

FODOR ZOLTÁN

# A világ keletkezése és az elemi részek fizikája



Fodor Zoltán  
elméleti fizikus  
az MTA doktora

1964-ben született Budapesten. Középiskolai éveit több országos matematika-, fizika- és kémiaversenyt nyert. 1987-ben kitüntetéses diplomával végzett az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Karának fizikus szakán. 1990-ben a fizikatudomány kandidátusa, 1996-ban akadémiai doktora lett.

Pályáját az ELTE TTK Elméleti fizikai tanszékén kezdte, 1998-tól egyetemi tanár. Számos külföldi kutatóintézetben és egyetemen volt vendégkutató, többek között Németországban, Svájcban és Japánban. Az MTA Résekszekefizikai Bizottságának tagja.

Főbb kutatási területe: az elemi részek fizikája, a rácstérelmélet. A rácstérelmélet egyik legnevezetesebb problémájára, a véges anyagsűrűség elérésére 2001-ben adott javaslatát 2003-ban a leghivatkozottabb rácstérelméleti dolgozat volt.

Az elemi részek fizikája a ma ismert legmélyebb, legalapvetőbb tudományos elmélet. Ezzel az elmélettel, az úgynevezett standard modellel az összes kísérleti eredmény teljes összhangban van. Ám, sajnos, még ez az általános elmélet is csak részben tud magyarázatot adni arra az alapvető kérdésre: miért is létezik a világegyetem, és miért létezőnk mi magunk? Az előadás áttekinti az elemi részek fizikájának az alapjait. Megvizsgálja azt a három feltételt, mely a korai világegyetem történései során az anyagi világ kialakulásához szükséges volt.

## Anyagaszimmetria ma és a korai világegyetemben

Az emberiség egyik legősibb problémája, hogy szeretné megérteni saját létének okát, azt, hogy miért is van világegyetem, és miért van benne anyag. Ezekre a kérdésekre ősidőktől fogva próbált választ adni a mitológia, a filozófia vagy éppen a költészet. Babits Mihály írja az *Esti kérdésben*:



„csupa szépség közt és gyönyörben járván  
mégis csak arra fogsz gondolni gyáván:  
ez a sok szépség mind mire való?”

És így folytatja: „miért a dombok és miért a lombok?” Valóban, miért van ez az egész körülöttünk lévő világegyetem? Nem lenne sokkal szimmetrikusabb a világ, ha üres lenne, és nem lenne benne anyag?

Az anyagi világ létezését a következőképpen is megfogalmazhatjuk: A megfigyelhető világegyetemben csak anyagot találunk, s **antianyagot** nem, vagyis aszimmetria áll fenn az anyag és az antianyag között. (Egy antianyag-részecske ugyanolyan tömegű, mint egy részecske, de minden más tulajdonsága ellentétes. Például a protonnak pozitív a töltése, az antiprotonnak negatív.)

Már a tudományos fantasztikus irodalomból tudjuk, hogy anyag- és antianyag-részecskék egymás közelébe kerülve megsemmisülnek, és nagy energiájú foton sugárzás keletkezik. Egy szimmetrikus világegyetemben az ősrobbanás után a keletkezett anyagrészecskék száma megegyezne az antianyag-részecskék számával. Az anyag- és antianyag-részecskék egymást kölcsönösen megsemmisítenék, és a világegyetem semmi másból nem állna, csak sugárzásból. Ez az elképzelés ellentmondásban van a mai megfigyelésekkel, melyek szerint igenis létezik anyagi világ, létezik a szerző és léteznek az olvasók is. Ebből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy az ősrobbanás után valamivel több anyagrészecske volt, mint antianyag-részecske. A pontos számítások azt mutatják, hogy minden milliárd antirészecskére egymilliárd és egy részecskét találtunk volna a korai univerzumban. Az egymilliárd kölcsönös megsemmisülése után, ez az egy, a kicsiny többlet megmaradt, és ezt látjuk ma, mint az anyagi világot. Az elméleti részecskefizika egyik alapkérdése tehát az: hogyan lehet ezt a rendkívül kicsiny anyag többletet a korai univerzum történetében dinamikus módon előállítani?

#### Antianyag:

az antianyag-részecskék tömege ugyanakkora, mint az anyagrészecskék tömege, minden más tulajdonságuk ellentétes. Például a proton töltése pozitív, az antiproton töltése negatív. Ha az antianyag-részecske egy részecskével találkozik, akkor mindketten megsemmisülnek, és a teljes energia két foton formájában sugárzódik szét.

#### Másodlagos részecske:

az atmoszférába érkező kozmikus sugárzás a levegő részecskéivel ütközve újabb részecskéket kelt; ezeket hívjuk másodlagos részecskéknek.

Mielőtt folytatnánk, hadd adjak egy kis biztatást a fiataloknak. A következő táblázatban láthatjuk azon Nobel-díjasoknak a nevét, akik jelentősen hozzájárultak a részecskefizika fejlődéséhez. A több tucat névből álló lista alapján a még pályaválasztás előtt álló fiatalok örömmel állapíthatják meg, hogy ezt a pályát választva sok ezerszer nagyobb az esélye a Nobel-díjnak, mint egy esetleges lottó ötösnek.

Ahogy említettem, akármilyen messzire is nézünk, mindig csak anyagrészecskékkel találkozunk. A Földön rendkívül kevés antianyag van, pontosabban szólva a Chicago melletti Fermilabban találjuk a legtöbbet, nos nem túl sokat: kb.  $10^{-11}$  grammot. Ezt a kicsiny mennyiséget kísérleti célokra állították elő.

Tudjuk, hogy a Hold is anyagból áll. Legjobb bizonyíték erre az, hogy Neil Armstrong első híres lépését túlélte, és képes volt egy második lépést is tenni.

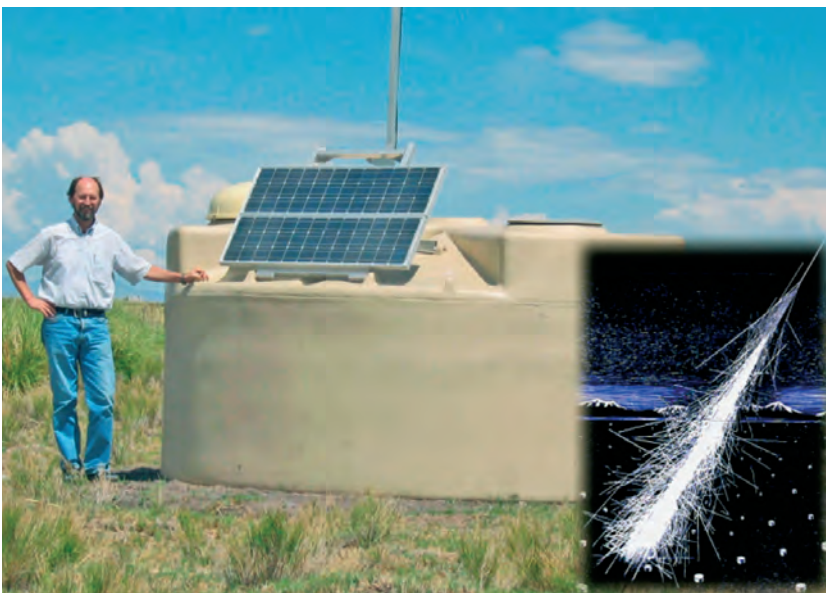
Ha még messzebbre tekintünk, akkor a kozmikus sugárzásban  $10^{-4}$  arányban találunk antirészecskéket. Ezek az antirészecskék azonban az atmoszférában generált másodlagos antirészecskék. Ha egy kozmikus sugárzás az atmoszféránkba érkezik, óriási energiája tömegű alakul, és számos

Carl D. Anderson	Donald A. Glaser	Abdus Salam
Antoine Henri Becquerel	Sheldon L. Glashow	Erwin Schrödinger
Patrick M. S. Blackett	David J. Gross	Melvin Schwartz
Niels Bohr	Werner K. Heisenberg	Julian Schwinger
Max Born	Victor F. Hess	Emilio Gino Segrè
Louis-Victor de Broglie	Robert Hofstadter	Marie Skłodowska-Curie
James Chadwick	Gerardus 't Hooft	Jack Steinberger
Owen Chamberlain	Henry W. Kendall	Otto Stern
Georges Charpak	Masatoshi Koshiha	Richard E. Taylor
John D. Cockcroft	Polykarp Kusch	George P. Thomson
Arthur H. Compton	Willis E. Lamb	Samuel C. C. Ting
James W. Cronin	Ernest O. Lawrence	Sin-Itiro Tomonaga
Pierre Curie	Leon M. Lederman	Martinus J. G. Veltman
Raymond Davis Jr.	Tsung-Dao Lee	Ernest T. S. Walton
Clinton J. Davisson	Simon van der Meer	Steven Weinberg
Paul A. M. Dirac	Robert A. Millikan	Wigner Jenő
Albert Einstein	Wolfgang Pauli	Frank Wilczek
Enrico Fermi	Martin L. Perl	Charles T. R. Wilson
Richard P. Feynman	H. David Politzer	Kenneth G. Wilson
Val L. Fitch	Cecil F. Powell	Chen Ning Yang
Jerome I. Friedman	Frederick Reines	Hideki Yukawa
Murray Gell-Mann	Burton Richter	
Riccardo Giacconi	Carlo Rubbia	

*Nobel-díjasok, akik jelentősen hozzájárultak a részecskefizika fejlődéséhez*

**másodlagos részecskét** kelt. A várakozásoknak megfelelően ezek között találunk antianyagot is. A kísérletek közül a Pierre Auger Observatóriumé a legfontosabb, mely Argentínában egy Nógrád megyényi területen folyik, és az 1. ábrán látható detektoregységeket használja.

Összefoglalva: a hozzánk érkező sugárzásban is megtalálható az anyag-antianyag aszimmetria, hiszen elsődleges részecskéként csak anyag ér el hozzánk.



1. ábra. Auger-detektor



### Kozmikus diffúz gamma-sugárzás:

kozmológiai távolságból (ez több millió fényévet jelent) érkező, pontforráshoz nem köthető gamma-sugarak.

### Anyag- és antianyag-domének:

anyagaszimmetria hiánya esetén a világegyetemben ugyanannyi anyag lenne, mint antianyag. Ezek nem lehetnek egymással összekeveredve, hiszen ebben az esetben szétsugárzódnának. Ezért a fenti elképzelés megköveteli, hogy különálló tartományokban, doménekben legyen anyag, illetve antianyag. Ezen feltételezés szerint mi egy anyagdomén része vagyunk.

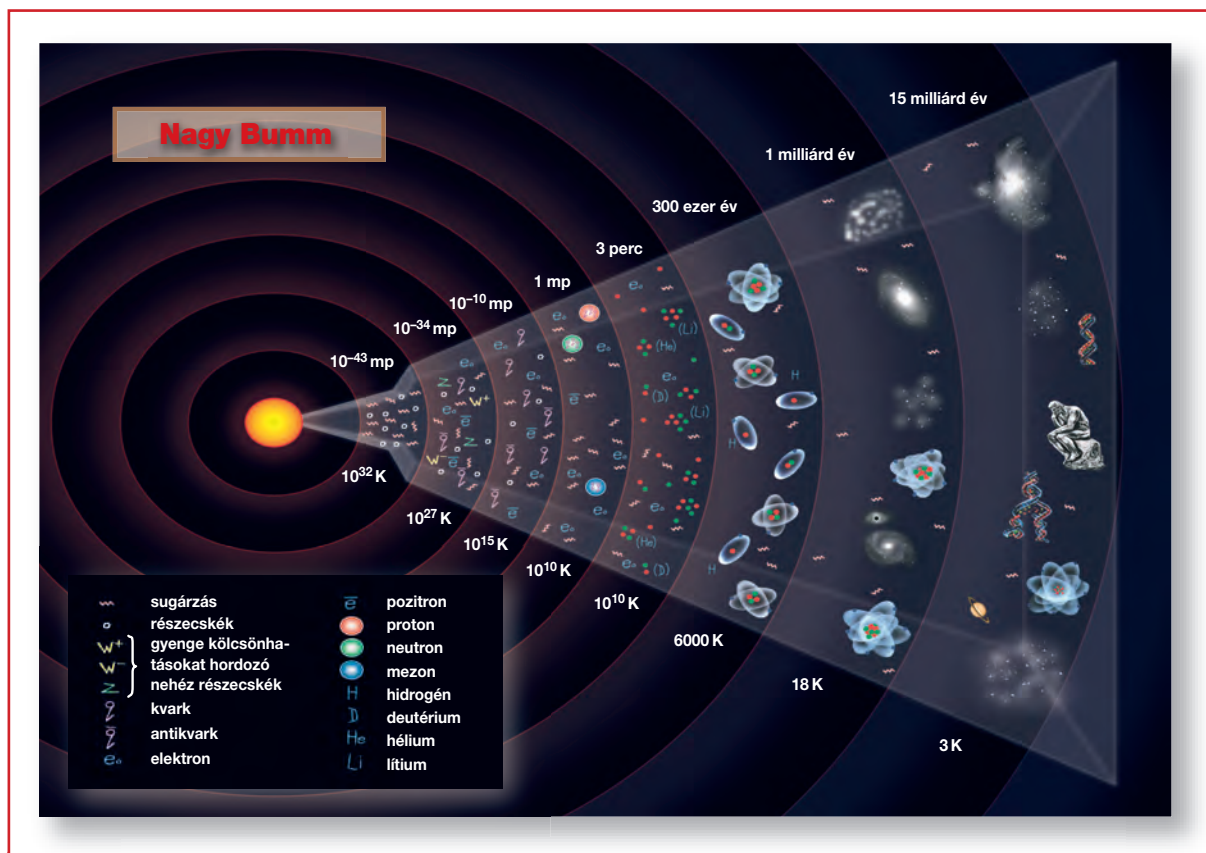
A világ anyagaszimmetriáját vizsgálva a legpontosabb kísérlet az úgynevezett **kozmosz diffúz gamma-sugárzás** mérésén alapul. Ha **anyag- és antianyag-domének** egymás közelébe kerülnének, a szétsugárzás következtében tipikus gamma-sugarakat bocsátanának ki. Méréseinkben ilyen sugárzást nem találunk. Ezt a kísérletet úgy kell értelmezni, mint bizonyítékot az anyag és az antianyag aszimmetriájára.

Hogyan tudjuk megmagyarázni az anyag és az antianyag között lévő aszimmetriát? Erre két lehetőségünk van:

1. Elképzelhető, hogy az anyag- és antianyag-részecskék számának előjeles összege a világegyetem fejlődése során végig változatlan maradt, a kezdeti feltételben, az ősrobbanásakor azonban az anyag-részecskék száma valamivel meghaladta az antianyag-részecskéket.
2. Egy fizikus számára sokkal vonzóbb az a lehetőség, hogy a ma megfigyelt anyagaszimmetria dinamikus fejlődési folyamat eredménye. A világegyetem az ősrobbanásakor szimmetrikus volt, az azóta eltelt idő során azonban lehetővé vált egy kicsiny anyag-többlet dinamikus generálása. A továbbiakban ezzel a második forgatókönyvvel foglalkozunk kissé részletesebben.

Az utóbbi két évtizedben rendkívül sokat tanultunk a **barionszámsértésnek** az úgynevezett elektrogénye skálán megjelenő tulajdonságairól, következményeiről. A kutatók számára ez igen népszerű téma volt. Ennek két oka

2. ábra. A világegyetem fejlődése



van. Először is, hogy az **elektrogyenge elmélet** rendkívüli precizitást ért el. A második ok az, hogy az **elektrogyenge fázisátmenet** után megszűnnek azok a folyamatok, amelyek az anyagszámot változtatják. Ennek következtében az itt kialakult anyagszimmetria mind a mai napig megmaradt.

A 2. ábra mutatja az univerzum történetét az ősrobbanástól napjainkig. Az egyes tengelyeken a karakterisztikus idő- és hőmérséklet-skálák vannak feltüntetve. Az időben visszatekintve láthatjuk, hol alakultak ki a galaxisok, melyek a tipikus **hadronikus** és elektrogyenge skálák. Számunkra a legfontosabb esemény az úgynevezett elektrogyenge átmenet. Ez az ősrobbanás után körülbelül  $10^{-12}$  másodperccel  $10^{16}$  fok hőmérsékleten zajlott le.

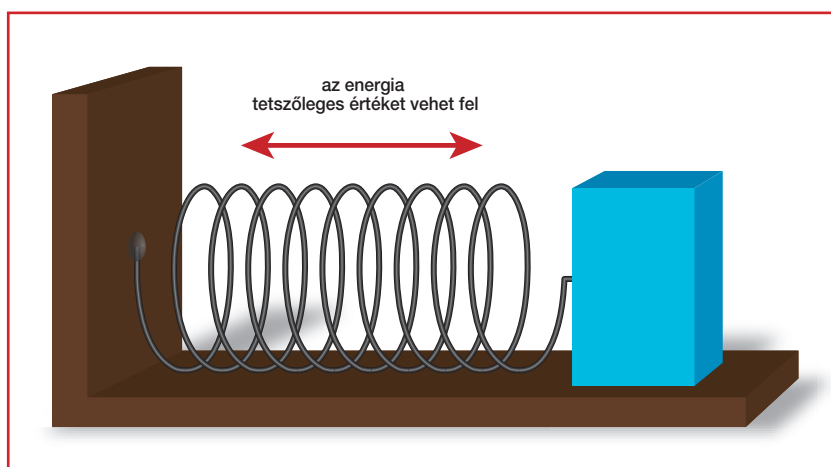
A továbbiakban részletesen megvizsgáljuk, vajon ezen az időskálán lehetséges volt-e a világ **anyagaszimmetriájának** a **dinamikus keltése**, illetve milyen információt szolgáltat az átmenet a világ anyagaszimmetriájáról.

Előtte azonban tekintsük át a különböző fizikai leírásokat, nevezetesen a klasszikus mechanikát, a klasszikus mezőelméletet, a kvantummechanikát és a kvantumtérelméletet.

## Fizikai leírási módok

A **klasszikus mechanikában** a fizikai változó a test helye az idő függvényében. Egy rugóra erősített test rezeg, helyzete az idő függvénye.

A **klasszikus térelméletben** vagy **mezőelméletben** a fizikai mezők a térnek és az időnek a függvényei. Például vehetünk egy tekercset, melybe egyre nagyobb és nagyobb áramot vezetünk, amelynek következtében a mágneses mező helyről helyre időben változik. De ilyen fizikai mezőelmélet például a meteorológia is, hiszen helyről helyre változik a hőmérséklet, a szélsébség, és ezek időbeli változását a fizika törvényei írják le.



### Barionszámsértés vagy anyagszámsértés:

olyan folyamat, melynek a kiinduló és végállapotában a barionszám ( $\rightarrow$  hadron) nem egyezik.

### Elektrogyenge elmélet, elektrogyenge kölcsönhatás:

az elektromágnesség és a bizonyos radioaktív bomlásokért felelős gyenge kölcsönhatás egyesített elmélete.

### Elektrogyenge fázisátmenet:

az elektrogyenge elmélet tulajdonságai nagyon különbözőek alacsony és magas hőmérsékleten. A kettő közötti átalakulást hívjuk elektrogyenge fázisátmenetnek.

### Hadron:

erős kölcsönhatásban részt vevő részecskék gyűjtőneve. A proton és a neutron mellett több száz hadront ismerünk. Nem elemi részecskék, a legtöbbjük két vagy három kvarkból áll össze. Egy kvarkból és egy antikvarkból álló hadronok esetén mezonokról, három kvarkból álló hadronok esetén (ilyen a proton és a neutron is) barionokról beszélünk. Az utóbbiak barionszáma 1, az előbbieké 0.

3. ábra. *Klasszikus mechanika*

A **kvantált elméleteket** nem felcserélhető mennyiségekkel írjuk le. Például: legyen  $x$  a test helye és  $v$  a sebessége.  $x \times v$  nem egyenlő  $v \times x$ -szel. Ez csak első pillantásra tűnik szokatlannak. Igaz,  $5 \times 6$  ugyanaz, mint  $6 \times 5$ ,



de az már nem ugyanaz, ha a buszon véletlenül rálépek a mellettem álló hölgy lábára, majd elnézést kérek, vagy előre elnézést kérek, majd rálépek a lábára.

A klasszikus mechanikában a test rezgésének az energiája bármekkora lehet. Ezt a test maximális kitérése határozza meg.

A klasszikus mezőelméletben a mezők rezeghetnek, ilyen például a fény vagy egy antennából származó rádióhullám. Az elektromos és mágneses mező erőssége a tér minden egyes pontjában időben változik. Például ha a piros ponttal jelölt helyet nézzük, akkor a grafikonon látható módon változott időben a mező erőssége.

4. ábra. Klasszikus térelmélet

#### Anyagaszimmetria dinamikus generálása:

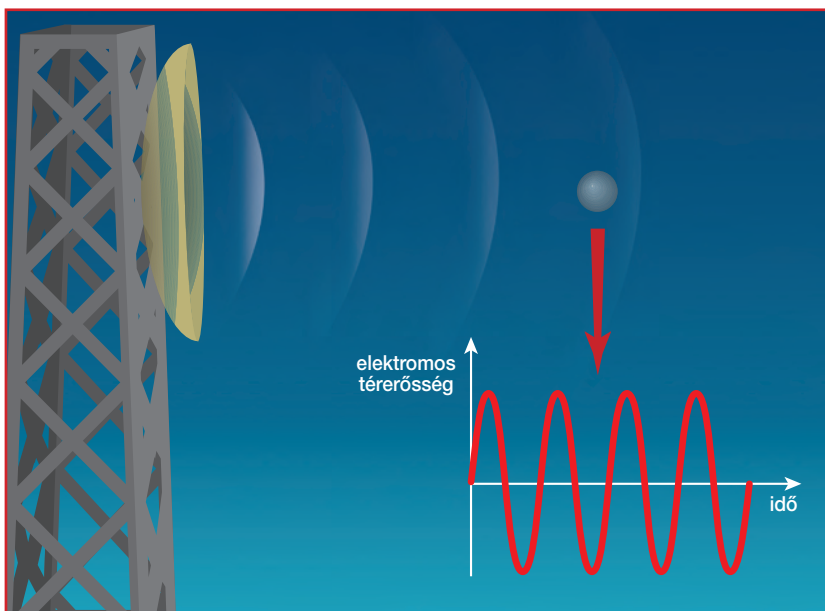
az észlelések arra utalnak, hogy a világon csak anyag létezik. A korai világegyetemben minden egymilliárd plusz egy anyagrészcskére egymilliárd antianyag-részecske jutott. Ezen kicsiny többlet keletkezhetett a korai világegyetem történései során. Ezt nevezzük az anyagaszimmetria dinamikus generálásának.

#### Klasszikus mechanika:

a fizika egyik ága; a testeknek erők hatására végzett mozgását vizsgálja.

#### Klasszikus tér- vagy mezőelmélet:

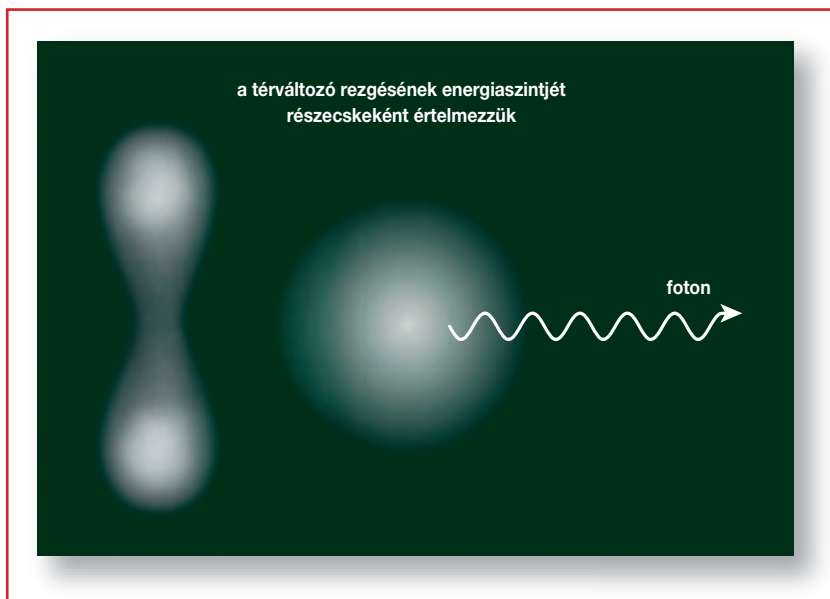
az ilyen elméletek a fizikai mennyiségek térbeli változásait és időbeli fejlődésüket vizsgálják. A tértől és időtől függő mennyiségeket mezőknek nevezzük. Jellegetes példa az elektromágneses térelmélet (ahol a mező az elektromos és a mágneses tér) vagy a meteorológia (itt a hőmérsékletet, a nyomást és a szélsébséget lehet mezőnek tekinteni).



A kvantummechanikában az energiaszintek csak meghatározottak lehetnek, kvantáltak. Ez így van a rugón mozgó test esetében is, de hogy egy közismertebb példát nézzünk, így van a hidrogénatomnál is. Az atommag körül az elektronfelhő csak bizonyos formákat, pályákat vehet fel, melyeknek meghatározott az energiaszintjük.

Midőn a hidrogénatom két állapot között átmegy, elektromágneses sugárzást bocsát ki. A kvantumtérelméletben a mezők ilyen rezgései, melyek a klasszikus elmülethez hasonlóan haladnak, kvantálnak tekinthetők. Kézenfekvő az ilyen tulajdonságokkal rendelkező, haladó csomagokat részecskéként interpretálni. Így lesz a kvantumtérelméletből részecskefizika.

A kvantumtérelmélet egyenleteit bizonyos értelemben igen egyszerűen kapjuk. A kölcsönhatások teljes megadásához csak két, látszólag triviális feltétel szükséges. Szimmetria és belső ellentmondásmentesség. Mit értünk szimmetria alatt? Azt, hogy az egyenletek bizonyos változtatás után ugyanolyanok maradnak. Ha például a tükör elé állunk, akkor a tükörképünk ugyanolyan. Ilyen és hasonló változtatásokra az egyenleteknek változatlanoknak kell maradniuk. Az pedig a legkevesebb, amit elvárhatunk egy tudóstól, hogy az elmélete önmagával ne keveredjen ellentmondásba.

5. ábra. *Kvantumtérelmélet*

A csodálatos az, hogy ezzel a két egyszerűnek tűnő feltétellel néhány olyan egyenletet kapunk, amelyek lényegében a világ összes kísérletével, jelenségével összhangban vannak, a legkisebb alkotórésztől kezdve a tranzisztorokat használó mobiltelefonokon és a napműködésen keresztül egészen az univerzum tágulásáig.

## Az elemi részek fizikája: kísérletek, részecskék és elméleti leírás

Nézzünk egy konkrét példát: az elektron **mágneses momentumát**. Ezt a mennyiséget úgy kapjuk, hogy az elektront mágneses térbe helyezünk, kibillentjük, és megnézzük, hogyan billen vissza.

A fenti két elv alkalmazásával a tudománynak egy példa nélkül álló sikerével találkozunk. Az elektron mágneses momentumát 11 tizedesjegyre meg lehet mérni, és ami az elméleti fizikus számára még érdekesebb, 11 tizedesjegyre ki lehet számolni.

$$m_e = 1,00115965219 \text{ kísérleti mérés}$$

$$m_e = 1,00115965215 \text{ elméleti eredmény}$$

Ez a két eredmény hibahatáron belül megegyezik. Ez olyan pontosság, mintha valaki fantasztikus eljárással ki tudná mérni, hogy mi az a terhelés, amit még kibír a Lánchíd, de egy milligrammal többet már nem. Nehéz kísérlet lenne. De még nehezebb elképzelni, hogy valaki pusztán szimmetriaelvekből – a Lánchíd pesti oldala ugyanolyan, mint a budai, és a jobb és a bal oldal is egyforma –, nos mindössze ennyi információ alapján milligramm pontosan megmondja, hogy mikor szakad le a híd.

### **Kvantált elméletek:**

bizonyos fizikai elméletek gyűjtőneve. Fontos tulajdonságuk, hogy a fizikai változókat nem felcserélhető mennyiségeknek tekintik. Ezen feltétel fontos következménye, hogy a rendszer energiája általában nem lehet tetszőleges, hanem csak bizonyos értékeket vehet fel, más szóval kvantált.

### **Mágneses momentum:**

egy vezető hurok mágneses momentuma a hurokban folyó áram és a hurok területének a szorzata. Mágneses térben a hurok a mágneses térre merőlegesen (azaz a hurok tengelye a mágneses térrel párhuzamosan) fog beállni. Mágneses térbe helyezve a vezető hurokhoz hasonlóan viselkedik számos elemi részecske is (például az elektron), ugyanis az elektron „forgástengelye” legszívesebben a mágneses térrel párhuzamosan áll be. Ennek megfelelően mágneses momentumot rendelhetünk az elemi részecskékhez is.



6. ábra. DESY – Zeus detektor

**Fermion:**

Enrico Fermi olasz fizikus után elnevezett részecsketípus. Ebbe a kategóriába tartozik az elektron, a proton, a neutron, de nem tartozik ide például a foton. Saját perdületük  $1/2$ . Fermionokból egy adott kvantumállapotban csak egy darab tartózkodhat.

**Lepton:**

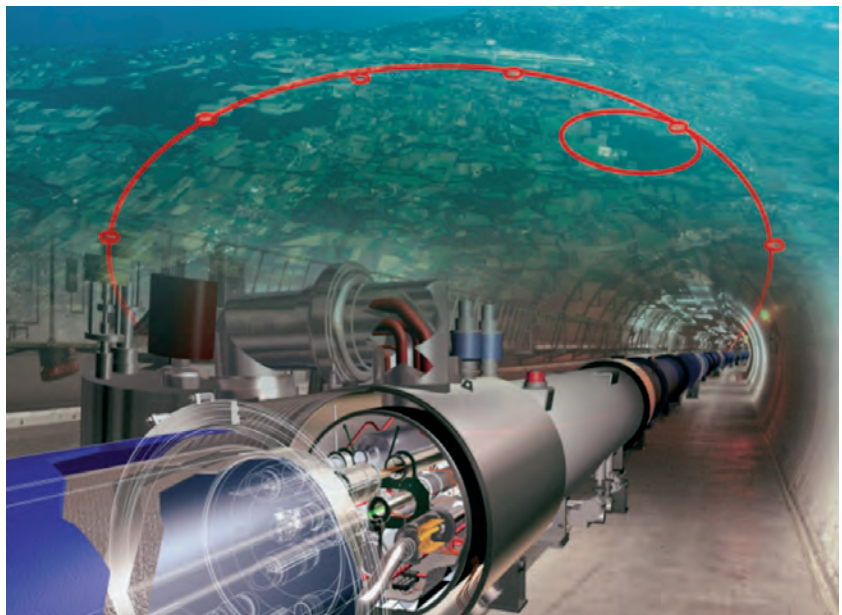
az elemi részecskék egy fermionikus fajtája. Az elektromgolyó kölcsönhatásban részt vesznek, viszont az erős kölcsönhatásban nem. Lehetnek zérus töltésűek (például neutrínók) vagy egységnyi töltésűek (például elektron). Tömegük általában jóval kisebb a hadronok tömegénél (innen származik az elnevezésük is: görögül *leptosz* = kicsi, viszont *hadrosz* = erős, robusztus).

**Lepton-töltés:**

egy részecske lepton-töltése adja az őt alkotó leptonok számát. Az elektromgolyó és erős kölcsönhatás kvantált elméletében csak a barionok száma mínusz, a leptonok száma megmaradó mennyiség, maga a leptonszám nem. Azaz egy folyamatban akár nőhet is a leptonok száma, ha mindeközben a barionok száma is ugyanannyival nő.



A részecskefizika kísérleti eszközei a gyorsítók és a detektorok. Ezekben a berendezésekben például elektronokat vagy protonokat gyorsítunk majdnem fénysebességre, majd összeütköztetjük őket. A hatalmas energia miatt százszámra keletkeznek további részecskék, melyeket detektorokban analizálunk. Az egyik ilyen berendezés a DESY-ben található Hamburgban. Ahogy az a 6. ábrán látható, egy ilyen detektor akkora, mint egy négyemeletes bérház.



7. ábra. Az LHC a CERN-ben

Ilyen intézet még a Fermilab Chicago mellett, illetve a KEK Tokió mellett. A Genf mellett megépített CERN magyar részvétellel működik. A berendezés olyan érzékeny, hogy a száz méter mélyen folyó kísérletek nemcsak a Genfi-tó vízszintváltozását észlelték, hanem a helyi gyorsvonat menetrendjét is.



Milyen részecskéket ismerünk? Az anyagi világ alkotórészeinek elsősorban a **fermionok**at tekintjük. Két fajtájuk van, a **leptonok** (például elektron) és a **kvarkok** (például *u* és *d*, amelyekből a protont lehet felépíteni). A leptonok leptonszáma 1, a kvarkok barionszáma  $1/3$ . Ezeket mutatja be az alábbi táblázat.

fermionok, saját impulzusmomentum (perdület): $1/2$			
lepton ( $L = 1, B = 0$ )	$e^-, \nu_e$	$\mu^-, \nu_\mu$	$\tau^-, \nu_\tau$
kvark ( $L = 0, B = 1/3$ )	$d, u$	$s, c$	$b, t$
<p><b>proton:</b> két <i>u</i>, egy <i>d</i> kvarkból áll  <b>neutron:</b> két <i>d</i>, egy <i>u</i> kvarkból áll</p> <p>klasszikusan: <math>B, L</math> megmarad  kvantumosan: <math>B - L</math> megmarad, <math>B + L</math> sérül</p>			

Ismert részecskék

Az anyagi világot alkotó részecskékről lásd még Horváth Zalán előadását (ME 3. köt. 155–171. p.).

Milyen kölcsönhatások hatnak a fermionok között? A következő táblázat egyre gyengülő sorrendben mutatja a négy ismert kölcsönhatást, azok erősségét és a közvetítő részecskéket.

közvetítő bozonok, saját impulzusmomentum: egész		
	erősség	közvetítő
erős (atombomba)	1	gluon
elektromágnesség	$1/137$	foton
gyenge ( $\beta$ -bomlás)	$10^{-5}$	bozon, $W, Z$
gravitáció	$10^{-40}$	graviton

Ismert kölcsönhatások

A gyenge kölcsönhatás felel bizonyos radioaktív bomlásokért, az erős kölcsönhatás pedig az atommagban levő erőért. A neutron radioaktív bomlása egy elektromágneses kölcsönhatás (8. ábra).

Érdeemes megjegyezni, hogy a neutron bomlási ideje körülbelül tíz perc. Testünk tömegének majdnem a fele neutron, és mégsem bomlunk el tíz perc alatt. A neutronok nem csupaszon vannak a testünkben, hanem atommagokba ágyazva. A tény, hogy nem bomlunk el, mutatja, milyen fontos lehet a környezet szerepe. A folyamat gráfszerű végigkövetése nagyon lényeges a részecskefizikában.

Nos, kövessük végig másik kedvenc témánkban, az elektron mágneses momentumának esetében, ugyanúgy gráfszerűen a folyamatokat.

Az elektron kölcsönhatásban van a mágneses térrel, melyet egy foton közvetít. A 9. ábra első része ezt mutatja. De lehet, hogy az elektron, még mielőtt kölcsönhatott volna a külső tér fotonjával, maga is kibocsát egy foton, melyet később elnyel. Ezt mutatja az ábra második része. Még bonyo-

**Kvark:**

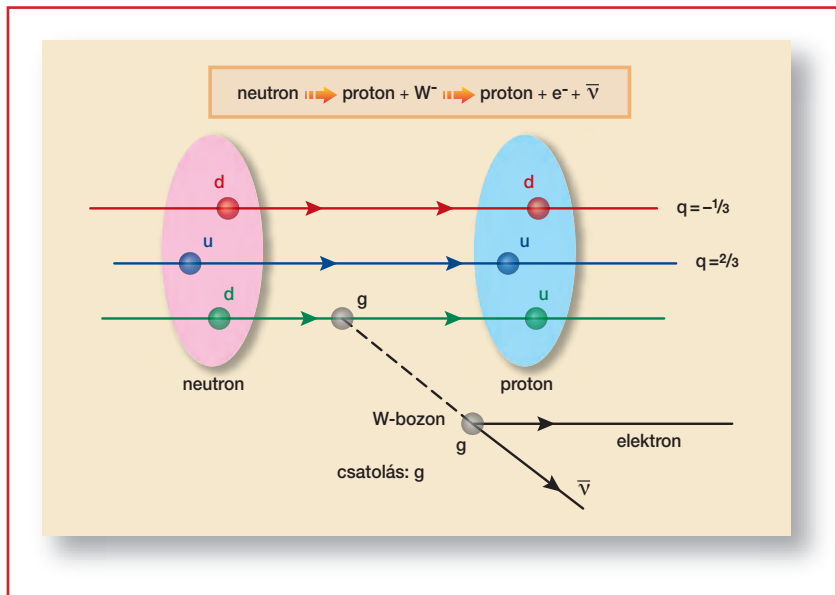
a hadronok alkotórésze, az elemi részecskék egy fermionikus fajtája. Elektromos töltésük az elektron töltésének  $1/3$  vagy  $2/3$  része, barionszámuk  $1/3$ . (Ezzel lesz a három kvarkból álló proton barionszáma 1.) Az erős kölcsönhatásnak alapvető tulajdonsága, hogy különálló kvarkot nem lehet megfigyelni a természetben.

**W-bozon:**

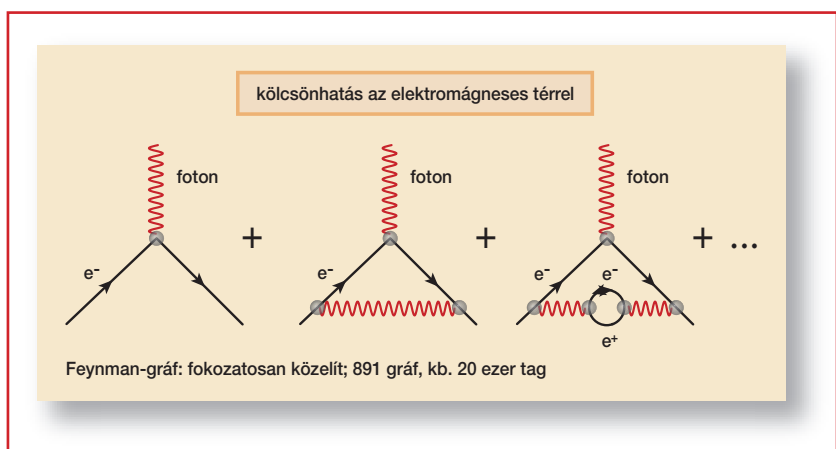
a gyenge kölcsönhatás egyik közvetítő részecskéje. Töltése az elektron töltésével megegyezik, tömege a proton tömegének nyolcvanszorosa.



8. ábra. *Elektrogyenge folyamatok.*  
A neutron három kvarkból áll.  
Az egyik kvark kibocsát egy  $W$  bozont, mely elbomlik egy elektronra és egy antineutrínóra



9. ábra. *Az elektron mágneses momentuma*

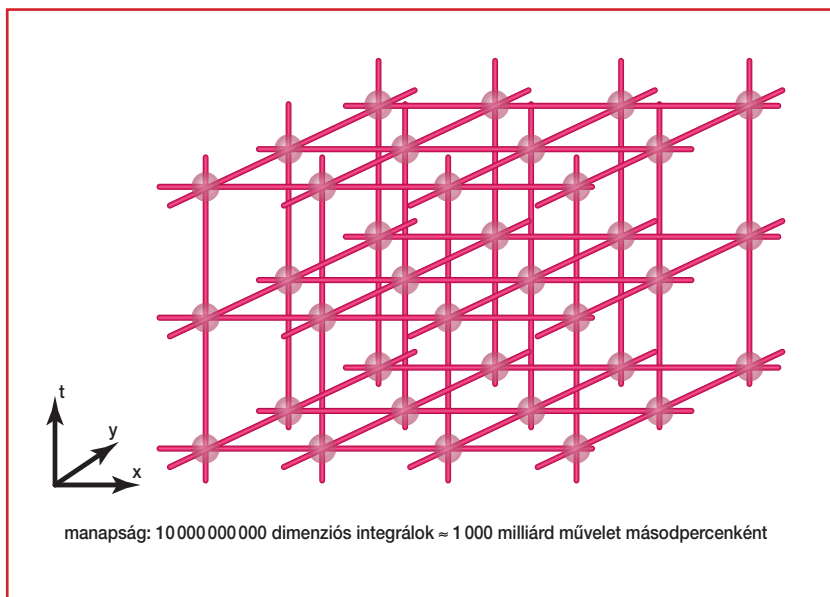


lultabb az az eset, amelyben az elektron által kibocsátott foton egy elektron–pozitron párra szétsugárzódik, majd újra fotonná egyesül. Ezt láthatjuk az ábra harmadik részén.

Ezt a gráfszerű eljárást Richard P. **Feynman** amerikai fizikus dolgozta ki; Nobel-díjat kapott érte. Az egyre bonyolultabb járulékok egyre kisebbek és kisebbek, így fokozatosan közelítik a végeredményt. Ma összesen 891 **gráf**-nak a járulékát ismerjük, ami körülbelül húszezer tag. Tehát ahogy láttuk, bár mindig van esély a Nobel-díjra, keményen kell dolgozni érte.

A fokozatos közelítések módszere mellett az elméleti részecskefizika egy másik szisztematikus közelítő módszere az úgynevezett **rácstérelmélet**. Alkalmazása során a teret és az időt felosztjuk, egy rácsot kapunk. Hasonló rácsot használnak az időjárás-előrejelzés során, amikor különböző földrajzi helyeken és magasságokban mérik a hőmérsékletet, szélirányt stb. Minden polgári repülőgép méri ezeket az adatokat, ebből készülnek végül az időjárás-előrejelzések.

A részecskefizikában a rács rácsponthiba az elektrogyenge elmélet **térerősségeit** írjuk. Az egyes jelenségeket pedig nagy számítógépekkel számít-

10. ábra. *Kvantummechanika téridőrácsán*

juk ki. Manapság tízmilliárd dimenziós integrálokat számolunk (csak emlékeztetőként: a területszámítást nevezük kétdimenziós, a térfogatszámítást háromdimenziós integrálnak). Másodpercenként ezermilliárd műveletre van szükség, ami nyilván szuperszámítógépeknek való feladat.

## Szuperszámítógépek és az elméleti részecskefizika

A 21. század elejének ilyen emblemikus szuperszámítógépe például a japán Earth Simulator, Föld-számoló. Másodpercenként sok ezer milliárd műveletet végez, de sajnos az ára is a dollár milliárd nagyságrendjébe esik. Magyarországon ez az út egyelőre nem járható. Ezért az Eötvös Loránd Tudományegyetemen kifejlesztettünk egy szuperszámítógépet, mely a részecskefizikában versenyképes a japán géppel, de annak töredékébe kerül. Ez annak tudható be, hogy mi személyi számítógépekből építkezünk, és nem készen vesszük a szuperszámítógépet. A PC-k a számítási képességeikhez képest nagyon olcsók – az óriási piac miatt. Nézzük, hogyan lesz a PC-ből részecskefizikára alkalmas szuperszámítógép.

A PC-s játékprogramokban a történet majdnem mindig ugyanaz: valamelyik irányból jön a gonosz, oda kell fordulni, és el kell látni a baját. A játékprogramokban megjelenő forgatás számítási szempontból ugyanaz, mint az elektroyenge elmélet. Azaz, ameddig a PC-gyártók arra törekednek, hogy a játékprogramok minél gyorsabban fussanak, és úgy húzozzák be a processzorokat, addig a részecskefizikai számítások is egyre gyorsabbak lesznek. Persze programozási szinten el kell menni a megfelelő szintig.

A számítástechnika másik húzóereje az internet. 2005-ben már a gigabites **Ethernet**-kártya, gigabites **switch** standardnak számít. De nem kell fel-

### Feynman-gráf, Feynman-diagram:

részecskefizikai folyamatok könnyen áttekinthető, képszerű megjelenítése. A részecskék szabad terjedését vonalakkal ábrázoljuk, a különböző vonalak találkozása jelenti a részecskék közötti kölcsönhatást.

### Rácstérelmélet:

a mezőelméletek azon leírási formája, melyben a mezők nem a folytonos térnek és időnek függvényei, hanem csak egymástól állandó távolságra lévő téridőpontokban vannak értelmezve (más szavakkal, egy téridőrácsán vannak definiálva). Egy szemléletes – bár kissé távoli – példa a televízió vagy a digitális fénykép, ahol egy folytonos képet közelítünk pixelekkel.

### Térerősség, mezőerősség:

valamely mezőnek egy adott pontban felvett értéke.

### Ethernet:

több számítógép összekapcsolásához minden számítógépnek rendelkeznie kell egy Ethernet-kimenettel; ez lehet külön kártya, vagy maga az alaplap is tartalmazhatja.

### Switch:

elektronikus berendezés, mely több számítógép összekapcsolására képes.



### Periodikus határfeltétel:

véges rendszer esetén (konkrét számolások rácsélméletben a számítógépidő végessége miatt csak véges rendszereken történhetnek) a mezőelméletet leíró egyenletek nemcsak a rendszer belső pontjaitól, hanem a mezőknek a rendszer határán felvett értékeitől is függenek. A mezők határm menti értékei a határfeltételek, melyek az elmélet bemeneti adatai. (Ilyen határfeltétel például a rezgő vonalzó esetén a vég – rögzített végek esetén a megpendített vonalzó teljesen másképp „szól”, mint ha az egyik vége el lenne engedve.) Periodikus a határfeltétel akkor, ha megköveteljük, hogy a rendszer bal határán a mező értéke ugyanaz legyen, mint a jobbon.

tétlenül switchen keresztülvinni az adatot. Ezért aztán feloszthatjuk a világ-egyedet apró részekre, ezeket számoljuk egy-egy PC-n, és mindegyik részt összekötjük a szomszédjával, hiszen a történések csak a közvetlen környezet-től függenek. Az ELTE személyi számítógépekből készített egy szuperszámító-gépet. Négy gigabites kártyát tettünk egy gépbe, és mint egy kockás papíron, összekötöttük a négy szomszédjával (**periodikus határfeltétel**).

## Az anyagaszimmetria keltésének fizikai feltételei

Az anyagaszimmetria keltéséhez Andrej Szaharov három szükséges feltételt állított fel. (1) Egyrészt kellett, hogy létezzenek anyagszámsértő folyamatok: ha nem lettek volna, akkor az összanyagszám nulla maradt volna. (2) A másik feltétel kissé bonyolultabb, tértükrözéssel, töltéstükrözéssel és szimmetriasértéssel kapcsolatos – ezt egy kicsit részletesebben tárgyaljuk. (3) A harmadik feltétel: az univerzum lépjen ki a termikus egyensúlyból. Ugyanis egyensúlyban a különböző mennyiségek, így az anyagszám is állandó. Ha nulla volt, akkor annyi is maradt.

### Anyagszámsértő folyamatok

Nézzünk egy egyszerű analógiát anyag–antianyagkeltésre. A példa távolinak tűnik, de meglepően sok hasonlóságot mutat a részecskefizikai számolással. Képzeljünk el egy bankot, amelynek csak adósai vannak, akik 1, 2, 3 stb. forinttal tartoznak. Ezeket a bank –1-eskének, –2-eskének stb. nevezi, így tartja őket nyilván. Ezért nem is engedi, hogy két ügyfélnek ugyanannyi adóssága legyen, mert akkor nem tudja megkülönböztetni őket. Nem engedi a nullás ügyfeleket sem, mert miért kellene nekik bank. Tegyük fel, hogy –1-eske rendezi tartozását, és betesz 2 forintot. Így felkerül az 1-es szintre, miközben megürül a –1-es szint. Az 1-es szintet értelmezzük részecskeként, a –1-es hiányát antirészecskeként. A korai világegyetemben nagyon magas hőmérséklet uralkodott, és a 2 forint mint energia ebből származott. Nyilvánvaló, hogy ha egy részecske keletkezik ezen a módon, akkor keletkezik egy antirészecske is, vagyis számuk megegyezik.

Vegyünk szemügyre egy számítógépes bűnözőt, egy hackert, aki a –1-en áll. A következő számlacserés trükköt eszeli ki: a számítógépen keresztül felteszi magát 1-eskének, de hogy ne ürüljön meg a –1, ezért oda felteszi a –2-eskét, a –2-eske helyére a –3-askát. És így tovább. Ha a bank csak arra gondol, hogy pénzforgalom nem volt, és minden adósa a helyén van, akkor bizony pórul jár. Ezt a trükköt csak azért lehetett megcsinálni, mert végtelesen sok adós volt. (De ilyen bank nincs, úgyhogy ezért is merem elmondani ezt a példát anélkül, hogy félnék, hogy valami felbujtás jellegű büntetőjogi problémába keveredek.) Összegezve: a részecskefizikai analógia szerint egy részecske keletkezett.



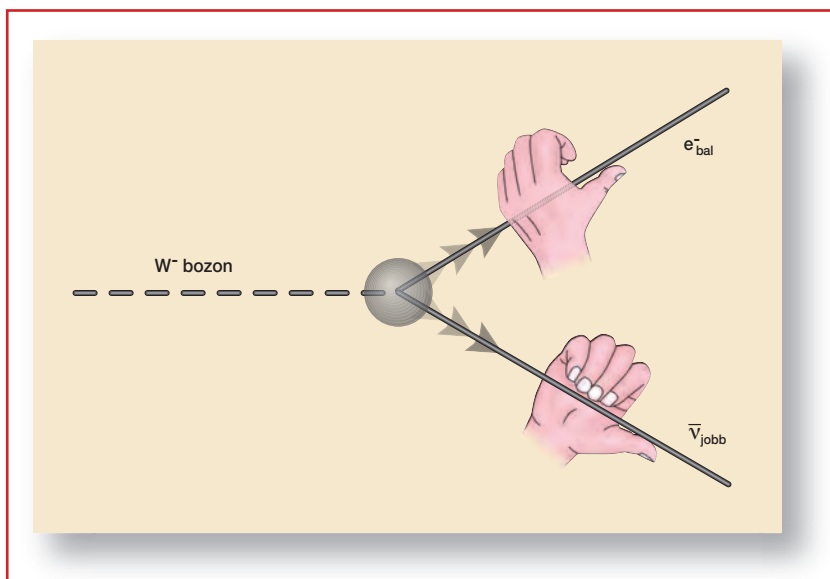
Szaharov, Andrej Dmitrijevics  
(1921–1989)

De lehet, hogy a  $-1$ -es hacker csak szeretne lekerülni az adólistáról. Kicseréli a  $-1$ -est a  $-2$ -essel, de hogy ott ne legyenek ketten, a  $-2$ -est kicseréli a  $-3$ -assal és így tovább. Végeredményben a  $-1$ -eske megürült. Ebben az esetben egy antirészecske keletkezett.

A világegyetemben is történhet ilyen különös átrendeződés, mely csak anyagot kelt. Ehhez egy **energiagát**on át kell haladni. A korai világegyetem nagyon meleg, energia van bőven a rendszerben, át tud menni a gáton, és a részecske keltése sem probléma energiaszempontról. A gát tetejét szfaleronnak hívjuk, és egy-egy ilyen átmenet után minden fermionból keletkezik egy-egy. Leptonokból is, barionokból is. Mivel együtt keletkeznek, különbségük állandó marad,  $B-L$  konstans. Így Szaharov első feltételét kielégítettük.

## Szimmetriasértés

Térjünk vissza a banki hasonlathoz. Elképzelhető, hogy számos hacker próbálkozik. Az egyik fölfelé rendezi át az ügyfelek listáját, utána egy másik pedig lefelé rendezi át a listát. Ahelyett hogy mind a ketten nyernének, egyikük sem fog. A lista ugyanolyan lesz, mint eredetileg volt. Ahhoz, hogy a hackelés eredményes legyen, az egyik irányt ki kell választaniuk: vagy inkább a pozitív irányba kell mozogniuk, vagy inkább a negatív irányt kell preferálniuk, a pozitív–negatív tükrözési szimmetriáját nem szabad engedni. A részecskefizikában hasonlóképpen különbséget kell tennünk a pozitív és a negatív között.



11. ábra. Neutronbomlás

A 11. ábra a már vizsgált neutronbomlásnak az utolsó része. A  $W^-$  bozon elbomlik elektrorra és antineutrínóra. Itt feltüntettük azt is, hogy a folyamat végén kirepülő elektron és **antineutrínó** merre pörög. Az antineutrínó esetében a hüvelykujjunkkal a repülés irányába mutatunk, és mintha a jobb kezünkkel csavarnánk be egy villanykörtét, az elektron esetében pedig mintha a bal kezünkkel egy tükrözött villanykörtét. Ezt jelölik az indexek is.

### Energiagát:

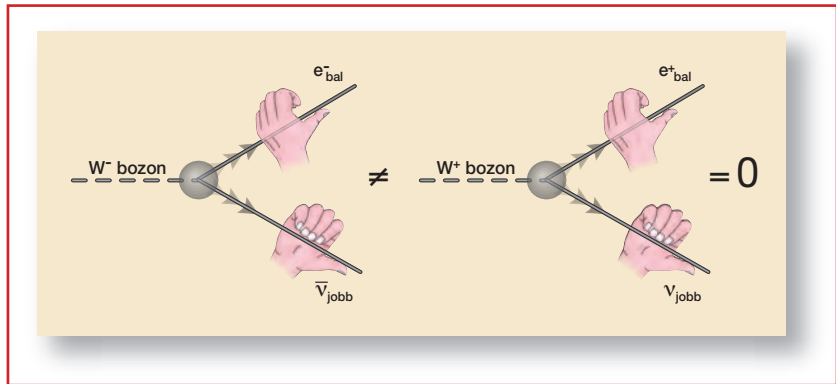
szemléletes példa: egy hegy két oldalán elterülő két völgy. Míddőn a rendszer az egyik minimumból (egyik völgy) a másikba szeretne átjutni (másik völgy), kénytelen energiáját megnövelni, azaz az energiagátat megmászni.

### Antineutrínó:

a neutrínó antirészecskéje. Mivel maga a neutrínó zérus elektromos töltéssel rendelkezik, az antineutrínónak sincs elektromos töltése.



12. ábra. Töltéstükrözött folyamat

**C, P, CP szimmetria:**

a részecskefizikában különösen fontos szerepük van a következő transzformációknak:

1. egy folyamatban minden részecskét az antirészecskéjére cserélünk (C transzformáció);
2. egy folyamat térbeli koordinátáin elvégzünk egy tértükrözést, azaz durván szólva egy folyamatot a tükörből nézünk végig (P transzformáció);
3. egy folyamaton előbb C, majd P transzformációt hajtunk végre (CP transzformáció).

Egy transzformációt akkor nevezünk egy folyamat szimmetriájának, ha a transzformációt a folyamaton elvégezve a lezajlás valószínűsége nem változik meg. Az erős és elektromágneses kölcsönhatásokban a C, a P és a CP transzformáció szimmetria, míg a gyenge kölcsönhatás mindegyiket sérti; azaz egy gyenge kölcsönhatás által vezérelt folyamat, illetve pontos tükörképe nem ugyanolyan valószínűséggel valósul meg. A CP szimmetriasértés a gyenge kölcsönhatás esetén lehetőséget kínálhat az anyagi világ létének megmagyarázására.

**Effektív potenciál:**

a rendszer energiája, midőn valamely mező értékét állandónak tekintjük.

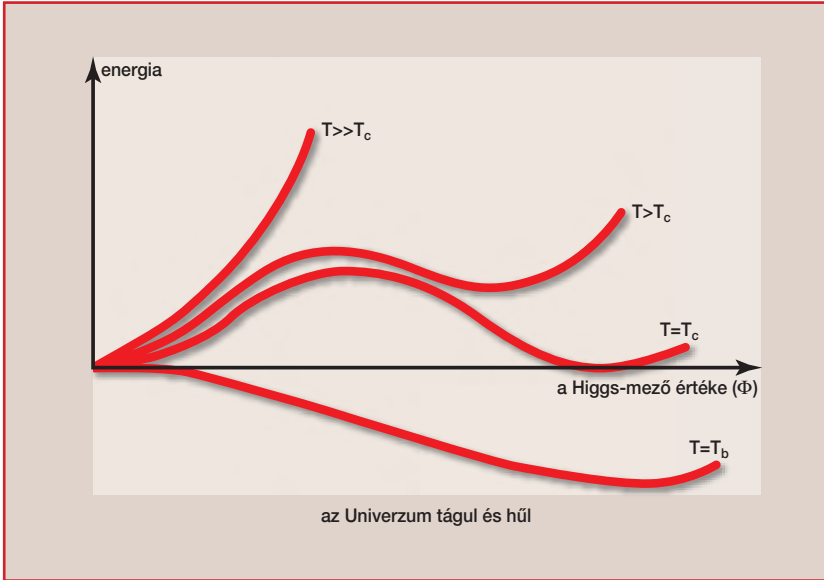
Most vizsgáljuk meg a töltéstükrözött folyamatot (C-tükrözés), változtassunk mindent pozitívból negatívba. A 12. ábra első része az eredeti folyamat, a második a megváltoztatott:  $W^-$  bozonból  $W^+$  bozon lesz; negatív töltésű elektronból pozitív töltésű, és az antineutrínóból neutrínó. A gyenge kölcsönhatás erre a változtatásra nem szimmetrikus. A töltéstükrözött folyamat nem valósulhat meg, az ilyen bomlás esélye nulla.

Ha a töltéstükrözés mellett tértükrözést is végzünk, a balkezesből jobbkézest csinálunk, akkor már lényegesen jobb szimmetriával, a **CP szimmetriával** állunk szemben, azonban még ez sem tökéletes. De emlékezzünk vissza, hogy mi ezt akartuk: a két irány között legyen különbség. Így kielégítettük Szaharov második feltételét.

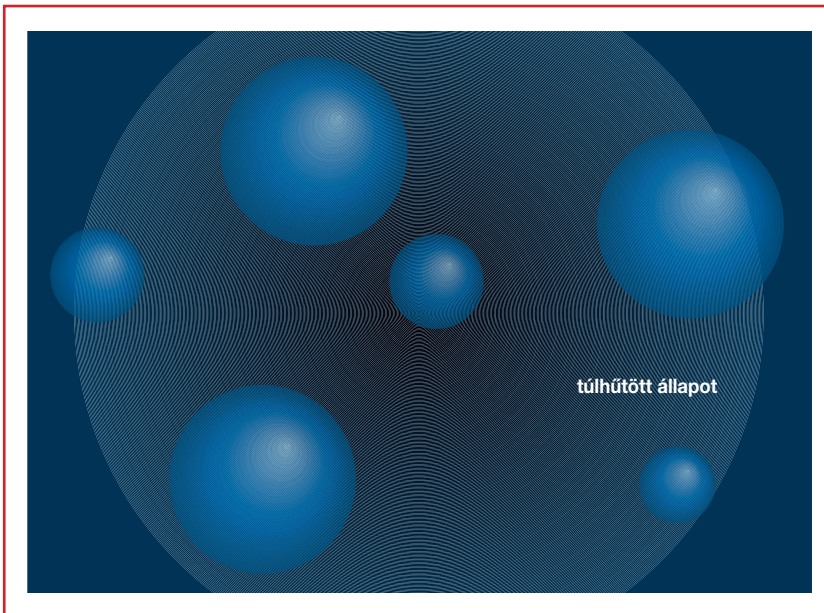
## A világegyetemnek nem szabad termikus egyensúlyban lennie

Szerencsére a korai univerzum gyorsan tágul. Hogy mi is történik, azt leginkább az **effektív potenciál** segítségével írhatjuk le. Ez a görbe a rendszer energiáját mutatja, attól függően, hogy mekkora egy mezőnek, az úgynevezett Higgs-mezőnek az értéke ( $\phi$ ). A rendszer persze, akárcsak egy golyó, szeretne a minimumba jutni. Nagyon magas hőmérsékleten ( $T \gg T_c$ ) csak egy **szimmetrikus minimum** van. A rendszer a szimmetrikus fázisban található. Ahogy a korai világegyetem tágul, és ennek következtében lehűl, fellép egy második, úgynevezett **sérült minimum**. Az úgynevezett **kritikus hőmérsékletnél** ( $T_c$ ) két minimumot találunk, melyeknek az energiája megegyezik. Még később a szimmetrikus fázis már nem stabil, és egy fázisátmenetet észlelünk a szimmetrikus fázisból a sérült fázisba. Mivel a Higgs-térnek a várható értéke nulláról ugrik v-re, ezért a fázisátmenet elsőrendű. Egy hétköznapi példát említve: a víz forrása vagy a vízgőz lecsapódása is egy elsőrendű fázisátmenet, mert a sűrűség egy kis értékről egy nagy értékre ugrik.

Egy ilyen elsőrendű elektromágneses fázisátmenet esetében a folyamat nagyon hasonlít a vízgőz lecsapódására vagy egy túlűtött folyadék megfagyására. A rendszer már szeretne a hideg fázisban lenni. Ahogy a 14. ábrán látjuk, a túlűtött rendszerben cseppecskék jelennek meg, de a felületi feszültség miatt energetikailag a kis cseppek nem kedvezőek. Túl kicsi az új fázis energianyere-



13. ábra. A világegyetem hűlése és az effektív potenciál közötti kapcsolat



14. ábra. A fázisátmenet folyamata

sége – ez a térfogattal, a sugár köbével arányos – a felületi feszültség energia-vesztéséhez képest, ez a felülettel, azaz a sugár négyzetével arányos. A kicsi cseppek eltűnnek, de a nagyok nőnek és betöltik az egész univerzumot.

Egy ilyen elsőrendű elektroyenge fázisátmenet során a tipikus nagyságrendek a következők:

világegyetem kora	$\sim 10^{-12}$ sec
fázisátmenet időtartama	$\sim 10^{-14}$ sec
horizont mérete	$\sim 1$ cm
túlhűlés	$< 1\%$
világegyetem hőmérséklete	$\sim 10^{16}$ K

**Szimmetrikus minimum, sérült minimum:**

valamely  $f(x)$  függvény esetében  $x_0$ -t a függvény szimmetrikus minimumának nevezzük, ha a)  $f(x_0)$  minimális; b)  $x_0 = T(x_0)$ , ahol  $T$  egy transzformáció (például tükrözés vagy forgatás). Minden más esetben a minimumot sérült minimumnak nevezzük. Például közönséges valós függvények esetében a transzformáció a tükrözés:  $T(x_0) = -x_0$ , így  $x_0 = -x_0$  egyenlőséget kell kiegyenlítőnk, azaz csak az  $x_0 = 0$  helyen felvett minimumot tekintjük szimmetrikus minimumnak.



### Kritikus hőmérséklet:

egy halmazállapot-változás (fázisátmenet) során azt a hőmérsékletet tekintjük kritikusnak, amelynél a két különböző halmazállapot (fázis) egymás mellett, egyensúlyban tud létezni. Például a víz–jég fázisátmenet esetében légköri nyomáson a 0 fok.

### Forró elektroyenge plazma:

az elektroyenge elmélet magas hőmérsékletű (100 GeV, amely körülbelül 10 000 000 000 000 K°-nak felel meg) halmazállapota (fázisa).

### Higgs-mező:

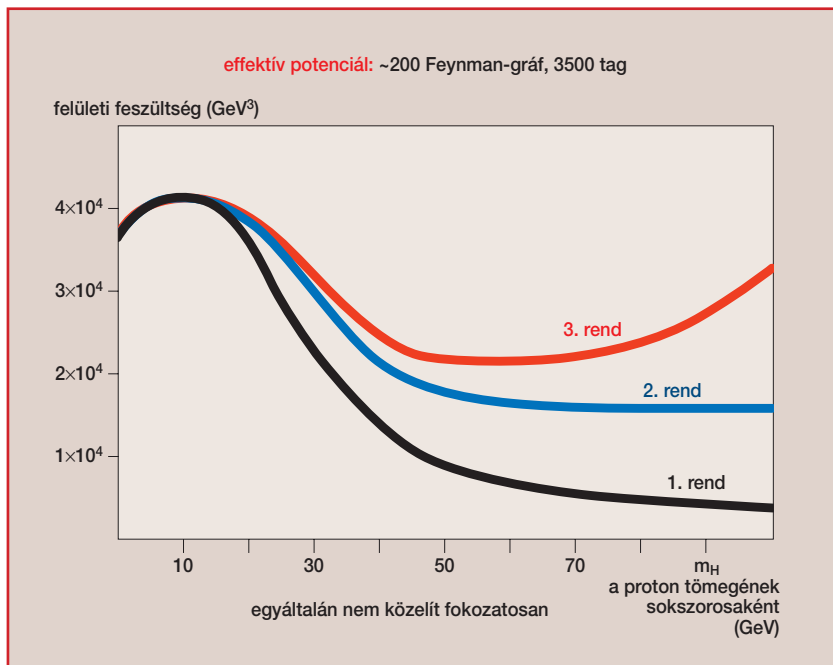
hasonló az elektromos és mágneses mezőhöz, azaz a tér minden pontjában valamilyen értéket felvesz. Kvantumait Higgs-részecskének nevezzük.

A számításokban van egy ismeretlen adat, az effektív potenciálnál tárgyalt **Higgs-mező**höz tartozó részecske tömege. Kísérletileg még nem találták meg, de tudjuk, hogy nehezebb, mint száz proton.

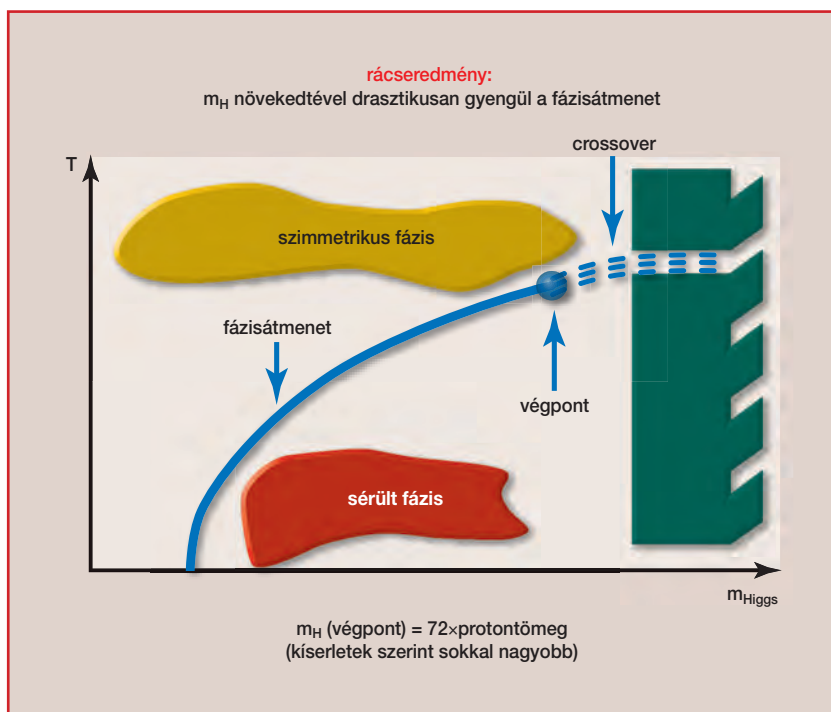
Láttuk, hogy sikeres anyaggeneráláshoz különbséget kell tennünk pozitív–negatív, jobb–bal között. A cseppek falában lévő részecskék érzik a különbséget jobb és bal között, a két fázis nagyon eltérő. A kialakult új fázis részecskéi számára a bal oldalon és a jobb oldalon is ugyanaz van. Ha sikerült is – mondjuk, a buborékok falában – anyagaszimmetriát generálnunk, vigyáznunk kell, nehogy úgy járjunk, mint az egyszeri hackerek, akik ha nem tudják az irányt, ide-oda átrendezéseikkel még a korábbi nyereséget is lenullázzák. Ezeket az átrendezéseket, a szfaleronátmeneteket le kell állítani. Ehhez az kell, hogy elég hideg legyen a rendszer, ne legyen elég energiája a gáton való átmenetekhez. A gát annál magasabb, minél nagyobb a Higgs-tér ugrása a fázisátmenet során. Ha a rendszer elég hideg, a hőmérséklet kisebb, mint az ugrás, akkor a gáton nem lehet átjutni; ami anyagaszimmetria keletkezett, az meg is marad. Ha a rendszer a fázisátmenetkor meleg, a hőmérséklet nagyobb, mint az ugrás, akkor úgy járunk, mint az előbb említett egyszeri hackerek: még ha sikerült is – mondjuk, a falban – anyagaszimmetriát kelteni, azt el is tüntetjük.

Láttuk, hogy a folyamatot lényegében a felületi feszültség és a Higgs-tér ugrásának a nagysága irányítja. A 15. ábrán a felületi feszültséget ábrázoljuk a Higgs-bozon tömegének a függvényében, a fokozatos közelítések módszerét alkalmazva. A három különböző görbe három közelítési rendnek felel meg. Jó esetben az egymást követő rendek egyre pontosabban közelítik meg a végeredményt. Jelen esetben egyáltalán nem látszik, hogy közelítenének valamely végső eredményhez. Ez sajnos azt jelenti, hogy maga a módszer nem alkalmazható. Minél nagyobb a Higgs-bozon tömege, annál rosszabb a fokozatos közelítés konvergenciája. Mivel a Higgs-

15. ábra. A fokozatos közelítés módszere







16. ábra. Fázisdiagram

**Fázisdiagram:**

egy ábra, mely egy adott anyag különböző állapotainak az egyensúlyi viszonyát mutatja. Például a víz fázisdiagramja mutatja, hogy a jég légköri nyomáson 0 °C-on egyensúlyban van a vízzel, és 100 °C-on a víz egyensúlyban van a gőzzel. A légköri nyomás felénél a jég még mindig 0 °C-on van egyensúlyban a vízzel, de a víz már 82 °C-on egyensúlyba kerül a gőzzel (többek között ezért nem egyszerű bablevest főzni a Mount Everesten). A víz fázisdiagramja a hőmérsékletet és a nyomást tartalmazza, az elektrodyenge elmélet fázisdiagramja pedig a hőmérsékletet és a hipotetikus Higgs-részecske tömegét.

**Higgs-részecske:**

egy mindmáig hipotetikus, tömeggel rendelkező, semleges töltésű elemi részecske. A Higgs-részecske segítségével tudjuk magyarázni a többi részecske tömegét. Létezése nélkülözhetetlen a legalapvetőbb részecskefizikai elméletek ellentmondásmentességéhez. Megtalálása vagy akár létezésének kizárása a 2007–2008-ban induló svájci LHC (Large Hadron Collider, nagy hadron-ütköztető) részecskegyorsító legfontosabb feladata.

bozon tömege a valóságban igen nagy, nem várhatjuk azt, hogy a fokozatos közelítések módszerével le tudjuk írni az elektrodyenge fázisátmenet tulajdonságait.

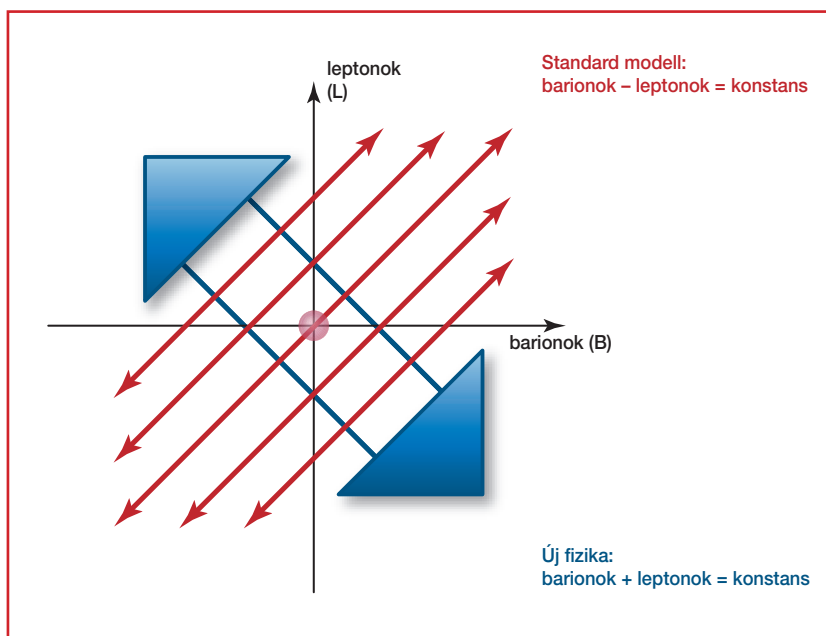
A rácstérelméleti vizsgálatoknak viszont – szuperszámítógépek segítségével – sikerült választ adniuk a kérdésekre és meghatározni a **forró elektrodyenge plazma** úgynevezett **fázisdiagramját**. A vízszintes tengelyen ábrázoljuk a jelenleg még ismeretlen **Higgs-részecske** feltételezett tömegét. A függőleges tengely a hőmérsékletet mutatja. Két fázist különböztethetünk meg. Az úgynevezett szimmetrikus, magas hőmérsékletű fázist, és az alacsony hőmérsékletű Higgs-fázist. A kettő közötti vonal jelzi a két fázis közötti elsőrendű fázisátmenetet. A vonal bizonyos pontnál véget ér. Ezen Higgs-tömegnél nagyobb Higgs-tömegek esetén már nincs fázisátmenet. A végponti Higgs-bozon tömege 72-szerese a proton tömegének (a proton tömege 1 GeV). Kísérletileg tudjuk, hogy a valódi érték sokkal nagyobb. Ez egyben azt is jelenti, hogy a nulla ugrás biztosan nem nagyobb, mint a hőmérséklet. Minden korábban generált elektrodyenge típusú aszimmetria eltűnik.

## Az elmélet kiterjesztése

A barionaszimmetria tehát nem alakulhatott ki a standard elektrodyenge elméletben. Azaz csak az ezen elméleten túli elméletek tudják megalapozni a világ létezésére vonatkozó elképzeléseinket. Lehetséges, hogy több Higgs-bozonra van szükség, de lehet, hogy más típusú anyagzámsértő folyamatok jelenléte oldja csak meg a problémát. Láttuk, az elektrodyenge elmélet



17. ábra. A részecskefizika standard elektrogenge elmélete nem ad magyarázatot a barionaszimmetriára



egyszerre kelt minden típusú fermion, azaz barionok és leptonok egyszerre keletkeznek. Az elmélet a piros nyilak mentén (17. ábra) tudja mozgatni a barionoknak és a leptonoknak a számát. Középről indult ( $B = L = 0$ ), de ha keltődött is valamennyi  $B$  és  $L$ , az elektrogenge átmenet után ez vissza-csúszik nullába. Ha viszont a rendszer a  $B + L = \text{const}$  irányba is el tud mozdulni (a 17. ábrán ezt jelöli a kék nyíl), akkor még az elektrogenge átmenet (mely a piros nyilak irányában tudja mozgatni a barionok és a leptonok számát) után is marad  $B$  aszimmetria; a világegyetemben található anyag létét, mennyiségét meg tudjuk magyarázni.

Ez nagyon fontos eredmény. Bár az elmélet szinte minden kísérletet magyaráz, sokszor fantasztikus, 11 tizedesjegy pontossággal, mégsem írja le teljesen a valóságot. Kiderül viszont, hogy az elméletet milyen irányba kell kiterjeszteni. Ami nagyon jó jel a fizikában. Hasonló tapasztalatok vezettek annak idején a relativitáselmélethez vagy a kvantummechanikához.

Összefoglalásul a következőket mondhatjuk: Az észlelések arra utalnak, hogy a megfigyelhető világegyetem kizárólag anyagból áll. A jelen előadás arra a kérdésre kereste a választ, hogy lehet-e ezt az anyagaszimmetriát dinamikus módon a korai világegyetemben előállítani. Röviden áttekintettük a részecskefizika ma ismert elméletét, mely sokszor fantasztikus, 11 tizedesjegy pontossággal írja le a kísérleteket. Ebben az elméletben bár lehetséges anyagkeltés, a soktényezős feltétel mégsem elégíthető ki. Nem így keletkezett az anyagi világ. De éppen ez a negatív hír mutatja meg, hogyan kell az elméletünket kiterjeszteni.

## Ajánlott irodalom

*Fritzsch, Harald:* Kvarkok. Bp.: Gondolat, 1987.

*Greene, Brian:* Az elegáns Univerzum. Bp.: Talentum, 2003.

*Horváth Zalán:* A kvantumelektrodinamika kísérleti bizonyítékai. In: Fizika 1977, Bp.: Gondolat, 1978.

*Kiss Dezső:* Bevezetés a kísérleti részecskefizikába. Bp.: Akadémiai Kiadó, 1990.

*Marx György:* Túl az atomfizikán. Bp.: Gondolat, 1960.

*Pócsik György:* Részecskefizika az ezredfordulón. *Fizikai Szemle*, 46(1996) 2. sz.: 67–71.

*Pócsik György:* Részecskefizika és társadalom. *Ezredforduló*, 1. sz. 1999: 27.

*Pócsik György:* Részecskefizika itthon és a világban. *Magyar Tudomány*, 44(1999) 6. sz.: 720–723.

*Simonyi Károly:* A fizika kultúrtörténete. Bp.: Akadémiai K., 1998<sup>4</sup>.

