
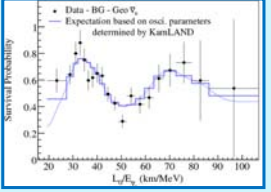
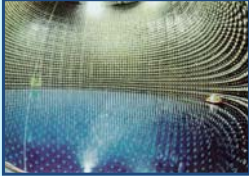
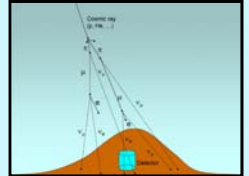


Dr. Sükösd Csaba (BME) A neutrínó sztori

A neutrínó sztori

2017.03.08
Országos Fizikatanári Ankét, Gödöllő
1

Dr. Sükösd Csaba (BME) A neutrínó sztori

Miről lesz szó

- Korai történet, sérülő (?) megmaradási tételek
- Neutrínó, antineutrínó
- A leptonok „családja”
- A leptontöltés megmaradása
- Neutrínó közvetlen kimutatása kísérlettel
- Nap-neutrínó rejtély, és magyarázási kísérlet
- Atmoszferikus neutrínók rejtélye
- Neutrínó ízregés (oszcilláció)
- Látjuk a Nap belsejét

2017.03.08
Országos Fizikatanári Ankét, Gödöllő
2

Dr. Sükösd Csaba (BME) A neutrínó sztori

Korai történet:

1914: Chadwick fedezte fel, hogy az elektronok spektruma folytonos a ^{214}Pb (RaB) β -bomlásánál. Mágneses spektrométerrel.

Értelmezés (Rutherford): a keletkező elektronok mind azonos energiájúak, de az anyagban energiát veszítenek.

$$^{214}_{82}\text{Pb} \xrightarrow{\beta} ^{214}_{83}\text{Bi} + e^-$$

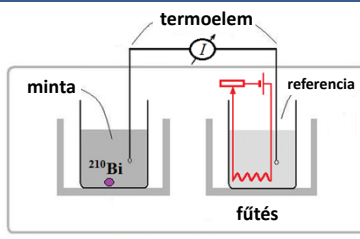
$$E_0 = [M(\text{Pb}) - M(\text{Bi}) - M(e^-)] \cdot c^2$$

1927: Ellis és Wooster kísérlet: mérték a ^{210}Bi (RaE) β -bomlásánál kibocsátott teljes energiát differenciális kaloriméterrel, amely minden elektront megállít a belsejében.

$E_0 = 1050 \text{ keV}$ a tömegkülönbségből kiszámítva.

$E_{\text{mért}} = 344 \pm 34 \text{ keV}$

Hova lesz az energia 2/3-a?




2017.03.08
Országos Fizikatanári Ankét, Gödöllő
3

Dr. Sükösd Csaba (BME) A neutrínó sztori

De nemcsak az energia „hiányzott”!

Perdület sem marad meg? $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + e^-$
 $J: 0\hbar \rightarrow 1\hbar + 1/2\hbar$ (??)

Lendület sem marad meg? $^6\text{He} \rightarrow ^6\text{Li} + e^-$
 Ködkamra felvétel



Szalay Sándor & Csikai Gyula (Debrecen)

Ötletek a rejtély megoldására:

N. Bohr, J.C. Slater, L.D. Landau: a megmaradási törvények nem érvényesek a mikrovilágban, csak statisztikusan! (Hmm...)

1930: W. Pauli levele: a „neutron” hipotézise
 $M \ll M_{\text{proton}}$, semleges, spin=1/2
 „Soha nem fogjuk közvetlenül megfigyelni” (Pauli)

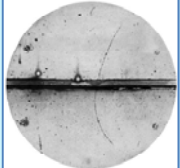
1933: E. Fermi átnevezte „neutrínóra”, miután Chadwick 1932-ben felfedezte a „nehéz” neutron ($M_n \approx M_{\text{proton}}$)
 „Le neutroni di Chadwick sono grande. Le neutroni di Pauli erano piccole; egli devono stare chiamati neutrini.”

2017.03.08
Országos Fizikatanári Ankét, Gödöllő
4

Dr. Sükösd Csaba (BME) A neutrínó sztori

A pozitron felfedezése
 C. D. Anderson (1932) kozmikus sugárzásban (Nobel-díj 1936)

Pozitron bomlás felfedezése
 F. Joliot-Curie és Irene Curie (1934) (Nobel-díj 1935)



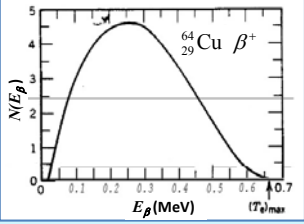
Anderson ködkamra felvétele

$${}_{13}^{27}\text{Al} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_{15}^{30}\text{P} + n \rightarrow {}_{15}^{30}\text{P} \rightarrow {}_{14}^{30}\text{Si} + e^+ + \nu$$

A pozitron-bomlás energia-spektruma is folytonos

Itt is kell legyen neutrínó-kibocsátás!

Vajon ez ugyanolyan neutrínó?

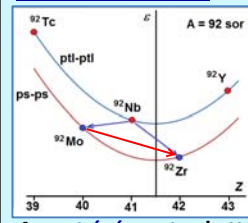


${}_{29}^{64}\text{Cu} \beta^+$

2017.03.08 Országos Fizikatanári Ankét, Gödöllő 5

Dr. Sükösd Csaba (BME) A neutrínó sztori

Kettős béta bomlás



${}_{92}^{92}\text{Mo}$ nem tud β -bomlani, mivel ${}_{92}^{92}\text{Nb}$ „magasabb” energiájú. Azonban, ${}_{92}^{92}\text{Zr}$ energiája alacsonyabb, így ha $\Delta Z=2$ „ugrást” tenne, akkor az energetikailag kedvezőbb lenne!

A neutrínómentes kettős béta bomlás ${}_{Z}^A X \rightarrow {}_{Z-2}^A Y + 2e^-$

Végbemegetne, ha a neutrínó a saját antirészecskéje lenne:

$${}_{Z}^A X \rightarrow {}_{Z-1}^A K + \nu + e^-$$

$${}_{Z-1}^A K + \nu \rightarrow {}_{Z-2}^A Y + e^-$$

Nem sikerült még megfigyelni. $T_{1/2} > 10^{25}$ év

Dirac (1928): feles spinű részecskének vannak **antirészecskéi** (pl. elektron - pozitron).

A neutrínómentes kettős béta-bomlás hiánya mutatja, hogy az elektron- és a pozitronbomlásban keletkező neutrínók különböznek.

Neutrínó - antineutrínó

2017.03.08 Országos Fizikatanári Ankét, Gödöllő 6

Dr. Sükösd Csaba (BME) A neutrínó sztori

A leptonok három „családja”

1897: J. J. Thomson: az **elektron** (e^-) felfedezése
 1930: W. Pauli: az **elektron-neutrínó** (ν_e) feltételezése
 1936: C. D. Anderson:
 a **muon** (μ^-) ($m_\mu \approx 200 m_e$) felfedezése (Nobel-díj: 1936)
 1962: Lederman, Schwartz, Steinberger:
 a **μ -neutrínó** (ν_μ) felfedezése (Nobel-díj: 1988)
 1975: M. L. Perl (SLAC, USA):
 a **tau** (τ) **részecske** ($m_\tau \approx 3500 m_e$) felfedezése (Nobel-díj: 1995)
 2000: DONUT kísérlet (Fermilab, USA)
 a **tau neutrínó** (ν_τ) felfedezése

A leptonok családja

	Töltött lepton	Tömeg	Semleges lepton	Tömeg
„ízek”	elektron (e^-)	$1 m_e$	elektron neutrínó (ν_e)	$? \approx 0$
	müon (μ^-)	$\approx 200 m_e$	müon neutrínó (ν_μ)	$? \approx 0$
	tau részecske (τ^-)	$\approx 3500 m_e$	tau neutrínó (ν_τ)	$? \approx 0$

... + az antirészecskéik!

2017.03.08 Országos Fizikatanári Ankét, Gödöllő 7

Dr. Sükösd Csaba (BME) A neutrínó sztori

Lepton töltés és megmaradása

Ugyanabban az évben (1953) 3 fizikus is felfedezte függetlenül:
Marx György : 1953 január (németül publikálta)
 J. B. Zeldovich (szovjet) : 1953 július (oroszul publikálta)
 H.M. Mahmoud és
 E.J. Konopinsky (USA) : 1953 november (angolul publikálták)

$$L = L_e + L_\mu + L_\tau$$

↑
elektron

↑
müon

↑
tau

A lepton töltés „családokra” = $\begin{cases} +1 \text{ a részecskékre} \\ -1 \text{ az antirészecskékre, és} \\ 0 \text{ a nem-leptonokra.} \end{cases}$

Megmaradási törvény érvényes a **teljes** lepton töltésre!
 (Sok reakciónál még az egyes íz-családokra külön is)

2017.03.08 Országos Fizikatanári Ankét, Gödöllő 8

Dr. Sükösd Csaba (BME) A neutrínó sztori

Példák a lepton töltés megmaradására

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$0 \rightarrow -1 + 1$$

Pion bomlás

L_μ

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \tilde{\nu}_\mu + \nu_e$$

$$0 \rightarrow -1 + 0 + 1$$

$$-1 \rightarrow 0 + (-1) + 0$$

Müon bomlás

L_e

L_μ

„Atmoszferikus” neutrínók

(Hasonló a negatív pion bomlása is)

Egy pion bomlásából keletkező neutrínók íz-aránya:

$$\frac{N(\nu_\mu) + N(\tilde{\nu}_\mu)}{N(\nu_e) + N(\tilde{\nu}_e)} = 2$$

2017.03.08 Országos Fizikatanári Ankét, Gödöllő 9

Dr. Sükösd Csaba (BME) A neutrínó sztori

Neutrínó közvetlen kimutatása (Davis kísérlet)

Neutrínó keltette reakció: $\nu + {}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^-$ kis valószínűségű!

Probléma: nagy mennyiségű X kell \leftrightarrow kevés Y atom keletkezik

Hogy lehet elválasztani és detektálni?

X és Y vegyileg nagyon különböző kell legyen Y legyen radioaktív

$$\nu + {}^{37}_{17}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}_{18}\text{Ar} + e^-$$

$T_{1/2} = 35$ nap, elektronbefogás)

Forrás: Nap $4 {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2e^+ + 2\nu + 26,22 \text{ MeV}$

Keletkezés: $\frac{1}{13,11 \text{ MeV}} = 4,8 \cdot 10^{11} \left[\frac{1}{\text{J}} \right]$

Napállandó: $1360 \text{ W/m}^2 = 0,136 \text{ J}/(\text{cm}^2\text{s})$

Nap neutrínók fluxusa a Földön: $\phi = 4,8 \cdot 10^{11} \cdot 0,136 = 6,53 \cdot 10^{10} \frac{1}{\text{cm}^2\text{s}}$

2017.03.08 Országos Fizikatanári Ankét, Gödöllő 10

Dr. Sükösd Csaba (BME) A neutrínó sztori

R. Davis, J. Bahcall „Homestake” kísérlet

1957 – 1994
(Nobel-díj 2002)

1478 m föld alatt egy elhagyott aranybányában!
Dél-Dakota (USA)

Figure 2.3. Schematic drawing of the argon recovery system. The pump-ductor system forces helium gas through the tetrachloroethylene liquid and provides the helium gas flow through the argon collection system.

http://www.bnl.gov/bnlweb/raydavis/images/pires/recovery_schematic.gif

R. Davis (1914-2006)

R. Davis, J. Bahcall „Homestake” kísérlet (folyt.)

$$1 \text{ SNU} = 10^{-36} \frac{1}{{}^{37}\text{Cl} \cdot \text{s}}$$

Nap-neutrínó „egység”

Eredmények:

Várt érték: $\approx 8,2 \pm 1,8 \text{ SNU}$ ➔ **Nap neutrínók rejtélye**

mért	$\approx \frac{1}{3}$
várt	≈ 3

Mért érték $\approx 2,65 \pm 0,23 \text{ SNU}$

Kísérletek a rejtély megoldására:

- Kísérleti hiba? NEM! Egyéb neutrínó kísérletek megerősítették az eredményt! (Wikipedia: 47 kísérlet, „nem teljes lista”)
- Hibás a Nap-modell? (pl. pulzál a Nap?)

2017.03.08 Országos Fizikatanári Ankét, Gödöllő 12

Dr. Sükösd Csaba (BME) A neutrínó sztori

Pulzáló Nap hipotézise

Ahol a fúzió lezajlik: mag (15 000 000 K)
Innen jönnek a **neutrínók**

Energia transzport a Napon belül!

Sokezer évig is eltarthat!

Amit „látunk”: Nap felszíne (5500 K)
Itt bocsátódik ki az energia sugárzással, ami a **napállandó** szerint a Földre jut.

Neutrínó távcső?

A Nap szerkezete

Fotoszféra
Konvekciós zóna
Röntgensugárzási zóna
Mag
Kromoszféra
Protuberancia

http://www.tananyag.almasi.hu/ojudit/Nap/Nap/a_nap_szerkezete_elemei/image002.jpg

sugárzás
Pulzáló Nap
fúzió

idő
most

2017.03.08 Országos Fizikatanári Ankét, Gödöllő 13

Dr. Sükösd Csaba (BME) A neutrínó sztori

Atmoszferikus neutrínók rejtélye

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

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

$$\mu^+ \rightarrow \tilde{\nu}_\mu + e^+ + \nu_e$$

$$\frac{N(\nu_\mu) + N(\tilde{\nu}_\mu)}{N(\nu_e) + N(\tilde{\nu}_e)} \approx 2$$

~ 50 km

Figyelembe véve a lehetséges korrekciós tényezőket:

$$\frac{N(\nu_\mu) + N(\tilde{\nu}_\mu)}{N(\nu_e) + N(\tilde{\nu}_e)} = 1,63$$

2017.03.08 Országos Fizikatanári Ankét, Gödöllő 14

Dr. Sükösd Csaba (BME) A neutrínó sztori

Kamiokande 2 és Super-Kamiokande (Japán) kísérlet

- 1000 m felszín alatt egy bányában
- 50000 t tiszta víz
- 11146 db fotoelektron-sokszorozó

A detektálás elve:

Cserenkov-sugárzás

Töltött részecske gyorsabban halad, mint az elektromos „zavar” terjedése (közegbeli fénysebesség). „Fénykúp”

Neutrino
electron
nucleus
muon or electron
Cherenkov light

2017.03.08 Országos Fizikatanári Ankét, Gödöllő 15

Dr. Sükösd Csaba (BME) A neutrínó sztori

Kamiokande 2 és Super-Kamiokande (Japán) kísérlet

- Neutrínók „meglökhettek” elektronokat (gyenge kölcsönhatással)
 $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$ (rugalmas szórás), vagy
- müonokat kelthetnek, pl. $\tilde{\nu}_\mu + p \rightarrow n + \mu^+$ (csak müon-neutrínók!)
- Különbséget tud tenni ν_e és ν_μ között!
- Irányérzékeny (Cserenkov-sugárzás miatt)

Atmoszferikus neutrínók eredmény:

	Kísérlet	Elméleti várakozás
Elektron-neutrínók	93,0±9,6	88,5
Müon-neutrínók	85,0±9,3	144,0

Magyarázat, amely mindkét rejtélyt megoldja: **neutrínó-oscilláció**

A lényegyet jobban kifejezi: **neutrínó izregés**

müon-gyűrű
elektron-gyűrű

2017.03.08 Országos Fizikatanári Ankét, Gödöllő 16

Dr. Sükösd Csaba (BME) A neutrínó sztori

Neutrínó ízregés (oszilláció) (Nobel-díj 2015)

Tipikus kvantummechanikai effektus

$$E = \sqrt{(pc)^2 + (m_0c^2)^2}$$

Következmény: különböző m_0 és p -hez különböző frekvencia tartozik.

Analógia: vektorok és komponenseik

A „neutrínó-tér” 3 dimenziós: Ez az „íz” szerinti „koordináta-rendszer”

Tegyük fel, hogy van egy „tömeg szerinti” rendszer is, különböző tömegekkel.

Keletkezés és elnyelődés **íz** szerint

Terjedés: **tömeg szerint**

A kicsit különböző tömegek miatt más a tömeg-komponensek energiája, más a frekvenciája is → terjedés során **összekeverednek!**

$E = h \cdot f$

Részecske teljes energiája állapotfüggvény frekvenciája

$$\begin{pmatrix} V_e \\ V_\mu \\ V_\tau \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix}$$

2017.03.08 Országos Fizikatanári Ankét, Gödöllő 17

Dr. Sükösd Csaba (BME) A neutrínó sztori

Neutrínó ízregés (oszilláció) (folytatás)

A kicsit különböző tömegek miatt más a tömeg-komponensek energiája, más a frekvenciája is → terjedés során **összekeverednek!**

A összekeveredés miatt megjelennek más ízű neutrínók is. Ráadásul a különböző lendületűek energiája és így frekvenciája még inkább különböző → azonos valószínűségű lesz mindegyik!

Indulás a Naptól Érkezés a Földre

$\begin{pmatrix} V_e \\ V_\mu \\ V_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ **terjedés, keveredés** $\begin{pmatrix} V_e \\ V_\mu \\ V_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{3} \\ 1/\sqrt{3} \\ 1/\sqrt{3} \end{pmatrix}$ ← Davis csak ezt tudta mérni!

Ezért kapta csak a várt neutrínók harmadát!

2017.03.08 Országos Fizikatanári Ankét, Gödöllő 18

Dr. Sükösd Csaba (BME) A neutrínó sztori

Atmoszferikus neutrínók rejtélyének magyarázata

Super-Kamiokande irány szerint is tud „válogatni”. Különböző irányokból jöttek esetében különböző a befutott út → más a keveredés!

lentről 12800 km oldalról 500 km fentről 15 km

A neutrínó-ízregés túlmutat a Standard Modellen! Izgalmas!!

2017.03.08 Országos Fizikatanári Ankét, Gödöllő 19

Dr. Sükösd Csaba (BME) A neutrínó sztori

Neutrínó ízregés (folyt.)

Több kísérlet is megerősítette

Super Kamiokande (Japán)

Neutrínókkal látjuk a Nap közepét!!!

Kamland (Japan)

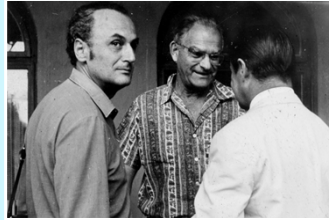
CERN to Gran Sasso (Italy)

2017.03.08 Országos Fizikatanári Ankét, Gödöllő 20

Dr. Sükösd Csaba (BME) A neutrínó sztori

**„... most, a századfordulón
ténylegesen látjuk a Nap
közepét, és látjuk ott azokat a
fúziós reakciókat is, amelyek
Napunk energiáját adják.
Közvetlen kísérleti tényé vált az
az állítás, hogy a napsugárzás
forrása az atommagok fúziója.”**

(Marx György, a Nemzetközi Neutrínó Bizottság
leköszönő elnöke, a Neutrino '02 konferencián)



Marx György Victor Weisskopffal a
„Neutrino 72” konferencián Balatonfüreden

Köszönöm a megtisztelő figyelmüket