# Kvarkok[1]

*R. P. Feynman*

Az anyag atomokból épül fel. Maguk az atomok kétféle építőkőből tehetők össze: elektronokból és atommagból. Nézzük, miből épülnek fel az elektronok. Mai tudásunk szerint az elektronok egyszerűek: nem bonthatók további alkotóelemekre. Más a helyzet az atommaggal. Az atommag további, egyszerűbb építőkövekre bontható, nevezetesen protonokra és neutronokra.

$$\text{Anyag} \longrightarrow \text{atomok} \begin{array}{l} \nearrow \text{nukleonok} \begin{array}{l} \nearrow \text{protonok} \\ \searrow \text{neutronok} \end{array} \\ \searrow \text{elektronok} \end{array}$$

Egy olyan elméletről fogok beszélni, amely szerint még maguk a nukleonok is valami más, egyszerűbb elemekből építhetők fel, ezeket az elemeket nevezzük kvarkoknak. Ma még csak különböző jelek utalnak arra, hogy a neutron és a proton kvarkokból áll, csak közvetett bizonyítékaink, feltevéseink vannak. Mind a mai napig soha senki nem talált még kvarkot, mégis úgy gondoljuk, hogy a nukleonok valóban szétszedhetők ezekre. Nos, lehet hogy ez így egy furcsa ötletnek tűnik, de látni fogjuk, hogy ez jó feltevés, izgalmas elképzelés, ami sok kérdésre választ tud adni.

Hogyan találhatjuk ki, hogy miből épül fel a neutron és a proton? Hogy győződhetünk meg arról, hogy valóban léteznek más, elemibb építőkövek, amik felépítik a körülöttünk levő anyagi világot?

Minden ismeretünk próbaköve a kísérlet. Kísérleteket kell tehát végeznünk, ha meg akarunk győződni arról, hogy feltevésünk valóban helyes.

Mi az, amit ilyen egyszerű objektumokkal tehetünk? Az egyetlen lehetőségünk, hogy jó erősen összeütköztetjük őket, és figyeljük, mi történik. (Hasonló módszerrel megállapíthatjuk például azt, hogy milyen alkatrészeket tartalmaz egy óra: fogunk két órát, erősen összeütjük őket, aztán megvizsgáljuk, mi repül ki belőlük.)

Két részecske áll rendelkezésünkre: a neutron és a proton. Ha ezeket alacsony energián ütköztetjük, új – pionoknak nevezett – részecskék jelennek meg. A kép tehát csak tovább bonyolódik: a nukleonok mellett most már pionokat is találunk. A pionoknak három fajtáját ismerjük: a pozitív töltésű $\pi^+$-t, a semleges $\pi^0$-t és a negatív $\pi^-$-t. Miért nevezzük valamennyit pionnak? Azért, mert tömegük közel azonos. (A töltött pionok tömege 140 MeV, a semlegesé 135 MeV.) Ez érdekes, mert ismét egy példát látunk arra, hogy különböző töltésű részecskék csaknem azonos tömeggel rendelkeznek.

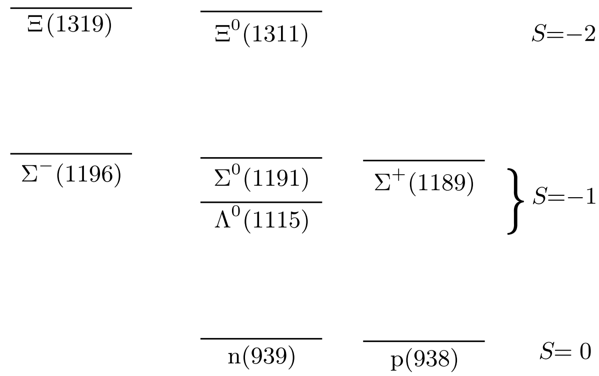
Mikor ezeket az új részecskéket felfedezték, megkísérelték egy olyan elméletet felállítani, amely szerint a pionok bizonyos értelemben a fotonhoz hasonló szerepet töltenek be. Annak analógiájára, ahogy az atommagot és az elektronokat az atomban együtt tartó elektromágneses erők e részecskék közötti fotoncserékkel értelmezhetők, egy olyan elméletet állítottak fel, ami a nukleonok közötti kölcsönhatásokat pionok kicserélődésével magyarázza. Ez szép elmélet, de sajnos hamarosan kiderül, hogy a dolog nem ilyen egyszerű. Az ütköztetett nukleonok energiáját tovább növelve ugyanis új részecskékre bukkanunk. Ezek a $\Lambda$-részecskék, tömegük 1115 MeV.

Próbáljuk meg ezt a részecskét a lehető legegyszerűbb módon beilleszteni az eddigi képbe. Kézenfekvő az a feltevés, hogy ez a részecske egy pionból és egy nukleonból épül fel. Kézenfekvő, de nem jó! Ha ez az elképzelés valóban igaz lenne, azt várnánk, hogy a $\Lambda$-részecske nagyon könnyen, gyorsan alkotóelemeire bomlana. Ez a bomlás valóban végbemegy, de csak nagyon lassan! Tehát létezni kell valami olyan szabálynak, ami azt mondja ki: ez a folyamat nem mehet végbe gyorsan. Van valamilyen törvény, ami megtiltja e folyamat gyors lefolyását. És most felállítjuk ezt a törvényt! Azt mondjuk: a részecskéknek van egy $S$ kvantumszáma (ritkaság), ami a nukleonokra és a pionokra más, mint a $\Lambda$-részecskékre (az előbbiekre zérus, az utóbbiakra $S = -1$, de ez nem lényeges). És felállítunk egy új szabályt: *Az $S$ kvantumszám megváltoztatása nehéz, csak lassan vihető végbe. Az erős kölcsönhatások – például a magerők – sohasem változtatják meg a ritkaságot.* Sikerült tehát ezzel az új törvénnyel „megmagyarázni", miért megy végbe olyan lassan a $\Lambda$-részecske bomlása pionra és nukleonra.

Folytatva a kísérletek sorát, a helyzet tovább bonyolódik. Még nagyobb energiákon három új részecske jelenik meg az ütközés végtermékei között: $\Sigma^-$ (1196 MeV), $\Sigma^0$ (1191 MeV), $\Sigma^+$ (1189 MeV). Ez utóbbi részecske például protonra és semleges pionra bomlik: $\Sigma^+ \to \mathrm{p} + \pi^0$. A folyamat lassan megy végbe, ezért ezekhez a részecskékhez megint $(-1)$-es ritkaságot rendelhetünk.

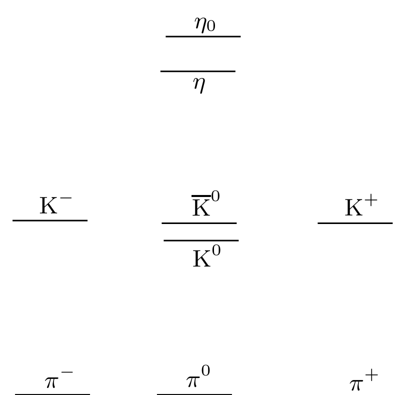
De nem értünk még a sor végére! Még mindig növelhetjük az ütköző nukleonok energiáját! Természetesen ismét új részecskékre bukkanunk: $\Xi^-$ (1319 MeV), $\Xi^0$ (1311 MeV). Ezek a részecskék szintén elbomlanak, de érdekes, hogy például a $\Xi^-$ bomlásánál az egyik bomlási termék $\pi^-$, de a másik keletkező részecske *nem neutron*, hanem $\Lambda^0$! (Ez – ismét lassan – végül is neutronra bomlik.) Ezek a részecskék tehát csak két lépésben tudnak nukleonokra bomlani, ezért $S = -2$ ritkaságot kell hozzájuk rendelnünk.

[1] Richard P. Feynman (1918-1988) 1972. június 21-én az ELTE fizikus hallgatói részére tartott előadását magnófelvétel alapján közölte a Fizikai Szemle 1973. évi januári száma. Fordította Gajzágó Éva. A cikket az előadó halálának évében átvette a KöMaL, és az az 1988. évi májusi számában jelent meg.




Láthatjuk, hogy a táblán a részecskék egy elég szabályos rendje alakult ki. Az egyre nagyobb tömegű részecskék egyre magasabban kaptak helyet. A függőleges oszlopokba az azonos töltésű részecskék kerültek, tehát középen vannak a semleges részecskék, ettől jobbra a pozitív, balra pedig a negatív töltésűek foglalnak helyet. Az egy sorban elhelyezett részecskék tömege nem teljesen azonos, de köztük csak nagyon kis különbség van. Kézenfekvő ezt a kis különbséget a részecskék eltérő elektromos töltésével kapcsolatba hozni. E részecskék minden sajátsága megegyezik, kivéve a töltésüket. Ezért hiszünk abban, hogy a tömegkülönbségek elektromágneses tömeget képviselnek: a részecskéket körülvevő elektromágneses mező energiájának különbözősége kis eltéréseket hoz létre e részek tömegei között.

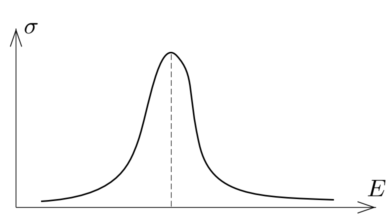
Vajon kimerítettük-e ezzel a természetben előforduló részecskék teljes spektrumát? A kísérletek nemmel válaszolnak erre a kérdésre: egyre újabb és újabb kísérleteket végezve további részecskékre bukkanhatunk: ilyenek például a kaonok: $\mathrm{K}^+$ (493 MeV), $\mathrm{K}^0$ (497 MeV), és megfelelő antirészecskéik, a $\mathrm{K}^-$ és $\overline{\mathrm{K}^0}$, csaknem azonos tömeggel. Nagyobb energiákon ehhez a sorhoz csatlakozik még két semleges részecske: $\eta$ (549 MeV) és $\eta_0$ (700 MeV). Ezeket a részecskéket megint egy táblázatba foglalhatjuk:




Vannak még további lehetőségek is. Vegyünk például egy olyan rugalmas szórásfolyamatot, melyben protonok szóródnak pozitív töltésű pionokon:

$$\mathrm{p} + \pi^+ \to \mathrm{p} + \pi^+.$$

Ábrázolva a folyamat hatáskeresztmetszetét[2] a bejövő részecskék energiájának függvényében, ilyenféle görbét kapunk.




Ez tipikus rezonanciagörbe, úgy értelmezhető, hogy a pionok és protonok ütközésekor a görbe maximumát adó energiánál megjelenik egy új lehetséges állapot, egy új részecske, ami azonban rövid élettartamú, és ismét könnyen bomlik protonra és pionra. Ez tehát új részecske, vagy ha úgy tetszik: *rezonancia*. Konkrétan a fenti folyamatban megjelenő, két pozitív töltéssel rendelkező rezonanciát $\Delta^{++}$-nak nevezzük. Ha ezt a szóráskísérletet megismételjük a pionok és nukleonok különböző lehetséges kombinációit véve, közel azonos tömegű további rezonanciákat kapunk: $\Delta^+$,

[2]Hatáskeresztmetszet: a részecskék ütközésénél a folyamat végbemenetelére jellemző, terület dimenziójú szám. Merev gömbök ütközésénél a hatáskeresztmetszet éppen a gömb árnyékának területével egyezik meg, általában azonban nem csupán a részecskék méretétől, hanem a kölcsönhatás erősségétől is függ a hatáskeresztmetszet. (*A fordító.*)

$\Delta^0$, $\Delta^-$ (1935 MeV). Valamennyi $\Delta$-rezonancia ritkasága zérus. Miért? A válasz egyszerű: mindannyian szívesen és gyorsan bomlanak zérus ritkaságú részekre: protonokra és pionokra.

Keressük az ezek „fölött" elhelyezkedő, nem zérus ritkaságú részeket! Hogy kaphatók meg ezek? A recept adva van: ismételjük meg az előbbi szóráskísérletet úgy, hogy a pionokat kaonokkal helyettesítjük. Így kapjuk a $(-1)$-es ritkaságú $\Sigma^{*-}$-, $\Sigma^{*0}$- és $\Sigma^{*+}$-rezonanciákat, majd a $(-2)$-es ritkaságú $\Xi^{*-}$- és $\Xi^{*0}$-rezonanciákat. Végül az egész építmény tetején egyedül áll az $\Omega^-$ $(S = -3)$, ami azzal dicsekedhet, hogy létezését előre megjósolták. Ritkaság és töltés szerint rendezve ezeket a részecskéket – mint eddig is tettük – könnyű észrevenni, hogy egy szabályos alakzat, egy háromszög formálódik előttünk. Ezt vette észre Gell-Mann, így jósolta meg a háromszög – akkor még hiányzó – csúcsát elfoglaló $\Omega^-$ létezését.

| | | | |
|---|---|---|---|
| $\Omega^-$ | | | |
| $\Xi^{*-}$ | $\Xi^{*0}$ | | |
| $\Sigma^{*-}$ | $\Sigma^{*0}$ | $\Sigma^{*+}$ | |
| $\Delta^-$ | $\Delta^0$ | $\Delta^+$ | $\Delta^{++}$ |

Térjünk most át a részecskék egy további csoportjának vizsgálatára. Létezik három részecske, melyeket $\varrho$-mezonoknak nevezünk (tömegük 765 MeV); ezeket követik nagyobb tömeggel az $\omega$- (782 MeV), $K^*$- (892 MeV), majd az 1018 MeV-es $\Phi$-mezonok.

Vannak még további részecskék is, a rezonanciákat is figyelembe véve az eddig megismert részecskék száma több százra tehető. Ezeknek csak egy kis töredékét sikerült eddig felsorolni. És a részecskék ilyen népes csoportjában a proton és a neutron többé már nem a „világ közepe", csupán két szerény tag az elemi részek kiterjedt családjában. Mégis mi indokolja megkülönböztetett helyzetüket, miért tűnnek fontosabbnak, mint mások? Azért, mert az energiájuk a legkisebb a saját csoportjukban: mind a proton-, mind a $\Lambda$-csoport valamennyi tagja végül ezekre bomlik. Éppen ezért csak a proton és a neutron volt alkalmas arra, hogy az atomok stabil építőköveivé váljanak.

Említsünk meg még két további tulajdonságot, amit valamennyi eddig ismertetett csoporthoz egyértelműen hozzárendelhetünk! Az egyik a részecskék sajátperdülete, másnéven spinje.[3] A proton-neutron csoportban szereplő részecskék spinje $J = \frac{1}{2}$, a $\pi$-csoportra $J = 0$, a $\Lambda$-csoportra $J = \frac{3}{2}$, és végül a $\varrho$-csoportra $J = 1$. A magasabb spinű csoportok még bonyolultabb szerkezetűek, de ezekkel most nem foglalkozunk.

A másik tulajdonság, amiről még említést kell tenni, egy további kvantumszám, a *barionszám*, ami a ritkasághoz hasonlóan szintén megmarad az erős kölcsönhatások során. Valójában ennél több is igaz: a barionszám – hasonlóan az elektromos töltéshez – *minden* kölcsönhatásban megmarad. Ezt az új kvantumszámot úgy rendeljük hozzá az eddig megismert részecskékhez, hogy a proton- és a $\Lambda$-csoport elemeire $B = 1$ legyen (barionok), míg a $\pi$- és a $\varrho$-csoport elemeire $B = 0$ (mezonok).

Ezek voltak tehát azok a főbb kísérleti tények, amikre szükségünk van, ha előbbre akarunk lépni az elemi részecskék világának megismerésében. Látni fogjuk, hogy megadható néhány egyszerű szabály, amely a többszáz megfigyelt részecskét egységes képbe foglalja, és megbízható kalauzként szolgál az eddig felhalmozott kísérleti adatok bonyolult útvesztőjében.

Az elmélet alapfeltevése nagyon egyszerű, és röviden a következő állításban fogalmazható meg: minden – a természetben eddig megfigyelt erősen kölcsönható – részecske néhány speciális építőkőből felépíthető. Ezeket nevezzük kvarkoknak. Mindössze hat alapvető elemre lesz szükségünk, hogy a táblán szereplő valamennyi részecskét és antirészecskéiket – 36, ha csak a részecskéket számítjuk! – felépíthesse. Ez a hat alapvető építőelem három kvark: $\uparrow$-kvark, $\downarrow$-kvark és s-kvark (vagy ritka kvark), továbbá ezek megfelelő antirészecskéi. Milyen kvantumszámok jellemzik ezeket a részecskéket? A $\uparrow$- és $\downarrow$-kvarkok ritkasága zérus, az s-kvark ritkasága $S = -1$. Az elektromos töltése ezeknek a részecskéknek, a $\uparrow$-kvark esetében $Q = \frac{2}{3}$, míg a $\downarrow$- és s-kvarkra egyaránt $Q = -\frac{1}{3}$. Valamennyi kvark spinje $J = \frac{1}{2}$, barionszáma pedig $B = \frac{1}{3}$. Innen az antikvarkok kvantumszámai már nyilvánvalóan következnek.

Összefoglalva a kvarkok elnevezését és tulajdonságait a következő táblázat állítható fel.

[3] A kvantumelmélet alaptörvényei szerint a spin vektorának $J$ nagysága (Planck-állandó egységekben mérve) csak egész $(J = 0, 1, 2 \ldots)$, vagy félegész $\left(J = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2} \ldots\right)$ értékű lehet, egy tetszőleges tengely (például a $z$-tengely) irányába eső vetülete pedig a $J, J-1, \ldots, -J$ értékek valamelyike. (*A fordító.*)

| **Ritkaság** ⇓ | Kvark $B=\frac{1}{3}$ | | Antikvark $B=-\frac{1}{3}$ | |
|---|---|---|---|---|
| $S=+1$ | | | $\overline{\mathrm{s}}$ | |
| $S=0$ | $\downarrow$ | $\uparrow$ | $\overline{\downarrow}$ | $\overline{\uparrow}$ |
| $S=-1$ | s | | | |
| **Töltés** ⇒ | $-\frac{1}{3}$ | $+\frac{2}{3}$ | $+\frac{1}{3}$ | $-\frac{2}{3}$ |

A kvantumszámok alapján könnyű belátni, hogy a barionok három kvarkból $(Q\,Q\,Q)$, a mezonok kvark-antikvark párból $(Q\,\overline{Q})$, az antibarionok pedig három antikvarkból építhetők fel $(\overline{Q}\,\overline{Q}\,\overline{Q})$.

Feltehetnénk persze a kérdést, hogy milyen részecskéket kapunk akkor, ha két kvarkot rakunk össze ily módon? Azt kell mondanunk, hogy ilyen részecskét még nem figyeltek meg, s azt hisszük, hogy ezek az állapotok nem valósulnak meg a természetben.

És mi a helyzet, ha egy kvarkot veszünk? Erről sem tudjuk biztosan állítani, hogy valóban létezik. Eddig még soha nem láttunk egyetlen kvarkot sem! Még sosem figyeltünk meg olyan részecskéket, melyeknek elektromos töltése (egységnek az elektron töltését választva) nem egész szám! És mégis: hisszük azt, hogy valamennyi megfigyelhető hadron ilyen alkotóelemekből tehető össze. Miért? Ne törődjünk most azzal, hogy miért, nézzük inkább azt, hogy mit tudunk megmagyarázni, megérteni e feltevés alapján!

Az elméletet persze paradoxszá teszi az a tény, hogy mind a mai napig nem találtunk kvarkokat a természetben. De éppen ettől válik a fizika érdekessé! Lehetséges, hogy egy napon majd felismerjük: feltevésünk hibás volt. De éppúgy az is kiderülhet, hogy mindaz, amiről ma beszéltem és beszélni fogok, igaz, és a kvarkokat azért nem látjuk, mert „ ... az $\alpha^{-}$-blabladronok konsternációja tezimális (?!!) ... ” – ahogy ezt 25 év múlva már minden iskolás gyerek tudni fogja.

Ne törődjünk most ezzel! Csak akkor tudunk előrehaladni, ha merünk új feltevéseket tenni, még akkor is, ha ezek a feltevések nem látszanak teljesen konzisztensnek! Lehet, hogy amit így elérünk, csupán áthidaló megoldás, ami később új rejtélyeket vet fel. Lehet, hogy az elmélet később hibásnak bizonyul. De akkor sem volt hiábavaló! A fizika története számos példát tud felmutatni, amikor egy elmélet kudarca új, pontosabb törvények felismerésének forrásává vált.

Nézzük tehát, hogy építhetők fel a táblán szereplő részecskék a kvarkok és antikvarkok különböző kombinációi segítségével!

Kezdjük azzal, hogy mit tudunk felépíteni három kvarkból! Vegyük először azt az esetet, amikor a három kvark spinje azonos irányba áll be. Feltehetnénk, hogy ezek egymáshoz képest bonyolult mozgást is végeznek, de ezt az esetet majd később tárgyaljuk. Először tekintsük a lehető legegyszerűbb állapotot – a hidrogénatom s-állapotának, vagyis az alapállapotának megfelelőt –, amikor nem kell a pályamenti mozgással törődnünk, az eredő pályamomentum zérus, és a kötött állapot teljes impulzusmomentuma a spinekből ered. Eltekintünk tehát minden komplikációtól, ami az egymáshoz viszonyított bonyolult mozgásból származhat.

Világos tehát, hogy ezeknek az állapotoknak a teljes impulzusmomentuma $J=\frac{3}{2}$. Éppen ezért kézenfekvő ezeket a $3/2$ spinű részecskéknek megfeleltetni. Vizsgáljuk tehát először azt a kérdést, hogy milyen állapotokat, milyen kvantumszámokkal rendelkező részecskéket tudunk ezek segítségével felépíteni! Vehetünk például három $\uparrow$-kvarkot. Ennek az állapotnak a töltése $Q=+2$, barionszáma $B=1$, ritkasága $S=0$ lesz. Van ilyen részecske a felsoroltak között? Látjuk, hogy van ilyen, ez éppen a $\Delta^{++}$-rezonanciának felel meg. Csak $\uparrow$ és $\downarrow$-kvarkokat használva fel még három további zérus ritkaságú állapotot kaphatunk.

| | $Q$ | $S$ | $B$ |
|---|---|---|---|
| $\uparrow\uparrow\downarrow$ | $+1$ | 0 | 1 |
| $\uparrow\downarrow\downarrow$ | 0 | 0 | 1 |
| $\downarrow\downarrow\downarrow$ | $-1$ | 0 | 1 |

Ezek megfelelnek a további három $\Delta$-rezonanciának. Tehát a három kvark zérus ritkaságú kombinációi a négy $\Delta$-rezonanciát adják meg.

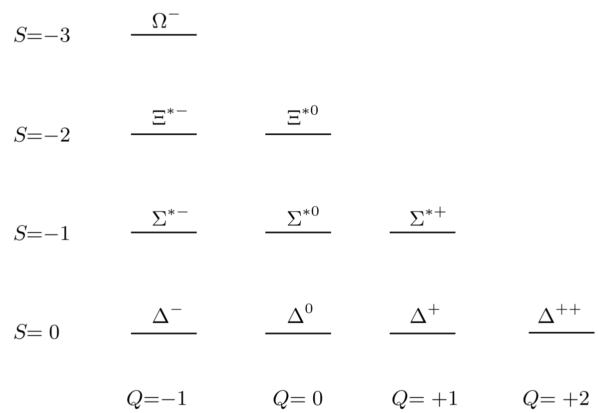
Fel fogjuk tenni, hogy a $\uparrow$- és $\downarrow$-kvarkok közel azonos tömegűek, illetve hogy a felépített részecske tömegéhez közel azonos járulékot adnak. Tehát a

$$(\uparrow\text{-kvark}) \;\Leftrightarrow\; (\downarrow\text{-kvark})$$

csere alig módosítja a tömeget. Eddig még nem használtuk fel az s-kvarkokat. Vegyük sorra most azokat a lehetséges kombinációkat, amelyekben egy, kettő, illetve három s-kvark szerepel. Ezeknek a részecskéknek a ritkasága rendre $-1$, $-2$, illetve $-3$ lesz.

Valamennyi állapotra $J=\frac{3}{2}$ és $B=1$. Összegezve az eredményeket láthatjuk, hogy amit kaptunk, egyértelműen megfeleltethető a $\Delta$-csoportnak.

| | $Q$ | $S$ | $B$ |
|---|---|---|---|
| ↓↓s | $-1$ | $-1$ | 1 |
| ↓↑s | 0 | $-1$ | 1 |
| ↑↑s | $+1$ | $-1$ | 1 |
| ↓ss | $-1$ | $-2$ | 1 |
| ↑ss | 0 | $-2$ | 1 |
| sss | $-1$ | $-3$ | 1 |




Egy részecske ritkaságát tehát az határozza meg, hány s-kvark vesz részt a felépítésében: a ritkaság megegyezik az összetevő s-kvarkok számával. Miért változhat a ritkaság nehezen? Ennek az okát is „kitaláljuk” most: a ritkaság változásához az szükséges, hogy egy s-kvark ↑- vagy ↓-kvarkká alakuljon, ez a folyamat pedig lassan és nehezen megy végbe. Hogyan magyarázzuk a csoporton belül egyre növekvő tömegeket? Látjuk, hogy ez egyértelműen kapcsolatba hozható az az s-kvarkok növekvő számával: minél több s-kvarkból épül fel egy állapot, annál nagyobb a tömege.

A kvarkmodell tehát jól magyarázza ezt a csoportot, melynek neve – mert tíz bariont tartalmaz – barion-dekuplett.

Mielőtt továbbmennénk, ejtsünk még néhány szót a Pauli-féle kizárási elvről! A kvarkokról feltettük, hogy feles spinű részecskék, és tudjuk, hogy minden – a természetben eddig megismert – feles spinű részecske, mint például az elektron, a *Pauli-elvnek* tesz eleget: két elektron nem lehet ugyanabban az állapotban. És mégis: az előbb nem is két, de három (!) kvarkot helyeztünk el ugyanazon a helyen, egyforma spinállással. *Feltettük* tehát, hogy ezekre a részecskékre *nem érvényes a Pauli-elv*; a kvarkokra nem vonatkozik az a szabály, hogy két kvark nem töltheti be ugyanazt az állapotot, hanem éppen ellenkezően: a kvark-állapotoknak teljesen szimmetrikusnak kell lenniük. Bármilyen furcsának tűnik is ez a feltevés, egyelőre el kell fogadnunk, ha előrébb akarunk jutni.

Eddig tehát $4\times10$ barionállapotot sikerült felépítenünk, – figyelembe véve, hogy $J=\frac{3}{2}$ mellett a spin $z$-komponense $\frac{3}{2}$, $\frac{1}{2}$, $-\frac{1}{2}$, és $-\frac{3}{2}$ lehet. Mi történik akkor, ha két kvark spinje felfelé, a harmadiké pedig lefelé áll? Ebben az esetben például a ↑↓ s állapot 3 különböző állapotot jelent, attól függően, hogy melyik kvark spinje áll lefelé. Hasonlóan: minden olyan kombináció, amely két különböző kvarkot tartalmaz, két állapotot reprezentál. Ezért most nem $2\times10$, hanem $2\times18$ állapotot kapunk. Ebből a 36 állapotból azonban $2\times10=20$ állapotot egyszer már figyelembe vettünk, amikor $J=\frac{3}{2}$, $J_z=\pm\frac{1}{2}$ kombinációkat számoltuk össze. Ezért – összegezve az eredményeket – végül is azt mondhatjuk, hogy a három kvark összes olyan lehetséges kombinációit véve, amikor az eredő pályamomentum zérus, összesen $4\times10+2\times8=56$ barionállapotot tudunk felépíteni. Erről az 56 barionállapotról pedig a kvantumszámok alapján könnyű belátni, hogy a $J=\frac{3}{2}$ kombinációk a barion-dekuplett, a $J=\frac{1}{2}$ kombinációk pedig a barion-oktett részecskéit adják.

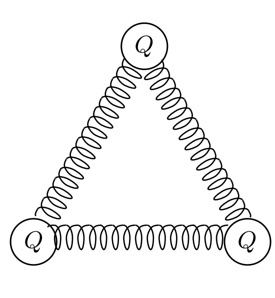
Térjünk át most a mezonok esetére! Milyen állapotok állíthatók elő egy kvark és egy antikvark felhasználásával? Ebben az esetben két spinünk van, ezek párhuzamosan vagy ellentétesen állhatnak. Az első esetben az eredő spin $J=1$, ennek $z$-komponense 1, 0 vagy $-1$ lehet, míg a második esetben $J=J_z=0$. Így összesen 36 különböző mezonállapotot kapunk, melyek tartalmazzák a táblán szereplő pion- és $\varrho$-mezon csoportot.

Sikerült tehát a táblán szereplő valamennyi részecskét a három kvark és három antikvark különböző kombinációiként előállítani.

Befejezésül még néhány megjegyzést szeretnék tenni.

*Először:* a modell keretein belül felépítettük valamennyi részecskét, melyekről eddig szó volt (36, eltekintve az antibarionoktól). Nem történt azonban említés például a magasabb spinű barionokról, amik szintén előfordulnak a természetben. Ismerünk például $\frac{5}{2}$ és $\frac{7}{2}$ spinű barionokat is. Úgy gondoljuk, hogy ezek is beleilleszkednek a fenti általános képbe: oly módon épülnek fel három kvarkból, hogy a három kvark nem s-állapotban van, hanem bonyolult módon keringenek egymás körül.

*Másodszor:* ha lenne egy jó elméletünk arra, hogy milyen erők hatnak a kvarkok között, ebben a modellben sok minden kiszámítható lenne. Sajnos, ez megint egy olyan pont, ahol további feltevéseket kell tennünk. Így például – mint legegyszerűbb feltevést – elfogadhatjuk azt az ötletet, hogy a kvarkokat mintegy „rugók” kapcsolják össze, ily módon:



Így már meg tudjuk határozni a rendszer lehetséges állapotainak számos tulajdonságát. Természetesen nem várhatjuk el, hogy a kapott eredmények pontosan a valóságnak megfelelőek lesznek, de remélhetjük, hogy a megismert törvényszerűségek és tulajdonságok fő jellemvonásait (például a multipletten belül a tömegviszonyokat) a modell helyesen fogja tükrözni. A modell alkalmas például a mágneses momentumok meghatározására is. Ha feltesszük, hogy a kvarkok „kis mágnesek" – tehát ugyanúgy, mint más feles spinű részecskék, megfelelő mágneses momentumot hordoznak –, könnyen megkaphatjuk a belőlük felépíthető részecskék mágneses momentumát. Vegyük például a proton és a neutron esetét! A protont egy $\uparrow\uparrow\downarrow$, a neutront pedig egy $\downarrow\downarrow\uparrow$ három kvark-kombináció adja, amiből könnyű leolvasni, hogy a proton mágneses momentuma $+3$ egység, míg a neutroné $-2$ egység. A kvarkmodell állítása szerint tehát a proton és a neutron mágneses momentumának aránya $\mu_\mathrm{n}/\mu_\mathrm{p} = -(2/3)$. A kísérletek szerint ez az arány ettől egy kicsit eltér: $(\mu_\mathrm{n}/\mu_\mathrm{p})_{\text{kísérleti}} = -0{,}68$. Láthatjuk, hogy bár a modellből kapott és a megfigyelt számértékek nem pontosan fedik egymást, az eltérés nagyon kicsi, ami csak fokozza reményeinket, hogy jó nyomon járunk.

Itt tart tehát a ma fizikája. Kérdéses, hogy a proton belsejében – vagy általánosabban: a természetben – valóban léteznek-e $+2/3$ és $-1/3$ töltésű részecskék. A feladat, ami most előttünk áll: e kérdés beható kísérleti vizsgálata, akár nagy energiájú kísérletekkel, akár más módon. Nem találtuk még meg azt a perdöntő kísérletet, amely kimutatta volna, hogy ezek a számok valóban előfordulnak. Minden bizonyíték, amivel feltevésünket igazolni tudjuk, közvetett: olyan típusú bizonyíték, mint az itt elmondottak. Lehet, hogy mindez a szép egyezés csak egy szerencsétlen véletlen következménye, és a magyarázat, amit hozzáfűzünk, valójában nem igaz. De lehet-e teljesen hibás? – A legvalószínűbb az, hogy az igazság egy kis részletét sikerült csak megragadnunk, és valahol a mélyben ott rejtőzik a valódi ok, amit még nem ismertünk fel. Az a tény, hogy mindezt a nagy tömegű információt, a több száz elemi részecskét ilyen egységes képbe tudtuk foglalni, azt jelenti, hogy van valami szabály, ami rendszerezi a részecskék népes sokaságát. Valahol a mélyben alighanem ott rejtőzik egy gyönyörű, csodálatosan egyszerű törvény, ami még felfedezésre vár. Közel járunk már hozzá, vagy messze vagyunk még tőle? Ezt nem tudjuk megmondani, csak sejtjük, hogy ez a modell helyesen mutatja az irányt, amerre haladnunk kell.

A kvarkmodell eddigi sikerei azt sugalmazzák, hogy e mélyen fekvő törvénynek a kutatása valahol szorosan kapcsolódik a törtszámú töltések megtalálásának kérdéséhez. Ezzel kapcsolatban olyan nagy energiájú kísérleteket tervezünk, amelyek elég nagy pontosságúak lesznek ahhoz, hogy kvantitatíven megadják a protont felépítő részecskék töltését – ha ugyan léteznek ilyenek. E kísérletek nyomán meg tudjuk mondani, hogy ezek a számok valóban megjelennek-e. Ezek a kísérletek a szerencsétől függően – mintegy félévet-évet vesznek majd igénybe. Reméljük, hogy ezek a kísérletek valóban meghozzák majd a perdöntő bizonyítékot, és ígérem, hogyha valóban így történik, egy napon majd ismét eljövök ide, hogy élőszóval számoljak be az eredményekről.

## Richard P. Feynman

(1918-1988)

Február közepén[4] meghalt korunk egyik legkiválóbb fizikusa. Lapunk olvasói elsősorban a *„Mai fizika"* című rendhagyó felépítésű, csodálatosan egyéni hangvételű könyvsorozat szerzőjeként ismerhetik Feynman nevét. Azok, akik esetleg fizikus hallgatóként folytatják majd tanulmányaikat, az egyetemen sokat fognak még „Feynman-gráfokról", vagy a kvantumelmélet Feynman-féle „pályaintegrálos megalapozásáról" hallani. A fizika szinte valamennyi területével foglalkozott: a szuperfolyékonyságtól a termodinamikáig, az anyagtudományoktól a sugárzási folyamatok kvantumelméletéig minden érdekelte, és mindenhez magas színvonalon értett. 1965-ben a sugárzáselméleti eredményeiért Nobel-díjat kapott.

16 évvel ezelőtt az ELTE fizikus hallgatói megismerhették egy élőszóban hallgatott igazi Feynman-előadás varázsát. Az anyag legkisebb ismert részecskéiről, a kvarkokról akkor és ott felvázolt kép a mai legjobb tudásunk szerint is érvényes, helytálló. Természetesen azóta számos részletében sikerült finomítani, kísérletekkel is alátámasztani az akkor még éppen hogy kibontakozófélben levő elképzeléseket. Számos elektron-nukleon és neutrínó-nukleon ütköztetési kísérletet végeztek, és ezek segítségével szinte letapogatták a protonok és a neutronok belsejét. A mérési eredmények számszerűen is megadták a belső összetevők elektromos töltését és egyéb jellemző kvantumszámát, s ezek jól egyeztek a kvarkmodell jóslataival. 1972 óta azt is sikerült megérteni, hogy miért nincs ellentmondásban a három egyforma állapotú kvark léte a Pauli-féle kizárási elvvel. Szabad, önállóan létező kvarkokat azonban mind ez ideig nem sikerült megfigyelni!

[4] Ez a rövid kiegészítés a Kvarkok című előadás írott változatának közlésekor 1988. májusában jelent meg a KöMaL-ban. Az 1972-es előadásban elhangzottak nemcsak 1988-ban, de még 2018-ban is időszerűek. (A Szerk.)