

Út az elemi részecskék felfedezéséhez és az e^-e^+ ütközések

Sinkovicz Péter

ELTE, MSc II.

2011. november 8.

Áttekintés

- 1 Bevezető
- 2 c kvark
 - V-A elmélet
 - GIM mechanizmus
 - c kvark kísérleti felfedezése
- 3 τ lepton
 - τ lepton felfedezése
- 4 b kvark
- 5 Gyenge kölcsönhatás
 - Higgs-mechanizmus
 - W^\pm felfedezése
 - Z^0 felfedezése

Bevezető

1974 előtt a Gell-Mann és Zweig által kidolgozott elmélet szerint a következő elemi részecskék vannak:

$$\begin{array}{ll} \text{kvarkok:} & u, d, s \\ \text{leptonok:} & e \quad \mu \\ & \nu_e \quad \nu_\mu \end{array}$$

A kvarkmodell szerint kvark szinglet kötött¹ állapotokat figyelhetünk meg a természetben. Ezek a kötött állapotok:

$$\begin{array}{ll} \text{barionoknak} & (q, q, q) \equiv 3 \otimes 3 \otimes 3 = 1 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 10 \\ \text{mezonoknak} & (q, \bar{q}) \equiv 3 \otimes \bar{3} = 1 \oplus 8 \end{array}$$

A leptonok azonban nem létesítenek kötött állapotokat.

¹szabad kvark a kvark-bezárás miatt nem figyelhető meg, szinglettől különböző állapotok tört töltést eredményeznének

Amikor úgy tűnt, hogy Gell-Mann kvarkelmélete helytálló, akkor kezdetét vette egy új tudományág, az ún. QCD. Az elmélet sikerességét a különböző kísérleti bizonyítok biztosították:

- Δ^{++} barion megtalálása
- Tömegformula

$$m_{\text{hadron}} = m_0 + m_1 Y + m_2 \left[(I + 1) I - \frac{Y^2}{4} \right] \quad (1)$$

által adott jóslatok kísérleti bizonyítékai:

PL.: barion oktet $((1/2)^+)$ -ben 4db különböző tömeg van (Nukleon, Σ , Λ , Ξ) és csak három egyenletünk, ebből a következő reláció áll fent a tömegekre:

$$\frac{1}{2} (m_N + m_\Xi) = \frac{1}{4} (3m_\Lambda + m_\Sigma) \quad (2)$$

amit 1%o pontossággal igazoltak

- 1962 - Taylor-Friedman-Kendall kísérlete 22GeV-en elektron-proton szórás mért. Az egy részecske elemisége erősen energia függő, így amíg alacsony energián vagyunk, addig nem látjuk a kisebb részecskék belső szerkezetét. Ez az energia azonban elég volt a proton letapogatására, mivel

$$\lambda \simeq \frac{\hbar c}{E} \quad (3)$$

$E \simeq 10\text{GeV}$ -en a proton is belső szerkezetet mutat. A proton alkotó részeit Feynman partonok-nak nevezte.

Azonban ezt az idillt Glashow és Bjorken elméleti jóslata (GIM mechanizmus) törte meg 1964-ben, mely szerint legalább 4 kvarknak kell létezni a természetben.

V-A elmélet

Az 1950-es években a paritás sértés kimutatására, az elméletisek megalkották az ú.n. V-A elméletet, mely szerint felírható egy olyan effektív Lagrange sűrűség ami tudja a paritás sértést:

$$\mathcal{L}_{\text{weak}} = -\frac{G_F}{\sqrt{2}} l^\alpha h_\alpha \quad (4)$$

ahol a lepton-áram kvark szinten: $l^\alpha(x) = \bar{l}(x)\gamma^\alpha(1 + \gamma_5)\nu_l(x)$ és a hadron áram pedig: $h_\alpha(x) = \bar{h}(x)\gamma^\alpha(1 + \gamma_5)h'(x)$.

Látható, hogy a $(\gamma\gamma_5)^2$ -ből képzett pszeudoskalár leírja a paritás sértést.

Ha a V-A elméletből az s,d kvarkok hatáskeresztmetszetét meghatározzuk, akkor az nagyságrendekkel eltér a mért kísérleti értékektől.

GIM mechanizmus

Tegyük fel, hogy létezik egy új kvark (charm) ami $2/3e^-$ töltéssel és egyenlőre tetszőleges tömeggel rendelkezik.

Ekkor a hadron-áramban új tagok jelennek meg, amik leírják a $c(x)$ áramlását. Így a teljes átmeneti valószínűségben megjelenik az charm kvark tömege:

$$|M|^2 \propto \frac{G_F^2}{16\pi^2} m_c^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta \simeq 10^{-7} \quad (5)$$

amiből a $m_c \simeq 1.5 GeV$. Ezt a számolást Mary K. Gaillard vezette.

Mary eredménye rámutatott arra, hogy milyen energiaskálán érdemes vizsgálni, azonban a kísérleti ellenőrzésre majd 10 évet várni kellett.

'Mindig boldogan vacsorázom elméleti emberekkel, de nem vagyok hajlandó fecsérelni az időmet, hogy a tanácsaik szerint dolgozzak'

c kvark kísérleti felfedezése

Csaknem egyszerre 1974-ben fedezték fel Ting vezetésével Brookhavenben és Richter vezetésével Stanforban (SLAC), hogy $e^- - p^+$, illetve $e^- - e^+$ ütközésekkor 3095 MeV energiánál a keletkező hadronok száma ugrásszerűen megnő.

Az így talált részecskét J , illetve ψ -nek nevezték, amit később egy Salamoni döntéssel J/ψ -nek kereszteltek át.

A J/ψ részecske bomlási rátája meglehetősen kicsinek bizonyult

$$\Gamma_{J/\psi} = 6.3\text{keV} \quad (6)$$

Ez az érték úgy volt magyarázható, hogy a J/ψ részecske nem egy részecske, hanem a $c\bar{c}$ mezon, más néven charmonium, ekkor ugyanis a $c\bar{c} \rightarrow$ hadron bomlás csak három gluon cserével írható le

$$\Gamma_{J/\psi} \propto \alpha_{\text{QCD}}^3 \quad (7)$$

A SLAC kutatói elektron és proton ütközésével keltettek virtuális fotonokat, a brookhaven kutatói szétfröccsentették a protont és a káoszból egy elektron-pozitron annihilálódt és fotont keltettek. Majd mindkét kísérletnél a foton keltett charmoniumot.

A kis tömegű részecskék gyorsulás hatására több energiát sugároznak szét, a Liénard-Wiechert elmélet szerint ez ponttöltés esetén:

$$P = \int df S = \frac{q^2}{6\pi\epsilon_0} \frac{1}{m^2 c^2} \left(\frac{dE}{dx} \right)^2 \quad (8)$$

ahol dE/dx a külső erők járuléka.

Így az első kísérletben lineáris gyorsítót használtak, hogy elkerüljék a nagy sugárzási veszteséget.

Töltések gyorsítása: homogén elektromos térrel: Ed , szinkrotron, plazma frekvenciás gyorsítás (relativisztikus mozgásnál a B^2 -es tag nem hanyagolható el \rightarrow mintegy megsiklathatóak a részecskék az EM hullámokon (10 – 20Gev))

A charmonium elmélet igazolásához kellett egy olyan részecskét találni aminek nincs kioltva a bájosság tulajdonsága. 1976-ban találtak (SLAC) is egy ilyen részecskét: $D^0 = (c\bar{d})$. Ez a legkönnyebb bájos részecske.

A D^0 megtalálása után elfogadott lett a modell, így tehát helyre állt a 4x4-es szimmetria. És a következő elemi részecskéket ismerték el:

kvarkok	
up	charm
down	strange
leptonok	
ν_e	ν_μ
elektron	müon

Első nemzedék (első oszlop) a mai világunk alkotója, illetve második nemzedék (második oszlop) nagy energiákon jelentős

τ lepton felfedezése

A c kvark felfedezése után elfogadott lett a kvark modell, így gyors magyarázat érkezett az 1975-ben Martin Perl által mért anomális jelenségre:

$$e^+e^-|_{s=4\text{GeV}} \rightarrow e^-\mu^+ + \dots \quad (9)$$

A mérés során látható volt hogy, az elektron és müon mellett még kell részecskéknek lenni, mivel az energia különben nem maradna meg. Azonban nem detektáltak semmilyen más részecskét (töltöttet).

Valamint az is látható, hogy a leptonszám se marad meg.

A bomlást úgy magyarázta, hogy rövid időre keletkezik egy: $\tau^+\tau^-$ pár ami gyenge bomlással elbomlik

$$\tau^+ \rightarrow e^-\nu_e+\nu_\tau \quad (10)$$

$$\tau^- \rightarrow \mu^+\nu_\mu\nu_{\tau^-} \quad (11)$$

így 4 neutrínó szerepel a (9.) egyenlet hiányzó részében. 

Martin Perl felfedezése után hosszú vita következett az új nehéz lepton és a harmadik leptoncsalád létezésének kérdésével kapcsolatban. Csak DESY-ben (Deutsches Elektronen Synchrotron, Hamburg), a DORIS tárológyűrűben a PLUTO mágneses detektorral 1977-ben folytatott kísérletek győzték meg teljesen a fizikusokat a lepton létezéséről.

Martin Perl az aacheni 1976-os neutrínókonferencián nevezte el az új nehéz részecskét t-leptonnak a görög triton (harmadik) első betűje a t után, ami a harmadik leptoncsaládra utal.

Azonban a ν_τ -t csak 2000-ben sikerült azonosítani, direktbe megfigyelni (mégpedig úgy hogy nem látjuk őket...). Kozmikus neutrínó mérés során a neutrínó oszcilláción túli neutrínó hiányt is megfigyeltek, mivel a ν_τ -t nem detektálták.

b kvark felfedezése

1975-re a Fermilab átalakul és a J/pszi 3.1GeV-es felső energia korlátjától 25GeV-es ütközéseket is tudott vizsgálni. Lederman vezetésével megismételték a J/pszi kísérletet és magasabb energián megtalálták az Υ részecskét (azonban 6GeV-en találtak egy hopsz-leon részecskét is és a publikáció után derült ki, hogy fake), amit már nagy gyakorlattal be tudtak azonosítani egy ú.n. szépségiumnak ($b\bar{b}$), aminek a tömege:

$$m_b = 4.1\text{GeV} \quad (12)$$

..., és később valamilyen félre értés során ezt a hangulatos nevet háttérbe szorította egy másik; a bottom elnevezés, ami legfőljebb egy-két női napozó esetén jelenti ugyanazt, mint a beauty...

Lederman

A beauty kvark felfedezésével már kirajzolódott a három generáció,

kvarkok		
up	charm	?
down	strange	beauty
leptonok		
ν_e	ν_μ	ν_τ
elektron	müon	tau

azonban a szimmetriát kiegészítő top kvarkot még nem találták meg, de teljesen elfogadott lett hogy valahol léteznie kell.

Majd 2001-ben a Tevatronban (Fermilab) az előzőekkel hasonló mérésekkel felfedezték a top kvarkot is ($m_\tau = 171\text{GeV}$).

Gyenge kölcsönhatás

Az elektromágneses folyamatok leírásának (pl. g mérés) sikerességén felbuzdulva a gyenge kölcsönhatást is hasonló keretek közt kezdték tárgyalni, azonban a véges hatótávolság miatt

$$R = \frac{\hbar}{mc^2} \simeq 10^{-19} \quad (13)$$

a közvetítő részecskékhez (igen nagy) tömeget kell rendelni.

A folyamatok leírására Schwinger két mértékbosont vezetett be W^\pm . Majd később semleges áramokat is megfigyeltek és ezekhez a Z^0 -t csatolták.

Ahhoz hogy a W, Z bosonok valódi mértékterek lehessenek ($SU(2)$), ahhoz tömegteleneknek kéne lenniük.

Ennek az ellentmondásnak a kiküszöbölésére egy magyarázatot jelent, a Higgs-mechanizmus. Amit Peter Higgs talált ki az 1960-as évek végére, és Steven Weinberg dolgozta ki részletesen. Ez egy újabb részecske létezését jósolta meg, az úgynevezett

Higgs boszont

Higgs-mechanizmus

Globális szimmetria spontán sérülése esetén létezik egy kvázi részecske, az úgynevezett Goldstone boson. Spontán sérül egy szimmetria, ha $UHU^\dagger = H$, de $U|0\rangle \neq |0\rangle$.

$$|B\rangle = \phi_B|0\rangle = U\phi_A U^\dagger|0\rangle = U\phi_A|0\rangle = U|A\rangle \quad (14)$$

ha $|A\rangle = |0\rangle$ és $|B\rangle \neq |0\rangle$ akkor látható hogy létezik egy olyan töltés, ami nem tünteti el a vákuum állapotot. Hiszen folytonos szimmetria esetén a töltések generálják a transzformációt:

$$U = e^{i\epsilon^a Q_a} \quad (15)$$

ami infinitezimális: $U|0\rangle - |0\rangle \simeq \epsilon^a Q_a|0\rangle \neq 0$. Ami viszont azt jelenti, hogy létezik olyan mező aminek a vákuum várható értéke nem nulla és a mező egy skalártér (Lorentz-invariancia miatt):

$$\langle 0|[Q^a, \phi_i(0)]|0\rangle = it_{ij}^a \langle 0|\phi_j(0)|0\rangle = it_{ij}^a \eta \quad (16)$$

Szeretnénk, ha a mezők vákuum várható értéke nulla lenne, így bevezethetünk az előző skalár tér helyett egy η -val eltolt teret, aminek a vákuum várható értéke már nulla. A Lagrange függvényben ez az eltolás egy tömeg tagot eredményez.

A Goldstone tétel 0 tömegű részecskét jósol, azonban a nem lineáris szigma modellből láthatóan egy tömeges részecske is felruházhatja a többi részecskét tömeggel.

A Higgs-bozon maga is rendelkezik tömeggel. A LEP gyorsító eredményei alapján jelenleg 95%-os biztonsággal állítható, hogy a Higgs, ha létezik, akkor nem kisebb 117 GeV-nél. Az őt leíró elmélet ellentmondásossá válik 251 GeV tömeg fölött.

W^\pm felfedezése

Ezek a bosonok felelősek a töltött folyamatokért, a β -bomlás a következő képen magyarázható az elektrodinamikához hasonló eszközökkel:

$$\text{nukleon szinten: } n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (17)$$

$$\text{kvark szinten: } d \rightarrow W^- + u \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + u \quad (18)$$

Az átrendezett folyamatban vesz részt a W^+ :

$$u^{+2/3} \rightarrow d^{-1/2} + W^+ \rightarrow d^{-1/2} + e^+ + \nu_e \quad (19)$$

Végül az SPS-ben találták meg a W^+ bosont $p + p$ ütközésben, $p + p$ ütközésben nagyobb energiát érhetünk el, azonban a végállapotban sok részecske keletkezik és abból kell kiválogatni a megfelelőt.

Z^0 felfedezése

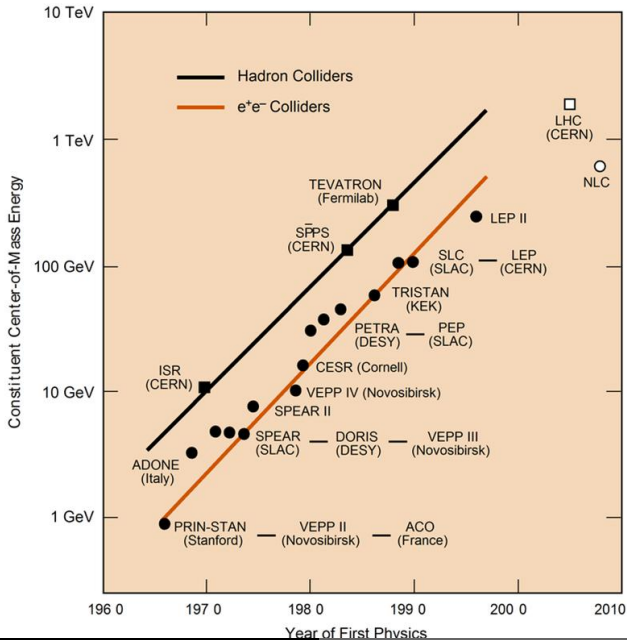
A W -bosont a gyenge (angolul weak) kölcsönhatásról nevezték el. A Z részecskét pedig – humorosan – azért nevezték el így, mert ez volt akkor az utolsó részecske, amelyet a standard modellből fel kellett fedezni. Más magyarázat szerint a zero elektromos töltésére utal.

A Z -boson (vagy Z^0) a saját antirészecskéje, így minden lehetséges töltése nulla.

A Z boson lehetséges bomlásai:

$$Z^0 \rightarrow \nu_i + \bar{\nu}_i \quad \text{ahol } i \in \{e, \nu, \tau\} \quad (20)$$

A Z^0 -t nehéz volt kimutatni, megjelent a cikk, majd vissza vonták. Végül az SPS-ben találták meg a Z^0 bosont $p + p$ ütközésben, amit a LEP $e^+ + e^-$ ütközésben tovább pontosítottak. Az $e^+ + e^-$ ütközésekkel precízebb eredményeket kapunk, mivel két valóban pontszerű atom ütközik és a végtermék is elég tiszta lesz emiatt.



Köszönöm a figyelmet

Felhasznált irodalom:

- Korábbi tanulmányaim
- L. Lederman - Az Isteni atom
- <http://hu.wikipedia.org/wiki/Kvark>
- http://en.wikipedia.org/wiki/W_and_Z_bosons
- <http://modernfizika.lapunk.hu/?modul=blog&a=107712>