

Neutrínók interferenciája

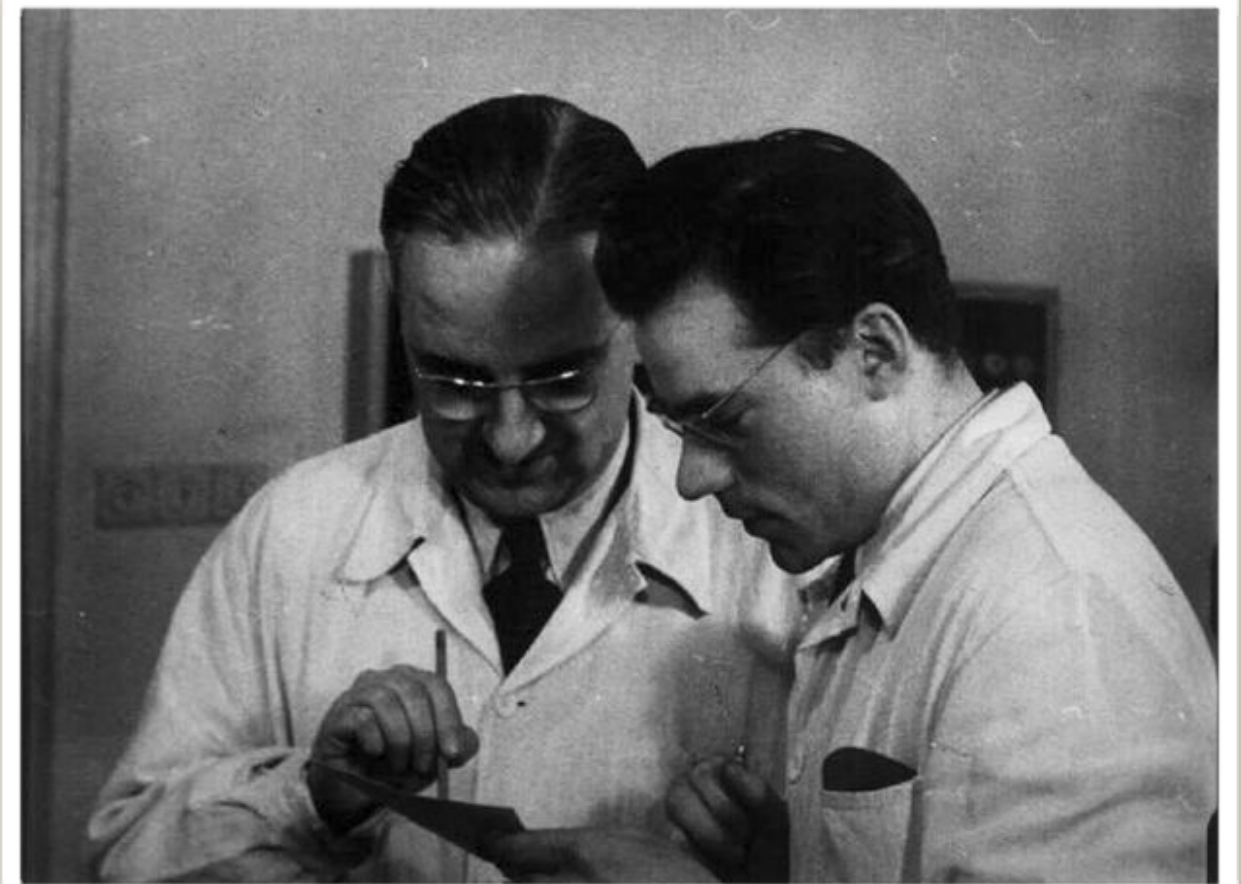
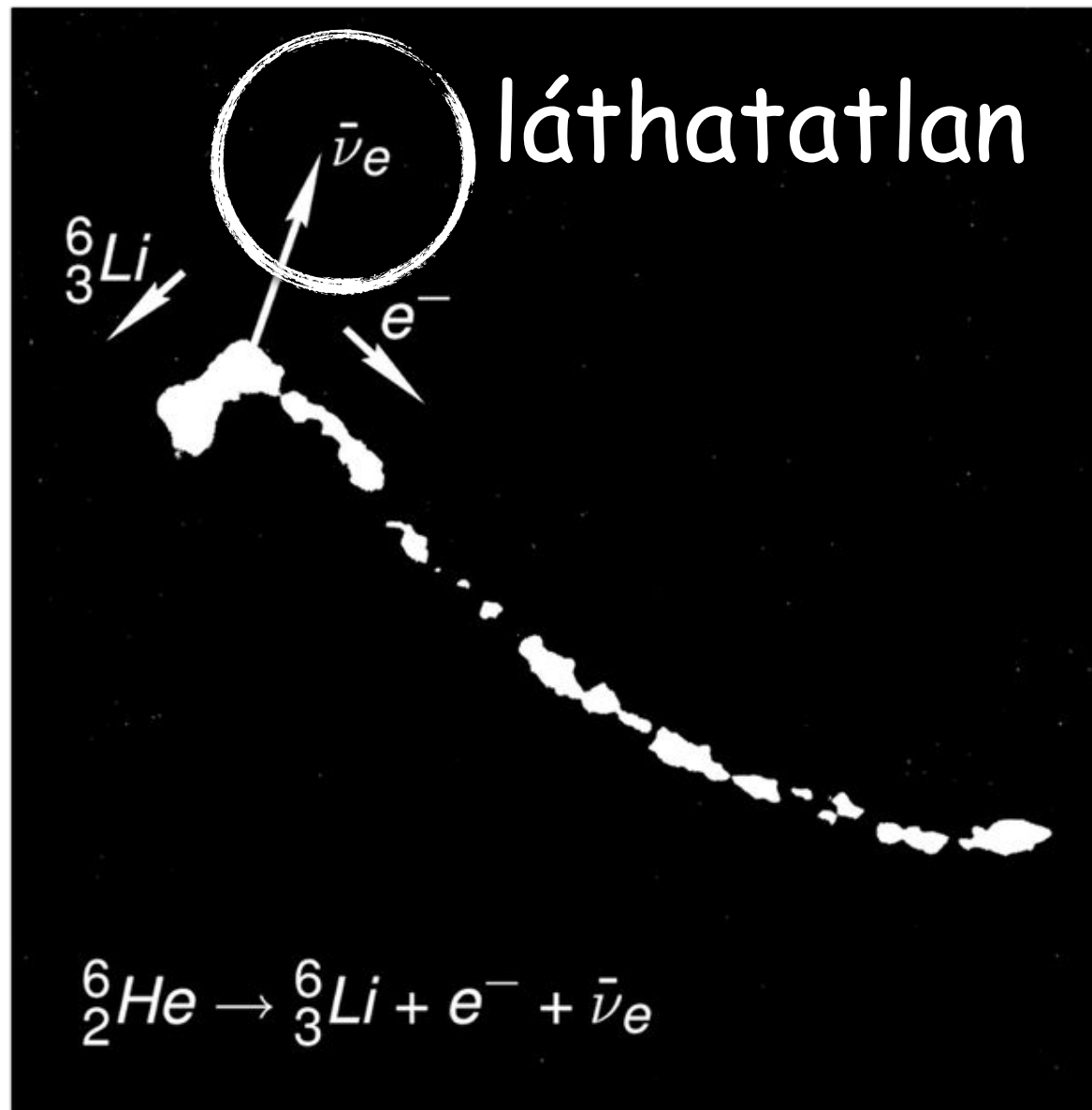
Trócsányi Zoltán

Debreceni Egyetem és MTA-DE Részecskefizikai Kutatócsoport

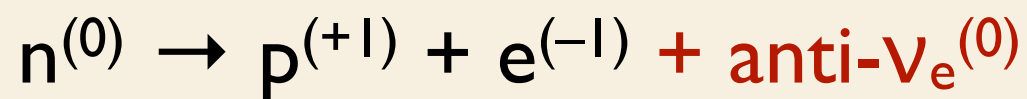


Magyar fizikatanárok találkozója
Budapest, 2016. november 12

Csikai-Szalay kísérlet (1956)



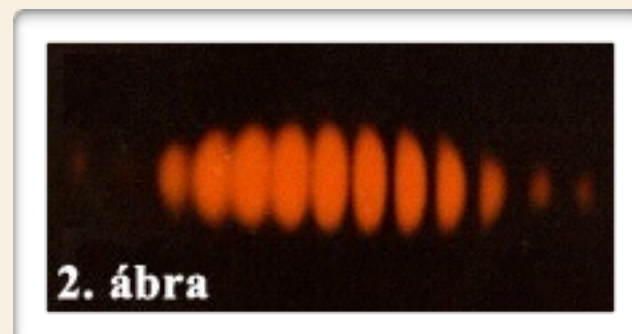
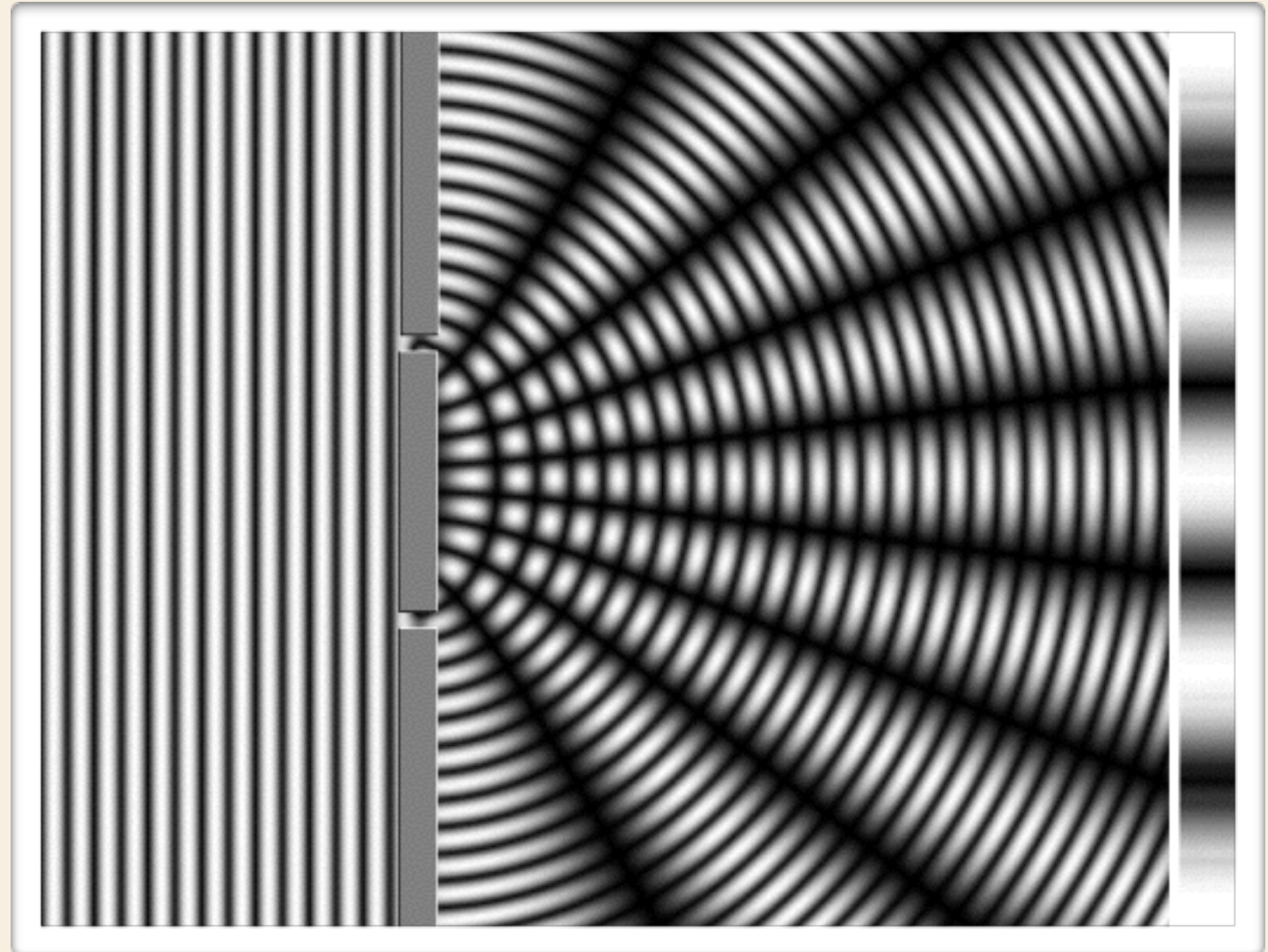
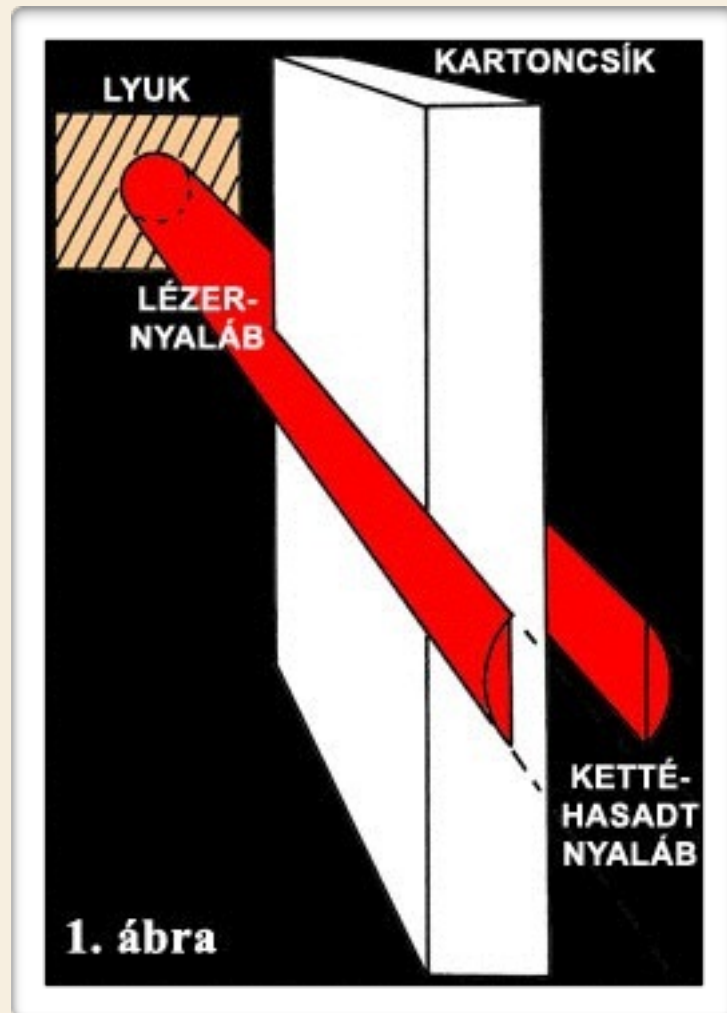
EPS historic site



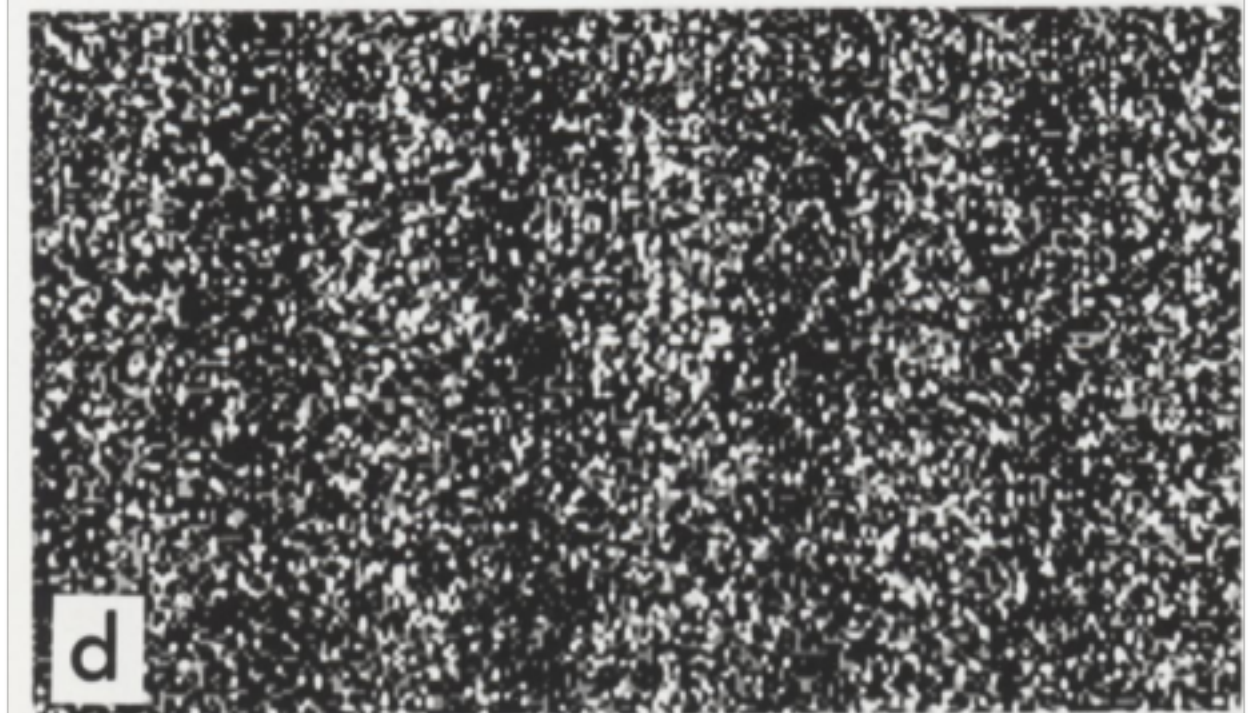
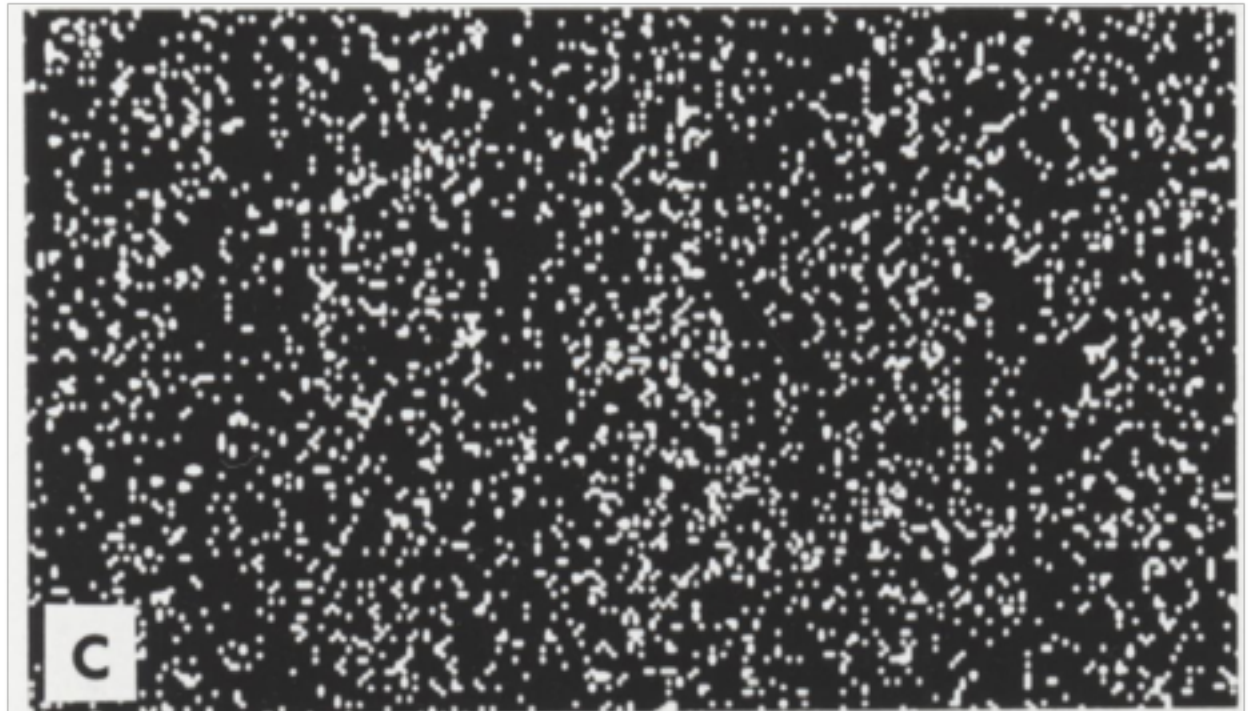
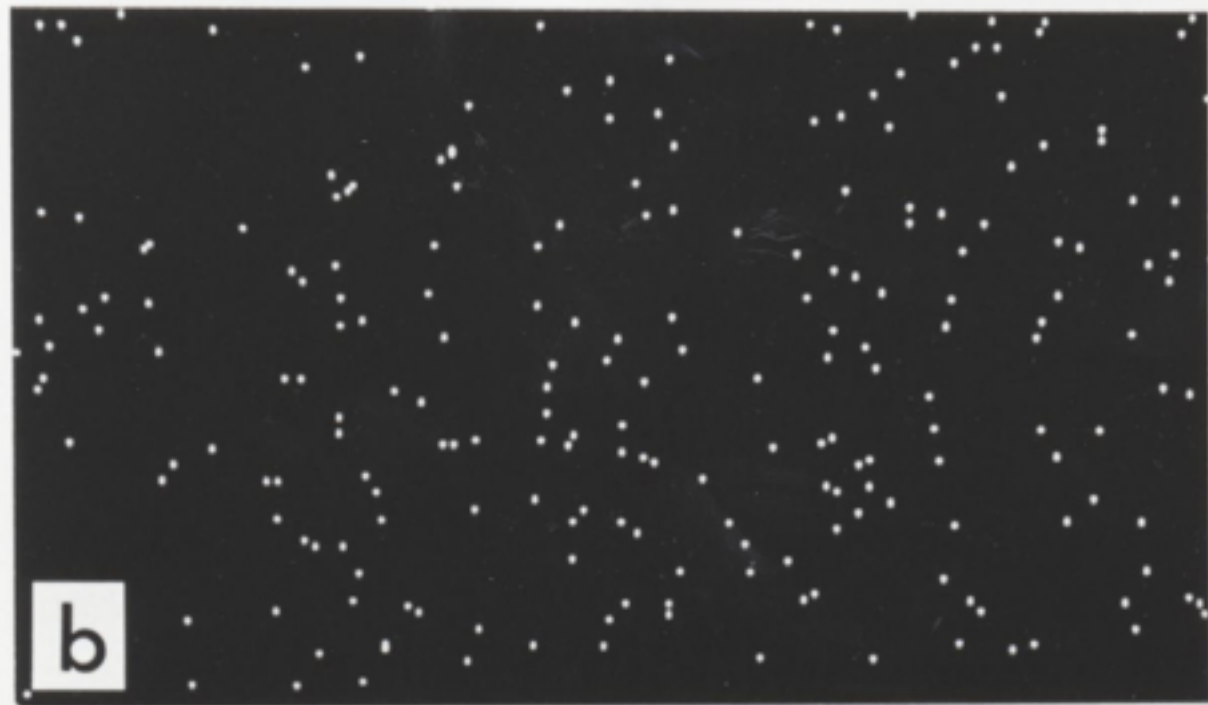
elemi szinten:



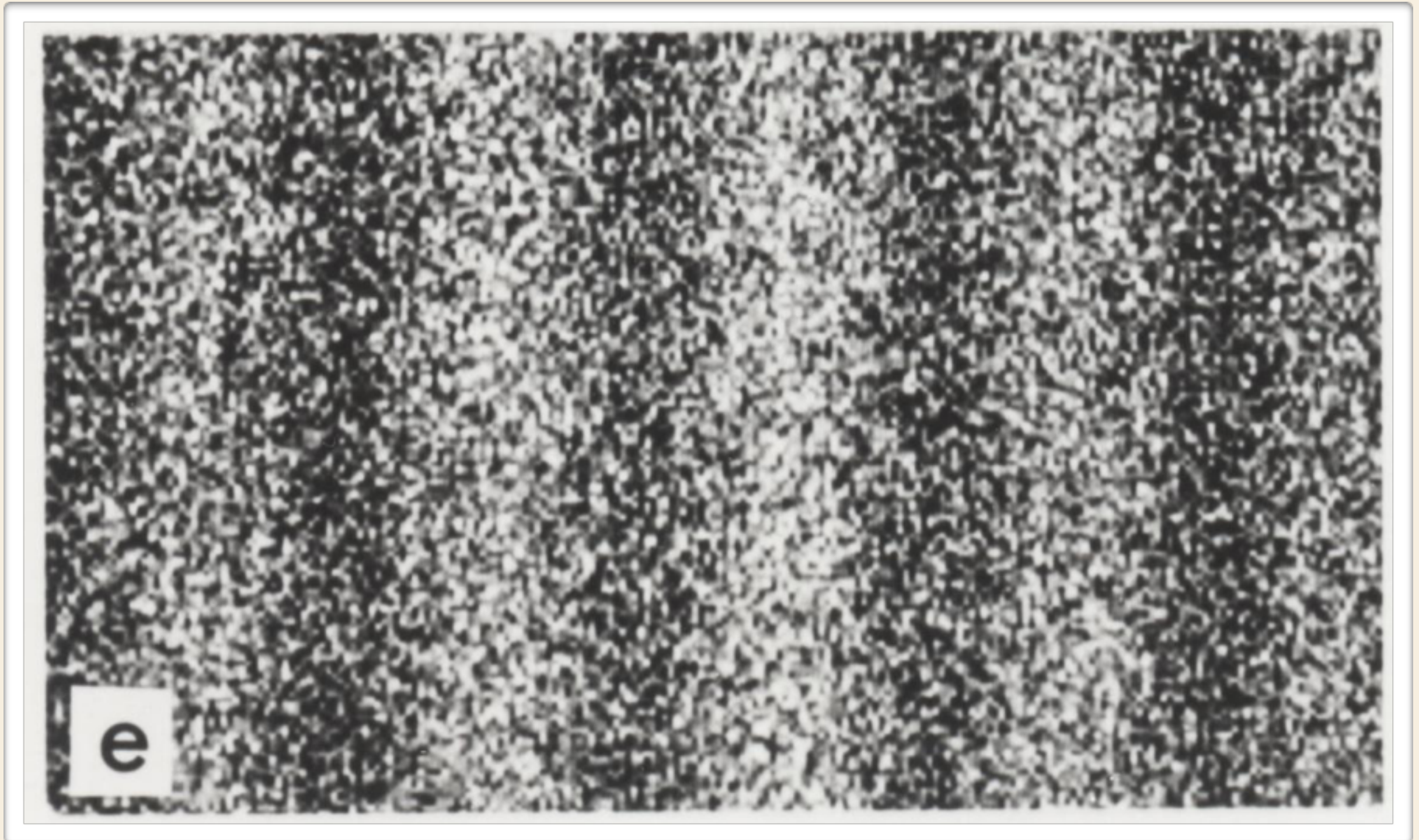
Kétréses-interferencia fényel



Kétréses-interferencia elektronnal



Kétréses-interferencia elektronnal



Lehetséges neutrínóval?

igen! - csak...

... interferencia alatt nem a neutrínók intenzitásának térbeli változását kell érteni, hanem...

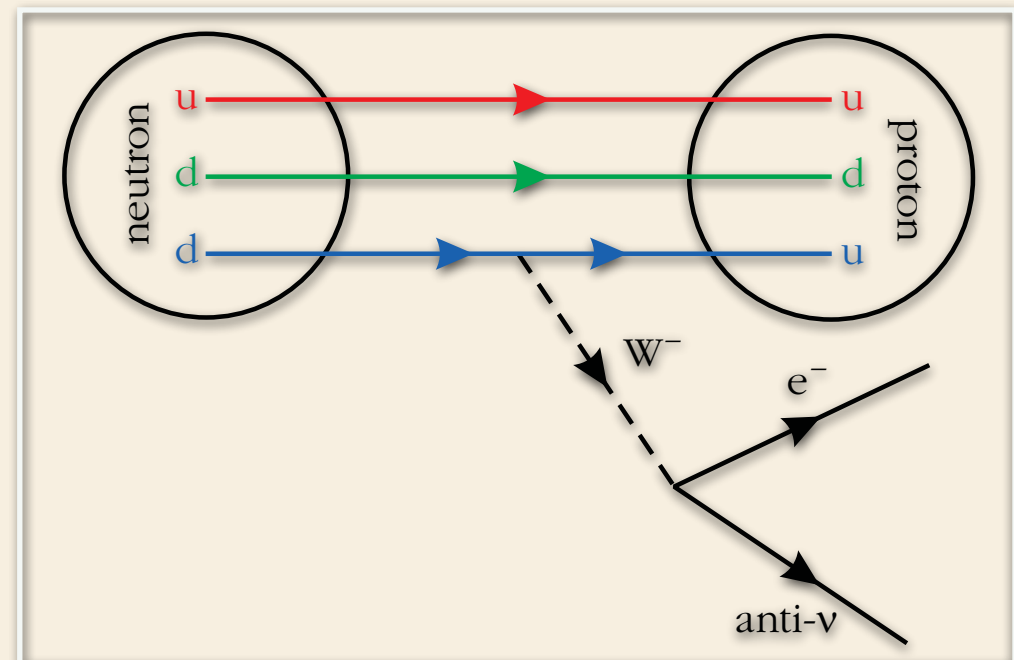
... a neutrínók ízének változását

angolul: **neutrino oscillation**

jelentése:

A neutrínók haladásuk közben nem őrzik azonosságukat (ízüket), hanem „önmaguktól“ átalakulnak másfajta ízű neutrínóvá. Magyarul: **neutrínók ízrezgése**

önmaguktól?
béta-bomlásnak is
van mélyebb oka:



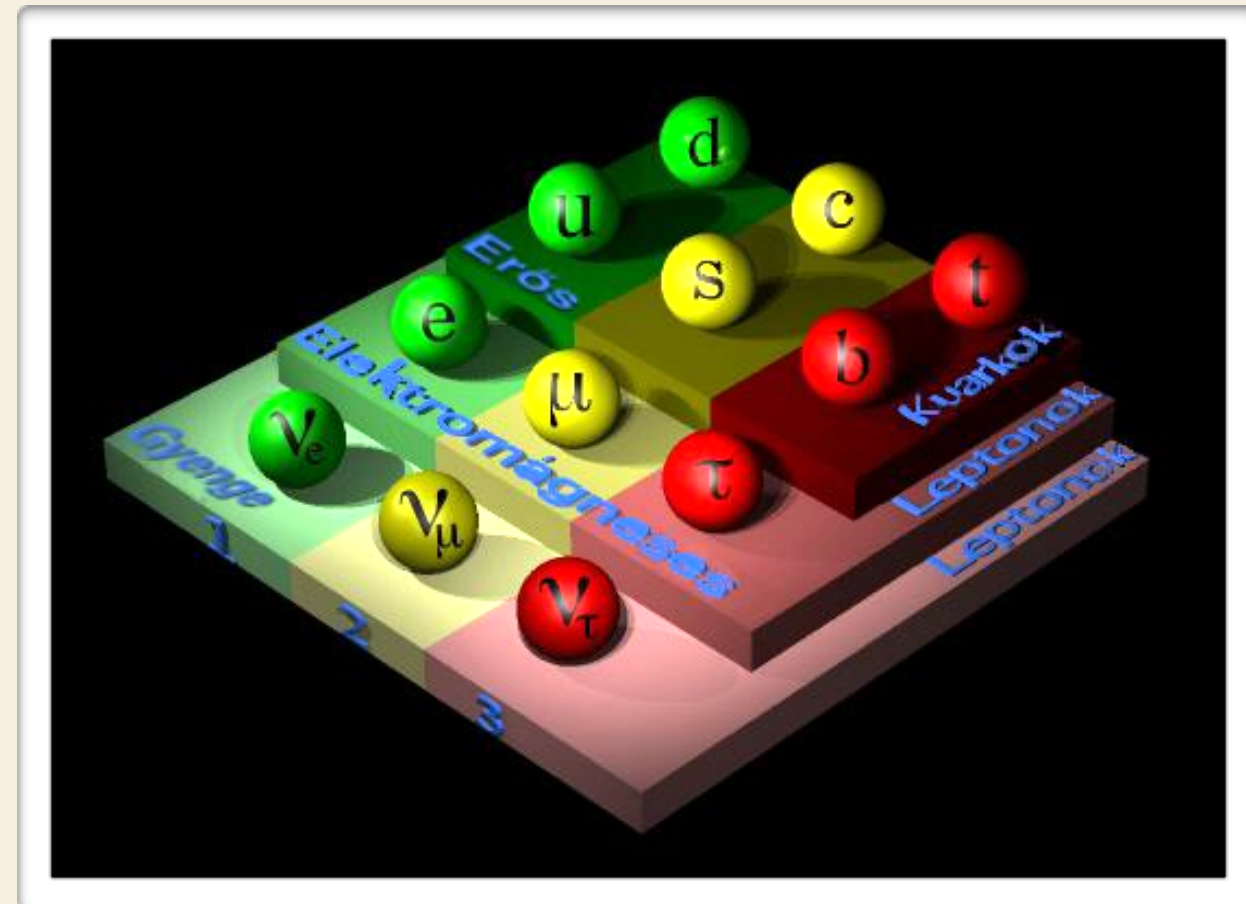
A standard modell

Az anyagi részecskék három családja (fermionok)

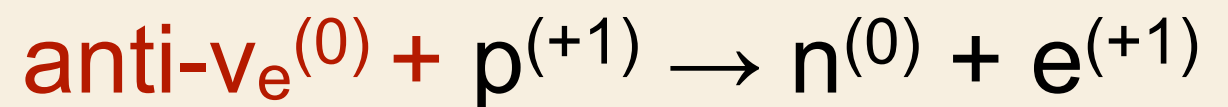
	I	II	III		
tömeg →	2,3 MeV/c ²	1,27 GeV/c ²	173 GeV/c ²	0	125 GeV/c ²
töltés →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
név →	u u-kvark	c c-kvark	t t-kvark	γ foton	H Higgs-bozon
	4,8 MeV/c ²	95 MeV/c ²	4,2 GeV/c ²	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
Kvarkok	d d-kvark	s s-kvark	b b-kvark	g gluon	
	<2,2 eV/c ²	<0,17 MeV/c ²	<15,5 MeV/c ²	91,2 GeV/c ²	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e elektron-neutrínó	ν_μ műon-neutrínó	ν_τ tau-neutrínó	Z⁰ Z-bozon	
	0,511 MeV/c ²	105,7 MeV/c ²	1,777 GeV/c ²	80,4 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
Leptonok	e elektron	μ műon	τ tau	W[±] W-bozon	
					Bozonok (kölcshatások)

Neutrínó-anyag kölcsönhatás

a neutrínók csak a radioaktivitásért felelős gyenge erőt érzik: százezer neutrínó közül csak egy akad fenn a Földön (12740 km), a többi áthalad 12,74 m-en a fennakadás valószínűsége 10^{-11} , tehát 10^{12} neutrínónak kell a detektoron áthaladni ahhoz, hogy néhány ütközzön a detektor anyagával

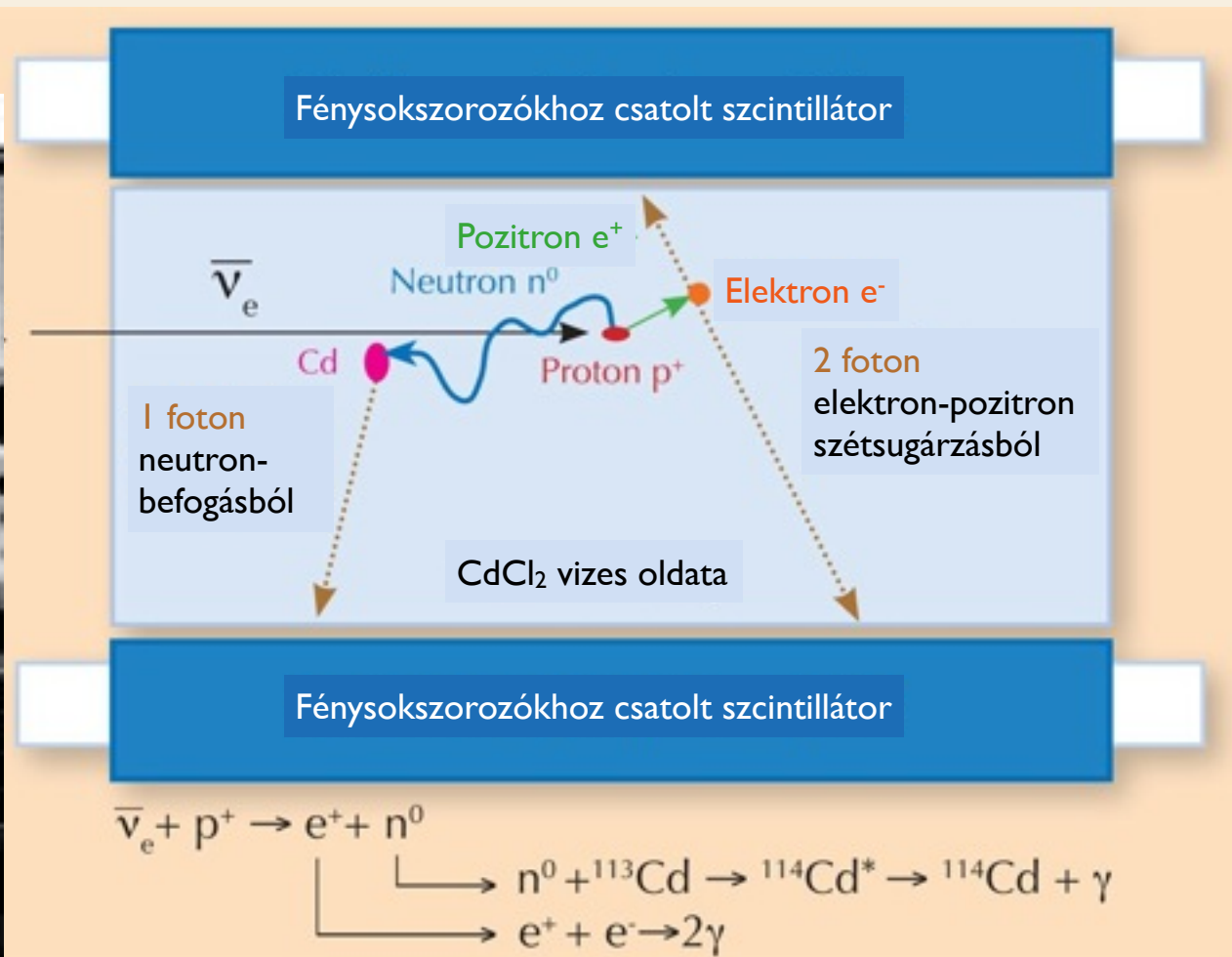
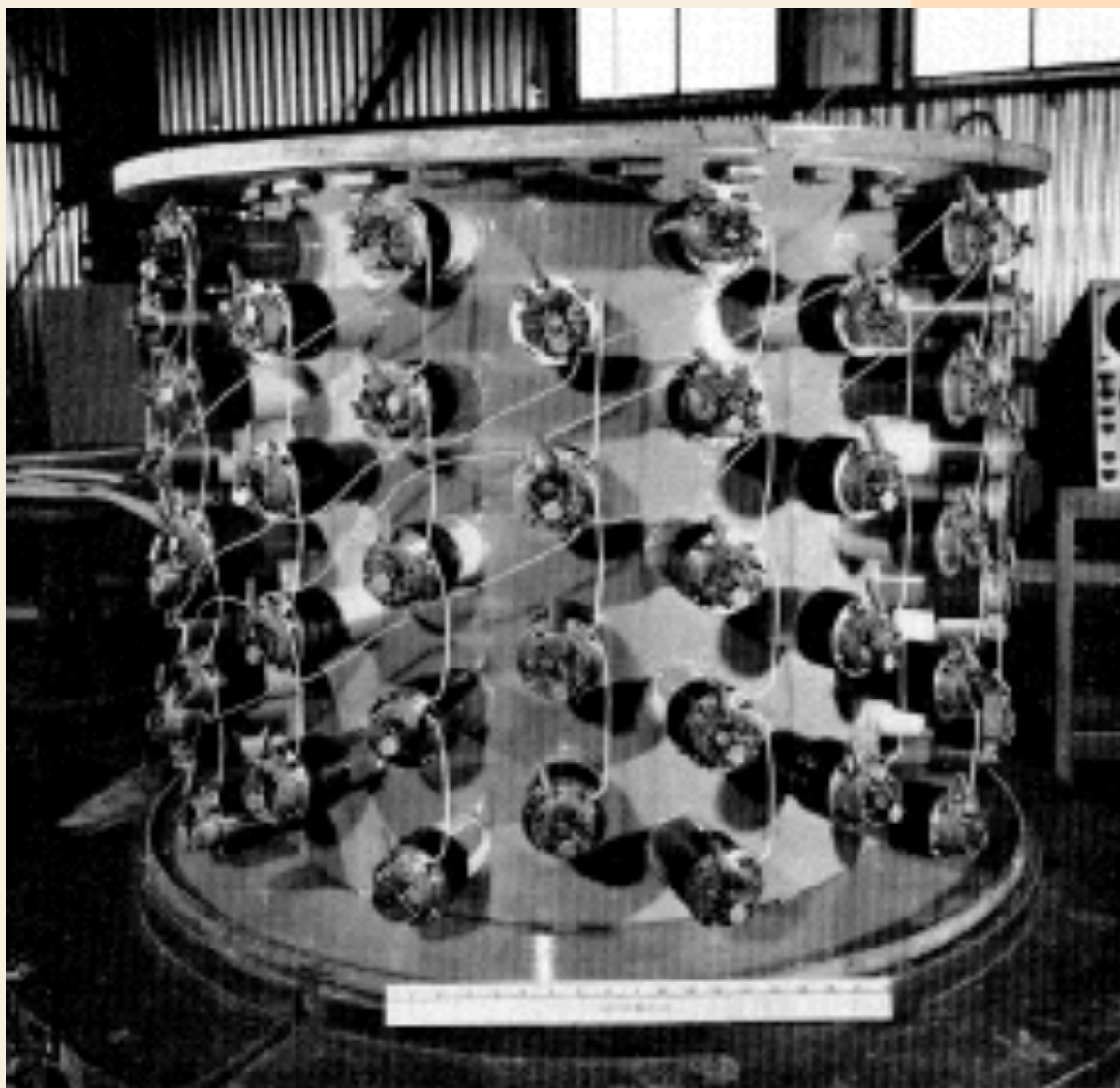


reaktor közelében van ilyen sok neutrínó:



Reines-Cowan kísérlet (1956)

Savannah riveri atomreaktor közelében CdCl_2 oldattal töltött tartály:



hatáskeresztmetszet:

mért: $6,3 \cdot 10^{-48} \text{ m}^2$

számolt: $6 \cdot 10^{-48} \text{ m}^2$

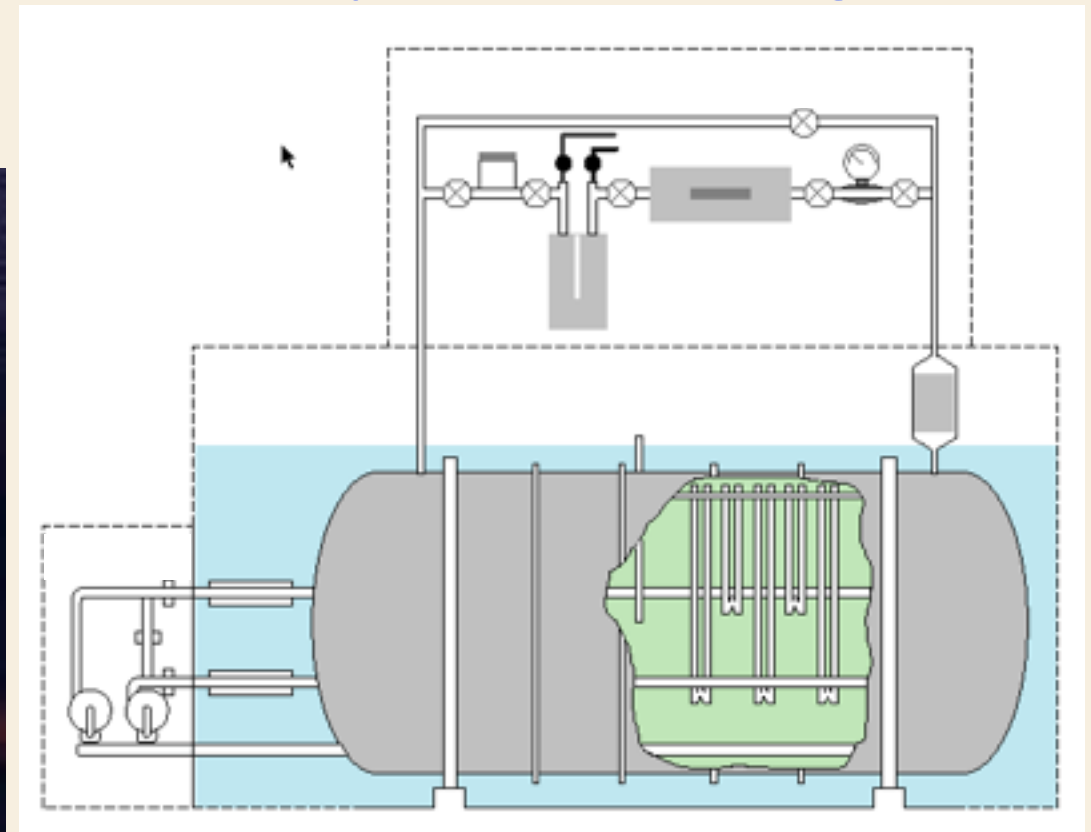
Neutrínó
rejtélyek

Davis kísérlete (1968-1993)

Homestake aranybányában
615 t perklóretilénnel töltött
tartály:

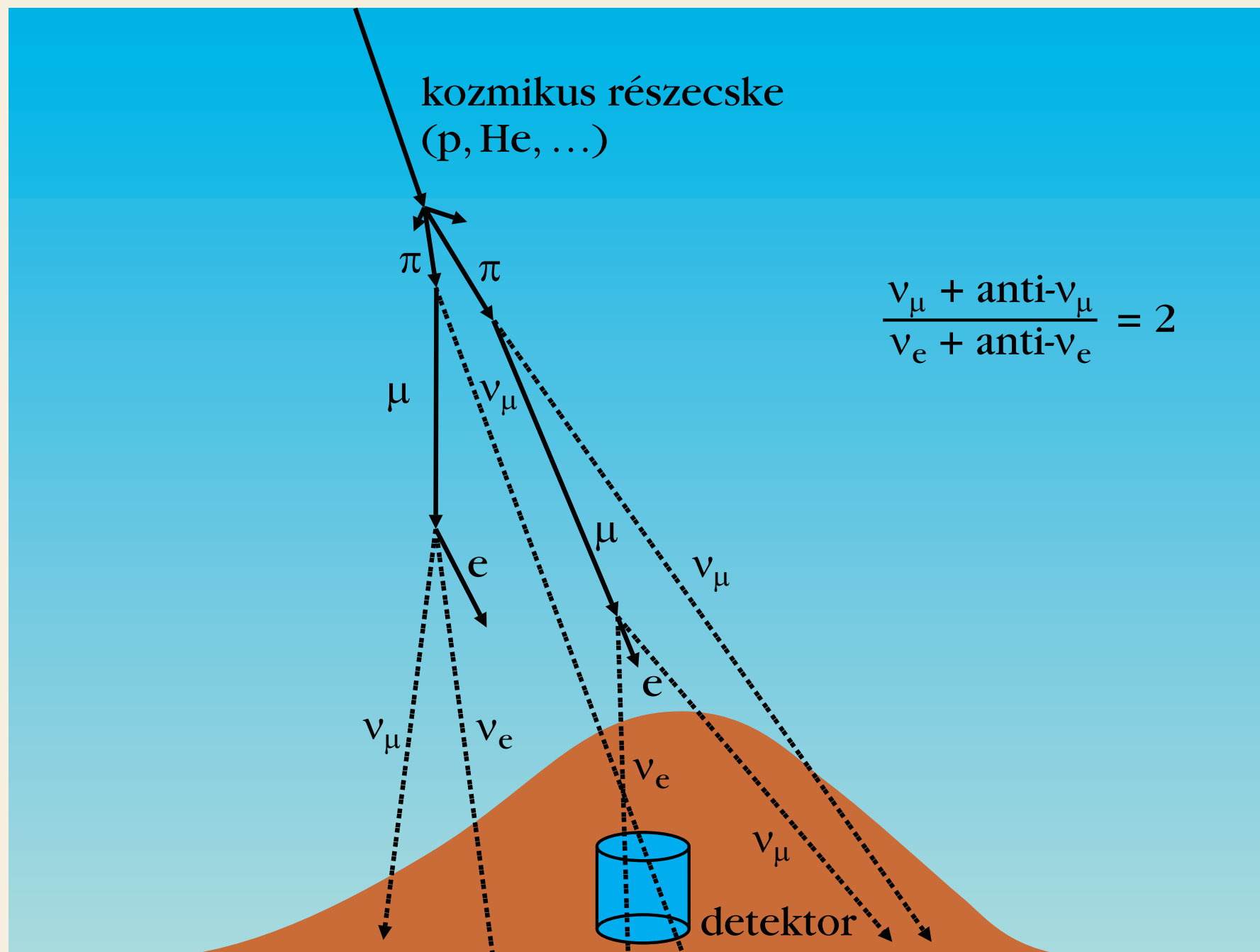


Eseményszám egysége: **1 SNU**
= 1 esemény/ 10^{36} Cl mag/sec



eseményszám:
mért: $2,56 \pm 0,23$ SNU
(17 Ar/70 nap)
becsült: $8,2 \pm 1,8$ SNU
Nap-neutrínó rejtély

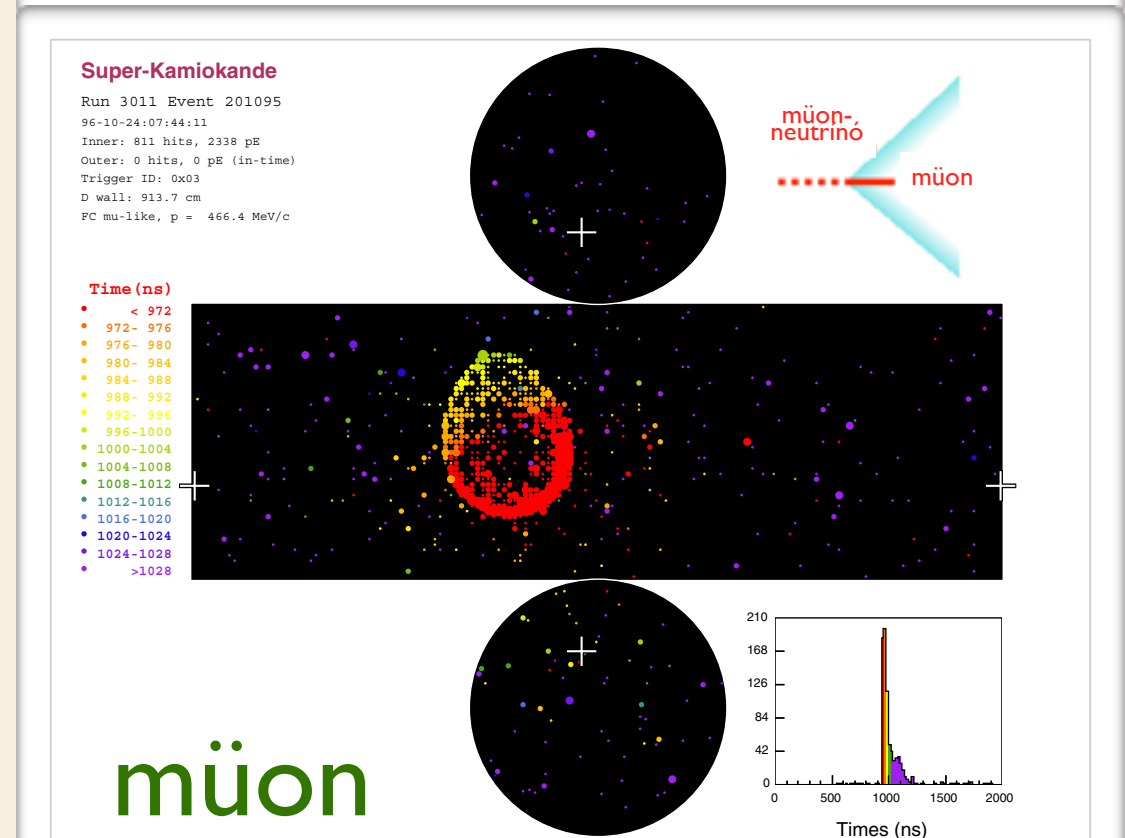
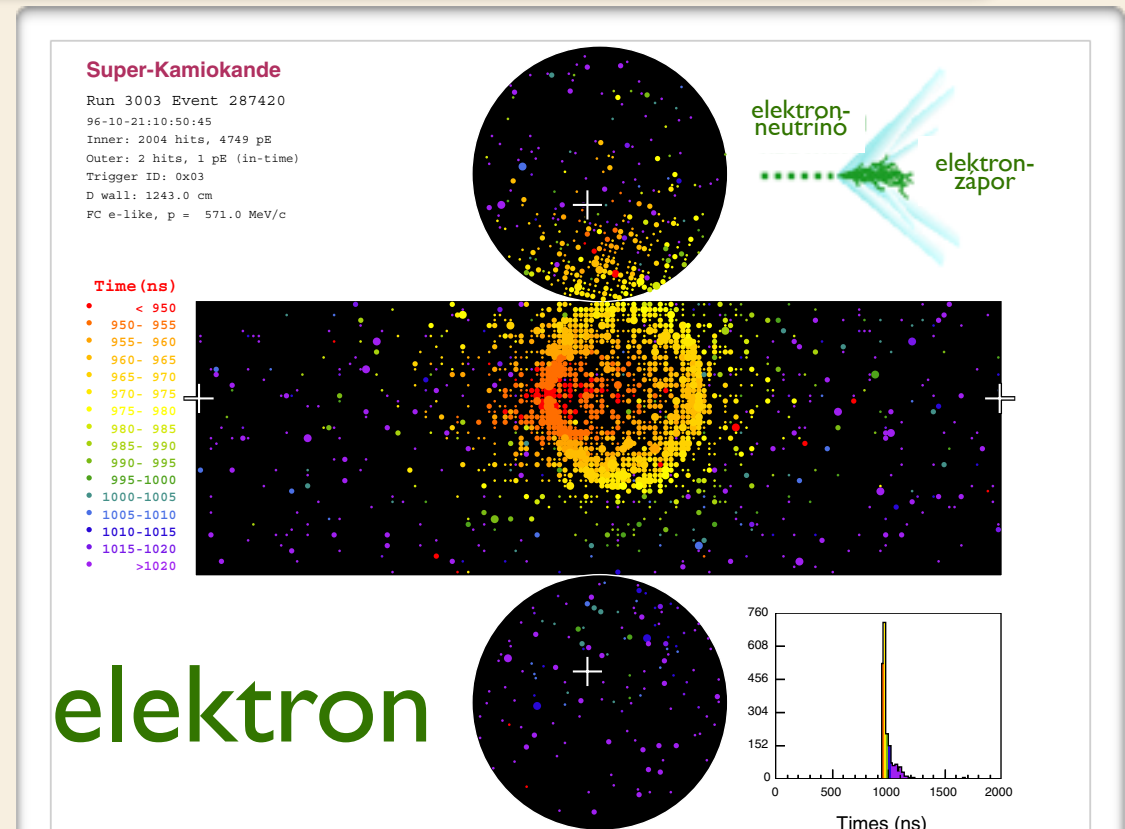
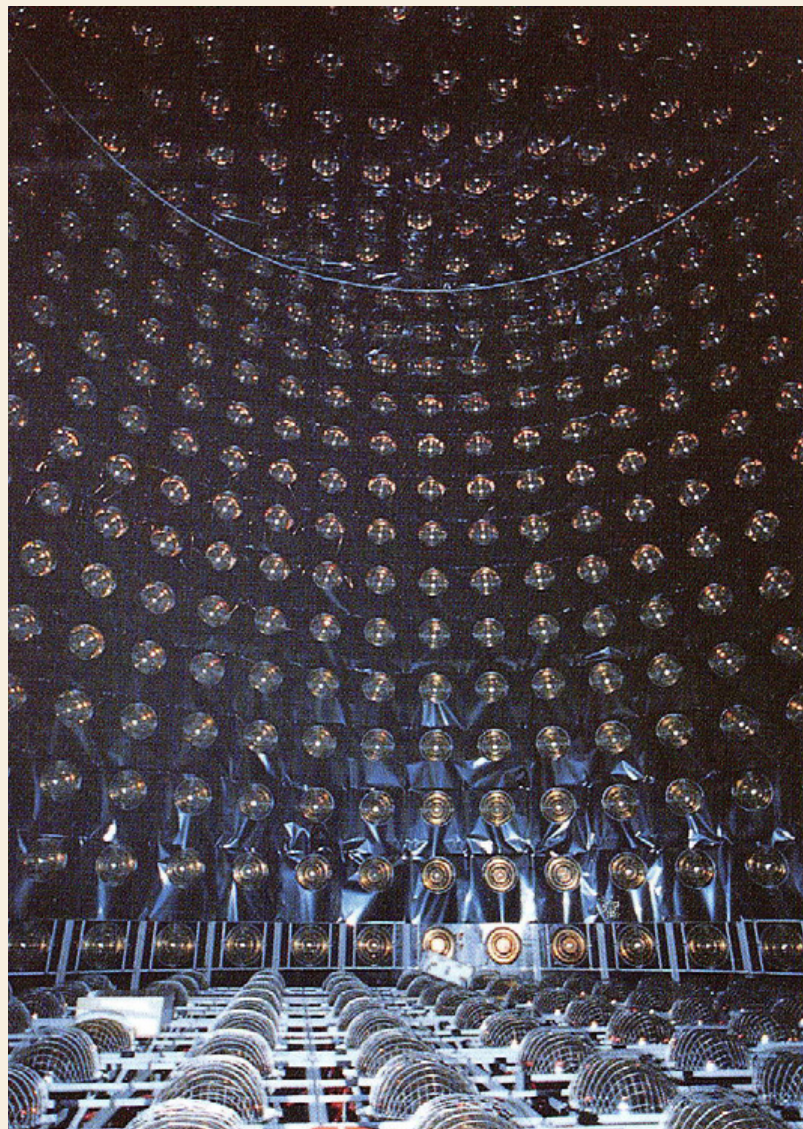
Légköri neutrínók



	adat	elmélet
elektron események	$93,0 \pm 9,6$	88,5
müon események	$1285,2 \pm 9,2$	144,0

Kamiokande II detektor

A nagy PM csövek alkamasak elektron és müon által keltett Cserenkov-kúp megkülönböztetésére: megerősítette a Nap-neutrínó hiányt

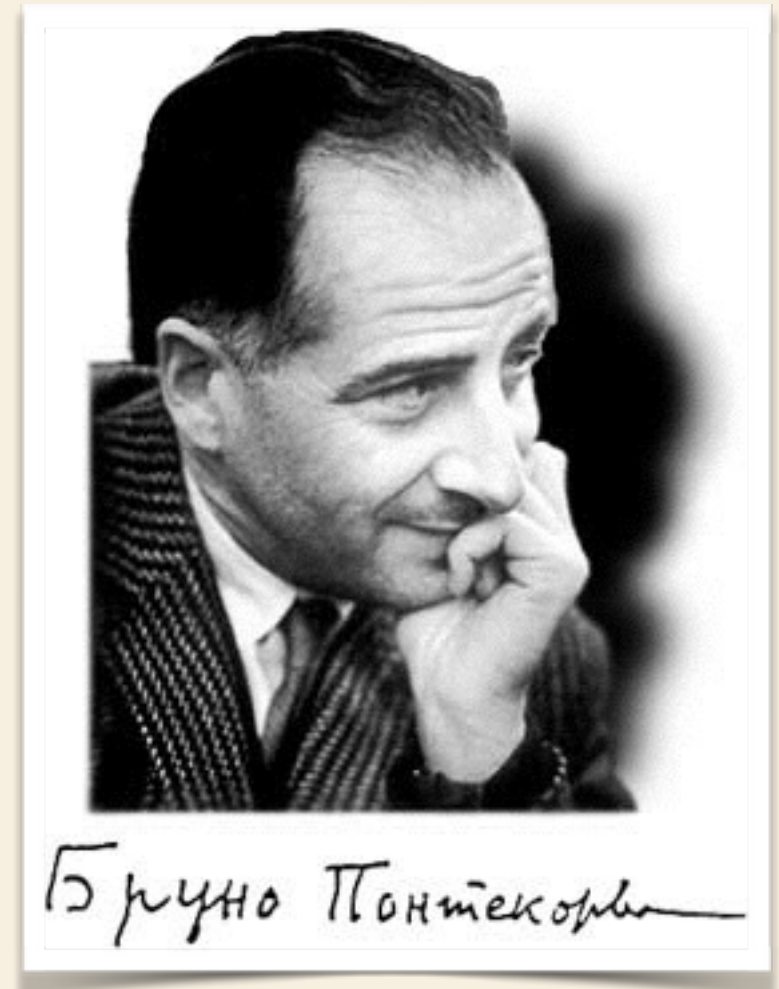


Neutrínók keveredése

Pontecorvo (Pryce?) felvetése

...de ez csupán feltevés, nincs rá elméleti indok

a különböző fajtájú (ízű) neutrínók átalakulhatnak egymásba, ha egy rögzített ízű neutrínó, mondjuk ν_μ tömege nem egyértelmű, hanem több (valószínűleg három) különböző rögzített m_i tömegű neutrínó keveréke hasonlóan a kvarkokhoz a kvarkok esetében a keveredés a Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) mátrix megjelenéséhez vezet, amelynek hatása mérhető a részecskefizikai szórási folyamatokban



A CKM mátrix analógja a neutrínóknál a PMNS mátrix (Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata)

Neutrínók keveredésének következménye

A T idő alatt L távolságot megtett neutrínók fázisa különbözni fog, ha tömegük különbözik

⇒ Annak valószínűsége, hogy a neutrínó
nem alakul át L távolság után

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta m^2 c^4 \cdot L}{h \cdot c \cdot E_\nu} \right)$$

$$\Delta m^2 = m_i^2 - m_j^2 \quad h \cdot c = 1,24 \cdot 10^{-9} \text{ eV} \cdot \text{ km}$$

Neutrínóíz-rezgés

a keveredés θ szöge megszabja hogy mennyi az i és j tömegkomponensek részesedése ν_μ -ben:

- ha $\theta = 0^\circ$ (vagy 90°), akkor ν_μ tisztán ν_i (vagy ν_j), és nincs keveredés
- ha $\theta = 45^\circ$, akkor ν_μ -ben egyenlő arányban van ν_i és ν_j , a neutrínókeveredés a legnagyobb

például kizárólag $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ keveredést feltételezve:

meghatározott L távolságot megtéve ν_μ teljesen ν_τ -vá alakul, továbbhaladva visszaalakul az eredeti müon-neutrínóvá, s.í.t.: a neutrínó íze rezeg

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta m^2 c^4 \cdot L}{h \cdot c \cdot E_\nu} \right)$$

Neutrínóíz-rezgés

a neutrínóíz-rezgés feltétele, hogy a neutrínóknak legyen tömege, például

$$\Delta m^2 = (1 \text{ eV}/c^2)^2 \text{ és } E_\nu = 1 \text{ GeV esetén}$$

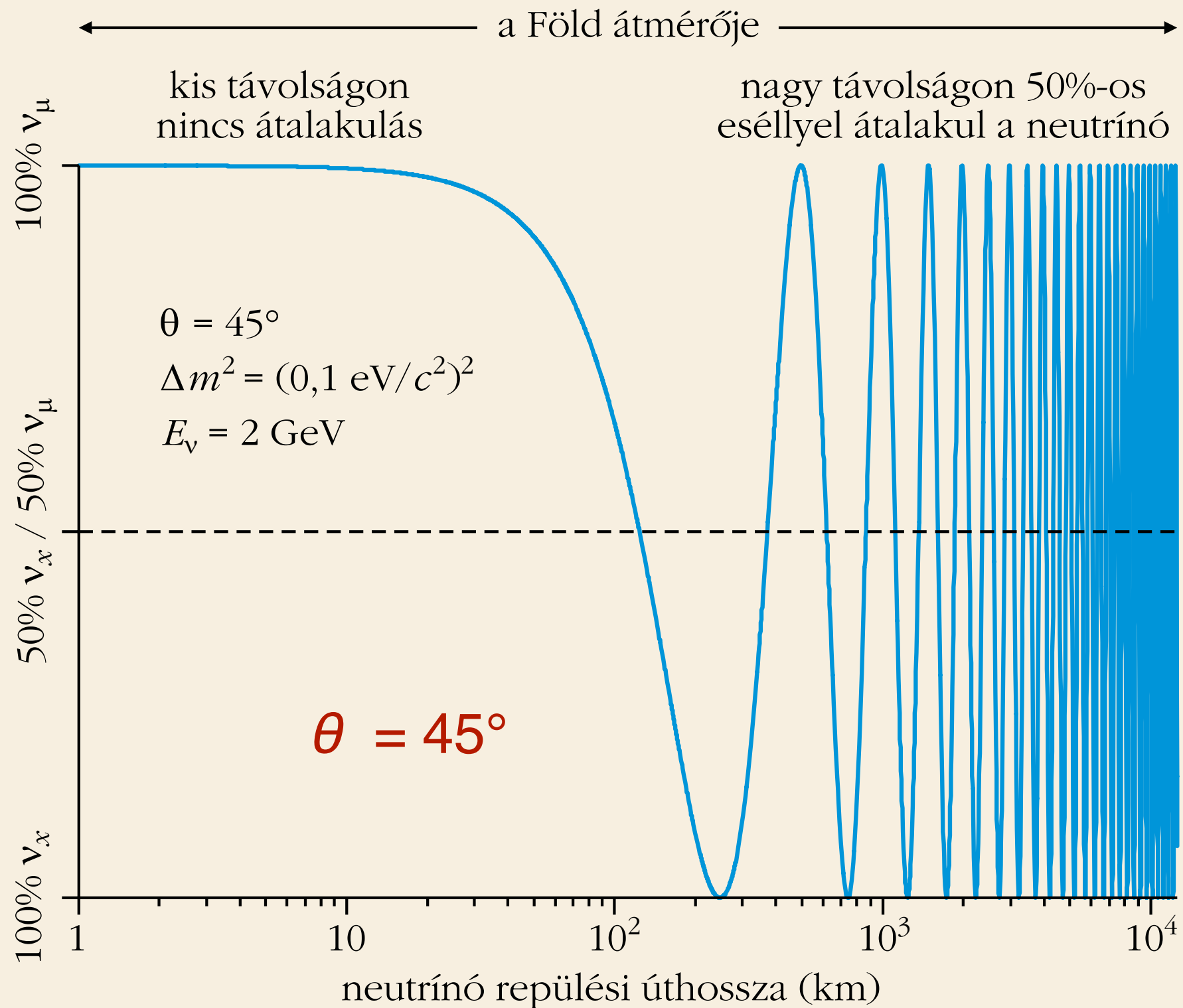
$$\Delta m^2 c^4 L / (hc E_\nu) = L / 1,24 \text{ km, tehát}$$

- $L = 1,24 \text{ km}$ -en teljes átalakulás
- tízszer nagyobb neutrínó energia esetén tízszer ekkora távolságra van szükség
- $\Delta m^2 = (0,1 \text{ eV}/c^2)^2$ esetén százszor nagyobbra

ha sikerül észlelni a neutrínóíz-rezgést és meghatározni L -t, akkor következtetés tudunk levonni a neutrínók tömegére

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta m^2 c^4 \cdot L}{h \cdot c \cdot E_\nu} \right)$$

Az át **nem** alakulás valószínűsége



Légköri neutrínó anomália értelmezése neutrínóíz-rezgéssel

	adat	elmélet
elektron események	$93,0 \pm 9,6$	88,5
müon események	$85,2 \pm 9,2$	144,0

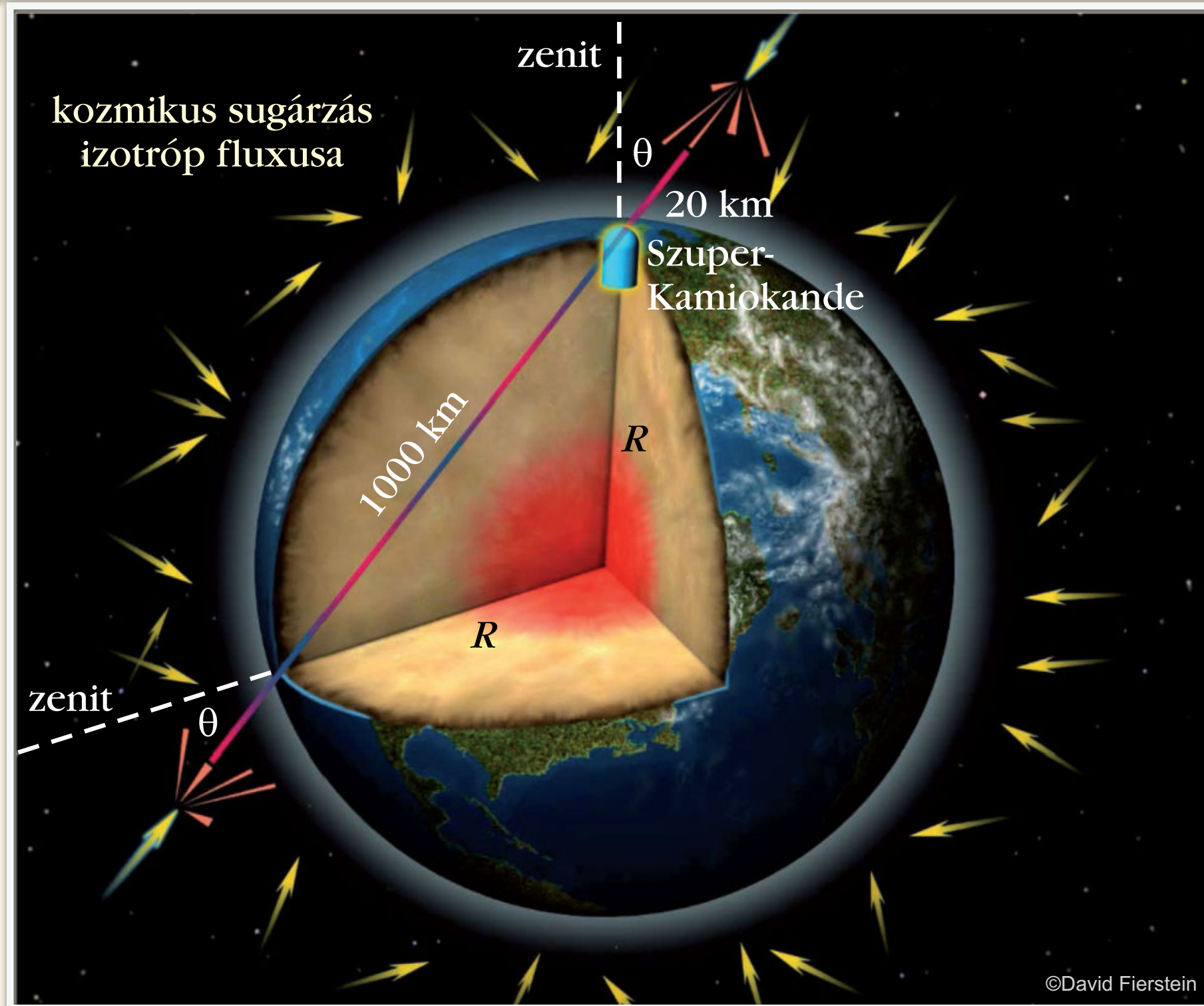
Elég meggyőző ez?

Nem, de lehet jobb mérést végezni!

Neutrínóíz-rezgés nélkül a felfelé és lefelé haladó neutrínók várt áramsűrűsége egyenlő (fel-le szimmetrikus)

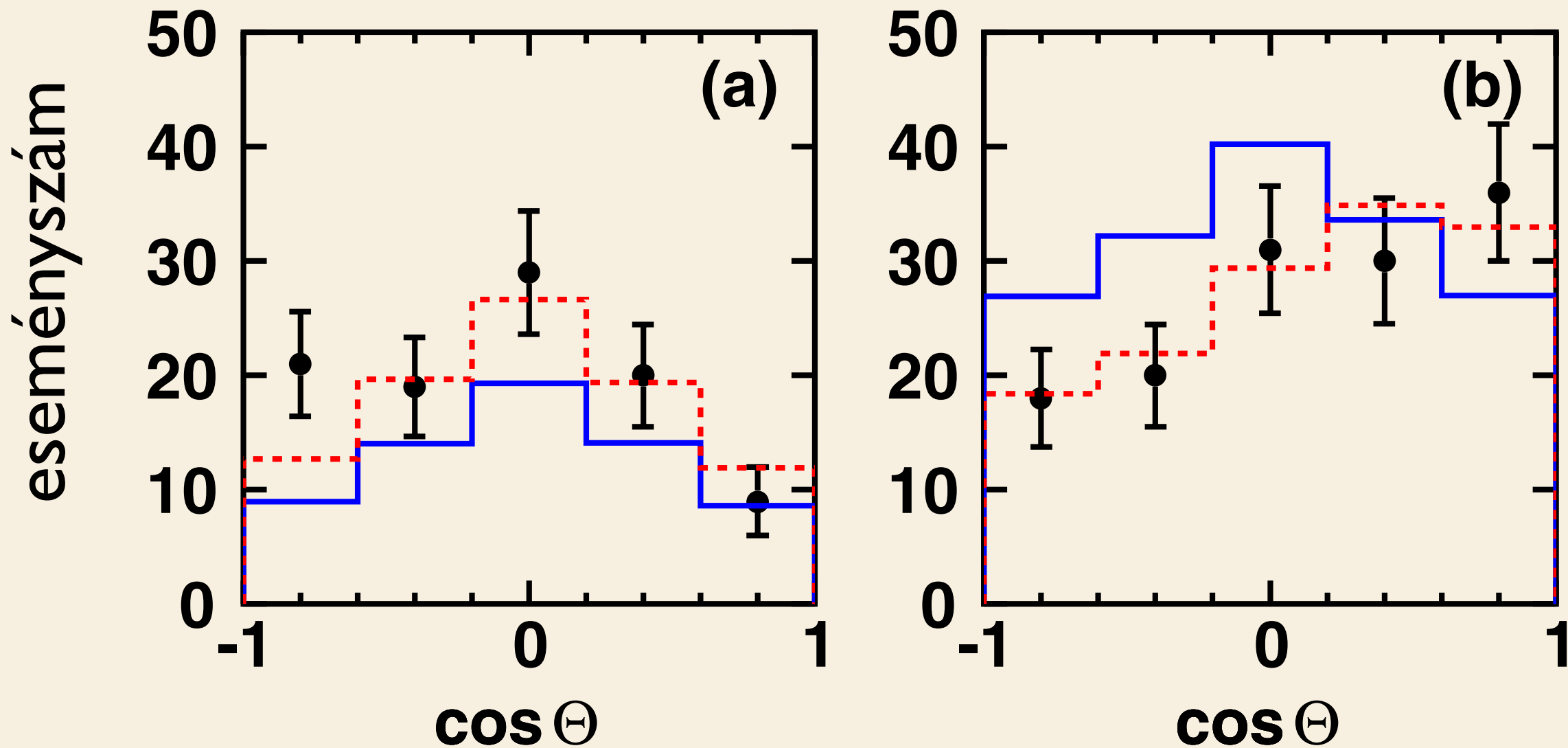
A neutrínóíz-rezgés megsérti ezt a szimmetriát (a Földön áthaladó neutrínók átalakulhatnak)

A fel-le szimmetria sérülése



irányérzékeny detektorral mérhető

Kamiokande II eredménye



a) elektron-események b) müion-események

P(értelmezés véletlen ingadozással) = 1%
az elvárás a részecskefizikában 10⁻⁵%

SzuperKamiokande kísérlet

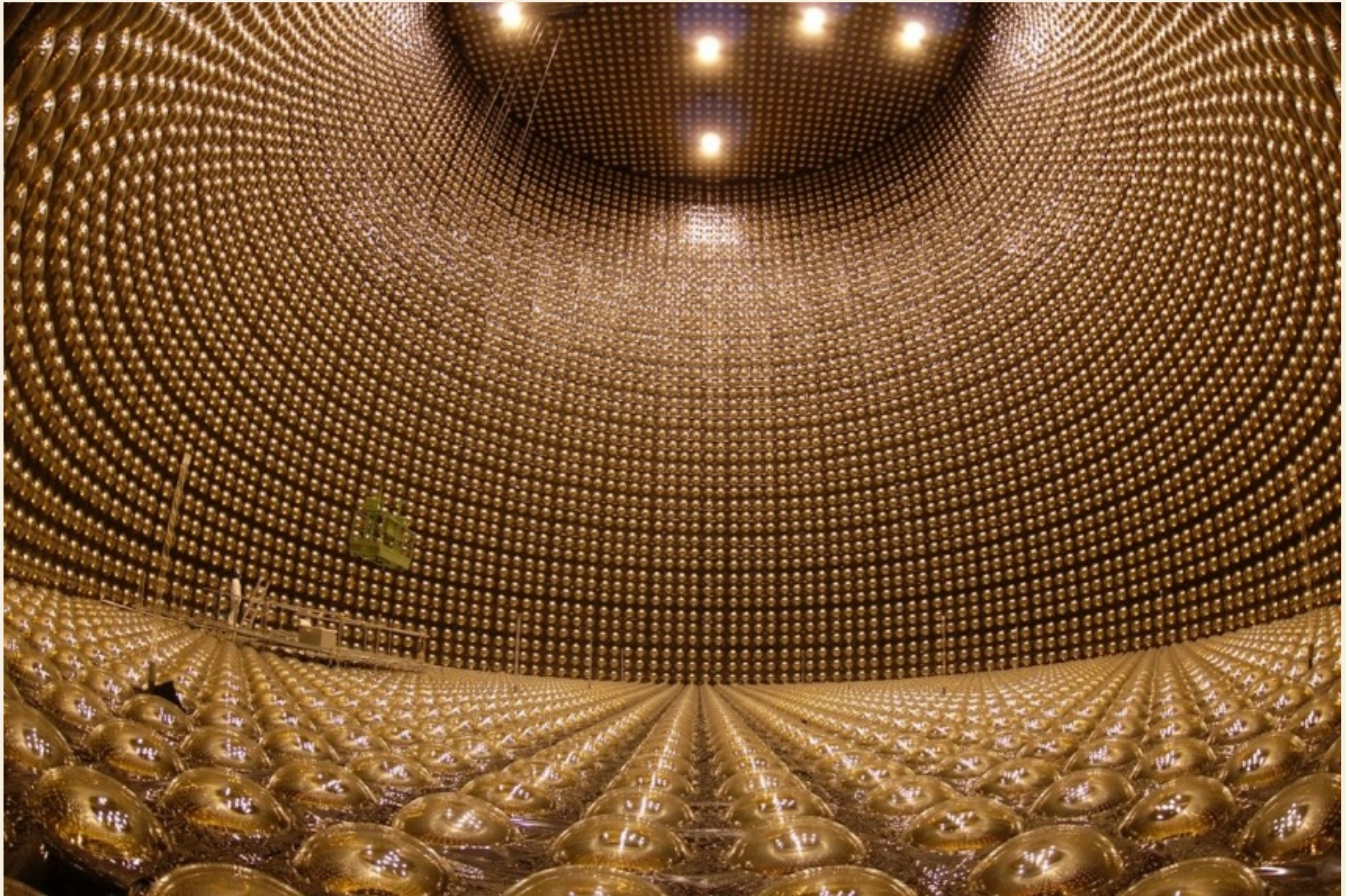
- belső tartály: 22,5 kt víz, 11200 db 50 cm-es PM cső
- külső tartály: 27,5 kt víz, 1900 db 20 cm-es PM cső
- müon-neutrínók azonosításának hatásfoka ~100%



$$R_{\mu/e} = \frac{\nu_{\mu} + \text{anti-}\nu_{\mu}}{\nu_e + \text{anti-}\nu_e}$$

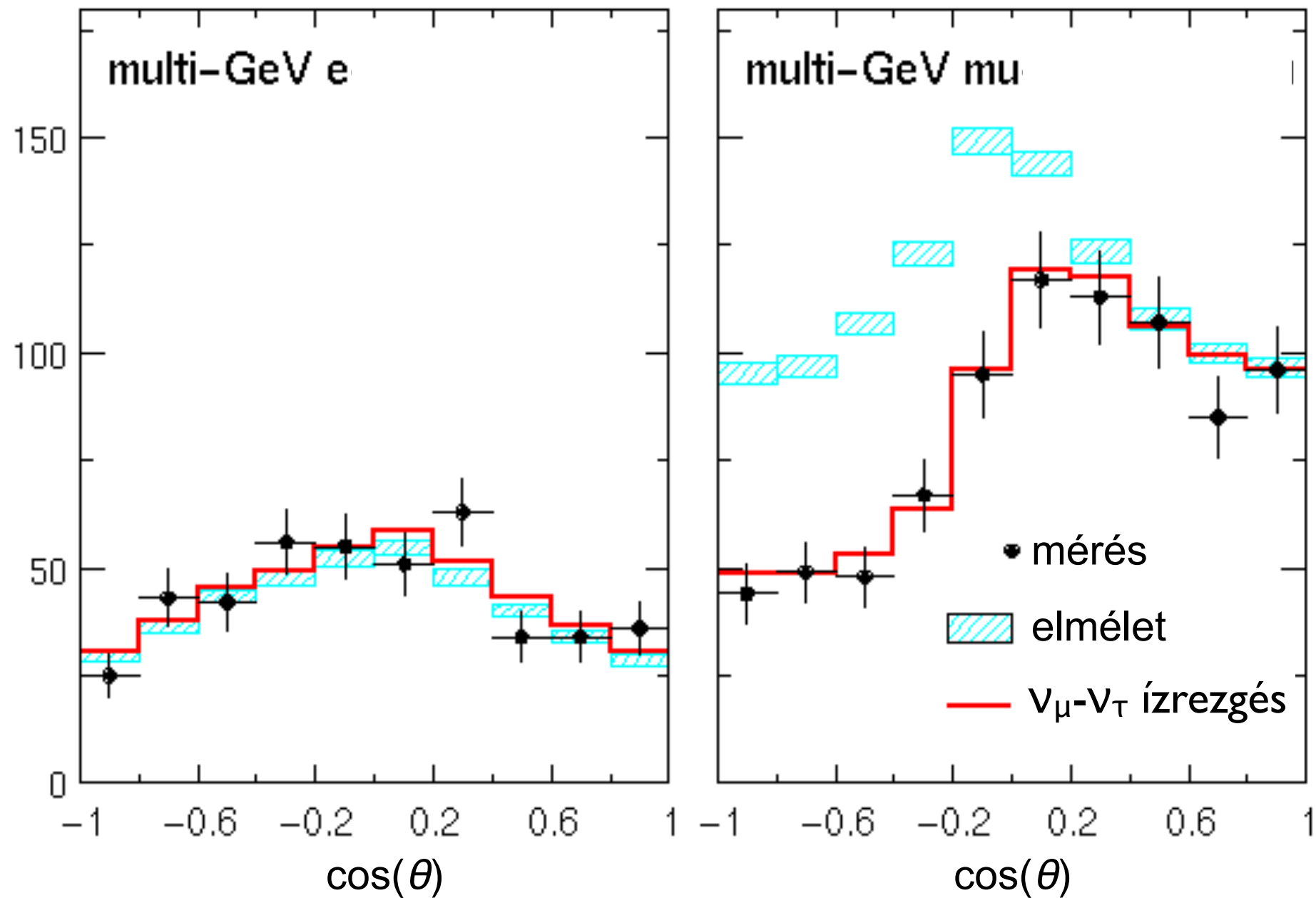
$(R_{\mu/e})_{\text{mérés}} / (R_{\mu/e})_{\text{elmélet}} = 0,688 \pm 0.053$ megerősíti a
Kamiokande II mérését

SzuperKamiokande kísérlet



A neutrínó-rezgés felfedezése

eseményszám



a) elektron-események

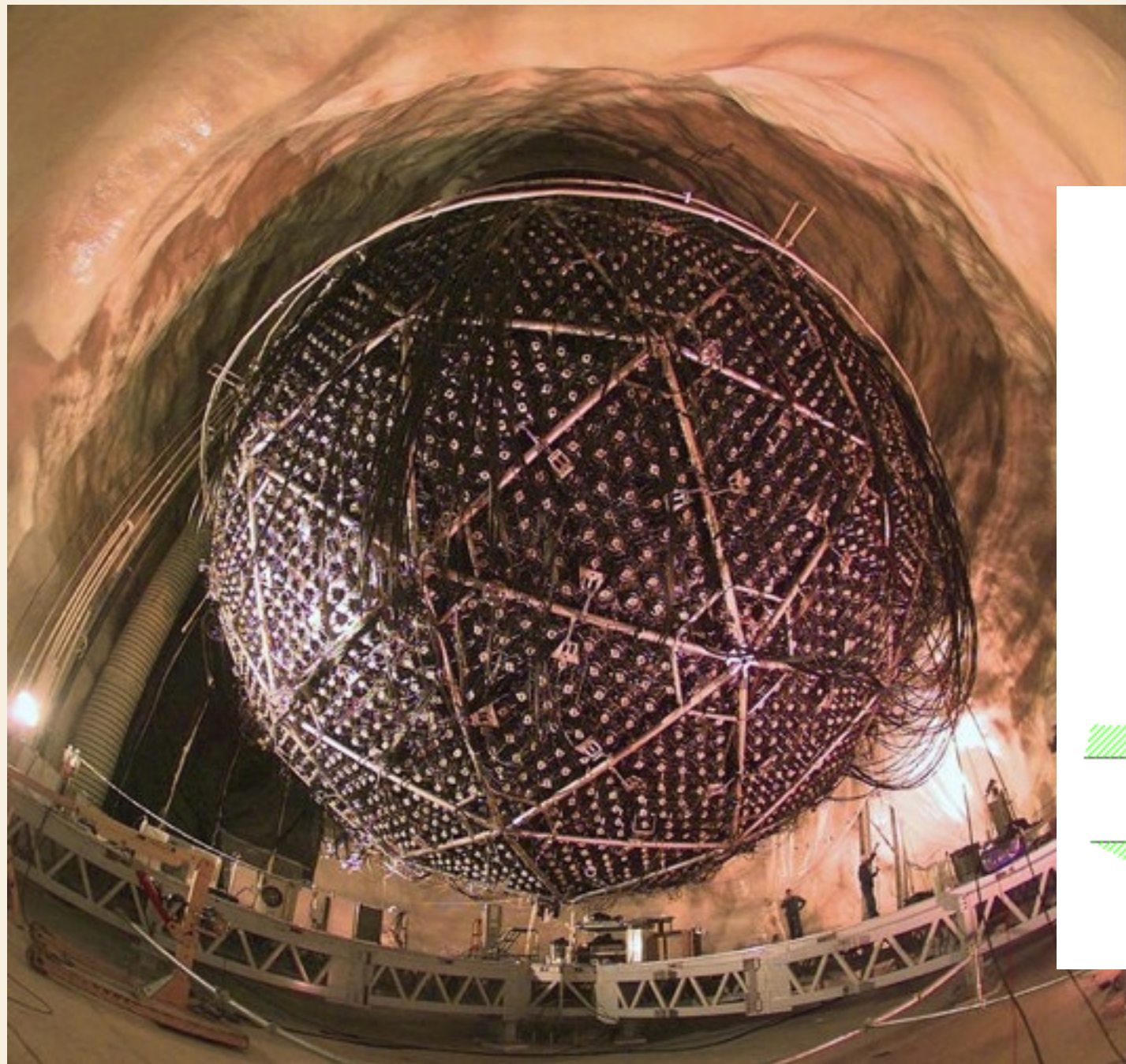
b) müion-események

A neutrínóíz-rezgés felfedezése

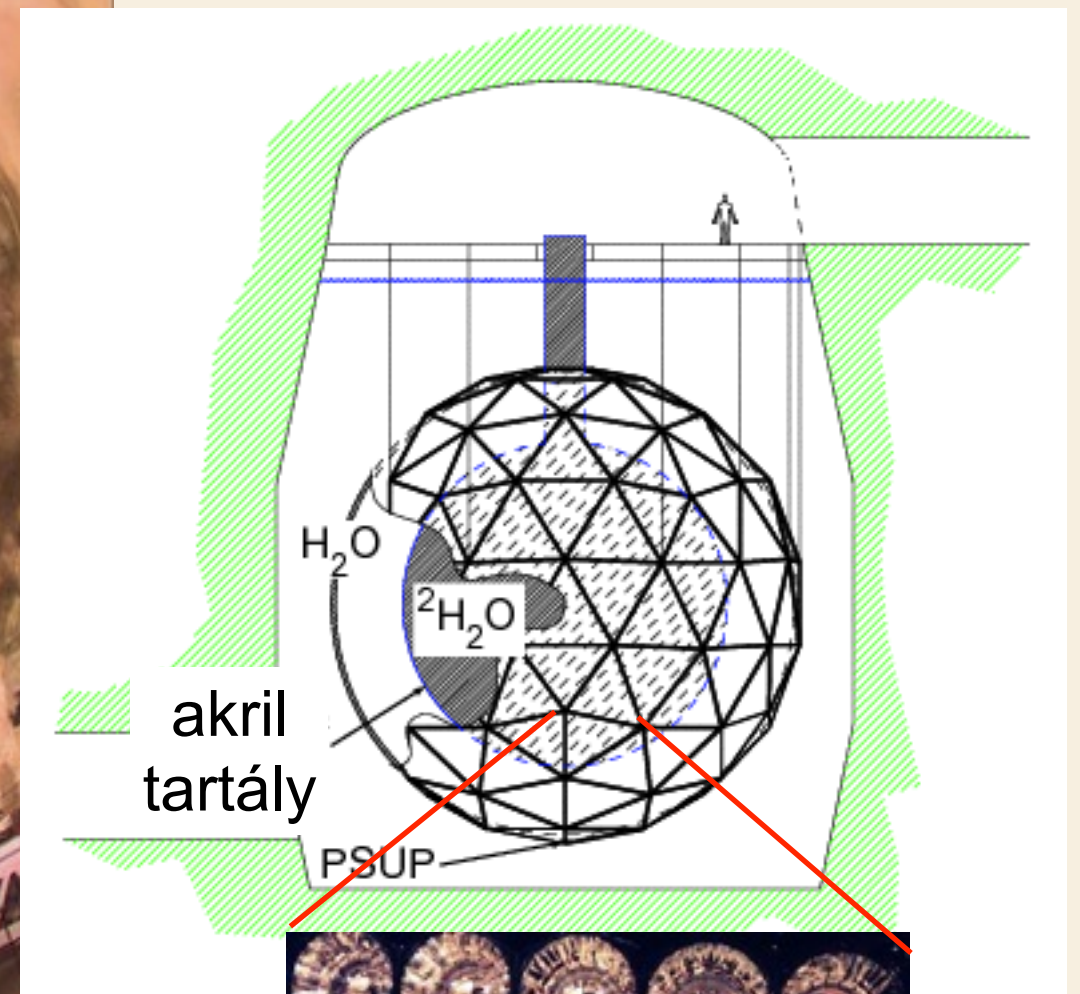
sok kérdést vet fel:

- Mekkora az ízrezgéshez szükséges Δm^2 tömegnégyzet különbség?
- Mekkora a keveredés θ szöge?
- A mérésben csak a müon-neutrínók eltűnedezését sikerült észlelni. Vajon a várakozásnak megfelelően tau-neutrínóvá alakultak?
(az elektron-neutrínók száma nem változott)
- Van-e keveredés más neutrínók között?
- Nem utolsó sorban: a légköri neutrínókra talált átalakulást meg lehet-e figyelni a Napból érkező neutrínók esetében is?
- A korábban fejtegetett Nap-neutrínó rejtélyre is a neutrínóíz-rezgés a magyarázat?

Az SNO kísérlet (1998-2002)



1100 t tiszta nehézvíz (D_2O)
6 m sugarú tartályban



2000 m-rel a felszín alatt

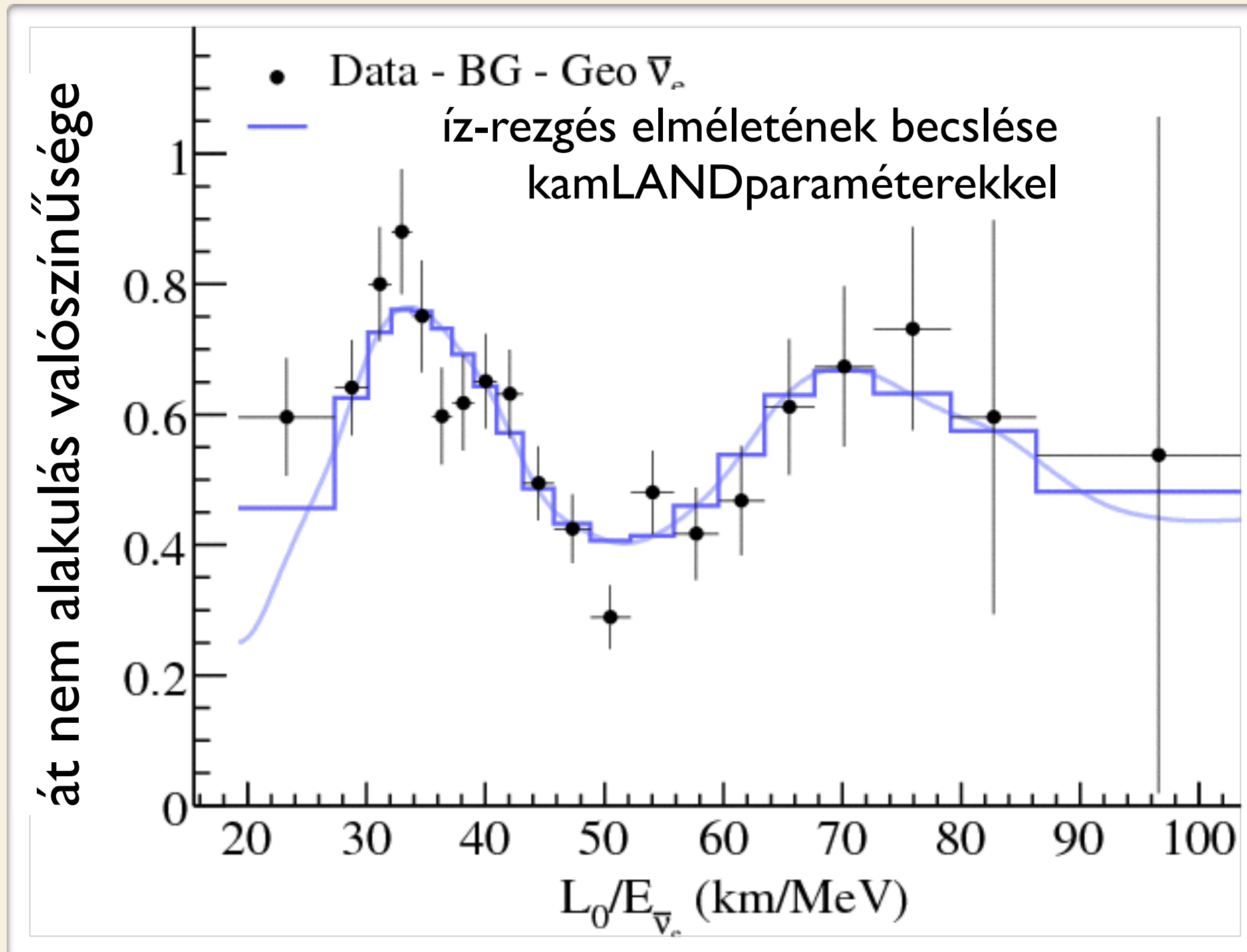
Következmények

A neutrínóíz-rezgés túlmutat a standard modellen

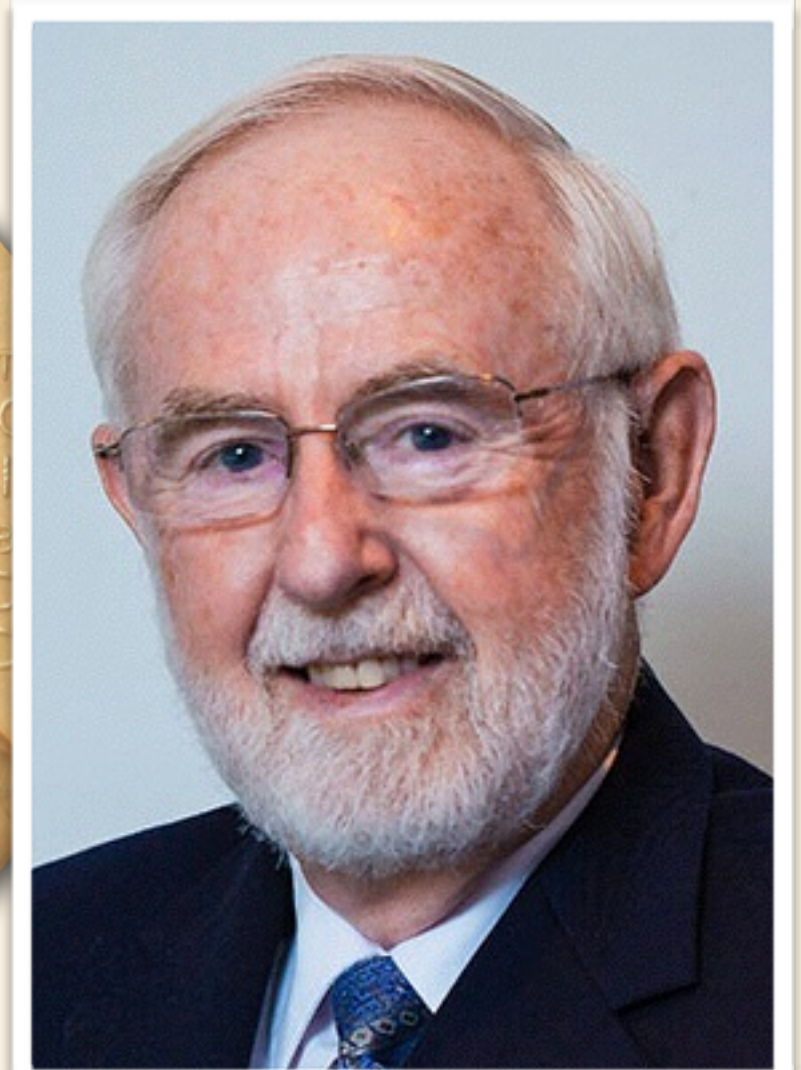
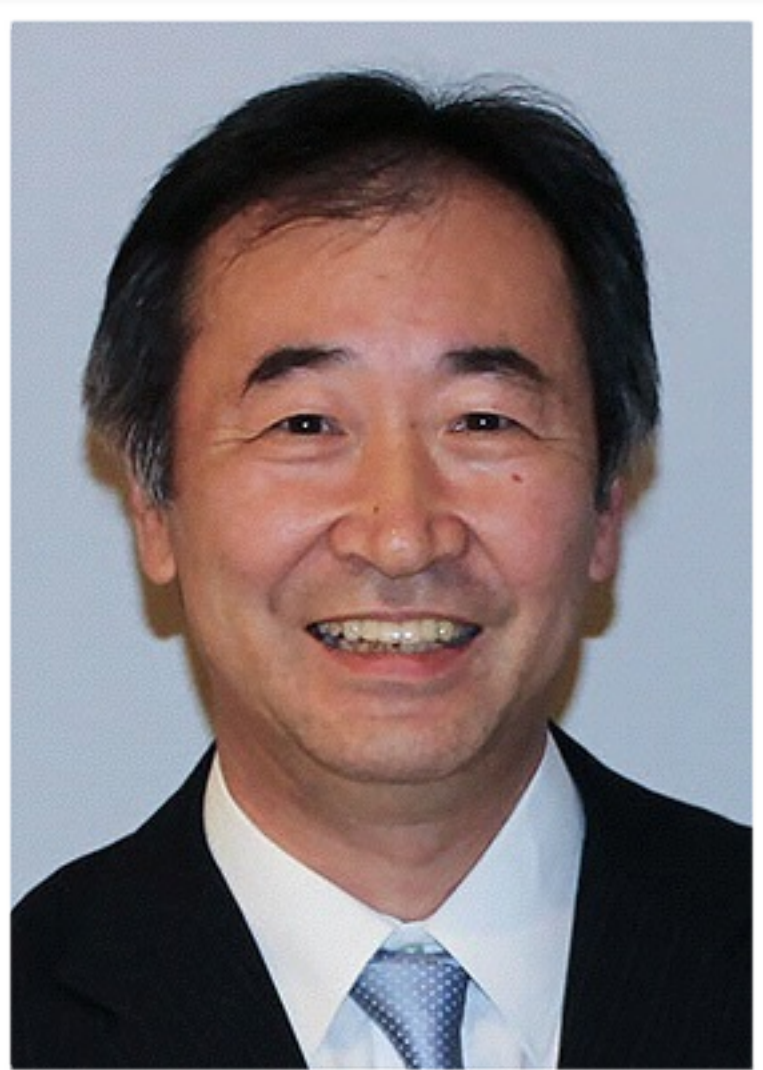
- A standard modellben a neutrínóknak nincs tömegük
- A neutrínóíz-rezgések felfedezése csak úgy értelmezhető, ha elfogadjuk, hogy a háromból legalább kettőnek van tömege
- Részecskeátalakulás azonban csakis úgy lehetséges, ha a részecske legalább két erőt érez
- Kézenfekvő, hogy a BEH-mező hat a neutrínókra, de
- a Higgs-mechanizmus megkövetelné, hogy a szokásos neutrínóknak legyen olyan **steril neutrínó**nak nevezett párja, amely csak a BEH mezőt érzi, mást nem

kísérleti észlelésük nehéz

Neutrínóíz-rezgés ma



Zárszó: 2015. évi Fizikai Nobel-díj



Kadzsi Takaaki

Arthur B. McDonald

*a „neutrínóíz-rezgés felfedezéséért,
ami bizonyítja, hogy a neutrínóknak van tömegük”*

Zárszó

2015 november 8-án jelentették be San Fransiscoban,
hogy a 2016. évi Fizikai Áttörés díjának
(Breakthrough prize in Fundamental Physics, 3 MUSD)
kitüntetettjei öt neutríno-kísérlet kutatócsoportjai.
a kínai Daya-Bay, a japáni KamLAND, K2K/T2K, Szuper
Kamiokande és a kanadai SNO

Általános vélekedés:

a neutrínók vizsgálata révén lehet választ kapni a
részecskefizika és a kozmológia több megválaszolatlan
kérdésére.