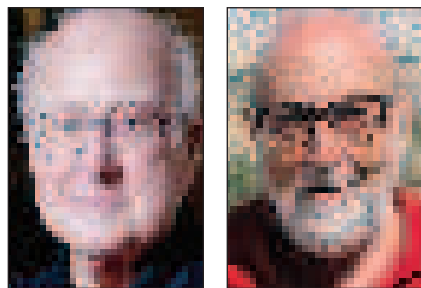


PATKÓS ANDRÁS

Folytatható-e az elemi kölcsönhatások felfedezés-története?

François Englert és Peter W. Higgs annak az elméleti mechanizmusnak felfedezéséért részesültek a 2013. évi megosztott fizikai Nobel-díjban, amely „lényegesen hozzájárul az elemi részecskék tömege eredetének megértéséhez, és amelyet a közelmúltban megerősített a felfedezésük részeként megjósolt elemi részecske létezésének a CERN LHC gyorsítójánál az ATLAS és a CMS kísérletekkel történt kimutatása.”

A fizikai Nobel-díj bizottságának idézett rövid indoklása világossá teszi, hogy az elismerést a Higgs-részecske létezésének megjósolásánál jóval átfogóbb jelentőségű elméleti fizikai alkotásért ítélték oda. Ezt az alkotást felfedezőikről Brout–Englert–Higgs-mechanizmusnak hívják. (1. ábra, Englert társszerzője Robert Brout 2011-ben



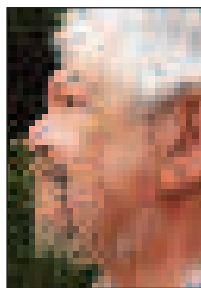
1. ábra. Peter Higgs, François Englert, Robert Brout

elhunytt.) A díj 26 oldalas részletes szakmai indoklása átfogja az alapvető kölcsönhatások természetének J. C. Maxwell munkásságával a XIX. század derekán kezdődött és napjainkig tartó feltárását. Részletesen bemutatja a BEH-mechanizmushoz vezető utat és az arra alapozott építkezést, amely elvezetett az elemi kölcsönhatások ún. Standard Modelljéhez. E történet bemutatása során mintegy másfél tucatnyi Nobel-díjas fizikust említenek, akiknek elismerése néha a nevükhöz fűződő konkrét felfedezést követő néhány éven belül megtörtént. A kiinduló alkotás jutalmazásával közel fél évszázadot vártak.

A BEH-mechanizmus immár bizonyítottan az alapja az elemi kölcsönhatás-

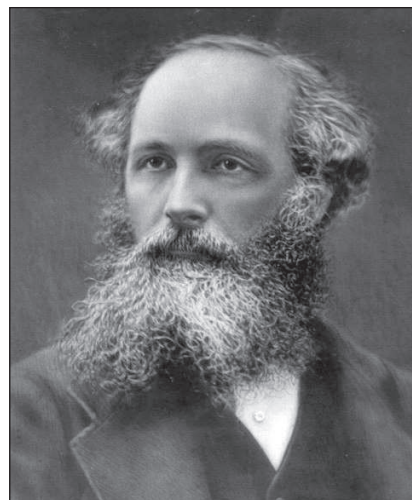
ok szédítő magasságba ívelő, a gótikus templomokhoz hasonlatos, emberi tudás-tornyanak. A Higgs-részecske utolsó maradt felfedezése a torony stabilitását adó zárókönek tekinthető. A CERN LHC-nál született felfedezés a BEH-mechanizmusnak mintegy melléktermékeként megjósolt nagytömegű elemi részecske létezését bizonyítja. Szükségszerű létezésére elsőként P. W. Higgs cikke mutatott rá, így ezt a részecskét a jövőben is Higgs-részecskének nevezik majd.

Az idézett rövid indoklás „név szerint” említi azokat kutatócsoportokat, amelyeknek köszönhető a Higgs-részecske kísérleti felfedezése. Az elmúlt egy évben a két csoport részleteiben megismerte a részecske tulajdonságait, amelyek szinte tökéletesen egyeznek a Higgs javaslata nyomán



kidolgozott vára-
kozásokkal. A Nobel-díj szabályainak korlátai között ennél nagyobb elismerést nem lehet nyújtani a két kísérletben egyenként közel 3000 fizikus erőfeszítésével elért eredménynek. (A CERN három vezetője, Rolf Heuer főigazgató, Sergio Bertolucci kutatási és informatikai igazgató és Steve Meyers technikai és gyorsítókért felelős igazgató elnyerték az Európai Fizikai Társaság (EPS) Edison-Volta díját, míg az ATLAS és a CMS kísérletek az EPS Nagyelektromos Fizikai Osztályának 2013. évi fődíjában részesültek.)

Terjedelmi korlátaink nem teszik lehetővé, hogy ismertessük a díjbizottság másfél évszázadot átfogó esszéjét, amelynek éppen fele a Higgs-részecske kísérleti felfedezésének részleteit mutatja be. Kénytelenek vagyunk a díjazott alkotás közvetlen környezetét adó legfontosabb elméleti gondolatokra koncentrálni, amelyekre a díjazottak érdemei is vonatkozhatnak.

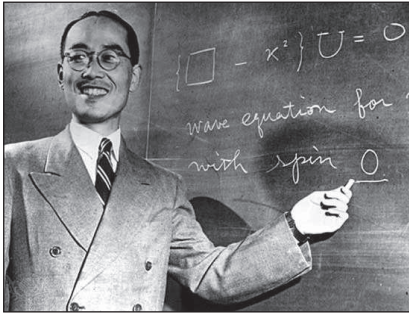


2. ábra. James Clerk Maxwell

Maxwell és követői

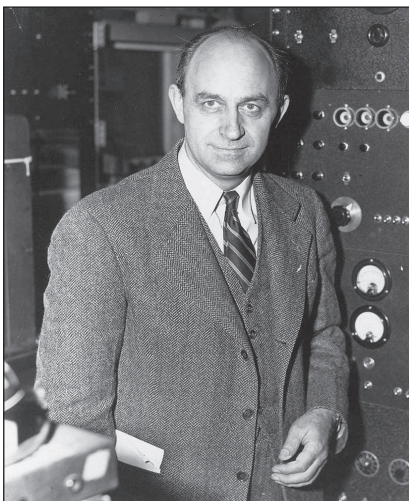
Kezdjük tehát James Clerk Maxwell (2. ábra) alkotásával, amely mindvégig mintaként szolgált az elemi kölcsönhatások megértésén dolgozó kutatók számára. 1865-ben megadta az elektromágnesség egységes elméletét, amelyben az elektromos és mágneses erőtér leírását a négykomponensű vektorpotenciál dinamikájából lehet származtatni. Ez a tér közvetíti az atomi alkotórészek közötti (manapság már kvantált) kölcsönhatást, nulla nyugalmi tömegű fotonok folyamatos cseréje révén. A nulla tömeg következménye a Coulombpotenciál lassú, a távolsággal fordítottan arányos csökkenése.

Az 1930-as évek elején főként W. Heisenbergnek, W. Paulinak és E. Ferminek a James Chadwick kísérleti eredményeit értelmező munkái révén vált világossá, hogy az atommagot összetartó vonzó erőhatás, illetve az instabil izotópok béta-bomlása két újabb elemi kölcsönhatásnak, az erős, illetve a gyenge kölcsönhatásnak a megnyilvánulásai. Ezeknek a hatásoknak azonban véges a hatósugara, nem haladja meg az atommagok néhány femtométernyi kiterjedését.



3. ábra. Hideki Yukawa

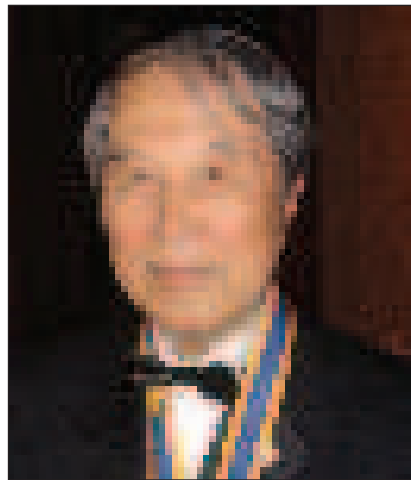
1934-ben *Hideki Yukawa* (3. ábra) Maxwellt követve bevezette azt az exponenciálisan (minden hatványnál gyorsabban) csökkenő potenciált a mag alkotórészei (a nukleonok) közötti erőhatás leírására, amely ma az ő nevét viseli. Ezt a potenciált a kvantumelméletből ugyanúgy a nukleonok közötti folyamatos mikrofizikai részecskecserével lehet származtatni, ahogy a fotonok cseréje vezet a Coulomb-potenciál kialakulására. A véges hatótávolság annak eredménye, hogy a kicserélt részecskék tömege nem nulla. A nukleonok közötti mért erőhatás alapján Yukawa megjósolta az általa „mezonnak” nevezett részecske tömegét, amelyet 1947-ben fel is fedeztek a Földet érő kozmikus sugárzás keltette részecske záporokban.



4. ábra. Enrico Fermi

Enrico Fermi (4. ábra) a béta-bomlás elméletének megalkotásakor szintén Maxwellt szerette volna követni. Ma már tudjuk, hogy nagyon rövid hatótávolságú, azaz nagyon nagy tömegű vektor-quantumok közvetítése révén tud elbomlani a neutron a béta-bomlásban. Első lépésben a neutron protonná alakul át, amit egy negatív töltésű W-bozon kibocsátása kísér. A második lépésben ez a vektor-quantum bomlik el egy elektrorra és

annak anti-neutrínójára. Azonban 1934-ben, Fermi elmélete megalkotásakor csak olyan kis energiájú gyenge kölcsönhatási folyamatokat tanulmányozhattak, amelyek leírásában a közvetítő vektorquantum térbeli haladásának semmiféle hatása nem jelentkezik. Közvetítő elmélete, amely szerint a neutron protonba történő átalakulása és az elektron meg az anti-neutrínó megjelenése ugyanabban a pontban és ugyanabban az időpillanatban történik, tökéletesen kielégítő értelmezést adott a kísérleti adatokra.



5. ábra. Yoichiro Nambu

A „szupravezető” vákuumban haladó elemi részecske

A ma pionoknak nevezett mezonok és a nukleonok kölcsönhatását vizsgálva *Yoichiro Nambu* (5. ábra) 1961-ben azt a kérdést tette fel, vajon a pionok elemi részecskék-e vagy esetleg egy nukleon és egy anti-nukleon erősen kötött állapotaként („atomjaként”) alakulhatnak ki. Erre a váratlan kérdésfeltevésre a szupravezetés jelenségének 1956-ban született átütő sikerű elmélete indította, amelyben a szupravezetés nulla-spinű töltéshordozója nem új önálló elemi objektum, hanem két feles spinű elektron kötött állapota, az ún. Cooper-pár. A Cooper-párok makroszkopikus sűrűségű jelenléte a szupravezető anyagban egy új fázis („halmozállapot”) megvalósulását jelenti. Nambu rámutatott, hogy a makroszkopikus sűrűségű nukleon-antinukleon párok csapadékat (kondenzátumát) tartalmazó fázisban automatikusan fellép egy könnyű gerjesztés, anélkül, hogy azt eredetileg elemi részecskéként be kellett volna vezetni. Ezt lehet azonosítani Yukawa pionjával. A kondenzátum másik fontos hatása az, hogy jelentősen megnöveli a nukleonok tömegét azoknak a kondenzátum nélküli világban mérhető értékéhez képest. A részecskefizika egyik legáltalánosabb hatása itt jelentkezett először: „A kondenzátummal jellemezhető állapot-

ban terjedő, azzal folyamatosan kölcsönható részecskéknek többlet-tömege keletkezik.”

A Nambu által megfogalmazott kép mai tudásunknak azzal a változásával vált tartós részévé, hogy a nukleon-antinukleon kondenzátum helyére kvark-antikvark kondenzátum lépett és a könnyű pion-gerjesztést kvark-antikvark kötött állapotként értelmezzük. Érdemes megjegyeznünk két fontos tulajdonságát a kvark-antikvark rendszernek:

Bár a kvarkok a kondenzátumban igen jelentős tömegtöbbletre tesznek szert, a kondenzátum nélküli állapotban sem lehetnek tömegtelenek. Ugyanis ekkor, mint *Jeffrey Goldstone* még 1961-ben kimutatta, a pionok is zérus tömegűek lennének, ami az ún. Nambu–Goldstone-bozonok általános tulajdonsága.

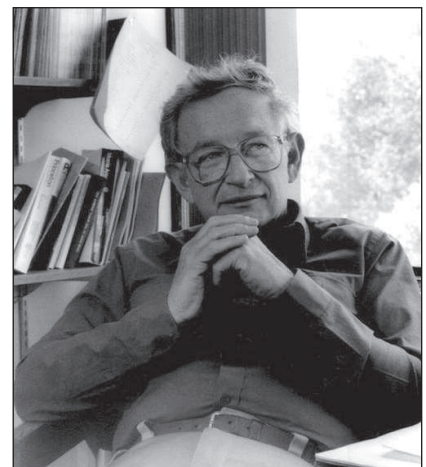
A pion, a könnyű kvark-antikvark kötött állapot mellett létezik egy nehéz is, amely a magának a csapadéknak a rezgési kvantumaival azonosítható. Ennek létét sokáig megkérdőjelezték, de 2012-ben végleg bekerült az elemi részek hivatalos táblázatába. A szigma-részecske tömege megfelel annak a várokozásnak, amelyet egy két kvarkból álló részecske (amilyen a szigma is) és a három kvarkból álló nukleonok tömegének arányára kialakíthatunk, ha a kötött állapot kötési energiája nem túl nagy.

Összefoglalva, az erősen kölcsönható elemi részek (a kvarkok kötött állapotai) nem üres vákuumban, hanem kvark-antikvark kondenzátumban haladnak és annak hatására többlettömeget nyernek.

Tömeges vektor erőterek könnyű kísérő részecskék nélkül

Többen próbálkoztak a maxwelli elektrodinamikához hasonló elmélet megalkotásával véges tömegű vektori erőterek esetére. A kvantumelektrodinamika elméletének kidolgozásáért Nobel-díjat nyert *Julian*

6. ábra. P. W. Anderson



Schwinger 1957-ben, valamint Richard Feynman, aki a kvark-hipotézist felállító, szintén Nobel-díjas Murray Gell-Mann-nal együttműködésben dolgozott ezen a kérdésen. Ők a béta-bomlás értelmezéséhez szükséges két töltött vektortérrel igyekeztek a nukleonok és a leptonok (az elektron és neutrínói) gyenge kölcsönhatását megkonstruálni. Sheldon Glashow 1961-ben az elektromágnességgel történő egyesítés cél-

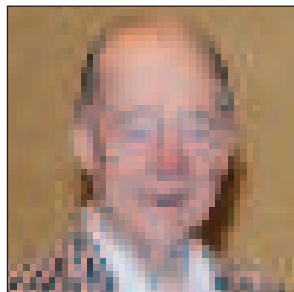
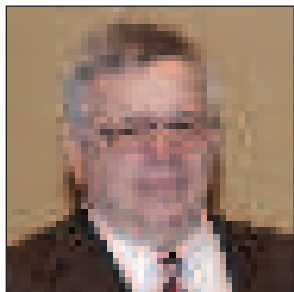
donságú kondenzátum is, amely az eredetileg zérus tömegű vektor-quantumoknak hoz létre tömeget. Aggodalmat okozott viszont, hogy a tömeggenerálást szükségszerűen kísérsni látszott meghatározott számú könnyű (Nambu–Goldstone-) részecske is, amelyre a gyenge kölcsönhatások tapasztalati anyaga egyáltalán nem utalt.

A polarizálható közegekben terjedő elektromágneses hullám elemzése mutatta a továbblépés útját. P. W. Anderson (6. ábra), aki később a kondenzált anyagok kvantumfizikájában elért eredménye-ért kapott Nobel-díjat, 1962-ben egybevetette az áram által keltett vektorpotenciál és a közegben külső vektorpotenciál hatására létrejövő áram egymást indukáló hatását. Természetesen a közegben kialakuló

romágneses tér) a kondenzátum gerjesztései között fellép a töltetlen könnyű (nulla tömegű), továbbá egy nehéz rezgési módus. Higgs azt mutatta meg, hogy az elektromágneses térrel való folyamatos kölcsönhatás eredményeként a könnyű részecske eltűnik, mintegy átalakul a tömeges elektromágneses hullám longitudinális polarizációval terjedő módusába.

Higgs elemzése a klasszikus hullámelmélet keretei között maradt, míg Brout és Englert az első kvantumkorrekciókat kiszámolva megmutatta, hogy a következtetés a kvantált részecskefizika keretei között is érvényes. 1964 és 1967 között a most kitüntetett fizikusok mellett még a G. S. Guralnik, C. R. Hagen és T. W. B. Kibble (7. ábra) alkotta csoport is lényegesen hozzájárult ahhoz, hogy megszülessen a tömeggenerálás receptje tetszőleges vektortér sokaságot tartalmazó Yang–Mills-elméletben, valamint annak bizonyításához, hogy a jelenség fennmarad ezen elméletek egzakt megoldásában is.

A Standard Modell megszületése 1967-ben Steven Weinberg és Abdus Salam (8. ábra) egymástól függetlenül tett javaslatá-



7. ábra. G. A. Guralnik és T. W. B. Kibble

jával kibővítette Schwinger konstrukcióját és felismerte, hogy a fotont csak akkor tudja beépíteni, ha egy további semleges gyenge erőtér (a későbbi Z^0) létezését is feltételezi.

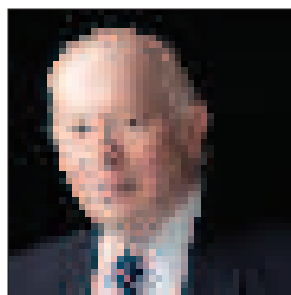
Mindezek a próbálkozások a kvantumelmélet részletes számításaiiban jártas kutatók előtt reménytelennek tündek. Ha a vektor-quantum a tömegét nem valamilyen dinamikai folyamatból nyeri, hanem eleve adott értékkel szerepel az egyenletekben, akkor az elmélet bármely megoldási eljárása értelmetlen, mindent határt meghaladóan nagy értékű (szinguláris) mennyiségekre vezetett. E tulajdonság miatt a korszak fizikusainak többsége azon a véleményen volt, hogy csak nulla tömegű vektorterekre lehet ellentmondásmentes kvantumelméletet kidolgozni, azaz a Maxwell-elméletre épített kvantumelektrodinamika sikere egyszeri, és az erős meg a gyenge kölcsönhatásokra megismételhetetlen. A nulla tömegű erőkkel közvetített kölcsönhatásoknak ugyanis van egy olyan többszörös-szimmetriájuk, amelynek hatására a közvetítésükkel végbemenő kvantumfolyamatok valószínűségeiből ezek a legsúlyosabban szinguláris járulékok kiejtik egymást. Ezen szimmetriát tekintve vezérelnek, 1955-ben Robert L. Mills és Chen N. Yang kidolgozta a vektormezők tetszőleges kombinációira alapozott kölcsönhatások elméleti konstrukcióját, a részecskefizikában mára egyeduralgódóvá lett Yang–Mills-elméleteket. Am a Yang–Mills-erők végtelen hatótávolságuk miatt az 1960-as évtized elején még nem keltek komoly érdeklődést.

Nambu vizsgálatai éppen azért kaptak szinte azonnali, a konkrét eredményeken túlmutató visszhangot, mert példát adtak a tömeg dinamikai generálására. Ez pedig reményt adott, hogy kialakulhat olyan tulaj-

lő elektromágneses vektorpotenciál nem választható szét külső polarizáló és az áram által indukált részre. Anderson a kialakuló teljes elektromágneses térre kimutatta, hogy az ún. plazmafrequenciával meghatározott tömegű, három polarizációs (két transzverzális és egy longitudinális) állapottal rendelkező hullámként viselkedik. Ami pedig a legfontosabb: a tömeg generálását ez esetben nem kíséri könnyű részecske gerjesztése. Anderson egyértelműen jelezte, hogy a részecskefizika Yang–Mills-terei is hasonló mechanizmust kell keresni, de a részletes plazmadinamika vagy akár a szupravezetőkben fellépő hasonló jelenség mechanizmusa túlságosan komplikáltak tűnt a részecskefizikai célú általánosításához.

A Brout–Englert-Higgs-mechanizmus

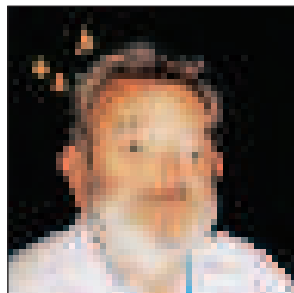
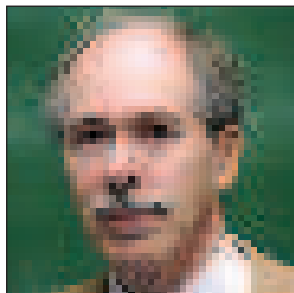
Az áttörést hozó vizsgálatokat mégis éppen a szupravezetés egy leegyszerűsített modelljének, a Ginzburg–Landau-modellnek a relativitáselmélet formai követelményeit érvényre juttató általánosításán végezte el Peter Higgs 1964-ben. A Cooper-párok összetett rendszerét ebben az elméletben egy kétszeresen töltött elemi részecske képviseli, amelynek zérus a saját-perdüllete. A Cooper-párok alkotta kondenzátum helyébe ezen elemi részecskék makroszkopikus sűrűségű kondenzátuma lép. Ennek hatására (ha nincs jelen elekt-



8. ábra. Steven Weinberg és Abdus Salam

tól számítható, amelynek szerzői hangsúlyosan támaszkodtak a BEH-mechanizmusra. Weinberg és Salam egy speciálisan választott Higgs-részecske csoport (multiplett) segítségével szelektíven tudtak tömeget generálni a Glashow által 1961-ben feltételezett négy vektorrészecskének. Közülük az egyik tömeg nélküli maradt és azonosítható lett az elektromágneses vektorpotenciállal. A másik háromnak a kondenzátum úgy ad tömeget, hogy a két elektromosan töltött W-bozon kissé könnyebb a semleges Z^0 -nál. Weinberg ennél is tovább ment, és ugyanezen kondenzátum segítségével Nambu mechanizmusát használta a kvarkok és a töltött leptonok tömegének generálására. (Láttuk, hogy a kvarkok tömegét a kvark-antikvark kondenzátum szintén növeli.) A konstrukció nagy sikere volt, hogy a neutrínók tömegtelenek maradhattak.

A történet itt még nem érhetett véget, miután fennállt a gyanú, hogy a kvantum fluktuációk figyelembevétele ugyanolyan súlyosan szinguláris viselkedésre



9. ábra. Gerald 't Hooft és Martinus J. G. Veltman

vezet, mint amit az eleve adott tömegű vektorrészecskékkal végzett számításokra vonatkozóan már említettünk. Szerencsére sikerült belátni, hogy az a többlétszimmetria, amely a nulla tömegű erőtereket tartalmazó elméletekben véges eredmények kiszámítását teszi lehetővé, a kondenzátum kialakulása ellenére fennmarad. Ezt a tulajdonságot kihasználva *Gerald 't Hooft* és *Martinus J. G. Veltman* (9. ábra) bebizonyították, hogy az egységes elektromágneses elméletben ugyanúgy lehet figyelembe venni a folyamatok bekövetkezési valószínűségében a kvantumfluktuációkat, akár az elektrodinamikában. Ezzel megkezdődhetett az elektromágneses elmélet diadalútja, amelynek egyik csúcspontja volt a *Carlo Rubbia* és *Simon van der Meer* (10. ábra) által vezetett CERN-kísérlet, amely 1983-ban felfedezte a foton nehéz testvéreit.

Az előző két bekezdésben említett nyolc fizikus mindegyike e munkákat elismerő Nobel-díjban részesült 1979-ben, 1984-ben, 1999-ben, végül 2008-ban. Nambu díjazásakor (2008) a történet ismerői számára már nyilvánvaló volt, hogy a Higgs-részecske felfedezését követő díjat készítik elő azzal, hogy nem hagyják ki a sorból a részecskefizikai tömeggenerálás első javaslattevőjét.

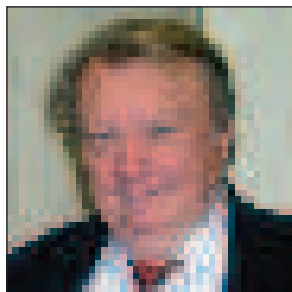
A kvantum térelmélet teljes körű részecskefizikai alkalmazhatóságát megalapozó felfedezés alkotóit végül akkor tüntették ki Nobel-díjjal, amikor a Standard Modellben szereplő összes részecskére kiterjedően bebizonyosodott elképzelésük helytálló volta.

Kitérő: a két Szása története

A svéd akadémia részletes tudománytörténeti áttekintése tartalmaz egy igen meglepő bekezdést is, amelyet legegyszerűbb idéznünk: „Goldstone tételét a Szovjetunióban is elemezték. Az ottani fizikusok elszigeteltségük ellenére ismerték Nambu, Goldstone és Schwinger munkáját. Két 19 éves egyetemista,

nyilvánvalóan a nyugati fejleményektől teljesen független gondolatmenetet követ.” A cikk oroszul 1966 februárjában jelent meg. Nyilván igen alapos kutatómunkát végeztek a svédek, amíg meggyőződtek arról, hogy egyidejűleg egyenrangú eredményt ért el két akkor még ismeretlen diák. Az események tisztázására fordított energiát az olvasó számára megmagyarázhatja, hogy a két Szása a Lev Landau és Nyikolaj Bogoljubov korszakát követő időszak elméleti fizikájának páros csillaga lett a Szovjetunióban. Annak széttesését követően mindketten a Princeton Egyetem professzorai lettek.

A „vezető fizikusok” megnevezés *Lev Landaut* és tudományos iskolája meghatározó személyiségeit rejtheti. Landau Halatnyikovval és Abrikoszovval a kvantumelektrodinamika mély elemzése alapján eljutott addig, hogy tagadta a kvantum térelmélet bármiféle alkalmasságát a részecskefizikai jelenségek leírására. Egy elszigetelt, szélsőségesen hierarchikus szerveződésű társadalomban az ő már-már



10. ábra. Carlo Rubbia és Simon van der Meer

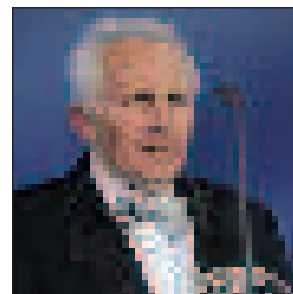
kultikus tekintélye sok éven át leblokkolta a szovjet kutatók hozzájárulását a Standard Modell fejlesztéséhez. Ugyanennek a légkörnek a megnyilvánulása volt a szibériai fizikus, Jozsif Khriplovics 1969-es számításának jelentéktelen kuriózumként

Alekszandr Migdal és *Alekszandr Poljakov* (11. ábra) megtalálta megoldást. Több, mint egy évig harcoltak azért, hogy publikálásra beküldhessék cikküket, mert a korabeli vezető szovjet tudósok nem támogatták munkájukat. Végül 1965 novemberében adhatták le cikküket, amely

történet kezelése, bár eredménye 4 évvel Gross, Politzer és Wilczek előtt jelezte az erős kölcsönhatások elméletének alaptulajdonságát, az aszimptotikus szabadságot. Landau kiemelkedő elméleti fizikusi teljesítményét beárnyékolja ellentmondást nem tűrő személyiségének hosszan bénító hatása, amely esetleg két Nobel-díjtól is megfosztotta a szovjet elméleti fizikai iskolát.

Az út vége?

A részecskefizika előzetes programozottságának tűnő, félvszázados felfedezés-sorozata végére ért. Zárásul három megoldatlanul maradt kérdést, illetve értelmezésre váró váratlan felfedezést sorolunk fel, amelyek igénylik a Standard Modell valamilyen kiegészítését:



11. ábra. Alekszandr Migdal és Alekszandr Poljakov

A jelenlegi elméleti keretben nem sikerült értelmezni az anyag és az antianyag aszimmetrikus előfordulását az Univerzum általunk belátható óriási tartományában;

A Standard Modell nem ad számot a galaxisok skálájától az Univerzum egészének méretskálájáig jelentkező „sötét anyag” természetéről;

A Standard Modell szerves részét alkotó neutrínók tömege nem nulla, ám e tömegeknek nem állhat háttérben a BEH-mechanizmus.

Számtalan elméleti elképzelés van e kérdések megválaszolására a Standard Modell kismértékű kiegészítésével. Azaz a nagyenergiás részecskefizika tudáshorizontja néhány kis felhőcskétől eltekintve vakítóan csillogó tisztaságú.

Remélem, igencsak ismerős ez a megfogalmazás! Lord Kelvin egyik előadása megállapításának parafrázisa, amely a XIX. század végén a fizika tudománya zárt teljességének akkor közeli-tűnő elérésével foglalkozott. A költői megfogalmazás tudományos idillre érkezett „pofonként” a XX. század első negyedében a kvantumfizika és a relativitáselmélet forradalma. Vajon erre számíthatunk-e most is? 🏠