

*Trócsányi Zoltán*

## **Hogyan fejlődik a természettudomány?\***

*Édesanyámnak és édesapámnak*

Előadásomban szeretném felvillantani az anyag legkisebb alkotórészeinek megismerésére vonatkozó kutatások néhány mérföldkövét, és ezáltal rávilágítani, hogyan fejlődik a természettudomány.

Természettudománynak nevezzük a természetről szerzett ismereteink tudományos igényű rendszerezését. A természetről való ismeretszerzés módja a megfigyelés és tapasztalás. Megfigyeléseink alapvető eszközei az érzékszerveink. Elsődleges tapasztalatokat látás, tapintás, hallás, szaglás, ízlelés révén szerzünk. Különösen fontos szerepet tölt be a látás; környezetünkre vonatkozó megfigyeléseink háromnegyedét látás útján végezzük. A jó látásnak két lényeges eleme van: egyrészt elegendően nagy felbontással jusson az agyunkba a tárgynak a szemünk által leképezett képe, másrészt az agyunkban legyen elraktározva megfelelő mintázat, amihez az éppen észlelt képet hasonlítani tudjuk.

Mindannyian késztetést érzünk, hogy ismereteket szerezzünk az érzékszerveinkkel közvetlenül nem észlelhető világról is, amihez olyan eszközöket használunk, amelyekkel a jelek erősségét, vagy más jellemzőjét úgy lehet átalakítani, hogy már érzékszerveinkkel közvetlenül felfogható legyen. Például a természetben előforduló, de szabad szemmel nem látható mintázatok látószögét mikroszkóppal illetve távcsővel fel tudjuk nagyítani, és ezáltal részleteit is láthatóvá tudjuk tenni. A szőgnagyításnak azonban természetes korlátai vannak. Hagyományos fénymikroszkóppal a fény hullámhosszánál, azaz kb. 500 nanométernél kisebb méretű mintázatok nem lehet feloldani.

(Zárójelben jegyzem meg, hogy a természettudomány fejlődésének természetes velejárója, hogy a technika fejlődésével korábban mindenki által elfogadott alaptételek megdőlhettek. Ez azonban nem jelenti, hogy a megdöntött elmélet hibás lenne, csupán annyit, hogy a természetre vonatkozó minden elképzelésünk bizonyos határok között érvényes, és ha azokat a határokat pontosabb megfigyelésekkel feszegetjük, a korábbi elméletet is magába foglaló mélyebb összefüggésekre lelhetünk. A Nobel-díjas R. P. Feynmant idézve: „Sosem lehetünk biztosak abban, hogy igazunk van, csak abban, hogy nincs.” E tekintetben tanúságos J. Keplert idézni, aki T. Brahe húsz éven keresztül végzett megfigyeléseit elemez-

\* Akadémiai székfoglaló előadás. Elhangzott 2008. február 27-én.

ve felfedezte a bolygómozgás három tapasztalati törvényét. Brahe nem csupán gyűjtötte a bolygók mozgásáról az adatokat, hanem meg is becsülte azok bizonytalanságát, és két szögperc bizonyossággal meg tudta adni az akkor ismert bolygópályákat. A mért adatok pontosságának ismeretében Kepler rámutatott a ptolemaioszi rendszer nyolc szögperc nagyságú hibájára, és helyébe új törvényeket keresett. Mindez arról jutott eszembe, hogy manapság például már az sem igaz, hogy fénymikroszkóppal nem lehet a fény hullámhosszánál kisebb szerkezeteket felnagyítani. 2005-ben sikerült megvalósítani egy harminc évvel korábbi ötletet, a negatív törésmutatójú anyagot. Az ebből készített „szuperlencsével” már sikerült 40 nm méretű tárgyat is láthatóvá tenni.)

De folytassuk utunkat az anyag belseje felé. A kvantummechanika hőskorának eredménye az a felismerés, hogy a részecskék hullámtermészetet is mutatnak, és minél nagyobb a részecskék energiája, annál rövidebb a hullámhosszuk. Így elegendően nagy energiára gyorsított részecskékkel a látható fény hullámhosszánál kisebb méretű tárgyak szerkezetét is fel lehet deríteni. Ezen alapszik az elektronmikroszkóp működése, amellyel például a szemünk retinájának nagy felbontású képét is megtekinthetjük. Az elektronok gyorsításának a költségek szabnak határt, és a múlt század utolsó harmadának elején már az a merész célkitűzés fogalmazódott meg, hogy nagyenergiájú elektronokkal bombázott protonok szerkezetét a szóródó elektronok szórásai képének elemzésével kellene felderíteni. Az ötlet megvalósítóinak Nobel díjat hozó „SLAC-MIT” kísérletből tudjuk, hogy a protonnak szerkezete van, az elektron a protonban található és jelenleg pontszerűnek ismert alkotórészek (kvarkokon és gluonokon, összefoglaló néven paritonokon) szóródik. Az ilyen mélyen-rugalmatlan elektron-protonszórás kicsit felületesen a legnagyobb felbontású mikroszkópnak tekinthető. Az észlelési pontosságnak a technikai fejlesztés eredményeként bekövetkező növekedése tehát a természetről alkotott képünk fejlődéséhez vezetett.

Valójában a SLAC-MIT kísérletben nem közvetlenül az elektron, hanem az általa kibocsátott nagy energiájú foton került a paritonokkal közvetlen kölcsönhatásba. Már ez is mutatta, hogy a mikroszkóp felbontásának a részecskeenergia növelésével való fokozása szintén természetes korlátba ütközik, ugyanis elegendően nagy energia kis térrészre való sűrítésével új részecskéket lehet előállítani Einstein híres felismerése, a tömeg és az energia egyenértékűsége révén. Az ilyen folyamatok végállapotainak értelmezése teljesen újszerű megközelítést igényel. Ezen a szinten a „látás” annyit jelent, hogy lehetséges végállapotok gyakoriságát állapítjuk meg. Nagyenergiájú részecskeütközések megfigyelése esetén nincsenek mintázatok a fejünkben, amelyekhez hasonlíthatnánk a látott képet. Helyette a részecskék kölcsönhatásait leíró matematikai modell segítségével a lehetséges végállapotok valószínűségeit tudjuk megbecsülni, és összevetni a tapasztalattal; ezáltal megerősítve, vagy kizárva a modellt.

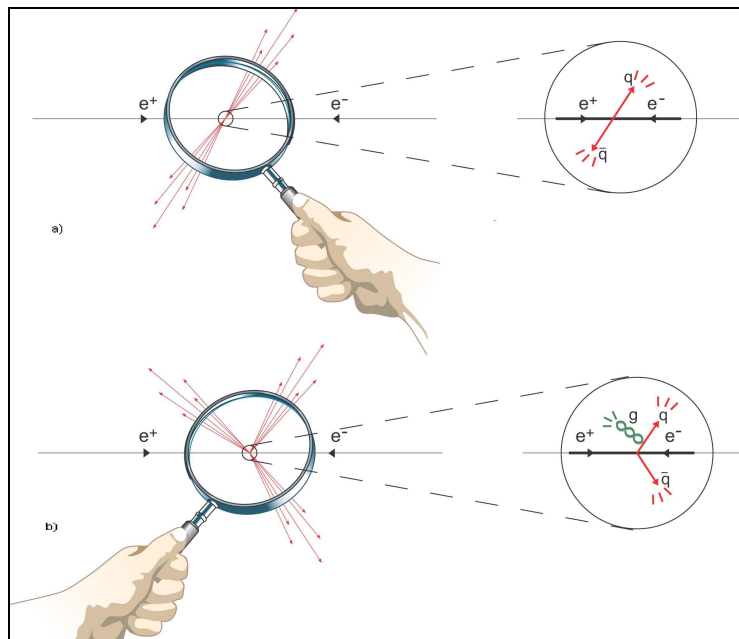
A részecske-kölcsönhatások ma ismert legpontosabb modellje a standard modell háromféle kölcsönhatást, a radioaktivitásért felelős gyenge, az elektromágneses és az atommagok alkotórészeit összetartó erős kölcsönhatást írja le. Ez a sorrend egyben a kölcsönhatások erősségének a sorrendje is: a mai kísérleteket jellemző energiákon a harmadik, az erős mintegy 15-ször erősebb a másik kettőnél. Ennek megfelelően a részecskék ütközésekor az erős kölcsönhatás által vezérelt folyamatok egy nagyságrenddel gyakoribbak, mint az elektrogyenge folyamatok, és így a kísérletek értelmezésének legfontosabb része az erős kölcsönhatás minél pontosabb leírása.

A korszerű részecskegyorsítók építésének elsősorban az a célja, hogy minél nagyobb energiára gyorsítsuk benne a részecskéket, és azok ütköztetésével a lehető legnagyobb energiasűrűséget érjük el kis térfogatban, hogy új, a természetben jelenleg nem található részecskéket állítsunk elő, és tanulmányozzuk tulajdonságaikat. Az ilyen kísérletek legszebb példái a múlt század utolsó évtizedében működtetett LEP gyorsító kísérletei. A LEP gyorsítón elektront ütköztettek pozitronnal eleinte 91,2 GeV tömegközépponti energián, majd nagyobb energiákon, elérve a 209 GeV-et is. A 91,2 GeV arról nevezetes, hogy ez az álló Z-részecske energiája. Mintegy 17 millió Z-részecske előállítására nagy pontossággal sikerült igazolni a standard modell elméleti jóslatait. Például az elektron-pozitron szétsugárzás teljes hatáskeresztmetszetének elméleti becslése meggyőzően egyezik a különböző kísérletekben mért értékekkel.

A kísérletek egyik központi kérdésköre volt az erős kölcsönhatás elméleti modelljének, a kvantum-szindinamikának a kísérleti ellenőrzése. A kvantum-szindinamika elméletnek egyik érdekes és nevezetes jóslata, hogy a részecskék közötti kölcsönhatás erősségét szabályozó csatolási paraméter,  $\alpha_s$ , nem állandó. (Az  $\alpha_s$  szerepe az erős kölcsönhatásban hasonló a tömegvonzást leíró Newton-féle erőtvényben szereplő gravitációs állandó szerepéhez.) A kvantum-szindinamika csatolása annál kisebb, minél nagyobb az ütközésben résztvevő részecskék energiája. Ennek az aszimptotikus szabadságnak nevezett jelenségnek 1973-ban történt felismeréséért kapta Gross, Wilczek és Politzer a 2004. évi fizikai Nobel díjat. Azért éppen 2004-ben, mert a jelenség kísérleti igazolására akkorra gyűlt össze elegendően pontos, meggyőző kísérleti tapasztalat.

Az aszimptotikus szabadság lehetővé teszi, hogy perturbatív leírasmódot használjunk, amelyben a kölcsönhatást a csatolás szerinti sorfejtés segítségével vesszük figyelembe. A perturbációs számítás lényege, hogy matematikai értelemben jól meghatározott eljárással (sorfejtéssel) egyre nehezebben kiszámítható, de egyre kisebb bizonytalanságot okozó járulékokat hagyunk el a pontos eredményből, amelyet az elmélet bonyolultsága miatt csak közelítőleg tudunk kiszámítani. Ilyen módon egyre pontosabb becslést tudunk adni valamely mérhető fizikai mennyiség értékére. A módszer része az egyetemi bevezető kvantummechanika tananyagának, és aki azt jól megtanulta, úgy gondolhatja, hogy ez egy jól megértett, „lezárt” témakör. Nos a kvantum-szindinamika esetében ez távolról sincs így. Hogy miért nem, a nagyenergiájú elektron-pozitron ütközések példáján mutatom be.

A Z-részecske tömegének megfelelő tömegközépponti energián működő LEP-en az elektron és pozitron ütközése során nagy valószínűséggel Z-részecske keletkezik. A Z-részecske elbomlik, az esetek 60%-ban kvark-antikvark pár keletkezik belőle. A kvarkok egymáshoz nagyon közel, nagy energiával keletkeznek, és így aszimptotikusan szabadon mozognak – használható a folyamat leírására a perturbatív kvantum-színdinamika. Igaz ugyan, hogy az egymástól távolodó kvarkok között egyre nagyobb („szín”-)erő hat, és az így felhalmozódó térenergia ahhoz vezet, hogy új részecskék keletkeznek, az észlelőberendezésekben már nem az eredeti két kvarkot látjuk, hanem részecskék sugarát (hadronsugarat). A folyamat azonban emlékét őrzi a kezdeti két kvark által szállított lendületnek és a perturbációszámítással meg lehet becsülni a két hadronsugarat tartalmazó események valószínűségét. Találtak három hadronsugarat tartalmazó eseményeket is, amelyeket úgy lehet értelmezni, hogy a kezdeti két kvarkkal együtt egy gluon is keletkezett (1. ábra).



1. ábra.

- a) Elektron-pozitron két hadronsugarba történő szétsugárzása és annak elemi folyamata:  $e^+ e^- \rightarrow \bar{q} q$ .  
 b) Elektron-pozitron három hadronsugarba történő szétsugárzása és annak elemi folyamata:  $e^+ e^- \rightarrow \bar{q} q g$ .

A kvantum-színdinamikában a perturbatív leírás első bonyodalma éppen a csatlás futása. Ha a végállapotokat nem osztályozzuk a hadronsugarak száma szerint, csupán leszámoljuk a hadronikus végállapotokat, akkor a teljes hadronikus hatáskeresztmetszetet mérhetjük meg. A perturbációszámítással kiszámított teljes

hatáskeresztmetszet tükrözi a csatolás futását, a számítás eredménye függ attól, mekkora energián vesszük a csatolást. Igen ám, csak hogy ez az energia nem mérhető, ezért az eredményünk nem használható becslés. A nemfizikai paramétertől való függést nevezzük renormálási skálafüggésnek. Szerencsére a perturbációs számítás egy másik tulajdonsága segítségünkre siet. Belátható, hogy a perturbációs számítás egyes rendjeiben a  $\mu$  renormálási skálától való függés egyel mindig magasabb rendű, mint a számítás adott rendje. Például, ha a fizikai mennyiséghez kiszámítjuk a perturbáció nagyságát jellemző  $\alpha_s$  ( $\approx 0,1$ ) csatolás második hatványával arányos járulékot, akkor a skálafüggés nagyságrendje, és így a számítás bizonytalansága  $\alpha_s$  harmadik hatványával arányos. Így minél tovább megyünk a perturbációs sor kiszámításában, annál kisebb a skálafüggés, hiszen egynél kisebb szám növekvő hatványai egyre kisebbek. A kvantum-szindinamikában tehát elengedhetetlen a csatolás szerinti sorfejtésben magasabb hatványú, sugárzási korrekcióknak nevezett járulékok figyelembevétele, ha mennyiségileg értelmes jóslatot akarunk tenni.

A második bonyodalommal a sugárzási korrekciók számításakor találkozunk. Perturbatív térelméletben valamely szóródási folyamat valószínűségét megadó szórási hatáskeresztmetszet jól meghatározott szabályok szerint számolható ki. A legnagyobb járulékot jelentő és egyben legkevésbé pontos Born közelítés véges. Az elsőrendű javításhoz kétfajta járulékot találunk. Az egyik esetben egy valódi részecske megjelenik a végállapotban, a másikban egy látszólagos részecskefluktuáció történik (szaknyelven hurokkorrekció). Az észlelő-berendezés egyik részecskét sem észleli külön részecskének, nem tudja feloldani. Mindkét járulékok önmagában végtelen, azonban az összegük véges, ha infravörös véges fizikai mennyiség hatáskeresztmetszetét számoljuk. Az infravörös végeesség minőségileg azt jelenti, hogy az észlelőberendezésben külön részecskének észlelt, feloldatlan részecske megjelenése a végállapotban nem változtatja meg a mennyiség értékét. Például a hadronsugarak száma attól nem változik, ha az egyik végállapotú részecske egy párhuzamosan tovarepülő részecskepárra bomlik, vagy keletkezik egy lágy (nagyon kicsi energiájú) részecske. Így, ha meghatározott számú hadronsugár keletkezésének hatáskeresztmetszetét számítjuk, akkor a valós és hurokkorrekció összege véges. A véges eredményt azonban nem könnyű megkapni, ugyanis a kétféle járulékok nem lehet közvetlenül összeadni (végtelenek összeadását nem értelmezzük).

Ma már az irodalomban léteznek általános eljárások arra, hogyan lehet folyamattól és a mérendő fizikai mennyiségtől függetlenül a számításokat úgy szervezni, hogy az első véges korrekciót megkapjuk, és ismerjük számos alapvető folyamat esetén a kvantum-szindinamika sugárzási korrekcióit. A legáltalánosabb módszer kidolgozásában magam is társszerző voltam. A módszer alkalmazásának szép példája a nagy energiával ütköző elektron és pozitron hadronokba történő szétsugárzása esetén a négy hadronsugár keletkezési valószínűségének kiszámítása. A folyamat a kvantum-szindinamikának a LEP-en történő pontos ellenőrzésének lehetőségét nyújtja. A négy hadronsugarat tartalmazó végállapo-

tok ugyanis számszerűleg a csatolás nagyságától, geometriai szerkezetüket tekintve pedig a kvantum-színdinamika színtöltéseitől is függenek. A színtöltések értéke az elmélet matematikai szerkezetének következménye, például kvantum-színdinamika esetén  $C_F = 4/3$ ,  $C_A = 3$ . Így a hadronsugarak gyakorisága és térbeli elhelyezkedésének mennyiségi jellemzése alapján a csatolás és a színtöltések egyszerre mérhetőek. Ilyen méréseket a LEP együttműködéseiben többször végeztek. Az eredmények összefoglalását találjuk az 5. ábrán. A mérések nagyon pontosan megerősítik a kvantum-színdinamika által becsült értékeket. Nagy örömmel szolgált, hogy a mérés elméleti háttérét Nagy Zoltán doktoranduszom Ph.D. dolgozata, az OPAL detektoron gyűjtött kísérleti adatok kiértékelését pedig Dienes Beatrix doktoranduszom Ph.D. dolgozata foglalta össze.

A LEP kísérleti eredményeit a standard modellel nagy pontossággal sikerül leírni. Mégsem mondhatjuk, hogy sikerült a LEP-en a standard modellt egyértelműen igazolni. A standard modell ugyanis olyan elméleten alapul, amelyben a részecskéknél nem lehet tömegük. Ugyanakkor tapasztalatból tudjuk, hogy a részecskéknél igenis van tömegük, amiről az elméletnek számot kell adni. A standard modellben az *elemi* részecskék tömege a Higgs mechanizmus eredménye, aminek lényege, hogy a részecskék egy egyelőre csak feltételezett skalártérrel, a Higgs-térrel való kölcsönhatás eredményeként nyerik tömegüket, ahhoz hasonlóan, mint ahogy sűrű közegben mozgó test tehetetlensége látszólag megnő. (Az összetett részecskék, mint például az anyagot felépítő proton és neutron tömegének túlnyomó részéért a kvantum-színdinamika felelős.) Ha a Higgs-tér létezik, akkor elő lehet állítani elemi részecskéjét, a Higgs-részecskét, ha elegendő energiasűrűséget sikerül előállítani a laboratóriumban. A LEP kísérletei Higgs-részecskét nem találtak (bár Higgs-keletkezést sugalló eseményekre akadtak).

A jelenleg épülő LHC gyorsító elsődleges célja a Higgs-részecske laboratóriumi előállítása. Protonok fognak ütközni 14 TeV tömegközépponti energián. Ahogy említettem a protonok összetett részecskék, nagyenergiájú ütközéseik során az elemi kölcsönhatás a bennük található kvarkok és gluonok között játszódik le. Ahhoz, hogy ezeket az eseményeket egyáltalán értelmezni lehessen szintén a kvantum-színdinamika pontos ismeretére van szükség, amihez elengedhetetlen a sugárzási korrekciók kiszámítása.

Egy új részecske felfedezésének első öröme után azonnal jön az új részecske tulajdonságainak meghatározása. Ezek a kísérleti analízisek akkor sikeresek, ha pontosak. A mérések pontos kiértékelése a jelenlegi ismereteinknél pontosabb elméleti leírást követel; bizonyos folyamatok esetén nagy szükség lenne a második sugárzási korrekciók ismeretére. Jó példa erre a Higgs-részecske keletkezésének valószínűsége, amely megbecsülhető a perturbatív kvantum-színdinamika eszköztárával. A számítások szerint az első sugárzási korrekció kétszeresére növeli a Born közelítésben számolt hozamot, míg az arra következő (második) korrekció további 15%-os növekedést jelent. Tehát ahhoz, hogy a keletkező Higgs-részecskék számára elfogadható pontosságú becsülésünk legyen, legalább a má-

sodik sugárzási korrekciót ismernünk kell. Somogyi Gábor doktoranduszom Ph.D. dolgozatában egy olyan általános eljárást írt le, amellyel folyamattól és fizikai mennyiségtől függetlenül megkapjuk a véges másodrendű korrekciót. A módszer azonban még nem teljes, további nehéz feladatok várnak megoldásra.

A részecskefizika fejlődését elemezve azt látjuk, hogy a természettudomány kéz a kézben fejlődik a technikával. Időnként ugyan véletlenszerűen születnek forradalmi felfedezések, de ezek az aprólékos és rendszerezett kutatómunka valamint a véletlen házasságának gyermekei. Ahogy újabb és pontosabb megfigyelési eszközöket készítünk, a természet újabb törvényeit vagyunk képesek felismerni. A természettudomány fejlődéséhez vezető ajtó kulcsa „megfigyeléseink pontosságának fokozása”. Azt is láttuk, hogy a részecskefizika területén ez nem csupán egyre nagyobb feloldóképességű berendezések építését jelenti, hanem az elméleti leírás növekvő pontosságát is megkívánja. Az elméleti leírás és a kísérleti technológia együtt fejlődik apró lépésekben. A szenzációra éhes közvélemény nem értékeli kellőképpen ezt a folyamatot. Szívesebben fogadnak forradalmian új elképzeléseket, eljárásokat. Közoktatásunknak fontos feladata lenne, hogy hitelt érdemlően megmutassa, a tudomány fejlődésében egy-egy „nagy ugrás” sok apró lépés eredménye. Minden új eredmény a korábbi eredményekre szervesen épül, akár továbbépítve azokat, akár javítva felismert hiányosságait. Ha a széles közvéleménnyel el lehetne fogadtatni e gondolatokat, nagyobb eséllyel lehetne visszaszorítani az áltudományos feltűnéskeltést.

A pontosság követelménye tekintetben aggasztónak találom közoktatásunk egy másik jellemzőjét. A magyar iskolások gyors ütemben szoknak le a pontos munkáról. Feladatmegoldásként gyakran elegendő valamit benyújtani, a megoldás helyességének ellenőrzése többnyire elmarad, az „alkotói szabadság” védelme alapján bármi elfogadható. A gyerekekben egyáltalán nem alakul ki a pontos munkára való hajlam, és az önellenőrzés készsége. Ha ezen nem sikerül változtatni, a következő nemzedékben nem lesznek olyan magyar pályakezdők, akik alkalmasak lennének tevékenyen részt venni a természettudomány fejlesztésében, és ez hosszú távon egész társadalmunkra kedvezőtlen hatással lenne.

#### *További tájékozódásra*

1. [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1984/index.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1984/index.html)
2. [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1990/index.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1990/index.html)
3. [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2004/index.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2004/index.html)
4. [http://hu.wikipedia.org/wiki/Standard\\_modell](http://hu.wikipedia.org/wiki/Standard_modell)
5. <http://hu.wikipedia.org/wiki/Higgs-bozon>
6. Frank Close, Michael Marten, Christine Sutton: The Particle Explosion, Oxford University Press, New York Tokyo Melbourne, 1987.
7. Mikrovilág, Természet Világa 2000. III. Különszám