

Interakcie v jadrách: Úvod

Literatúra:

1. E.D. Commins, P.H. Bucksbaum, Weak interaction of leptons and quarks, Cambridge University Press 1983
2. L.B. Okun, Leptony i kvarki, Nauka Moskva 1981
3. Halzen Martin,
4. Moje prednášky:
<http://atlas.hep.dnp.fmph.uniba.sk/~tokar/Lectures/lect.html>

Stanislav Tokár

Univerzita Komenského

Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

Katedra jadrovej fyziky a biofyziky

Bratislava

Základné škály

Základné stavebné častice látky:

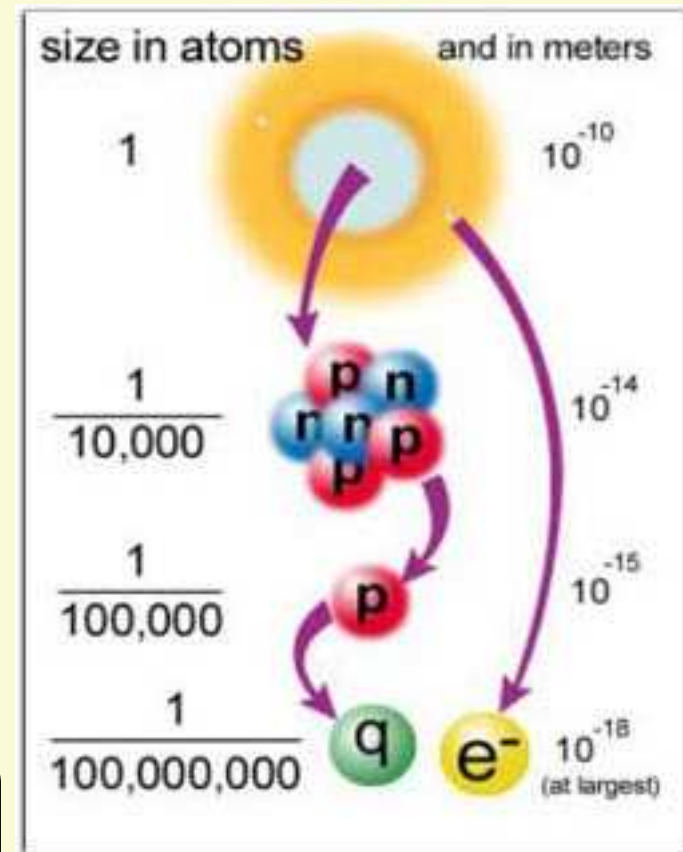
- **Elektróny** (atómový obal)
- **Kvarky** (nukleóny)

Elektróny a kvarky sú bodové častice.

Experiment:

bodovosť leptónov a kvarkov
 $< 10^{-18} \text{ m}$ (10^{-19})

Aký je počet elementárnych častíc?
Aké sily pôsobia medzi nimi?
A prečo je to tak?



Z histórie: čo sa vedelo pred 100 rokmi?!

Najmenšia častica látky je **atóm**.

Atóm: je homogenná guľa kladne nabitej hmoty, v ktorej plávajú elektróny (J.J. Thompson). $R \sim 10^{-10} \text{ m}$

J.J. Thompson: Na nebi fyziky sú **len 2 čierne body**:

1. spektrum žiarenia absolutne čierneho telesa
2. Špecifické teplo tuhých látok pri nízkych T

20. Storočie = revolúcia vo fyzike

Teória relativity (Lorentz, Poincare, Einstein R. 1905)

- čas a priestor sú vzájomne prepojené: pád absolutnosti času: v rôznych inerciálnych sústavách čas plynie rôzne.
- Energia vs hmotnosť: $E = mc^2$
- Filozofické zmeny v pohľade na svet → koncepcia časopriestoru

Všeobecná teória relativity (Einstein R. 1916)

- vlastnosti priestoru a času závisia od rozloženia hmotnosti (energie) → organické spojenie časopriestoru s hmotou.
- Reálny časopriestor je neeuklidovský → zakrivenie priestoru, spomalenie času pri hmotných telesách.
- Nestacionárne riešenie Einsteinových rovníc (Friedman 1917) expandujúci vesmír, počiatková singularita (Big Bang)

Začiatok 20. storočia: **Záhada atómu**

Existencia atómového jadra

→ priemer jadra:

1/10 000 priemeru atómu

→ hmotnosť jadra:

99.95% hmotnosti atómu.

Rutherfordov
experiment:
Rozptyl α +Au

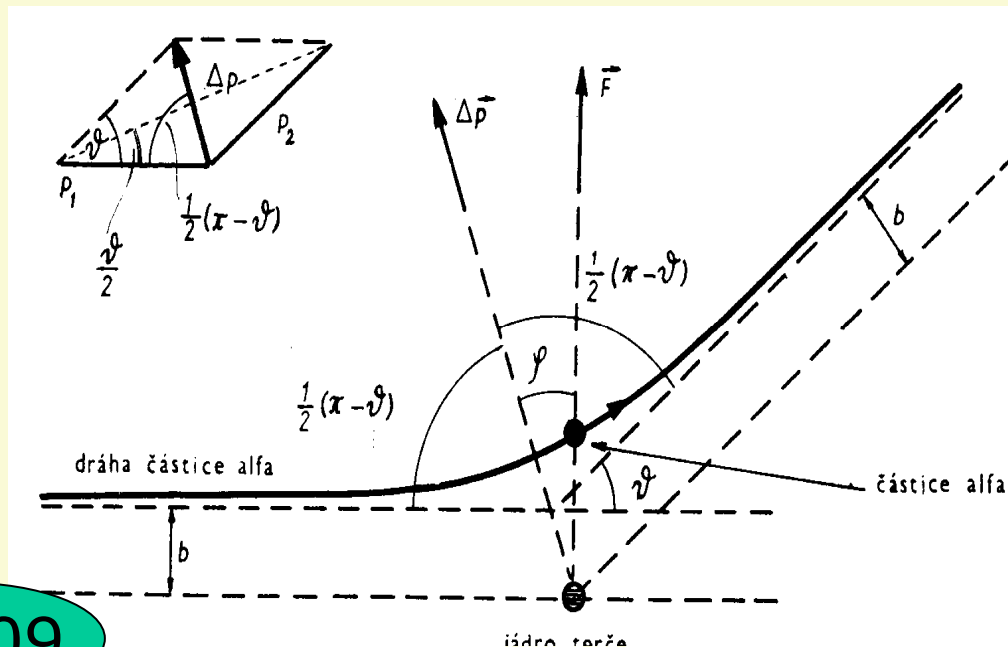
R1909

- Väčšina α -častíc sa nerozptyľuje
- Niektoré α -častice sa rozptyľujú aj na veľké uhly

Záhada atómu

↓
Kvantová teória

Protirečí Thomsonovmu modelu atómu: **$M_{\alpha} \approx 7000 \times m_{el}$**



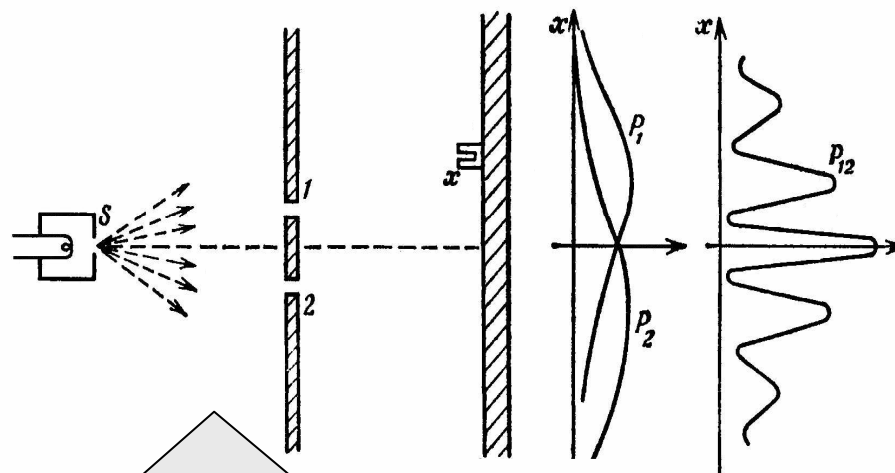
Kvantová teória- záhada atómu

Kvantová teória (Bohr, Schrodinger, Heisenberg, Dirac 1913- 1929)

➤ Princíp neurčitosti → indeterminizmus, pojem trajektorie stráca zmysel.

➤ KT vyriešila štruktúru atómu → nový pohľad na mikrosvet

➤ Vplyv KT:
Filozofické myslenie
Technológia



- elektrón sa správa ako vlna: $\lambda = p/h$
- pri registrácii ako bodová častica

... Obraz mikrosveta sa mení

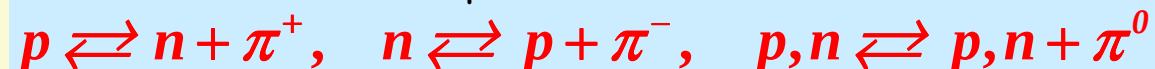
Ťažisko skúmania: **atómové jadro** (10^{-14} m)

- **Objav neutrónu** (Chadwick, 1932: neutrálne žiarenie vznikajúce pri ožarovaní Be, Li je tvorené neutrónnymi časticami s $M \approx M_{\text{proton}}$)

Atómové jadro je tvorené protónmi a neutrónmi

- Čím sú viazané nukleóny v jadre?

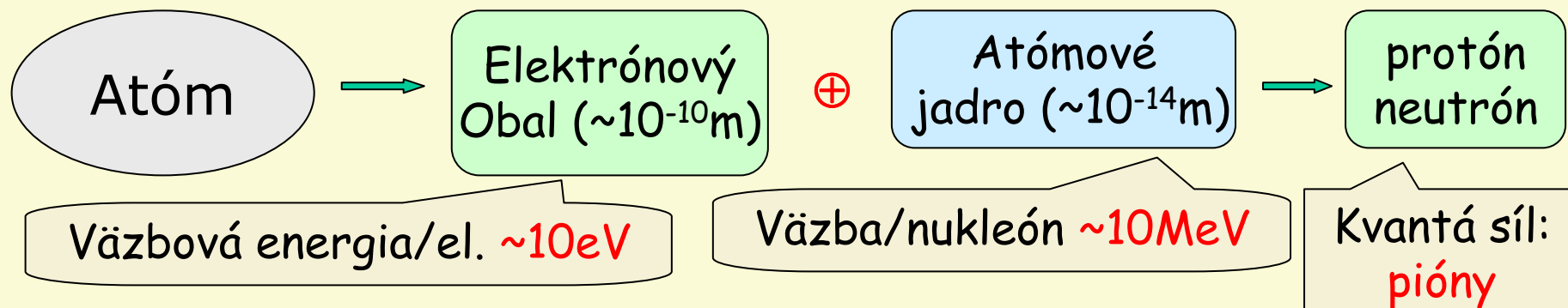
R. 1935, Yukawa: jadrové sily sú **výmenné sily** - nukleóny si vzájomne vymieňajú pióny, $m_{\text{pion}} \geq 200 m_{\text{el}}$, podľa schémy:



- Pri transmutácii jadier: uvoľnenie obrovského množstva energie (syntéza ľahkých jadier, štiepenie ťažkých jadier) → Hahn, Strassman, 1939: štiepenie Uránu → reťazová reakcia

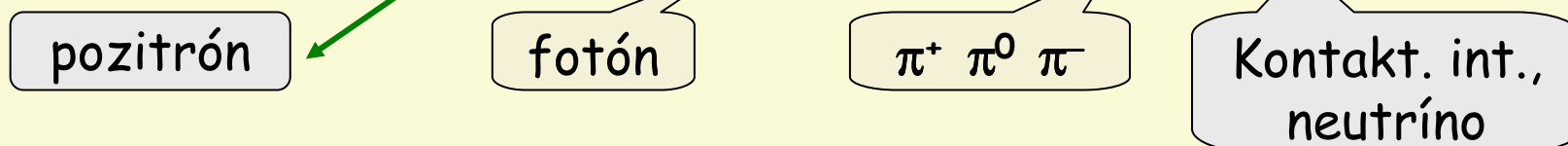
- ✓ **Objavenie pozitrónu** (Anderson, 1932) → existencia antičastice
- ✓ **Urýchlenie protónov** (Cockroft + Walton, 1932) → éra urýchľovačov

Obraz mikrosveta - koniec 30. R



Stavebné častice látky: **elektrón, protón a neutrón**

Sily prírody: **Gravitačná, elektromagnetická, jadrová a slabá**



Rozdiely vo väzbovej energii: **štepene t'ážkých jadier a**

syntéza ľahkých jadier $\rightarrow$ **uvoľnenie $\sim 10^6$ x viac** ako pri chem. proces.

Zdroj energie hviezd

Možnosť jadrových zbraní

Zdá sa: úplný obraz si žiada len nájst' pióny !!!???

Fyzika v 2. polovici 20. storočia

Objav π -mezónov (1950, v KŽ), ale

- Už predtým objav miónu ($m=207m_e$) - „zbytočná častica“ Načo?
- Rozvoj urýchľovačov: celý rad nových mezónov, baryónov, rezonancií

Poriadok v časticiach: Kvarková hypotéza (Zweig, Gell-Man 1963)

Pozorované častice a rezonancie

3 kvarky: u, d, s + anti- q

Koľko je kvarkov ?

Aké sily pôsobia medzi nimi?

Zjednotenie elektromagnetických a slabých síl (1968, Glashow, Salam, Weinberg) do elektroslabej interakcie (EW)

- Slabé sily sú vymenné sily sprostredkované W^+, W^- a Z -bozónmi
- Podstata zjednotenia: pri vysokých energiách W^+, W^- a Z a fotón sa spávajú ako rôzne formy jednej výmennej častice
- Kvarky musia vytvárať doublety: $(u, d), (\dots, s) \dots$

Posledná štvrtina 20. storočia

Experiment objavuje:

- kvarky c (1974), b (1977), t (1995)
- Kvanta slabých interakcií W^+ , W^- a Z -bozóny (1983)
- Nové leptóny: τ -leptón a neutrína ν_e , ν_μ , ν_τ
- Predpovede EW-teorie sú vo vynikajúcej zhode s experimentom

Čo viaže kvarky? $\longrightarrow$ Kvantová chromodynamika QCD (70.R):

- Sily medzi kvarkami sú sprostredkované 8 gluónmi
- Kvarky sa môžu vyskytovať v 3 nábojových stavoch (R,G,B)

Experimentálny prejav gluónov a kvarkov:

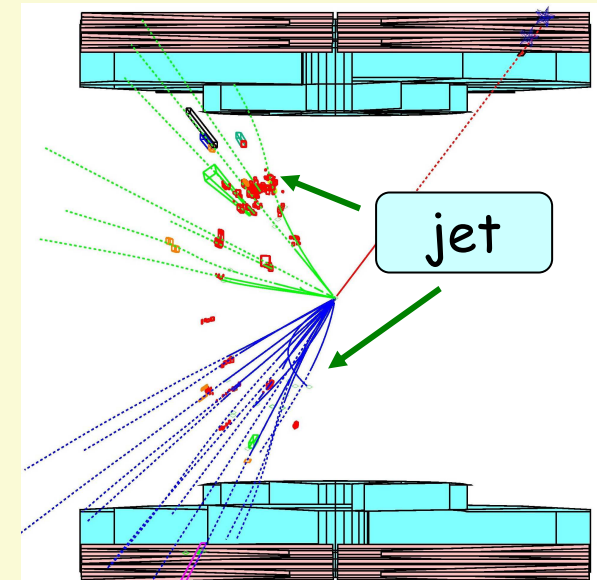
Jety $\rightarrow$ prúdy častíc pod blízkymi uhlami z rovnakého bodu.

Štandardný model

EW + QCD vynikajúca zhoda s experimentom

10/05/2007

S. Tokár, Interakcie v jadrách: Úvod



Štandardný model

Štandardný model (SM) je založený na kalibračných symetriách:

- častice sú kvantá polí
- Fyzikálny systém je systém polí s daným lagranžiánom
- Charakter interakcií závisí od symetrií lagranžiánu

- **Teória elektroslabých interakcií**

(Symetria Lagranžiánu: $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$)

elektromagnetické javy a javy slabých interakcií

- **Teória silných interakcií (QCD)**

(Symetria Lagranžiánu: $SU(3)_c$)

(sily pôsobiace medzi kvarkami, nukleónmi etc.)

- ✓ **Gravitácia nie súčasťou SM !**

(Problémy s kvantovou teóriou gravitácie)

Testy SM

χ^2 je rozumný
(nie však perfektný):

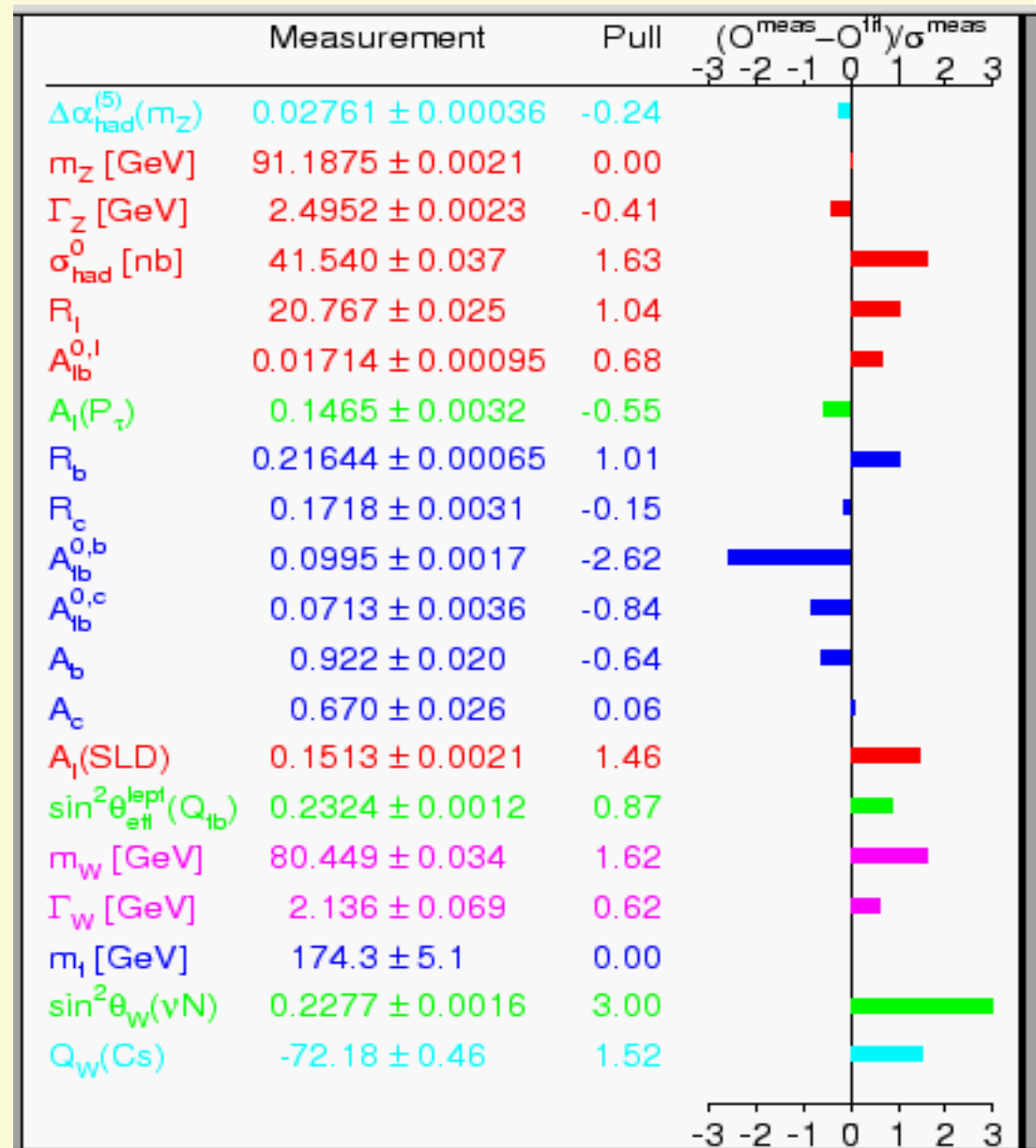
$$\chi^2/\text{ndof} = 29.7/15 \text{ (1.3\%)}$$

N.B.: včítane NuTeV a
APV

Bez NuTeV a APV:
(teor. chyba otázna)

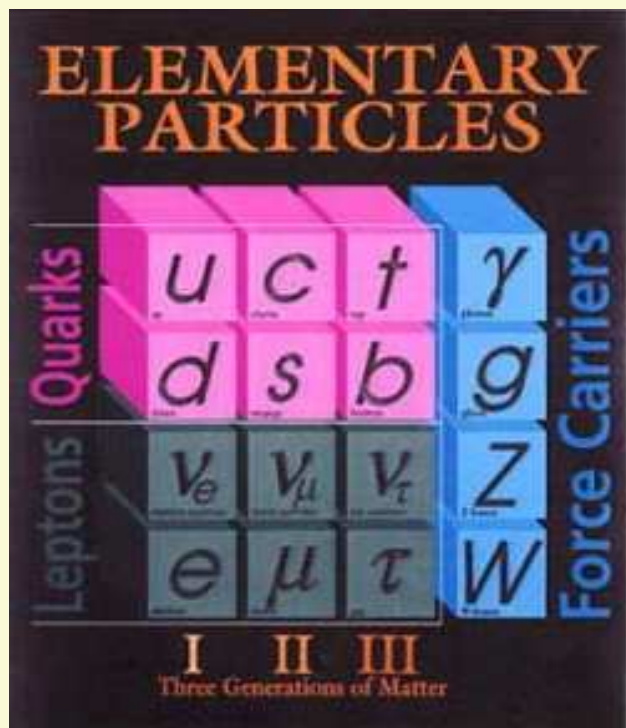
$$\chi^2/\text{ndof} = 18.2/13 \text{ (14.9\%)}$$

NuTeV $\longrightarrow$
APV $\longrightarrow$



Častice a sily prírody

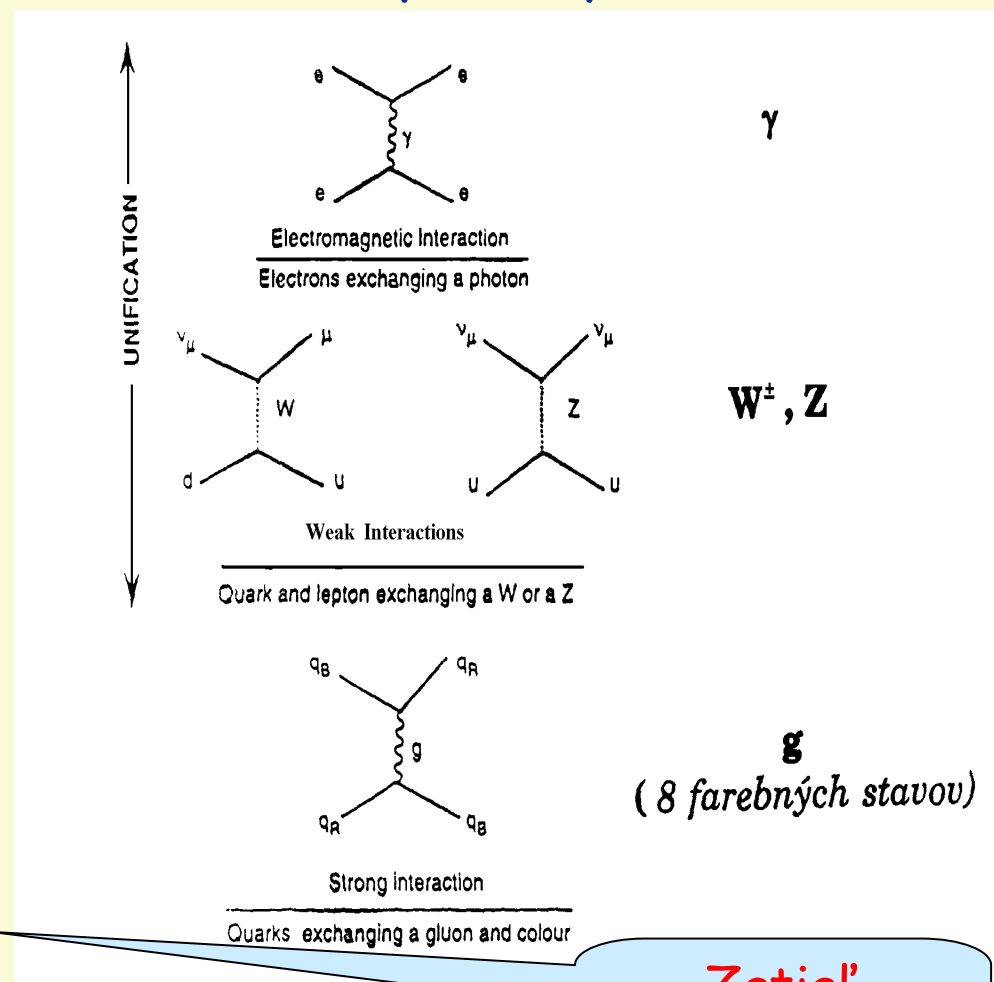
Sily sú sprostredkované vymennými časticami



? Higgsove častice
Vákuum=Higgsov kondenzát

10/05/2007

S. Tokár, Interakcie v jadrách: Úvod



Zatiaľ
neobjavené

Častice vs. ranný vesmír

čas (sec)

0

Big Bang ($T \sim -15 \cdot 10^9$)

10^{-43}

Vesmír vzniká z kvantovej gravitačnej fluktuácie?

10^{-32}

Kvarková epocha (farebný svet)

10^{-12}

$T \sim 3 \cdot 10^{15} \text{ K}$ ($E \sim 200 \text{ GeV}$):

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

Je treba 3 pokolenia častíc

10^{-11}

$T \sim 10^{15} \text{ K}$ ($E \sim 100 \text{ GeV}$): ← **Súčasný exp.**

Obsah vesmíru: leptóny, kvarky, gluóny, $W^\pm$, Z, fotóny

10^{-5}

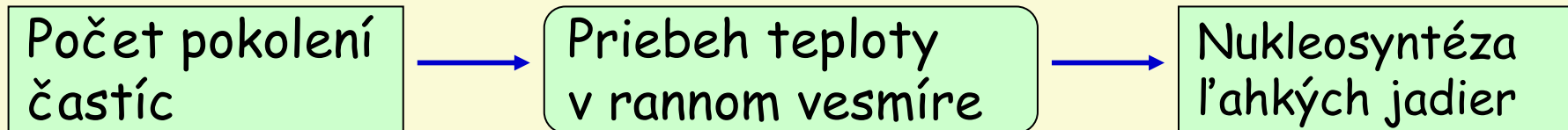
$T \sim 10^{12} \text{ K}$ (energia $\sim 200 \text{ MeV}$): "Confinement" kvarkov →
formovanie hadrónov (protóny, neutróny, iné baryóny, mezóny)

SM vs kozmológia

Vesmír ako na termodynamický systém častíc (rozpínajúci)
Vzťah medzi časom (vekom) vesmíru a jeho teplotou:

$$t(\text{sec}) = \frac{2.42}{\sqrt{N(T)}} \left(\frac{1 \text{ MeV}}{kT} \right)^2$$

$N(T)$ udáva počet efektívne nehmotných stupňov voľnosti fermiónov a bozónov, podieľajúcich sa na termodyn. rovnováhe



Astrofyzikálne pozorovania zastúpenia He, Be, Li, etc.:

Počet pokolení ≤ 4 , pravdep. počet pokolení = 3

Nespokojnosť so SM

- Veľký počet voľných parametrov – v min. verzii 18 parametrov, v plnej verzii 25-26 parametrov
 - SM nevysvetľuje hierarchiu hmotností častíc,
 - pôvod narušenia CP-symetrie nie je uspokojivo zodpovedaný,
 - nedáva odpoveď na otázku počtu generácií,
 - nezahrnuje gravitáciu.
-
- Vytvorenie nových fyzikálnych koncepcií iducích za SM (GUT-teória, SuSy, Teória superstrún)

Nové teórie

Technicolour (QTD) (narušenie symetrie bez Higgsovho bozónu)

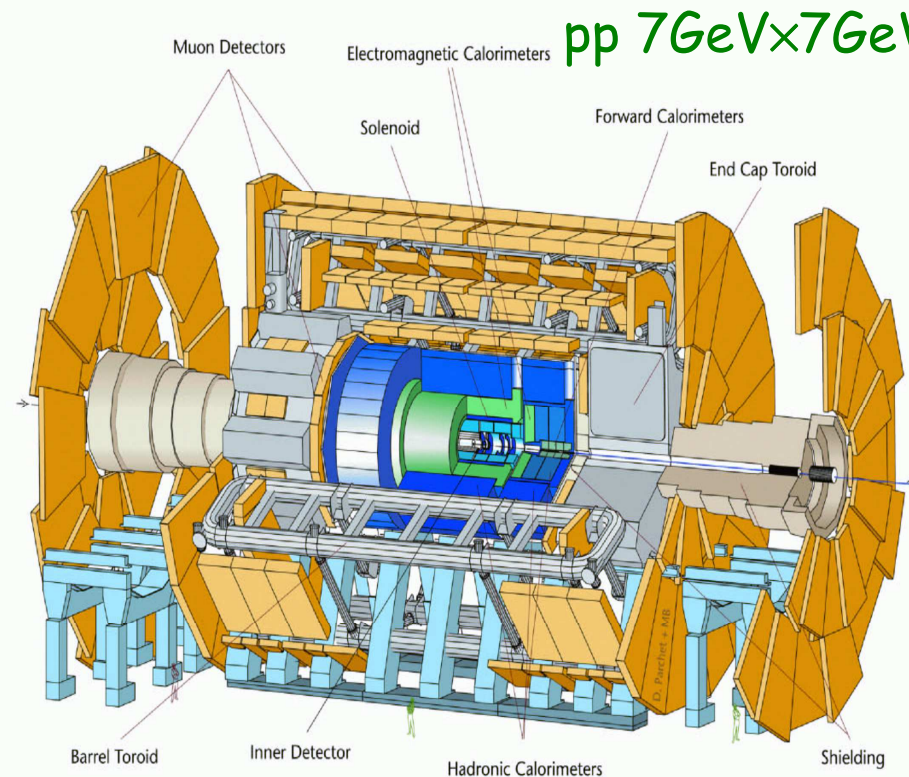
GUT-teória (SU(5) a vyššie symetrie, zjednotenie elektroslabých a silných interakcií, $M_{\text{scale}}=10^{15} \text{ GeV}$)

SuperSymetria (zahrnutie gravitácie, častica má supersymetrického partnera, $M_{\text{scale}}=10^{19} \text{ GeV}, 10^{-43} \text{ s}$)

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

ATLAS performance

Mnoho-účelový časticový detector (pokrytie do $|\eta|=5$, $L=10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)



- **Inner Detector**

$$\sigma/p_T \approx 0.05\% \cdot p_T (\text{GeV}) \oplus 0.1\%$$

Tracking range $|\eta| < 2.5$

- **EM Calorimetry**

$$\sigma/E \approx 10\% / \sqrt{E (\text{GeV})} \oplus 1\%$$

Fine granularity up to $|\eta| < 2.5$

- **Hadronic Calorimetry**

$$\sigma/E \approx 50\% / \sqrt{E (\text{GeV})} \oplus 3\%$$

Range: $|\eta| < 4.9$

- **Muon System**

$$\sigma/p_T \sim 2-7\%, \quad \text{range: } |\eta| < 2.7$$

Magnetické pole :

2T Solenoid + 3 air core toroids

Začiatok: 2007

10/05/2007

Precision physics in $|\eta| < 2.5$

Lepton energy scale: 0.02% ($Z \rightarrow ll$)

Jet energy scale: 1.0 % ($W \rightarrow jj$)

Základné úlohy fyziky na LHC

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

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

Prospekty QCD at 14 TeV (*Multijets, top production, p.d.f. sensitive processes*)

B-fyzika a iné procesy SM (*Štúdium narušenia CP symetrie, B^0_s -oscilácií; $B^0 \rightarrow J/\psi + K^0_s$, $B^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$, fyzika jetov (testovanie QCD) etc.*)

Precízne merania v rámci fyziky SM

W a Top hmotnosť, ohraničenie na hmotnosť Higgs bozónu via EW fyziku

Ako hľadať novú fyziku

♣ *Hľadanie pravých 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} ; $m(W_R) > 406 \text{ GeV}$,
 $m(Z_{LR}) > 310 \text{ GeV}$)

♣ *Kompozitnosť fundamentálnych fermiónov*

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

♣ *SuSy častice*

(Teória Super Symetrie zahrnuje aj gravitáciu;
 $\text{kvar} \Leftrightarrow \text{skvar}$, $\text{leptón} \Leftrightarrow \text{sleptón}$;
Higsov sektor: $H^\pm, H, h, A$)