

# AZ ANYAG GYENGE KÖLCSONHATÁSOKBAN MEGNYILVÁNULÓ ASZIMMETRIÁJA ÉS A MOLEKULÁRIS ASZIMMETRIA

(Székfoglaló előadás a Magyar Tudományos Akadémia  
1974. március 11-i ülésén)

## *1. BEVEZETÉS: NÉHÁNY SZÓ A MEGMARADÁSI TÉTELEKRŐL*

A tudományos ismeretszerzés legcélszerűbb módja a kísérletezés. A vizsgálandó eseményt azonos körülmények között többször előidézzük és ha az esemény megismételhetőnek bizonyul, természettörvényeket fogalmazunk meg. Az ismétlés lényegéhez tartozik azonban, hogy elvileg sem tudunk minden tényezőt azonosan tartani, pl. nem lehet azonos időben és ugyanakkor azonos helyen ismételni. Ezt az elvi nehézséget figyelmen kívül hagyjuk, mert meg vagyunk győződve arról, hogy teljesen mindegy, hol és mikor végezzük a kísérletet, ha a többi paraméter azonos marad. Az ingamozgás törvényei pl. azonos alakúak bárhol és bármikor végezzük is a kísérletet. A patkány vérképére azonos hatást gyakorol egy drog függetlenül a kísérlet helyétől és idejétől, ha a patkányok, a drogok és a kísérlet minden más feltétele teljesen azonos. Ezt a triviálisnak hangzó, de igen fontos tényt úgy szokták fogalmazni, hogy a természet törvényei a térbeli és időbeli eltolásra invariánsak, a természet eltolási szimmetriát mutat. De invariánsak a természet törvényei a tükrözésekre is; ha elkészítjük egy mérőműszer spektrofotométer pontos tükörképi párját és a mérést abban végezzük el, azonos eredményt kell kapnunk; a természet tükrözés-szimmetrikus. Ha ez nem így lenne, nem lehetne kísérletezni és nem tudnánk természettörvényeket megfogalmazni. A tükrözésre vonatkozó invariancia elvet, az ún. paritás elvet már Leibniz felismerte. Kijelentette, hogy minden alakzat vagy esemény tükörképi párja is lehetséges alakzat, az események pedig azonos törvényeket követnek a valóságban illetve a tükörképi párok esetében. Tökéletes tükröt tételezve fel, nem tudjuk megállapítani, hogy egy fizikai eseményt, pl. biliárdgolyók ütközését a valóságban vagy a tükörben szemléljük-e.

A biológiai jelenségekre, mint látni fogjuk, ez nem mondható el. A legtöbb ember jobbkezes; ha egy jobb kézzel író embert és tükörképi párját összehasonlítjuk, biztosan meg tudjuk különböztetni a valódi képet a tükörképi pártól. Számos példával lehetne bizonyítani, hogy a biológiában az egyik tükörképi pár határozottan kitüntetett helyzetben van a másikkal szemben. Ezért már Kant és később Pasteur a tükrözési invariancia elv megsértésére gyanakodott. Hasonló gyanú a fizikában 18 éve merült fel, s ma már tudjuk, hogy a tükrözési invariancia elv korlátozott érvényű. Az alábbiakban engedelmükkel azt a kérdést kívánom tárgyalni, hogy a tükrözési invariancia elv sérülésének milyen biológiai következményei vannak. Úgy érzem a kérdés jelentős, hiszen a XX. század természettudományos gondolkodásában a szimmetria elvek fundamentális szerepet játszanak; Wigner (1) szerint próbakőként szolgálnak a természettörvények számára. Ugyanis a szimmetria elvekből következnek a megmaradási tételek, pl. az időeltolás szimmetriából az energiamegmaradás, amelynek minden természeti törvény eleget kell hogy tegyen.

## II. A KIRALITÁS SZÓ EREDETE, AZ ÉLŐLÉNYEK MORFOLÓGIAI ÉS MOLEKULÁRIS KIRALITÁSA

A kiralitás szó a görög *cheir*=kéz szóból képzett szakkifejezés, melyet Kelvin (2) vezetett be. A következőket írja: királisnak nevezek minden geometriai alakzatot vagy pontcsoportot és azt mondom, ezeknek kiralitása van, ha a siktükörben megjelenő képük nem hozható fedésbe önmagukkal". Mivel a legismertebb királis alakzat a kéz, indokolt, hogy a szakkifejezés erre utal. Bárki meggyőződhet róla, hogy a bal és a jobb kéz egymással fedésbe nem hozható tükörképi pár.

Említettük, hogy az emberek túlnyomó többsége jobban tudja használni a jobb kezét, mint a balt. Az őseMBER több jobb kézre álló köeszközt pattintott, mint bal kézre állót (3), manapság pedig kizárólag jobb kézre álló kávékiöntőt, jobbos dugóhúzó stb. használunk. A csigaházak túlnyomó többségben jobbos csavarmenetre emlékeztetnek. Számos más példa is bizonyíthatná, hogy a mindennapi életben a jobbos helicitás – amely tengelyre vonatkoztatott szabályos kiralitást jelent – kitüntetett helyzetben van.

Nem kis meglepetést okozott, hogy a jobboság kitüntetett volta sokkal mélyebben, a molekuláris szinten is megtalálható. Valamennyi fehérje  $\alpha$ -helix és DNS kettős helix jobb csavarmenetű. Kis molekulák esetében látszólag nem ez a helyzet. Közismert, hogy a cukrok a D sorozathoz tartoznak, jobbosak, míg az aminosavak az L sorozathoz, tehát balosak. Az aminosavakra és cukrokra vonatkozó konvenció azonban nem a helixből, hanem a szén-tetraéderből indul ki. Könnyen belátható, hogy a négy különböző szubsztituenssel lekött tetraéderhez geometriailag két jobbos és két balos helix rendelhető attól függően, hogy milyen irányban választjuk meg a helix tengelyét. Az L sorozathoz tartozó aminosavak tehát éppúgy felfoghatók jobbos helicitásúnak, mint a D sorozathoz tartozó cukrok. Tény mindenestre, hogy jobbos  $\alpha$  helixek csak L aminosavakból épülhetnek fel; jobbos DNS spirálok pedig csak D dezoxiribózt tartalmazó nukleotidekből.

Számos példa bizonyítja, hogy a molekuláris kiralitás, az ún. optikai tisztaság elengedhetetlen feltétele az organizmus stabilitásának és koordináltságának. Érdemes ezek közül néhányat emlékezetünkbe idézni. – Az  $\alpha$ -helixek felépíthetők aminosavakból nem enzimatisz eljárással is. Ha racem elegyből indulunk ki, az  $\alpha$ -helixek szintézise hűsör lassúbb mintha tiszta L vagy tiszta D módosulatot használunk. A racem  $\alpha$ -helixek instabilak, törékenyek (4).

– A testidegen enantiomerek csak igen ritkán fordulnak elő a szervezetben s ilyenkor rendszerint drámai hatásúak, pl. az L cukrok vagy D aminosavak az antibiotikumokban (5). A két enantiomer íz és illat alapján megkülönböztethető: pl. a D aminosavak édesek, az L-izomerek nem (6). Farmakológiai ill. immunológiai szempontból az egyik enantiomer több százszor hatásosabb lehet, mint a másik (7).

– Állandóan megvan a lehetőség arra, hogy a szervezetben D aminosavak keletkezzenek, de ezeket specifikus enzimek azonnal oxidálják (8), a vesében pedig gyorsabban kiválasztódnak (5).

– A testidegen enantiomerek felhasználás előtt racemizálódnak (9); ha a megfelelő racemáz hiányzik, akkor egész más anyagsere-utat követnek: pl. a D-glicerinaldehid dioxiacetonfoszfáton keresztül D-fruktóz-1-foszfáttá alakul, az L-aldehid pedig L-szorbóz-1-foszfáttá (10).

– Végül szélsőséges esetben az is előfordul, hogy a szervezet egyáltalán nem tudja hasznosítani a testidegen izomert. A *Penicillium glaucum* pl. kitűnően tenyészik D-borostyánkősavon, az L-izomeren viszont éhenhal (11).

### III. AZ ÉLETTELEN ANYAG ASZIMETRIÁJA

Amikor Pasteur 1854-ben észrevette, hogy a *Penicillium glaucum* az L-borostyánkősvat nem tudja hasznosítani, messzemenő következtetéseket tett. A természet egysege alapján azt posztulálta, hogy az anyagnak, „a világegyetemnek is aszimmetrikusnak kell lennie, s az élet ennek a kozmikus aszimmetriának funkciója”. Pasteur élete végéig fenntartotta nézetét, melyet később egy életrajzírója alkímista álomnak minősített (12).

Nagy volt a megdöbbenés, amikor 1957-ben kiderült (13), hogy az élettelen anyag bizonyos értelemben valóban aszimmetrikus. Az antineutrino pl. kizárólag jobbos formában létezhet, mint ahogy jobbosak az életre jellemző makromolekulák, jobbosan kulcsoljuk össze kezünket és jobbos csavarmentekre rendezkedett be az ipar.

Minden bizonnyal azt gondolják, hogy önkényesen összeválogatott példákkal egyoldalúan állítom be a kérdést. Ugyanis, bár valóban meglepő, hogy az elemi részek közül egyesek éppúgy kitüntetnek egyfajta kiralitást, mint a biomolekulák vagy némely morfológiai bélyeg, semmi okunk sincs arra, hogy a különböző szinteken megfigyelt aszimmetriák között összefüggést sejtünk. A neutrino, mint tömeg és töltés nélküli részecske, gyakorlatilag nem lép kölcsönhatásba az anyaggal, a jobbos molekulából nem lehet levezetni a makroszkópikus jobboságot, a csavarment jobbosága pedig egyszerűen megállapodás kérdése. Remélem, előadásommal sikerül majd meggyőzőnöm a hallgatóságot arról, hogy a szubatomi és molekuláris szinteken megfigyelt aszimmetriák mégis összefüggnek (a makroszkópikus aszimmetriával a továbbiakban nem foglalkozunk).

#### 1. A paritás és kiralitás kapcsolata

Említettem a Leibniz féle paritás elvet, mely szerint minden alakzat vagy esemény tükörképi párja is lehetséges. Más szóval a természet törvényei függetlenek attól, hogy egy meghatározott eseményt vagy annak tükörképi párját vizsgáljuk-e. Az egyenes vonalú mozgás vagy a körmozgás egyenlete azonos alakú balra illetve jobbra történő mozgás esetén. A helykoordináták előjele megváltozik ugyan, de ez nem befolyásolja az egyenlet érvényét. Érdekes viszont, hogy az egyenes vonalú mozgást jelképező poláros vektor másként tükröződik az origón, mint a körmozgást jelző axiálvektor. Az előbbi előjelet vált, a mozgásirány ellenkezőre változik, az utóbbi, vagyis az axiálvektor megtartja mozgásirányát, előjele nem változik. Azt mondjuk, hogy a poláros vektorok (sebesség, impulzus, gyorsulás, erő, elektromos térerősség) páratlan,  $-1$  paritásúak, mert ezek az origón tükrözve előjelet váltanak, viszont az axiálvektorok (szögsebesség, impulzusmomentum, mágneses térerősség) páros  $+1$  paritásúak, mert ezek az origóra való tükrözéskor nem váltanak előjelet. Amikor a paritás megmaradásáról beszélünk, akkor lényegében csak azt az evidens tényt szögezzük le, hogy a vektoriális mennyiségek minden időpillanatban egyértelműen felbonthatók polárvektorokra és axiálvektorokra. A paritás megmaradását egészen a legújabb időkig minden kísérlet és megfigyelés bizonyította. Ismeretes pl., hogy a Maxwell egyenletben elektromos és mágneses térerősségek szerepelnek. Ha elvégezzük az origóra való tükrözést és természetesen nem változtatjuk meg a skalárokat, akkor a tükrözés után az egyenletek alakja teljesen azonos az eredeti Maxwell egyenletekkel.

Ha egy axiál és egy polárvektort szuperponálunk, akkor helikális mozgást, királis alakzatot kapunk. Mivel a poláros vektort és az axiálvektort két-két térbeli sajátág

jellemez (hosszúság + irány, illetve felület + a rotáció iránya), ezért a királis objektumot a három-dimenziós térben négy térbeli sajátság rögzítésével lehet leírni.

Abban a szerencsés helyzetben vagyunk, hogy a fentiek nemcsak a klasszikus fizika, hanem a kvantummechanika törvényeire is érvényesek. A kvantummechanikában a fizikai rendszert, atomot, molekulát állapotegyenlettel írjuk le. Ha az origóra való tükrözés az állapotfüggvényt változtatlanul hagyja, akkor azt mondjuk, hogy a rendszernek páros,  $+1$  paritása van. Az előjelet váltó függvénynek paritása páratlan,  $-1$ . A kvantummechanikában is érvényes, hogy egy páros és páratlan stationer állapot szuperpozíciójával balos és jobbos nem stationer modifikációkat kapunk. Ha tehát a paritás nem maradna meg, akkor az egyik királis modifikáció előnyben részesülne a másikkal szemben.

Márpedig Lee és Yang jól ismert felfedezése óta ( $1956$ ) számos kísérlet bizonyítja, hogy az ún. gyenge kölcsönhatásokban a paritás nem marad meg. Az eredeti megfigyelés, amelyből ezt a fontos következtetést levonták a  $K^+$  mezonok kétféle bomlása: az egyik esetben  $2 \pi$  mezonra, a másik esetben  $3 \pi$  mezonra bomlanak. Mivel a  $\pi$  mezonokról tudták, hogy páratlan paritásúak ( $P\pi = -1$ ), a kétféle végállapot teljes paritása különböző kell hogy legyen ( $P^2\pi = +1$ ,  $P^3\pi = -1$ ). Azt a lehetőséget, hogy a kétféle bomlás két különböző, egy páros és egy páratlan paritású  $K^+$  létére mutatna, el kellett vetni, ugyanis a feltételezett  $K^+$  tömege ( $493,71 \text{ MeV}$ ) élettartama ( $1,237 \cdot 10^{-8} \text{ sec}$ ), sőt szórási hatáskeresztmetszete is azonosnak bizonyult. A paritás tehát nem marad meg.

Mivel a  $K^+$  bomlása gyenge kölcsönhatás következtében jön létre, várható, hogy a gyenge kölcsönhatások általában megsértik a paritás megmaradás szabályát. Ez a feltételezés  $1957$ -ben néhány hónap alatt fényesen igazolódott. Bármilyen elemi részecskék is keletkeznek gyenge kölcsönhatások során, mindig királis, aszimmetrikus végállapotok jönnek létre. A kezdeti állapot szimmetrikus, tükörképe fedésbe hozható önmagával, a végállapot tükörképe nem. A leglátványosabb megnyilvánulása ennek, hogy a  $\beta^-$  bomláskor keletkező elektronok balos perdületűek, negatív helicitásúak, spinjük a mozgásiránnyal ellentétes irányban áll ( $\delta \cdot p < 0$ , ahol  $\delta$  a spin,  $p$  a momentum). Ezekben a kísérletekben ismerték fel a neutrino helicitását, melyről fentebb szoltam.

A kérdésnek van egy termodinamikai vonatkozása. A második főtétel értelmében ugyanis az aszimmetrikus állapotok általában spontán szimmetrikusba mennek át. Gondoljunk például arra, hogy egy zárt rendszerben az egyenlőtlenül eloszló gázmolekulák idővel egyenletes sűrűséggel töltik be a rendelkezésre álló teret. Az eltolás aszimmetrikus állapot, tehát eltolás szimmetrikussá vált. A tükrözési szimetriára ugyanez érvényes. Spinpolarizált elektrongáz zárt rendszerben depolarizálódik; optikailag aktív molekulák spontán racemizálódnak, miközben a rendszer entrópiája és szimmetriája egyaránt növekszik. Pl. a D és L borkősav összeöntésekor az entrópia  $7 \text{ kcal/mol.fok-kal}$  nő. Nyilvánvaló, hogy a  $\beta$ -bomlás során is növekszik a rendszer összentrópiája, az a tény azonban, hogy a szimmetria szempontjából a rendszer entrópiája csökken, igen figyelemre méltó, ugyanis a végállapot információ tartalma magasabb, leírásához több adat rögzítése szükséges, mint a kezdeti állapot leírásához. Mai tudásunk szerint a fizikai eseményeknek ez a meglepő iránya, hogy tudniillik a szimmetrikus kezdőállapotból aszimmetrikus végállapot keletkezik, kizárólag a gyenge (és szupergyenge) kölcsönhatásokra vonatkozik. Nagyon fontos tehát, hogy meg tárgyaljuk, mit értünk gyenge kölcsönhatások alatt és milyen kölcsönhatások léteznek még.

## 2. Az alapvető fizikai kölcsönhatások

Az elemi részecskék viselkedését és így közvetve minden fizikai jelenséget öt különböző erővel, szabatosabban kölcsönhatással magyarázunk (az I. táblázaton csak négyet tüntetünk fel, az ötödik, szupergyenge kölcsönhatásról később beszélünk). Ezek közül kettő általánosan ismert, a gravitáció, mely összetartja a naprendszert és az elektromágneses kölcsönhatás, mely az elektronokat az atommaghoz köti, így az atomok és molekulák viselkedését szabja meg. Kevésbé ismertek az erős kölcsönhatások (magerők). Ezek tartják össze a protonokat és a neutronokat az atommagban. A gyenge kölcsönhatások mai tudásunk szerint nem tartanak össze semmit, éppen ellenkezőleg, bomlási folyamatokat idéznek elő és olyan ütközési jelenségekben nyilvánulnak meg, amelyben valamilyen ok miatt az erős és elektromágneses kölcsönhatások nem működhetnek.

A biológiai folyamatokban szinte kizárólag elektromágneses kölcsönhatások szerepelnek. Az ionmozgás, légzés, ingervezetés, enzimműködés stb. elektromágneses folyamatok. Az élet szempontjából azonban jelentősége van a gravitációnak is. Nemcsak annyiban, hogy a gravitáció tartja az élőlényeket a Föld felszínén, hanem ezen jóval túlmenően, a gravitációnak növekedésszabályozó és formaképző szerepe van a növényeknél és állatoknál egyaránt. A gyenge kölcsönhatás közvetve ugyancsak elengedhetetlen feltétele a földi életnek, ugyanis gyenge kölcsönhatás idézi elő a Napban annak a termonukleáris reakcióláncnak első lépését, melynek az életet fenntartó napfényt köszönhetjük. Mint ismeretes ennek a lépésnek során két proton deutériummá alakul és pozitron, valamint neutrino keletkezik. Előadásomban érvelni fogok amellest, hogy a gyenge kölcsönhatásoknak nemcsak közvetett, hanem közvetlen szerepe is van az élő szervezetben lejátszódó folyamatokban.

Joggal kérdezheti valaki, miért csak két kölcsönhatást ismerünk a mindennapi életből. A válasz a következő: azért, mert csak a gravitációs és elektromágneses erők nyúlnak a végtelenbe, csupán ez a kettő távhatás. A magerők és a gyenge kölcsönhatások nagyon kis távolságra korlátozódnak. Az előbbi a protontól, ill. neutrontól  $10^{-13}$ – $10^{-14}$  cm távolságban már nullává válik; a gyenge kölcsönhatások hatósugara még ennél is kisebb,  $10^{-14}$  cm-en belül esik. Tehát ezeknek az erőknek a felismerése csak különleges feltételek között lehetséges. Nyilvánvaló azonban, hogy az elemi részecskék körül mind a négy erőter kialakulhat.

Milyen szerkezetűek a különböző erőterek? Ma tudjuk, hogy az erőterek maguk is elemi részecskékből épülnek fel. Ezek cseréje biztosítja az energia, momentum, perdület továbbadását a fény sebességénél soha nem nagyobb sebességgel. A bizonytalansági reláció következménye, hogy a végtelenbe nyúló elektromos és gravitációs erőterek kvantumainak (foton, graviton) nem lehet nyugalmi tömege. A rövidebb hatótávolságú magerők kvantumainak (pion, kaon stb.) nagy nyugalmi tömegük van. Az igen kis hatótávolságú gyenge kölcsönhatásokat olyan elemi részecskék közvetítik, amelyek tömege a proton tömegének kb. harmincszorosa.

A négy kölcsönhatást az I. táblázat foglalja össze. Bennünket a gyenge kölcsönhatások érdekelnek, hiszen ezek sértik meg a természet tükrözésszimmetriáját. Ezért a gyenge kölcsönhatásokról el kell egyet s más mondanunk, hogy világos legyen a kép, ha majd biológiai vonatkozásokat kezdünk tárgyalni. A táblázatból látszik, hogy a gyenge kölcsönhatások a foton kivételével minden elemi részecske között működnek. A legújabb időkig úgy tudtuk, hogy a kölcsönhatás során mindig töltéscsere történik, tehát a két kölcsönható részecske közül az egyiknek elektromosan töltöttnek kell lennie. Ilyen kölcsönható párok pl. a következők:  $(e^{\pm}, \nu_e)$ ,  $(u^{\pm}, \nu_u)$  vagy  $(p^{\pm}, n)$ . A hatást közvetítő vektorbozont tehát töltöttnek tartották ( $W^+$ , ill.  $W^-$ ) és

Kölcsönhatás	Erőssége	Időtartam	Hatótávolság cm	Forrás		Erőter kvantuma	Tipusa
				Töltés	Részecske		
Erős	1	$10^{-22}$ s	$10^{-13}$	Barion	$p^+$ , $n^+$ és a többi barionok.	pion $\pi$	vonzás, taszítás
Elektromágneses	$10^{-2}$	$10^{-12}$ s	$\infty$	Elektromos	$e^+$ , $\mu^+$ , $p^+$ és a többi töltött részecske.	foton $\gamma$	vonzás, taszítás a töltés előjelétől függően
Gyenge	$10^{-14}$	$10^{-10}$ ev	$10^{-16}$	Fermion	$\nu_e, \nu_\mu, e^+, \mu^+, p^+, n$ minden részecske a fotont kivéve.	vektorbozon $W$	vonzás, taszítás a töltés előjelétől és a kiralitástól függően
Gravitációs	$10^{-39}$	?	$\infty$	Tömeg	minden részecske	graviton $g$	csak vonzás

• Dimenzió nélküli csatolási állandó.

1. táblázat: Négy alapvető fizikai kölcsönhatás (az ötödik, ún. szupergyenge kölcsönhatást a táblázat nem tartalmazza, mert jelenleg e tekintetben nagyon hiányosak ismereteink. Az előadás során azonban érinteni fogjuk a szupergyenge kölcsönhatásokat is).

az elektromos áram analógiájára azt mondták, hogy a gyenge kölcsönhatásokban töltött áramok vesznek részt. Csak a legújabb eredményekből következtethetünk semleges áramok léteire is. A bizonyító kísérlet során müon neutrinnal bombáztak protonokat és két különböző esetet figyeltek meg. Az egyiknél töltéscsere történt, mert a müon neutrino átalakult müonná. A másik esetben nem jelentkezett a végállapotban müon, ami a semleges vektorbozon létezését bizonyítja (14). Ha viszont semleges vektorbozonok léteznek, akkor felléphet gyenge kölcsönhatás két elektron, illetve két proton között is, melyet a  $\sim 79,6$  proton tömegű  $Z^0$  vektorbozon közvetít. Akár töltött, akár semleges áram közvetíti a kölcsönhatást, mindig megsérül a paritás, ugyanis ha a kölcsönhatás során új részecskék keletkeznek, akkor ezek spinpolarizáltak, ha pedig szóródás történik, (nem polarizált magokon), akkor a hatáskeresztmetszet nem azonos balos, ill. jobbos perdületű részecskék esetén (15). Végül meg kell említenünk egy nem általánosan elfogadott hipotézist, mely szerint gyenge kölcsönhatást neutrino-antineutrino pár is közvetíthet (16).

A legújabb elméleti megfontolások és azok a kísérletek, melyek a semleges vektorbozon felfedezéséhez vezettek, igen nagy jelentőségűek, ugyanis azt valószínűsítik, hogy az elektromágneses és gyenge kölcsönhatás is egyetlen fundamentális kölcsönhatás különböző megnyilvánulásai (17). Az eltérések a hatótávolság különböző voltából és az ún. mérték-invariencia megsértéséből fakadnak. Ennek a kérdésnek megtárgyalása messze meghaladja előadásom kereteit. Egy dolgot azonban feltétlenül meg kell jegyeznünk: a semleges áramok felfedezése azt jelenti, hogy a molekulákban is felléphet gyenge kölcsönhatás, mint az elektromágneses áram egy axiál-vektorral való szennyezése.

#### IV. ÖSSZEFÜGGÉS AZ ELEMI RÉSZECSKÉK ÉS A BIOMOLEKULÁK ASZIMMETRIÁJA KÖZÖTT

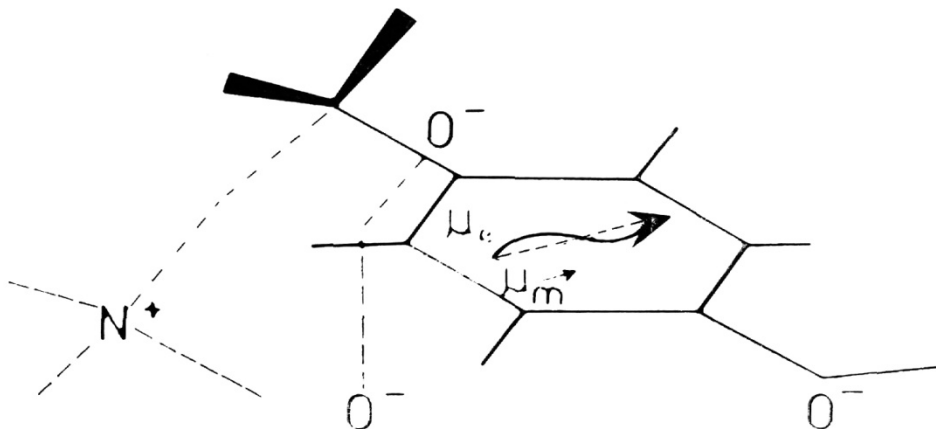
A paritás elv 1957-ben bekövetkezett megdőlése után egymástól függetlenül négyen vették észre, hogy a gyenge kölcsönhatások szimmetria-sértése és a biomolekulák szimmetria-sértése között összefüggés lehetséges: F. Vester, T. L. V. Ulbricht (19), Y. Yamagata (19) és mi (20). Az utóbbi években kiderült ugyan, hogy mások is felismerték az összefüggés lehetőségét [pl. Sagan (21), Finegold (22), Dubos (12), Ernst (23)], de nem mentek túl az ötlet említésén. Ezzel szemben a fentiek a kérdést elméleti és kísérleti vizsgálat tárgyává tették. A problémát két úton közelítették meg. Az első szerint a polarizált  $\beta^-$  részecskék különbözőképpen hatnak kölcsön a két enantiomerrel, tehát  $\beta^-$  részecskék jelenlétében preferenciálisan az egyik optikai izomer keletkezik, ill. bomlik (Vester–Ulbricht hipotézise). A második szerint az élőlények optikai tisztaságának oka, hogy a molekulában is működnek a gyenge kölcsönhatások, tehát a balos és jobbos izomerek másként reagálnak egymással (Yamagata hipotézis). A két hipotézis, mint látni fogjuk, jól összehangolható (24).

##### 1. $\beta^-$ részecskék differenciális kölcsönhatása a két enantiomerrel

A Vester–Ulbricht hipotézis szerint az életre jellemző optikai tisztaság úgy alakult ki, hogy a kémiai evolúció során a  $\beta^-$  részecskék különbözőképpen reagáltak a két enantiomerrel. A balos  $\beta^-$  részecskék az ősóceánban lezajló szintéziseket tolták el az egyik izomer irányába, ill. a már kialakult racem rendszerben az egyik enantiomer bomlását jobban gyorsították, mint a másikat. A reakció mechanizmusát Vester és Ulbricht abban látta, hogy a longitudinálisan poláros  $\beta^-$  részecskék lassulásakor  $\gamma$ -sugárzást emittálnak, amely cirkulárisan poláros. Azt viszont már régóta tudjuk (25) és újabb vizsgálatok is megerősítik (26), hogy cirkulárisan poláros fényvel szimmetriás szintézisek valósíthatók meg. Vester és Ulbricht különböző  $\beta^-$  sugárzó izotópok jelenlétében összesen 10 különböző szintézis, hidrolízis és lebontási jelenséget tanulmányoztak negatív eredménnyel (27). Egy évvel később Goldanskii és Khrapov (28) Vesterék munkájának ellenőrzése céljából 11 különböző kombinációban ugyancsak negatív eredményt kaptak. (Vester–Ulbricht hipotézissel kapcsolatban tévesen említeni szokták Starodubcev és munkatársai kísérletét (29), akik közölték, hogy  $^{60}\text{Co}$ -ból emittált  $\gamma$  sugarakkal optikailag aktív molekulákat szintetizáltak. Ezt a kísérletet egyrészt megcáfolták (30), másrészt a téma szempontjából irreleváns, mivel a  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  sugárzására nem cirkulárisan poláros.)

Az első pozitív eredményt mi közöltük 1968-ban (20). Négy eredménytelen kísérlet után gyengén lúgos oldatban L és D tirozint bombáztunk  $^{90}\text{Sr}$ -ből származó  $\beta^-$  részecskékkel. A D-tirozin határozottan gyorsabban bomlott, mint az L. A  $\beta^-$  részecskék és az enantiomerek kölcsönhatására új hipotézist dolgoztunk ki, melynek alapjául az az ismert tény szolgált, hogy optikailag aktív anyagokban a statikus elektromos töltések helikálisan oszlanak el. A gerjesztett ill. a molekuláról leszakított elektron „megérzi” a molekula helikális potenciáletterét és helikális pályára kényszerül (31). Ennek következtében mágneses momentum keletkezik, melynek hatásaként az elektronok spinje és mozgásiránya csatolódik, spinpolarizáció lép fel (lásd 1. ábra). Az elektron jobbos és balos helicitásától függően különbözőképpen reagál a polarizált  $\beta^-$  részecskékkel: különböző lesz tehát a kölcsönhatási barrier a két enantiomerrel. Lényegében a Pauli-elv érvényesül, ui. az egyik enantiomerről leszakított elektronnal paralel, a másikról leszakított elektronnal antiparalel párt képezhetne a  $\beta^-$  részecske.

A pozitív eredmény cáfolására Bernstein és mtsai 5 aminosav racemát lebont-



1. ábra: A tirozin molekula  $\beta$  átmenetének helikális jellege, az elektromos dipólmomentum  $\mu_e$  és mágneses dipólmomentum  $\mu_m$  fellépése.

tását tanulmányozták  $^{14}\text{C}$ -ből származó  $\beta$ -részek jelenlétében és negatív eredményt kaptak (32). Pár év múlva Bonner és Flores  $^{90}\text{Sr}$ -ből származó fékezési sugárzás hatásának tett ki D és L, ill. racem leucint (33). Gyenge preferenciális kölcsönhatást tapasztaltak. Eredményeiket azonban később visszavonták. Legújabban ugyancsak Bonner és mtsai szilárd D és L leucint lineáris gyorsítóban előállított, longitudinálisan polarizált elektronokkal bombáztak (34). A D-leucin gyorsabban bomlott a természetes balos spinpolarizált elektronok hatására, az L módosulat viszont jobbos spinpolarizált elektronokkal bombázva bomlott gyorsabban.

Egy másik ugyancsak új eredmény, hogy olyan racem oldatokból, amelyeket  $^{32}\text{P}$ -ből származó balos elektronokkal bombáztak, preferenciálisan a D izomér kristályosodott ki. Ez az eredmény azért fontos, mert ez ideig a  $\beta^-$  részek és az optikailag aktív molekulák közötti differenciális kölcsönhatást mindig befolyásolhatták az L és D enantiomerekben lévő különböző szennyeződések. Mivel a jelen kísérletben racem oldatból indultak ki, az esetleges szennyeződések, amint azt a kontrollok igazolták, az L és D izomerek kristályosodására azonosan hatottak.

Az utóbbi két kísérlet, különösen Bonneréké perdöntőnek látszik és a preferenciális bomlás iránya is megegyezik azzal, amit mi találtunk 1968-ban (20). Ennek ellenére foglalkoznunk kell a kérdéssel, miért van az irodalomban lényegesen több negatív, mint pozitív adat.

## 2. A $\beta^-$ részecskék és királis molekulák kölcsönhatására vonatkozó kísérletek kritikája

Először néhány teoretikus nehézséget említek, azután rámutatok arra, hogy a kutatók jelentékeny része nem választotta meg szerencsésen a kísérleti felételeket.

### A) Teoretikus problémák:

Az első pillanatra nyilvánvaló, hogy az elemi részecskéknél megfigyelt aszimmetria és a molekuláris aszimmetria között kapcsolat lehet. Ha azonban részletekbemenően vizsgáljuk a kérdést, azt látjuk, hogy a várható effektusok igen kicsik. Sajnos nem állnak rendelkezésünkre pontos számítások, mert ez ideig nem volt olyan mo-



dell, aminek keretében a számításokat el lehetett volna végezni. A becslések szerint azonban csak a mérhetőség határa alatti differenciális kölcsönhatásokra lehetünk elkészülve. E becslések alapjául az alábbi megfontolások szolgáltak:

- a) A fékezési  $\gamma$  sugárzás cirkuláris polarizációjának foka abban a tartományban (10–100 eV), ahol fotokémiai hatás várható, igen kicsiny: Vester és mtsai-nak számítása szerint  $\sim 1.4 \times 10^{-4}$ – $10^{-2}$  rész. Márpedig még  $\sim 100\%$  cirkulárisan poláros fényvel is csak rossz kitermeléssel lehet aszimmetriás szintéziseket, ill. bomlásokat előidézni (26).
- b) A spinflip  $\sim 10^{-4}$  eV energiát igényel, viszont a bomlás első lépéséhez, az ionizációhoz 25–40 eV-ra van szükség. A spin tehát ütközés esetén  $\sim 10^{-5}$  nagyságrendben vehet részt a reakcióban. Bizonyosan sokkal kisebb ez a szám, ha a hatást arra az esetre próbáljuk megbecsülni, amikor a  $\beta^-$  részecske még távol van a molekulától. Fontos megjegyezni, hogy két polarizált elektron közti kölcsönhatásban az energetikai szempontokon túlmenően a Pauli elvnek lényeges szerepe van.
- c) Nem szabad arról sem megfeledkezni, hogy egyetlen  $\beta^-$  részecske pályája során több ezer molekulát ionizált, de eredeti balos spinjét csak egynek adja át. Ez lényeges különbség a cirkulárisan poláros fényvel szemben, ahol egyetlen foton egyetlen molekulát gerjeszt és annak cirkuláris polarizációját is átadja.
- d) Vizes oldatok besugárzása bizonyos szempontból sikerrel kecsegtet, ui. az oldat összetételének megváltoztatásával befolyásolni lehet a bombázott anyag sugárérzékenységét és növelni lehet lúgos közegben a hidratált  $\beta^-$  részecskék élettartamát. Hátrány viszont, hogy a radiolízist rendszerint a hidroxil-, hidrogén- és más ionok közvetítik, tehát jelentős szekunder hatással kell számolni. Mindezek alapján nagyon valószínű tehát, hogy olyan esetekben, ahol a  $\beta^-$  részecskékkel való bombázás az L, ill. D molekulákra különbözőképpen hatott, valamilyen erősítő mechanizmus is működött, pl. a kis mennyiségben jelenlévő bomlástermék katalitikus hatást fejthet ki az egyik enantiomerre. A bomlást megelőző hosszú lag fázis, majd a hirtelen bekövetkező intenzív bomlás erre utal.

### *B) Rosszul megválasztott kísérleti feltételek:*

A teoretikus nehézségeken túlmenően az egyes kísérletek értéke megkérdőjelezhető. Az alábbi kritika többségében Keszthelyi Lajostól származik.

- a) A kísérletek legnagyobb részében racem oldatokat sugároztak be és a várt differenciális radiolízist polarimetriás módszerrel ellenőrizték. Mivel a besugárzás hatására racemizáció lép fel, a polarimetriás módszer nem látszik megfelelőnek.
- b) Vester és Ulbricht (27), valamint Goldanskii és Khrapov (28) a besugárzásokat reaktorban végezték, ahol a minták felmelegedhettek és ki voltak téve a reaktorokban mindig jelenlévő gyors neutronoknak is. Ezért a mintában racemizáció léphetett fel. Számos kísérletben nem választották meg helyesen a radioaktív sugárforrást. A  $^{108}\text{Ag}$  és  $^{110}\text{Ag}$  esetében a reaktor-neutronok és a nem polarizált  $\gamma$  sugárzás elfedhették a fékezési sugárzás által indukált differenciális radiolízist (27). Bernstein és mtsai-nak  $^{14}\text{C}$  végzett kísérleteiben a  $\beta^-$  részecskéknél alacsony a kinetikai energiájuk (32), márpedig a polarizáció foka arányos ezzel az energiával. Más szóval a  $^{14}\text{C}$ -ből származó  $\beta^-$  részecskék nincsenek kellő mértékben polarizálva.
- c) Ugyancsak Bernstein és mtsai-nak kísérletében nem állt rendelkezésre elég energia a molekulák bomlásához (32). Számításaink azt mutatják, hogy nagymértékű dekompozíció esetén az egy molekulára eső energia 0,5–1,7 eV között mozog. Ez

nyilvánvalóan nem elegendő. Tehát a molekulák bomlását nem a  $\beta$ -részecskék idézték elő. Kedvezőbb esetekben az elbomlott frakció túl kicsiny ahhoz, hogy különbséget lehessen megállapítani optikai rotációval.

- d) Bonner és Flores kísérleteinek (33) elemzésekor kiderül, hogy a fékezési  $\gamma$  sugárzásnak az a tartománya, amely preferenciális bomlást okozhatna, nem érhet el a mintát a célszerűtlen konténer alkalmazása miatt.

### 3. $\beta^+$ részecskék differenciális kölcsönhatása a két enantiomerrel

A teoretikus és kísérleti nehézségek egy részét át lehet hidalni, ha az enantiomereket nem  $\beta^-$ , hanem  $\beta^+$  részecskékkel bombázzuk. A  $\beta^-$  részecskék ugyanis a lelassulás után „beolvadnak” az elektronok tömegébe. Ezzel szemben a  $\beta^-$  részecskék molekulákkal való kölcsönhatása jól követhető, mert lelassulás után az elektronokkal párt képeznek és annihilálódnak. Az ilyenkor keletkező  $\gamma$  fotonok száma, ill. az emittálás és annihilálás közt eltelt idő (pozitron élettartama) fontos információkat nyújt. Mivel pedig a pozitronok lassulás során nem veszítik el polarizáltságukat, az annihilálás módja azokról az eseményekről tájékoztat, amelyekben a spin szerepet játszik. A kísérletek megértése céljából fontos emlékeztünkbe idézni, hogy a pozitron háromféleképpen annihilálódhat.

a) Direkt annihilálás szabad elektronon (élettartam  $\tau \sim 2 \times 10^{-10}$  s).

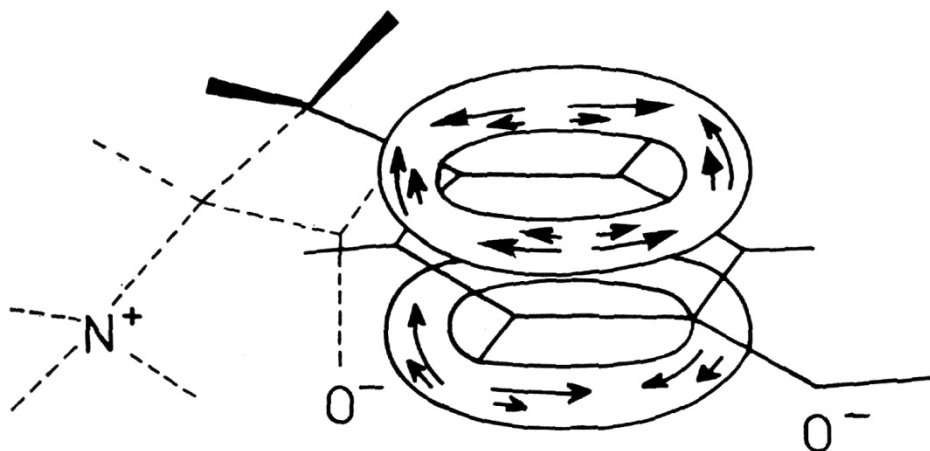
b) Az annihilációt megelőzően a pozitron az elektronnal ún. pozitroniumot képez, amely lehet szinglet (a két részecske spinje antiparalel) vagy triplet (két részecske spinje paralel) állapotú. A szinglet állapotú pozitronium két  $\gamma$  fotonná annihilálódik  $\tau_s \sim 1,2 \times 10^{-10}$  s alatt, a triplet állapotú három  $\gamma$  fotonná annihilálódik  $\tau^t \sim 2,7 \times 10^{-7}$  s alatt.

c) Kondenzált anyagokban az annihilálás mindig szinglet állapotból történik. Uí. a pozitronium, ha triplet állapotban keletkezett is, elektronját lecseréli antiparalel spinű elektronnal. Ez esetben természetesen két  $\gamma$  foton keletkezik, az élettartam pedig  $\tau \sim 1-5 \times 10^{-9}$  s.

Egy kísérletsorozatban L és D aminosav párokat sugároztunk be  $^{22}\text{Na}$ -ból származó spinpolarizált  $\beta^+$  részecskékkel (35). Az eredmények azt mutatták, hogy a D izomeren a  $\beta^+$  rész preferenciálisan triplet állapotú pozitroniumot képez, míg az L izomeren nagyobb arányban keletkezik a singlet állapotú pozitronium. Az eredményt kétféleképpen lehet értelmezni:

a) Amikor a  $\beta^+$  részecske az optikailag aktív molekulából egy elektront „kiszippant”, az elektronnak keresztül kell haladnia a molekula helikális potenciálerén és így mágneses tér keletkezik. Ha ez a mágneses tér antiparalel a pozitron spinjével, akkor elsősorban triplet-pozitronium keletkezik, mert a kiszakított elektron spinje a mozgásirányba áll be. Természetesen a két enantiomer ellentétes értelműen helikális, tehát bennük az ionizálódáskor létrejött mágneses térerősség ellentétes irányú.

b) A másik lehetőség az, hogy a molekulában már az alapállapotban is csatolás van az elektronok spinje és mozgásiránya között (lásd 2. ábra). Ezt a lehetőséget Hraskó vetette fel és dolgozta ki kvantummechanikailag korrekt formában (36). A hipotézis lényege a következő: ha egy elektron optikailag aktív molekulában mozog, polarizálja környezetét. A polarizációs töltések mozgásának két komponense van. Az egyik paralel, a másik merőleges a mozgásirányra. Ez utóbbi cirkuláris mozgás, mely jobbos és balos lehet az elektron mozgás irányától függően. Optikailag inaktív rendszerben a jobbos és balos mozgás kompenzálja egymást, királis molekulában azonban a polarizációs töltések mozgása követi a molekulák



2. ábra: A helikális elektrongáz modell a benzolgyűrű  $\pi$  elektronrendszerben a tirozin példáján.  
 (  $\curvearrowright$  → momentum,  $\rightarrow$  spin).

helikális jellegét. Az így fellépő mágneses tér ismert módon hat az elektron spinjére, ami a mozgásirány és a spin közötti csatoláshoz vezet hasonló módon, mint azt a gerjesztésnél és az ionizálásnál tárgyaltuk. A molekula tehát alapállapotban egy olyan „helikális elektrongázra” emlékeztet (az elnevezés Hraskótól származik), amelyben a spinek a mozgásirányba vagy azzal ellentétesen mutatnak attól függően, hogy a D vagy az L izomerről van-e szó. Ha már most a  $\beta^+$  rész ilyen helikális elektrongázon halad keresztül vagy annak közelébe jut, akkor a saját mozgásával megegyező mozgású elektronokkal fog preferenciálisan kölcsönhatni. Ha a mozgásirányhoz képest az elektronok spinje előrenéz, akkor több triplet állapotú pozitronium fog keletkezni (D aminosavakban), ellenkező esetben elsősorban szinglet állapotú pozitroniumok keletkeznek (L aminosavak esetén). Amit a  $\beta^+$  részekre elmondunk, az a  $\beta^-$  részekre is érvényes, de ez esetben nem pozitronium keletkezik, hanem a molekula szinglet ill. triplet állapotba kerülhet attól függően, hogy a  $\beta^-$  részecske D, ill. L izomerrel hat-e kölcsönösen (lásd II. táblázat).

Pozitron annihilációs kísérletünket össze lehet vetni két másik laboratórium eredményeivel. A kísérleti feltételek és az adatok kiértékeléséhez használt program minden esetben különböző volt. Dézsi és mtsai 8 enantiomer-párt vizsgáltak meg (37). Három esetben a D-ben kaptak nagyobb triplet-intenzitást, öt esetben a hibahatárokon belül azonos volt a triplet-képződés a két izomerben. Chuang és Thao 10 L aminosavat hasonlított össze 10 racem módosulattal (38). A D aminosav jelenléte négy esetben növelte a triplet intenzitását, öt esetben nem befolyásolta és csak egyetlen esetben csökkentette. Az a tény, hogy 22 különböző variáció közül 11 esetben nem volt különbség, 10 esetben a D-ben és csak egyetlen esetben az L-ben volt nagyobb a triplet pozitronium intenzitás, azt mutatja, hogy a pozitron annihilációs módszer egyértelműbb eredményekre vezet, mint a  $\beta^-$  részekkel való kísérletezés. Emlékeztetünk arra, hogy  $\beta^-$  bombázásokkal 34 kombináció közül csak két olyan kísérlet ismeretes, amely D aminosavak gyorsabb bomlását bizonyítja. A többinél nem kaptak különbséget. Megjegyzendő, hogy sem a pozitron annihiláció, sem a  $\beta^-$  bomlásos kísérletekben nincs a szennyezés veszélye megnyugtatóan kiküszöbölve.

Egy másik kísérletben Lemmon és mtsai polarizált  $\mu^+$ -k beépülését vizsgálták meg

Izomerek és részecskék	Mozgásirány	Spin
L-izomer	← →	→ ← ↑↓
$\beta^+$ részecske	→	→ ↑↓
$\beta^-$ részecske	→	← ↑↓
D-izomer	→ ←	→ ← ↑↓

↑  
↓  
preferenciális szinglet képződés

II. táblázat: Az elektronspin és mozgásirány csatolása optikai izomerekben, továbbá a  $\beta^+$  részecskék preferenciális szinglet képződése az izomerből kiszakított elektronokkal.

különböző optikai izomerekben (39). Feltételezték, hogy a polarizált  $\mu^+$  sugár különbséget tesz a két optikai izomer között, de szelektivitást nem találtak. A negatív eredmény minden bizonnyal azzal magyarázható, hogy egyrészt az  $\mu^+$ -nak az elbomláshoz nincs szüksége a közegből felvett elektronokra, másrészt az  $\mu^+$  tömege mintegy kétszázszor nagyobb az elektron tömegénél, tehát mágneses terekre – amitől a szelektivitást várjuk – kétszázszor érzéktelenebb, mint az elektron, ill. a pozitron. Érdeemes megemlíteni, hogy Lemmon és mtsai D és L 2-oktanollal, valamint D és L alaninnal dolgoztak. Pozitron annihilációs kísérletekben Dézsi és mtsai az alaninnál magasabb triplet intenzitást találtak a D izomérben, Chuang és Thao pedig nem találtak különbséget (37).

## V. GYENGE KÖLCSÖNHATÁSOK BIOLÓGIAI RENDSZEREKBE

### 1. Szimmetriasértő gyenge kölcsönhatások az atomokban és a molekulákban

Már néhány hónappal a paritás megdőlésének bizonyítása után Zeldovics felvetette azt a lehetőséget, hogy a paritássértő gyenge erők befolyásolják a protonok és elektronok közti elektromágneses kölcsönhatásokat, tehát működnek az atomokban és molekulákban is (15). Szerinte a paritássértő kölcsönhatás kimutatható longitudinálisan polarizált elektronok nem polarizált protonokon való Coulomb szóródásával. Jobbos, ill. balos ( $\delta \cdot p > 0$ ,  $\delta \cdot p < 0$ ) gyors elektronok ( $10^9$  eV) szóródási hatáskeresztmetszetének  $0,1-0,01\%$ -ban különböznie kell. Elméleti megfontolásokkal azt is bizonyítja, hogy szimmetrikus atomok, pl. a H egyes átmenetei a síkban polarizált fényt elforgatják paritássértő gyenge kölcsönhatások fellépése miatt. Nézeteit 1960-ban Perelomovval közösen írt cikkében részletesen kifejti, nem tartja valószínűtlennek a mérésekkel való kimutatást sem (40). A fentiek alapján 1962-ben Bradley és Wall tesz kísérletet arra, hogy a  $^{16}\text{O}_2$  egyik mágneses dipolátmenetét ilyen szempontból tanulmányozza (41). A molekulát jobb és bal körkörös poláris fénnyel gerjesztette, ill. azt vizsgálta, hogy az emittált fény milyen mértékben körkörös poláris. Az eredmény negatív volt. Az amplitudóban a paritássértő potenciál kisebb mint  $3 \times 10^{-8}$ -ad résszel szerepel. Carhart elméleti számításai szerint  $^{16}\text{O}_2$ -nél a paritássértés  $10^{-18}$  körül mozoghat (42), tehát 10 nagyságrenddel kell fokozni a mérés érzékenységét. A hidrogén esetében  $10^{-12}$  határt ad meg. Curtis-Michel szerint reménytelennek látszanak az ilyen irányú vizsgálatok (66).

Legújabbban azonban a probléma újraéledt, aminek két oka van. Egyrészt 1967-ben kimutatták, hogy a gyenge kölcsönhatás miatt a magerőkhöz is paritássértő tag keveredhet és így a gerjesztett atommagok  $\gamma$  vonalai igen kis mértékben körkörös polárisokká válnak (43). Másrészt a semleges áramok felfedezése fordította az érdeklődést az atomban, ill. a molekulában esetleg fellépő gyenge kölcsönhatások felé. Igaz, a nehézségek óriásiak. Mint említettük, a gyenge kölcsönhatások kontakt természete nagyon valószínűtlenné teszi a paritássértő kölcsönhatást két elektron között, melyek Coulomb taszítás miatt nem kerülhetnek  $10^{-14}$  cm közel egymáshoz. Az elektron és proton közötti kölcsönhatás már valószínűbbnek látszik. Ez a körülmény és a hangolható lézertechnika felfedezése indította Bouchiat-t arra, hogy a kérdést újra megvizsgálja (44). Számításai szerint nehéz atomokban ( $Z > 50$ ) a paritássértő kölcsönhatás lézertechnikával kimutatható. Kísérleti eredményekről azonban máig nem adtak hírt.

### 2. Gyenge kölcsönhatások optikai izomerekben

Yamagata ismerte fel 1966-ban, hogy a két enantiomernek kötési ill. kémiai reakcióképessége igen gyengén különböző lehet (19). A paritás megsértése ugyanis – mint említettük – a természet tükrözésszimmetriájának megsértését jelenti; szabatosabban a semleges áramok a tükrözési szimmetriára non-invariánsak. Igaz, 1966-ban még nem tudtuk, hogy léteznek-e semleges áramok, Yamagata viszont Zeldovics-hoz (15) és másokhoz hasonlóan helyesen látta, hogy az erős és elektromágneses kölcsönhatások sem teljesen paritásörzöek, mivel mint írja „magasabb rendben korrigálni kell őket a gyenge kölcsönhatásokkal”. Így a molekula két tükörképi párjának hullámfüggvénye nem lesz teljesen azonos. A szimmetriasértés igen kismértékű, tehát valamilyen akkumulációs elvnek kell érvényesülnie ahhoz, hogy manifesztálódjék. Yamagata reakció-kinetikai számításokkal bizonyította, hogy a jobbos DNS szinté-

zisénel, amely több millió lépésből áll, a két enantiomer közti reakciósebesség-különbség felerősödik és így racem elegykből a jobbos helix szintetizálódik preferenciálisan. A néhány ezer vagy tízezer aminosavból álló proteineknel az egyik enantiomer reakciósebességének felerősödése még elhanyagolható.

Yamagata hipotézise adja meg az elméleti alapot ahhoz a vizsgálathoz, amelyet Thiemann és Wagener (45) kezdeményezett. Kimutatták, hogy a D és L NA-NH<sub>4</sub>-tartarát kristályok rács energiájában különbség van. Ezzel magyarázzák, hogy a két enantiomer oldékonysága eltérő. A kérdéssel kapcsolatban Thiemann és Darge utánanézett az utóbbi évek kristályosítási kísérleteinek (46). Kiderítették, hogy igen ritkán található a kézikönyvekben a két enantiomerre azonos fajlagos forgatóképesség (természetesen különböző előjellel), a kereskedelmi racem anyagok pedig csaknem minden esetben néhány 0%-kal többet tartalmaznak az egyik izomerből, mint a másiktól. pl. a DL-glutaminsav, DL-lizin és DL-kámfor kb. 70%-ban volt „szennyezve” az egyik izomérrel. A jelenséget azzal szokták magyarázni, hogy a laboratóriumi levegő szennyezése élő eredetű, gyapot-, gyapjú-, rovardarabkákból álló por és ez okozza az egyik enantiomer preferenciális kristályosodását. Meg kell azonban jegyezni, hogy Harada laboratóriumi porral tudatosan szennyezett kristályosítási kísérletekben nem tudta a fenti hatást kimutatni (47), a szimmetriától való eltérésekre tehát nincs kielégítő magyarázat.

Meggyőzőbbek a polimerizációra vonatkozó kísérletek. Blout és Idelson D- és L-poliglutamátot állítottak elő  $\gamma$ -benzil-glutamát-N-karboxianhidridből. Azt találták, hogy az L-polimer 120%-kal hosszabb, mint a D-polimer. Ez a különbség messze túl van a kísérleti hibán; a szerzők nem fűztek hozzá megjegyzést (4). Wada hasonló kísérleteket végzett és ugyancsak szabálytalanságokat talált (48). Azok a polimerek, amelyek több L izomert tartalmaztak, sokkal nagyobb molekulásúlyúak voltak, mint azok, amelyekben a D izomer volt a több, racem polimerek pedig szignifikáns pozitív rotációs diszperziót mutattak. Wada az esetleges szennyeződésen kívül fölveti annak lehetőségét, hogy a szintézis menete az L és D izomerre nézve aszimmetrikus. Nagyon megerősíti ezt a gyanút Darge (49), Thiemann és Darge (46) valamint Thiemann (50) újabb mérésorozata. Több különböző aminosav igazoltan racem oldatából polimereket szintetizáltak. A polimerek összetétele már nem bizonyult racemnek, preferenciálisan az L aminosavak épültek be (D/L=0.8). Ugyancsak racem telített oldatból olyan kristályok keletkeztek, melyben a D/L arány 0.75 volt.

Bár ezeknek a kísérleteknek értelmezésére Yamagata hipotézise szolgált, egy fontos megjegyzést kell tennünk. A gyenge kölcsönhatások nem fognak különbséget tenni két objektum között csak azért, mert azok egymásnak tükörképi párjai. Akkor viszont miről ismerik fel a neutrális áramok az L és D izomert? A válasz az, hogy az elektronok helicitásáról. Ugyanis mint már említettük, a redukció során leszakadó elektron a molekula helikális potenciálterében helikális mozgást végez, mágneses momentum keletkezik és az elektron spinje a mozgásirányhoz képest longitudinálisan polarizálódik. A polarizáltságnak reakciókinetikai jelentőségét a klorofillok allomerációjának példáján mutathatjuk be (51). Ismeretes, hogy a klorofillok alkalikus oldatban allomerizálódnak. Ez a folyamat elektron leszakításával kezdődik, melyet a tirozin gátolni képes. A Mg-deuteroporfirin, az A-klorofill és a b-klorofill struktúrája nagyon hasonló, a helicitás szempontjából sorozatot képeznek. A Mg-deuteroporfirin szimmetrikus, a gerjesztéskor mágneses momentum nem keletkezik, az a-klorofill és a b-klorofill királis, az elsőben geszjesztéskor kicsi, a másodikban nagy mágneses momentum keletkezik. A Mg-deuteroporfirin redukójakor tehát nem lép fel spinpolarizáltság. Az a-klorofillnál a leszakadó elektronok kisebb polizáltsága várható mint a b-klorofillnél. Mivel az elektront az ugyancsak helikális szerkezetű L ill. D

tirozin veszi fel, nem közömbös, hogy a leszakadó elektron milyen helicitású. Ha hipotézisünk helyes, akkor azt várhatjuk, hogy a Mg-deuteroporfirin nem differenciál az L és D tirozin között, viszont az a-, és b-klorofill fokozódó sztereo-szelektivitást mutat. Az eredmények ezt a várakozást igazolták. Optikailag aktív anyagoknak reakciókinetikájában jelentősége van tehát az elektron helicitásnak, ami előfeltétele a gyenge kölcsönhatások érvényesülésének. A gyenge kölcsönhatások tehát az átmenetek és ionizációk láncán keresztül szintézisfolyamatokban manifesztálódnak. Ennek a véleménynek ad hangot Gajzágó és Marx is (52). Megjegyezzük, hogy a királis molekulák gerjesztéskor fellépő spinpolarizáltságot több más kísérletben is bizonyítottuk, melyet azonban itt nem részletezünk (53).

Végül foglalkoznunk kell Yamagatának azzal a feltevésével, hogy a két enantiomer kötési energiája különböző. Rein két dolgozatában is ismertette idevonatkozó kvantumkémiái számításainak eredményeit (54). Az elsöben  $10^{-10}$  eV vagy ennél kisebb kötési energiakülönbséget számolt, a másodikban a paritásértő energiakorrektiót még kisebbnek találta:  $\sim 10^{-13}$  eV. Ez az érték a mérési határ alatt van, ami fokozottabban hívja fel a figyelmet amplifikációs mechanizmusok keresésére. Rein felveti azt a lehetőséget is, hogy maguk az elektromágneses kölcsönhatások hadronikus axiálvektor árammal sértik a paritást. Ennek a kérdésnek megtárgyalása nem lehet feladatunk.

## VI. A BIOLÓGIAI IDŐIRÁNY A SZIMMETRIAELVEK TÜKRÉBEN

Engedjék meg, hogy előadásomat távlatok és tervek bemutatásával zárjam. A szimmetriaelvek ugyanis szigorú logikával vezetnek el bennünket az idő, pontosabban az időirány kérdéséhez, mely a biológia, talán legfundamentálisabb problémája. Teljesen egyetértek Bronowskyval, amikor a következőket mondja: „miként lehetséges, hogy az evolúció mint egész, egy különleges időirányt mutat, a fokozódó komplexitás irányát. Ha egyáltalán van a biológiában valamilyen kérdés amelyre választ várunk, akkor az a következő: miért ilyen a biológiai időirány?” (55).

Tisztában vagyok vele, hogy a mutációs és szelekciós rendszerek felfedezése, elméleti kombinálása, valamint a termodinamikai disszipatív a szimmetriasértő biokémiai reakcióláncok leírása (56) jelentékeny lépés az evolúció értelmezésében. De hogy a magyarázat nem végleges és átfogó, azt bizonyítja a téma folyamatos felélesztése, az egymást erő szkeptikus megnyilvánulások (5, 57). Indokolt tehát megvizsgálunk a biológiai időirány kérdését egy egészen más nézőpontból, a szimmetriaelvekből kiindulva.

Mint tudjuk, a gyenge kölcsönhatások megsértik a természet tükrözésszimmetriáját, a  $\beta^-$  bomláskor keletkező elektronok balos perdületűek. A természet szimmetriája, mely a fizikai törvények megfogalmazása szempontjából elengedhetetlen, helyreáll azzal, hogy a  $\beta^+$  bomláskor keletkező pozitronok jobbos perdületűek (58). A gyenge kölcsönhatás tehát az elektront tekintve, az anyagi világhoz a jobbosságot rendeli. Ha egy fizikai törvényben a koordináták (x, y, z) előjelét megváltoztatjuk (-x, -y, -z) – paritás vagy P transzformáció – és egyben az anyagot antianyaggal helyettesítjük – töltés vagy C transzformáció –, akkor a gyenge kölcsönhatás egyenletei az átalakítás után is helyesen írják le az eseményeket. Ha csak az egyik (P vagy C) transzformációt végezzük el, akkor az átalakított törvény nem tükrözi a valóságot. A gyenge kölcsönhatások tehát külön-külön sem C sem P szimmetriát nem mutatnak, de CP szimmetrikusak. Amikor ezt a kombinált szimmetriát egy külön kísérletben

hosszú életű semleges  $K_L^0$  mezonok bomlásánál akarták bizonyítani, meglepő eredményt kaptak. A  $K_L^0$  mezonok az alábbi bomlási gyakoriságot mutatták (59):

$$\frac{W/K_L^0 \rightarrow e^+ \pi^- \nu /}{W/K_L^0 \rightarrow e^+ \pi^+ \bar{\nu}} = 1.0030 \pm 0.0003$$

Az egytől eltérő arány a CP szimmetria megsértését jelenti.  $K_L^0$  mezonok bomlását leíró törvény tehát CP transzformáció után helytelen képet ad az eseményekről. Mint-hogy azonban a szimmetria megmaradása a fizika egész területén alapvető fontosságú, ezért a CP szimmetriát egy még komplexebb szimmetriává fejlesztették azzal, hogy az időt (T) is számításba vették. Mai felfogásunk szerint minden fizikai törvénynek érvényben kell maradnia, ha a balost jobbosnak (P), az anyagot antianyagnak és az előre folyó időt (+T) visszafelé folyónak (-T) tükrözzük. Ezt a tételt nevezik CPT teoremnak. Világos, hogy ha a CP szimmetria nincs érvényben, a CPT viszont helyes, akkor a T szimmetria önmagában sérül. A T transzformációnak ki kell javítania azt a hibát, amit a CP elkövet, tehát az idő „másként folyik előre mint hátra”. A T sértésnek van egy közvetlen bizonyítéka is. Elméletileg kimutatták, hogy sérülne a T szimmetria, ha a kaonok három  $\pi^0$  bomlásában az alábbi ágarány adódna:

$$\left| \frac{\text{Amp} / K_S^0 \rightarrow 3\pi^0 /}{\text{Amp} / K_L^0 \rightarrow 3\pi^0 /} \right| < 2$$

Nos ez az arány Barmin és mtsainak mérése szerint 1.2-nél kisebb (60). Meg kell jegyeznünk, hogy a „visszafelé folyó idő” kifejezés a mikrofizikai folyamatok megfordíthatóságát jelenti és semmi köze sincs a sokaságokra érvényes termodinamikai időirányhoz, melyet a II. főtétel fejez ki (61). Bár ez a többség véleménye, a dolog nem ilyen egyszerű. Ugyanis általánosan elfogadott, hogy a II. főtétel levezethető a világegyetem tágulásából, amivel viszont a CP sértés is kapcsolatban van (62). Tehát összefüggés sejtethető a CP sértés és a II. főtétel között. Korai volna e tekintetben véleményt alkotni. Mindenesetre az időirány „megfordulásához” az szükséges, hogy az élő szervezetben is működjön és felerősödjön egy olyan pl. szupergyenge kölcsönhatás, ami a CP és így a T sértést is okozza. Semmilyen elvi megfontolás nem szól amellett, hogy a CP sértő szupergyenge kölcsönhatást a  $K_L^0$  ( $K-\bar{K}$ ) rendszerre korlátozzuk. Bizonyosan működnek ezek a kölcsönhatások az atomokban és molekulákban, ha mégoly gyengén is, de nem elhanyagolhatóan. Ha már most az élő szervezetben T szimmetriasértő kölcsönhatások működnek, akkor fennáll a lehetősége annak, hogy egyes folyamatok a megszokott időiránnyal ellentétes irányba menjenek. Természetesen nincsen arról szó, hogy ami megtörtént, a fordított irányba újra maradéktalanul megtörténjen. Az időirány megfordulása alatt a fokozódó komplexitás irányát értjük.

Hipotézisünk ötletszinten mozog és nem rendelkezik a falszifikálhatóság kritériumával. Egy körülményre azonban szeretném felhívni a figyelmet.

A gravitáció a leggyengébb kölcsönhatás; nem tudjuk sérti-e a C, P., ill. a CP és T szimmetriát. E tekintetben az irodalom csak spekulációkat tartalmaz (63). Annyi azonban bizonyos, hogy a gravitáció aszimmetrikus kölcsönhatás. Ugyanis csak tömegvonzás létezik, tömegtaszítás nem. Két tömegpont egymáshoz való közeledése, a gravitációs gyorsulás tehát éppúgy csak egy irányban történhet, mint ahogy egy irányban halad az idő. Tükrözés esetén a gyorsulás iránya megfordulna, a testek távolodnának egymástól. Ezt látjuk a növények és állatok növekedésénél. A tenyésző-



csúcs növekedése követi a gravitációs erővonalakat a helyi térerősséggel ellentétes irányban. Nagyobb gravitációs erők alkalmazásánál élettelen rendszereknél gyorsul az egymáshoz való közeledés, élő rendszereknél viszont – az időtükrözésnek megfelelően – a gravitációs térből való kinövés sebessége fokozódik. Centrifugában  $5-20\text{ g}$ -ig – amíg károsodás nem lép fel – a növények és állatok növekedése jelentősen gyorsul. Pl. a teknőcök centrifugált akváriumokban nagyobbra növekednek (64), vízszintes helyzetben forgatott zab alacsony lesz (65).

Valószínűleg igen nehéz lesz majd eldönteni, hogy hipotézisünknek van-e reális alapja. A kérdés lényege a következő: az elektronok helicitása, melyet a biológiában a királis molekula szerkezet tesz lehetővé, hordoz-e az idő irányával kapcsolatos információt? Azt tudjuk, hogy az elektronok helicitása a gyenge kölcsönhatásokra vonatkozóan információt jelent, hiszen a semleges áramok nem tükrözésszimmetrikusak, tehát felismerik és kvantitatíve megkülönböztetik a tükörképi párt.

Nyilvánvaló, ha van a helicitásban időirányra vonatkozó információ, akkor ez nem vonatkozhat az elektromágneses és gyenge kölcsönhatásokra, csak a szupergyenge, mely a  $K^0$  mezonok bomlását idézi elő. Lehetséges, hogy a helicitásban rejlő, időirányra vonatkozó információ eltűnik a termikus zajban, vagy azokban az eseményekben, amelyeket az erősebb kölcsönhatások idéznek elő? Lehet, de nem szabad megfeledkezni arról, hogy az első élő sejt, sőt az első optikailag tiszta rendszer már nem statisztikus sokaság volt, hanem az evolúció tanúsága szerint fejlődésre képes egység, mely a II. főtétellel ellentétes időirányban változott. Kétségtelen, hogy ehhez szükség van a Naphól áramló energiára, de szükség van valamilyen információra is. Talán nem járunk messze a valóságtól, ha ezt az információt azokban a kölcsönhatásokban keressük, amelyek nem hajlandók néhány szilárdnak vélt megmaradási tételnek eleget tenni.

Feltevésünk a fizikát és biológiát egy fundamentális ponton, a megmaradási tételeknél kapcsolja össze. Érinti azt a kérdést is, vajon a szerves világra vonatkozó egyes fizikai törvények érvényben vannak-e biológiai rendszerekben is? Konceptciónk keretében erre a kérdésre, legalábbis tentatíve nemmel kell válaszolni. A fizikai törvények ugyanis csak CPT invarianciát mutatnak, az élő szervezetbe vonatkozóan viszont C transzformációt nem lehet végrehajtani. Ha pl. kiderülne, hogy az élő szervezetben az elektron-transzport során a mozgásirányba néző spin van kitüntetve, ami a gyenge kölcsönhatásokban az antianyagra jellemző, akkor a gyenge kölcsönhatásra felállított fizikai törvények a biológiai rendszerekben csak akkor maradnak érvényben, ha C transzformációt is végrehajtunk, ez pedig lehetetlen, mert az élők anyagból és nem antianyagból állnak (III. táblázat). Megjegyzendő, hogy amennyiben az elektron a jobbos óriásmolekulákban jobbos helix formájában mozdul el, akkor spinje a mozgásirányba, tehát a fenti módon állna be. Erre nézve azonban nem rendelkezünk semmilyen adattal. Persze az említett fizikai törvények sérülése a biológiában csak igen kis mértékű lehet. Elvileg azonban be kell következnie.

## VII. ÖSSZEFOGLALÁS

Előadásom célja az volt, hogy a megmaradási elvekből kiindulva ismertessem az alapvető fizikai kölcsönhatásokat és rámutassak arra, hogy ezek a kölcsönhatások az élő rendszerekben szerepelnek. Az életre jellemző óriás és kismolekulák helikális potenciálterének hatása van a rendszerben mozgó elektronokra. A helikális pályák mágneses teret indukálnak, melyeken a spin a mozgásirányhoz képest longitudinálisan polarizálódik. Így az élő szervezetben ugyanúgy létrejön a spin és a momentum kö-

Kölcsönhatás típusa			Töltés	Spin	Idő
Gyenge kölsönhatás	antianyag	$\beta$ bomlás	$e^+$	$\longrightarrow^*$	$-t$
	anyag		$e^-$	$\longleftarrow^{**}$	$+t$
Elektro- mágneses kölsönhatás	anyag	biokémiai folyamat	$e^-$	$\longrightarrow?$	$?$
		kémiai folyamat	$e^-$	$\longleftarrow$	$+t$

- \* Longitudinális polarizáció a mozgás-irányban
- \*\* Longitudinális polarizáció a mozgásiránnyal ellentétben

III. táblázat: Töltés spin és „időirány” és CPT teorema szerint, továbbá különböző jelenségekben, mint  $\beta$  bomlás, biológiai és kémiai folyamatok.

zötti csatolás (akár gerjeszteskor, akár alapállapotban), mint a gyenge és szupergyenge kölcsönhatásoknál.

Ezt a  $\beta$ -részekkel való bombázással és pozitron annihilációs kísérletekkel igazoltuk, amivel egyben rámutattunk arra, hogy az optikai tisztaság eredete a paritás-sértő gyenge kölcsönhatásokban keresendő. Ezen túlmenően felvetettük azt a lehetőséget, hogy a gyenge és szupergyenge kölcsönhatások működnek a molekulákban is. Kristályosítási és polimerizációs kísérletek szólnak emellett. Az elektronok biológiai rendszerekben fellépő helicitása valószínűleg nemcsak a gyenge kölcsönhatásra, hanem az időirányra vonatkozóan is hordoz információt. A kérdést a CPT teorema keretében kapcsolatba hoztuk a termodinamika II. főtételeiben kifejezett időiránnyal. Feltételeztük, hogy az élőben esetleg szereplő időszimmetria-sértő kölcsönhatásoknak jelentősége volt az evolúcióban az anyag komplexitás felé való haladásában.

GARAY ANDRÁS  
az MBT elnökségének tagja

## IRODALOM

1. Wigner, P. (1964) Proceedings of the International School of Physics 29, 40
2. Whyte, L. L. (1958) Nature 182, 198
3. Rust, A. (1973) Handwerkliches Können und Lebensweise des Steinzeitmehschen. In: Mannheim forum 73/74. ed. H. Ditfurth. Boehringer Mannheim.
4. Blout, E. R. és Idelson, M. (1956) J. Am. Chem. Soc. 78, 3857 Idelson M. és Blout E. R. (1958) J. Am. Chem. Soc. 79, 749
5. Irodalmat lásd: Ulbricht, T. L. V. (1962) Comparative biochemistry 4, 1
6. Schallenberger, R. S., Acree, T. E. és Lee, G. Y. (1969) Nature 221, 555
7. Karush, F. (1956) J. Am. Chem. Soc. 78. 5519 és 79, 3380
8. Still, J. L., Buell, M. V., Knox, W. E. és Green, D. E. (1949) J. Biol. Chem. 179, 831
9. Molnar, D. M. és Thorne, C. B. (1955) Bacteriol. Proc. 1, 123
10. Warburg, O., Gawehn, K., Geissler, A. W. és Lorenz, S. (1963) Z. Klin. Chemic. 1, 175
11. Pasteur, L. (1860) Researches on the molecular asymmetry of natural organic products. Alembic Club reprint. No. 14. Livingston. Edinburgh an London. Cit. in Valery-Radot, R. (1960) The life of Pasteur. Dover, New York.
12. Dubos, R. (1960) Pasteur and modern science. Doubleday and Co., New York.
13. Lee, T. D., Yang, C. N. (1956) Phys. Rev., 104, 254–258 Wu, C. S., Ambler, E., Hayward, R. W. Hoppes, D. D., Hudson, R. P. (1957) Phys. Rev. 105, 1413–1415
14. D. M. (kezdőbetűk) (1973) Nature 245, 119
15. Zeldovics, I. B. (1957) J. Expl. Theoret. Phys. (USSR) 33, 1488– 33, 1531
16. Zeldovics, I. B. (1958) J. Expl. Theoret. Phys. (USSR) 36, 964
17. Feinberg, G. és Sucher, J. (1968) Phys. Rev. 166, 1638
17. Weinberg, S. (1967) Phys. Rev. Lett. 19, 1264  
Weinberg, S. (1972) Phys. Rev. D5, 1412
18. Vester, F. (1957) Seminar at Yale University. Febr. 7.  
Fester, F., Ulbricht, T. L. V., Rauch, H. (1959) Naturwiss. 46, 68
19. Yamagata, Y. (1966) J. Theoret. Biol., 11, 495–498
20. Garay, A. S. (1968) Nature 219, 338
21. Sagan, C. (1957) Evolution 40, 49
22. Finegold, L. (1958) School Sci. Rev. 140, 19
23. Ernst, J. (1967) Bevezetés a biofizikába, Akad. Kiadó, Bp. p. 428
24. Garay, A. S. és Hrasko, P. (1973) Symposium on generation and amplification of asymmetry in chemical systems (in press) Jülich.
25. Byk, A. (1904) Z. Phys. Chem. 49, 641
26. Buchardt, O. (1974) Angew. Chemie 86, 222
27. Ulbricht, T. L. V. and Vester, F. (1962) Tetrahedron, 18, 629
28. Goldanskii, V. I. és Kharпов, V. V. (1962) J. Expl. Theoret. Phys. (USSR) 43, 823
29. Starodubsek, S. V., Gurskii M. N. és Sizikh, A. G. (1959) Dokl. Akad. Nauk. 129, 907
30. Spialter, L. és Futrell, J. H. (1960) Nature 188, 225
13. Brewster, J. H. (1967) Helix models of optical activity in Allingen-Elieil topics in stereochemistry, 2, 1–72  
Caldwell, D. J., Eyring, H. (1971) The theory of optical activity. John Wiley and Sons Inc. New York, London, Sydney, Toronto.  
Mason, S. F. (1971) The development of theories of optical activity and of their applications. In: Fundamental aspects and recent development in optical rotatory dispersion and circular dichroism. Tirrenia, Pisa.
32. Bernstein, W. J., Lemnon, R. M. és Calvin, M. (1972) An investigation of the possible differential radiolysis of amino acids optical isomers by <sup>14</sup>C betas. In: Molecular Evolution. D. L. Rohlving and A. I. Oparin Editors p. 151. New York, Plenum.

33. Bonner, W. A. és Flores, J. J. (1973) Abstracts of the 4th International Conference on the Origin of Life. Barcelona. Abstract No. 101.  
Bonner, W. A. (1973) Abstract of the Symposium on Generation and Amplification of Asymmetry in Chemical Systems. Jülich p. 9.
34. Bonner, W. A., Kavasmaneck, P. R., Van Dort, M. A., Martin, F. S. és Flores, J. J. (1974) Chemical Evolution of the Giant Planets. College Park Colloquia on Chemical Evolution, October 23–26.
35. Garay, A. S. Keszthelyi, L., Demeter, I. és Hrasko, P. (1973), Chem. Phys. Letters 23, 549
36. Hrasko, P. (1973) KFKI Report 73–40. Hung. Acad. Sci. Bp.
37. Dézsi, I., Horváth, D. és Kajcsos, Zs. (1974) Chem. Phys. Letter 24, 514
38. Chuang, S. Y. és Tao, S. J. (1974) J. Phys. Chem. 78, 1261
39. Lemmon, R. M. és mtsai (1974) Nature 252, 692
40. Zeldovics, R. B. és Perelomov, A. M. (1960) J. Expl. Theoret. Phys. (USSR) 39, 1115
41. Bradley, L. C. és Wall, N. S. (1962) Nuovo Cimento 25, 48
42. Carhart, R. A. (1966) Phys. Rev. 153, 1077
43. Lobasov, V. M. et al. (1967) Phys. Letters, 25B, 104
44. Bouchiat, M. A. és Bouchiat, C. C. (1974) Proceedings of the triangle seminar on weak interactions at low energies. March 28–30. 157–164.
45. Thiemann, W. és Wagener, K. (1970) Angewandte Chemie Int. E. 9, 740–741
46. Thiemann, W., Darge, W. (1974) Origins Life 5, 263
47. Harada, K. (1970) Naturwiss. 6 57, 114
48. Wada, A. (1961) J. Mol. Biol. 3, 507
49. Darge, W. (1972) Thesis RWTH Aachen
50. Thiemann, W. (1974) Naturwiss. 61, 476
51. Garay, A. S. (1971) Life Sci. 10, 1393–1398
52. Gajzágó, E., Marx, Gy. (1974) Proceedings of the triangle seminar on weak interactions at low energies. March 28–30, 177–184
53. Garay, A. S., Demeter, S., Kovács, K., Horváth, G., Faludi-Dániel, Á. (1972) Photochem. Photo-biol. 16, 139–144  
Garay, A. S., Czégé, J., Tolvaj, L., Tóth, M., Szabó, M. (1973) Acta biotheor. 22, 34
54. Rein, D. (1974) Proceedings of the triangle seminar on weak interactions at low energies. March 28–30, 185–194  
Rein, D. W. (1974) J. Mol. Evol. 4, 15
55. Bronowski, J. (1969) Physics and the explanation of Life 13th Meeting of AAAS, Boston, Mass., 40–69, 3–2678 Casette
56. Prigogine, I., Lefever, R., Goldbeter, A., Herschkowitz–Kaufman, M. (1969) Nature, 223, 916
57. Heisenberg, W. (1959) Naturwiss. 46, 661
58. Irodalmat lásd Ulbricht, T. L. V. (1959) Quarterly Rev. 13, 48–60
59. Christenson, J., Cronin, J., Fitch, V., Turlay, R. (1964) Phys. Rev. Letters, 13, 138  
Kabir, P. K. (1968) The CP puzzle Acad. Press. London, New York
60. Barmin, V. V. et al. (1972) In: Vojcicki, S. Meson decay Proc. SVI. Conference on high energy physics 2, 209
61. Stueckelberg, E. G. (1952) Helv. Phys. Acta 25, 577
62. Aharony, A., Ne'eman Y. (1970) Int. J. Theor. Phys. 3, 437–441
63. Leitner, J. és Okubo, S. (1964) Phys. Rev. 136B, 1542
64. Dodge, H. C. és Wunder, C. C. (1963) Nature 197, 922
65. Garay, A. S. (1963) VI. Orsz. Biol. Napok előadásai Gondolat Könyvkiadó Bp. p 27
66. Curtis-Michel, F. (1965) Phys. Rev. 138B, 408