

Neutrínók Ízrezgése

Trócsányi Zoltán

Eötvös Loránd Tudományegyetem és
Debreceni Egyetem

HTP utótalálkozó

Budapest 2024. november 30.

Mottó

A tudománynak azonban, hogy el ne satnyuljon,
nem szabad csak gyakorlati célokat szem előtt
tartani.

Albert Einstein

Mottó

A tudománynak azonban, hogy el ne satnyuljon,
nem szabad csak gyakorlati célokat szem előtt
tartani.

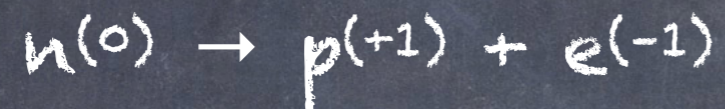
Albert Einstein

Az életnek azonban, hogy el ne satnyuljon,
nem szabad csak gyakorlati célokat szem előtt
tartani.

TZ

Wolfgang Pauli jóslata

béta-bomlásban látszik:

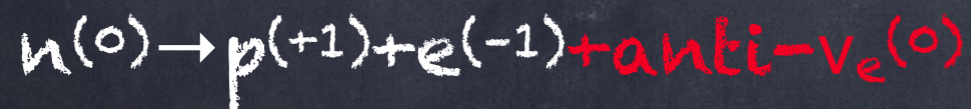


✓energia

✓lendület

✓perdület

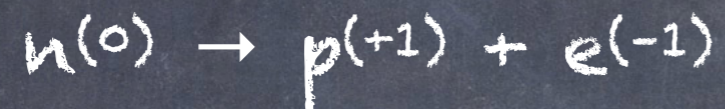
megmaradása megköveteli egy további részecske keletkezését



Wolfgang Pauli (1900-1958)
a „Pauli kizárási elv felfedezéséért”

Wolfgang Pauli jóslata

béta-bomlásban látszik:

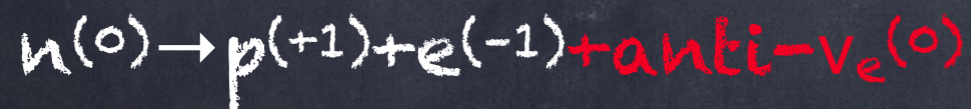


✓energia

✓lendület

✓perdület

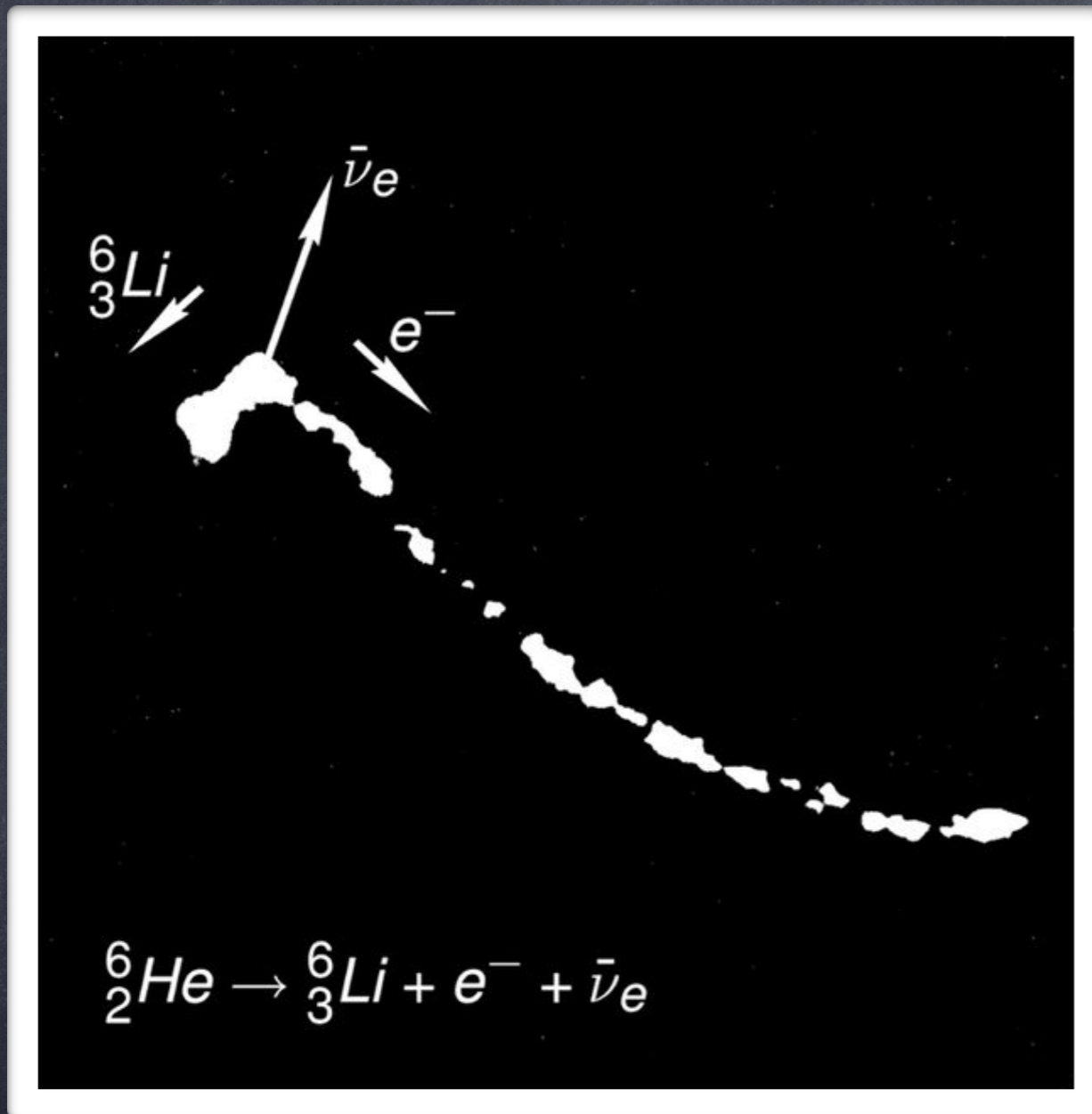
megmaradása megköveteli egy további részecske keletkezését



Wolfgang Pauli (1900-1958)
a „Pauli kizárási elv felfedezéséért”

Marx György: a leptonszám megmarad

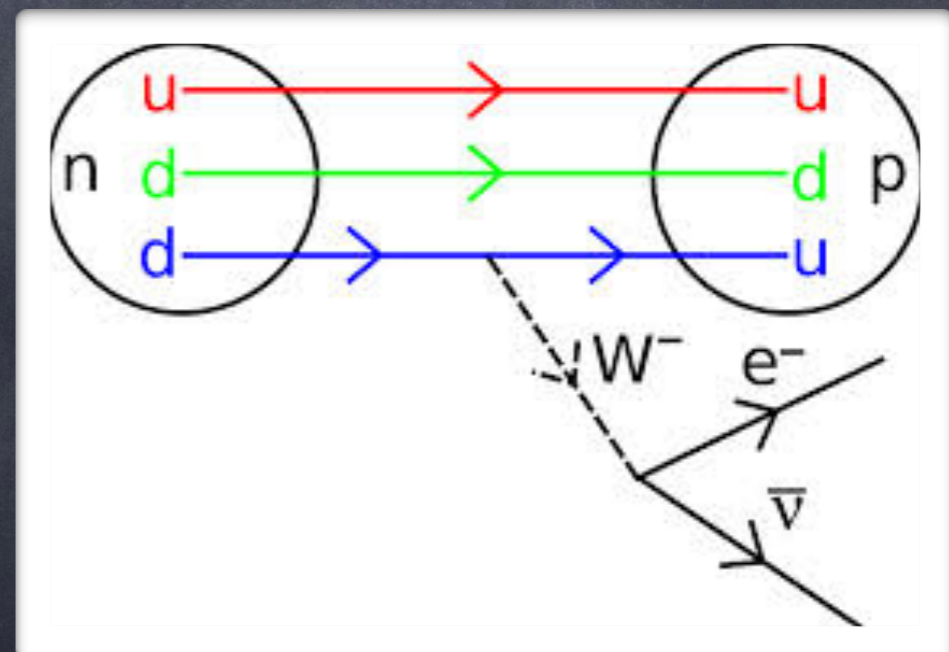
Csikai-Szalay kísérlet (1956)



$$n^{(0)} \rightarrow p^{(+1)} + e^{(-1)} + \text{anti-}\nu_e^{(0)}$$

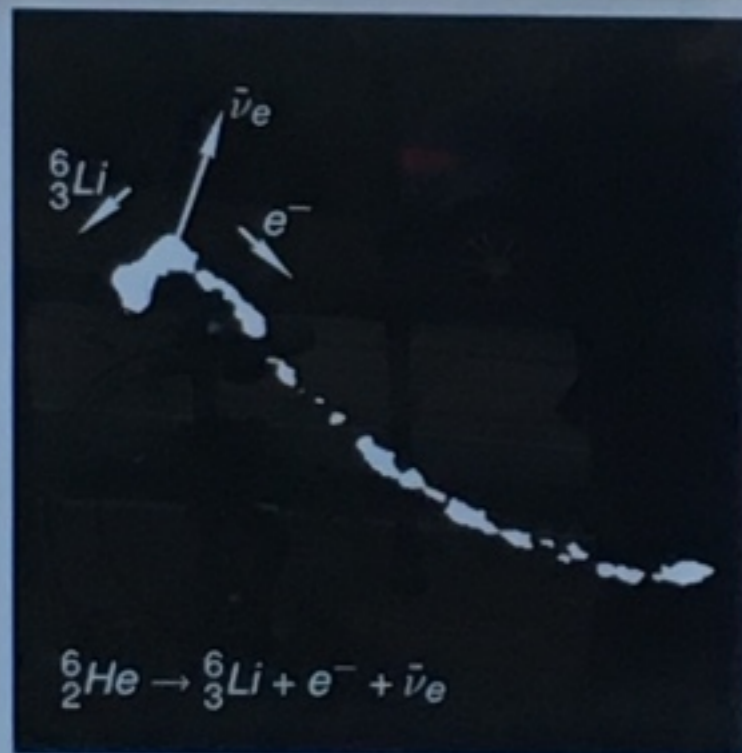
elemi szinten:

$$d^{(-1/3)} \rightarrow u^{(+2/3)} + e^{(-1)} + \text{anti-}\nu_e^{(0)}$$



Csikai-Szalay Kísérlet (1956)

ma az Atomki az Európai Fizikai Társulat történelmi emlékhelye



EUROPEAN PHYSICAL SOCIETY – EPS HISTORIC SITE THE NEUTRINO EXPERIMENT AT MTA ATOMKI

USING A CLOUD CHAMBER LOCATED IN THIS BUILDING, IN 1956 J. CSIKAI AND A. SZALAY PHOTOGRAPHED BETA-DECAY EVENTS. IN SOME CASES THE ANGLE BETWEEN THE TRACKS OF THE ELECTRON AND THE RESIDUAL NUCLEUS IMPLIED THE EMERGENCE OF AN UNDETECTED THIRD PARTICLE IN THE DECAY. THUS CONFIRMING THE EXISTENCE OF THE NEUTRINO, THE DEBRECEN NEUTRINO EXPERIMENT LAID A BRICK OF THE FOUNDATION OF MODERN PHYSICS.

EURÓPAI FIZIKAI TÁRSULAT – EPS TÖRTÉNELMI EMLÉKHELY A NEUTRINÓKÍSÉRLET, MTA ATOMKI

1956-BAN CSIKAI GYULA ÉS SZALAY SÁNDOR EBBEN AZ ÉPÜLETBEN BÉTA-BOMLÁSI ESEMÉNYEKET FÉNYKÉPEZETT LE EGY KÖDKAMRÁBAN. AZ ELEKTRON ÉS A MARADÉKMAG PÁLYÁJÁNAK SZÖGE AZT MUTATJA, HOGY A BOMLÁSBAN KELETKEZIK EGY NEM DETEKTÁLT HARMADIK RÉSZECSE IS. A NEUTRINÓ LÉTEZÉSÉT ÍGY MEGERŐSÍTVE, A KÍSÉRLET HOZZÁJÁRULT A MODERN FIZIKA MEGALAPOZÁSÁHOZ.



DEBRECEN
2013



Elemi részecskék és kölcsönhatásaik

Az anyagi részecskék három családja (fermionok)

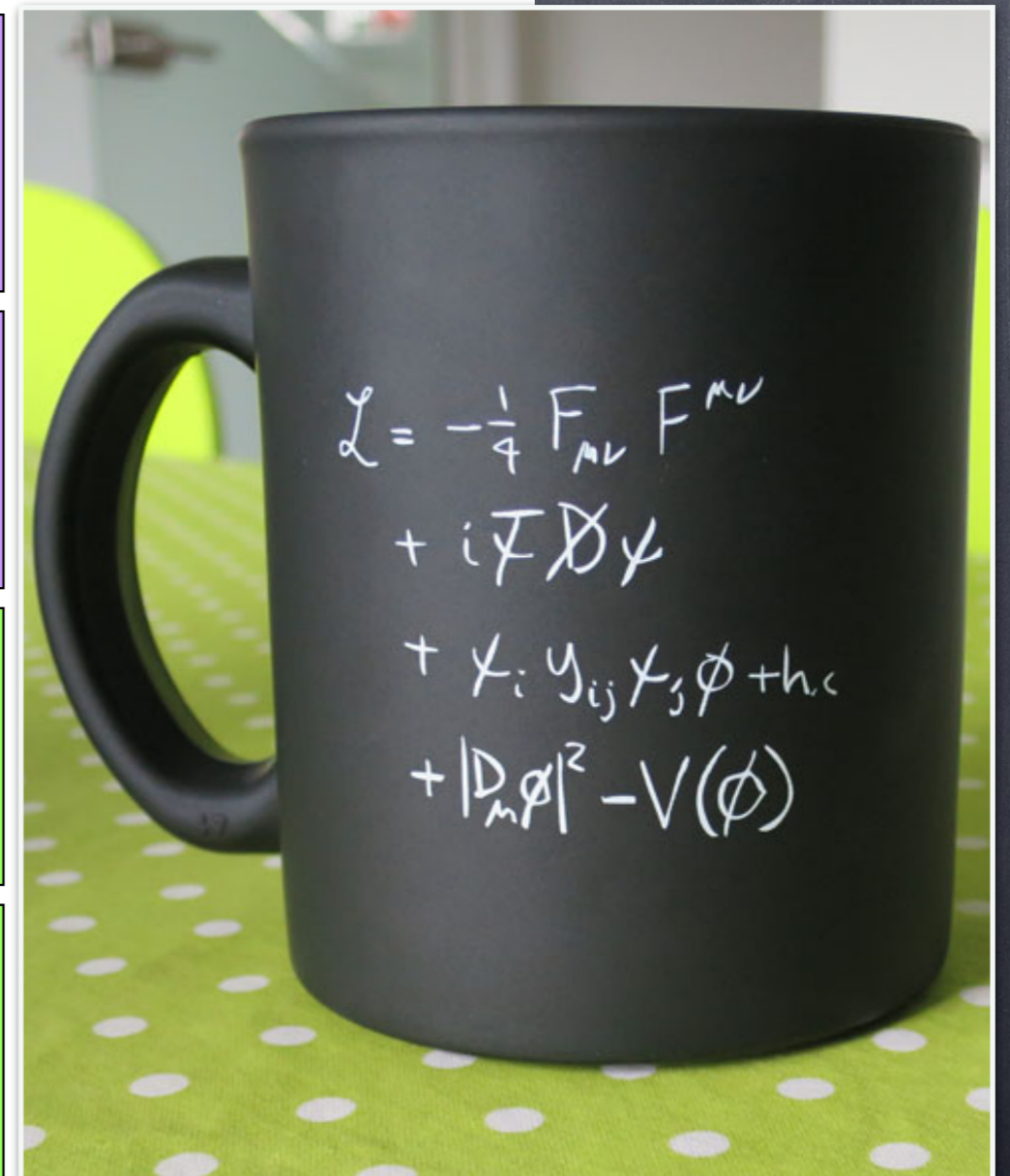
	I	II	III		
tömeg→	2,3 MeV/c ²	1,27 GeV/c ²	173 GeV/c ²	0	125 GeV/c ²
töltés→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
név→	u-kvark	c-kvark	t-kvark	foton	Higgs-bozon
Kvarkok	4,8 MeV/c ²	95 MeV/c ²	4,2 GeV/c ²	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	d-kvark	s-kvark	b-kvark	gluon	
Leptonok	<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	
	elektron-neutrínó	müon-neutrínó	tau-neutrínó	Z ⁰ -bozon	
Leptonok	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	
	elektron	müon	tau	W [±] -bozon	

Bozonok (kölcsönhatások)

Elemi részecskék és kölcsönhatásai

Az anyagi részecskék három családja (fermionok)

	I	II	III
tömeg →	2,3 MeV/c ²	1,27 GeV/c ²	173 GeV/c ²
töltés →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
név →	u-kvark	c-kvark	t-kvark
Kvarkok	4,8 MeV/c ²	95 MeV/c ²	4,2 GeV/c ²
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d-kvark	s-kvark	b-kvark
Leptonok	<2,2 eV/c ²	<0,17 MeV/c ²	<15,5 MeV/c ²
	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	elektron-neutrínó	müon-neutrínó	tau-neutrínó
	0,511 MeV/c ²	105,7 MeV/c ²	1,777 GeV/c ²
	-1	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	elektron	müon	tau

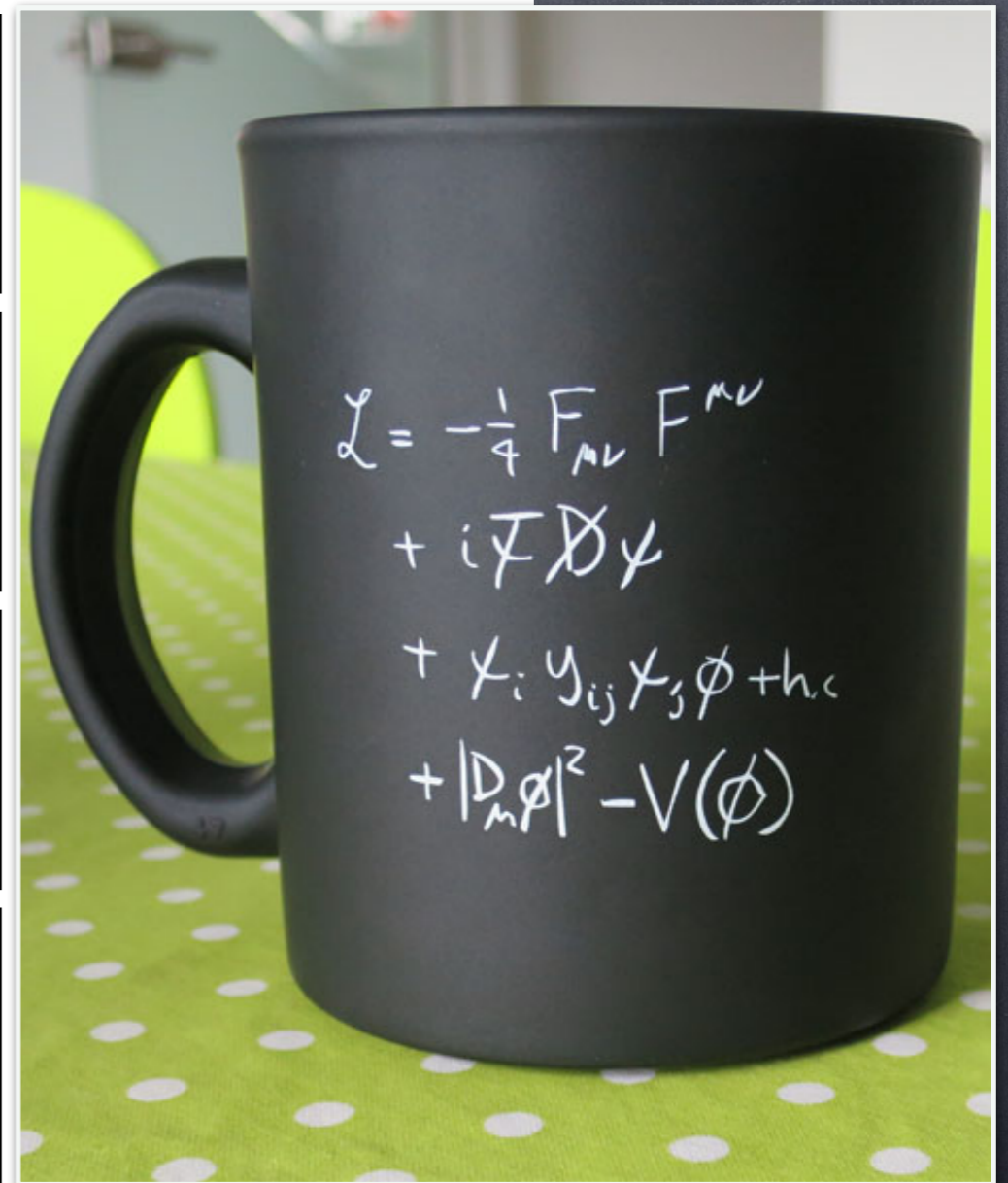


Elemi részecskék és kölcsönhatásai

Az anyagi részecskék három családja (fermionok)

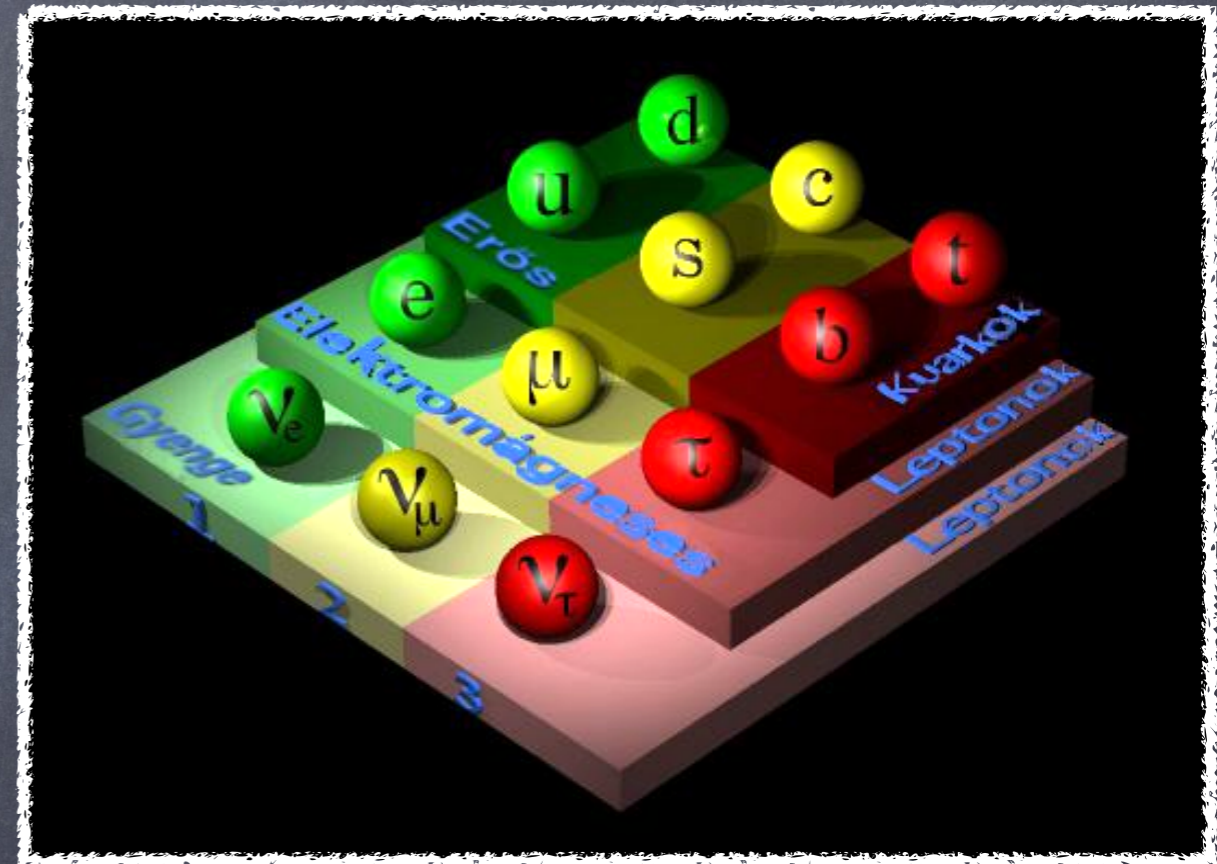
	I	II	III
tömeg →	2,3 MeV/c ²	1,27 GeV/c ²	173 GeV/c ²
töltés →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
név →	u-kvark	c-kvark	t-kvark
Kvarkok	4,8 MeV/c ²	95 MeV/c ²	4,2 GeV/c ²
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d-kvark	s-kvark	b-kvark
Leptonok	<2,2 eV/c ²	<0,17 MeV/c ²	<15,5 MeV/c ²
	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	elektron-neutrínó	müon-neutrínó	tau-neutrínó
	0,511 MeV/c ²	105,7 MeV/c ²	1,777 GeV/c ²
	-1	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	elektron	müon	tau

neutrínó
ízek



Neutrínó-anyag kölcsönhatás

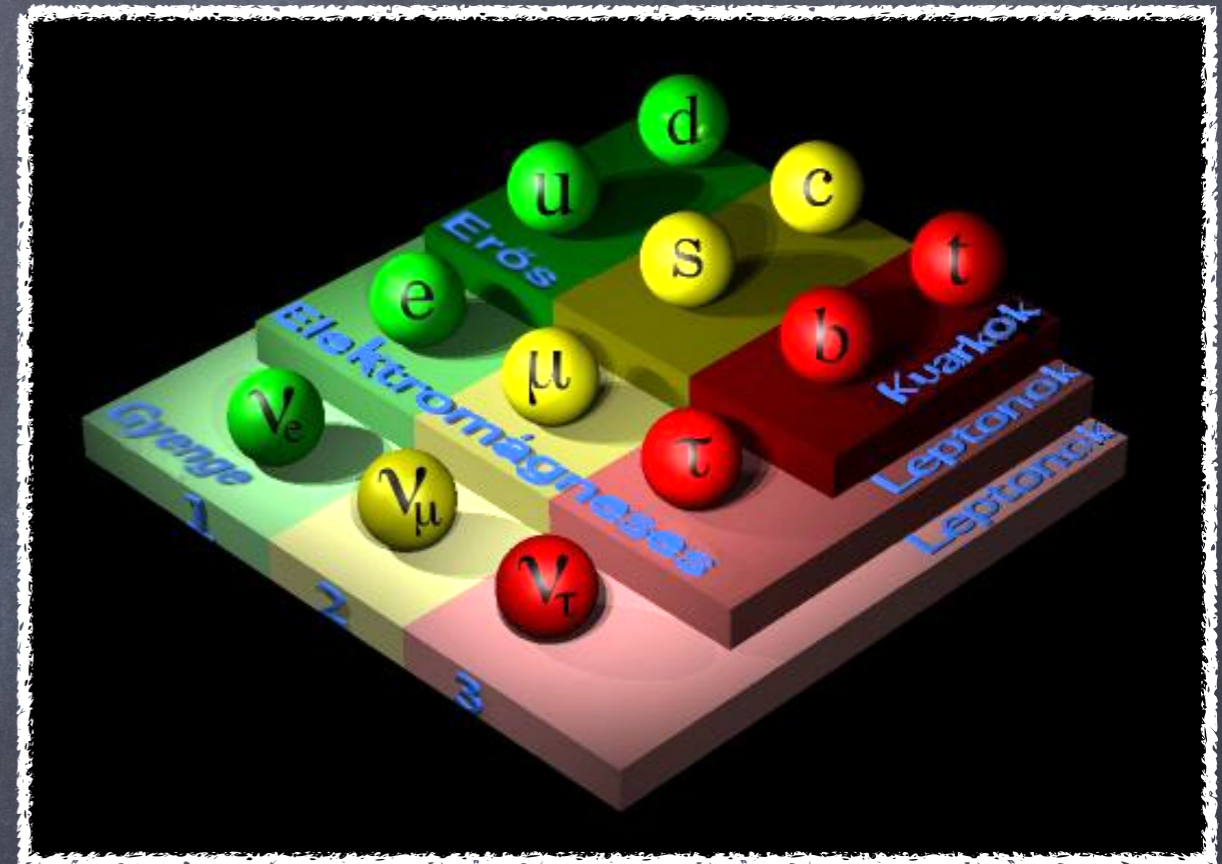
a neutrínók csak a radioaktivitásért felelős gyenge erőt érzik:



Neutrínó-anyag kölcsönhatás

a neutrínók csak a radioaktivitásért felelős gyenge erőt érzik:

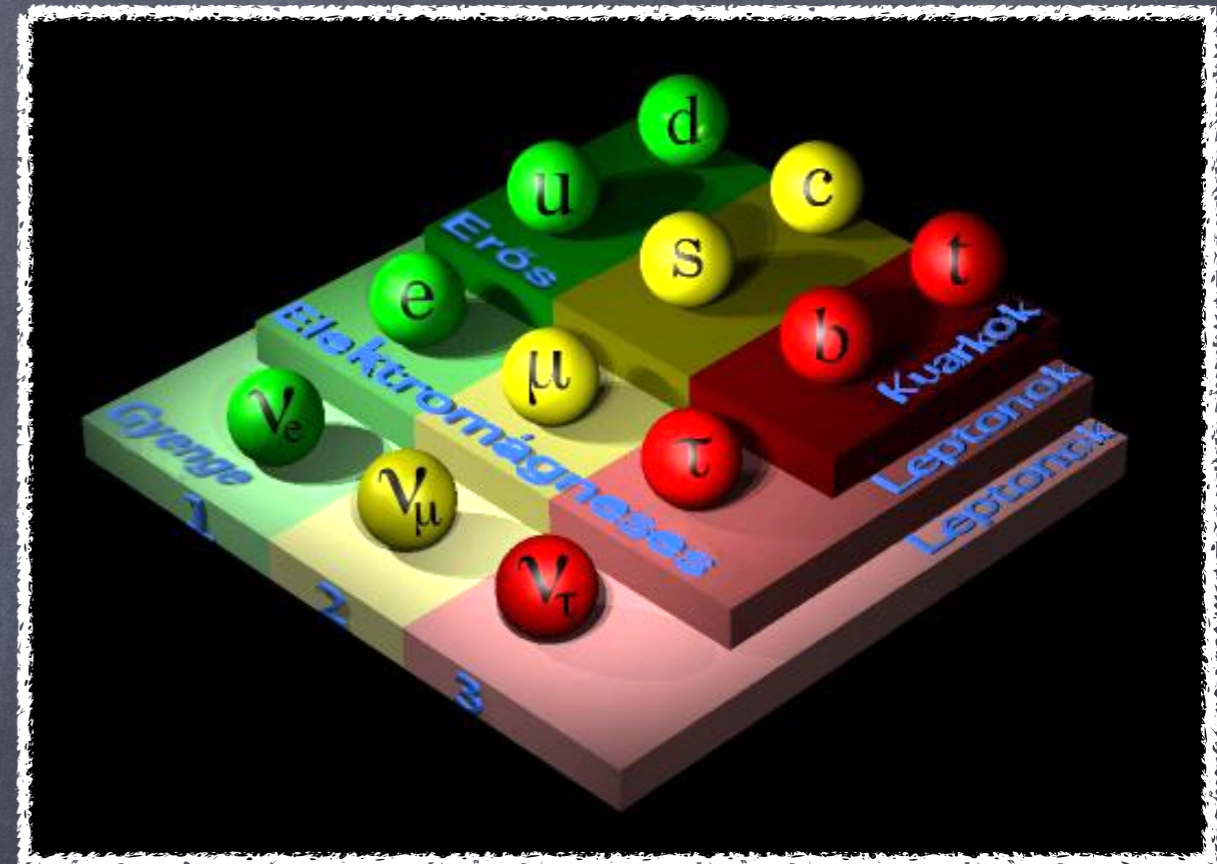
százezer neutrínó közül csak egy akad fenn a Földön (12740 km), a többi áthalad



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



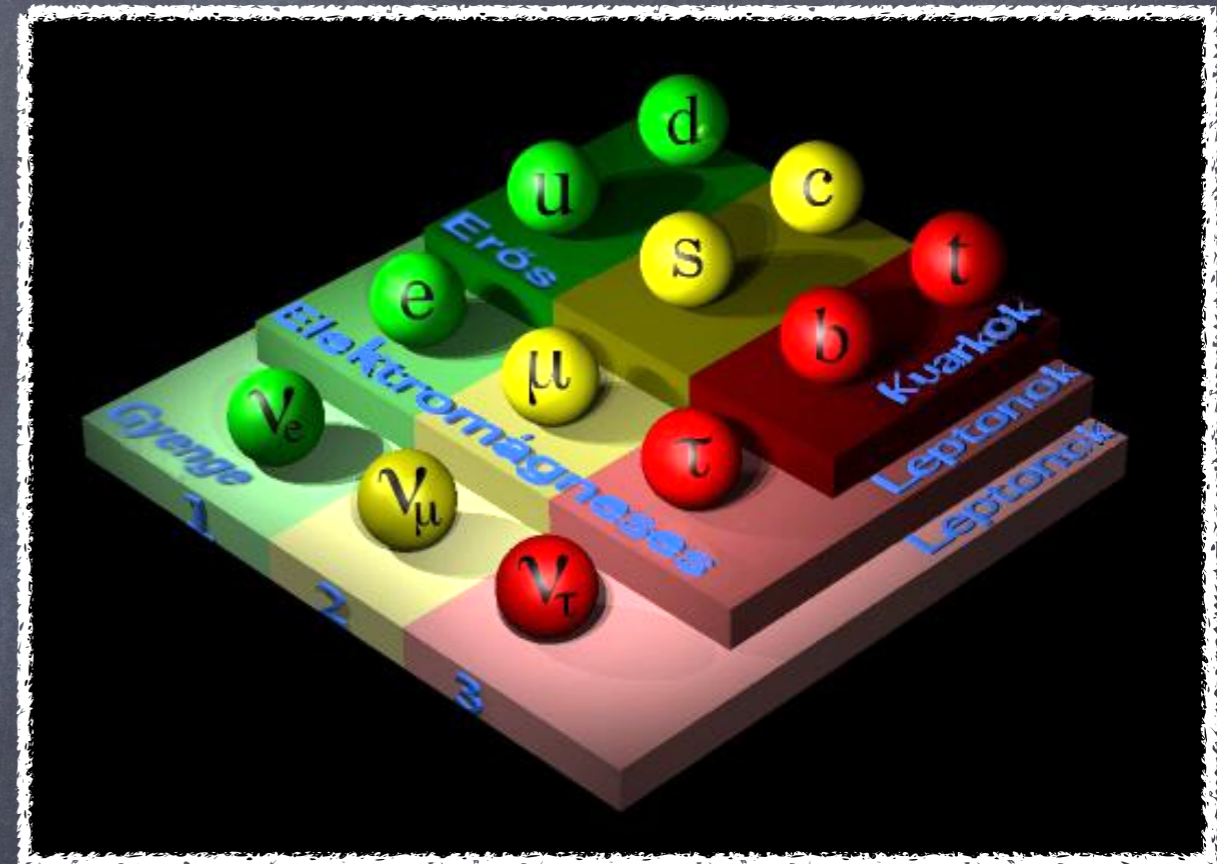
Neutrínó-anyag kölcsönhatás

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



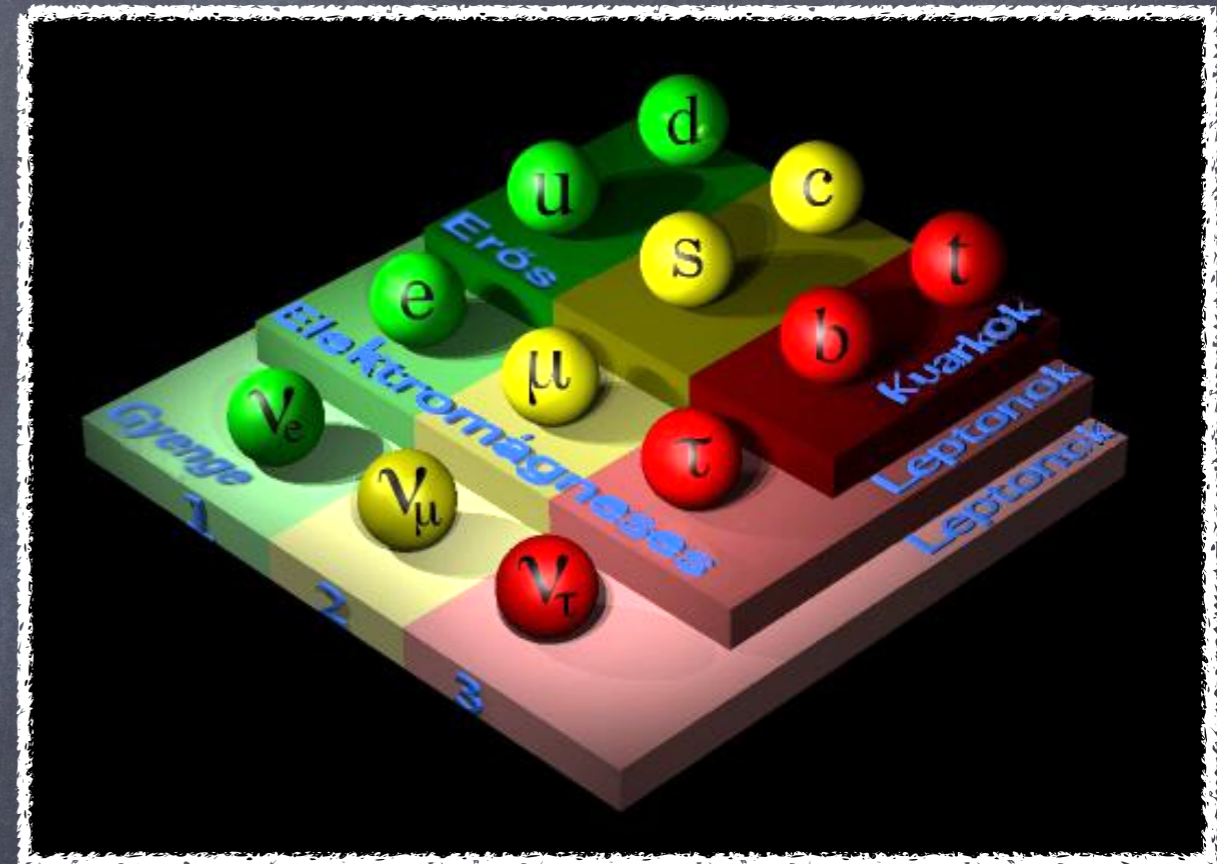
Neutrínó-anyag kölcsönhatás

a neutrínók csak a radioaktivitásért felelős gyenge erőt érzik:

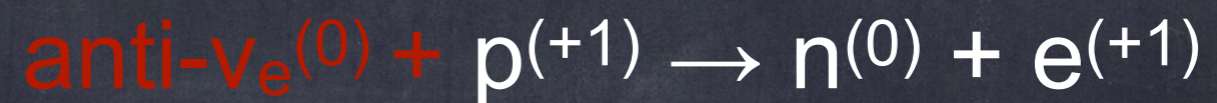
százezer neutrínó közül csak egy akad fenn a Földön

(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



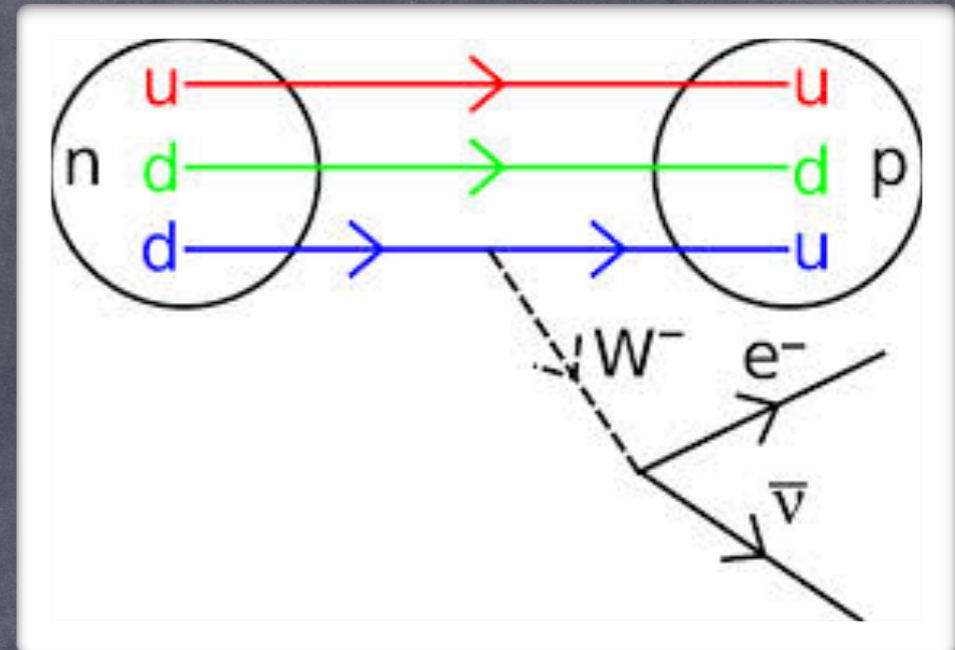
reaktor közelében van ilyen sok neutrínó:



Neutrínók észlelése

Detektoraink az elektromos erőt érző, vagy a nehéz részecskéket észlelik

β -bomlás elemi szinten:



Neutrínók észlelése

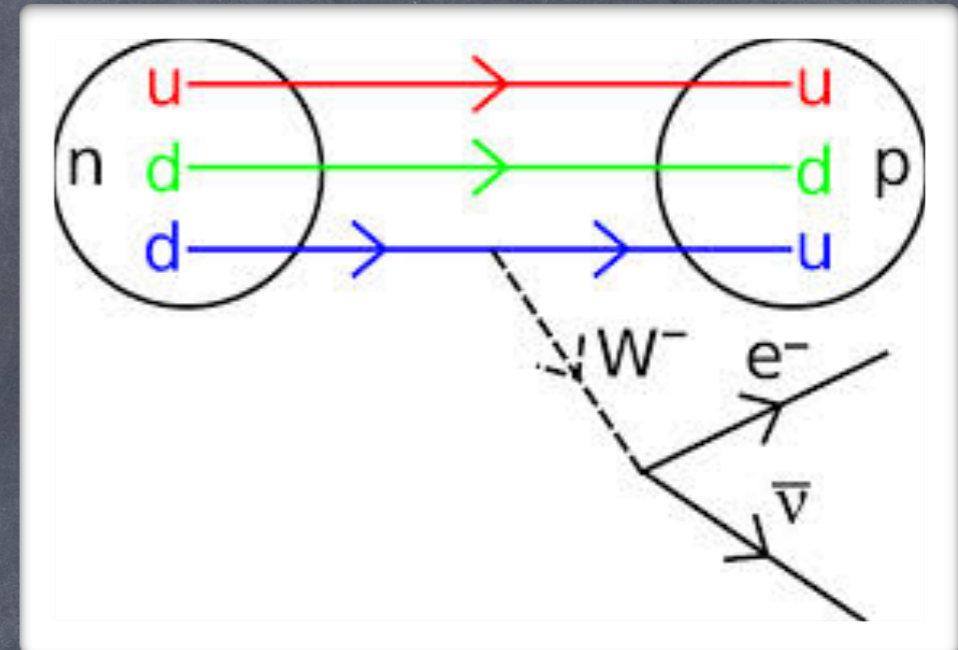
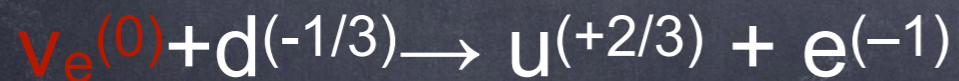
Detektoraink az elektromos erőt érző, vagy a nehéz részecskéket észlelik

β -bomlás elemi szinten:

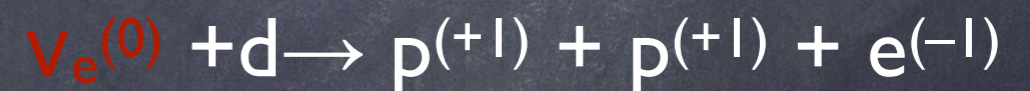


megfordítva, elemi szinten:

töltéscserével (töltött áram kölcsönhatás):



észlelt részecskék szintjén:



Neutrínók észlelése

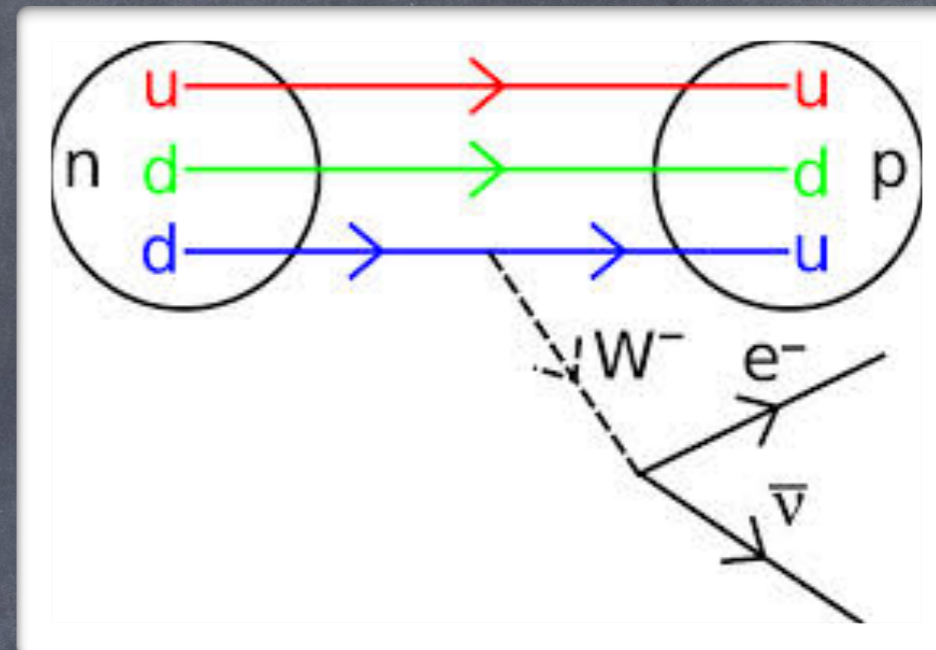
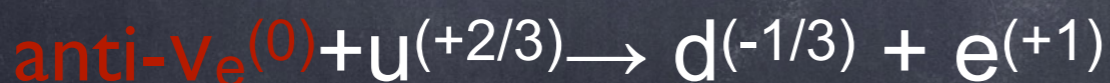
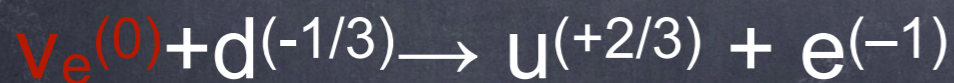
Detektoraink az elektromos erőt érző, vagy a nehéz részecskéket észlelik

β -bomlás elemi szinten:

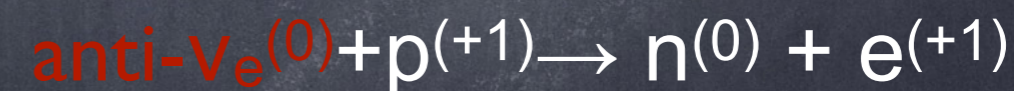
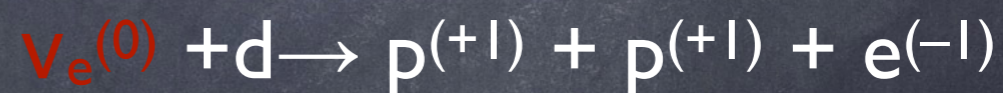


megfordítva, elemi szinten:

töltéscserével (töltött áram kölcsönhatás):



észlelt részecskék szintjén:



Neutrínók észlelése

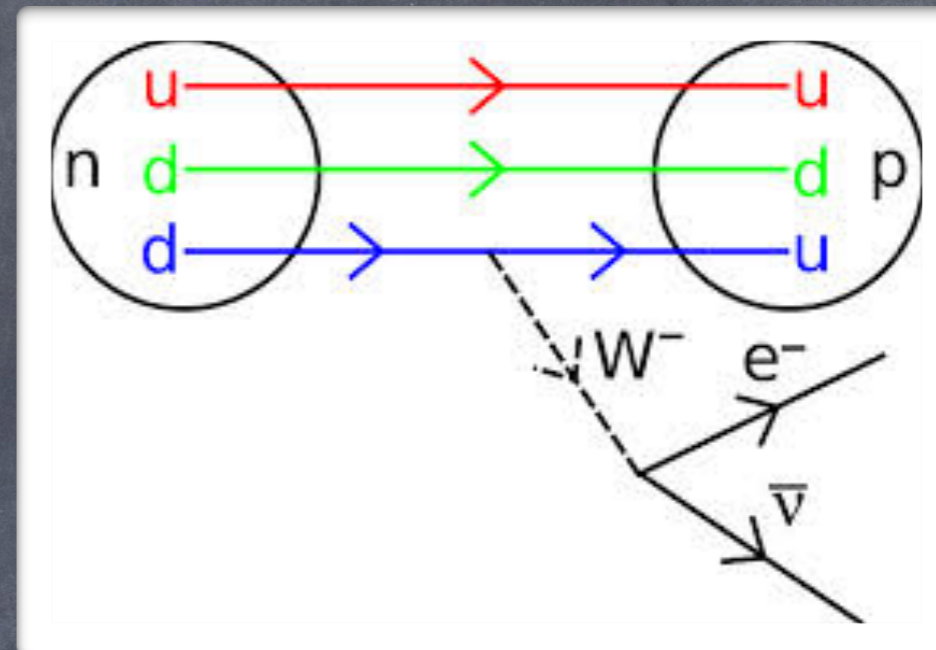
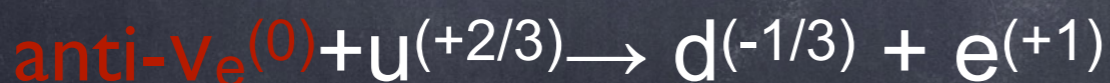
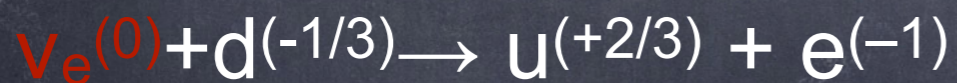
Detektoraink az elektromos erőt érző, vagy a nehéz részecskéket észlelik

β -bomlás elemi szinten:

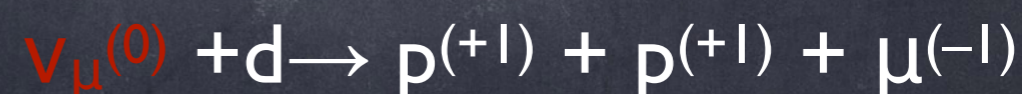
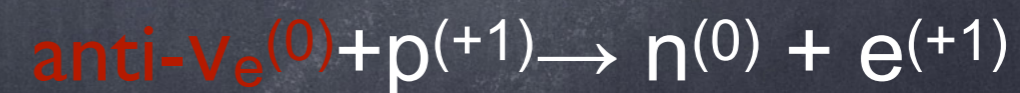
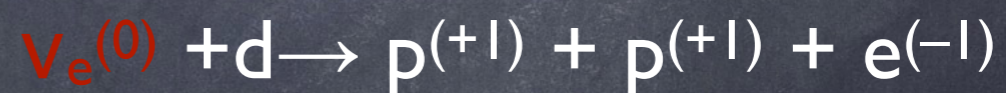


megfordítva, elemi szinten:

töltéscserével (töltött áram kölcsönhatás):



észlelt részecskék szintjén:



Neutrínók észlelése

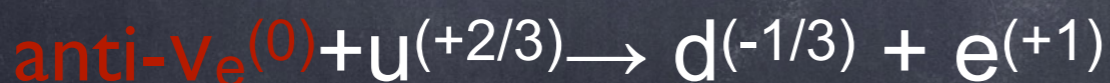
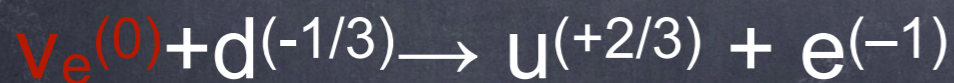
Detektoraink az elektromos erőt érző, vagy a nehéz részecskéket észlelik

β -bomlás elemi szinten:

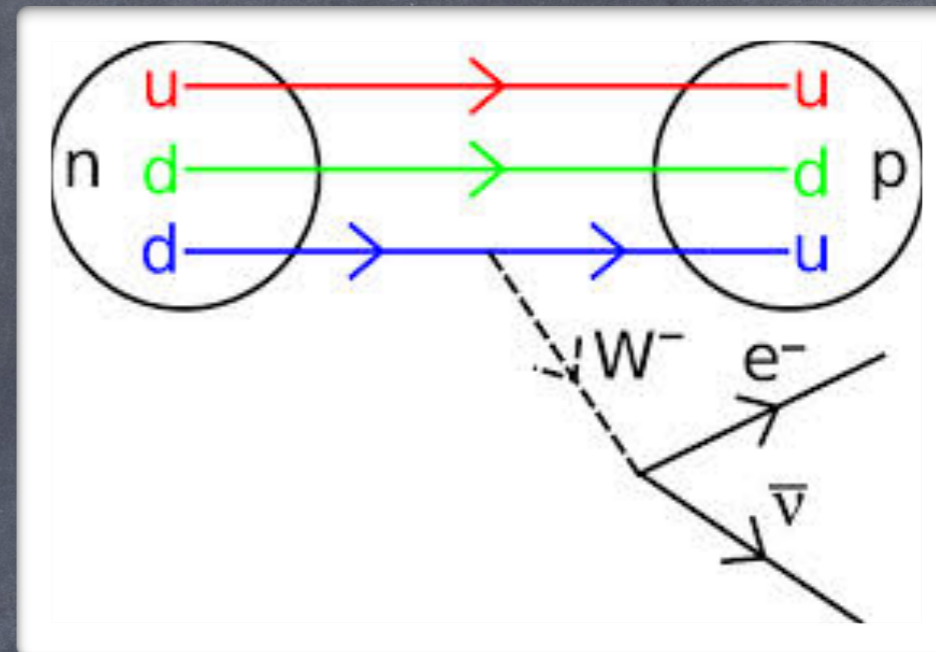
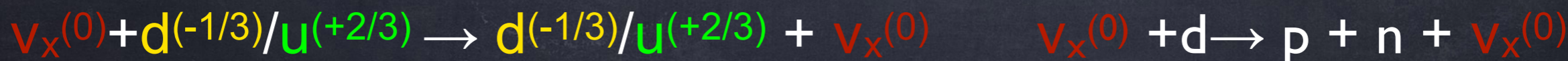


megfordítva, elemi szinten:

töltéscserével (töltött áram kölcsönhatás):



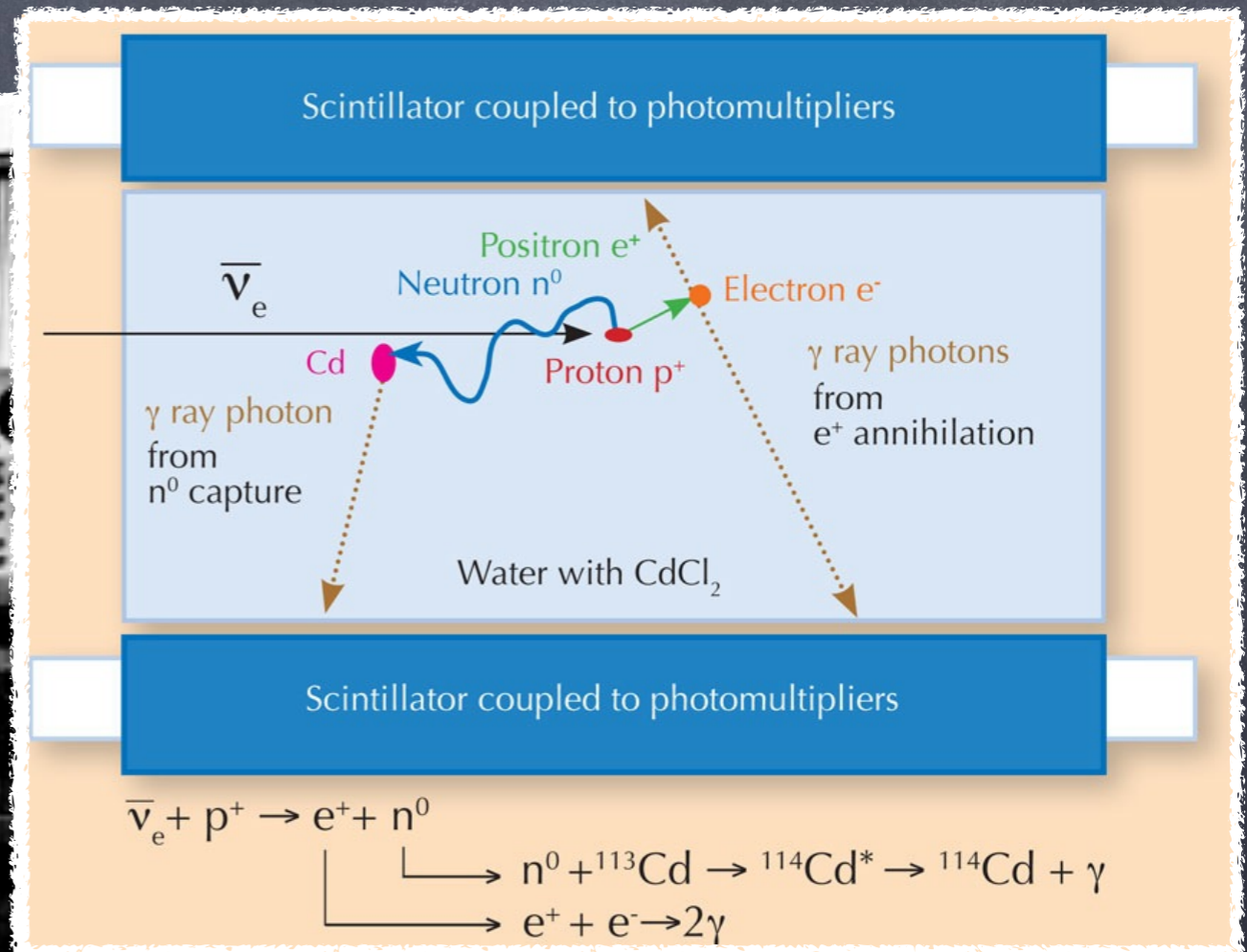
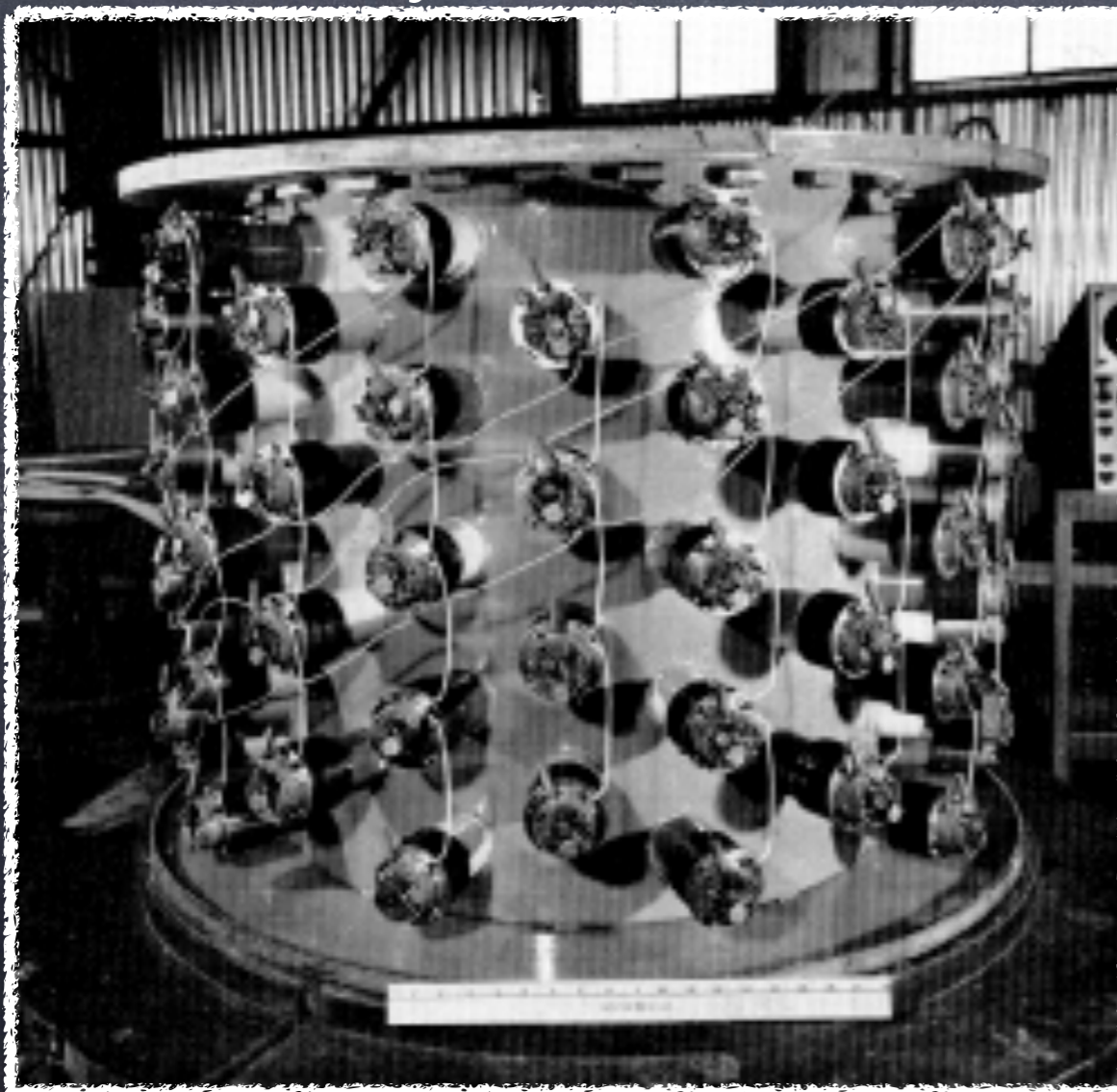
töltéscsere nélkül (semleges áram kölcsönhatás):



észlelt részecskék szintjén:

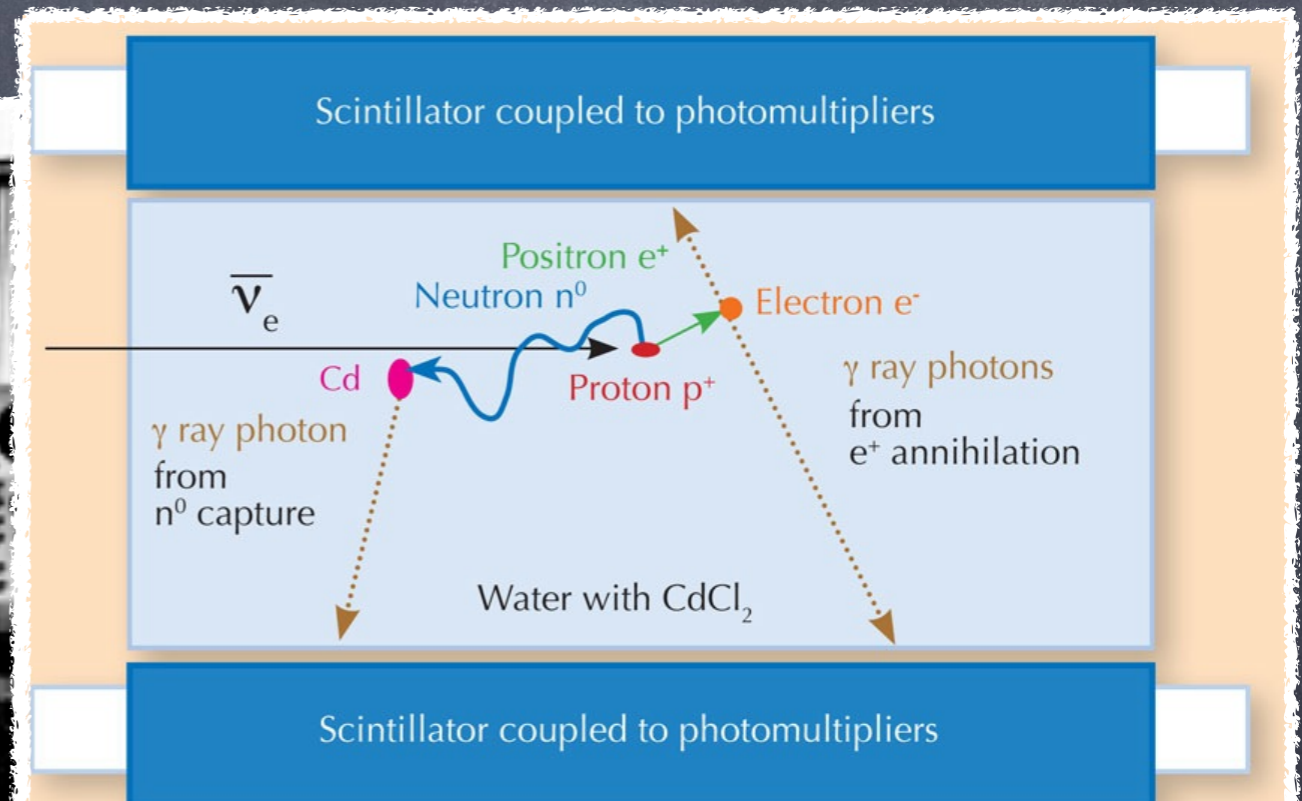
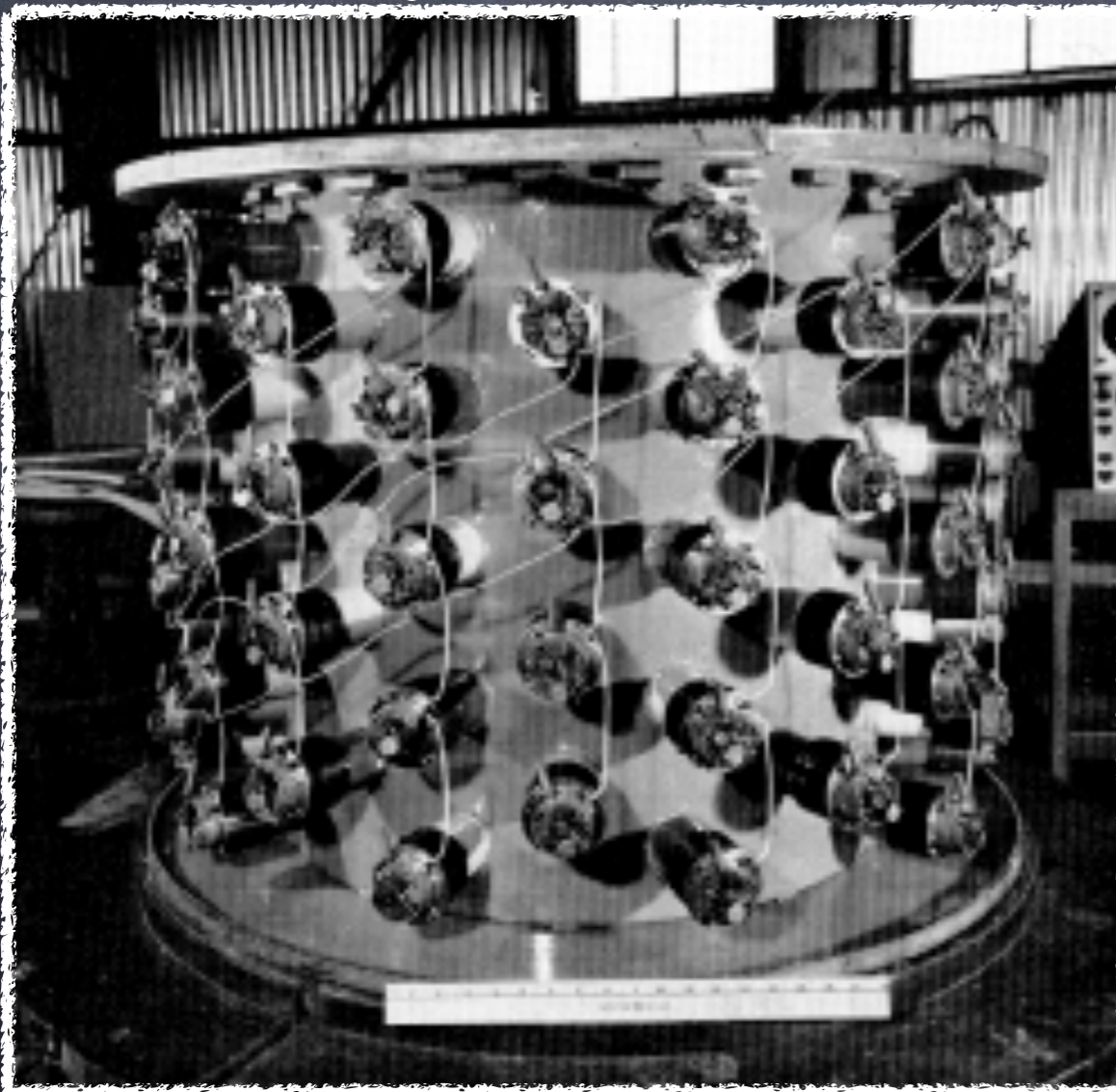
Reines-Cowan kísérlet (1956)

Savannah riveri atomreaktor közelében CdCl₂ oldattal töltött tartály:



Reines-Cowan kísérlet (1956)

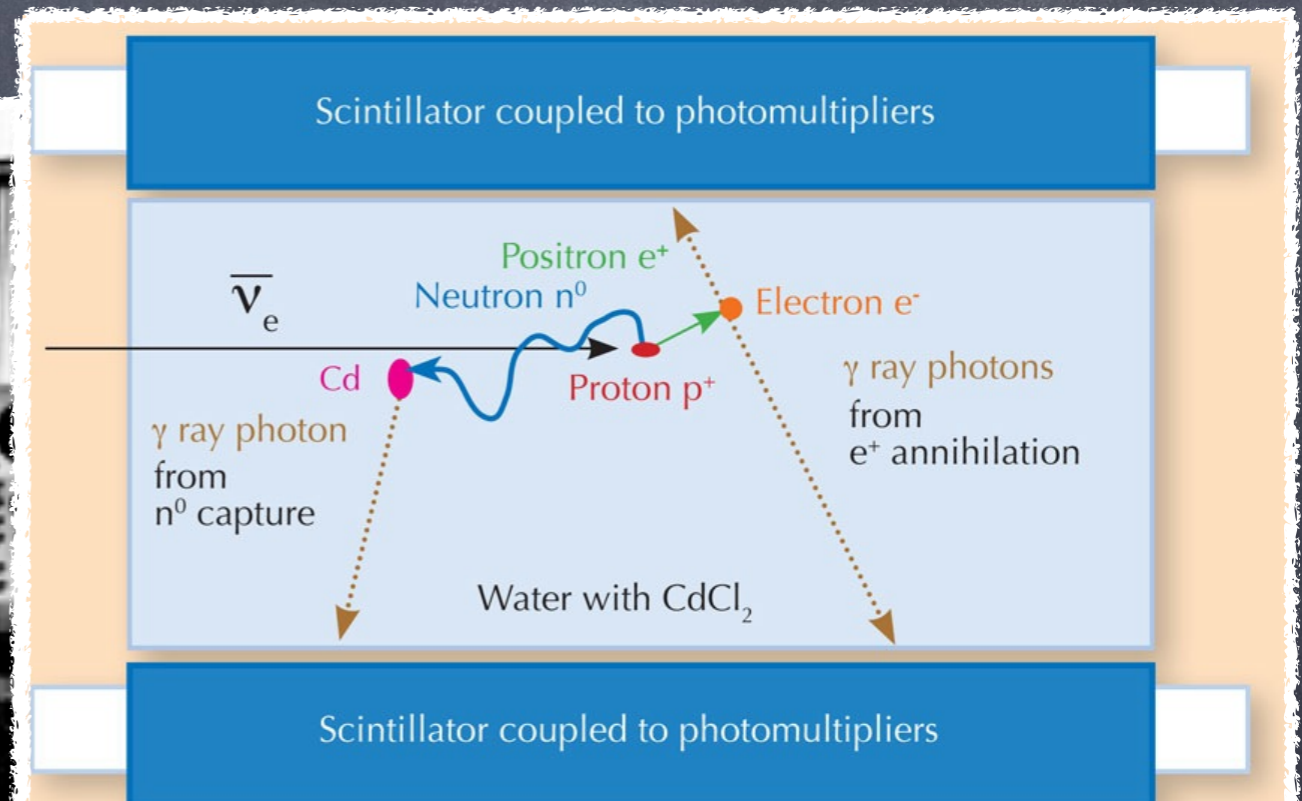
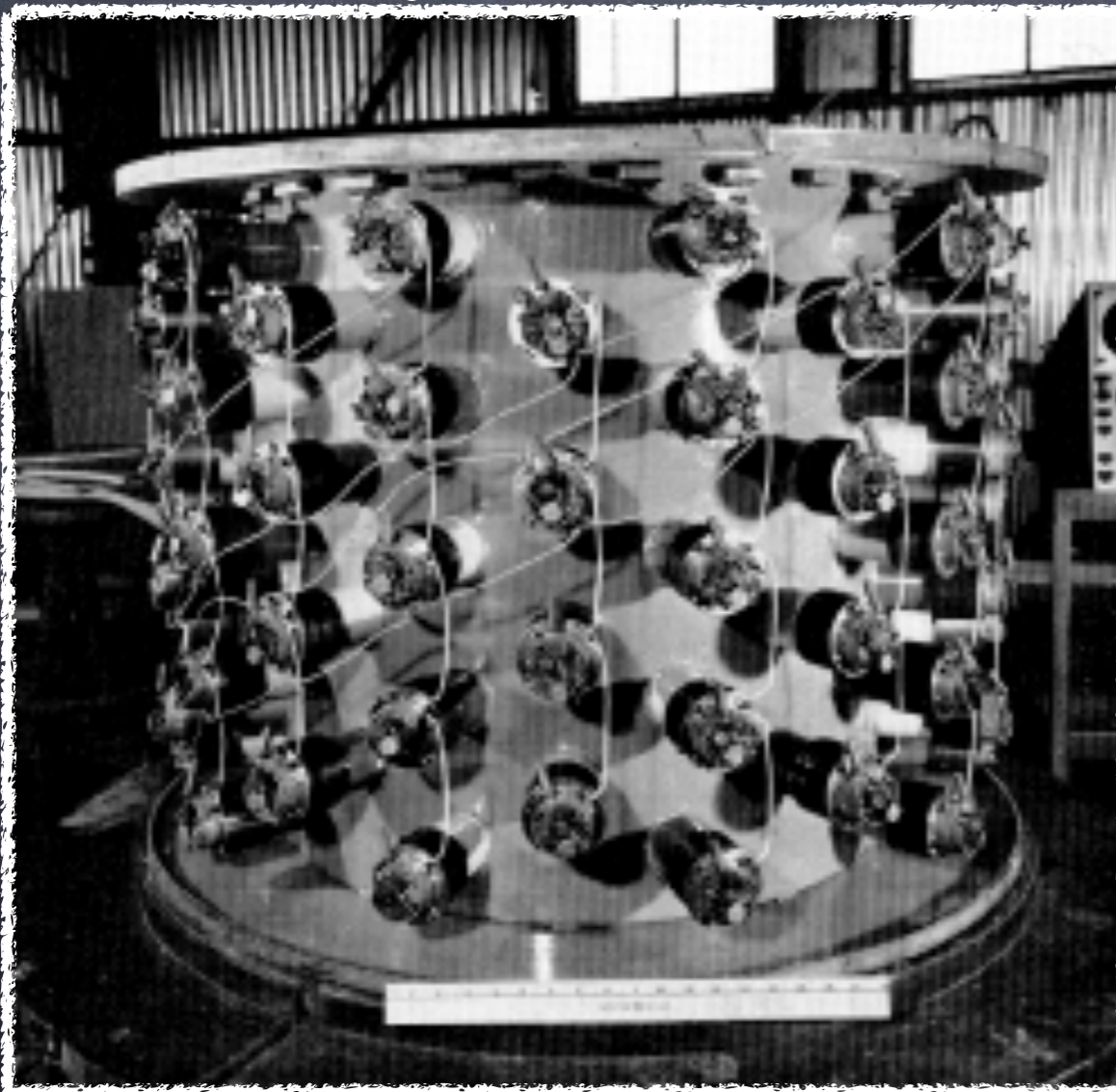
Savannah riveri atomreaktor közelében CdCl₂ oldattal töltött tartály:



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

Reines-Cowan kísérlet (1956)

Savannah riveri atomreaktor közelében CdCl₂ oldattal töltött tartály:

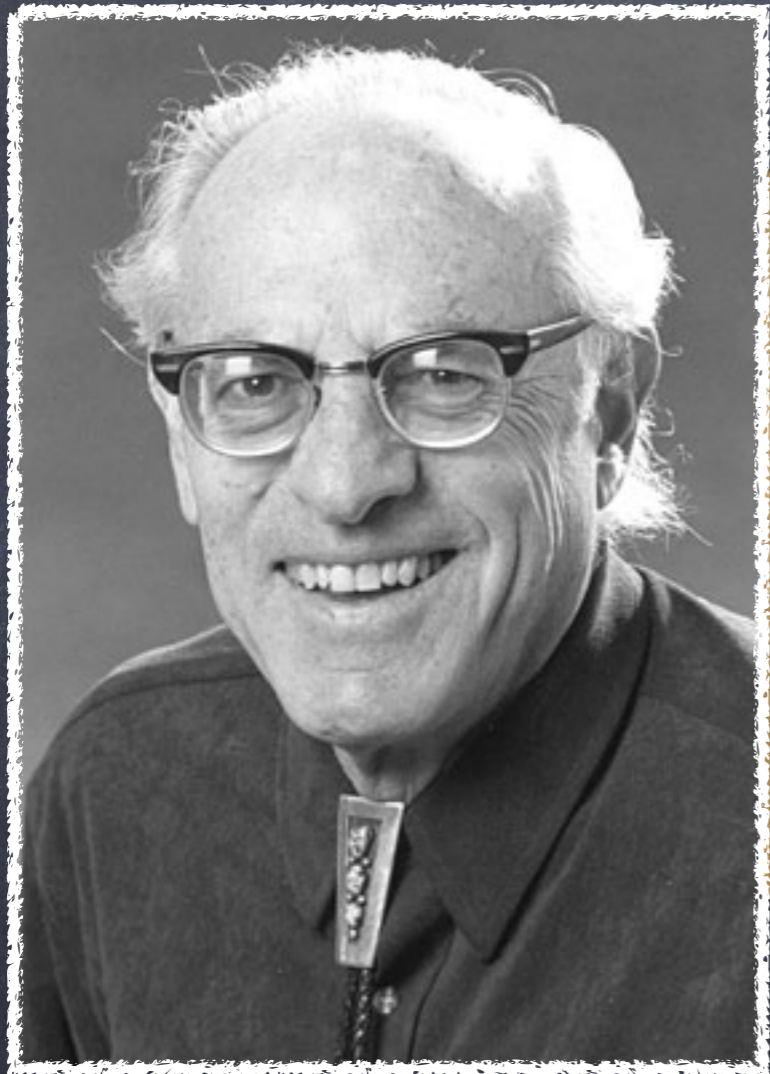


hatáskeresztmetszet:

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

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

A 1995. évi fizikai Nobel díj



Frederick Reines
(1918-1998)

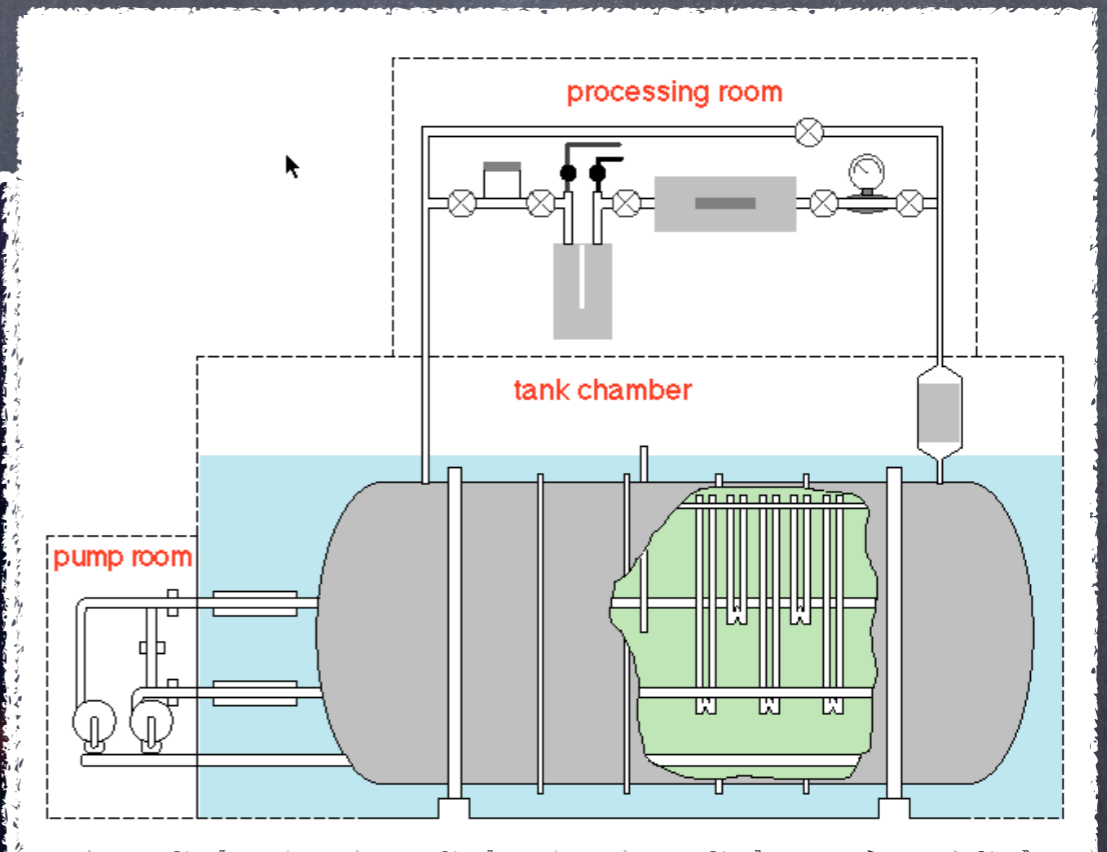
a „neutrínó létezésének közvetlen kimutatásáért”

Davis Kísérlete (1968-1993)

Homestake aranybányában
(1480m felszín alatt) 615 t
perklóretilénnel töltött tartály:



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



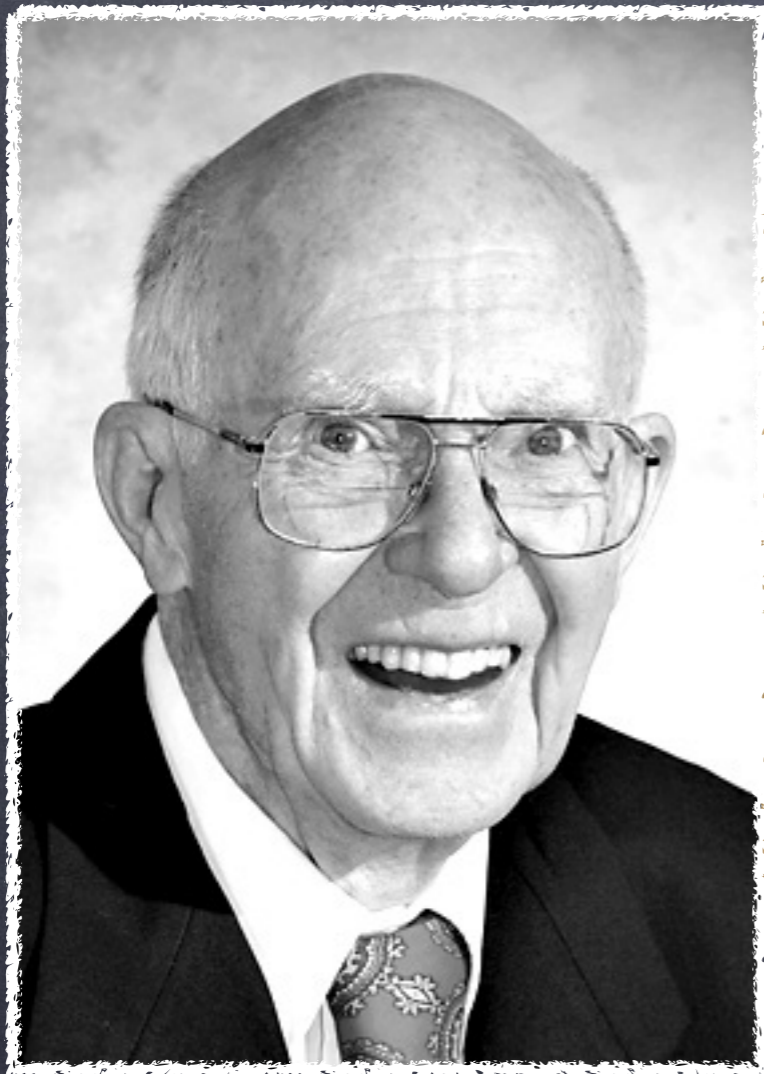
eseményszám:

mért: $2,56 \pm 0,23$ SNU
(17 Ar/70 nap)

becsült: $8,2 \pm 1,8$ SNU

Nap-neutrínó rejtély

A 2002. évi fizikai Nobel díj



Raymond Davis Jr.
(1914-2006)

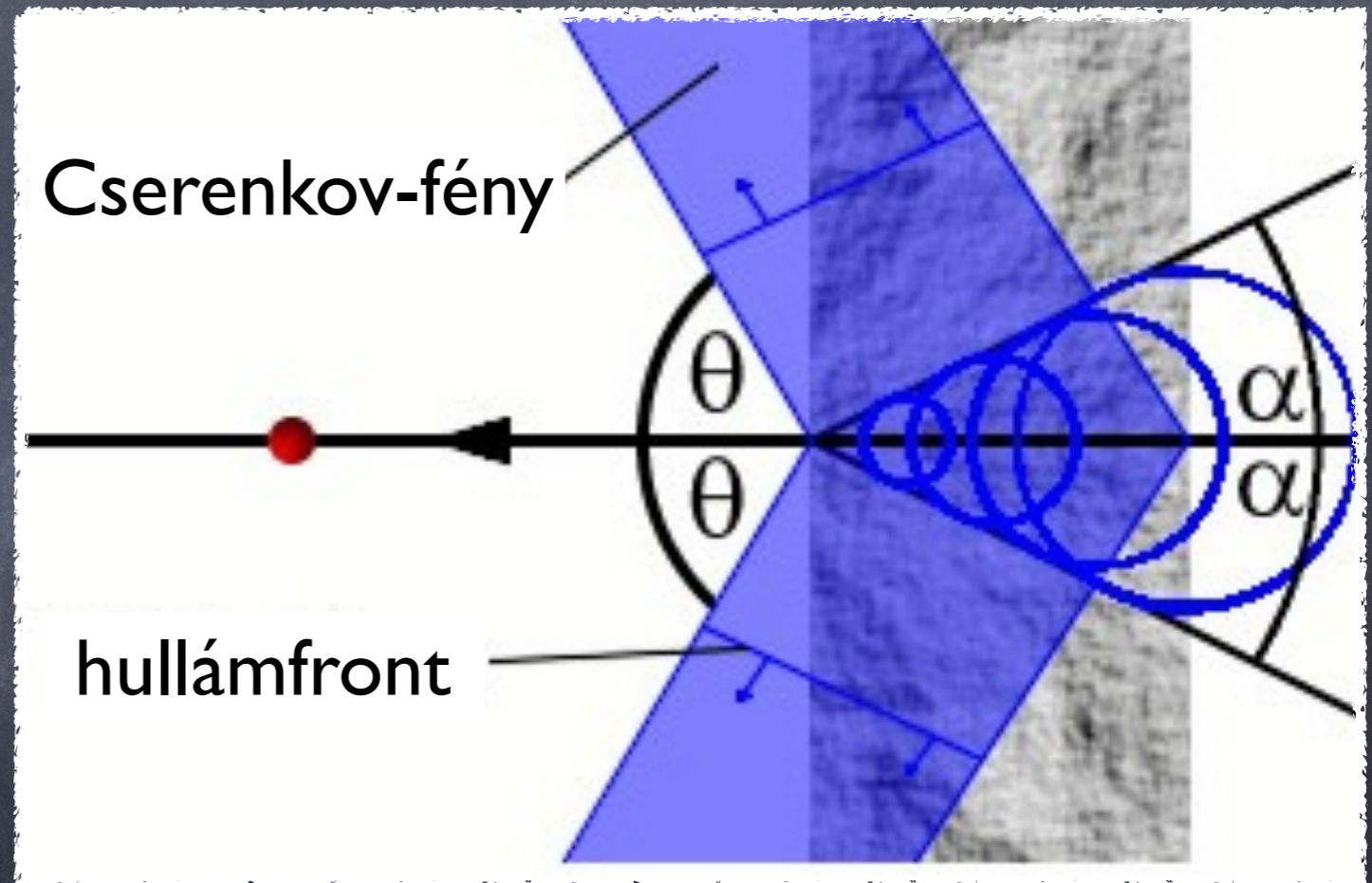
Masatoshi Koshihara
(1926-2020)

a „ kozmikus eredetű neutrínók észleléséért”

Cserenkov-sugárzás

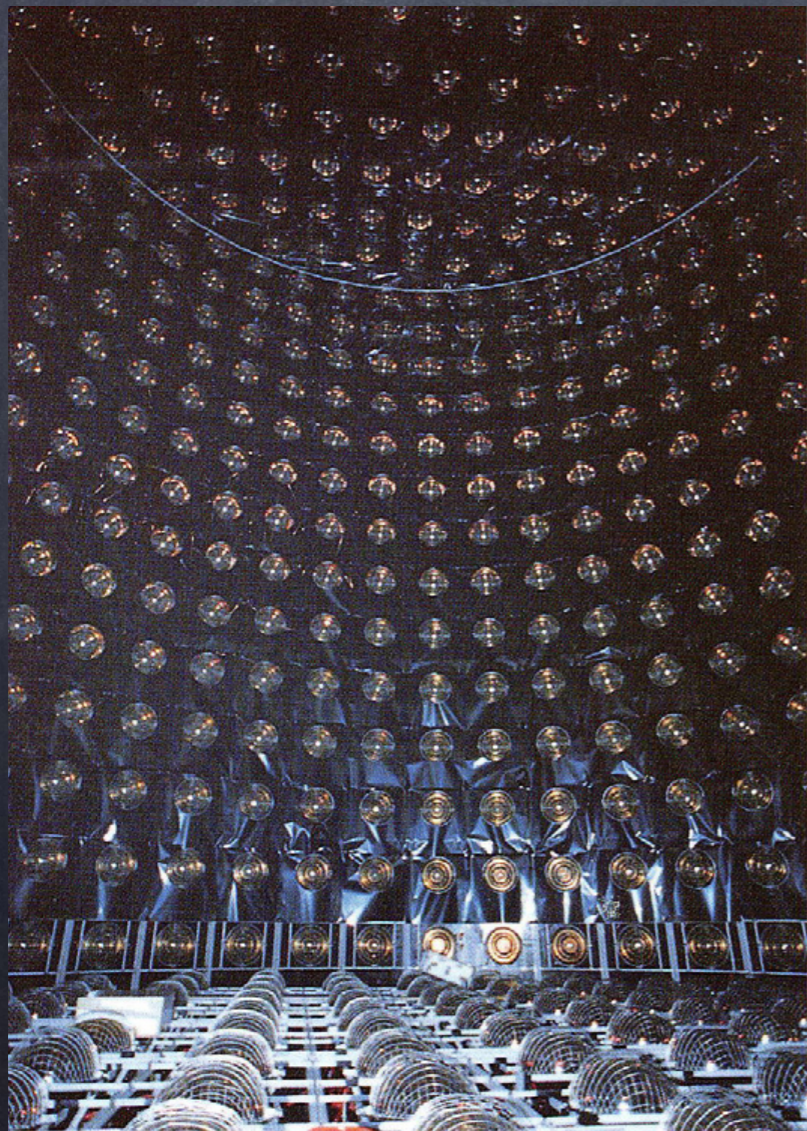


Cserenkov-sugárzás



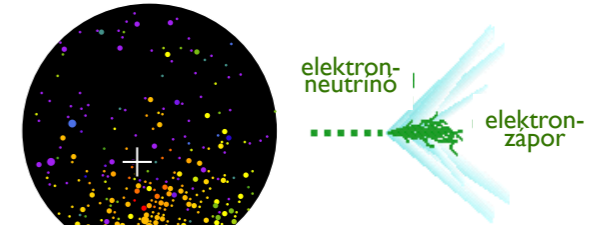
Kamiokande-II detektor

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



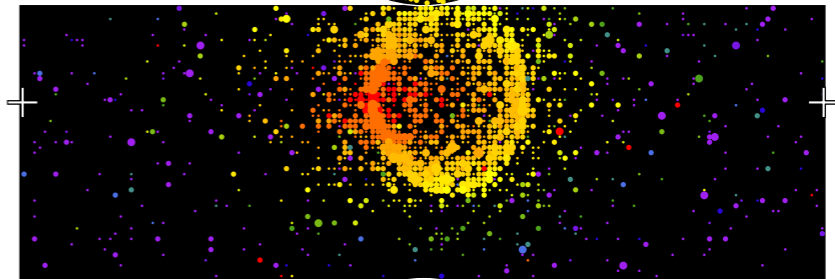
Super-Kamiokande

Run 3003 Event 287420
 96-10-21:10:50:45
 Inner: 2004 hits, 4749 pE
 Outer: 2 hits, 1 pE (in-time)
 Trigger ID: 0x03
 D wall: 1243.0 cm
 FC e-like, p = 571.0 MeV/c

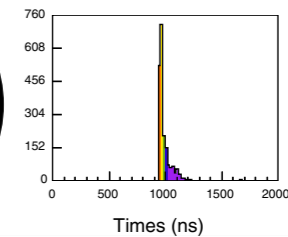
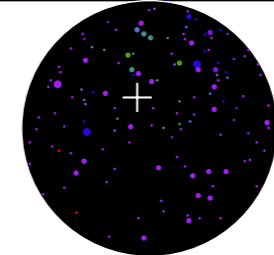


Time (ns)

- < 950
- 950- 955
- 955- 960
- 960- 965
- 965- 970
- 970- 975
- 975- 980
- 980- 985
- 985- 990
- 990- 995
- 995-1000
- 1000-1005
- 1005-1010
- 1010-1015
- 1015-1020
- >1020

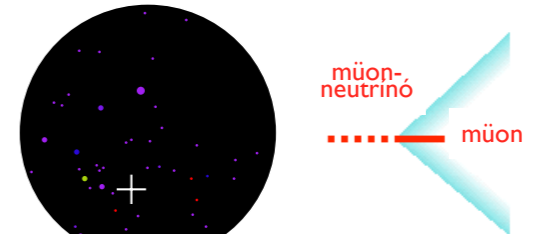


elektron



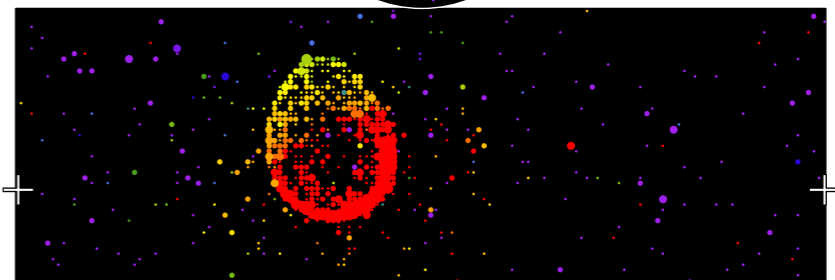
Super-Kamiokande

Run 3011 Event 201095
 96-10-24:07:44:11
 Inner: 811 hits, 2338 pE
 Outer: 0 hits, 0 pE (in-time)
 Trigger ID: 0x03
 D wall: 913.7 cm
 FC mu-like, p = 466.4 MeV/c

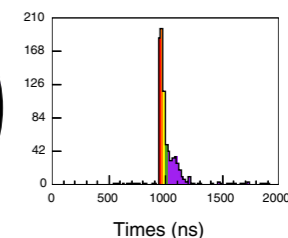
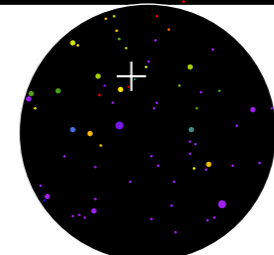


Time (ns)

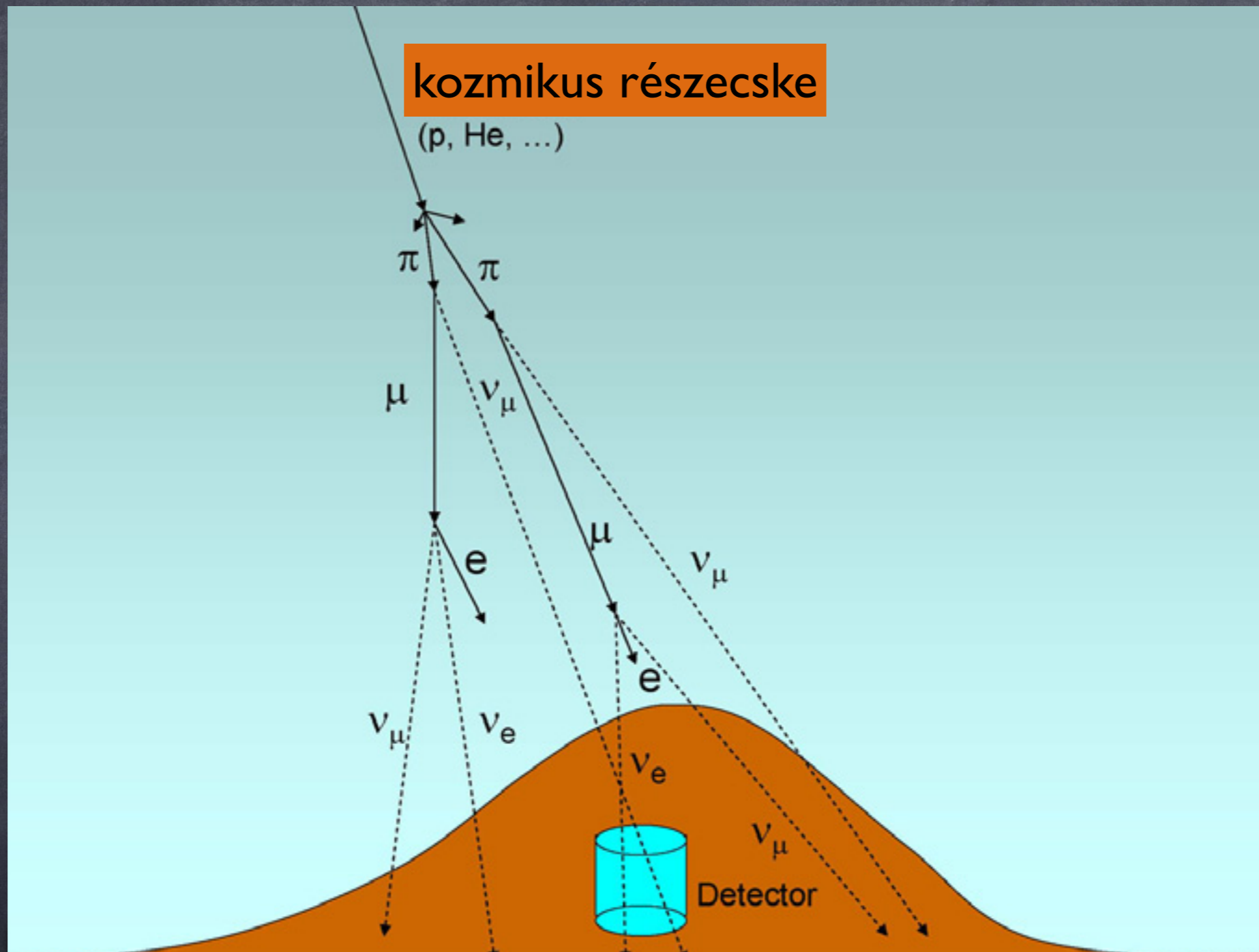
- < 972
- 972- 976
- 976- 980
- 980- 984
- 984- 988
- 988- 992
- 992- 996
- 996-1000
- 1000-1004
- 1004-1008
- 1008-1012
- 1012-1016
- 1016-1020
- 1020-1024
- 1024-1028
- >1028



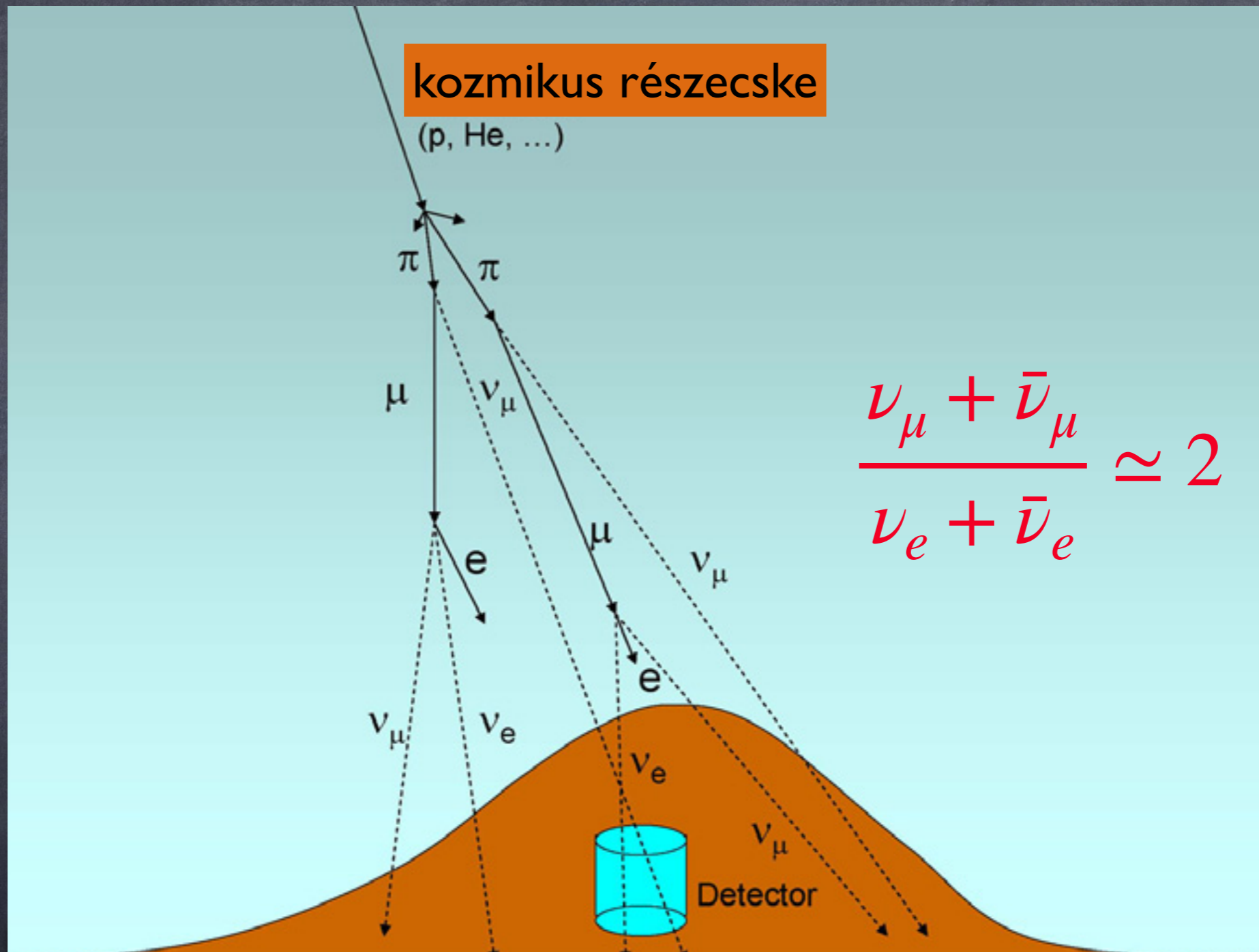
müon



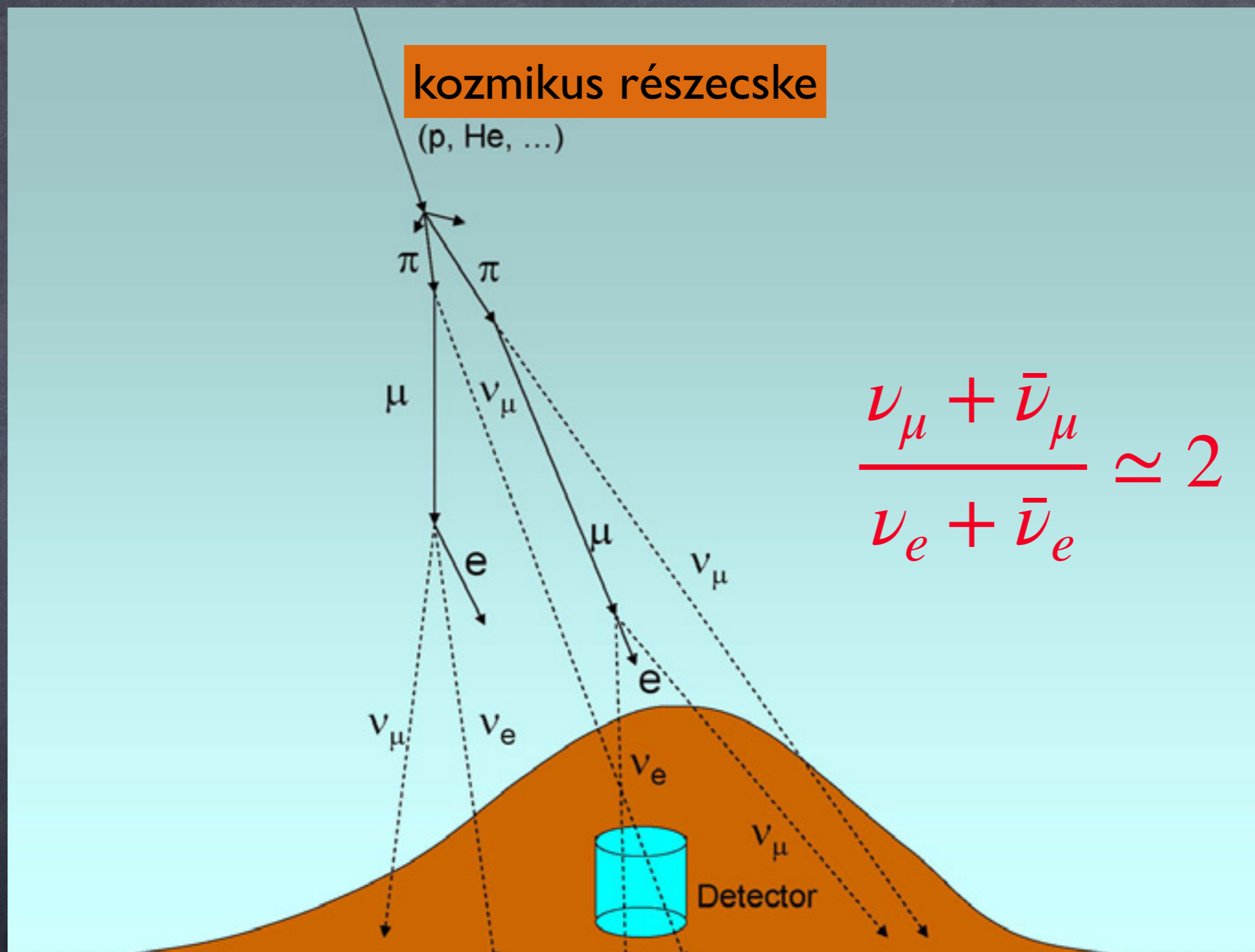
Légköri neutrínók rejtélye



Légköri neutrínók rejtélye



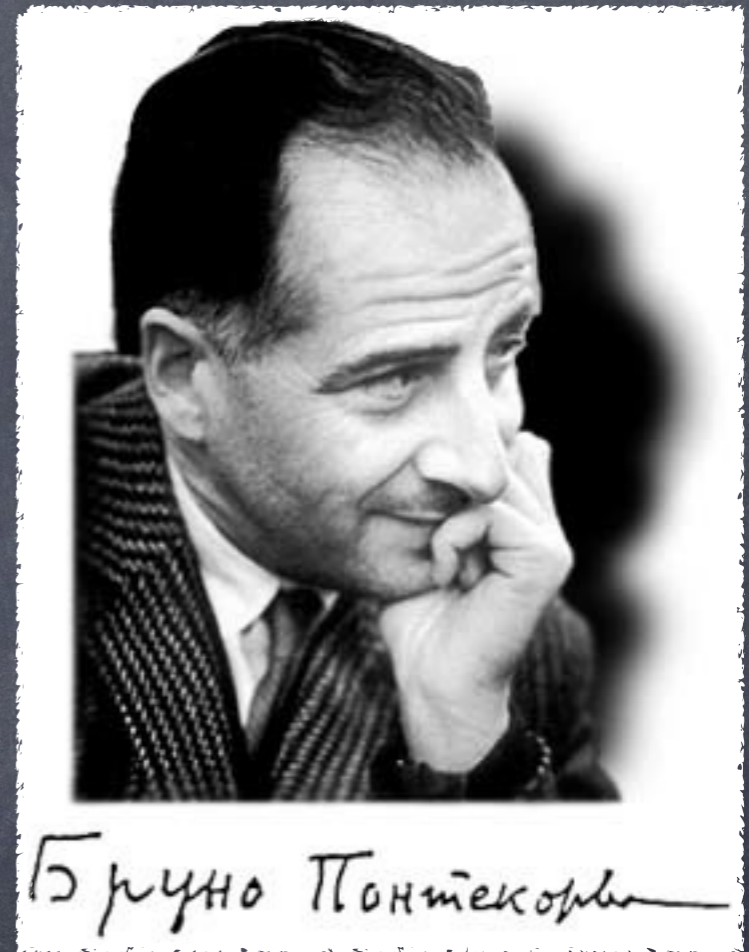
Légköri neutrínók rejtélye



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

Ponte-corvo felvetése

- 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**



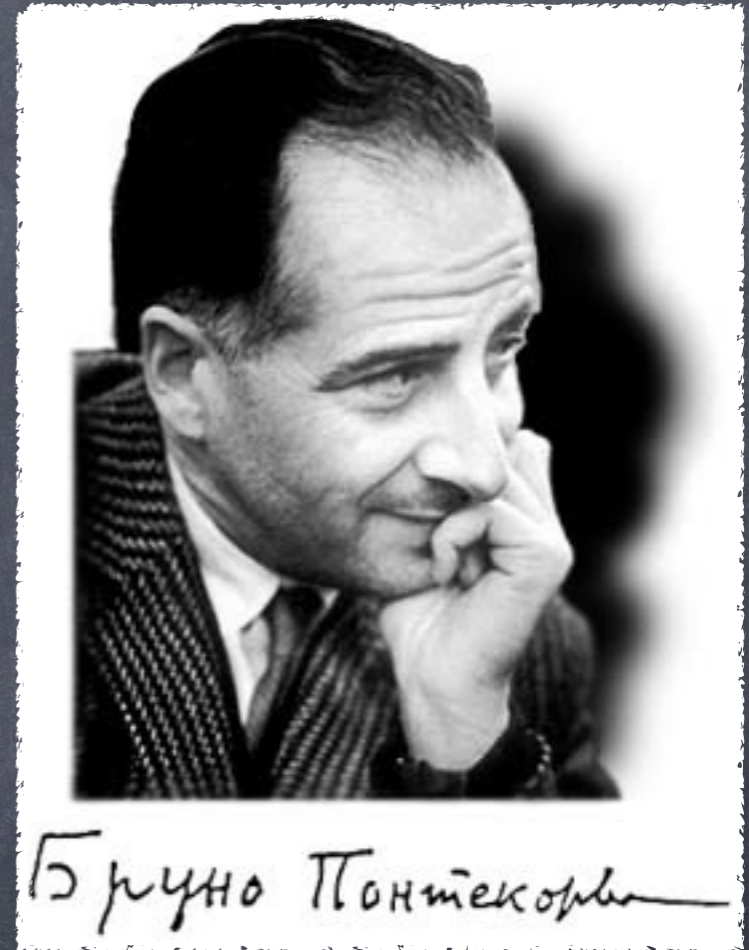
Бруно Понтекорво

Ponte-corvo felvetése

- 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**
- egyszerű kvantummechanikai eredmény:

Annak valószínűsége, hogy nem alakul át L távolság után

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



Neutrínó-ízrezgés

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

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

Neutrínó-ízrezgés

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.

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

Neutrínó-ízrezgés

neutrínó-ízrezgés feltétele, hogy a *neutrínóknak* legyen tömege, például

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

Neutrínó-ízrezgés

neutrínó-ízrezgés feltétele, hogy a *neutrínóknak* legyen tömege, például

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

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

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

Neutrínó-ízrezgés

neutrínó-ízrezgés 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

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

Neutrínó-ízrezgés

neutrínó-ízrezgés 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

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

Neutrínó-ízrezgés

neutrínó-ízrezgés 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

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

Neutrínó-ízrezgés

neutrínó-ízrezgés feltétele, hogy a *neutrínóknak* legyen tömege, például

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

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

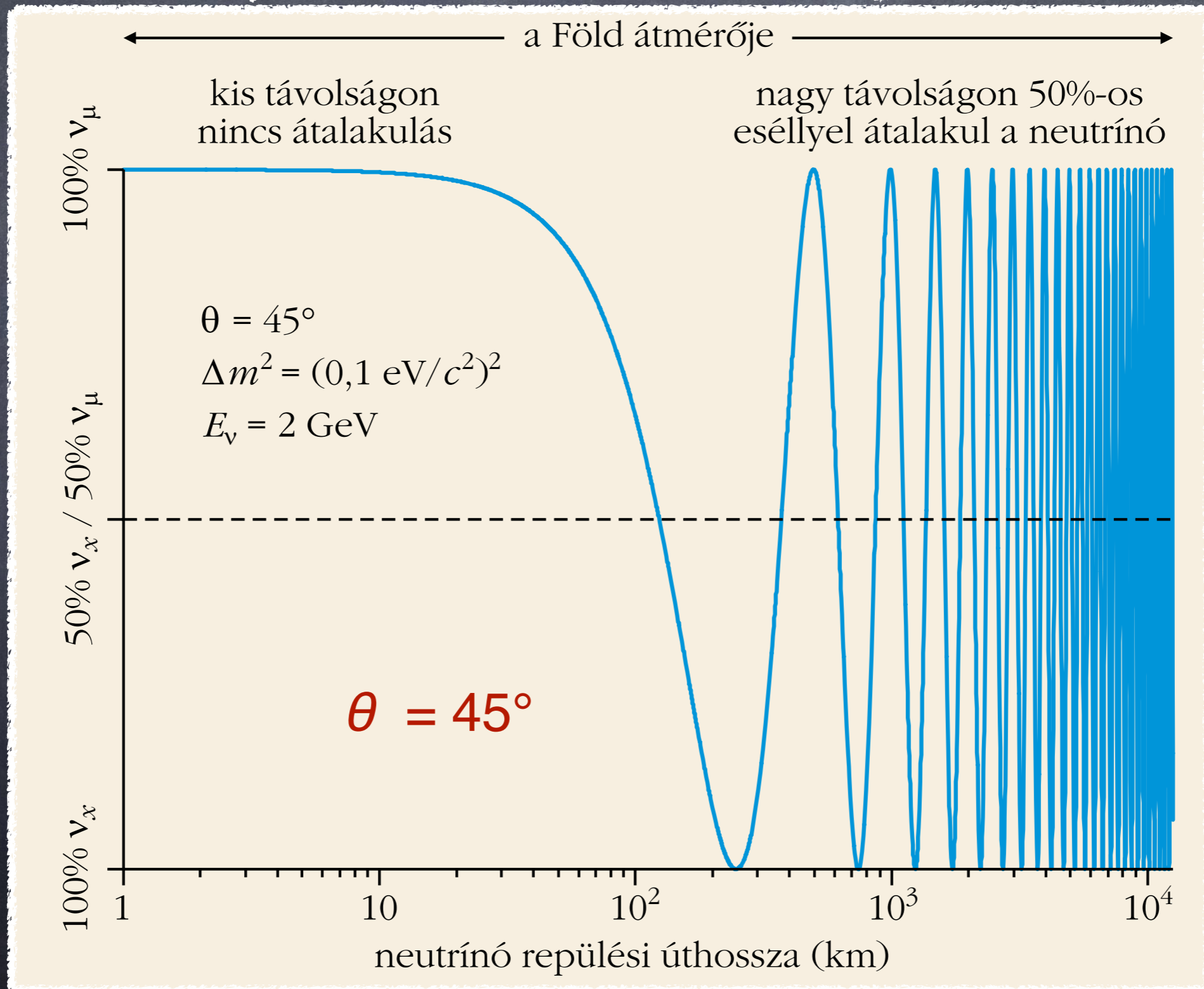
- $L = 1,24 \text{ km}$ -en teljes átalakulás
- tízszer nagyobb neutrínó energia esetén tízszer ekkora távolságra van szükség
- $\Delta m^2 = (0,1 \text{ eV}/c^2)^2$ esetén százszor nagyobbra

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

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

A rejtélyek magyarázata az ízrezgés

a neutrínók repülésük közben egymásba alakulnak



Légköri neutrínó anomália értelmezése neutrínó-ízreaggással

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

Elég meggyőző ez?

Légköri neutrínó anomália értelmezése neutrínó-ízreaggással

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

Elég meggyőző ez?

Nem, de lehet jobb mérést végezni!

Légköri neutrínó anomália értelmezése neutrínó-ízreaggéssel

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

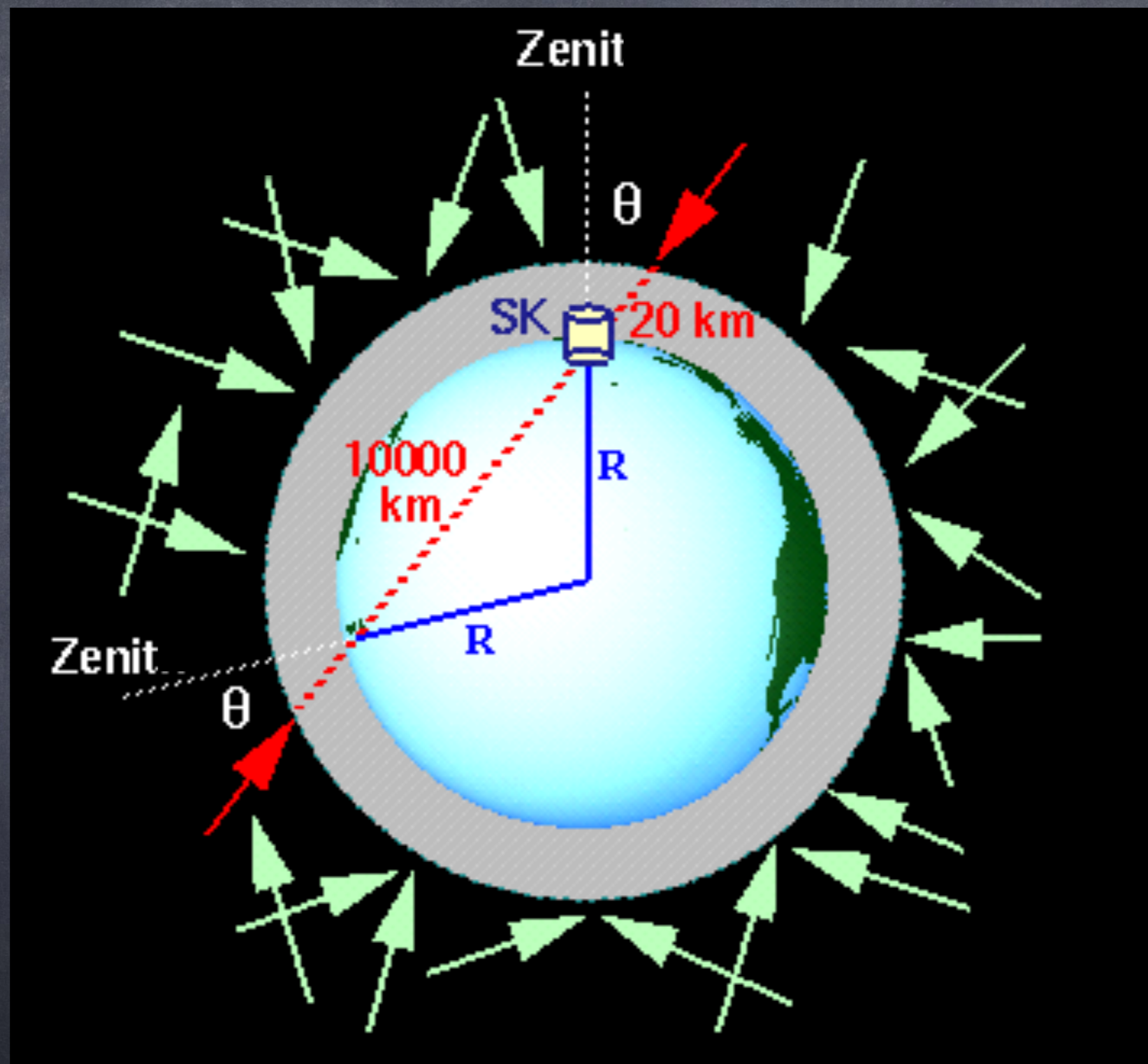
Elég meggyőző ez?

Nem, de lehet jobb mérést végezni!

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

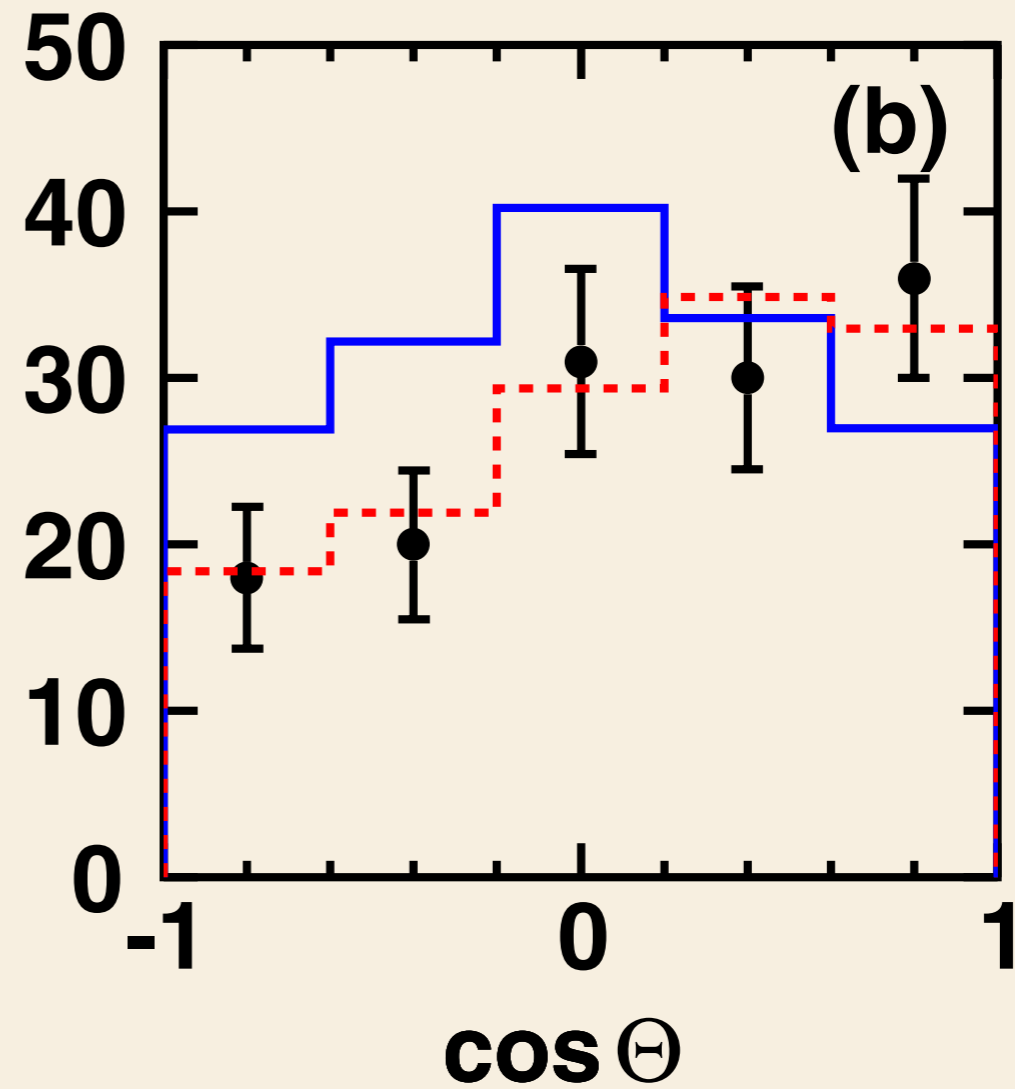
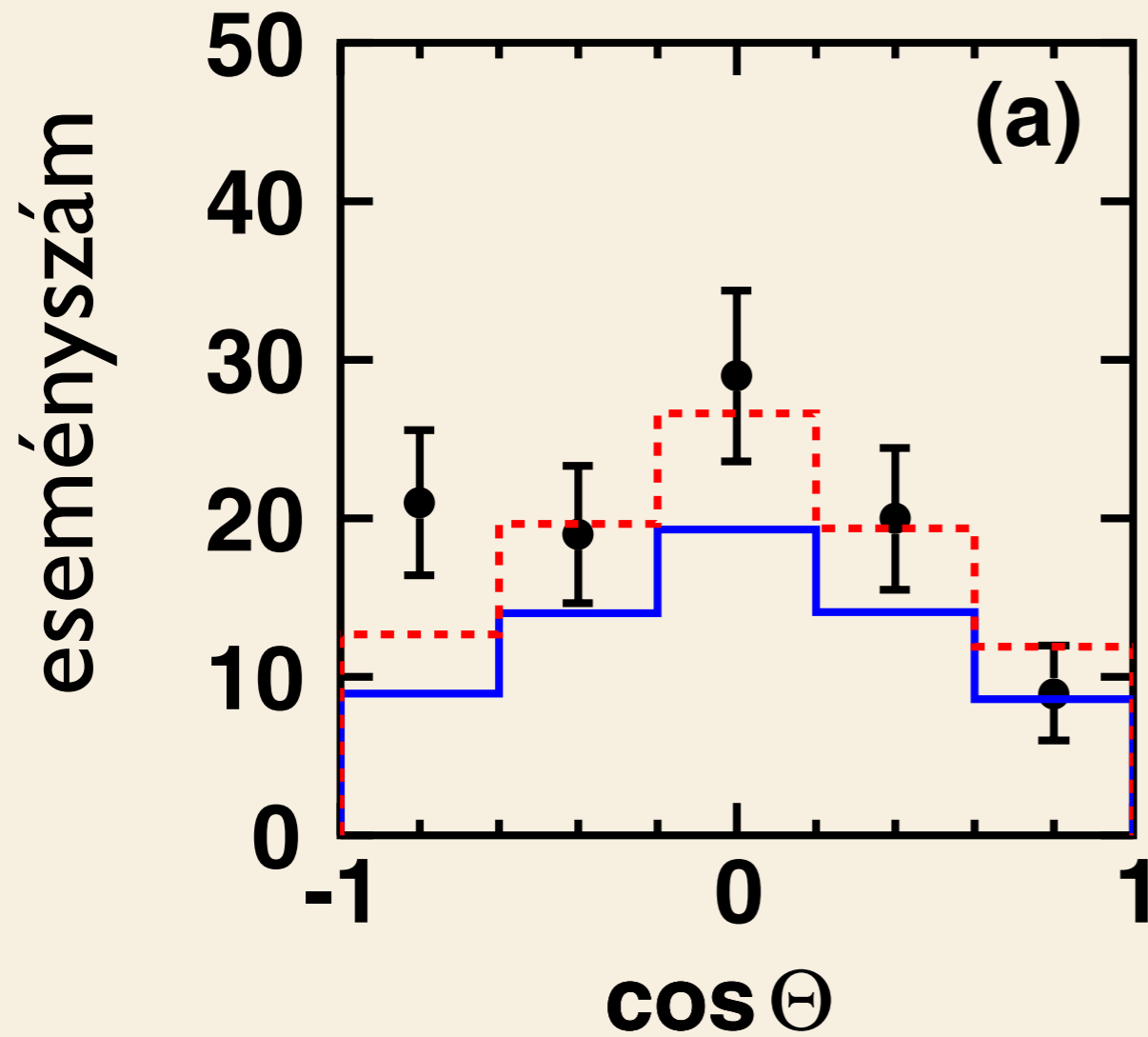
A neutrínó-ízreaggés megsérti ezt a szimmetriát (a Földön áthaladó neutrínók átalakulhatnak)

A fel-le szimmetria sérülése



irányérzékeny detektorral mérhető

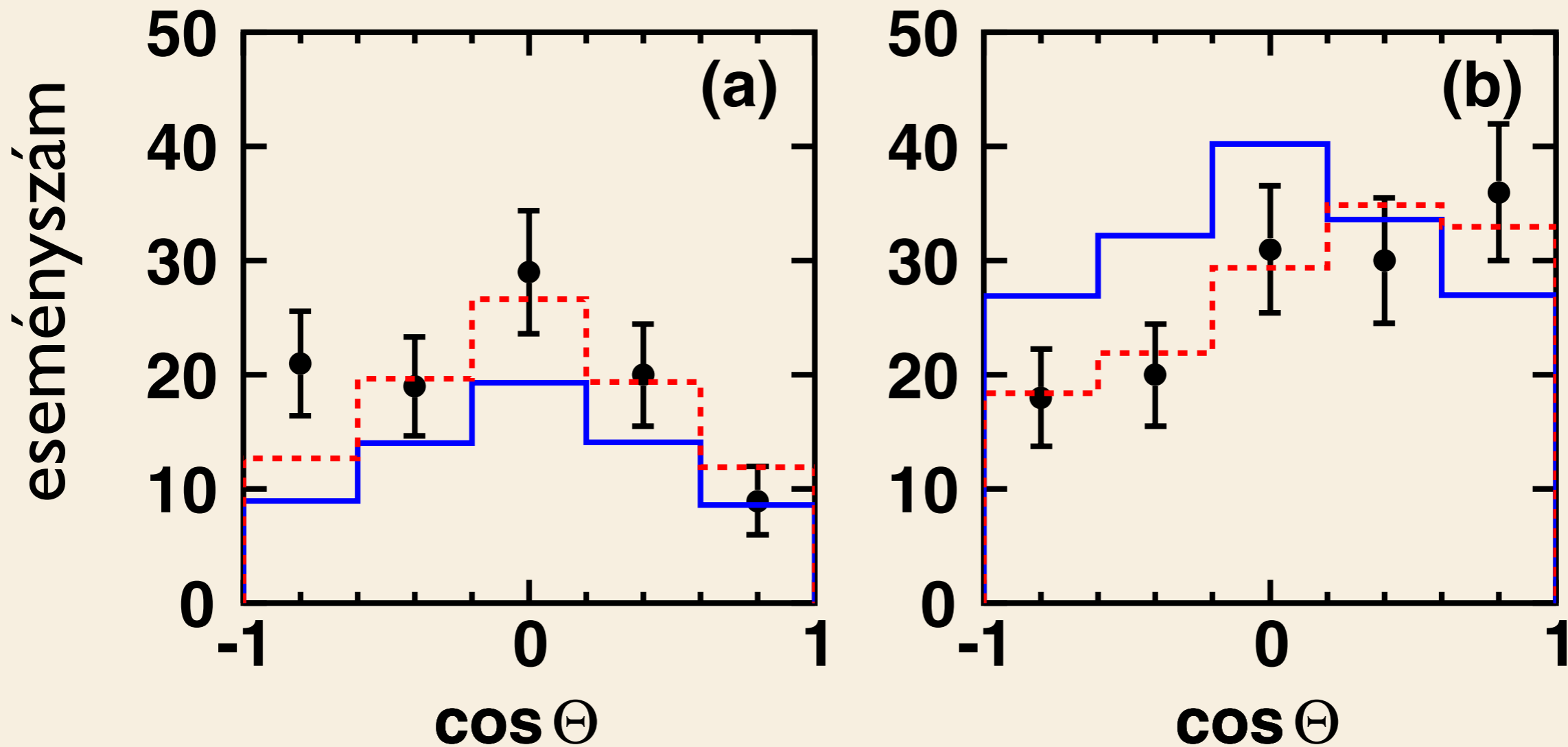
Kamiokande II eredménye



a) elektron-események

b) müion-események

Kamiokande II eredménye



a) elektron-események b) müion-események

P(értelmezés véletlen ingadozással) = 1%

az elvárás a részecskefizikában 10⁻⁵%

Szuper Kamiokande 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 észlelésének hatásfoka $\sim 100\%$



Szuper Kamiokande 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 észlelésének hatásfoka ~100%

$$R_{\mu/e} = \frac{\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu}}{\nu_e + \bar{\nu}_e}$$



Szuper Kamiokande kísérlet

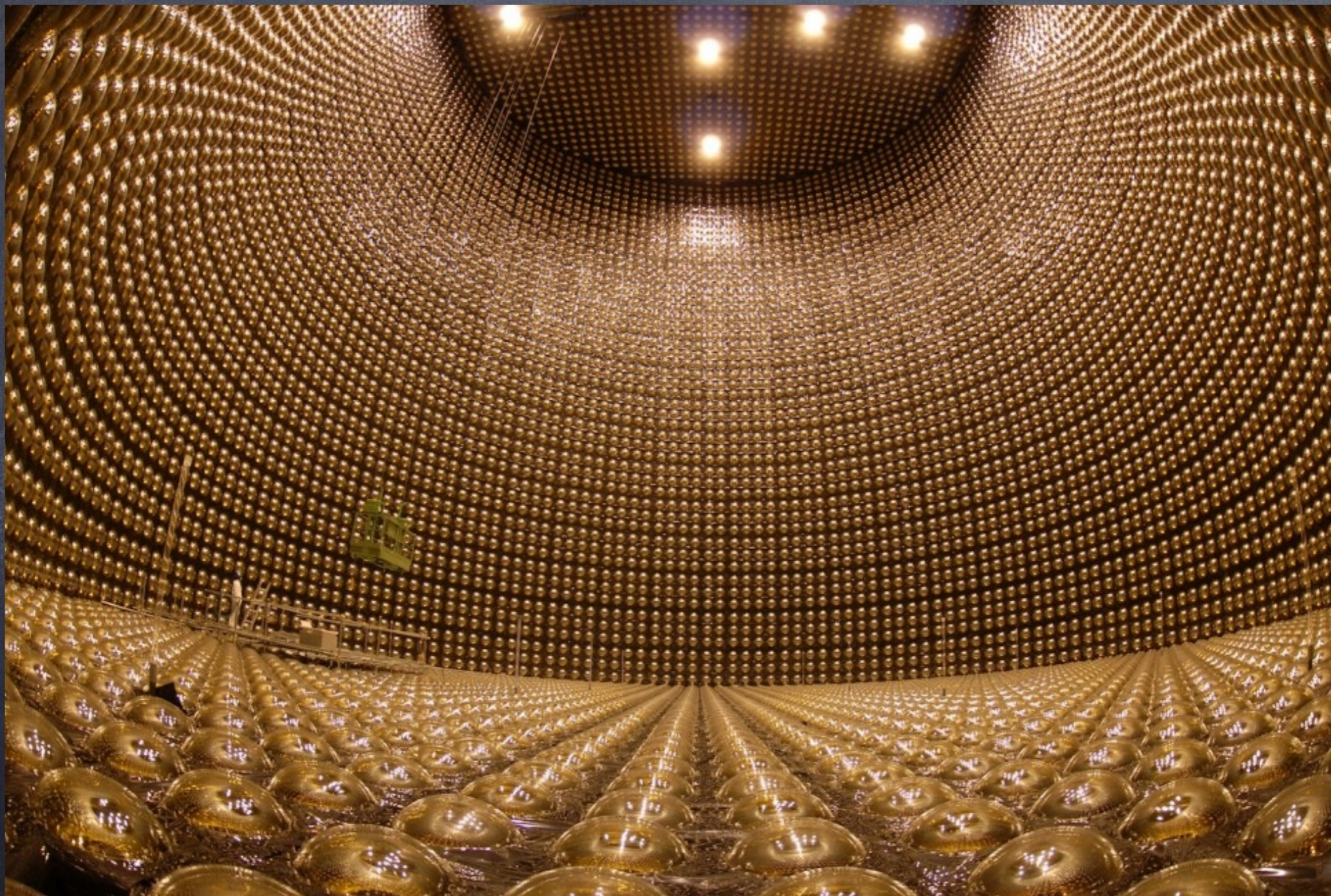
- belső tartály: 22,5 kt víz, 11200 db 50 cm-es PM cső
- külső tartály: 27,5 kt víz, 1900 db 20 cm-es PM cső
- müon-neutrínók észlelésének hatásfoka ~100%



$$R_{\mu/e} = \frac{\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu}}{\nu_e + \bar{\nu}_e}$$

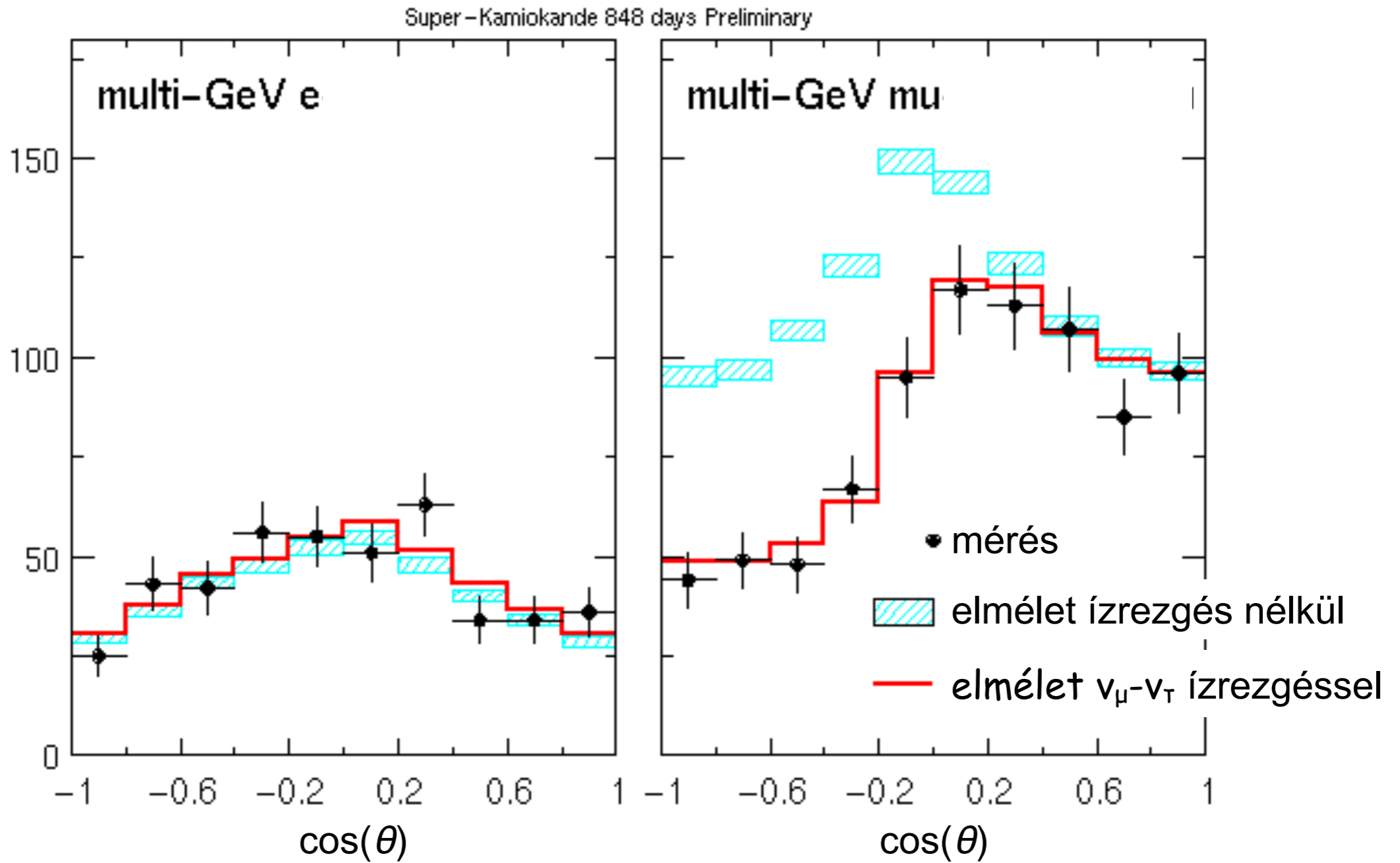
$(R_{\mu/e})_{\text{mérés}} / (R_{\mu/e})_{\text{elmélet}} = 0,688 \pm 0.053$ megerősíti a
Kamiokande II mérését

Szuper Kamiokande Kísérlet



A neutrínó-ízrengés felfedezése

eseményszám



a) elektron-események

b) müion-események

A tudományos felfedezés
izgalmas

mert sok kérdést vet fel:

A tudományos felfedezés izgalmas

mert sok kérdést vet fel:

- Mekkora az érzézéshez szükséges Δm^2 tömegnégyzet különbség?

A tudományos felfedezés izgalmas

mert sok kérdést vet fel:

- Mekkora az érzékszékhez szükséges Δm^2 tömegnégyzet különbség?
- Mekkora a keveredés θ szöge?

A tudományos felfedezés izgalmas

mert sok kérdést vet fel:

- Mekkora az érzékszékhez szükséges Δm^2 tömegnégyzet különbség?
- Mekkora a keveredés θ szöge?
- A mérésben csak a müon-neutrínók eltünedezését sikerült észlelni. Vajon a várakozásnak megfelelően **tau-neutrínóvá alakultak?**
(az elektron-neutrínók száma nem változott)

A tudományos felfedezés izgalmas

mert sok kérdést vet fel:

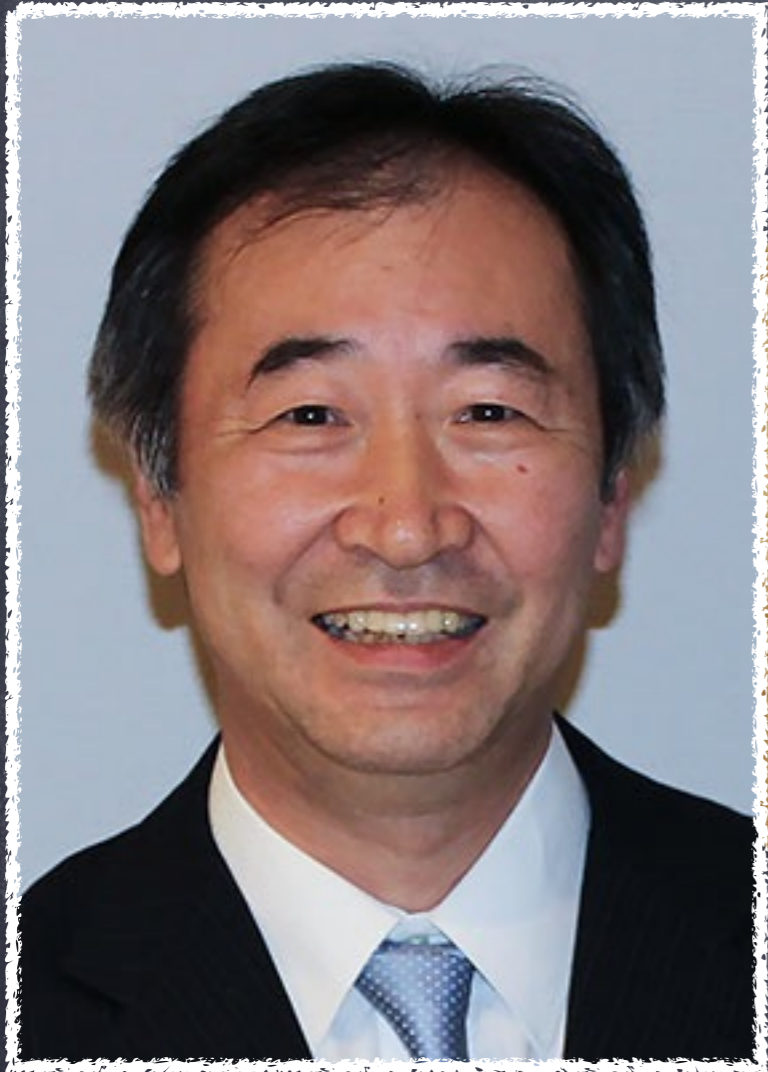
- Mekkora az érzékszékhez szükséges Δm^2 tömegnégyzet különbség?
- Mekkora a keveredés θ szöge?
- A mérésben csak a müon-neutrínók eltünedezését sikerült észlelni. Vajon a várakozásnak megfelelően tau-neutrínóvá alakultak?
(az elektron-neutrínók száma nem változott)
- Van-e keveredés más neutrínók között?

A tudományos felfedezés izgalmas

mert sok kérdést vet fel:

- Mekkora az érzékszékhez szükséges Δm^2 tömegnégyzet különbség?
- Mekkora a keveredés θ szöge?
- A mérésben csak a müon-neutrínók eltünedezését 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 neutrínó-érezék a magyarázat**?

A 2015. évi fizikai Nobel díj



Takaaki Kajita

Arthur B. McDonald

*a „neutrínó-ízrengés felfedezéséért,
ami bizonyítja, hogy a neutrínóknak van tömegük”*

A neutrínó-ízrengés túlmutat a standard modellel

- A részecskefizika standard modelljében a neutrínóknak nincs tömegük

A neutrínó-ízrezgés túlmutat a standard modellel

- A részecskefizika standard modelljében a neutrínóknak nincs tömegük
- A neutrínó-ízrezgések felfedezése csak úgy értelmezhető, ha elfogadjuk, hogy **a háromból legalább kettőnek van tömege**

A neutrínó-ízrezgés túlmutat a standard modellel

- A részecskefizika standard modelljében a neutrínóknak nincs tömegük
- A neutrínó-ízrezgések 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**

A neutrínó-ízrezgés túlmutat a standard modellel

- A részecskefizika standard modelljében a neutrínóknak nincs tömegük
- A neutrínó-ízrezgések 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-mezővel kölcsönhat, de

A neutrínó-ízrezgés túlmutat a standard modellel

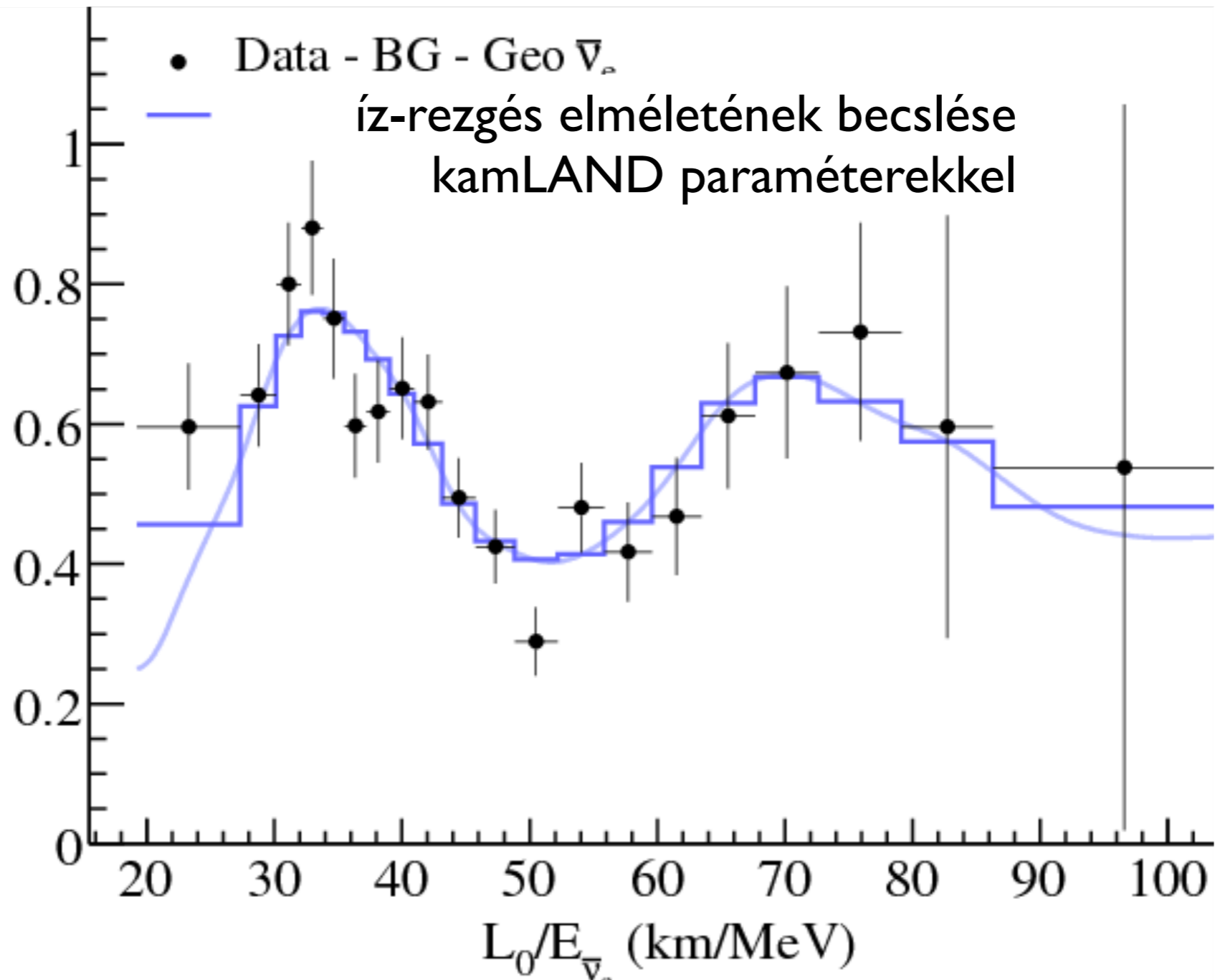
- A részecskefizika standard modelljében a neutrínóknak nincs tömegük
- A neutrínó-ízrezgések felfedezése csak úgy értelmezhető, ha elfogadjuk, hogy **a háromból legalább kettőnek van tömege**
- Részecskeátalakulás azonban csakis úgy lehetséges, ha **a részecske legalább két erőt érez**
- Kézenfekvő,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

A neutrínó-ízrezgés túlmutat a standard modellel

- A részecskefizika standard modelljében a neutrínóknak nincs tömegük
- A neutrínó-ízrezgések 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-mezővel kölcsönhat, 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 észlelése nehéz

Neutrínó-ízrengés ma

át nem alakulás valószínűsége



Általános vélekedés:
a neutrínók vizsgálata révén lehet választ kapni a
részecskefizika és a kozmológia több
megválaszolatlan kérdésére,
ezért sok kísérlet van vagy lesz:
[Magyar Tudomány jövő évi cikke](#)

Az előadás szövege letölthető:
<http://www.matud.iif.hu/2016/04/11.htm>

Általános vélekedés:
a neutrínók vizsgálata révén lehet választ kapni a
részecskefizika és a kozmológia több
megválaszolatlan kérdésére,
ezért sok kísérlet van vagy lesz:
Magyar Tudomány jövő évi cikke

Az előadás szövege letölthető:
<http://www.matud.iif.hu/2016/04/11.htm>

vége

Kvíz

Kvíz

1. Melyik állítás igaz? A neutrínók észleléséhez

Kvíz

1. Melyik állítás igaz? A neutrínók észleléséhez
 - a. az $\nu_e^{(0)} + n^{(0)} \rightarrow e^{(+1)} + e^{(-1)}$ folyamatot használják és a keletkező pozitront és elektront észleli a detektor.

Kvíz

1. Melyik állítás igaz? A neutrínók észleléséhez
 - a. az $\nu_e^{(0)} + n^{(0)} \rightarrow e^{(+1)} + e^{(-1)}$ folyamatot használják és a keletkező pozitront és elektront észleli a detektor.
 - b. az $\text{anti-}\nu_e^{(0)} + p^{(+1)} \rightarrow n^{(0)} + e^{(+1)}$ folyamatot használják, és a keletkező neutront és pozitront észleli a detektor.

Kvíz

1. Melyik állítás igaz? A neutrínók észleléséhez
 - a. az $\nu_e^{(0)} + n^{(0)} \rightarrow e^{(+1)} + e^{(-1)}$ folyamatot használják és a keletkező pozitront és elektront észleli a detektor.
 - b. az $\text{anti-}\nu_e^{(0)} + p^{(+1)} \rightarrow n^{(0)} + e^{(+1)}$ folyamatot használják, és a keletkező neutront és pozitront észleli a detektor.
 - c. az $\nu_e^{(0)} + p^{(+1)} \rightarrow n^{(0)} + e^{(-1)}$ folyamatot használják, és a keletkező neutront és elektront észleli a detektor.
- (A zárójelben a jelzett részecskék elektromos töltése szerepel.)

Kvíz

1. Melyik állítás igaz? A neutrínók észleléséhez
 - a. az $\nu_e^{(0)} + n^{(0)} \rightarrow e^{(+1)} + e^{(-1)}$ folyamatot használják és a keletkező pozitront és elektront észleli a detektor.
 - b. az $\text{anti-}\nu_e^{(0)} + p^{(+1)} \rightarrow n^{(0)} + e^{(+1)}$ folyamatot használják, és a keletkező neutront és pozitront észleli a detektor.
 - c. az $\nu_e^{(0)} + p^{(+1)} \rightarrow n^{(0)} + e^{(-1)}$ folyamatot használják, és a keletkező neutront és elektront észleli a detektor.(A zárójelben a jelzett részecskék elektromos töltése szerepel.)

2. Melyik állítás hamis? A neutrínók észleléséhez óriási tartályokat használnak,

Kvíz

1. Melyik állítás igaz? A neutrínók észleléséhez
 - a. az $\nu_e^{(0)} + n^{(0)} \rightarrow e^{(+1)} + e^{(-1)}$ folyamatot használják és a keletkező pozitront és elektront észleli a detektor.
 - b. az $\text{anti-}\nu_e^{(0)} + p^{(+1)} \rightarrow n^{(0)} + e^{(+1)}$ folyamatot használják, és a keletkező neutront és pozitront észleli a detektor.
 - c. az $\nu_e^{(0)} + p^{(+1)} \rightarrow n^{(0)} + e^{(-1)}$ folyamatot használják, és a keletkező neutront és elektront észleli a detektor.(A zárójelben a jelzett részecskék elektromos töltése szerepel.)

2. Melyik állítás hamis? A neutrínók észleléséhez óriási tartályokat használnak,
 - a. amelyeket mérgező anyag tölt meg, ezért azokat emberi lakhelytől távol, bányák mélyére telepítik.

Kvíz

1. Melyik állítás igaz? A neutrínók észleléséhez
 - a. az $\nu_e^{(0)} + n^{(0)} \rightarrow e^{(+1)} + e^{(-1)}$ folyamatot használják és a keletkező pozitront és elektront észleli a detektor.
 - b. az $\text{anti-}\nu_e^{(0)} + p^{(+1)} \rightarrow n^{(0)} + e^{(+1)}$ folyamatot használják, és a keletkező neutront és pozitront észleli a detektor.
 - c. az $\nu_e^{(0)} + p^{(+1)} \rightarrow n^{(0)} + e^{(-1)}$ folyamatot használják, és a keletkező neutront és elektront észleli a detektor.(A zárójelben a jelzett részecskék elektromos töltése szerepel.)

2. Melyik állítás hamis? A neutrínók észleléséhez óriási tartályokat használnak,
 - a. amelyeket mérgező anyag tölt meg, ezért azokat emberi lakhelytől távol, bányák mélyére telepítik.
 - b. és a tartályok falára fénysokszorozó csöveket tesznek, amelyekkel a neutrínók által keltett gyorsan mozgó töltések Cserenkov-sugárzását észlelik.

Kvíz

1. Melyik állítás igaz? A neutrínók észleléséhez
 - a. az $\nu_e^{(0)} + n^{(0)} \rightarrow e^{(+1)} + e^{(-1)}$ folyamatot használják és a keletkező pozitront és elektront észleli a detektor.
 - b. az $\text{anti-}\nu_e^{(0)} + p^{(+1)} \rightarrow n^{(0)} + e^{(+1)}$ folyamatot használják, és a keletkező neutront és pozitront észleli a detektor.
 - c. az $\nu_e^{(0)} + p^{(+1)} \rightarrow n^{(0)} + e^{(-1)}$ folyamatot használják, és a keletkező neutront és elektront észleli a detektor.(A zárójelben a jelzett részecskék elektromos töltése szerepel.)

2. Melyik állítás hamis? A neutrínók észleléséhez óriási tartályokat használnak,
 - a. amelyeket mérgező anyag tölt meg, ezért azokat emberi lakhelytől távol, bányák mélyére telepítik.
 - b. és a tartályok falára fénysokszorozó csöveket tesznek, amelyekkel a neutrínók által keltett gyorsan mozgó töltések Cserenkov-sugárzását észlelik.
 - c. amelyeket bányák mélyére telepítenek, hogy kiküszöböljék a kozmikus háttérsugárzásból érkező másfajta részecskéket.

Kvíz

1. Melyik állítás igaz? A neutrínók észleléséhez
 - a. az $\nu_e^{(0)} + n^{(0)} \rightarrow e^{(+1)} + e^{(-1)}$ folyamatot használják és a keletkező pozitront és elektront észleli a detektor.
 - b. az $\text{anti-}\nu_e^{(0)} + p^{(+1)} \rightarrow n^{(0)} + e^{(+1)}$ folyamatot használják, és a keletkező neutront és pozitront észleli a detektor.
 - c. az $\nu_e^{(0)} + p^{(+1)} \rightarrow n^{(0)} + e^{(-1)}$ folyamatot használják, és a keletkező neutront és elektront észleli a detektor.(A zárójelben a jelzett részecskék elektromos töltése szerepel.)

2. Melyik állítás hamis? A neutrínók észleléséhez óriási tartályokat használnak,
 - a. amelyeket mérgező anyag tölt meg, ezért azokat emberi lakhelytől távol, bányák mélyére telepítik.
 - b. és a tartályok falára fénysokszorozó csöveket tesznek, amelyekkel a neutrínók által keltett gyorsan mozgó töltések Cserenkov-sugárzását észlelik.
 - c. amelyeket bányák mélyére telepítenek, hogy kiküszöböljék a kozmikus háttérsugárzásból érkező másfajta részecskéket.

3. Melyik állítás igaz? A Nap-neutrínó rejtély azt jelentette, hogy

Kvíz

1. Melyik állítás igaz? A neutrínók észleléséhez
 - a. az $\nu_e^{(0)} + n^{(0)} \rightarrow e^{(+1)} + e^{(-1)}$ folyamatot használják és a keletkező pozitront és elektront észleli a detektor.
 - b. az $\text{anti-}\nu_e^{(0)} + p^{(+1)} \rightarrow n^{(0)} + e^{(+1)}$ folyamatot használják, és a keletkező neutront és pozitront észleli a detektor.
 - c. az $\nu_e^{(0)} + p^{(+1)} \rightarrow n^{(0)} + e^{(-1)}$ folyamatot használják, és a keletkező neutront és elektront észleli a detektor.(A zárójelben a jelzett részecskék elektromos töltése szerepel.)

2. Melyik állítás hamis? A neutrínók észleléséhez óriási tartályokat használnak,
 - a. amelyeket mérgező anyag tölt meg, ezért azokat emberi lakhelytől távol, bányák mélyére telepítik.
 - b. és a tartályok falára fénysokszorozó csöveket tesznek, amelyekkel a neutrínók által keltett gyorsan mozgó töltések Cserenkov-sugárzását észlelik.
 - c. amelyeket bányák mélyére telepítenek, hogy kiküszöböljék a kozmikus háttérsugárzásból érkező másfajta részecskéket.

3. Melyik állítás igaz? A Nap-neutrínó rejtély azt jelentette, hogy
 - a. nem tudtuk, hogyan keletkeznek az elektronneutrínók a Napban.

Kvíz

1. Melyik állítás igaz? A neutrínók észleléséhez
 - a. az $\nu_e^{(0)} + n^{(0)} \rightarrow e^{(+1)} + e^{(-1)}$ folyamatot használják és a keletkező pozitront és elektront észleli a detektor.
 - b. az $\text{anti-}\nu_e^{(0)} + p^{(+1)} \rightarrow n^{(0)} + e^{(+1)}$ folyamatot használják, és a keletkező neutront és pozitront észleli a detektor.
 - c. az $\nu_e^{(0)} + p^{(+1)} \rightarrow n^{(0)} + e^{(-1)}$ folyamatot használják, és a keletkező neutront és elektront észleli a detektor.(A zárójelben a jelzett részecskék elektromos töltése szerepel.)

2. Melyik állítás hamis? A neutrínók észleléséhez óriási tartályokat használnak,
 - a. amelyeket mérgező anyag tölt meg, ezért azokat emberi lakhelytől távol, bányák mélyére telepítik.
 - b. és a tartályok falára fénysokszorozó csöveket tesznek, amelyekkel a neutrínók által keltett gyorsan mozgó töltések Cserenkov-sugárzását észlelik.
 - c. amelyeket bányák mélyére telepítenek, hogy kiküszöböljék a kozmikus háttérsugárzásból érkező másfajta részecskéket.

3. Melyik állítás igaz? A Nap-neutrínó rejtély azt jelentette, hogy
 - a. nem tudtuk, hogyan keletkeznek az elektronneutrínók a Napban.
 - b. nem tudtuk, milyen fajta neutrínók keletkeznek a Napban.

Kvíz

1. Melyik állítás igaz? A neutrínók észleléséhez
 - a. az $\nu_e^{(0)} + n^{(0)} \rightarrow e^{(+1)} + e^{(-1)}$ folyamatot használják és a keletkező pozitront és elektront észleli a detektor.
 - b. az $\text{anti-}\nu_e^{(0)} + p^{(+1)} \rightarrow n^{(0)} + e^{(+1)}$ folyamatot használják, és a keletkező neutront és pozitront észleli a detektor.
 - c. az $\nu_e^{(0)} + p^{(+1)} \rightarrow n^{(0)} + e^{(-1)}$ folyamatot használják, és a keletkező neutront és elektront észleli a detektor.(A zárójelben a jelzett részecskék elektromos töltése szerepel.)

2. Melyik állítás hamis? A neutrínók észleléséhez óriási tartályokat használnak,
 - a. amelyeket mérgező anyag tölt meg, ezért azokat emberi lakhelytől távol, bányák mélyére telepítik.
 - b. és a tartályok falára fénysokszorozó csöveket tesznek, amelyekkel a neutrínók által keltett gyorsan mozgó töltések Cserenkov-sugárzását észlelik.
 - c. amelyeket bányák mélyére telepítenek, hogy kiküszöböljék a kozmikus háttérsugárzásból érkező másfajta részecskéket.

3. Melyik állítás igaz? A Nap-neutrínó rejtély azt jelentette, hogy
 - a. nem tudtuk, hogyan keletkeznek az elektronneutrínók a Napban.
 - b. nem tudtuk, milyen fajta neutrínók keletkeznek a Napban.
 - c. nem tudtuk miért érkezik kevesebb elektronneutrínó a Föld felszínre, mint amennyi elindul a Napból.