

laboratóriumban elvégzett mérés, amiben minden ediginél alacsonyabb energiákat sikerült elérni. Az Ősrobbanásra jellemző energiatarományban új, pontos kísérleti értékek állnak rendelkezésre, így kijelenthetjük, hogy a ${}^7\text{Li}$ probléma a ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció alapján nem oldható meg. A legújabb, nagyenergiás mérések azonban a reakcióval kapcsolatban új problémákat vetettek fel, ami kérdéssé teszi a Nap hidrogénégésére jellemző energiákra való extrapoláció megbízhatóságát. Ezért a ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció vizsgálata mind kísérleti, mind elméleti szempontból valószínűleg még hosszú ideig nem tekinthető lezártnak.

Irodalom

1. Patkós A., Frei Zs.: *Inflációs kozmológia*. Typotex, Budapest, 2005.
2. Csabai I., Purger N., Dobos L.: Az Univerzum szerkezete. *Fizikai Szemle* 57/12 (2007) 385.
3. Fülöp Zs., Gyürky Gy.: *Az elemek születése. Szemelvények a nukleáris tudomány történetéből*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2009.
4. http://en.wikipedia.org/wiki/Proton-proton_chain_reaction
5. http://hu.wikipedia.org/wiki/Neutrínódetektorok_listája
6. Gy. Gyürky et al., *Phys. Rev. C* 75 (2007) 035805.
7. a csoport honlapja: <http://www.atomki.hu/atomki/IonBeam/nag>
8. a LUNA együttműködés honlapja: <http://luna.lngs.infn.it>
9. F. Confortola et al., *Phys. Rev. C* 75 (2007) 065803.
10. A. di Leva et al., *Phys. Rev. Lett.* 102 (2009) 232502.

A NEUTRÍNÓ ÚJABB MEGLEPETÉSE

Manno István
MTA KFKI RMKI

A neutrínó már számos esetben meglepte a kutatókat. A neutrínó-hipotézis születése sem volt kivétel ezek közül a meglepetések közül. *Wolfgang Pauli* a neutrínó-hipotézist akkor vezette be, amikor egy „kétségbeesett kísérletet” tett arra, hogy a β -bomlásban sérülőnek látszó energiamegmaradás törvényét megmentse (1930. december 4.).

A Gran Sasso-i föld alatti laboratóriumban (LNGS) ν_τ tau-neutrínót észlelt az OPERA kísérlet a CERN-ből érkező ν_μ müon-neutrínó nyalábban (2010. május 31.). A kísérlet első alkalommal figyelte meg direkt módon egy olyan eseményt, amelyet tau-neutrínó okozott. Ez pedig annyit jelent, hogy a ν_μ müon-neutrínó a CERN-ből a LNGS-ig megtett útján átalakul ν_τ tau-neutrínóvá. Ebből az is következik, hogy megvalósul a neutrínó-oszcilláció és legalább egy neutrínónak zérustól eltérő tömege van. Ez pedig túlmutat a részecskék és alapvető kölcsönhatások Standard modelljén (SM), mivel az SM-ben a neutrínóknak nincs tömegük.

A részecskék és kölcsönhatások Standard modellje¹

Jelenlegi tudásunk szerint a Világmindenségről és a benne végbemenő jelenségekről a legjobb leírást a részecskék és alapvető kölcsönhatások Standard modellje (Standard Model of Particles and Fundamental Interactions – SM) adja (lásd az 1. és 2. táblázatot). Az SM az anyag néhány építőelemének (hat kvark és hat lepton, valamint ezek antirészecskéi) és a köztük létrejövő négy alapvető kölcsönhatás (erős, elektromágneses, gyenge és gravitációs) segítségével írja le a Világmindenséget, amelyben élünk. Az SM leírja azt, ahogy a részecskék egymással kölcsönhatnak és ahogy egymásba átalakulnak. Ezek a kölcsönhatások és építőelemek elegendőek valamennyi eddig felfedezett jelenség leírására.

¹ Lásd *Horváth Dezső* cikkét és a hozzá tartozó mellékletet a *Fizikai Szemle* 2008. július–augusztusi számában.

A Világmindenség eddig feltérképezett valamennyi részén ezeket az építőelemeket és ezeket a kölcsönhatásokat találjuk.

Az SM jó leírást ad a fiatal és nagyon forró Univerzumból kiindulva, amely az Ősrobbanásban keletkezett, az Univerzum jelenlegi állapotáig. Az SM jó leírást ad a parányi méretektől, a részecskék mikrovilágától, amelyet nagy részecskegyorsítókval lehet tanulmányozni a hatalmas méreteig a legjobb távcsövekkel vizsgálható égitestek világáig.

A *gravitáció* tart bennünket a Földön és a bolygókat a pályáikon. A gravitációs vonzás bármely két részecske között létezik. A gravitáció olyan kis távolságokon, mint az atom mérete a többi kölcsönhatáshoz képest

1. táblázat		
A Standard modell építőelemei		
részecskék		
I. család	II. család	III. család
kvarkok		
up u $q = +2/3$ $m = 3 \text{ MeV}/c^2$	charm c $q = +2/3$ $m = 1500 \text{ MeV}/c^2$	top t $q = +2/3$ $m = 175000 \text{ MeV}/c^2$
down d $q = -1/3$ $m = 6 \text{ MeV}/c^2$	strange s $q = -1/3$ $m = 170 \text{ MeV}/c^2$	bottom b $q = -1/3$ $m = 4500 \text{ MeV}/c^2$
leptonok		
elektron e^- $q = -1$ $m = 0,511 \text{ MeV}/c^2$	müon μ^- $q = -1$ $m = 105 \text{ MeV}/c^2$	tau τ^- $q = -1$ $m = 1782 \text{ MeV}/c^2$
elektron-neutrínó ν_e $q = 0$ $m < 15 \text{ eV}/c^2$	müon-neutrínó ν_μ $q = 0$ $m < 0,17 \text{ MeV}/c^2$	tau-neutrínó ν_τ $q = 0$ $m < 18,2 \text{ MeV}/c^2$
antirészecskék		
\bar{u} \bar{d} e^+ $\bar{\nu}_e$	\bar{c} \bar{s} μ^+ $\bar{\nu}_\mu$	\bar{l} \bar{b} τ^+ $\bar{\nu}_\tau$

2. táblázat

A Standard modell alapvető kölcsönhatásai

	erős	elektromágneses	gyenge
relatív erősség	1	10^{-2}	10^{-7}
potenciál	$\sim r$	r^{-1}	$\sim r^{-1} \cdot e^{-r/R}$ $R \sim \hbar/(M_W c)$
élettartam (s)	10^{-23} $\Delta \rightarrow p\pi$	$10^{-20} - 10^{-16}$ $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$	$> 10^{-12}$ $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}$
közvetítő bozon	8 gluon	foton	W^\pm Z^0
tömeg (GeV/c ²)	0	0	80 91

elhanyagolható. Nagy távolságokon azonban a gravitáció döntő szerepet játszik. Fontos szerepet játszik a csillagok és galaxisok kialakulásánál és fejlődésénél.

Az *elektromágneses erő* tartja össze az atomokat, köti az elektronokat az atommaghoz. A molekulákban elektromosan töltött részecskék (protonok és elektronok) vannak. A molekuláknak ez az elektromos szubstruktúrája az alapja annak, hogy kristályok jönnek létre. Az elektromágneses kölcsönhatás fontos szerepet játszik a kémiai reakciókban. Nagyon sok hétköznapi jelenség mögött az elektromágneses erők fedezhetők fel. Az anyagban elektromágneses erők akadályozzák, hogy az egyes molekulák elmozduljanak egyensúlyi helyzetükből. Ennek következménye, hogy a padló megtartja a ráhelyezett testeket, a szilárd anyagok ellenállnak a nyíró hatásoknak stb.

Az *erős kölcsönhatás*, amelyet „színerőnek” is neveznek, köti össze a kvarkokat a protonokban, a neutronokban és más erősen kölcsönható részecskékben, a hadronokban, valamint a protonokat és neutronokat az atommagokban.

A *gyenge kölcsönhatás* fontos szerepet játszik a bomlási folyamatokban, neki köszönhetjük, hogy a Nap süt és hogy a Földön kialakult az élet. A csillagok energia-termelésében a fúzió játszik szerepet, amely során hidrogénből hélium keletkezik. Ebben a folyamatban keletkeznek az alacsony rendszámú elemek is. Ezekben a reakciókban fontos szerepet játszik a gyenge kölcsönhatás, amelyben egy kvark átváltozhat egy más típusú kvarkká és egy lepton más típusú leptonná.

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS)

Az INFN² a világ legkorszerűbb föld alatti laboratóriumát hozta létre az Appenninek legmagasabb hegycsúcsai alatt.

Mint ismeretes Olaszország kitűnő autópályahálózattal rendelkezik. Autópálya halad végig mindenütt a

² INFN – Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Az INFN irányítja és finanszírozza a magfizikai és részecskefizikai kutatásokat Olaszországban.



1. ábra. Laboratori Nazionali del Gran Sasso felszíni épületei és a föld alatti laboratóriumok az autópálya-alagúttal.

„csizma” szélein és a tengerpartokon haladó autópályákat többször is autópályák kötik össze. Az 1980-as évek elején épült meg az az autópálya, amely Rómát köti össze Teramóval. Az A24-es Róma–l’Aquila–Teramo autópálya áthalad egy 10,4 km hosszú kettős alagútban az Appenninek legmagasabb csúcsai alatt, amelyet Gran Sasso d’Italiának neveznek. A föld alatti laboratórium bejárata (1. ábra) az alagút keleti bejáratától 5 kilométerre, körülbelül az alagút közepén található. Antonio Zichichi, aki az alagút tervezésekor az INFN elnöke volt, azt javasolta, hogy építsenek itt egy föld alatti laboratóriumot (1979). Nicola Cabibbo irányította a tervek elkészítését. Az olasz parlament 1982-ben hagyta jóvá a tervet és a laboratórium építésének a finanszírozását. A laboratórium építése 1987-ben fejeződött be.

E laboratórium neve Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS). Ebben a laboratóriumban a müonok fluxusa hat nagyságrenddel kisebb, mint a Föld felszínén. A laboratórium három hatalmas csarnokból áll, amelyeket A-, B- és C-termeknek neveznek. A termek magassága 20 m, hossza 100 m, szélessége pedig 18 m. A termeket biztonsági és egyéb szempontok miatt alagútrendszer köti össze. Három kis teremben, amelyek egy háromszög alakban elhelyezkedő alagutak csúcspontjaiban találhatók, van egy lézeres interfero-

méter-állomás, amely a sziklában végbemenő mozgásokat és deformációkat méri.³ A föld alatti laboratóriumokat 1400 m vastag, főleg mészkőből és dolomitből álló sziklaréteg védi a kozmikus sugárzástól. Ez körülbelül 4000 m vastag vízrétegnek felel meg. A laboratórium 963 m magasan van a tenger szintje felett. Ha l'Aquila felől hajtunk be az alagútba, az alagút felett fokozatosan nő a sziklaréteg és 6,25 kilométernél eléri az 1494 m vastagságot. A laboratórium fölött található a Campo Imperatore fennsík.⁴ A laboratóriumhoz a föld alatti termeken kívül számos épület tartozik (lásd az 1. ábrát). Ezekben az épületekben, amelyek az alagút nyugati bejáratánál vannak, található a LNGS adminisztrációja, a dolgozószobák, előadótermek, műhelyek és laboratóriumok.

Neutrínó

A neutrínó a leptonok⁵ családjába tartozó elektromosan semleges részecske. Mint az írás elején említettem, a neutrínó már számos esetben meglepte a kutatókat. A neutrínó-hipotézis születése sem volt kivétel ezek közül a meglepetések közül, hiszen Wolfgang Pauli⁶ a β -bomlásban látszólag sérülő energiamegmaradás-törvény megmentésére vezette be neutrínó-hipotézist. A neutrínó olyan gyengén hat kölcsön az anyaggal, hogy a neutrínó-hipotézis születésétől negyed évszázadnak kellett eltelnie addig, amíg *Frederick Reines* és *Clyde L. Cowan Jr.* kísérletileg kimutatták a neutrínó létezését (1956). Újabb majd negyven év elteltével, 1995-ben Reines Nobel-díjjal jutalmazták eredményéért. „Biztos vagyok benne, hogy a neutrínófizika jövője legalább olyan izgalmas és eredményes lesz, mint a múltja” – mondta Reines Nobel-előadásában.

A neutrínók a leptonok családjába tartozó stabil, elektromosan semleges részecskék, spinjük 1/2. Három elektromosan töltött leptont ismerünk: az elekt-

³ 2009. április 6-án hatalmas földrengés rázta meg l'Aquilát, az LNGS közeli gyönyörű kisvárost. A földrengést a laboratórium szeizmikus szekciója előre jelezte. L'Aquilának magyar vonatkozása is van, innen származott Kapisztrán János (Giovanni Capistrano) ferencesrendi szerzetes, aki Mátyás király tanítómestere volt. Meghatározó szerepet játszott a nándorfehérvári diadalban (1456. július 21–22.), amely meghátrálásra kényszerítette a törököket. Ehhez tartozik az a majdnem igaz hiedelem, hogy a nándorfehérvári győzelem emlékére harangoznak délben a keresztény templomokban.

⁴ A Campo Imperatore nemzeti parkban, a laboratórium felett található az a szálloda, amelyben fogva tartották Benito Mussolinin és ahonnan 1943. szeptember 12-én Otto Skorzeny és ejtőernyősei kiszabadították őt.

⁵ A lepton azon részecskék gyűjtőneve, amelyek nem vesznek részt az erős kölcsönhatásban és fermionok. Fermionnak nevezünk minden olyan részecskét, amelynek az eloszlását a Fermi–Dirac-statisztika írja le. E részecskék spinje félegész szám. A lepton görög szó, amely könnyűt jelent. Ez az elnevezés akkor született, amikor az erősen kölcsönható részecskéknél lényegesen könnyebb olyan részecskéket ismertek, amelyek nem vesznek részt az erős kölcsönhatásban (e, μ).

⁶ *Viktor Weisskopf* mesélte: egy alkalommal rájött, hogy az egyik cikkében hibás számolást közölt. Elcsüggedve ment volt tanárához Paulihoz, hogy megkérdezze érdemes-e folytatnia a fizikusi pályát.

Pauli a következőképpen bátorította: „Ne add fel, mindenki elkövet hibákat – kivéve engem.”

ront (e^-), valamint a hozzá hasonló, de nála nehezebb müönt (μ^-) és taut (τ^-), amelyek nem vesznek részt az erős kölcsönhatásban, de részt vesznek a többi, elektromágneses, gyenge és gravitációs kölcsönhatásban. Minden töltött leptonhoz tartozik egy elektromosan semleges lepton, egy neutrínó: az elektronhoz az elektron-neutrínó (ν_e), a müönhoz a müön-neutrínó (ν_μ), a tauhoz pedig a tau-neutrínó (ν_τ).

Az események topológiája

A részecskék reakcióiban az alapvető mennyiségek (elektromos töltés, energia, impulzus stb.) megmaradnak.

A neutron bomlása

Ebben a β -bomlásban a neutron (n) elbomlik, ekkor egy proton (p^+), egy elektron (e^-) és egy anti-elektron-neutrínó ($\bar{\nu}_e$) keletkezik:

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e,$$

azaz

$$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e,$$

ahol d a down, u pedig az up kvarkot jelöli. A detektorban csak az elektromosan töltött részecskék hagynak nyomot. Mivel nem csak a két töltött részecske keletkezik a bomlásban, ezért a töltött részecskék nyomai általában nem ellentétes irányban indulnak ki a bomlás helyétől, hanem egymással szöveget zárnak be. Pauli egy ilyen eseményt tanulmányozva alkotta meg a neutrínó-hipotézist.

Az inverz β -bomlás, amelynek segítségével Fred Reinesék kimutatták a neutrínó létezését:

$$\bar{\nu}_e + p^+ \rightarrow n + e^+.$$

A müön bomlása

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu,$$

ahol μ a müönt, ν_μ pedig a müön-neutrínót jelöli.

A tau bomlása

Mivel a τ -részecskéknek nagy a tömegük, ezért többféleképpen is bomolhatnak. Az elektron tömege $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, a müön tömege $m_\mu = 206,76 m_e$, a tau tömege pedig $m_\tau = 3477,18 m_e$.

$$\tau^- \rightarrow X^- + \nu_\tau,$$

ahol X olyan részecskét vagy részecskéket jelöl, amelyek együttes elektromos töltése megegyezik a τ^-

A CNGS nyaláb adatai

szuperciklus (T_{sc}) hossza (s)	36
szuperciklusban levő gyors nyalábimpulzusok száma	6
gyors nyalábimpulzus hossza (μ s)	10,5
gyors nyalábimpulzus protonjainak száma	10^{13}
gyors nyalábimpulzusok közötti idő (ms)	50

elektromos töltésével. Néhány a lehetséges bomlások közül:

$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau,$$

$$\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau,$$

$$\tau^- \rightarrow \pi^- + \nu_\tau.$$

Neutrínó-oszcilláció

Mivel a kvark tömegállapotok a kvark gyengeállapotok keverékei, ezért a kvantummechanikai interferencia lehetővé teszi, hogy a semleges K -mezonok periodikusan átalakuljanak egymásba:

$$K^0(s\bar{d}) \rightarrow \bar{K}^0(\bar{s}d) \rightarrow K^0(s\bar{d}) \rightarrow \dots$$

E jelenség alapján *Bruno Pontecorvo* 1957-ben azt állította, ha a neutrínók egymástól eltérő tömegűek és ha a leptonszám nem tökéletesen megmaradó mennyiség, akkor megvalósul a neutrínó-oszcilláció jelensége.

A legutóbbi kísérletek azt sugallják, hogy a neutrínók közül legalább egynek zérustól eltérő tömege van. Ha a három különböző neutrínó tömeg-sajátállapotnak nem egyforma a tömege, akkor fellép a neutrínó-oszcilláció jelensége:

$$\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau \quad \nu_\mu \rightarrow \nu_e, \nu_\tau \quad \text{vagy} \quad \nu_\tau \rightarrow \nu_e, \nu_\mu.$$

Ha a neutrínóknak bármilyen kicsi, zérusnál nagyobb tömegük van, akkor a természettudomány számos területén módosítani kell elméleteinket:

- Módosítani kell a részecskék Standard modelljét úgy, hogy számot adjon a neutrínók tömegéről.
- A kozmológia területén a neutrínók képezhetik az Univerzum sötét anyagának (dark matter) egy részét. Az elmélet szerint a mikrohullámú háttérsugárhoz hasonlóan az Univerzum minden köbcentiméterében a három fajta neutrínóból körülbelül 300 van.

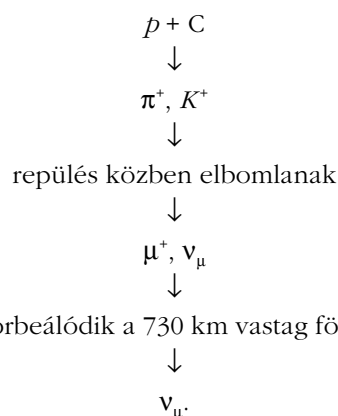
CERN Neutrinos to Gran Sasso (CNGS)

A CNGS egy Genfben található projekt, amelyben a CERN részecskegyorsítójával előállított müon-neutrínó nyalábot küld a CERN-től 730 km távolságra lévő LNGS föld alatti laboratóriumába. Ezt a távolságot 2 ezred másodperc alatt teszik meg a részecskék.

2006. augusztus elején készült el a ν_μ -nyalábot előállító berendezés. Először 2006. augusztus 17-én kúldtek egy alacsony intenzitású nyalábot a LNGS föld alatti laboratóriuma C-termébe, ahol a Borexino és az OPERA kísérletek várták a nyalábot (OPERA – Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus). Októberben már a mérések elvégzéséhez alkalmas nyaláb érkezett a laboratóriumba.

A CNGS nyaláb

A CNGS nyalábot (3. táblázat) a CERN SPS (Super Proton Synchrotron) gyorsítójával állítják elő. A protonnyalábot (400 GeV/c) egy grafit céltárgyra irányítják, itt a kölcsönhatásokban pionok és kaonok is keletkeznek. A pozitív elektromos töltésű pionokat és kaonokat mágneses lencsékkel párhuzamos nyalábbá alakítják. E nyaláb részecskéi egy 1 km hosszú bomlási zónában elbomlanak többek között μ^+ és ν_μ részecskékre. A többi hadron (protonok, pionok, kaonok stb.) abszorbeálódnak az útjukba helyezett vasfalban. A müonokat detektorokkal kontrollálják. A müonok abszorbeálódnak a CERN és LNGS laboratóriumok között található 730 km vastag földrétegben és így az LNGS laboratóriumba csak ν_μ müon-neutrínók érkeznek meg:



Egy részecskecsomag hossza 10,5 μ s (FE – Fast Extraction). Két FE között 50 ms idő telik el.

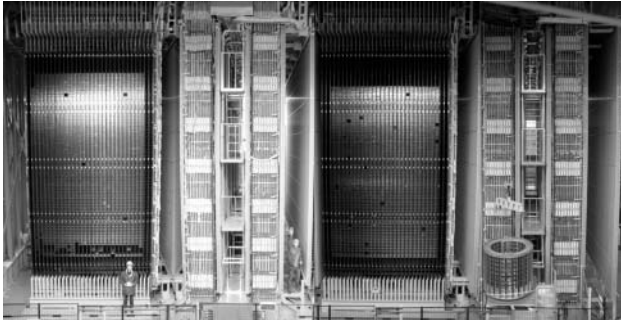
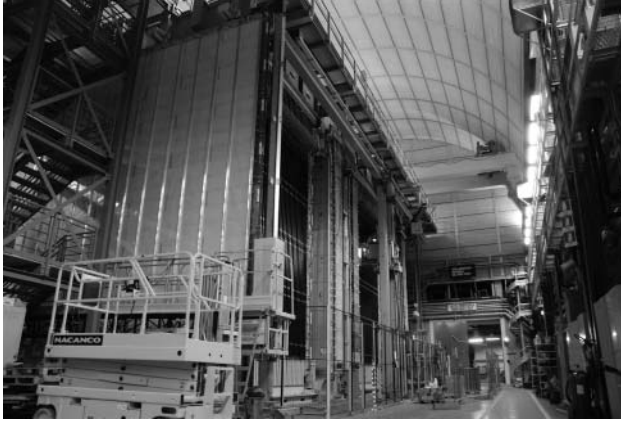
A nyalábot úgy optimalizálták, hogy az OPERA detektorban a $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oszcilláció megfigyelése a legnagyobb valószínűséggel következzen be.

Az OPERA kísérlet

Az OPERA kísérletet – neutrínó-oszcillációs kísérlet emulziós nyomdetektorokkal – a CERN-ből érkező müon-neutrínó nyaláb tanulmányozására hozták létre.

Az OPERA detektor

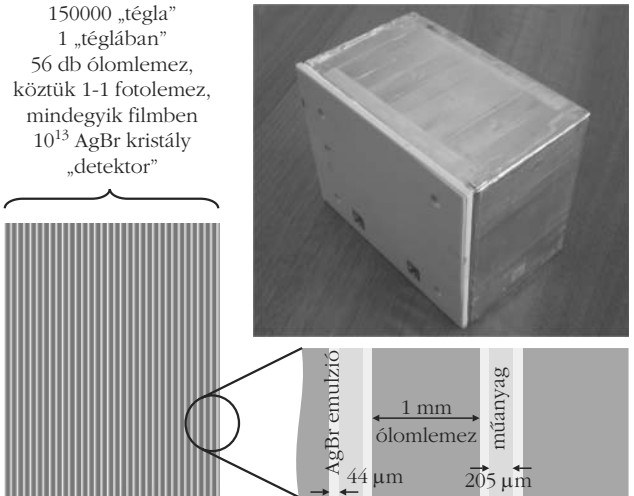
Az OPERA detektor egy hibrid detektor, amely két azonos szupermodulból áll (lásd a 2. ábrát). A két szupermodul előtt egy müon-vető van, amely kiszűri azokat a müonokat, amelyek a laboratórium előtti sziklában keletkeznek.



2. ábra. Az OPERA detektor távlati képe fölül és a két azonos szuperdetektor alul.

A supermodul elején találjuk a céltárgyat, amely 31, a falban elhelyezett alumínium- és fotoemulziólemezekből készített modulból („tégla”) áll.

4. ábra. Az érdeklődésre számot tartó eseményt tartalmazó „téglát” kiszedő – és az üres helyet újból feltöltő – automata manipulátor.



3. ábra. Egy „tégla” felépítése.

A céltárgy után következnek a nyomdetektorok, majd szcintillátor-hodoszkópok, valamint müon-spektrométerek.

A hodoszkópok 32 000 szcintillátorból – egyenként $7 \text{ m} \times 25 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ – állnak. A hodoszkópok felülete 7000 m^2 .

A mágneses müon-spektrométerek két vasmágnesből, RPC⁷-ből és driftcsövekből állnak. Minden egyes dipolmágnes mérete $8 \times 8 \text{ m}^2$ és benne a mágneses mező értéke 1,52 T. Az RCP-k között 5 cm vastag vaslemezeket helyeztek el. Ezek a spektrométerek mérik a müonok impulzusát.

A detektorban összesen 150 000 „tégla” található. Az egyes téglák 12,2 cm hosszúak, 10,2 cm szélesek és 8 cm magasak. Minden egyes tégla 56 darab 1 mm vastag ólomlemezről és a köztük elhelyezett fotolemezekből áll (3. ábra).

A céltárgy után egy müonspektrométert találunk, ezek feladata a müonok azonosítása. A targetből kirepülő részecskéket nyomdetektorok észlelik. A fotoemulzió és a nyomdetektorok adatait analizálva lehet meghatározni, hogy milyen esemény következett be a detektorban. A céltárgy körül elhelyezett detektorok segítségével meg lehet határozni, hogy a kísérlet szempontjából érdekes esemény a céltárgy melyik „téglájában” következett be.

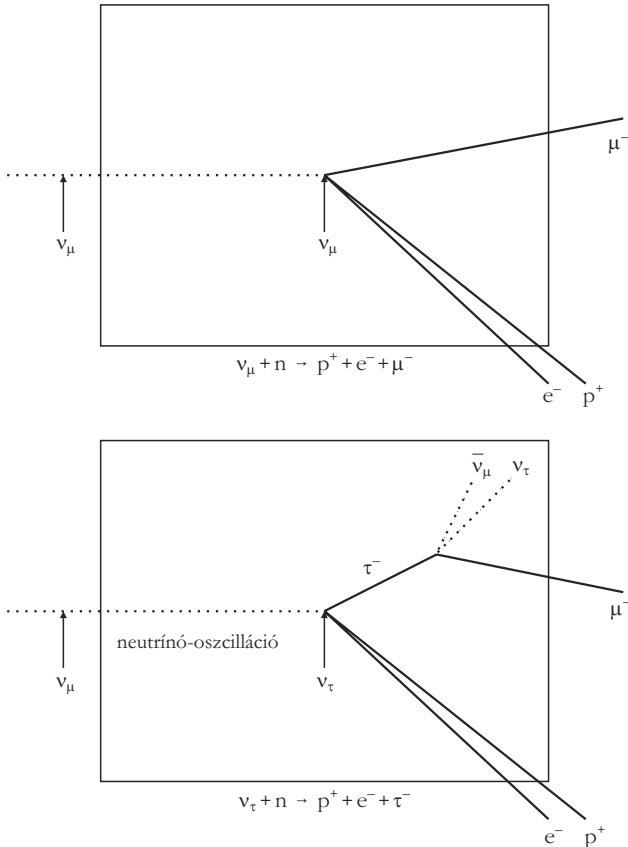
Ha a detektor valamely „téglájában” a kísérlet szempontjából érdekes eseményt figyel meg, akkor ezt, a külső detektorok adatai alapján meghatározott „téglát” egy robot (4. ábra) újra cseréli.

A kivett „téglát” egy automata berendezés analizálja.

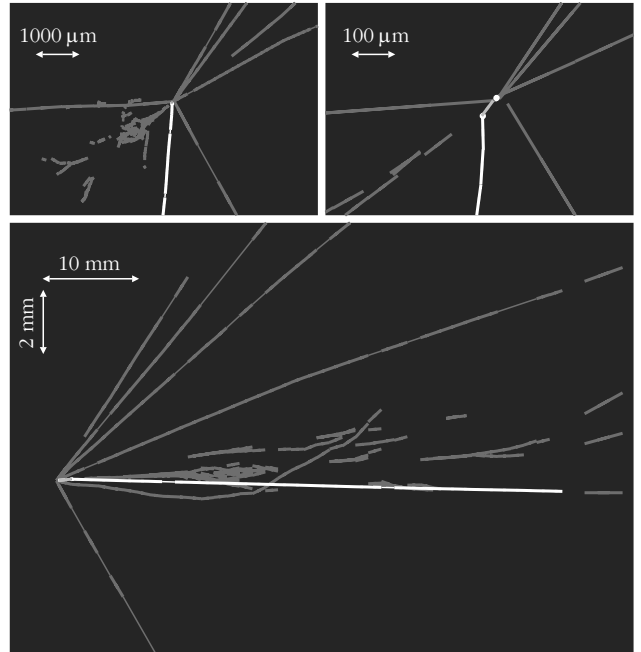
Az OPERA által megfigyelt események topológiája

Csak olyan eseményeket vesznek figyelembe, amelyek a nyaláb részecskéinek megérkezése után, a részecskesomag ideje alatt ($10,5 \mu\text{s}$) következnek be.

⁷ Resistive Plate Chamber



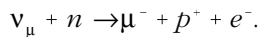
5. ábra. Két jellegzetes esemény – fölül a müion-neutrínó, alul a tau-neutrínó által kiváltott reakció – az OPERA detektorban.



6. ábra. A nevezetes, tau-bomlásra utaló esemény. Balra fenn a neutrínó repülési irányából nézve, jobbra ugyanez, csak nagyítva a kölcsönhatási pont körüli rész. Alul az esemény a neutrínó repülését merőlegesen mutatja. A világos nyomvonal jelzi a tau-bomlást.

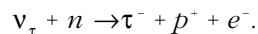
τ bomlásánál egy elektromosan töltött részecske (például müion) és két semleges részecske, két neutrínó, egy ν_{τ} tau-neutrínó és ebben a példában egy $\bar{\nu}_{\mu}$ anti-müionneutrínó keletkezik (lásd a 5. ábra alsó részét).

A müion-neutrínók egy lehetséges reakciója



Ebben a bomlásban keletkezik egy müion (μ^{-}), amelynek a bomlási ideje $2,197 \cdot 10^{-6}$ s, ezért általában bomlás nélkül hagyja el a „téglát” és a nyomán nincs törés. Ebben az esetben a vertexből (abból a pontból, ahol az esemény bekövetkezik) három elektromosan töltött részecske (μ^{-} , p^{+} és e^{-}) távozik (5. ábra fölül).

A tau-neutrínók egy lehetséges reakciója



A tau részecske (τ^{-}) bomlási ideje sokkal rövidebb ($2,91 \cdot 10^{-17}$ s), mint a müion bomlási ideje, ezért a τ^{-} -részecske nagy valószínűséggel a „téglában” elbomlik (a reakciótól számított 1 cm belül), így általában a τ -részecske nyomán egy törést találunk, mivel a

A tau-neutrínó azonosítása

Az előző szakaszban ismertetett bomlások alapján azonosítani lehet a részecskéket. A ν_{μ} müion-neutrínó esetében a kölcsönhatás pontjából (vertex) három töltött részecske repül ki (egy μ^{-} müion, egy p^{+} proton és egy e^{-} elektron). A müion $(2,187019 \pm 0,000029) \cdot 10^{-6}$ s alatt elbomlik, így átlagosan 656 m utat tesz meg mielőtt elbomlik, tehát kirepül a „téglából”.

Ha a müion-neutrínó a CERN és LNGS között tau-neutrínóvá alakul át (neutrínó-oszcilláció), akkor az a detektorban található neutronnal kölcsönhatva három töltött részecskét (egy τ^{-} tau részecske, egy p^{+} proton és egy e^{-} elektron) kelt. A τ^{-} -részecske bomlási ideje olyan rövid, $(290,6 \pm 1,0) \cdot 10^{-15}$ s, hogy a τ^{-} -részecske nagy valószínűséggel a „téglában” elbomlik, és keletkezik például egy μ^{-} müion, egy $\bar{\nu}_{\mu}$ anti-müionneutrínó és egy ν_{τ} tau-neutrínó. A két neutrínó, mivel elektromosan semleges, nem hagy nyomot a „téglában”, így olyan nyomot látunk amelyen egy törés van a bomlás helyén (lásd az 6. ábrát). A 201(!) szerzős cikket a *Physics Letters B* 2010. július 26-i száma közölte.

Szerkesztőség: 1121 Budapest, Konkoly Thege Miklós út 29–33., 31. épület, II.emelet, 315. szoba, Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacíme: mail.elft@gmail.com

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős: Szatmáry Zoltán főszerkesztő.

Kéziratokat nem őrzünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Kármán Tamás, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szatmáry Attila ügyvezető igazgató.

Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszámlán.

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 800.- Ft + postaköltség.

HU ISSN 0015–3257 (nyomtatott) és HU ISSN 1588–0540 (online)