

Béta bomlás és a neutrínó II.

Tartalom

- Paritássértés gyenge kölcsönhatásban, Wu kísérlete
- A neutrínó sztorija, lepton családok. Leptontöltés
- Antineutrínó detektálása (Reines-Cowan kísérlet)
- Neutrínó detektálása (Davis kísérlet)
- A Nap-neutrínó rejtély
- Neutrínó oszcilláció, és a neutrínó-tömegek

1

Paritássértés béta-bomlásban

A paritást először **Wigner Jenő** vezette be 1927-ben, az atomi kvantumállapotok $r \rightarrow -r$ transzformációs szimmetriájának leírására.

Az elektromágneses kölcsönhatásban a paritás megmarad

Az erős kölcsönhatásban is megmarad a paritás

Feltételezték, hogy a **gyenge** kölcsönhatásban is megmarad.

1956-ban azonban **T.D.Lee** és **C.N.Yang** megmutatta, hogy nincs direkt kísérleti bizonyíték arra, hogy a gyenge kölcsönhatásban is megmarad a paritás. Az ú.n. „tau-theta talányt” a paritássértéssel magyarázták **→ Nobel-díj 1957-ben!**

PHYSICAL REVIEW VOLUME 104, NUMBER 1 OCTOBER 1, 1957

Question of Parity Conservation in Weak Interactions*

T. D. LEE, Columbia University, New York, New York

AND

C. N. YANG,† Brookhaven National Laboratory, Upton, New York

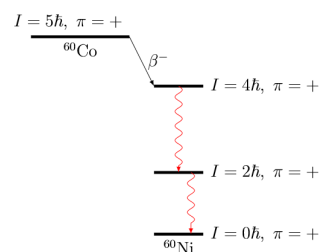
(Received June 22, 1956)

The question of parity conservation in β decays and in hyperon and meson decays is examined. Possible experiments are suggested which might test parity conservation in these interactions.

2

Ha a gyenge kölcsönhatás nem őrzi meg a paritást, akkor ennek a β -bomlásban is látszani kell!

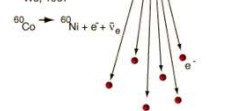
Kísérleti bizonyíték: **C.S.Wu** et al. (1957)



Eredmény:

Beta emission is preferentially in the direction opposite the nuclear spin, in violation of conservation of parity.

Wu, 1957



3

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/imgqua/wu.gif>

Polarizált ^{60}Co forrás:

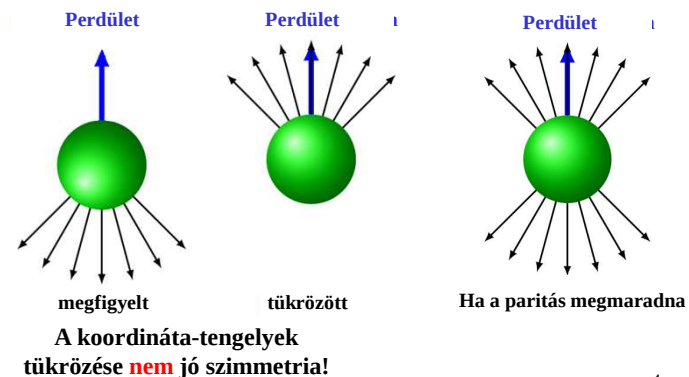
Alacsony hőmérséklet (~ 3 mK),

erős mágneses mező

$$(\mu B) \gg kT \quad \frac{n_{\uparrow}}{n_{\downarrow}} = e^{\frac{2\mu B}{kT}}$$

Miért jelent ez paritás sértést?

- Az elektronok iránya: $\mathbf{p}$ (impulzus): **vektor** $\rightarrow -1$ tükrözve
- A perdület iránya: $\mathbf{J} = [\mathbf{r} \times \mathbf{p}]$: **axiálvektor** $\rightarrow +1$ tükrözve



A koordináta-tengelyek tükrözése **nem** jó szimmetria!

4

Perdület a Wu kísérletben

A paritásváltás magyarázata (teljes paritásváltás)

$$\varphi_v = \begin{pmatrix} \psi_{\uparrow} \\ \psi_{\downarrow} \\ \tilde{\psi}_{\uparrow} \\ \tilde{\psi}_{\downarrow} \end{pmatrix} \Rightarrow \varphi_v = \begin{pmatrix} 0 \\ \psi_{\downarrow} \\ \tilde{\psi}_{\uparrow} \\ 0 \end{pmatrix}$$

Csak jobb-kezes antineutrínók ($p\uparrow\uparrow s$), és balkezes neutrínók ($p\uparrow\downarrow s$) léteznek!

W. Pauli: „Nem tudom elhinni, hogy Isten balkezes!”

Antineutrínók a $J = 5\hbar$ irányába **kell repüljenek! Ezért az elektronok többnyire az ellenkező irányba**

Következmény a H_{β} operátorra:

$$H_{\beta} = (\cancel{H_{\beta,S}} + H_{\beta,V}) + (H_{\beta,A} + \cancel{H_{\beta,T}})$$

Fermi, G.T.

Végül a kölcsönhatási operátor: $H_{\beta} = H_{\beta,V} + H_{\beta,A}$

A neutrínó-sztori

Korai történet:

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

Értelmezés (Rutherford): monoenergiás elektronok jönnek ki a magból, de az anyagban energiát veszítenek.

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

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

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

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

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, $\text{spin} = 1/2$
 „Soha nem fogjuk közvetlenül megfigyelni” (Pauli)

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

Szalay Sándor & Csikai Gyula (Debrecen)

Kettős béta bomlás

^{92}Mo ha $\Delta Z = 2$ „ugrást” tenne, akkor az energetikailag kedvezőbb lenne!

A rendes (neutrínós) kettős béta bomlás:
 $^A_Z\text{X} \rightarrow ^A_{Z+2}\text{Y} + 2e^- + 2\bar{\nu}$
 Egyes ps-ps atommagban ritkán előfordul.
Megfigyelték 35 izotópnaál, $T_{1/2} \sim 10^{19} - 10^{22} \text{ év}$

A neutrínómentes kettős béta bomlás $^A_Z\text{X} \rightarrow ^A_{Z+2}\text{Y} + 2e^-$
 Végbemegetne, ha a neutrínó a saját antirészecskéje lenne:

$^A_Z\text{X} \rightarrow ^A_{Z+1}\text{K} + \bar{\nu} + e^-$
 $^A_{Z+1}\text{K} + \bar{\nu} \rightarrow ^A_{Z+2}\text{Y} + e^-$ **Nem sikerült még megfigyelni.** $T_{1/2} > 10^{25} \text{ év}$

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

A neutrínómentes kettős béta-bomlás hiánya mutatja, hogy az elektron- és a pozitronbomlásban keletkező neutrínók különbözők.
Neutrínó $\leftrightarrow$ antineutrínó

A leptonok három „családja”

- 1936:** C. D. Anderson: a **müon** (μ^-) ($m_\mu \sim 207 m_e$) felfedezése
(Nobel-díj: 1936 a pozitron felfedezéséért ☺)
- 1962:** Lederman, Schwartz, Steinberger:
a **μ -neutrínó** felfedezése (Nobel-díj: 1988)
- 1975:** M. L. Perl (SLAC, USA):
a **tau részecske** ($m_\tau \sim 3500 m_e$) felfedezése (Nobel-díj: 1995)
- 2000:** DONUT kísérlet (Fermilab, USA)
a **tau neutrínó** felfedezése

A leptonok családjai („ízék” flavours)

Töltött lepton	Tömeg	Semleges lepton	Tömeg
elektron (e^-)	$1 m_e$	elektron neutrínó (ν_e)	?
müon (μ^-)	$\sim 200 m_e$	müon neutrínó (ν_μ)	?
tau (τ^-)	$\sim 3500 m_e$	tau neutrínó (ν_τ)	?

... + az antirészecskéik!

9

Lepton töltés

A **neutrínómentes** kettős béta bomlás (és sok egyéb folyamat) vezettek el a **lepton töltés megmaradás** törvényének felfedezéséhez

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)

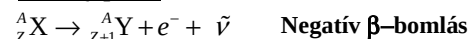
$$L = L_e + L_\mu + L_\tau$$

A lepton töltés „családokra” = +1 a részecskékre
–1 az antirészecskékre, és
0 a nem-leptonokra.

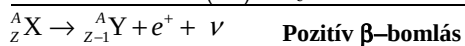
Megmaradási törvény érvényes a teljes lepton töltésre!
(Sok reakciónál még az egyes családokra külön is)

10

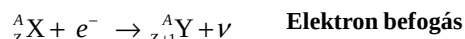
Néhány példa:



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



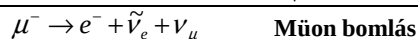
$$0 \rightarrow 0+(-1)+1 \quad L_e$$



$$0 + 1 \rightarrow 0 + 1 \quad L_e$$



$$0 \rightarrow 1+(-1) \quad L_\mu$$



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

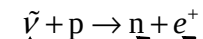
$$1 \rightarrow 0 + 0 + 1 \quad L_\mu$$

11

Antineutrínó kimutatása (Reines-Cowan kísérlet)

Nagyon kis kölcsön-
hatási valószínűség

Nagyon sok részecske kell
könnyű detektálhatóság kell
alacsony háttér kell



víz (~400 l)
 $N \approx 6,6 \cdot 10^{22} \left[\frac{1}{\text{cm}^3} \right]$

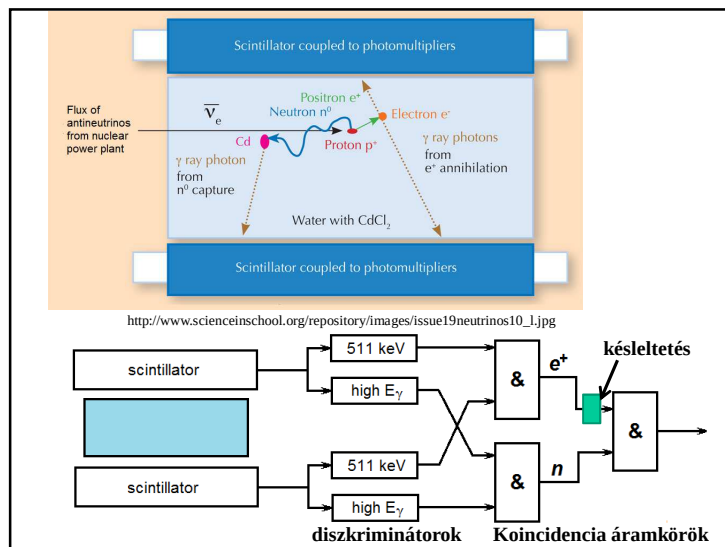
atomreaktor
(Savannah River)
Sok β^- bomlás
hasadási
termékekből

$$\phi \approx 10^{13} \left[\frac{1}{\text{cm}^2 \text{s}} \right]$$

$e^+ \rightarrow$ annihilációs gammák detektálása
(2 x 511 keV)

$n \rightarrow$ nagy energiájú gammák detektálása
 $\text{Cd}(n,\gamma)$ reakciókból CdCl_2 -ban

12



Eredmények:

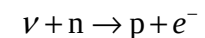
1953: 24 ± 12 esemény/h
 1956: $2,88 \pm 0,22$ esemény/h
 1958: $36,4 \pm 4$ esemény/h

$\sigma_{\text{exp}} = 1,2 \pm 0,5 \cdot 10^{-43} \text{ cm}^2$ Szép!! ☺
 $\sigma_{\text{theory}} = 1,0 \pm 0,17 \cdot 10^{-43} \text{ cm}^2$

(Reines: Nobel-díj 1995, Cowan már meghalt 1974-ben)

Neutrínó kimutatása (Davis kísérlet)

A Reines-Cowan módszer nem működik!



Nincs ilyen céltárgy!
 $e^- \rightarrow$ nem detektálható, mindenütt vannak elektronok
 $p \rightarrow$ nem detektálható, mindenütt vannak protonok

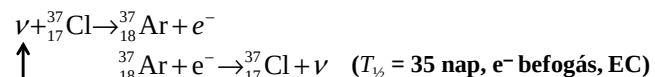
Nincs erős mesterséges forrás!

14

B. Pontecorvo: atommagban kell létrehozni: $\nu + {}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^-$

Probléma: nagy mennyiségű X kell $\longleftrightarrow$ kevés Y atom keletkezik
 Hogy lehet **elválasztani** és **detektálni**?

X és Y vegyileg legyen nagyon különböző!
 Y legyen radioaktív



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

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

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

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

R. Davis, J. Bahcall
 „Homestake” kísérlet

1957 – 1994
 (Nobel-díj 2002)

1478 m föld alatt!

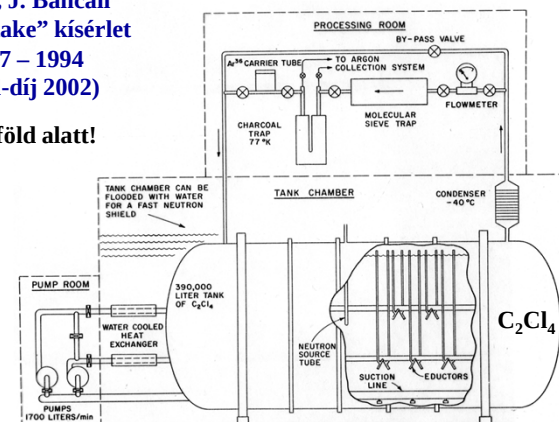


Figure 2.3. Schematic drawing of the argon recovery system. The pump-educator system forces helium gas through the tetrachloroethylene liquid and provides the helium gas flow through the argon collection system.

http://www.bnl.gov/bnlweb/physics/physics/images/physics/recovery_schematic.gif

R. Davis, J. Bahcall „Homestake” kísérlet

Eredmények:

Várt érték $\sim 8,2 \pm 1,8$ SNU

Mért érték $\sim 2,65 \pm 0,23$ SNU

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

➔ **Nap neutrínók rejtélye**

Kísérletek a rejtély megoldására:

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

- Egyéb... ? ☺

Még egy rejtély:

- Atmoszferikus neutrínók rejtélye



17

Pulzáló Nap hipotézise

Ahol a fúzió lezajlik:

mag (15 000 000 K)

Innen jönnek a **neutrínók**

Energia transzport
a Napon belül!

Sok ezer évig is eltarthat!!

Amit „látunk”:

Nap felszíne (5500 K)

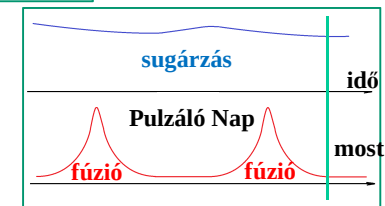
Itt bocsátódik ki az energia
sugárzással, ami a
napállandó

Neutrínó távcső?

A Nap szerkezete

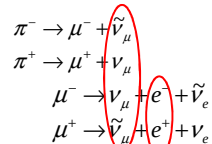


http://www.tananyag.almasi.hu/ojudit/Nap/Na p/a_nap_szerkezete_elemei/image002.jpg



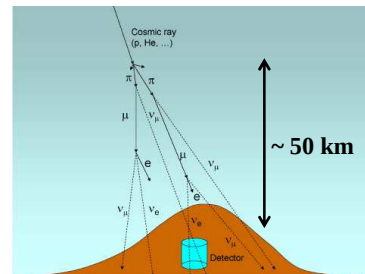
18

Atmoszferikus neutrínók rejtélye



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

Figyelembe véve a lehetséges
korrekciós tényezőket: $\frac{N(\nu_\mu) + N(\tilde{\nu}_\mu)}{N(\nu_e) + N(\tilde{\nu}_e)} = 1,63$



19

Kamiokande 2 és Super-Kamiokande (Japán) kísérlet

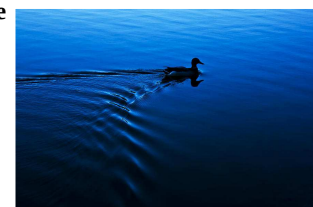
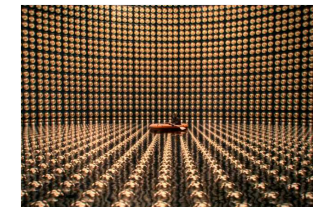
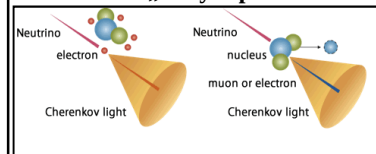
- 1000 m felszín alatt egy bányában
- 50000 t tiszta víz
- 11146 db fotoelektron-sokszorozó

A detektálás elve:

Cserekov-sugárzás

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

„Fénykúp”

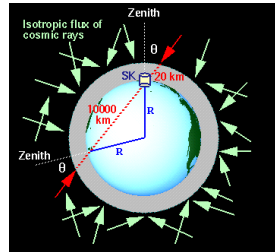


20

6

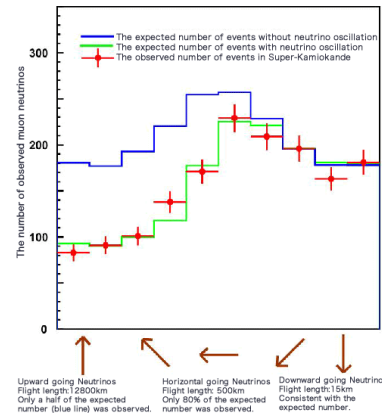
Atmoszferikus neutrínók rejtélyének magyarázata

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



Nobel-díj 2015

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

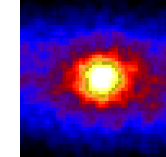
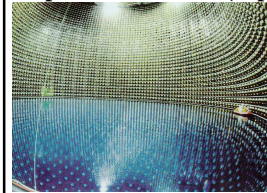


25

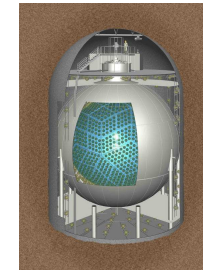
Neutrínó oszcilláció (folyt.)

Több kísérlet is megerősítette

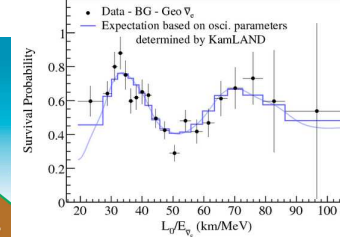
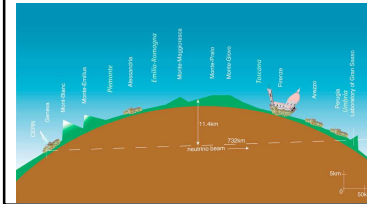
Super Kamiokande (Japan) ν „fénykép” a Napról



Kamland (Japan)

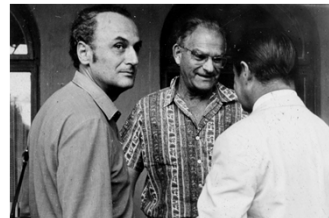


CERN to Gran Sasso (Italy)



„... 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 és Victor Weisskopf a „Neutrino 72” konferencián Balatonfüreden

Köszönöm a megtisztelő figyelmet

27

Függelék A

(levezetés a neutrínó oszcillációhoz)

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$$

$$t \text{ időpontban: } |\nu\rangle = \exp\left(\frac{-iE_1 t}{\hbar}\right) \cos \theta |\nu_1\rangle + \exp\left(\frac{-iE_2 t}{\hbar}\right) \sin \theta |\nu_2\rangle$$

Annak valószínűsége, hogy ismét elektron-neutrínóként találjuk:

$$P(t) = \langle \nu_e | \nu \rangle^2 = \left| \exp\left(\frac{-iE_1 t}{\hbar}\right) \cos \theta \langle \nu_e | \nu_1 \rangle + \exp\left(\frac{-iE_2 t}{\hbar}\right) \sin \theta \langle \nu_e | \nu_2 \rangle \right|^2$$

Kihasználva, hogy $\langle \nu_e | \nu_1 \rangle = \cos \theta$ és $\langle \nu_e | \nu_2 \rangle = \sin \theta$

$$P(t) = \left| \exp\left(\frac{-iE_1 t}{\hbar}\right) \cos^2 \theta + \exp\left(\frac{-iE_2 t}{\hbar}\right) \sin^2 \theta \right|^2$$

Bontsuk fel az exp függvényeket is valós és képzetes részekre:

$$P(t) = \left| \cos \frac{E_1 t}{\hbar} \cos^2 \theta + \cos \frac{E_2 t}{\hbar} \sin^2 \theta - i \left(\sin \frac{E_1 t}{\hbar} \cos^2 \theta + \sin \frac{E_2 t}{\hbar} \sin^2 \theta \right) \right|^2$$

28

$$P(t) = \left| \cos \frac{E_1 t}{\hbar} \cos^2 \theta + \cos \frac{E_2 t}{\hbar} \sin^2 \theta - i \left(\sin \frac{E_1 t}{\hbar} \cos^2 \theta + \sin \frac{E_2 t}{\hbar} \sin^2 \theta \right) \right|^2$$

$$P(t) = \left(\cos \frac{E_1 t}{\hbar} \cos^2 \theta + \cos \frac{E_2 t}{\hbar} \sin^2 \theta \right)^2 + \left(\sin \frac{E_1 t}{\hbar} \cos^2 \theta + \sin \frac{E_2 t}{\hbar} \sin^2 \theta \right)^2$$

A négyzetre emeléseket elvégezve:

$$P(t) = \cos^4 \theta \left(\cos^2 \frac{E_1 t}{\hbar} + \sin^2 \frac{E_1 t}{\hbar} \right) + \sin^4 \theta \left(\cos^2 \frac{E_2 t}{\hbar} + \sin^2 \frac{E_2 t}{\hbar} \right) + 2 \cos^2 \theta \sin^2 \theta \left(\cos \frac{E_1 t}{\hbar} \cos \frac{E_2 t}{\hbar} + \sin \frac{E_1 t}{\hbar} \sin \frac{E_2 t}{\hbar} \right) = 1$$

Használjuk ki a következő trigonometriai azonosságokat:

$$2 \cos^2 \theta \sin^2 \theta = \frac{1}{2} (4 \sin^2 \theta \cos^2 \theta) = \frac{1}{2} \sin^2 2\theta, \text{ valamint}$$

$$\cos \frac{E_1 t}{\hbar} \cos \frac{E_2 t}{\hbar} + \sin \frac{E_1 t}{\hbar} \sin \frac{E_2 t}{\hbar} = \cos \frac{(E_2 - E_1) \cdot t}{\hbar}, \text{ továbbá}$$

$$\cos^4 \theta + \sin^4 \theta = (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta)^2 - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta = 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta$$

29

$$P(t) = \cos^4 \theta \left(\cos^2 \frac{E_1 t}{\hbar} + \sin^2 \frac{E_1 t}{\hbar} \right) + \sin^4 \theta \left(\cos^2 \frac{E_2 t}{\hbar} + \sin^2 \frac{E_2 t}{\hbar} \right) +$$

$$+ 2 \cos^2 \theta \sin^2 \theta \left(\cos \frac{E_1 t}{\hbar} \cos \frac{E_2 t}{\hbar} + \sin \frac{E_1 t}{\hbar} \sin \frac{E_2 t}{\hbar} \right) \rightarrow$$

$$P(t) = 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta + \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \cdot \cos \frac{(E_2 - E_1) \cdot t}{\hbar} = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{(E_2 - E_1) \cdot t}{\hbar} \right)$$

Végül kihasználva, hogy $\frac{1}{2}(1 - \cos 2\alpha) = \sin^2 \alpha$ kapjuk:

$$P(t) = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left[\frac{(E_2 - E_1) \cdot t}{2\hbar} \right]$$

Ebből pedig azonnal következik, hogy

$$P\left(t \approx \frac{L}{c}\right) = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left[\frac{(E_2 - E_1) \cdot L}{2\hbar c} \right]$$

Ezt kellett megmutatni. (Q.E.D)

30

Függelék B (levezetés neutrínó oszcillációhoz)

Mutassuk meg, hogy: $\frac{(E_2 - E_1)L}{2\hbar c} = 1,27 \frac{\Delta m^2 L}{pc}$, ahol $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$ [eV²/c⁴]
L [m], pc [MeV].

Először határozzuk meg $E_2 - E_1$ értékét!

$$\text{Mivel } E_k = \sqrt{p^2 c^2 + m_k^2 c^4} \text{ és } pc \gg m_k c^2$$

$$E_k = pc \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{m_k c^2}{pc} \right)^2} \approx pc \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{m_k c^2}{pc} \right)^2 \right)$$

Ezért

$$E_2 - E_1 \approx \frac{pc}{2} \left[\left(\frac{m_2 c^2}{pc} \right)^2 - \left(\frac{m_1 c^2}{pc} \right)^2 \right] = \frac{1}{2} \cdot \frac{(m_2^2 - m_1^2) \cdot c^4}{pc} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta m^2 \cdot c^4}{pc}$$

$$\text{Így kapjuk } \frac{(E_2 - E_1) \cdot L}{2\hbar c} \approx \left(\frac{1}{4\hbar c} \right) \cdot \frac{(\Delta m^2 \cdot c^4) \cdot L}{pc}$$

A megfelelő egységekben behelyettesítve a bizonyítandó állítást kapjuk.

31