadu neutrálního baryonu z jader, které je tvoří, pravotočivá.

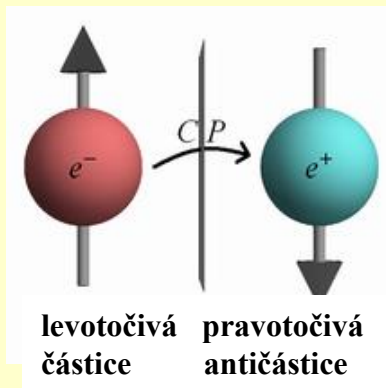
Kombinovaná CP symetrie

!! Pokud nevíme jestli nejsou mimozemšťané z hmoty, tak **jsme zase v háji !!**

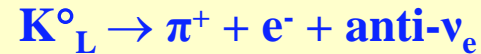
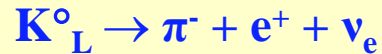
Narušení zrcadlové symetrie se kompenzuje narušením C-symetrie v opačném směru

levotočivé neutrino $\xrightarrow[\text{zrcadlo}]{P}$ pravotočivé neutrino $\xrightarrow[\text{do antisvěta}]{C}$ pravotočivé antineutrino
reálná situace reálná situace

rozpad beta ^{60}Co probíhá **stejně** jako rozpad beta antijádra ^{60}Co



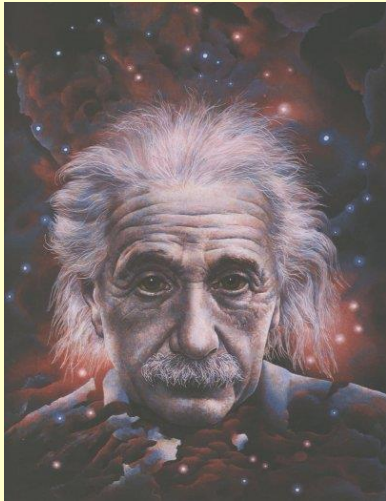
Asymetrie se projevuje také v rozpadech těchto částic, kde se vyskytují elektrony a pozitrony



$$\Delta = \frac{(K_L^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu_e) - (K_L^0 \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}_e)}{(K_L^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu_e) + (K_L^0 \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}_e)} = (0,327 \pm 0,012) \times 10^{-2}$$

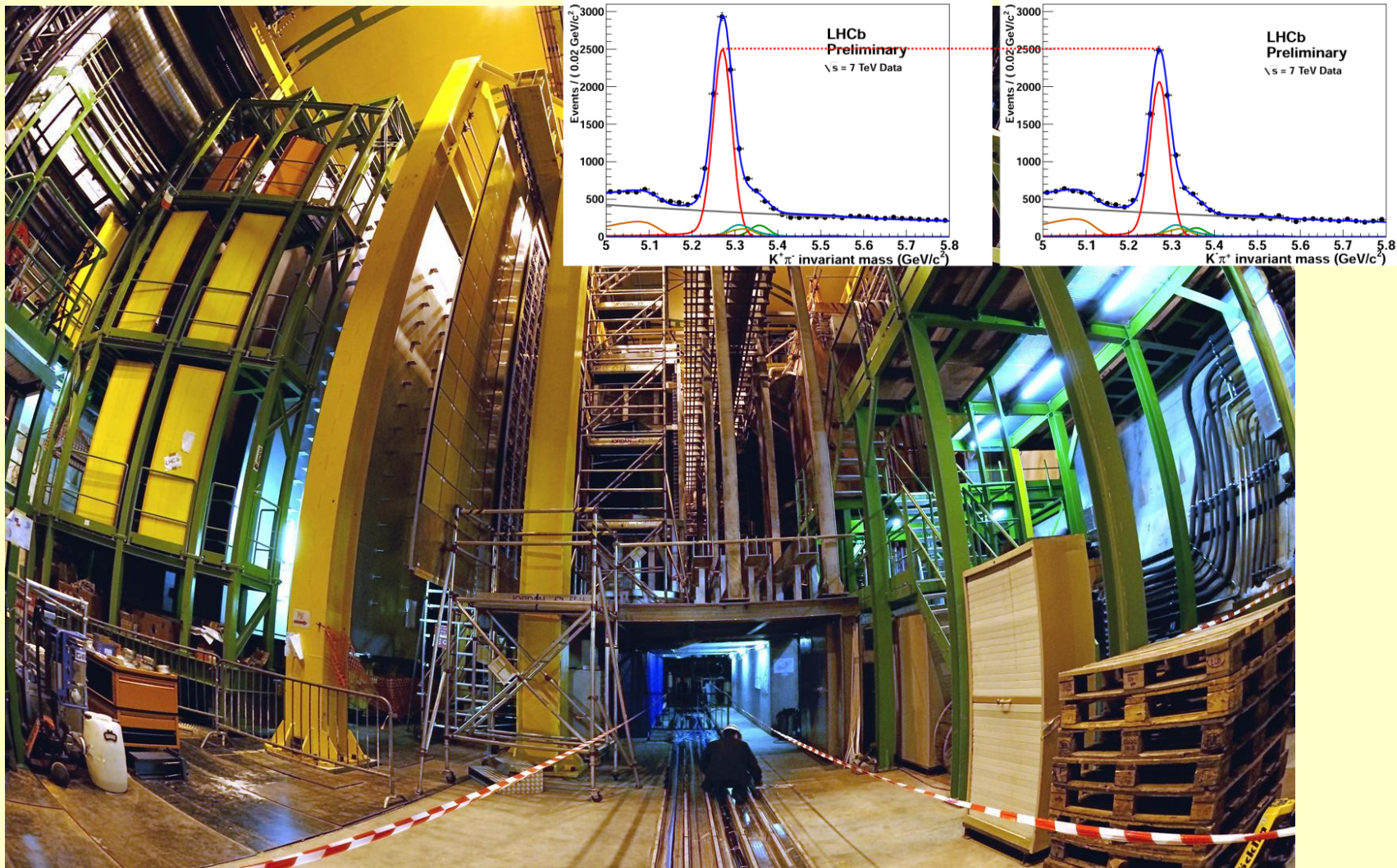
Takže pozitron a antihmotu lze definovat tak, že je to ta nabitá lehká částice, která se v rozpadu K_L^0 produkuje ve větší míře

Pokud platí speciální teorie relativity – platí že skok za zrcadlo, do antivěta a obrácený tok času nezmění fyzikální zákonitosti – CPT teorém



Narušení CP symetrie + CPT teorém → narušení T symetrie

LHCb studuje rozdíly mezi částicemi a antičásticemi



Studium rozdílu mezi hmotou a antihmotou, světem a antisvětem

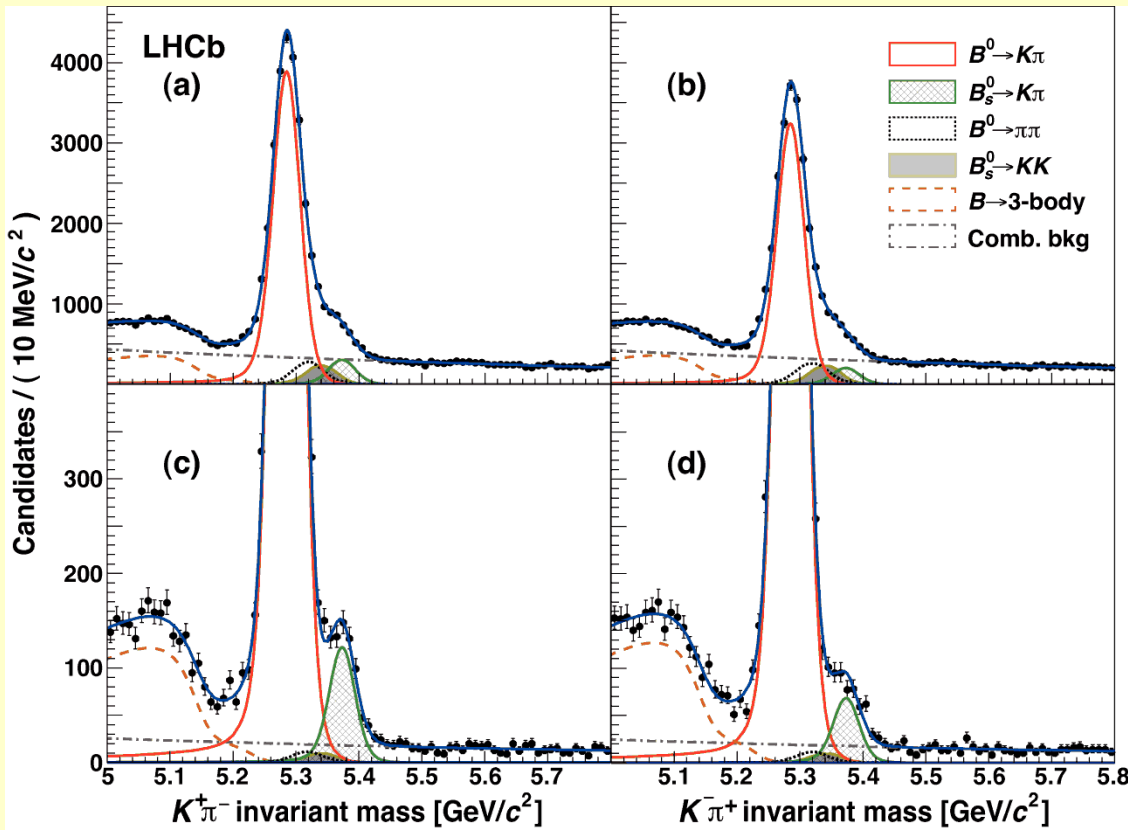
Částice s kvarkem b → mnohem větší efekt narušení

CP narušení pro B⁰ meson

B⁰ = (anti-b a d)

CP narušení potvrzeno v roce 2001

Narušení CP symetrie pozorováno experimentem BABAR (SLAC) a BELLE (KEK)



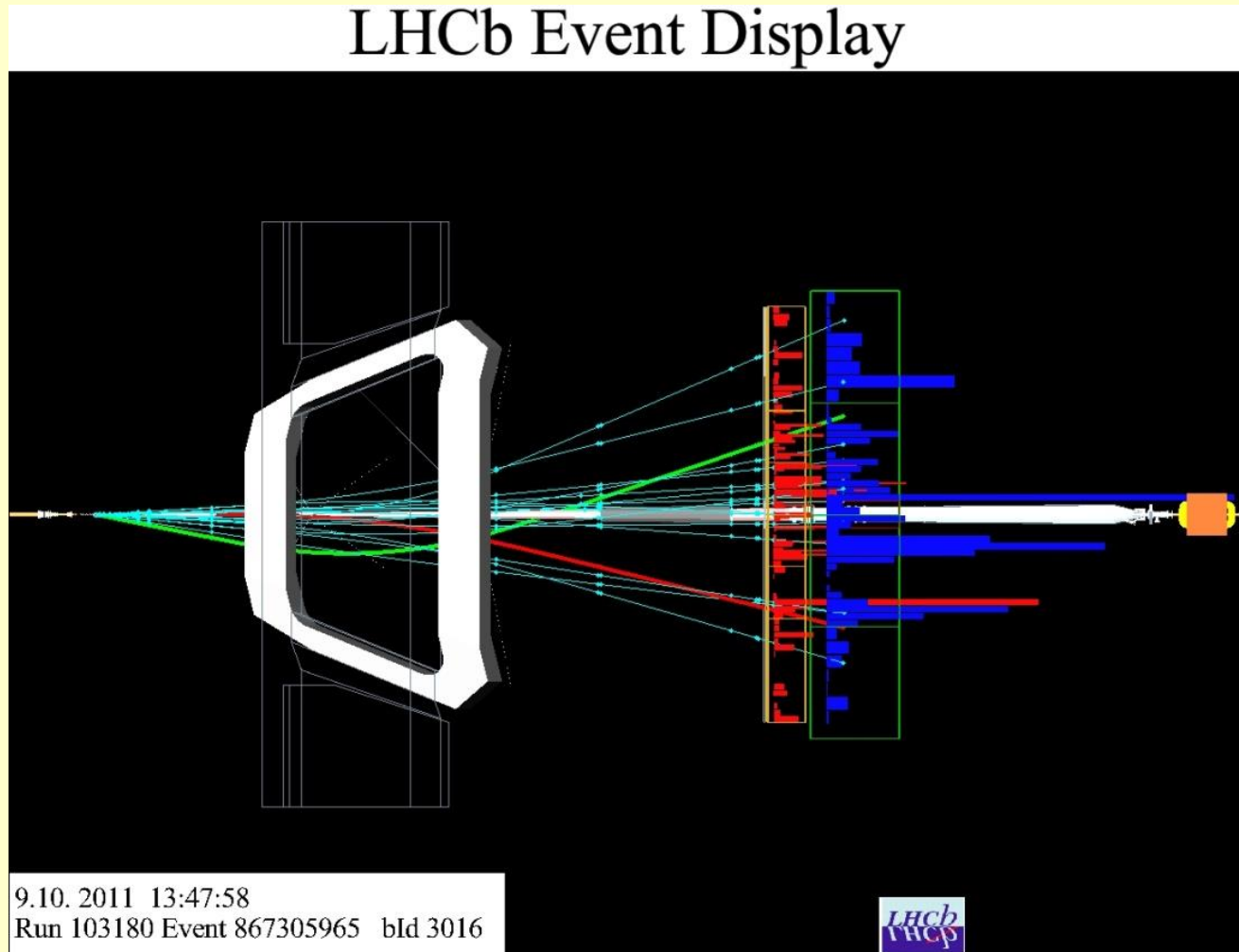
$$\Delta(B^0 \rightarrow K^+\pi^-) = -0,080 \pm 0,007 \pm 0,003$$

$$\Delta(B_s^0 \rightarrow K^+\pi^-) = -0,27 \pm 0,04 \pm 0,01$$

První pozorování CP narušení u B^0_s

(anti-b a s)

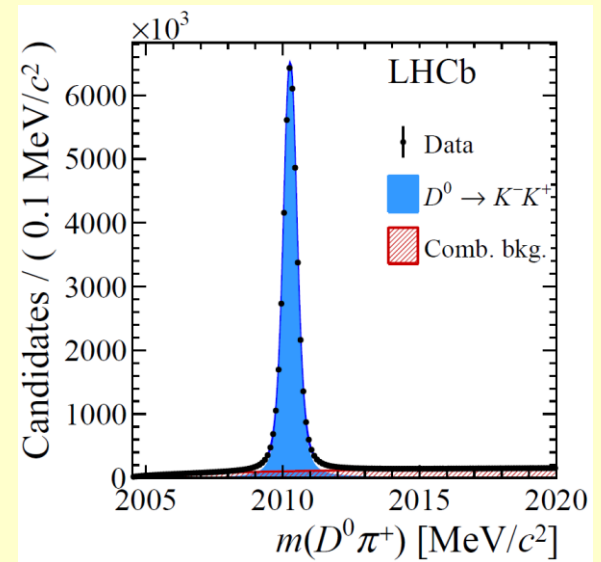
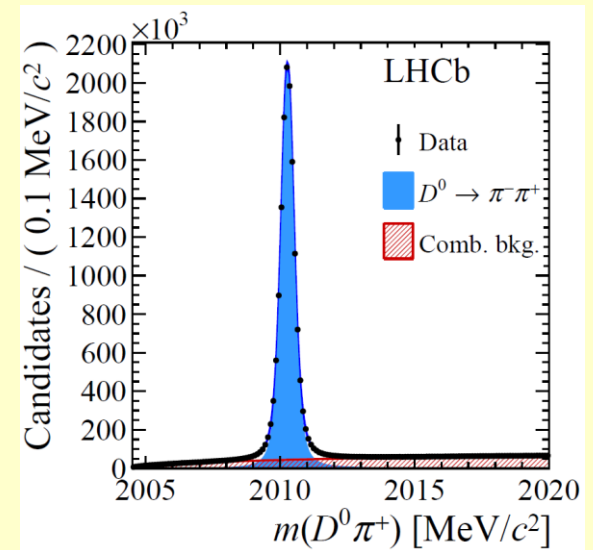
Pozorováno opravdu velké narušení CP symetrie 27 %



První pozorování narušení CP symetrie u D^0 a anti- D^0 mezonů

Složení z c a u kvarků

První pozorování jevu narušení CP symetrie v oblasti c kvarků – další okno k pochopení rozdílu mezi hmotou a antihmotou



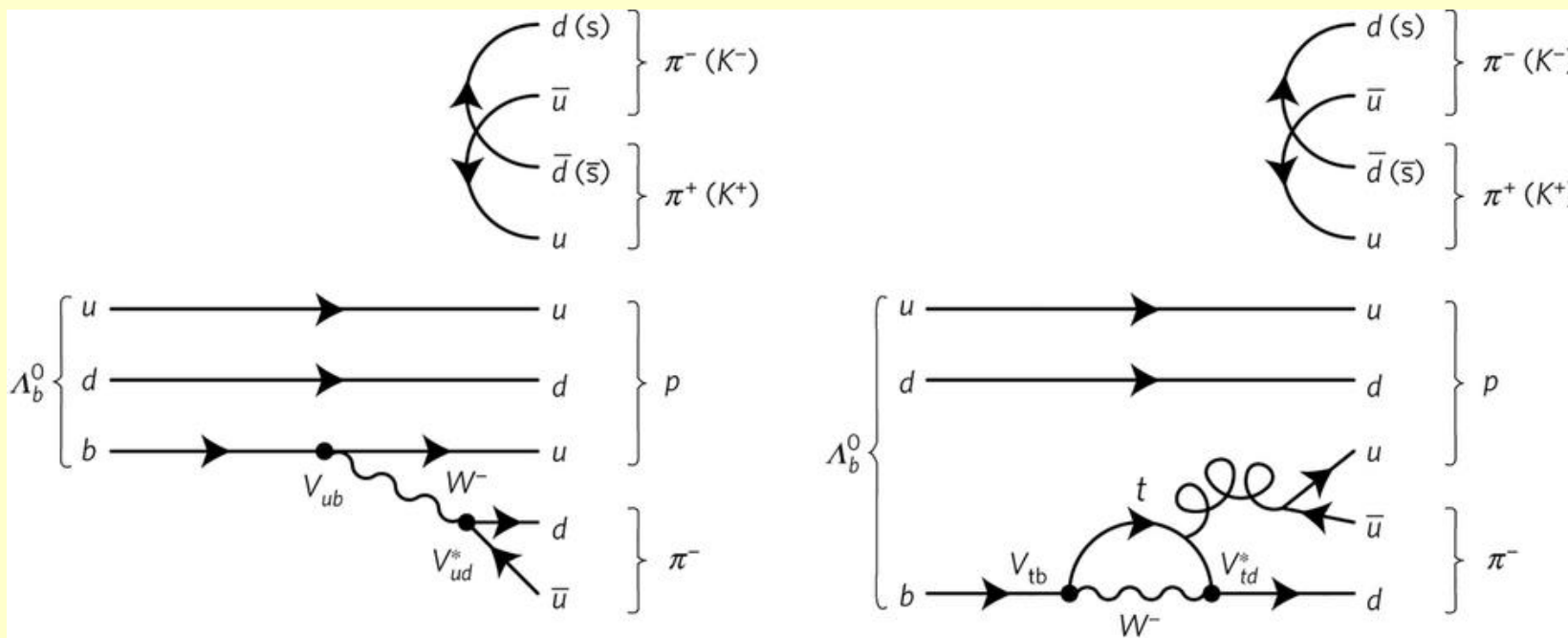
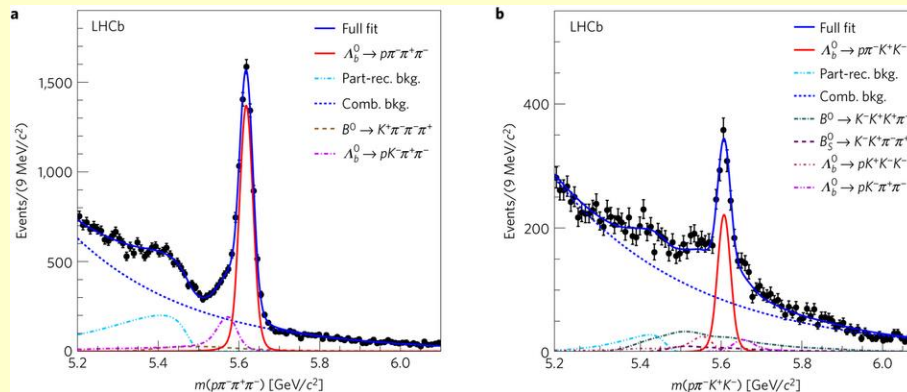
První pozorování narušení CP- symetrie v rozpadu baryonů

$$\Lambda_b^0 \rightarrow p \pi^- \pi^+ \pi^- \quad \Lambda_b^0 \rightarrow p \pi^- K^+ K^-$$

a ekvivalentní rozpad antičástice

Zatím asymetrie na úrovni 3 sigma

Přesahuje Standardní model ?



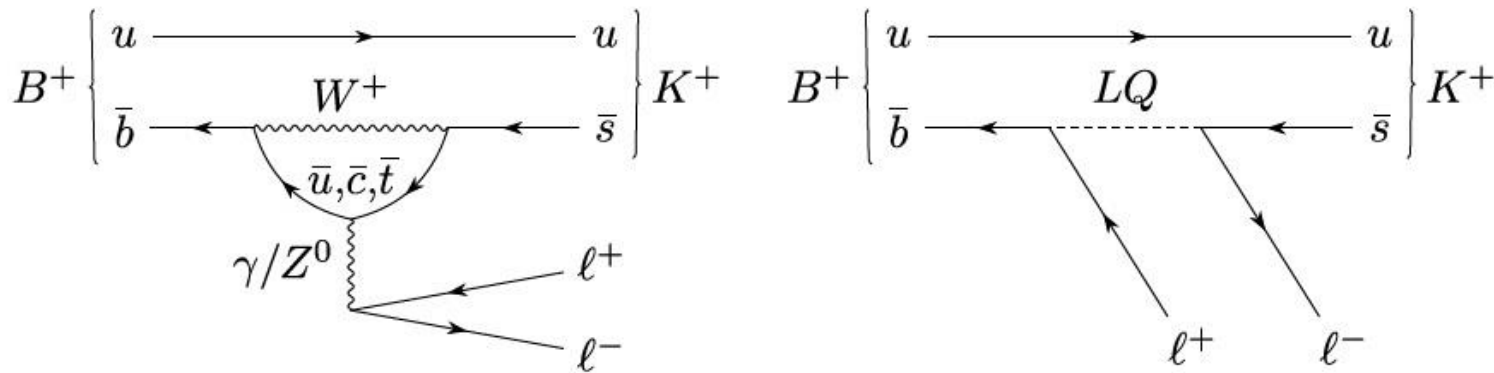
Hledání exotické fyziky na LHC

Studium vzácných rozpadů, které jsou ve Standardním modelu silně potlačeny (musí jít přes virtuální procesy - Feynmanovy grafy - vyššího řádu)

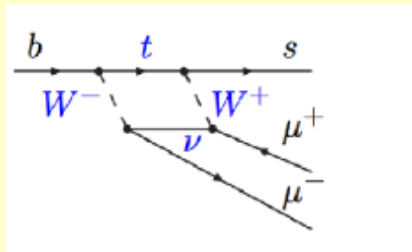
Rozpad B^+ mezonu na K^+ a leptonový pár.

Porovnání pravděpodobnosti rozpadu se vznikem páru elektron a pozitron a se vznikem páru mion a antimion – **test leptonové universality**

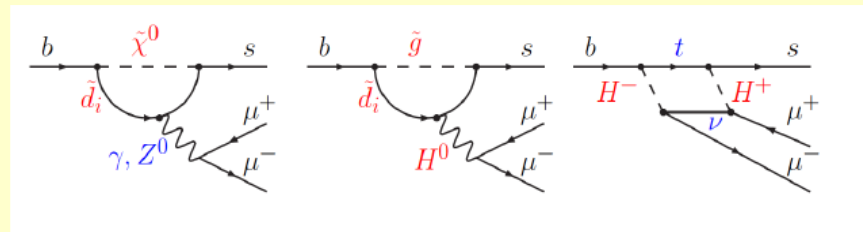
Ve Standardním modelu leptonová universalita platí, narušení způsobeno exotickou fyzikou – například existencí leptokvarků, které mění kvark na lepton



Vlevo – elektroslabý rozpad



Vpravo – rozpad přes leptokvark či jinou EF



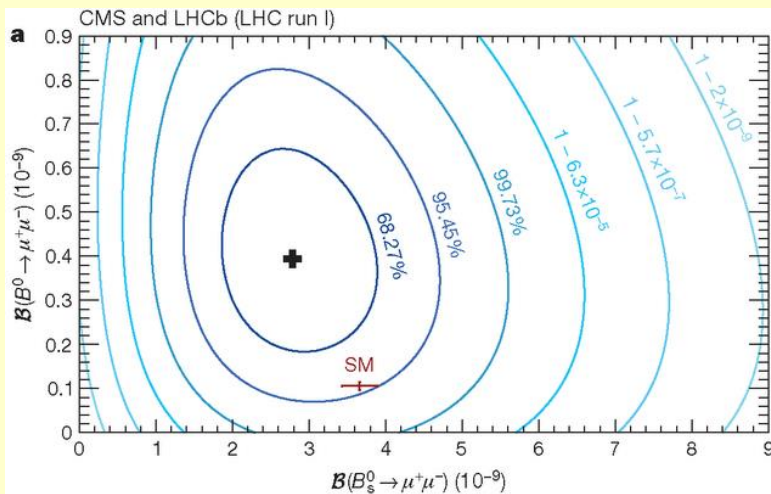
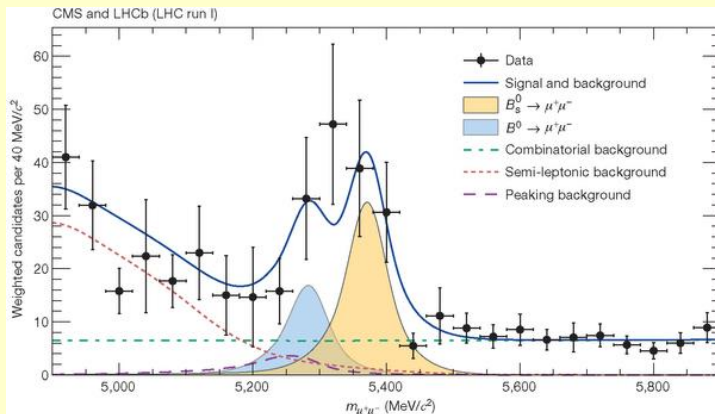
Rozpady B^0 mezonů na mionové páry

Před třemi roky jsem referoval o jejich rozdílu oproti Standardnímu modelu

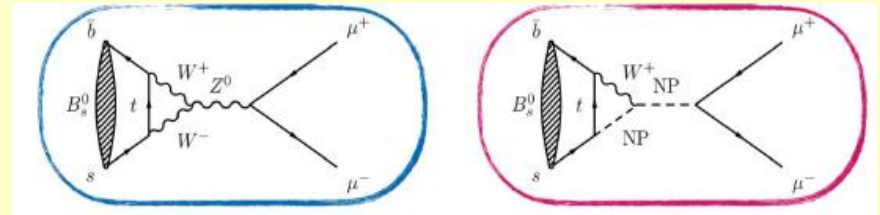
$$B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

$$B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

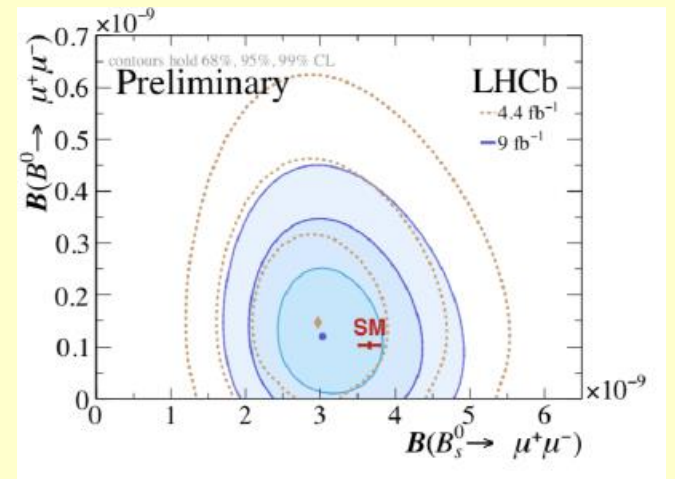
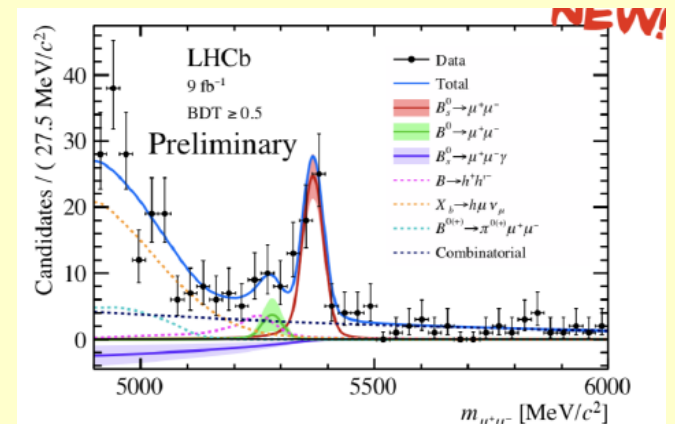
2018



Při kvalitnější analýze s větší statistikou se experimentální data přiblížila Standardnímu modelu

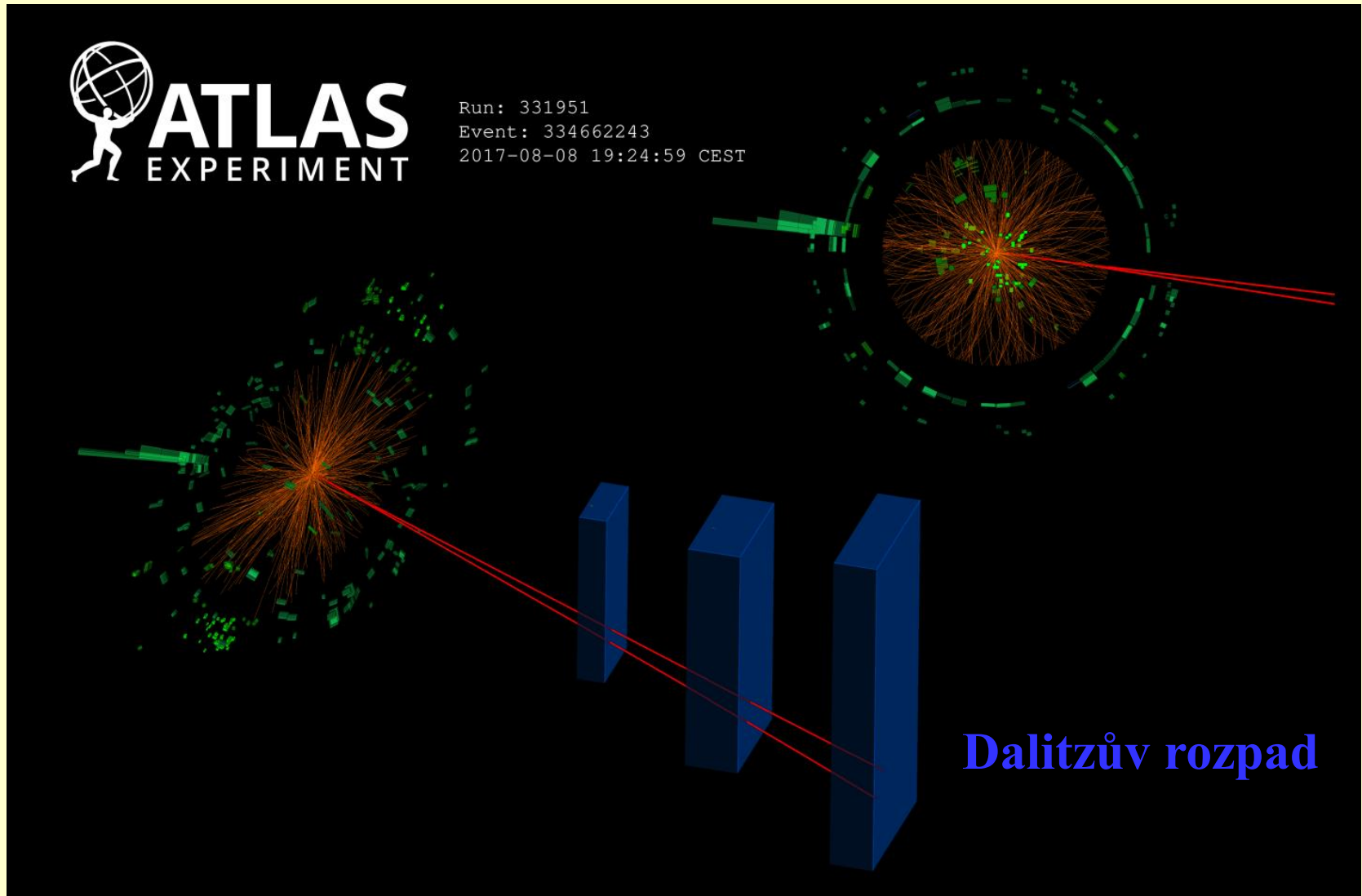


2021



Velmi vzácný rozpad higgse na pár lepton a antilepton a foton

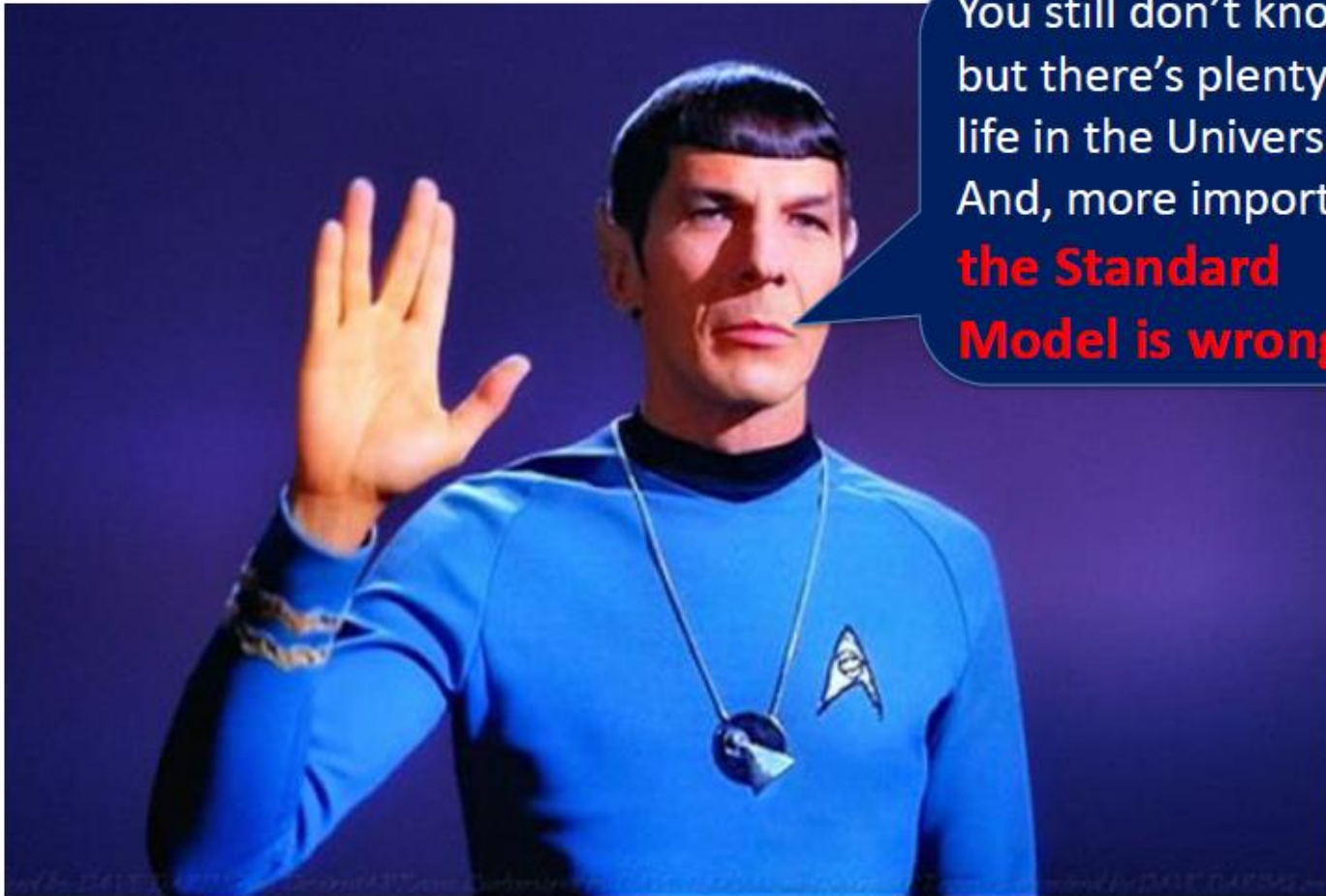
Poměr mezi předpovědí Standardního modelu a experimentem 1,5 (0,5)



Co k nové fyzice za Standardním modelem?

Breaking news from Moriond 2119!

S'chn T'gai Spock



You still don't know,
but there's plenty of
life in the Universe.
And, more importantly,
**the Standard
Model is wrong!**

Řevzato se shrnující prezentace Vincenzo Vagnoniho v Moriondu

Vylepšení LHC s názvem HL LHC, případně HE LHC

Nové magnety 11 T (zvýšení energie) a další řada vylepšení pro zvýšení intenzity (5násobné) předpokládá se jeho uvedení do provozu v roce 2026

Intenzivní příprava už probíhá nyní – využívá se i doba odstavení LHC

Ještě vyšší nárůst energie HE LHC (těžišťová energie 27 TeV) - třicátá léta



Příprava na další vylepšení LHC v roce 2026 se pracuje už nyní, třeba přípravou

Případný následovník LHC – FCC-hh a FCC-ee

Obvod zhruba 100 km

Elektron – elektron srážeč

Proton – protonový srážeč

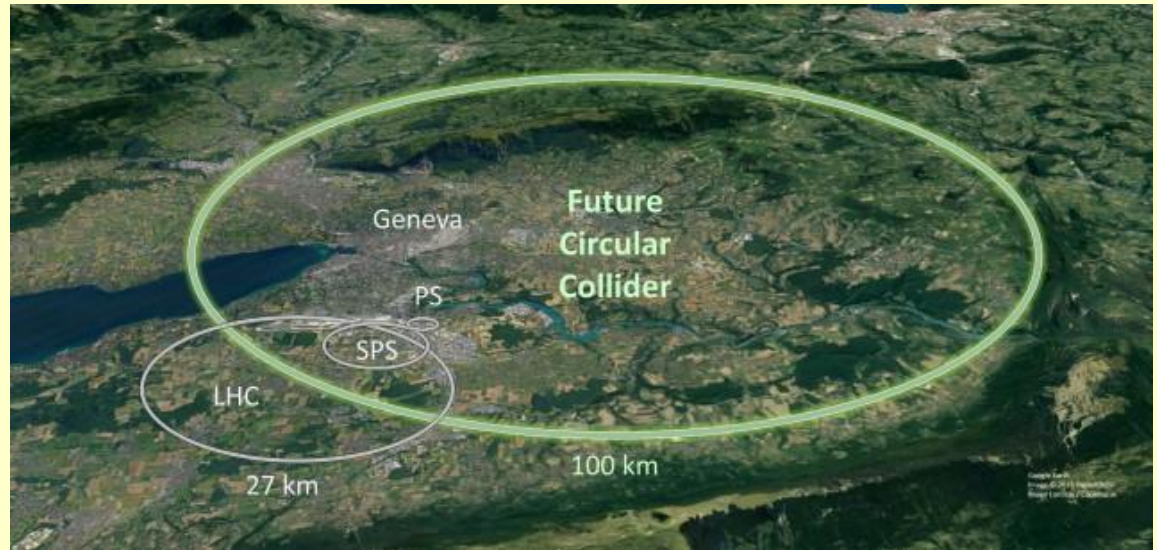
následovaly by po sobě

Magnety s polem 16 T

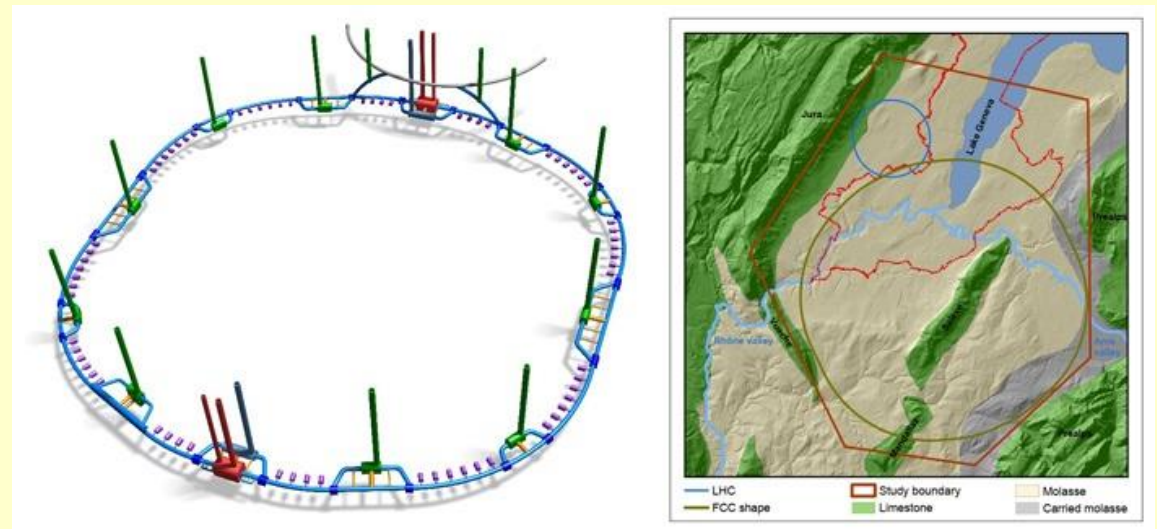
Další run 2022 – 2024

Srážeč FCC-hh až rok 20250

Podobný projekt i Čína



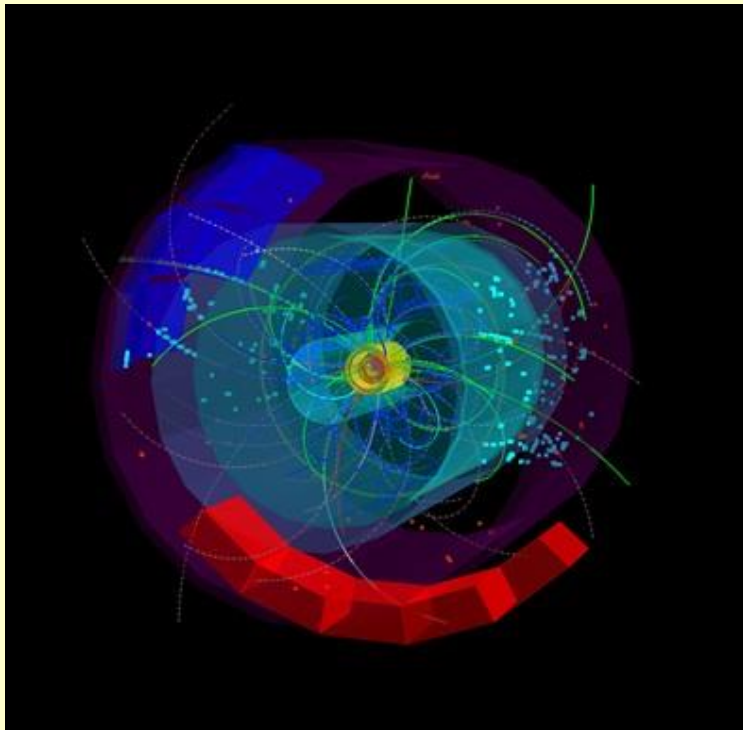
Práce na nových magnetech



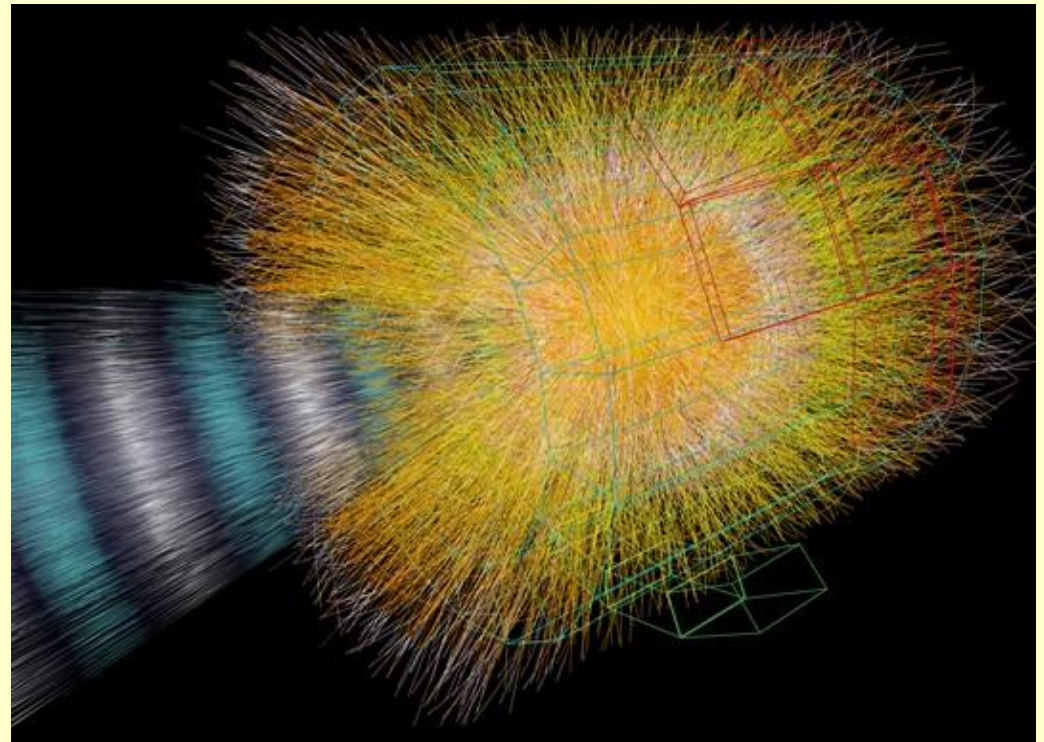
Urychlovač FCC-hh a FCC-ee

Srovnání srážek protonů a těžkých iontů

ALICE p+p srážka



ALICE Pb+Pb



Velmi horká jaderná hmota – počátek našeho vesmíru

Kam se kouká LHC?

Dosažená teplota:

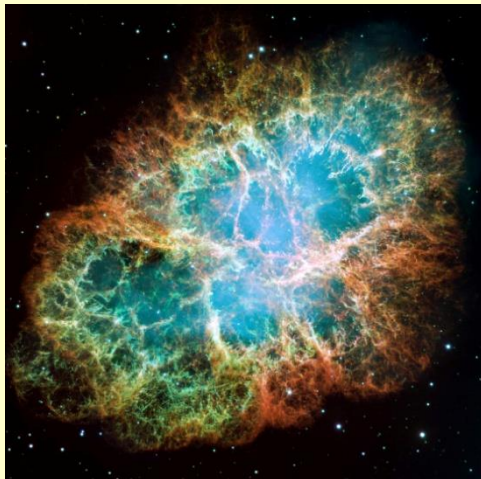
$\sim 3 \times 10^{12} \text{ K}$

(100 000krát více než v
nitru Slunce)

Dosažená hustota:

$\sim 10^{18} \text{ kg/m}^3$

Takové hustoty má i
hmota v nitru
supernovy a
neutronové hvězdy



$1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$

Kvark-gluonové plazma

$10 \mu\text{s} = 10^{-5} \text{ s}$

Hadronová hmota

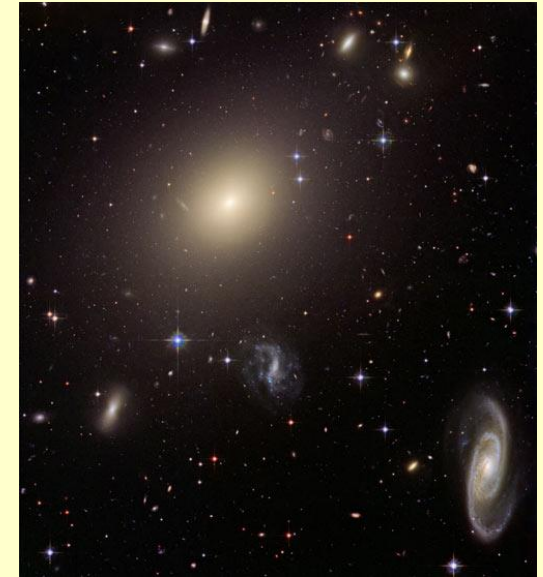
V pozdější fázi jen nejjlehčí
baryony – proton a neutron

$3 \text{ min} = 1,8 \cdot 10^2 \text{ s}$

Atomová jádra – vodík, helium
a trochu těžších jader

$400\,000 \text{ let} \sim 10^{13} \text{ s}$

Reliktní záření



Zkoumání kvark-gluonového plazmatu

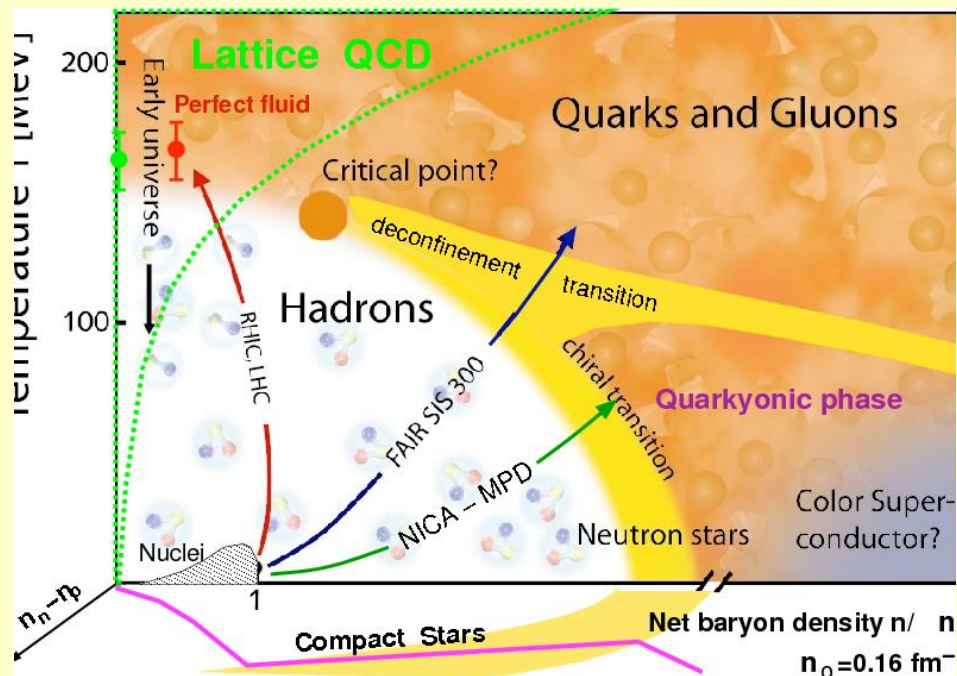
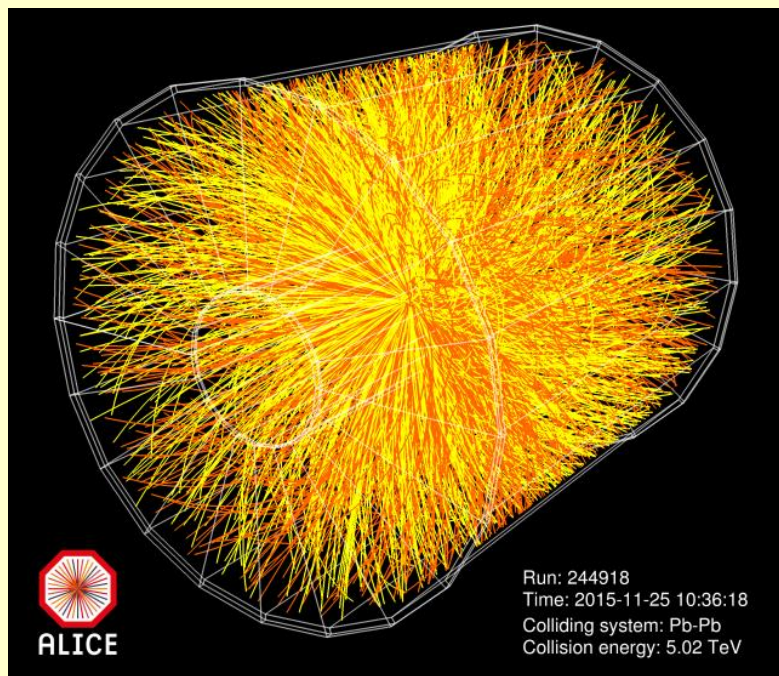
Přechod pro vysoké teploty (hustoty energie) a nízké baryonové hustoty – spojitý

Kvark- gluonové plazma – silně intragující hmota s extrémně nízkou viskozitou

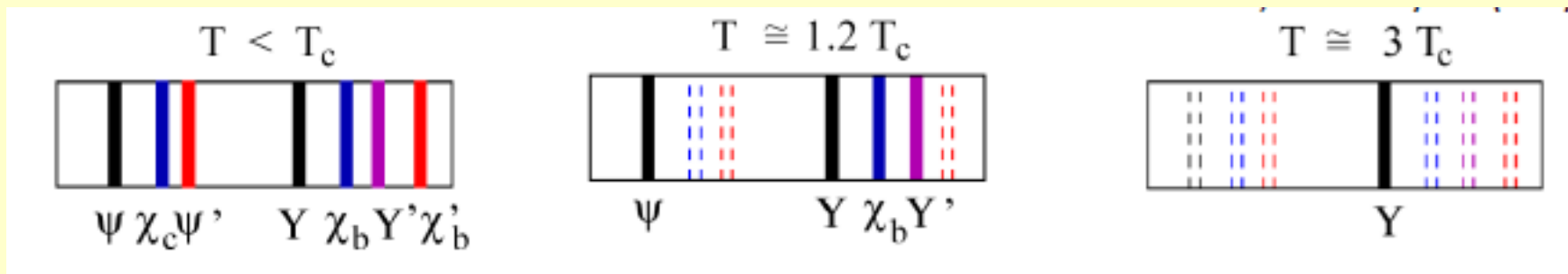
Termodynamická rovnováha nastolena ještě v kvark-gluonovém plazmatu

Popis pomocí hydrodynamických modelů

Interakce kvarků a gluonů s plazmatem (brzdné gluonové záření)



Míra efektivity disociace kvarkonií závisí na teplotě \leftrightarrow slouží jako teploměr horkého a hustého média



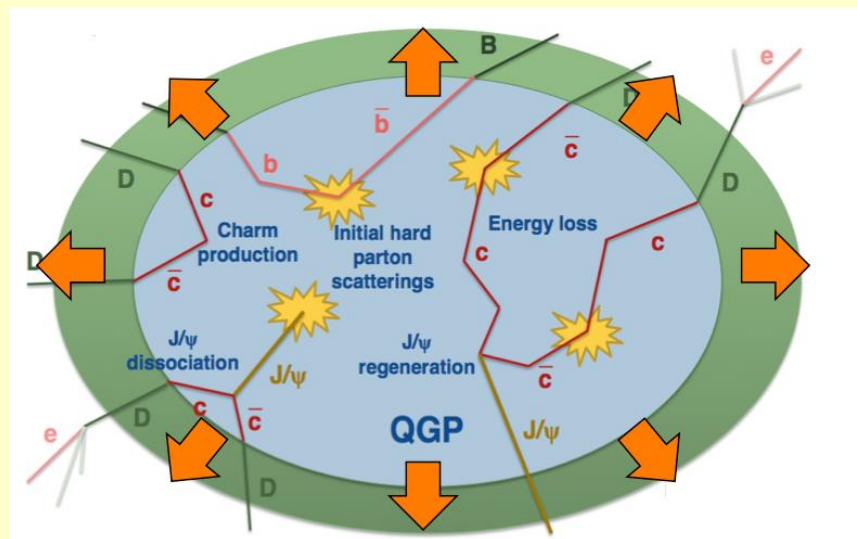
Působící jevy:

- Horká hmota:**
- 1) Disociace kvark antikvarkových párů
 - 2) Regenerace spojením uvolněných kvarků
 - 3) Ztráta energie

- Studená hmota:**
- 1) Vznik z přeměny těžších hadronů – i v pozdější době
 - 2) Ztráta energie
 - 3) Croninův jev

Pozorování závislosti poměru mezi produkovaným počtem částic a předpovědi na základě nukleon nukleonových srážek

https://indico.cern.ch/event/443462/images/6069-hf_cartoon1.png



Standardní kosmologický model

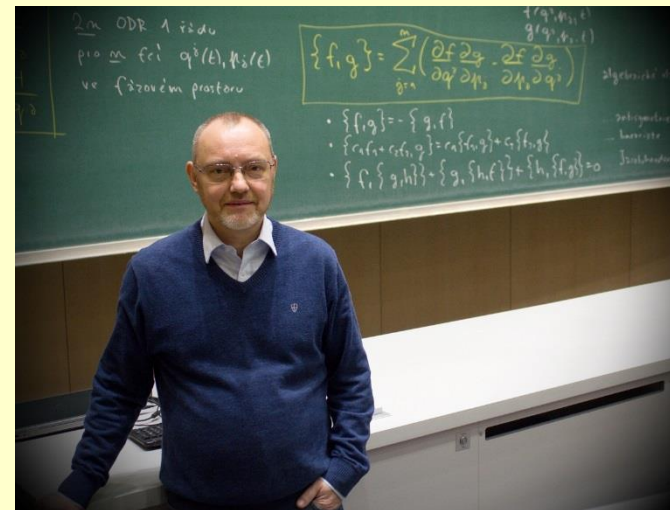
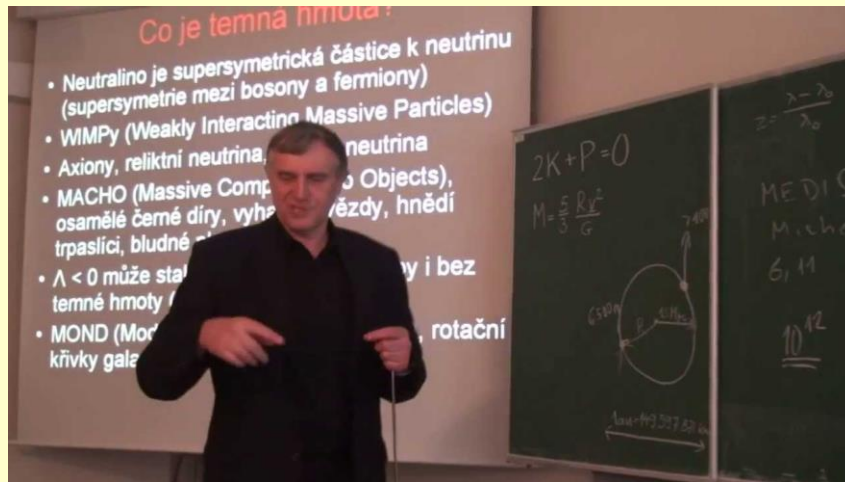
versus

konkurenční modely

Standardní model vychází z předpokladu platnosti Standardního modelu hmoty a OTR
 Nutnost zavedení temné hmoty a temné energie, nemožnost popsání extrémních období na počátku (inflační období? ...)

Konzistentní popis téměř všech existujících dat – nic takového nenabízí zatím alternativní přístupy

Nutnost a pozitivní vliv kritického přístupu a hledání slabin v současném pohledu V teoretické oblasti – hledání matematických řešení a předpovědí různých gravitačních teorií (alternativ a rozšíření OTR) – třeba kvadratické gravitace (úspěch české skupiny)



Michal Křížek patří k našim předním kritikům částicové interpretace temné hmoty

J. Podolský- člen skupiny, která našla analytické řešení pro symetrickou černou díru v kvadratické gravitaci

Závěr

- 1) Současný Standardní kosmologický model je postaven na Standardním modelu částic a interakcí a Obecné teorie relativity
- 2) Jeho ověřování lze založit pouze na experimentálním pozorování
- 3) Pozorujeme jevy, které nelze zdůvodnit klasickými teoriemi – nutnost „exotické“ fyziky za Standardním modelem a Obecnou teorií relativity
- 4) Velké urychlovače umožňují studovat strukturu hmoty a hledat známky exotické fyziky
- 5) V roce 2022 se znovu rozběhl urychlovač LHC, kde uvidí exotickou fyziku?
- 6) Kvantová teorie pole umožňuje vidět i částice potřebující nedosažitelnou energii
- 7) Potvrzené měření magnetického dipólového momentu mionu – exotická fyzika?
- 8) Souhra astronomických pozorování a experimentů v jaderné a částicové fyzice

