

Határtaalan neutrínók

Trócsányi Zoltán

Eötvös Loránd Tudományegyetem és
MTA-DE Részecskefizikai Kutatócsoport

HTP utótalálkozó
Budapest 2019 november 23

Mottó

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

Albert Einstein

Mottó

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

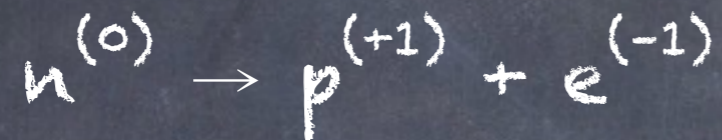
Albert Einstein

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

TZ

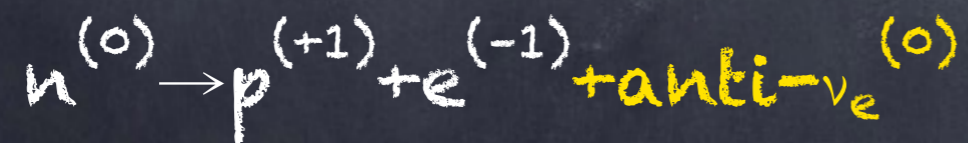
Wolfgang Pauli jóslata

béta-bomlásban látszik:



- ✓ energia
- ✓ lendület
- ✓ perdület

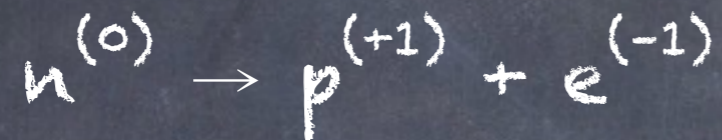
megmaradása megköveteli egy további részecske keletkezését



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

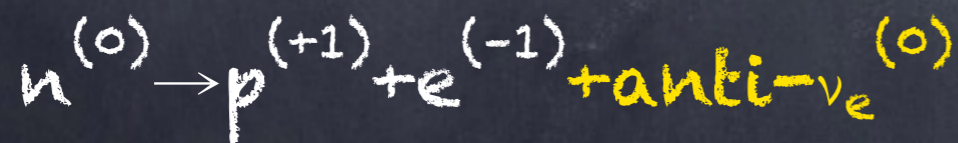
Wolfgang Pauli jóslata

béta-bomlásban látszik:



- ✓ energia
- ✓ lendület
- ✓ perdület

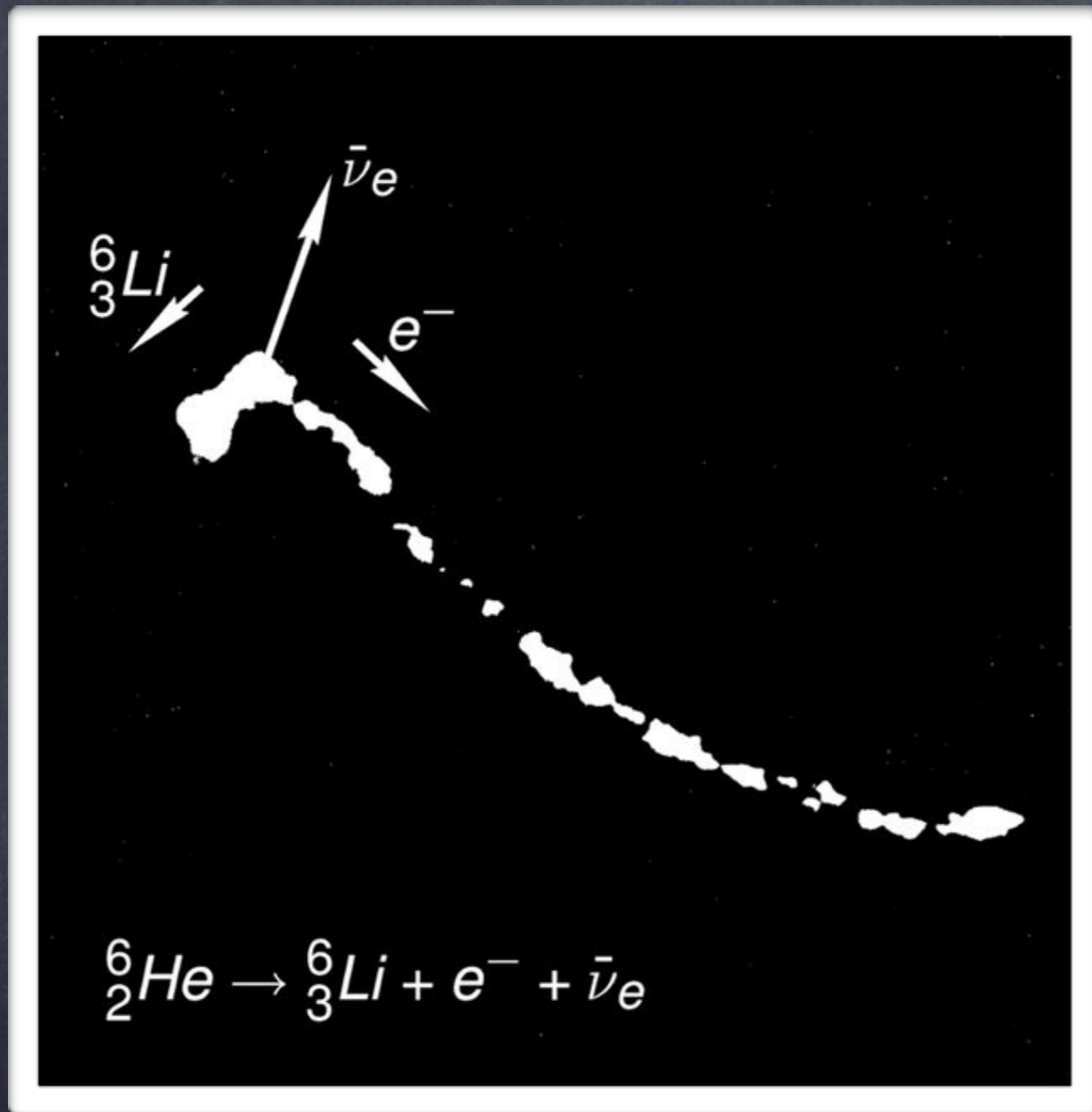
megmaradása megköveteli egy további részecske keletkezését



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

Marx György: a leptonszám megmarad

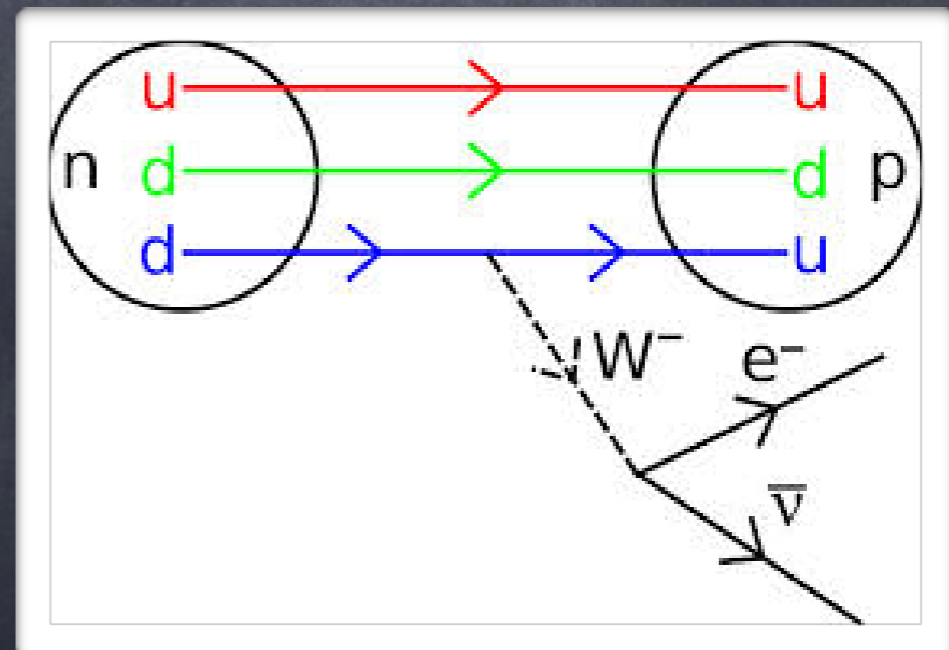
Csikai-Szalay kísérlet (1956)



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

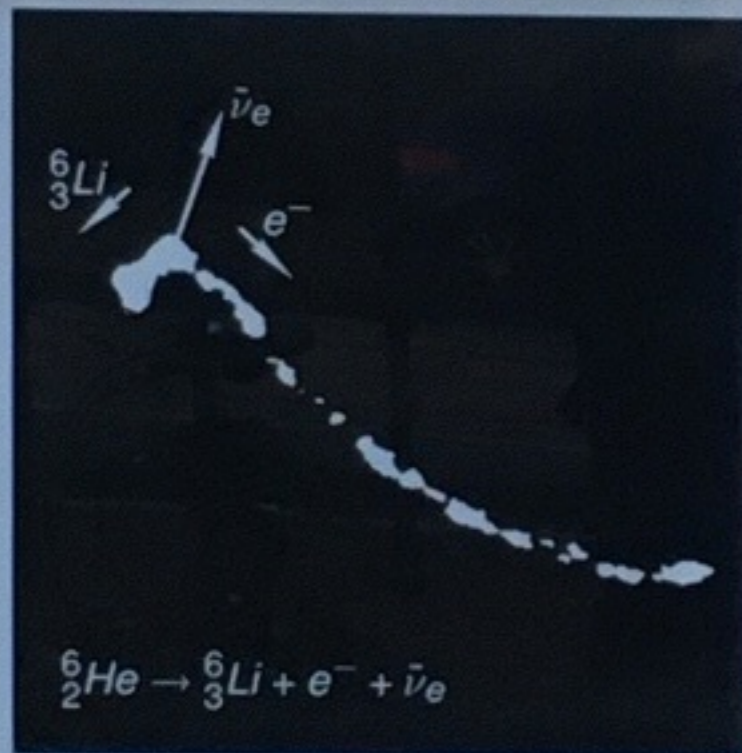
elemi szinten:

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



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 RÉSZECSEKE 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)

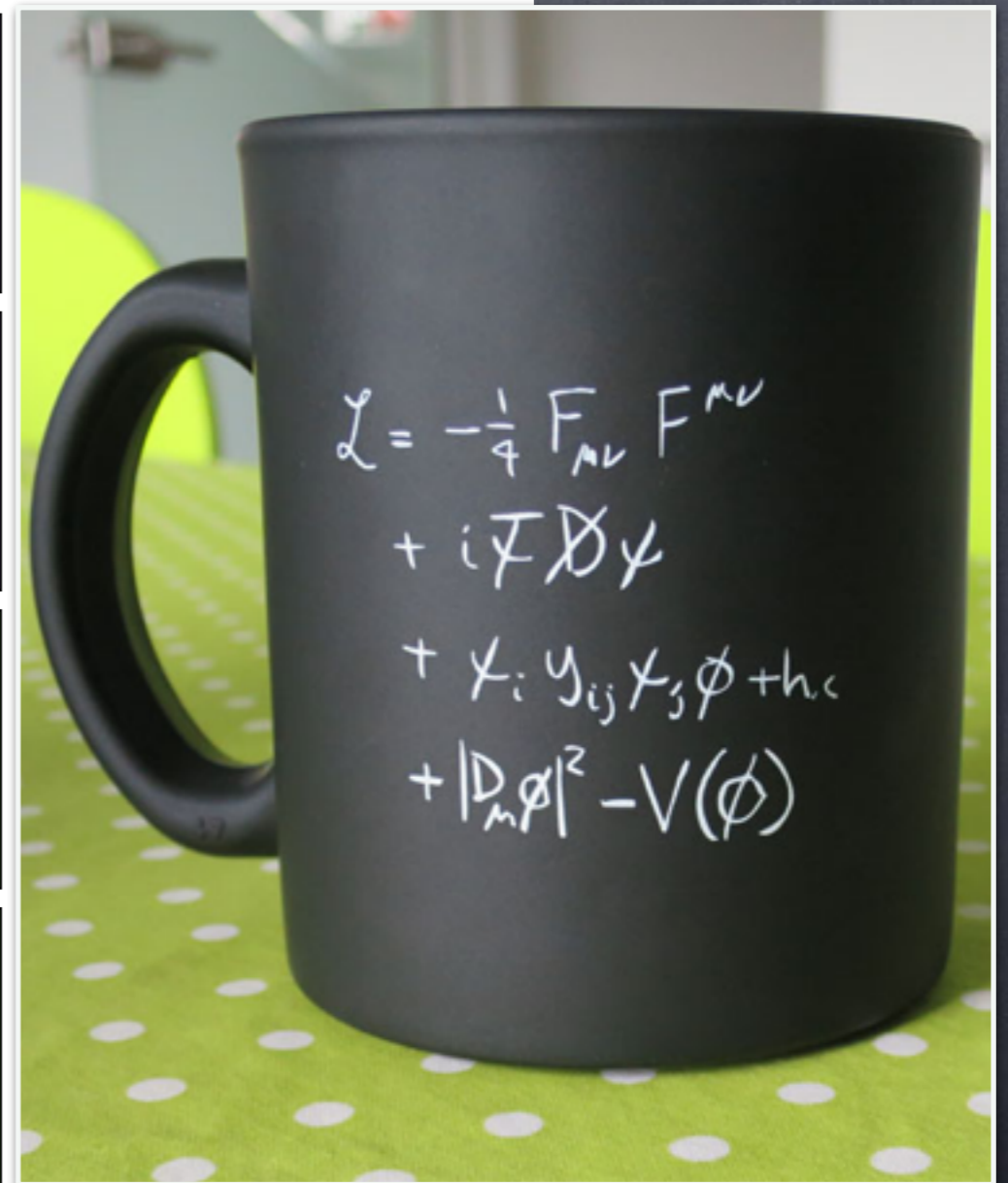
	I	II	III		
tömeg→	2,3 MeV/c ²	1,27 GeV/c ²	173 GeV/c ²	0	125 GeV/c ²
töltés→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
név→	u-kvark	c-kvark	t-kvark	foton	Higgs-bozon
Kvarkok	4,8 MeV/c ²	95 MeV/c ²	4,2 GeV/c ²	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	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 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
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

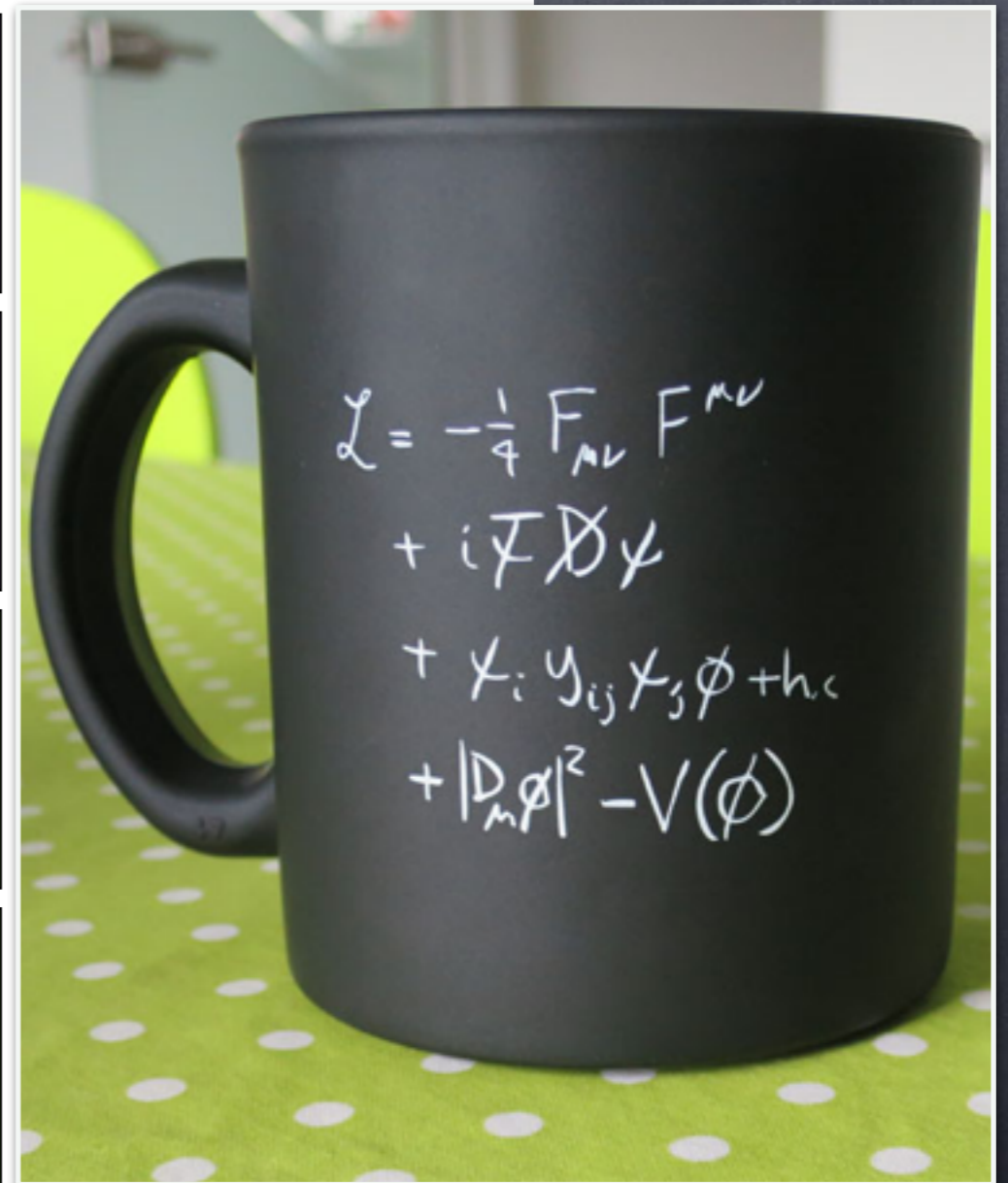


Elemi részecskék és kölcsönhatásai

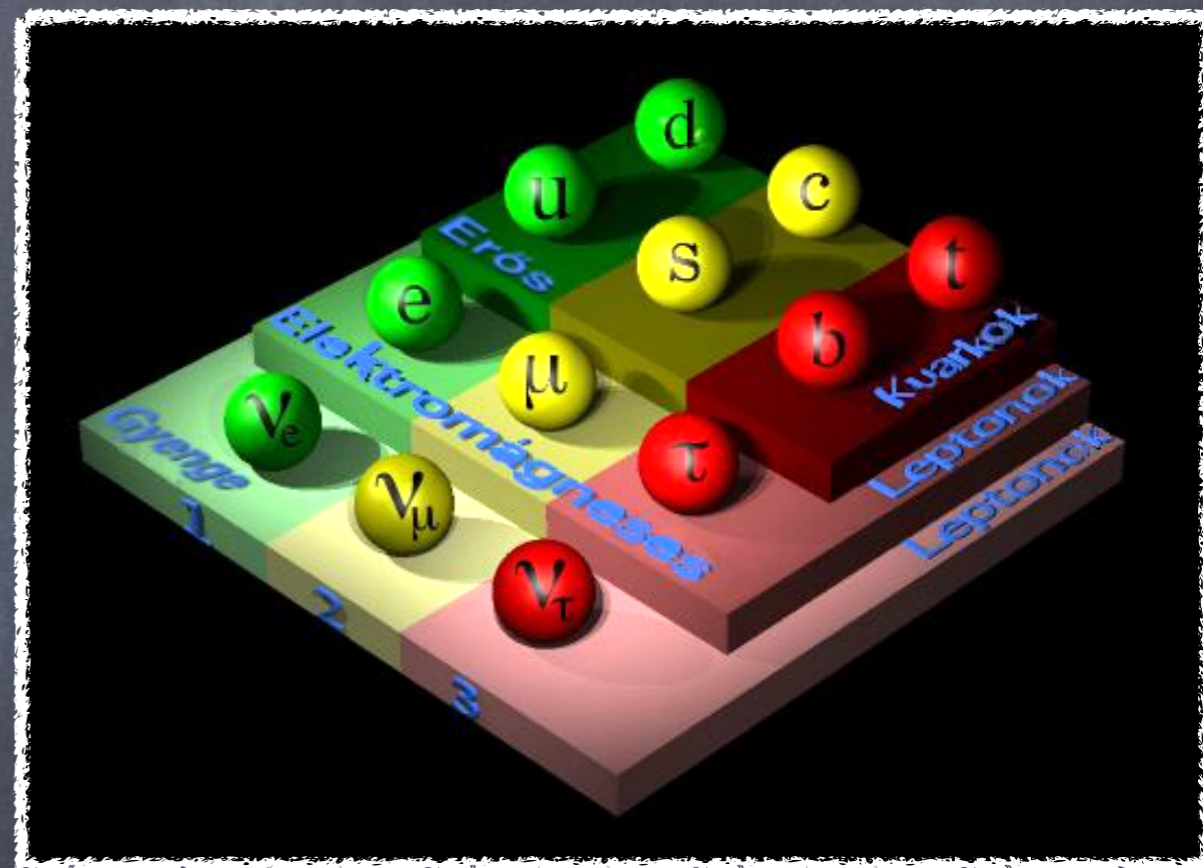
Az anyagi részecskék három családja (fermionok)

	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

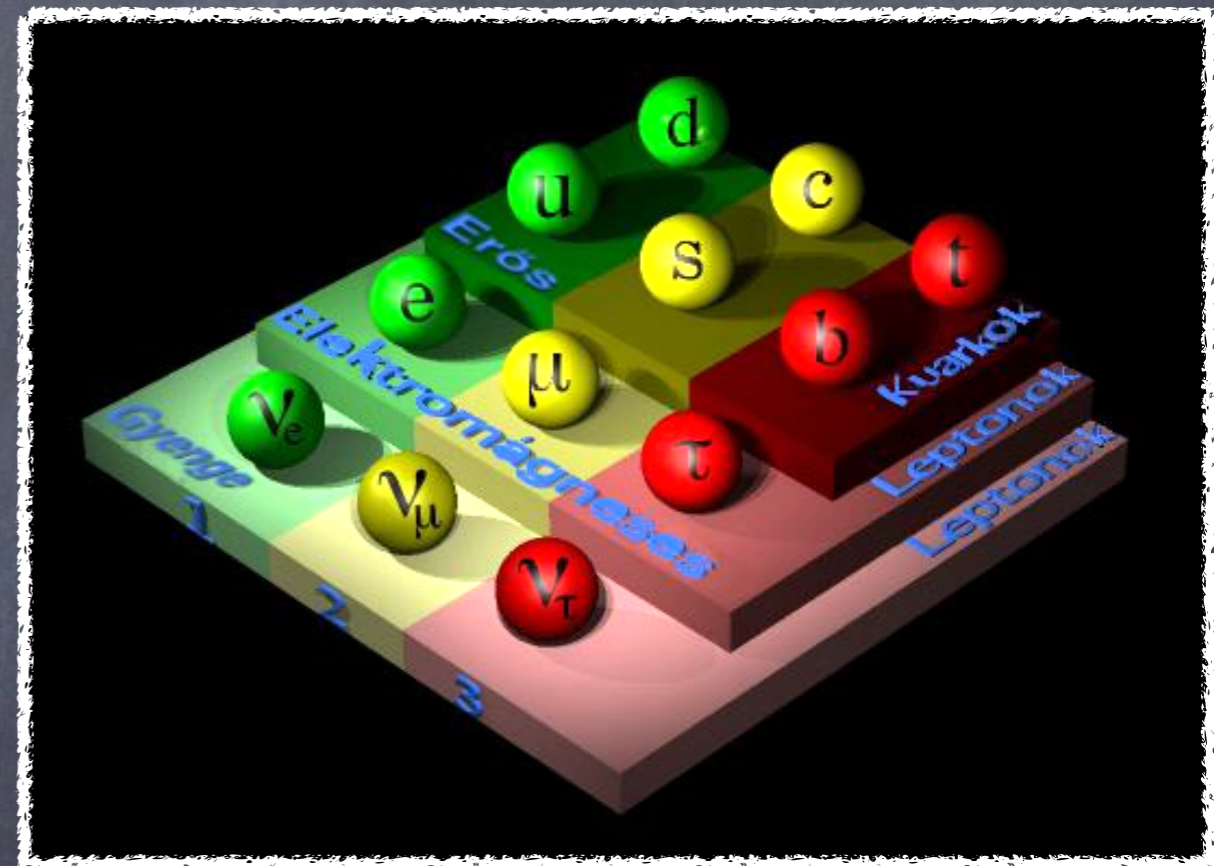


Neutrínó-anyag kölcsönhatás



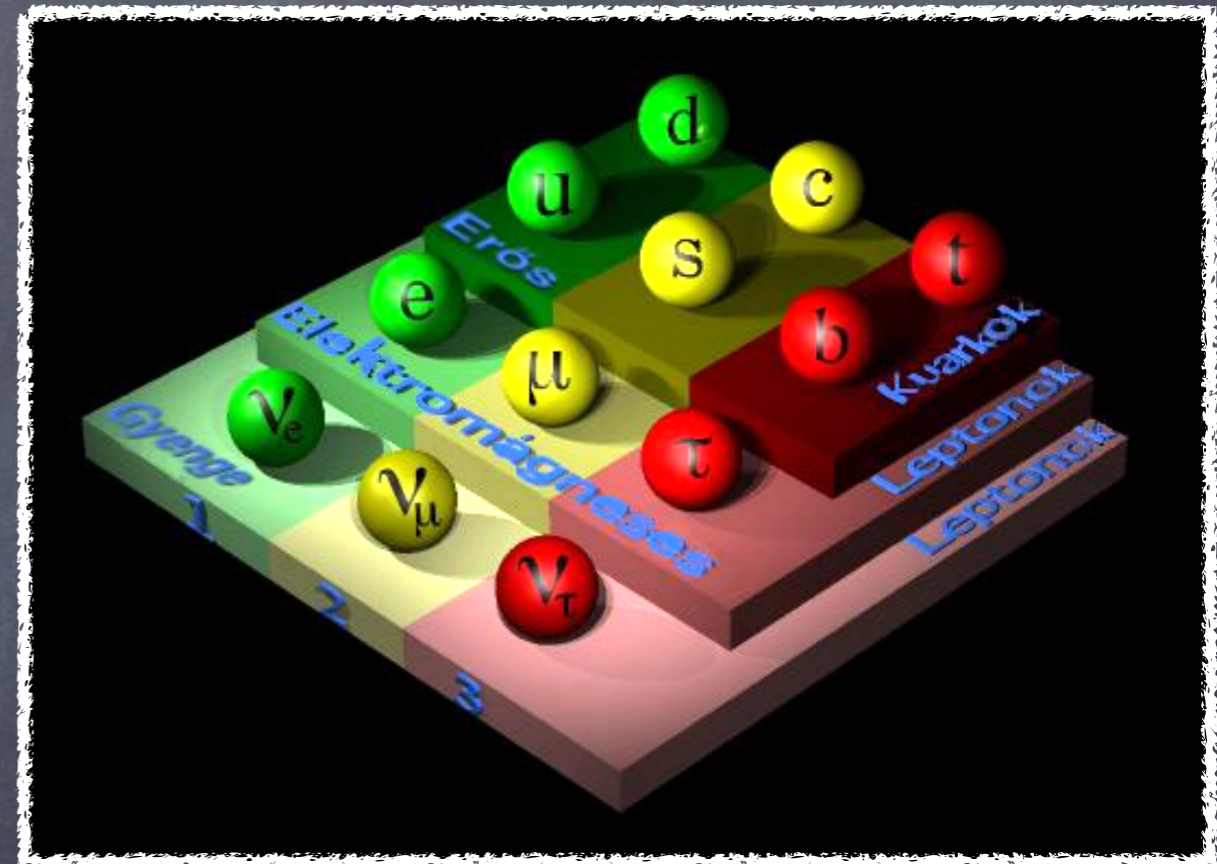
Neutrínó-anyag kölcsönhatás

a neutrínók csak a radioaktivitásért felelős gyenge erőt érzik:



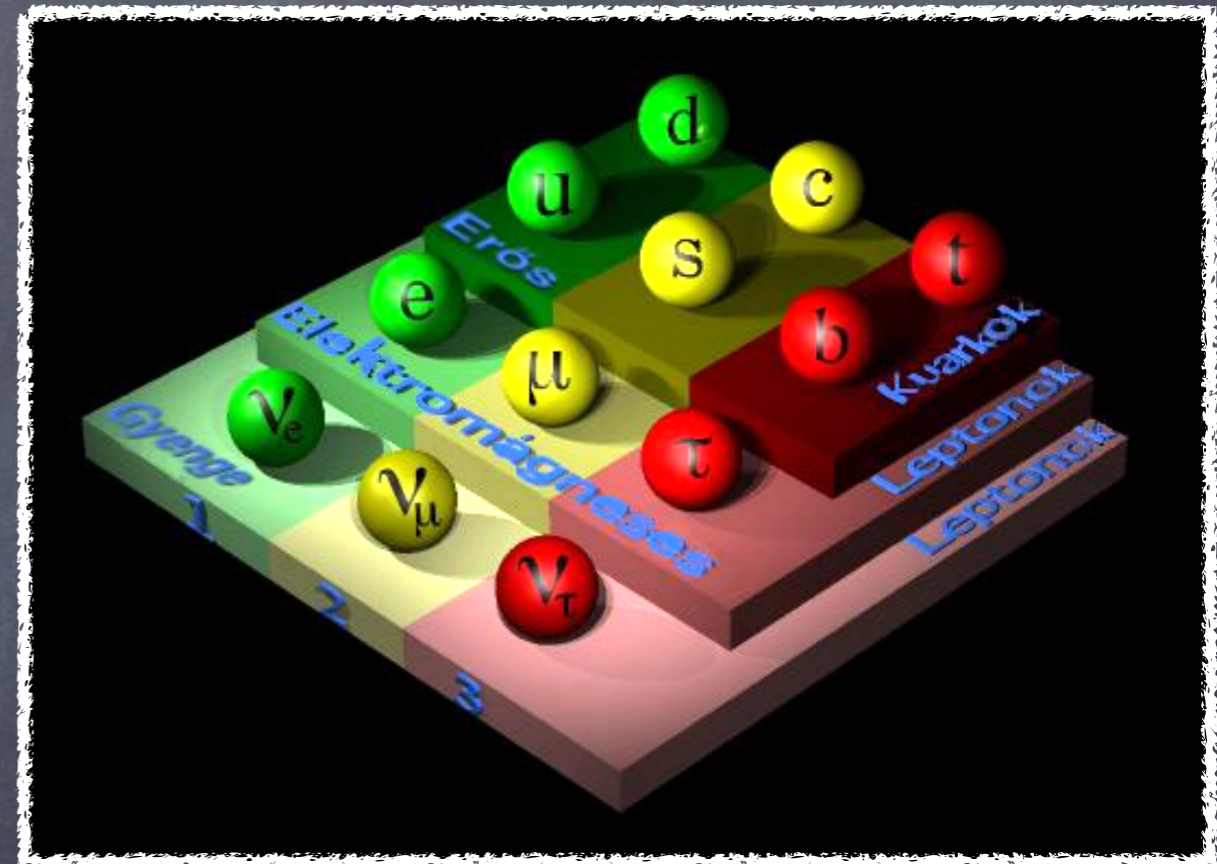
Neutrínó-anyag kölcsönhatás

a neutrínók csak a radioaktivitásért felelős gyenge erőt érzik: százezer neutrínó közül csak egy akad fenn a Földön (12740 km), a többi áthalad



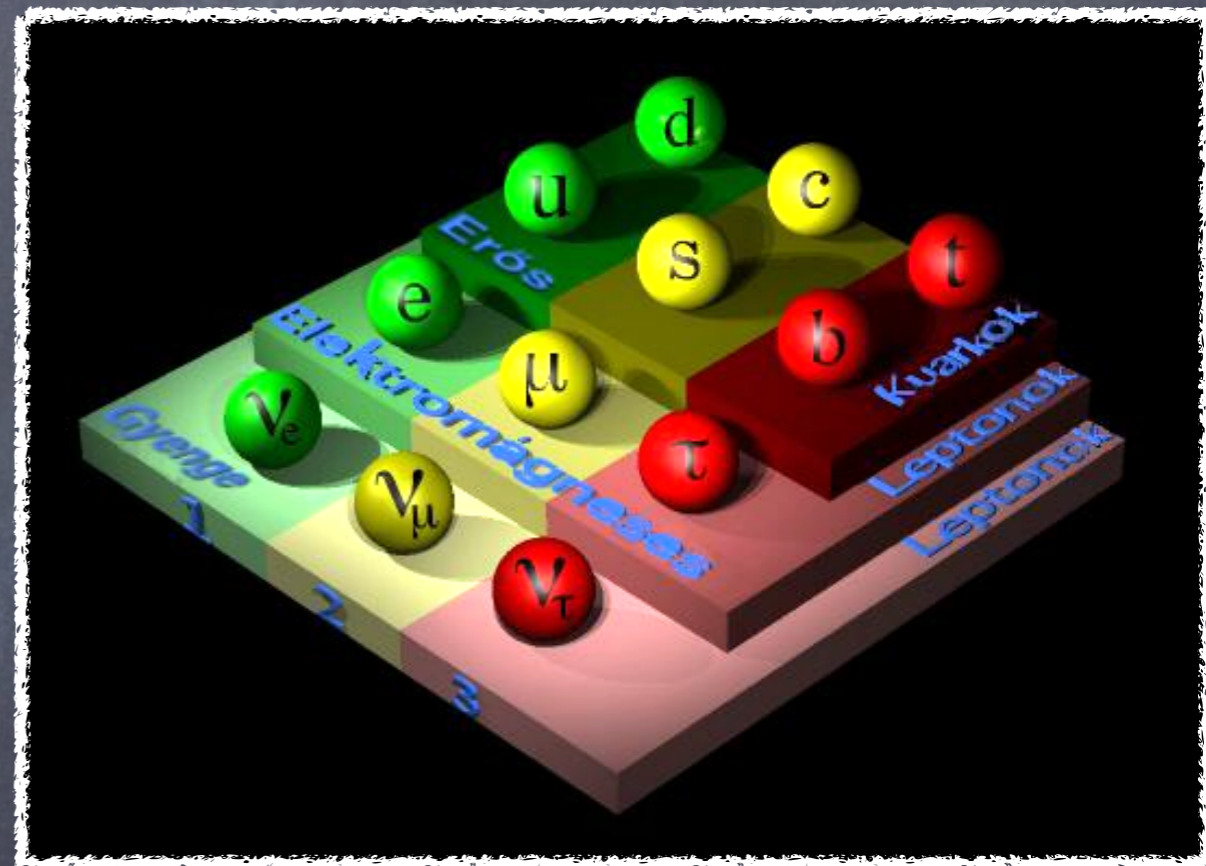
Neutrínó-anyag kölcsönhatás

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



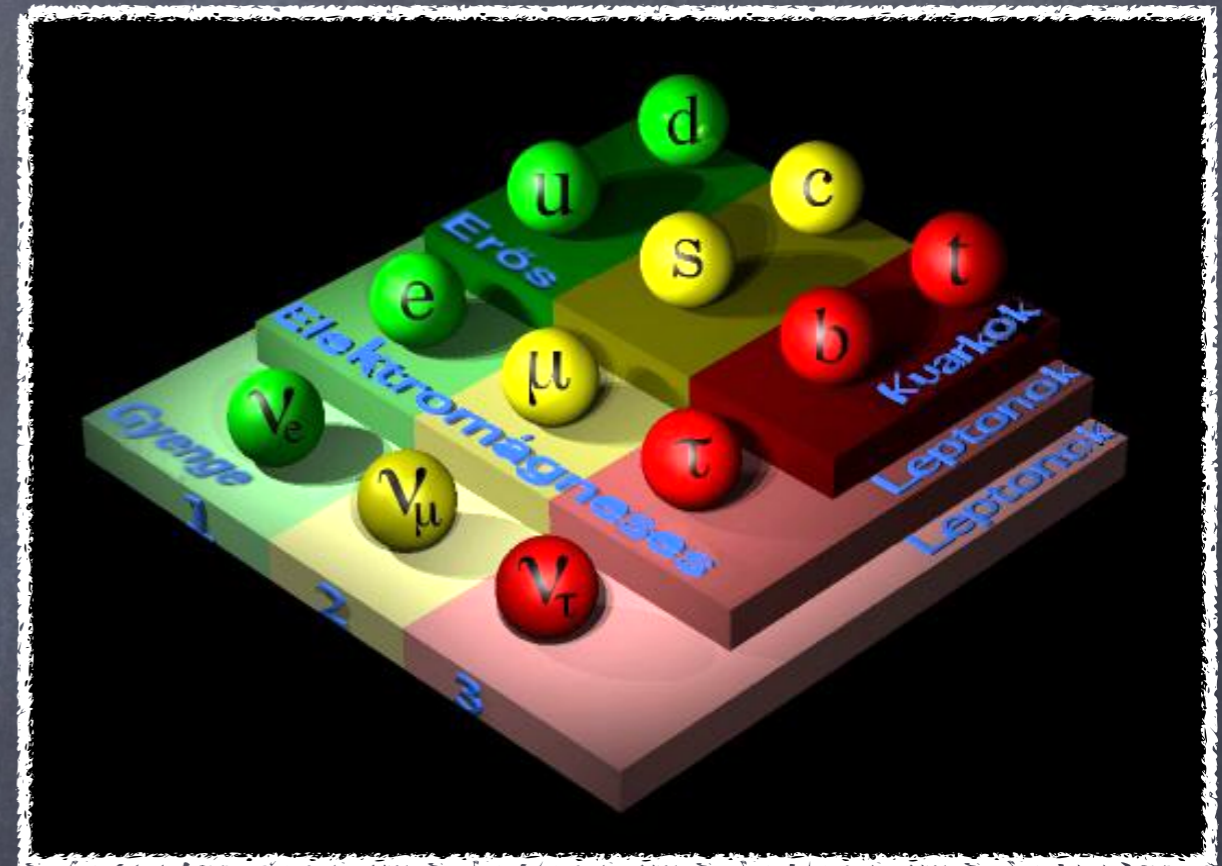
Neutrínó-anyag kölcsönhatás

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**

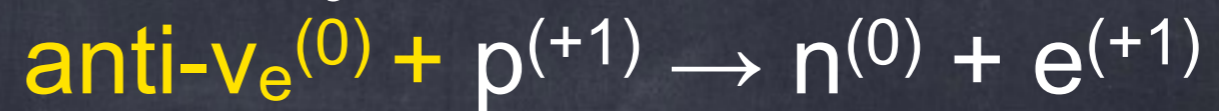


Neutrínó-anyag kölcsönhatás

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**

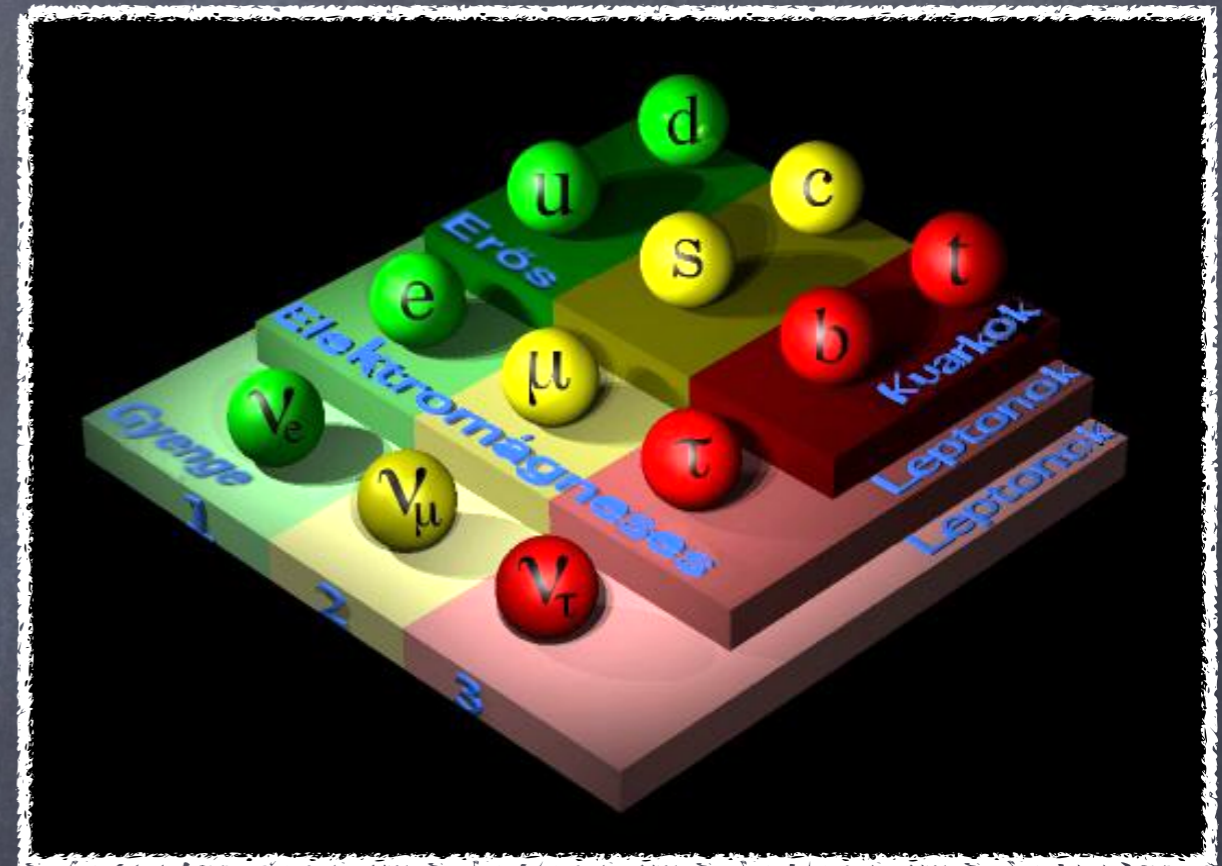


reaktorok közelében van ilyen sok neutrínó:

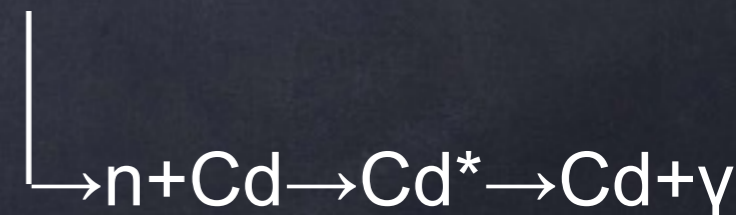
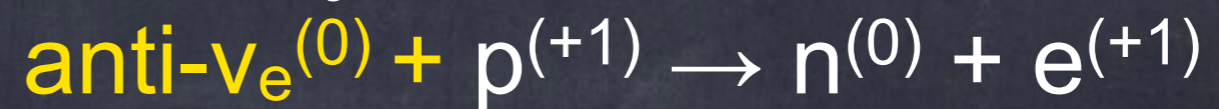


Neutrínó-anyag kölcsönhatás

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**

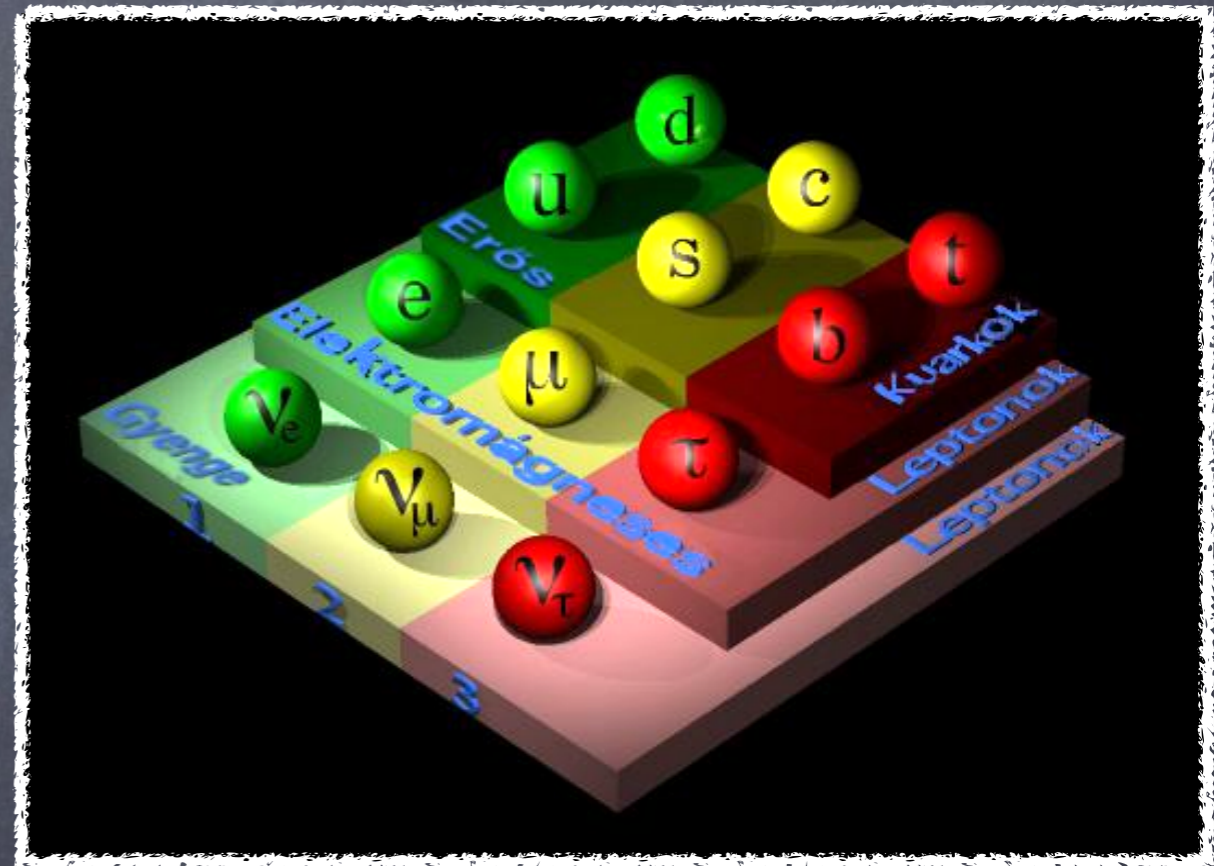


reaktorok közelében van ilyen sok neutrínó:

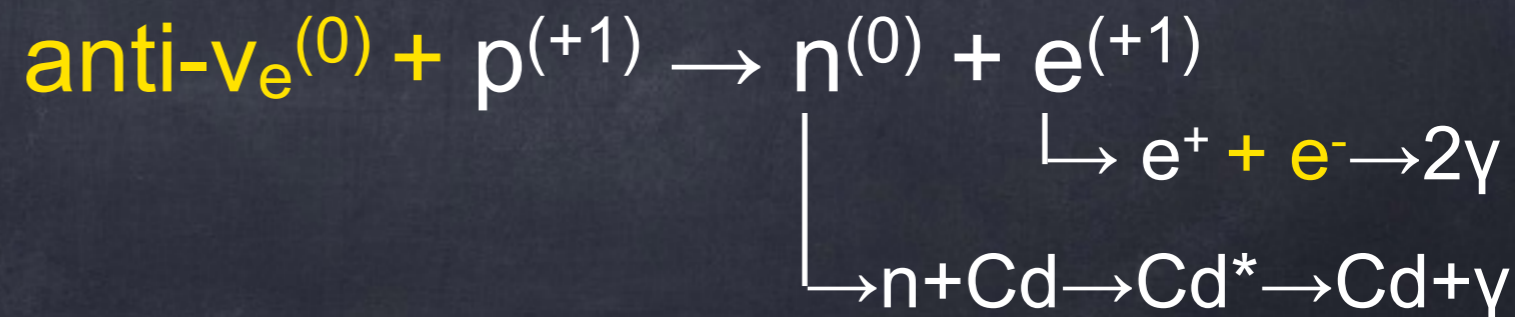


Neutrínó-anyag kölcsönhatás

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**



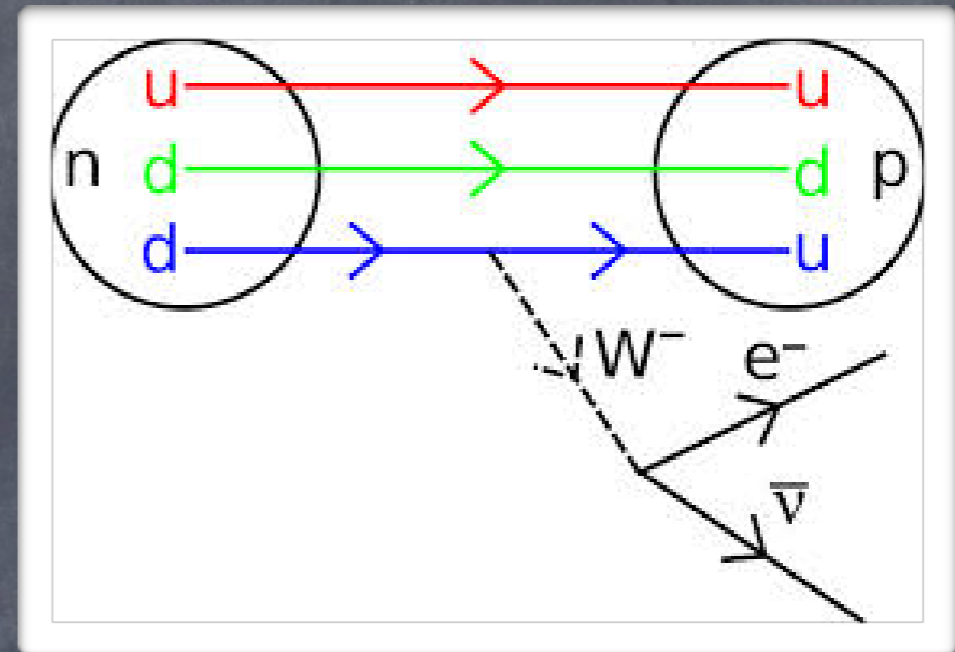
reaktorok közelében van ilyen sok neutrínó:



Neutrínók észlelése

Detektoraink az elektromos erőt érző, vagy a nehéz részecskéket észlelik

β -bomlás elemi szinten:



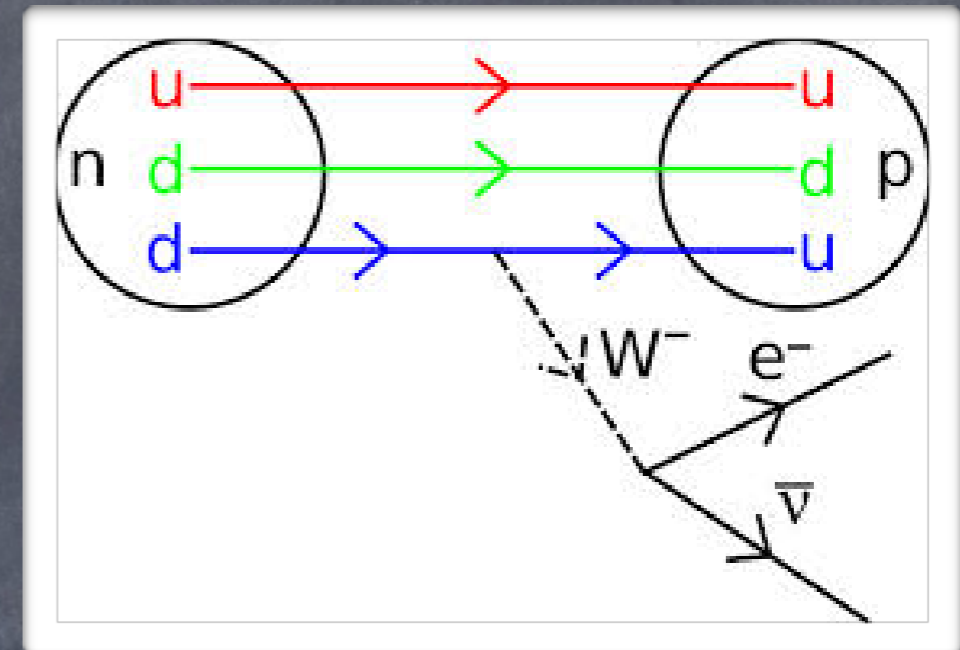
Neutrínók észlelése

Detektoraink az elektromos erőt érző, vagy a nehéz részecskéket észlelik

β -bomlás elemi szinten:



megfordítva, elemi szinten:



észlelt részecskék szintjén:

Neutrínók észlelése

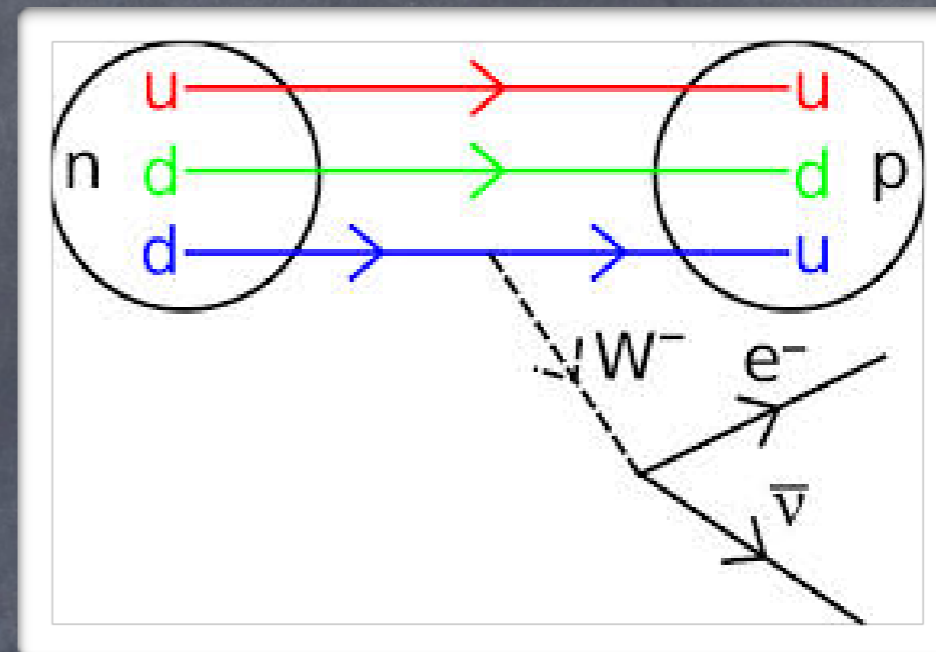
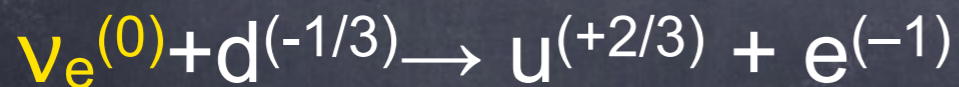
Detektoraink az elektromos erőt érző, vagy a nehéz részecskéket észlelik

β -bomlás elemi szinten:

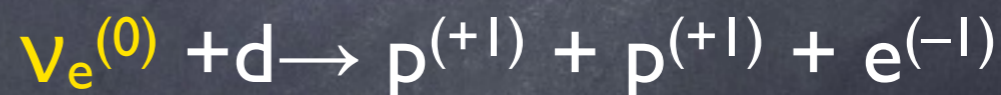


megfordítva, elemi szinten:

töltéscserével (töltött áram kölcsönhatás):



észlelt részecskék szintjén:



Neutrínók észlelése

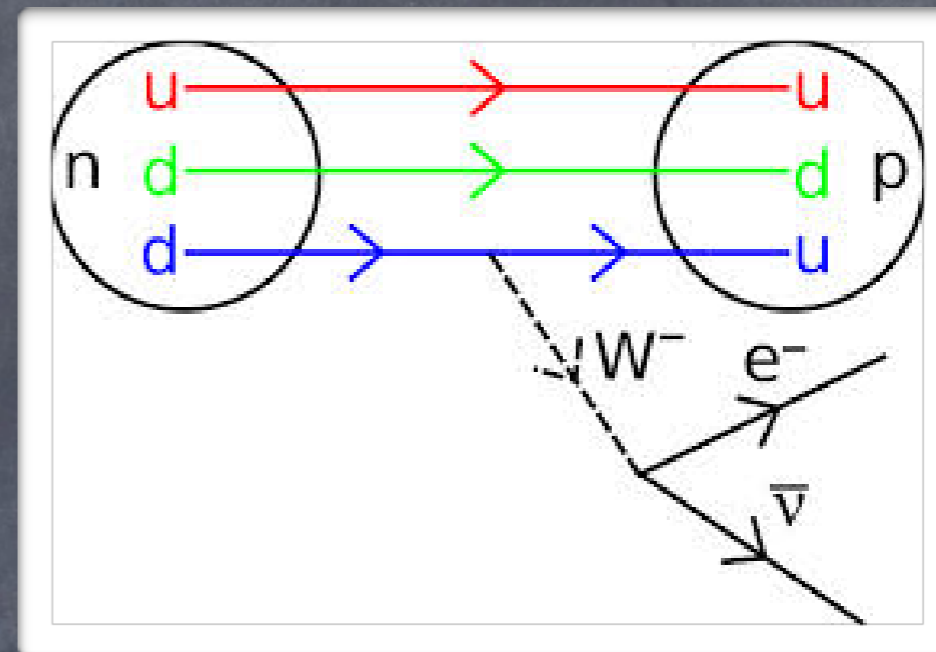
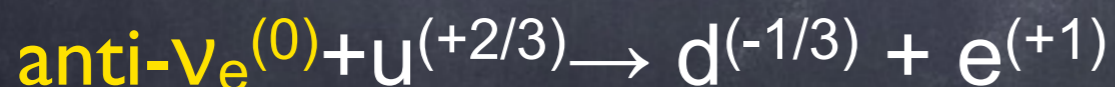
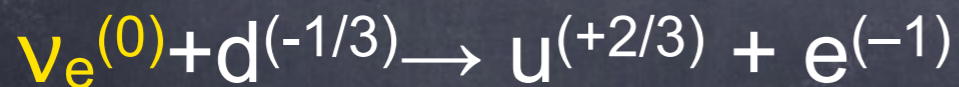
Detektoraink az elektromos erőt érző, vagy a nehéz részecskéket észlelik

β -bomlás elemi szinten:

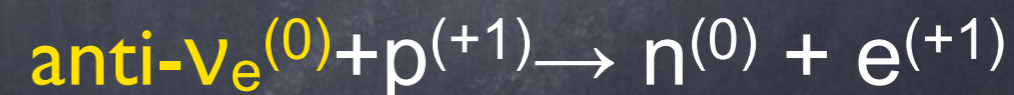
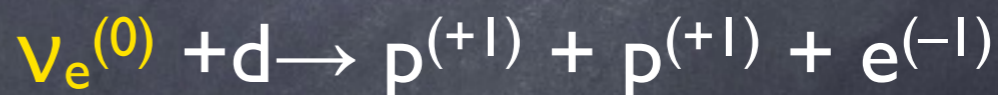


megfordítva, elemi szinten:

töltéscserével (töltött áram kölcsönhatás):



észlelt részecskék szintjén:



Neutrínók észlelése

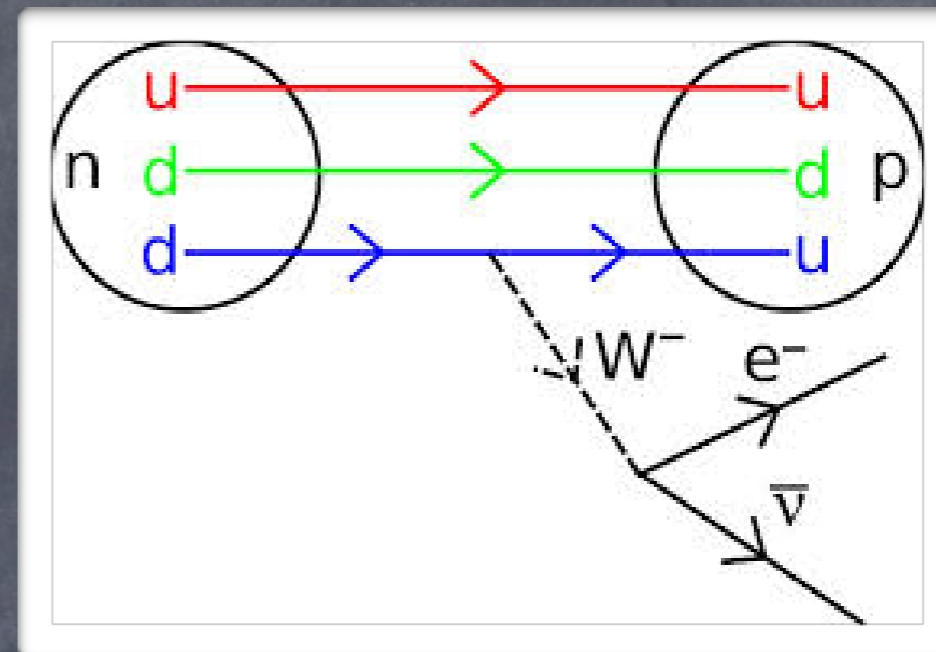
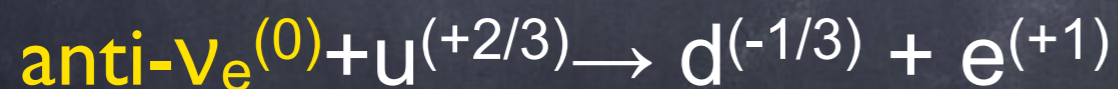
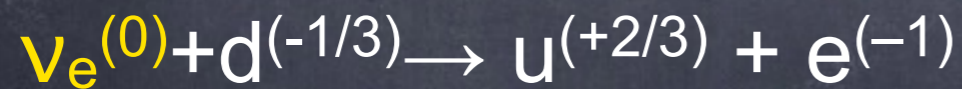
Detektoraink az elektromos erőt érző, vagy a nehéz részecskéket észlelik

β -bomlás elemi szinten:

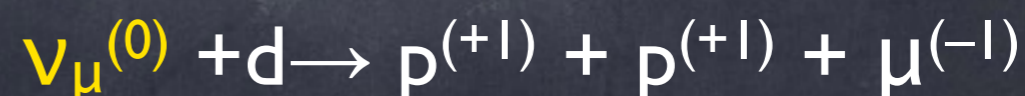
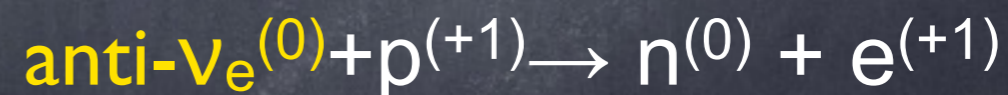
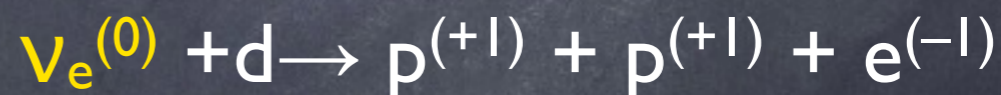


megfordítva, elemi szinten:

töltéscserével (töltött áram kölcsönhatás):



észlelt részecskék szintjén:



Neutrínók észlelése

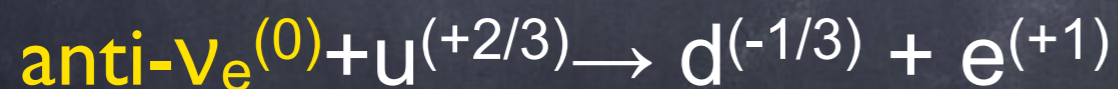
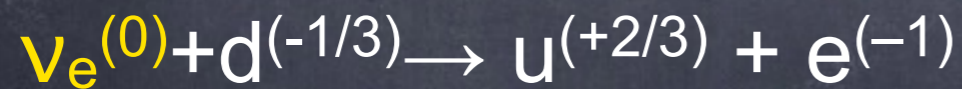
Detektoraink az elektromos erőt érző, vagy a nehéz részecskéket észlelik

β -bomlás elemi szinten:

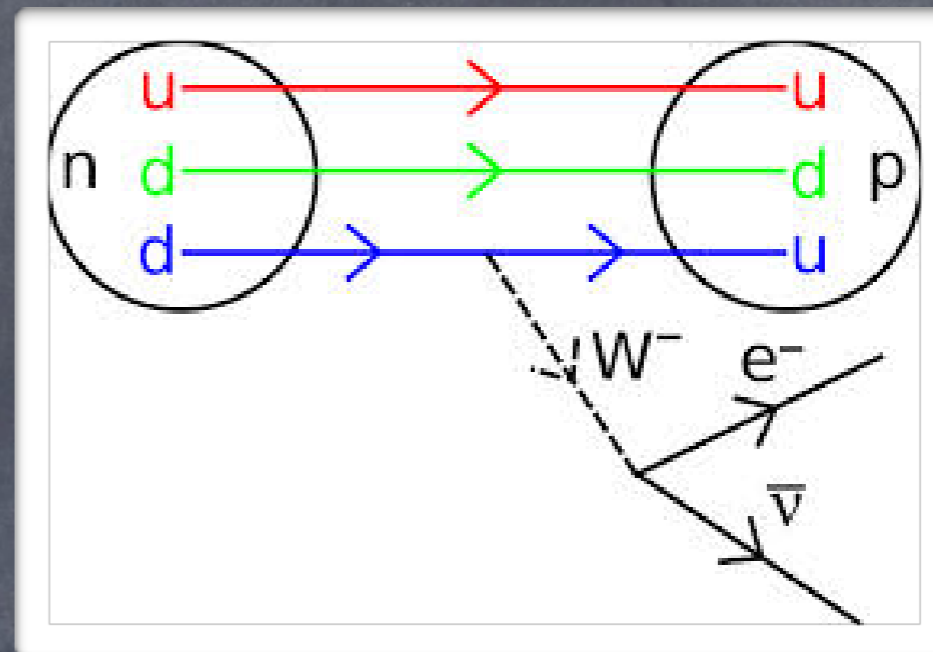
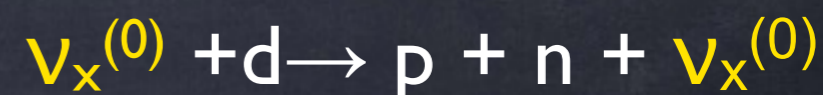
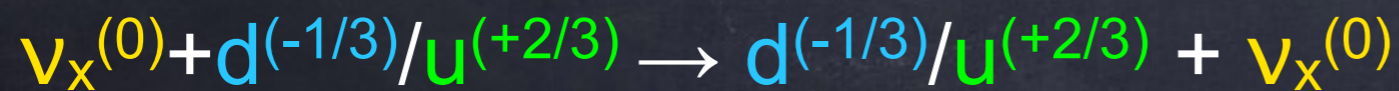


megfordítva, elemi szinten:

töltéscserével (töltött áram kölcsönhatás):



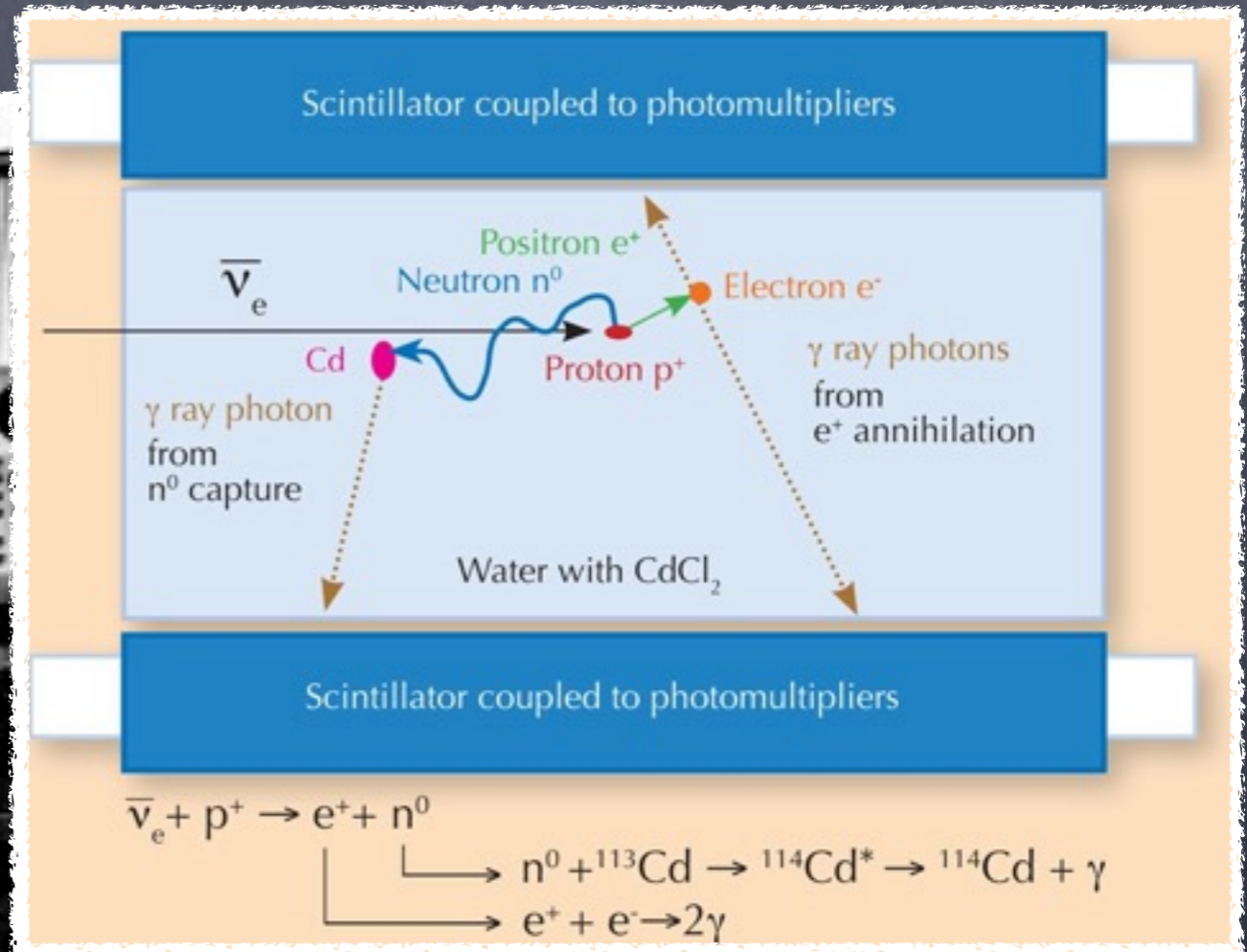
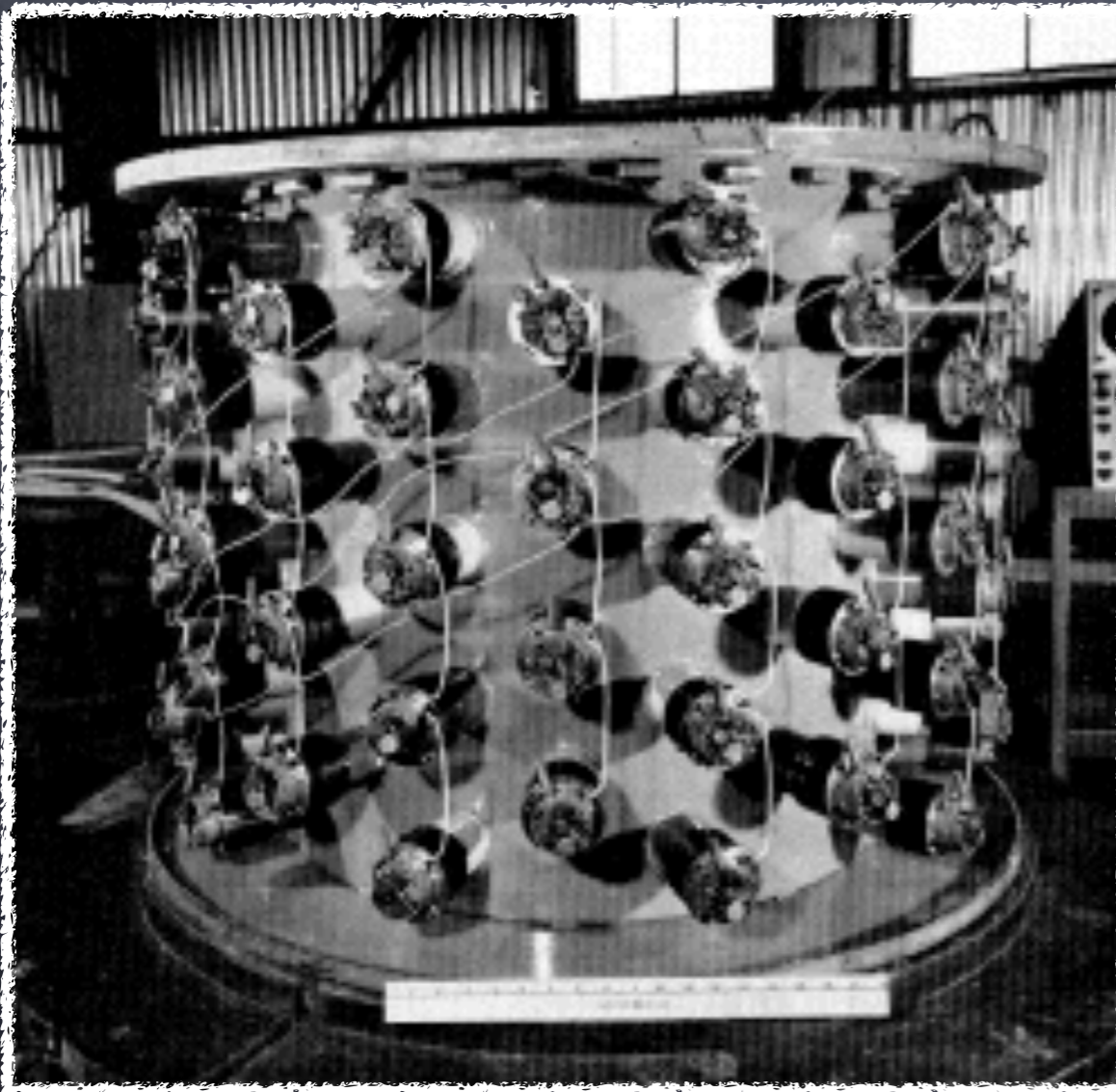
töltéscsere nélkül (semleges áram kölcsönhatás):



észlelt részecskék szintjén:

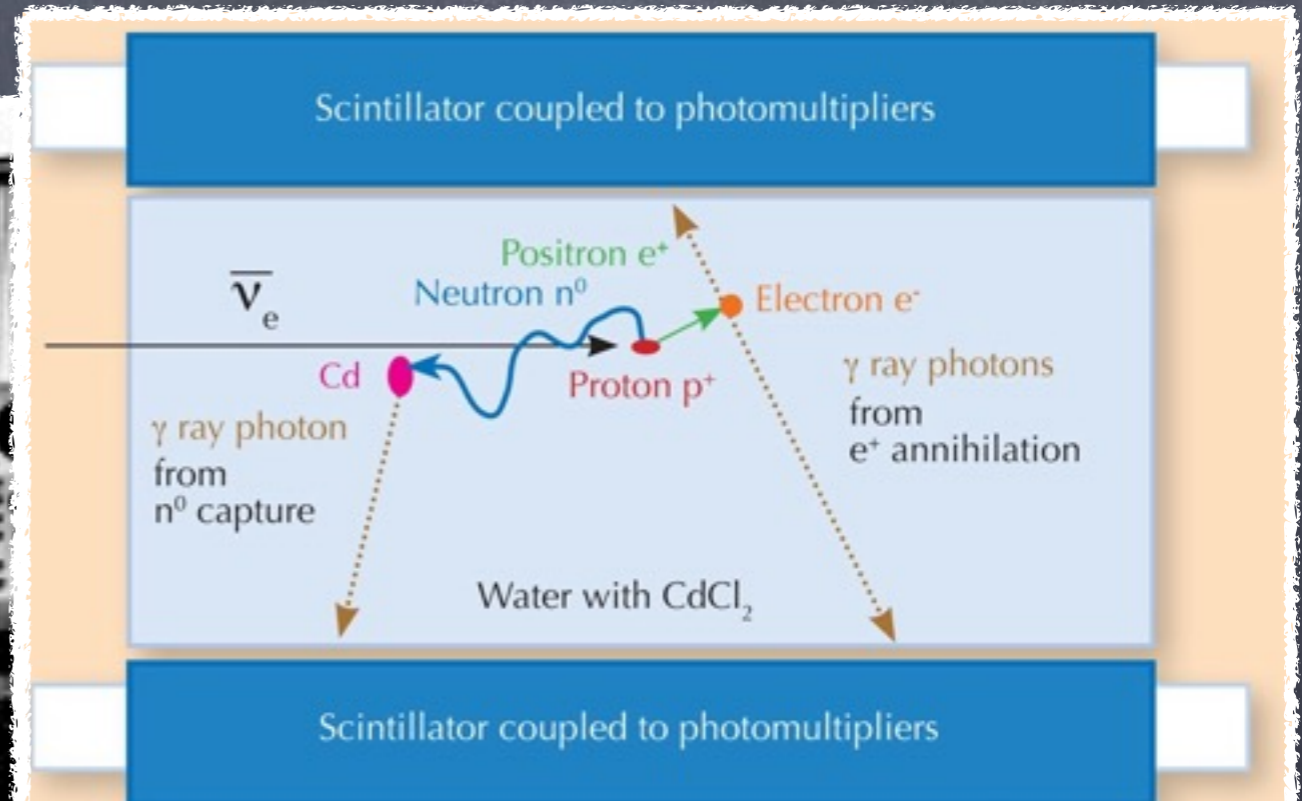
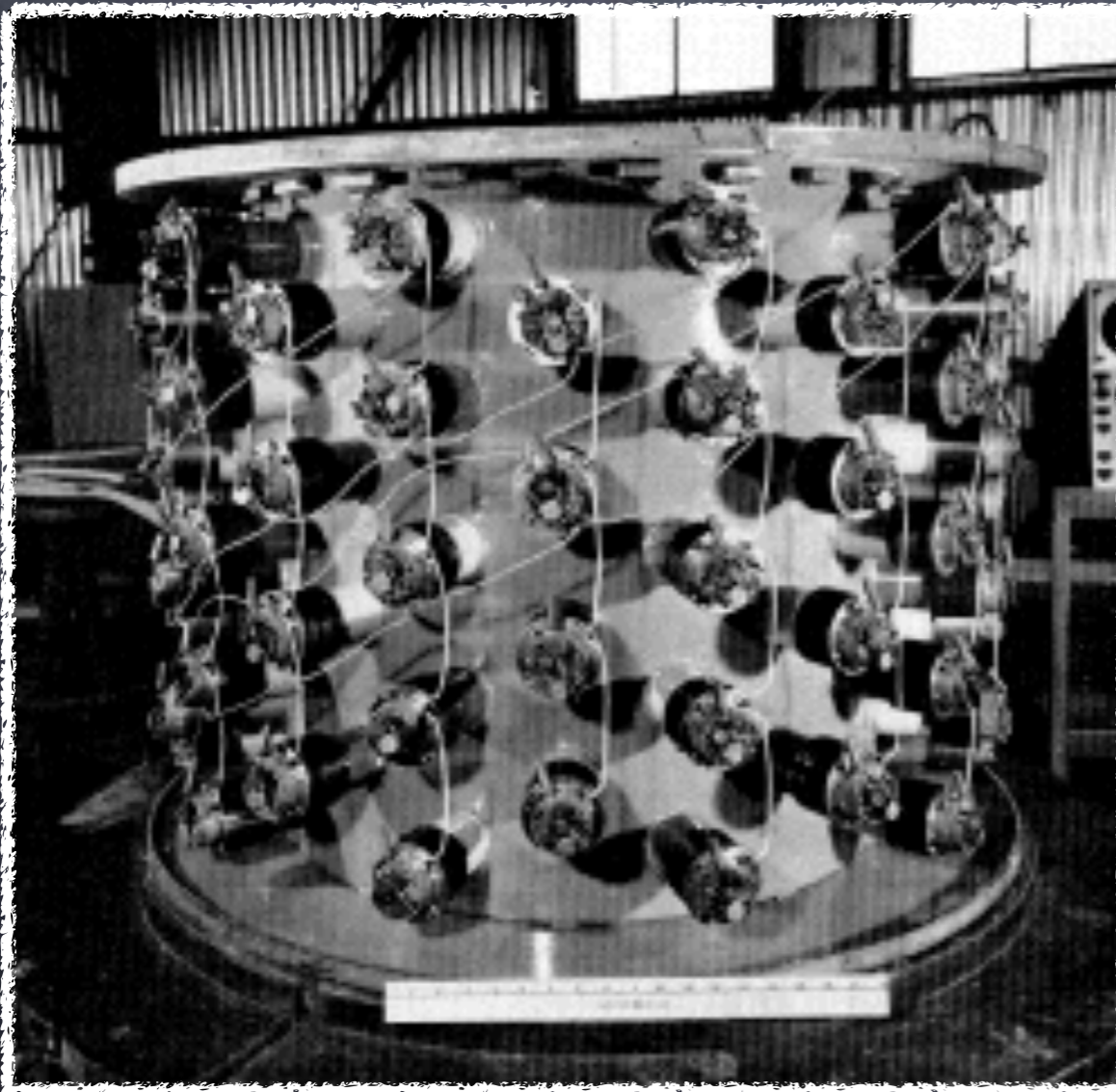
Reines-Cowan kísérlet (1956)

Savannah riveri atomreaktor közelében CdCl₂ oldattal töltött tartály:



Reines-Cowan kísérlet (1956)

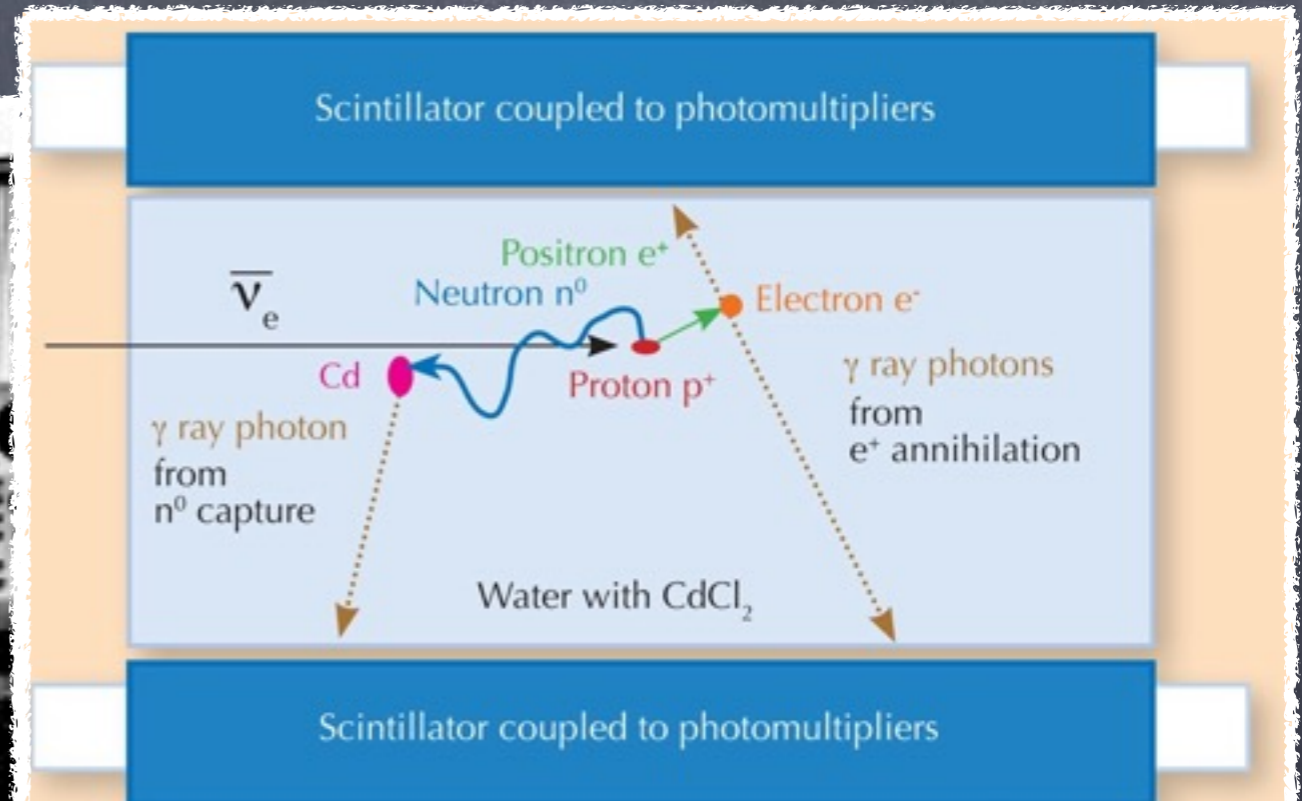
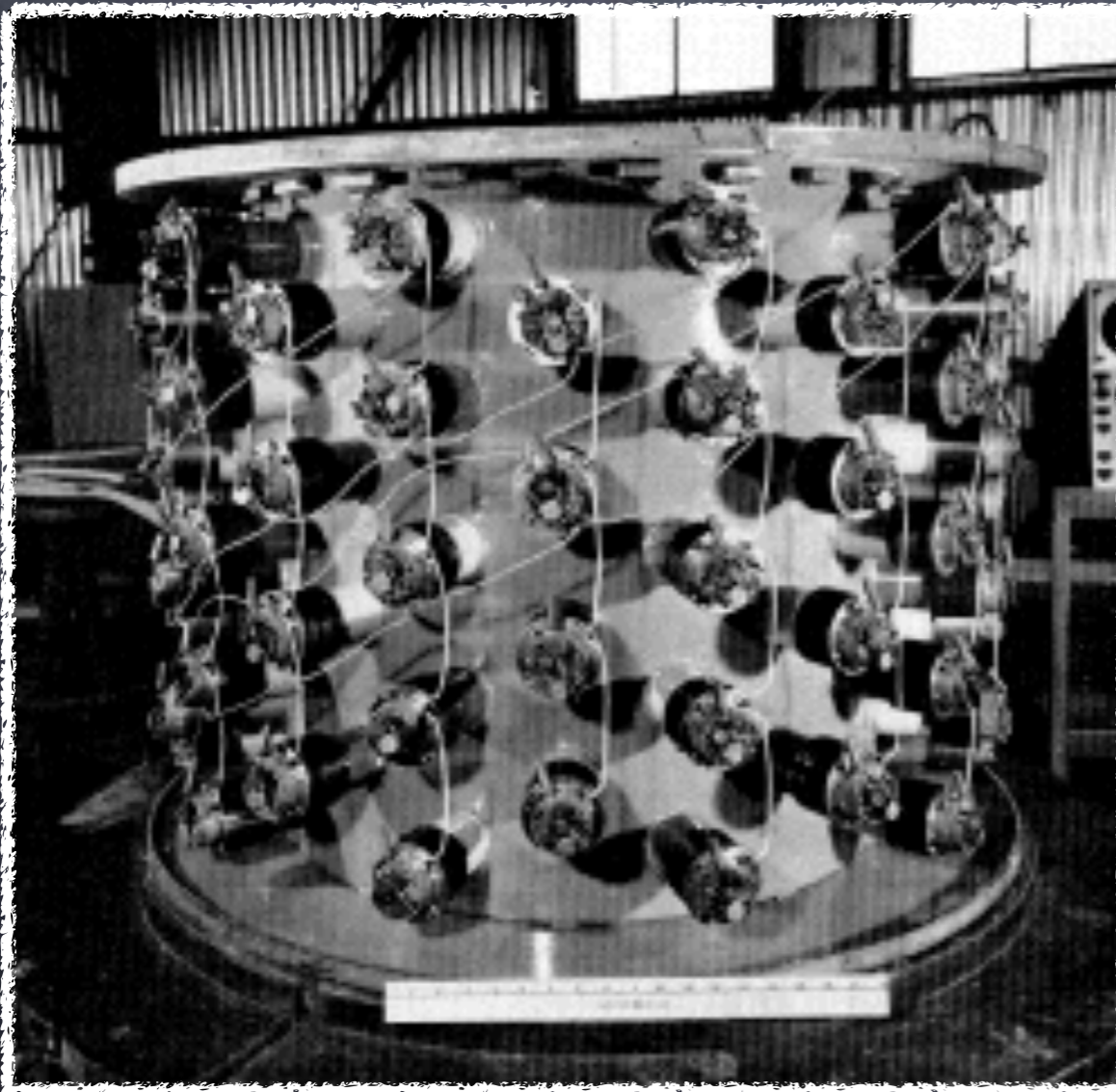
Savannah riveri atomreaktor közelében CdCl₂ oldattal töltött tartály:



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

Reines-Cowan kísérlet (1956)

Savannah riveri atomreaktor közelében CdCl₂ oldattal töltött tartály:

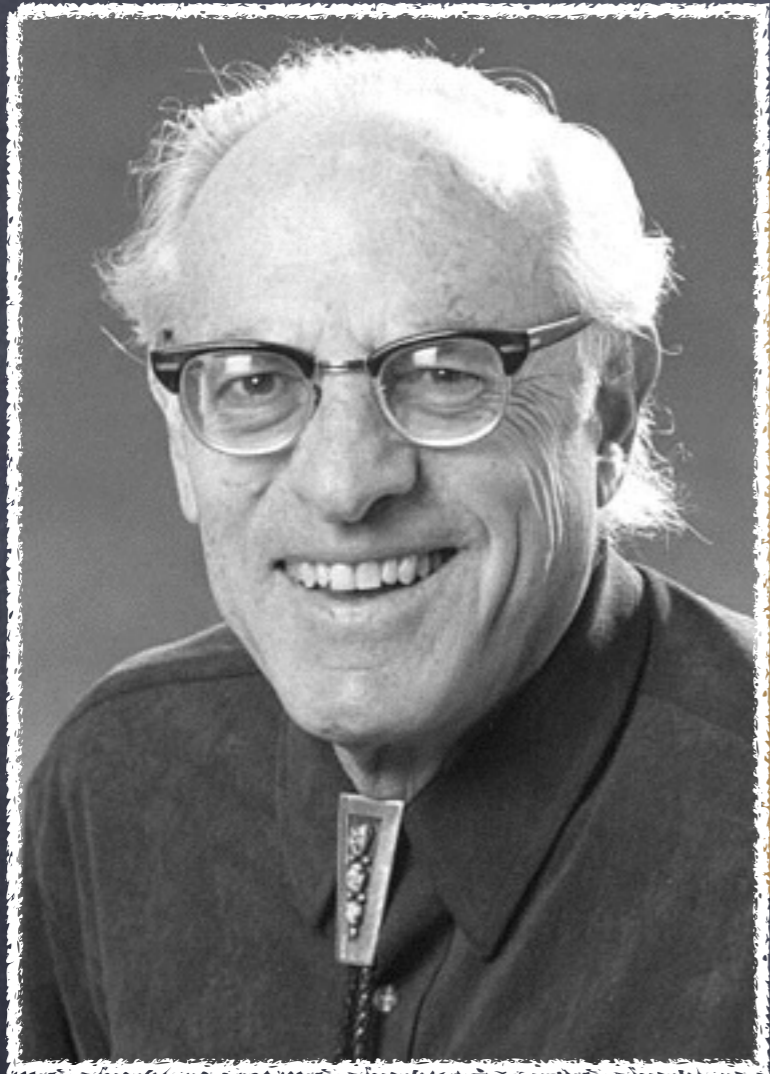


hatáskeresztmetszet:

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)

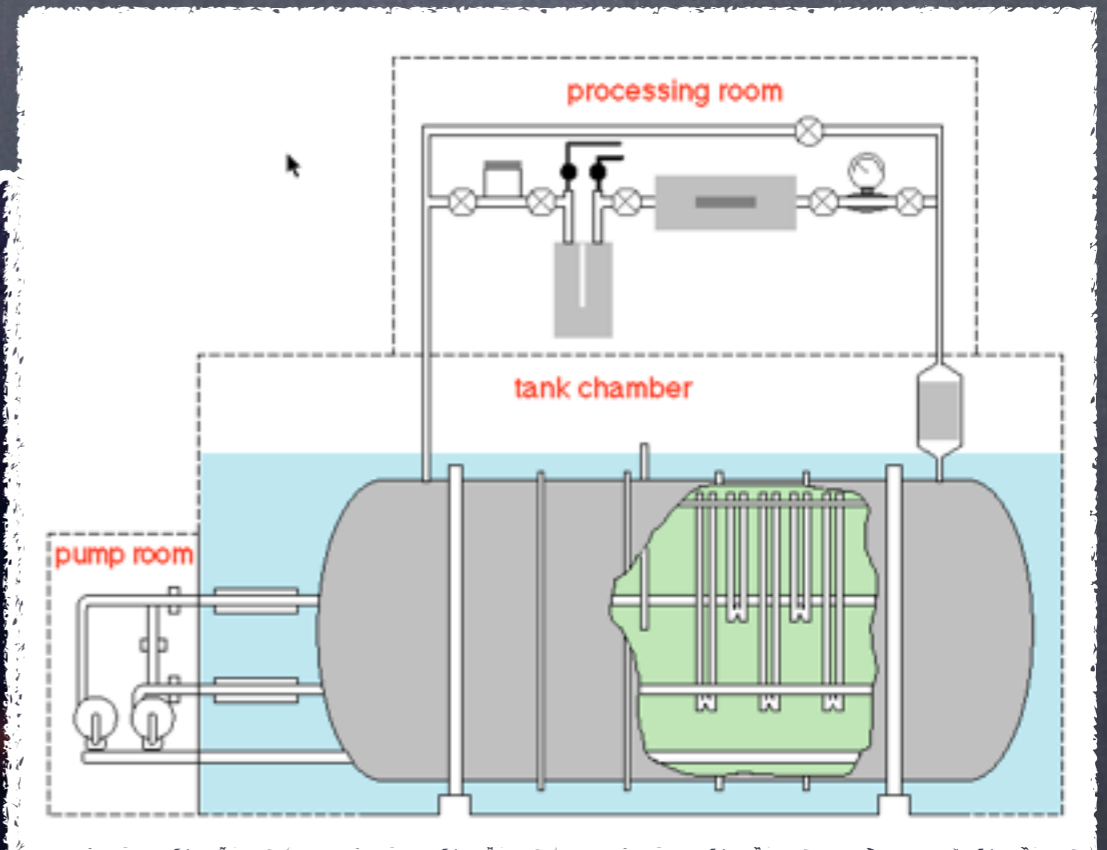
a „neutrínó létezésének közvetlen kimutatásáért”

Davis Kísérlete (1968-1993)

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

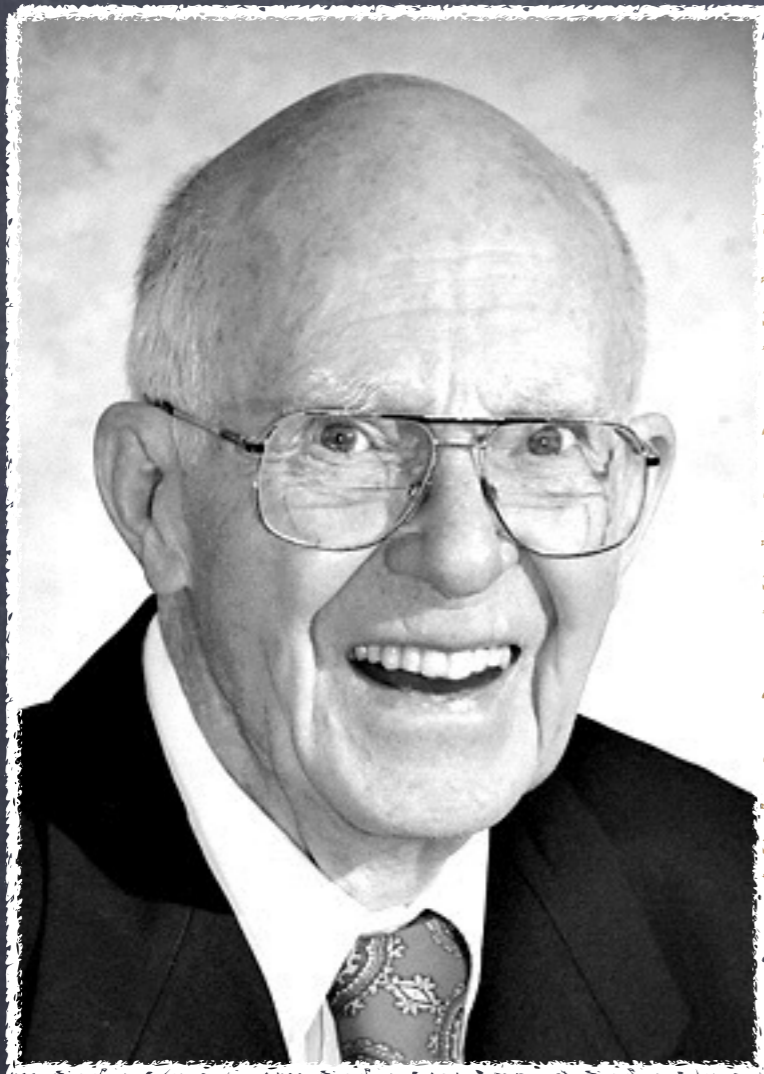


Eseményszám egysége: **1 SNU**
= 1 esemény/ 10^{36} Cl mag/sec



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)

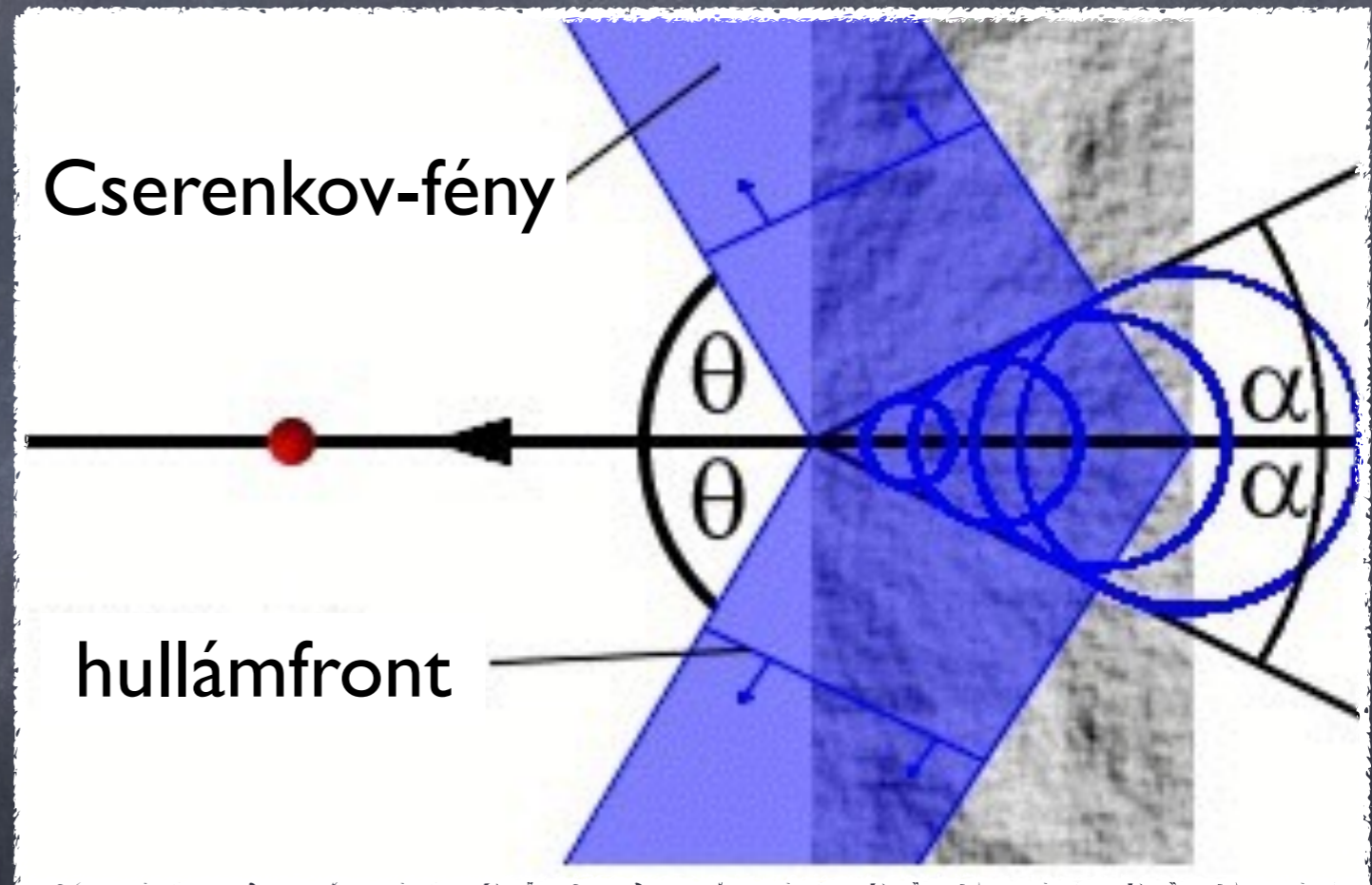
Masatoshi Koshiro
(1926-)

a „ kozmikus eredetű neutrínók észleléséért”

Cserenkov-sugárzás

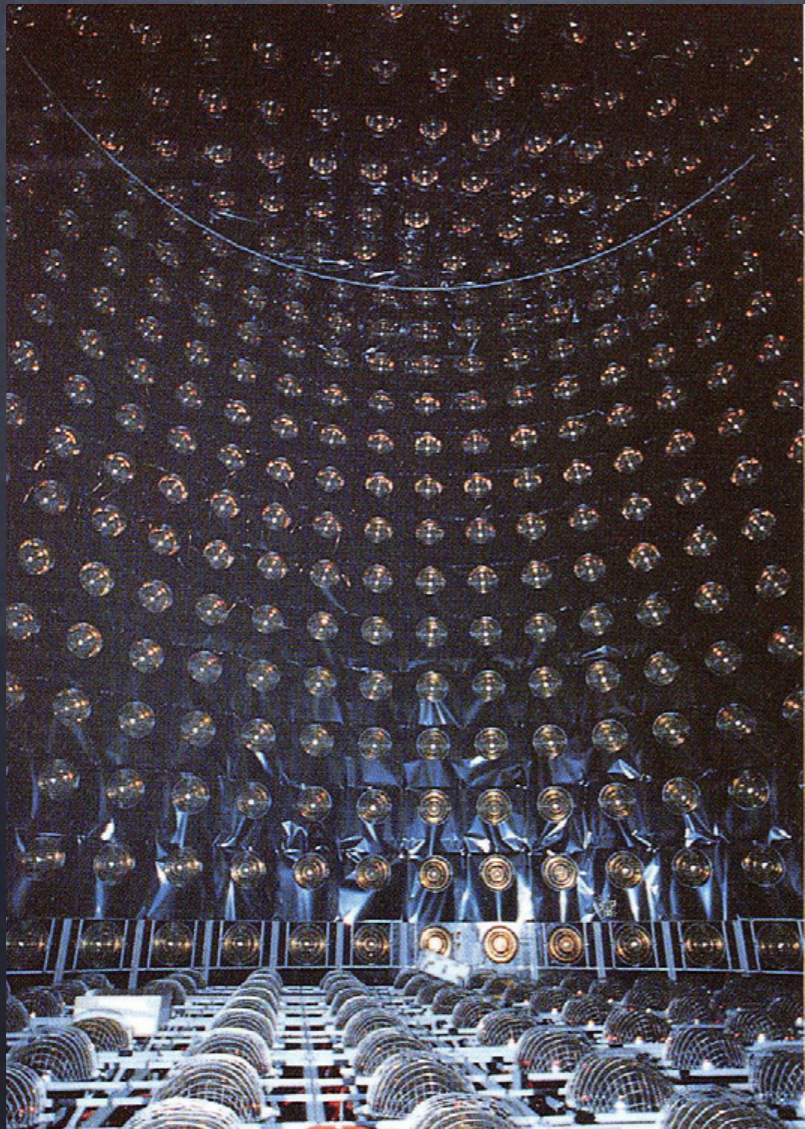


Cserenkov-sugárzás



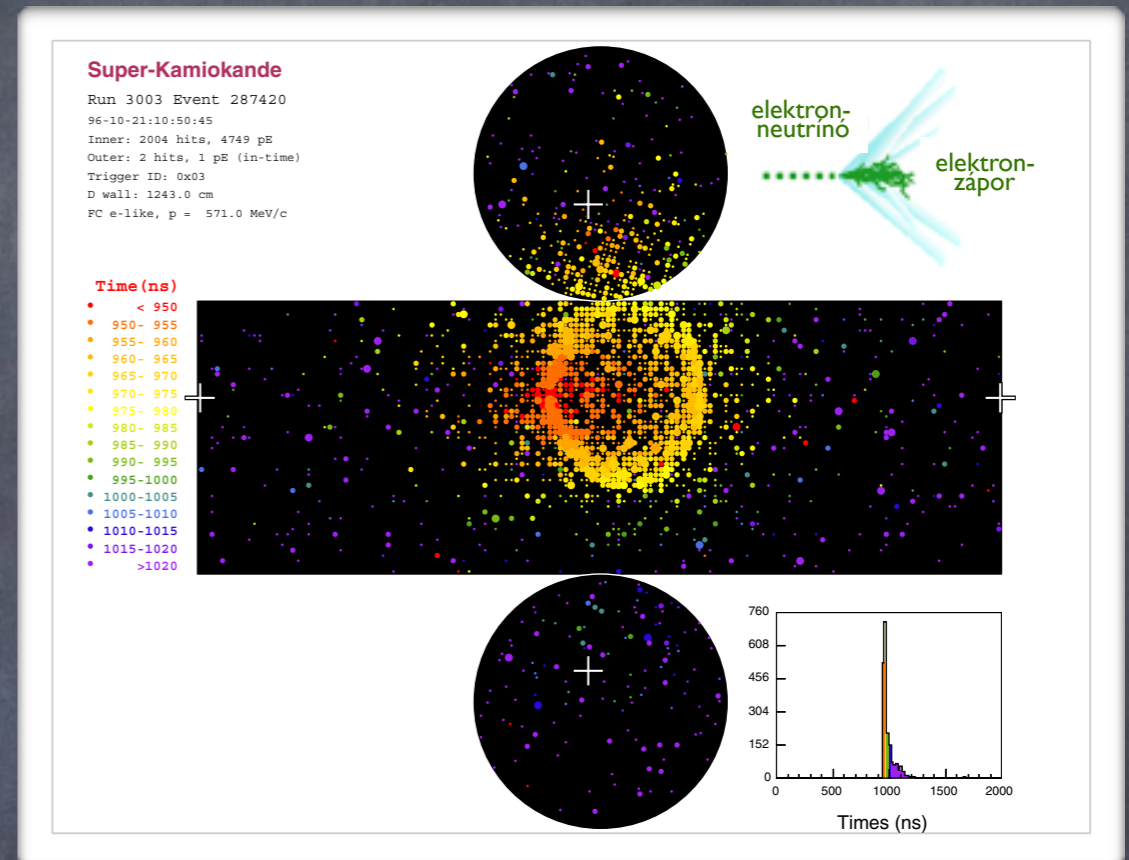
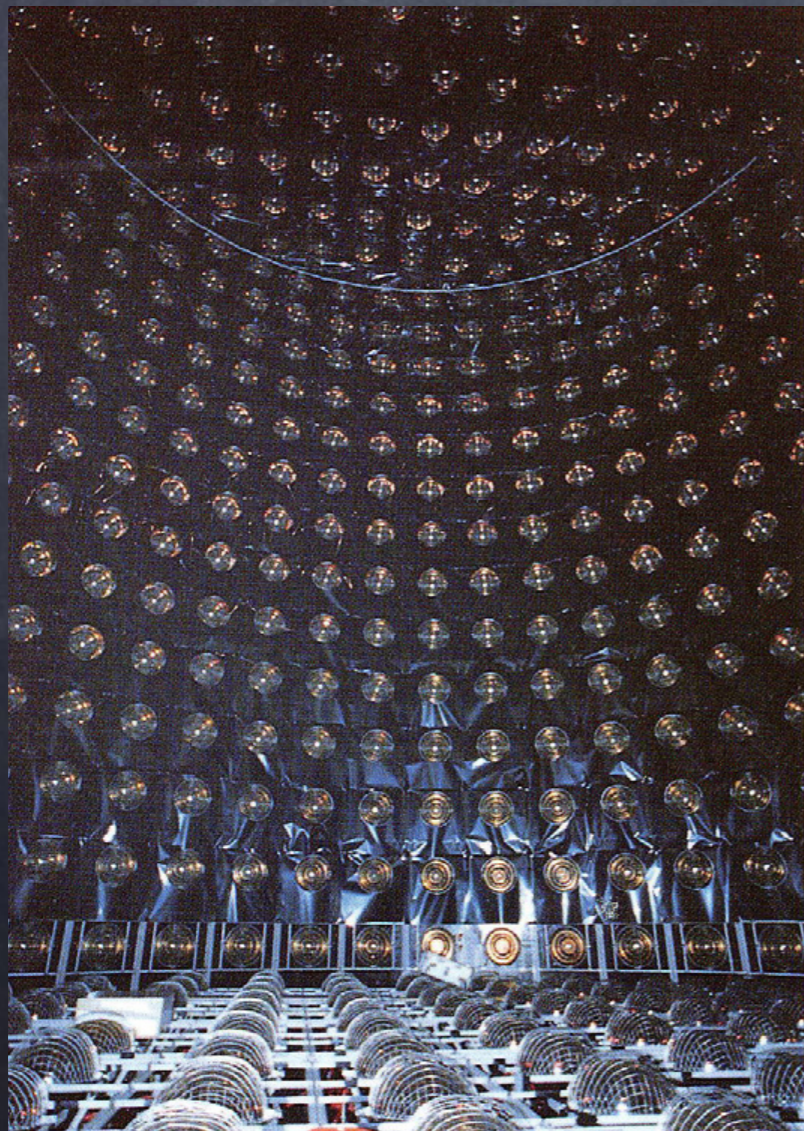
Kamiokande-II detektor

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



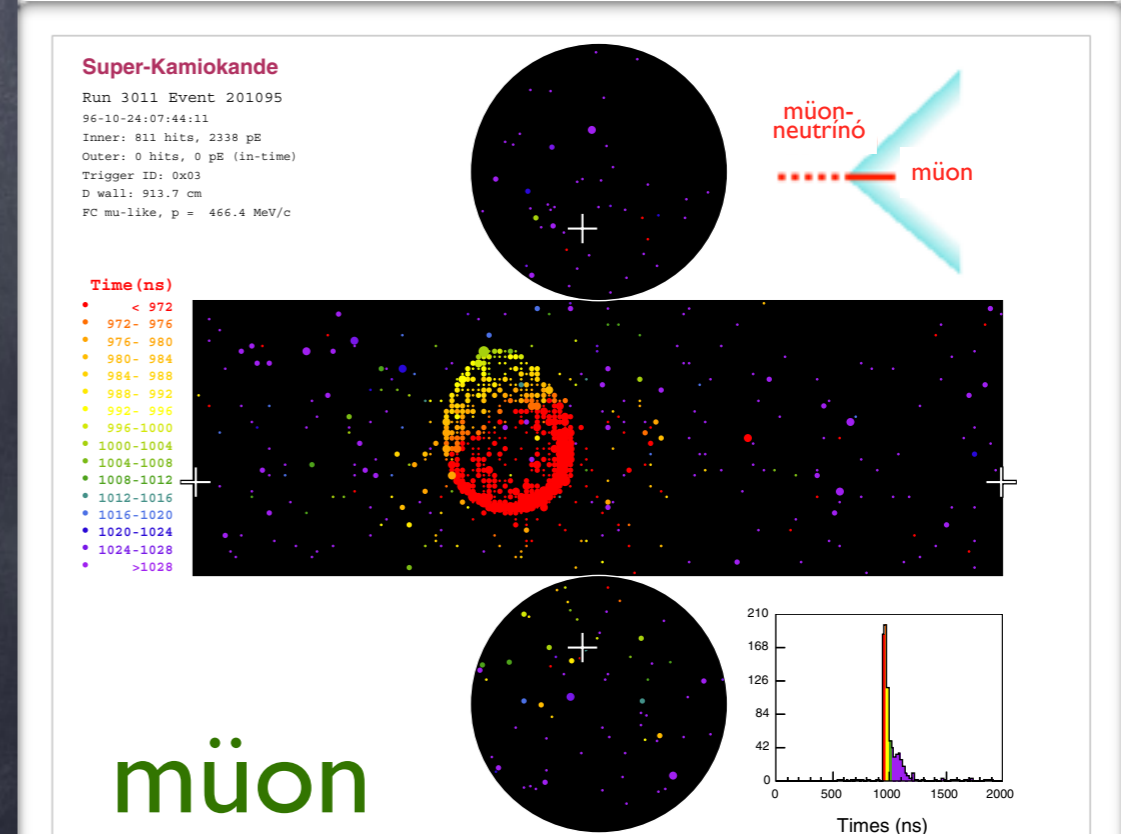
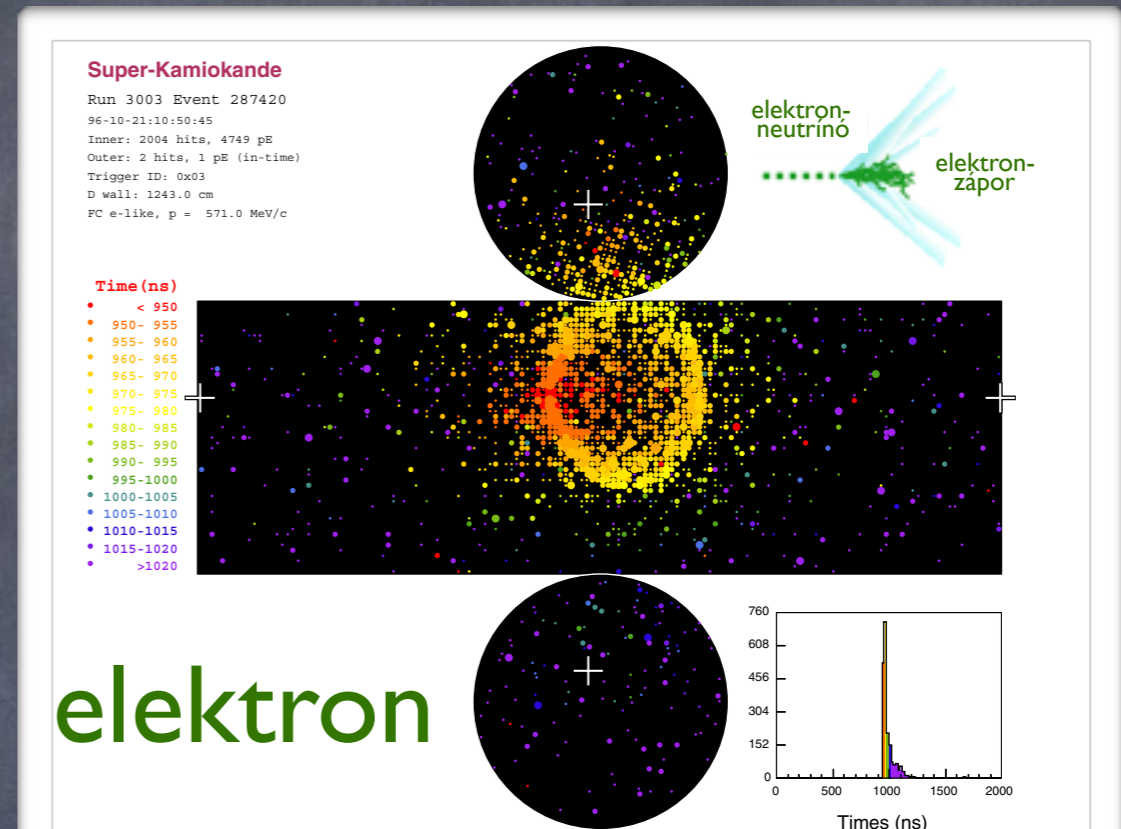
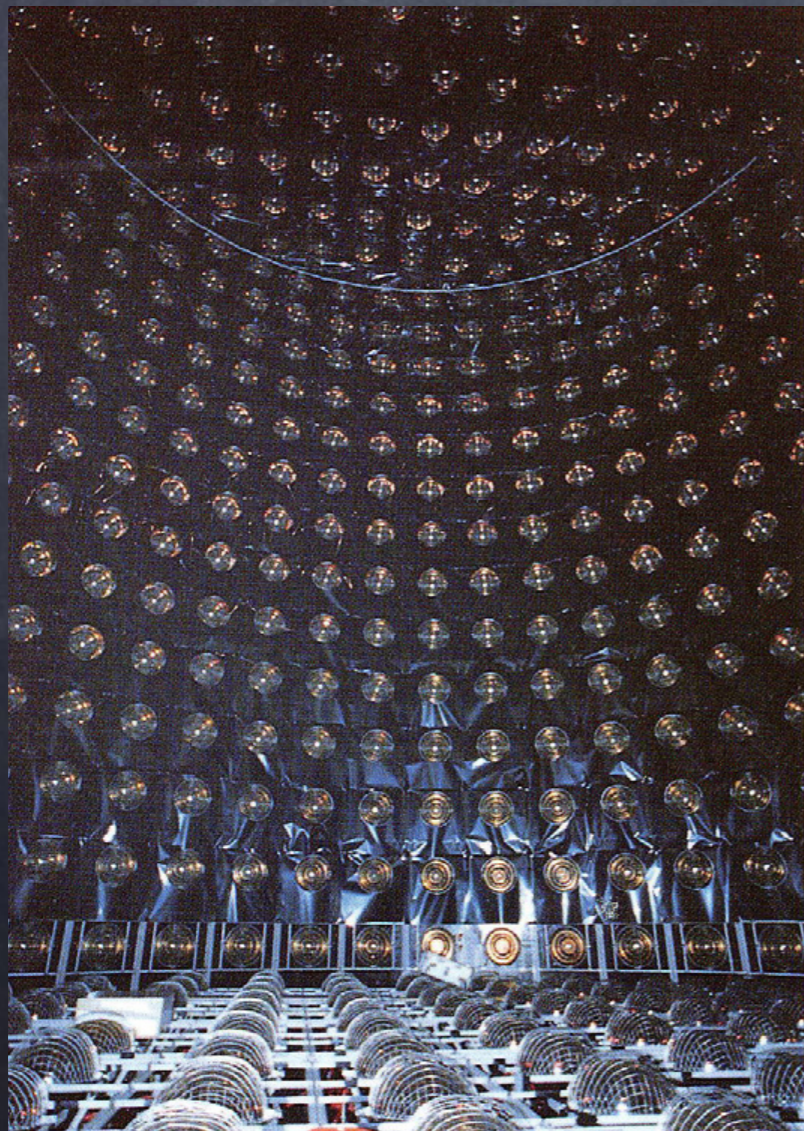
Kamiokande-II detektor

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

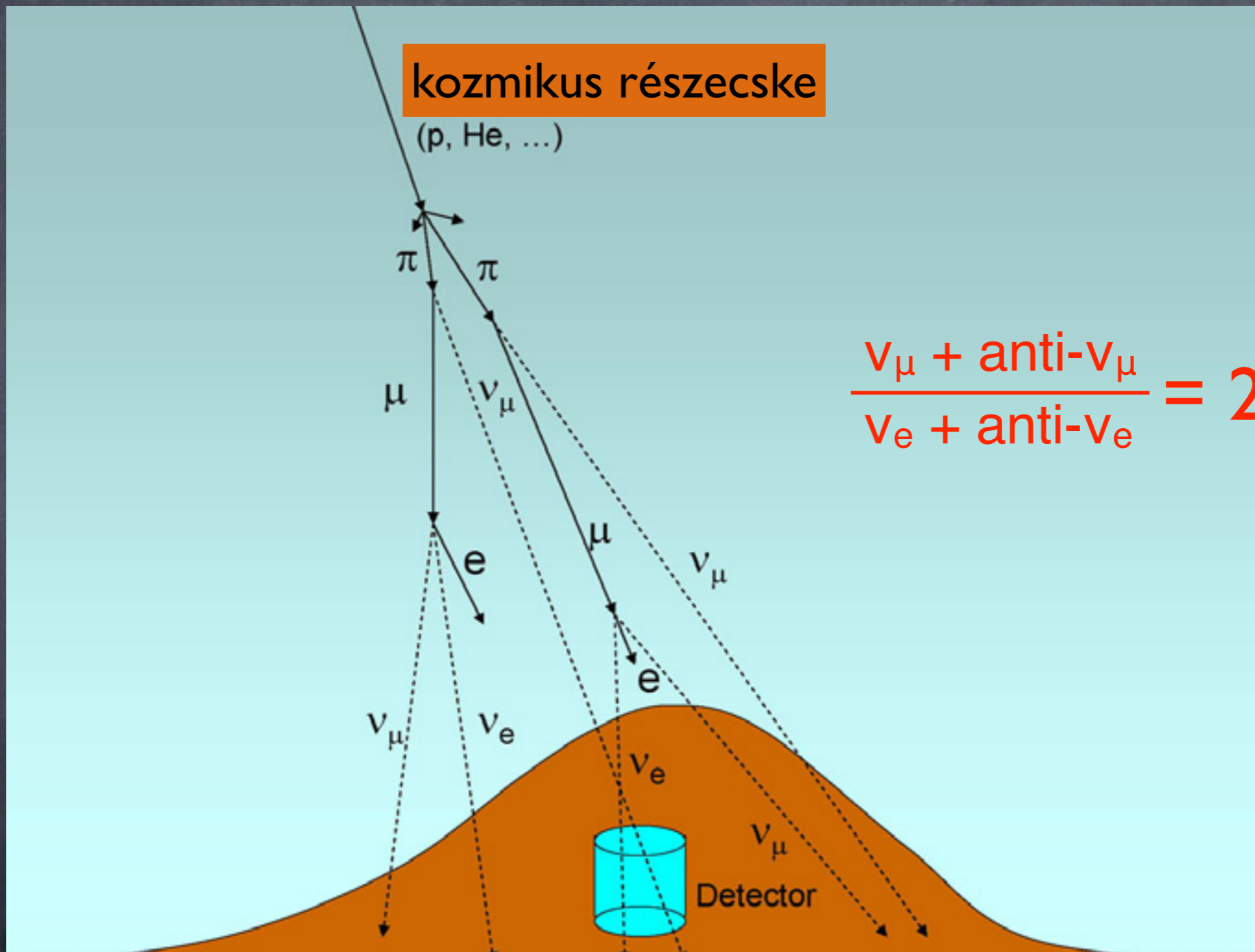


Kamiokande-II detektor

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



Légköri neutrínók rejtélye

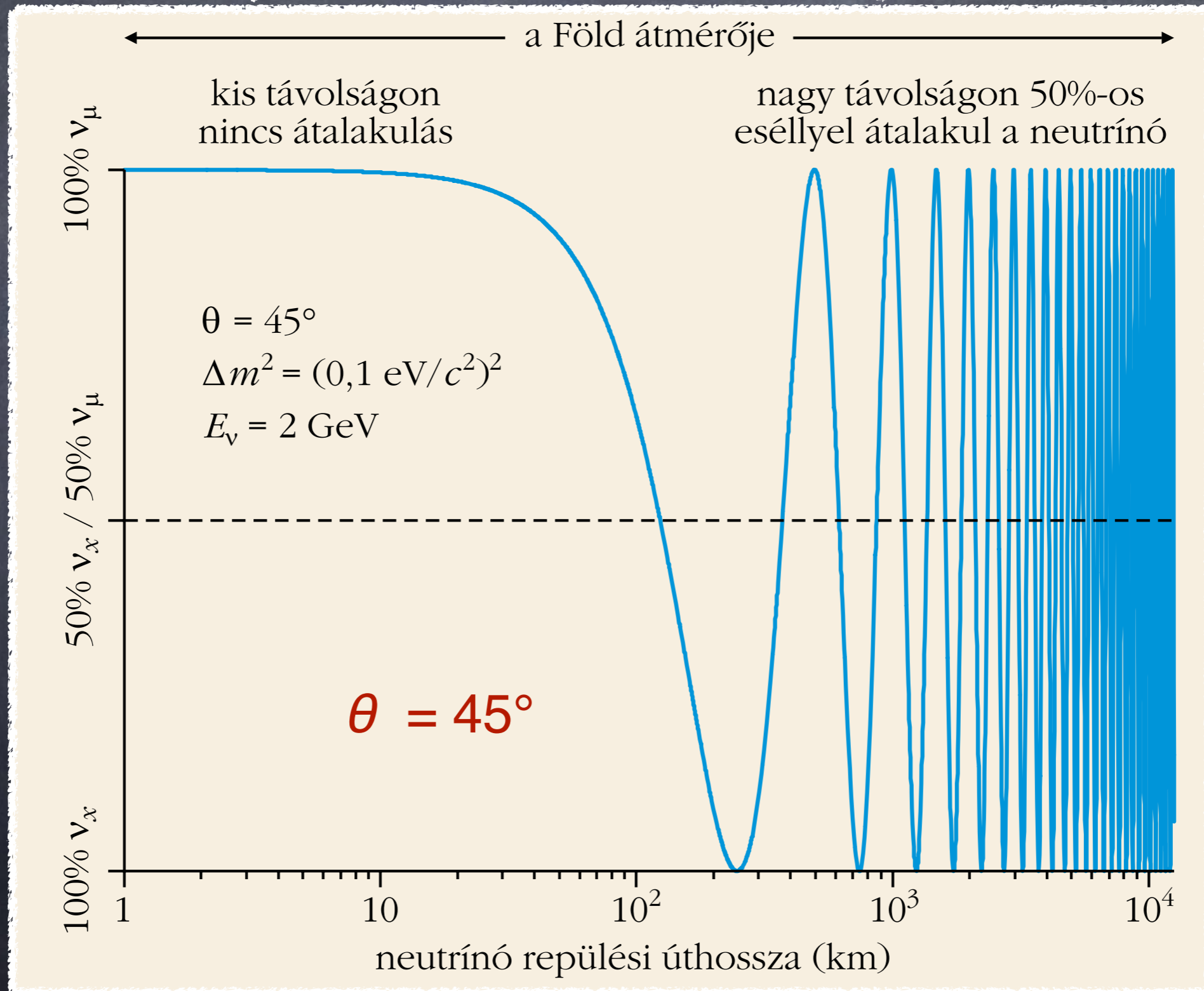


$$\frac{\nu_{\mu} + \text{anti-}\nu_{\mu}}{\nu_e + \text{anti-}\nu_e} = 2$$

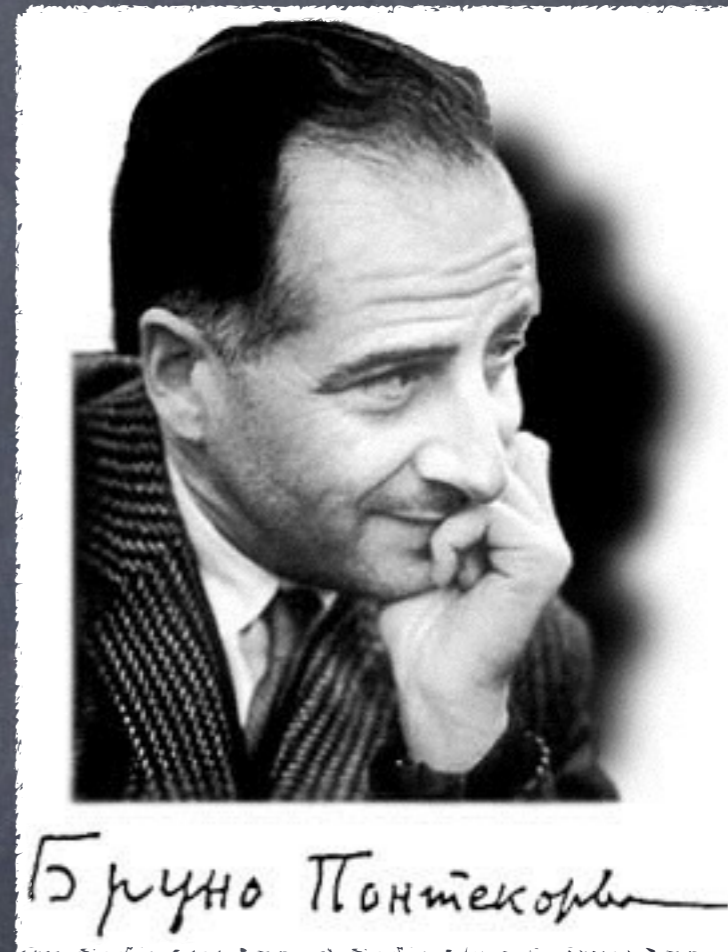
	adat	elmélet
elektron események	$93,0 \pm 9,6$	88,5
müion események	$85,2 \pm 9,2$	144,0

A rejtélyek magyarázata az ízrezgés

a neutrínók repülésük közben egymásba alakulnak

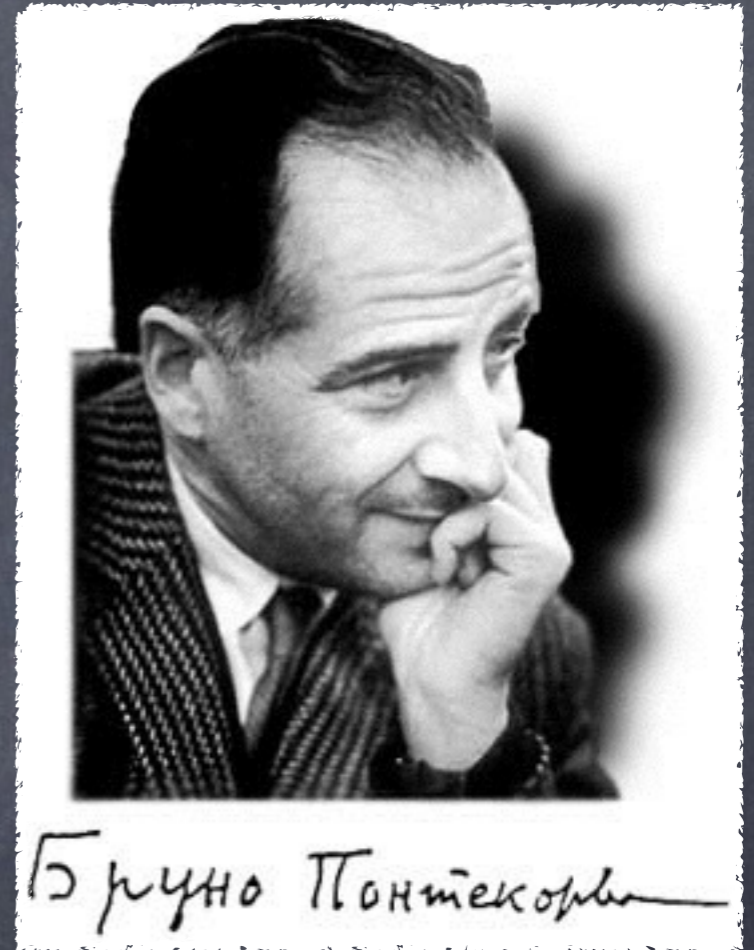


Pontecorvo felvétele



Pontecorvo felvetése

- a különböző fajtajú (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



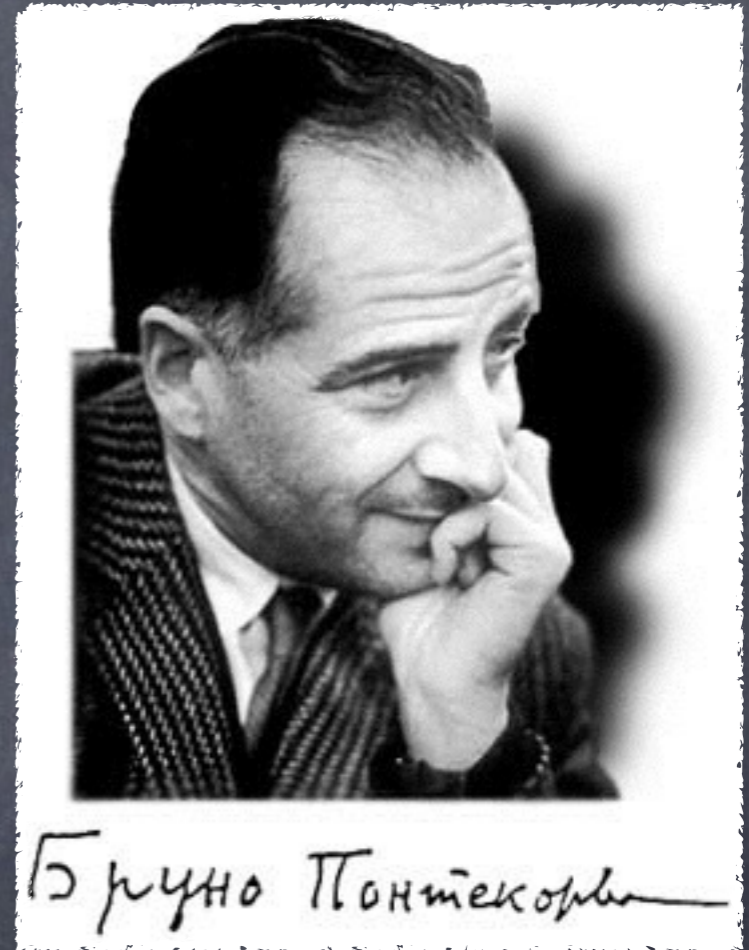
Бруно Понтекорво

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 mi 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 θ szöge megszabja hogy mennyi az i és j tömegkomponensek részesedése ν_μ -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 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

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

Neutrínó-ízrengés

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-ízrengés

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

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

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

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

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

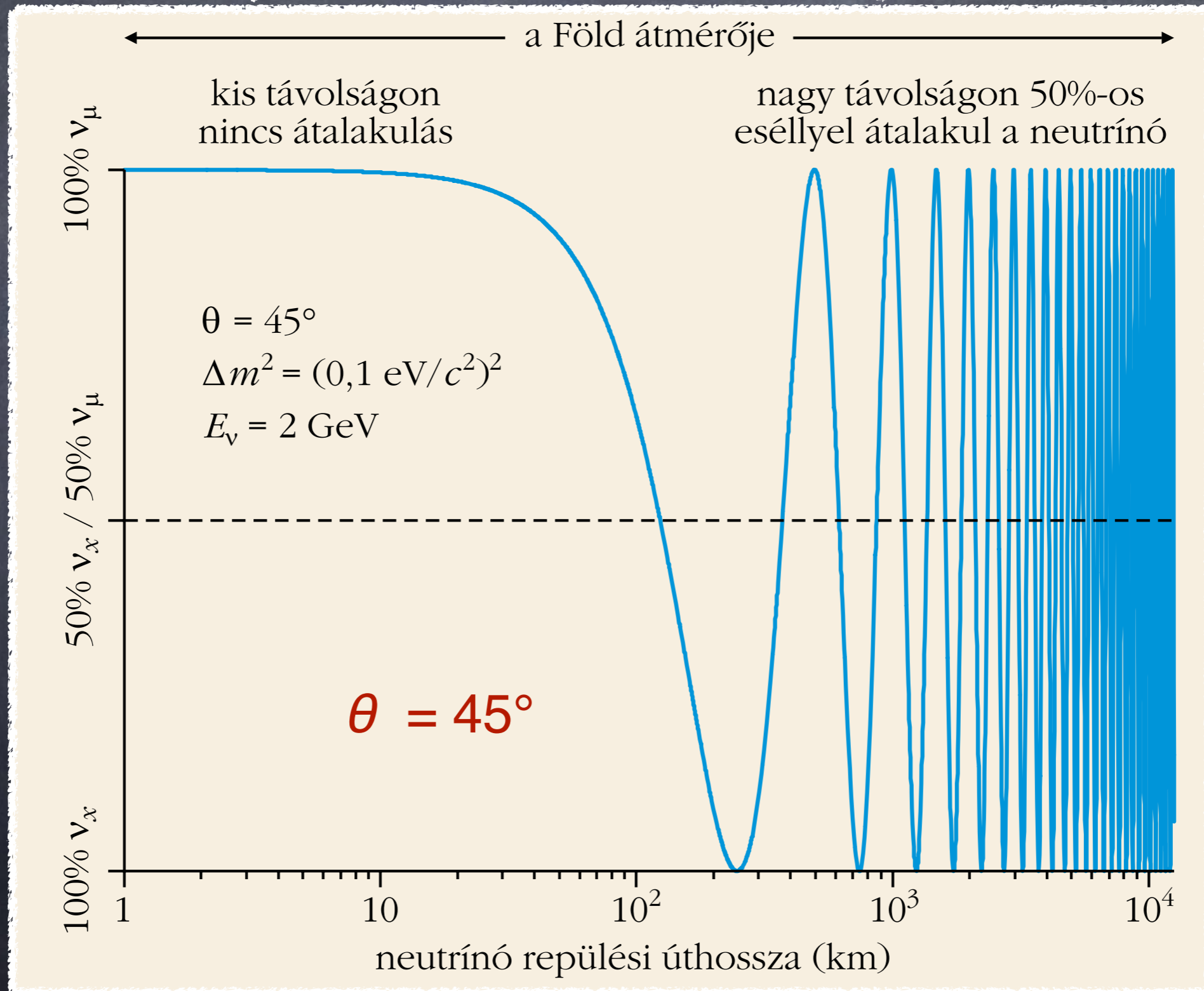
- $L = 1,24 \text{ km}$ -en teljes átalakulás
- tízszer nagyobb neutrínó energia esetén tízszer ekkora távolságra van szükség
- $\Delta m^2 = (0,1 \text{ eV}/c^2)^2$ esetén százszor nagyobbra

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

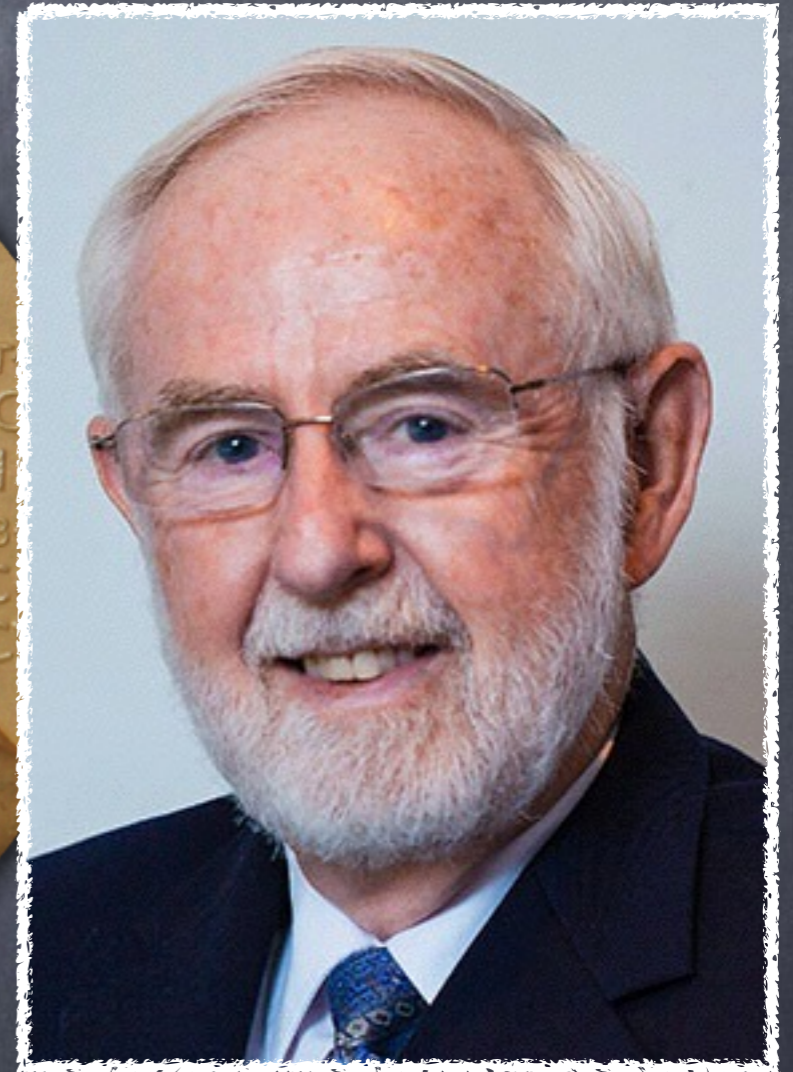
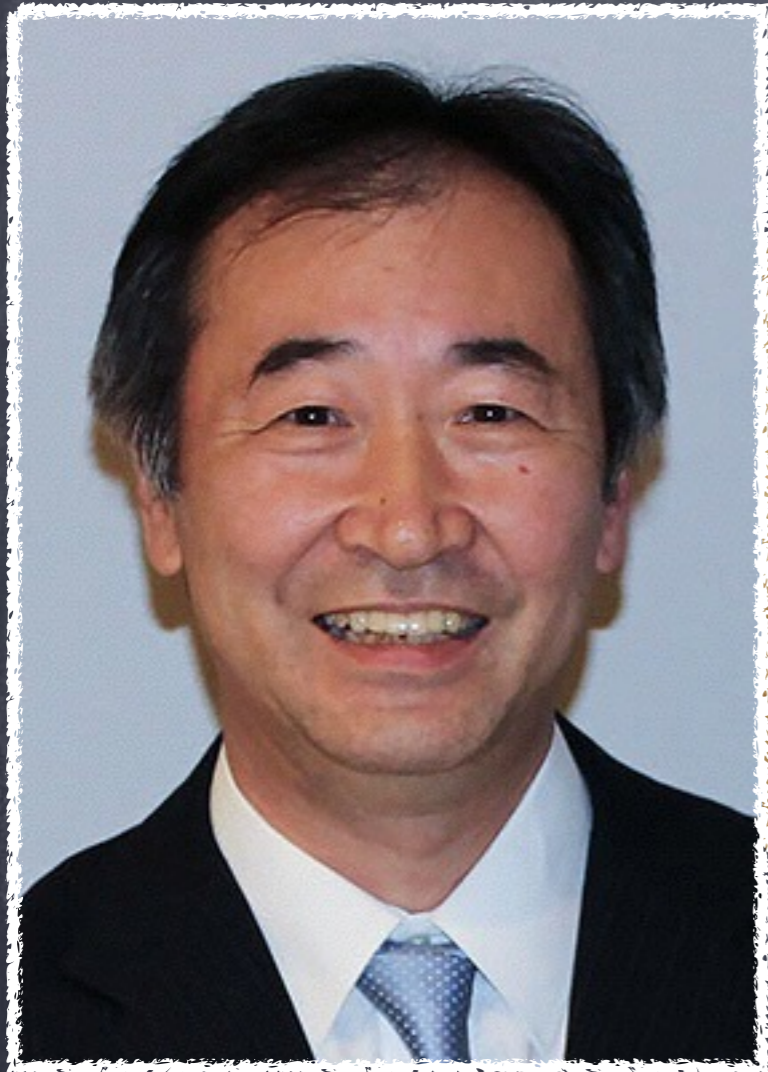
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta m^2 c^4 \cdot L}{h \cdot c \cdot E_\nu} \right)$$

A rejtélyek magyarázata az ízrezgés

a neutrínók repülésük közben egymásba alakulnak



A 2015. évi fizikai Nobel díj



Takaaki Kajita

Arthur B. McDonald

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

vége

Neutrínók keveredése

Légköri neutrínó anomália értelmezése neutrínó-ízreaggással

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

Elég meggyőző ez?

Nem, de lehet jobb mérést végezni!

Légeköri neutrínó anomália értelmezése neutrínó-ízreaggéssel

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

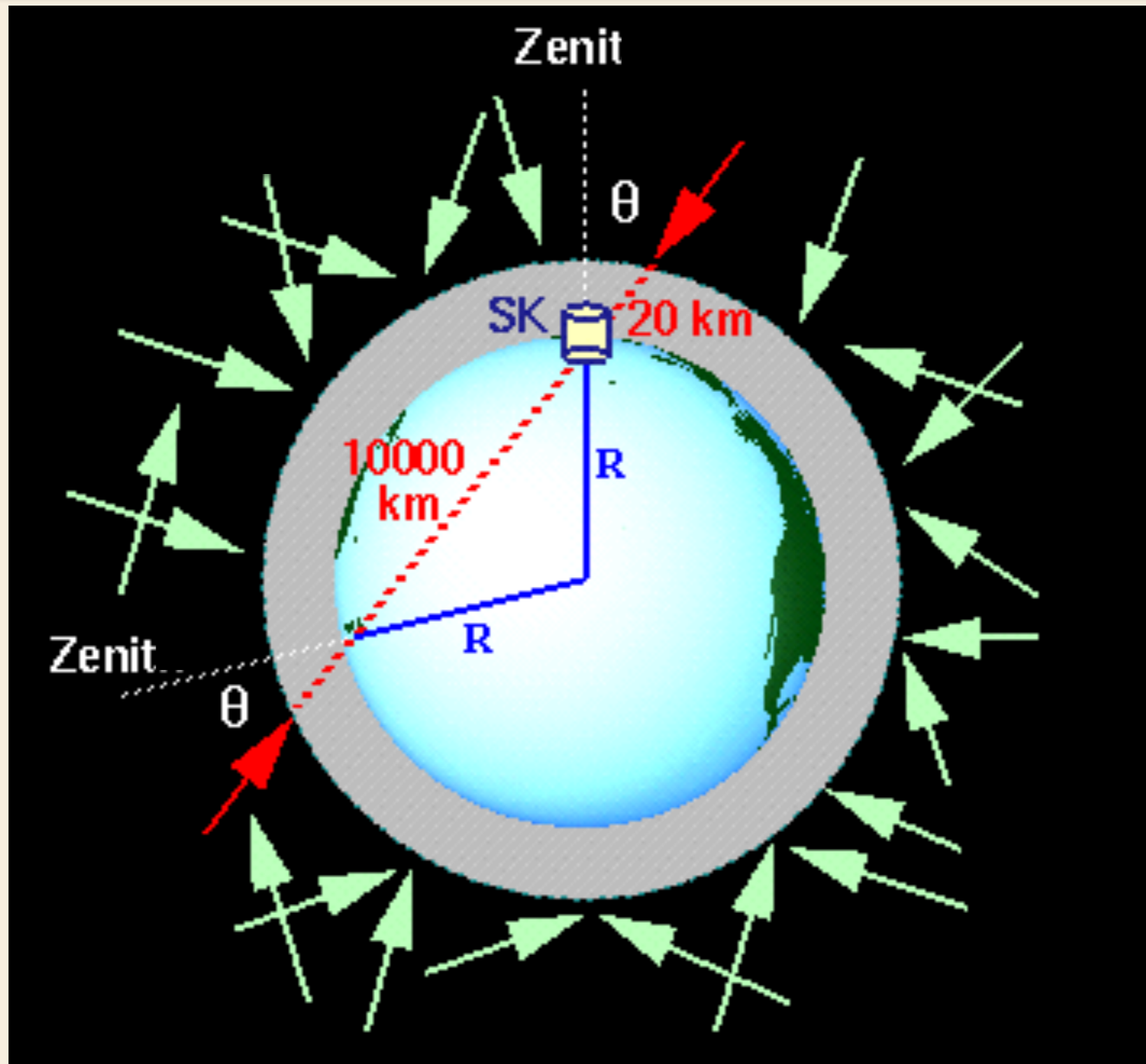
Elég meggyőző ez?

Nem, de lehet jobb mérést végezni!

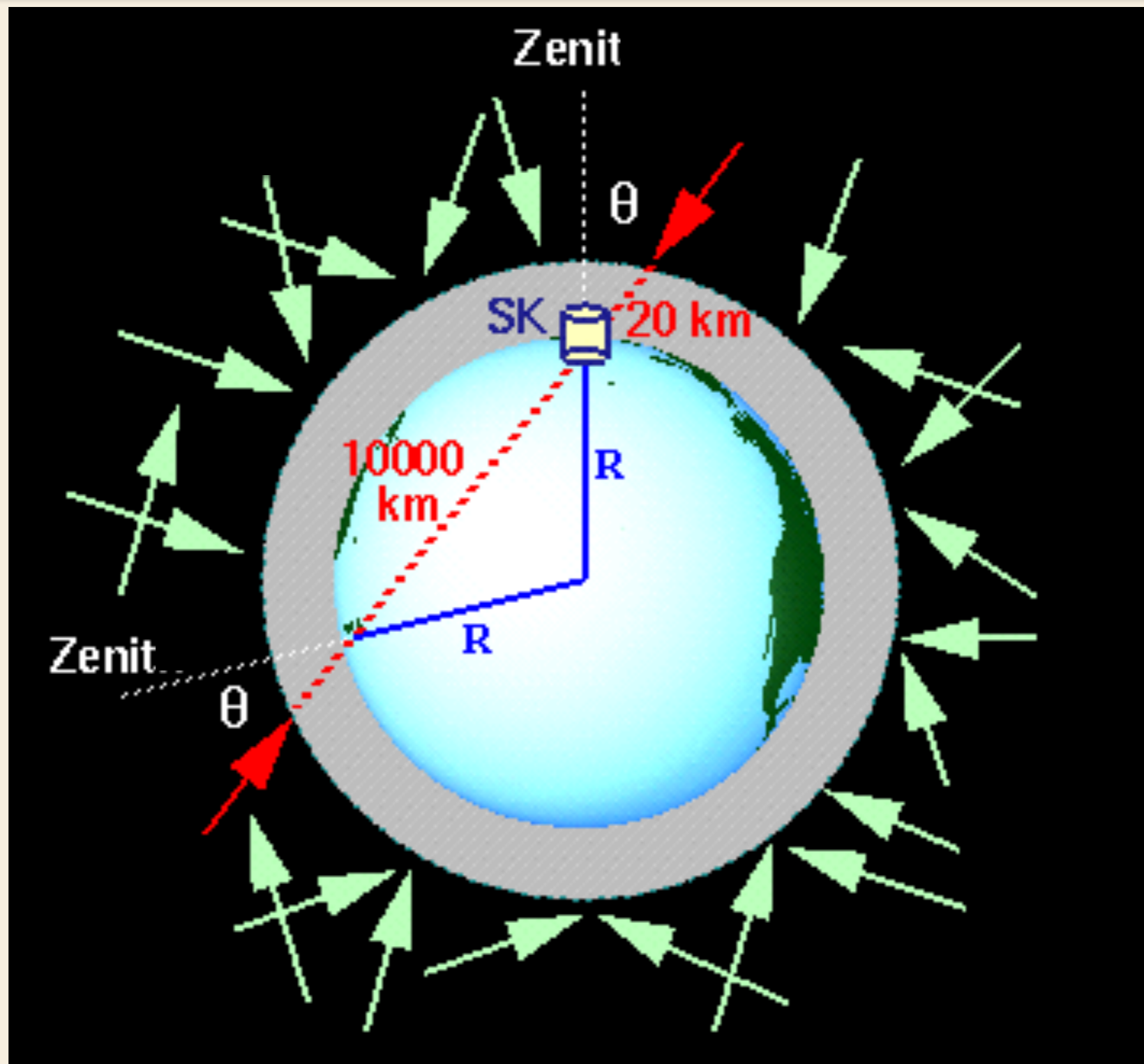
Neutrínó-ízreaggés nélkül a felfelé és lefelé haladó neutrínók várt áramsűrűsége egyenlő (fel-le szimmetrikus)

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

A fel-le szimmetria sérülése

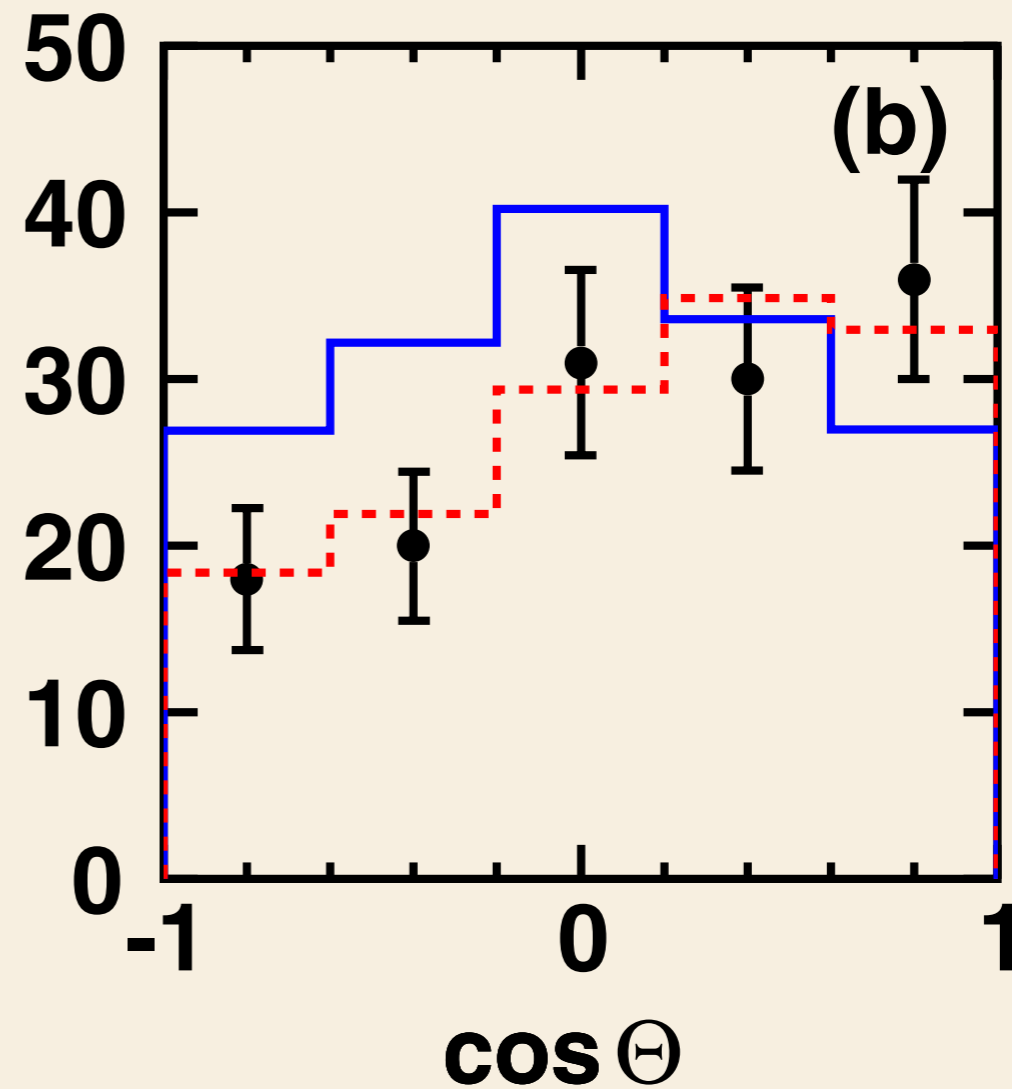
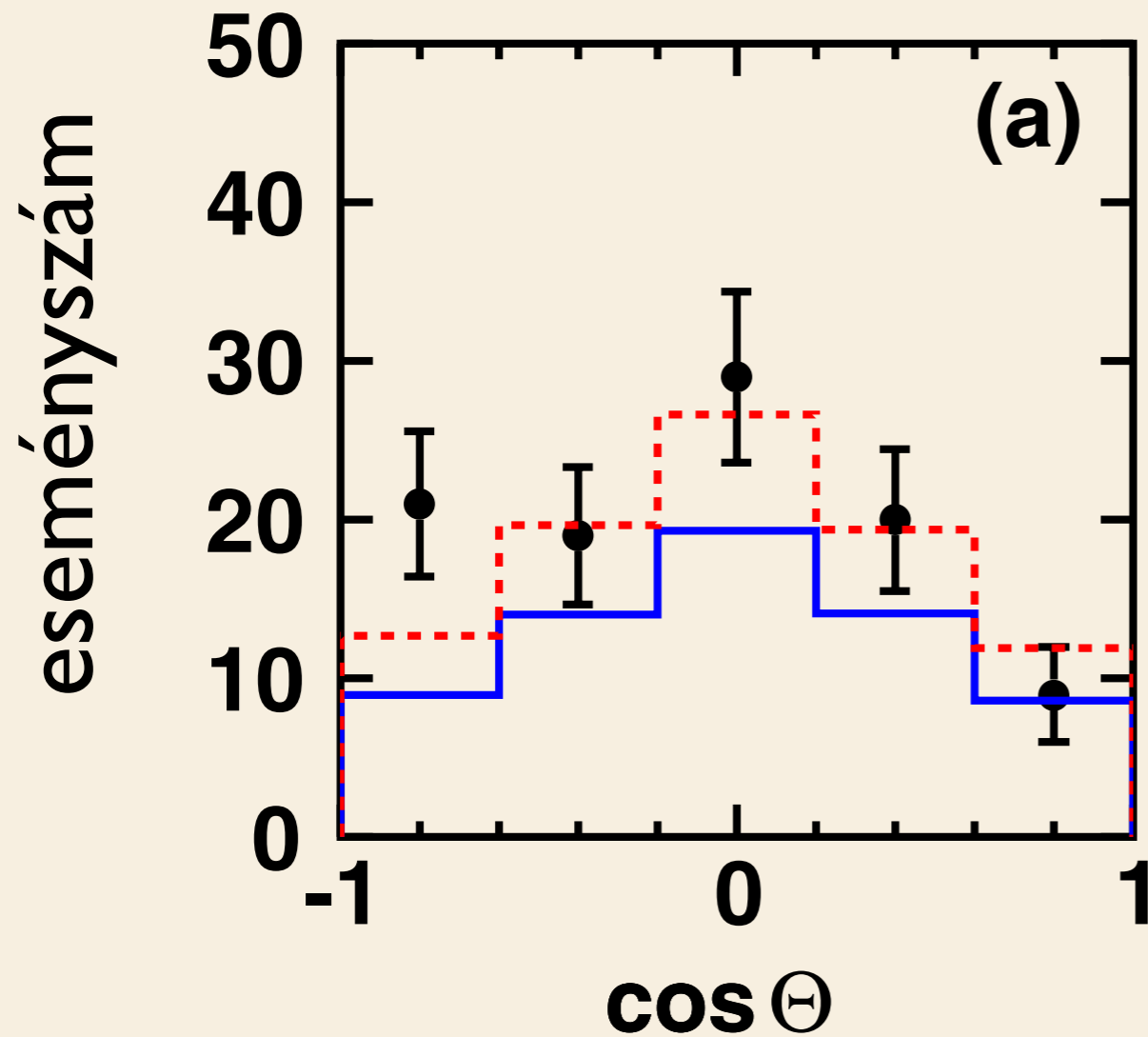


A fel-le szimmetria sérülése



irányérzékeny detektorral mérhető

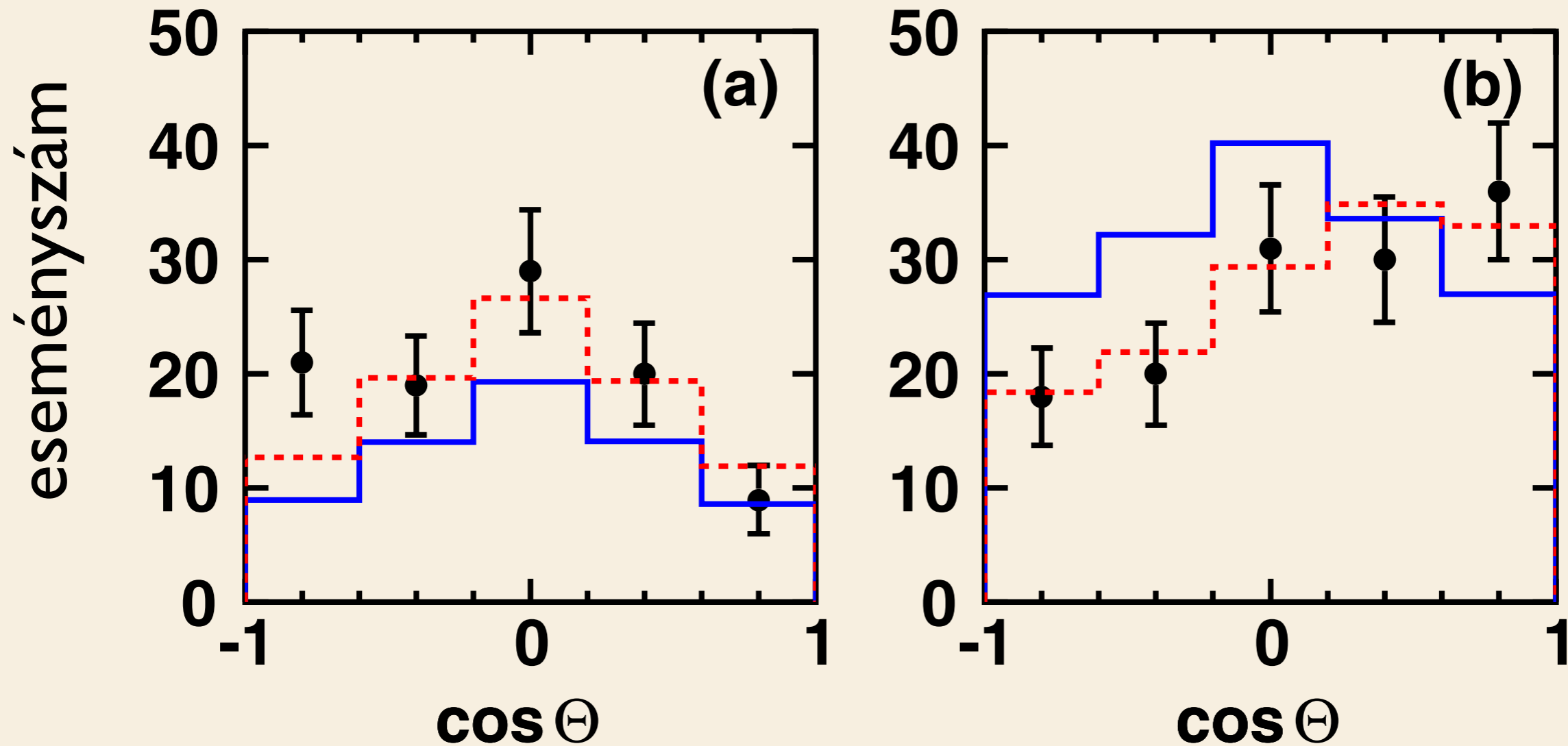
Kamiokande II eredménye



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 ~100%



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

Szuper Kamiokande kísérlet

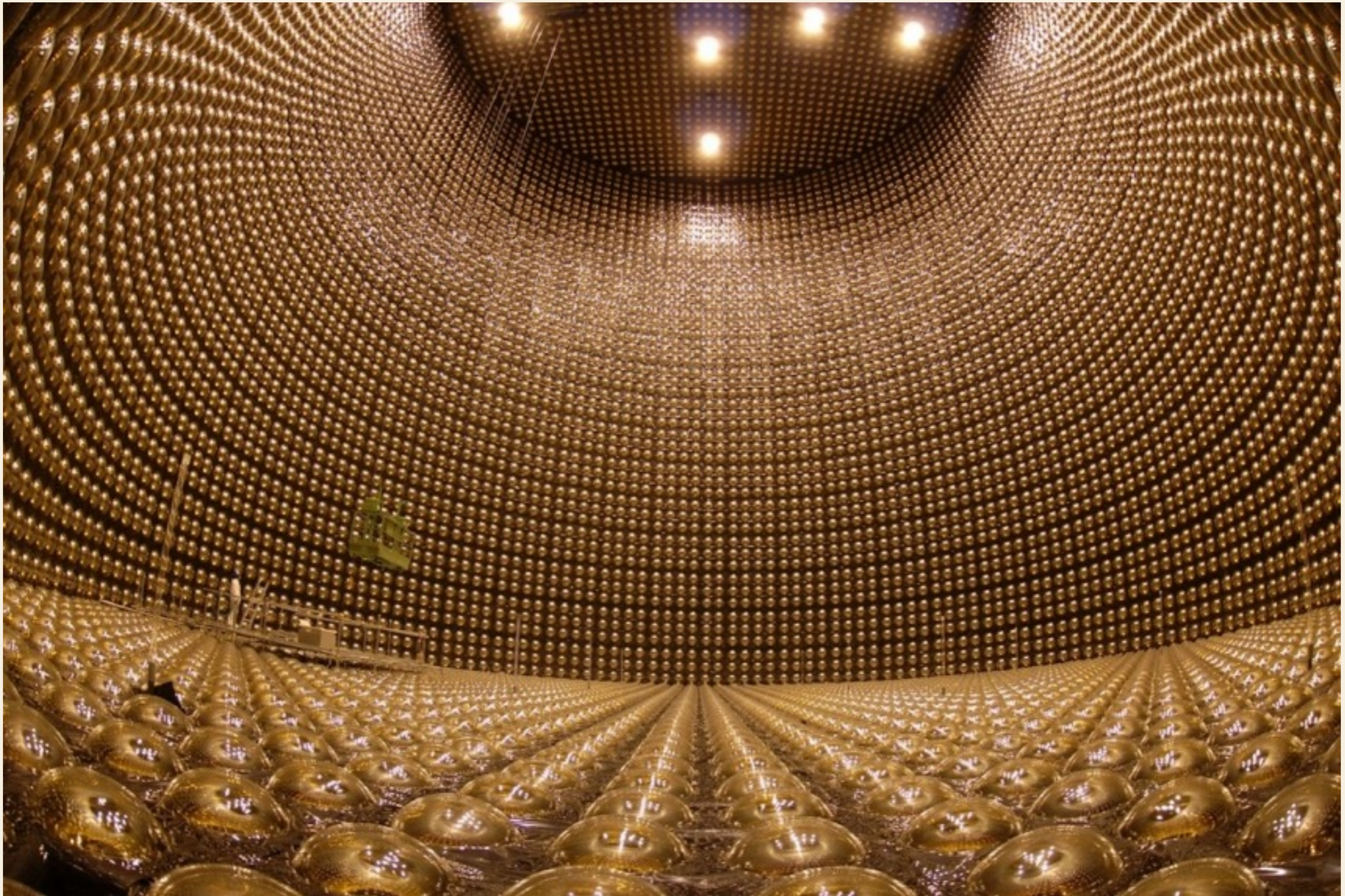
- belső tartály: 22,5 kt víz, 11200 db 50 cm-es PM cső
- külső tartály: 27,5 kt víz, 1900 db 20 cm-es PM cső
- müon-neutrínók észlelésének hatásfoka ~100%



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

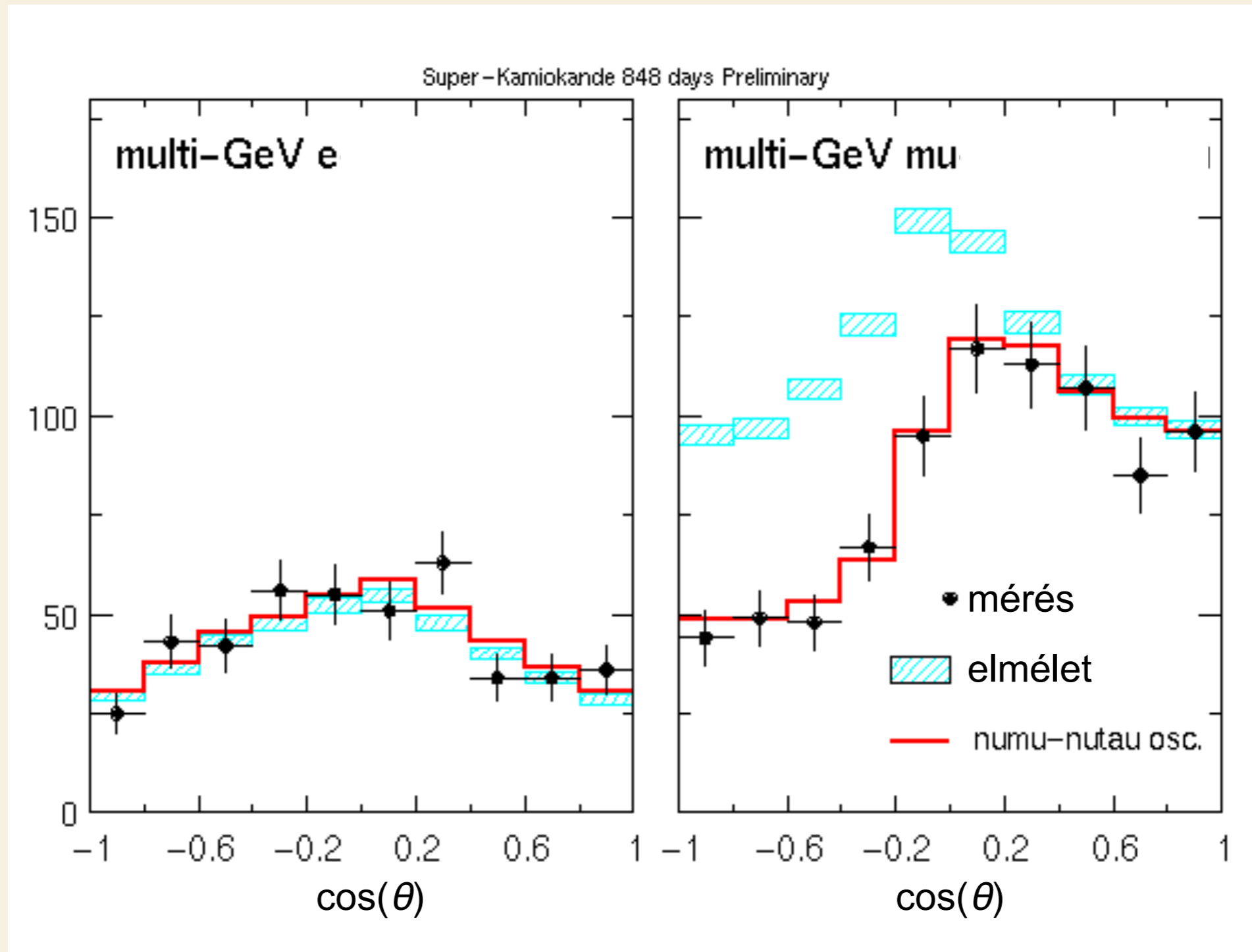
$(R_{\mu/e})_{\text{mérés}} / (R_{\mu/e})_{\text{elmélet}} = 0,688 \pm 0.053$ megerősíti a
Kamiokande II mérését

Szuper Kamiokande kísérlet



A neutrínó-ízrezgés 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 Δm^2 tömegnégyzet különbség?

A tudományos felfedezés izgalmas

mert sok kérdést vet fel:

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

A tudományos felfedezés izgalmas

mert sok kérdést vet fel:

- Mekkora az ízrezgéshez szükséges Δm^2 tömegnégyzet különbség?
- Mekkora a keveredés θ szöge?
- A mérésben csak a müon-neutrínók eltűnedezését sikerült észlelni. Vajon a várakozásnak megfelelően tau-neutrínóvá alakultak?

A tudományos felfedezés izgalmas

mert sok kérdést vet fel:

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

A tudományos felfedezés izgalmas

mert sok kérdést vet fel:

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

A tudományos felfedezés izgalmas

mert sok kérdést vet fel:

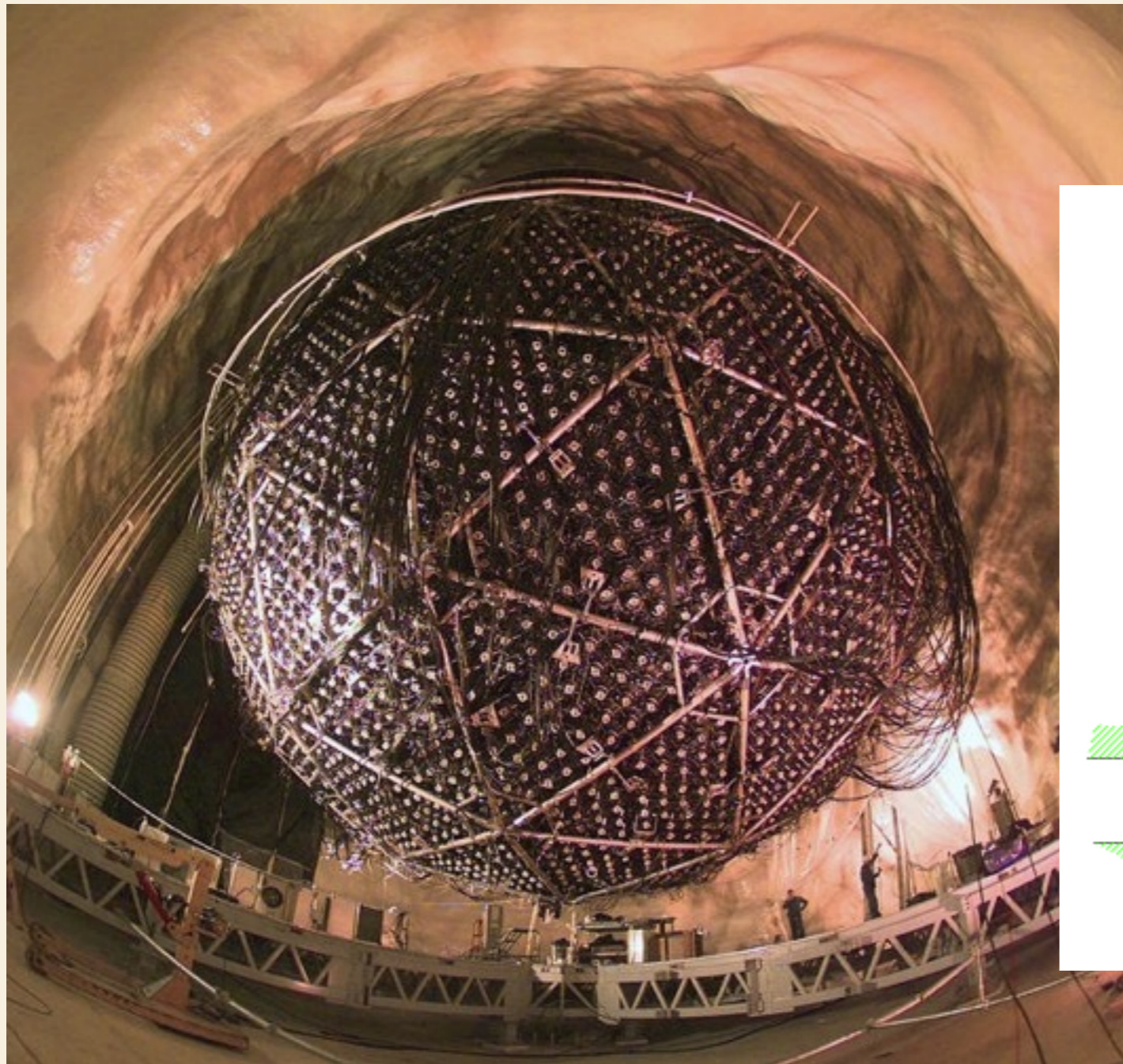
- Mekkora az érzékszékhez szükséges Δm^2 tömegnégyzet különbség?
- Mekkora a keveredés θ szöge?
- A mérésben csak a müon-neutrínók eltünedezését sikerült észlelni. Vajon a várakozásnak megfelelően tau-neutrínóvá alakultak?
(az elektron-neutrínók száma nem változott)
- Van-e keveredés más neutrínók között?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

A tudományos felfedezés izgalmas

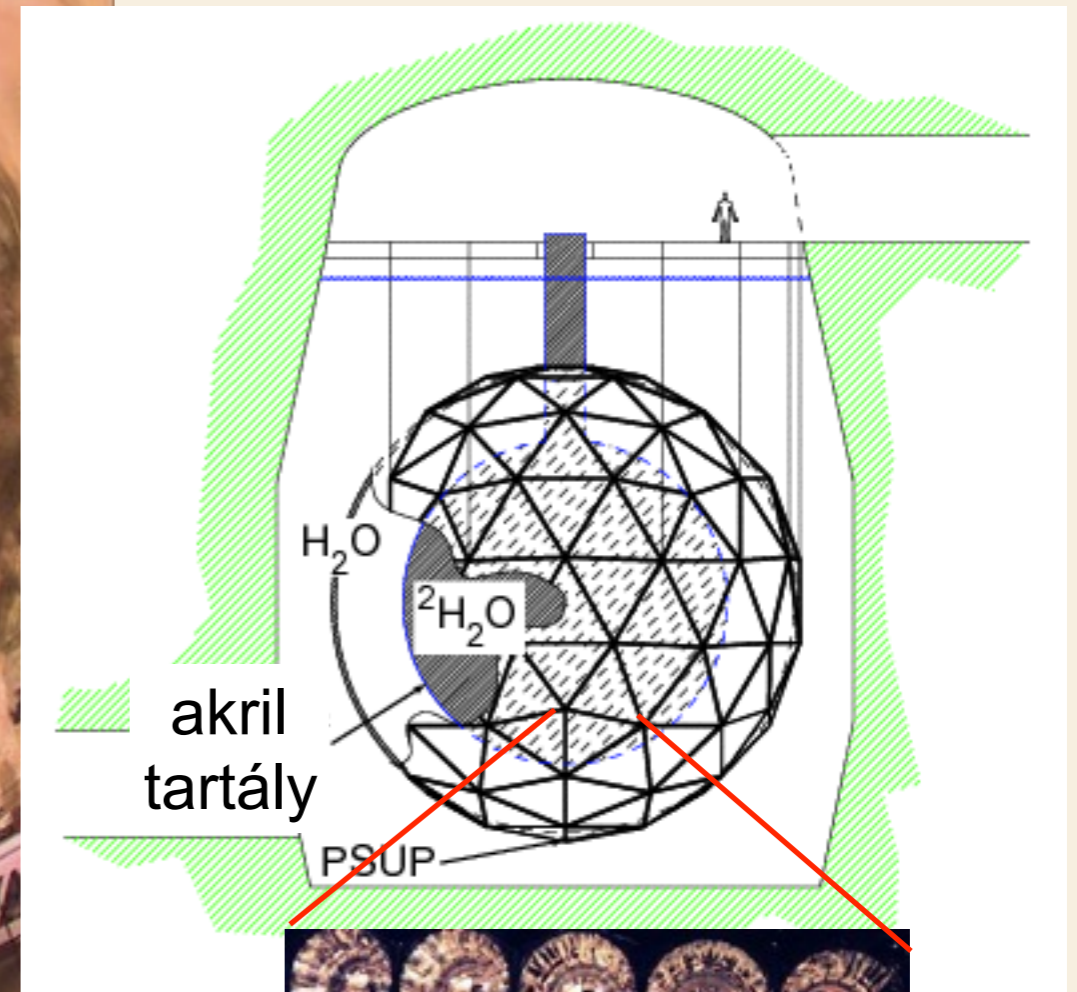
mert sok kérdést vet fel:

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

Az SNO kísérlet (1998-2002)



1100 t tiszta nehézvíz (D_2O)
6 m sugarú tartályban

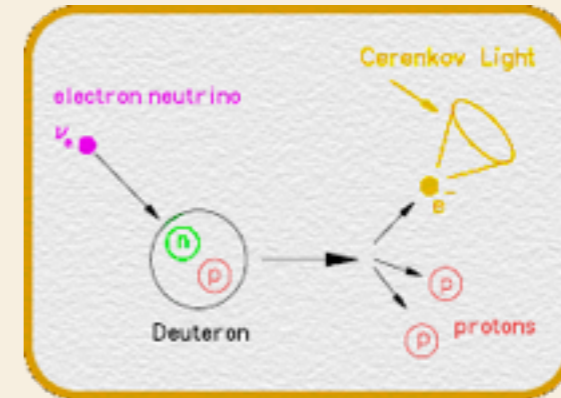
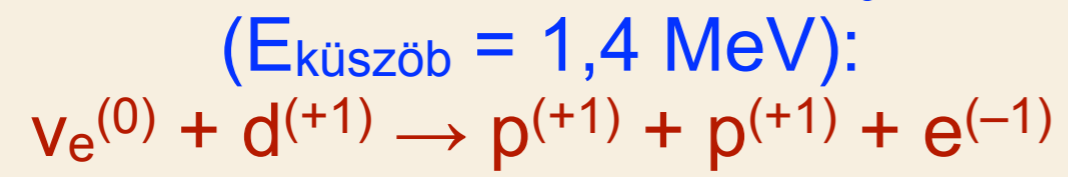


2000 m-rel a felszín alatt

Az SNO kísérlet (1998-2002)

töltött részecskét keltő folyamat

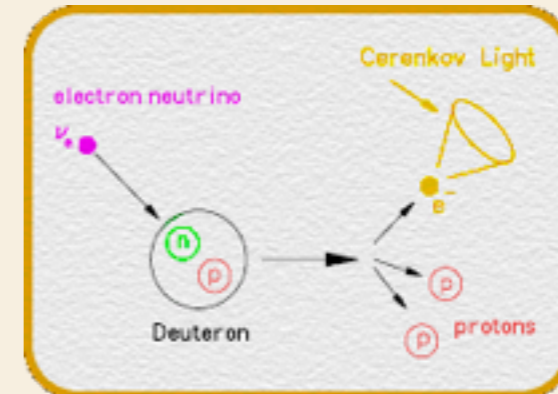
($E_{\text{küszöb}} = 1,4 \text{ MeV}$):



Az SNO kísérlet (1998-2002)

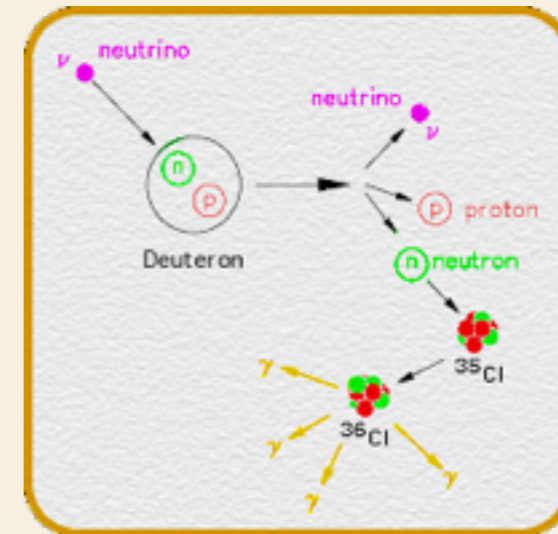
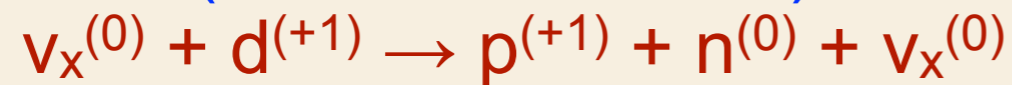
töltött részecskét keltő folyamat

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



semleges részecskét keltő folyamat

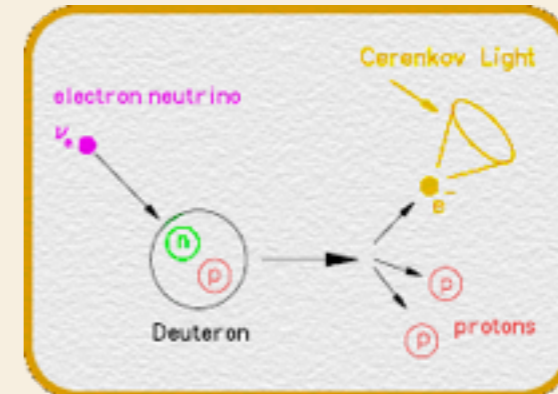
($E_{\text{küszöb}} = 2,2 \text{ MeV}$):



Az SNO kísérlet (1998-2002)

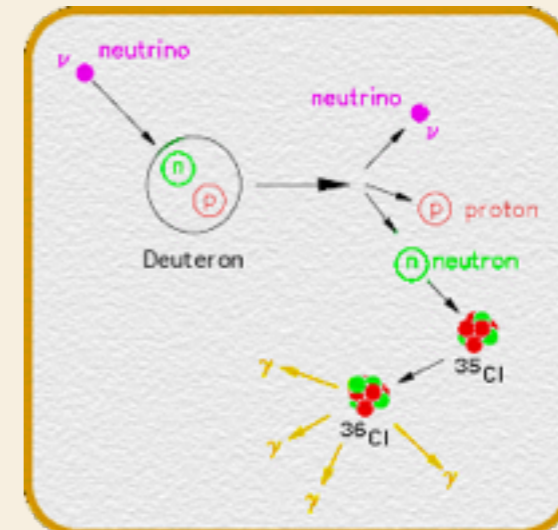
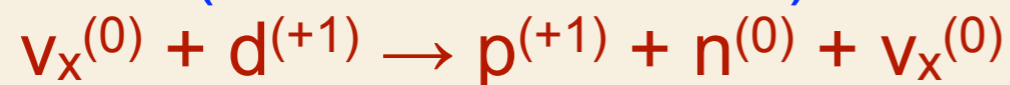
töltött részecskét keltő folyamat

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

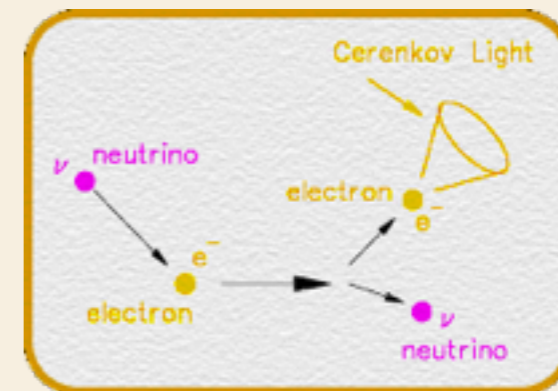


semleges részecskét keltő folyamat

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



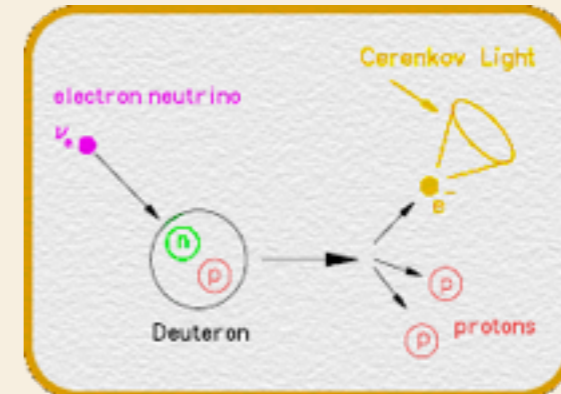
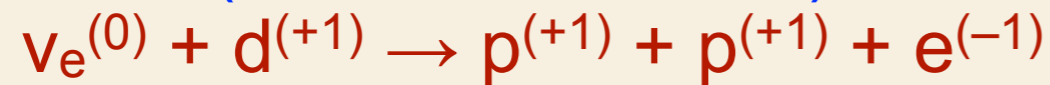
rugalmas szórás ($E_{\text{küszöb}} = 0 \text{ MeV}$):



Az SNO kísérlet (1998-2002)

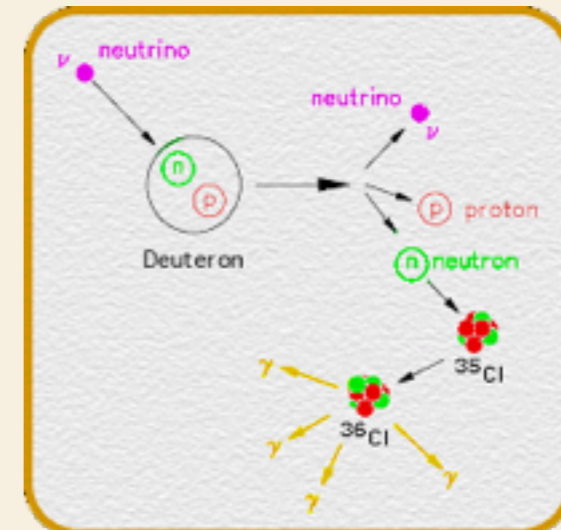
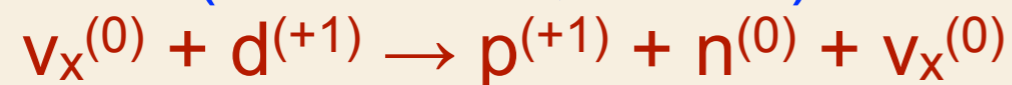
töltött részecskét keltő folyamat

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

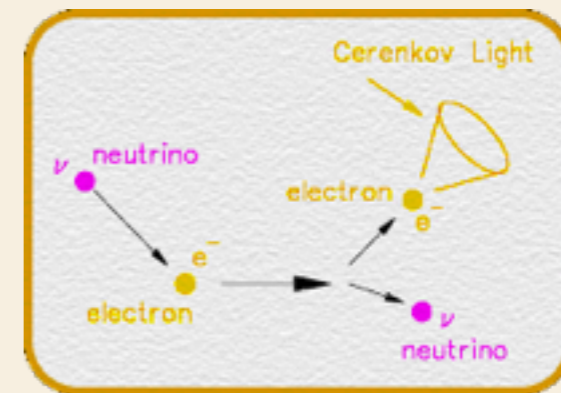


semleges részecskét keltő folyamat

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



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



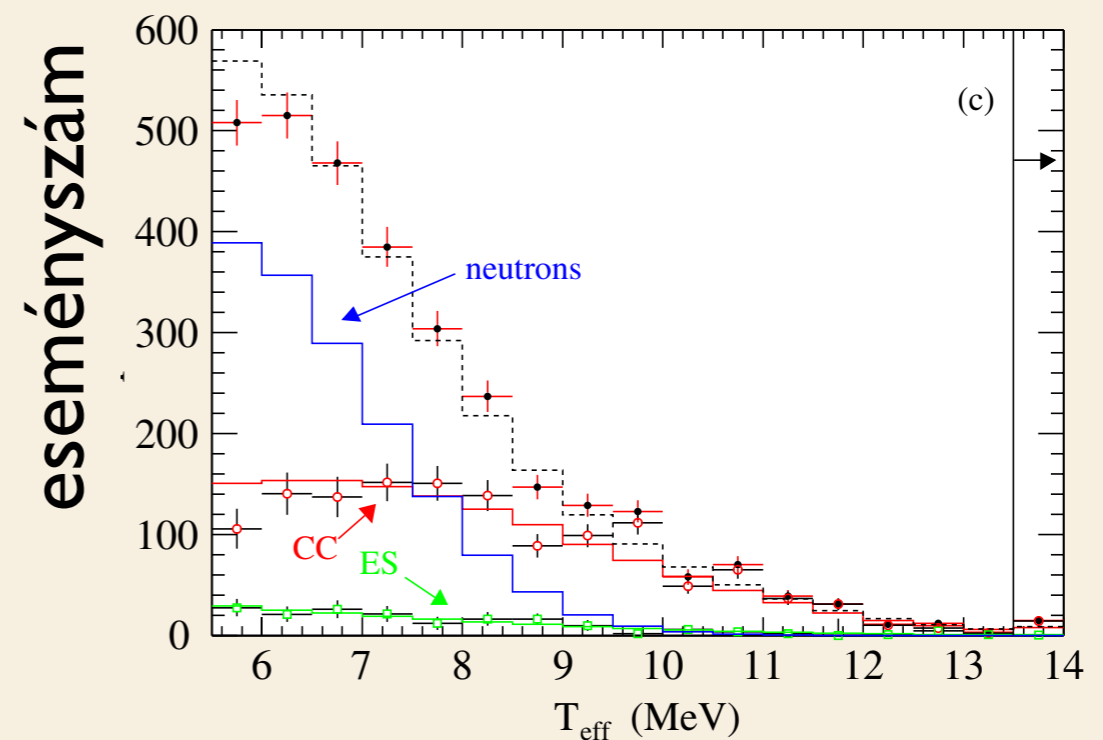
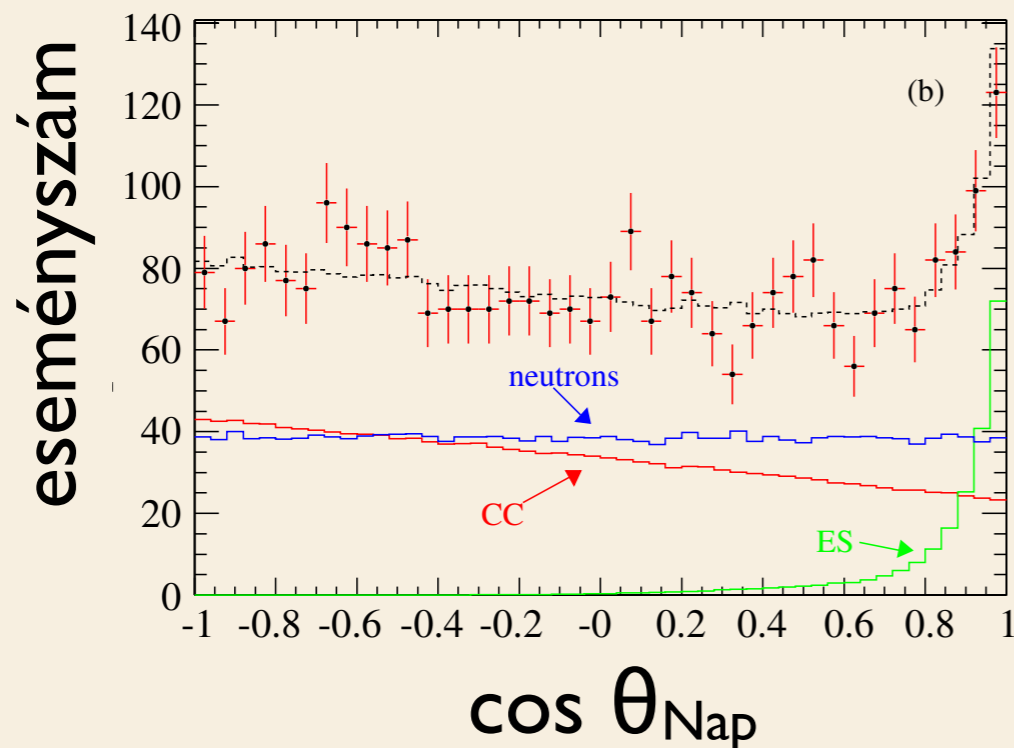
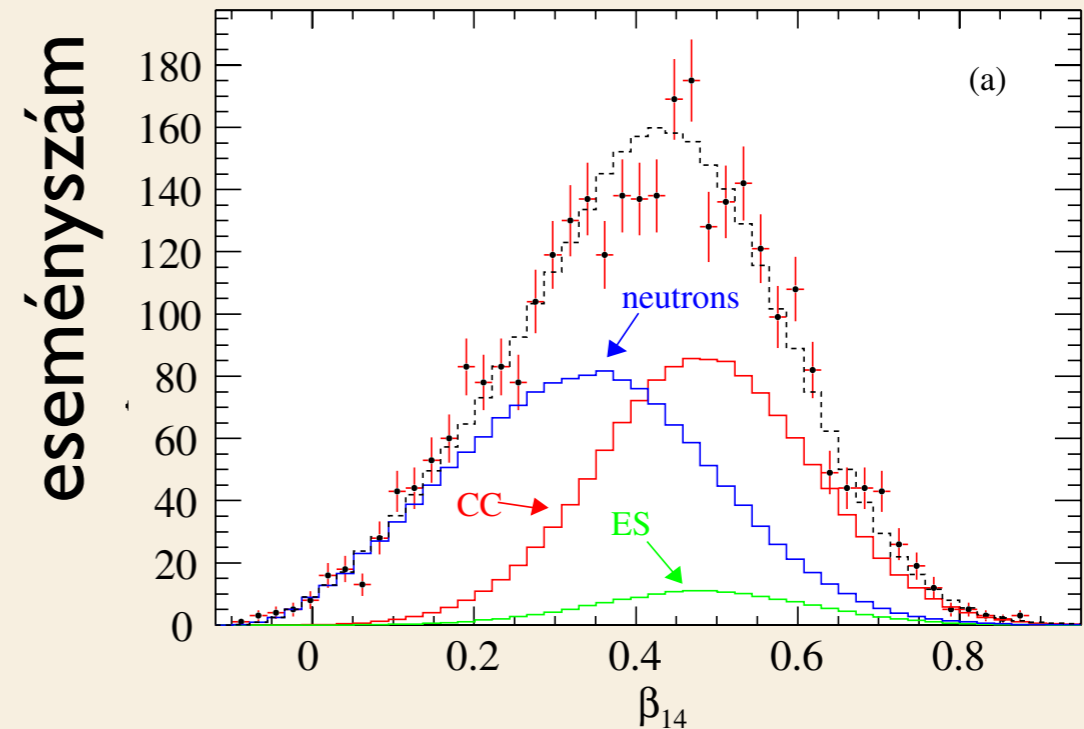
nincs szükség összehasonlításra a Nap-modell által becsült neutrínó áramsűrűségekkel

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

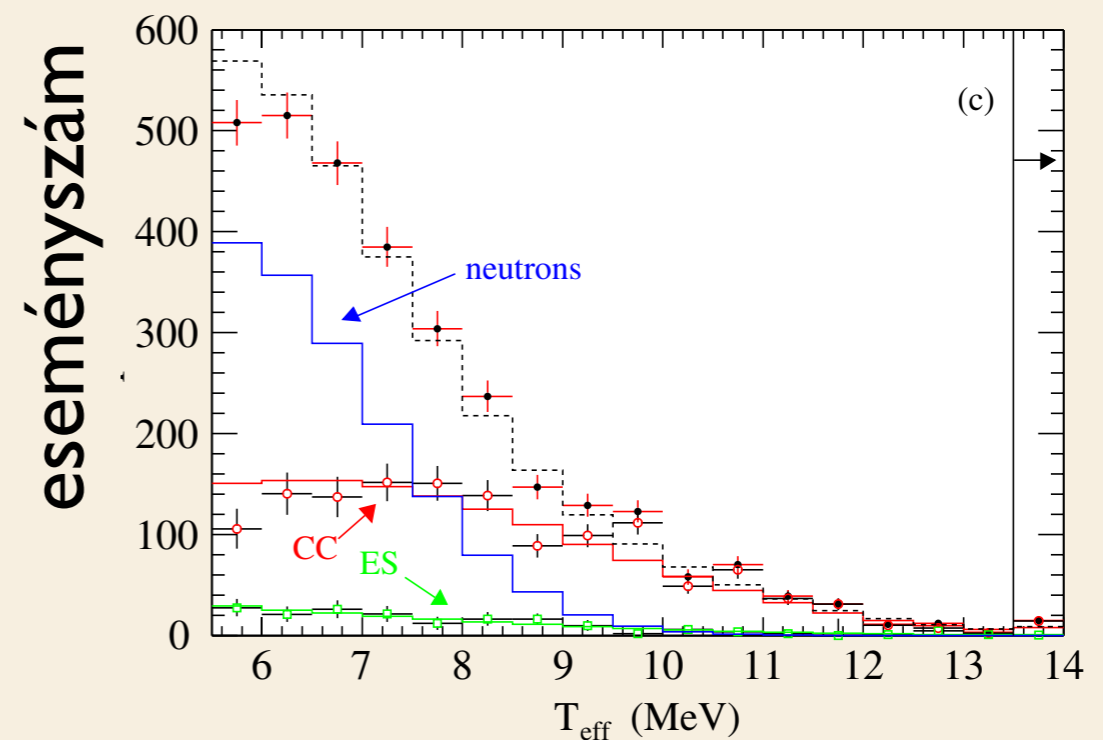
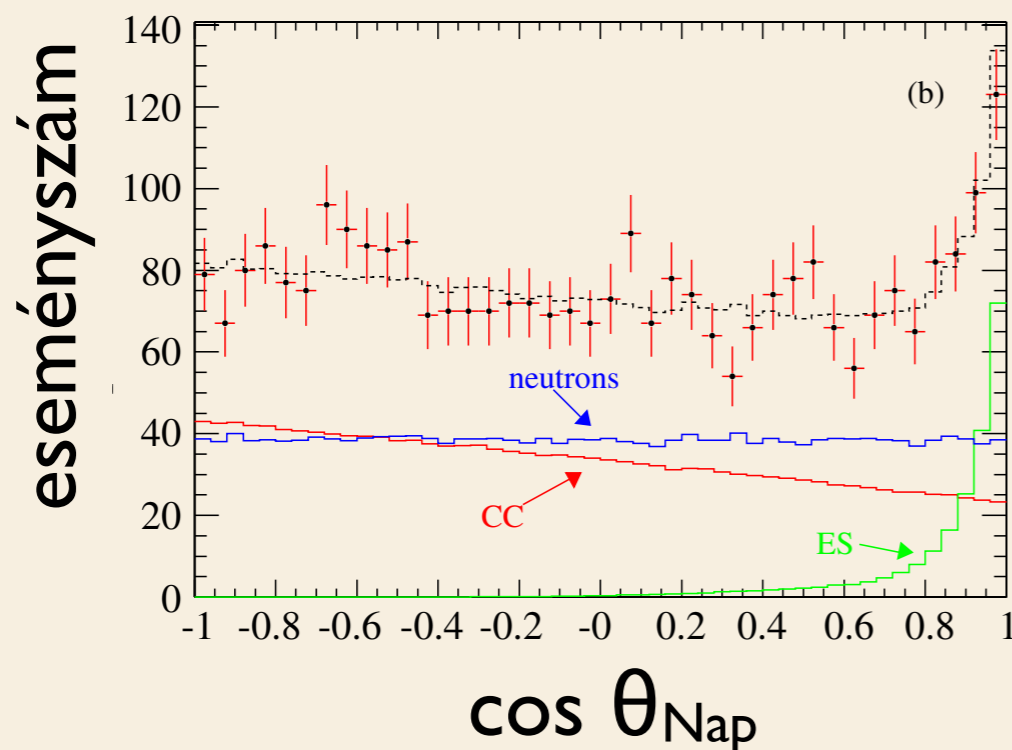
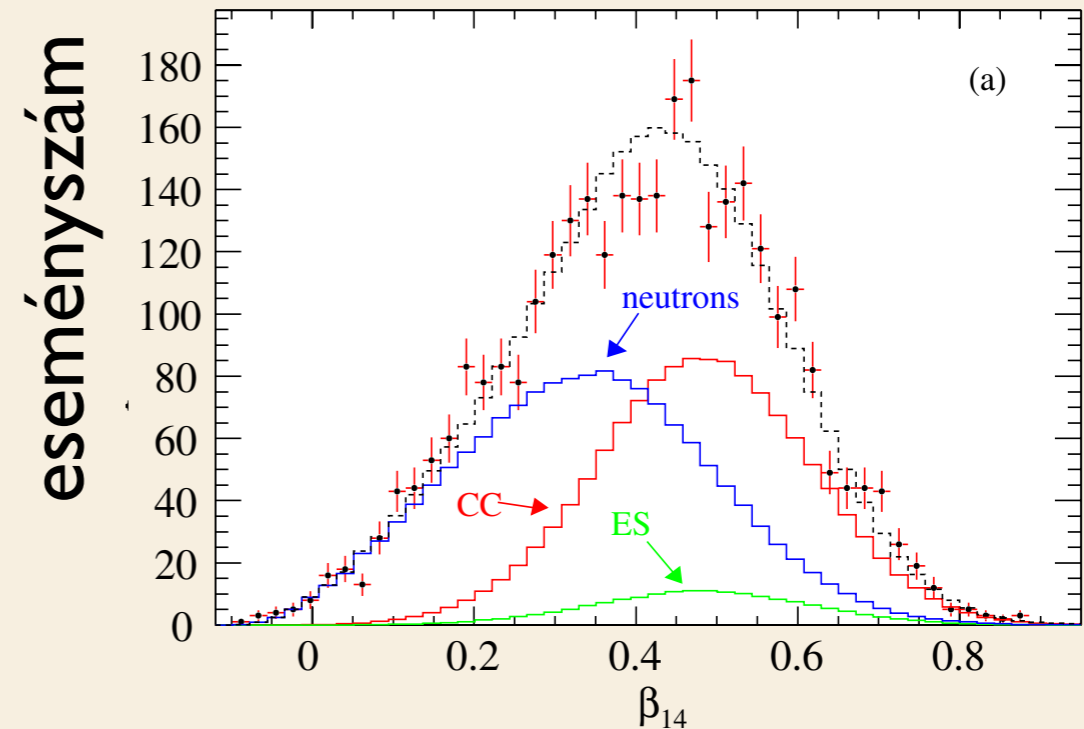
Nap-neutrínó áramsűrűség a Föld felszínén

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:

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

