

A részecskefizika kialakulása

– a Standard Modell előtt –

Az emberiséget ósidők óta foglalkoztatja az a kérdés, hogy melyek az anyag alapvető építőkövei. *Thalész* szerint a víz minden lét alapja, ebből keletkezik, és ezé válik minden. *Anaximénész* az alapelemet a levegőben, *Herakleitosz* pedig a tűzben találta meg, míg *Parmenidész* a világot és a létet homogén gömb formájában képzelte el. *Arisztotelész* szerint a világ négy elem: a föld, a víz, a levegő és a tűz különböző arányú keverékéből és bomlásából jön létre. Ezt a négy elemet először *Empedoklésznél* találjuk meg.

Démokritosz időszámításunk előtt a negyedik században élt és alkotta meg elméletét, amely végül „valóssággá lett álomnak” bizonyult. Így ír: *Adott az oszthatatlan testek sokasága, végtelen számosságukban és alakjuk változatosságában... Mindegyikük természete ugyanaz... egymástól csak alakban és az alkotóelemek elrendezésében különböznek. Az atomoknak mindenféle alakjuk, külső megjelenésük és nagyságuk van: némelyik érdes, másik horgas, ismét másik konkáv vagy konvex, és ismét másoknak megszámlálhatatlan a változatosságuk. Az atomok alakjainak száma végtelen, minthogy semmi ok nincs az atom számára, hogy pont ilyen vagy pont amolyan legyen. Egyesek visszapatannak különböző irányokban, míg mások összekapcsolódnak alakjuk vagy helyzetük, elrendezésük szimmetriája miatt és együtt maradnak. Így állnak elő az összetett testek. Arisztotelész bírálta ezt a „kísérleti megalapozás nélküli elméletet”, amely kétezer éven keresztül a háttérben maradt.*

A 17. század közepéig a következő elméletek éltek egymás mellett vagy egymással összefonódva:

1. Az arisztotelészi négy elem hipotézise.
2. *Paracelsus* nyomán átmenetileg nagyon népszerűvé vált a három őselem: a higany, a só és a kén segítségével konstruált világ.
3. *Descartes* szerint az anyag részecskékből áll, méghozzá három finomsági fokban, ezek teljesen kitöltik a teret, és mindegyikük más és más jelenségszoportért felelős.
4. *Gassendi* páter a démokritoszi atomelméletnek a keresztény ideológia által elfogadható formába öntött változatát vallotta. Eszerint az atomok nem öröktől fogva valók, Isten teremtette őket, és Isten a világ végén megsemmisítheti azokat. Mozgásuk nem a véletlen függvénye, hanem Isten akarata szerinti. Az atomok alapvető tulajdonsága a szilárdság, és hogy képtelenek egymáson áthatolni. Nagyságukban és mozgásukban azonban különböznek, különbözőképpen társulhatnak.

A 18–19. század fordulója táján az egyre sokasodó kísérleti tapasztalatok birtokában a kémia szólt bele az atomfogalom alakításába. *Lavoisier* az 1790 körül végzett vizsgálatában tisztázta az elem fogalmát. *Daltonnak* köszönhetjük azt a felismerést, hogy egy-egy vegyi elem összes atomja, illetve egy-egy vegyület minden molekulája valamennyi tulajdonságában megegyezik. Nevéhez fűződik az atomsúly meghatározása is, az atomok tömegét a hidrogénatom tömegéhez viszonyította. *Avogadro* 1811-ben ehhez hozzáfűzte azt a róla elnevezett szabályt, miszerint ideális gázok térfogategységében azonos hőmérsékleten és nyomáson egyforma számú molekula van. 1865-ben *Loschmidt* becslést adott az általa gömb alakúnak feltételezett gázmolekulák átmérőjéről. Az egy molban levő molekulák számára a $6 \cdot 10^{23}$ értéket találta (ez a jól ismert Avogadro-szám). Ezt a számot *Maxwell* 1872-ben megerősítette. *Prout* 1815-ben felfigyelt arra, hogy a különböző elemek

atomsúlya a hidrogén atomsúlyában kifejezve jó közelítéssel egész szám. Ezért feltételezte, hogy minden kémiai elem egyetlen őselemből, a hidrogénből épül fel.

1869-ben *Mengyelejev* és *Meyer* egymástól függetlenül mutatták rá, ha az elemeket atomsúlyuk alapján növekvő sorrendbe rendezzük, az elemek kémiai tulajdonságai jellegzetes periodicitást mutatnak. *Mengyelejev* figyelt fel először arra, hogy a még akkor ismeretlen elemek periódusos rendszerben elfoglalt helyéből következtetni lehet azok jellegzetes kémiai és fizikai tulajdonságaira.

A kémikusok számára a periódusos rendszer gyorsan „munkaeszközzé” vált, a fizikusok előtt állt a feladat, hogy a felismert szabályosságokra magyarázatot találjanak (a sok évszázadon át oszthatatlannak tartott atom szerkezetének megismerésével). A 18. század második felében viharos fejlődésnek indultak az elektromos és mágneses erőkkel összefüggő kutatások. Megszületett *Coulomb* törvénye és *Faraday* törvényei. *Faraday* az elektrolízis vizsgálata során különböző törvényszerűségeket talált, meghatározta az elemi töltés nagyságát, felismerte az elektromágneses indukció jelenségét. Az empirikus tapasztalatokat összegezve *Maxwell* megalkotta híres egyenleteit, melyek az elektromos tér időbeli változásait a mágneses tér térbeli eloszlásával kapcsolják össze és fordítva. *Maxwell* rájött: ha a tovatérjedő elektromágneses hullámok leírására alkalmazza egyenleteit, a terjedési sebesség nagyságára pontosan a fény vákuumbeli terjedési sebességét kapja. *Maxwell* ebből az eredményből arra következtetett, hogy a fényhullámok valójában igen rövid elektromágneses hullámok. A fény hullámtermészetét bizonyító kísérletek (*Newton*) és elméletek (*Huygens* és *Young*) ellenére *Maxwell* kitarított korpuszkuláris elmélete mellett. *Maxwell* egyenletei segítségével az optika összes törvényeit magyarázni tudjuk.

1891-ben *Lorentz* felállította klasszikus elektronelméletét, miszerint az elektromágneses jelenségek hordozója az anyagtól mentes éter, létrehozója az elektromos töltések mozgása. Az egyenletesen mozgó vagy nyugvó töltések a sztatikus vagy stacionárius teret, a gyorsuló töltések pedig az elektromágneses hullámokat hozzák létre. 1895-ben *Röntgen* felfedezte a róla elnevezett láthatatlan sugárzást, ami képes áthatolni a szilárd testeken.

A 19. század vége felé a fizikusok a gázokon átáramló elektromosságra fordították a figyelmüket. Már régen tudták, hogy az egyébként elektromosan jól szigetelő gázokban nagy elektromos feszültségnél átütés keletkezik. A kisülés a pici szikráktól a viharokban megtapasztalt hatalmas villámokig terjed. A jelenség kutatói rájöttek, ha a gáz nyomását csökkentik, az elektromosság sokkal békésebben halad át a gázon. Így például a kis gáznymomású *Crookes*-csövekre nagy feszültséget kapcsolva, a katódtól az anód felé tartó éles nyálábot láthatunk. *Crookes* megfigyelte azt is, ha mágneset helyez a cső közelébe, a nyáláb eltér, mintha elektromos áram vagy negatív töltésű részecskék repülnének ki a katódtól. *Perin* észrevette, hogy a nyáláb útjába helyezett fémlap negatív töltésű lesz. Eszerint a részecskéknak negatív töltésűnek kell lenniük, amelyek ugyanúgy haladnak át a gázon, mint *Faraday* ionjai a folyadékokon elektrolíziskor. A jelenséget katódugárzásnak nevezték el, viselkedésük a kutatások homlokterébe került. Közel fél évszázados rejtélyét *Thomson* 1897-ben oldotta meg. Ezt az

évet tekinthetjük az elektron születési évének. Thomson úgy gondolta, hogy a katódsugár olyan részecskékből áll, amiknek töltésük van. Kísérleteiben a részecskéknak a fajlagos töltését mérte az elektromos és a mágneses tér katódsugarakra gyakorolt hatásán keresztül. Vizsgálatai alapján egyértelműen leszögezte, hogy a katódsugarat azonos részecskék alkotják, bármilyen elemet is használunk katódként vagy töltőgázként. Thomson úgy gondolta, majd kísérletileg is bebizonyította, hogy a katódsugarakat alkotó részecskék töltése megegyezik a Faraday által meghatározott elemi töltés értékével. Ennek alapján azt kapta, hogy a részecskék tömege a hidrogénatom tömegénél 1840-szer kisebb. Thomson ebből arra következtetett, hogy Faraday ionjai az elektromos töltést vivő atomok, a katódsugarakat alkotó részecskék pedig maguk az elektromos töltések. Ezeknek a részecskéknak az elektron nevet adta. Az atomot pozitív töltésű tömör gömbnek képzelte, amelyben parányi elektronok vannak elszórva, mint a fekete magvak a görögdinnye húsában. Ha egy atom fölös energiát kap, azaz gerjesztett állapotba kerül, akkor a belsejében az addig az elektromos kölcsönhatások miatt egyensúlyban lévő elektronok egyensúlyi helyzetük körül rezegni kezdenek, miközben különböző hullámhosszú elektromágneses (fény-) hullámokat bocsátanak ki. Fáradságos számításokat végeztek, hogy a modellel magyarázni tudják az elemek vonalas színképét. Ez azonban nem sikerült, később Rutherford atommodellje vezetett el a sikerhez.

1896-ban Becquerel megfigyelte, hogy az uránsók fekete papírra burkolózva is nyomot hagynak a fényképezőlemezen, azaz szintén kibocsátanak szilárd testeken is áthatoló sugárzást. Ezt a jelenséget később radioaktivitásnak nevezték el.

A következő évben Marie és Pierre Curie felfedezte az igen erősen sugárzó rádiumot és a bizmut radioaktív izotópját. A sugárzás természetét tanulmányozva Rutherford 1899-ben megállapította, hogy háromféle sugárzás van: α -sugárzás, melyről később bebizonyosodott, hogy héliumionok; β -sugárzás, amiről kiderült, hogy valójában igen gyors elektronok; valamint a γ -sugárzás, amely a röntgensugárzáshoz hasonló, de hullámhossza sokkal kisebb, és így energiája sokkal nagyobb. 1902-ben Rutherford és Soddy kimutatták, hogy az urániumból α -részecskék kibocsátása közben másik elem keletkezik, vagyis az atom nem oszthatatlan elemi részecske. A következő évben felismerték az α - és β -sugárzásokra épülő bomlási folyamatokat, amelyek során a kiindulási elemekből újak keletkeznek.

1914-ben Chadwick a különböző radioaktív anyagok által kibocsátott β -sugárzás spektrumát tanulmányozta. Ez a spektrum lényegesen különbözött az α - és γ -sugarak vonalas spektrumától. A β -sugarak mozgási energiája ugyanis folytonos eloszlású volt, a nullához közeli értéktől igen nagy értékekig terjedt – végállapotban pedig a részecskék energiájának összege kisebb volt, mint a kezdeti energia. A β -sugarak folytonos energiaspektrumának egyik lehetséges magyarázata az volt, hogy a β -sugarak nagy energiavesztéseket szenvednek, amikor eltávoznak a radioaktív anyagból, amelyben keletkeztek. A kísérletek azonban ellentmondtak ennek a feltevésnek. Ezen ellentmondás feloldására Bohr még azt is fölvetette, hogy esetleg az energiamegmaradás törvénye csak átlagértékében érvényes a radioaktív β -bomlásra. 1931-ben Pauli más megoldást javasolt: kísérje a β -részecske kibocsátását egy másik, nagyon nehezen észlelhető részecske, ami majd helyreállítja az energiamegmaradást. Ez a részecske elektromosan semleges, tömege pedig igen kicsi, így nem meglepő, hogy nagyon nehéz detektálni. A részecske végül a neutrínó (ν) nevet kapta.

A neutrínók kölcsönhatása az anyaggal olyan kicsi, hogy többnyire kölcsönhatás nélkül keresztülhaladnak a Földön, sőt a Napon is. A neutrínók közvetlen kísérleti kimutatása – az anyaggal való igen gyenge kölcsönhatása miatt – csak mintegy húsz évvel az elméleti jóslat után sikerült. Az ehhez szükséges kísérletet atomreaktorok mellett végezték, ahol a magreakciók során nagyon nagy számban keletkeznek neutrínók.

A katódsugárcsővel végzett kísérletek valószínűsítették, hogy az

elektron főszerepet játszik az atom felépítésében. Azonban továbbra is rejtélyesnek tűnt az elektronok töltését semlegesítő pozitív alkotórész felépítése.

A döntő fordulatot Rutherford híres, α -részecskékkel végzett szórás kísérletei hozták 1911-ben. Vékony aranylemezt α -részecskékkel sugárzott be, és meglepő eredményt kapott. Erre így emlékezett vissza: *Határozottan ez volt a leghihetlenebb eredmény, amellyel életemben találkoztam. Majdnem olyan hihetetlen volt, mintha valaki egy 15 hüvelykes gránáttal egy selyempapír-darabkára tüzelne, és az visszatérve őt magát találná el.*

Ha az atommag belsejében az anyag többé-kevésbé egyenletesen oszlan el, akkor az α -részecskék a lemezen, bár lassulva, de eltérülés nélkül haladnának keresztül, hasonlóan, mint a puskagolyó a vízben. Az α -részecskéknél néha jelentős irányváltozás volt megfigyelhető. Többségük (miközben energiájuk egy részét elveszítették) egyenesen haladt át a lemezen, néhányuk iránya azonban jelentősen megváltozott. Ez csak azzal volt magyarázható, hogy az atomok tömegének legnagyobb része egy, az atom térfogatához képest igen kicsi, pozitív töltésű magban koncentráldódik. Az atommag átmérője 10^{-12} cm, ami az atom méretének tízezered része. A szórás kísérlet eredménye vezette végül Rutherfordot és Bohrt olyan atommodellhez, amelyben a pozitív töltésű pici, de nehéz magot a negatív töltött elektronok felhője veszi körül. A mag körül keringő elektronok száma megegyezik az atom rendszámával. A hidrogénatom magjára a proton elnevezést 1920-ban Rutherford javasolta.

A kvantumfizika szerint a fény kvantumokból – fotonokból – áll. A fotonok olyan részecskék, amelyek nyugalmi tömege zérus, így csak fénysebességgel mozoghatnak. A valódi fotonok, éppúgy mint az elektronok és a protonok, végtelen hosszú ideig élnek, ha nem kerülnek kölcsönhatásba más részecskékkel. Az úgynevezett virtuális fotonok – melyek megjelenése a határozatlansági összefüggés eredménye – élettartama azonban nagyon rövid. Amikor két elektron kölcsönhat egymással, virtuális foton cserélődik ki közöttük. A folyamat igen gyorsan zajlik le. Az ilyen rövid ideig létező foton tömege a határozatlansági elv értelmében nem zérus, minél rövidebb az élettartama, annál nagyobb lehet ez a tömeg. A mai nagy gyorsítókkal a proton tömegének százszorosánál nagyobb tömegű virtuális foton is sikerült előállítani.

Az, hogy a részecskék között ható erőt egy harmadik részecske cseréje közvetíti, a következő szemléletes képpel magyarázható: ha ketten egy labdát dobálnak egymásnak, akkor ez ugyanazt jelenti, mintha valamely erővel taszítanák egymást. A vonzóerő már kicsit kevésbé szemléletesen úgy képzelhető el, hogy a labdát az egyik játékos el akarja venni a másiktól, aki azt vissza akarja tartani. Ezeket a tasztító, illetve vonzó erőt kicserélődési erőknél nevezhetjük.

A Rutherford-kísérlet, valamint a proton felfedezése után a változtathatatlanok hitt atomok hipotézise helyébe a változtathatatlan atomi építőelemek (proton és elektron) elmélete került. A fizikusok bennük látták az anyag végső építőköveit – a szerkezetnélküliséget és a felbonthatatlanságot. Ezt juttatta kifejezésre az „elemi részecske” elnevezés.

Amikor a fizikusok az atommag szerkezetét kezdték vizsgálni, azzal a problémával találták magukat szemben, hogy bár a magban lévő protonok a Coulomb-erő miatt nagy erővel tasztítják egymást, az atommag mégis stabil állapotban van. E problémának csak egy megoldása van, a természetben léteznie kell még egy igen rövid hatótávolságú, de nagyon intenzív erőhatásnak, amely az elektromos tasztítást kompenzálja.

Ugyanakkor 1930 táján egyre nyilvánvalóbbá vált az is, hogy a nagy rendszámú atommagoknak sem a rendszámát, sem pedig a tömegét nem lehet megmagyarázni pusztán a magban lévő protonok számával, mert nagy magok esetén a hosszú hatótávolságú elektromos tasztítás legyőzi a rövid hatótávolságú magerőket, és így a mag nem lehetne stabil állapotban. Azt, hogy nagyobb rendszámú, nehezebb magok is léteznek (az atomtömegek körülbelül mindig egész számú tömegegységgel különböznek), egy elektro-

mosan semleges, de tömegében és az erős kölcsönhatással szembeni viselkedése szempontjából a protonéval azonos részecske feltételezésével vált magyarázhatóvá. Ezt a hipotetikus részecskét – melyet elektromos semlegessége miatt neutronnak neveztek el – Chadwick mutatta ki kísérletileg először 1932-ben.

Így 1932 táján a fizikusoknak négy olyan részecskéről volt tudomásuk, amik az anyagot és az elektromágneses sugárzást felépítik: elektron, proton, neutron és foton. Feltételezték, hogy ezek a részecskék elemiek, vagyis nincsenek kisebb alkotóelemeik.

A magerők töltésfüggetlenségének elvét, miszerint a magban ható erő nagysága független attól, hogy az proton vagy neutronok közt hat, Heisenberg mondta ki 1931-ben. Wigner azt javasolta, hogy a protont és a neutron tekintésük ugyanazon objektum – a nukleon – két különböző töltésállapotának.

Ez volt talán az első ilyen jellegű összekapcsolása a különböző részecskéknél, melynek később nagyon nagy szerepe lett a részecskék szimmetriáinál, a spontán sérülő mértékelméleteknél.

1930 után az atom, illetve részecskefizika új korszaka bontakozott ki. A fejlődés alapja a kísérleti fizika rohamos fejlődése. A részecskék detektálására szolgáló, már régebben ismert számlálócső mellett felfedezték és kifejlesztették a sokkal pontosabb és részletesebb adatokat szolgáltató eszközöket: a ködkamrát, a fotoemulziós módszert, majd később a buborékkamrát. Ezzel párhuzamosan nagy részecskegyorsítók építésébe kezdtek, hogy a felgyorsított nagy energiájú részecskék ütközésekor – a keletkező és elbomló részecskék nyomainak analizálásával – megvizsgálhassák a közöttük lévő kölcsönhatás természetét.

A klasszikus elemi részecskéket – az atomok szerkezetének magyarázatához szükséges alkotóelemeket – általában már kész hely várta az elmélet épületében. A többi új részecske felfedezése azonban meglepetés volt a fizikusok számára. A kísérletek eredményei új elméleti kutatások megindítóivá váltak.

1930 és 1950 között a kozmikus sugárzásban többnyire nehéz és erősen instabil, igen rövid élettartamú elemi részecskék egész sorát fedezték föl: neutron (n^0), pozitron (e^+), muon (μ^-), pion (π), kaon (K), lambda hiperon (Λ) stb. Ezeket a részecskéket később a részecskegyorsítóknak mesterségesen is előállították.

Az elemi részecskék kölcsönhatását leíró kvantumtérelmélet 1930 és 1950 között a részecskéket szerkezet nélküli, oszthatatlan, pontszerű objektumoknak tekintette.

Az új részecskék felfedezésével azonban az elemi részecskék száma rohamosan növekedni kezdett, ma már több száz ilyen elemi részecskét ismerünk. Ezek nagy száma, valamint az egyes részecskék között megmutatkozó hasonlóságok arra engedtek következtetni, hogy legtöbbjük, beleértve a protont és a neutron is, belső szerkezettel rendelkező objektumok – hasonlóan az atommagokhoz.

Míg az atomok leírására elegendő volt a kvantummechanika, addig az elemi részecskék keletkezését és elbomlását ez az elmélet már nem tudta magyarázni. Ezért született meg a kvantumtérelmélet, mellyel már leírható volt a részecskék keletkezése és eltűnése.

A spin analógiájára a protonból és neutronból álló kétállapotú rendszerre Heisenberg bevezette az izospin fogalmát – a protonra az izospin harmadik komponense (I_3) a $+1/2$, a neutronra pedig a $-1/2$ értéket veszi fel. Az izospin kvantumszámok és a részecskék töltése között az alábbi összefüggés áll fenn:

$$Q = e \cdot (I_3 + 1/2).$$

A magerők töltésfüggetlensége a magerők Lagrange-függvényének, illetve Hamilton-operátorának és az izospin komponensei felcserélhetőségének következménye. Ezt matematikailag úgy lehet leírni, hogy a Lagrange-függvény és az isospint leíró mennyiség „kommutál”:

$$[L, I_i] = 0.$$

Az egyes töltött részecskék közötti elektromos kölcsönhatást a közöttük kicserélt virtuális fotonok közvetítik.

Ennek analógiájára 1935-ben Yukawa a nukleonok között ható

erő, a magerő magyarázatára a következő elméletet javasolta: tekintsük a mag alkotórészei között ható vonzóerőt egy erőternek, amit a fotonhoz hasonló közvetítő részecske – egy mezon – okoz. A végtelen hatótávolságú Coulomb-erőtérrel ellentétben a magerők hatótávolsága kicsi, ezért Yukawa a Coulomb-potenciál távolsággal exponenciálisan csökkenő levágását javasolta.

A virtuális kvantumokkal létrehozott kölcsönhatásokra jellemző, hogy a kölcsönhatás hatótávolsága szorosan összefügg a kicserélt kvantum nyugalmi tömegével. A fotonok nyugalmi tömege zérus, így a töltött részecskék elektromágneses kölcsönhatásának hatótávolsága végtelen. A magerők körülbelül 1 fm (10^{-15} m) hatótávolságából a közvetítő részecske tömegére ≈ 100 MeV adódik.

1937-ben Anderson, Neddermayer, Street és Stevenson a kozmikus sugárzást vizsgálva olyan részecskét találtak, aminek tömege az elektroné és a protoné közé esett – úgy gondolták, hogy megtalálták az erős kölcsönhatás kvantumát. 1947-ben azonban kiderült, hogy a talált részecske mégsem lehet a Yukawa által megjósolt, az erős kölcsönhatást közvetítő részecske, mert sem tömege, sem élettartama nem felelt meg a követelményeknek és az anyaggal való kölcsönhatása is igen gyenge volt. Marshak és Bethe azt javasolták, hogy a talált részecske, az ún. müon (μ) tulajdonképpen a keresett Yukawa-kvantum bomlásterméke, mely müonra és a Pauli által 1931-ben javasolt antineutrínóra ($\bar{\nu}$) bomlik.

Néhány évvel később, 1948-ban Berkeleyben, az ottani részecskegyorsítóban elvégzett proton–proton ütközésekben sikerült megtalálni a keresett π -mezont. A pozitív és a negatív töltésű pion mellett kimutatták a pion harmadik, elektromosan semleges töltésállapotát is. Ez a tény, hogy a π -mezonnak három lehetséges töltésállapota van, azt mutatja, hogy ennek az elemi részecskének az izospinjé 1.

Ez azonban újabb problémához vezetett: a nukleonoknál az elektromos töltés és az izospin harmadik komponense között kapott egyszerű összefüggés nem adott jó eredményt a pionokra. Az összefüggést egy új kvantumszám – az úgynevezett barionszám – bevezetésével sikerült úgy módosítani, hogy most már az a pionokra is helyes eredményt adjon. A barionszám értéke a nukleonokra 1, a pionokra pedig 0, az összefüggés így a

$$Q = e \cdot (I_3 + 1/2 \cdot B)$$

alakot veszi fel.

Az elvégzendő kísérletek fontossága miatt a részecskegyorsítók építése felgyorsult. 1947-ben Butler és Rochester Wilson-kamrában olyan nyomokat észlelt, amik a pionnál, illetve a müonnál nagyobb tömegű részecskék jelenlétére utaltak. Kétféle nyomot is találtak: az egyik egy semleges részecske két töltött részecskére való bomlására, a másik egy töltött részecskének egy másik töltött részecskére, egy semleges részecske kibocsátásával való elbomlására utalt. Ezeket a K^+ , K^0 -mezonok létezésének feltételezésével a

$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-, \quad K^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}$$

bomlásokkal tudták azonosítani.

A Brookhavenben felépült gyorsítóban az 1950-es években már 1,5 GeV/c impulzusú pionnyalábot is előállítottak, mellyel protonokat bombáztak. Ezekkel a kísérletekkel további újabb, a protonnál nehezebb részecskéket sikerült megfigyelni. Ezeket a nehezebb részecskéket hiperonoknak nevezték el:

$$\pi^0 + p^+ \rightarrow \Lambda^0 + K^+, \quad \pi^+ + n^0 \rightarrow \Lambda^0 + K^+.$$

A K^0 -mezon bomlásában két különböző élettartamú állapotot mértek ki, így a kapott eredmények magyarázatához összesen négy K -mezont, kaont kellett feltételezni (K^+ , K^- , K^0 , \bar{K}^0). A kaonok barionszáma a pionéhoz hasonlóan zérus. A négy kaont két úgynevezett izodoublettben lehet elhelyezni:

$$\begin{bmatrix} K^+ \\ K^0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \bar{K}^0 \\ K^- \end{bmatrix}.$$

Gell-Mann és Nishijima arra a következtetésre jutott, hogy a már említett elektromos töltés és az izospin harmadik komponense között kapott összefüggést úgy lehet ismét helyrehozni, hogy még egy új – az erős kölcsönhatás során – megmaradó kvantumszámot – az úgynevezett ritkaságot – kell bevezetni, melynek értéke

$$\Lambda: -1; K^+: +1; K^-: -1; K^0: -1; \bar{K}^0: +1.$$

A korábbi összefüggés módosított alakja így a következő lett:

$$Q = e \cdot [I_3 + 1/2 \cdot (B+S)].$$

Az 1970-es évektől napjainkig a részecskegyorsítóknak elérhető energiák növekedtével további három – az erős kölcsönhatás során megmaradó – kvantumszámot fedeztek fel. Ezek a „charm”, a „beauty” és a „top”. A környezetünkben található anyagban az ilyen kvantumszámokkal rendelkező objektumok általában nem találhatók meg, mert élettartamuk igen rövid és nagyon gyorsan elbomlanak.

A részecskéket két nagy csoportra osztjuk. Az első csoportba az erősen kölcsönható részecskéket soroljuk – ezek a hadronok, melyek szintén két csoportba oszthatók, a mezonok és a barionok csoportjába. Minden mezonra jellemző, hogy végül elektronra, pozitronra, neutrínóra és fotonra bomlik, valamint hogy spinjük mindig egységnyi. Jellemző rájuk az is, hogy tömegük a spinnel együtt nő. A másik csoport a barionok csoportja, ilyen a proton, a neutron, a hiperonok és a Δ (delta) -részecskék. A barionok spinje mindig feles, mindannyian nehezebbek a protonnál, a proton kivételével mindannyian instabilak, bomlásuk során barionokra és mezonokra bomlanak. Az egyetlen erősen kölcsönható részecske, mely a bomlásuk során végtermékként megmarad, a proton – a többi, bomlásuk során keletkezett részecske már nem hat kölcsön erősen. Az, hogy a barionok végül protonra és nem erősen kölcsönható részecskékre bomlanak, fontos megmaradási törvény, a barionszám megmaradási törvényének következménye. A részecskefizikában a barionszám megmaradásának törvénye éppen olyan fontos, mint az elektromos töltés megmaradása. Ha a barionszám valóban megmarad, akkor a proton abszolút stabil, míg ha nem, akkor elbomolhatna pozitronra, neutrínóra és pionra. A barionszám megmaradásán kívül semmi olyan törvény nincs a fizikában, ami ezt megtiltaná. Így az atommagok stabilitása közvetlenül ennek a törvénynek köszönhető. Habár a proton abszolút stabilnak látszik, lehet hogy mégsem az, csak nagyon nagy az élettartama, a jelenlegi kísérleti korlát erre kb. 10^{32} év.

A mezonok és barionok (vagyis a hadronok) mellett az elemi részecskék másik csoportja a leptonok. Általában minden részecskét, amely nem hat kölcsön erősen és spinje feles, leptonnak nevezünk. Lepton az elektron, a neutrínó, a μ -mezon és az 1975-ben felfedezett τ -részecske, melynek tömege a többi leptonéhoz viszonyítva már elég nagy, a proton tömegének mintegy kétszerese. A τ -részecske a müonhoz hasonlóan szintén instabil, a müon bomlásához hasonló gyenge kölcsönhatási folyamatban bomlik el. A töltött leptonok az elektromágneses és a gyenge, míg a semlegesek csak a gyenge kölcsönhatásban vesznek részt. Az összes töltött leptonhoz kapcsolódik egy neutrínó, a leptonokat így három dublettbe rendezhetjük:

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ e^- \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{bmatrix}.$$

A hadronokat a leptonokkal összehasonlítva látható, hogy míg több száz hadront figyeltek meg, addig a leptonok száma mindössze hat. Ez arra utal, hogy a leptonok tényleg elemi részecskéknek tekinthetők, a hadronok azonban összetett rendszerek, melyek kisebb és még elemibb egységekből – a kvarkoknak elnevezett részecskékből – épülnek fel. Vajon milyen tulajdonságúaknak kell lenniük ezeknek az alkotóelemeknek? Először is 1/2 spinűeknek, különben nem lehetne belőlük 1/2 spinű objektumokat felépíteni. Másodszor, az összetevő részecskék barionszáma sem le-

het zérus, mert a proton és a neutron barionszáma 1. Harmadszor, elektromos töltésüknek is kell lennie, mert a hadronoknak és a mezonoknak is van elektromos töltésük. A mezonokat így két részecskékből, egy kvarkból és egy antikvarkból álló rendszernek tekinthetjük. Ha a barionokat összetett rendszernek képzeljük el, egyrészt biztosan több, mint egy kvarkból kell állniuk, másrészt kettőből nem állhatnak, mert akkor nem lehetnének feles spinűek. A legegyszerűbb lehetőség a három kvarkból álló rendszer. A proton, a neutron, a π -mezonok és a később felfedezett ρ -mezon már kétféle kvarkból (u- és d-kvarkokból) felépíthetőek. A kvarkok tulajdonságai azonban rendkívül furcsák, szokatlanok: barionszámuk 1/3, és töltésük sem egész, ahogy azt eddig megszoktuk, hanem az u-kvarké +2/3, a d-kvarké pedig -1/3. A proton az uud, a neutron az udd, a pozitív és a negatív π -mezon (u \bar{d}) illetve ($\bar{u}d$) alakban állítható elő, a semleges π^0 és ρ^0 pedig az uu és $\bar{d}\bar{d}$ különböző kombinációból áll. A későbbiekben felfedezett kaonok és a Λ , Σ és Ξ hiperonok felépítéséhez azonban még egy további kvarkra, az s-kvarkra van szükség, melynek ritkaság kvantumszáma -1 kell hogy legyen.

Az u-, d-, s-kvarkokból azonban már több részecske építhető fel, mint az akkoriban felfedezettek. Így a kvarkhipotézis lehetővé tette új elemi részecskék létezésének megjövendölését, várható tulajdonságaival, tömegével együtt. A leghíresebb ilyen részecske az Ω^- hiperon volt, ami három s-kvarkból áll, és így a ritkasága -3. Ennek sikeres kísérleti felfedezése 1964-ben a brookhaveni gyorsítóval végzett kísérletekben nagy diadala volt a kvarkmodell hipotézisének.

A kísérleti fizika fejlődésével napjainkig még további három kvarkot sikerült felfedezni az előbbieken említett charm, beauty és top kvantumszámok hordozóit, a c-, b- és t-kvarkokat.

A neutronbomlás, és az ehhez hasonló ritka folyamatok magyarázatára – melyeket a kis valószínűség miatt gyenge kölcsönhatásnak neveztek el –, Fermi az 1930-as évek elején állította fel az azóta róla elnevezett Fermi-féle négyfermion-elméletet. Eszerint a neutron egy pontszerű kölcsönhatással átalakul a másik három fermionná: protonná, elektronná és antineutrínóvá. Az elmélet alapján végzett számítások eredménye kitűnően megegyezett a kísérleti megfigyelésekkel. Ez azonban inkább fenomenológikus leírás volt, mint megalapozott elmélet.

Az elemi részek fizikájában igen fontos szerepe van a szimmetriáknak. A fizikában szimmetriának nevezünk, ha a rendszer Lagrange-függvénye invariáns valamely transzformációval szemben, vagyis az egyenletek változatlanok maradnak a transzformáció során.

A transzformáció típusa kétféle lehet: folytonos és diszkrét. Folytonos, ha létezik egy – a transzformációt leíró – paraméter, melynek értékét folytonosan változtatva tudunk eljutni bármely transzformációhoz. A diszkrét szimmetriáknál ilyen nincs. A geometriában folytonos transzformáció például a tengely körüli forgatás, míg a diszkrét az egy pontra vagy egy egyenesre való tükrözés.

Az elmélet valamely folytonos szimmetriájának létezéséből egy kontinuitási egyenletre, tehát egy differenciális megmaradási tételre lehet jutni, vagyis az elmélet minden folytonos szimmetriájához megmaradó mennyiség kapcsolódik. Így a teret leíró négydimenziós Minkowski-térben a koordináta-rendszer eltolásával – a tér homogenitásával (vagyis hogy az tér minden pontja egyenértékű) – szembeni invariancia következménye az energia és az impulzus megmaradása, míg a tér elforgatásával – izotrópiájával (vagyis hogy nincs benne kitüntetett irány) – szembeni invariancia következménye az impulzusmomentum megmaradása.

A kvantumtérelméletben a komplex téroperátorokra vonatkozó téregyenletek többnyire invariánsak a téroperátorok fázisának állandó értékkel való megváltoztatásával szemben:

$$\Phi \rightarrow \exp(i \cdot \vartheta) \Phi.$$

Ezt a transzformációt nevezük elsőfajú mértéktranszformációnak. Ez a ϑ paraméter folytonos függvénye. A Lagrange-függvény ezzel a transzformációval szembeni invarianciájából az elektromos

töltés megmaradása következik. Más szavakkal ezt úgy mondhatjuk, hogy az elektromos töltés megmaradása annak a következménye, hogy a töltött tereket leíró komplex tér operátora fázisának nincs közvetlen fizikai jelentése, hanem csak az egyes állapotok közötti fáziskülönbségeknek (az összes fázis azonos értékkel való megváltoztatása az elmélet fizikai következményeit nem érinti).

A diszkrét szimmetriák nem tartalmaznak folytonos paramétert, így nem nyerhetők egymásból folytonos átmenettel. Ezzel szemben ugyanazon diszkrét szimmetriát többször (általában kétszer) alkalmazva visszajutunk a kiindulási állapothoz.

A diszkrét szimmetriák közül rendkívül fontos a részecskefizikában a paritás – a jobb-bal tükrözési szimmetria. A közönséges fizikában a tükörszimmetria elve mindig érvényesült, minden fizikai folyamathoz lehetett találni egy másik folyamatot, amely az előzőnek pontosan a tükörképe volt. 1956-ban Yang és Lee elméleti megfontolások alapján azt állították, hogy az elemi részecskéknél ez nem minden folyamatra érvényes. Így például a neutron bomlásakor kibocsátott elektron többnyire a neutron spinjének irányában mozog. Eredetileg azt hitték, hogy az elektronok mindkét irányban egyforma valószínűséggel repülnek ki az elbomló neutronból, és teljesül a tükörszimmetria elve. A Wu által már a következő évben elvégzett kísérlet azonban ezzel a képpel ellenkező eredményt adott, vagyis igazolta Lee és Yang hipotézisét, az elektronok mindig ugyanabban az irányban repültek ki, vagyis a gyenge kölcsönhatásban csak az egyik – a spin irányához viszonyítottan – úgynevezett balkezes részecskék vesznek részt.

Ez a gyenge kölcsönhatásokra a paritás megmaradásának bukását jelentette. A Fermi-féle eredeti négyfermion elméletet ezért úgy kellett módosítani, hogy leírja ezt a paritás elvét teljes mértékben sértő folyamatokat. Ennek neve a V-A-elmélet, ahol a fermionok között a vektor és az axiálevktor csatolás ugyanolyan súlylyal szerepel. Ez a módosítás Sudarshan, Marshak, Feynman, Gell-Mann, és Sakurai nevéhez fűződik.

A gyenge kölcsönhatás leírása a folyamatok számításánál, a perturbációs számítás legalacsonyabb rendjében helyes, a kísérletekkel egyező eredményt adott, de a számolt magasabb rendű korrekciók elrontották ezeket az eredményeket. A megoldást az úgynevezett közbülső vektormezon hipotézisével próbálták megoldani. Azzal, hogy a négyfermion kölcsönhatást „széthúzták”, úgy gondolták, nem négy fermion hat egymással kölcsön egy pontszerű folyamatban, hanem a kölcsönhatás – az elektromágneses és az erős kölcsönhatásnál tapasztaltaknak megfelelően – egy igen nehéz közvetítő részecskén keresztül zajlik. Ez az ötlet jónak bizonyult, de egészen a további cikkekben említett, úgynevezett Higgs-jelenségig továbbra sem tudta helyrehozni a számítások során magasabb rendben fellépő divergens tagokat.

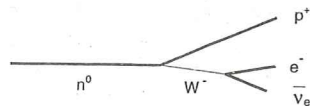
Amikor a nagy energiájú neutrínó kölcsönhat az anyaggal, általában töltött lepton keletkezik, ehhez hasonló folyamat felelős a hadronok gyenge bomlásaiért is. A pozitív π -mezon bomlása során például a pionban lévő kvark-antikvark pár megsemmisül, és ennek során müon és müon-antineutrínó pár keletkezik.

Már az 1960-as években felvetődött a kérdés, nem létezik-e még egy más típusú gyenge erő is, amely az elektromágneses kölcsönhatáshoz hasonlóan nem változtatná meg a kölcsönható részecske töltését. Ezt a fajta kölcsönhatást – a semleges áramokat – végül az 1970-es években fel is fedezték.

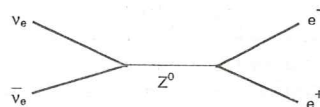
A gyenge kölcsönhatásoknál tehát két típusú folyamatot találtak, az egyiknél a folyamat során az egyes részecskék a kölcsönhatás során töltést cserélnek, a másiknál pedig nem.

Mindkét folyamatot – mivel egyforma erősséggel játszódnak le – a gyenge kölcsönhatás különböző megnyilvánulásainak tekinthetjük. Az ötlet a gyenge kölcsönhatás leírására az elektromágneses és az erős kölcsönhatás leírásánál bevált – valamely közvetítő részecske (az elektromágnesesnél a foton, az erősnél pedig π -mezon) cseréjén alapszik. Mivel a gyenge folyamatok mind töltöttek, mind pedig semlegesek is lehetnek, ez arra utal, hogy a gyenge kölcsönhatás nem írható le egyetlen részecske cseréjével, a leíráshoz egy

töltött és egy töltetlen részecske is kell. A töltött részecske keletkezésével járó neutronbomlás például úgy írható le, hogy a neutron kibocsátja a virtuális W-részecskét, miközben protonná alakul, a virtuális W-részecske pedig elbomlik elektronná és antineutrínóvá.



A semleges gyenge áramú folyamatok teljes egészében hasonlítanak az elektromágneses folyamatokra, a neutrínó szórás leírása például az elektromosan semleges virtuális Z-részecske kibocsátásán, majd elbomlásán alapszik.



A gyenge kölcsönhatás – mint a neve is tükrözi – igen gyenge, így az előbbi W-, illetve Z-részecskék tömegére igen nagy értéket, a proton tömegének legalább ötvenszerezését kellett feltételezni.

Ilyen volt a részecskefizika helyzete az 1970-es évek elején. Az elektromágneses, erős és gyenge kölcsönhatások alapvető szerkezetének leírása helyesnek tűnt, de egyrészt a magasabb rendű korrekciók számítása rossz eredményeket adott, másrészt sok – az elmélethez szükséges részecskét – még nem sikerült kísérletileg előállítani, harmadrészt az egyes kölcsönhatások hasonló szerkezte ellenére sem volt köztük semmilyen kapcsolat.

Az áttörést a spontán szimmetriasértés, majd az egyes kölcsönhatások egyesített elméletének kidolgozása jelentette.

A részecskefizika fejlődésének története szép példája a természettudományok „fejlődéstörténetének”. Arisztotelész – az akkori megfigyelések alapján – úgy gondolta, megtalálta az anyag alapvető építőköveit. Ez a hit sokáig tartotta is magát. Aztán ahogy fejlődött a kísérleti fizika és sokasodtak a kísérleti eredmények, egyre több ellentmondás is napvilágra került – az elméleti fizikusok pedig keresték ezek magyarázatát. Thomson, Rutherford és Chadwick szintén azt hitték, hogy rátaláltak az anyagot felépítő alapvető részecskékre. Aztán, ahogy tovább fejlődött a kísérleti fizika, kiderült, hogy ezek mégsem azok. Az egyre nagyobb és egyre bonyolultabb kísérleti eszközök segítségével a kísérleti fizikusok egyre újabb és újabb információkat gyűjtöttek, az elméleti fizikusok pedig próbálták megmagyarázni azokat.

Hol az elmélet járt előbb, hol a kísérlet. Van-e ennek a (talán végtelen) ciklusnak vége, vagy a fizika fejlődésével az elemi részecskék szerkezetének egyre újabb és újabb, és persze pontosabb leírását kapjuk? Ez a kérdés a filozófusoké. A részecskefizika dolga megvalósítani Arisztotelész álmát és megtalálni az „oszthatatlant”.

IRODALOM

- [1] G. Gamow: A fizika története, Gondolat Kiadó, 1965
- [2] G. Gamow, J. M. Cleveland: Fizika, Gondolat Kiadó, 1973
- [3] F. R. Paturi: A technika krónikája, Officina Nova, 1991
- [4] Simonyi Károly: A fizika kultúrtörténete, Gondolat Kiadó, 1981
- [5] H. Fritsch: Kvarkok, Gondolat Kiadó, 1987



LÉNDVAI ENDRE (1952), a fizikai tudományok kandidátusa, tudományos főmunkatárs az MTA ELTE Elméleti Fizikai Tanszéki Kutatócsoportban (1117 Bp., Pázmány Péter sétány 1/a). Az ELTE TTK fizikus szakán végzett 1975-ben, a kandidátusi címet 1986-ban szerezte meg az ELTE-n. Fő kutatási területe: az elektromágneses és gyenge kölcsönhatások egyesített elmélete, a Higgs-bozonok fizikája.