

ÉRTEKEZÉSEK
EMLÉKEZÉSEK

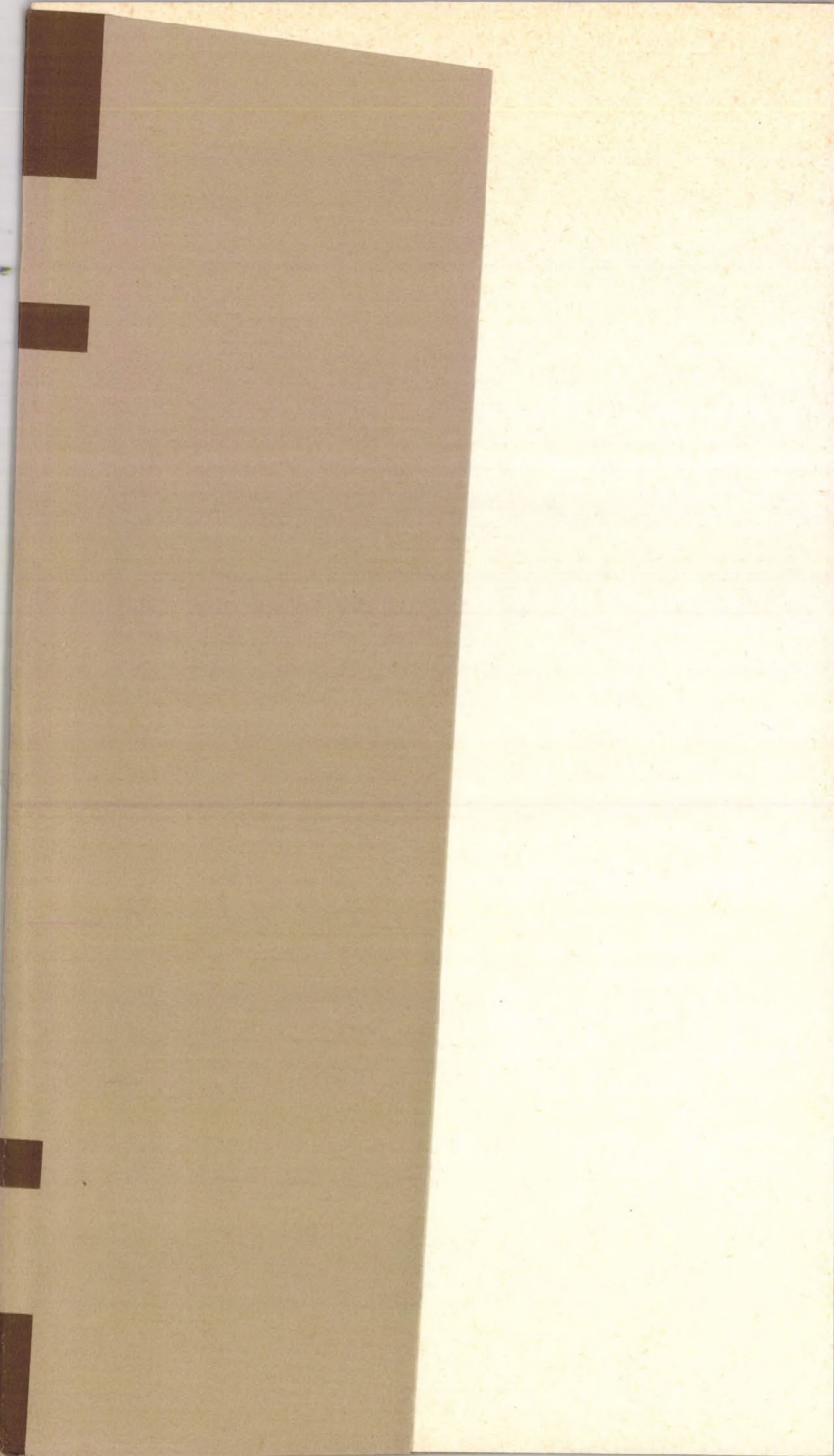
KISS DEZSŐ

A NEUTRÍNÓK
DETEKTÁLÁSÁNAK
MŰVÉSZETE



68

AKADÉMIAI KIADÓ, BUDAPEST



ÉRTEKEZÉSEK
EMLÉKEZÉSEK

ÉRTEKEZÉSEK EMLÉKEZÉSEK

SZERKESZTI
TOLNAI MÁRTON

KISS DEZSŐ

A NEUTRÍNÓK
DETEKTÁLÁSÁNAK
MŰVÉSZE

AKADÉMIAI SZÉKFOGLALÓ

1986. ÁPRILIS 16.



AKADÉMIAI KIADÓ, BUDAPEST

A kiadványsorozatban a Magyar Tudományos Akadémia 1982.
évi CXLII. Közgyűlése időpontjától megválasztott rendes és
levelező tagok székfoglalói — önálló kötetben — látnak
napvilágot.

A sorozat indításáról az Akadémia főtitkárának 22/1/1982.
számú állásfoglalása rendelkezett.

ISBN 963 05 4496 2

© Akadémiai Kiadó, Budapest 1988 — Kiss Dezső

A kiadásért felelős az Akadémiai Kiadó
és Nyomda Vállalat főigazgatója

Felelős szerkesztő: Sente László

Műszaki szerkesztő: Kiss Zsuzsa

Terjedelem: 2,96 (A/5) ív + 4 oldal műmelléklet

HU ISSN 0236—6258

87.16850 Akadémiai Kiadó és Nyomda Vállalat

Felelős vezető: Hazai György

Printed in Hungary

I. BEVEZETÉS

A múlt század végén nagyon fontos állomáshoz érkezett a fizika: 1896-ban Becquerel felfedezte a radioaktivitás jelenségét. Az ezután következő esztendőök alatt nagyon sok kiváló fizikus foglalkozott a három különböző típusú radioaktív bomlás pontosabb vizsgálatával. A béta-bomlás során meghatározták pl. egy adott mag által kibocsátott béta-részek (elektronok) energiaspektrumát. A várakozással ellentétben nem egy diszkrét vonalat, hanem egy folytonos energiaeloszlást találtak. Diszkrét vonal egy adott mag esetében azért volt várható, mert az energia- és impulzusmegmaradási törvények egyértelműen megszabják egy részecske két részre való bomlásának esetén a komponenseknek az energiáját. Bár az energiaeloszlás maximuma pontosan megfelel az anya- és leánymag tömegkülönbsége alapján várt értéknek, a folytonos béta-spektrum súlyos gondokat okozott. Hová lesz a hiányzó energia? Hasonló nehézségek jelentkeztek az impulzus- és impulzusnyomaték-megmaradás törvényének beteljesülésével kapcsolatban is. Ezen nehézségek kiküszöbölésére alkotta meg W. Pauli osztrák elméleti fizikus hipotézisét (1930), amely szerint a béta-részecskékkel egyidejűleg egy további részecske is emittálódik [1]. Ez a részecske viszi el az energia és az impulzus hiányzó részét; spinje $1/2$, töltése 0, nyu-

galmi tömege zérus (vagy nagyon kicsi) kell, hogy legyen. Ezt a bizarr részecskét később E. Fermi neutrínónak (ν), azaz „semlegeské”-nek nevezte el. A neutrínóhipotézis kimondása után hamarosan világossá vált, hogy meg kell különböztetni a pozitív és negatív béta-bomlásokban kilépő neutrínókat: ezek egymás antirészecskéi. Konvenció szerint a β^+ -bomlásban kilépőt nevezzük neutrínónak (ν), a β^- -bomlásban kilépőt pedig antineutrínónak ($\bar{\nu}$).

A neutrínó tulajdonságai annyira szokatlanok és különösek, hogy B. Pontecorvo, e terület egyik legnagyobb tekintélyű művelője szerint a neutrínó olyan az elemi részecskék „állatkertjében”, mint a zsiráf. (A zsiráf megpillantásánál a gyermek felkiált: „Ilyen nem is létezhet!”.) A részecske feltételezése Pauli tudományos fantáziájának merészségéről tanúskodik. Pauli szavaival: „Ma valamilyen borzasztó dolgot cselekedtem, olyant, amilyent egy elméleti fizikusnak soha nem lenne szabad tennie. Olyant javasoltam, amit sohasem lehet kísérletileg igazolni.” Valóban, az ellenőrzés, a neutrínó kísérleti kimutatása abban az időben majdnem lehetetlennek látszott, figyelembe véve, hogy az anyaggal való kölcsönhatási valószínűsége hihetetlenül kicsi: a kölcsönhatási hatáskeresztmetszet – természetesen a kölcsönhatási folyamattól és az energiától függően változóan – $10^{-43} - 10^{-44}$ cm² nagyságrendű.

A fizika fejlődése rácaffolt Pauli pesszimizmusára: kezdetben közvetett, később közvetlen* kísérleti bizonyítékot találtak a neutrínó léteire. Azóta a neutrínó detektálása – ha nem is vált a kísérleti fizikusok rutinfeladatává – a modern részecskefizikai kutatások szerves része lett. Hatalmas detektorok épültek (és épülnek), amelyek arra alkalmasak, hogy velük a neutrínó által létrehozott kölcsönhatások természetét vizsgálhassuk.

Elméletileg már korábban felmerült, hogy a neutrínónak 2 fajtája lehetséges, az elektron-neutrínó (ν_e) és a müonneutrínó (ν_μ)**. Az előbbire az a jellemző, hogy egyrészt elektron-kölcsönhatásánál keletkezik, másrészt kölcsönhatásánál elektron keletkezik (müon nem). A müonneutrínó esetében ugyanez a folyamat zajlik le, de itt elektron helyett müon (elektron nem) szerepel a kölcsönhatásban. (Természetesen mind a két fajta neutrínónak megvan a megfelelő antineutrínója.) A kétféle neutrínó létezésének kísérleti igazolása 1962-ben sikerült.

*Reines és Cowan amerikai fizikusoknak sikerült először közvetlenül kísérletileg kimutatnia a neutrínó létezését. Reaktorból származó (anti)neutrínókat ejtettek nagy méretű, Cd-tartalmú szcintillációs detektorra, és a $p + \bar{\nu}_e = n + e^+$ kölcsönhatásból származó késleltetett ($n - e^+$)koincidenciákat észlelték. Az e^+ elektronnal találkozva annihilálódik és két prompt γ -fotont szolgáltat. A neutron lelassul, azután befogódik a Cd-ban (ezért kell késleltetett koincidencia), és szintén γ -fotonokat ad. A γ -kat a szcintillátor detektálja.

**Valószínű, hogy van tau-neutrínó (ν_τ) is.

A neutrínóknak vannak természetes és mesterséges forrásai. Természetes forrás a kozmikus sugárzás, amelybe mind a Napból, mind a galaxisokból származó, mind az atmoszférikus eredetű neutrínók beletartoznak. Mesterségesen is előállíthatunk neutrínókat, pl. reaktorokban, ahol az alapfolyamat során bétaaktív hasadási termékek keletkeznek, és ezek bomlásánál nagyon sok elektron-antineutrínó ($\bar{\nu}_e$) keletkezik, amely akadálytalanul áthatol a reaktor sugárvédelmi falán, és mérési célokra felhasználható. A harmadik lehetőséget a gyorsítók szolgáltatják. Ha gyorsítónyalábot ejtünk valamilyen céltárgyra, akkor a kölcsönhatások során sok szekunder részecske keletkezik, köztük neutrínó is. Miután a neutrínók semlegesek, mágneses vagy elektromos térrel őket az egyéb elektromosan töltött részekről viszonylag könnyű elválasztani. Nehezebb elválasztani a gamma-sugárzástól és neutrontól, miután ezek is semlegesek. (A többi semleges általában rövid élettartalmú.) Kihhasználva a neutrínó rendkívül nagy áthatolóképességét, a gamma- és neutronhátteret is jelentősen csökkenteni lehet.

A három neutrínóforrás kiegészíti egymást: a természetes neutrínóforrás óriási előnye, hogy benne olyan hatalmas energiájú neutrínók szerepelhetnek, amelyeket sem a ma működő, sem a ma tervezett gyorsítóberendezésekkel nem tudunk előállítani. Ezenkívül, mivel az Univerzumból erednek, asztrofizikai kutatá-

sokra használhatók. A nagy teljesítményű reaktorok eléggé bőséges neutrínóforrások, de a legjobban kézben tartható és a legnagyobb intenzitású a gyorsítós neutrínóforrás.

A következőkben először a gyorsítós neutrínóforrásokkal nyert, majd a természetes (kozmikus eredetű) neutrínók detektálásával fogunk foglalkozni; a reaktorneutrínók fontosságát és érdekességét mindez nem csökkenti, egyszerűen a téma és az idő korlátai kényszerítenek egy ilyen korlátozásra. Az első részben a szerpuhovi gyorsítón működő Szerpuhov–Dubna–Budapest–Berlin együttműködésben felépült neutrínódetektor tervezéséről, építéséről számolunk be. E detektor 1985 decemberében működött először; a tapasztalatok kielégítőek, reméljük, hogy a közeljövőben tényleges fizikai mérésekre is sor kerül. A második részben a kozmikus eredetű neutrínók föld alatti detektálásának a kérdését ismertetjük a teljesség és az érdekesség kedvéért (a szerző ilyen kísérletekben nem vesz részt). A harmadik részben foglalkozunk a neutrínók víz alatti detektálásának a kérdésével, első sorban az ún. Bajkál-kísérlettel, amelyet egy moszkvai intézet végez a Bajkál-tavon, és amelyben a budapesti laboratórium is részt vesz. A rövid áttekintés sokkal szélesebb horizontot nyit meg, mint amennyi a magyar résztvevők és az író szerény személye által indokolt lenne; mindenesetre a szerpuhovi gyorsítón működő neutrínódetektor terve-

zésében, építésében és az első mérésekben, továbbá hasonló módon a bajkál-tavi kísérletben a szerző személy szerint is részt vett és részt vesz.

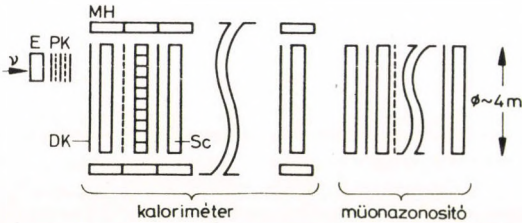
II. NEUTRÍNÓK DETEKTÁLÁSA GYORSÍTÓK MELLETT

1. A „dubnai” neutrínódetektor [2], [3]

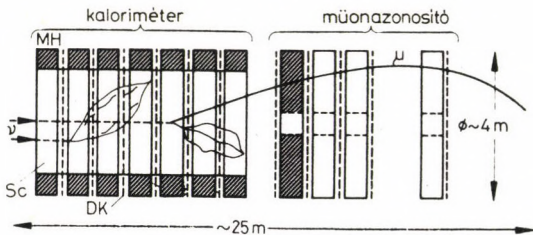
A neutrínókkal végzett kísérletek alapproblémája a neutrínó gyenge kölcsönhatása; emiatt a kölcsönhatások száma – tekintélyes targetméretek esetén is –, összehasonlítva más részecskefizikai kísérletekkel, rendkívül kicsi. A regisztrált események számát növeli, hogy a neutrínó-kölcsönhatás céltárgya egyben a keletkezett szekunder részecskék detektálásával is szolgál. Napjainkban még a neutrínófizikai kísérletek alapproblémája a neutrínódetektálás kis hatásfoka. Ezért szerte a világban nagy erőfeszítések történnek nagyobb hatásfokú neutrínódetektor építésére. Az elmúlt években érlelődött meg Dubnában és Szerpuhovban az a gondolat, hogy a neutrínófizika fejlődésének meggyorsítására a két intézet egyesített erőfeszítésével létesít egy korszerű, nagy teljesítőképességű, univerzális, flexibilis neutrínódetektort. Hosszas tudományos diszkussziók, viták után megszületett a projekt, amelyet mindkét intézet tudományos tanácsa elfogadott, így 1980-ban megkezdődött ennek az új detektornak a tervezése és építése. A neutrínódetektor elnevezés nem sejteti a berendezés méreteinek, komplexitásának, költségeinek nagyságát. Egy szokásos magfizikai detektor súlya nagyságrendileg 1 kg, ára néhányszor 10 000 forint. A tervezett neutrínódetektor

150 m³ szcintillációs folyadékot tartalmaz, mérete 4 mX4 mX25 m, súlya 1000 t, létrehozásának költsége mintegy 200 millió forint.

A detektor tulajdonképpen 6 részből áll (1. és 2. ábra):



1. ábra: A Dubna–Szerpuhov együttműködésben épülő neutrínodetektor elrendezési sémája. E – emulziós blokk, PK – proporcionális kamrák, amelyek segítségével vissza lehet következtetni az emulzióbeli kölcsönhatás helyére, DK – driftkamrák, a kölcsönhatásnál keletkezett töltött szekunder részecskék pályájának meghatározására, Sc – folyadékszintillátort tartalmazó alumíniumhasábok a szekunder töltött részek által elvitt energia mérésére, MH – mágneses héj az esetleg keletkező müonok visszatérítésére. A driftkamrák egymást követő rétegei 90 fokkal el vannak forgatva, hogy meg lehessen határozni az X és Y koordinátákat. A rajz nem méretarányos; továbbá mind a kaloriméternek, mind a müonazonosítónak csak az első és utolsó moduljai vannak ábrázolva.



2. ábra: A neutrínókaloriméterben végbemenő neutrínó-kölcsönhatásoknál keletkezett töltött részecskézapörök és müon képzeletbeli ábrázolása.

1. (szcintillációs hadron) kaloriméter;
2. koordinátadetektorok (driftkamrák);
3. mágneses „hég”;
4. mágneses müonspektrométer;
5. emulziós blokk*;
6. elektrondetektor**.

1. A detektor legfontosabb része egy *szcintillációs hadronkaloriméter*, amelynek feladata, hogy a neutrínó kölcsönhatásánál felszabaduló energiát mérje, és a keletkezett kölcsönhatási termékeket detektálja. A szcintillátor céltárgyként és egyúttal detektorként is szolgál. Természetesen impozánsan nagy mennyiségekről van szó: 150 m³ folyékony szcintillátort, „white spirit” nevű szerves folyadékot*** helyeznek el 400 db, egyenként 30 cm X 30 cm X 420 cm-es tartályban; ezek mindegyikét két végén 1–1 elektronsokszorozó „nézi”. A szcintillációs tartályok vízszintesen helyezkednek el. Modulszerkezetük durva koordinátameghatározást tesz lehetővé, ezt a másik síkban kiegészíthetjük oly módon, hogy mérjük a két elektronsokszorozó jeleinek időkülönbségét, ami függvénye annak, hogy az ionizáló részecske hol ment át a detektoron a

*Szigorúan véve az emulziós blokk nem szerves része a detektornak (a kettő önmagában, egymástól függetlenül is megállhat, és más-más típusú eseményeket regisztrál), azonban előnyösen kiegészíti.

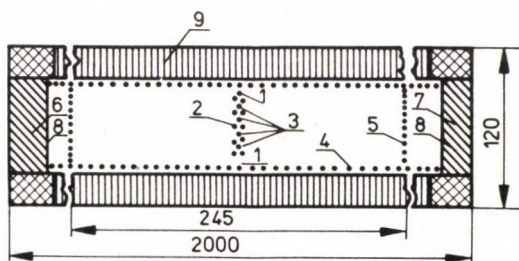
**Az 1. és 2. ábrán az elektrondetektor nem látható. Ezt a detektort a berlini (NDK) Nagyenergiájú Fizikai Intézet építi ólomlemezek és plasztikszcintillátorok „szendvicselésével”.

***White spirit – nehézbenzin-féleség.

két végéhez viszonyítva. A tartályok alumíniumból készülnek, belső felületüket vékony műanyagfólia borítja, a fény jobb összegyűjtése érdekében. (A készítés technológiája egyébként nem érdektelen: a fóliát zacskó vagy zsák formájában belehelyezik a tartályba, és nagy nyomású levegővel préselik a falhoz.) A szcintillátor előállítása nem jelent túlságosan nagy gondot, a white spirit alapanyaga a kereskedelemben kapható, bár szcintillációs célokra további tisztítása szükséges, hogy a fényabszorpciója minimális legyen. Ilyen tisztító eljárást dolgoztak ki a Kaukázusban levő neutrínóállomáson kozmikus sugárzási neutrínómérések céljára. Az eljárás és maga az alapanyag meglehetősen olcsó: a dubnai, szerpuhovi detektorhoz szükséges mennyiséget a kaukázusi állomásról be lehet szerezni. Furcsa módon viszont a szállítás kerül sokba, és nem is veszélytelen, mivel a folyadék lobbanási hőmérséklete nagyon alacsony, 30°C körüli, ami egyébként alkalmazását is megnehezíti. Jelenleg kísérletek folynak, hogy valamilyen adalékanyag hozzáadásával hogyan lehetne a lobbanási hőmérsékletet megemelni, és ezáltal a folyadék használatát biztonságosabbá tenni.

2. A kaloriméter szcintillációs detektorai és a mágneses héj egyes elemei közé a pontos helymeghatározás érdekében ún. *koordinátadetektorokat* kell elhelyezni, hogy nyomon tudjuk követni a kölcsönhatásnál keletkezett töltött szekunder részecskék pályáját. A tervezés stá-

diumában a sokszálas proporcionális és a driftkamra versenyzett egymással. Mind a kettőnek megvan az előnye és a hátránya. A proporcionális kamrák gyorsabbak, előállítási technológiájuk Dubnában kidolgozott*, viszont mintegy százezer szálhoz szükséges elektronika, ami – bármilyen egyszerű is legyen – komolyan növeli a detektor előállításának a költségeit. (A jelszálakhoz szükséges elektronika valóban egyszerű: egy erősítőtől, egy diszkriminátorból, egy késleltető egységből és egy logikai rendszerből áll. Mindezt azonban száz-ezerszer meg kell ismételni.) Ezzel szemben a driftkamra kevésbé gyors, viszont a százezer szál helyett mindössze háromezer jelszállal, ennek megfelelően lényegesen egyszerűbb és



3. ábra: A driftkamra konstrukciója. 1 – védőszálak (ϕ 200 μm), 2 – katódshálók (ϕ 200 μm), 3 – jelszálak (ϕ 50 μm), 4, 5 – nagyfeszültségű és feszültségosztó szálak (ϕ 200 μm), 6, 7 – oldal panelek, 8 – nagyfeszültségű elektródok, 9 – méhsejtszerű panelek.

*A CERN-nel közösen végzett mélyen rugalmatlan műonoszórás kísérlethez (NA-4) 3 m \times 3 m-es kamrából 80-at a dubnai EAI gyártott le, és ezek fényesen kiállták a gyakorlat próbáját.

olcsóbb elektronikával dolgozik. Végül is a driftkamra javára született döntés (3. ábra). Összesen 540 db driftkamra nyer elhelyezést a detektorban.

3. A szcintillációs kalorimétert minden oldalról egy 1,5 T (15 kG) mágneses indukciójú, 15 cm vastagságú *mágneses „héj”* veszi körül, négyszögletes „pánt” formájában. (Az egész 40 darabból áll.) Erre azért van szükség, hogy a töltött áramú kölcsönhatásnál keletkező és a detektort elhagyni készülő müonokat visszatérítse a detektorba, és így ne regisztráljuk tévesen semleges áramú kölcsönhatásnak az eseményt*. Ezzel a mágneshéjrendszerrel el lehet érni, hogy pl. 10 GeV energián a keletkező müonoknak nem több, mint 3%-a tud csak megszökni a detektorból.

4. A kaloriméter végén mágneses *müonspektrométer* található, amelynek feladata, hogy a kölcsönhatásnál keletkezett müonokat detektálja, és megmérje az impulzusukat. A müonspektrométer 18 db, 4 m átmérőjű, mágnesezett vaskorongból áll, amelyekben a mágneses indukció 1,5 T. Egy-egy korong vastagsága 11 cm. A 4 m átmérőjű korongok megmunkálása meglehetősen nehéz, ezért 2 féldarabból

*A töltött áramú (gyenge) kölcsönhatásnál az elektromos töltés megváltozik mind a kölcsönhatás leptonrészében, mind pedig a kvarkrészében. A semleges áramú kölcsönhatásnál ezzel szemben nincs elektromos töltésváltozás egyik komponensben sem. P.: $\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + \pi^+ + X$ töltött áramú, $\nu_\mu + e \rightarrow \nu_\mu + e$ semleges áramú kölcsönhatás.

rakják össze őket (összesen 36 db-ra van szükség).

5. Az egész detektor elé (vagy mögé) egy nagy *emulziós blokkot* helyeznek el azzal a céllal, hogy ha a kölcsönhatás az emulzióban következik be, akkor ki lehessen használni az emulzió és az elektrondetektor kombinációja adta előnyöket. A szerencsés kombináció a következő: az emulzióban rendkívül pontosan megfigyelhető a kölcsönhatás környéke (ideális vertexdetektor). A keletkezett szekunder részecskék további sorsa azonban nem követhető, mert az emulzióból hamar eltávoznak. Ezután detektálásukra viszont kiválóan alkalmas az utána következő néhány proporcionális kamra. Sőt, a proporcionális kamrák segítségével vissza tudunk következtetni arra, hogy az emulziós blokk mely részében következett be a kölcsönhatás oly formában, hogy a szekunder részek pályáját visszaextrapoláljuk az emulzióig. Ez rendkívül leegyszerűsíti az emulzió feldolgozását, ahol is a fő probléma az, hogy hihetetlenül nagy térfogatú emulziót kellene átvizsgálni, hogy megtaláljuk a néhány ritka neutrínó-kölcsönhatást*. Most azonban van egy „célzóberendezésünk”, amely kijelöli a ritka kölcsönhatások közvetlen környékét, mégpedig mintegy $100\ \mu\text{m}$ (elképesztően jó!)

*A buborékkamra-felvételektől eltérően az emulzióban térbelileg különböző mélységekben helyezkednek el a nyomok, és ez a nyomok követését nehézkessé, hosszadalmassá teszi.

pontossággal. Tehát csak ezeket a területeket kell vizsgálni, ami óriási időnyereség, és a scanelés fáradságos munkáját rendkívüli mértékben megkönnyíti. A kiértékelés további egyszerűsítése céljából Dubnában megindult egy speciális automatizált emulziókiértékelő berendezés tervezési munkája (egy ún. Fourier-mikroszkóp segítségével holografikusan scanelik az emulziót).

A detektor működését a jelenlegi szerpuhovi gyorsítón kezdte el, amelynek intenzitását a közelmúltban (egy booster segítségével) egy nagyságrenddel megemelték. A jelenlegi szerpuhovi gyorsító maximális energiája (76 GeV) mellett „csak” kb. 5–15 GeV-os neutrínók várhatók. Bár ez ma már nem számít rekordenergiának – rejtegethet ez a terület váratlan meglepetéseket. Először is, ez az energiatartomány ma „senki földje”, a fejlődés során átugrották: világviszonylatban korábban sokkal kisebb, jelenleg viszont sokkal nagyobb energiákon folytatják a vizsgálatokat. Másodszor, ebben a spektrumtartományban az elérhető intenzitás rendkívül nagy. Ezen a területen akkora neutrínóintenzitást tudunk elérni, mint a világ jelenlegi összes gyorsítójának neutrínónyalábjai együttesen érnek el. Mindezekről eltekintve a detektor felhasználásának perspektíváját az 1995-re megvalósuló mammutgyorsító, a 3000 GeV-os UNK adja, amely – mint ismeretes – ugyancsak Szerpuhovban épül fel. Akkor élvonalba tartozó energiájú neutrínók-

kal lehet majd méréseket végezni. Hadd jegyezzem meg, hogy míg sok fizikai jelenség vizsgálata szempontjából az elektron-pozitron ütközönnyalábos gyorsítók sokkal perspektivikusabbak, mint a rögzített céltárgyú gyorsítók, hiszen a tömegközépponti energia rendkívül nagy, addig szekundernyalábok – ide tartozik a neutrínónyaláb is – esetében érthető módon csak a rögzített céltárgyú gyorsítók jöhetnek számításba. Ebben a vonatkozásban az UNK és a most épülő neutrínódetektor egyedülálló helyzetben lesz. A nagyobb energiánál várhatóan meg kell növelni a detektor méreteit, amit a modulfelépítés egyszerűbbé tesz, szerencsére azonban a hosszúság nem lineárisan, hanem csak az energiának a négyzetgyökével változik. Továbbá a méretnövelés mértékét csökkenteni lehet abszorbensek behelyezésével.

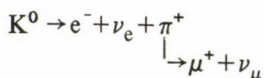
Általános jellemzőként tehát azt mondhatjuk, hogy ez a neutrínódetektor egyesíteni fogja magában az emulziós technika és az elektronikus detektálás előnyeit, s követhetővé teszi a kölcsönhatási termékek (köztük a müonok) útját is. Energiafelbontása hadronokra kb. $30\%/\sqrt{E_h}$ lesz. A modulrendszer lehetővé teszi esetleg újonnan felmerülő kísérleti gondolatoknak a viszonylag egyszerű megvalósítását is. A detektor kb. 6 évig készült; elkészítési költsége mintegy 12 millió rubel volt, amelynek felét Dubna, felét Szerpuhov vállalta magára. A munkamegosztás a következő: Szer-

puhov biztosította a neutrínónyalábot, a neutrínócsatornát, a szcintillációs detektorokat és a koordinátadetektorok egy részét; Dubna feladata volt a mágnesek és a koordinátadetektorok másik részének, valamint az emulziós blokknak az elkészítése. Ezeken a területeken Dubna komoly tapasztalatokkal rendelkezik.

A tervezett neutrínódetektor legfőbb paraméterei igen jó helyet foglalnak el a világon már működő, vagy tervezés alatt álló neutrínódetektorok paraméterei között, mind méret, mind a detektor anyageloszlásának finomsága tekintetében; továbbá a hadronokra és a müonokra vonatkozó energia- és szögfelbontást illetően is.

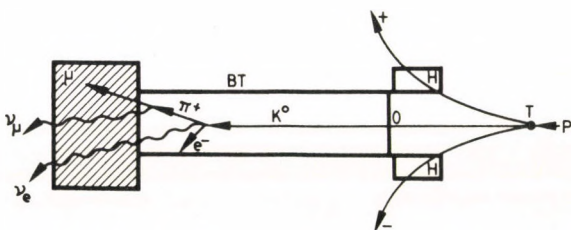
2. A neutrínónyaláb

A szerpuhovi intézet azt tervezi, hogy speciális, *elektronneutrínóban dúsított* nyalábot állít elő. A normális neutrínónyalábokban, amelyek a töltött kaonok és pionok bomlásából származnak, döntő többségben müonneutrínó található, és az elektronneutrínó mindössze 1%-os nagyságrendben fordul elő. A semleges kaonok bomlásából azonban elektronneutrínó keletkezik:



Sajnos keletkezik egy pion is, amely bomlásánál müonneutrínót szolgáltat. Ezzel együtt fel

lehet emelni az elektronneutrínók számarányát 1%-ról 50%-ra. A nyaláb meglehetősen monokromatikus lesz. A 4. ábra mutatja a nyaláb-előállító részt. A céltárgyra beérkező protonok szekunder részecskéket hoznak létre, a szekunder részecskék közül a töltötteket egy elektromágnes eltávolítja a nyalábból. Egyenesen csak a semleges részecskék haladnak tovább, köztük a számunkra e szempontból érdekes semleges kaon. A kaon egy bomlási zónába kerül, itt nagy valószínűséggel elbomlik, a bomlási termékek elakadnak a megfelelő vastagságú vasabszorbensben, a neutrínók pedig továbbjutnak. A szerpuhovi neutrínónyaláb jelenleg is megállja a helyét világviszonylatban, ha pedig megvalósítják az elektronneutrínóban dúsított nyalábot, akkor unikális helyzetben lesz.



4. ábra: Elektronneutrínóban (ν_e) dúsított nyaláb előállítása. A T targetbe (céltárgyba) érkező p protonok által keltett töltött szekunder részecskéket a H mágnesek oldalt eltérítik. A semleges részek, köztük a K^0 , tovább haladnak, és a BT bomlási térfogatban elbomlanak. A bomlásnál elektron, elektronneutrínó és pion keletkezik. A pion további bomlásánál müon és müonneutrínót ad.

A neutrínónyaláb és a detektor tulajdonságai együttesen határozzák meg az elérhető eseményszámokat, és ilyen vonatkozásban a Dubna–Szerpuhov projekt rendkívül előnyös. Háromhetes mérési periódus alatt (gyakorlati okokból 3 hét szokott lenni egy mérési szakasz) várható $\approx 10^6$ detektált neutrínó-kölcsönhatás, ebből $\approx 2 \cdot 10^4$ elektronneutrínó-kölcsönhatás. Ha még részletesebben vizsgáljuk, és a müon-neutrínók elektronon való rugalmas szórását nézzük, akkor ≈ 100 esemény, ha pedig az egyik legritkább folyamatot, akkor ≈ 20 esemény várható. Müon-anti-neutrínó elektronnal (vagy protonon) való rugalmas szórásnál ≈ 10 ezer esemény várható.

3. A fizikai program

Természetesen könnyen belátható, hogy ilyen nagy mérőberendezés elkészítése optimális feltételek mellett is több (esetünkben 6) évet vesz igénybe, ezért – a részecskefizika rohamos fejlődését figyelembe véve – rendkívül nehéz előre megmondani, hogy amikor elkészült, és üzembiztosan működik, akkor éppen mely fizikai problémák lesznek a legizgalmasabbak. Éppen emiatt készül a neutrínódetektor univerzális típusként, modulrendszerben; ez lehetővé teszi, hogy rugalmasan alkalmazkodjunk (a modulok cseréjével, bővítésével, új egységek behelyezésével) az elkészülés utáni legidősebb fizikai problémák vizsgálatához.

1. Lehet vizsgálni a töltött áram közvetítette mélyen rugalmatlan neutrínószórást. E kísérletnél a jelen detektor előnye, hogy az 5–15 GeV-ig terjedő energiájú intervallumban ki lehet mérni a differenciális hatáskeresztmetszetet, hála a nyaláb monokromatikusságának és intenzitásának. Ezen adatok felhasználhatók a struktúrafüggvények meghatározására, hadronok kvarkszerkezetének vizsgálatára.

2. A semleges áram közvetítette mélyen rugalmatlan neutrínószórás vizsgálata is a lehetőségek közé tartozik. Itt müon nem keletkezik, csak hadronok, és az a furcsa helyzet alakul ki, hogy bejön egy semleges, tehát nem detektálható neutrínó, eltávozik egy kisebb energiájú, ugyancsak nem detektálható neutrínó, s közben keletkezik egy hadronzápor. Az egyetlen rendelkezésünkre álló kísérleti információ a hadronzápor energiájának mérése. Valamivel azonban többet is tudunk: megmérhetjük a hadronzápor „átlagos” irányát (tulajdonképpen a különböző hadronok „tömegközéppontját”).

3. Tanulmányozható a müonneutrínó elektronon történő rugalmas szórása.

4. Vizsgálhatjuk a neutrínó rugalmas szórását protonon: az eddigi, mindössze 100 eseménnyel szemben várhatóan nagyságrenddel több esemény lesz megfigyelhető.

5. Sokleptonos müon- és elektron-végállapotokat is tanulmányozhatunk velük: erre a 4π -geometria kiválóan alkalmas.

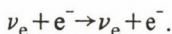
6. Lehet végezni ún. „*beam-dump*” kísérleteket is. Beam-dump-nak nevezzük az olyan kísérleteket, amelyeknél a nagyenergiára felgyorsított proton olyan vastag és nagy sűrűségű céltárgyra esik, amelyben a keletkezett instabilis szekunder részecskék legnagyobb része az atommagokkal kölcsönhat, mielőtt elbomlana. Kivételt képeznek a *nagyon rövid* élettartamú részecskék (pl. a „bájós” kvarkot tartalmazók), amelyeknél a magkölcsönhatás előtt végbemehet a bomlás, és a bomlási neutrínók megjelenhetnek. Így *prompt* neutrínókban dústított nyalábot kapunk, és lehetőség nyílik az azokat kibocsátó részecske vizsgálatára.

7. Lehet vizsgálni a *neutrínóoszillációt*. A neutrínó terjedése során tömeg-sajátállapotban van, és ez nem feltétlenül kell hogy megegyezzen a kölcsönhatási sajátállapotával. Így a neutrínó tömeg-sajátállapota kölcsönhatási sajátállapotok szuperpozíciója lesz. Pontecorvo elmélete szerint a neutrínó haladásával periodikusan változik a távolság függvényében annak valószínűsége, hogy a neutrínó melyik kölcsönhatási sajátállapotba ugrik be a mérés során. Ezt úgy érzékeljük méréseinkben, mintha egy azonos típusú neutrínónak az előfordulási valószínűsége a távolsággal oszcillálna. Pl. ha kezdetben tiszta ν_e nyalábunk van, egy bizonyos távolság megtétele után megjelenhet a nyalábban ν_μ vagy ν_τ is – és viszont. E kvantummechanikai jelenség előfeltétele, hogy az

egyes neutrínófajták — ha mégoly kis — tömeggel rendelkezzenek.

Tucatnyi kísérletet végeztek és végeznek a világ különböző laboratóriumaiban, a neutrínóoszilláció kimutatására — az eredmények azonban ellentmondóak: egyesek megerősítik, mások cáfolják a Pontecorvo elmélete által jóslott oszcilláció létét.

8. Lehet mérni az *elektronneutrínó rugalmas szóródását elektronon*:



Ez elvileg nagy jelentőségű az elektron-müon univerzalitás szempontjából. Tudjuk, hogy a müon és az elektron — eltekintve a tömegtől — semmiben nem különböznek egymástól, és ez a „nem különbözőség” a természet egyik rejtélye (vajon miért hozta létre az elektronnál sokkal nehezebb, de egyébként vele teljesen „azonos” müont? . . .). Kérdés, hogy szigorúan igaz-e a müon-elektron univerzalitás a neutrínók nyelvére lefordítva.

Ennél a mérésnél a kísérleti nehézségek rendkívül nagyok. Egyrészt — mint láttuk — tiszta elektronneutrínó-nyaláb előállítása nehéz, — bár a szerpuhoviak megoldása, ha nem is tiszta, de dúsított nyalábot ígér. A másik feladat speciális elektrondetektor előállítása. A legegyszerűbb megoldás, ha azt használjuk ki, hogy az elektron kölcsönhatva anyaggal elektromágneses záport hoz létre. Ha pl. ólomlemezeket rétegezzük (szendvicselünk) plasztik

szcintillátorrétegekkel, akkor elég hosszú detektor esetében regisztrálhatjuk a záport. A detektorral szembeni egyik követelményünk, hogy hatásfoka nagy, legalább 50% legyen, a másik, ami nagyon fontos, hogy megkülönböztethetők legyenek az elektronok más részecskéktől, elsősorban legfőbb „ellenfelüktől”, a tőlük legnehezebben megkülönböztethető pionoktól. (Azt kell megkívánnunk, hogy a berendezés 100 pion közül legfeljebb 1-et regisztráljon tévedésből elektronként.)

9. Egy másik mérési lehetőség a hipotetikus *nehéz neutrínók* bomlásának vizsgálata. A neutrínó létezésének kimutatása legalább olyan nehézséget okozott a fizikusok számára, mint amilyent manapság a neutrínó tömegének, ill. „tömegtelenségének” kimutatása jelent. Pontecorvo 1967-ben asztrofizikai megfontolások alapján elméletileg feltételezte, hogy a neutrínónak létezik tömege, amely a növekvő kölcsönhatási energiákon keletkezett neutrínótípusoknál egyre nagyobb. Ennek megfelelően a ν_e , ν_μ és ν_τ -k rendre „nehezebbek”.

A neutrínó tömegének léte két kísérletileg kimutatható jelenséget eredményezhet:

a) a már említett neutrínó-tömegoszillációt és

b) a „nehéz” neutrínók bomlását.

Van olyan modell, mely szerint a ν_e és ν_μ -nak „megfelelő” tömeg-sajátállapotú neutrínók stabilisak, míg a magasabb energiákhoz tartozó neutrínótípusoknak megfelelő tömeg-

sajátállapotú neutrínók instabilisak, és a bomlástörvények által meghatározott módon elbomlanak. A bomlástermékekből visszakövetkeztethetünk a nehéz neutrínók tulajdonságaira.

A neutrínódetektor modulszerkezete miatt alkalmas nehéz neutrínók bomlásának vizsgálatára, mivel a bomláshoz szükséges térfogatot a megfelelő modulok kiemelésével könnyen létrehozhatjuk.

Elképzeltető, hogy ez lesz az első mérés a neutrínódetektoron.

10. Tulajdonképpen az egész berendezés felhasználható úgy, hogy a detektorra nem neutrínó-, hanem müonnyaláb esik, tehát a *müonfizikát* is művelhetjük, amennyiben a fizikai érdeklődés ezt követeli meg.

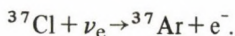
III. NEUTRÍNÓK DETEKTÁLÁSA A FÖLD ALATT

A napneutrínók intenzitásának kísérleti meghatározása [4]. Külön művészet ilyen kis hatáskeresztmetszetek (nagyságrendben $10^{-42} - 10^{-44} \text{ cm}^2$) mellett a neutrínók és az általuk létrehozott kölcsönhatások kísérleti tanulmányozása. Ezt a problémát azonban – mint láttuk – megoldották, és ma már több mint tucatnyi neutrínódetektor működik világviszonylatban. Külön nehézséget okoz azonban az, ha nem gyorsítón előállított neutrínónyalábbal kísérletezünk, hanem földön kívüli neutrínóforrással, azaz kozmikus származású neutrínóval. Ilyenkor a kis hatáskeresztmetszet okozta nehézséghez hozzájárul még az is, hogy ezen neutrínók intenzitása kicsi.

Ez a két tény parancsolóan megkívánja, hogy egyrészt a neutrínó detektálásánál igen nagy mennyiségű detektoranyagot használjunk fel, hogy a kevés számú és gyengén kölcsönható neutrínók mégis csak ésszerű beütésszámban legyenek észlelhetők, másrészt, hogy körültekintően gondoskodjunk a lehetséges zavaró háttér kiküszöböléséről vagy reális számbavételéről.

A neutrínók természetes forrása lehet a Nap vagy a Galaktikának valamely objektuma, vagy esetleg egy távolabbi Galaxis. A Naptól származó neutrínók kísérleti kimutatására R. Davis

a következő magreakciót használta fel:



Davis Dél-Dakota (USA) egy elhagyott mély aranybányájában (Home Stake) végezte el a kísérletet. A bánya 1500 m (4000 m vízfeletti mélység) mélyen helyezkedik el. A bányában egy óriási méretű, gyakorlatilag *úszómedence* nagyságú tankban helyezték el mintegy 400 ezer liter (!) tetraklór-etilént, C_2Cl_4 -t. A kívülről érkező antineutrínók a Cl-atomokat átalakítják 35 napos felezési idejű, radioaktív Ar-atomokká. Ezeknek az aktivitását kell megmérni. Technikailag ez rendkívül nehéz és bonyolult folyamat: nagyon nagy mennyiségű folyadék-ból kell kinyerni néhány atomot. Davis úgy oldotta meg a kérdést, hogy mintegy 5000 liter He-ot buborékolatott át a medencén, és ekkor a keletkezett Ar-t a He-gáz magával ragadta. A He–Ar keverékből 78 K-en aktivált faszénben nyelette el az argont, amelyet később melegítéssel eltávolított, megtisztított, és ekkor kezdődött az aktivitás mérése.

Végső fázisként az argonmintát egy kis – 1,2 cm hosszú, 0,3 cm átmérőjű – proporcionális számlálócsőbe juttatta, és megmérte az ^{37}Ar radioaktivitását. Lenyűgöző a kontraszt az úszómedencényi folyadék és a végtermékként kapott kis mennyiségű argon között. Ez mutatja a választott technika nehézségét. Meglepő, hogy az egész folyamat hatásfoka nagyobb, mint 95%. Mivel csak néhány radio-

aktív atommag kimutatásáról van szó, rendkívül komolyan kellett védekeznie a háttér ellen. Ezért alacsony háttérű mérőberendezést használt, azaz a számlálócsövet antikoincidenzába kapcsolt protoporcionális számlálók gyűrűjében helyezte el, ezt pedig egy nagy NaI(Tl)-kristállyal vette körül, amely ugyancsak antikoincidenzába volt kapcsolva. A mérőberendezés felépítése mintegy 600 ezer dollárba került.

Az Ar számlálásának a hatásfoka a teljes csúcsra számolva 46% volt. A háttér származhat kozmikus sugárzási müonokból, gyors neutronokból, amelyek a környező sziklafalakban válhatnak ki magreakciót, és származhat végül magában a folyadékban lévő radioaktivitásból. Háttéreffektusok léphetnek fel a kőzetben lévő urán- és tóriumatomok spontán hasadásának következményeként is. Figyelembe véve az összes lehetséges háttéreffektusokat, kimutatható, hogy a fenti kísérleti feltételek mellett a szoláris neutrínó által létrehozott tiszta effektus nagyobb, mint a háttéreffektusok összege, és a tiszta effektus napi 6–8 eseményekre becsülhető.

Több hónapos mérés eredményeképpen azt kapta, hogy naponta

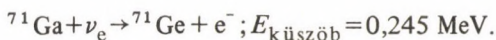
$$0,34 \pm 0,06 \text{ } ^{37}\text{Ar}$$

atom keletkezik. Ha bevezetjük az SNU nap-neutrínó egységet (Solar Neutrino Unit), ami megfelel másodpercenként 10^{-36} neutrínó

befogásának egy ^{37}Cl -atomon, akkor a fenti érték $1,8 \pm 0,7$ SNU-ra tehető.

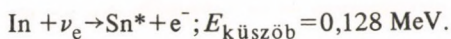
A kísérletileg kapott eredmény kevesebb mint harmadrésze az elméletileg vártnak. Az elméletileg várt alatt az értendő, hogy kiszámolták a Napban végbemenő termonukleáris reakció nyomán létrejövő neutrínók számát. Ez természetesen több hipotézistől függ, és a különböző neutrínót termelő folyamatok nem egyforma súllyal esnek latba. Az eltérés egyik oka lehet az, hogy az alkalmazott Cl-magreakció csak bizonyos neutrínóenergia feletti küszöbnél jelez neutrínókat, nevezetesen, ha energiájuk nagyobb mint $0,814$ MeV.

Éppen ezért felmerültek újabb elképzelések a napneutrínók kimutatásával kapcsolatban, amelyek más, alacsonyabb küszöbenergiájú reakciókat használnának. Az egyik ilyen reakció a következő:



Jelenleg több helyen folynak ilyen vizsgálatok [pl. Bakszánban (Kaukázus), NSZK–Olaszország kollaborációban].

Egy másik lehetőség:



(A * jelzi, hogy gerjesztett állapotú Sn keletkezik.) Ez a reakció egészen jellegzetes, egyéni jelet ad: egy azonnali 128 keV energiájú elektront és $3,3 \mu\text{s}$ -mal később egyidőben egy 126 és egy 498 keV energiájú gamma-sugarat.

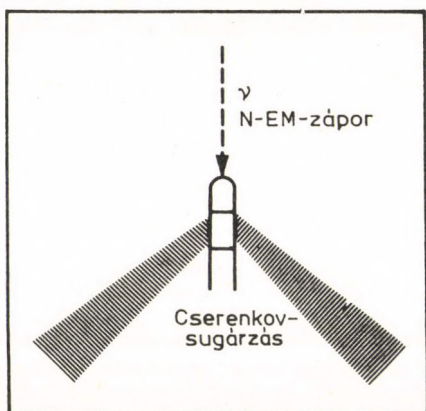
Lehetséges, hogy a különbséget nem a külsőenergia okozza, hanem pl. a neutrínóoszilláció vagy más folyamatok, de az is lehetséges, hogy ez tényleges különbség, és ez esetben a Napban lezajló folyamatok elméletének átdolgozására van szükség.

IV. NEUTRÍNÓK DETEKTÁLÁSA MÉLYVÍZBEN

E gondok körüli diszkussziók során merült fel először az az egyszerűségében is lenyűgöző elképzelés, hogy miért ne használhatnánk fel az óceánok vizét detektoranyagnak és egyben a zavaró háttér elleni védelemnek is, hiszen az óceánok (vagy nagy tavak) vize ingyen áll rendelkezésünkre, gyakorlatilag korlátlan mennyiségben. A kérdések kérdése természetesen az, hogy hogyan lehet detektálni a neutrínó kölcsönhatását az óceán (tó) vizében. Erre két, első hangzásra meglehetősen bizarr megoldás állhat rendelkezésünkre:

a) A neutrínó-kölcsönhatásnál keletkezett nagy energiájú másodlagos töltött részecskék egy speciális, ún. *Cserenkov-sugárzást* keltenek. Ha valamilyen töltött részecskének a sebessége egy adott közegben, jelen esetben a vízben, nagyobb annál, mint a fénysebesség az illető közegben, akkor a részecske mozgása közben kúp alakban kékes fényt bocsát ki. Ezt nevezzük felfedezőjéről Cserenkov-sugárzásnak. Ezt a kék fényt fotoelektron-sokszorozókkal észleljük. Az 5. ábrán láthatjuk a neutrínó által kiváltott nukleáris (N) és elektromágneses (EM) zápor (ill. záporrészecskék) által keltett Cserenkov-sugárzás kialakulását.

b) A neutrínók kölcsönhatásánál olyan nagy energia szabadul fel, hogy mikrorobbanás megy végbe az óceán vizében, s ez hanghullámot kelt,

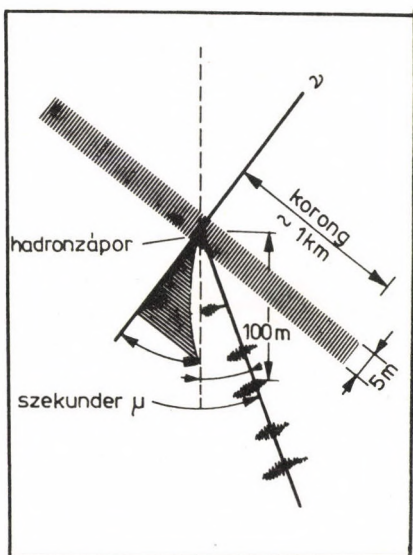


5. ábra: A neutrínó-kölcsönhatásnál nukleáris (N) és elektromágneses (EM) zápor alakul ki. E záporok nagy energiájú elektromosan töltött részecskéi nagyobb sebességgel haladnak az óceán vízében, mint a fény, és ezért egy kúpszögben kék Cserenkov-sugárzás alakul ki (vonalkázott rész).

amely *akusztikus* eszközökkel, pl. vízálló mikrofonok (hidrofonok) sorozatával detektálható. Az akusztikus módszer alapelvét a 6. ábra illusztrálja: a hang egy, a neutrínó pályájára merőleges, kb. 1 km sugarú, 5 m vastagságú korongban terjed. Ezen a lapos korongon belül tárolódik az akusztikus energiának a döntő része.*

Mindkét megoldásnál elvben bármilyen nagy víztömeg számításba jöhet, de természetesen vannak más szempontok, amelyek bizonyos óceánrészeket vagy tavakat előnyben részesí-

*Mind az optikai, mind az akusztikai jelenség fellépését gyorsítók segítségével előállított neutrínókkal igazolták.



6. ábra: A neutrínó-kölcsönhatásnál nagy energiájú másodlagos részecskék keletkeznek, és ezek a neutrínópályára mérőlegesen, mintegy 1 km sugarú, 5 m vastagságú korongban akusztikus hullámokat keltenek.

tenek. Így pl. érthető módon igen nagy jelentősége van annak, hogy az óceán olyan részén vagy olyan tóban végezzük a méréseket, amely egyrészt elég mély (a háttér csökkentése érdekében), másrészt a vize nagyon átlátszó. Ilyen szempontból a Csendes-óceán Hawaii melletti partrésze jöhet számításba, ahol mindössze 64%-os fényintenzitás csökkenés észlelhető 25 m-es távolságban. Ugyanakkor a vulkanikus eredet következtében a tenger partja itt hirtelen mélyül, és lehetővé teszi, hogy a mérőberendezés viszonylag partközelen lehessen. Egy

másik lehetőségként az igen tiszta Bajkál-tó vagy pl. a Kazahsztánban található Isszik-Kul-tó merül fel. Az alábbiakban e három lehetőség megvalósításának – a megvalósulás különböző szintjein álló – terveivel foglalkozunk.

1. A DUMAND-projekt

A Csendes-óceán Hawaii melletti részében való neutrínódetektálás tervének a neve DUMAND, ami az angol elnevezés rövidítéséből született: *Deep Under Water Meson and Neutrino Detector*, azaz mélyvíz alatti mezon- és neutrínódetektor. Az első rendkívül ambiciózus elképzelések szerint – amelyeket a Honolulu-i egyetemen dolgoztak ki – több mint 100 ezer fotoelektron-sokszorozót kívántak elhelyezni egy köbkilométeres kocka virtuális rácspontjain. Majd az egész elrendezést mintegy 5 ezer méter mélyen az óceánba süllyeszteni. A technikai nehézségek elképzelhetetlenül nagyok: ilyen nagyszámú fotoelektron-sokszorozó megbízható működtetése, az ehhez szükséges néhány ezer voltos feszültség víz alatti biztosítása, a keletkezett rengeteg elektromos jel zavarmentes felszínrehozatala, – mind kihívást jelentenek a modern elektronika tervezőinek. Ugyanakkor figyelembe kell vennünk, hogy a fotoelektron-sokszorozók sem lehetnek a laboratóriumban használt megszokott, közönséges típusok: hiszen igen nagy

nyomás nehezedik rájuk a tenger felszíne alatt 5 ezer méterrel, amelyet a nagy katódfelületüknek üzembiztosan ki kell állni. Külön gondot jelent a tengervíz mozgása, a különböző áramlatok, de különösen a vihar, amely azzal fenyegethet, hogy szétszakítja az egész láncot. Fizikai mérésekben teljesen szokatlan jellegű háttér is jelentkezik: gondoljunk pl. a világító vízi élőlényekre.

Ha az optikai megoldást választjuk, akkor a Cserenkov-fény irányítottsága elvben lehetővé teszi a bejövő neutrínók irányának meghatározását. Ezen információ kinyerése érdekében a fotoelektron-sokszorozók jeleit on-line kell feldolgozni a számítógépek segítségével. Ha az akusztikus módszert választjuk, akkor a különbség csak az, hogy a fotoelektron-sokszorozók helyére hidrofonok kerülnek. Ebben az esetben a háttér az óceánban fellépő különböző zajok okozzák, amelyek lehetnek biológiai vagy termikus eredetűek. Kiválthatja őket erős esőzés, szél, mikro földrengés stb. is.

Majdnem 10 évvel ezelőtt kezdett hozzá kb. 100 kutató (fizikus, csillagász, mérnök, óceánográfus stb.) a kísérleti terveknek a kidolgozásához. A várható költség nagyságrendben 100 millió dollár. Egyelőre lényegesen szerényebb, 5 millió dolláros modellkísérlet kivitelezésével foglalkoznak: néhány detektort kívánnak leengedni a tenger vizébe. Sajnálatos módon az első próbálkozások sikertelenül végződtek: két esetben (amely két próbálkozást

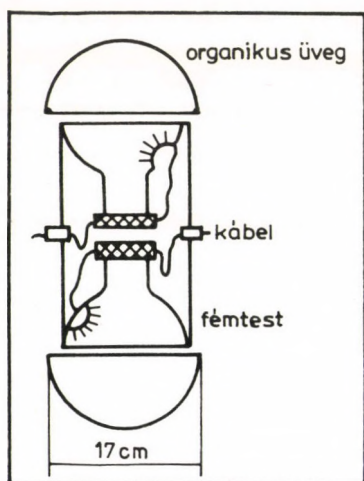
elég nagy időszak, kb. 1 év választott el egymástól) szakította el az erős hullámzás a kábeleket, és vesztették el örökre a fotoelektron-sokszorozókat. Ez a két balszerencsés eset különös élességgel világítja meg e kísérlet rendkívüli technikai nehézségeit, és egyben rámutat arra, hogy a kísérlet legkényesebb pontja a fotoelektron-sokszorozók vízbe való *telepítése*. Ez az a kérdés, aminek megoldásával úgy tűnik a legnehezebb megbírkózni.

2. A Bajkál-kísérlet

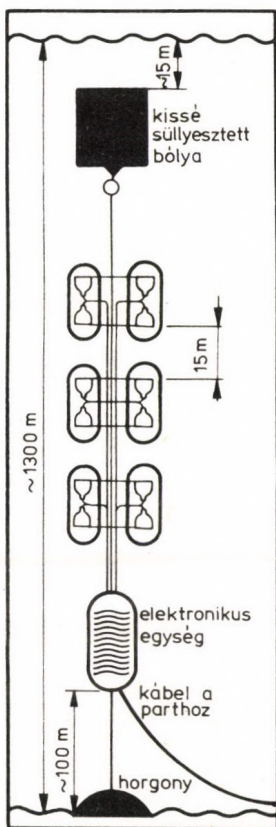
A Szovjetunió elvben résztvevője a DUMAND-kísérletnek, bár gyakorlatilag ebben a kérdésben néhány közös megbeszélésen túlmenően semmi sem történt. A jelenlegi politikai atmoszféra nem kedvez e szovjet–amerikai közös kísérleteknek (sem). Ugyanakkor a szovjet fizikusok hozzákezdtek a közelmúltban egy hasonló detektor felépítéséhez, amelyet a Bajkál-tóba telepítenének. A Bajkál-tó mélysége természetesen jóval kisebb (a maximum 1620 m), és ez bizonyos hátrányt jelent a háttér csökkentése szempontjából. A víz átlátszósága jó, de némileg elmarad a Hawaii melletti vizek átlátszóságától. Ugyanakkor a megoldásnak van egy lényeges előnye, s ez a telepítés – amely mint láttuk a legkényesebb pont – kérdésének elegáns, egyszerű megoldása: *a telepítés ugyanis a Bajkál-tó jegéről történik.*

Ez olyan momentum, amelyről érdemes egy kicsit részletesebben beszélni. A szibériai hidegben a Bajkál-tó vizét teljes egészében vastag jégpáncél borítja. A legvastagabb, mintegy 70 cm-es jég február végére, március elejére alakul ki. (Ez az időbeli eltolódás a hőmérsékleti minimumhoz képest azzal magyarázható, hogy egy ilyen mély tó vizének teljes lehűléséhez az állandó keveredés és természetes hőáramlás miatt hosszabb időre van szükség. A legnagyobb jégvastagság kialakulása tehát időben később van, mint a legnagyobb hideg.) Ebben az időszakban a Bajkál-tavon mintegy 5 km-re a parttól egy kb. 1 m × 1 m méretű léket kell vágni, és ezen a léken át leengedni a detektáló fotoelektron-sokszorozókat. A kísérlet elvégzésének a helyénél az elérhető legnagyobb mélység 1300 m körüli. A fotoelektron-sokszorozók leengedése után a szükséges kábeleket le lehet fektetni a jég tetejére, majd speciális, nagyon egyszerű eszközzel rést vágni a jégen egészen a partig, és leengedni a kábeleket a tó fenekére. Ily módon ezzel a rendkívül egyszerű megoldással gyakorlatilag olyan körülmények között lehet végezni a telepítést, mint amelyek a földi körülmények között uralkodnak, nem fenyeget tehát az óceán hullámai okozta kábelszakadásnak a veszélye. Ugyanakkor, ha egyszer megtörtént a telepítés, a jég elolvadása után is a helyén marad és működőképes lesz a berendezés (bóják).

Az első kísérletet 1984. március elején kezdtük el. A moszkvai Magfizikai Kutatások Intézetében alakult egy csoport, amely ezzel a feladattal foglalkozik. A későbbiek során a csoport létszámát mintegy 100 főre fogják emelni. A csoport kidolgozta a fotoelektron-sokszorozók modulját: egy modulban két fotoelektron-sokszorozó foglal helyet (7. ábra). A modulon belül kb. fél atmoszféra nyomású száraz gáz van azért, hogy a víz nagy nyomása segítsen összetartani és vízmentesen megőrizni a modult. A használt fotoelektron-sokszorozó szovjet gyártmányú; átmérője 17 cm. A későbbiek során felmerült speciális, nagyobb fotokatód-átmérőjű elektronsokszorozók kidol-



7. ábra: Két fotoelektron-sokszorozóból álló modul elvi vázlata.

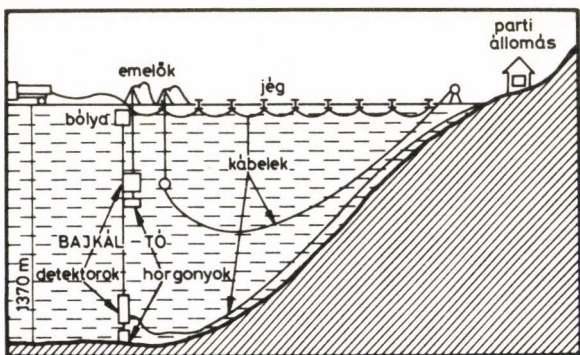


8. ábra: A jelenlegi – hat modulból álló – mérőberendezés telepítése a Bajkál-tó vizébe.

gozása vagy megvásárlása. A hat modul három párt alkot; ez az a berendezés, amely az első fizikai mérést elvégezte. Két-két modult merev összeköttetéssel kapcsoltunk össze. Ezek a modulok csak akkor adnak jeleket a felszínre, ha egyidőben ad a két modul elektromos

jelet, tehát a jelzésnek valóban egy közös oka volt, azaz koincidencia lépett fel. Az egész berendezést alulról egy horgony húzza le a tó fenekéhez, felülről pedig egy bója merevíti ki (8. ábra). A bóját valamivel a víz felszíne alatt érdemes elhelyezni, hogy a felületi, szél okozta hullámvás kevésbé mozgassa az elektronsokszorozók füzérét. A közös elektronikus egységből a kötélkabel a mintegy 5 km-re levő partra vezet, ahol a központi elektronikus berendezések vannak (9. ábra).

Az első szerény, tapogatózó jellegű mérést 12 fotoelektron-sokszorozóval végeztük el, és a berendezés, a technika kipróbálása mellett meghatároztuk a hidrológusokkal együttműködve a tó vizének átlátszóságát. Érdekes jelenséget tapasztaltunk: vannak a Bajkál-tóban olyan mikroorganizmusok, amelyek enyhén



9. ábra: Két hatmodulos mérőberendezés kábelének a tó fenekére való lefektetése, az egyik a behelyezés közben, a másik a végleges állapotban.

világítanak. Erről a biológusok ez ideig nem tudtak, úgyhogy melléktermékként egy új limnológiai eredmény is született. Ez a világítás természetesen a fizikusok szempontjából nem öröm: némileg növeli a háttérrel. Ez a gond azonban feltehetőleg leküzdhető.

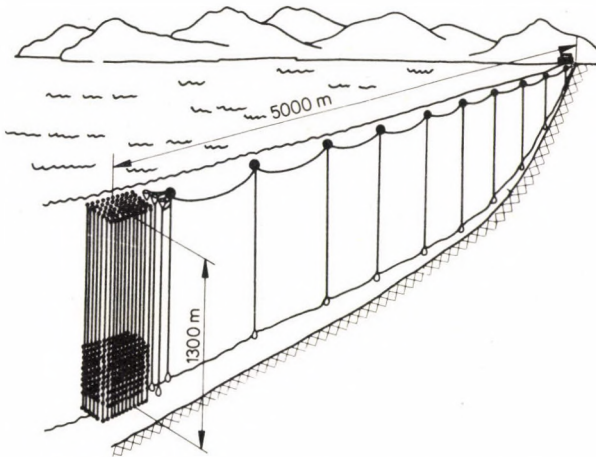
Az első mérést egyben felhasználtuk egy fontos fizikai probléma vizsgálatára is. Dirac, Nobel-díjas elméleti fizikus azt állította, hogy ahogy van külön pozitív, illetve negatív elektromos töltés, ugyanúgy léteznie kell külön elemi északi, illetve déli mágneses sarkoknak, azaz mágneses *monopólusoknak* is. Ezek a monopólusok egyébként nemcsak Dirac elméletéből következnek, hanem létüket megkívánja az elektromágneses, gyenge és erős kölcsönhatásokat egyesítő Nagy Egyesítési Elmélet is. Nagy jelentőségű tehát annak a vizsgálata, hogy valóban léteznek-e ilyen monopólusok. Ez ideig kimutatásuk nem sikerült. A monopóluskutatás többször kapott impulzusszerű új lendületet, eddig azonban eredmény nem született.

Az egyik új felívelő periódus akkor kezdődött, amikor felmerült az a lehetőség, hogy a Nagy Egyesített Elmélet következményeképpen a protonok nem stabilisak, hanem igen nagy felezési idővel (kb. 10^{31} – 10^{32} év) elbomlanak. Figyelembe véve az elmélet rendkívül fundamentális fontosságát, a világon mintegy tucatnyi helyen építettek óriási berendezéseket a proton esetleges (rendkívül ritka)

bomlásának a kísérleti igazolására. Az említett moszkvai intézet egyik elméleti fizikusa kidolgozott egy új elméletet [5], amely szerint a monopólusok mintegy „katalizálni” tudják a protonok radioaktív bomlását, ha az egyáltalán létezik. Ha tehát a világűrben jönnek és a Bajkál-tó vizébe jutnak monopólusok, ezek elősegíthetik a tóban lévő protonok bomlását, és a bomlástermékként keletkező elektromosan töltött részecskék meglehetősen intenzív Cserenkov-sugárzást adnak. Ez pedig az előzetes számítások szerint már ezzel a 12 elektron-sokszorozóból álló egyszerű berendezéssel is regisztrálható. A kísérletet elvégeztük: az első, előzetes eredmények negatívak voltak. Azonban gyakran a negatív eredmény is fontos eredmény. Jelen esetben az eredmény negatív volta azt jelezheti, hogy a három feltevés közül legalább az egyik nem igaz: vagy nincsenek monopólusok (azaz nem igaz a Dirac-féle elmélet), vagy ha vannak is, nem katalizálnak (azaz nem igaz a Rubakov-elmélet), avagy a proton nem bomlékony (tehát nem érvényes a Nagy Egyesítési Elmélet, legalább is annak legegyszerűbb változata).

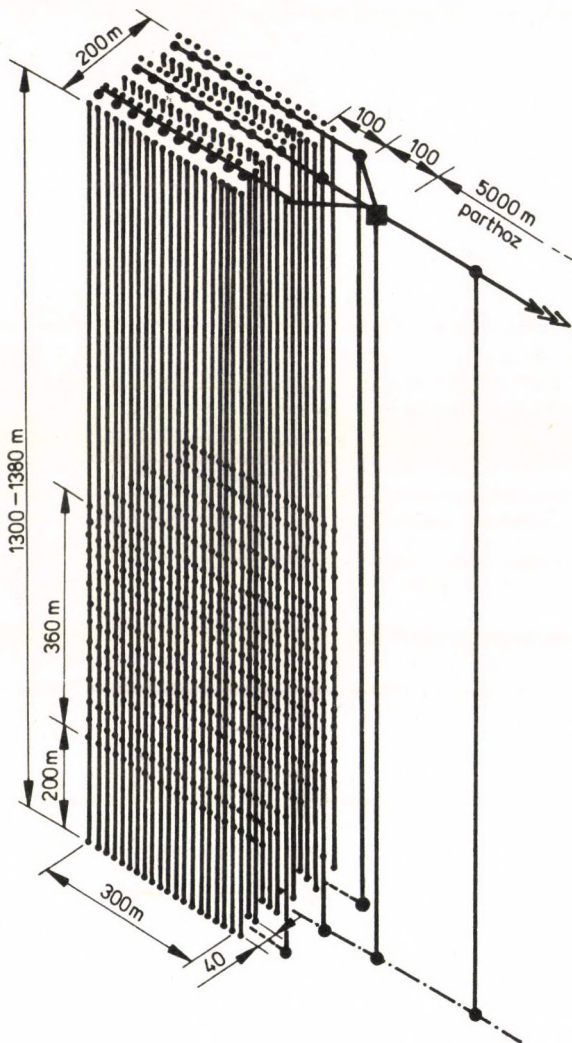
Végül is, mint ilyenkor szokásos, a negatív eredményeket úgy fogalmazzuk meg, hogy megadtunk egy felső határt az esetleg létező monopólusok intenzitására, aminél az csak kevesebb lehet. Ez a határ [6]:

$$I_m \leq 6 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}.$$



10. ábra: A többmodulos mérőberendezés és a tó fenekére lefektetett kábel végleges elrendezésben.

A későbbiek során a 12 elektronsokszorozó kevés lesz, és ezért már most azon dolgozunk, hogy sok hálózatszerűen összekapcsolt modulból álló rendszert alakítsunk ki (10. és 11. ábra). Az elképzelések szerint kb. 3 év alatt sikerül 100 modult felépíteni. És nemcsak többet gyártunk a már ismert modulból, hanem egyidejűleg keressük a tökéletesebb – pl. a kisebb súlyú modulokból álló – megoldásokat is. A végleges berendezés mintegy 10 ezer (szerényebb, de sokkal reálisabb, mint a DUMAND-projekt) modulból fog állni, és a mérések akár 10–15 éven át is tarthatnak. A kísérlet költségei azonban – az ilyen jellegű más kísérletekhez viszonyítva – nem túlságosan nagyok.



11. ábra: A mérőberendezés továbbfejlesztése: girlandok kialakítása.

3. A BATISSZ-kísérlet

Kirgiziában a Tien-San hegységben 1609 m magasan helyezkedik el az igen átlátszó vizű Isszik-Kul-tó, amelynek a maximális mélysége 700 m, vize gyengén sós. A tó sohasem fagy be. A mélyvizű rész kb. 4–8 km-re van a parttól.

A tóban a Cserenkov-fény kb. 17 m távolságban csökken a felére. Mintegy 300 detektort akarnak elhelyezni egy kb. 4 köbkilométeres kockában; minden detektor 2–3 fotoelektron-sokszorozót tartalmaz.

Ennél a kísérletnél felhasználhatják az Univerzumból jövő neutrínókat, és vizsgálhatják ugyanazokat a fizikai problémákat, amiket pl. a Bajkál-kísérletnél. Ugyanakkor felmerült egy másik lenyűgöző gondolat. Az Egyesült Államokban, Batáviában (Chicago mellett) lévő, jelenleg a világon a legnagyobb energiájú gyorsító neutrínónyalábját úgy irányíthatnák a Föld alá, hogy az a *Földön keresztülhatolva* éppen e tóban bukkanjon fel újra. A neutrínónyaláb a Föld ún. középső zónájában halad, nem érinti azonban a Föld legbelső magját: mintegy 5 ezer km-re haladna el a Föld centrumától. Ez azt jelenti, hogy a neutrínók kb. 10 ezer km-t tennének meg a Földben. (A neutrínók rendkívül kis hatáskeresztmetszete következtében ilyen óriási távolság megtétele közben is csak mintegy 0,1%-os intenzitásvesztéséget szenvednek!)

A gyorsító minden 17. s-ban ad neutrínókat, ami rendkívül előnyös a mérés szempontjából, hiszen az összes háttér (műonok az Univerzumból, neutrínók a Napból, a természetes radioaktivitás stb.) időben egyenletesen oszlik el, míg a vizsgálni kívánt jelenség egy rövid időtartamra koncentrált.

A kísérlet nevét a *Batavia* és az *Isszik-Kul* összevonásából kapta: **BATISSZ**. Ez a szovjet–amerikai tudományos együttműködés egyik legszebb példája lenne, ha sor kerülne rá. Jelenleg ugyanaz mondható el, mint a **DU-MAND**-kísérletben való szovjet részvételről: a jelenlegi amerikai politikai vezetés magatartása nem kedvez ilyen jellegű együttműködéseknek.

4. Mit adhatnak nekünk a víz alatti neutrínókísérletek?

E cikkben a szerző érdeklődésének megfelelően elsősorban a detektálástechnikai megoldásokról beszélt, amelyekről úgy véli, tele vannak fantáziadús elképzelésekkel. Reméli, hogy sikerült megéreztetni az olvasóval is e feladatok szépségét és egyben bonyolultságát. A detektorok önmagukban azonban csak eszközök, velük fizikai információkat kívánunk nyerni. Erről részleteiben e cikkben nem kívánunk beszélni, csak a teljesség kedvéért említünk meg néhány lehetőséget.

A legtöbb esetben azt a tényt használják ki, hogy míg a többi sugárzás lényegileg felületi, a

neutrínósugárzás térfogati (a nagy áthatolóképesség miatt), és így valamely objektum teljes *térfogatáról* képes információt adni.

a) *Asztrofizika, csillagászat.* A neutrínó rendkívül kicsi hatáskeresztmetszete, amely mint láttuk, igen komoly detektálási nehézséget okoz, ugyanakkor a fizikai problematika szempontjából néha különösen értékes tulajdonság. Az eddigi, naprendszeren kívüli objektumokra vonatkozó ismereteink, mind a foton detektálásán alapulnak – a foton szót tágabban értelmezve: beleértve nemcsak a látható fényt, hanem az ultraibolya- és a röntgensugárzást is. A neutrínó a fotonnal ellentétben olyan részecske, amely az Univerzumban haladva, anyagtömeggel találkozva nem abszorbeálódik, nem szóródik, tehát információt hoz számunkra. Létre lehet hozni *neutrínóteleszkópot*. Vizsgálhatjuk fiatal szupernovák belsejét, ami eddig nem volt lehetséges, mert az első kb. 6 hónapban a centrumban lévő neutroncsillag által kibocsátott protonburok elnyeli a fotont, – de nem nyeli el a neutrínót! Kettős csillagok esetében a neutroncsillagok sugárzása a társcsillag felületéről anyagot párologtat el. Ez az elpárologtatott anyag és maga a társcsillag leárnyékolhatja a kölcsönhatási zónát. Mégint csak a neutrínó az, amely kijuthat és hozhat magával információt.

Kísérletileg ez ideig nem egyértelműen eldöntött esetleges nagyobb mennyiségű *anti*-anyag jelenlétének, ill. hiányának az Univer-

zumban való kimutatása. A fotonok révén antianyag létezéséről keveset tudhatunk meg, mert a foton és antifoton identikus. A neutrínó és antineutrínó azonban tulajdonságaiban eltér egymástól (ellentétes a helicitásuk*), ezért a neutrínóteleszkóp segítségével elvben egyértelmű feleletet kaphatunk arra a kérdésre, hogy vajon az Univerzumnak vannak-e antianyagból felépített részei.

Külön érdekes, izgalmas kérdés, hogy az űrből származó kozmikus neutrínók eloszlása *izotrop-e* vagy pedig valamilyen irányítottságot mutat, azaz van-e valamilyen forrásuk, ahonnan származnak.

b) *Részecske- és magfizika.* A neutrínókísérletek segítségével megoldhatók részecske- és magfizikai problémák is, és itt elsősorban arra lehet gondolni, hogy a legnagyobb rendelkezésünkre álló részecskegyorsító energiája is sok-sok nagyságrenddel elmarad attól, mint amilyen energiájú neutrínók a kozmikus sugárzásban találhatóak. De nemcsak a jelenlegi, hanem a tervezés alatt álló gyorsítók családja is messze elmarad (tervezett) energiában a kozmikus energiák mögött. Így tehát, bár kétségtelenül a gyorsítók adta neutrínónyaláb jobban kéz-bentartható, és jóval nagyobb az intenzitása, van egy olyan energiatartomány, amely csak kozmikus neutrínók segítségével hozzáférhető.

*A neutrínó spinje és haladási iránya ellentétes, azt mondjuk „balkezes”, a H helicitása -1 . Az antineutrínónál fordítva van.

Ezenkívül soha nem lehet kizárni, hogy fel-
lépnek olyan jelenségek a kozmikus neutrínókkal, amelyekre ma még nem gondolunk és nem is gondolhatunk. Ilyen pl., hogy felfedezünk új, még nem ismert elemi részecskéket is, vagy ha léteznek elméletileg megjósolt nehéz neutrínók, akkor ezek esetleg elbomlanak könnyű neutrínókra, és így elképzelhető, hogy detektálhatók.

c) *Geofizikai és geodéziai problémák.* A BATISSZ-kísérletben több geofizikai problémát meg lehet oldani, hiszen a neutrínó mintegy „átvilágítja”, „megröntgenezí” a Föld belső rétegeit (12. ábra), és olyan információt hoz ezekből a rétegekből, amelyek semmilyen más módon nem hozzáférhetőek. A kísérletben megmérhetjük a Föld két, 10 ezer km távolságban lévő részének a pontos távolságát is.

Elvben elképzelhető, hogy a Föld méhében rejlő, eddig ismeretlen szénhidrogén és ásványi kincsek lelőhelyeit sikerül felderíteni és meg-



12. ábra: A Föld „átvilágítása” neutrínókkal – geológiai és geodéziai célokból.

határozni. Ez utóbbira egy Nobel-díjas fizikus (S. L. Glashow) részvételével* már konkrét terveket is dolgoznak ki, és ennek a megvalósítása nem teljesen reménytelen, hiszen az új lelőhelyek felfedezésének reményében, gazdag olajtársaságok, „olajmultik” támogatják. A megvalósításhoz szükséges 2–3 milliárd dollár fantasztikusan nagy összegnek tűnik, azonban a multik esetében talán nem is olyan elképzelhetetlenül nagy. Gondot legfeljebb az okozhat, hogy akik a pénz előteremtésén dolgoznak, rendszerint nem fizikusok. A javaslatot fantazmagóriának vélhetik, ami a tudományban és a tudománnyal szemben amúgy sem ritkaság.

Nos, az előzőekben próbáltunk felvillantani néhány olyan mérési elképzelést, amelyek ma még vagy nem tartoznak a megvalósult realitások birodalmába, vagy éppen csak most kezdték el életüket, és amelyektől az emberi tudás lényeges, fundamentális kiszélesedését, elmélyülését várhatjuk, azonban nem kizárt – hiszen az emberiség története ezt tanítja –, hogy előbb-utóbb az absztrakt alapkutatói eredményekből, a „Nagy Tudomány” eredményeiből néhány a pillanatnyi technikai gyakorlat, műszaki fejlődés szolgálatába állítódik. Mindenesetre a tudomány, ezen belül a fizika, a részecske- és a neutrínófizika még sok izgalmas

*Marx György ötletére és elképzeléseire alapozva.

és szép felismeréssel, felfedezéssel kecsegtet bennünket.

Valószínűnek látszik, hogy a neutrínó segíteni fogja a jövőben is a fizikusokat és a csillagászokat abban, hogy a természet alapvető jelenségeit kutassák mikroszkopikus és galaktikus dimenziókban, és információkat fog szolgáltatni ma még ismeretlen folyamatokról a Nap belsejében, a csillagokban vagy a végtelen Univerzum mélyében. A neutrínó és az Univerzum, vagyis a „legkisebb” és a „legnagyobb” között igen sokszálú a kapcsolat. Egyszer talán a kutatás tárgyából és eszközéből az ember szolgálatába fog állni, hasonlóan a fotonhoz, a fény hordozójához, hasonlóan az elektronhoz, amely az elektromos áramot szállítja vagy a neutronhoz, a magenergia kulcsához. A neutrínó diadalútjának még nincs vége!

V. NÉHÁNY TUDOMÁNYPOLITIKAI MEGJEGYZÉS

A neutrínófizika (és általában a kísérleti részecskefizika) par excellence alapkutató: a teljesen elvont alapkutatóaktól a műszaki fejlesztésig terjedő ív egyik extrém pontjában foglal helyet. A szélesebb értelemben vett alapkutatókban is különleges a kísérleti részecskefizika és így a neutrínófizika helyzete: néhány különlegességgel rendelkezik, amely általában eltér a többi alapkutatótól. (A teljesség kedvéért megjegyezzük, hogy bár viszonylag kevés ilyen terület van, de a részecskefizika mégsem áll egyedül ebben a vonatkozásban.) Az alábbiakban inkább csak jelzésszerűen szeretnék megemlíteni néhányat az ilyen típusú jellegzetességek közül:

1. A kísérleti részecskefizika művelése igen *költséges*, ami megkülönbözteti az alapkutatók többi ágától. Az esetek nagy részében (de láttuk, nem mindenütt) az egyik alapeszköz a gyorsítóberendezés. Egy modern gyorsítóberendezés létesítésének költsége néhány száz millió dollár, ill. rubel körül mozog; a legújabb rekord paraméterekkel rendelkező – tervezés alatt álló – gyorsító becsült költsége a 3 milliárd dollárt is meghaladja. Ugyancsak a szokásosnál lényegesen többbe kerülnek az egyes mérőberendezések is. Ezeknek a költsége a 100 millió dolláros határt súrolja.

2. A részecskefizikai mérőberendezések általában méretükkel (több száz méter), súlyukkal (több ezer tonna) és *bonyolultságuk* igen magas fokával tűnnek ki. Megtervezésük, létrehozásuk és üzemeltetésük olyan körülményeket igényel, amelyek sokban hasonlítanak az iparban levőkéhez.

3. Éppen a kísérletek és a kísérleti berendezések bonyolultsági fokának rendkívül magas volta miatt, a kísérletek elvégzése a megszokottnál lényegesen nagyobb számú kísérleti fizikus koherens együttműködését teszi szükségessé: a kísérleti részecskefizikai projektekben *részt vevők* (és így a publikációkban szerzőként szereplők) *száma általában meghaladja a százat*. Ez bizonyos „szociológiai” gondokat vethet fel mind emberi relációkban, mind a tudományos díjak odaítélésében, az egyes résztvevők szakmai minősítésénél, a scientometriai megítélésben, pályázatok elbírálásánál stb.

4. *Egy-egy publikáció időtartama* a gondolat felmerülésétől a publikáció beküldéséig gyakran *8–10 évet vesz igénybe*. Ez teljesen sajátos és nem könnyen elfogadható helyzetet teremthet, különösen a kezdő, fiatal kutatók körében. Gondot okozhat ez a hazai rendszerben a diplomamunkások, a kutatóképzésben résztvevők, doktoranduszok felvételénél is.

Az ilyen nagy kísérleteknek a megtervezése, megszervezése és a kollektíva egybetartása, vezetése, a felmerülő problémák megoldása a szokásosnál nagyobb mértékű szervező (és köz-

leti) munkát igényel. Ez viszont elsősorban az idősebb, tapasztaltabb, vezető állású kísérleti részecskefizikusok számára jelenthet problémát.

Mind a kétféle típusú gondot nagy mértékben kompenzálja a felvetődött probléma általában rendkívül *fundamentális*, természettudományos világképünket alapvetően befolyásoló jellege, a kísérletek minden egyes fázisának különös érdekessége, kreativitást igénylő volta és az elért eredmény általában nagy nemzetközi visszhangot kiváltó jellege.

5. Felmerülhet ezek után, hogy *egy magyar kísérleti részecskefizikusnak milyen lehetőségei vannak*. Természetesen elvben a lehetőségek közé tartozik az, hogy Magyarországon nem foglalkozunk kísérleti részecskefizikával. Minden bizonnyal van szubjektív elfogultság is abban, hogy erre azt válaszolom, hogy minden objektív nehézség ellenére részecskefizikával foglalkozni kell. Ezek után marad a tudományos integráció magas formájába való belépés, ami egyben azt is jelenti, hogy a nemzetközi kapcsolatainkat a szokásosnál lényegesen intenzívebben és kiterjedtebben kell alkalmazni, és lényegesen jobban rájuk vagyunk szorulva. A nemzetközi kollaboráció gyakori tartós külföldi tartózkodást tesz szükségessé, annak minden előnyével és hátrányával. Természetesen vannak a részecskefizikai kísérleteknek olyan szakaszai is, amelyek sikerrel és színvonalasan végezhetők a gyorsítóktól távoli, esetleg nem

túl nagy hazai laboratóriumokban is. Így pl. nincs helyhez kötve annak a gondolatnak a felmerülése, hogy milyen kísérletet és milyen mérési berendezéssel kellene elvégezni. Ezenkívül részt lehet venni a kísérleti berendezés egy-egy részének a megtervezésében, sőt elkészítésében is. Egy szokásos forma a kapott mérési eredmények egy részének kiértékelése, a mérési adatok részleges számítógépes feldolgozása és fizikai interpretációja.

A szokásosnál nagyobb mértékű *nemzetközi integrációnak* van egyébként a szakmai és emberin kívül politikai oldala is: a közös cél, a közösen eltöltött hosszú évek, a közös érdekelttség minden bizonnyal hozzájárul egymás jobb megismeréséhez, az előítéletek megszüntetéséhez vagy legalábbis csökkenéséhez, és ez valamilyen formában áttételesen elősegíti a béke ügyét.

Az elmondottak végső konklúziójaként azt lehet megállapítani, hogy a kísérleti részecskefizika igen jó példát mutat arra, hogy *differenciáltan és csak differenciáltan* lehet és kell megítélni az egyes tudományterületek, de ezen belül még az egyes témák helyzetét, gondjait és értékelését is.

IRODALOM

- [1] W. PAULI: Aufsätze und Vorträge über Physik und Erkenntnistheorie. F. Viewig und Sohn, Braunschweig, 1961.
- [2] ν -detector. IHEP-JINR, Dubna, 1984.
- [3] SZ. A. BUNYATOV, D. KISS et al.: Proc. of Int. Conference Neutrino'82, Budapest, 1982.
- [4] R. DAVIS: Phys. Rev. Lett., 12 (1964) 303.
- [5] V. A. RUBAKOV: JETP Lett., 644. (1981).
- [6] L. B. BEZRUKOV, D. KISS et al.: Progress Report on Lake Baikal Neutrino Experiment.

FÉNYKÉPEK





1. A folyadékszintillátort tartalmazó alumíniumhasáb.



2. A folyadékszintillátor belső falára felviendő műanyagfólia előkészítése és egy összeszerelt hasáb.



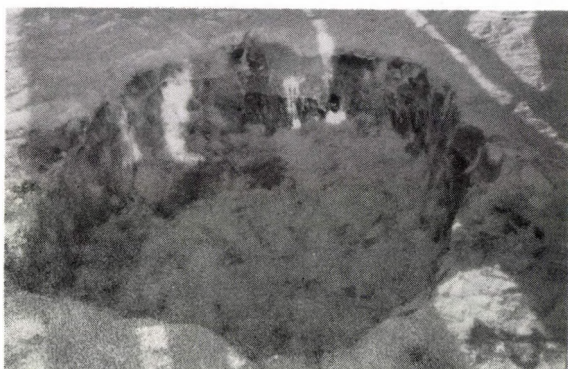
3. A neutrínódetektor műonspektrométer részének egy mágneses korongja.



4. A befagyott Bajkál.



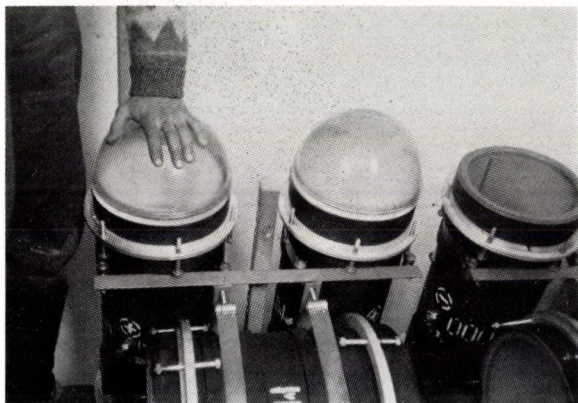
5. Lékvágás a Bajkálon.



6. Lék a Bajkálon.



7. A fotoelektron-sokszorozó leengedése a léken át.



8. Négy fotoelektron-sokszorozót tartalmazó modul.

