

CP szimmetria sértés¹

Ligeti Zoltán

*Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory
University of California, Berkeley, CA 94720*

Kivonat

Ha a „tükör”, amit CP szimmetriának hívunk, hibátlan volna, akkor az univerzumban nem létezne anyag. Milyen kölcsönhatás okozza ezt a hibát? 1999. óta új gyorsítók, úgynevezett aszimmetrikus-energiájú B -mezon gyárak, kutatják ezt.

Bevezetés

A részecskefizikában a szimmetriák szerepe rendkívül fontos. Új szimmetriák felismerése gyakran vezet a részecskék közti kölcsönhatások alapvetőbb megértéséhez, és egy igaznak vélt szimmetria sérülése a szimmetria sértésért felelős új kölcsönhatás felfedezéséhez vezethet. A szimmetriák jelentése a fizikában általánosabb, mint a hétköznapi szóhasználatban: szimmetriák alatt azt értjük, ha a fizikai jelenségeket leíró elmélet változatlan marad (invariáns) egy adott transzformáció hatása esetén. Emmy Noether bizonyította be 1917-ben, hogy minden szimmetria létezése egy megmaradó mennyiséget eredményez. Például az, hogy a tér minden irányban egyforma (a fizikai törvények függetlenek a koordináta rendszer orientációjától), az impulzusmomentum megmaradásával egyenértékű.

A minket körülvevő univerzumban, ameddig a távcsöveinkkel ellátni, egy alapvető aszimmetria látható. Minden galaxist és csillagot anyag alkot, míg antianyag szinte sehol se található. Vajon ez egy véletlen szüleménye az univerzum keletkezésének, vagy a természet törvényeiben rejlő aszimmetria szükségszerű következménye? Azt képzeljük, hogy az anyag túlsúlya az anyag és az antianyag viselkedése közti alapvető különbség következménye. Ilyen különbség nem létezhetne, ha a töltés–paritás (CP , charge–parity) tükrözés szimmetria tökéletes volna.

Többféle szimmetria létezik: diszkrét és folytonos, egzakt és sérült. Fontos folytonos szimmetria például a Lorentz invariancia Einstein speciális relativitás elméletében, ami a matematikai megfogalmazása annak, hogy a fizikai törvényeket leíró egyenletek nem változnak, amikor egyik vonatkoztatási rendszerből áttérünk egy inerciálisan mozgó másikba. Ezt a szimmetriát egzaktoknak véljük, amit egyetlen kölcsönhatás se sért. A fent említett forgatási szimmetria része a Lorentz szimmetriának.

Az egyik legegyszerűbb diszkrét szimmetria a paritás (P), ami egy objektumot a tükörképébe visz át és elforgatja a tükör síkjára merőleges tengely körül 180 fokkal (azaz megváltoztatja a három

¹A Természet Világa 2000. III. különszámában megjelent cikkem átdolgozott változata.

tér-koordináta előjelét, $\vec{x} \rightarrow -\vec{x}$). Csak úgy, mint egy közönséges tükör, P is felcseréli a jobb és bal oldalt. Egy másik diszkrét szimmetria a töltés tükrözés (C). Ez mínusz egyszeresére változtatja a részecskék töltését (és minden egyéb kvantumszámát), azaz felcseréli a részecskéket az antirészecskékkel. Szemben a Lorentz invarianciával, amit minden kölcsönhatásra érvényesnek gondolunk, a gyenge kölcsönhatás sérti mind a P mind a C szimmetriát, míg az elektromágneses és az erős kölcsönhatás P és C szimmetrikus. Ennek a felismerésnek kulcs szerepe volt a gyenge kölcsönhatás modern elméletének kialakulásában. Az együttes CP szimmetria is sérül a gyenge kölcsönhatásban, és ennek a jobb megértése elvezethet az elemi részecskék és kölcsönhatásaik Standard Modellnél alapvetőbb megértéséhez.

A Standard Modell

A Standard Modell néhány elemi részecske és kölcsönhatásaik elmélete, ami konzisztens az összes megfigyelt részecskefizikai jelenséggel. Hat fajta kvark és hat fajta lepton (és antirészecskék) alkotják az anyagi részecskéket. A kvarkok és leptonok három „generációt” alkotnak (a generáció címke csak eltérő tömegekre, de nem időbeli eloszlásra utal), amik közül az első alkotja a minket körülvevő világban levő atomokat. A második és harmadik generáció részecskéi nehezebbek, és csak gyorsítóknak, illetve kozmikus sugárzásban tanulmányozhatóak.

A kvarkokon és leptonokon kívül néhány további részecske a kölcsönhatások közvetítéséért felelős. A jól ismert elektromágneses kölcsönhatást fotonok közvetítik. Az erős kölcsönhatást, ami a kvarkok domináns kölcsönhatása, gluonoknak hívott részecskék közvetítik. Ez a kölcsönhatás olyan erős, hogy kvarkok nem is léteznek szabadon a természetben. A sokszáz kísérletileg megfigyelt erősen kölcsönható részecske kvark-antikvark vagy három-kvark kötött állapotok. Ilyen három-kvark kötött állapot például a proton, amit két up kvark és egy down kvark alkot, és a neutron, amit egy up kvark és két down kvark alkot (ld. az 1. táblázatot). Az ezekből álló atommagok formálásáért is az erős kölcsönhatás felelős. Végül a gyenge kölcsönhatást úgynevezett W és Z bozonok közvetítik. Mivel ezek tömege közel száz proton tömeg, így a kölcsönhatás nagyon gyenge és rövid hatótávolságú. Ez az egyetlen ismert kölcsönhatás, ami a kvarkok és leptonok típusát meg tudja változtatni. Például a radioaktív béta bomlás (neutron \rightarrow proton + elektron + antineutrínó), kvark-lepton szinten a $d \rightarrow u e \bar{\nu}_e$ átmenetnek felel meg (down kvark \rightarrow up kvark + elektron + antineutrínó). A negyedik ismert kölcsönhatás, a gravitáció, elhanyagolható szerepet játszik a jelenlegi gyorsítóknak tanulmányozható energiákon.

Végül, az elmélet megkövetel egy kísérletileg eddig még nem megfigyelt Higgs részecske létezését, aminek a kölcsönhatása a többi részecskével felelős azok tömegéért. Ha a Higgs tulajdonságai a Standard Modell által jósoltak, akkor a Large Hadron Collider nevű gyorsítóval, ami 2007-től fog működni a Genf melletti CERN-ben, részletesen tanulmányozzák majd ezt a részecskét. Ha nem fedezik fel a Higgs részecskét, akkor a Standard Modell inkonzisztens lenne, ugyanis egyetlen részecskének sem lehetne nem nulla tömege.

A CP sértés szempontjából fontosak a mezonoknak nevezett kvark-antikvark kötött állapo-

Részecskék a Standard Modellben

Az anyagi részecskék, a kvarkok és leptonok, három generációban jelennek meg. Az első generáció tartalmazza az up és down kvarkot, az elektront és a neutrínót, és ezek antirészecskéit. A második és harmadik generáció részecskéi a korai univerzumban léteztek, és jelenleg nagyenergiás gyorsítóknál illetve kozmikus sugárzásban tanulmányozhatóak. (A kvarkok neve önkényes, és nem valamilyen tulajdonságukra utal.)

	Részecskék	szimbolum	töltés	tömeg* (GeV/c ²)
Első generáció				
Kvarkok	up	u	+2/3	0.004
	down	d	-1/3	0.008
Leptonok	elektron	e	-1	0.0005
	elektron neutrínó	ν_e	0	~ 0
Második generáció				
Kvarkok	charm	c	+2/3	1.4
	strange	s	-1/3	0.1
Leptonok	muon	μ	-1	0.106
	muon neutrínó	ν_μ	0	~ 0
Harmadik generáció				
Kvarkok	top	t	+2/3	175
	bottom	b	-1/3	4.2
Leptonok	tau	τ	-1	1.78
	tau neutrínó	ν_τ	0	~ 0

A Standard Modell tartalmaz további részecskéket, amik a kölcsönhatásokat közvetítik, és egy kísérletileg még nem észlelt Higgs részecskét. A Higgs-szel való kölcsönhatás felelős a részecskék tömegéért és a CP sértésért egyaránt.

Kölcsönhatás	Részecske	szimbolum	töltés	tömeg* (GeV/c ²)
Elektromágneses	foton	γ	0	0
Erős	gluon	g	0	0
Gyenge	W -bozon	W^\pm	± 1	80
	Z -bozon	Z	0	91

* 1 GeV jó közelítéssel egy proton vagy egy neutron tömege. Az elmúlt években egyértelművé vált, hogy a neutrínók tömege bár kisebb mint 1 eV (azaz 10^{-9} GeV), de nem zérus.

tok. Különösen fontos a K^0 mezon, vagy kaon, amit egy strange antikvark és egy down kvark alkot ($K^0 = \bar{s}d$; az antirészecskéket általában felülvonással jelölik). A K^0 mezon CP tükörképe a $\bar{K}^0 = s\bar{d}$. Sok szempontból hasonló a B^0 mezon, amit egy bottom antikvark és egy down kvark alkot, és CP tükörképe, a \bar{B}^0 ($B^0 = \bar{b}d$ és $\bar{B}^0 = b\bar{d}$).

A Standard Modell, sok sikere ellenére, számos kérdésre nem ad választ. Például nem tudjuk mi határozza meg a modell több mint húsz szabad paraméterét, a részecskék tömege közti nagy hierarchiát, vagy akár azt, hogy miért pont három részecske generáció létezik?

C és P szimmetria sértés

A kvarkok és leptonok fontos tulajdonsága a spinjük, azaz saját impulzusmomentumuk. Ezen részecskék spinje fele a Planck állandónak, ami a spin kvantuma. Feles spinű részecskéket jobb- és balkezeseknek hívjuk aszerint, hogy a spin vetülete a momentum irányába vagy azzal ellenkező irányba esik. A paritás (P) transzformáció hatására a momentum iránya megváltozik, de a spin nem (a spin úgy viselkedik, mint két vektor direkt szorzata). Így jobbkezes részecskéből balkezes lesz, és fordítva. A töltés tükrözés (C) hatására jobb- és balkezes részecskéből jobb- és balkezes antirészecske lesz, és fordítva. Tehát ha P és C igazi szimmetriák, akkor jobb- és balkezes részecskéknek illetve a részecskéknek és antirészecskéiknek egyformán kell viselkedniük.

Míg az elektromágneses és erős kölcsönhatás törvényei változatlanok egy paritás vagy töltés tükrözött világban, addig a gyenge kölcsönhatás drasztikusan különbözően hat jobb- és balkezes részecskéken. Először Lee és Yang kérdőjelezték meg 1956-ban, hogy a P szimmetria általános érvényű-e, majd néhány hónappal később Wu fedezte fel kísérletileg, hogy csak balkezes részecskék bomlanak el gyenge kölcsönhatásban, a jobbkezesek egyáltalán nem. Mi több, jelenlegi ismereteink szerint nem is kell, hogy létezzenek jobbkezes neutrínók!

Így a gyenge kölcsönhatásban a C és P szimmetria bizonyos értelemben maximálisan sérül. Nem arról van szó tehát, hogy a C és P sértés kicsi, hanem arról, hogy a C -t és P -t százszázalékosan sértő gyenge kölcsönhatás sokkal gyengébb, mint az erős és az elektromágneses kölcsönhatások. Pusztán emiatt tekintették (hibásan) evidenciának a C és P szimmetriákat ötven évvel ezelőttig.

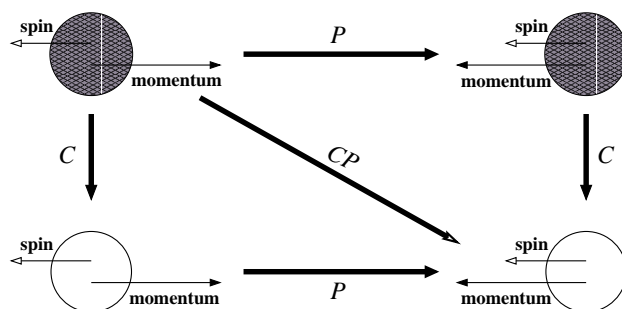
CP szimmetria sértés

Röviddel a P szimmetria sértés felfedezése után azt gondolták, hogy esetleg a kombinált CP tükrözés az igazi szimmetriája a természetnek. Ezt lényegében csak az motiválta, hogy a tükrözés szimmetria valamilyen formában érvényes maradjon a természeti törvényekre. Mint említettük a bevezetésben, minden jó szimmetriához tartozik egy megmaradó mennyiség. Ha egy állapotra akár C , akár P kétszer hat, akkor az eredeti állapotot kapjuk vissza, azaz $C^2 = P^2 = 1$. Emiatt egy tetszőleges fizikai állapot CP száma (a kvantummechanikában úgynevezett sajátértéke) csak $+1$ vagy -1 lehet. Ha a természet CP szimmetrikus, akkor egy $+1$ CP számú fizikai állapot csak $+1$ CP számú végállapotra bomolhat el; és hasonlóan, egy -1 CP számú fizikai állapot csak -1

A Fazekasban kezdődött...

Töltés és paritás tükrözés

Kevés szimmetria érdekesebb, mint a töltés (C) és paritás (P) tükrözés. C mínusz egyszeresére változtatja egy részecske összes kvantumszámát, például elektromos töltését, és ezáltal felcseréli a részecskéket és antirészecskéiket. P tükröz egy objektumot, és elforgatja a tükör síkjára merőleges tengely körül 180 fokkal. A klasszikus mechanika, az elektromágnesesség, és az erős kölcsönhatás invariánsak ezekkel az operációkkal szemben. Ellenben a gyenge kölcsönhatás drasztikusan más akár töltés, akár paritás tükrözés hatására.



A bal felső sarokban levő balkezes részecske P hatására jobbkezes részecskévé, illetve C hatására balkezes antirészecskévé válik. CP együttes hatására a jobb alsó sarokban levő jobbkezes antirészecskét kapjuk. Ha a kiindulási részecske egy neutrínó, akkor a jobb felső és bal alsó sarokban levő részecskék nem is kell feltétlenül létezniük a természetben.

CP számú végállapotra bomolhat el.

Térjünk most vissza a semleges K mezonokhoz: $K^0 = \bar{s}d$ és a CP tükörképe, $\bar{K}^0 = s\bar{d}$. Vagyis $CP(K^0) = \bar{K}^0$ és $CP(\bar{K}^0) = K^0$. Ezeknek az állapotoknak nincs egyértelmű CP számuk, hiszen nem önmagukat adják vissza. Mivel a gyenge kölcsönhatás megenged $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ átmenetet, így megkonstruálhatóak e két állapotnak olyan szuperpozíciói, amiknek a CP száma már jól definiált. Ha a természet CP szimmetrikus volna, akkor a fizikai részecskék (amiknek jól meghatározott tömegük és élettartamuk van) az iménti két állapot következő kombinációi lennének: $K_1 = K^0 + \bar{K}^0$ és $K_2 = K^0 - \bar{K}^0$. Ezeknek a CP száma $+1$ és -1 , hiszen $CP(K_1) = \bar{K}^0 + K^0 = K_1$ és $CP(K_2) = \bar{K}^0 - K^0 = -K_2$.

A természetben kísérletileg megfigyelt két semleges K mezon nagyon eltérő tulajdonságú. Az egyik élettartama majdnem 600-szorosa a másikénak. A hosszú élettartamú K mezon három pionra bomlik el (pion = π mezon: $\pi^+ = u\bar{d}$, $\pi^- = \bar{u}d$, $\pi^0 = (u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$), míg a rövid élettartamú K mezon két pionra. Mindez összhangban is lenne a fenti képpel, ugyanis két pion CP száma $+1$, míg három pioné -1 . Így a két K mezon eltérő élettartama megmagyarázható lenne CP szimmetriával: a $+1$ CP számú K_1 gyorsan elbomolhat két pionra, míg a -1 CP számú K_2 csak három pionra bomolhat, ami nehezebben megy végbe, és emiatt hosszabb időbe telik.

Ezt a képet zúzták szét 1964-ben Christenson és munkatársai, amikor felfedezték, hogy körülbelül minden 500-dik hosszú élettartamú kaon nem három, hanem két pionra bomlik. Ez szükség-

A Fazekasban kezdődött...

szerűen azt is jelenti, hogy a CP tükör sem tökéletes! Az elméleti fizikusokat ez annyira meglepte, hogy teljesen új kölcsönhatást is hajlandók voltak posztulálni a kísérleti eredmény megmagyarázására. Kobayashi és Maskawa ismerték fel 1972-ben, hogy ha a kvarkoknak és leptonoknak három generációja létezik, akkor a Standard Modellben automatikusan megjelenik egy CP szimmetriát sértő paraméter. (Ha csak két generáció létezne, akkor nem lehetne CP sértés a Standard Modellben!) Ez a felismerés három évvel előzte meg azt, hogy Perl felfedezte a harmadik generáció első részecskéjét, a τ leptont.

A Kobayashi és Maskawa által felismert paraméter a CP sértés egyetlen forrása a Standard Modellben, és így a természetben megfigyelhető minden CP sértő jelenség arányos ezzel. E paraméter értéke összhangban van a kaon bomlásban kísérletileg megfigyelt CP sértéssel, de az elmélet nem ellenőrizhető precízen kaon bomlásokban. Ennek részben az az oka, hogy kaon bomlásokban a CP sértés pici, legfeljebb 10^{-3} nagyságrendű jelenség. Másrészt pedig ahhoz, hogy a mezonok bomlásában megfigyelt CP sértést a kvarkok kölcsönhatásának szintjén interpretálhassuk, pontosan értenünk kell a mezonok erős kölcsönhatását. Ez csak speciális esetekben lehetséges, mert a (kvantum)elektrodinamikában jól bevált számolási módszerek nem működnek az erős kölcsönhatásban. Bár a CP sértés egyértelműen megfigyelhető K mezon bomlásokban, annak interpretálása bizonytalan a pontatlanul ismert erős kölcsönhatási effektusok miatt. B mezon bomlások azért is érdekesek, mert ott a CP sértésre vonatkozó kísérleti eredmények értelmezése egyértelműbb.

Az univerzum aszimmetriája

Lehetséges, hogy a világegyetem nem nulla anyag–antianyag aszimmetriával keletkezett. Azonban ez a különbség gyorsan eltűnt volna, ha van a természetben olyan folyamat, ami megváltoztatja a baryon számot (kvarkok száma mínusz az antikvarkok száma). Ilyen folyamatok minden bizonnyal könnyen végbemehettek kevéssel az ősrobbanás után. Így azt hisszük, hogy az anyag dominanciájának dinamikus kellett kialakulnia a világegyetem fejlődése során.

Sakharov határozta meg az anyag–antianyag aszimmetria dinamikus kialakulásának három feltételét. Először is kell legyen baryon számot sértő kölcsönhatás, különben zérus baryon számú kezdeti állapotból nem alakulhatna ki nem-nulla baryon számú végállapot. Másodszor, a C és CP szimmetriáknak sérülniük kell, különben minden folyamatban azonos mennyiségű anyag és antianyag keletkezne. Harmadszor, a világegyetemenek a fejlődése során ki kellett mozdulnia termikus egyensúlyból, különben azonos energiájú állapotoknak azonos lenne a betöltöttsége. Termikus egyensúlyban akkor is azonos számú részecske és antirészecske keletkezik, ha léteznek baryon számot és C és CP szimmetriát sértő folyamatok.²

²A részecskék és az antirészecskék tömege egyenlő a CPT szimmetria miatt (T az idő irányának a megfordítását jelöli). Annak ellenére, hogy külön-külön mind C , P , T , CP , CT , PT sérül, azt hisszük, hogy a CPT tükör tökéletes. Nem tudunk olyan elméletet konstruálni, amiben a CPT tükör sérül. Ez a szimmetria matematikailag levezethető minden speciális relativitáselmélettel konzisztens kvantumtérelméletben, és ezek az alkotórészek a jelenlegi megértésünk (megingathatatlanak tűnő) alapkövei.

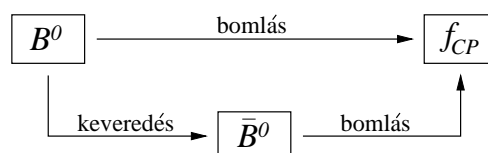
Az uralkodó elképzelés szerint az univerzum keletkezésekor a Higgs részecskét leíró tér értéke mindenütt nulla volt. Ez az a tér, amivel kölcsönhatva az összes többi részecske tömeget kap, de csak akkor, ha a Higgs tér értéke nem nulla. Ahogy az univerzum tágult és hűlt, kialakult egy buborék, amiben a Higgs tér felvette a jelenlegi nem nulla értékét. Így a buborékon kívül levő részecskéknél nem volt tömegük, ellenben a buborékon belülrre kerülve tömeget szereztek. Ahogy a buborék növekedett, részecskék és antirészecskék eltérő arányban kerültek a buborék belsejébe a CP sértés miatt. A buborékon kívüli anyag–antianyag aszimmetriát gyorsan megszüntették baryon számot sértő folyamatok, viszont ezek roppant valószínűtlenek voltak a buborék belsejében. Mire a buborék elfoglalta a teljes univerzumot, több részecskét tartalmazott, mint antirészecskét.

Részletes számolások ellenben azt mutatják, hogy a kaon bomlásokban megfigyelt és a Standard Modellbe beilleszthető CP sértés sok nagyságrenddel kisebb, mint ami az univerzumban megfigyelt anyag–antianyag aszimmetria kialakulásához szükséges. Ez az egyik legerősebb ok arra, hogy a Standard Modellen túl egyéb CP sértő kölcsönhatásnak is kell léteznie.

B mezon gyáarak

B mezon bomlások a legígéretesebbek a CP sértés részletes tanulmányozására, és esetleges új CP sértő folyamatok felfedezésére. Kísérletileg B^0 mezon bomlásokat figyelünk meg jól definiált CP számú végállapotra. Ilyen bomlások eltérő arányban mehetnek végbe kezdeti B^0 és \bar{B}^0 részecskék esetén. A különbség a CP sértés mértéke. Hasonlóan a $K^0 - \bar{K}^0$ rendszerhez, a gyenge kölcsönhatás megenged $B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$ átmenetet is. Azonban egy kezdeti B^0 mezon körülbelül 16% valószínűséggel válik \bar{B}^0 mezonná mielőtt elbomlik, ami sokkal nagyobb, mint a hasonló valószínűség K mezonok esetén. Így a Standard Modell nagy aszimmetriát jósol számos B^0 és \bar{B}^0 bomlás között, szemben a kaon bomlásokban megfigyelt legfeljebb 10^{-3} nagyságú effektusokkal. A Standard Modellen túli elképzelések közül sok jósol eltérő aszimmetriákat, így a mérések jó tesztelhetik a különféle elméleteket.

Az egyik legérdekesebb típusú B mezon bomlásokban a végállapotnak jól definiált CP száma van. Ez esetben két bomlási út lehetséges. Vagy a B^0 mezon direkt bomlik el a végállapotra, vagy előbb \bar{B}^0 mezonná „keveredik” és utána bomlik el. Azon végállapotok esetén, amikor e két bomlási amplitudó abszolút értéke azonos, a bomlási valószínűség időfüggése az erős kölcsönhatás részleteitől függetlenül pontosan értelmezhető információt ad. Nevezetesen, a mérés egy kvantum interferencia kísérlet, amiben a két bomlási útnak megfelelő komplex kvantummechanikai amplitudók közti fáziskülönbséget lehet pontosan megmérni. Ez a fáziskülönbség tisztán a kvarkok kölcsönhatását jellemzi, és független a kvarkokból mezonokat formáló erős kölcsönhatás részleteitől.



B mezonokat legtisztábban elektron–pozitron ütközésben lehet létrehozni, a tömegközépponti energiát 10.6 GeV-nek választva. Minden negyedik ütközésben felszabaduló energia egy majdnem nyugalomban levő B mezon párt kelt. Ahhoz, hogy meg lehessen mérni a B mezonok keletkezése és bomlása közti időkülönbséget, célszerű, ha az ütköző elektron és pozitron nyaláb energiája eltérő. Így elérhető, hogy az ütköző részecskék tömegközéppontja közel a fénysebesség felével mozog a laboratóriumi vonatkoztatási rendszerben. Ezáltal az elektron–pozitron ütközésben keletkező B^0 és \bar{B}^0 részecskék egymástól (és a keletkezés helyétől) viszonylag távol (átlagosan $250\mu\text{m}$ -re) bomlanak el. A bomlások koordinátáinak ismeretében meghatározható a B^0 és \bar{B}^0 mezonok bomlásai közti időkülönbség. A B mezonok legérdekesebb bomlásai viszonylag ritkák, és emiatt sok bomlás tanulmányozása szükséges. Az 1990-es évek második felében a kaliforniai SLAC és a japán KEK gyorsítóközpontokban speciális „aszimmetrikus-energiájú B mezon gyárat” építettek, évi 30 millió $B^0 - \bar{B}^0$ pár bomlásának detektálására. (Az aszimmetria az elektron és pozitron nyaláb eltérő energiájára, a gyár pedig a keltett B mezonok nagy számára utal. A tervezettnél jóval több, közel 450 illetve 280 millió B mezon bomlását detektálták eddig.)

A legpontosabb CP -aszimmetria mérés mostanra 5% pontosságú, és azt mutatja, hogy a CP sértés tényleg nagy effektus B mezon bomlásokban, szemben a K mezon bomlásokkal. Mint említettük, a Standard Modellben egyetlen paraméter felelős minden CP sértő jelenségért, így az elmélet jól meghatározott korrelációkat jósol különféle bomlásokban mérhető CP -aszimmetriák közt. Ilyen mérésekkel sokféle módon tesztelhető a Standard Modell, és meghatározható több kevésbé ismert paramétere. Bár az eredmények egyelőre konzisztensek a Standard Modellel, a domináns hibák statisztikus jellegűek, így elképzelhető, hogy a közeljövőben, több adat birtokában, a Standard Modellel összeegyeztethetetlen eredményeket kaphatunk.

Irodalom

1. H.R. Quinn and M.S. Witherell, The Asymmetry Between Matter and Antimatter, Scientific American, 1998 October, p. 76.
2. R.K. Adair, A Flaw in a Universal Mirror, Scientific American, 1988 February, p. 50.
3. E.P. Wigner, Violations of Symmetry in Physics, Scientific American, 1965 December, p. 28.
4. C. Quigg, Elementary particles and Forces, Scientific American, 1985 April, p. 84.
5. R.P. Feynman, The character of physical law, MIT Press, 1965.