

# fizikai szemle

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT LAPJA

Alapította Eötvös Loránd 1891-ben Mathematikai és Physikai Lapok néven

XXX. évfolyam

12. szám

1980. december

## A NEUTRINÓ-FIZIKA 50 ÉVE (epizódok)

Bruno Pontecorvo  
Dubna

### Bevezetés

Körülbelül két éve Edoardo Amaldi 70. születésnapja alkalmából egy nemzetközi konferencián összefoglaló előadást tartottam a neutrínó-fizikáról, ahol a fizikusoknak csak kis része volt neutrínó-specialista. Így természetesen jóval könnyebb feladatomból volt, mint most, mikor mindenki „profi” neutrínó-szakember. S ráadásul most csak 30 percem van (az Amaldi-konferencián két óra állt a rendelkezésemre). Nem szeretném untatni a t. hallgatóságot a saját munkaterületük ABC-jével. Inkább a neutrínó-fizika fejlődésének néhány epizódjára emlékeztetnék, melyek érdekesek és ugyanakkor fontosak is (Pauli, Fermi), vagy éppen azokra, melyekben én leginkább jártas vagyok. Így az előadásom teljes mértékben szubjektív lesz (ellentétben az Amaldi-ünnepségen tartott előadással), és főként a neutrínó-fizikusok fiatalabb generációjának ajánlom figyelmébe, akik jól ismerik a ma és a tegnapi fejlődését, de talán nem olyan jól tájékozottak a „hőskorszak” eredményeiről. Nem taglalom napjaink problémáit, hiszen erre csaknem egy teljes hét áll rendelkezésünkre. A hallgatóság többsége a  $10^5$ – $10^6$  neutrínó-esemény ismeretében talán hajlamos rá, hogy megfeledkezék arról a tényről, hogy még 16 évvel Pauli neutrínó-hipotézise (1930) után sem tudták a neutrínót detektálni, és csak a felfedezését követően 25 év múltán sikerült szabad állapotban „megfigyelni”. A neutrínó-fizika félig-meddig a gyenge kölcsönhatások fizikájának a szinonimája, de azért vannak különbségek. Ezeket a különbségeket többnyire igyekszem figyelembe venni.

Hogy előadásom mégse legyen annyira szubjektív, a neutrínó-fizika főbb eseményeit egy táblázatba foglaltam. De természetesen ez a táblázat sem teljesen objektív. Azokat az eseményeket tűn-

tettem fel, melyek vagy döntő jelentőségűek vagy egy sor kutatás kiindulópontjaként szolgáltak. Természetesen lehetetlen ezek mindegyikét felsorolni, mégha némelyik jelentősebb is, mint a primer kutatás. Még néhány szót a táblázatról. Először emlékezetből szerkesztettem meg, és sok időbe telt mikor ellenőriznem kellett az adatokat, de végül is 95%-ban az eredeti események maradtak benne, és csak néhányat kellett hozzátoldanom. Elnézésüket kérem az esetleges aránytalanságok és hiányok miatt: a táblázat azt az utat mutatja, melyen a neutrínó-fizika engem végigkísért (vagy fordítva). A táblázat négy részből áll, négy „halványan” körvonalazott periódushoz kapcsolódóan. Az első — a radioaktivitás felfedezésétől a neutrínó-hipotézisig, a béta-bomlás elméletén (Fermi) keresztül a szabad antineutrínó detektálásáig. A második — a béta-bomlástól különböző gyenge folyamatok megfigyelésétől a paritás-sértésen és a V–A univerzális elméleten keresztül a CP sértés megfigyeléséig. A harmadik — a nagyenergiás neutrínó-fizika születésétől és a kétfajta neutrínó felfedezésétől a semleges áram és a  $\tau$  lepton felfedezésén, valamint a „bájós” részecskék gyenge bomlásának megfigyelésén keresztül az egyesített elektromágneses mértékelmélet számos jóslatának kísérleti ellenőrzéséig. A negyedik — neutrínó az asztrofizikában, asztronómiában és a kozmológiában.

Bizonyos okok miatt az irodalomjegyzék összeállítását a negyedik résznél kezdtem. Később a jegyzéket nagymértékben csökkentettem. Így meglehetősen esetleges az összeállítás. Ennek az az oka, hogy nem akartam különböző nemzetközi konferenciák összefoglalóinak tartalomjegyzékét felsorolni, hiszen a szükséges információk ezekben az összefoglalókban úgyis megtalálhatók. A táblázatra pillantva nyomon követhetjük a neutrínó-fizika rendkívül gyors fejlődését, amely határozottan kvantitatív tudománnyá vált, s amely élet-erős és hatékony, de még minden bizonnyal tartogatót meglepetéseket a kutatók számára. A táblázatban kiemeltem néhány érdekes és/vagy nem teljesen közismert eseményhez kapcsolódó évszámot.

A neutrínó feltételezésének 50. évfordulóját 50 gyertyás születésnapi tortával ünnepelték meg a részecskefizikusok a VII. Nemzetközi Neutrínófizikai Műhely alkalmával (Balatonszéplak, 1980. szeptember.) A megnyitó visszamemlékező előadást Bruno Pontecorvo, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat tiszteletbeli tagja tartotta. Előadásának szövegét Postásy Csaba fordításában közöljük.



## A radioaktivitás felfedezésétől a neutrínó-hipotézisen és a béta-bomlás elméletén (Fermi) keresztül a szabad antineutrínó detektálásáig

Év	Esemény	Szerző és/vagy hivatkozás
1896	A radioaktivitás felfedezése	Becquerel
1899	A béta-sugárzás felfedezése	Rutherford
1908	A számlálók (Geiger–Müller és proporcionális) szabad, töltött részecskét detektálnak	Geiger, Rutherford, Müller
1912	Ködkamra	Wilson
1914	A folytonos $\beta$ -spektrum	Chadwick
1925	Magemulzió	Misovsky
1927	A $\beta$ -bomlás során felszabadult hő mérése	Ellis, Wooster
1927	A sugárzás kvantumelmélete	Dirac
1928	A feles spinű részecskék relativisztikus egyenlete	Dirac
1929	A tömeg nélküli fermionok elmélete két komponenssel	Weil
1930	A neutrínó felfedezése	Pauli [1, 2]
1932	A pozitron felfedezése	Anderson
1932	A neutron felfedezése	Chadwick
1932–1933	Az atommag nukleonokból áll	Ivanenko, Heisenberg, Majorana
1933	A béta-bomlás elmélete	Fermi
1934	Mesterséges radioaktivitás	Curie (Joliot)
1934	Pozitron-kibocsátás $\beta$ -bomlásban	Curie (Joliot)
1934	Az inverz $\beta$ -bomlás első taglalása	Bethe, Peierls
1935	A magerők mezon-elmélete	Yukawa
1935	A mag visszalökődése a $\beta$ -bomlás következtében	Leipunsky [3]
1935	A kétszeres béta-bomlás első említése	Göppert–Maier [4]
1936	Messzemenő következményei vannak annak a ténynek, hogy a Fermi-konstans nem dimenziótlan	Heisenberg
1936	Kurie-diagram	Curie, Richards, Paxton
1936	A Gamow–Teller kiválasztási szabályok	Gamow, Teller
1937	A Majorana-neutrínó	Majorana
1937	Pályaelektron befogása a magba	Alvarez
1938	A müon felfedezése	Anderson, Neddermeyer
1939	Diffúziós kamra	Langsdorf
1942	Az első atomreaktor	Fermi és Szilárd
1944	A fázisstabilitás elve. Néhány évvel később a hatékony gyorsítókkal végrehajtott kísérletek korszaka kezdődik	Veksler, Macmillan
1945–1959	Kristály-számlálók és félvezető detektorok	Van Heerdin, McKay, McKenzie, Bronlay
1946	Alacsony energiás neutrínók radiokémiai módszerrel történő detektálásának felvetése	Pontecorvo
1947	Szcintillációs számláló	Kallman
1949	Az elektron-neutrínó tömegének felső határa $^3\text{H}$ bomlásából	[5]
1950	Cserenkov számláló	Jelley
1952	Buborék-kamra	Glaser
1953	A leptonszám megfogalmazása	Marx, Zeldovics, Konopinski, Mahmoud
1953–1956	Szabad antineutrino első megfigyelése atomreaktornál	Reines, Cowan
1956	Nem figyeltek meg $\bar{\nu}_e + ^{37}\text{Cl} \rightarrow ^{37}\text{A} + e^-$ reakciót ( $\nu_e \neq \bar{\nu}_e$ )	Davis



A  $\beta$ -bomlástól különböző gyenge folyamatok megfigyelésétől a paritás-sértésen és a V-A univerzális elméleten keresztül a CP-sértés megfigyeléséig

Év	Esemény	Szerző és/vagy hivatkozás
1941	A müon radioaktivitásának közvetlen bizonyítása és a közepes élettartamának meghatározása ( kozmikus sugárzás)	Rasetti
1947	A müon nem hadron ( kozmikus sugárzás)	Conversi, Pancini, Piccioni
1947	A pion ( $\pi$ ) és a $\pi - \mu$ bomlás felfedezése ( kozmikus sugárzás)	Lattes, Occhialini, Powell
1947—1949	Különböző négyfermion kölcsönhatások és a gyenge folyamatok közti analógia	[8]
1947	A ritka részecskék felfedezése kozmikus sugárzásban	Rochester, Butler, Leprince-Ringuet
1948	A $\mu \rightarrow e\gamma$ folyamat nem megy végbe ( kozmikus sugárzás)	Hincks, Pontecorvo [7], Sard, Althaus
1948	A pion mesterséges előállítása. Ezek után igen pontos mérésekkel meghatározták a pion és a müon tömegét, közepes élettartamukat és a töltött bomlástermék energiáját (ilyen kísérletek még ma is vannak). Hasonló kvantitatív méréseket végeztek a ritka részecskék tulajdonságainak megállapítására is	Gardner, Lattes
1948—1949	A neutron radioaktivitásának felfedezése	Snell, Miller, Robson
1949	A müon-bomlásban három részecske keletkezik, $\mu \rightarrow e + \nu \nu'$ ( kozmikus sugárzás)	Steinberger, Jdanov, Anderson et al.
1950	A Michel-paraméter	Michel
1950	Erősen fókuszált nyaláb a gyorsítóknak	Christophilos et al.
1952	„Csak az a lehetőség maradt, hogy a C és P szimmetria csak megközelítőleg áll fenn, és egyedül a CP szimmetria egzakt”	Wick, Wightman, Wigner [8]
1953—1954	A hadronok izotóp-multiplétei. A ritkaság	Gell-Mann, Nishijima
1953	A semleges kaonok duális tulajdonságai	Gell-Mann, Pais
1954	A Yang-Mills terek	Yang, Mills
1954	A CPT tétel	Luders, Pauli
1955	Az antiproton első megfigyelése	Chamberlain, Segré
1955	A gyenge áram megmaradása	Gerstein, Zeldovics
1955—1956	A $\theta - \tau$ paradoxon (a paritás sérülése ritka részecskék bomlásánál)	Whitehead et al., Barkas et al., Dalitz et al., Harris et al., Fitch et al.
1956	A hosszú élettartamú semleges kaon felfedezése	Landé et al.
1956	Sérül vagy megmarad a paritás a gyenge kölcsönhatásban?	Lee, Yang
1956—1957	A CP invariancia	Landau, Lee, Yang
1957	A C és P szimmetria sérül a $^{60}\text{Co}$ bomlásában	Wu et al.
1957	A C és P szimmetria sérül a $\pi - \mu$ és $\mu - e$ bomlásokban	Garwin, Lederman, Weinrich
1957	A gyenge és elektromágneses kölcsönhatás egyesítésének első említése	Schwinger
1957	Longitudinális neutrínó	Landau, Salam, Lee, Yang
1957	A „béta-részecskék” longitudinális polaritásának megfigyelése	Frauenfelder et al., Alichanov et al., Nikitin et al.
1957	A V-A univerzális gyenge kölcsönhatás	Gell-Mann, Feynman, Marschak, Sudershan
1957	A $\beta$ -bomlásban ( $^{35}\text{A}$ , $^6\text{He}$ ) mért elektron-neutrínó szögkorreláció teljes összhangban van a V-A elmélettel	Herrmansfelt et al.
1958	A $\pi \rightarrow e\nu$ bomlás mért valószínűsége teljes összhangban van a V-A elmélettel	Fazzini et al., Schwartz, Steinberger et al.
1957	Neutrínó-oszcilláció (?)	Pontecorvo
1958	Ionizációs kaloriméter	Grigorov, Murzin et al.
1958	Unitér szimmetria és gyenge kölcsönhatás	Kobzarev, Okun
1958—1963	A Cabibbo-elmélet	Gell-Mann, Levy, Cabibbo
1958	Az erős kölcsönhatás szerepe a gyenge folyamatokban	Goldberger, Treiman
1959	A „Kiev-szimmetria” vagyis „prekvark” lepton-hadron szimmetria	Gamba, Marschak, Okubo
1962	A $\mu^- + ^3\text{He} \rightarrow ^3\text{H} + \bar{\nu}_\mu$ folyamat megfigyelése és vizsgálata	Falomkin et al.
1962	A $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$ folyamat megfigyelése és vizsgálata (hidrogénnel)	Hiddebrand
1962—1963	A $\pi^+ \rightarrow \pi_0 + e^+ + \nu_e$ bomlás valószínűsége összhangban van a CVC-ből számolt értékkel	Depommier et al.
1963	Egy Gell-Mann által javasolt kísérlet ( $^{12}\text{N}$ és $^{12}\text{B}$ bomlása) megerősíti a CVC helyességét	Lee, Mo, Wu
1964	CP sértés ( $K_L^0 \rightarrow 2\pi$ )	Christenson et al.
1964	A szupergyenge kölcsönhatás (?)	Wolfenstein
1967	Töltéstükrözési aszimmetria a $K_L^0$ leptonos bomlásában	Dorfan et al., Bennet et al.



A nagyenergiás neutrínó-fizika születésétől és a kétfajta neutrínó felfedezésétől a semleges áram és a  $\tau$  lepton felfedezésén valamint a „bájós” részecskék gyenge bomlásának a megfigyelésén keresztül az egyesített gyenge-elektromágneses mértékelmélet számos jósolatának kísérleti ellenőrzéséig

Év	Esemény	Szerző és/vagy hivatkozás
1959–1960	Nagyenergiás neutrínók: egy gyakorlati javaslat, amely új utakat nyitott a gyenge kölcsönhatás vizsgálatában	Pontecorvo, Ryndin, Schwartz, Markov
1959	A szikrakamra	Fukuni, Miyamoto
1959–1974	Paritásvértés atomokban és elektron-nukleon kölcsönhatásban (elméleti munka)	Zeldovics, Bouchiat
1961	Az elektroyenge kölcsönhatás egy elmélete	Glashow
1962	$\nu_e \neq \bar{\nu}_\mu$ (szikrakamra-kísérlet)	Brookhaven, Danby et al.
1963	A mágneses „szarv”	Van der Meer
1963	A magemulzió más technikákkal való kombinálása kölcsönhatási pont meghatározására	Dvoretzky et al.
1963	A neutrínó kölcsönhatási pont lokalizálása magemulzió és szikrakamra segítségével	Burhop et al.
1963–1964	Streamer kamra	Chikovani et al., Dolgoshein et al.
1963–1964	Az első neutrínó-kísérlet melyben buborékkamrát használtak	CERN, Block et al.
1964–1967	A gyenge magerők	Abov et al., Lobashev et al.
1964	A tört töltésű kvarkok (u, d, s)	Gell-Man, Zweig
1964	A spontán szimmetriasértés mechanizmusa, mellyel a vektormezon tömeget nyerhet	Higgs
1964	$\nu_\mu \neq \bar{\nu}_\mu$	CERN, Bernardini et al.
1963–1964	A „chärm” elméleti bevezetése	Maki, Nakagawa et al., Bjorken, Glashow, Vladimirsky, Okun
1964	Az egyes kvarkoknak háromféle „színük” lehet	Greenberg
1965	Egész töltésű kvarkok	Bogoljubov, Struminsky, Tavk-helidze, Han, Nambu
1965	Rugalmatlan $\nu$ -N szórás esetén a teljes hatáskeresztmetszet növekszik (rugalmas esetben a nukleon alakfaktora ezt megakadályozza)	Markov
1967–1972	A gyenge és elektromágneses kölcsönhatás egyesített mértékelmélete	Salam, Weinberg
1967	A tömeg nélküli Yang-Mills terek kvantálása	Fadeev, Popov, De Witt
1967	Neutrínó oszcilláció: konkrét kísérletek felvetése	Pontecorvo, Gribov, Bilenky
1968	Proporcionális és drift-kamrák	Charpak et al.
1969	A skálázás	Bjorken
1969	A parton modell	Feynman
1971	A tömeggel rendelkező Yang-Mills terek kvantálása	G't Hooft
1971	A Gargamelle buborékkamra (a neutrínó-kísérletek új generációja)	CERN
1971	A céltárgy-kaloriméter használata neutrínó-kísérletben	Rubbia et al.
1972	Mit mondhat a neutrínó a partonokról?	Feynman, Balatonfüred
1972	A GIM mechanizmus. Be kell vezetnünk egy negyedik kvarkot, hogy a semleges áramot szimmetrikussá tegyük	Glashow, Illiopoulos, Maiani
1972–1980	A teljes $\nu_\mu$ és $\bar{\nu}_\mu$ hatáskeresztmetszet nukleonon lineárisan nő az energiával	CERN, Gargamelle és később más berendezések is
1972–1980	A kvark-parton-modell „jól vizsgálják” töltött áramú $\nu_\mu$ és $\bar{\nu}_\mu$ események vizsgálatánál	CERN, Gargamelle és később más berendezések is
1973–1980	A semleges áram megfigyelése $\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$ folyamatban	CERN, Gargamelle és később más berendezések is
1973	A semleges áram megfigyelése $\nu_\mu + N + \nu_\mu + \dots$ típusú eseményekben	CERN, Gargamelle, Fermilab, HPWF, és később más berendezések is
1973–1974	Protonbomlás?	Pati, Salam, Georgi, Glashow
1974	A $J/\psi$ részecske	Ting et al., Richter et al.
1975	Részletes javaslat a „direkt” neutrínó detektálására, mely lehetővé teszi a „bájós” részecskék tanulmányozását	Pontecorvo
1975	Az első „bájós” barion, melyet neutrínóval keltettek a brookhaveni hidrogéntöltésű buborékkamrában	Cassoli et al.
1975	A $\mu^+\mu^-$ párok keletkezése neutrino- szórásban „bájós” részecskék bomlására utal	Fermilab, HWPF
1975	A $\tau$ lepton első észlelése	SPEAR, Pearl et al.
1976	A $\nu_e$ tömege $< 35$ eV	ITEP, Tretyakov et al. [5]
1976	A $\nu_\mu + Z \rightarrow \mu^- + e^+ + \dots$ és a $\bar{\nu}_\mu + Z \rightarrow \mu^+ + e^- + \dots$ folyamatok a „bájós” részecskék keletkezését és bomlását demonstrálják (H-Ne-vel töltött „nagy” buborékkamra Fermilabban és Gargamelle CERN-ben)	Fermilab, Berkeley-CERN, Hawaii-Wisconsin...
1976	$\bar{\nu}_e$ -e szórás megfigyelése (reaktor-kísérlet)	Reines, Gurr, Sobel
1976	A $\nu_{\mu p}$ és $\bar{\nu}_{\mu p}$ rugalmas szórás megfigyelése és a gyenge semleges hadron-áram paritásvértésének kimutatása	Brookhaven, Harvard-Pennsylvania-Wisconsin, Columbia-Illinois-Rockefeller
1977	A $\bar{\nu}_e$ detektálásának gyakorlati alkalmazása reaktornál	Mikaelyan et al.
1977	Az üpszilon-mezon felfedezése (valószínűleg bb vagyis „bottom-antibottom” alapállapot)	Fermilab, Lederman et al. Columbia-Fermilab-Stony-Brook



Év	Esemény	Szerző és/vagy hivatkozás
1977 1977–1980	A 400 GeV-es proton-nyaláb a nagyenergiás neutrino-kísérletek egy újabb korszakát nyitja meg a CERN-ben A „Beam Dump” kísérletek	CDHS, Beps és később a CHARM Szerpuhov, IHEP–ITEP, CERN, Aachen–Bonn–CERN–London–Oxford–Saclay (Beps)
1978	Az atomokban mért paritásvértés összhangban van a Weinberg-Salam-modellel	CERN, Gargamelle, CERN, CDHS, CHARM Barkow, Zolotarev
1978	Polarizált elektron szórása deutériumon. Az eredmény megfelel a Weinberg-Salam-modelleknek, és a mért $\sin^2\theta_w$ összhangban van a legjobb neutrino-kísérletekből (CDHS, CHARM) kapott értékekkel	SLAC, Prescott et al.
1978	A $\nu_\mu$ tömege $< 0.57$ MeV	SIN, Frosch et al.
1978	A $\tau$ lepton tömege $= 1782^{+2}_-2$ MeV míg a $\nu_\tau$ neutrínó tömege $\leq 250$ MeV	SPEAR, Kirkby et al., Feldman et al.
1979	A neutrínó-szórásban keletkezett müon polaritása megfelel a V–A elvárásnak	CERN, CHARM
1979	A $\bar{\nu}_e + d \rightarrow \bar{\nu}_e + n + p$ és a $\bar{\nu}_e + d \rightarrow e^+ + n + n$ folyamatok megfigyelése és vizsgálata (reaktor-kísérlet)	Irvine csoport, Pasierb et al.
1979	Mikor a $\pi^+$ mezon elbomlik az anyagban ( $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ; $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ ), megfigyelhető a $\nu_e + d \rightarrow e^- + p + p$ reakció, ellentétben a $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ átmenettel, ami a $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \nu_\mu$ bomlás tiltott voltát demonstrálja	
1979	A magemulzióban vagy buborékkamrában megfigyelt, neutrínó-szórással előállított „bájos” részecskék közepes élettartama megfelel az elméleti várakozásnak (néhányszor $10^{-13}$ s)	Los Alamos, Burman et al. CERN, Wa 17, Fermilab, Berkeley–Batavia–Hawaii–Seattle–Wisconsin, Brookhaven Brookhaven–Columbia

## Nagyenergiás neutrínó-nyalábok

Gyorsító	Proton energia (GeV)	Bomlás-hossz (m)	Müon-abszorber (m)	Neutrínó energia (GeV)
ANL	12,4	30	13 (Fe)	0,3–6
CERN	27	70	22 (Fe)	1–12
BNL	29	57	30 (Fe)	1–15
IHEP	70	140	62 (Fe)	2–30
FNAL	300–400	340	1000 (föld és Fe)	10–200
CERN SPS	400	300	400 (Fe)	10–200

## Nagy buborékkamrák

Buborékkamra	Töltőanyag	Hasznos térfogat (m <sup>3</sup> )	Tömeg (tonna)
Gargamelle, CERN	CF <sub>3</sub> Br	5	7–9
12', ANL (USA)	H <sub>2</sub> , D <sub>2</sub>	16	1–2
7', BNL (USA)	H <sub>2</sub> , D <sub>2</sub>	6	0,4
15', FNAL (USA)	H <sub>2</sub>	20	1,3
	H <sub>2</sub> + Ne 20%	20	7
	H <sub>2</sub> + Ne 64%	20	22
SKAT, IHEP (USSR)	CF <sub>3</sub> Br	4,5	7
BEPS	H <sub>2</sub> , D <sub>2</sub> , Ne	20–25	

## Elektronikus neutrínó-detektorok

„Telőhely”	Együttműködés	Hasznos céltárgy-tömeg (tonna)
CERN	Aachen–Padova (AP) CERN–Dortmund–Heidelberg–Saclay (CDHS) CERN–Hamburg–Amsterdam–Róma–Moszkva (CHARM)	20 900 100
Brookhaven	Harvard–Pennsylvania–Wisconsin (HPW)	30
Nemzeti Lab.	Columbia–Illinois–Rockefeller (CIR)	8
IHEP, Szerpuhov	ITEP–IHEP (S.S)	30
FNAL	Harvard–Pennsylvania–Wisconsin–Fermilab (HPWF) California Inst. of Technology, Fermilab (CITF)	20 100

(A legfejlettebb detektorok: CDHS és CHARM)



## Neutrínó az asztrofizikában, asztronómiában és kozmológiában

Év	Esemény	Szerző és/vagy hivatkozás
1939	A Nap és más csillagok neutrínó-sugárzása a termonukleáris reakció következtében	Bethe [9]
1941	Szupernovák és „Urca” folyamatok	Gamov, Schonberg [10]
1946	A neutrínó detektálásának radiokémiai módszere (pl. Cl-A módszer a Nap-neutrínók esetén)	Pontecorvo [11]
1946	A Nagy Bumm elmélet	Gamov [12]
1958	$^8\text{B}$ a viszonylagosan nagy energiájú szoláris neutrínók forrása	Fowler [13]
1959	A forró csillagok neutrínó-sugárzása az univerzális Fermi kölcsönhatás következtében (a $\nu_e + e \rightarrow \nu_e + e$ folyamat)	Pontecorvo [14]
1960	A neutrínó-kísérletek célszerű nagy mélységben a föld vagy víz alatt végrehajtani	Markov [15], Greisen [16]
1961	Fenomenológikus megfontolások a „neutrínótenger” lehetséges létezéséről	Pontecorvo, Smorodinsky [17]
1961	Az univerzumban levő láthatatlan energia felső határa ( kozmológiai megfontolások)	Zeldovics, Smorodinsky [18]
1962	A hipotetikus semleges áramból $\bar{\nu}\bar{\nu}$ párok keletkezhetnek	Pontecorvo [19]
1963	Egy dél-afrikai bányában (8700 m mélységben) elhelyezett detektorral (atmoszférikus) kozmikus neutrínókat mértek (8 év alatt $\sim 100$ esemény)	Irvine, Reines et al.
1964	Neutrínócsillagok?	Markov
1965	Teleszkópokat és mágneses spektrométereket helyeztek el 7500 m mélységben egy indiai aranybányában (atmoszférikus) kozmikus neutrínó detektálására (6 év alatt $\sim 20$ esemény)	India–Japán együttműködés, Krisnashvami et al., Osborne et al. [21]
1965–1966	Neutrínó-reakciók és párkeltés óriáscsillagokban és szupernovákban	Fowler, Hoyle [22] Colgate, Wihte [23]
1965	Detektálható neutrínók ( $E \geq 10$ MeV) kisugárzása kihűlt csillagok kollapszusánál, vagyis a neutronizáció folyamata: $e^- + {}^A_Z \rightarrow \nu_e + {}^{A-1}_{Z-1}A$	Zeldovics [24]
1965	Az összeomló csillagok által kibocsátott neutrínók detektálására tett javaslat	Domogatsky [25], Zatsepin
1965–1967	Az elektromágneses háttérsugárzás felfedezése amely összhangban van a Nagy Bumm elméletével, ugyanakkor hasonló háttér neutrínó-tenger létezését teszi szükségessé	Penzias, Wilson [26], Dicke et al. [27], Zeldovics, Novikov [28], Weinberg [29]
1966	A $\nu_\mu$ neutrínó tömegének felső határa (kozmológikus megfontolások)	Gershtein, Zeldovics [30]
1967–1968	A léptonszám-megmaradással és a neutrínók számával kapcsolatos kérdések tisztázása (neutrínó-oszcilláció) fontos feladat (jövendő szoláris neutrínó-kísérletek)	[31, 32, 33]
1972	A $^{37}\text{Cl}$ - $^{37}\text{A}$ Nap-kísérlet várható eredményei a standard szoláris modellen alapulnak	Bahcall [34]
1975–1977	Ultra-nagyenergiás neutrínók kozmikus forrásai	Beresinsky [35], Zatsepin
1977	A szupernovák kvantitatív elmélete, mely szerint „neutrínó-gyújtás” indítja be a szénben a termonukleáris folyamatokat	Gershtein et al. [36]
1977	300 tonnás szejntillációs teleszkóp (3150 egység) kezdte meg működését 800 méterrel a föld alatt a Baksan völgyben	Chudakov et al. [37]
1977	Ultra-nagyenergiás neutrínók detektálása akusztikus detektorral	Dolgoshein et al. [38]
1977	A csillagok kollapszusánál kibocsátott neutrínók és a nukleoszintézis (a magok proton-többségének a magyarázata)	Domogatsky et al. [40]
1978	Egy több mint 10 éves kísérlet eredménye: a napneutrínók detektálása Cl-A módszerrel	Davis et al. [41]
1978	500 tonnás $\text{H}_2\text{O}$ Cserenkov számláló a csillagkollapszus során keletkező neutrínók detektálására (S. Dakota, Ohio és a Mont Blanc alatt)	Landé et al. [42]
1978	100 tonnás szejntillációs számláló (INR) 600 m mélyen egy artyomovski sóbányában — a kollapszus során keletkező neutrínók detektálására	Zatsepin et al. [43]
1980	Szejntillációs számláló a Mont Blanc alatt a kollapszus során keletkezett neutrínók detektálására (60 db $2\text{ m}^3$ -es egység)	INR –Torino együttműködés
1980	Mélytengeri müon és neutrínó detektor (egy köbkilométeres fényakusztikus $\text{H}_2\text{O}$ detektor)	[44]

## Pauli

Nehéz lenne találni a tudományban Pauli neutrínó-felfedezéséhez hasonló esetet, ahol az a szó hogy „intuición” jobban jellemezné a tudós teljesítményét. Először is azért, mert 50 évvel ezelőtt mindössze két „elemi” részecskét, az elektront és a protont ismertek, és a nagy ötlet, hogy a jelenségek megértéséhez egy harmadik részecskét is be

kell vezetni — forradalmi gondolat volt. Mennyire más a helyzet manapság, mikor a legcsekélyebb „szükség” esetén sok fizikus „akárhány” részecskét kész bevezetni. Másodszor is azért, mert a neutrínó meglehetősen egzotikus tulajdonságokkal rendelkezik, különösen az óriási áthatolóképessége figyelemreméltó. Igaz, Pauli kezdetben nem ismer-te fel elméletének ezt az elkerülhetetlen velejáróját, s szerényen a  $\gamma$  sugár áthatolóképességét vagy



annak tízszeresét tételezte fel a neutrínóra. Mellesleg dimenzionális termodinamikai érvelést felhasználva Bethe és Peierles [45] megmutatta, hogy egy  $\sim 1$  MeV-es neutrínónak ( $\lambda$  hullámhosszal) asztronómiai méretekben is nagy a közepes szabad úthossza, például vízzel számolva, a Föld-Nap távolság milliárdszorosára tehető. A következő két folyamattal számoltak:  $Z \rightarrow (Z + 1) + e^- + \bar{\nu}_e$  (vagyis  $\beta$ -bomlás  $T$  karakterisztikus idővel) és az inverz reakció:  $\bar{\nu}_e + (Z + 1) \rightarrow Z + e^+$ , melynek adott energián  $\sigma$  a jellemző hatáskeresztmetszete:

$$\sigma \leq \lambda^2 \frac{1}{T} \frac{\lambda}{c}.$$

Az érvelés, amely ma már magától értetődő (általában minden helyes okfejtés a „későbbiekben” nyilvánvalóvá válik), igen nagy hatást gyakorolt rám. Sok évvel később is emlékeztem rá, mikor szabad neutrínós kísérleteket javasoltam reaktorforrás segítségével [11]. *Harmadsorban* pedig azért, mert a neutrínót nem lehetett észlelni szabad állapotban, éppen a fantasztikus áthatolóképesége miatt, és a létezését csak az energia-impulzus-megmaradásból lehetett kikövetkeztetni, megmérve a mag visszalökődését is a  $\beta$ -bomlás során, vagyis egy olyan módszerrel, melyet ma már rendszeresen használnak a semleges részecskék tanulmányozására (a „hiányzó energia” módszere). Pauli javasolta először az ilyen típusú kísérleteket, és Leipnskiék valósították meg elsőként Cambridge-ben. Itt szeretném megjegyezni, hogy 50 éve csak egyetlen folyamatot ismertek, amelyben a neutrínó is részt vett, s ez a nehéz magok  $\beta$ -bomlása volt. Ellis és mások kísérletekkel kimutatták, hogy a béta-sugárzás átlagos energiája (kalóri méterrel mérve) egyenlő a béta-spektrum átlagos energiájával (mágneses spektrométerrel mérve). Ez a tény ismert volt Pauli számára, mint ahogy az is, hogy a  $\beta$ -sugaraknak van egy maximális energiájuk. Minden más folyamat amelyben neutrínó is közreműködhet, ismeretlen volt abban az időben. Ezek közül néhány kétrészecske-bomlás (folyamat) gyönyörű jeleket hagy a nyomdetektorban (pl.  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ;  $\mu^- + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{H} + \nu_\mu \dots$ ) s ma már mindenki által igen jól ismertek. Ha korábban is „láttak” volna ilyen folyamatokat, akkor nem lett volna szükség Pauli géniuszára a neutrínó felfedezéséhez. Meg szeretném itt említeni, hogy abban az időben Bohr foglalkozott a gondolattal, hogy a folytonos  $\beta$ -spektrum az energia-impulzus-megmaradás sérüléséből származhat egyes folyamatoknál. Mindenesetre ebből is kiténik, hogy nem volt magától értetődő, hogy a hiányzó energiát csak egy harmadik részecske viheti el.

Még néhány szó Pauli felfedezéséről. Könnyen lehet, hogy nem mindenki tudja Önök közül, hogy az első gondolat a neutrínó létezéséről egy levélben tünt fel [1], melyet radioaktivitással foglalkozó szakemberek egy Tübingenben összegyűlt csoportjához intézett Pauli. A levél így kezdődött: „Kedves radioaktív hölgyeim és uraim ...”. A talál-

kozón Pauli nem jelent meg, mert egy bálra volt hivatalos Zürichben (1930. december 6.). De a levélben nemcsak tréfálkozott. Két olyan gondolatot tett közzé, melyek csak egy ilyen rendkívüli intuícióval megáldott ember agyában szülelhetnek meg. Ezek a gondolatok, mai és eredeti terminológiában a következők:

1. Az atommagban léteznie kell elektromágnesesen semleges részecskének, neutronoknak (Pauli szintén neutronnak hívta őket), melyek  $1/2$  a spinjük.
2. A  $\beta$ -bomlás során az elektron mellett keletkeznie kell egy semleges részecskének, neutrínónak (Pauli levelében: neutron), mégpedig úgy, hogy az elektron, a neutrínó és a visszalökött mag energiájának összege egy diszkrét érték.

Így Pauli egyszerre két részecskét fedezett fel, melyek mindegyikére szükség volt (emlékezzünk csak egyebek között az ún. nitrogén katasztrófára: Rasetti klasszikus spektroszkópiai vizsgálattal megmutatta, hogy a  ${}^{14}\text{N}$  mag a Bose-statisztikának engedelmeskedik, noha csak párosszámú protonból és elektronból építhető fel). Pauli egy darabig azt hitte, hogy csak egy részecskét fedezett fel, mert tévesen identifikálta őket. Hamarosan azonban megértette hol hibázott, s a neutrínóról szóló első hivatalos publikációiban [2] korrigálta tévedését (1933, Solvay Kongresszus).

A következő hatalmas lépést Fermi tette meg.

### Fermi

Fermi először 1931-ben ismerkedett meg Pauli hipotézisével egy nemzetközi magfizikai konferencián, ahol a béta-bomlás problematikáját vitatták meg. Bohr az energia-megmaradás sérülése mellett állt ki. Fermire viszont nagy hatással volt Pauli részecskéje, melyet ő kezdett először „neutrínónak” hívni. Az 1933-as Solvay Konferencián először beszélt Pauli elméletéről [2], s elképzelése a sajtóban is megjelent. Fermi akkor már hosszú ideje foglalkoztatta az új részecske, két hónappal a Solvay Konferencia után megjelent híres cikke: „A  $\beta$ -bomlás lehetséges elmélete” [46]. Ez a kvantitatív elmélet igen nagy hatással volt a fizika fejlődésére. Kétségtelen, hogy Fermi munkája nélkül a neutrínó létezésének gondolata nehezebben férközött volna be a fizikus-köztudatba. Bámulatos, hogy ez az elmélet mind a mai napig csaknem változatlanul fennmaradt a sok apró, bár fontos módosítások ellenére is. Biztos vagyok benne, ha Fermi tovább élt volna, az első között javasolta volna ezeket a módosításokat — a kísérleti tények kényszerítő súlya alatt, melyekről a későbbiekben még szó lesz.

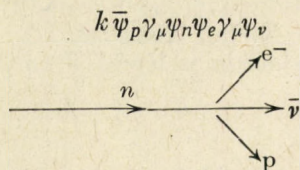
Most szeretnék elmondani néhány érdekességet Fermi elméletével kapcsolatban, melyeket római tartózkodásom során személyesen tapasztaltam.

1. A „Nature” c. folyóirat visszautasította Fermi cikkét, mondván, hogy ez túl absztrakt,



s nem érdeklí az olvasókat. A szerkesztő minden bizonnyal sokáig nem bocsátotta meg magának ezt a nagy baklövést.

2. A másik érdekesség az elméletben foglaltatott. Nem matematikai, inkább fizikai problémát jelentett az elmélet „megemésztése”. A második kvantálás alkalmazása „könnyű falat” volt annak a fizikai képnek az elfogadásához képest, melyben az elektron és a neutrínó a neutron protonba való átalakulása során keletkezik. Természetesen ezt ma már minden egyetemista tudja: a részecskék kölcsönhatása részecskék kicserélődésével magyarázható. Ezeket a folyamatokat leíró kvantumtérelmélet szükségszerű következménye a kvantummechanikának és a relativitáselméletnek. Részecskék keletkeznek és elnyelődnek. Ez még Fermi számára sem volt magától értetődő. Pauli sem fogalmazta meg tisztán ezt a pontot, és Fermi az eredeti cikkében Dirac elektromágneses kvantumtérelméletét hozta fel analógiának (foton keletkezik és elnyelődik). A foton segítségével közvetített „távolbaható” elektromágneses kölcsönhatástól ( $e\bar{\psi}_p\gamma_\mu A_\mu\psi_p$ ) eltérően Fermi a gyenge kölcsönhatásra azt feltételezte, hogy a két áramnak, a nehéz részecskék ( $n, p$ ) és a könnyű részecskék ( $e, \nu$ ) áramának közvetlen csatolódásával állunk szemben:



Itt egy  $10^{-49}$  erg  $\text{cm}^3$  nagyságrendű állandó. (Ma már tudjuk, hogy  $k = G/\sqrt{2}$ , ahol  $G = 10^{-5}/M_p^2$  a Fermi-állandó,  $\hbar = c = 1$ ),  $\bar{\psi}_p, \psi_n$  a proton és a neutron operátorai, stb. Fermi feltételezte, hogy a gyenge áramok Lorentz-négyesvektorok, ugyanúgy-mint az elektrodinamikában. Kezdetben Fermi úgy gondolta, hogy a nukleonok gyenge árama ( $\bar{\psi}_p\gamma_\mu\psi_n$ ) az elektromágneses áram, míg a leptonos gyenge áram ( $\bar{\psi}_e\gamma_\mu\psi_\nu$ ) az elektromágneses potenciál analogonja, noha a formulákból kitűnt, hogy hasonló szerepet játszanak a kölcsönhatásban.

Végül is tehát Fermi egy pontosan megfogalmazott elméletet alkotott néhány kísérleti eredményből (nehéz magok béta-bomlása) és Dirac sugárzási kvantumelméletének analógiájából.

#### Fermi után . . .

Az 1930-as évek óta tudásunk, ismereteink óriási mértékben megnövekedtek, de még ezzel együtt is (és ezt szeretném külön kihangsúlyozni) az új tapasztalatok nagy többsége igen-igen jól beleillett a Fermi-képbe. Az új dolgokat a táblázatokban már felsoroltam (főleg II. és III.), de most mégis kitérnék egyikre-másikra — valamivel részletesebben.

1. A neutrínó nemcsak a  $\beta$ -bomlásban szerepelhet, hanem számos más folyamatban is, s nemcsak keletkezik, hanem elnyelődhet is. Példák: a ritka, nem-ritka részecskék és a „bájos” részecskék bomlása, ezeknek a folyamatoknak az inverze (nagyenergiás neutrínó-nyaláb segítségével), töltött leptonok ( $\mu$  és  $\tau$ ) bomlása, mélyen rugalmatlan neutrínók nukleonon való szóródása és rugalmas neutrínó-elektron, neutrínó-nukleon szórás.

2. A fenti tényeknek már egy kis része is sejtette, hogy a  $\beta$ -bomlás csak egy speciális folyamat a négyfermionos kölcsönhatások egy bizonyos csoportjában, melyeknek azonos az erősségük (pontosabban „gyengeségük”). Így született a gyenge kölcsönhatás fogalma.

3. Minimum három típusú lepton létezik ( $e, \mu, \tau$ ) és a hozzájuk tartozó neutrínók ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ), melyek közül kettőt már megfigyeltek szabad állapotban az általuk keltett reakciók által (reaktor [47], Nap [41] és gyorsítóval [48] előállított neutrínókkal).

4. A gyenge folyamatokban sem a paritás ( $P$ ), sem a töltéstükrözés ( $C$ ) nem marad meg, bár a  $PC$  tükrözésre (szimultán koordináta és töltés váltás) a természet (csaknem) invariáns. A paritássértésről számot adhatunk, ha a neutrínókat két komponensű spinorokkal írjuk le (Landaу, Lee és Yang, Salam és Sakurai), s így az elméletünk automatikusan sérti a tértükrözés szimmetriáját. A neutrínónak (az elmélet szerint) csak egyféle csavarodása lehet, s mint Goldhaber kísérletileg megmutatta: „balkezes”. Az antineutrínók „jobbkezesek”. Tehát a neutrínónál csak két állapot lehetséges, ellentétben más fermionokkal, ahol létezik jobbkezes és balkezes részecske, továbbá jobbkezes és balkezes antirészecske. Balkezes neutrínónak az a jelentősége, hogy megadja a gyenge kölcsönhatásban résztvevő fermionok viselkedésének prototípusát. Egy egyszerű memória-szabály: a gyenge kölcsönhatásban minden fermion balkezes és minden antifermion jobbkezes. Lényegében ez testesül meg Feynman, Gell-Mann, Marschak és Sudarshan gyenge kölcsönhatást leíró híres  $V-A$  univerzális elméletében. Mint láttuk, a gyenge kölcsönhatást, az elektrodinamikához hasonlóan, a részecskék hullámfüggvényéből felépülő vektor-operátorok határozzák meg. De ebben az esetben kétfajta vektorunk van:  $V$ , az eredeti Fermi-féle, melynek a tértükrözési tulajdonsága megegyezik egy polárvektoréval (vagyis előjelet vált a térkoordináták inverziójára) és  $A$ , az axiálvektor, amely nem vált előjelet. Lényegében a  $V$  és  $A$  típusú vektor-operátorok együttes „részvétele” a kölcsönhatásban okozza a paritássértést. Így a Fermi-féle gyenge áram, amely eredetileg vektor volt, valójában egy vektor és egy axiálvektor összegéből tevődik össze (ez utóbbit a  $\gamma_\mu\gamma_5$  mátrix segítségével képezzük, ahol  $\gamma_5 = i\gamma_0\gamma_1\gamma_2\gamma_3$ ). Most szeretnék visszatérni Fermire egy feltételes mód erejéig. Vajon hogyan alakult



volna a fizika fejlődése, ha a sors egy kicsit hosszabb életet ad neki? Valószínűnek tartom, hogy ebben az esetben ő fedezte volna fel a kétkomponensű neutrínót. De abban már egyenesen biztos vagyok, hogy a kétkomponensű neutrínó — általa vagy más által történt — felfedezése után, ő alkotta volna meg a  $V-A$  univerzális elméletet.

5. A hadronok keverednek, vagyis a gyenge kölcsönhatásban a hadronoknak egy koherens „keveréke” vesz részt. Kvark-képet használva, a töltött hadron-áram a következőképpen fest:

$$\bar{u}(d \cos \theta + s \sin \theta) + \bar{c}(-d \sin \theta + s \cos \theta) + \dots$$

ahol  $\theta$  a Cabibbo szög ( $\sim 15^\circ$ ),  $\bar{u}$  az  $u$  kvark keltő operátora,  $d$  a  $d$  kvark eltüntető operátora stb. A gyenge kölcsönhatás Lagrange-függvénye tehát így fest:

$$L_w = \frac{G}{\sqrt{2}} J_w J_w^+$$

ahol

$$J_w = \bar{e} \nu_e + \bar{\mu} \nu_\mu + \bar{u}(d \cos \theta + s \sin \theta) + \bar{c}(-d \sin \theta + s \cos \theta) \dots$$

$$J_w^+ = \bar{\nu}_e e + \bar{\nu}_\mu \mu + (\bar{d} \cos \theta + \bar{s} \sin \theta) u + (-\bar{d} \sin \theta + \bar{s} \cos \theta) c \dots$$

és minden tagot egy  $V$  és  $A$  vektor összegeként kell érteni, vagyis például:  $\bar{e} \gamma_\mu (1 + \gamma_5) \nu_e$  stb. Tehát még egyszer: ez a formula Fermi Lagrange-függvényének a természetes általánosítása, amely figyelembe veszi a későbbiekben felmerült kísérleti tényeket. Ez csodálatosan számot ad minden töltött árammal kapcsolatos gyenge folyamatról, melyeknek első példája a  $\beta$ -bomlás a la Fermi volt. Mellesleg elég valószínű, hogy nemcsak a hadronok, de a leptonok is keverednek, de mint ígértem, nem bocsátkozom részletekbe olyan dolgokkal kapcsolatban, melyeket a konferencián úgyszólván alaposan megvitattunk.

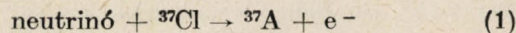
6. Most egy igen lényeges témára szeretnék rátérni, nevezetesen a semleges áramra, melyet a CERN-ben fedeztek fel, s a Fermilabban erősítették meg a kísérleti tényeket. Meg kell mondanom, hogy a semleges áram létezésének lehetősége már jóval Glashow, Salam, Weinberg elektrogyenge egyesített elméletének megszületése előtt felmerült, s alapos diszkussziók tárgya volt. Mint tudják, az elmélet jóslatán felbuzdulva, sikerült kísérletileg is kimutatni. Nem megyek a részletekbe, először is mert sokkal izgalmasabb, ha elolvassák az elmélet „atyáinak” Nobel-díjas értekezését, más részt mert a hét folyamán valószínűleg elég sűrűn találkozunk még ezzel a témával. Mellesleg megemlítem még, hogy a semleges áram felfedezése mellett, nagy jelentősége van a CDHS együttműködés csodálatos munkájának a semleges áram tulajdonságainak vizsgálatában. Még egyszer mondom, hogy korábban fenomenológikusan igen sokan foglalkoztak a semleges árammal (szimmetrikus  $\bar{e}e$ ,  $\bar{\nu}\nu$ ,  $\bar{p}p$  típusú tagokat

vettek be a kölcsönhatásba). Még én is írtam egy cikket [19] 1962-ben a semleges áram asztrofizikai következményeiről. Az effajta kölcsönhatást az ember igen könnyű szívvel feltételezhetette, hiszen a hasonló típusú elektromágneses kölcsönhatás úgy is erősen elnyomta az effektusokat. Végül is tehát csak a Glashow, Salam, Weinberg elmélet feltűnése után találtak kísérleti evidenciát semleges áram létezésére.

#### $A^{37}\text{Cl} - ^{37}\text{A}$ módszer

Most engedjék meg, hogy egy szubjektív összefoglaló keretében néhány szóban kitérjek a neutrínó-fizika olyan területeire, melyeken valamilyen formában én is tevékenyen részt vettem.

1946-ban a neutrínót még detektálatlan részecskének tekintették. Igen sok komoly fizikus vállalta azt a nézetet, hogy a szabad neutrínó detektálása egész egyszerűen abszurdum. Én jól emlékeztem Bethe és Peierls érvelésére [45], és úgy gondoltam, hogy a nagyteljesítményű atomreaktorok megjelenése a szabad neutrínó detektálását elérhető közelségbe hozhatja. Akkor Kanadában élttem, és igen jártas voltam a reaktorfizikában. Az NRX kanadai reaktor, melynek tervezésében magam is részt vettem, még nem működött, de világos volt számomra, hogy egy jó vastag pajzs mögött, ahol a kozmikus sugarak már jelentősen legyengültek, elő lehet állítani egy  $10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  intenzitású neutrínó-fluxust. Akkor a szcintillátort, melyet sok évvel később oly sikeresen alkalmazott Cowan és Reines szabad reaktor-antineutrínó detektálásához — még nem fedezték fel. Nos, én úgy gondoltam, hogy a probléma megoldható radiokémiai módszerrel, vagyis egy nagyobb tömegű anyag neutrínóval történt besugárzása után kémiai úton kimutatva azt az izotópot, amely az inverz béta-bomlás során keletkezett. A mesterséges izotópok Seaborg-táblázatának gondos tanulmányozása során több célmag szóba jött, de a legjobbnak a klór izotópja ígérkezett, amely a következő reakciót eredményezi:



ahol a  $^{37}\text{A}$  egy K-héjú elektron befogása után 2,8 keV-es röntgen-sugár kibocsátásával bomlik el. Itt „neutrínót” és nem „antineutrínót” írtam, mert akkor még nem volt ismert a különbség köztük, de erre még később visszatérek. Egy sor, ma már ismert, gyakorlati előnye van  $^{37}\text{Cl}$  használatának, de ezeket nem szeretném felsorolni. Egyet azért kiemelnék, amely nem volt számomra természetes, s csak véletlenül derült rá fény. A Chalk Riverben tervezett neutrínó-detektoros kísérlet előkészítése során hagyományos módon előállított  $^{37}\text{A}$ -t helyeztünk el egy detektorban. Arra lettünk figyelmesek, hogy az  $^{37}\text{A}$ -tól azonos amplitúdójú jeleket látunk, de jóval a Geiger-Müller feszültségküszöb alatt. Így fedeztük fel (Curran et al.-tól függetlenül) a nagy gázerősítésű ( $10^6$ -ig terjedő) proporcionális tartományt. Ez természetesen igen



fontos volt a neutrínó detektálása szempontjából, mert csökkenteni lehetett az effektív háttérrel. Akkortájt egy dogma terjedt el a proporcionális számlálóról, hogy nem képesek 100-nál nagyobb multiplikációs faktorral dolgozni. Ez természetesen igaz akkor, ha nagy az input-ionizáció (alfa-részecske stb.), de egyszerűen abszurdum, ha csak néhány ionpár keletkezik az elsődleges ionizáció során.

A  $^{37}\text{Cl}$ - $^{37}\text{A}$  módszert megvitattam Fermivel Chicagóban (1947?), és később az 1949-es basel-comoi konferencián. Fermi nem lelkesítette túlságosan a neutrínó-detektáló módszerünk, de nagyon tetszett neki a proporcionális számlálónk, mely segítségével először sikerült megfigyelni L-héjú elektron befogását ( $^{37}\text{A}$ -vel, 10 ionpár) [51], és mérni tudtuk a  $^3\text{H}$  béta-spektrumát, ezáltal egyre lejjebb és lejjebb haladtunk a neutrínó tömegével [5]. Utólag visszagondolva, már megérttem Fermi reakcióját. Úgy hiszem, Segré mondta: „Don Quihote nem Fermi hőse”. Ő nem szerette az olyan kísérleteket, melyeket ugyan véghezvittek hatalmas erőfeszítések árán (R. Davis), de csak sok-sok évvel a megfogalmazásuk után [41, 52]. Most visszatérek arra a kérdésre, hogy vajon a reaktor antineutrínói részt vehetnek-e az (1) folyamatban. Nos, hát úgy 1947–48 táján Zürichben átutazva egy nap Preswerkkel és Paulival ebédeltünk. Elmondtam Paulinak terveimet a  $^{37}\text{Cl}$ - $^{37}\text{A}$  módszerrel kapcsolatban, s neki nagyon tetszett az ötlet, de megjegyezte, hogy nem biztos benne, hogy a „reaktor-neutrínók” is produkálhatják az (1) reakciót, de azért valószínűnek tartotta. A kérdés attól fogva világos volt előttem. 1950-ig foglalkoztam a dologgal, s terveztem ezentúl az alacsony háttérű proporcionális számláló tesztelését is, s alkalmazását szoláris problémáknál. Például emlékszem, hogy Camerini, aki abban az időben Bristolban dolgozott és nagy szakértője volt a kozmikus sugárzásnak, segített kiszámítani a kozmikus sugárzástól származó háttérrel a különböző tervezett  $\text{Cl}-\text{A}$  kísérleteimhez. A számlálóm effektív háttéré elég alacsony volt ahhoz, hogy nap-neutrínókat detektálhassak [11] az  $^{37}\text{A}$  bomlásán keresztül. De 1950-től nem foglalkoztam a témával, mert a Szovjetunióban nem volt kellő mélységben föld alatti hely (pl. bánya), amely szükséges a szoláris kísérletekhez. Ezután a számlálóval kezdtem behatóbban foglalkozni, s amikor az 1968-as első Neutrínó Konferencián (Moszkva) találkoztam R. Davissal, említettem neki, hogy a számláló produkálta jeleknek az alakját is mérve, az effektív háttér jelentősen lecsökkenthető. Mint később az 1972-es magyarországi Neutrínó Konferencián hallottam tőle, csakis ezzel a módszerrel dolgozott. De most menjünk vissza 15 évet.

### Neutrínó-oszcilláció

Ma már mindannyian tudjuk, amit R. Davis 1955-ben megmutatott [52], hogy a reaktorból jövő (anti)neutrínók nem képesek  $^{37}\text{Cl}$ -ből  $^{37}\text{A}$ -t produkálni, vagyis  $\nu_e \neq \bar{\nu}_e$ . Ennek ellenére a fülemben

jutott egy téves információ. Egy Moszkvába látogató delegáció egyik tagja (nem emlékszem a nevére) arról tájékoztatót, hogy R. Davis kísérletében pozitív eredményt kapott. Ez a hír abban az időben fantasztikus volt. De a téves hírek sokszor hasznosak is lehetnek. Megpróbáltam magyarázni az effektust, és felfedeztem [53] a neutrínó oszcillációt  $\nu_e \leftrightarrow \bar{\nu}_e$  típusát. Természetesen ez mind hibás volt, s nemcsak azért, mert az a kísérleti tény, amely a gondolatsort elindította, egyszerűen nem létezett, hanem, mint később rájöttem, a  $\nu_e$  és  $\bar{\nu}_e$  különböző csavarodása miatt is. Mindazonáltal ez a hibás gondolatmenet nekem igen jól jött 10 évvel később, mikor a neutrínó oszcilláció lehetőségét modern elméleti úton tanulmányozták, s vizsgálatára több kísérletet terveztek (reaktor-, gyorsító-, kozmikus és nap-neutrínók) [31, 33]. Manapság mind a neutrínó-oszcilláció, mind a neutrínók esetleges tömege igen divatos elméleti és kísérleti téma, hisz elég csak ennek a konferenciának vagy az idejének „Rochester” Konferenciájának a programjára pillantani. Így a hét során mindkét kérdést alaposan megvitattuk.

### Nagyenergiájú neutrínó-fizika

Engedelmelemmel ismét személyes dolgokról beszélnék. Elmondom önöknek, hogy jutottam el a gondolatig, hogy nagyenergiás neutrínó-kísérleteket javasoljak, nagyenergiás gyorsítók és „mezon-gyárak” segítségével előállított neutrínók felhasználásával. 1958-ban a JINR intézet relativisztikus proton-ciklotron tervezett, 800 MeV-es nyaláb-energiával, és 500  $\mu\text{A}$  intenzitással, de a gyorsítót végül is anyagi nehézségek miatt nem építették meg. Ma úgy gondolom, hogy ez hiba volt, hiszen a gyorsítónak olyan paraméterei lettek volna, mint a mai „mezon-gyáraknak”. Mindenesetre én már 1959 elejétől gondolkodni kezdtem az ilyen gyorsítókkal megvalósítható kutatási programon. Úgy gondoltam, hogy egy egészséges és viszonylag olcsó neutrínó programot lehetne végrehajtani, ha a proton-nyalábot egy nagy vastömbbe lőnénk, amely így egyszerű neutrínó-forrásként, ugyanakkor hadron-abszorberként szolgálna. Elmondhatom, hogy a LAMPF nemrégiben javasolt gyorsító neutrínó-kísérletei igen sok tekintetben hasonlóak azokhoz a kísérletekhez, melyeket 20 éve terveztünk (54, 55) — egy meg sem épült gyorsítóra. Az egyikről, melyek a  $\nu_e = \nu_\mu$ ? kérdést akartuk tisztázni, mondanék néhány szót. Tekintsünk vissza a múltba, az 1947–50-es évekre. Akkortájt sokan vizsgálták a kozmikus müonok bomlását (J. Steinberger, E. Hincks ... és én is). A vizsgálat eredményeként megállapítható volt, hogy a bomló müon három részecskét bocsát ki: egy elektront (fékezési sugárzással mutattuk ki) és két semleges részecskét, melyeket csaknem mindenki másképp hívott: két neutrínó, neutrínó és neutrettó,  $\nu$  és  $\nu'$  stb. Ezt csak azért említem, hogy rámutassak: azokban az időkben állandóan terítéken volt a különböző típusú neutrínók kérdése. Igaz, később sok elméleti fizikus



megfeledezett erről, s néhányan újra felfedezték, hogy kétféle neutrínó létezik (pl. M. Markov). Nem volt triviális, hogyan lehetne kísérletileg dönteni, s ezt egy cikkben sikerült elég világosan megfogalmaznom (54) (a neutrínó-nyaláb használata).

1959-ben egy másik probléma talán még jobban foglalkoztatta a fizikusokat. Nagy kérdés volt: a négyfermion kölcsönhatás vajon egy közvetítő vektorbozonon keresztül, vagy közvetlenül, kontakt módon megy végbe? Tulajdonképpen ez a kérdés még ma is élő, bár most már van egy Glashow—Salam—Weinberg-elméletünk, amely 100 GeV körüli vektorbozonokat jósol (1959-ben — ad-hoc módon — csak néhány GeV tömegű vektorbozonokat fontolgattak). „Mezongyárrakkal” nyilván nem lehet előállítani a közbenső vektorbozonokat, így az 1959-es Kievi Nemzetközi Konferencián Ryndin és én nagyenergiás neutrínó-nyaláb használatát javasoltuk a vektorbozonok kutatására [56]. Az elméleti motiváció az volt, hogy kellően nagy energián a hatáskeresztmetszet  $G$ -vel lesz arányos  $G^2$  helyett, s így ésszerű eseményszámot várhatnánk. Mint tudjuk, ez a kérdés 1972-ig nyitott volt, de ma már úgy tűnik, hogy a neutrínó mégsem alkalmas erre a célra.

A kétféle neutrínó problematikáját egy igen szép kísérletben oldották meg — Brookhavenben (48).

#### „Beam Dump” kísérletek

A Szerpuhovban és a CERN-ben végrehajtott „Beam Dump” kísérletekben a proton-mag ütközésben keletkezett „bájós” részecskéket vizsgálták (elsőként) a leptonos bomlás során kiszabadult direkt neutrínok detektálásával. Ezeket a csodálatos kísérleteket csak akkor értékelhetjük igazán, ha két „történelmi” analógiával élünk. Képzeld csak el, ha Rutherfordnak a béta-bomlás felfedezésénél az elektron helyett a neutrínót kellett volna detektálnia. Vagy Lattes, Occhialini és Powell a pion bomlást egy proton-nyalábbal, egy hatalmas vas céltárggyal és egy több tonnás neutrínó-detektorral mutathatták volna csak ki ahelyett, hogy a müont detektálták volna (mint ahogy ezt is tették).

#### Konklúzió

Ami a neutrínó-fizikában az utóbbi években történt, az valóságos csoda. Úgy tűnik, hogy minden O. K., vagyis a teljes elektrogyenge kölcsönhatást leíró Glashow—Salam—Weinberg-elmélet korrekt. Ez túlságosan is szép. Persze evéssel jön meg az étvágy, s most már a Nagyszabású Egyesítés elméleteivel kísérletezünk. De azért nem félek attól, hogy a részecskefizika a problémák hiányában egyszerűen kihal. Hadd ne beszéljek most az új, váratlan eredményekről, hiszen végül is az előadásom címe: „A neutrínó-fizika 50 éve”. Például a neutrínó-tömeg már valószínűleg mindenkinek a „könyökén jön ki”. A velejáró neutrínó-oszcilláció különféle kísérleti vizsgálata (reaktor, gyorsító, kozmikus, szoláris) igen informatív lenne (a neutrínók száma, tömegük, keverési szög).

Nem kizárt, \* hogy a  $\nu_e$  tömeget direkt módon meghatározhatjuk a  $^3\text{H}$  béta-spektrumból, bár ebben én nem vagyok biztos, a kísérleti megvalósítás fantasztikusan nehéz volta miatt [5]. Akárhogyis legyen, a véges neutrínó-tömeg nemcsak hogy megerősítene sok modern elméleti gondolatot, megadna fontos paramétereket, de valóságos forradalmat jelentene a kozmológiában, az asztrofizikában és a neutrínó-asztronómiában. Különös, hogy a manapság legnépszerűbb kutatási területek — a proton instabilitása, neutrínó oszcilláció — általában nem a nagyenergiájú kísérletek körébe tartoznak.

Miután megírtam ezt a cikket, megjelent egy preprint (Lubimov, Nozik, Tretjakov, Kozik, ITEP 62, 1980), amelyben  $^3\text{H}$  béta-bomlásából 90%-os konfidencia határon belül 14–16 eV közötti véges neutrínó-tömeget mértek ki. A kísérlet egyszerűen csodálatos. Mindazonáltal a nehézségek és a kérdés fontossága miatt feltétlenül szükséges, hogy a moszkvai és más csoportok is megismételjék és folytassák ezeket a vizsgálatokat.

#### HIVATKOZÁSOK

- [1] Pauli: levél (1930. december 4.) egy tübingeni fizikus-találkozó hallgatóságához (köztük Geiger és Meitner). A levelet Meitner őrizte meg, s csak sok évvel később publikálták (például: Brown, Phys. Today, 1978. szeptember).
- [2] Pauli. „Septieme Conseil de Physique Solvay 1933”, Gauthier-Villars, Párizs, 1934.
- [3] Rodeback, Allen. Phys. Rev., 1952, 86, 466.
- [4] Összefoglaló: Primakov és Rosen, Report on Progress in Physics, 1959, 22, 121; Fiorini, az 1977-es Konferencia anyaga, Ed. Nauka, Moszkva, 1978.
- [5] A  $^3\text{H}$ -spektrum első mérése (1949) proporcionális számláló segítségével: Hanna, Pontecorvo, Phys. Rev., 1949, 75, 983; Curran et al. Phil. Mag., 1949, 40, 53; A legutolsó és legpontosabb mérés: Tretyakov et al., az 1976-os tbilisi Nemzetközi Nagyenergiás Fizikai Konferencia anyaga.
- [6] Pontecorvo, Phys. Rev., 1947., 72, 246; Puppi, Nuovo Cimento, 1948, 5, 505.
- [7] Ezek a kísérletek nem túl jó felső határt adtak: Később jóval nagyobb pontossággal, gamma-hodoszkóp és mágneses spektrométer segítségével adódott (Anderson, Hofstadter et al. Az 1978-as „Rochester” Konferencia anyaga).
- [8] Wick, Wightman, Wigner. Phys. Rev., 1952, 88, 101.
- [9] Bethe, Phys. Rev., 1939, 55, 434.
- [10] Gamov, Schonberg, Phys. Rev., 1941, 59, 539.
- [11] Pontecorvo, National Res. Council Canada, Rep. PD 205, 1946; Helv. Phys. Acta, Suppl., 1950, 3, 97.
- [12] Gamov, Phys. Rev., 1948, 70, 505.
- [13] Fowler, Appl. J., 1958, 127, 551.
- [14] Pontecorvo, JETP, 1959, 36, 1615.
- [15] Markov, az 1960-as „Rochester” Konferencia anyaga 578.
- [16] Greisen, az 1960-as „A nagyenergiás fizika mérőberendezései” konferencia anyaga, 209.
- [17] Pontecorvo, Smorodinsky, JETP, 1961, 41, 239.
- [18] Zeldovics, Smorodinsky, JETP, 1961, 41, 907.
- [19] Pontecorvo, Phys. Lett., 1963, 1, 287.
- [20] Reines et al., az 1972-es Neutrino Konferencia anyaga, II. kötet, 199.
- [21] Krishnasvami et al., Proc. Roy. Soc., 1971, A323, 489; Osborne et al., az 1972-es Neutrino Konferencia anyaga, II. kötet, 223.
- [22] Colgate, White, Astrophys. J., 1966, 143, 626.
- [23] Zeldovics, Letters JETP, 1965, 1, 40.
- [24] Domagatsky, Zatsepin, a 9. Nemzetközi Kozmikus Sugárzás Konferencia anyaga, 1965, 2, 1030.
- [25] Penzias, Wilson, Ap. J., 1965, 142, 419.
- [26] Dicke et al. Ap. J., 1965, 142, 414.



- [28] Zeldovics, Novikov, Lett. JETP, 1967, 6, 772.
- [29] Weinberg, Gravitation and Cosmology. John Wiley Inc., New York, 1972.
- [30] Gershtein, Zeldovics: Lett. JETP, 1966, 4, 174; A semleges leptonok tömegének kozmológiai megszorításai: pl. Lee, Weinberg, Phys. Rev. Lett., 1977, 39, 165; A tömeg nélküli neutrínók számának kozmológiai korlátai: pl. Schwartsman, Lett. JETP, 1969, 9, 315; Steigman, Schram, Gunn, Phys. Lett., 1977, 66B, 202; A neutrínóra vonatkozó más asztrofizikai megfontolások: Bernstein, Rideman, Feinberg, Phys. Rev., 1963, 132, 1227; Berg, Marciano, Ruderman, Phys. Rev., 1978, D17, 1395.
- [31] Pontecorvo, JETP, 1967, 53, 1717; 1971, 13, 281.
- [32] Gribov, Pontecorvo. Phys. Lett., 1969, 28B, 493.
- [33] Bilenky, Pontecorvo, Phys. Lett, 1976, 61B, 248; Lett. Nuovo Cimento, 1976, 17, 569; Comments on nuclear and particle phys., 1977, 7, 149; Phys. Rep., 1978, 41, 226.
- [34] Bahcall, az 1972-es Neutrino Konferencia anyaga, 1, 29.
- [35] Berezinsky, Zatsepin, Sov. Phys. Usp., 1977, 20, 361.
- [36] Gershtein et al., az 1977-es Neutrino Konferencia anyaga, 1, 106; ezenkívül Suther and et al., Phys. Rev., 1976, D13, 2700; Pethick, az 1979-es Neutrino Konferencia anyaga, Bergen, Norway, 1, 78.
- [37] Chudakov et al., az 1977-es Neutrino Konferencia anyaga, 1, 155.
- [38] Dolgoshein et al., az 1977-es Neutrino Konferencia anyaga, 2, 341.
- [39] Sulak; et al., az 1977-es Neutr. Konf. anyaga, 2, 350.
- [40] Domogatsky et al., az 1977-es Neutr. Konf. anyaga, 1, 115.
- [41] Davis et al., az 1978-as Neutr. Konf. anyaga, 53.
- [42] Landé et al., az 1978-as Neutr. Konf. anyaga, 887.
- [43] Zatsepin, az 1978-as Neutr. Konf. anyaga, 881.
- [44] P.: Learned, az 1978-as Neutr. Konf. anyaga, 895.
- [45] Bethe, Peierls, Nature, 1934, 133, 532.
- [46] Fermi, Nuovo Cimento, 1934, 1, 11.
- [47] Reines, Cowan, Phys. Rev., 1953, 98, 492; 1959, 113, 273.
- [48] Danby et al., az 1962-es Nagyenergiás Fiz. Konf. (CERN) anyaga, 809.
- [49] Vasilevsky et al. Phys. Lett., 1962, 1, 345
- [50] Kobzarev, Okun, JETP, 1961, 41, 1205.
- [51] Kirkwood, Hanna, Pontecorvo, Phys. Rev., 1949, 75, 982.
- [52] Davis, Phys. Rev., 1955, 97, 766.
- [53] Pontecorvo, JETP, 1957, 33, 549.
- [54] Pontecorvo, JETP, 1959, 37, 1751.
- [55] Nguyen Van Hieu, Pontecorvo, JETP Lett., 1968, 7, 137.
- [56] Pontecorvo, Ryndin, az 1959-es kievi Nemz. Nagyen. Fiz. Konf. anyaga, 233.
- [57] Bludman, Nuovo Cimento, 1958, 9, 433.
- [58] Zeldovics, JETP, 1959, 36, 964; Bouchiat, Phys. Lett., 1974, 48B, 111.
- [59] Barkov és Zo tarev, az 1978-as Neutr. Konf. anyaga, 423.
- [60] Prescott et al., Phys. Lett., 1978, 77B, 347.
- [61] Pl.: Conversi, az Európai Fiz. Társ. Nemz. Konferenciája, Genf, 1979.