

# Neutrínók Ízrezgése

Trócsányi Zoltán

Eötvös Loránd Tudományegyetem és  
Debreceni Egyetem

HTP utótalálkozó  
Budapest 2022. december 3

# 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.

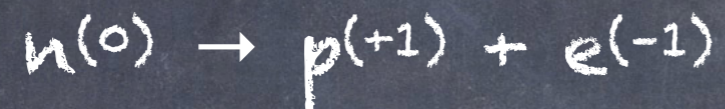
Albert Einstein

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

TZ

# Wolfgang Pauli jóslata

béta-bomlásban látszik:

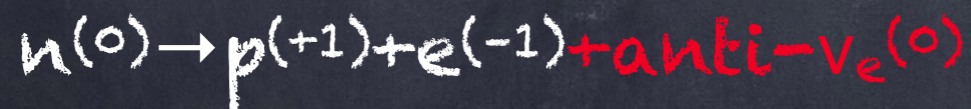


✓energia

✓lendület

✓perdület

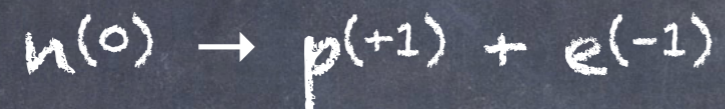
megmaradása megköveteli egy további részecske keletkezését



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

# Wolfgang Pauli jóslata

béta-bomlásban látszik:

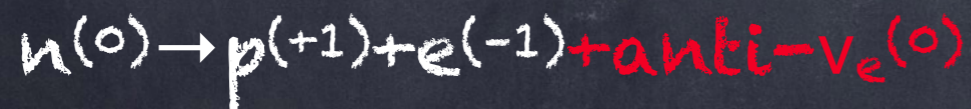


✓energia

✓lendület

✓perdület

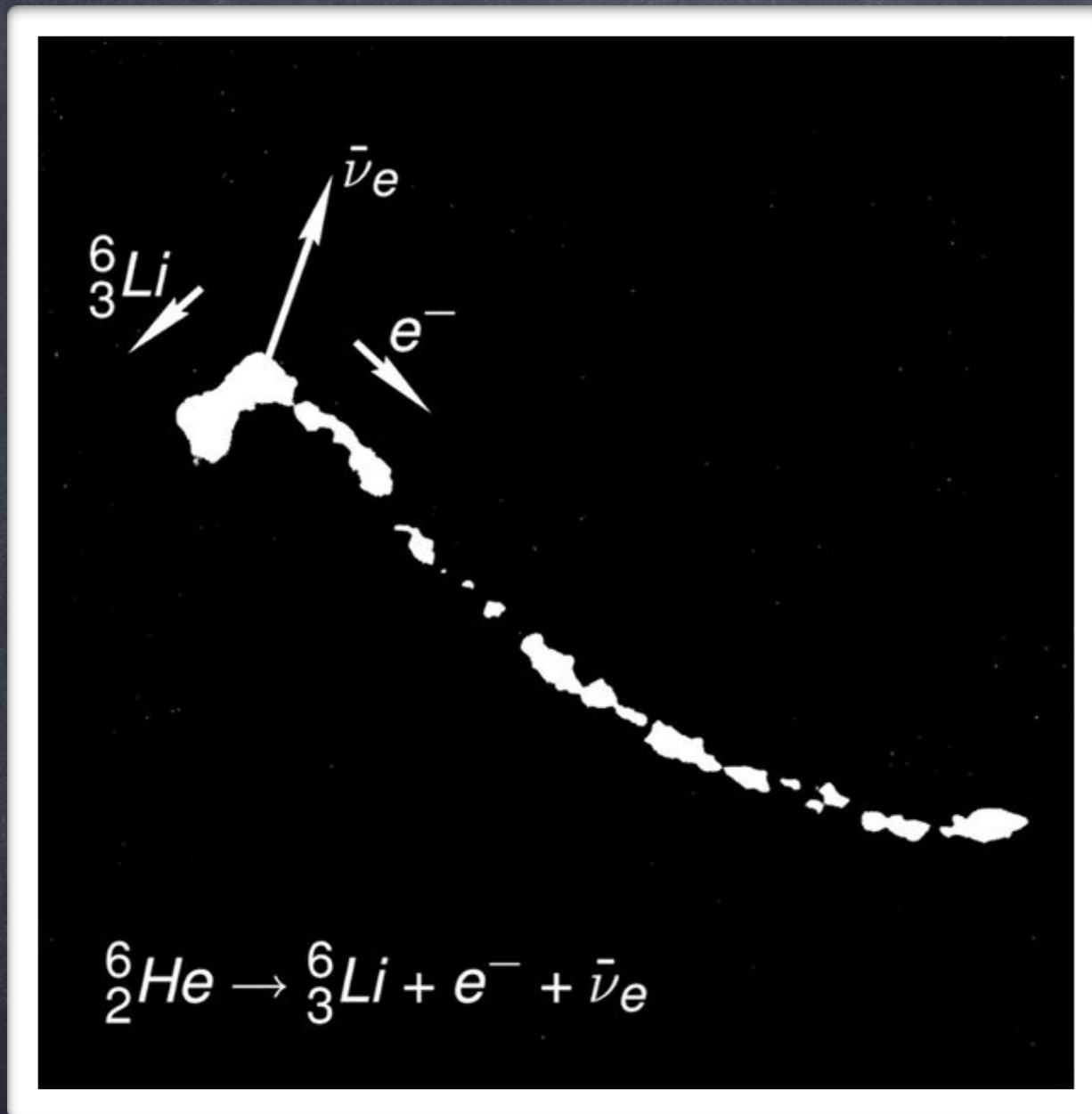
megmaradása megköveteli egy további részecske keletkezését



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

**Marx György: a leptonszám megmarad**

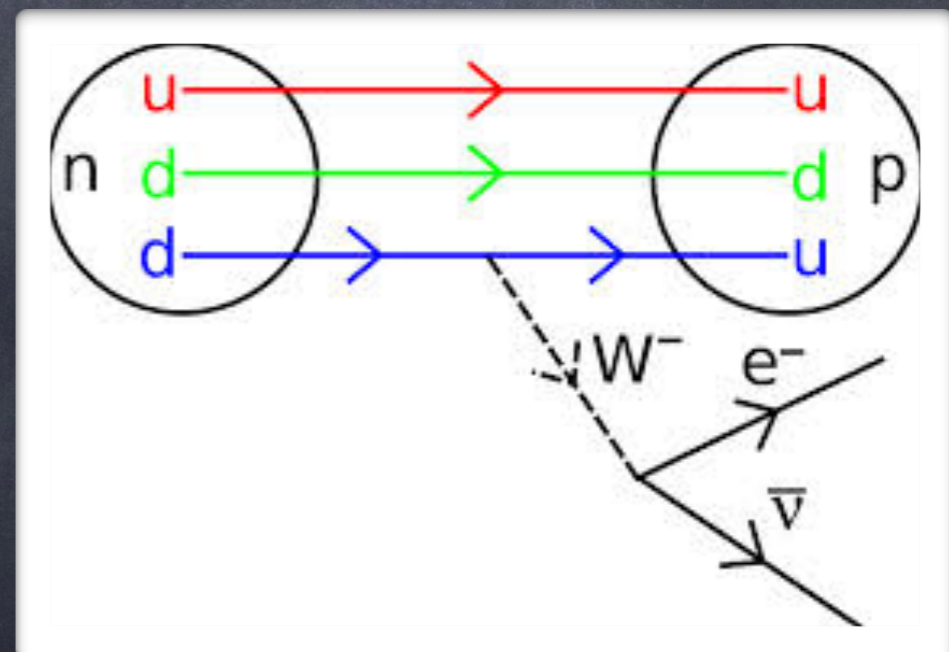
# Csikai-Szalay kísérlet (1956)



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

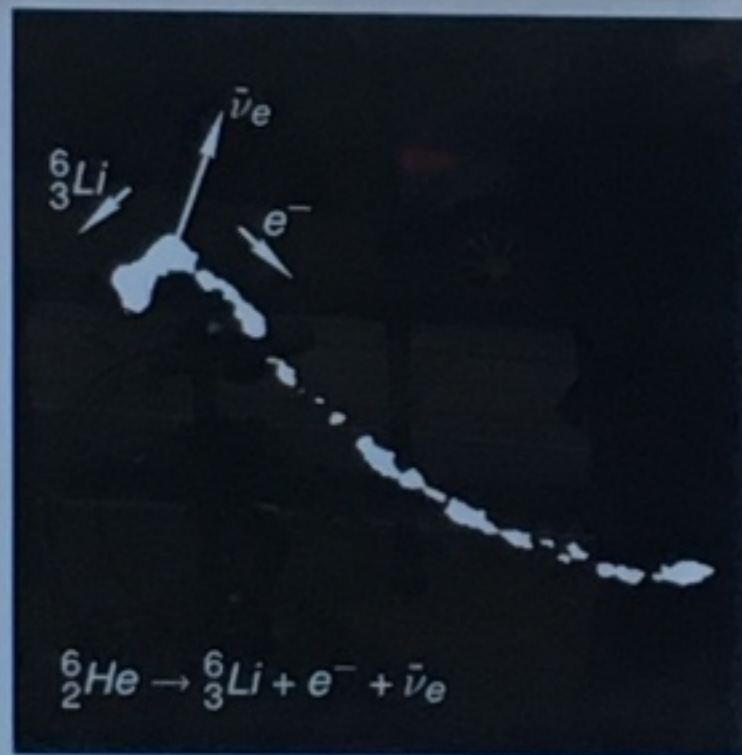
elemi szinten:

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



# 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 <sup>2</sup>	1,27 GeV/c <sup>2</sup>	173 GeV/c <sup>2</sup>	0	125 GeV/c <sup>2</sup>
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 <sup>2</sup>	95 MeV/c <sup>2</sup>	4,2 GeV/c <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	<0,17 MeV/c <sup>2</sup>	<15,5 MeV/c <sup>2</sup>	91,2 GeV/c <sup>2</sup>	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	elektron-neutrínó	müon-neutrínó	tau-neutrínó	Z-bozon	
Leptonok	0,511 MeV/c <sup>2</sup>	105,7 MeV/c <sup>2</sup>	1,777 GeV/c <sup>2</sup>	80,4 GeV/c <sup>2</sup>	
	-1	-1	-1	$\pm 1$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	elektron	müon	tau	W-bozon	

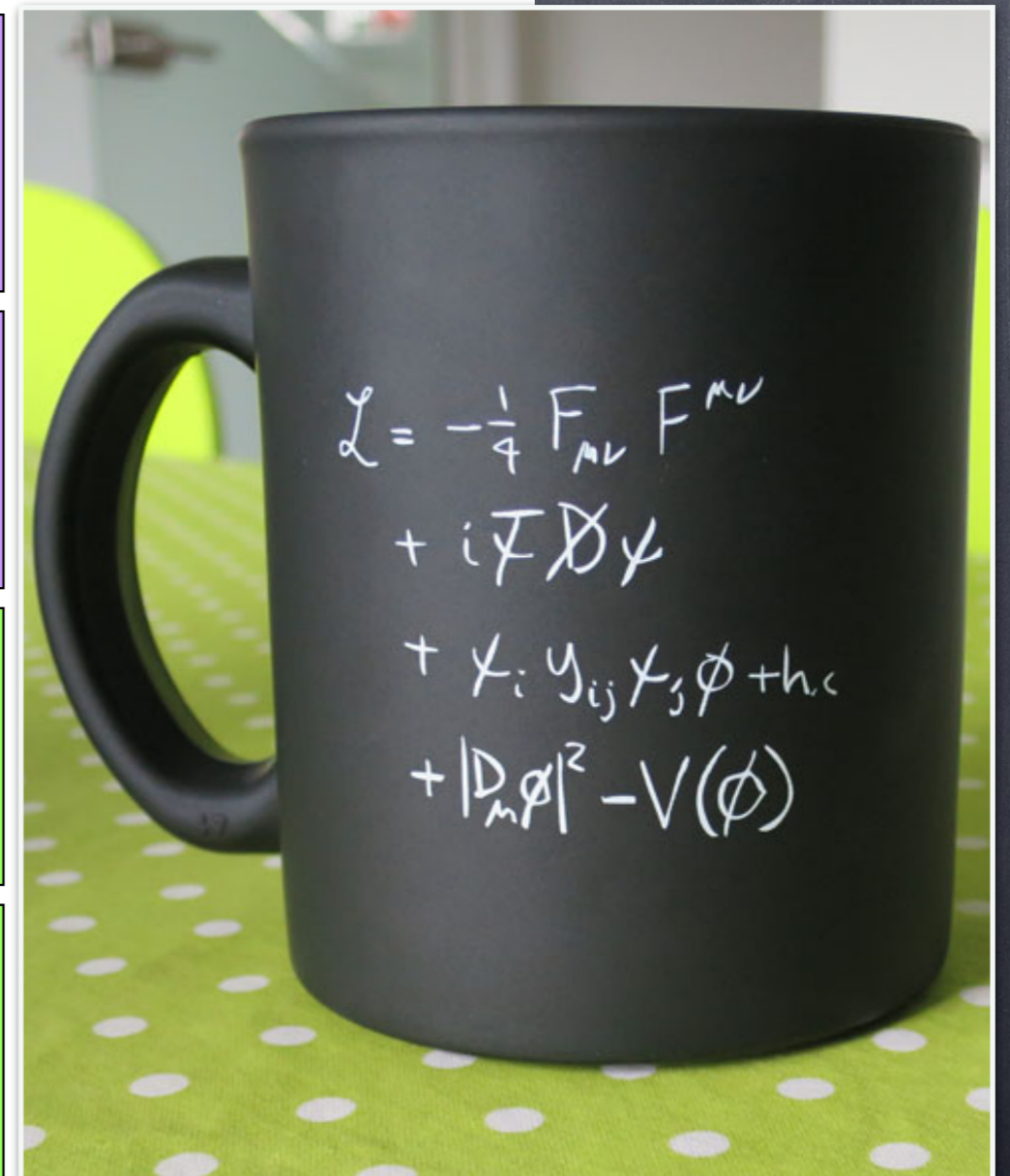
Bozonok (kölcsönhatások)



# Elemi részecskék és kölcsönhatásai

Az anyagi részecskék három családja (fermionok)

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

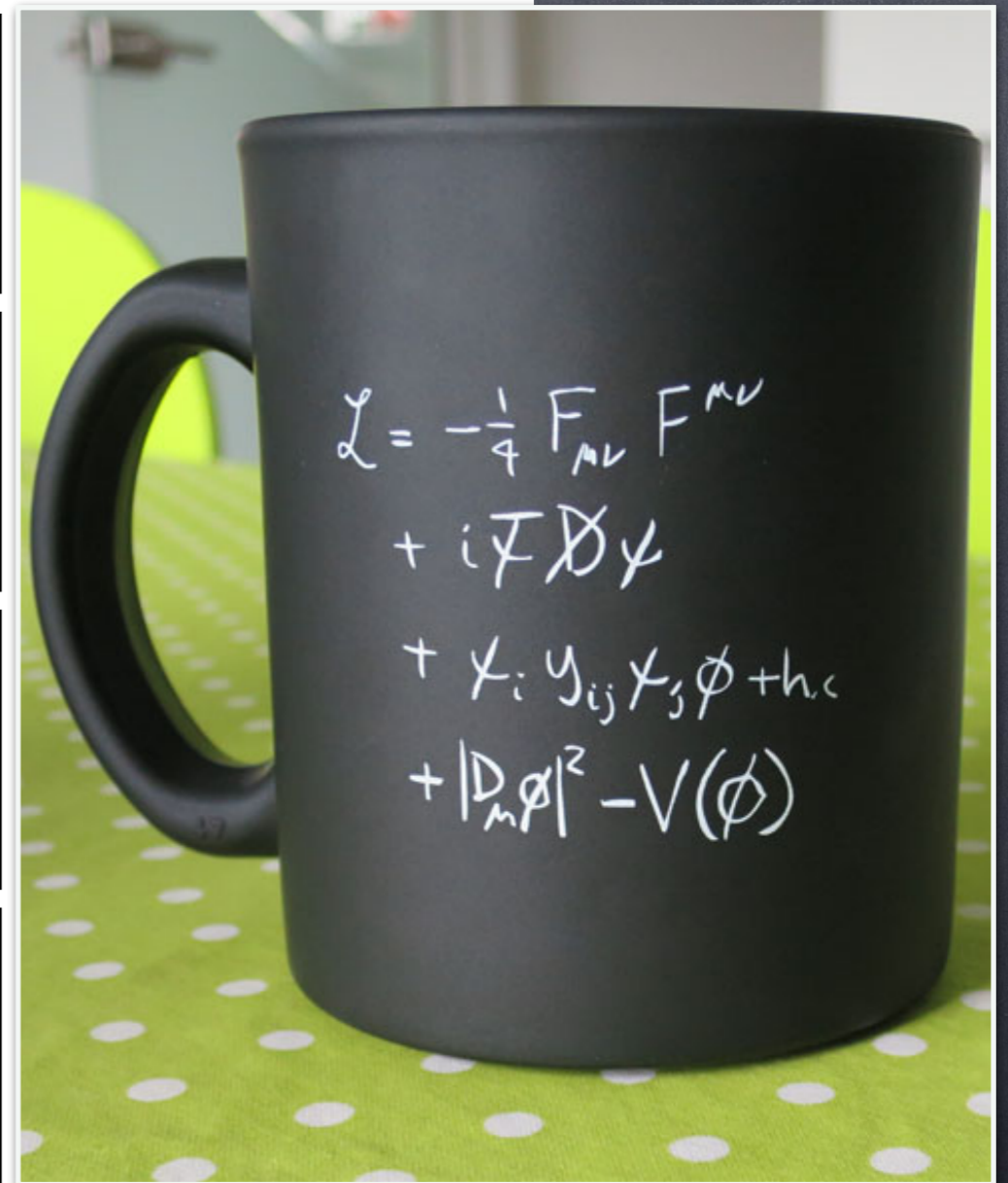


# Elemi részecskék és kölcsönhatásai

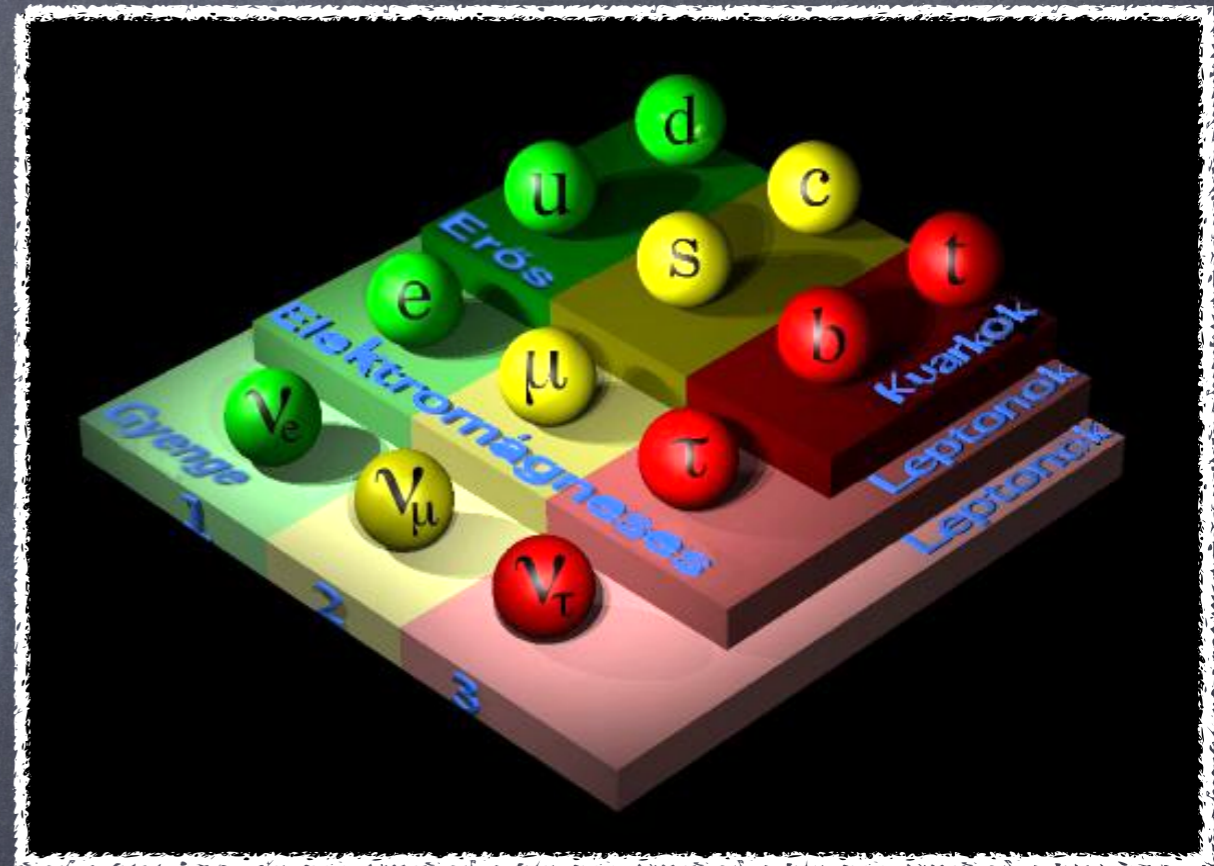
Az anyagi részecskék három családja (fermionok)

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

neutrínó  
ízek

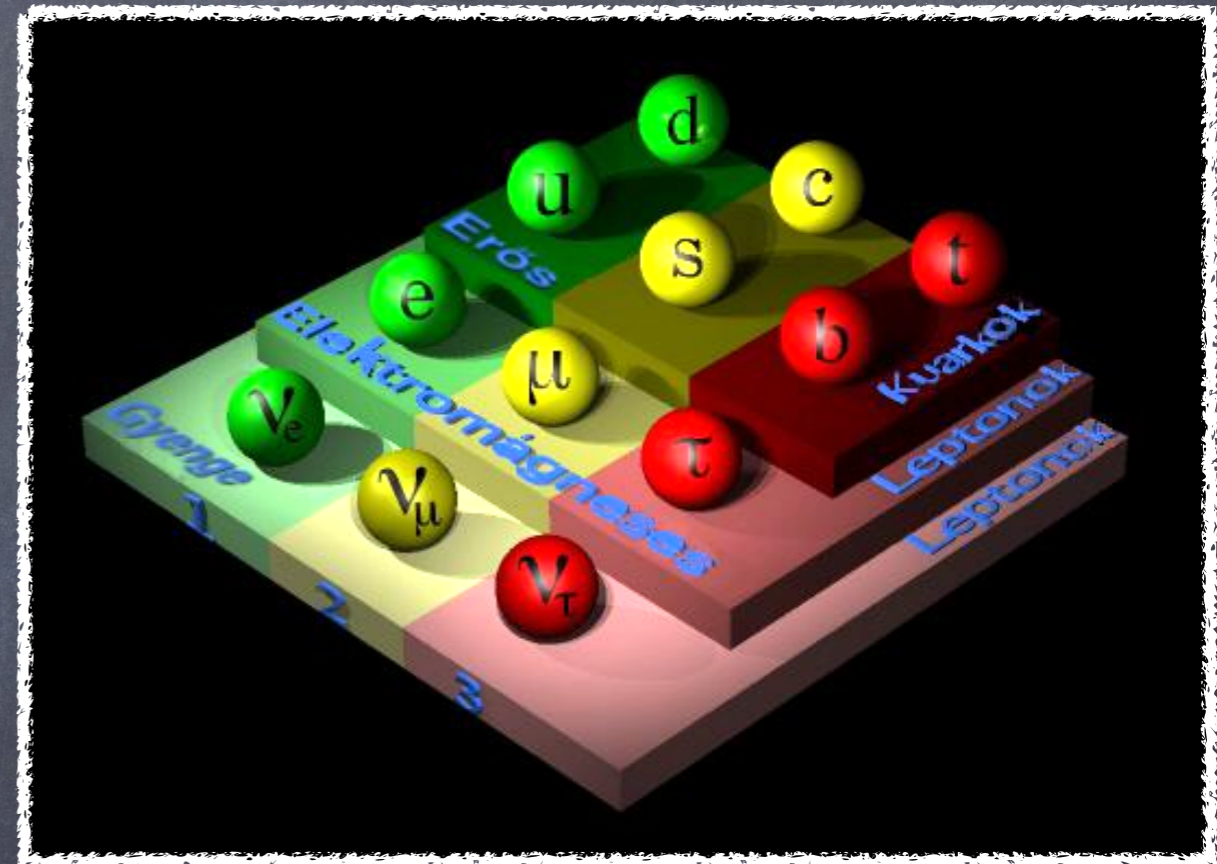


# Neutrínó-anyag kölcsönhatás



# Neutrínó-anyag kölcsönhatás

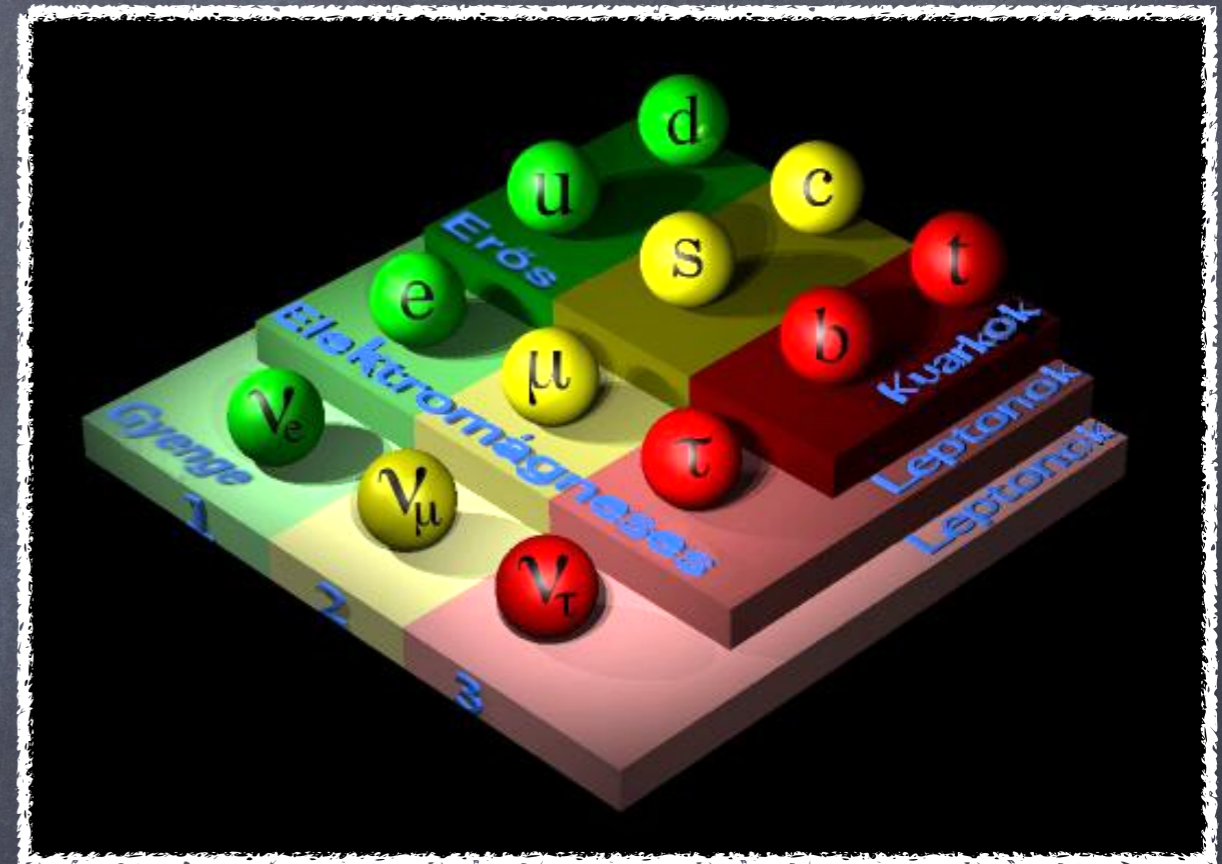
a neutrínók csak a radioaktivitásért felelős gyenge erőt érzik:



# Neutrínó-anyag kölcsönhatás

a neutrínók csak a radioaktivitásért felelős gyenge erőt érzik:

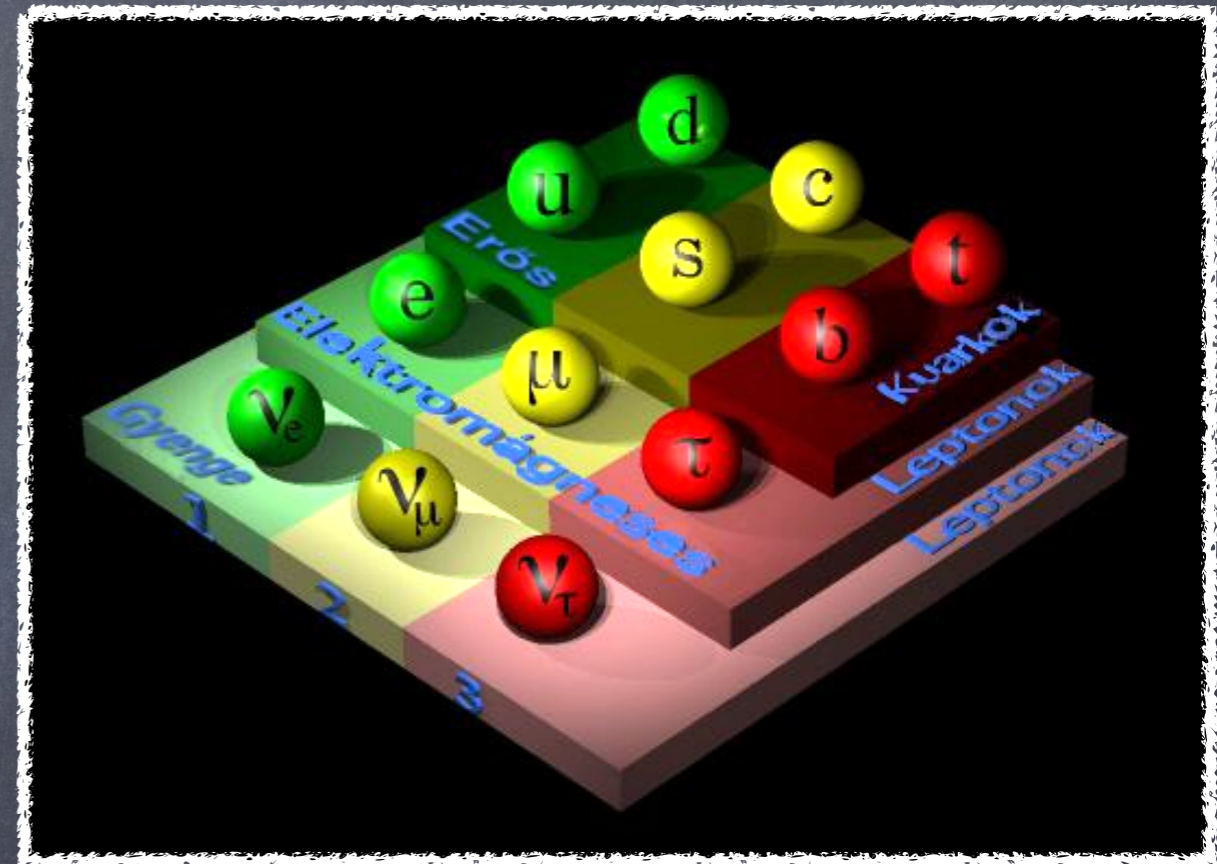
százezer neutrínó közül csak egy akad fenn a Földön (12740 km), a többi áthalad



# 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



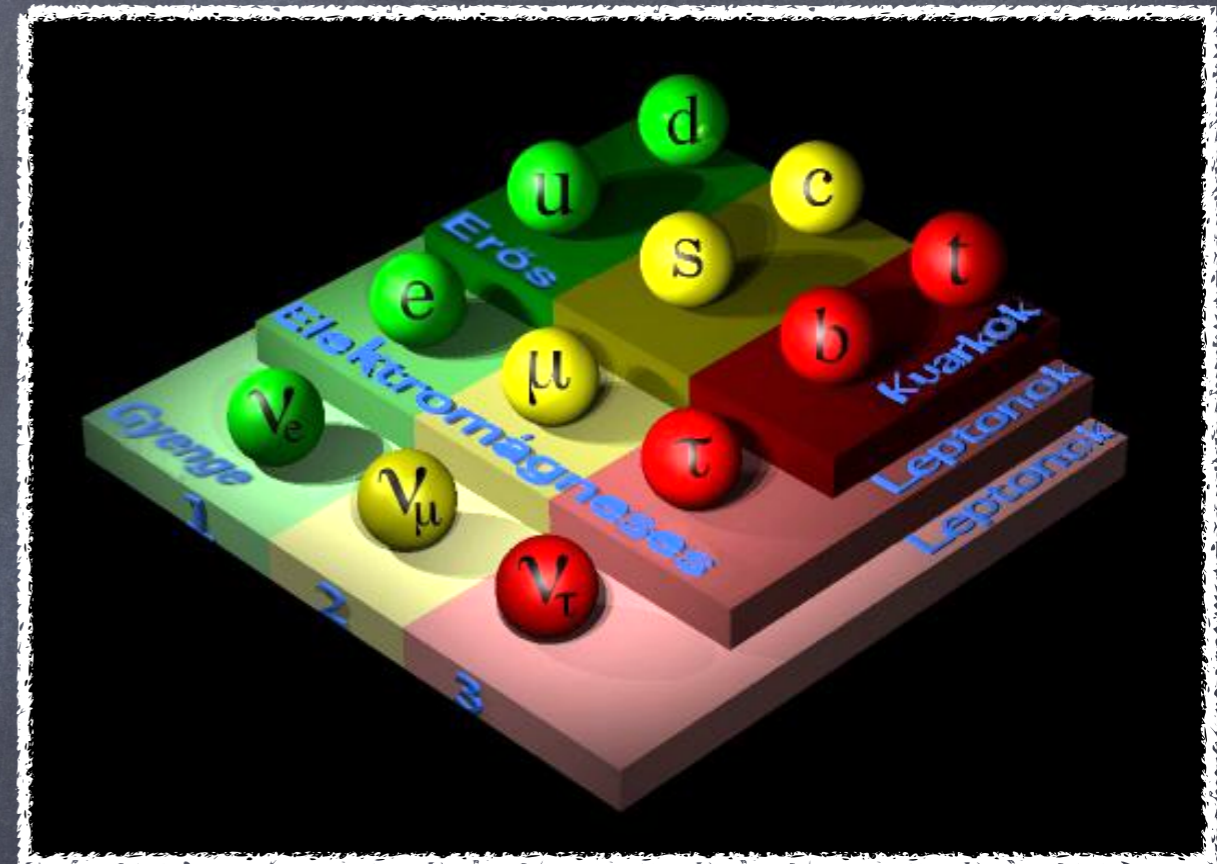
# Neutrínó-anyag kölcsönhatás

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



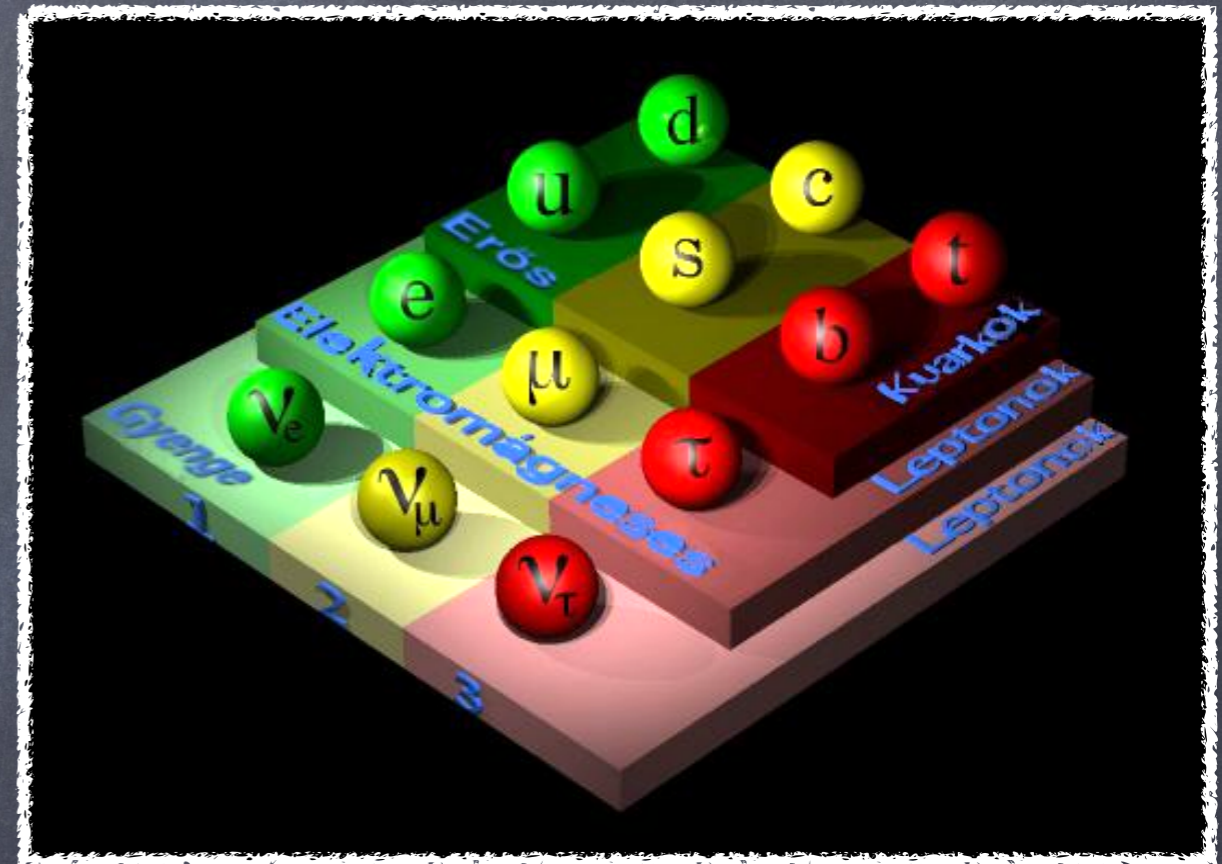
# Neutrínó-anyag kölcsönhatás

a neutrínók csak a radioaktivitásért felelős gyenge erőt érzik:

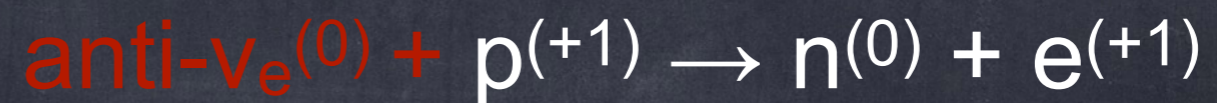
százezer neutrínó közül csak egy akad fenn a Földön

(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:





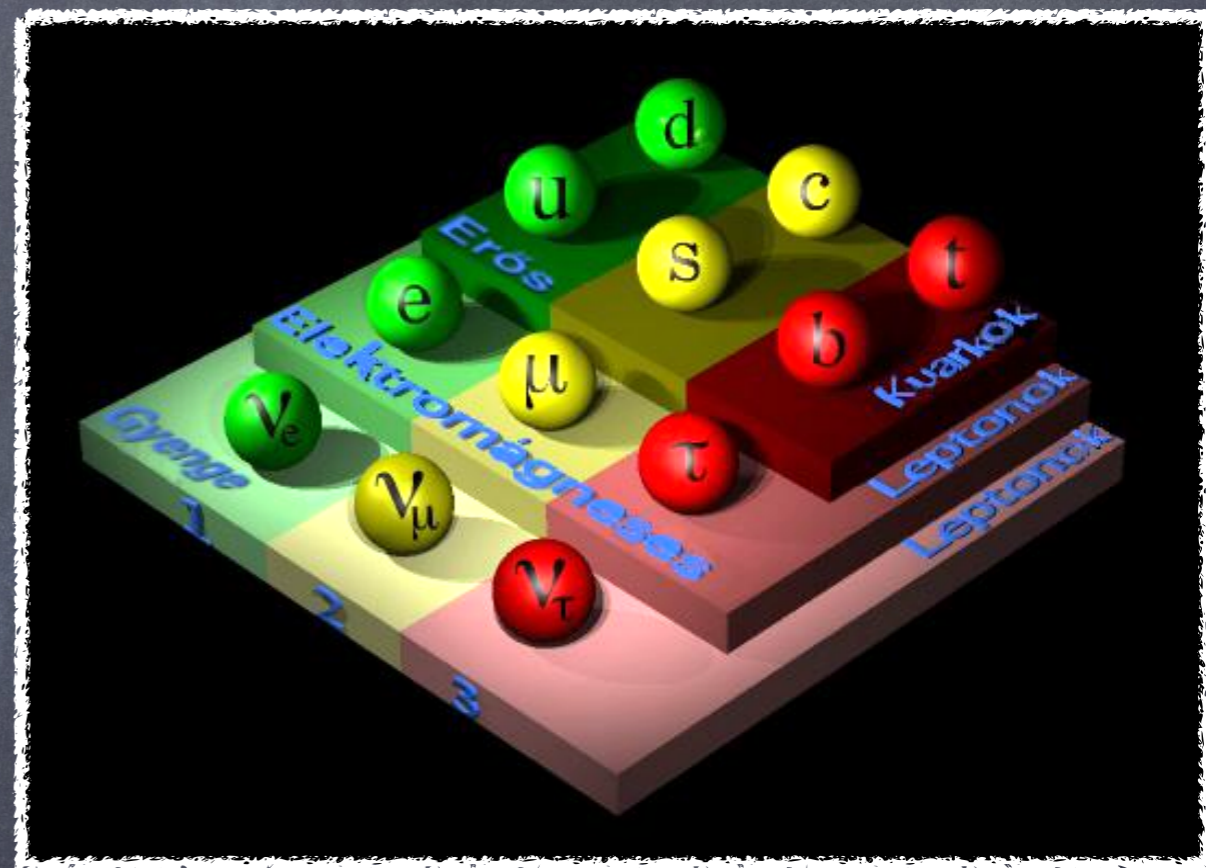
# Neutrínó-anyag kölcsönhatás

a neutrínók csak a radioaktivitásért felelős gyenge erőt érzik:

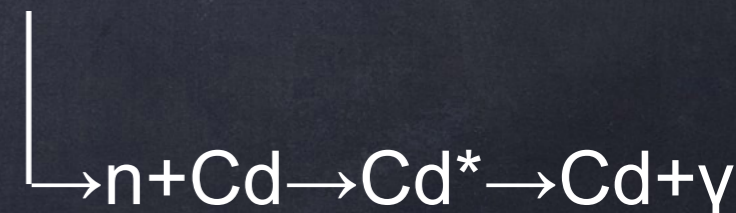
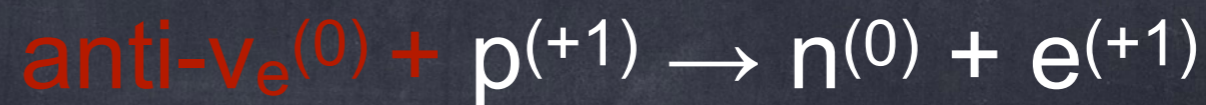
százezer neutrínó közül csak egy akad fenn a Földön

(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:

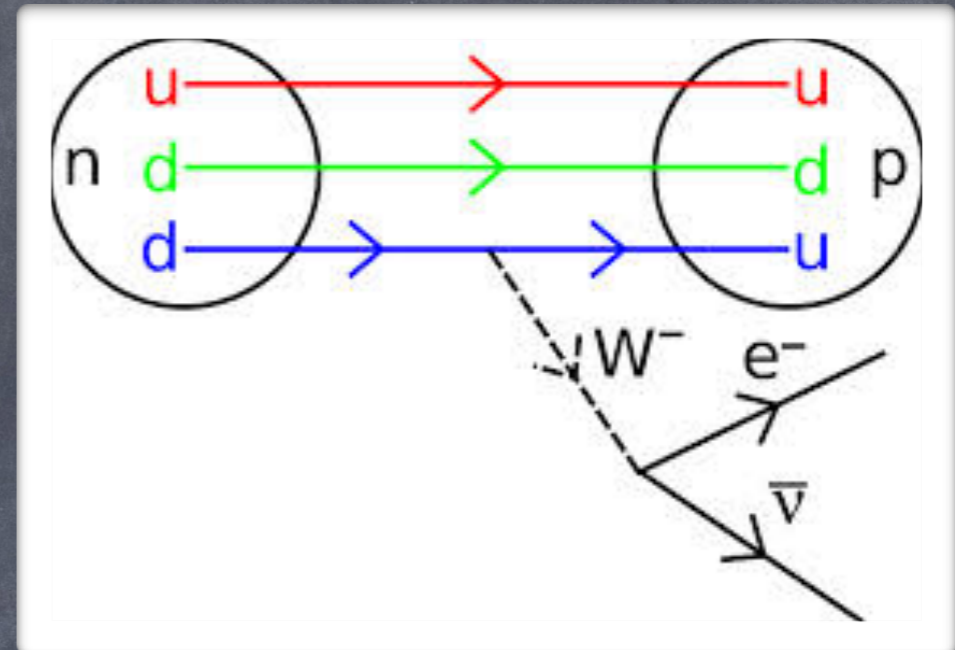




# Neutrínók észlelése

Detektoraink az elektromos erőt érző, vagy a nehéz részecskéket észlelik

$\beta$ -bomlás elemi szinten:



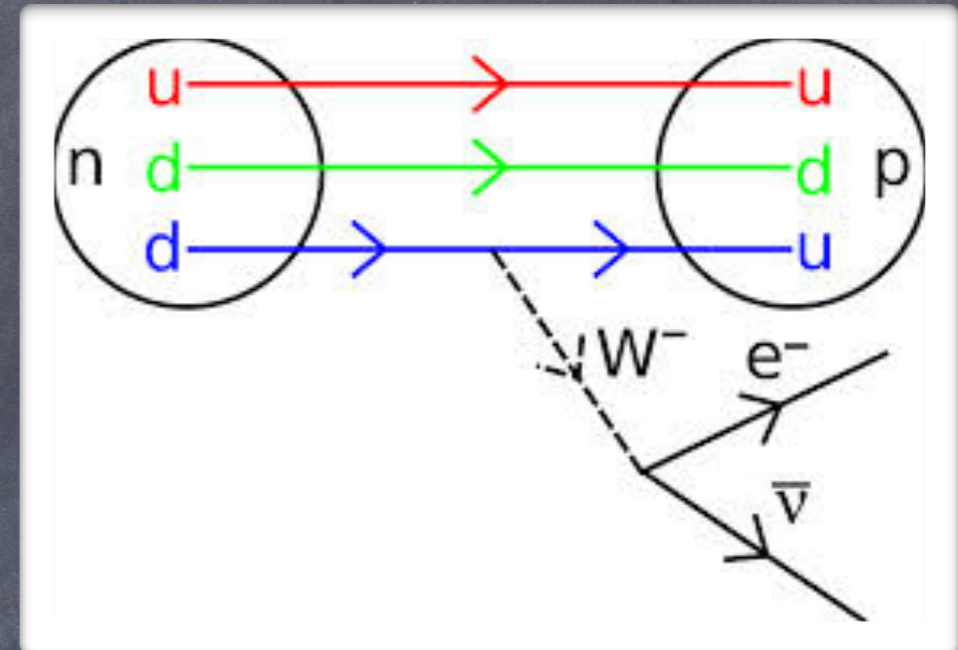
# Neutrínók észlelése

Detektoraink az elektromos erőt érző, vagy a nehéz részecskéket észlelik

$\beta$ -bomlás elemi szinten:



megfordítva, elemi szinten:



észlelt részecskék szintjén:

# Neutrínók észlelése

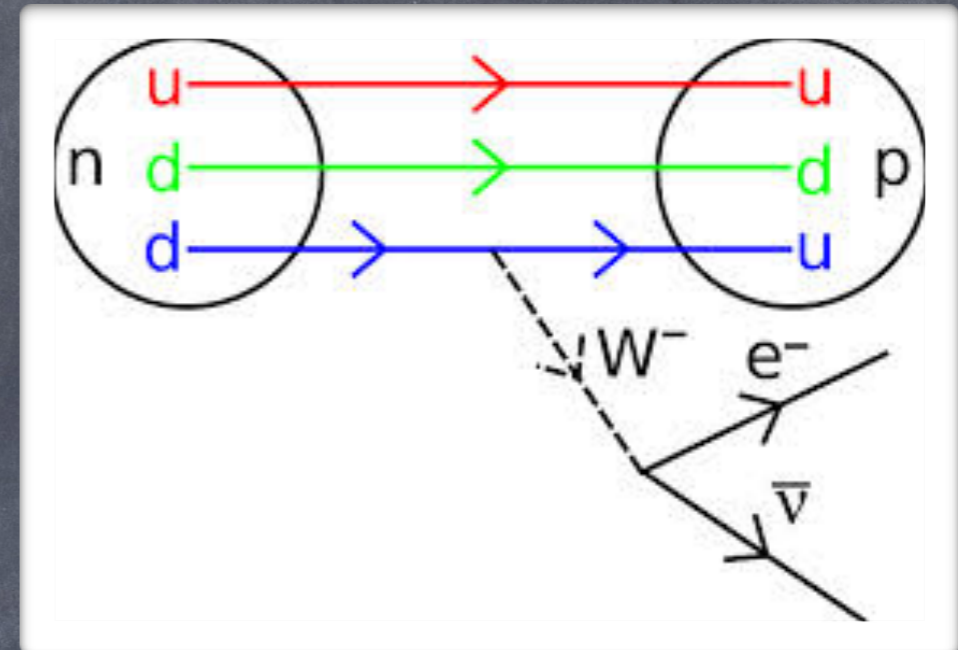
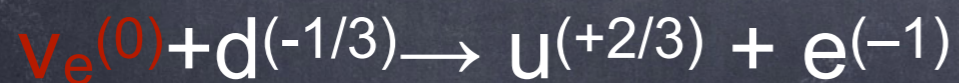
Detektoraink az elektromos erőt érző, vagy a nehéz részecskéket észlelik

$\beta$ -bomlás elemi szinten:

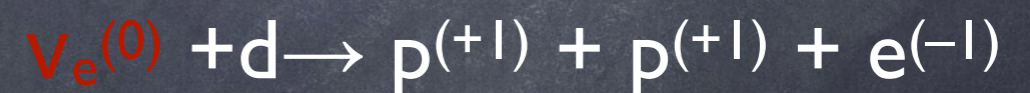


megfordítva, elemi szinten:

töltéscserével (töltött áram kölcsönhatás):



észlelt részecskék szintjén:



# Neutrínók észlelése

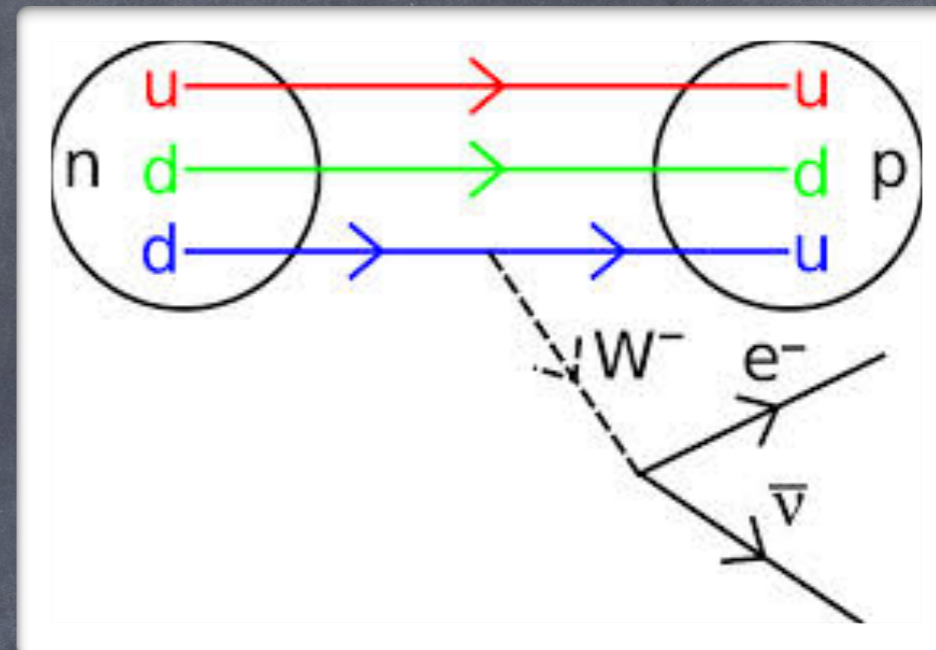
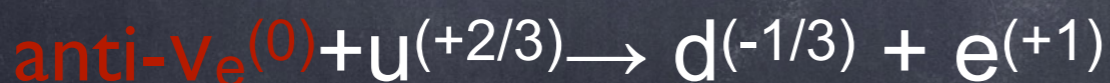
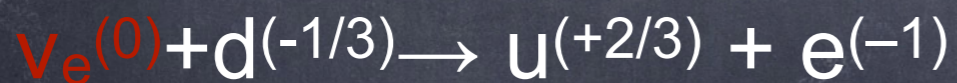
Detektoraink az elektromos erőt érző, vagy a nehéz részecskéket észlelik

$\beta$ -bomlás elemi szinten:

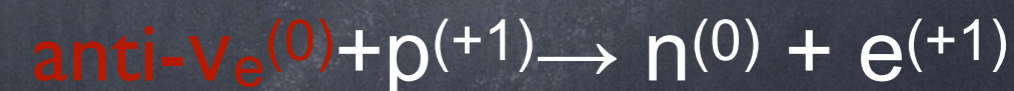
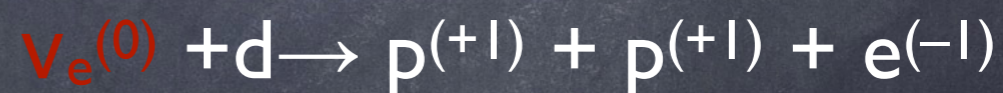


megfordítva, elemi szinten:

töltéscserével (töltött áram kölcsönhatás):



észlelt részecskék szintjén:



# Neutrínók észlelése

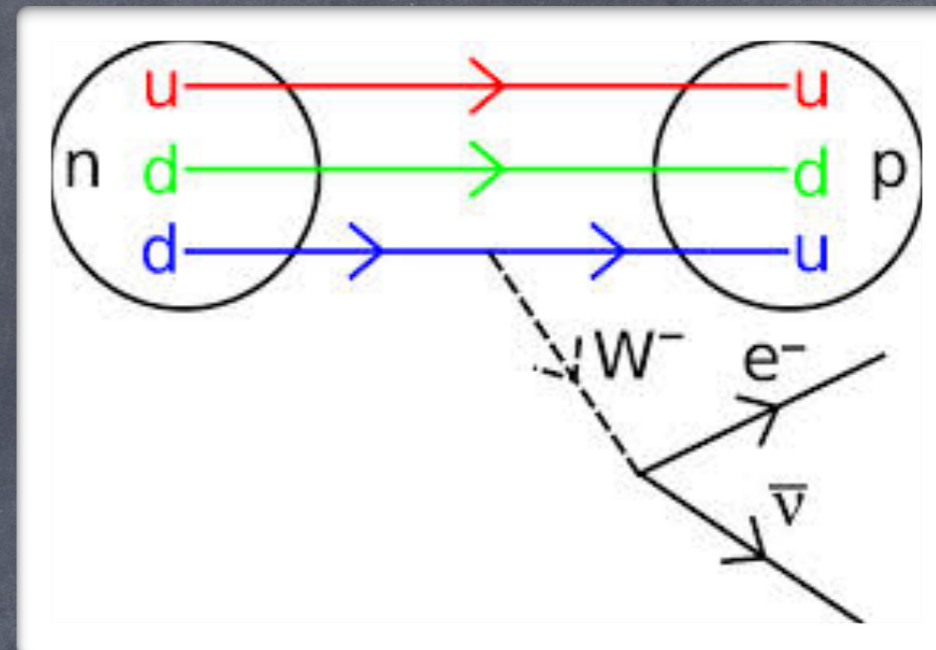
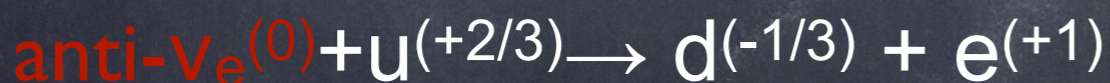
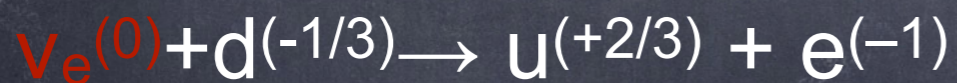
Detektoraink az elektromos erőt érző, vagy a nehéz részecskéket észlelik

$\beta$ -bomlás elemi szinten:

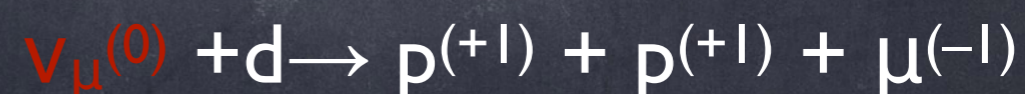
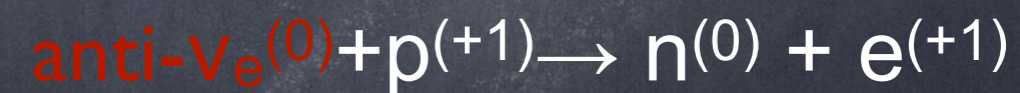
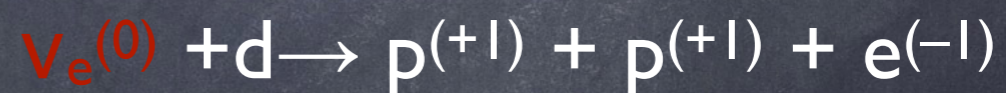


megfordítva, elemi szinten:

töltéscserével (töltött áram kölcsönhatás):



észlelt részecskék szintjén:



# Neutrínók észlelése

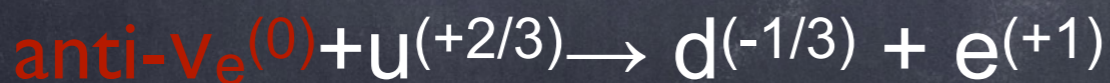
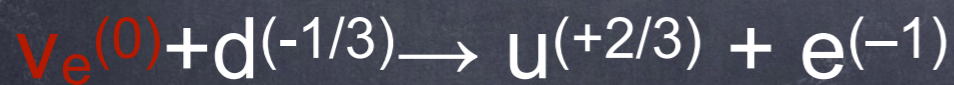
Detektoraink az elektromos erőt érző, vagy a nehéz részecskéket észlelik

$\beta$ -bomlás elemi szinten:

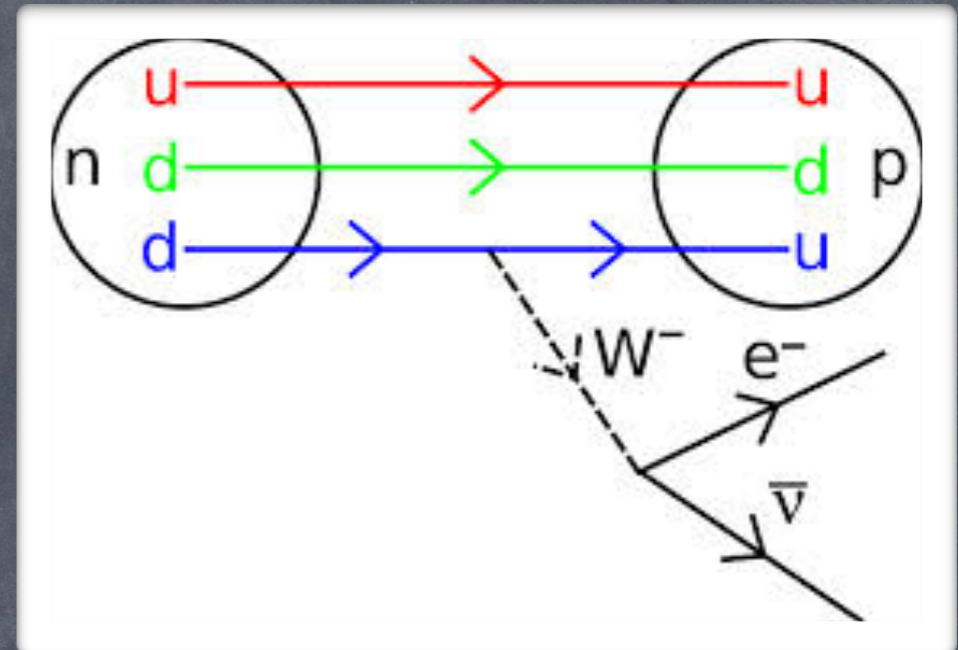


megfordítva, elemi szinten:

töltéscserével (töltött áram kölcsönhatás):



töltéscsere nélkül (semleges áram kölcsönhatás):

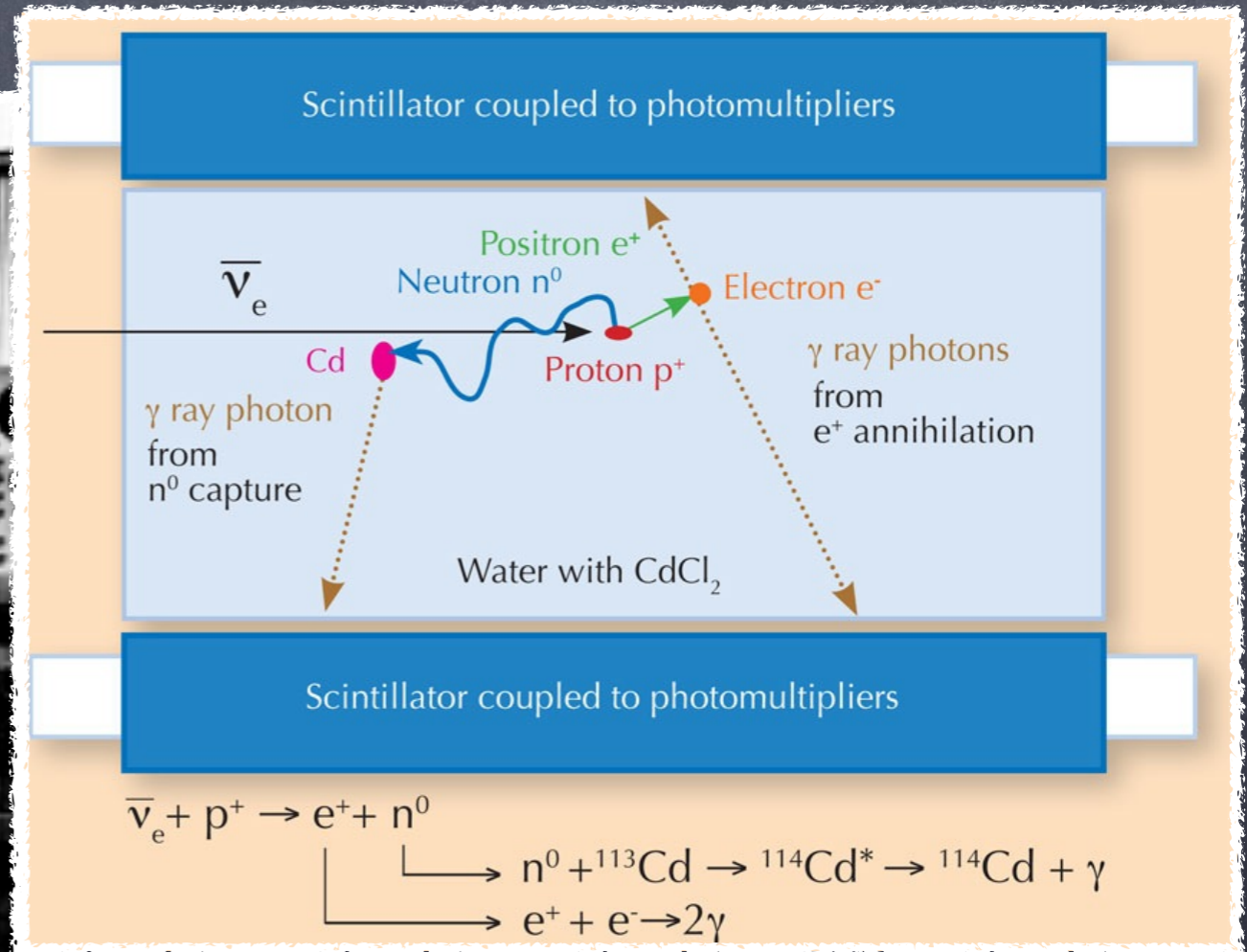
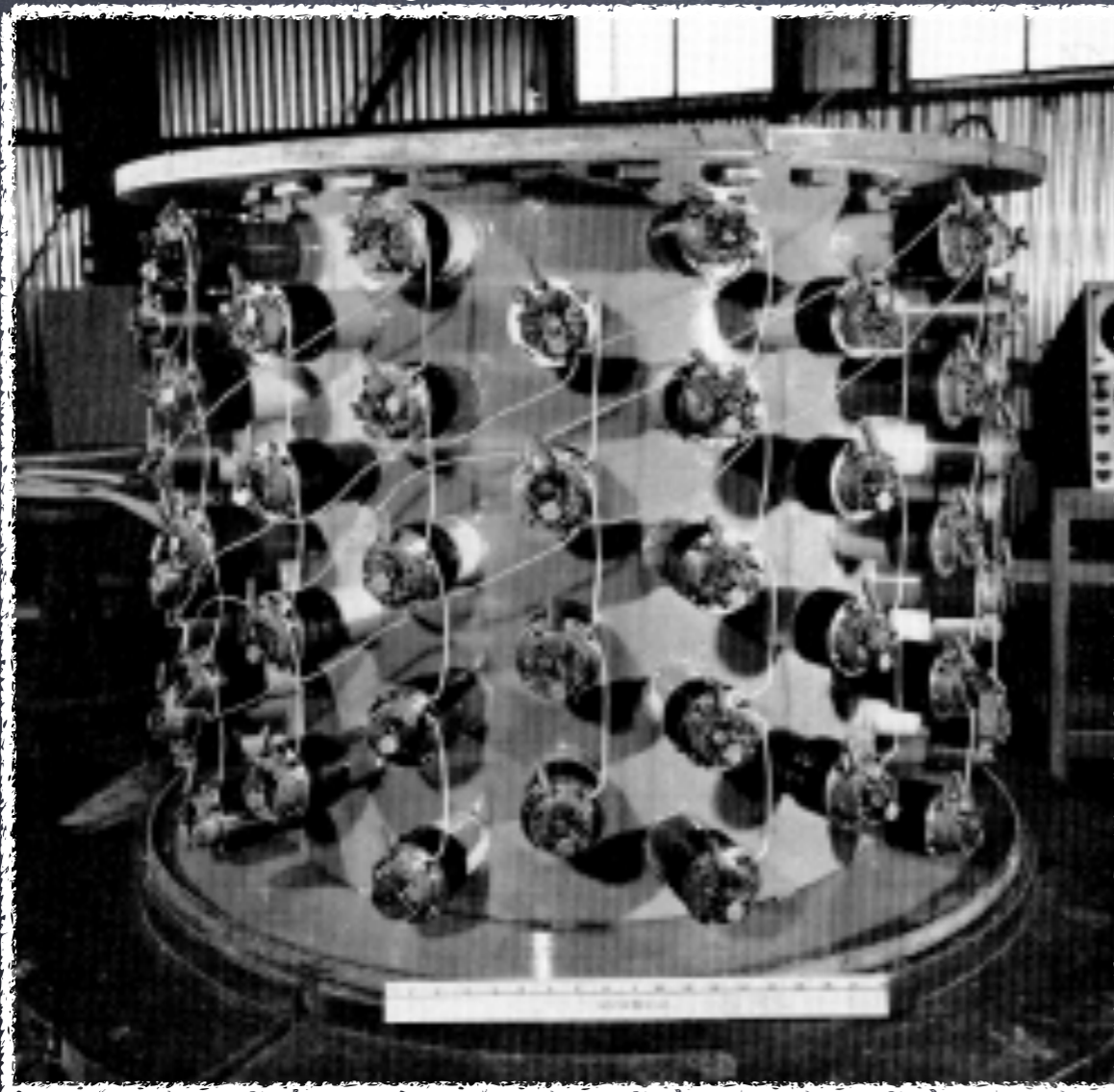


észlelt részecskék szintjén:



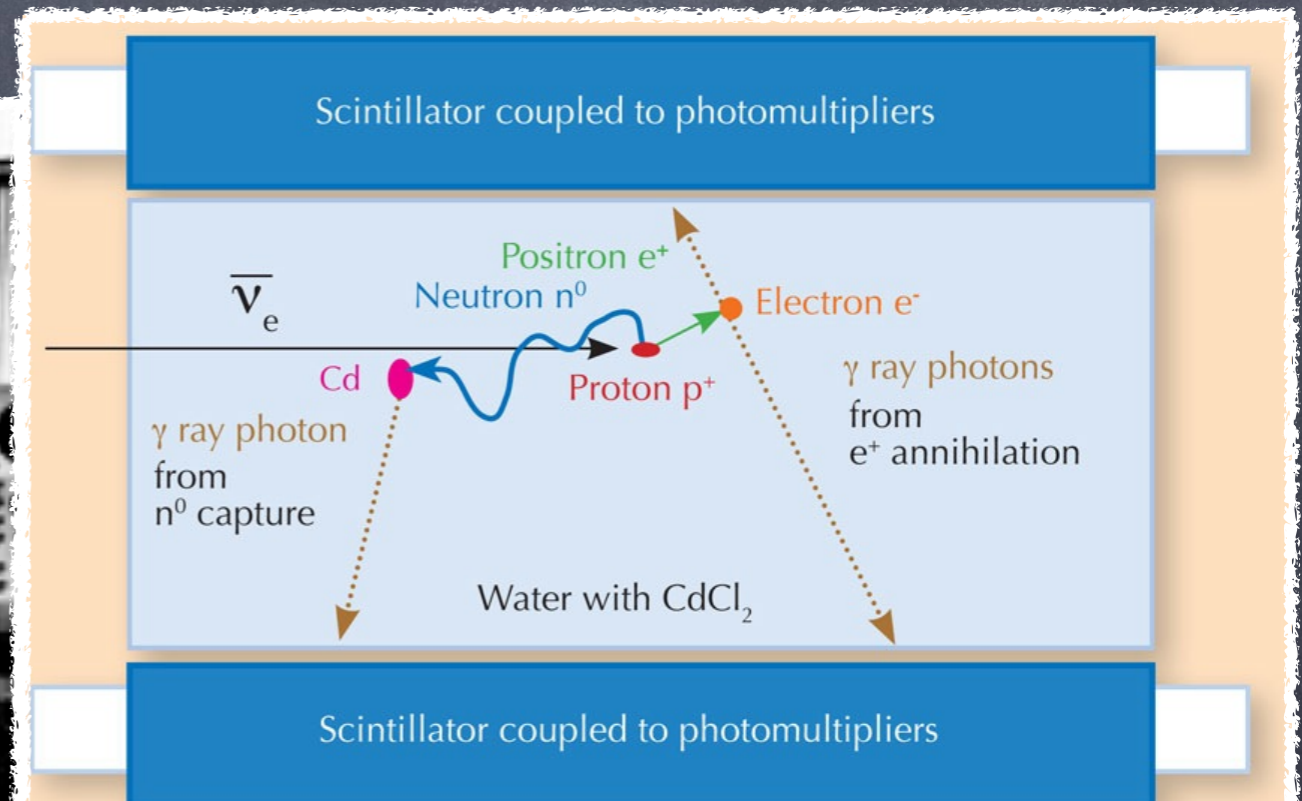
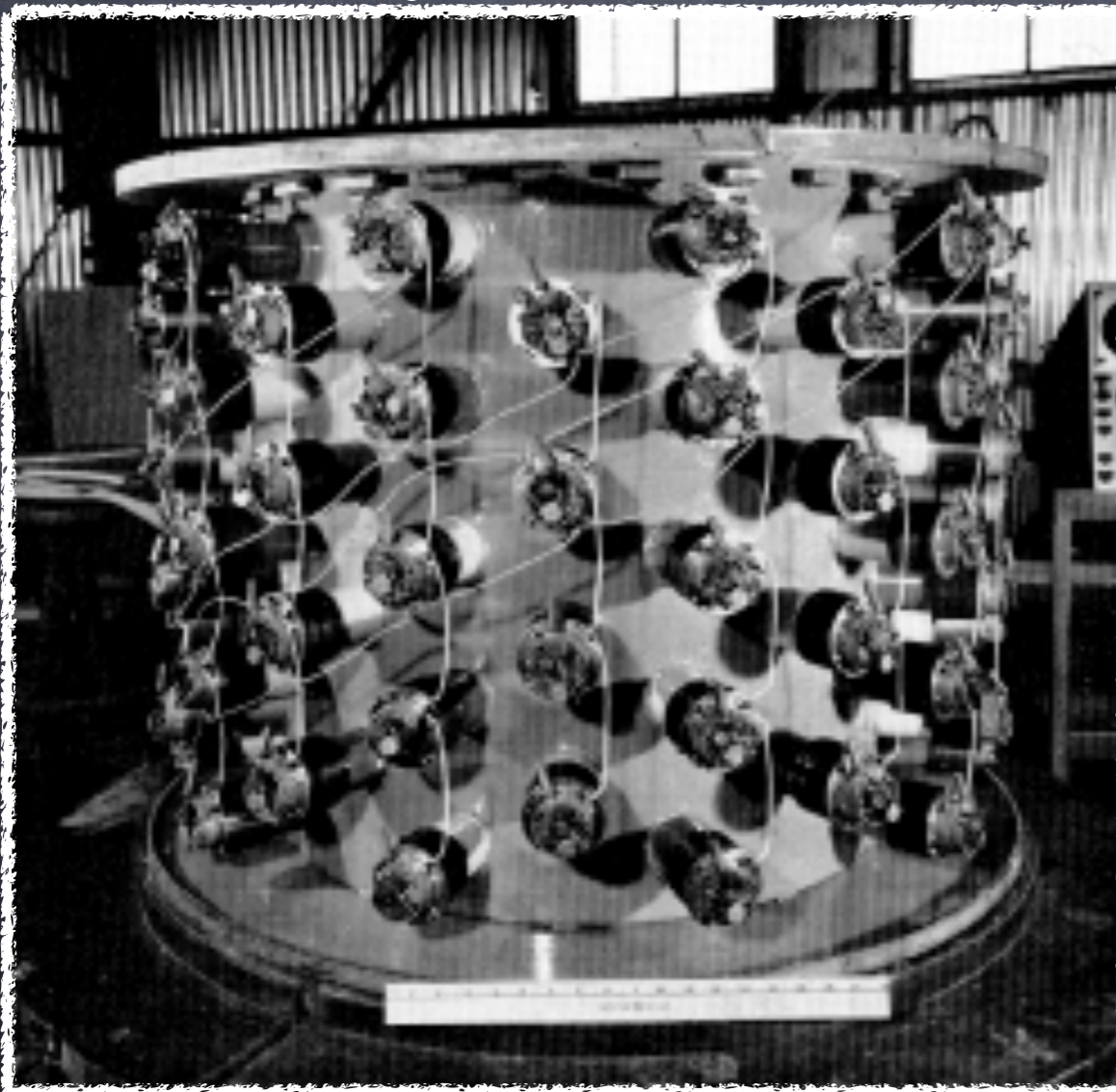
# Reines-Cowan kísérlet (1956)

Savannah riveri atomreaktor közelében CdCl<sub>2</sub> oldattal töltött tartály:



# Reines-Cowan kísérlet (1956)

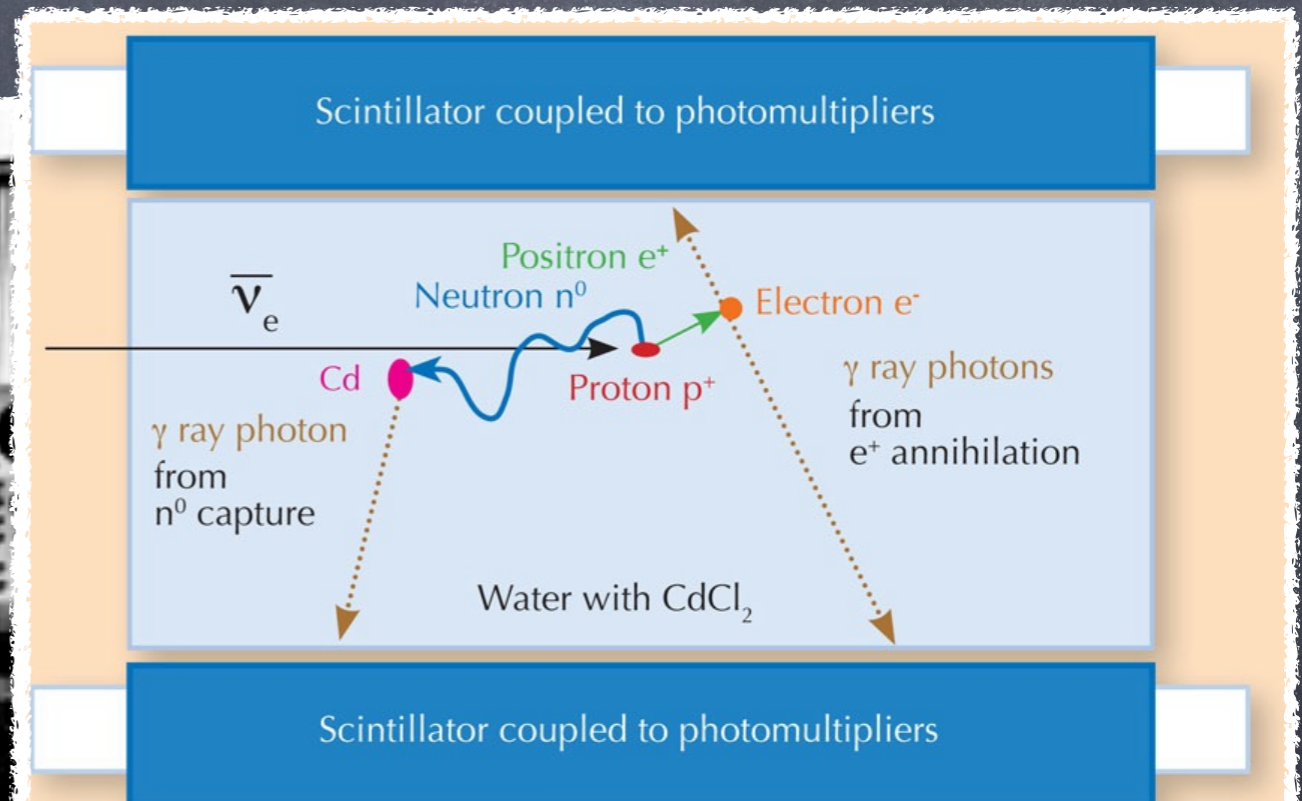
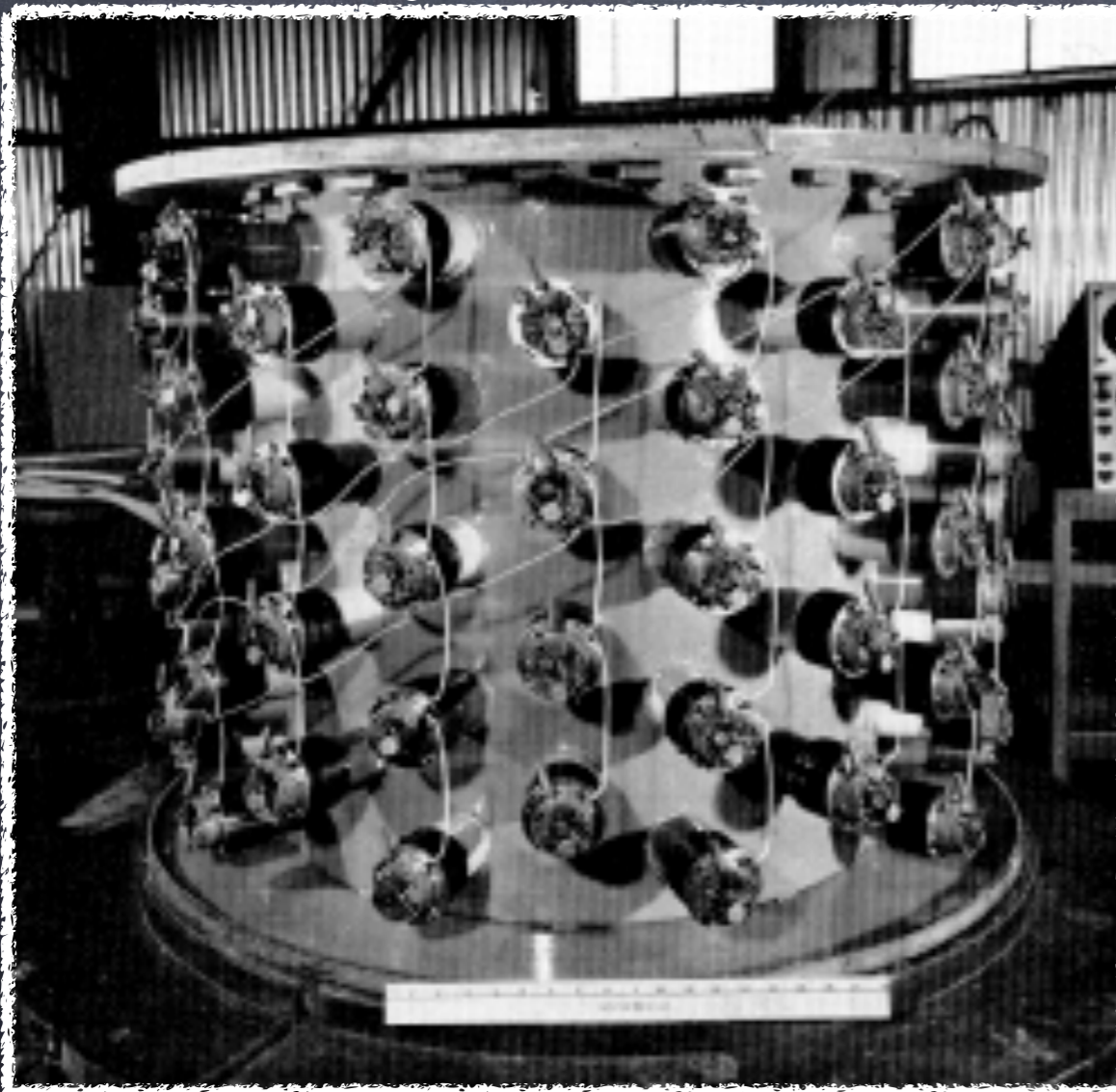
Savannah riveri atomreaktor közelében CdCl<sub>2</sub> oldattal töltött tartály:



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

# Reines-Cowan kísérlet (1956)

Savannah riveri atomreaktor közelében CdCl<sub>2</sub> oldattal töltött tartály:

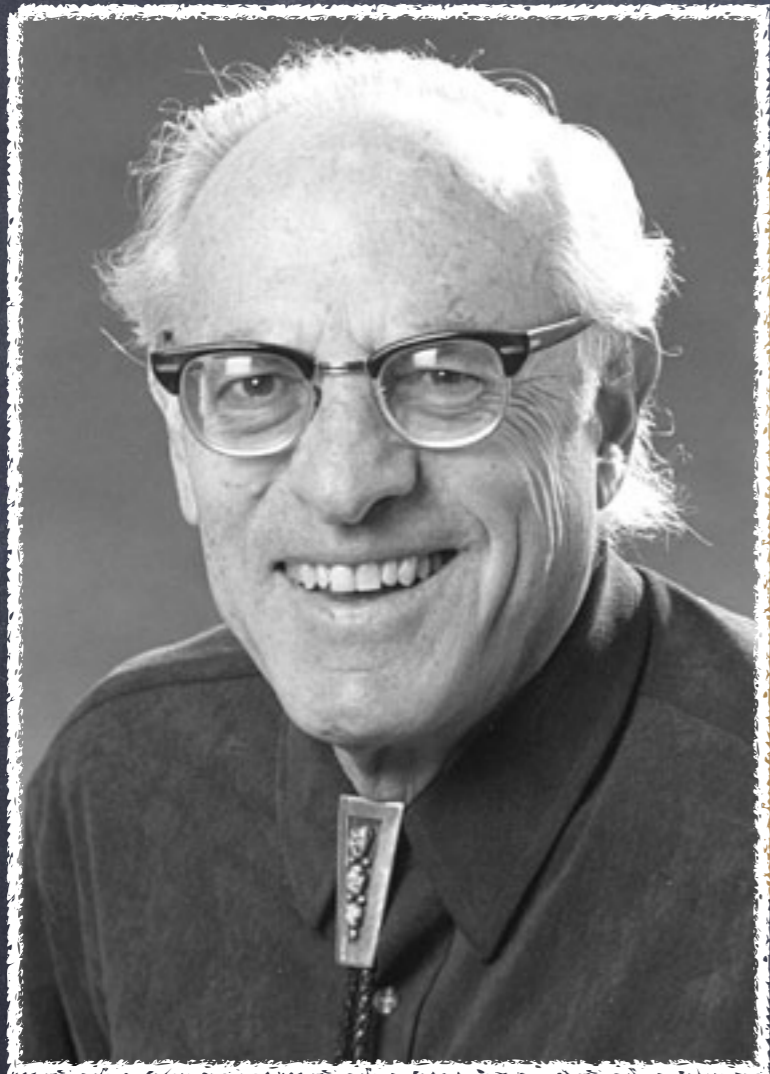


hatáskeresztmetszet:

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)

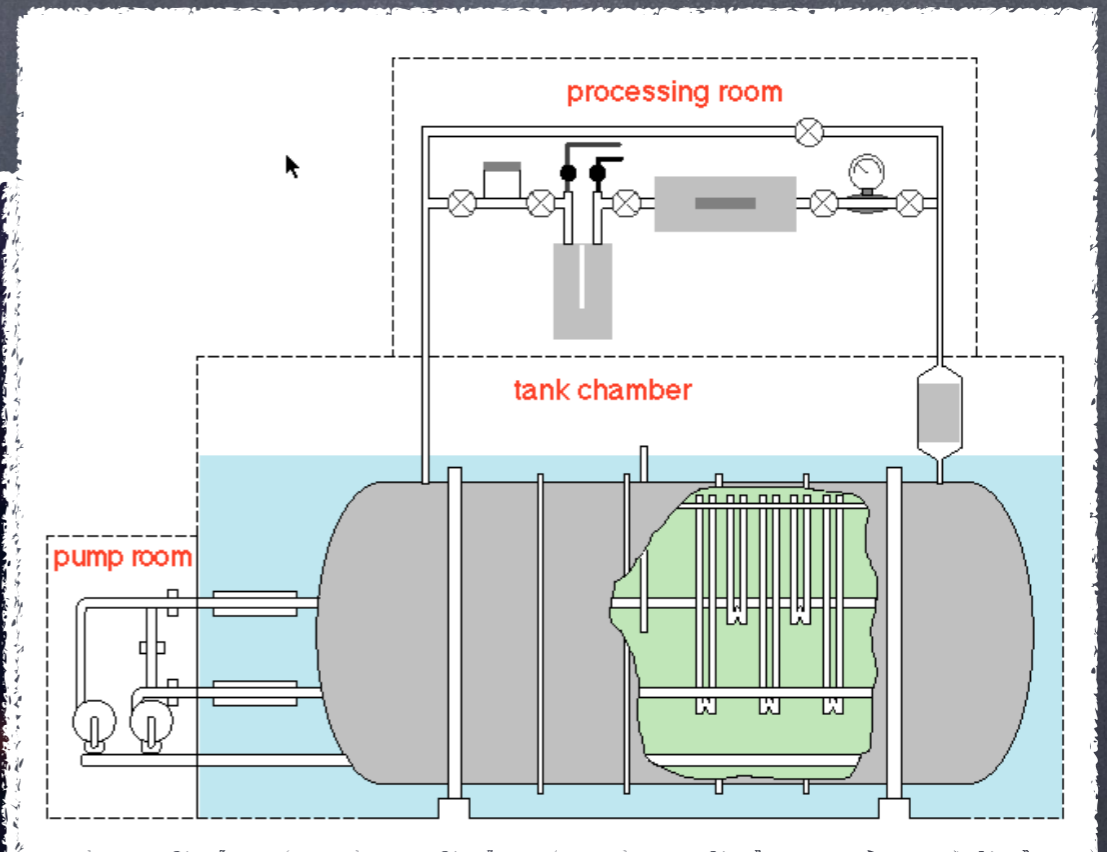
*a „neutrínó létezésének közvetlen kimutatásáért”*

# 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



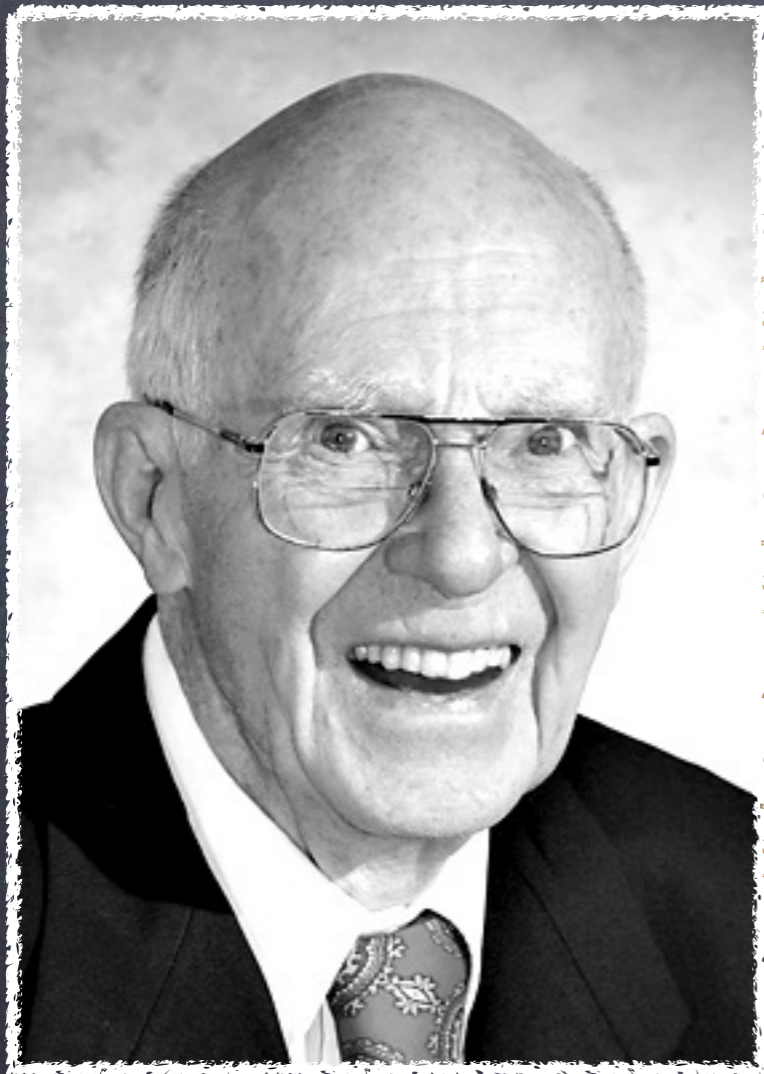
eseményszám:

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)

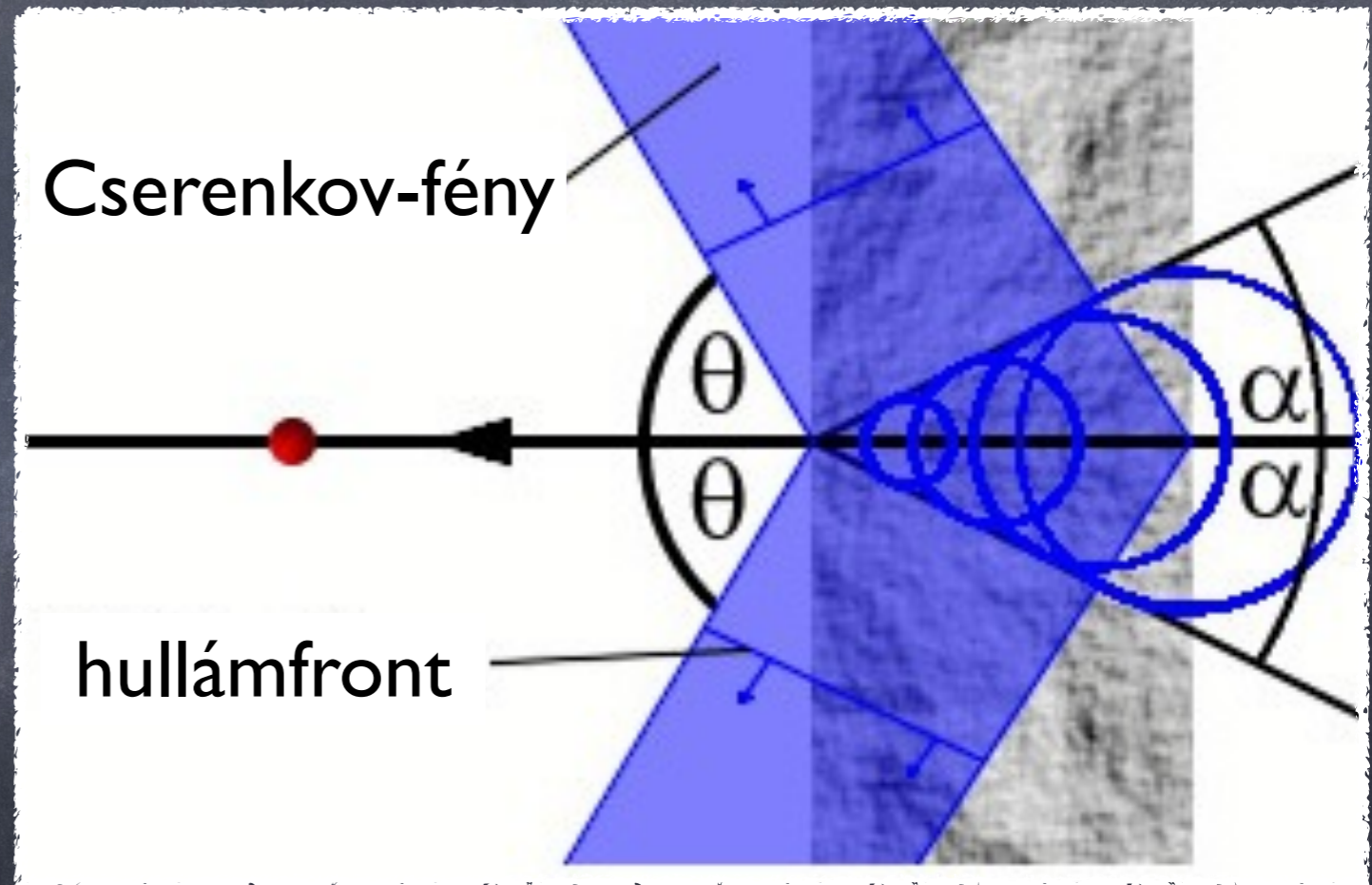
Masatoshi Koshihara  
(1926-2020)

*a „ kozmikus eredetű neutrínók észleléséért”*

# Cserenkov-sugárzás



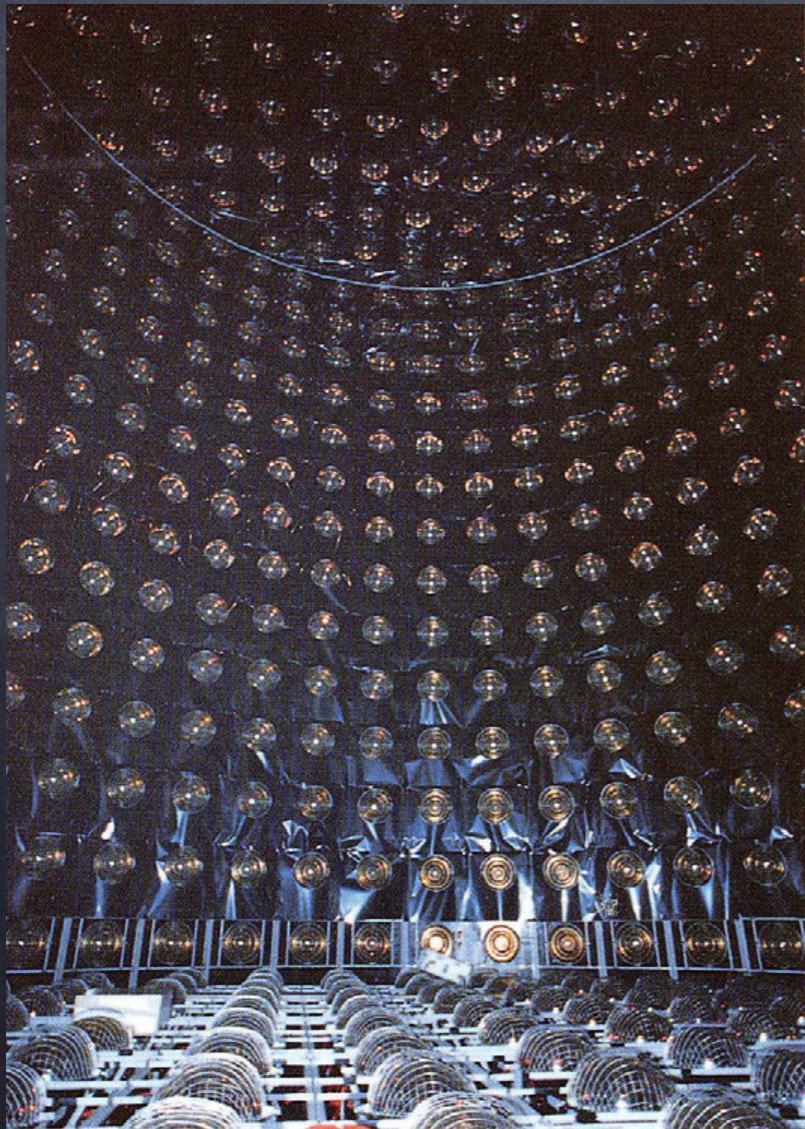
# Cserenkov-sugárzás





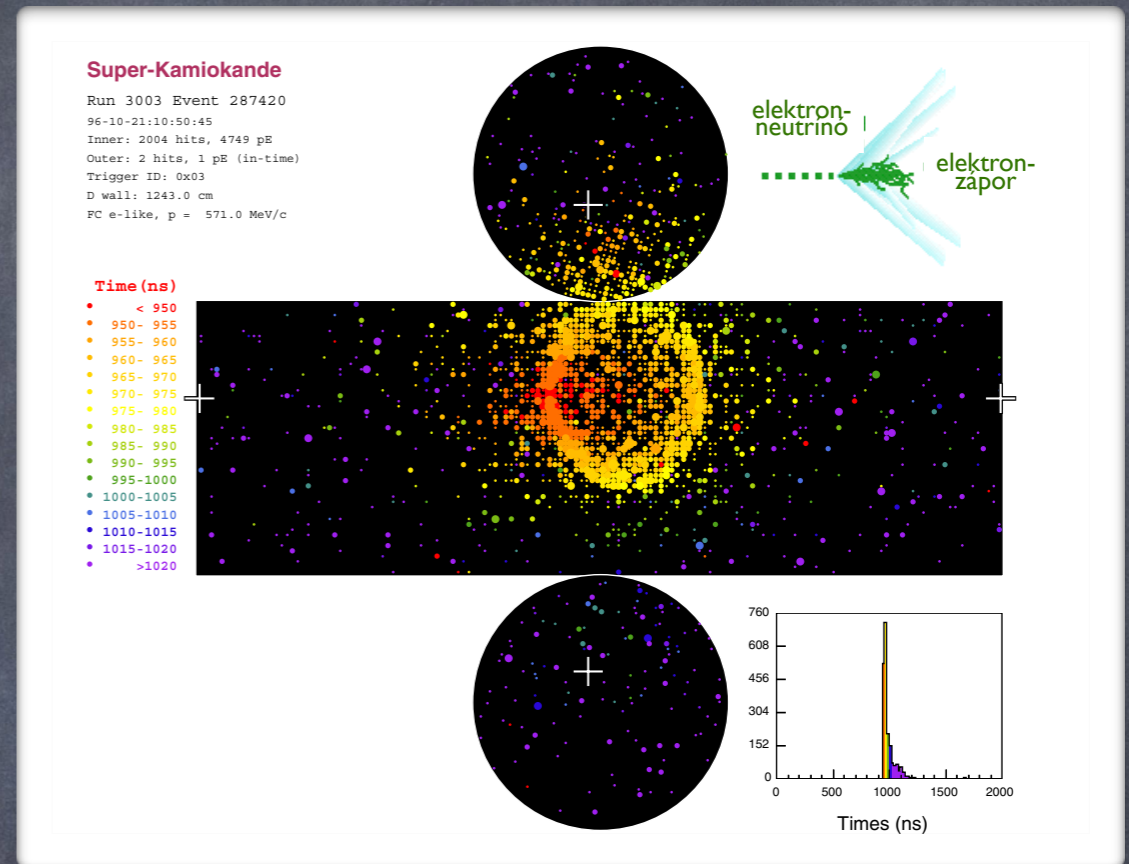
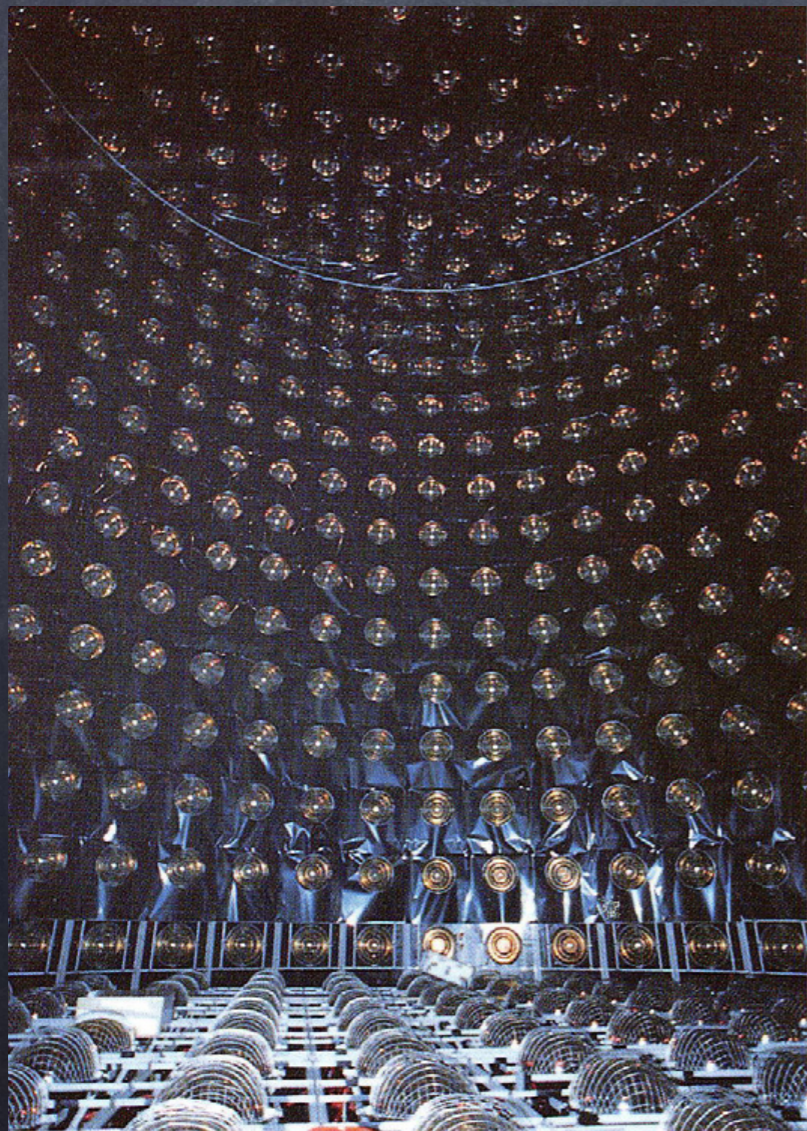
# Kamiokande-II detektor

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



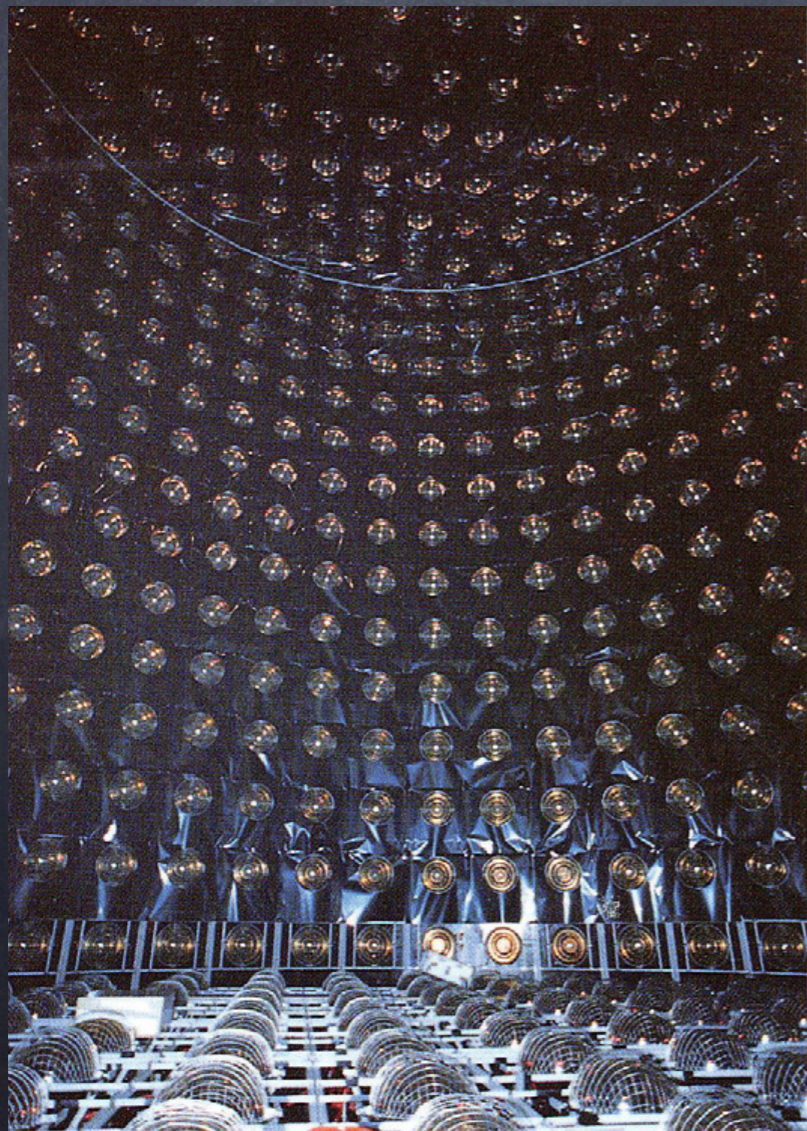
# Kamiokande-II detektor

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



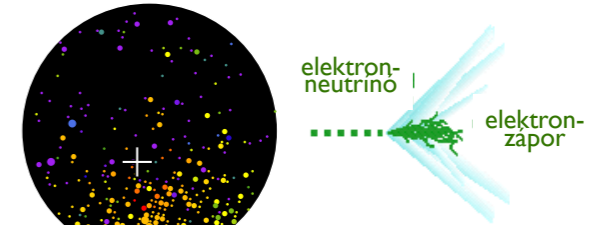
# Kamiokande-II detektor

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



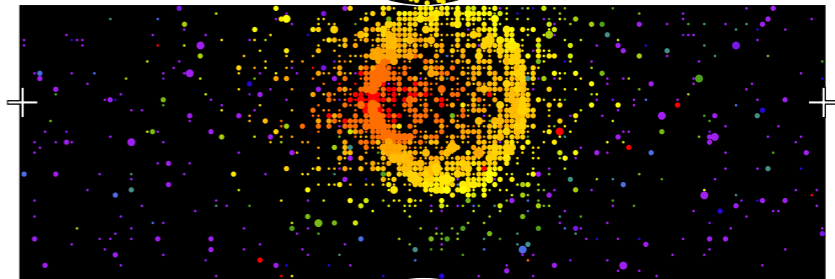
## Super-Kamiokande

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

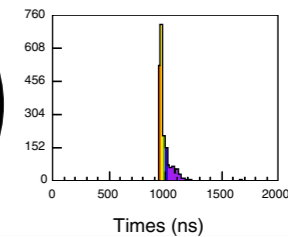
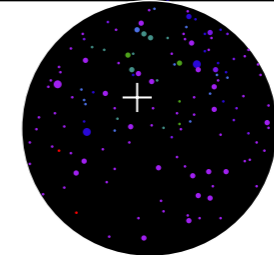


### Time (ns)

- < 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

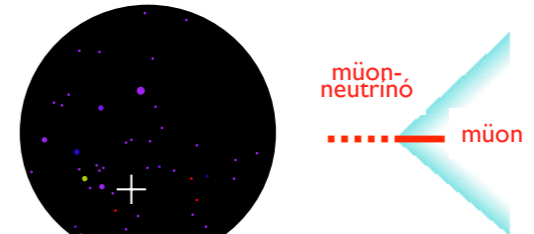


elektron



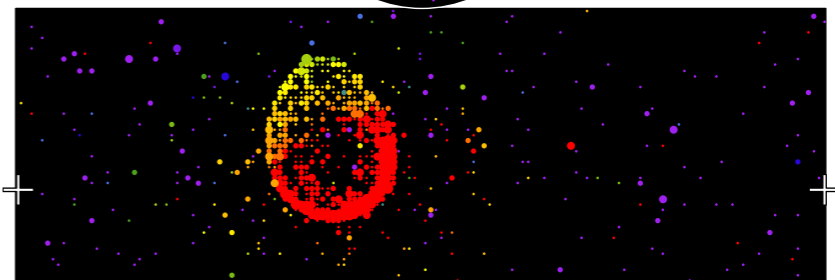
## Super-Kamiokande

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

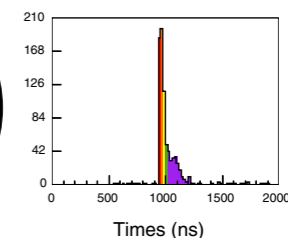
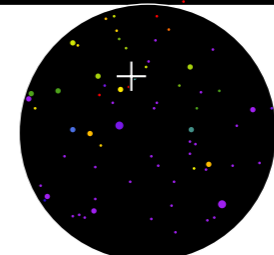


### Time (ns)

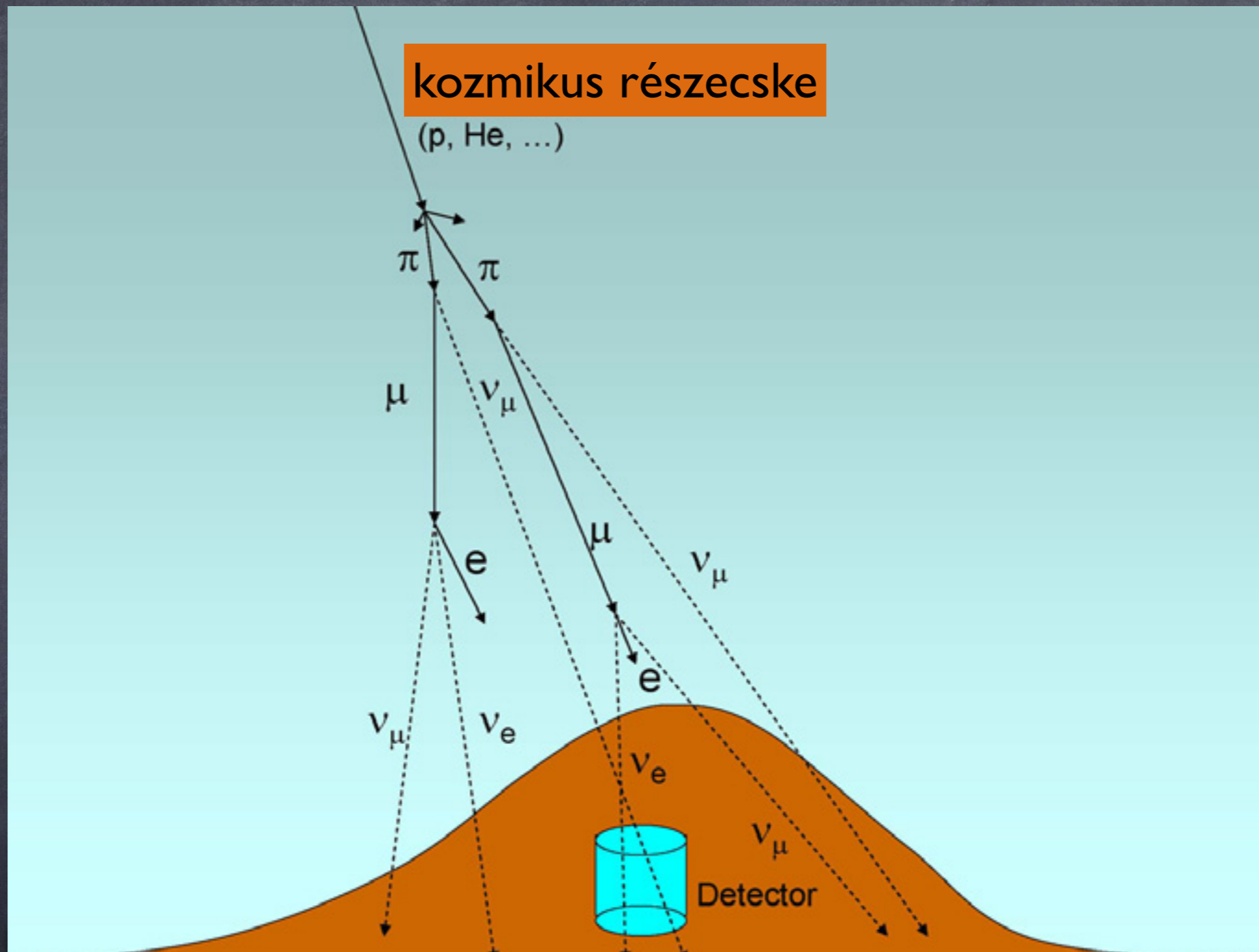
- < 972
- 972- 976
- 976- 980
- 980- 984
- 984- 988
- 988- 992
- 992- 996
- 996-1000
- 1000-1004
- 1004-1008
- 1008-1012
- 1012-1016
- 1016-1020
- 1020-1024
- 1024-1028
- >1028



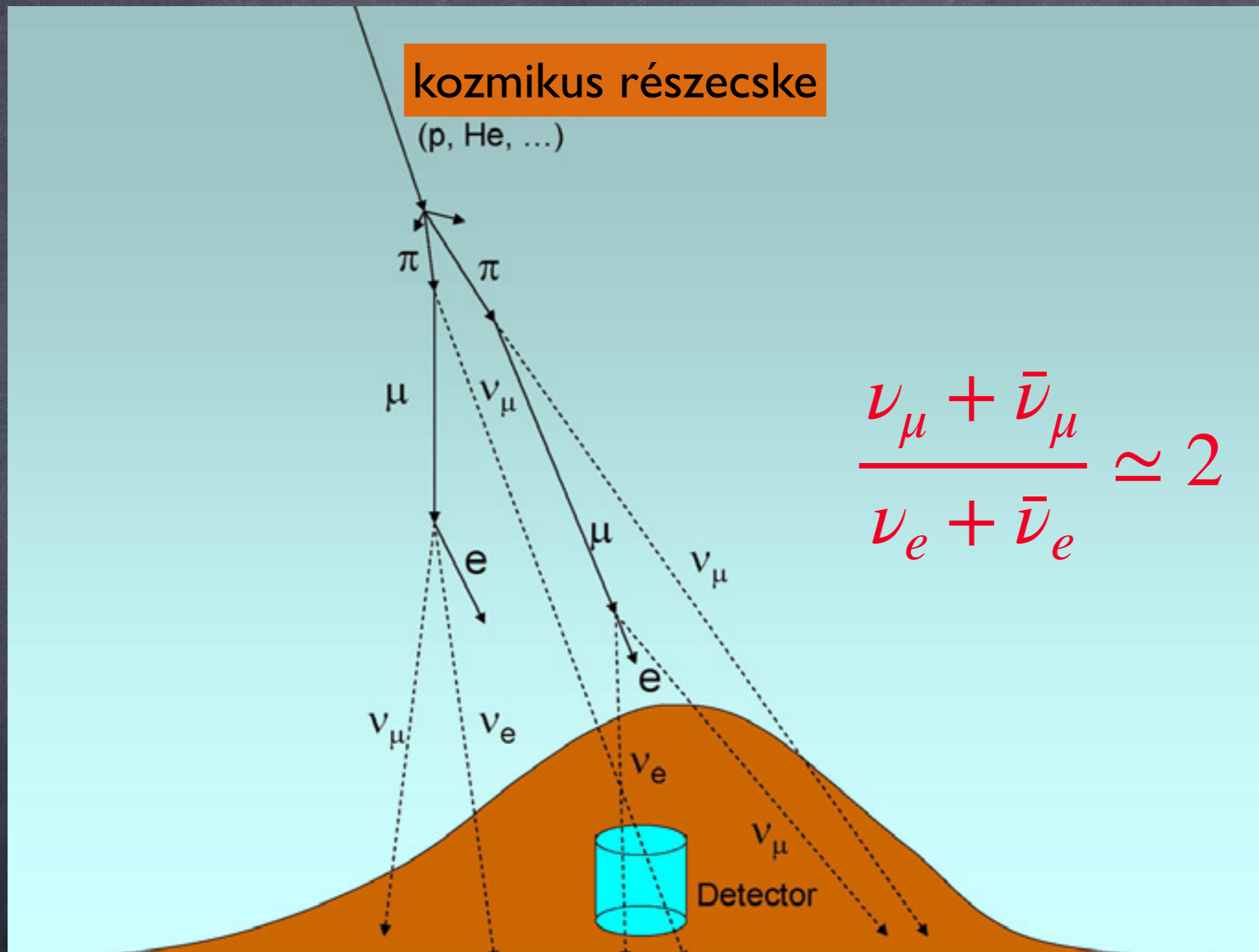
müon



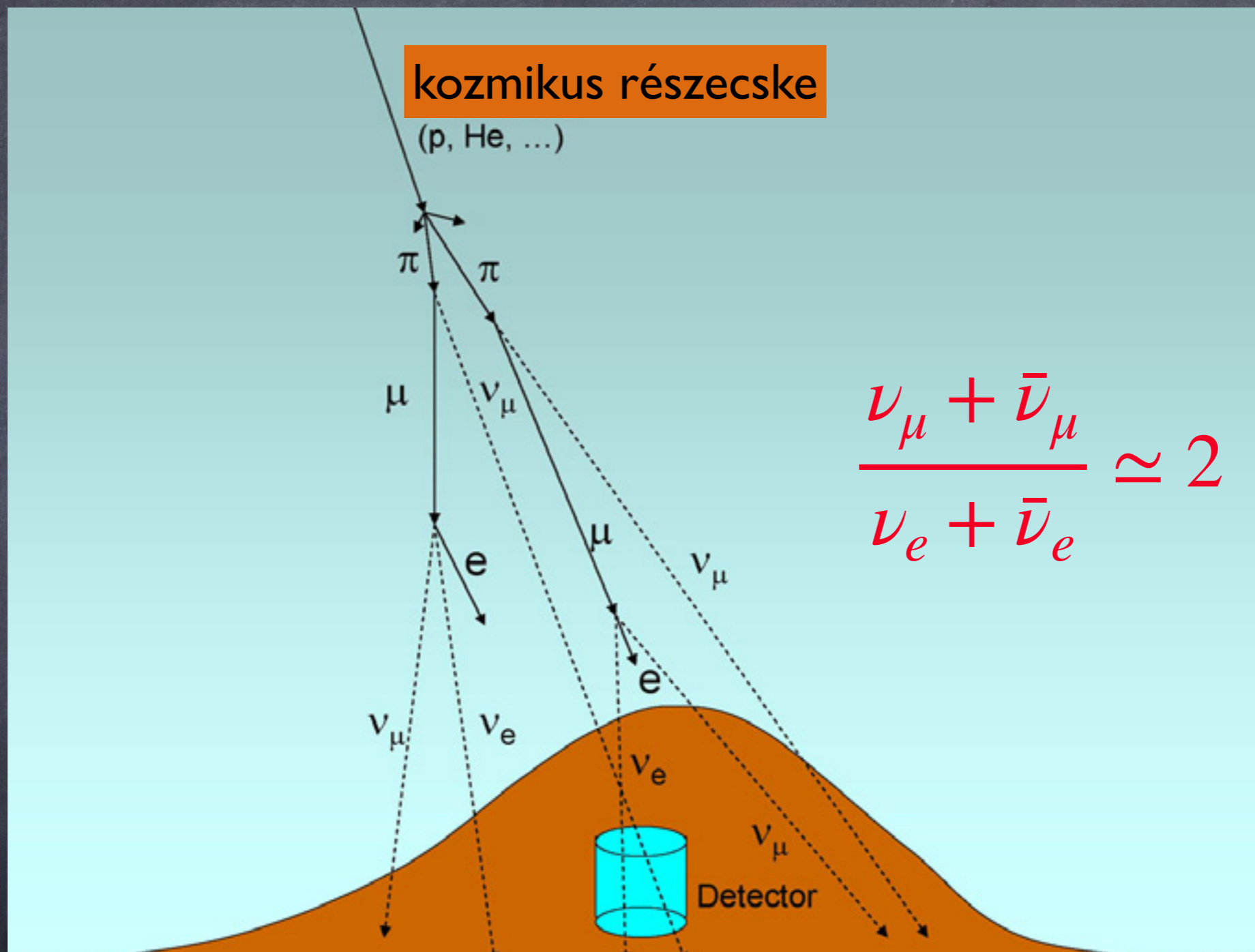
# Légköri neutrínók rejtélye



# Légköri neutrínók rejtélye

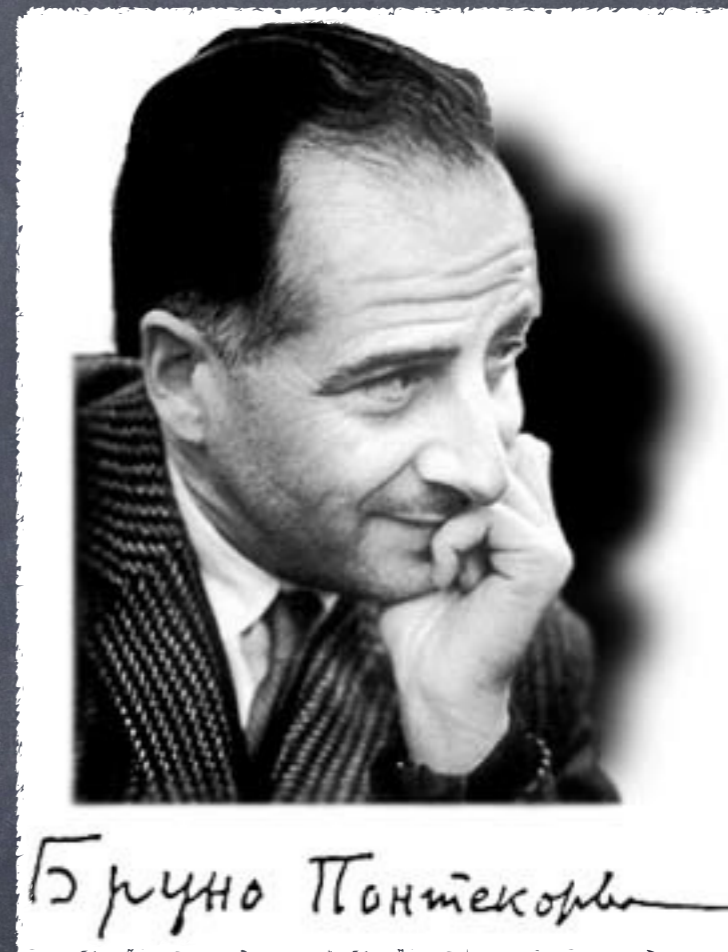


# Légköri neutrínók rejtélye



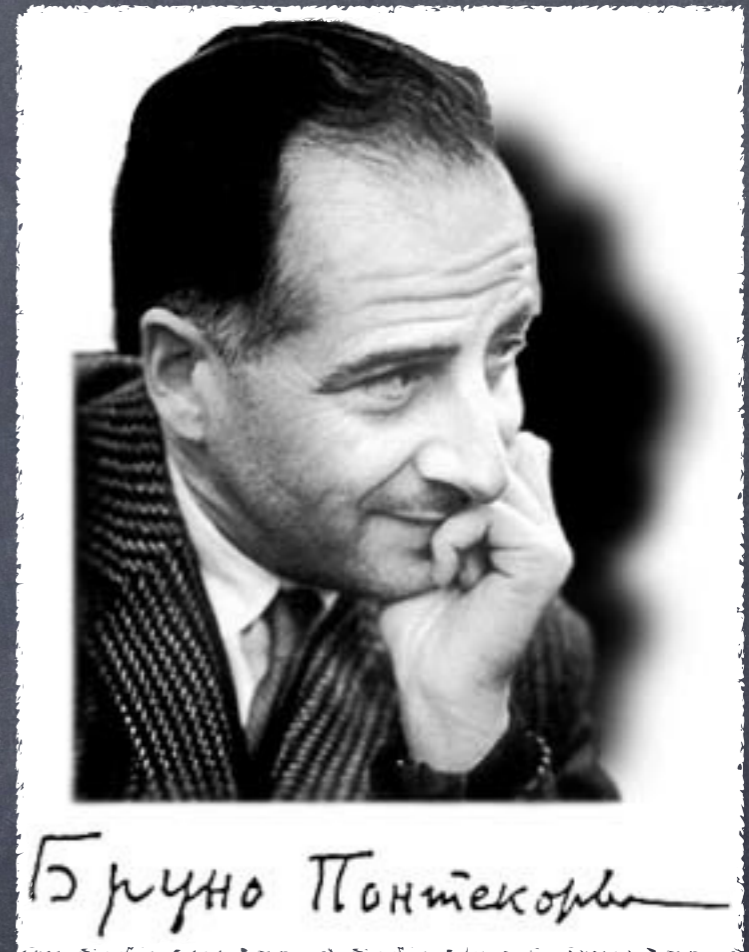
	adat	elmélet
elektron események	$93,0 \pm 9,6$	88,5
müion események	$85,2 \pm 9,2$	144,0

# Pontercorvo felvetése



# Ponte-corvo felvetése

- a különböző fajtájú (ízű) neutrínók átalakulhatnak egymásba, ha **egy rögzített ízű neutrínó**, mondjuk  $\nu_\mu$  tömege nem egyértelmű, hanem **több (valószínűleg három) különböző rögzített  $m_i$  tömegű neutrínó keveréke**



Бруно Понтекорво

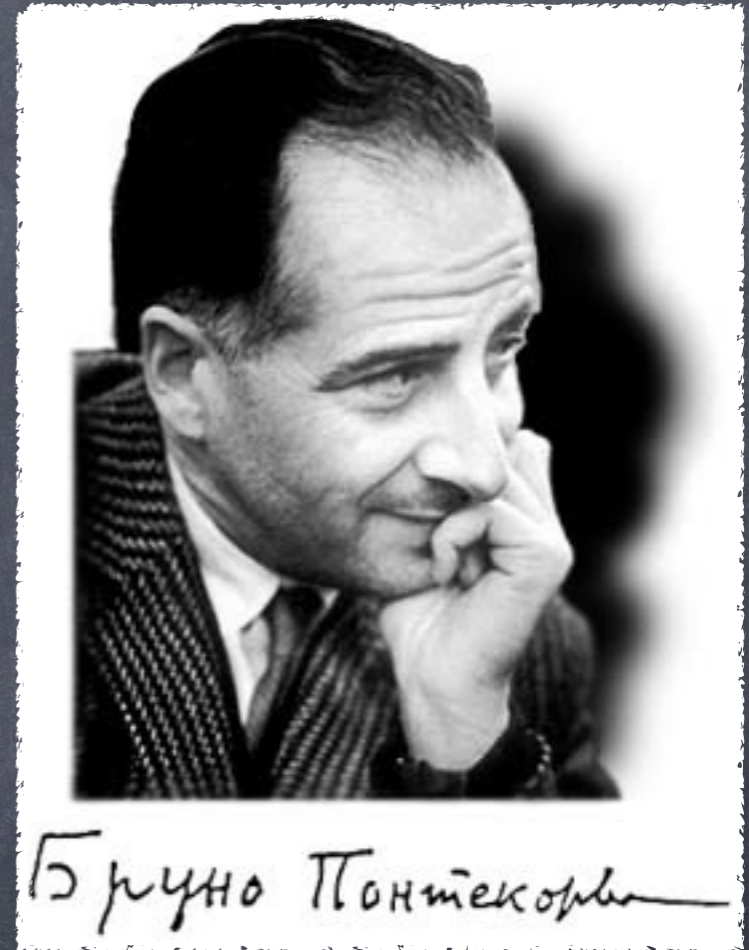


# Ponte-corvo felvetése

- a különböző fajtájú (ízű) neutrínók átalakulhatnak egymásba, ha **egy rögzített ízű neutrínó**, mondjuk  $\nu_\mu$  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

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

# Neutrínó-ízrezgés

a keveredés  $\theta$  szöge megszabja hogy mennyi az  $i$  és  $j$  tömegkomponensek részesedése  $\nu_\mu$ -ben:

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

# Neutrínó-ízrezgés

a keveredés  $\theta$  szöge megszabja hogy mennyi az  $i$  és  $j$  tömegkomponensek részesedése  $\nu_\mu$ -ben:

- ha  $\theta = 0^\circ$  (vagy  $90^\circ$ ), akkor  $\nu_\mu$  tisztán  $\nu_i$  (vagy  $\nu_j$ ), és nincs keveredés

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

# Neutrínó-ízrezgés

a keveredés  $\theta$  szöge megszabja hogy mennyi az  $i$  és  $j$  tömegkomponensek részesedése  $\nu_\mu$ -ben:

- ha  $\theta = 0^\circ$  (vagy  $90^\circ$ ), akkor  $\nu_\mu$  tisztán  $\nu_i$  (vagy  $\nu_j$ ), és nincs keveredés
- ha  $\theta = 45^\circ$ , akkor  $\nu_\mu$ -ben egyenlő arányban van  $\nu_i$  és  $\nu_j$  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  $\theta$  szöge megszabja hogy mennyi az  $i$  és  $j$  tömegkomponensek részesedése  $\nu_\mu$ -ben:

- ha  $\theta = 0^\circ$  (vagy  $90^\circ$ ), akkor  $\nu_\mu$  tisztán  $\nu_i$  (vagy  $\nu_j$ ), és nincs keveredés
- ha  $\theta = 45^\circ$ , akkor  $\nu_\mu$ -ben egyenlő arányban van  $\nu_i$  és  $\nu_j$  a neutrínókeveredés a legnagyobb

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

meghatározott  $L$  távolságot megtéve  $\nu_\mu$  teljesen  $\nu_\tau$ -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

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

# 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

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

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

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

# 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

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

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

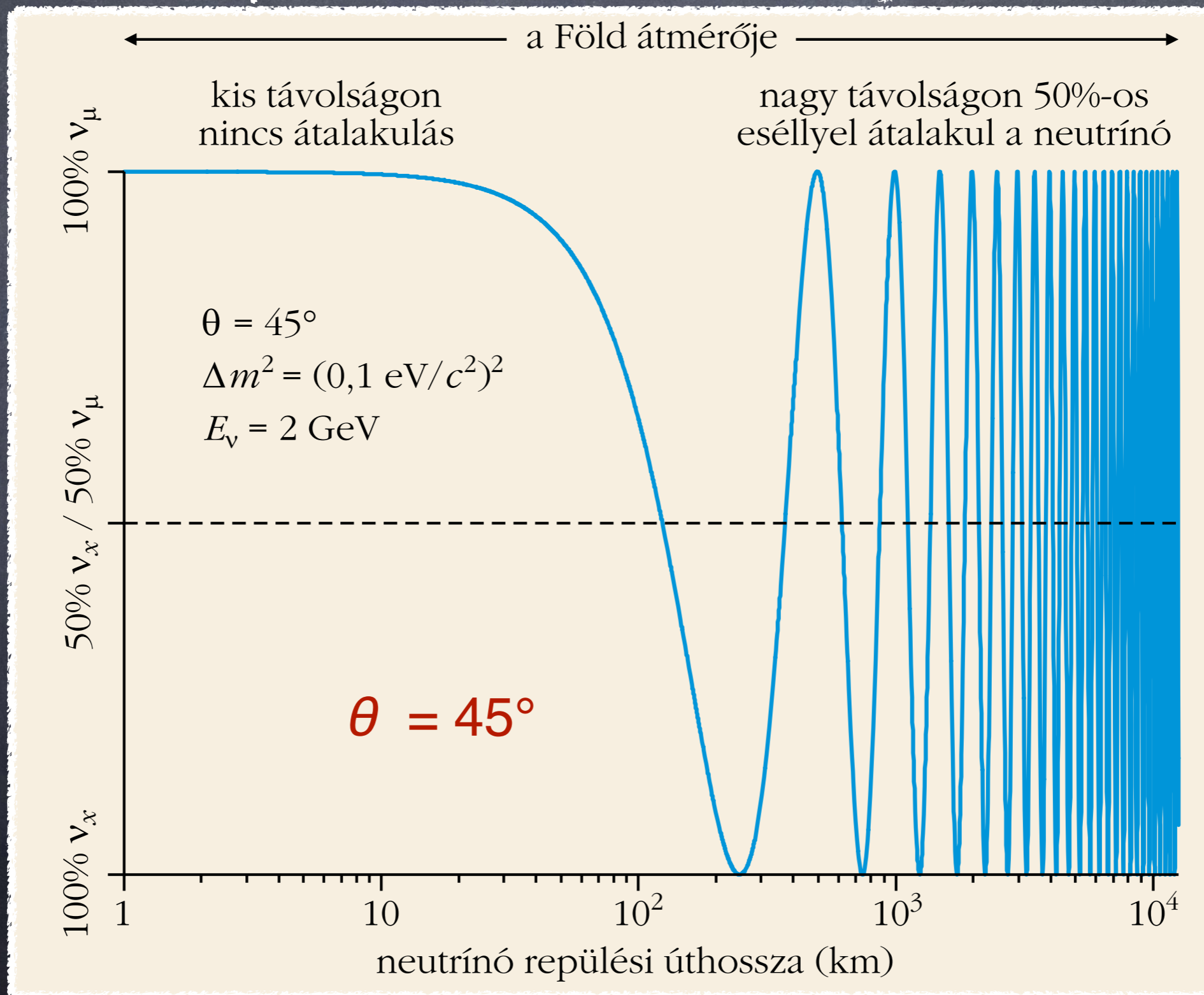
- $L = 1,24 \text{ km}$ -en teljes átalakulás
- tízszer nagyobb neutrínó energia esetén tízszer ekkora távolságra van szükség
- $\Delta m^2 = (0,1 \text{ eV}/c^2)^2$  esetén százszor nagyobbra

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-ízreaggéssel

	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-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!



# 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

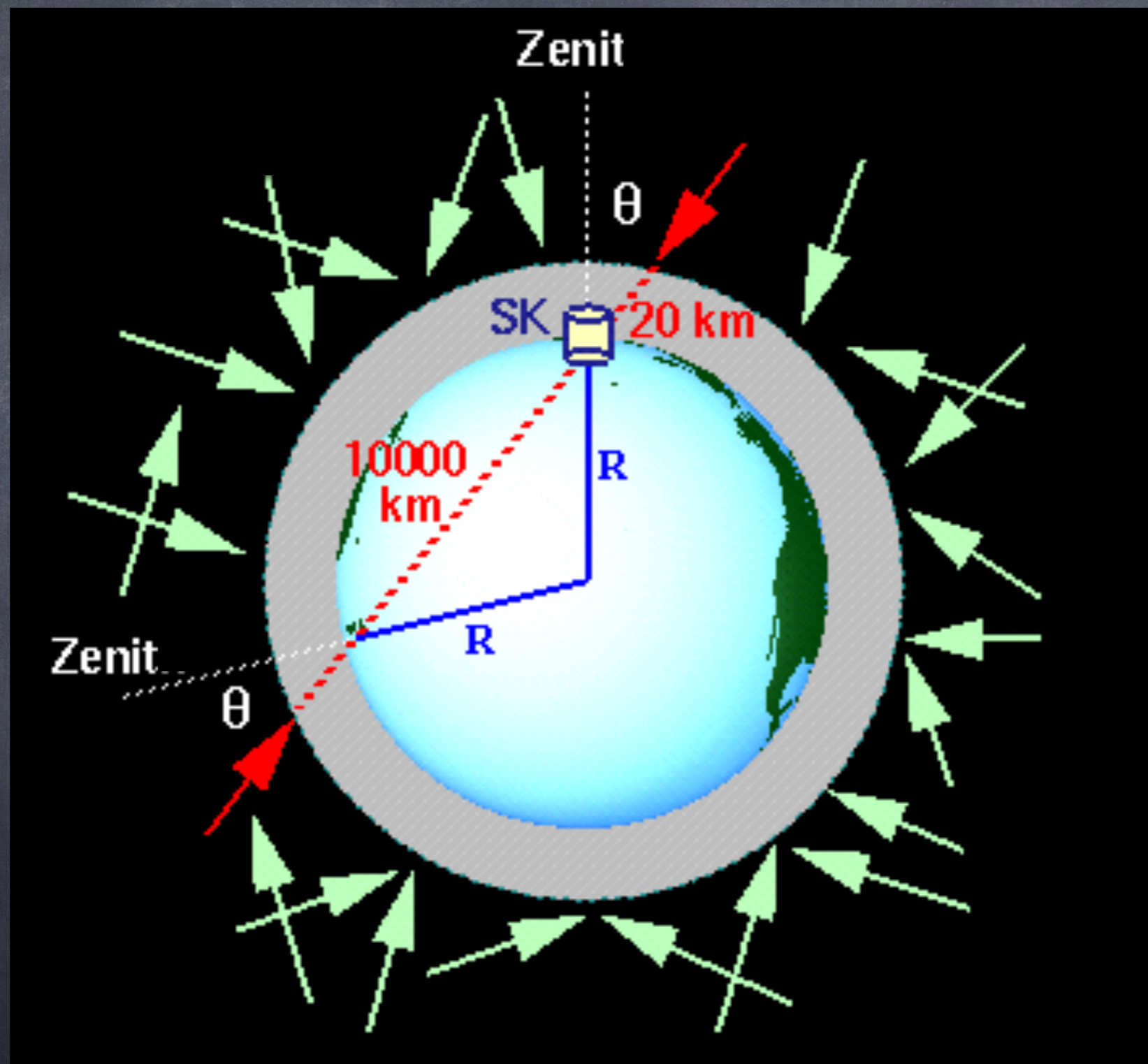
Elég meggyőző ez?

Nem, de lehet jobb mérést végezni!

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

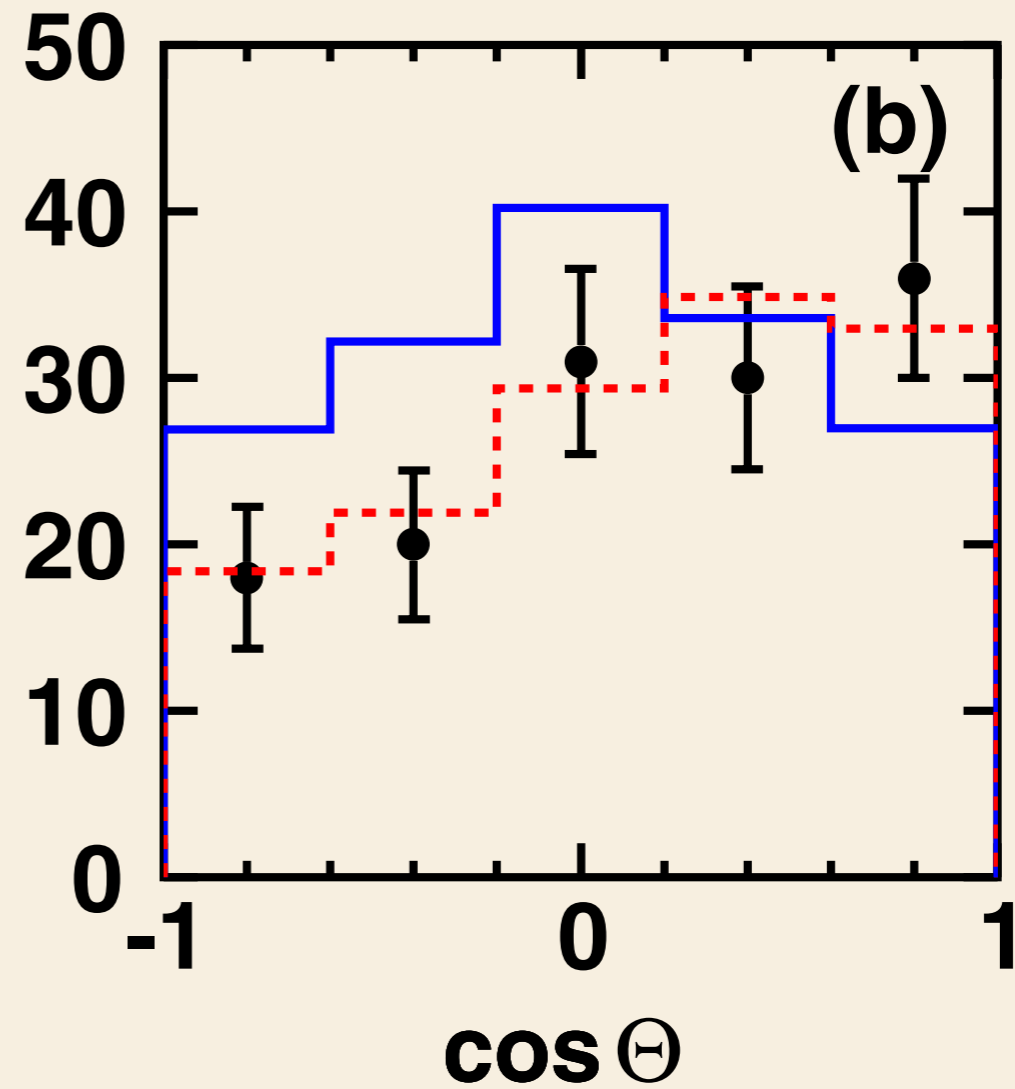
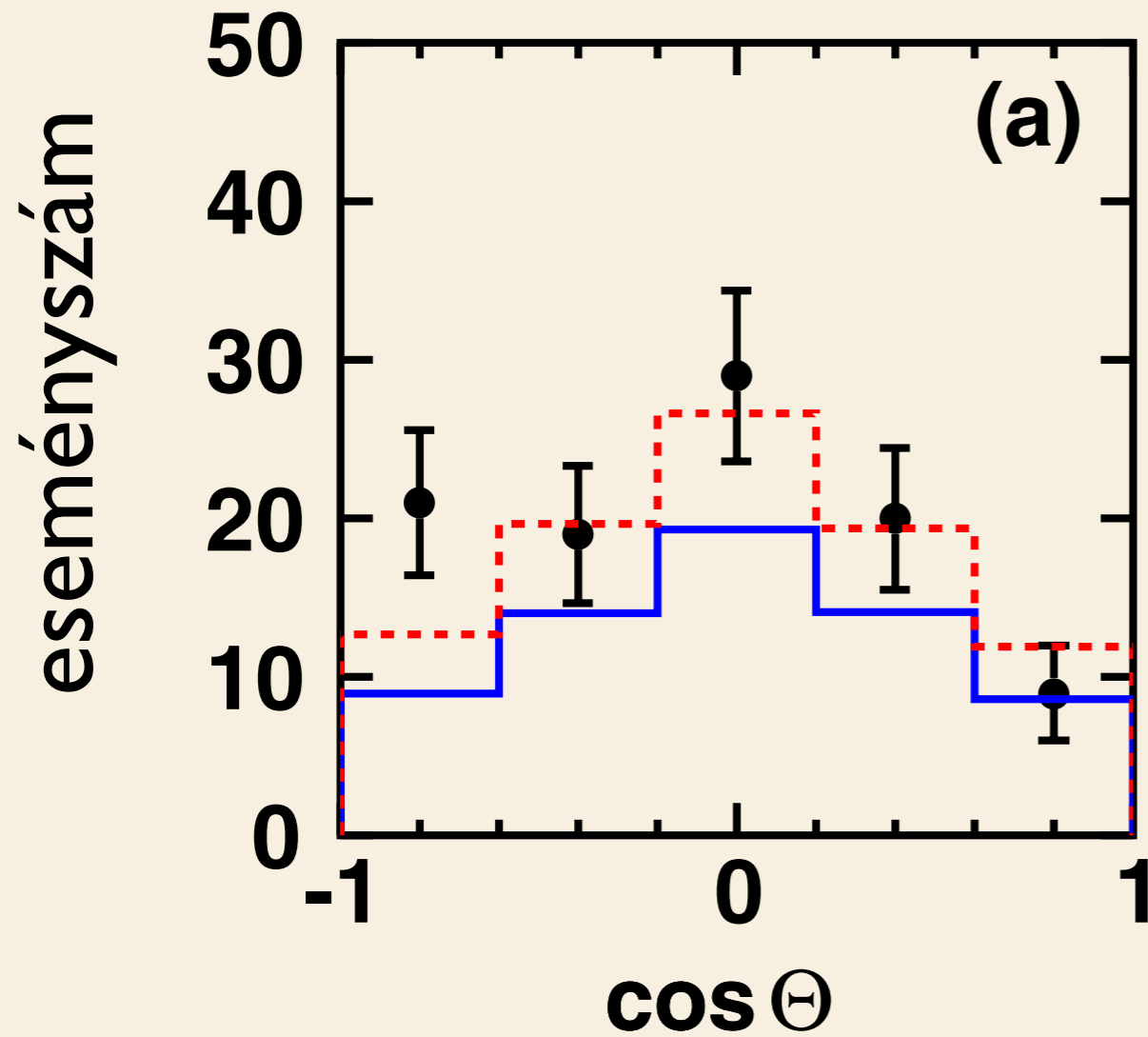
A neutrínó-ízreaggés megsérti ezt a szimmetriát (a Földön áthaladó neutrínók átalakulhatnak)

# A fel-le szimmetria sérülése



irányérzékeny detektorral mérhető

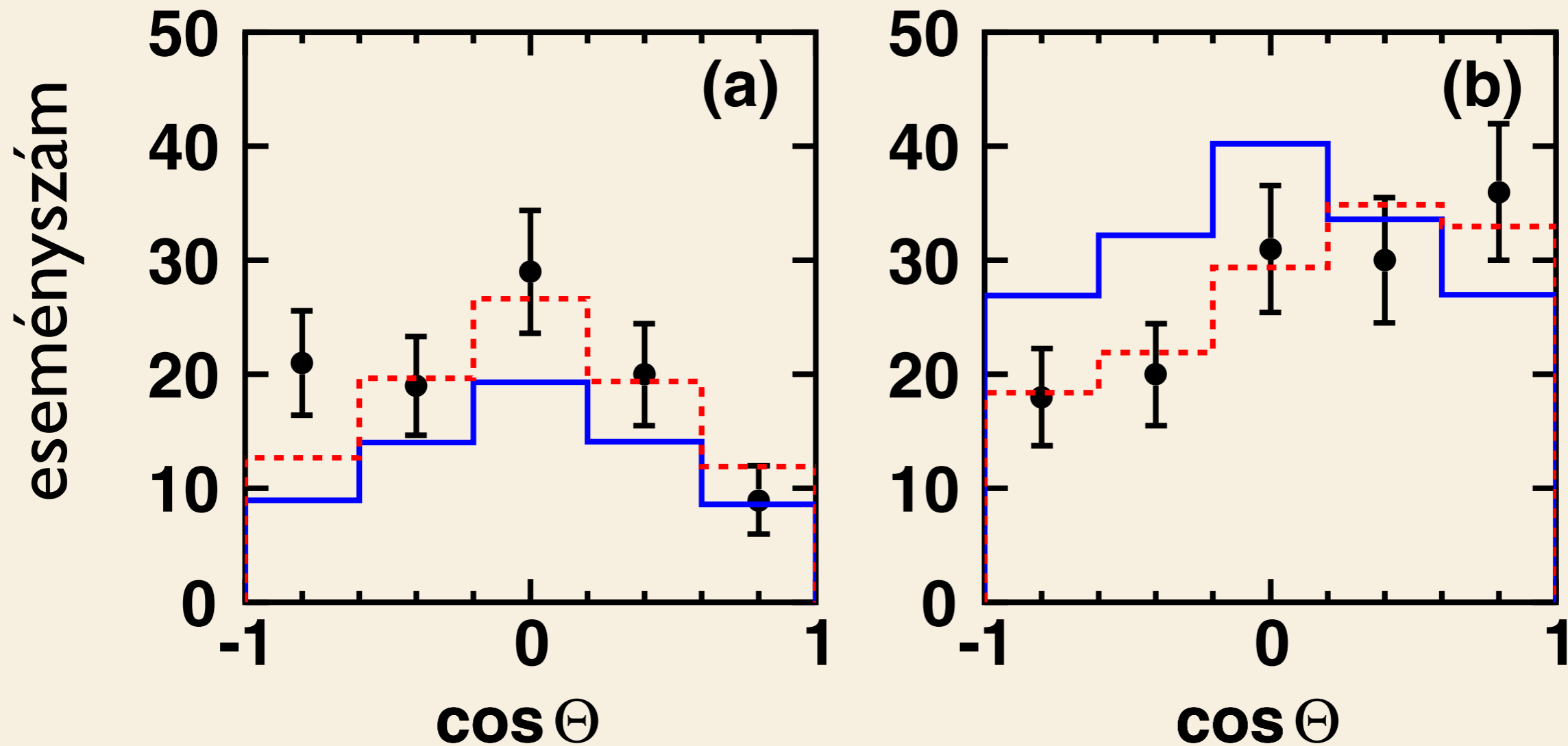
# Kamiokande II eredménye



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<sup>-5</sup>%

# 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

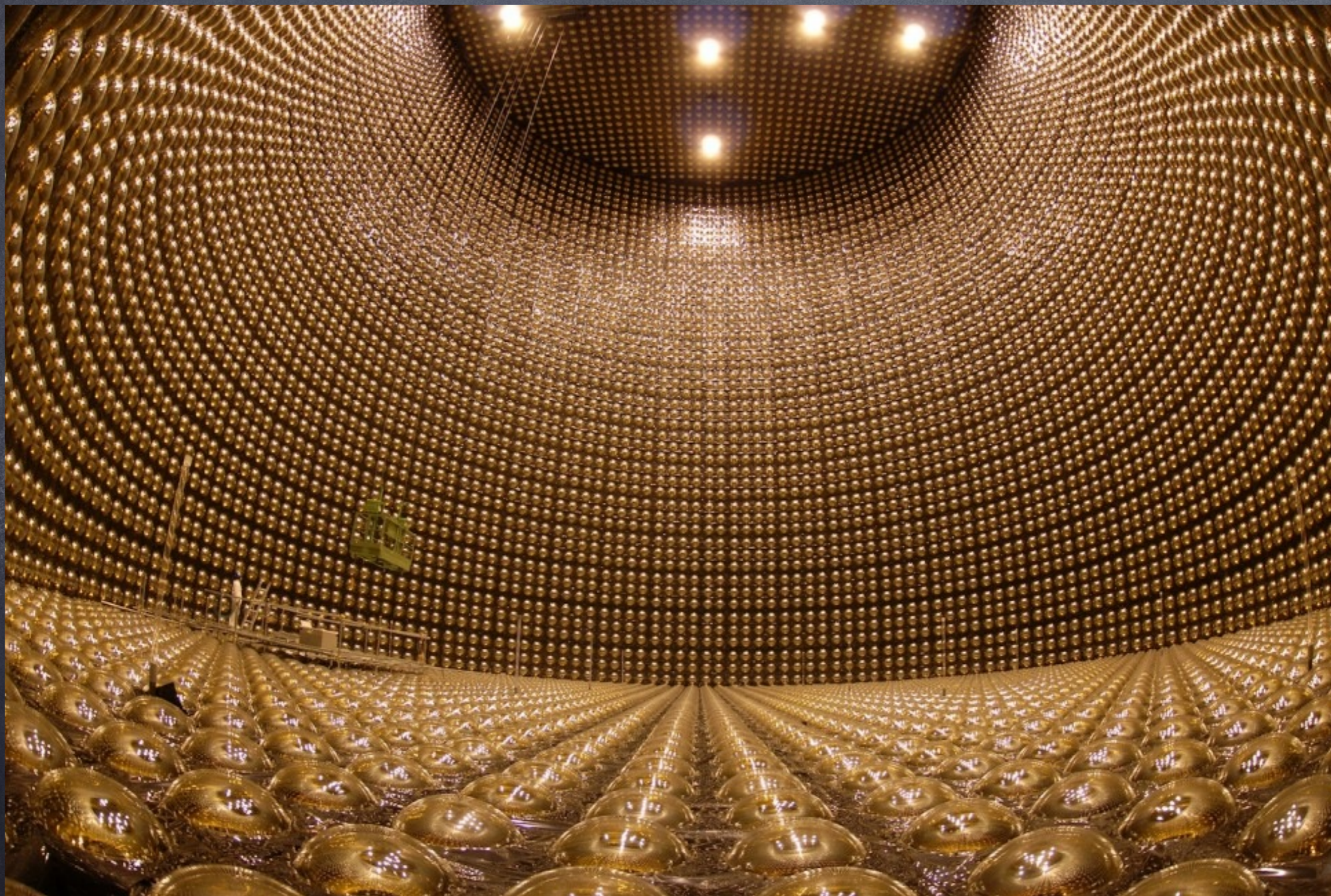
- belső tartály: 22,5 kt víz, 11200 db 50 cm-es PM cső
- külső tartály: 27,5 kt víz, 1900 db 20 cm-es PM cső
- müon-neutrínók észlelésének hatásfoka ~100%



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

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

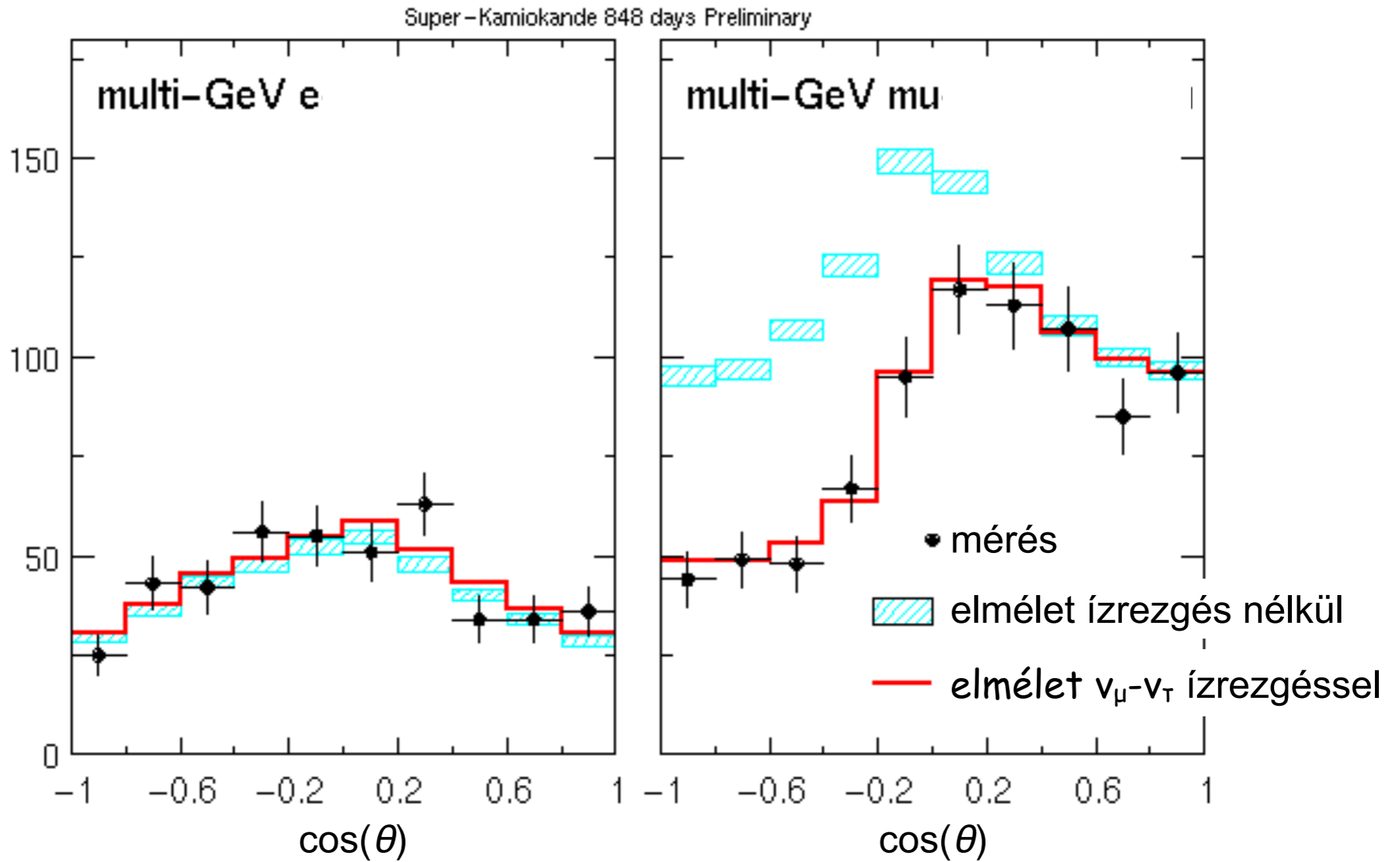
# Szuper Kamiokande kísérlet





# A neutrínó-ízrengés felfedezése

eseményszám



a) elektron-események

b) müion-események

A tudományos felfedezés  
izgalmas

A tudományos felfedezés  
izgalmas

mert sok kérdést vet fel:

# A tudományos felfedezés izgalmas

mert sok kérdést vet fel:

- Mekkora az érzézéshez szükséges  $\Delta m^2$  tömegnégyzet különbség?

# A tudományos felfedezés izgalmas

mert sok kérdést vet fel:

- Mekkora az érzékszékhez szükséges  $\Delta m^2$  tömegnégyzet különbség?
- Mekkora a keveredés  $\theta$  szöge?

# A tudományos felfedezés izgalmas

mert sok kérdést vet fel:

- Mekkora az érzékszékhez szükséges  $\Delta m^2$  tömegnégyzet különbség?
- Mekkora a keveredés  $\theta$  szöge?
- A mérésben csak a müon-neutrínók eltünedezését sikerült észlelni. Vajon a várakozásnak megfelelően tau-neutrínóvá alakultak?

# A tudományos felfedezés izgalmas

mert sok kérdést vet fel:

- Mekkora az érzékszékhez szükséges  $\Delta m^2$  tömegnégyzet különbség?
- Mekkora a keveredés  $\theta$  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  $\Delta m^2$  tömegnégyzet különbség?
- Mekkora a keveredés  $\theta$  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**?

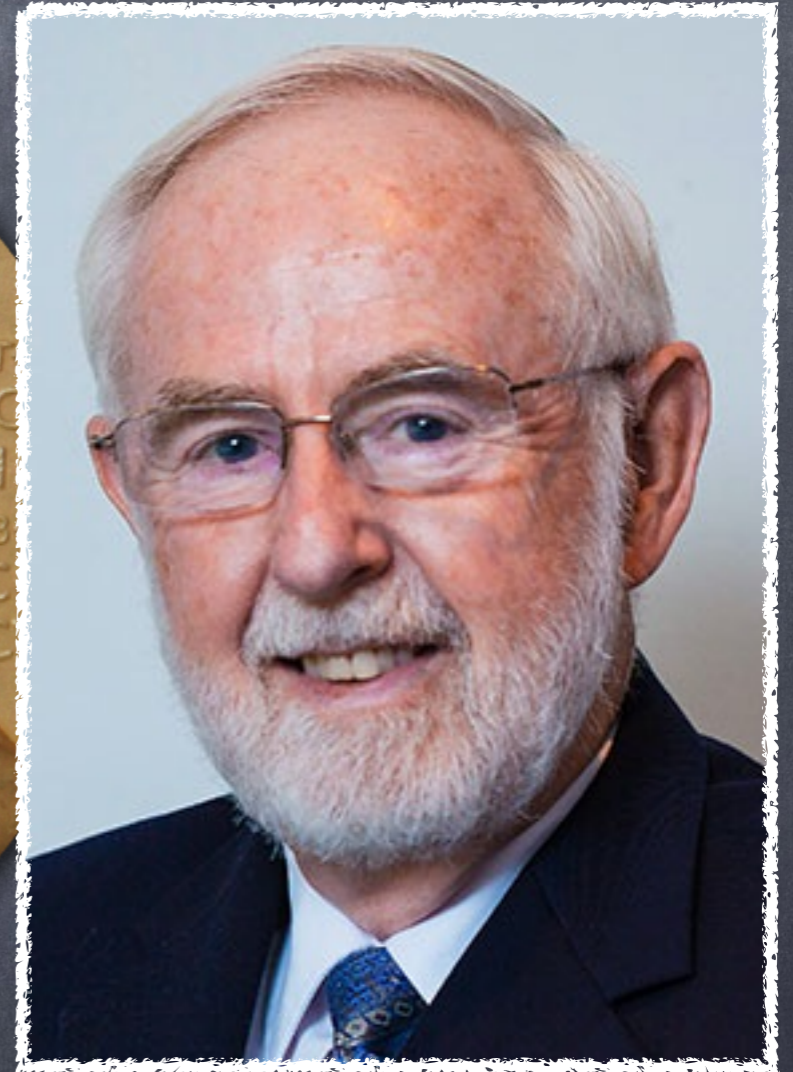
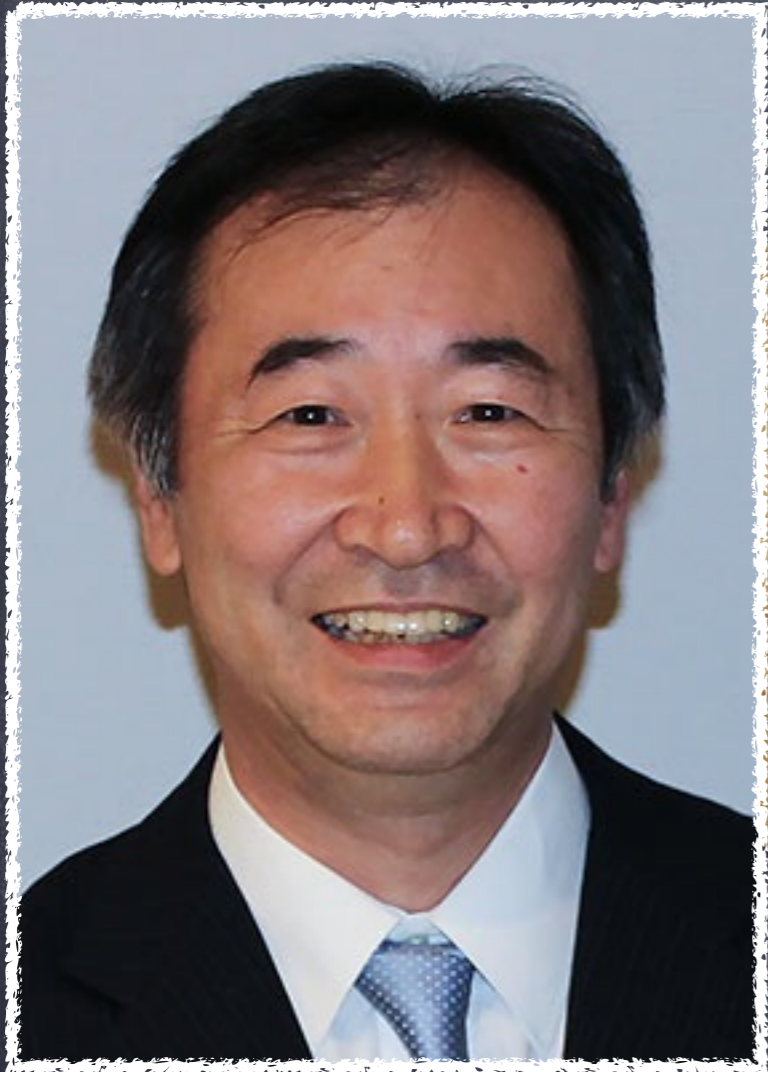


# A tudományos felfedezés izgalmas

mert sok kérdést vet fel:

- Mekkora az érzékszékhez szükséges  $\Delta m^2$  tömegnégyzet különbség?
- Mekkora a keveredés  $\theta$  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-érezékés 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-ízrevezgés túlmutat a  
standard modellel

# A neutrínó-ízrezgés túlmutat a standard modellel

- A részecskefizika standard modelljében a neutrínóknak nincs tömegük

# A neutrínó-ízrengés túlmutat a standard modellel

- A részecskefizika standard modelljében a neutrínóknak nincs tömegük
- A neutrínó-ízrengések 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

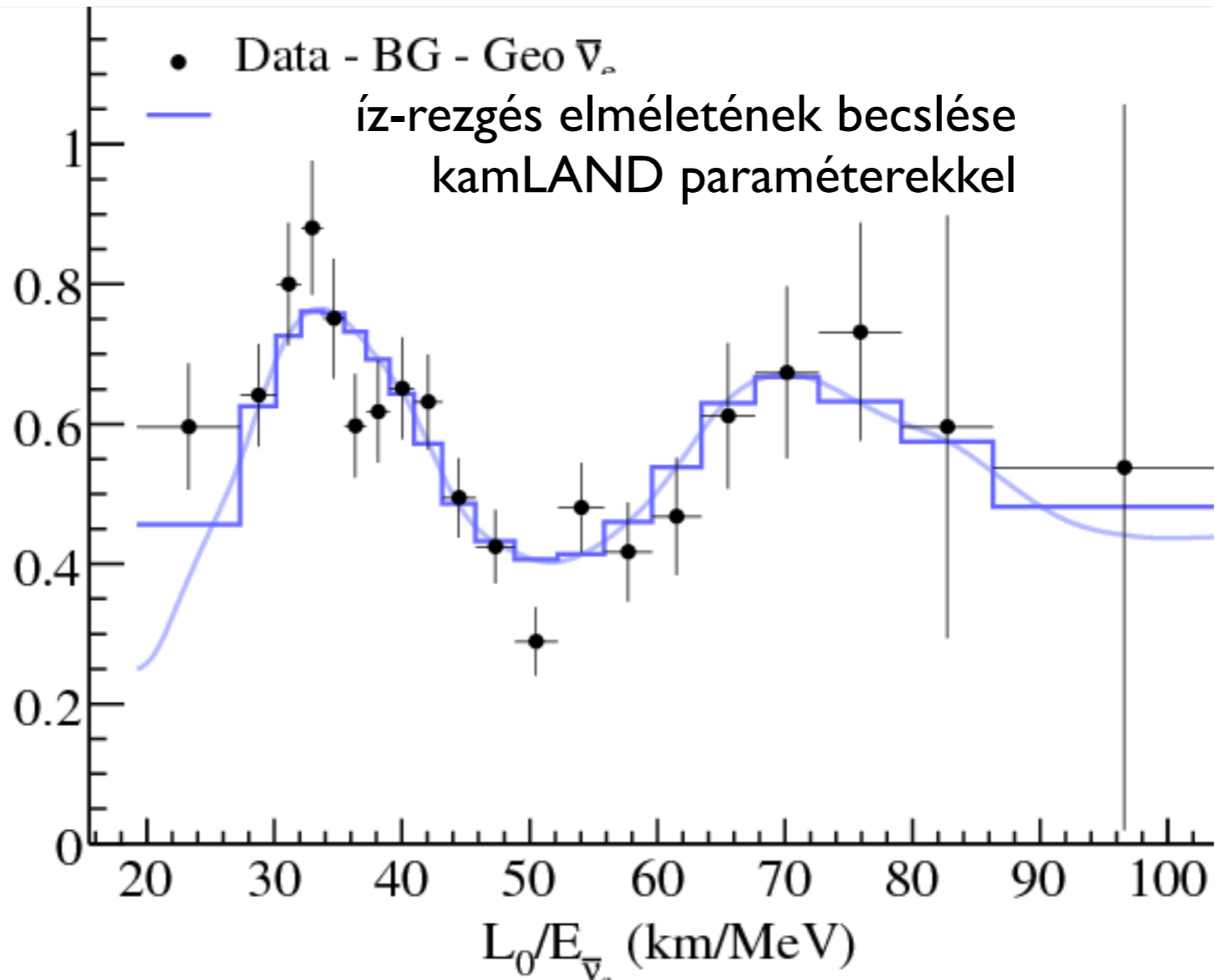


# A neutrínó-ízrezgés túlmutat a standard modellel

- 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.

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.

*vége*

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

# 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.

# 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.)

# 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.



# 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.

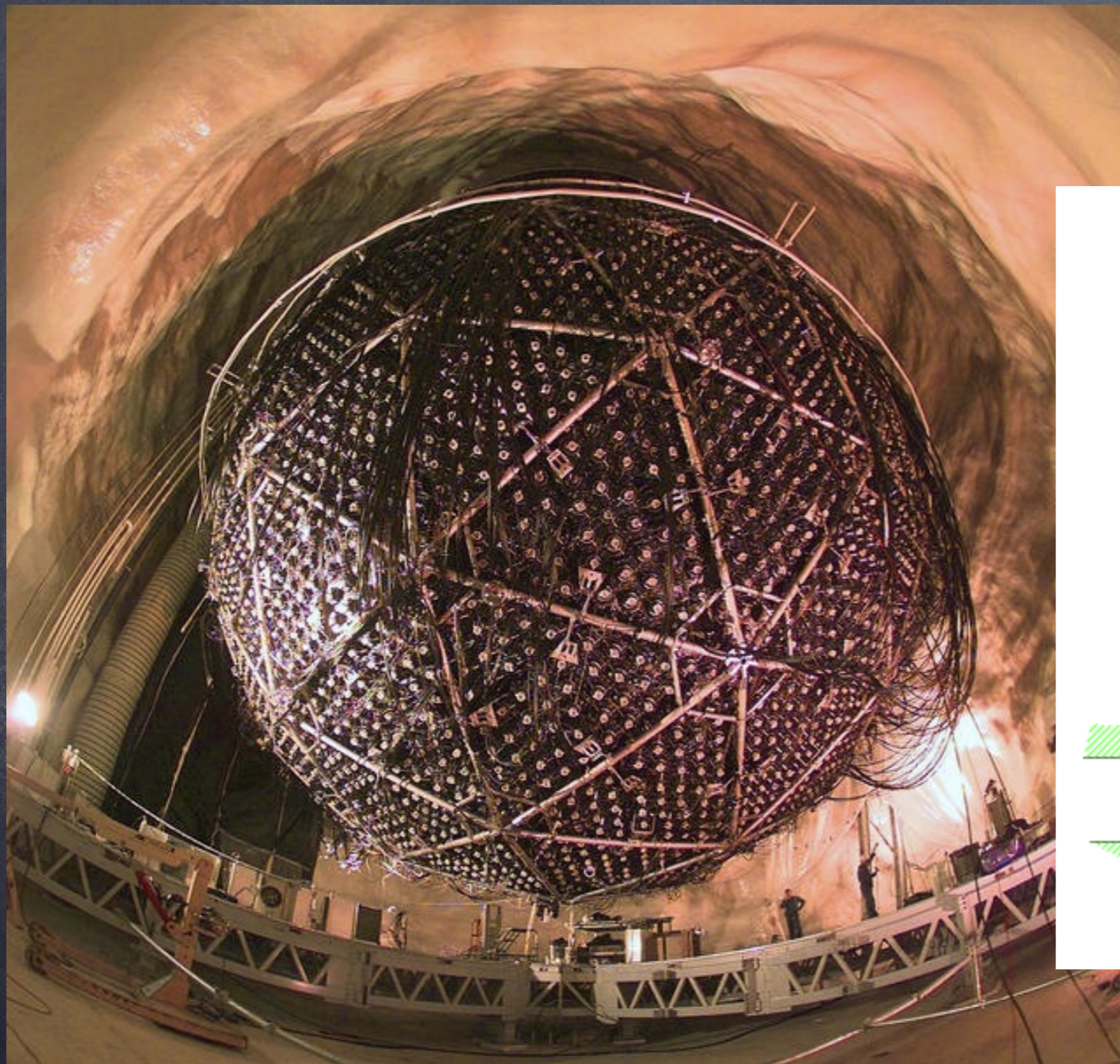
# Kvíz

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.

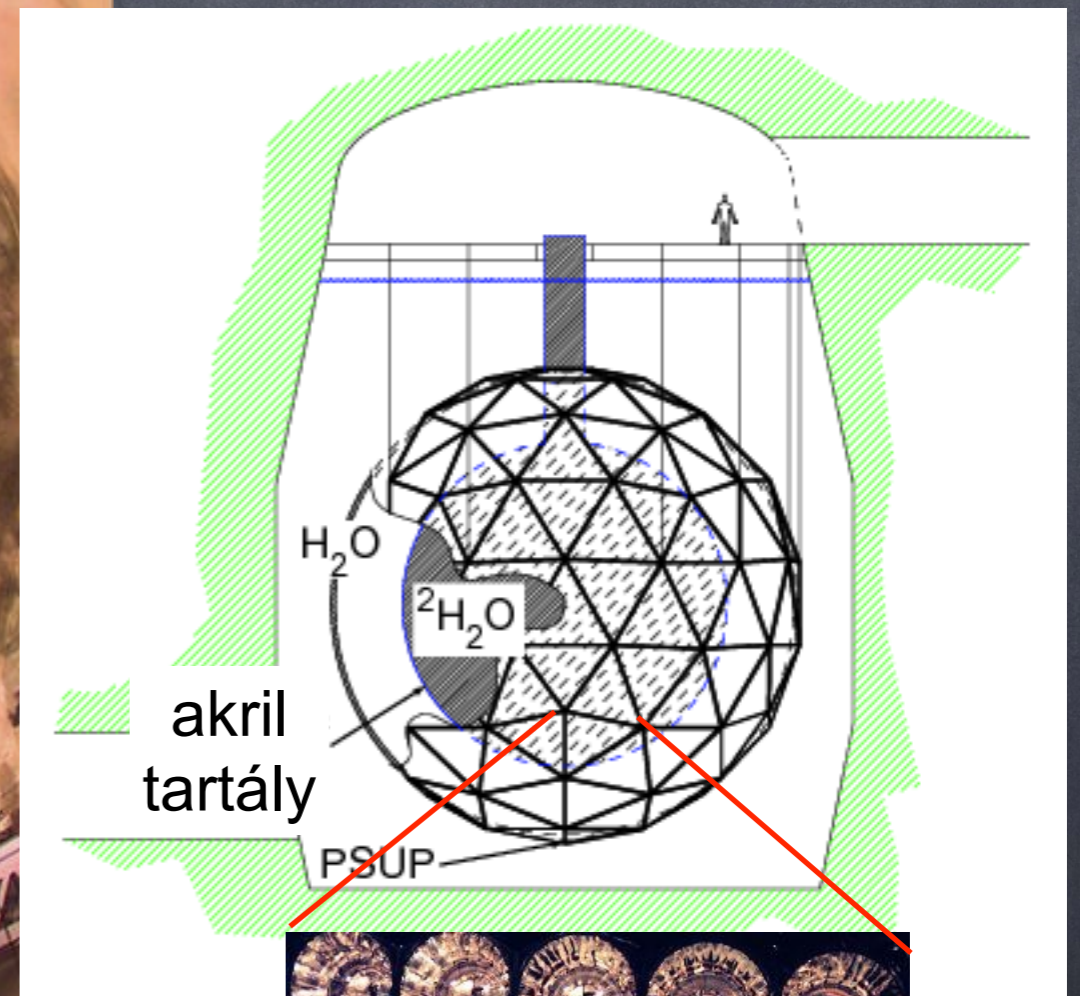
# Kvíz

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.

# Az SNO kísérlet (1998-2002)



1100 t tiszta nehézvíz ( $D_2O$ )  
6 m sugarú tartályban



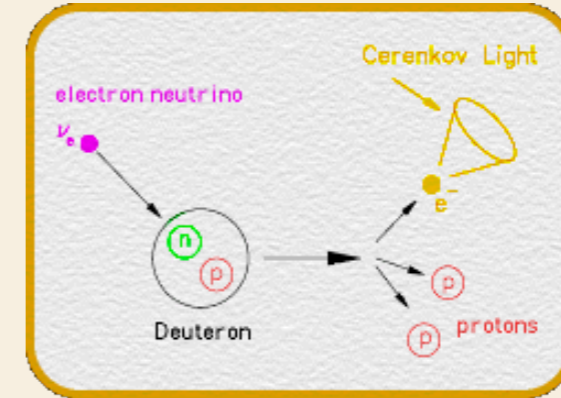
2000 m-rel a felszín alatt



# Az SNO kísérlet (1998-2002)

töltött részecskét keltő folyamat

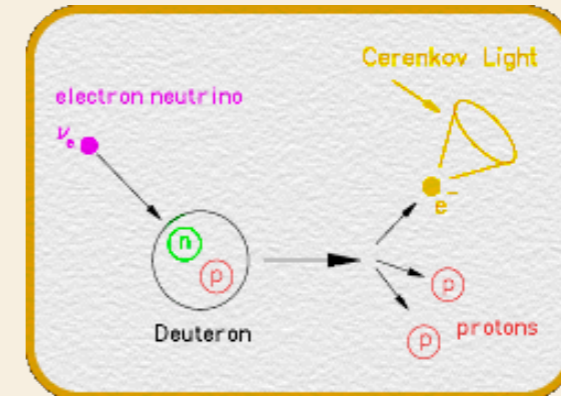
( $E_{\text{küszöb}} = 1,4 \text{ MeV}$ ):



# Az SNO kísérlet (1998-2002)

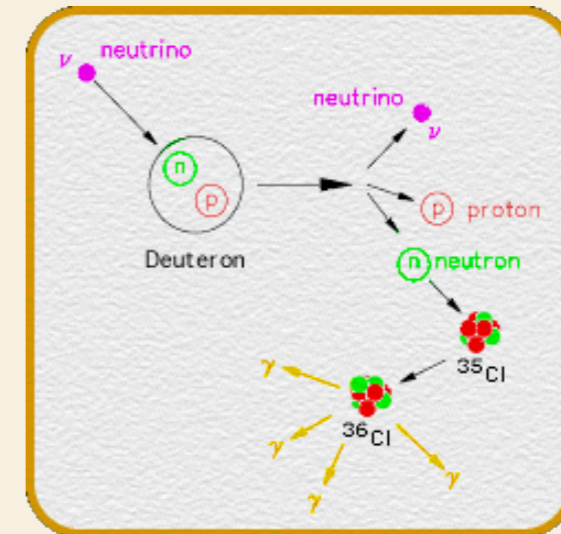
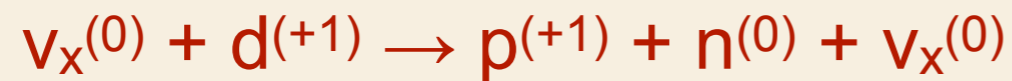
töltött részecskét keltő folyamat

( $E_{\text{küszöb}} = 1,4 \text{ MeV}$ ):



semleges részecskét keltő folyamat

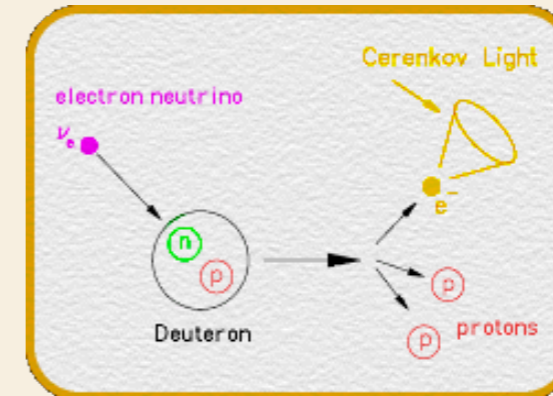
( $E_{\text{küszöb}} = 2,2 \text{ MeV}$ ):



# Az SNO kísérlet (1998-2002)

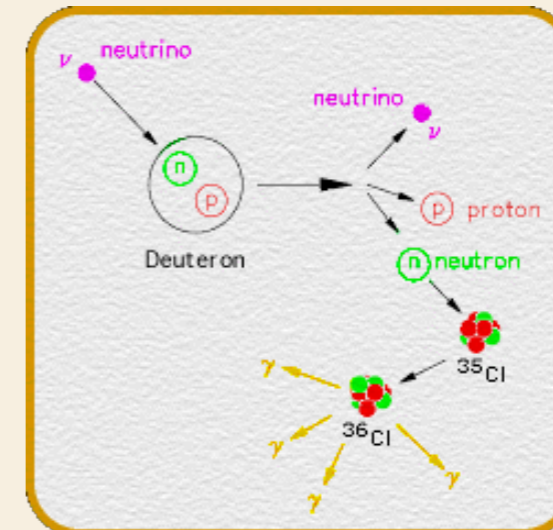
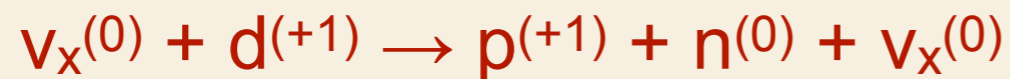
töltött részecskét keltő folyamat

( $E_{\text{küszöb}} = 1,4 \text{ MeV}$ ):

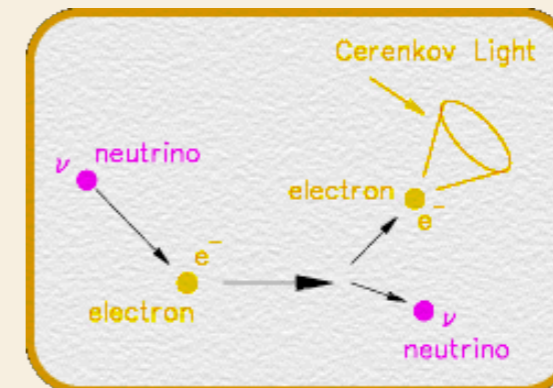
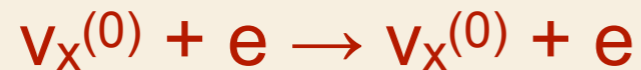


semleges részecskét keltő folyamat

( $E_{\text{küszöb}} = 2,2 \text{ MeV}$ ):



rugalmas szórás ( $E_{\text{küszöb}} = 0 \text{ MeV}$ ):

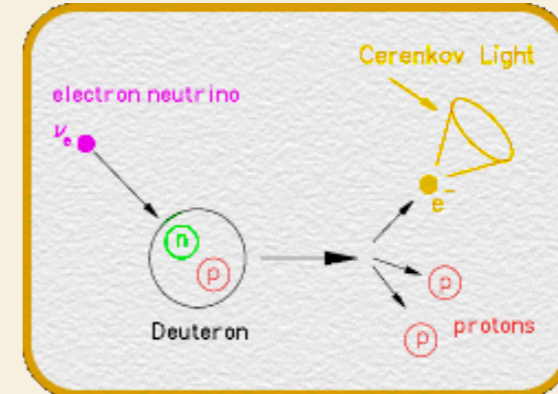




# Az SNO kísérlet (1998-2002)

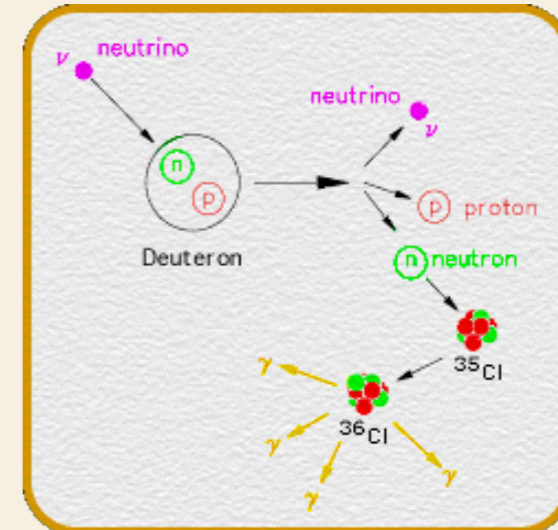
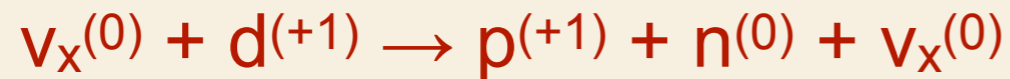
töltött részecskét keltő folyamat

( $E_{\text{küszöb}} = 1,4 \text{ MeV}$ ):

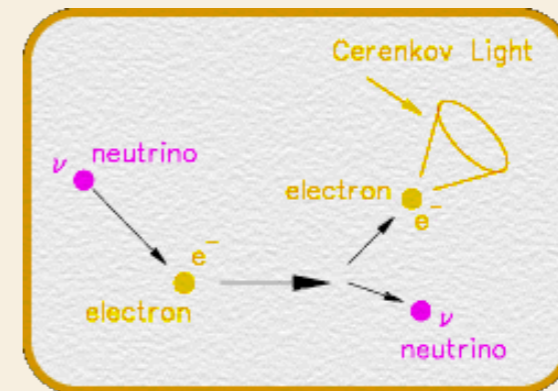
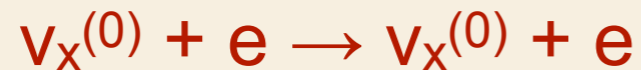


semleges részecskét keltő folyamat

( $E_{\text{küszöb}} = 2,2 \text{ MeV}$ ):



rugalmas szórás ( $E_{\text{küszöb}} = 0 \text{ MeV}$ ):



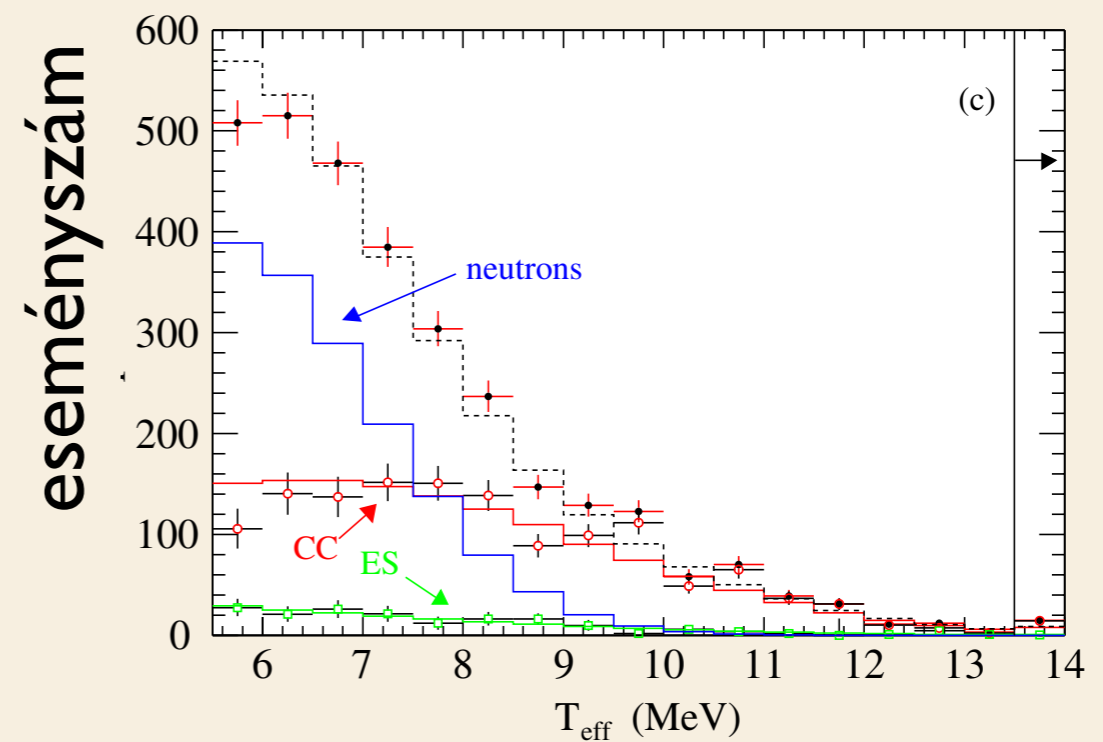
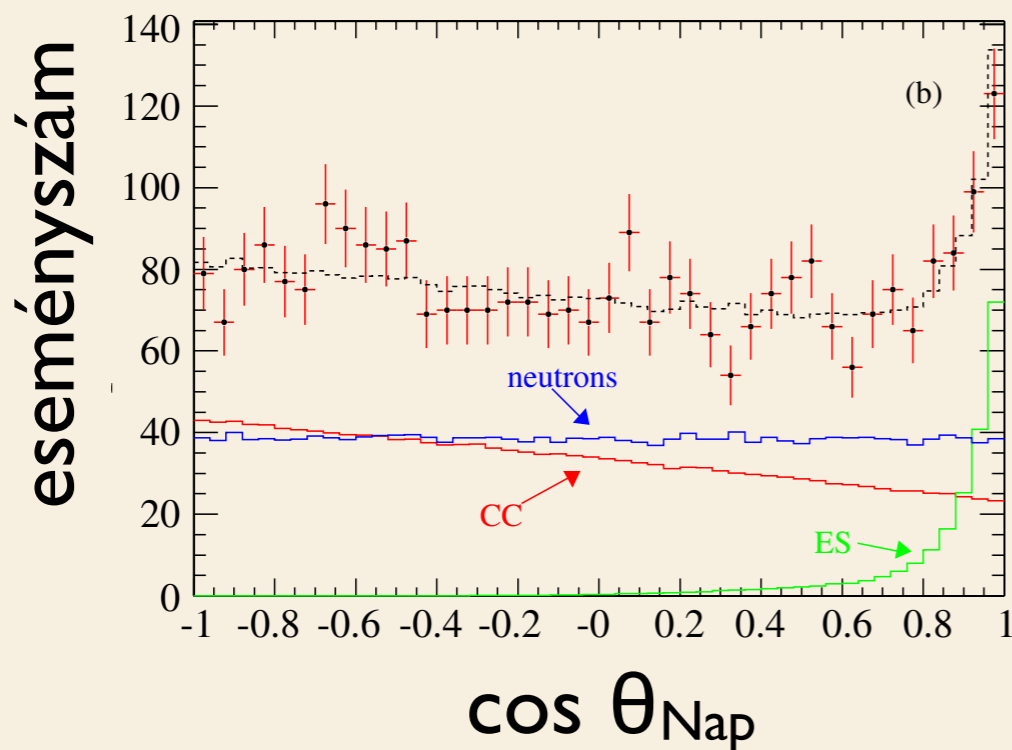
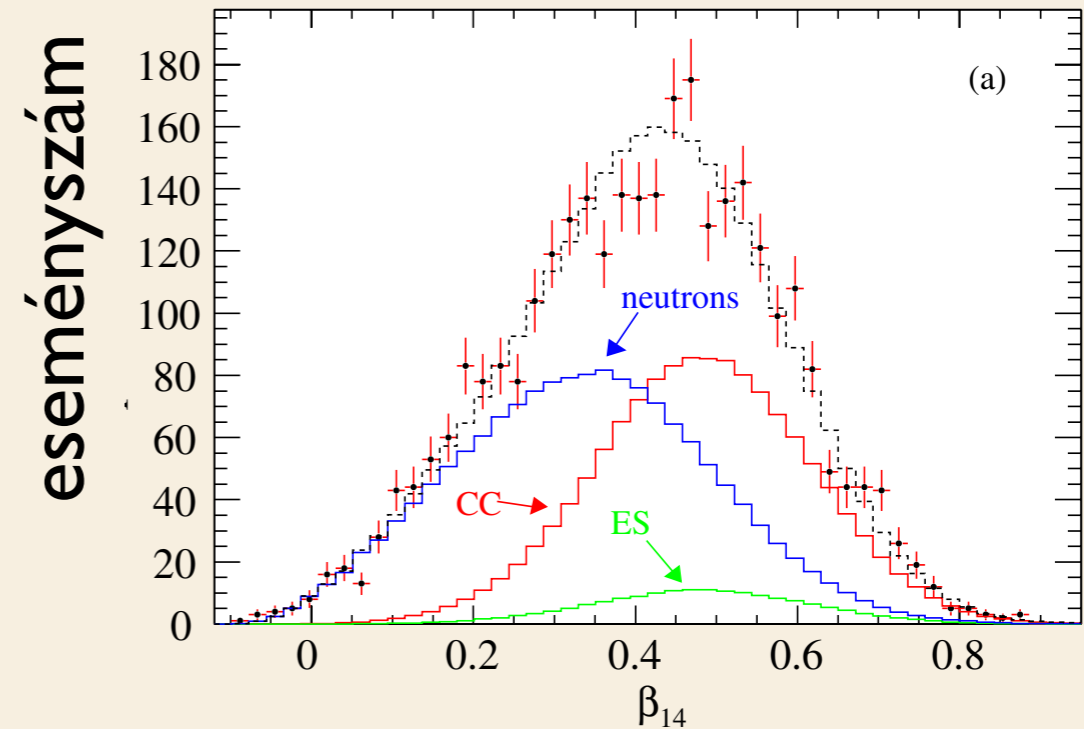
nincs szükség összehasonlításra a Nap-modell által becsült neutrínó áramsűrűségekkel

# Nap-neutrínók átalakulása

## Nap-neutrínó áramsűrűség a Föld felszínén

töltött folyamat alapján:

$$\Phi_t = (1,59 \pm 0,1) 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$



# Nap-neutrínók átalakulása

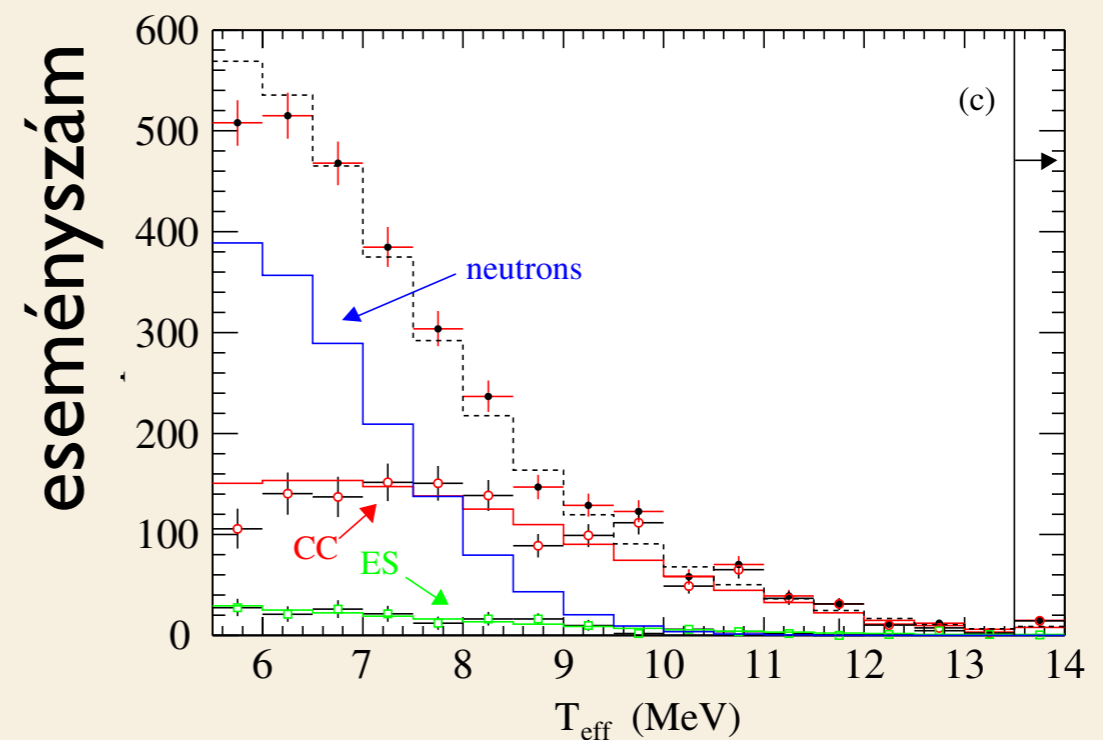
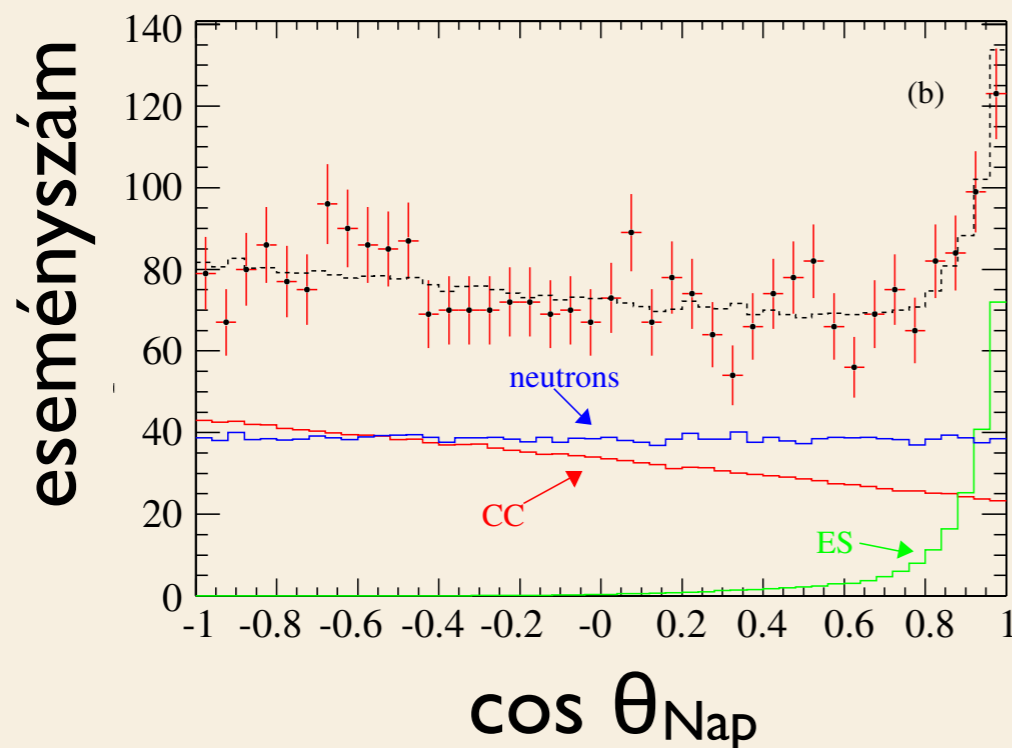
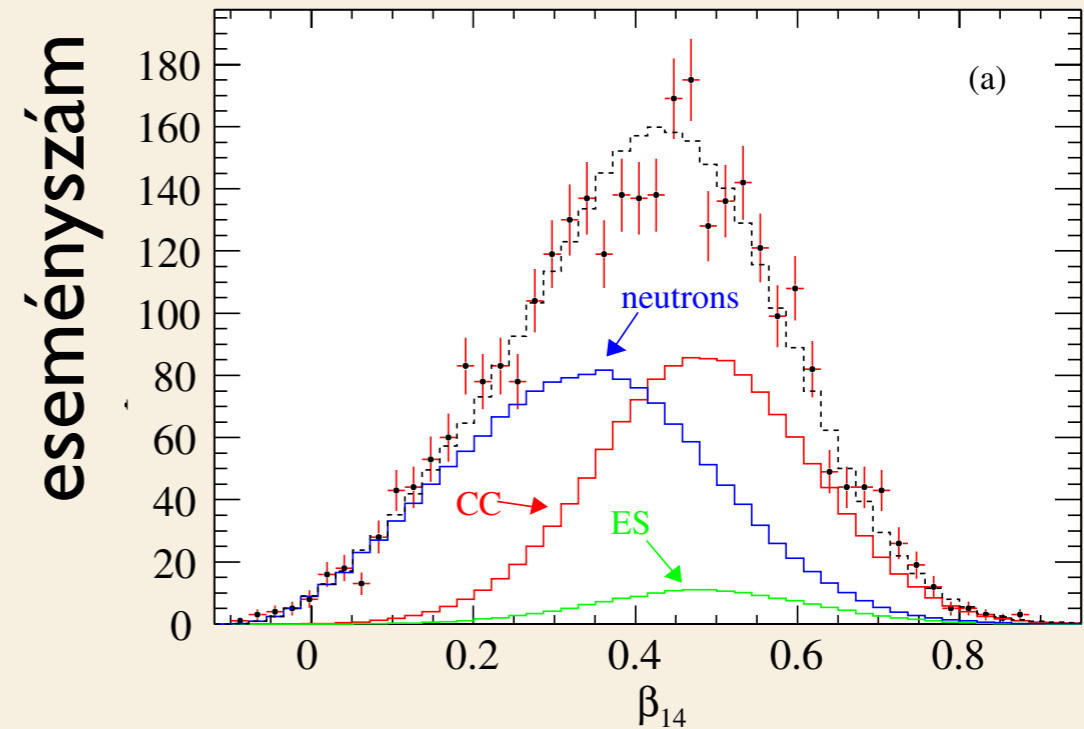
## Nap-neutrínó áramsűrűség a Föld felszínén

töltött folyamat alapján:

$$\Phi_t = (1,59 \pm 0,1) 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

semleges folyamat alapján:

$$\Phi_s = (5,21 \pm 0,47) 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$



# Nap-neutrínók átalakulása

## Nap-neutrínó áramsűrűség a Föld felszínén

töltött folyamat alapján:

$$\Phi_t = (1,59 \pm 0,1) 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

semleges folyamat alapján:

$$\Phi_s = (5,21 \pm 0,47) 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Nap-modell becslése:

$$\Phi = (5,82 \pm 1,34) 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

