

Program pre učiteľov fyziky z členských štátov CERNu

Fyzika elementárnych častíc

3. nekonečná

Martin Mojžiš

štandardný model teória elementárnych častíc



QED



QCD



QFD

teória elementárnych častíc

- kvantová teória (mrňavé častice)
- relativistická teória (veľké rýchlosti)
- spojenie: prekvapujúco ťažké
- ale dá sa to (za určitú cenu)

- výsledok sa volá

kvantová teória pol'a

kvantová teória poľa

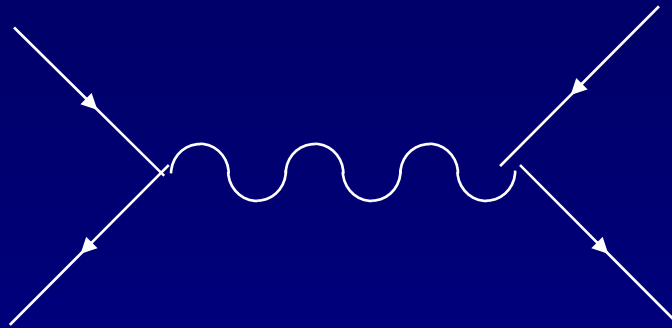
- je to teória častíc (nie polí)
- je to konceptuálne aj technicky náročná teória
- je to matematicky zle definovaná teória
- je to najpresnejšia teória, akú sme kedy mali
- príklad z kvantovej elektrodynamiky (QED)
magnetický moment elektrónu viazaného v atóme

$$g(\text{C}^{5+})_{\text{theo}} = 2.0010415901 \pm \dots 03$$

$$g(\text{C}^{5+})_{\text{exp}} = 2.0010415963 \pm \dots 54$$

Feynmanove diagramy

- komiksová forma výpočtov (v kvantovej teórii poľa)



- počítajú sa pravdepodobnosti rôznych procesov
- čiaram a vrcholom prislúchajú konkrétne faktory
- vonkajšie čiary sú určené procesom
- všetko ostatné je určené uvažovanou teóriou poľa

kvantová elektrodynamika

- dva typy čiar

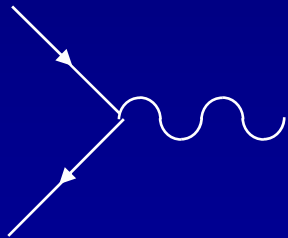


fermiónová (elektrón, mión, tau, kvark)



fotónová

- jediný typ vrcholu

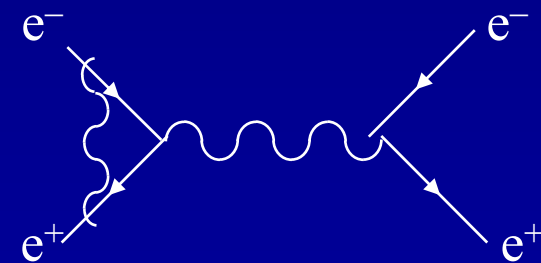
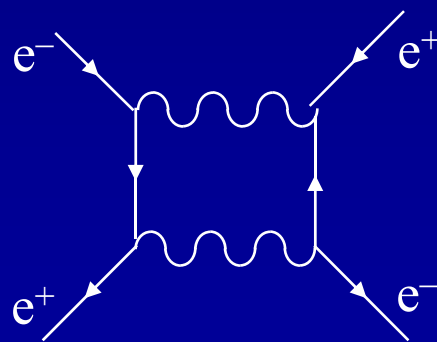
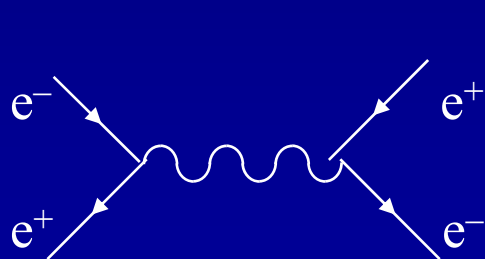


interakcia fermiónu s fotónom

Feynmanove diagramy kvantovej elektrodynamiky
sú zložené len z týchto vecí

príklad: diagramy pre $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$

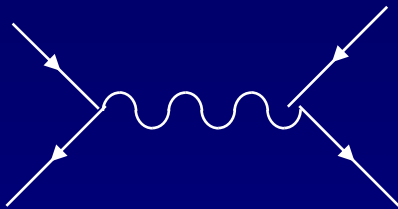
- na začiatku čiara pre e^+ a čiara pre e^-
- na konci čiara pre e^+ a čiara pre e^-
- medzi nimi všetko, čo sa dá poskladať z vrcholov a čiar danej teórie
- takých vecí je veľa, treba ich všetky sčítať



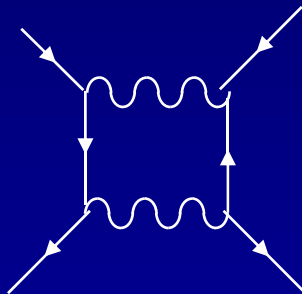
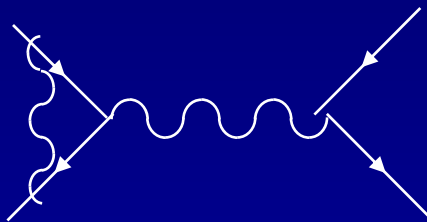
... a nekonečne veľa ďalších

viac a menej dôležité diagramy

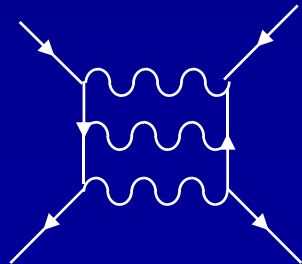
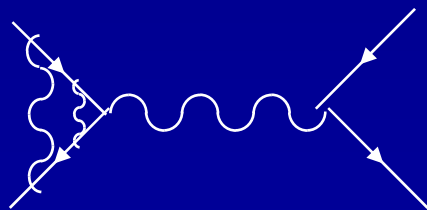
každá dvojica vrcholov dáva faktor $1/137$



niečo $\times 0.007$



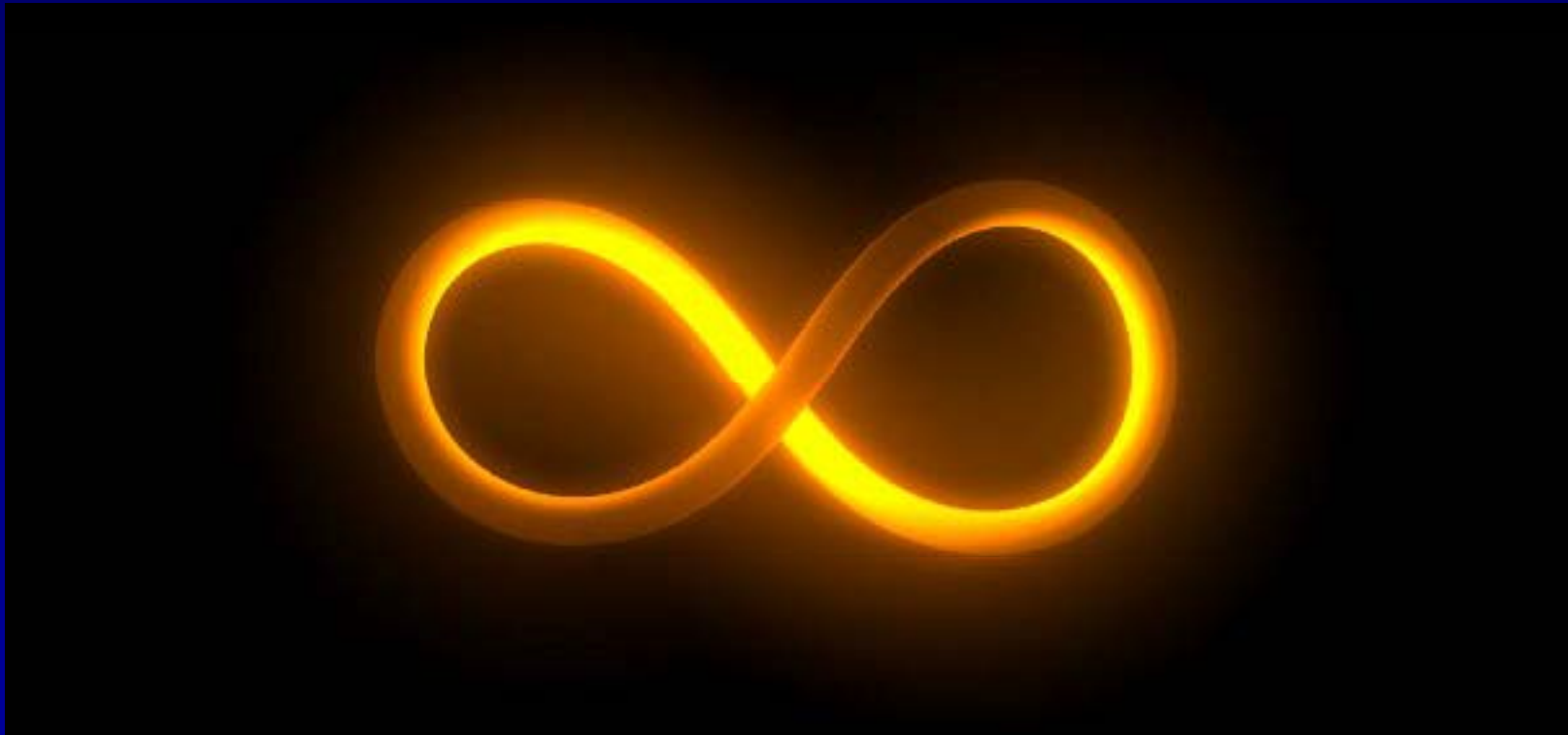
niečo $\times 0.00005$



niečo $\times 0.0000004$

drobný problém

- funguje to vtedy, ak tie „niečá“ nie sú príliš veľké
- v skutočnosti sú okrem toho prvého nekonečné



- takmer zabili kvantovú teóriu poľa ešte v zárrodku

... po pätnástich rokoch

nekonečná sú len
v medzivýsledkoch

ak vyjadríme merateľné
veliĉiny pomocou iných
merateľných veličín,
nekonečná zmiznú

renormalizovateľnosť

je renormalizovateľnosť bežná?

ó, nie

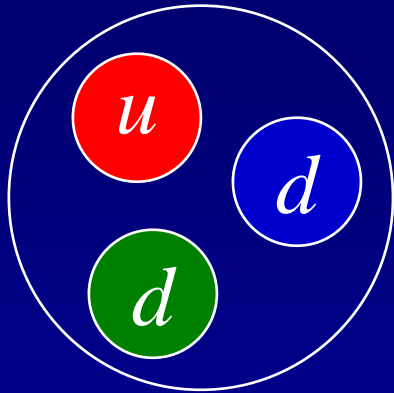
- väčšina kvantových teórií poľa nemá túto vlastnosť
- kvantová elektrodynamika je šťastná výnimka
- vieme prečo je práve ona renormalizovateľná?
- ó, áno

súvis so symetriami

- veľmi úzky
- QED má takzvanú $U(1)$ kalibračnú symetriu
- je to istý špeciálny typ symetrie (detaily vynecháme)
- kalibračné teórie poľa sú renormalizovateľné
- zaujímavá vlastnosť kalibračných teórií:
musia obsahovať časticu s nulovou hmotnosťou
- v kvantovej elektrodynamike je to fotón

a čo silné jadrové sily?

- aj tam sa podarilo nájsť renormalizovateľnú teóriu
- pri pokuse ukázať, že taká teória nemôže existovať



kvarky sú uväznené v hadrónoch
ale v rámci nich sú vlastne voľné
niečo ako väzni na väzenskom dvore
hovorí sa tomu asymptotická voľnosť

- môže byť nejaká kvantová teória poľa renormalizovateľná aj asymptoticky voľná?
- áno, ale musí to byť kalibračná teória

súvis so symetriami

- Gell-Mannova hypotéza kvarkov narazila už na začiatku na niekoľko problémov
- ktoré sa vyriešili zavedením nového kvantového čísla, ktoré dostalo meno farba
- keď ľudia prišli na to, že teória silných interakcií musí byť kalibračná, rýchlo našli vhodnú symetriu
- bola založená práve na onej farbe
- častice s nulovou hmotnosťou sú gluóny
- kalibračná symetria je takzvaná $SU(3)_c$ symetria

kvantová chromodynamika

- dva typy čiar

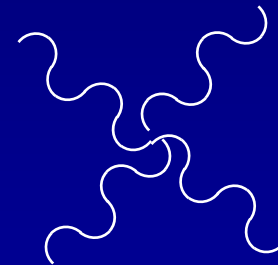
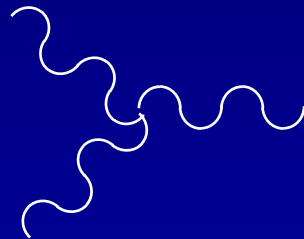
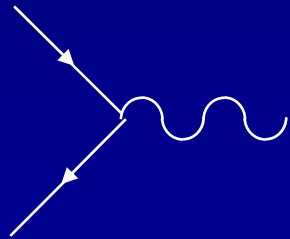


fermiónová (kvark)



gluónová

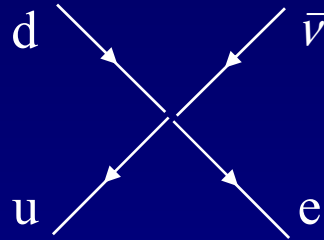
- tri typy vrcholov:



tieto spôsobujú uväznenie

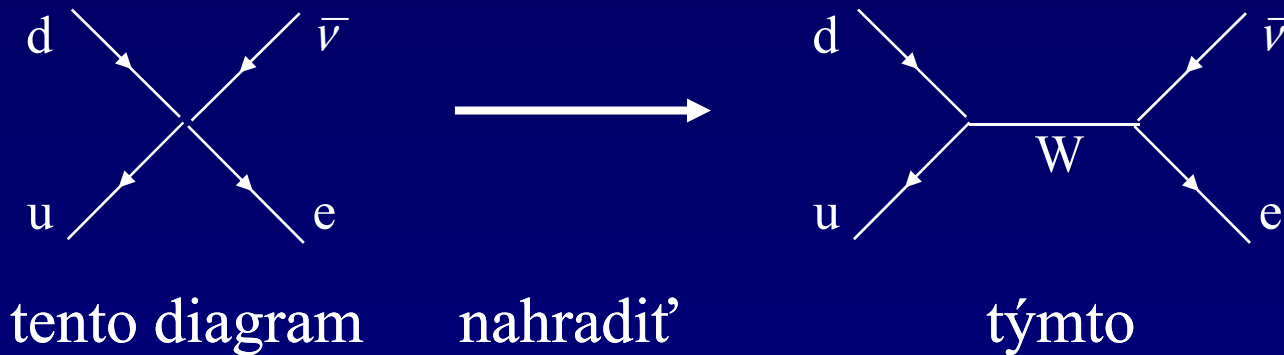
a čo slabé jadrové sily?

- dlho existovala takzvaná Fermiho teória
- jej vrcholy vyzerali takto:



- najjednoduchšie diagramy dávali výborné výsledky
- teória však nebola normalizovateľná

pokus o záchranu Fermiho teórie



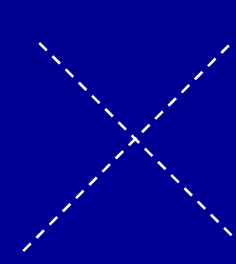
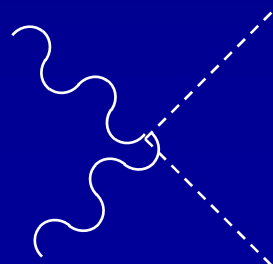
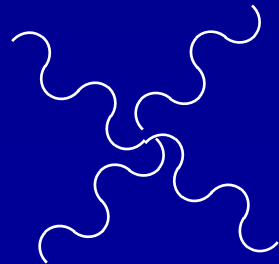
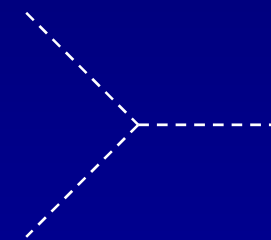
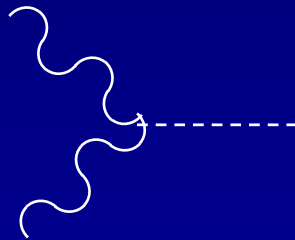
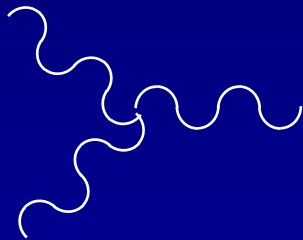
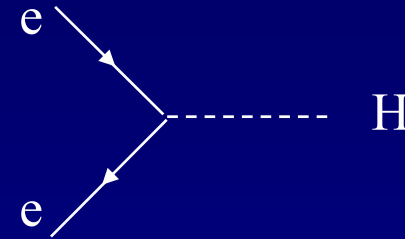
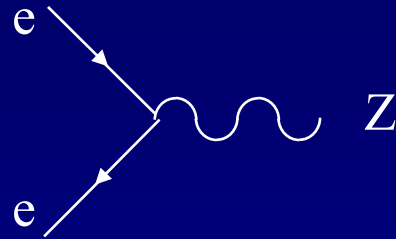
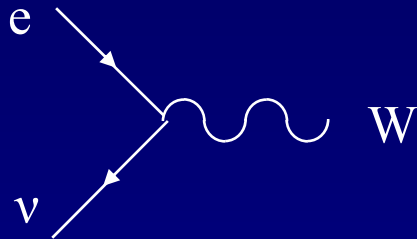
- ak je W veľmi ťažká častica, potom zreprodukuje dobré výsledky Fermiho teórie
- a zmenšíme problémy s nerenormalizovateľnosťou
- neodstránime ich však celkom
- teória je ešte stále nerenormalizovateľná

nemohla by to byť kalibračná teória?

- v kalibračnej teórii by W mala nulovú hmotnosť
- my však potrebujeme, aby mala veľkú hmotnosť
- dá sa z toho nejako vybrádnut'?
- dá, ale musí existovať ešte jedna častica, takzvaný Higgsov bozón
- Higgsov bozón dokáže dať W -časticiam (a aj iným časticiam) ľubovoľnú hmotnosť
- z Fermiho teórie sa tak stane renormalizovateľná GWS teória (kvantová flavordynamika)

kvantová flavordynamika

- strašne veľa typov vrcholov:



súvis so symetriami

- kalibračná symetria je takzvaná $SU(2)_w$ symetria
- tá vedie na dva W -bozóny a k nim ešte Z -bozón
- navyše je tu veľmi úzky súvis $U(1)$ a s fotónom
- Higgsov bozón sa objaví v hre v dôsledku tzv. spontánneho narušenia symetrie (detaily vynecháme)

štandardný model

teória elementárnych častíc



QED

$$SU(3)_c \times SU(2)_w \times U(1)_Y$$



QCD



QED

koniec