

Fyzika v experimente ATLAS

Základné otázky:

- Prečo je potrebný experiment ATLAS (a pod. experimenty)
- Čo bude predmetom skúmania ATLASu
- Naše miesto v ATLASe

Experiment ATLAS – dôvody

Posledná tretina 20. storočia - **veľký progres v teórii aj experimente!**

Teória

- Vytvorenie Štandardného modelu (SM) – elektroslabé zjednotenie , QCD.
SM so svojou kategorizáciou častíc a síl umožnil:
 1. kvalitatívne nový pohľad na fyzikálne procesy na úrovni mikrosveta aj megasveta (horúca fáza vesmíru).
 2. predokladal existenciu celého radu častíc ($W^\pm$, Z^0 , gluóny,...)
- Vytvorenie nových fyzikálnych koncepcií iducích za SM (GUTteórie, SuSy, Teória superstrún)

Experiment

- Došlo k významnému progresu (revolúcii) v technológii experimentu:
 1. Vznik elektronického experimentu– možnosť študovať procesy s veľmi nízkymi účinnými prierezmi.
 2. Nástup kolajderov (ISR, SPS, Tevatron, LEP,...) –prechod k štúdiu interakcií pri veľmi vysokých energiách.
- Experimentálny objav kvarkovej štruktúry hadrónov- objav c -, b - a t -kvarkov, experimentálne potvrdenie existencie $W^\pm$, Z^0 bozónov.

Požiadavky na súčasný experiment:

- Precízna EW-fyzika a QCD
- Štúdium neperturbatívnych QCD procesov
- Potenciál pre objav novej fyziky

Urýchľovače častíc

Large Hadron Collider (LHC)

Incidentné častice:	$p \rightarrow \leftarrow p$ 7 TeV $\otimes$ 7 TeV	$Pb \rightarrow \leftarrow Pb$ 574 TeV $\otimes$ 574 TeV
Luminozita ($10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$):	10^4	0.002
Čas medzi zrážkami (μs):	0.025	0.135
Obvod urýchľovača:	26.659 km	
Hlavné experimenty:	ATLAS (p-p) CMS (p-p) ALICE (Pb-Pb) LHCb (p-p, B-fyzika)	

→ Súčasné urýchľovače

	Zväzok	Luminozita ($10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Tevatron (Fermilab)	$p \rightarrow \leftarrow \bar{p}$ 0.9-1 TeV $\otimes$ 0.9-1 TeV	210
LEP I (CERN)	$e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$ 55 GeV $\otimes$ 55 GeV	11
(LEP II	100 GeV $\otimes$ 100 GeV)	100
SLC (SLAC)	$e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$ 50 GeV $\otimes$ 50 GeV	0.35
HERA (DESY)	$e^- \rightarrow \leftarrow p$ 30 GeV $\otimes$ 820 GeV	16
KEKB (KEK)	$e^- \rightarrow \leftarrow e^+$ 8 GeV $\otimes$ 3.5 GeV	10 000
PEP-II (SLAC)	$e^- \rightarrow \leftarrow e^+$ 9 GeV $\otimes$ 3.1 GeV	3 000
DAΦNE (Frascati)	$e^- \rightarrow \leftarrow e^+$ 0.51 GeV $\otimes$ 0.51 GeV	3 000 5(→50)

Štandardný model

Súčasný fyzikálny obraz sveta sa opiera o teóriu, ktorá sa nazýva **štandardný model (SM)**. SM zahŕňa v sebe nasledovné teórie:

- **Teóriu elektroslabých interakcií**

(Symetria Lagranžiánu: $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ vysvetľuje elektromagnetické javy a javy slabých interakcií (β -rozpady))

- **Teóriu silných interakcií (QCD)**

(Symetria Lagranžiánu: $SU(3)_c$ vysvetľuje sily pôsobiace medzi kvarkami (komponenty nukleónov), nukleónmi etc.)

Vyššie uvedené teórie sú kvantovými teóriami a veľmi dobre vysvetľujú všetky javy obklopujúceho nás sveta s výnimkou procesov súvisiacich s gravitáciou.

- ♠ **Gravitácia nie súčasťou SM !**

Fyzika pozná veľmi dobrú teóriu gravitácie - je ňou **Všeobecná teória relativity** – to však nie je kvantová teória.

(*Problémy s vytvorením kvantovej teórie gravitácie*)

Základné častice SM .

Podľa SM javy obklopujúceho nás sveta je možné vysvetliť pomocou istých základných častíc, ktoré je možné rozdeliť do 3 sektorov častíc:

- **Fundamentálne fermióny**

(Základné stavebné častice fyzického sveta – vytvárajú štruktúry: nukleón, atómové jadro, atóm, etc.; sú to fermióny platí pre nich Pauliho princíp)

- **Kvantá silových polí (intermediálne častice)**

(Bozóny (neplatí pre nich Pauliho princíp) sprostredkujúce interakcie medzi časticami)

- **Higsove častice**

(Interakcia častíc s Higgovým poľom dáva časticám hmotnosť)

Všetky fundamentálne častice boli experimentálne potvrdené (majú dobrý empirický status) až na Higgovu časticu. Hľadanie Higsovej častice a procesov s ňou súvisiacich je hlavnou úlohou súčasnej experimentálnej fyziky elementárnych častíc.

Fundamentálne fermióny



Príroda pozná len biele stavy !

*Typické kvarkové štruktúry: **mezóny** ($q\bar{q}$) a **baryóny** (qqq)*

Atóm: atómové jadro + elektrónový obal ($\Rightarrow$ elektróny)



nukleóny $\Rightarrow$ kvarky (protón $p \equiv uud$, neutrón $n \equiv udd$)

Kvantá silových polí



Higgsove častice

H (*Higgsov bozón*)

Vákuum je Higgsov kondenzát a interakcia častíc s ním dáva časticiam hmotnosť !

Ranný Vesmír

Kozmológia a elementárne častice

čas (sec)

0 ⇒ **Big Bang** - nekonečne horúci a hustý vesmír (?) ($T \sim 10^{15} \text{ K}$)

↓

⇒ **Epocha kvantovej gravitácie** (?)

↓

10^{-43} Vesmír vzniká z kvantovej gravitačnej fluktuácie.

↓

⇒ **Epocha GUT**

↓

10^{-34}

⇒ **Kozmická inflácia** (?) (každých 10^{-34} sec sa vesmír zdvojnásobil)

Obrovská energia inflatonovho poľa falošného vákua sa konvertovala na častice

↓

10^{-32}

⇒ **Kvarková epocha** (farebný svet)

↓

⇒ **Teplota** $\sim 3 \cdot 10^{15} \text{ K}$ (energia $\sim 200 \text{ GeV}$):

- Fázový prechod → Vznik Higgsovho kondenzátu → leptóny, kvarky, $W^{\pm}$, Z-bozóny nadobúdajú hmotnosť
- Vznik prebytku látky nad antilátkou ($\sim 1:10^{10}$)

↓

10^{-11}

⇒ **Teplota** $\sim 10^{15} \text{ K}$ (energia $\sim 100 \text{ GeV}$): ← Súčasný experiment

Obsah vesmíru: leptóny, kvarky, gluóny, $W^{\pm}$, Z-bozóny, fotóny

↓

↓

↓

10^{-5}

⇒ **Teplota** $\sim 10^{12} \text{ K}$ (energia $\sim 200 \text{ MeV}$):

“Confinement” kvarkov → formovanie hadrónov (protóny, neutróny, iné baryóny, mezóny → existujú len “biele” objekty .

↓

10^{-2}

⇒ **Teplota** $\sim 10^{11} \text{ K}$ (energia $\sim 10 \text{ MeV}$):

Termodynamickú rovnováhu tvoria : elektróny (e^{-}), pozitróny (e^{+}), neutrína (ν) a fotóny (γ);

Počet nukleónov je malý ($n/p = 10^{-9}$) protóny a neutróny sú v rovnováhe (50%:50%)

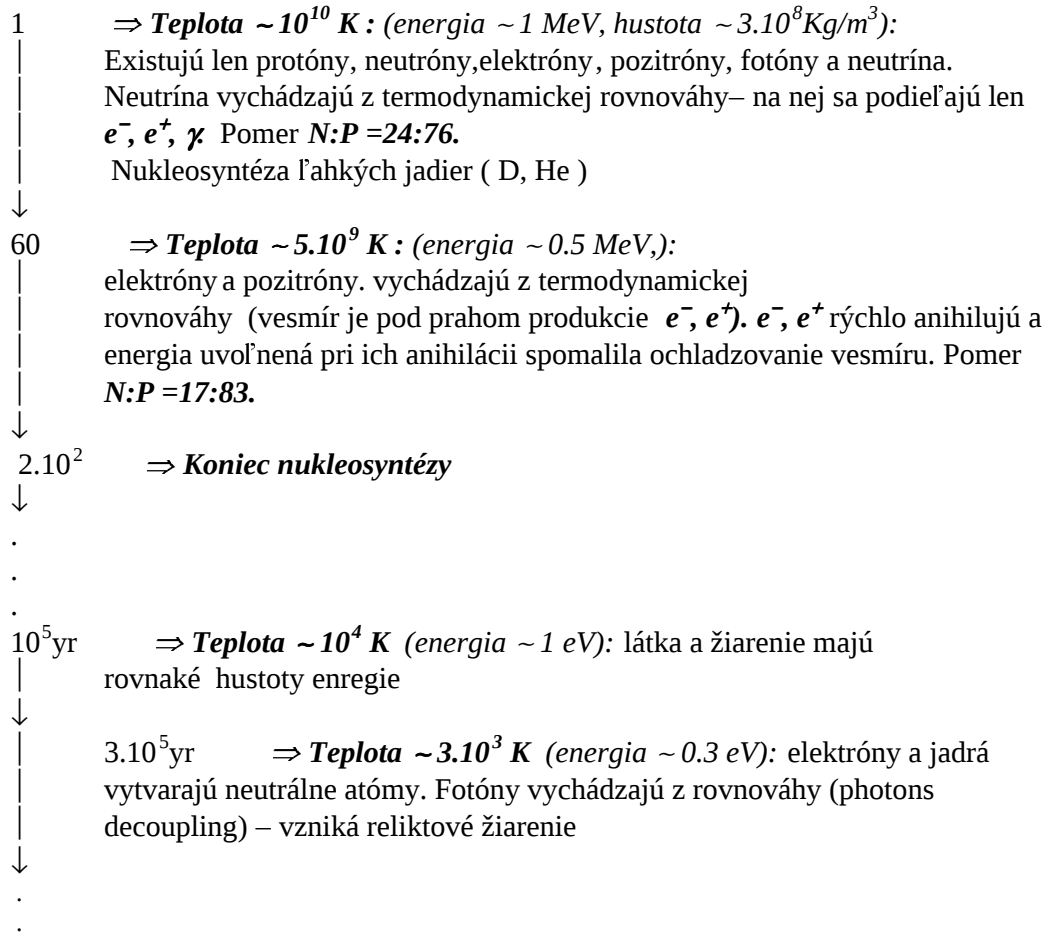
↓

10^{-1}

⇒ **Teplota** $\sim 3 \cdot 10^{10} \text{ K}$ (energia $\sim 3 \text{ MeV}$, hustota $\sim 3 \cdot 10^{10} \text{ Kg/m}^3$):

Obsah vesmíru: ako predtým ale pomer protónov a neutronov sa zmenil: 38% neutróny a 62% protóny, atómové jadrá ešte nevznikajú.

↓



Významným úspechom súčasnej fyziky je to, že umožňuje popísať evolúciu sveta od jeho prvopočiatku až po súčasnosť.

Vychádzajúc zo stavu dnes pozorovaného vesmíru a aplikujúc poznatky súčasnnej fyziky na projekciu evolúciu vesmíru v čase dozadu, fyzika prichádza k záveru, že na počiatku evolúcie bola singularita – t.j. nekonečne horúci a nekonečne hustý vesmír (Big bang = Veľký tresk). Táto udalosť nastala pred asi 15 miliardami rokov. Z toho momentu sa vesmír rozširuje.

V súčasnem svete sa jednoznačne pozorujú prejavy tzv. horúcej fázy vesmíru. Paradoxom sa javí to, že skúmanie najelementárnejších častíc štruktúry látky sa získavajú poznatky týkajúce sa vesmíru ako celku.

Súčasná experimentálna fyzika elementárnych častíc umožňuje skúmať procesy v horúcej fáze vesmíru v čase 10^{-11} s po singularite.

Základné úlohy fyziky na LHC

- ***Pôvod mechanizmu spontanného narušenia symetrie v elektroslabom sektore***
(*hľadanie Higgsovhovho bozónu + fyzika okolo*)

- ***Fyzika top-kvarku***
(*LHC $\sim 10^7$ tt-párov/rok $\rightarrow$ detailné štúdium t-procesov (účinné prierezy, rozpady)*)

- ***B-fyzika***
(*Štúdium narušenia CP symetrie, B^0_s -oscilácií; $B^0 \rightarrow J/\psi + K^0_s$,
 $B^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$, etc.)*

- ***Fyzika “za” Štandardným modelom***

$\Rightarrow$ ***Nové teórie:***

Technicolour (QTD) (*narušenie symetrie bez Higgsovhovho bozónu*),

GUT-teórie (SU(5) a vyššie symetrie, zjednotenie elektroslabých a silných interakcií)

SuperSymetria (*zahrnutie gravitácie, častica má supersymetrického partnera*)

Teória superstrún (fundamentálny objekt je superstruna existujúca v D - rozmernom časopriestore (D=10, 26) ; nadbytočné rozmery sú skompaktifikované, kompaktifikácie vedie k diskretným hmotnostiam)

- ♣ ***Hľadanie ľahkých W- a Z- bozónov***

(*$SU(2)_L \rightarrow SU(2)_L \otimes SU(2)_R \rightarrow$ existujú aj “pravé” intermediálne bozóny W_R a Z_{LR} ;
 $m(W_R) > 406$ GeV , $m(Z_{LR}) > 310$ GeV)*

- ♣ ***Kompozitnosť fundamentálnych fermiónov***

(*súčasný experiment: bodovosť častíc $< \sim 10^{-18}$ m*)

- ♣ ***SuSy častice***

(*Teória Super Symetrie zahŕňa aj gravitáciu;
kvark $\Leftrightarrow$ skvark , leptón $\Leftrightarrow$ sleptón ;
Higgsov sektor: $H^\pm$, H , h , A)*

Hľadánie Higgsovho bozónu

SM:

<i>Hmotnostný interval (GeV)</i>	<i>rozpad</i>
$90 < m_H < 100$	$H \rightarrow b\bar{b}$
$90 < m_H < 150$	$H \rightarrow \gamma\gamma$
$130 < m_H < 2m_Z$	$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l^\pm$
$m_H > 2m_Z$	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l^\pm, 2l^\pm 2\nu$
$m_H \leq 2m_Z$	$H \rightarrow WW, ZZ \rightarrow l^\pm \nu \text{ 2 jets, } 2l^\pm 2 \text{ jets}$

MSSM Higgs

$A \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow e\mu+2\nu+2 \text{ jets}$

$H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu \rightarrow 2 \text{ jets} +l\text{-tag} +b\text{-tag}$

2. O interakciách fundamentálnych fermiónov

Elektromagnetickú a slabú interakcia fundamentálnych fermiónov sa podarilo zjednotiť do univerzálnej elektroslabej interakcie.

Elektroslabá interakcie vykazuje lokálnu symetriu (spontánne narušenú) $SU(2)_L \otimes U(1)$.

Dôsledkom tejto symetrie je, že v systéme fundamentálnych fermiónov je elektroslabá interakcia sprostredkovaná :

- Kalibračnými bozónmi $W^{\pm 0}$ s väzbovou konštantou úmernou $T^{\pm 3}$ (generátory $SU(2)_L$, komponenty slabého izospinu)
- Kalibračným bozónom B^0 (nábojový singlet) s väzbovou konštantou úmernou Y (generátor grupy $U(1)$).

Zmiešavaním W^0 a B^0 vznikajú fyzikálne stavy neutrálnych kalibračných bozónov: Z-bozón (Z) a fotón (γ).

Interakcia fundamentálnych fermiónov s kalibračnými bozónmi

Interakčný lagranžian systému fundamentálnych fermiónov:

$$L_F^{\text{int}} =$$



+

Kde

m_f a Q_f sú hmotnosť resp. náboj fermiónu

e – elementárny náboj

$\theta_w \equiv$ uhol zmiešavania slabých interakcií :

$$Z_\mu = \cos \theta_w \cdot W_\mu^3 + \sin \theta_w \cdot B_\mu$$

$$A_\mu = -\sin \theta_w \cdot W_\mu^3 + \cos \theta_w \cdot B_\mu$$

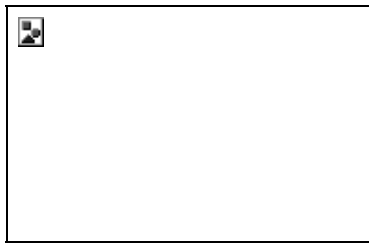
a väzbové konštanty neutrálneho prúdu (v_f a a_f) sú:

$$v_f = I_3^f - 2Q_f \sin^2 \theta_w \quad a_f = I_3^f.$$

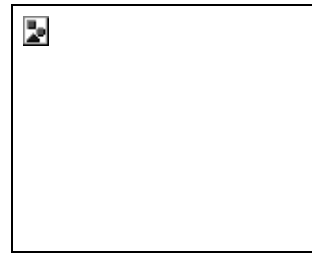
3. Precízna elektroslabá fyzika

3.1 Fermiho konštanty a parametre SM

Uvažujme rozpad miónu $\mu^- \rightarrow e^- \tilde{\nu}_e \nu_\mu$.



$M_w \gg m_\mu$



$$i \left(\frac{e}{2\sqrt{2} s_w} \right)^2 \frac{J_{CC}^{(\mu)} \cdot J_{CC}^{(e)}}{q^2 - M_w^2}$$

$\longrightarrow$

$$i \frac{G_F}{\sqrt{2}} J_{CC}^{(\mu)} \cdot J_{CC}^{(e)}$$

Kde $J_{CC}^{(l)} = \bar{u}_{\nu_l} \gamma_\mu (1 - \gamma_5) u_l$ je nabitý slabý prúd ($l=e,\mu$).

Dôležitý moment:

charakteristická škála slabých interakcií ($1/M_w$) $\ll$ charakteristická škála μ /rozpadu ($1/m_\mu$).

Vzťah medzi Fermiho konštantou a parametrami SM:

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{e^2}{8s_w^2 M_w^2} \quad (3.1)$$

Keď zo vzťahu (1) vypočítame M_w – dostaneme: $M_w = 77.6 \text{ GeV}$, zatiaľ čo experimentálna hodnota je $M_w = 80.419 \pm 0.056 \text{ GeV}$.

Dôvod rozdielu: nebrali sme do úvahy korekcie vyšších rádov!

3.2 Korekcie vyšších rádov, Δr vs t -kvark a H -bozón



$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{e_0^2}{8s_W^2 M_W^2} \left[1 + \frac{\Sigma^W(0)}{M_W^2} + (\text{vertex}, \text{box}) \right] \quad (3.2)$$

Kde

e_0, s_W^0, M_W^0 sú holé parametre (náboj, $\sin \theta_W$, hmotnosť Z)

$\Sigma^W(0)$ je vlastná energia W -bozónu.

Po renormalizácii, ktorá spočíva v tom, že vypočítame príspevky vyšších rádov a predefinujeme základné parametre, tj. prejdeme od holých parametrov e_0, s_W^0, M_W^0

k fyzikálne pozorovaným e, s_W, M_W , dostaneme:

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{e^2}{8s_W^2 M_W^2} (1 + \Delta r) \quad (3.3)$$

Kde Δr je konečná veličina závislá na e, M_W, M_Z, M_H, m_t predstavujúca výsledok zahrnutia vyšších rádov a dá sa vyjadriť ako

$$\Delta r = \Delta \alpha - \frac{c_W^2}{s_W^2} \Delta \rho + (\Delta r)_{rem} \quad (3.4)$$

kde $\Delta \alpha$ predstavuje korekcie 2. rádu k propagátoru fotónu od ľahkých fermiónov:

$$\Delta \alpha = -\text{Re} \hat{\Pi}^{\gamma}(M_Z^2) = \sum_f Q_f^2 \frac{\alpha}{3\pi} \left(\frac{5}{3} - \log \frac{M_Z^2}{m_f^2} \right) \quad (3.5)$$

$\Delta \rho$ predstavuje korekcie 2. rádu k propagátoru W bozónu :

$$\Delta \rho = N_C \frac{\alpha}{16\pi s_W^2 c_W^2} \frac{m_t^2}{M_Z^2} \quad (3.6)$$

($N_C=3$ je počet farieb).

$(\Delta r)_{rem}$ predstavuje všetky ostatné korekcie vrátane logaritmickej závislosti od hmotnosti t -kvarku a Higgsovho bozónu:

$$(\Delta r)_{rem}^{top} = \frac{\alpha}{4\pi s_W^2} \left(\frac{c_W^2}{s_W^2} - \frac{1}{3} \right) \log \frac{m_t}{M_Z} + \quad (\Delta r)_{rem}^{Higgs} = \frac{\alpha}{16\pi s_W^2} \frac{11}{3} \left(\log \frac{M_H^2}{M_W^2} - \frac{5}{6} \right) \quad (3.7)$$

Vzťah 3.4 je možné použiť na určenie hmotnosti t-kvarku - $\Delta\alpha = 0.0602 \pm 0.0009$, typická hodnota $(\Delta r)_{rem} \approx 0.01$. Výpočty dávajú:

$$m_t = 168.2^{+9.6}_{-7.4} \text{ GeV}$$

Poznámka 1. Vzťahy 4.7 umožňujú urobiť aj ohraničenie na hmotnosť Higgsovho bozónu.

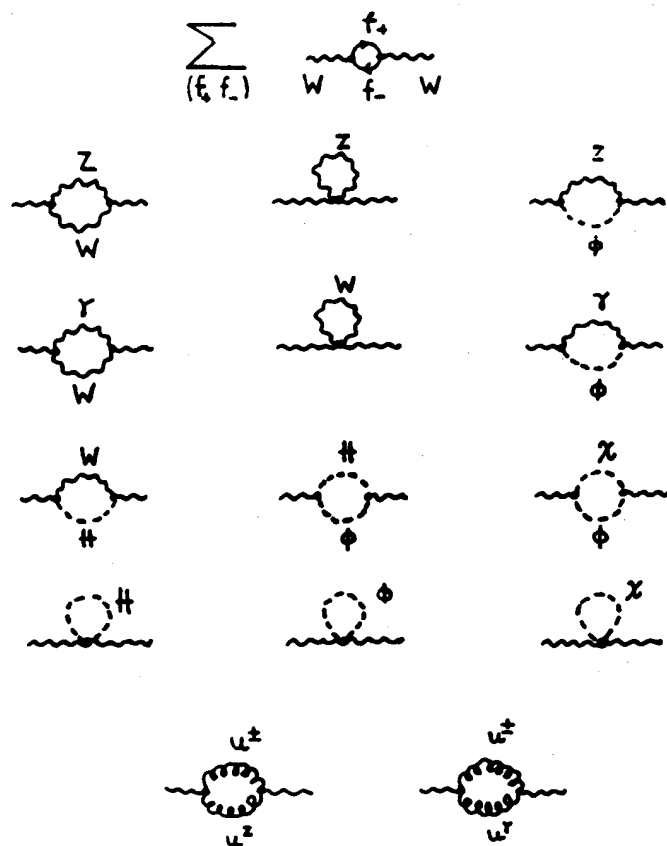
Poznámka 2. Efekty vyšších (všetkých) rádov poruchovej teórie je možné získať zámenou:

$$1 + \Delta r \rightarrow \frac{1}{1 - \Delta r}$$

	2000	At LHC start	LHC
ΔM_W [MeV]	56	30	15
Δm_t [GeV]	5.1	3.5	2

Eqivalentný chybový vklad: $\Delta M_W = 0.7 \cdot 10^{-2} \Delta m_t \rightarrow 30\%$ ohraničenie M_H

Dodatok1: Vlastná energia W-bozónu



Dodatok 2: Vertexové korekcie a korekcie typu „box“.

Vertexové korekcie



Korekcie typu box



Top kvark

1 Základné vlastnosti

Základné konštituenty látky

<i>leptóny</i>	<i>Q</i>	<i>T₃</i>	<i>Kvarky</i>	<i>Q</i>	<i>T₃</i>
$\nu_e \ \nu_\mu \ \nu_\tau$	0	1/2	u c t	2/3	1/2
e μ τ	-1	-1/2	d s b	-1/3	-1/2

Tab.1: Fundamentálne fermióny, $Q \equiv$ elektrický náboj v [e], $T_3 \equiv$ slabý izospin.

Hmotnosť t-kvarku: $m_{top} = 174.3 \pm 5.1 \text{ GeV}/c^2$

Objavený - kedy : 1995

Kde : Fermilab

1.1 Produkcia top kvarku

Základné mechanizmy produkcie t-kvark (v $p \bar{p}$ (pp)-zrážkach) sú (viď. Obr.1):

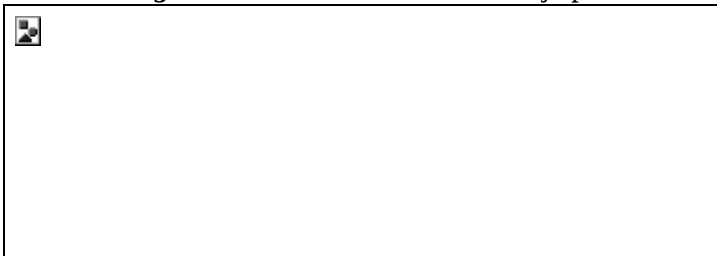
- Kvark-anitikvarková anihilácia
- Gluónová fúzia.



Obr. 1: Dominantné produkčné mechanizmy pre t-kvark.

Dominantné produkčné mechanizmy sú sprostredkované **silnými interakciami** a kvarky sú produkované v pároch ($t\bar{t}$).

Produkcia **singletného t-kvarku** sa uskutočňuje prostredníctvom **slabých interakcií** (Obr.2).

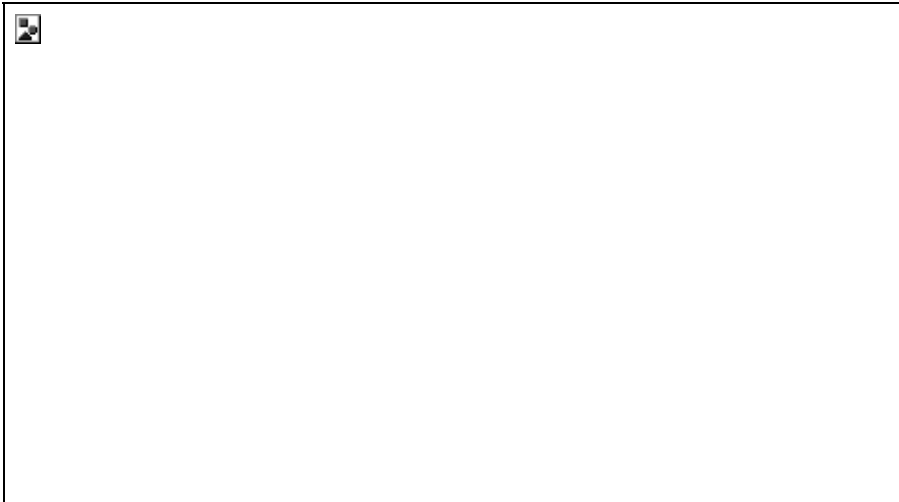


Obr. 2: Produkcia singletného t-kvarku via slabé interakcie: (a) s-kanálový proces ; (b) t-kanálový proces.

1.2 Rozpad t -kvarku

Vzhľadom na to, že hmotnosť t -kvarku ($\approx 175 \text{ GeV}$) je značne väčšia ako hmotnosť W -bozónu ($\approx 80 \text{ GeV}$), t -kvark sa rýchlo rozpadá bez toho, žeby hadronizoval.

Pri slabých prechodoch môže t prechádzať na b , s a d kvarky – intenzita prechodu je charakterizovaná elementom V_{tq} ($q=b,c,s$) matice CKM (Obr. 3). Pri 3 pokoleniach častíc rozpad t -kvarku ide výlučne cez kanál $t \rightarrow Wb$ ($V_{tb} \approx 1$).



Obr. 3 : Rozpad t -kvarku, amplitúda rozpadu $t \rightarrow Wq$ je úmerná elementu matice CKM (V_{tq}).

Rozpadová pološírka procesu $t \rightarrow Wb$:

$$\Gamma(t \rightarrow Wb) = \frac{G_F m_t^3}{8\pi\sqrt{2}} \left(1 - 3 \frac{M_W^4}{m_t^4} + 2 \frac{M_W^6}{m_t^6} \right) \approx 1.56 \text{ GeV}$$

$$\tau_{top} = \frac{\hbar}{\Gamma(t \rightarrow Wb)} = \frac{6.58 \cdot 10^{-25} \text{ GeV} \cdot \text{s}}{1.58 \text{ GeV}} \approx 4 \cdot 10^{-25} \text{ s}$$

Keďže,

$\tau_{hadr} \approx 10^{-23} \text{ s}$ platí: $\tau_{top} \ll \tau_{hadr}$, teda t -kvark sa rozpadne ešte pred sformovaním hadrónu.

Bratislava v ATLASe

- **Rekonštrukcia experimentálnej informácie z hadrónového kalorimetra**

Rozvíjame metódu umožňujúcu potlačiť efekt neskompensovanosti
hadrónového kalorimetra

Nekompenzovanosť kalorimetra: odozva kalorimetra na hadrón sa líši od
odozvy na $e^\pm \gamma$.

Pritom

podiel energie π^0 v interakciách hadrónov rastie ako $\log E$,
fluktuácie energie π^0 sú veľké.

Dôsledok:

- a) **zhoršenie rozlíšenia kalorimetra**
- b) nelineárnosť odozvy s rastúcou energiou

Kto:

R. Garabík, P. Šťavina, S. Tokár, T. Ženiš

- **Testovanie fotonásobičov metódou jedno-fotoelektrónovej analýzy**

Rozvíjame metódu umožňujúcu nájsť a kontrolovať základné parametre
spektrometrického kanála založeného na fotonásobiči.

Kto:

I. Fedorko, I. Sýkora, S. Tokár

- **Top fyzika**

Preštudovať možnosť priamej rekonštrukcie náboja t-kvarku pomocou
experimentu ATLAS