

# Fizika a Standard Modellen innen és túl

**K**özhely, de igaz: a XX. században a fizika forradalmi átalakuláson ment át. A kvantumelmélet az anyag mikroszkopikus összetevőinek, az általános relativitáselmélet pedig az Univerzum nagyléptékű szerkezetének megértéséhez vezetett.

Az anyag mikroszkopikus szerkezetét ma kb.  $10^{-18}$  méteres felbontással ismerjük; ez nagyjából egymilliárdszor kisebb, mint egy atom mérete. Az ismereteink mai állását összefoglaló elmélet a Standard Modell, amely az elektromágneses, gyenge és erős kölcsönhatásokkal kapcsolatos tudásunkat foglalja egységes keretbe. A Standard Modell egy hosszú, több évtizedes kutatási erőfeszítés eredménye; a kialakulásához vezető felfedezésekért tucatnyi Nobel-díjat ítéltek oda.

## A Standard Modell alapjai

Az anyag ma ismert legalapvetőbb részecskéit az 1. ábra mutatja be. Az első három

**1. ábra. Részecskék a Standard Modellben. A táblázat a részecskék tömegét az  $E=mc^2$  összefüggésből adódó nyugalmi energiával jellemzi, elektronvolt (eV) egységekben, ahol  $1\text{ eV} \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$  joule és kb.  $1,8 \cdot 10^{-36}$  kg tömegnek felel meg. A részecskék töltését az elemi töltés ( $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$  coulomb), sajátperdületét (spinjét) pedig a Planck-állandó ( $\hbar \approx 1,05 \cdot 10^{-34}$  m<sup>2</sup>kg/s) többszöröseként adja meg**

		Az anyagi részecskék három családja (fermionok)			
		I	II	III	
tömeg		2.4 MeV	1.27 GeV	1.712 GeV	0
töltés		2/3	2/3	2/3	0
spin		1/2	1/2	1/2	1
név		u up	c charm	t top	γ foton
	Kvarkok				
		4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
		-1/3	-1/3	-1/3	0
		1/2	1/2	1/2	1
		d down	s strange	b bottom	g gluon
		~2.2 eV	~0.17 MeV	~15.5 MeV	91.2 GeV
		0	0	0	0
		1/2	1/2	1/2	1
		ve elektron-neutrino	vμ muon-neutrino	vτ tau-neutrino	Z Z-bozon
	Leptonok				
		0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
		-1	-1	-1	±1
		1/2	1/2	1/2	1
		e elektron	μ muon	τ tau	W W-bozon

## A részecskék világa

Az elemi részecskéket a speciális relativitáselmélet és a kvantumelmélet egyesítését jelentő kvantumtérelmélet írja le. Az anyag legalapvetőbb részecskéit elsősorban *tömegek* jellemzi, amelyen a nyugvó részecske tehetetlenségének mértékét értjük (a speciális relativitáselmélet szerint ugyanis a részecske tehetetlensége függ a mozgásállapótól). A részecske tömege és energiája között Einstein híres egyenlete, az

$$E = mc^2$$

teremt összefüggést. Egy  $E$  energiájú részecske legfeljebb

$$\lambda = \hbar c / E$$

pontosággal lokalizálható; ennek megfelelően egyre nagyobb energiájú részecskékkel elvégzett kísérletek/megfigyelések kellene ahhoz, hogy az anyag tulajdonságait egyre jobb felbontással tudjuk tanulmányozni.

A részecskék másik jellemzője a *spin*, amely a részecskéhez képest nyugvó koordináta-rendszerben mért perdületüket jellemzi. Ennek bármilyen (mondjuk  $z$ ) irányra vett vetülete csak kvantált értékeket vehet fel:

$$S_z = s_z \hbar$$

ahol  $\hbar \approx 1,05 \times 10^{-34}$  m<sup>2</sup>kg/s a Planck-állandó. A spin vetületet jellemző  $s_z$  kvantumszám lehetséges értékei egy minimum és egy maximum között egyesével változnak:

$$s_z = -s, -s+1, \dots, s-1, s$$

ahol  $s$  a részecske teljes spinjét jellemzi, és értéke egész vagy feles lehet. Az egész spinű részecskékre példa a foton: spinje  $s=1$ , zérus nyugalmi tömege miatt azonban a mozgás irányára csak az

$$s_z = \pm 1$$

vetületek megengedettek. Ezt a kétféle fotonállapotot jobb-, illetve balkezesnek nevezzük és a fény kétféle körkörös polarizációjának felelnek meg.

Feles spinű részecskére példa az elektron, amelynél a spin két lehetséges vetülete

$$s_z = \pm 1/2.$$

Amennyiben egy részecske nyugalmi tömege zérus, akkor a fotonhoz hasonlóan minden vonatkoztatási rendszerben fénysebességgel mozog, és spinjének vetülete a mozgás irányára független a vonatkoztatási rendszertől. Ez a vetület az ún. helicitás; a pozitív helicitású részecskét a fotonhoz hasonlóan jobb-, a negatív helicitásút pedig balkezesnek nevezzük.

A részecskéknek még számos más jellemzőjük is van, ezek között további megmaradó mennyiségek is vannak, amelyekről később lesz szó.

oszlopban a fermionokat láthatjuk. Ezek olyan részecskék, amelyekre a Pauli-féle kizárási elv érvényes. A kizárási elv jelentősége abban van, hogy ezek a részecskék kiterjedt anyagi rendszereket hoznak létre, mivel ha sok van belőlük jelen, nem lehet egyszerre kettő ugyanazon a helyen vagy ugyanabban az állapotban. Az elektronok között érvényesülő kizárási elv nélkül nem létezne az elemek változatossága (Mengye-

lejev-féle periódusos rendszer), valamint a molekulák sokfélesége és a köztük lezajló változatos kémiai reakciók, aminek végső soron mindennapi világunk változatos anyagi formáit és magát az életet is köszönhetjük. Ezzel szemben a kölcsönhatásokat közvetítő részecskék bozonok, amelyekre a kizárási elv nem érvényes: a közismert elektromágneses mező valójában nem más, mint olyan állapot, amelyben sok foton töl-



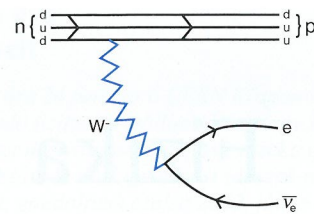
ti be ugyanazt a kvantumállapotot. A kölcsönhatások szolgáltatják egyrészt az anyag belső szerkezetét stabilizáló erőket: molekuláris szinten döntően az elektromágneses kölcsönhatás, az atommagokban pedig az erős kölcsönhatás játssza ezt a szerepet. Másrészt pedig belőlük erednek az átalakulásokért felelős hajtóerők; a kémiai folyamatok pl. az elektromágneses, a mag-átalakulások pedig elsősorban az erős, illetve a radioaktív béta-bomlás esetén a gyenge kölcsönhatás eredményeképpen jönnek létre.

A fermionok alapvetően leptonokra és kvarkokra bonthatók; ezeket az különbözteti meg, hogy a kvarkok részt vesznek a gluonok által közvetített erős kölcsönhatásokban, a leptonok pedig nem. Sőt, a neutrínóknak nevezett leptonok elektromosan semlegesek is, így a Standard Modell által leírt három kölcsönhatásból kizárólag a gyenge kölcsönhatásban vesznek részt. A részecskék fajtáját (*u, d, c, s, t, b* valamint *e, μ, τ*) a fizikusok íznek (flavour) nevezik; a neutrínók is három ízben fordulnak elő. A kvarkoknak ezenkívül színük is van, ami az erős kölcsönhatással kapcsolatos. Ezen felül a kvarkoknak ún. bariontöltésük is van, ennek értéke a kvarkok esetén +1, az antikvarkokra pedig -1, és az elektromos töltéshez hasonlóan minden ma ismert folyamat során megmarad. A leptonok esetén hasonló szerepet tölt be a leptontöltés, amely ráadásul családonként is megmarad, tehát külön-külön teljesül a megmaradás az elektron, müon és tau típusú leptonokra számolt leptontöltésekre.

A Standard Modell által leírt három kölcsönhatás jellege nagymértékben eltér egymástól. Az elektromágneses kölcsönhatást a mindennapi életből is jól ismerjük; a technikai alkalmazásokon túl az atomok világában az elektromágnesség biztosítja az atomok stabilitását, és a kémiai reakciók hajtóerejét, valamint az anyag atomi és molekuláris szintű szerkezetét is ez az erő határozta meg.

Az erős kölcsönhatás nem egyszerűen „erős” (mint neve sugallja), hanem „bezáró” jellegű is: ez azt jelenti, hogy kvarkok és gluonok szabadon nem észlelhetők. A megfigyelhető erősen kölcsönható részecskék, az ún. hadronok a kvarkok és gluonok színsemleges kötött állapotai, amelyeket a bennük található kvarkok szerint osztályozunk. A mezonokban egy kvark és egy antikvark van jelen, a barionokban pedig három kvark (illetve az antibarionokban három antikvark). Mezonok például a pionok: a pozitív töltésű  $\pi^+$  egy *u* kvarkból és egy anti-*d* kvarkból épül fel, azaz összetétele *ud*, antirészecskéje a negatívan töltött  $\pi^-$  (*ud*), a semleges pion ( $\pi^0$ ) pedig *uu* és *dd* állapotok keveréke. Barion például a proton, amelynek kvarkösszetétele: *uud*, illetve a neutron (*udd*), az antiproton (*uud*) és az antineutron (*udd*).

A gyenge kölcsönhatás azért gyenge a mindennapi energiaskálákon, mert a közvetítő részecskék tömege igen nagy: a  $W^\pm$  mértékbozonok tömege mintegy 80-szorosa a protonénak, ezért keltésük valószínűsége rendkívül kicsi. Mindössze  $10^{-18}$  méteres távolságokon a gyenge kölcsönhatás erőssége megegyezik az elektromágneses kölcsönhatással, de  $10^{-17}$  m távolságban már csak mintegy tízezred része annak. A közvetítő részecskék nagy tömege abban is megnyilvánul, hogy az általuk közvetített kölcsönhatás a mikroszkopikus folyamatok skáláján igen lassú: az elektromágneses kölcsönhatással bomló semleges pion élettartama mintegy  $10^{-16}$  másodperc, míg



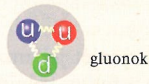
2. ábra. A neutron béta-bomlása

a gyenge kölcsönhatással bomló töltött pionoké  $10^{-8}$  másodperc, egy szabad neutron élettartama pedig mintegy 15 perc. A 2. ábra mutatja a neutron bomlását az elemi összetevők szintjén.

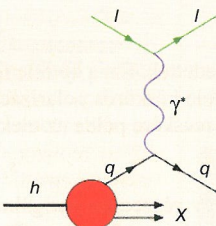
### Az erős kölcsönhatás elmélete: a kvantum-színdinamika

Az erős kölcsönhatást a kvantum-színdinamika (quantum chromodynamics, QCD) írja le. Ez a Standard Modell azon része, amely kizárólag a gluonokat és kvarkokat tartalmazza. A kvarkok létezésére és az erős kölcsönhatás tulajdonságaira eredetileg egy olyan kísérlet során következtettek, amelyben nagyon nagyenergiájú elektronokat szórtak protonokon (ez az atommag felfedezéséhez vezetett Rutherford-kísérlet analógja, csak ezúttal a nagy energia miatt a proton belső szerkezetébe engedett betekintést). Kiderült, hogy a protonban jól meghatározott, pontszerű alkotóelemeken szóródik az elektron, amelyek megfeleltethetők voltak a korábban Gell-Mann és Zweig által elméleti úton feltételezett kvarkoknak. A kvarkok háromféle speciális, ún. színtöltést hordoznak, és ennek révén vesznek részt a gluonok által közvetített erős kölcsönhatásban, ahhoz hasonlóan, ahogy az elektromos töltés leírja az elektromágneses erőt közvetítő fotonokkal való kölcsönhatásukat.

A kölcsönhatás erőssége miatt ez az elmélet rendkívül bonyolult, és csak a közelmúltban sikerült kellő pontosságú számításokkal igazolni, hogy le tudja írni az erősen kölcsönható részecskék (mezonok és barionok) fajtáit (hasonlóan ahhoz, ahogy a kvantummechanika megmagyarázza a periódusos rendszert).



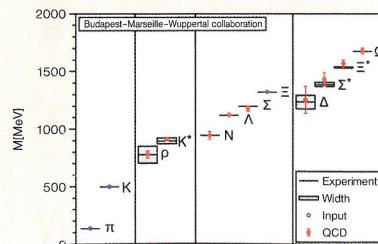
A proton szerkezete: két *u* és egy *d* típusú (ízű) kvark alkotja. A kvarkok színe az erős kölcsönhatásban betöltött szerepüket jellemzi; a három szín a gluonok közvetítésével folyamatosan kicserélődik



A hadronok szerkezetének feltárása ún. mélyen rugalmatlan leptonszórással. A bejövő lepton (*l*) a hadron (*h*) belsejében létező valamelyik kvarkkal (*q*) egy fotont kicserélve elektromágneses kölcsönhatásba lép. A lepton eltérüléséből következtethetünk a hadron belsejének struktúrájára; nemcsak a kvarkok létezésére, hanem a köztük lévő kölcsönhatásra vonatkozólag is sikerült annyi információt szerezni, ami kellően alátámasztotta a QCD elméletét

Az atommagokat összetartó magerő is a kvarkok közötti, gluonok közvetített erős kölcsönhatás eredménye. A molekulák közötti van der Waals-erőkhöz hasonlóan, a lényeg itt is az, hogy a színtöltésre nézve összességében semleges nukleonok (protonok és neutronok) egymáshoz közel kerülve polarizálják egymást, és az ezáltal létrejött átmeneti helyi színtöltés okozta erőt érzik. Ez az erő igen rövid (kb.  $10^{-15}$  m) hatótávolságú, de olyan erős, hogy a protonok és neutronok megfelelő aránya esetén képes legyőzni a protonok közötti elektromos tasztítást, és így jönnek létre a különböző elemek izotópjainak atommagjai, amelyek között számos mag teljesen stabil. A stabil magokban kötésben lévő neutronok nem bomlanak el, mert a helyükön maradt proton tasztító hatása jóval amennyi a béta-bomlásban felszabadul.

### A hadronok tömege a QCD alapján





Az előbbi listából látszik, hogy a hétköznapjainkban megtalálható, illetve az általunk megfigyelhető csillagokat és galaxisokat felépítő anyagot teljes egészében az I. generáció tagjai alkotják, így felvetődik a kérdés: mi szükség a kvarkok és leptonok II. és III. családjára? A Standard Modell semmilyen magyarázattal nem szolgál a családok számát illetően, szerkezetüket azonban előírja, így a *strange* (ritka, *s*) kvark ismeretében megjósolta a *charm* (bájos, *c*) kvark létezését, a *b* kvark felfedezése után pedig a *t* kvarkot is. Sőt, az utóbbi esetben a korábbi precíziós mérések analiziséből megjósolható volt a *t* kvark tömege is, és ez a jóslat kitűnően egyezett a tényleges felfedezéskor mért tömeggel.

A Standard Modell egy másik alapvető jóslata, hogy a béta-bomlásért felelős  $W^\pm$  mértékbozonok mellett létezik egy semleges mértékbozon is, a  $Z^0$ , amely nem változtatja meg a részecskék ízét. Ez azt jelenti, hogy pl. míg egy  $W^-$  kibocsátásával az elektron neutrínóvá alakul, egy  $Z^0$  kibocsátása után ugyanúgy elektron marad. Ez a jóslat fényesen igazolódott a CERN kísérleteiben: a semleges mértékbozon okozta kölcsönhatást 1973-ban, a  $W$  és a  $Z$  bozonokat pedig 1983-ban sikerült kimutatni. A Standard Modell részletesen megjó-

solja ezen részecskék bomlásait is, és ezen jóslatokkal a megfigyelések teljes összhangban vannak. Különösen figyelemre méltó a  $Z^0$  bomlása, amelynek méréséből többek között le lehet vonni azt a következtetést, hogy pontosan három fajta neutrínó létezik, összhangban az ismert kvarkok és töltött leptonok számával. De számos más kísérletben is tesztelték a modell jóslatait, az esetek túlnyomó többségében meggyőző sikerrel<sup>1</sup>.

Az 1. ábra táblázata azonban nem teljes. A Standard Modell a feltüntetett részecskékkel nem működik teljes mértékben. Ennek oka, hogy a megadott tömegekkel rendelkező részecskék esetén a fizikai folyamatokra jóslott valószínűségek megsértik a logikailag várható követelményeket, amelyeket a valószínűségek pozitív volta, valamint az jelent, hogy az összes lehetséges kimenetel valószínűségének összege 1 kell legyen. A Standard Modell eredeti megfogalmazásában ezt a Higgs-mező bevezetése oldotta meg. A Higgs-mező nélkül az elmélet konzisztens értelmezését lehetővé tevő szimmetriák előírják, hogy valamennyi részecske nyugalmi tömege zérus legyen, ami nyilvánvalóan ellentmond a tapasztalatnak. A Higgs-mező a modell szimmetriáinak egy részét spontán módon

sérti azzal, hogy a vákuumban nem zérus értéket vesz fel, és ennek következtében tömeget ad a részecskék nagy részének<sup>2</sup>. Ez egyben azt is jelenti, hogy a modell teljességét másképpen is biztosítani lehet, amennyiben ezt a szimmetriasértést valamilyen más mechanizmus biztosítja. Az eredetileg bevezetett Higgs-mező mindössze a legegyszerűbb megvalósítást jelenti, és egyben megjósol egy olyan elemi részecskét, amely egy zérus spinű bozon (az összes korábbról ismert ilyen típusú részecske kvarkokból álló összetett mezon). A precíziós elektrogyenge mérések alapján ezt a részecskét nem sokkal 110–120 GeV feletti tömegűnek várjuk. És valóban, a CERN Nagy Hadronütköztetőjében (Large Hadron Collider) folytatott kísérletek eredményei alapján nemrégiben bejelentették egy ehhez hasonló állapot létezését. Hogy ez valóban megegyezik-e a várva várt Higgs-részecskével, az a jövő nagy kérdése...

### Kvantum izdinamika

A Standard Modellben az elektromos és gyenge kölcsönhatások egyesítve, egy ún. elektrogyenge kölcsönhatás formájában található meg. Az egyesítést jellemző szimmetriát a Higgs-mező sérti, és emiatt lesz a  $W^\pm$ ,  $Z^0$  és  $\gamma$  közvetítő bozonok tömege egymástól eltérő (az utóbbi, azaz a foton nyugalmi tömege zérus marad).

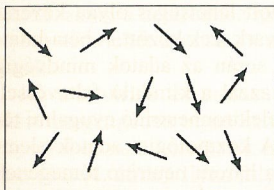
A  $W^\pm$  által közvetített kölcsönhatások megváltoztatják a részecskék ízét, pl. egy  $W^+$  kibocsátásával az *u* kvark *d* kvarkká alakulhat, amelyből viszont egy  $W^-$  kibocsátásával lehet *u* kvark. Hasonlóképpen lehet átmenet a *c* és *s*, valamint a *t* és *b* között. Azonban a helyzet ennél bonyolultabb, mert a különböző családok között is lehetnek átmenetek, amelyeket az ún. keveredési együtthatók írnak le. Két család esetén mindössze egyetlen keveredési szög, három család esetén azonban három keveredési szög és egy komplex fázis jellemzi ezeket az átmeneteket, amelyek során pl. *c* kvarkból *d*, vagy *s* kvarkból *u* keletkezhet. A komplex fázis jelenléte azt jelenti, hogy ez a keveredés sérti a *CP* szimmetriát (lásd a következő oldalon).

### A Standard Modell elméleti korlátai

Akár mennyire is sikeres a részecskefizika Standard Modellje, egyre több jel utal arra, hogy nem lehet ez a végső elmélet az anyag mikroszkopikus szerkezetének leírásában. Már a modell megalkotásakor is mutattak erre bizonyos, elsősorban elméleti megfontolások.

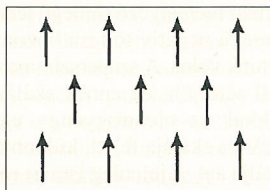
Az egyik észrevétel az volt, hogy a modell jellemző skálája (pár száz GeV) felett még kell lennie legalább egy másik rele-

### A spontán szimmetriasértés



Paramágneses állapot

A spontán sértést legegyszerűbben a ferromágnesek viselkedésén érthetjük meg. A ferromágneses anyagok, mint pl. a vas, az ún. Curie-pont feletti hőmérsékleten paramágnesesek, azaz a bennük lévő atomok olyan kis iránytűként viselkednek, ame-



Ferromágneses állapot

lyek a hőmérsékleti rezgések miatt nem tudnak rendeződni. Ebben az esetben a rendszer nem tüntet ki semmilyen térbeli irányt sem. A Curie-hőmérséklet a vas esetén 770 °C (1043 K); ez alatt spontán mágnesezettség jelenik meg, amely a hűtéssel egyre határozottabb lesz. Mivel a mágnesezettségnek iránya van, ez spontán módon kijelöl egy térbeli irányt, és ezzel megsérti a rendszer irányfüggetlensége jelenete szimmetriát. Fontos megjegyezni, hogy maga a rendszer dinamikája, azaz a mágneses nyomatók kölcsönhatását leíró modell irányfüggetlen; a szimmetriát kizárólag az sérti, hogy az alacsony hőmérsékletű állapotban a rendszer mágnesezettsége nem zérus.

A Higgs-mező hasonló mechanizmussal sérti meg a Standard Modell szimmetriáinak egy részét. A mező spontán erőssége a vákuumban 246 GeV, ez határozza meg az elektromos és gyenge kölcsönhatások elektrogyenge egyesítésének skáláját. Az ennek megfelelő mintegy  $10^{15}$  kelvin hőmérséklet (az elektrogyenge egyesítés „Curie-pontja”) felett a spontán sértés megszűnik, és az elektromágneses és gyenge kölcsönhatások közti különbség eltűnik. Ennek az átalakulásnak döntő szerepe volt a korai Világ-egyetem történetében.

<sup>1</sup> A kevés számú eltérés közé tartozik a müon mágneses nyomatókában talált eltérés az elméleti jóslattól, vagy az LHCb kísérlet által a *b* kvarkot tartalmazó mezonok bomlásában talált kismértékű többlet esemény. Azonban ezek jelentősége egyfelől a kísérleti hiba miatt bizonytalan, másfelől maga az elméleti jóslat sem ismert kellően pontosan. Elméleti oldalon a legnagyobb problémát az erős kölcsönhatással kapcsolatos számítási nehézségek jelentik.  
<sup>2</sup> Ez alól mai ismereteink szerint kizárólag a foton kivétel: az elektromágneses mező kvantumának nyugalmi tömege az elmélet szerint pontosan zérus. A jelenlegi kísérletek szerint a foton nyugalmi tömege legalább 24 nagyságrenddel kisebb az elektron tömegénél.



### A C, P és T szimmetriák

Az elemi részecskék között lejátszódó folyamatok közül az elektromágneses és erős kölcsönhatás által közvetített átalakulásoknak három speciális szimmetriatulajdonsága van. Az átalakulás átmeneti valószínűsége nem változik akkor, ha minden résztvevő részecskét az antirészecskével felcserélünk, ez a C töltéstükrözés. Nem változik az átmeneti valószínűség akkor sem, ha a folyamat térbeli tükrözöttjét tekintjük (ez a P paritás-transzformáció), vagy az időben megfordított folyamatot nézzük (ez a T időtükrözés).

A gyenge kölcsönhatás ellenben sérti a P szimmetriát: a  $W^*$  bozonok kizárólag a balkezes részecskével (és a jobbkezes antirészecskével) hatnak kölcsön, és a  $Z^0$  bozonok is megkülönböztetik a részecskéket a kezességük szerint. Ezzel azonban még nem sértik meg a CP szimmetriát (ami egyszerre elvégzett töltéstükrözést és paritás-transzformációt jelent); ennek megsértéséhez a családok, mégpedig legalább három család közti keveredés szükséges.

A Standard Modell azonban egzaktul megőrzi a CPT szimmetriát. Ez a relativisztikus kvantumtérelmélet alapvető elveiből következik, ezért a CPT szimmetriasértése nemcsak a Standard Modellen, hanem a részecskefizika jelenlegi alapvető elméleti keretén túli fizikai jelenséget jelentene.

váns fizikai skálának. Ez a Planck-skála<sup>3</sup> (mintegy  $10^{19}$  GeV), amelyen a gravitáció kvantum jellege meghatározóvá válik, és a térre és időre vonatkozó fogalmaink nagy valószínűséggel értelmüket veszítik. Az is ismert volt már, hogy a gravitációt sikeresen leíró általános relativitáselmélet és a kvantumelmélet alapvetően összeférhetetlen; a jelenleg tanulmányozott jelenségeknél ez azért nem okoz gondot, mert a gravitáció nagy (makroszkopikus) skálákon, míg a kvantumelmélet a kis (mikroszkopikus) skálákon játszik fontos szerepet, így mindig azt alkalmazzuk, amelyikre éppen szükségünk van. Jelenlegi kísérleti eszközzeinkkel nem tudunk olyan jelenségeket előállítani vagy megfigyelni, ahol a gravitáció kvantumhatásai jelentősek lennének; természetesen erre folyamatosan történnek erőfeszítések, és előbb-utóbb várhatóan lesznek olyan asztrofizikai és kozmológiai megfigyeléseink, amelyek támpontot adhatnak egy kvantumgravitációs elmélet felállítására.

Két, egymástól ennyire távoli fundamentális skála azért is problémás, mert a kvantum hatások miatt egy ilyen modell csak a paraméterek igen pontos finomhangolása mellett stabil (a Planck-skála jelenléte miatt mintegy 32 tizedesjegy pontossággal kell beállítani a Standard Modell szimmetriasértését jellemző paramétereket). Ezt a természetellenes finomhangolást nevezik hierarchia problémának. Az

ilyen rendkívül pontos hangolás esetén felmerül, hogy ez egy szimmetriának köszönhetően teljesül. Pl. a foton zérus nyugalmi tömegének elméleti hátterét az ún. mérték-szimmetria jelenti, amely egyben az elektromos töltés megmaradásához is vezet. A hierarchia probléma esetében az egyik javasolt megoldás az ún. szuperszimmetria: ez azt jelenti, hogy minden fermionhoz tartozik egy bozon, és minden bozonhoz egy fermion partner részecske. Ez a szimmetria nem lehet teljesen egzakt, mert különben pl. az elektron szuperpartnere az elektronnal megegyező tömegű lenne; egy ilyen tömegű negatív töltésű bozont már detektáltunk volna. A szuperszimmetria tehát meg kell sérüljön, de ennek skálája nem lehet sokkal az elektrogyenge egyesítés 246 GeV-os skálája felett, különben nem stabilizálja azt. A jelenleg ismert részecskékhöz feltételezett szuperpartnereket a 3. ábra illusztrálja.

Egy másik elméleti probléma a három család létezése. Azt, hogy pontosan három család van, számos megfigyelés támasztja alá; ha van még egy negyedik, akkor az ahhoz tartozó neutrínó olyan extrém nehéz kell legyen, hogy a Z bozon nem bomolhaszon el ilyen részecskékre. Arra azonban a Standard Modell nem nyújt semmilyen magyarázatot, miért van egynél több csa-

lád. Ugyanakkor a családok szerkezetében, a tömegekben és egyéb paraméterekben számos szabályszerűség figyelhető meg, amelyeket esetleg egy alapvetőbb elmélet (az elemek Mengyelejev-féle periódusos rendszeréhez hasonlóan) megmagyarázhat.

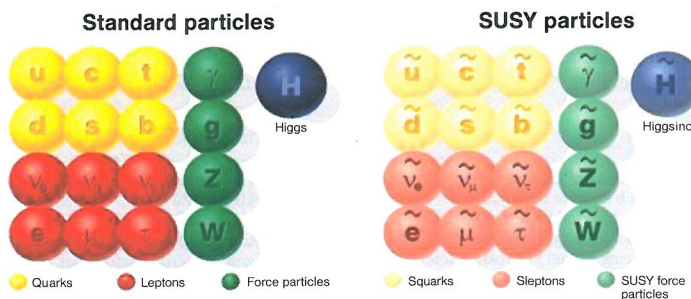
Harmadik elméleti problémaként, a fentiekkel is kapcsolatos a Standard Modell egy lényeges „szépséghibája”, hogy (eredeti alakjában) összesen 19 paramétere van, mivel az összes kvark és lepton tömegét, a keveredési szögeket nem magyarázza meg, valamint a kölcsönhatások közül az erőset egyáltalán nem, és az elektromágneses és gyenge kölcsönhatást is csak részlegesen egyesíti.

### A Standard Modellen túlmutatató megfigyelések

A Standard Modellen túli fizikára nemcsak elméleti megfontolások utalnak. Az 1960-as évek óta ismert, hogy a Napból érkező elektron-neutrínók száma csak mintegy harmada a csillagunk energiatermelése alapján számított mennyiségnek. Mivel a Nap energiatermelését igen jól ismert magfizikai folyamatokkal írhatjuk le, a gyanú a neutrínókra terelődött. A Standard Modellen a neutrínók eredetileg zérus nyugalmi tömegű, elektromosan semleges fermionokként szerepeltek; emiatt a leptonok között nem volt lehetséges olyan keveredés<sup>4</sup>, mint a kvark ízek között. A béta-bomlás elemzése során az adatok mindvégig egybevágtak azzal a kiinduló feltevessel, hogy az anti-elektron-neutrínó nyugalmi tömege zérus. A kozmológiai adatok elemzése alapján a három neutrínó tömegének összege kisebb kell legyen, mint 0,3 eV, ami tehát ugyancsak konzisztens a zérus nyugalmi tömeggel.

Az elmúlt években elvégzett neutrínó-kísérletek kimutatták, hogy a neutrínók keverednek, vagyis a három neutrínó nyugalmi tömege, bár kicsi, de nem lehet mind zérus. Ennek következtében a Napból induló elektron-neutrínóknak csak mintegy egyharmada érkezik meg ilyen formában a Földre; egyharmada müon-, a maradék

3. ábra. A Standard Modell részecskéi és szuperpartnereik



<sup>3</sup> Esetleg további skálák is lehetnek (pl. egy Nagy Egyesítés, ahol az erős kölcsönhatás is összeolvad az elektrogyenge erővel); ezek ugyanilyen jellegű problémákat vetnek fel.

<sup>4</sup> Ennek oka, hogy amennyiben a három neutrínó tömege zérus (vagy legalábbis azonos), minden kombinációjuk tömege is ugyanakkora határozott tömeggel rendelkezik, és egyszerűen elnevezzük az elektronba W-részecske kibocsátásával átalakulót elektron-neutrínónak, a müonba átalakulót müonneutrínónak, és a tauba átalakulót tauneutrínónak. Fizikailag megfigyelhető keveredés tehát csak akkor léphet fel, ha a neutrínófajták tömegei különböznek.



egyharmad pedig tauneutrínó formájában detektálható. Sikertült oszcillációt kimutatni a légkörben elbomló müonokból származó, valamint a nukleáris reaktorokból származó neutrínók esetén is. Ezek segítségével sikerült megállapítani a neutrínó keveredést jellemző több paramétert: a három keveredési szöget, valamint az egyes neutrínófajták tömegének négyzete közti különbségeket. Ha a neutrínók a kvarkokhoz hasonló módon keverednek, ez könnyen beépíthető a Standard Modellbe, 7 új paraméter<sup>5</sup> bevezetése árán. Ebben az esetben a leptontöltés családonként már nem marad meg, hiszen a keveredés miatt a különböző családokhoz tartozó leptonok egymásba alakulhatnak. Azonban a teljes leptontöltés még ebben az esetben is megmarad.

Mivel azonban a neutrínó elektromosan semleges, elképzelhető az is, hogy a neutrínó azonos a saját antirészecskéjével (ún. Majorana-fermion). Más, elektromosan semleges fermionok, pl. a neutron esetén ez azért nem fordulhat elő, mert a neutron bariontöltése +1, az antineutroné pedig -1, és a bariontöltés megmaradása miatt a két részecske nem lehet azonos. Ha a neutrínók ilyen különleges tulajdonságúak, akkor ez egyrészt még két (jelenleg ismeretlen) keveredési paramétert jelent, másrészt pedig a leptontöltés nem marad meg (hiszen a neutrínó leptontöltése +1 lenne, az antineutrínóé pedig -1; ha ez a töltés megmarad, akkor a neutronhoz hasonlóan a neutrínó sem lehet azonos az antirészecskéjével).

Ha a neutrínó és antineutrínó azonos, akkor megengedett olyan kettős béta-bomlás, amikor nem keletkezik egyetlen neutrínó sem (4. ábra). Ilyen folyamatot eddig még nem sikerült megfigyelni, így jelenleg nem tudjuk, hogy a neutrínókeveredés ténylegesen kivezet-e a Standard Modell alkalmazási köréből.

Az asztrofizikai és kozmológiai megfigyelések további Standard Modellen túli

jelenségeket sugallnak. A kozmológiai sötét anyag (azért nevezzük így, mert nem sugároz fényt) túlnyomó része nem állhat a Standard Modell részecskéiből. Bár a sötét anyag feltételezését el lehet kerülni azzal, ha a gravitációs erőtörvény galaktikus, extragalaktikus és kozmológiai skálán nem felel meg a newtoni erőtörvénynek (pontosabban az einsteini általános relativitáselméletnek), az Einstein-féle általános relativitáselmélet sérülését kereső mérések eddig nem vezettek eredményre, viszont egyre jobban korlátozzák bármiféle eltérés mértékét. A sötét anyag legegyszerűbb modellje egy, a gyenge kölcsönhatás skáláján mozgó (pár száz GeV) tömegű, Majorana-típusú és kizárólag a gyenge kölcsönhatásban résztvevő részecske: ilyen állapot előáll a szuperszimmetrikus modellekben a Z és a Higgs-bozon szuperpartnerének keveredésével, vagy lehet ilyen a gravitáció hipotetikus kvantumának, a gravitonnak ugyancsak hipotetikus szuperpartnere, a gravitínó nevű részecske is.

Egy másik, a Standard Modellen túlmutatott jelenség a Világegyetem tágulásának gyorsulását előidéző sötét energia, bár ez esetben nem feltétlenül világos, hogy ennek eredete a részecskefizikában keresendő; a sötét energia lehet teljességgel gravitációs (esetleg kvantumgravitációs) eredetű is. A mérések szerint a sötét energia a hibahatáron belül úgy viselkedik, mint az Einstein által bevezetett, majd később elvetett kozmológiai állandó, ami egyben az üres tér energiasűrűségéként értelmezhető.

Amennyiben a kozmológiai infláció hipotézise meggyőzően igazolódik, úgy ennek hajtóerejét is a Standard Modellen túli fizikában kell keresnünk, hiszen a releváns fizikai folyamat skálája mintegy 12–13 nagyságrenddel magasabban van.

Egy másik rejtély, hogy a látható világban sehol nem észlelünk antianyagot. Ezt tovább mélyíti az, hogy a modellszámítások alapján, ha a kezdetkor az anyag és antianyag egyenlő mennyiségben lett vol-

na jelen, akkor szinte mind annihilált volna, és a jelenleginél jóval kevesebb anyag (és ugyanannyi antianyag) lenne jelen. Eszerint tehát a korai Univerzum fejlődése során egy ponton az anyag mennyisége (a számítások szerint kismértékben ugyan, de mindenképpen) meghaladta az antianyagét. Kérdés, mi ennek az ún. barion aszimmetriának az eredete. A kozmológiai mérésekből tudjuk, hogy a mértéke igen kicsi: a barionok és antibarionok számának különbségét a fotonokéhoz viszonyító aszimmetria paraméter értéke

$$\eta = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} \approx 6 \cdot 10^{-9}$$

A Standard Modell ugyan az elemi folyamatokban nem sérti a barionszámot, ám az elektromos szimmetriát sértő fázisátalakulás közben végbemennek barionszámsértő folyamatok. Ehhez azonban a fázisátalakulásnak egyensúlytól kellően távol kell történni (ugyanis egyensúlyban az ellentétes irányú folyamatok kiegyenlítik egymást, és a keletkező nettó barionszám zérus), valamint szükséges a *P* és a *CP* szimmetriának a sértése. A számítások azt mutatják, hogy – bár *P* és *CP* valóban sérül – összességében mégsem generálódik elegendő barion aszimmetria az elektromos fázisátalakulás során, amennyiben szigorúan a Standard Modellre szorítkozunk. Annak magyarázata tehát, hogy miért van jelen a megfigyelt mennyiségű (standard) anyag, amely a galaxisokat, csillagokat és végső soron minket alkot, ugyancsak túlmutat a Standard Modell keretein.

A neutrínófizika részletei ezt a képet döntően befolyásolhatják; amennyiben a neutrínók keveredése sérti a *P* és *CP* szimmetriákat, illetve a leptonszám megmaradását, ez újabb mechanizmusokat eredményez a barionszám aszimmetria generálására.

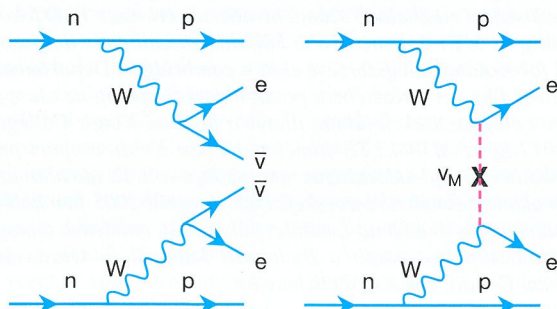
## Összefoglalás

A részecskefizika Standard Modellje igen sikeres elmélet, amely az erős, gyenge és elektromágneses kölcsönhatással kapcsolatos valamennyi megfigyelésünket igen jól megmagyarázza, a gravitáció általános relativitáselméletével kiegészítve pedig a kozmosz rengeteg aspektusáról is számot ad. Azonban részben elméleti megfontolások, részben pedig asztrofizikai megfigyelések alapján biztosak lehetünk abban, hogy nem lehet ez a Mindenség végső fundamentális elmélete<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> Ez a hét paraméter a három neutrínó tömege, három keveredési szög, valamint egy *CP* sértő fázis. Az utóbbi létezéséről és nagyságáról jelenleg semmilyen kísérleti információnk sincs.

<sup>6</sup> Amennyiben persze ilyen elmélet (Theory of Everything, szokásos rövidítéssel TOE) egyáltalán létezik.

4. ábra. A bal oldali diagram két, ugyanabban az atommagban található neutron szimultán bomlását mutatja, amikor is két anti-elektronneutrínó keletkezik. A jobb oldali diagramon a neutrínó Majorana-részecske, így azonos saját antirészecskéjével; a folyamat közben annihilál, és végeredményként csupán két elektron távozik





Az LHC-ben jelenleg folyó kísérletek célja egyrészt a Standard Modell szimmetriasértési mechanizmusának kiderítése (leggyeszterűbb esetben a Higgs-részecske

megtalálása), részben pedig – más részecske- és asztrofizikai mérésekkel kombinálva – a Standard Modellen túli, „új fizika” keresése.

A következő évek, évtizedek kutatásai akár sorsdöntő változást is hozhatnak az anyagról és a Világegyetemről alkotott elképzeléseinkben.

### A kozmológia „standard modellje”

A Világegyetem „standard” (más néven „konkordancia”) modellje a közelmúlt erőfeszítéseinek eredménye. Az elmúlt egymásfél évtized során lehetővé vált, hogy a kozmológiai skálákon is precíziós méréseket végezhessünk: ezek eredményei egyfelől meggyőzően igazolták az ősrobbanás („Big Bang”) néven ismert elméletet, másfelől pedig számos új összetevővel is gazdagította ezt a modellt.

Az ősrobbanás elmélet kiindulópontja az, hogy az Univerzum egy sűrű, forró és homogén állapotból az általános relativitáselmélet által leírt módon kitágult. Eközben lehűlt, és ennek következtében a benne lévő anyag több átalakuláson ment át. A mai fizika segítségével ezt az átalakulást a mellékelt ábrán jelölt elektromos-erő kortól, azaz mintegy  $10^{16}$  kelvin hőmérséklettől tudjuk nyomon követni. Az elmélet a megfigyelt Világegyetem számos tulajdonságát sikeresen megmagyarázza, többek között a könnyű elemek előfordulási arányait, a galaxisok térbeli eloszlását, valamint a mikrohullámú háttérsugárzás eredetét és annak fluktuációit.

Egyre több bizonyíték mutat arra is, hogy a standard kozmológiai modellben leírt tágulást egy villámgyors felfűvadási („inflációs”) szakasz előzte meg, ami az elektromos-erő korra jellemzőnél mintegy 12–13 nagyságrenddel nagyobb hőmérsékleten ment végbe. Amennyiben létezik az elektromos-erő, gyenge és erős kölcsönhatást teljesen egyesítő Nagy Egysítés, akkor azt a jelenlegi adatok alapján ugyanebben a tartományban várjuk.

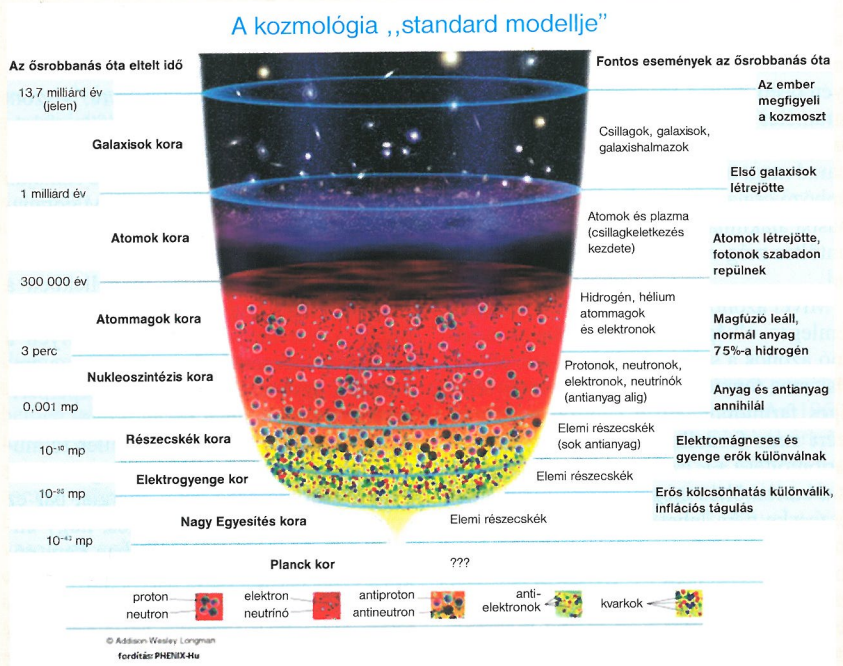
Az inflációs korszaknál még 3 nagyságrenddel nagyobb energiaskálaikon az Univerzum valószínűleg olyan állapotban

volt (Planck-kor), amikor a gravitáció kvantumeffektusai jelentős szerepet játszottak. Erről a korszakról jelenleg a megfelelő elméleti keret hiánya miatt nem tudunk konkrét képet alkotni; az ehhez szükséges „kvantumgravitációs” elmélet kialakítása a mai elméleti fizikai kutatások egyik fontos problémája.

A precíziós kozmológiai mérések arra utalnak, hogy az Univerzum anyagának csak mindössze mintegy 5%-a a Standard Modellben leírt anyagfajta; mintegy 20%-a olyan, úgynevezett sötét anyag, aminek

mindössze gravitációs hatását érzékeljük, és a standard anyaggal csak igen gyengén hat kölcsön, azonban jelentős szerepe van az anyag kozmológiai méretekben megfigyelhető csomósodásában, a galaxisok és galaxishalmazok kialakulásában, valamint azok dinamikájában.

A jelenlévő anyag háromnegyede pedig úgynevezett sötét energia, ami egyfelől nem csomósodik a gravitáció hatására, ugyanakkor negatív nyomása révén az Univerzum tágulásának gyorsulását okozza.



A szerző elméleti fizikus, kutatási területe a kvantumtérelmélet, ezen belül konkrétan főként két-dimenziós térelméletekkel és egzakt megoldható modellekkel foglalkozik. Több mint ötven tudományos közleményére ötszázat meghaladó számú hivatkozás érkezett. PhD fokozatát 1996-ban szerezte, 2008 óta pedig az MTA doktora. Több külföldi intézetben is dolgozott hosszabb ideig: közvetlenül doktori fokozatának megszerzése előtt a cambridge-i Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics intézetében, posztdoktorként pedig az olasz Istituto Nazionale di Fisica Nucleare bolognai szekciójában, illetve a londoni King's College matematika tanszékén. 2001-től 2012-ig az MTA-ELTE Elméleti Fizikai Kutatócsoport posztdoktora, később tudományos főmunkatársa, majd tudományos tanácsadója volt. Ez idő alatt az Eötvös Loránd Tudományegyetemen oktatott elméleti részecskefizikát, ugyanitt 2005-ben habilitált. 2012-ben elnyerte a Magyar Tudományos Akadémia Lendület pályázatát, amelynek támogatásával új statisztikus térelméleti kutatócsoportot alapít a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Fizikai Intézetében. E-mail: takacs@eik.bme.hu