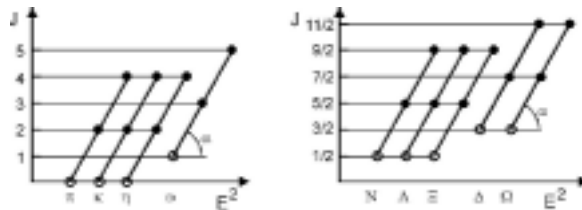


## Legújabb eredmények a részecskefizikában

II. rész

### 3. A hadronok gerjesztett állapotai

Adott hadron gerjesztett állapotainak azok a részecskék tekinthetők, amelyek minden belső kvantumszám tekintetében azonosak, és csupán energiában, valamint saját impulzusmomentumban, azaz spinben különböznek. Ha ábrázoljuk külön a barionok és külön a mezonok  $J$  spinjét az energia négyzetének függvényében, akkor rendkívül figyelemreméltó törvényszerűséget fedezhetünk fel, amint az a 3.1. ábráról leolvasható:



3.1. ábra

A hadronok  $J$  spinje  $E^2$  függvényében.

A  $J$  spin mindkét esetben az energia négyzetének lineáris függvénye. Ez annál is érdekesebb, minthogy az összes ismert mikro- és makro-rendszerrel az energia az, ami egyenesen arányos a  $J$  impulzusmomentum négyzetével:

$$E = J^2 / 2\Theta,$$

ahol  $\Theta$  a tehetetlenségi nyomaték.

Az egyetlen ismert kivétel a relativisztikus húr. Ennek a tulajdonságait a következőképp lehet összefoglalni. Gondoljunk el egy olyan  $2r_0$  hosszúságú, egydimenziós objektumot, amelynek végpontjai  $v_0=c$  fénysebességgel mozognak, középpontja áll, a többi pontjának sebessége pedig a

$$v = c(r/r_0)$$

képlet szerint változik. Tegyük fel, hogy a húr mentén a hosszegységre eső nyugalmi energia állandó:  $k$ . Ekkor az így definiált relativisztikus húr teljes energiája a következőképpen számítható ki:

$$E = 2 \int_0^{r_0} dr k (1 - v^2 / c^2)^{-1/2} = 2kr_0 \int_0^1 d(r/r_0) (1 - (r/r_0)^2)^{-1/2} = kr_0 \pi.$$

A  $J$  spin hasonlóképp kapható meg:

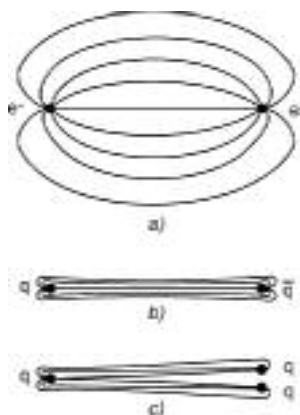
$$J = 2/(c^2 \hbar) \int_0^{r_0} dr k v r (1 - v^2 / c^2)^{-1/2} = 2kr_0^2 / (c\hbar) \int_0^1 d(r/r_0) (r/r_0)^2 (1 - v^2 / c^2)^{-1/2} = kr_0^2 \pi / (2\hbar c).$$

Összevetve,  $J$ -t és  $E^2$ -et, azt kapjuk, hogy

$$J = aE^2$$

ahol  $a^{-1} = 2\hbar c k \pi$ . Megállapíthatjuk tehát, hogy a relativisztikus húr (ami csak egy elgondolt modell) és a hadronok esetén  $J$  és  $E^2$  között ugyanolyan összefüggés érvényes. A hadronok tehát „olyanok”, mint a relativisztikus húr.

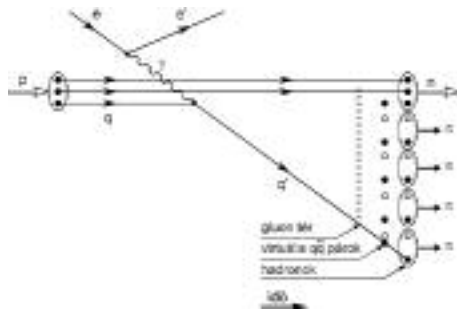
Első látszatra ellentmondás van a kvarkmodell és a húrmodell között, hiszen az egyik zsákhoz, a másik kötélhez hasonlítja a hadronokat. Az ellentmondás azonban megszűnik, ha figyelembe vesszük, hogy egy kvark és egy antikvark körül olyan gluontér alakul ki, amelynek erővonalai a kvarkból kiindulva a lehető legkisebb térfogatot kitöltve futnak be az antikvarkba, amint azt a 3.2 ábra szemlélteti. Ez a gluontér téregyenleteinek nem-lineáris jellegéből következik. A barionok esetén a helyzet hasonló: a gluontér erővonalai a kvarkból indulnak ki és egy két-kvark rendszerbe futnak be. (A csoportelméletből tudjuk, hogy az  $SU(3)$  csoportnak két független háromdimenziós alapábrázolása van. Az egyiket a kvarknak, a másikat az antikvarknak feleltetjük meg. Két kvarknak a kilencdimenziós szorzatábrázolás felel meg. A kilencdimenziós tér felbontható egy háromdimenziós és egy hatdimenziós irreducibilis al térre:  $3 \times 3 = \bar{3} + 6$ . Az előbbi megegyezik az antikvarknak megfelelő háromdimenziós ábrázolással. Csoportelméleti szinten tehát, egy antikvark és két kvark egyenértékű). Természetesen a relativisztikus húr egy idealizált határeset, a valóságos hadronikus húr inkább egy hurka semmint egy húr, aminek körülbelül 1 fm az átmérője. A hadronok alapállapotban inkább gömbszerűek, gerjesztett állapotokban inkább hurkaszerűek.



3.2 ábra

- a.) Az elektromos dipólus elektromos tere széttérül.  
 b.) Az erősen gerjesztett mezőben a kvark és antikvark között feszülő gluon tér minimális térfogatra terjed ki, ami a nem-lineáris téregyenletek következménye.  
 c.) Egy erősen gerjesztett barionban a minimális térfogatra kiterjedő gluon tér egy kvark és egy dikvark között feszül. Ez azért van mert a dikvark (csoportelméleti szempontból) megfeleltethető egy antikvarknak.

Amikor egy kvarkot el akarunk távolítani egy barionból, például rugalmatlan elektromos sugár segítségével, az elektrontól átadott foton elnyelődik az egyik kvarkon, amely megkapja a foton impulzusát. Ennek következtében a kvark eltávolodik a másik két kvarktól, és így egy kvark-dikvark konfiguráció jön létre. A kvark és a visszamaradott dikvark között egy húr szerű keskeny gluontér épül fel. A létrejött gluontér energiája rovására kvark-antikvark párok képződhetnek. A kilökött kvark egy képződött antikvark társaságában pionként távozik. Ezt további pionok követhetik. Az utoljára képződő kvark-antikvark párból az antikvark távozik egy pion kötelékében, míg a kvark visszamarad a dikvark társaságában. A végeredmény tehát az, hogy egy három kvarkból álló barion marad vissza. A lényeg tehát az, hogy a kiindulási barion egy kvarkját sikerült eltávolítani, de a végállapotban csak legális hadronok vannak jelen, egy barion és valahány pion.



3.3 ábra

$A p + e \rightarrow n + e' + \pi + \dots + \pi$  reakció

#### 4. Exotikus hadronok

Negyven évig tartotta magát az a dogma, hogy a barionok három kvarkból, míg a mezonok egy kvark-antikvark párból állnak. Természetesen ezt nem szószerint kell venni, hiszen minden kvantumrendszerben jelen van a vákuumpolarizáció jelensége, ami azt jelenti, hogy az energiamegmaradás törvénye a Heisenberg-féle bizonytalansági reláció „által engedélyezett mértékben” megsérülhet, miközben virtuális részecske-antirészecske párok jöhetnek létre. Így a hadronokban is mindig található a körülményeknek megfelelő virtuális kvark-antikvark párok. Az elmúlt két évben azonban kiderült, hogy ez a dogma csak közelítő érvényű, mert igenis vannak olyan hadronok, amelyekben (kvark, kvark, antikvark, antikvark) található, ezek a tetrakvarkok, vagy (kvark, kvark, kvark, kvark, antikvark), ezek a pentakvarkok.

Hangsúlyozni, kell, hogy a „fölösleges” kvark-antikvark pár ezekben a hadronokban nem virtuális állapotban van jelen, hanem valóságosan. Úgy is lehetne gondolni, hogy a tetrakvark két mezonból álló molekula, míg a pentakvark egy barionból és egy mezonból álló hadron „molekula”. Hangsúlyozni kell azonban, hogy ezekben a „molekulákban” a hadronikus „atomok” nem őrzik meg úgy az önállóságukat, mint a közös atomok a közös kémiai molekulákban. Először nézzük a kísérleti tényeket. Egy Japánban működő kutatócsoport (KEK) 2003-ban számolt be arról, hogy találtak egy olyan 3872 MeV tömegnek megfelelő rezonanciát, azaz egy olyan véges élettartamú, véges energiabizonytalanságú részecskét, ami  $((uc)(\bar{d}\bar{c}))$  összetételű tetrakvarkként értelmezhető. A kísérlet a következő volt. Elektron-positron ütköztetés révén előállították a híres bottomiumnak nevezett  $Y$  rezonanciát, ami egy bottom kvarkból és egy bottom antikvarkból áll, ami rövid idő alatt elbomlik:

$$e^+ + e^- \rightarrow Y \rightarrow B^+ + B^-, \text{ ahol } B^+ \Rightarrow (u\bar{b}) \text{ és } B^- \Rightarrow (\bar{u}b).$$

Ezután az így előállított  $B^+$  bomlását vizsgálták:

$$B^+ \rightarrow K^+ + \pi^- + X^+ \rightarrow K^+ + \pi^- + \pi^+ + \psi^0.$$

Ahol  $\psi^0$  a híres charmonium, ami egy charm-anticharm kötött állapota, (hasonlít a bottomiumhoz.) Azt találták, hogy a bomlás első lépésében keletkezik egy  $X^+$ -nek nevezett részecske, ami az  $X^+ \rightarrow \pi^+ + \psi^0$  módon bomlik tovább. Ez azt jelenti, hogy  $X$  összetétele:  $((uc)(\bar{d}\bar{c}))$ . Megmérve a keletkező bomlástermékek kinematikai változóit, azt találták, hogy az  $X$  nyugalmi tömegének megfelelő mennyiségben 3872 MeV-nál egy rezonanciacsúcs található. Ez tehát egy véges élettartamú tetrakvark.

Ugyancsak 2003-ban fedezték fel a  $D_s(2317) \Rightarrow ((uc)(\bar{u}s))$  tetraquarkot is.

Azóta találtak három pentaquarkot is.

$$\begin{array}{lll} \Theta^+ (1540) & \Rightarrow & ((ud)(ud)\bar{s}) \\ \Xi (1862) & \Rightarrow & ((ud)(ud)\bar{d}) \\ D^* (3099) & \Rightarrow & ((ud)(ud)\bar{c}) \end{array}$$

Ezen eredmények alapján várható, hogy előbb-utóbb bottom, illetve top kvarkot tartalmazó exotikus hadronokat is fognak találni. A kvark-összetételt megadó formulákban két-két kvarkot zárójelbe tettünk. Ezek dikvarkok. R. Jaffee és F. Wilczek elemzése kimutatta, hogy az exotikus hadron molekulákban kitüntetett szerepe van a dikvarkoknak. Az előzőekben említettük, hogy a dikvark csoportelméleti szempontból úgy viselkedik, mint egy antikvark. Ezek szerint a tetraquarkok, amik egy dikvarkból és egy antikvarkból állnak, megfelelnek egy antikvarkból és egy kvarkból álló párnak, azaz egy mezonnak. A pentaquarkban hasonlóképpen két dikvark és egy antikvark van jelen. Ez megfelel három antikvarknak, azaz egy antibarionnak. Ha az exotikus hadronokban nem dikvarkok lennének jelen, hanem kvark antikvark párok, akkor ezek a kész, mondhatni „előregyártott” mezonok gyorsan eltávoznának és így az exotikus hadronoknak olyan rövid lenne a bomlási ideje és ezzel együtt olyan nagy az energia bizonytalansága, hogy meg se lehetne figyelni őket. Az exotikus hadronok jellemző tulajdonsága, hogy bennük nehéz kvarkok fordulnak elő. Ez elméleti szempontból azért érdekes, mert alkalmat adnak arra, hogy a különböző modellek teljesítőképességét ellenőrizzük.

## 5. Higgs bozon

Amint a bevezetőben említettük, az egy fotonon, a három gyenge bozonon és a nyolc gluonon, azaz a tizenkét mérték bozonon kívül létezik még egy „szerencsétlen” tizenharmadik bozon is, ez a Higgs skalár. Pontosabban léteznie kell, de eddig kísérletileg még nem sikerült megtalálni. A Higgs skalár egy nagyon fontos alkatrésze a Standard Modellnek, mert a Higgs térrel való kölcsönhatás produkálja a gyenge bozonok szokatlanul nagy tömegét és hozzájárul a többi részecske tömegéhez is (kivéve a foton). Sokáig úgy tűnt, hogy a Higgs bozon kísérleti kimutatása a Standard Modell megkoronázása lesz, amellyel lezárul egy fontos fejezete a fizikának. Kitűnt azonban, hogy a Higgs bozon erősen remélt megtalálása távolról sem lesz egy „tanévzáró Te Deum Laudamus”, hanem inkább egy „tanévkezdő Veni Sancte Spiritus”. Már régebben megállapítást nyert ugyanis, hogy a Higgs bozon tömege nem állandó. A tömeg kvantumkorrekciói a rendszer energiájával együtt növekszenek. Ez egy olyan anomália, ami a Standard Modellt alapjaiban támadja meg. Kitűnt azonban, hogy ez az anomália megszűnik, ha a modellt szuper-szimmetrikusan kiterjesztjük. Ez azt jelenti, hogy a Standard Modell minden fermionjához egy bozont és minden mérték bozonjához egy fermiont társítunk. Ezen szuperszimmetrikus részecskék kvantumkorrekciói pontosan kompenzálják a Standard Modell részecskéinek járulékait. Így a Higgs bozon tömegével kapcsolatos anomália megszűnik. Ez viszont azt jelenti, hogy a Higgs bozonon kívül még meg kell találnunk 12 szuperszimmetrikus részecskét, ami elég kemény feladatot jelent. Ebben a helyzetben bizonyos változás következett be. Bebizonyították ugyanis, hogy a Higgs bozon tömegével kapcsolatos anomáliát nem csak a szuperszimmetrikus kiterjesztés útján lehet megszüntetni. Kitűnt ugyanis, hogy létezik a Standard Modellnek egy olyan kiterjesztése is, amelyben minden fermionhoz egy másik fermiont és minden bozonhoz egy másik bozont kell társítani. A Higgs bozonnal együtt tehát most is még

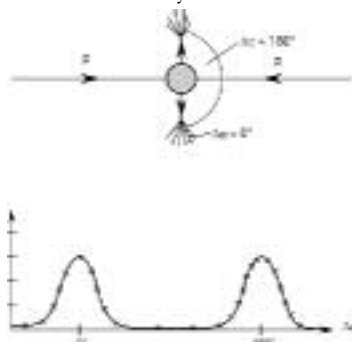
további 13 szerencsétlen részecskét kell felfedezni. Ezek közül még egy sincs meg, ezért túlzott optimizmus, (vagy pesszimizmus) azt hinni, hogy a részecskefizika a lezárás stádiumához közeledik. Indokolt inkább azt hinni, hogy most jön a neheze. „Veni Sancte Spiritus!”

## 6. Kvark-Gluon Plazma

A nagyenergiás fizika, ami a magfizika és a részecskefizika ötvözetét jelenti, a modern fizika egyik legfontosabb kérdésére keresi a választ. Ez a következőképpen hangzik: „Meg lehet-e olvasztani a hadronokat?” Más szóval ez a kérdés azt jelenti, hogy vajon lehetséges-e földi körülmények között, nagy energiás nehéz atommagok összeütköztetésével olyan nagy hőmérsékletű, nagy sűrűségű, nagy nyomású állapotot előidézni, amelyben a nukleonok börtönébe zárt kvarkok kiszabadulnak, és egy kvark-gluon plazma elnevezésű állapotba mennek át. A folyamat emlékeztet egy forradalmi körülmények között kitört börtönlázadáshoz, amikor is az utcai harcok hatására a három személyes cellákba zárt kvark rabok fellázadnak és lerombolják a celláik falait. A cellafalakat alkotó gluon darabokkal akarnak részt venni a forradalomban. A szabadságra vágyó kvarkok, azonban csak a börtön udvarig jutnak el, ahol egymást verik a gluon darabokkal, majd a forradalmi hevület csökkenésével visszakullognak és hármassával újra építik a saját háromszemélyes celláikat. A külső megfigyelő már csak ezeket a hiánytalan darabszámú cellákat, illetve az azokból kiáradó „panasz” észleli. Szakmai zsargonban az előbbieket barionoknak, az utóbbiakat mezonoknak hívják. Az a természet rendje szerint való, hogy a végén ugyanannyi cella található (ez a barionszám megmaradásának a következménye).

Kvark gluon plazmát előállítani azért lenne fontos, mert meg vagyunk arról győződve, hogy a Big Bang után egy ideig az egész Világegyetem ilyen állapotban volt. Jelenleg a Kvark Gluon Plazma előállítására irányuló nagyszabású kísérletek Brookhaven-ban folynak a RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) segítségével. Ez egy nagyenergiás tároló gyűrű, amelyben elsősorban, protonokat, deuteronokat és arany atommagokat gyorsítanak. A tároló gyűrű különböző pontjain elhelyezett detektorok belsejében történik a szembefutó nyalábok ütköztetése. Ezen detektorok közül a PHENIX elnevezésű mellett dolgozik egy igen sikeres magyar csoport, most azonban mégis a STAR elnevezésű detektorral kapott eredményeket ismertetjük, mert ezeket könnyebb értelmezni.

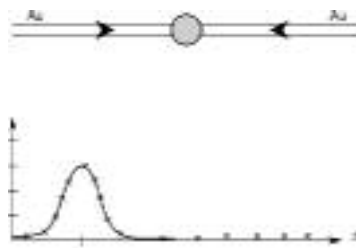
Megvizsgálták két azonos energiára gyorsított protonnyaláb ütköztetése révén kapott eseményeket. Azt találták, hogy a proton – proton ütköztetés során igen gyakran keletkezik olyan két-hadron jet, amelyek a protonnyalábra merőleges síkban egymással ellentétes irányba repülnek szét igen nagy impulzussal. Az impulzusmegmaradás törvénye következtében a két hadron jet impulzusa egymással megegyezik, csupán az irányuk ellentétes. Ha tehát kiválasztunk két tranzverzális hadront, akkor azok vagy közel zérus fokot bezáró, vagy közel 180 fokot bezáró irányban mozognak, attól függően, hogy az egyik, vagy a másik jethez tartoznak.



6.1 ábra  
 $p+p \rightarrow \text{jet} + \text{jet}$  ütközés

Két tranzverzális nagyenergiás hadron előfordulási gyakorisága a  $\Delta\phi$  szögkülönbség függvényében a következőképpen fest (6.1 ábra). Ez egy teljesen természetes, jól érthető dolog.

Nézzük ezután azt az esetet, amikor arany atommagot ütköztetünk arany atommaggal. Azt várjuk, hogy az ütköző arany atommagokban jelenlevő nukleonok ütközése során keletkező nagy tranzverzális impulzusú hadron-párok normál gyakorisága, a  $\Delta\phi$  szögkülönbség függvényében ugyanolyan lesz, mint amilyen volt két proton esetében. Ezt a feltételezést a kísérlet messzemenően cáfolja: 6.2. ábra.



6.2 ábra

$Au + Au \rightarrow jet + jet$  ütközés

A 180 foknál tapasztalt csúcs, ami jelen volt a p+p ütközésben, most teljesen hiányzik, de a 0 foknál tapasztalt csúcs megvan! Mi ennek az oka? Azért, hogy ezt a kérdést meg lehessen válaszolni, elvégezték az Au+d kísérletet. Az eredmény ugyanaz volt, mint a p + p ütköztetés esetén. Mind a két maximum jelen van! Az Au + Au esetben tapasztaltakat meg tudjuk érteni, ha feltételezzük, hogy az ütközés során egy erősen abszorbeáló közeg keletkezett. Ha egy hadron kijut az ütközés helyéről, akkor egy vele közel párhuzamosan mozgó másik hadron is ki tud jutni. Az a hadron viszont nem, amelyik ellentétes irányba indul, mert annak egy erősen abszorbeáló közegen kellene átküzdeni magát. Ez azonban nem sikerül. Ez a közeg elnyeli a kijutni igyekvő hadront. A következtetés tehát az, hogy az Au + d ütközésben ilyen erősen abszorbeáló közeg nem keletkezett, de az Au + Au esetben igen! Nyomon vagyunk! Ez lesz a Kvarc Gluon Plazma! Hátra van még az, hogy ellenőrizzük ennek a közegnek a tulajdonságait és összevessük az elméletileg várt tulajdonságokkal. Ha egyezést tapasztalunk, akkor elmondhatjuk, hogy „jó multság, férfi munka volt!”. Befejezésül szeretném hangsúlyozni, hogy amit találtak, az nem egy spekulatív elmekonstrukció igazolása, hanem egy valódi fizikai jelenség felfedezése. Ez egy gyönyörű jelenség! Ez azt bizonyítja, hogy a hadronikus anyagnak egy új halmazállapotát találták meg! A hátralévő feladat már „csak” az, hogy megkeressék ennek az új halmazállapotnak a helyes elméleti leírását.

Lovas István

a Magyar Tudományos Akadémia tagja



## Áramlások, örvények és egyéb érdekes jelenségek

VI. rész

### A szélcsatornától a repülőgépig

A nagy sebességű járművek és a repülőgépek szélcsatornában történő vizsgálatánál hasonlósági modelleket használnak. Milyen kell, hogy legyen a hasonlósági modell? A