



Monika Panušková



Fyzika na LHC

- Standardní Model
- Původ hmoty elementárních částic
- Supersymetrie
-

Obsah

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force
				Bosons (Forces)

- 3 generace elementárních částic
- 4 elementární fermiony v každé generaci
- 1 foton pro elmag. interakci
- 3 slabé bosony pro slabou interakci
- 8 gluonů pro silnou interakci: 3 barvy-> 9 kombinací, jedna je ovšem barevně neutrální (všechny barvy najednou)

Standardní Model

- Druhá a třetí generace jsou kopií té první
- Pouze první generace je stabilní
- Částice z druhé a třetí generace se rozpadají
- Stejně tak se rozpadají W a Z bosony
- Kvarky a gluony se nevyskytují volně, jsou vázané uvnitř částic
 - baryony(ze tří kvarků)
 - mesony(z kvarku a antikvarku)

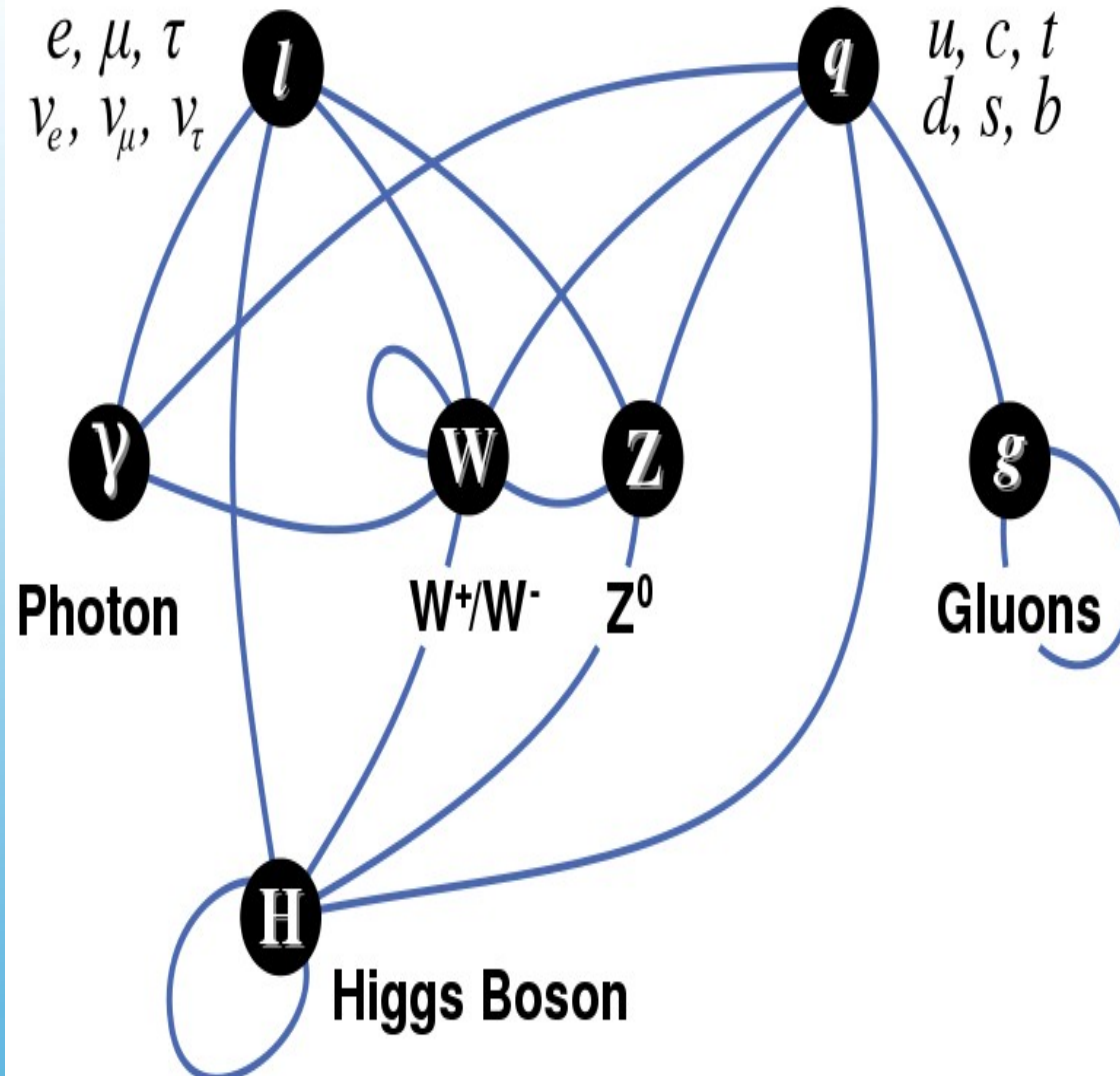
Standardní Model

Leptons

e, μ, τ
 ν_e, ν_μ, ν_τ

Quarks

u, c, t
 d, s, b



- Interakce zprostředkované interakčními bosony
- Bosony pro elmag. a slabou interakci se mísí mezi sebou => **elektroslabé sjednocení**
- Aby předpovědi SM byly v souladu s pozorováním je nezbytné postulovat existenci další interakce: s Higgsovým bosonem
- Interakcí s H. bosonem částice získávají hmotnost (větší hmotnost = silnější interakce)
- Nehmotné částice s H. bosonem neinteragují

Interakce SM

- V Lagrangeianu se vyskytují pole W_1 , W_2 , W_3 a B . Pole W_3 se mísí s polem B , takže vznikají 2 smíšené stavy které měříme. Jedním polem je Z a druhým foton. Na předchozím obrázku jsou spojené částice které interagují spolu.. Pole kt. pozorujeme W^+ , W^- , Z , γ
- Leptony interagují s fotonem, W , Z ale ne s gluony, kvarky int. se všemi bosony. Gluony, W můžou i mezi sebou.
- Interakce s H se navenek projevuje tak že částice mají hmotnost.

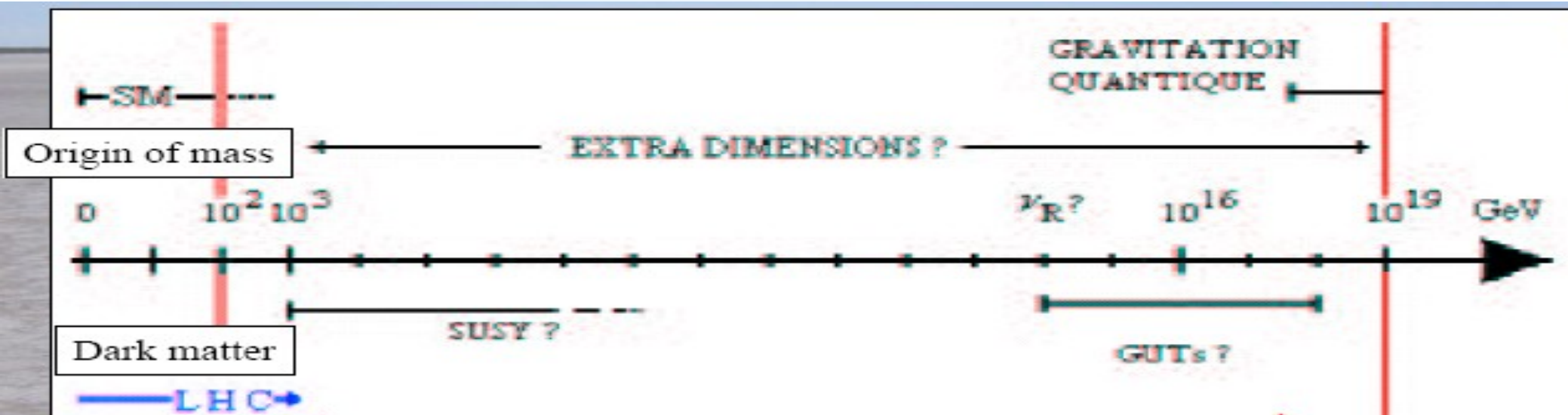
Interakce SM

- Perfektní shoda se všemi potvrzenými daty z urychlovačů
- Konzistence s přesnými měřeními v elektroslabém sektoru (LEP...), za podmínky že existuje H. boson
- Shoda s daty požaduje relativně lehký H. boson ($< 180 \text{ GeV}$)
- Nechává mnoho otevřených otázek (původ hmoty, velké sjednocení,...)

Stav Standardního Modelu

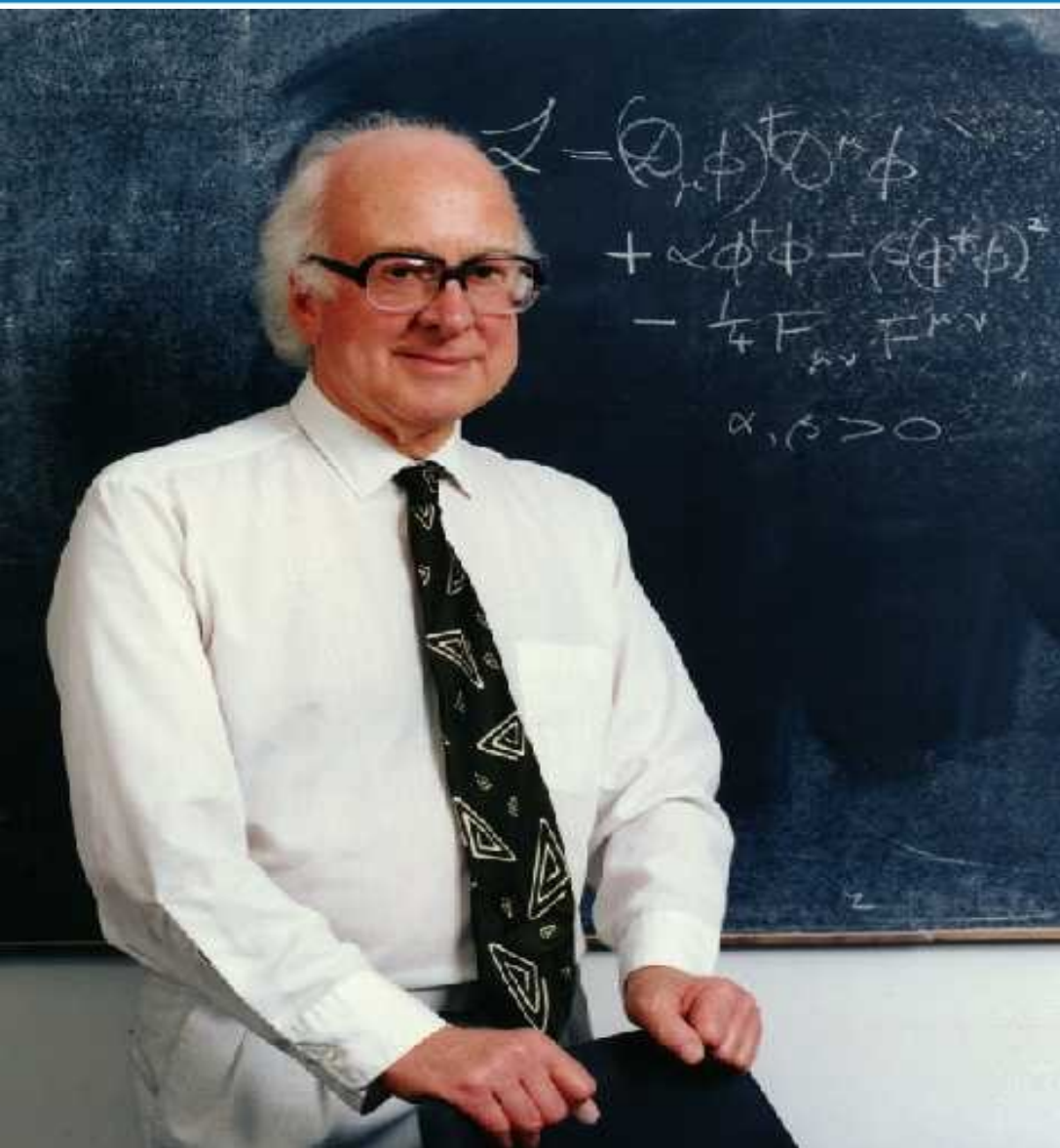
- Jaký je původ hmotnosti elementárních částic?
 - Může za to H. boson ? Nebo něco jiného ?
- Proč máme tolik elementárních částic – 3 rodiny – a proč jsou navzájem tak rozdílné (mnoho řádů v hmotnosti – neutrino vs. top)
 - (ne)symetrie mezi hmotou a antihmotou ve vesmíru
- Sjednocení fundamentálních interakcí při velmi vysokých energiích – je to možné ?
- Kvantová teorie gravitace

Otevřené otázky SM



- Původ hmoty nemůže být na energiích které se příliš liší od klidových energií částic, které pozorujeme
- Pokud je temná hmota způsobená novými částicemi, nemohou být příliš těžké (experimentální limity)
- Nová fyzika “přede dveřmi” na LHC a ILC

Na jakých energiích očekávat novou fyziku?



- Newton :
 - Tíha je úměrná hmotnosti
- Einstein :
 - Energie souvisí s hmotností
- Nikdo z nich nevysvětlil původ hmotnosti
- Pochází hmotnost z Higgsovy interakce ?

Proč věci mají hmotnost?



- Večírek, místnost je plná lidí, kteří jsou rovnoměrně rozloženi po místnosti
- To odpovídá Higgsovu poli
- Lidé volně přecházejí sem a tam, což jsou fluktuace vakua

Ilustrace Higgsovy myšlenky



- Do místnosti vejde známá osoba – ta představuje např. W boson
- Lidé se kolem ní začnou shlukovat – vzniká hmotná částice – to odpovídá procesu, kdy částice získávají hmotnost interakcí s Higgsovým polem

Ilustrace Higgsovy myšlenky



- Drb o tom, že známá osoba přijde, může vyvolat samolé sdružení (excitaci) Higgsova pole
- Takto vzniká Higgsův boson

Ilustrace Higgsovy myšlenky

Think of a Snowfield



Skier moves fast:
Like particle without mass
e.g., photon = particle of light



**The LHC will look for
the snowflake:
The Higgs Boson**

Snowshoer sinks into snow,
moves slower:
Like particle with mass
e.g., electron

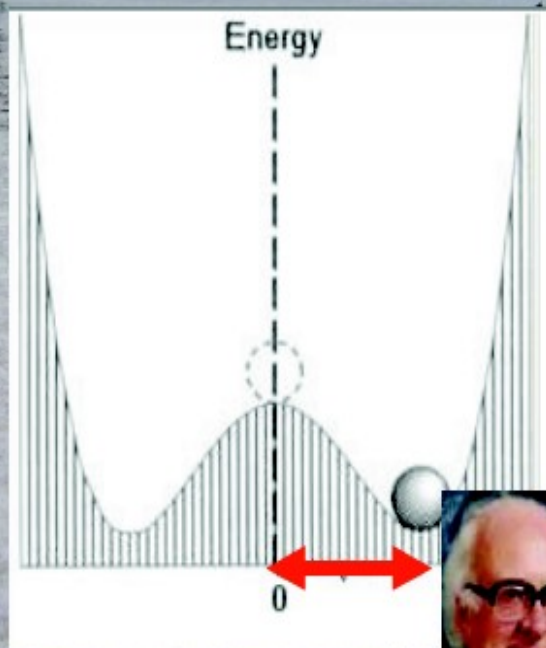
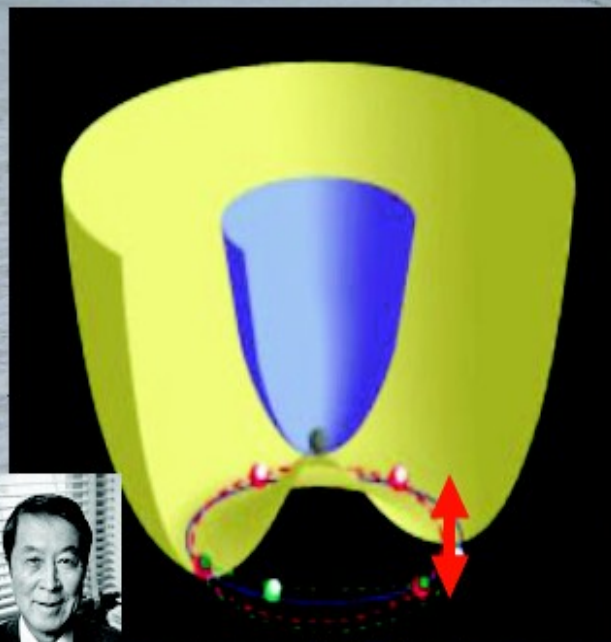


Hiker sinks deep,
moves very slowly:
Particle with large mass



Ilustrace Higgsovy myšlenky č.2 – sněhové pole (John Ellis)

Spontaneous breaking of symmetry



- Higgsův potenciál má určitou symetrii – v této ilustraci je to rotační symetrie kolem svislé osy
- Základní stav je stav s nejnižší energií - “dno láhve”
- Z. stav není jednoznačný, naopak je jich nekonečně mnoho – základním stavem je kterýkoli bod na kružnici podél dna

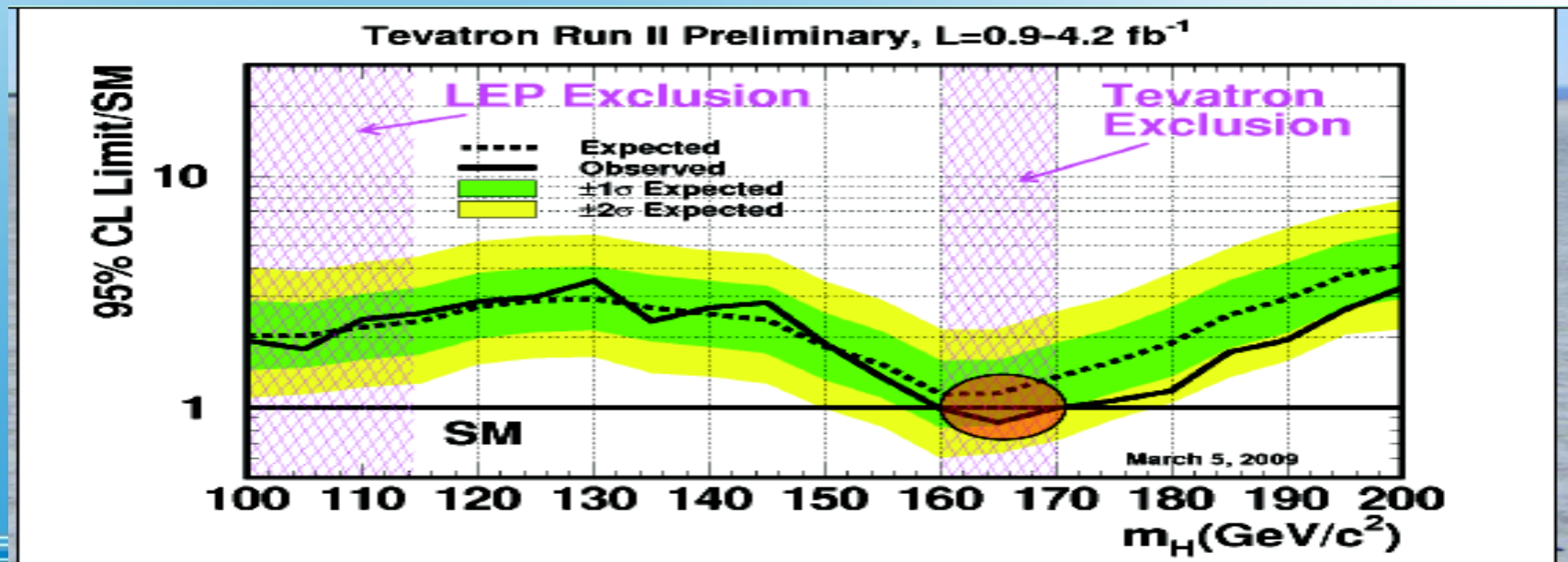
Částice v základním stavu se nemůže pohybovat podél dna (má energie právě tak akorát, aby existoval) => Základní stav NEMÁ rotační symetrii
=> **Spontánní narušení symetrie**

Spontánní narušení symetrie

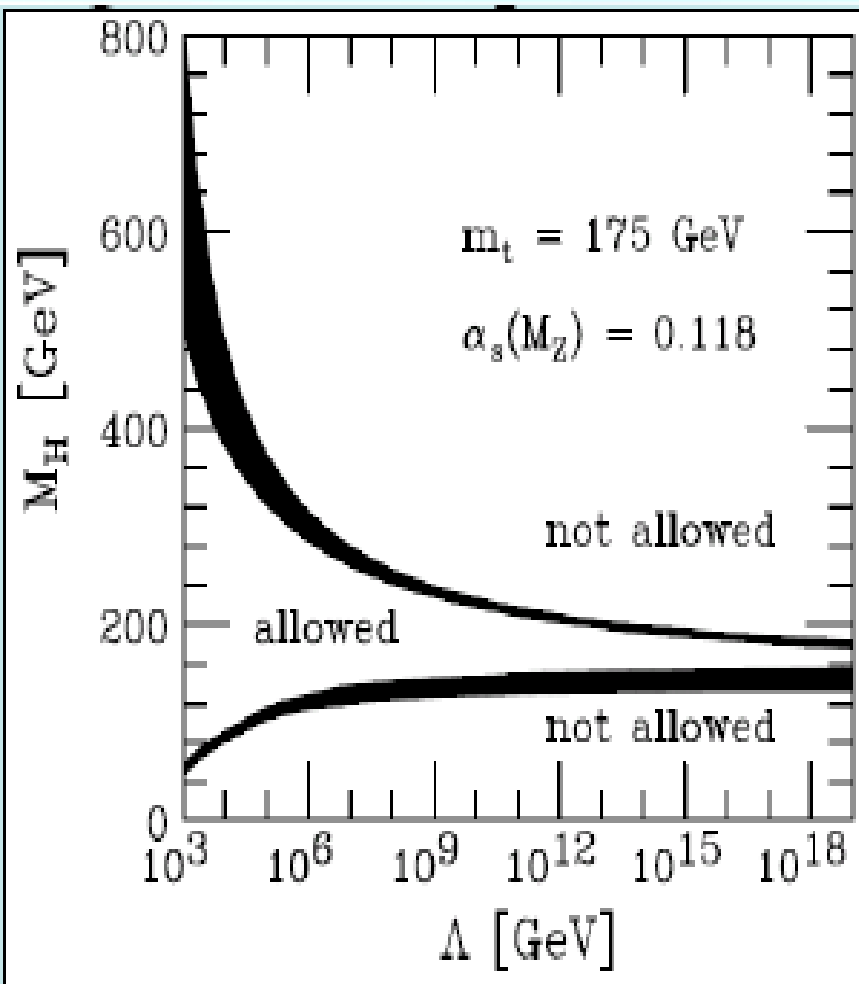
- Základní vnitřní symetrie Standardního modelu jsou:
 - **Elektromagnetická kalibrační symetrie** (různé vektorové a skalární potenciály dávávají stejné elektromagnetické pole)
 - **Slabá kalibrační symetrie** (zachovávající se slabý isospin)
 - platí jen pro levotočivé částice, pravotočivé částice se slabé interakce nezúčastňují (slabá interakce, např. beta rozpad, maximálně porušuje paritu)
 - **Silná kalibrační symetrie** (symetrie výměny barev v kvarcích)
- Existence slabé kal. symetrie brání tomu, aby částice měly hmotnost (pro hmotné částice se levo a pravotočivé stavy mísí => slabá interakce by pak působila stejně na pravo i levotočivé částice => rozpor s experimentem)
- Spontánním narušením se zbavíme slabé symetrie => je možné dát částicím hmotnost => Proces se nazývá **Higgsův mechanismus**

Higgsův mechanismus

- Dolní limita z přímého hledání na LEP: **114.4 GeV**
- Hodnoty ze statisticky nejlepšího fitu : **84^{+34}_{-26} GeV**
- Horní limita: **154 GeV** (bez dat z přímého hledání) **185 GeV** (s daty z přímého hledání)
- Tevatron vyloučil existenci Standardního Higgsova bosonu v oblasti **160-170 GeV**



Stav hledání Higgse – jaro 2009



- H potenciál lze velmi dobře stabilizovat novými fermiony
=> **Supersymetrie**

- Omezení pro hmotnost H bosonu závisí na škále Λ , kde se objeví nová fyzika
- Hmotnost H bosonu nemůže být příliš velká, protože velká hmotnost vede k velmi silné vazbě mezi Higgsovými bosony, což pak vede k prakticky nekonečným maticovým elementům na vyšších energiích
- Hmotnost H bosonu nemůže být ani příliš malá, protože pak by korekce k hmotnosti pocházející od top kvarku vedly k předpovědi negativní vazebné konstanty => nestabilita vakua
- oblast (kolem 160-180 GeV), která je stabilní až k vysokým hodnotám Λ , byla do značné míry vyloučena Tevatronem)

Teoretické omezení na hmotnost H bosonu

Event rates in ATLAS or CMS at $L = 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Process	Events/s	Events per year	Total statistics collected at previous machines by 2007
$W \rightarrow e\nu$	15	10^8	10^4 LEP / 10^7 Tevatron
$Z \rightarrow ee$	1.5	10^7	10^7 LEP
$t\bar{t}$	1	10^7	10^4 Tevatron
$b\bar{b}$	10^6	$10^{12} - 10^{13}$	10^9 Belle/BaBar ?
H $m=130 \text{ GeV}$	0.02	10^5	?
$\tilde{g}\tilde{g}$ $m=1 \text{ TeV}$	0.001	10^4	---
Black holes $m > 3 \text{ TeV}$ ($M_D=3 \text{ TeV}$, $n=4$)	0.0001	10^3	---

- LHC je továrna na všechno. W/Z, Higgs, SUSY,...
- Pozorovatelné by měly být částice až do hmotnosti 5 TeV

Produkce na LHC

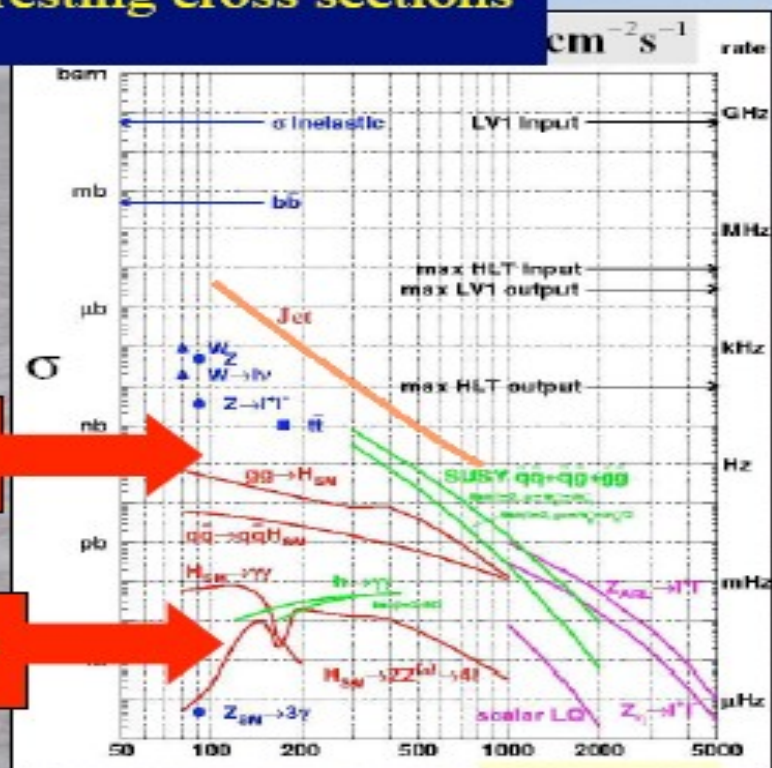
LHC bude produkovat vsechno v obrovských mnozstvich. Za jeden rok dokaze vyprodukovat vice statistiky nez vsechny ostatni experimenty v historii dohromady... A dokaze produkovat i veci, které nejsou dosazitelne predchozimi stroji, jako SUSY castice , cerne diry a v podstate cokoli s hmotnosti do 5 TeV.

Je mozne, ze budou mit maly ucinny prurez, nebo se budou rozpadat tak, ze to nepujde videt v detektoru, takze by mohly uniknout pozorovani.

Produkce na LHC

The LHC Physics Haystack(s)

Interesting cross sections

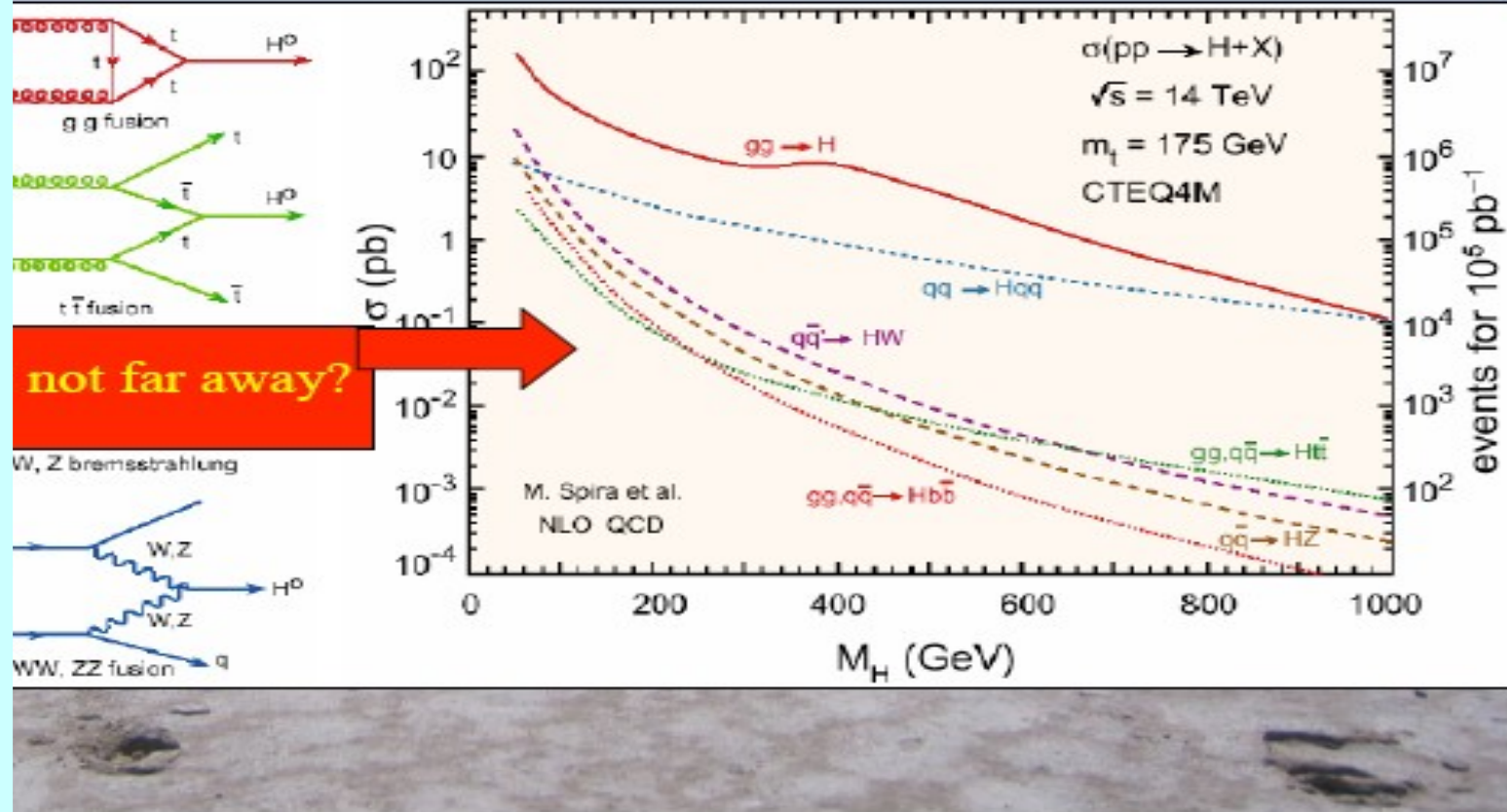


- Účinný průřez pro těžké částice $\sim 1/(1 \text{ TeV})^2$
- Většinou mají jen velmi slabou vazbu
- Celkový účinný průřez LHC $\sim 1/(100 \text{ MeV})^2$
- Potřebujeme ca. 1000 eventů pro signál: zlomek $1/100000000000000$
- Srovnání: jehla – $1/1000000000 \text{ m}^3$
- kupka sena: 100 m^3
- **LHC hledá jehlu ve 100000 kupkách !**

Jehla v kupkách sena

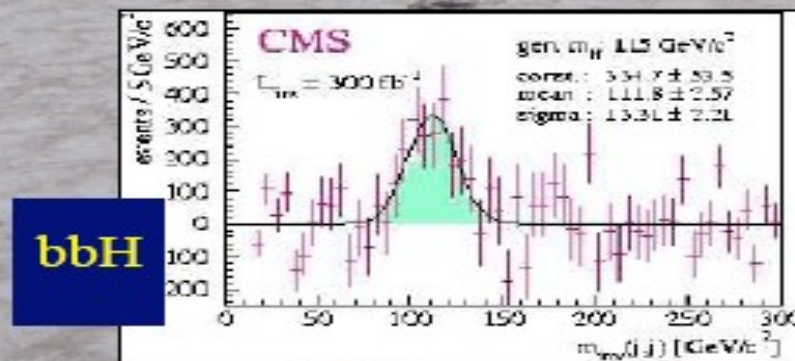
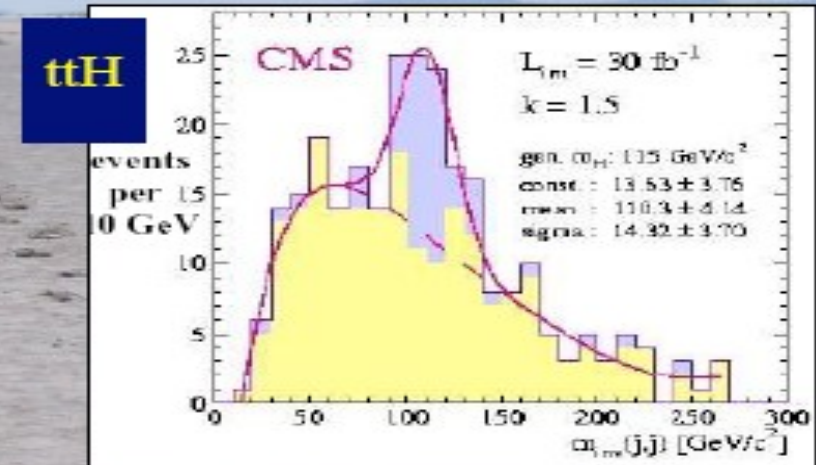
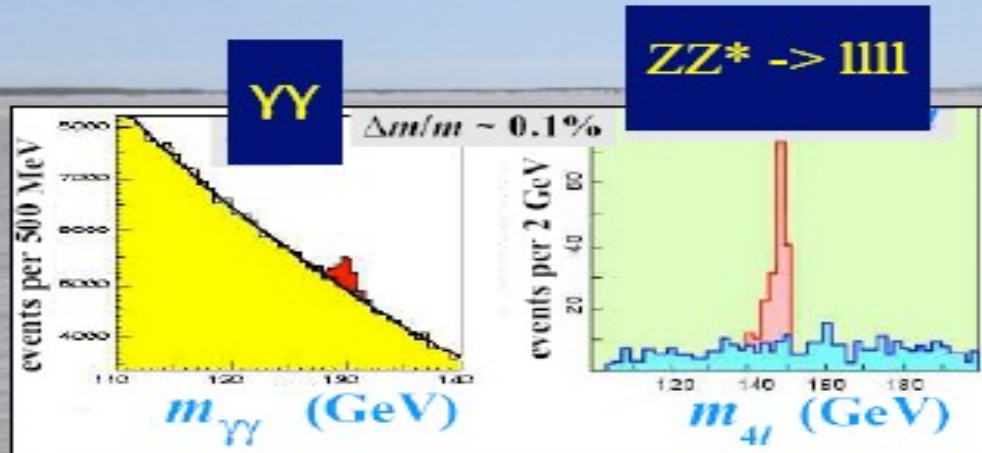
- Několik produkčních módů
- Největší účinný průřez má gluon-gluon fúze
- Nejzajímavější je WW/ZZ fúze – má dobře viditelnou signaturu a potlačitelné pozadí (narozdíl od gg fúze)

Higgs Production at the LHC



Produkce H bosonu na LHC

Some Sample Higgs Signals

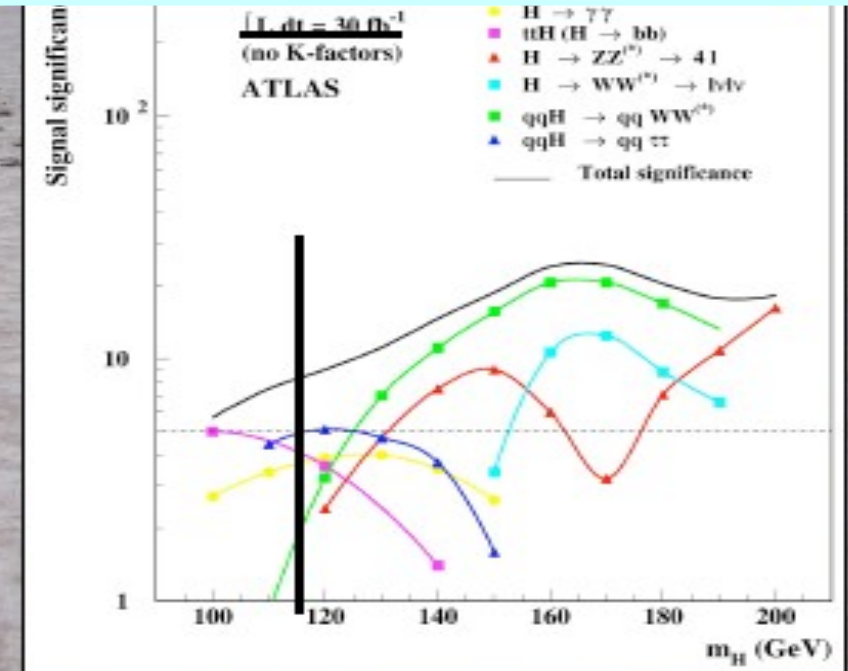
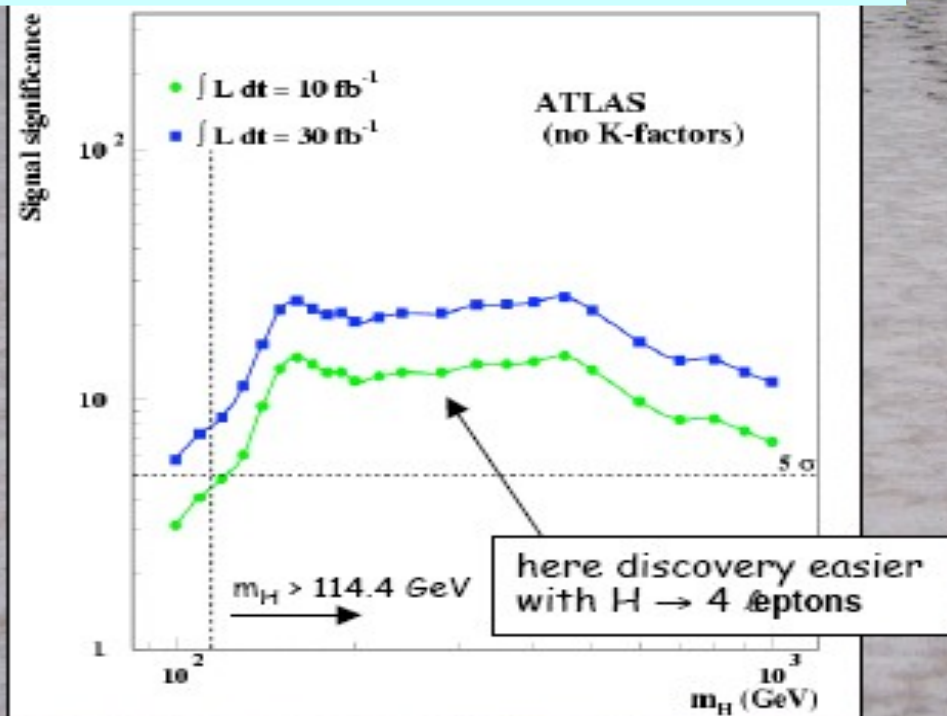


Některé ze signálů H bosonu na LHC

Higgs Detection at the LHC

Higgs může být nalezen rychle...

... v několika rozdílných kanálech



Detekce H bosonu na LHC

- **Jediné možné netriviální** rozšíření Lorentzovy grupy symetrií (3 rotace, 3 +1 translace, 3 boosty) Triviální by bylo kdyby komutovalo se všemi ostatními symetriemi (Coleman-Mandulova věta a Haag-Sohnius-Lopuszanského věta, 70. léta)
- Máme 10 vnějších symetrií v Pincarého grupe translace podél prostoročasových a časové osy, rotace kolem 3 os a lorentzovský boost ve 3 směrech. Symetrie SM jsou triviálními rozšířeními téhle grupy, protože jejich generátory komutují s generátory Poincareho grupy. Když chceme najít netriviální řešení, nutně dostáváme supersymetrii. Jiné rozšíření není možné

Supersymetrie

- Ze supersymetrie vyplývá symetrie mezi bosony a fermiony (tj. je to předpověď teorie, ne požadavek zvenku). Supersymetrie znamená, že pro každý boson existuje fermion téže hmotnosti a se stejnými interakcemi (a naopak)
- Předpovídá lehký H boson
- Uhlazuje cestu k možnému sjednocení interakcí
- Poskytuje kandidáty na částici temné hmoty

Supersymetrie

- Jedna ze zásadních otázek moderní fyziky je problém **hierarchie**, tj.
 - proč je slabá interakce o tolik silnější než gravitační (34 řádů)
 - proč je elektromagnetická interakce o tolik silnější než gravitační
- Můžeme nastavit parametry “ručně” - dostáváme problémy v korekcích prvního řádu při výpočtu self-interakce H bosonu – korekce mají velikost hierarchického rozdílu škál, tj. jsou o mnoho řádů větší než hodnoty nultého řádu – musíme provést extrémní vyladění parametrů (**fine tuning**), aby byla teorie v souladu s experimentem

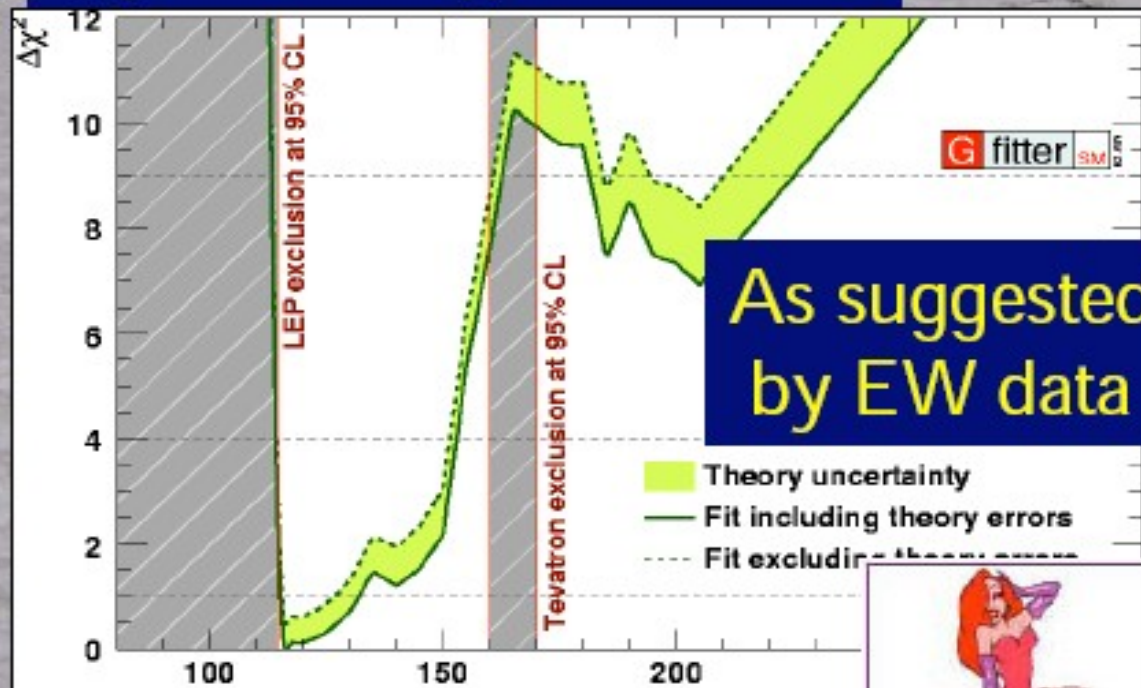
Proč supersymetrie?

- Self-interakce fotonů a fermionů je před podobným efektem chráněná elektromagnetickou kalibrační symetrií (foton) a přibližnou chirální (pravo-levou) symetrií Standardního modelu (fermion)
- Higgsův boson není chráněn žádnou symetrií ve SM
- Supersymetrie postuluje ke každému bosonu fermionového partnera => příspěvky od SUSY fermionů vyruší divergence, které existují ve SM
- Na nasl. Slide uvidíme kvalitu shody s daty (kvalita fitu) pro různé hm. Higgse. Čím je větší hodnota, tím horší fit..
- Nejlepe se shodují hodnoty pod 150 GeV, a lehce přes 200 GeV (sede oblasti vyloučeny z LEP a Tevatronu)

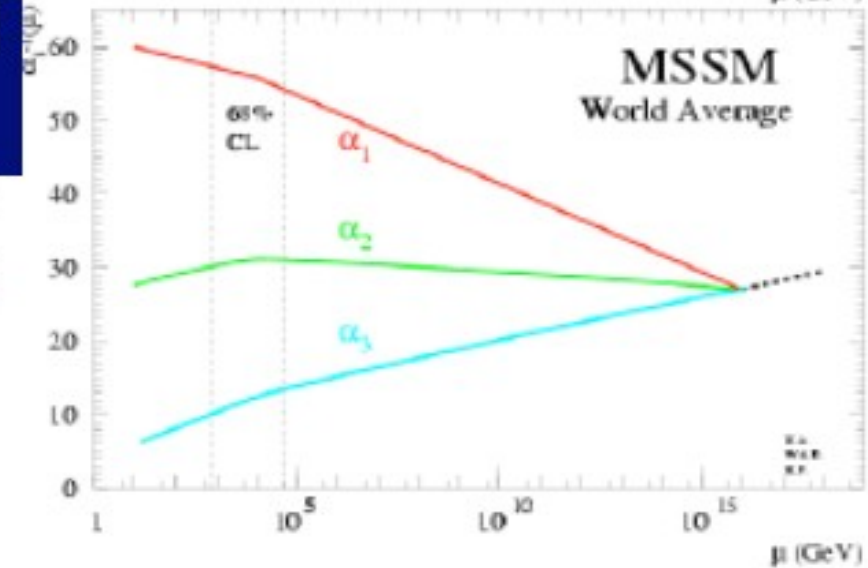
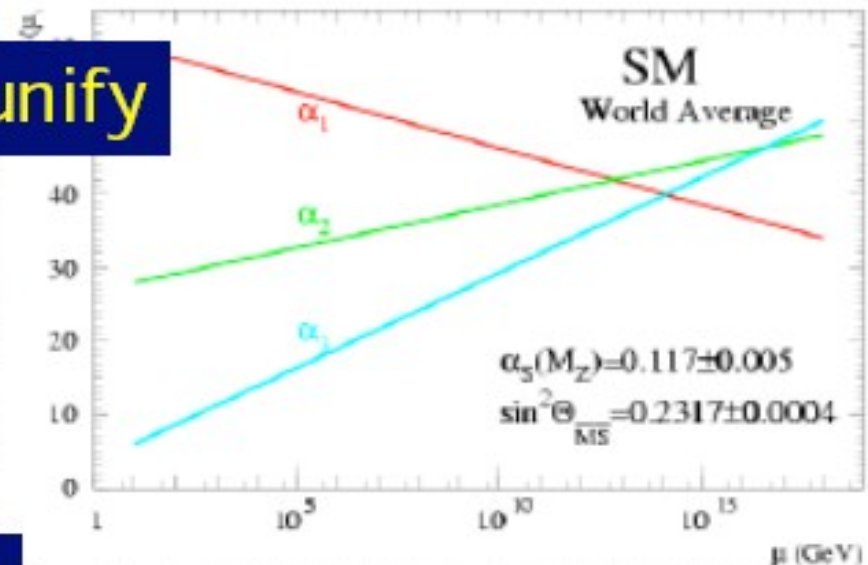
Proč supersymetrie?

It enables the gauge couplings to unify

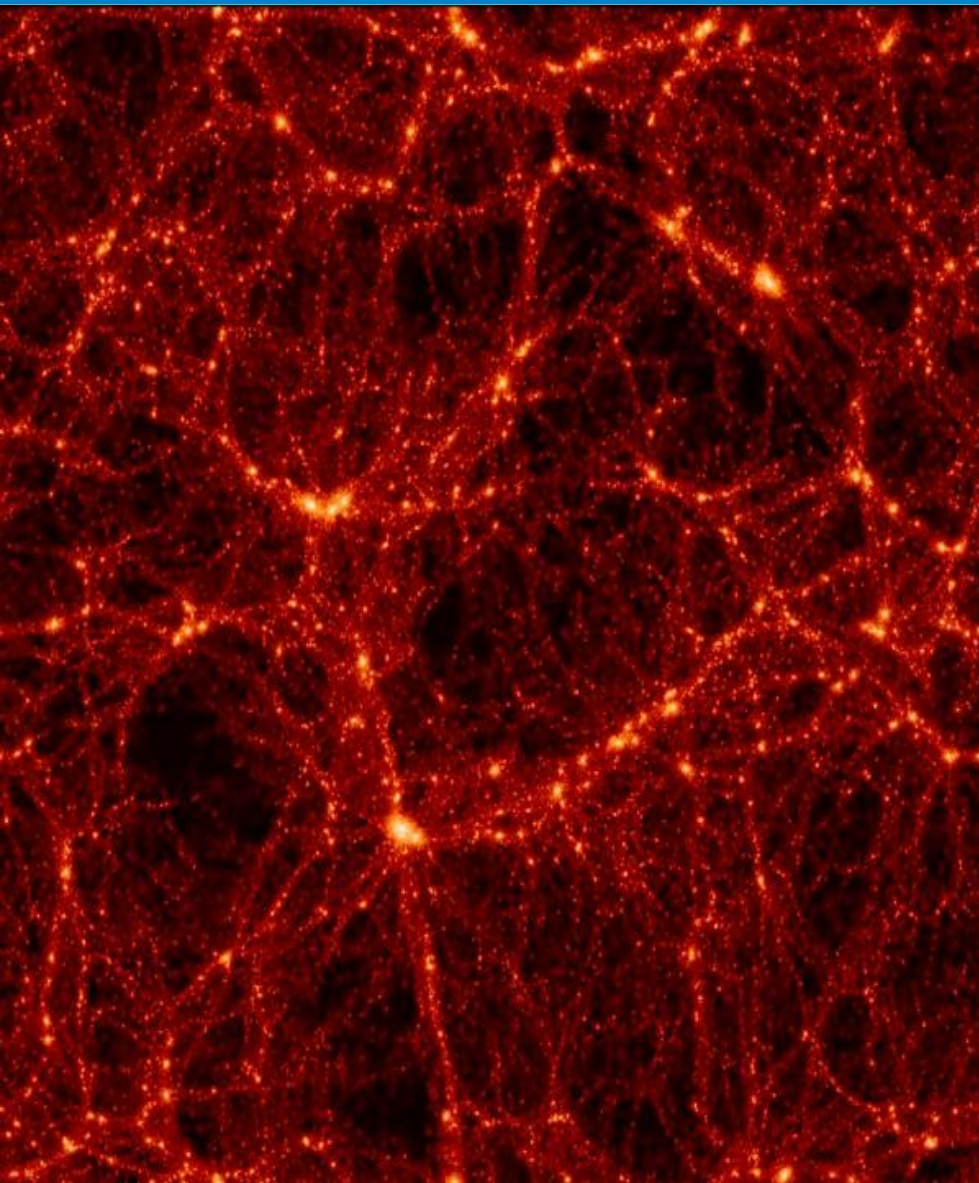
It predicts $m_H < 150$ GeV



Provided by Fabiola Gianotti



Další důvody proč si oblíbit SUSY

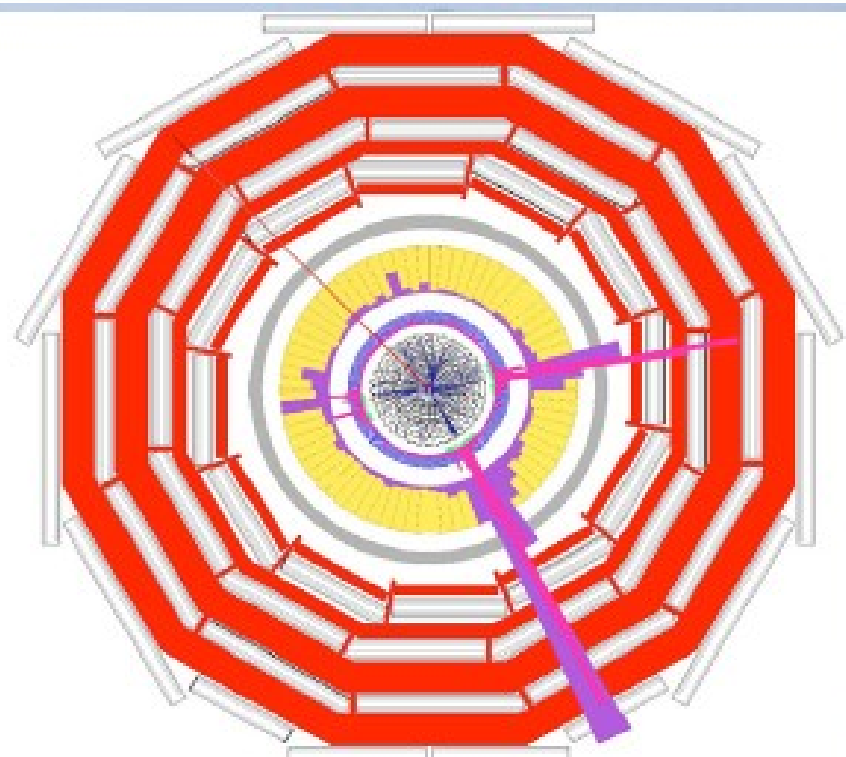
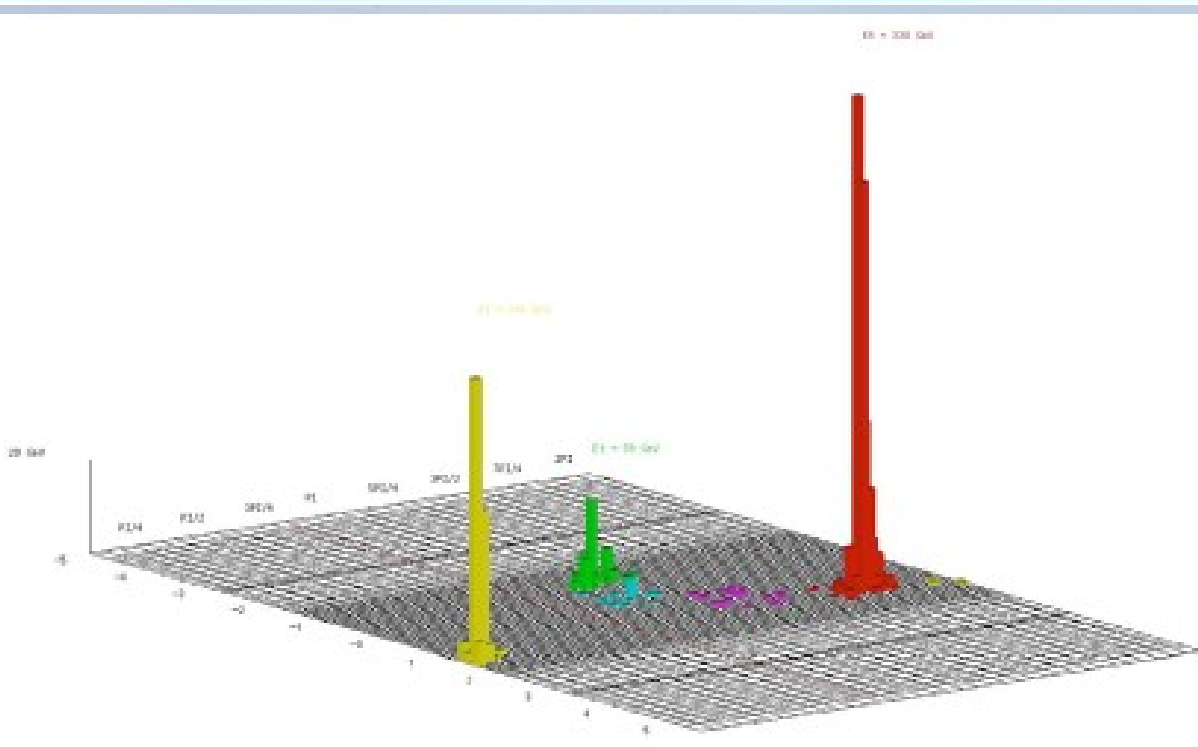


- Měření ukazují, že většina hmoty ve vesmíru je temná
 - Temná hmota zabírá 23 % vesmíru, baryonová hmota (hvězdy, planety, my) 4 % a zbytek je temná energie
- Některé částice předpovídané supersymetrií mají vlastnosti, které z nich dělají dobré kandidáty na temnou hmotu:
 - minimální interakce s ostatními částicemi (“temnost”)
 - stabilita (jinak by se už dávno rozpadla a my bychom ji nemohli pozorovat)
 - dostatečná hmotnost (neutrína jsou příliš lehká)
 - Dobrým kandidátem je nejlehčí supersymetrická částice (má všechny výše zmíněné vlastnosti)
- Na LHC možná budeme produkovat temnou hmotu

Temná hmota

Na nasl. obrázku typický SUSY event. SUSY částice jsou nestabilní a rozpadají se na lehké částice až se finalmente rozpadnou na nejlehčí SUSY částici. Předpokládá se, že ta nejlehčí částice je stabilní, takže už se dál nerozpadá. Aby byla Nejlehčí SUSY částice dobrým kandidátem na temnou hmotu, nesmí interagovat s detektorem, takže z něho odletí pryč, podobně jako neutrino. V detektoru tak chybí hodně energie. To je vidět na obrázku kdy tam je jeden energetický jet dolu, něco do stran, ale nic nahoru. Tam letěla SUSY částice.

SUSY event

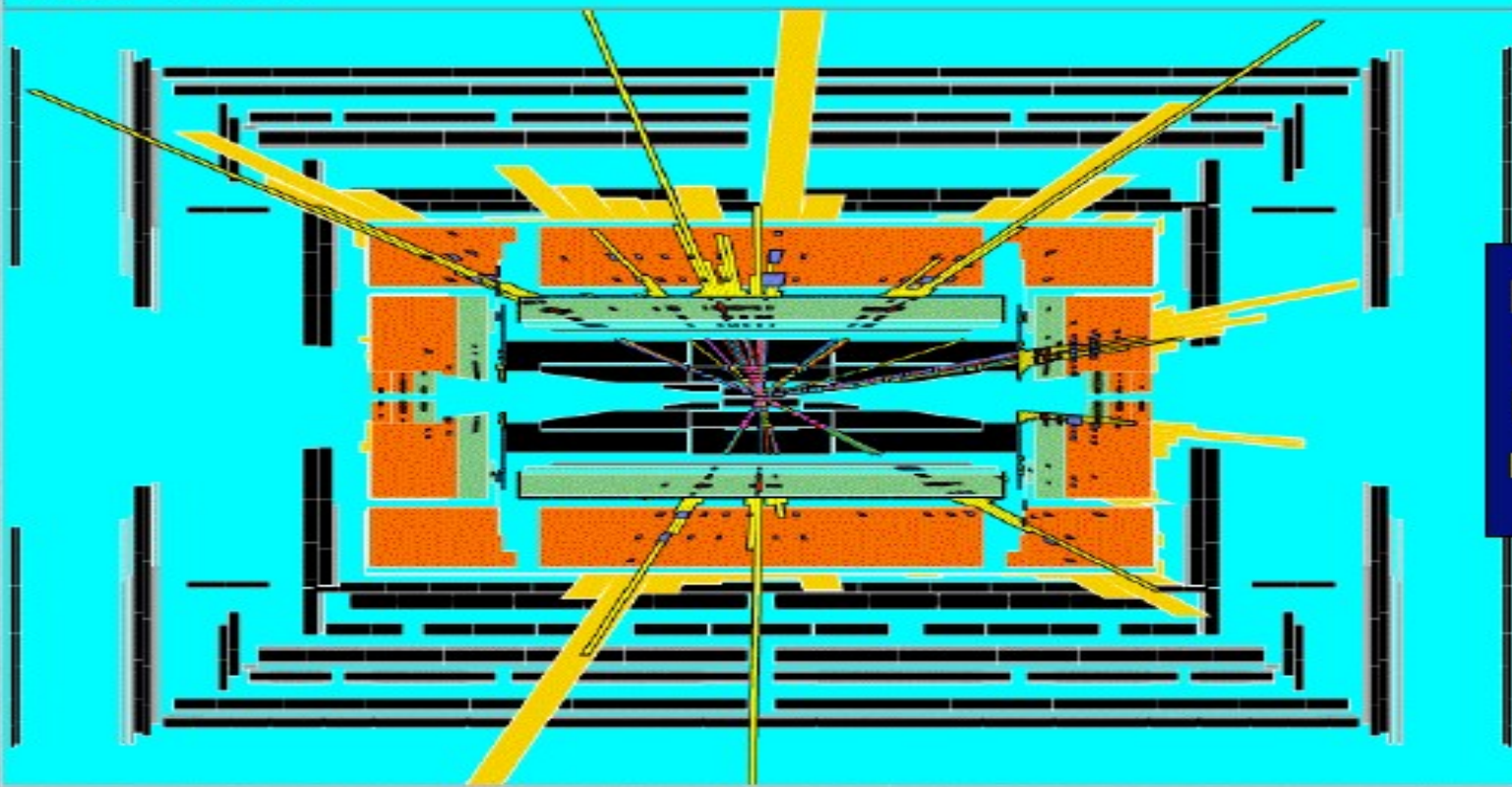


Značná část energie “chybí” - odnáší ji s sebou částice temné hmoty (nejlehčí SUSY částice), které neinteragují s detektorem

Typický supersymetrický event na LHC (CMS)

- Jedním z možných vysvětlení slabosti gravitace jsou extra dimenze
- Mnoho různých modelů, obecně předpokládají existenci dalších dimenzí prostoročasu
- Gravitace “žije” v těchto extra dimenzích, kde je stejně silná jako ostatní síly. Její projekce do našich 4 dimenzí je ovšem mimořádně malá.
- Na rozdíl od našich 3+1 dimenzí jsou extra dimenze “kompaktní” - mikroskopicky malé, svinuté uvnitř našeho prostoročasu
- Energie LHC odpovídá průzkumu vzorků o velikosti několika attometrů – může odpovídat novým dimenzím

Extra dimenze



Multiple jets,
leptons from
Hawking
radiation

- Extra dimenze mohou znamenat, že se gravitace stane silnou na TeV škále
- sražené protony se tak mohou ocitnout uvnitř svého Schwarzschildova poloměru a vytvořit miniaturní černou díru, která se okamžitě vypaří Hawkingovým zářením

Černé díry na LHC

- Původ hmotnosti je nejpalčivějším problémem současné částicové fyziky
- Potřebujeme nějaké řešení v oblasti $< 1 \text{ TeV}$
 - Higgs? SUSY ? Extra dimenze?
 - LHC napoví
- Celá řada dalších více či méně spekulativních teorií o fyzice za SM
 - i zde může LHC poskytnout významný příspěvek
- Zkrátka, LHC díky svému energetickému dosahu, obrovské luminositě a vyjímečně přesným detektorům poskytne vhled do celé řady otázek současné fyziky

Závěr