

Interferența neutrinelor

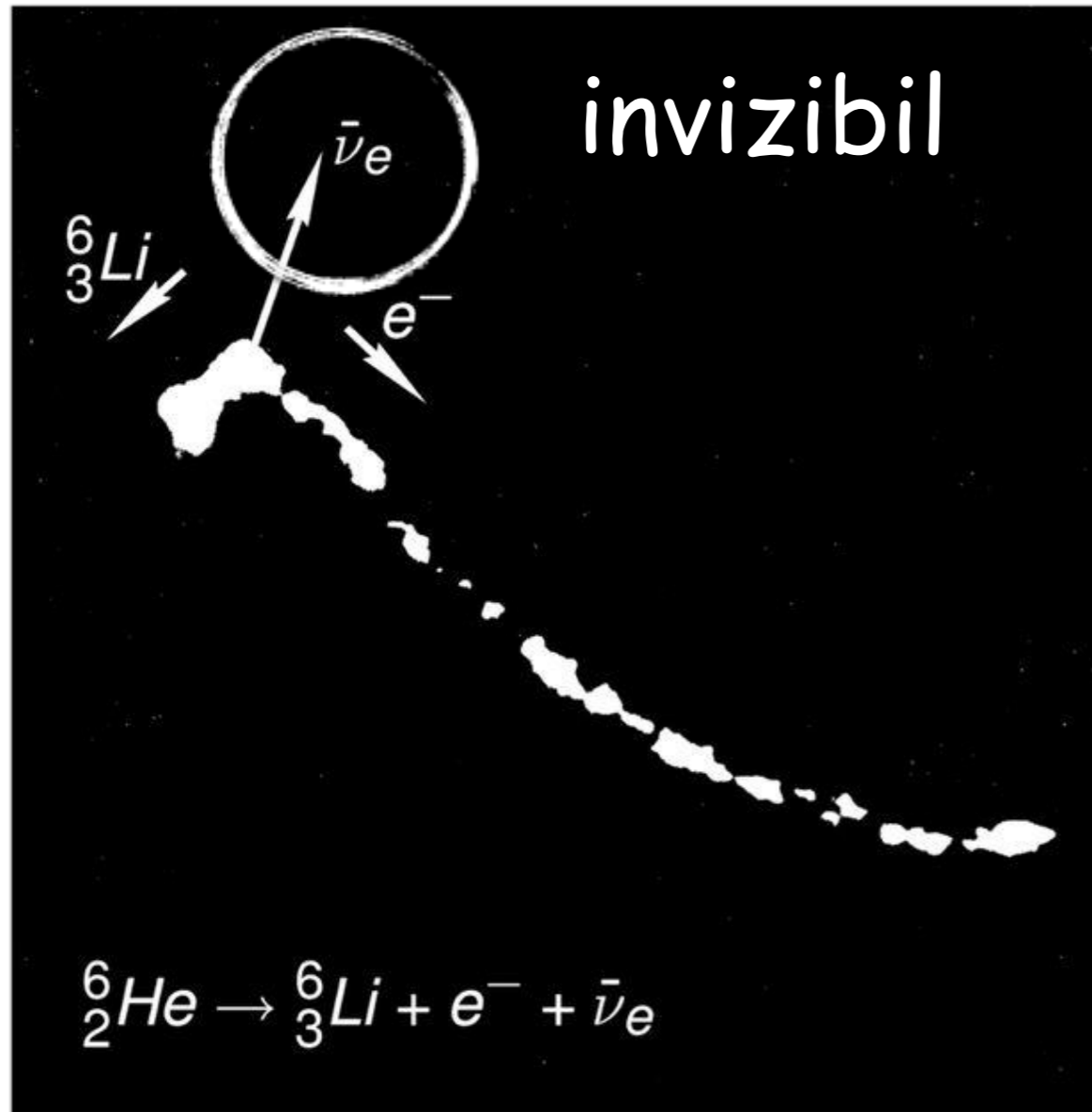
Trócsányi Zoltán

Universitatea Debrecen și AȘM-DE Echipa de Cercetare Particule
elementare

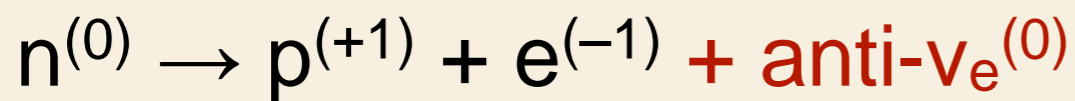


Concurs Schwartz
Oradea, 15 Octombrie 2016

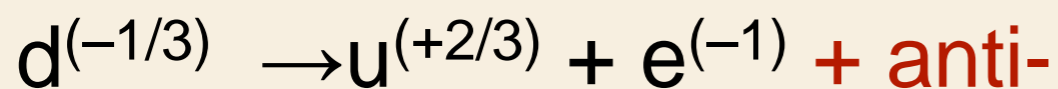
Experiment Csikai-Szalay (1956)



Site istoric EPS

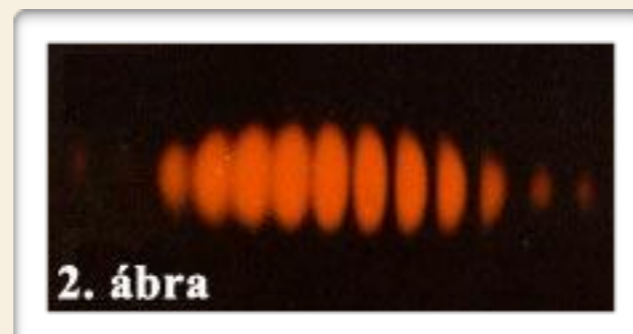
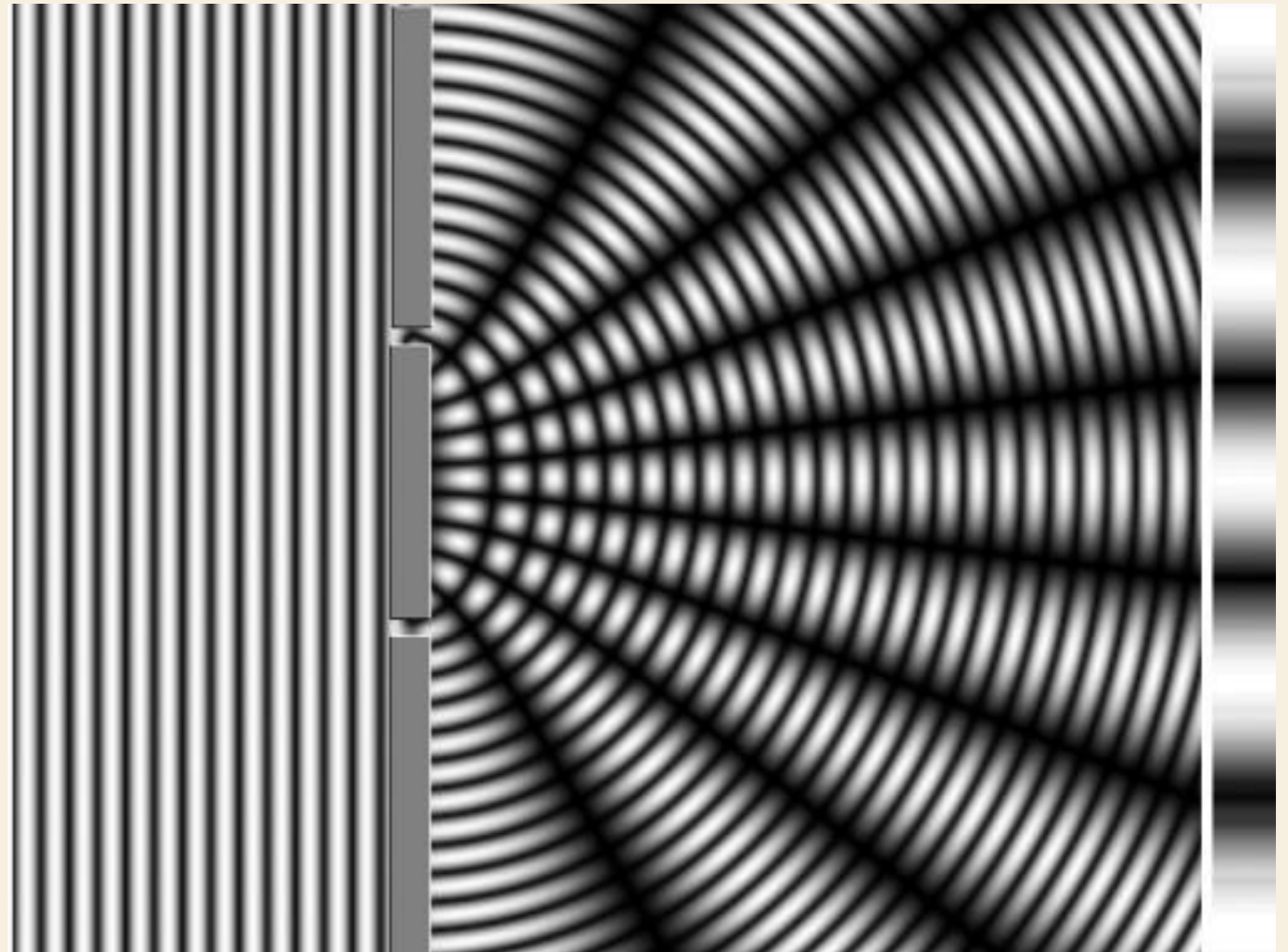
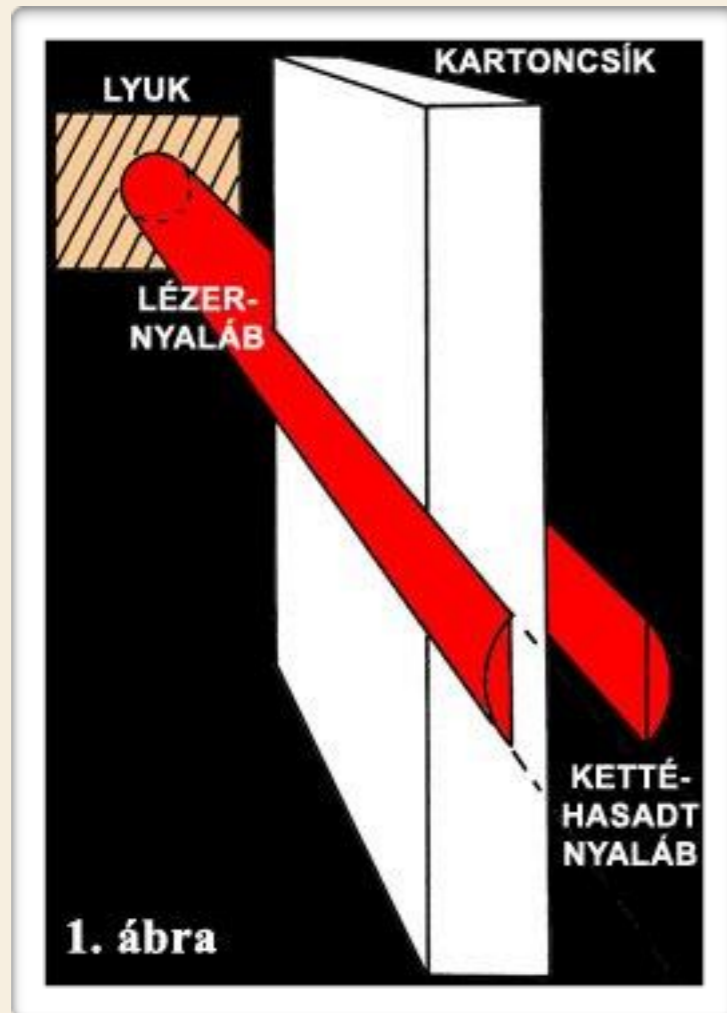


La nivel elementar:

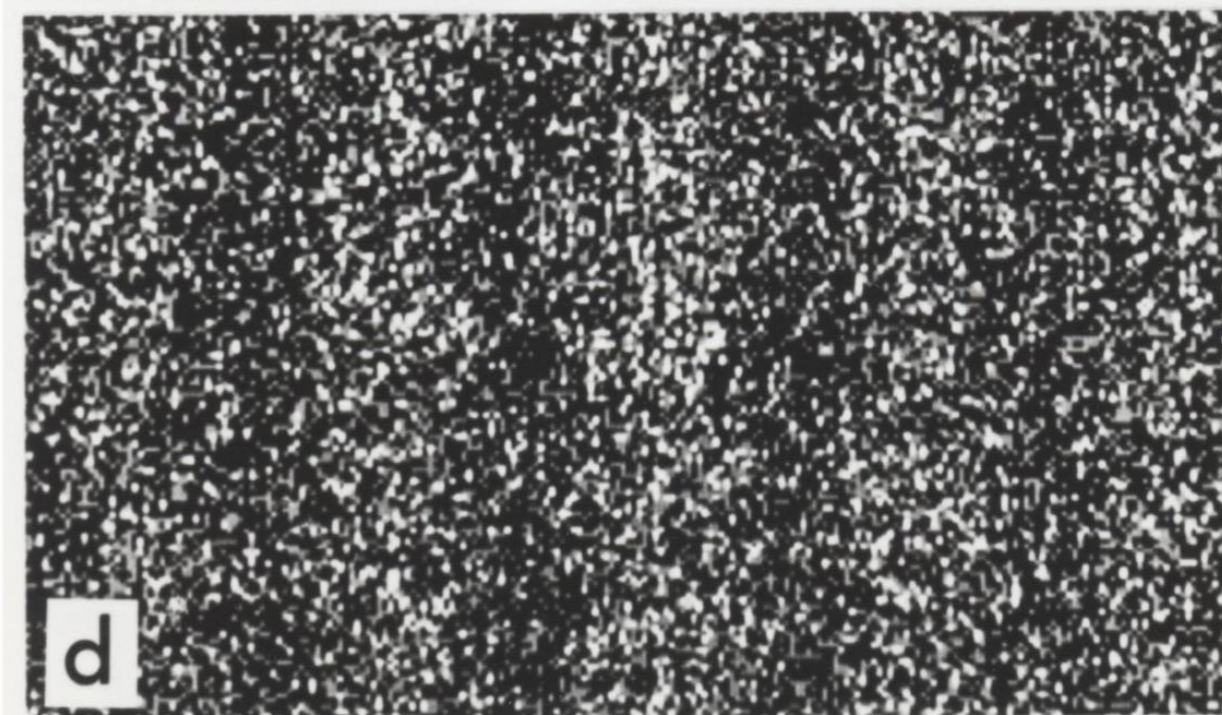
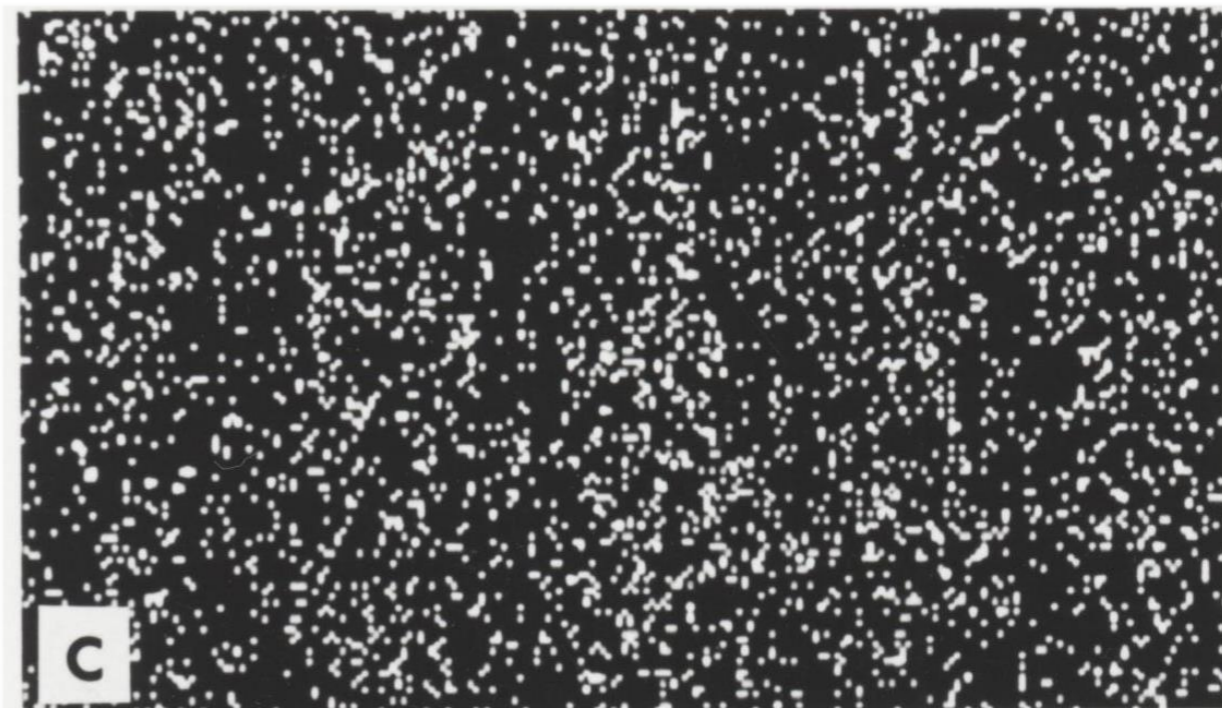
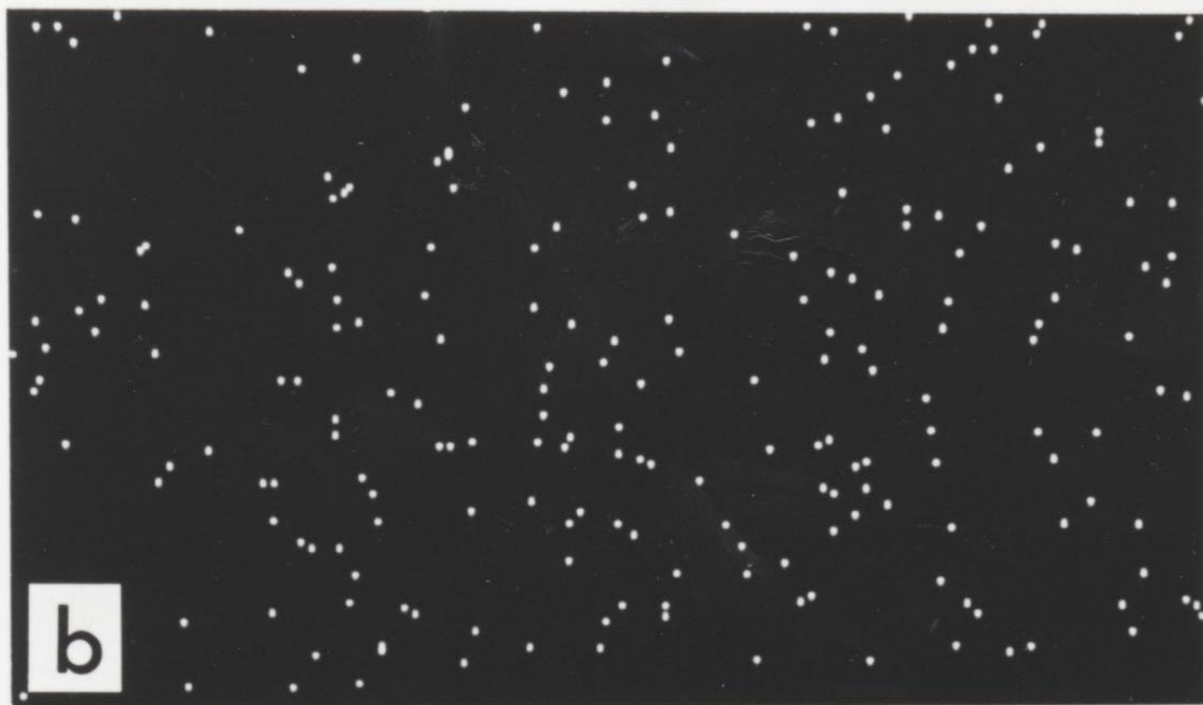
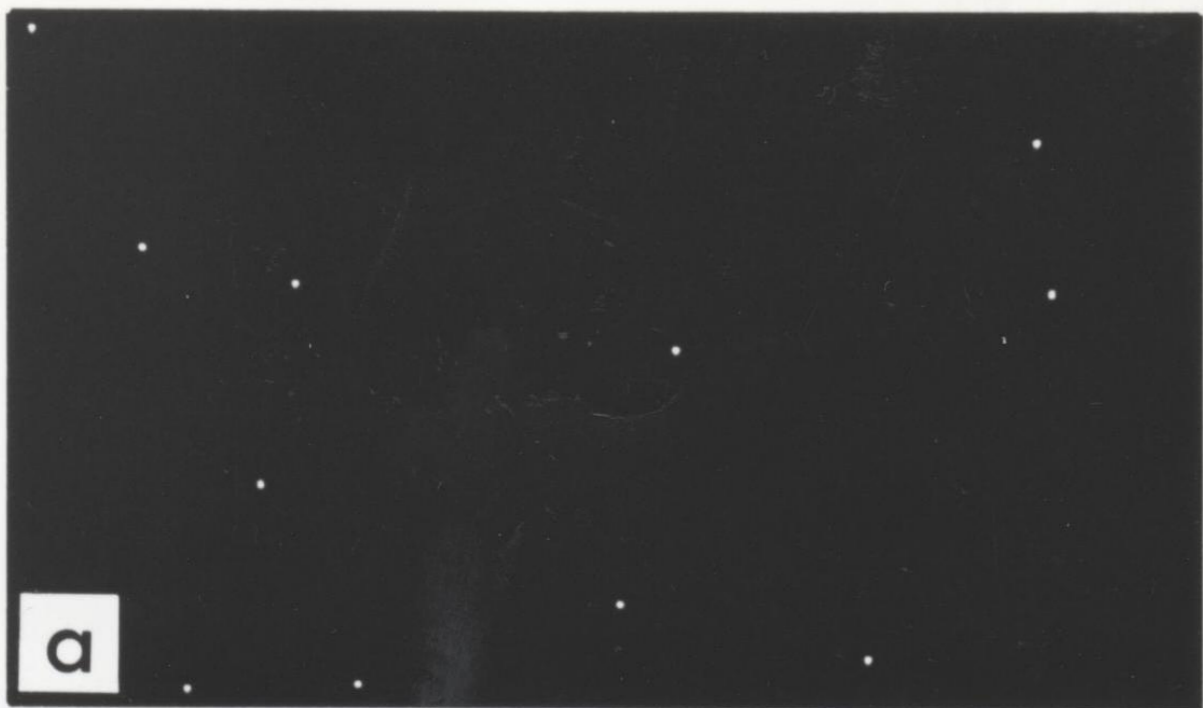


$\nu_e^{(0)}$

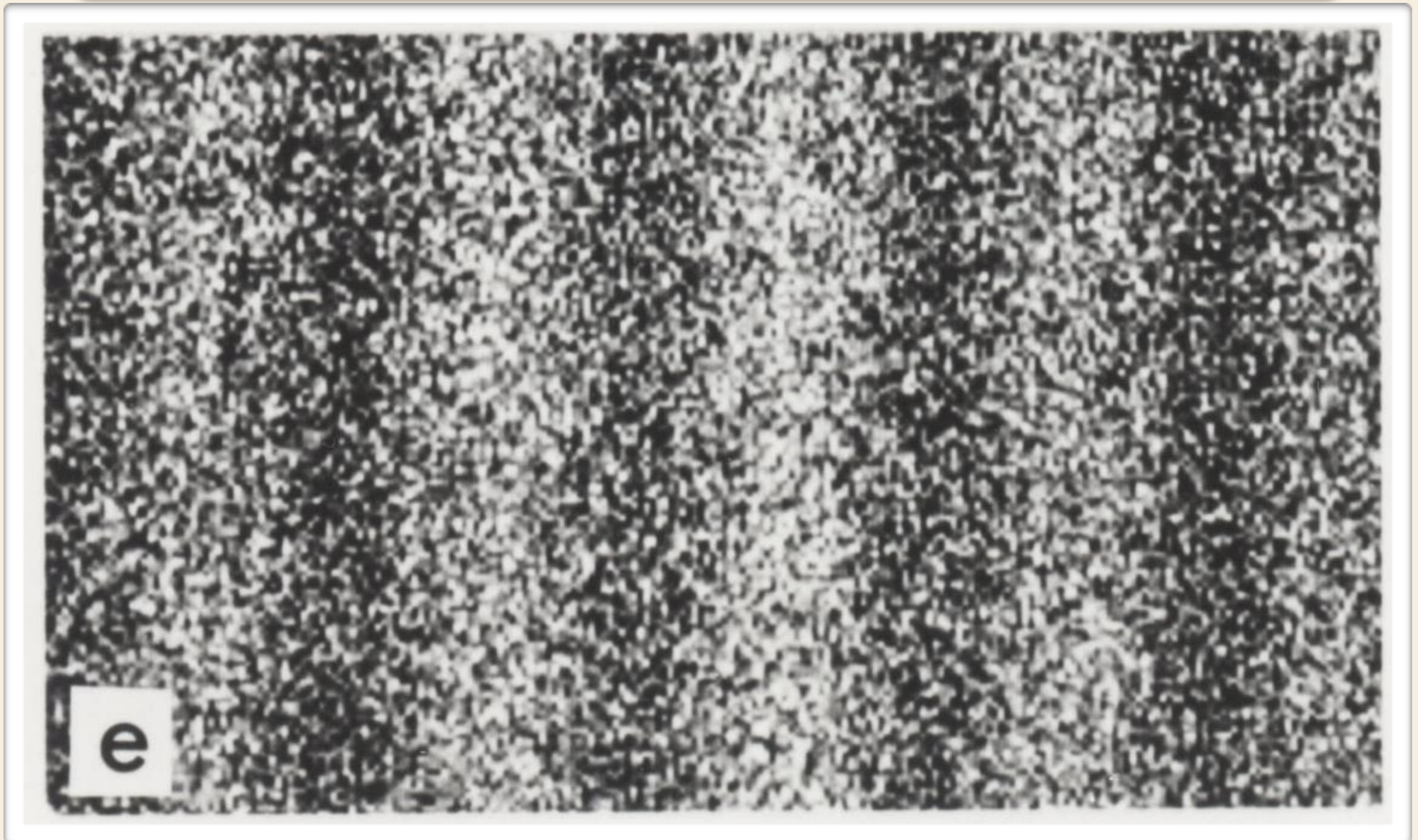
Interferența luminii pe fantă dublă



Interferența pe fanta dublă cu electroni



Interferența pe fanta dublă cu electroni



Este posibil cu neutrini?

da! - dar...

... prin interferență **nu** trebuie să înțelegem modificarea spațială a intensității neutrinoilor ci...

... modificarea aromei neutrinoilor...

în engleză: neutrino oscillation

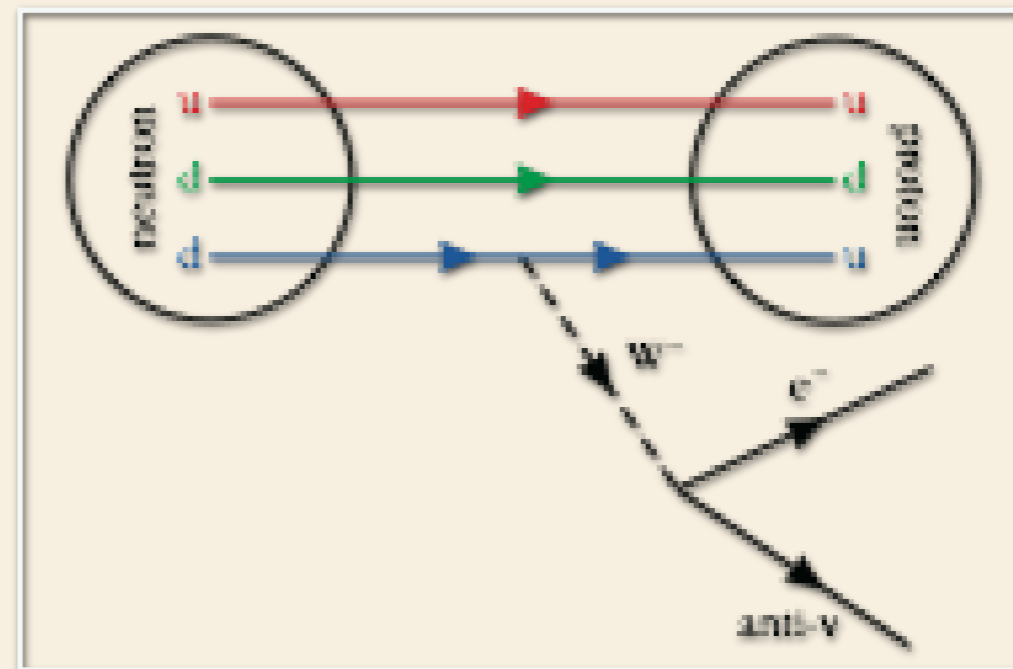
semnifică:

Neutrinoii în timpul deplasării lor nu își păstrază identitatea, ci „de la sine“ se transformă în neutrino de altă aromă

românește: oscilația aromei neutrinoilor

de la sine?

și dezintegrarea-beta are o cauză mai profundă:



Modelul standard

Trei generații ale materiei (fermioni)

	I	II	III		
masă	$2,3 \text{ MeV}/c^2$	$1,27 \text{ GeV}/c^2$	$173 \text{ GeV}/c^2$	0	$125 \text{ GeV}/c^2$
sarcină	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
nume	u up (sus)	c charm (farmec)	t top (vârf)	γ foton	H boson Higgs
Quarkuri	$4,8 \text{ MeV}/c^2$	$95 \text{ MeV}/c^2$	$4,2 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	d down (jos)	s strange (ciudăt)	b bottom (bază)	g gluon	
Leptoni	$<2,2 \text{ eV}/c^2$	$<0,17 \text{ MeV}/c^2$	$<15,5 \text{ MeV}/c^2$	$91,2 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e neutriful electronului	ν_μ neutriful miuonului	ν_τ neutriful taonului	Z^0 boson Z	
	$0,511 \text{ MeV}/c^2$	$105,7 \text{ MeV}/c^2$	$1,777 \text{ GeV}/c^2$	$80,4 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e electron	μ miuon	τ taon	W^\pm boson W	Bosoni intermediari

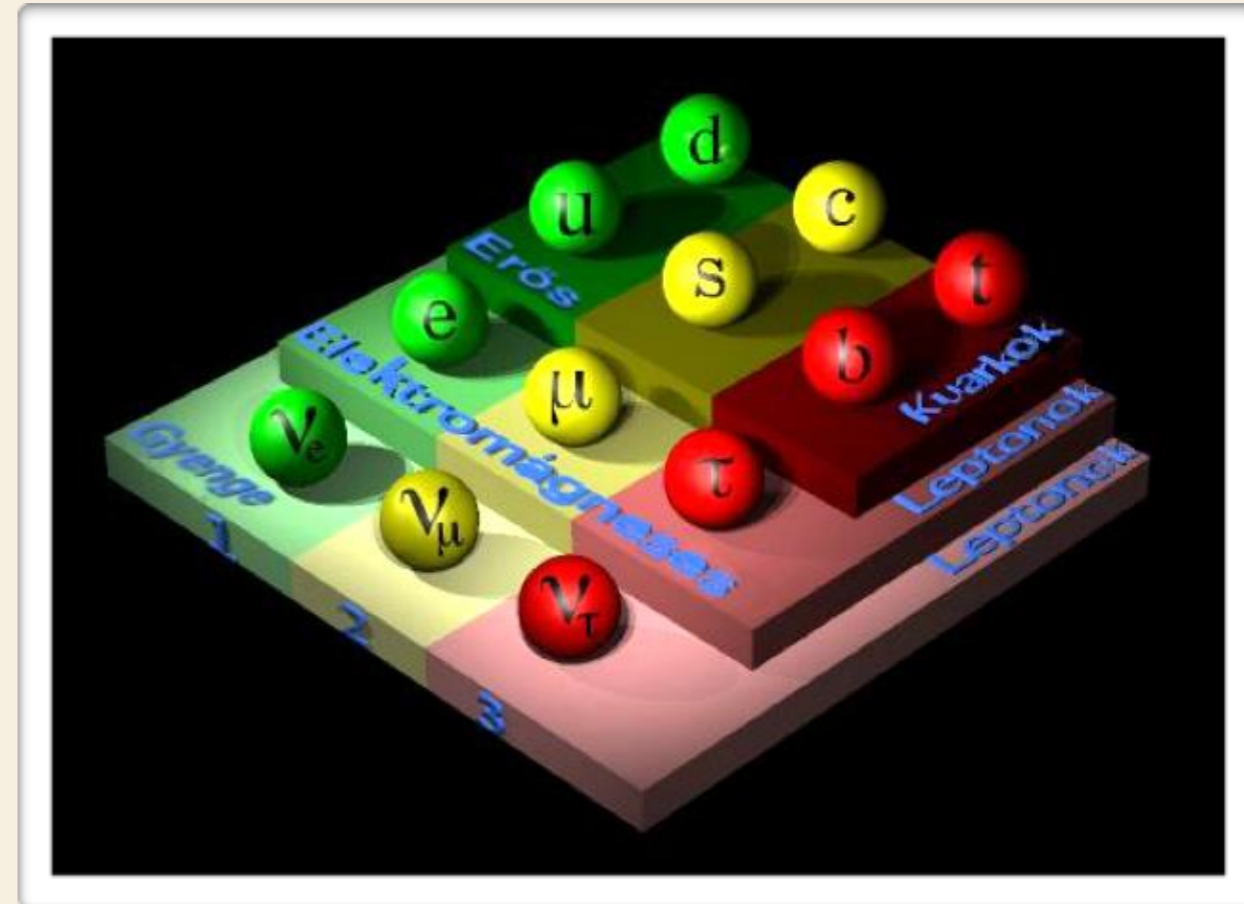
Interacțiunea neutrin-materie

Neutrini sunt sensibili numai la forța slabă responsabilă pentru radioactivitate:

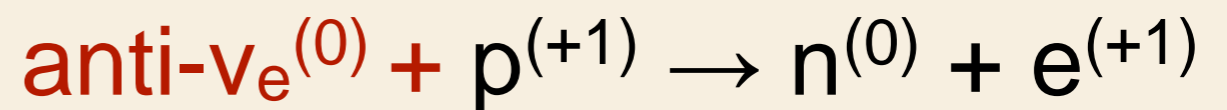
Din o sută de mii de neutrini doar unul (este oprit de Pământ)

(interacționează cu Pământul)(12740 km), restul trec mai departe

pe 12,74 m probabilitatea interacțiunii este de 10^{-11} , deci 10^{12} neutrini trebuie să treacă prin detector ca să interacționeze câțiva cu materialul detectorului

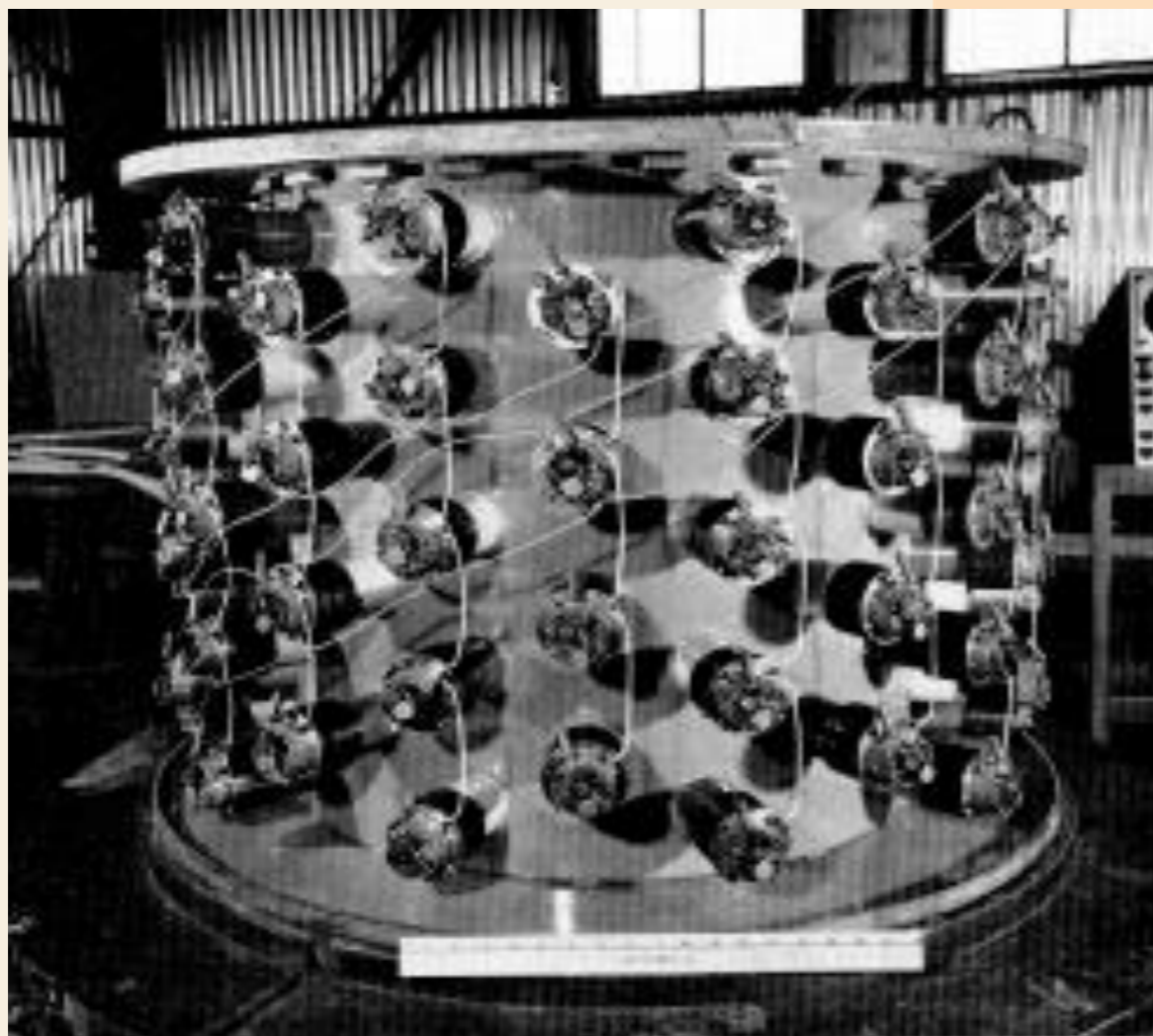


Numai în vecinătatea unui reactor există mulți astfel de neutrini:

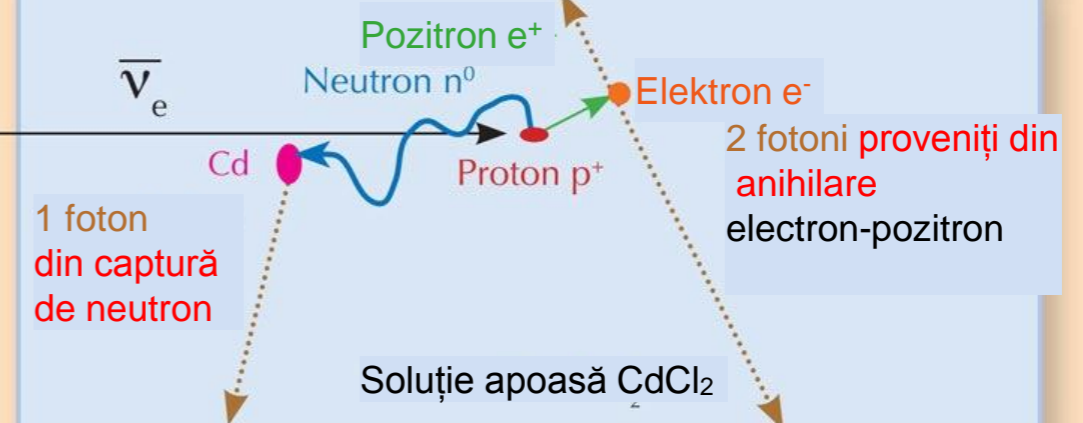


Experimentul Reines-Cowan (1956)

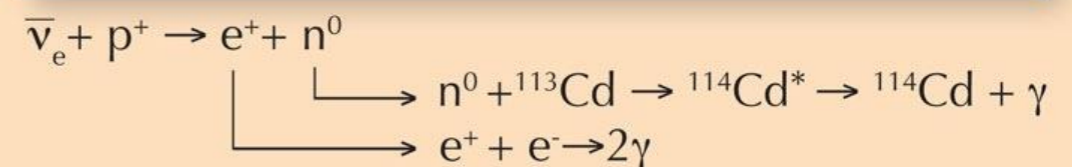
Rezervorul reactorului atomic
de lângă Savannah River plin
cu CdCl_2
közéleben CdCl_2 oldattal
töltött tartály:



Scintilator conectat la fotomultiplicatori



Scintilator conectat la fotomultiplicatori



Secțiunea eficace:
măsurată: $6,3 \cdot 10^{-48} \text{ m}^2$
calculată: $6 \cdot 10^{-48} \text{ m}^2$

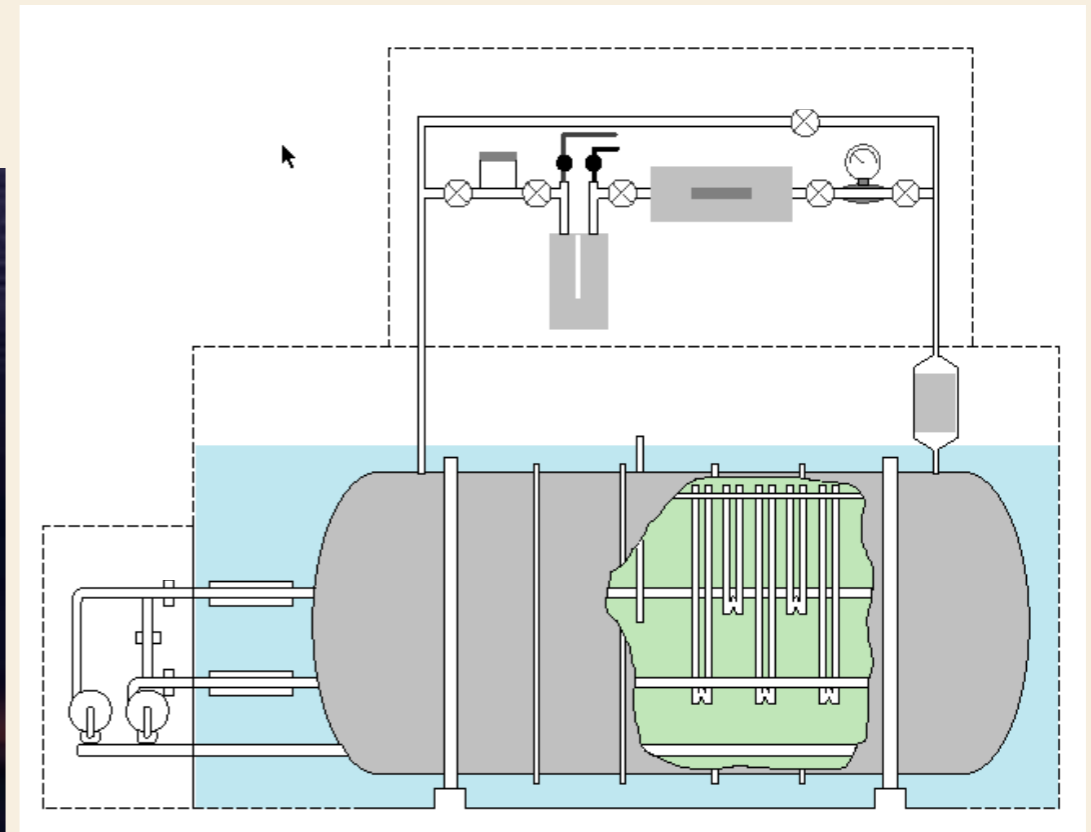
Misterele Neutrinului

Experimentul lui Davis (1968-1993)

Rezervorul cu 615 t de **percloretică** din mina de aur Homestake:

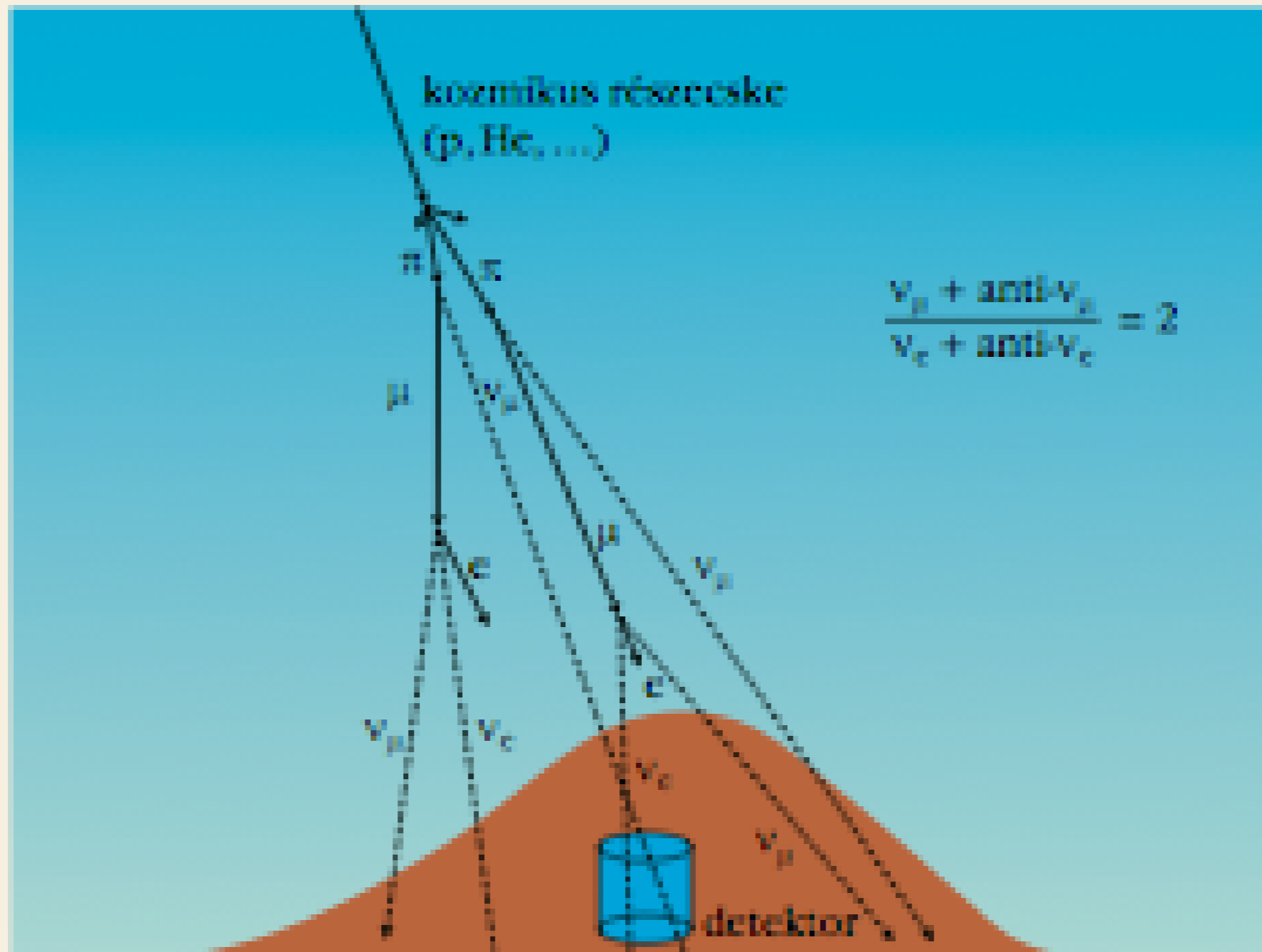


Unitatea probabilității : 1 SNU
= 1 eveniment/ 10^{36} nucl. Cl/sec



număr evenimente:
măsurat: $2,56 \pm 0,23$ SNU
(17 Ar/70 zi)
estimat: $8,2 \pm 1,8$ SNU
Mister neutrîn-solar

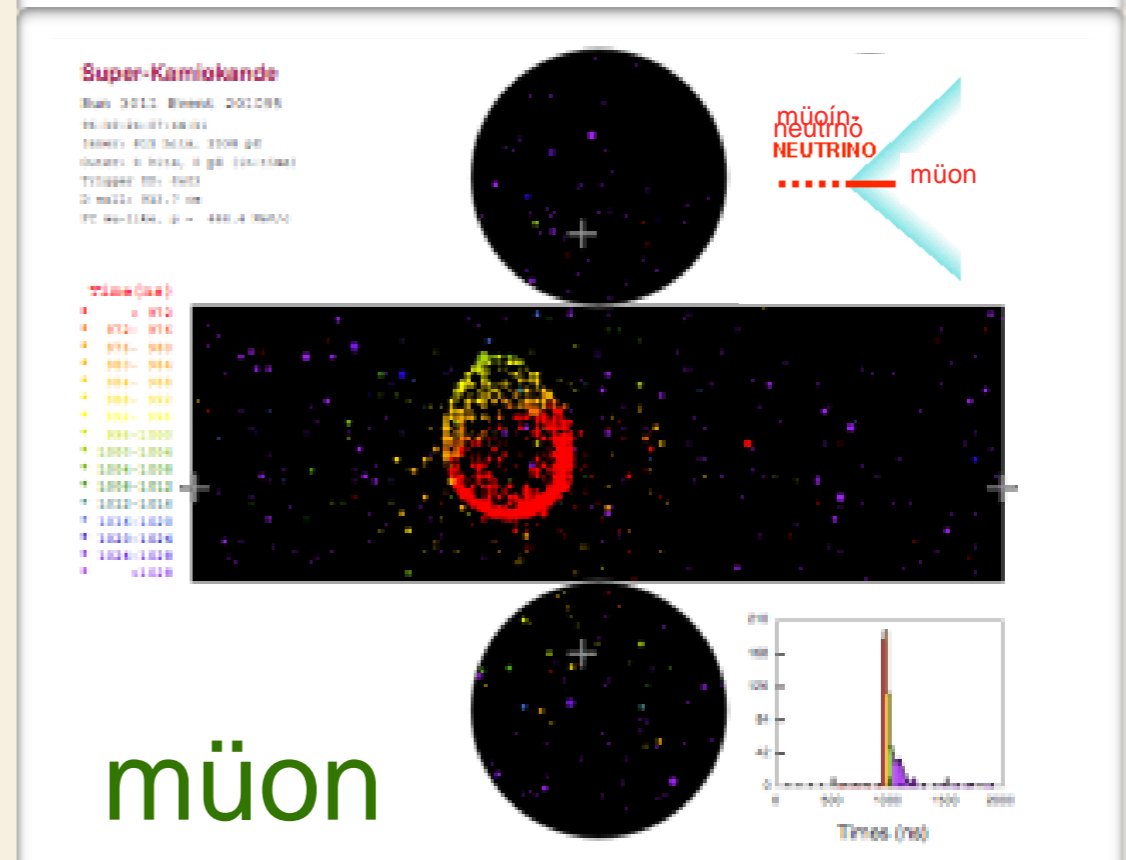
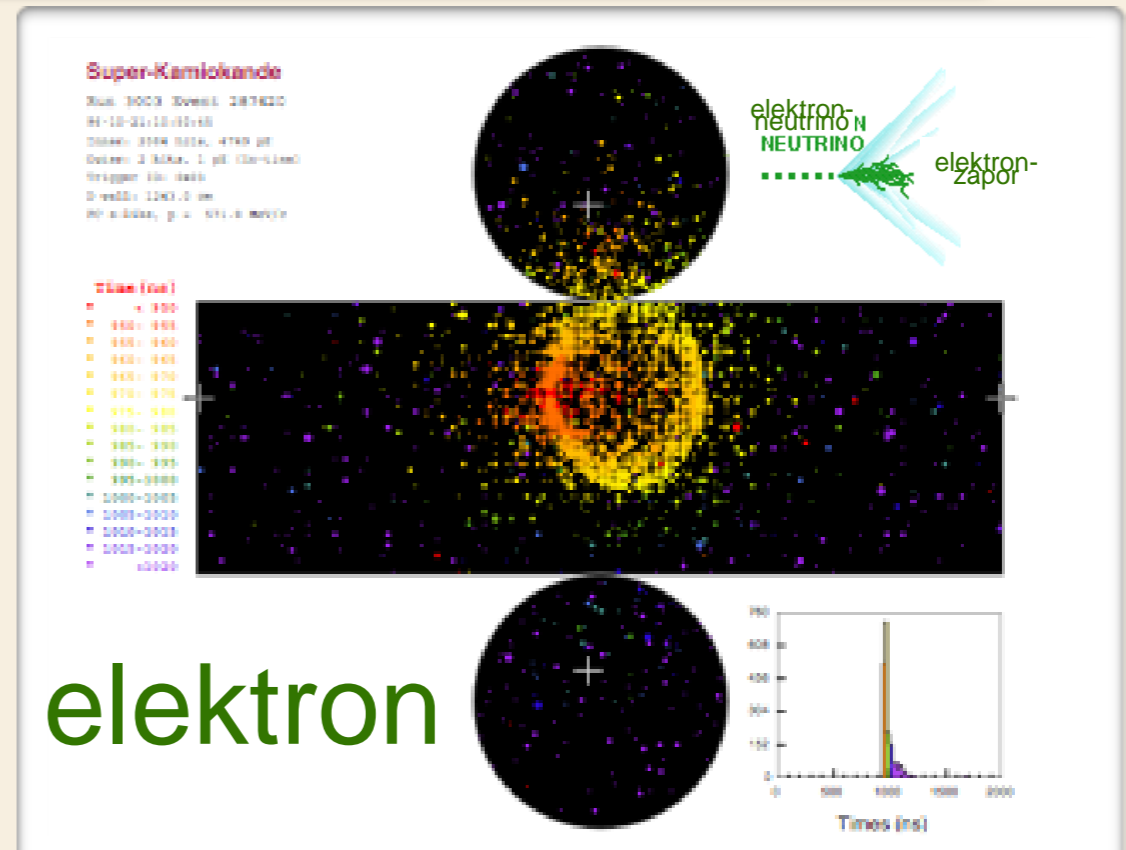
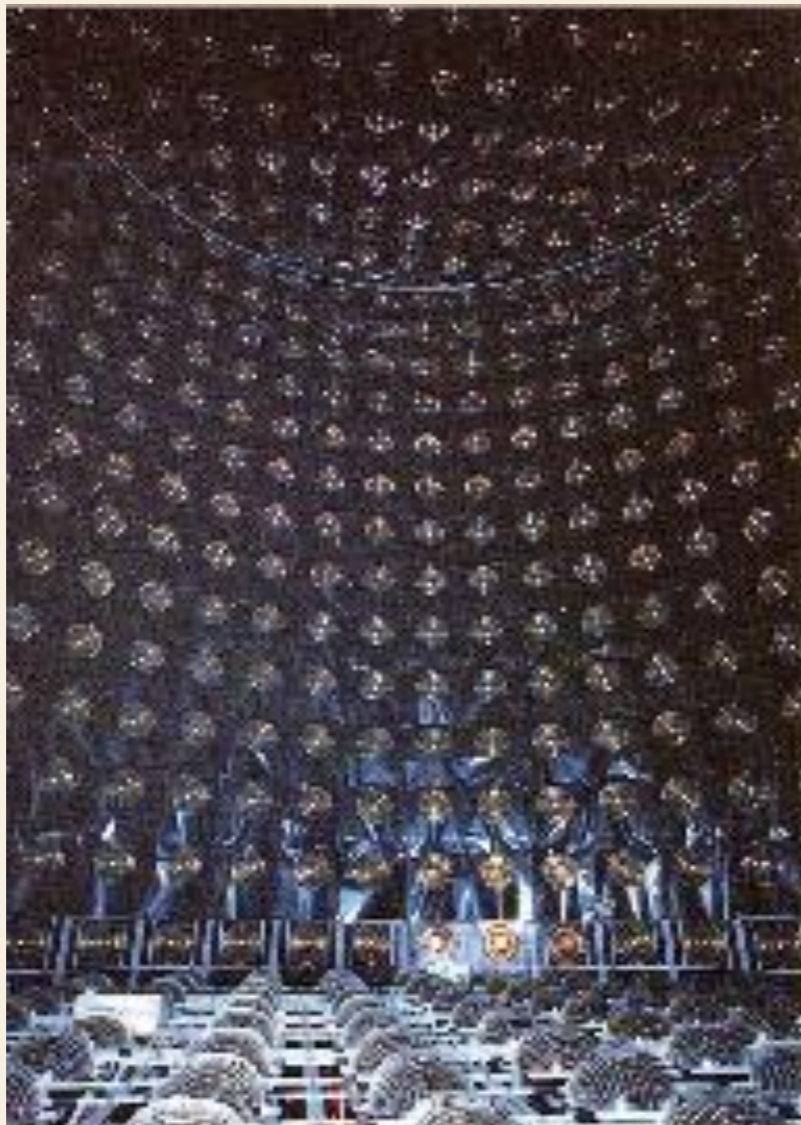
Neutrini atmosferici



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

Detectorul Kamiokande II

Țevile mari PM folosite pentru a deosebi conurile Cerenkov produse de electroni și miuoni: au întărit lipsa neutrinelor Solari



Amestecul
neutrinilor

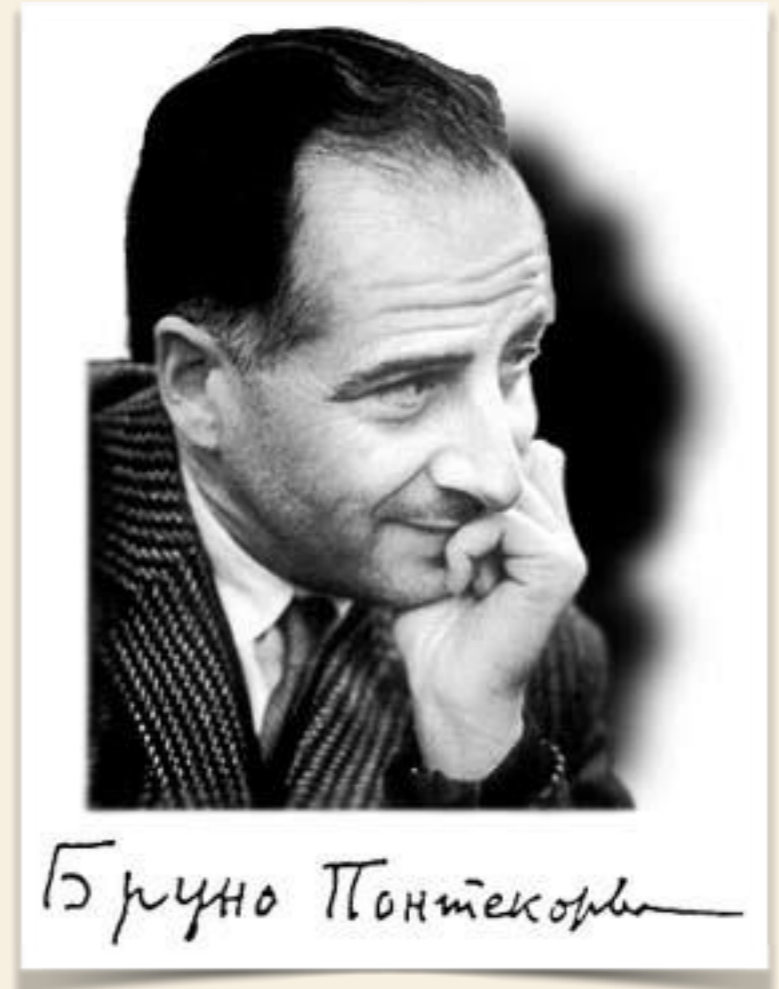
Ipoteza lui Pontecorvo (Pryce?)

...aceasta este doar o ipoteză, nu există pentru ea motiv teoretic

neutrini de diverse tipuri (arome) se pot transforma unul în altul, dacă masa unui neutrin cu aromă fixată să zicem ν_μ nu este unic determinat ci este amestecul (probabil a trei) neutrini diferiți cu mase determinate m_i asemenea quarcilor.

În cazul quarcilor amestecarea duce la apariția matricei Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) a cărei efect, este măsurabil în procesele de împrăștiere a particulelor elementare.

Analogul matrii CKM în cazul neutrinilor este matricea PMNS
(Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata)



Urmarea amestecului neutrinilor

Faza neutrinilor care în timpul T au parcurs lungimea L , va fi diferită dacă masele lor diferă

⇒ Probabilitatea, ca neutrino să
nu se transforme după parcurgerea lungimii L

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

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

Oscilația-aromei neutrinilor

Unghiul θ al amestecului ne arată care este ponderea componentelor de mase i și j în ν_μ :

- dacă $\theta = 0^\circ$ (sau 90°), atunci ν_μ este numai ν_i (sau ν_j), și nu avem amestecare
- dacă $\theta = 45^\circ$, atunci în ν_μ avem în proporții egale ν_i și ν_j , amestecarea neutrinilor este maximă

De exemplu presupunând numai un amestec $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$:
parcurgând o distanță determinată L ν_μ se transformă integral în ν_τ , și mergând mai departe se retransformă în neutrinel miuonic inițial, ș.a.m.d.: aroma neutrinului oscilează

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

Oscilația aromei neutrinilor

Condiția oscilației aromei neutrinilor este ca neutrinii să aibă masă, de exemplu

în cazul $\Delta m^2 = (1 \text{ eV}/c^2)^2$ și $E_\nu = 1 \text{ GeV}$

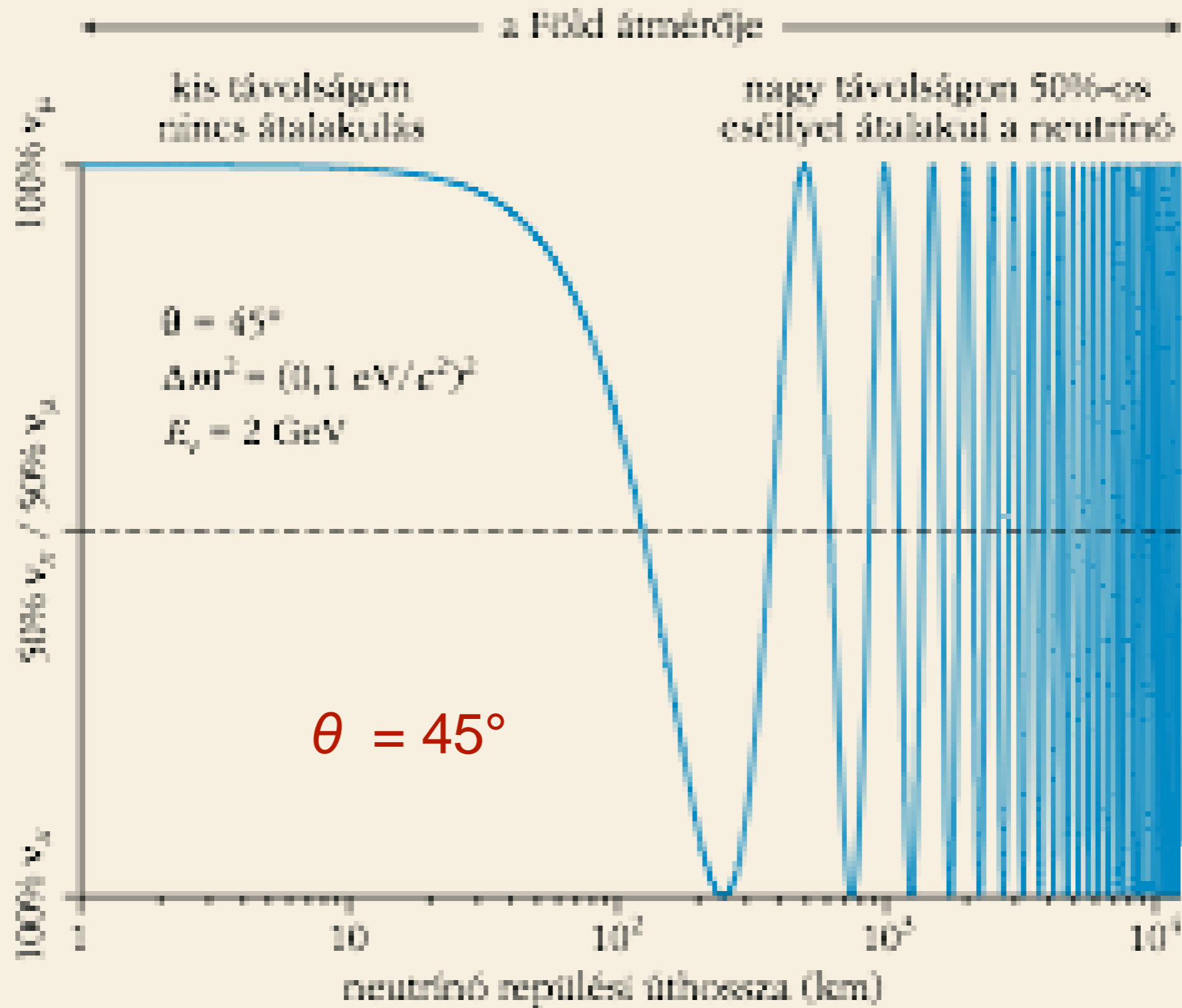
$\Delta m^2 c^4 L / (hcE_\nu) = L/1,24 \text{ km}$, deci pentru

- $L = 1,24 \text{ km}$ transformare totală
- pentru o energie a neutrinelui de zece ori mai mare e nevoie de o distanță de zece ori mai mare
- în cazul $\Delta m^2 = (0,1 \text{ eV}/c^2)^2$ de o sută de ori mai mare

dacă reușim să observăm oscilația aromei neutrinilor și să determinăm pe L , atunci putem trage concluzii despre masa neutrinilor

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

Probabilitatea **ne**transformării



Explicația anomaliei neutrinelor atmosferici cu oscilația aromei neutrinelor

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

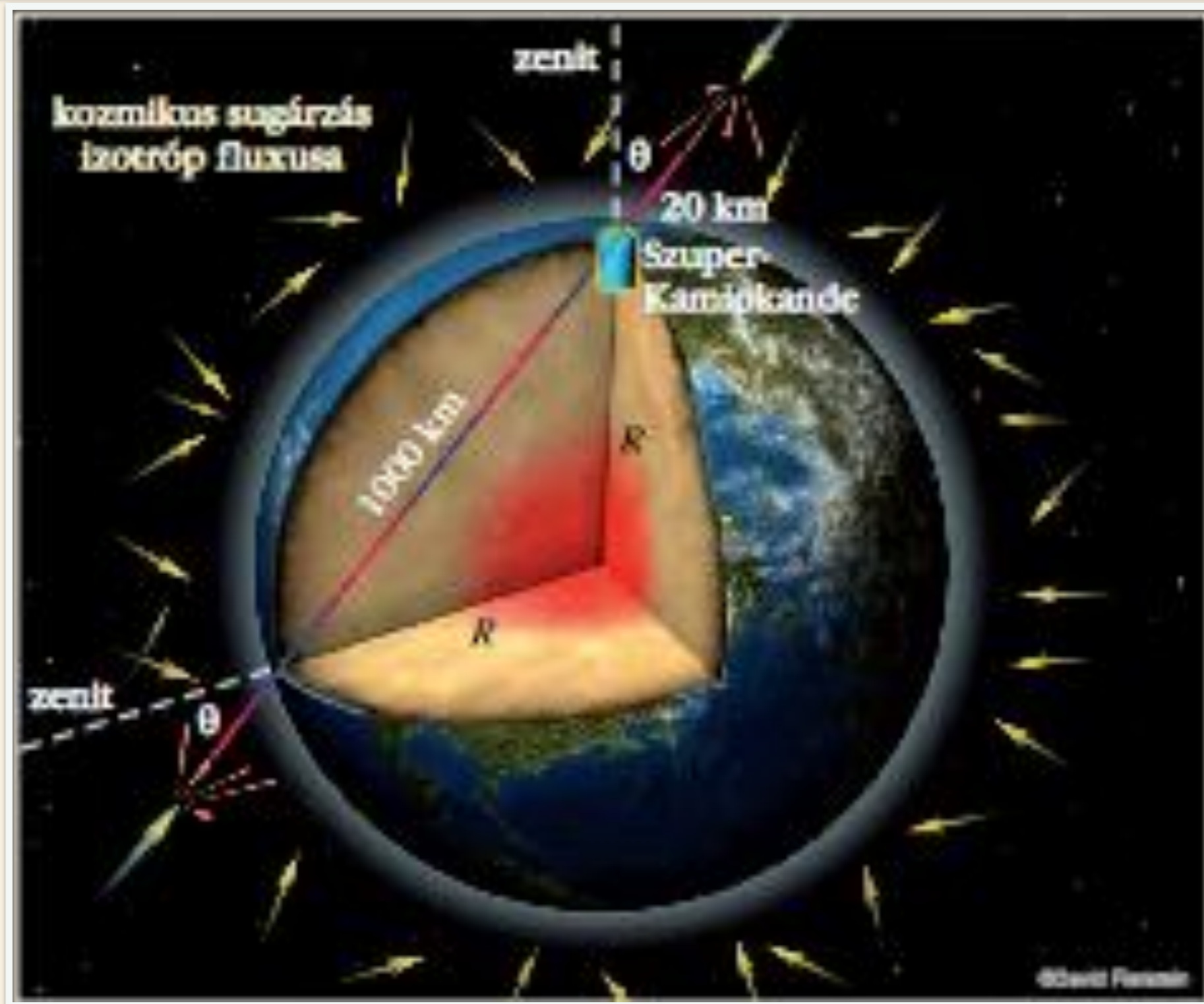
Este aceasta suficient de convingătoare?

Nu, dar se poate face o măsurătoare mai bună!

Fără oscilația aromei neutrinelor estimarea densității fluxului de neutrini care circulă în sus și în jos este egală (simetrie sus-jos)

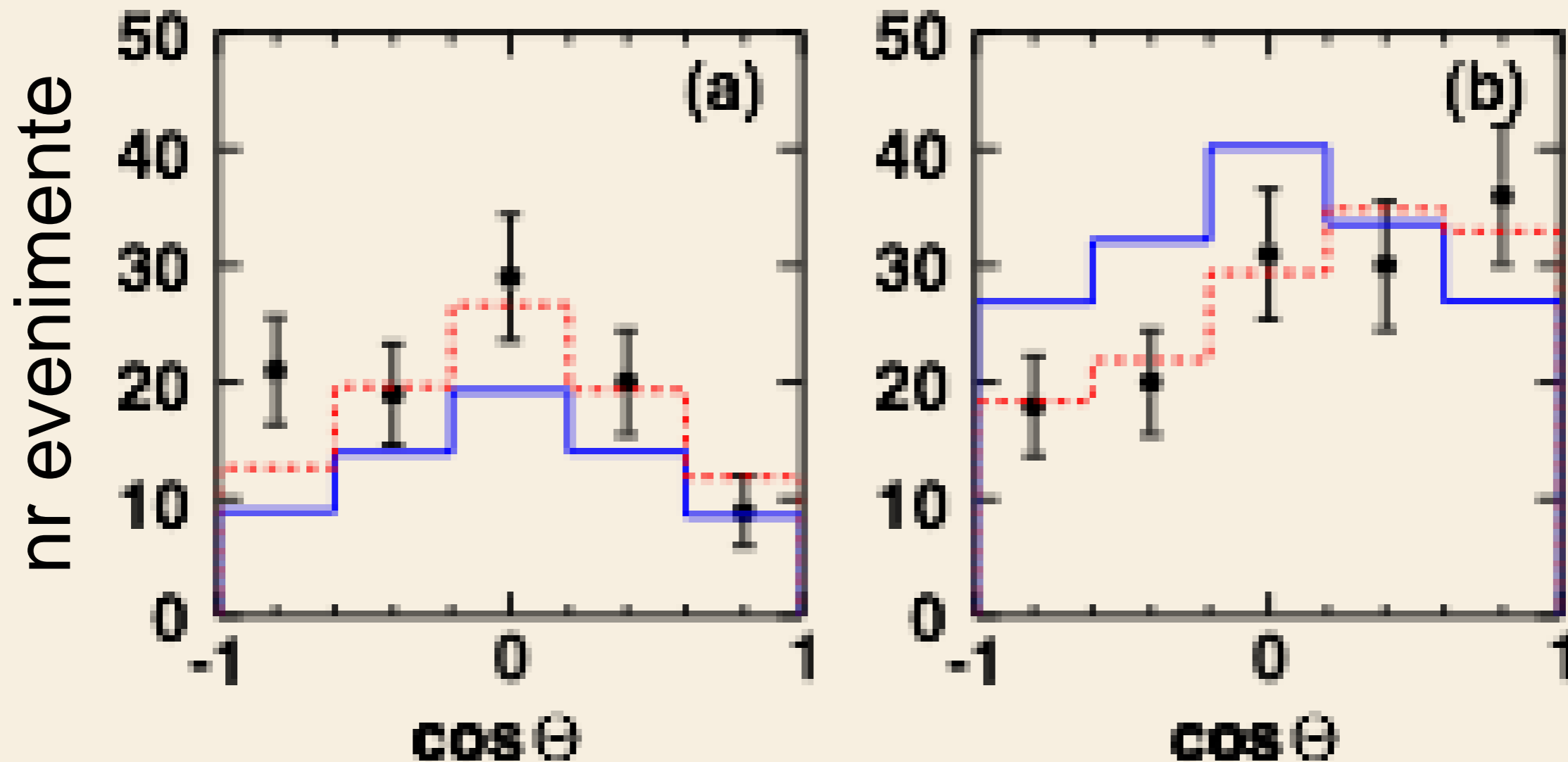
Oscilația aromei neutrinelor strică această simetrie (neutrini care trec prin Pământ se pot transforma)

Distrugerea simetriei sus-jos



măsurabilă cu detectoare sensibile la direcție

Rezultatul Kamiokande II



a) evenimente-electron b) evenimente-miuon

P(explicație cu oscilație întâmplătoare) = 1%

Estimare în fizica particulelor 10^{-5} %

Experiența SuperKamiokande

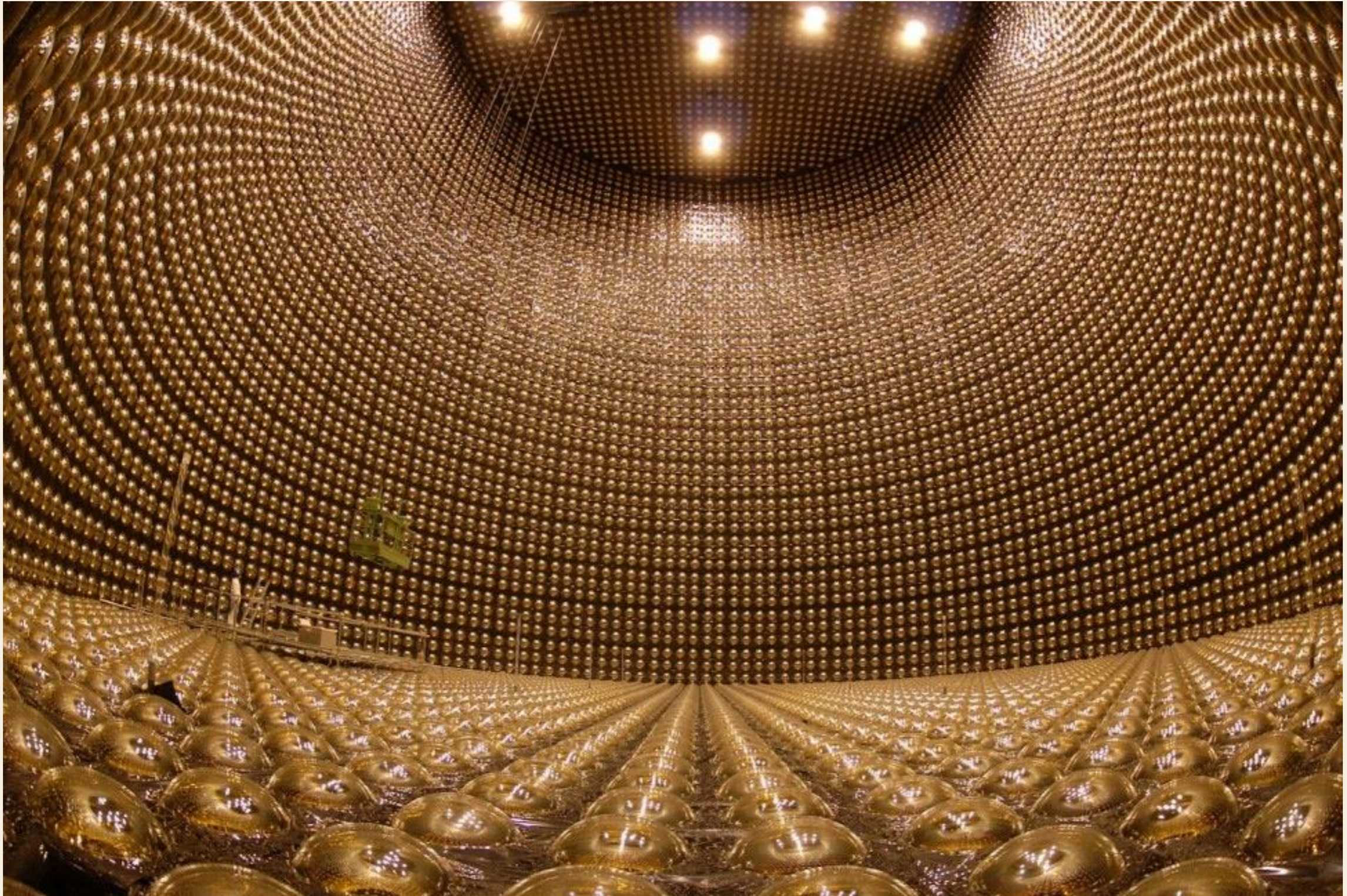
- rezervor intern: 22,5 kt apă, 11200 buc țevi PM de 50 cm
- rezervor extern: 27,5 kt apă, 1900 buc țevi PM de 20 cm
- eficiența certificării neutrinelor miuoni ~100%



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

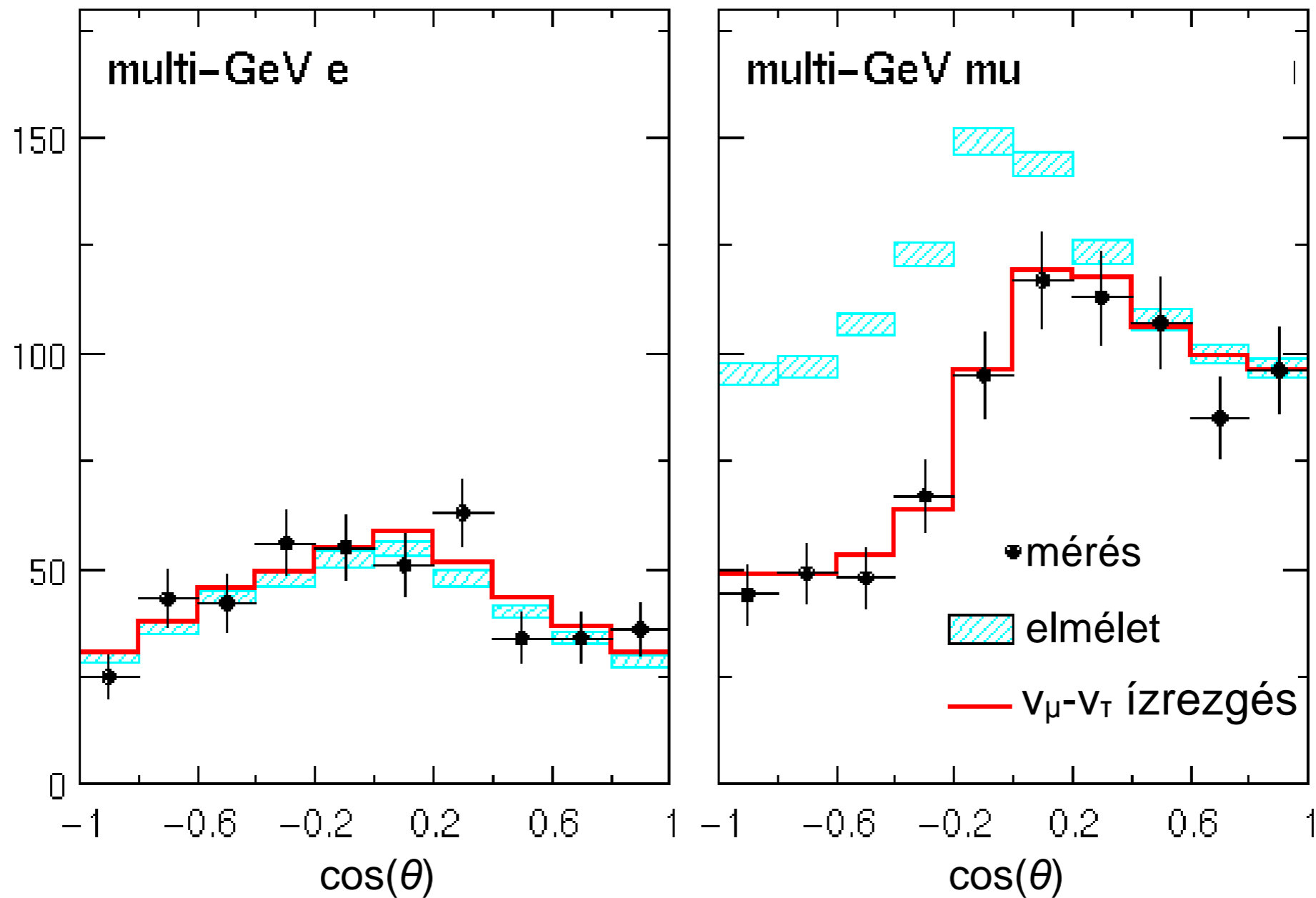
$(R_{\mu/e})_{\text{măsurare}} / (R_{\mu/e})_{\text{teorie}} = 0,688 \pm 0.053$ întărește
Măsurătoarea Kamiokande II

Experiența SuperKamiokande



Descoperirea oscilației aromei neutrinelor

număr evenimente



a) evenimente-electron

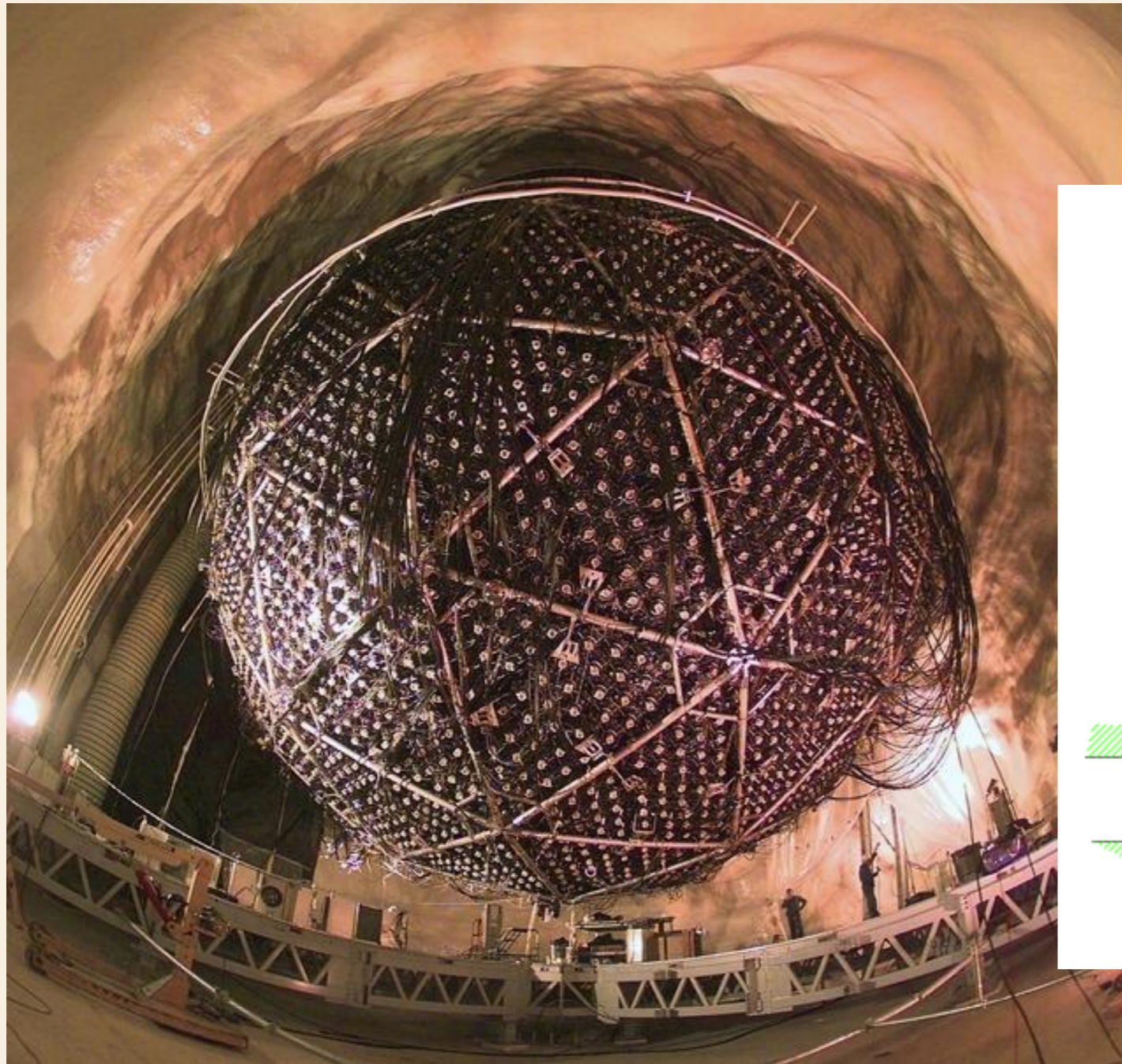
b) evenimente-miuon

Descoperirea oscilației aromei neutrinilor

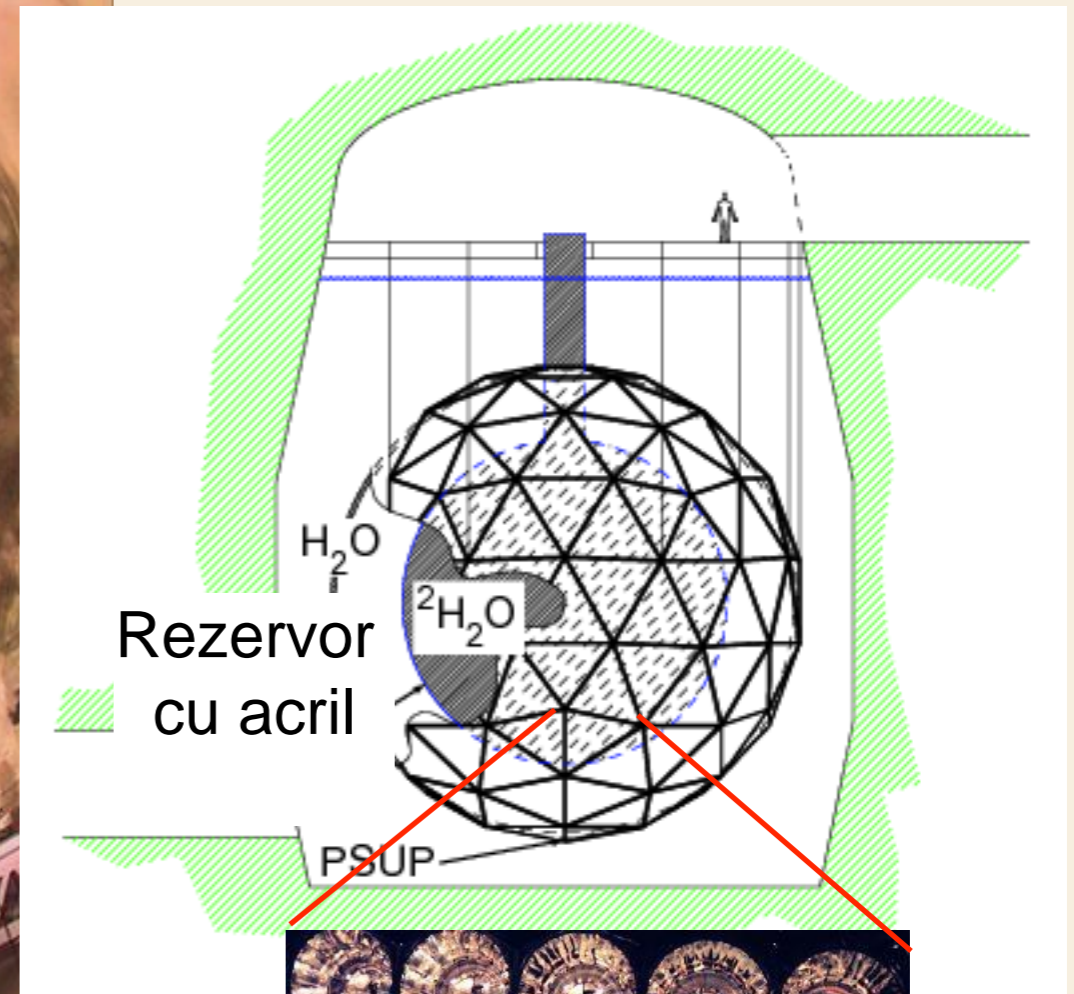
pune o mulțime de întrebări:

- Cât de mare este diferența Δm^2 necesară oscilației aromei?
- Cât de mare este unghiul θ al amestecării?
- În măsurători s-a putut observa numai dispariția neutrinelui-miuonic. S-au transformat ei conform așteptărilor în **neutrini-tauonici**?
(numărul neutrinilor-electronici nu s-a modificat)
- Există amestecare și între alți **neutrini**?
- Nu în ultimul rând: transformările observate la neutrinii atmosferici pot fi observate și la neutrinii sosiți de la Soare?
- **Misterul neutrinilor Solari** dezbatut mai devreme își găsește rezolvarea în oscilația aromei neutrinilor?

Experimentul SNO (1998-2002)



1100 t de apă grea curată (D_2O)
într-un rezervor cu raza de 6 m



La 2000 m sub pământ

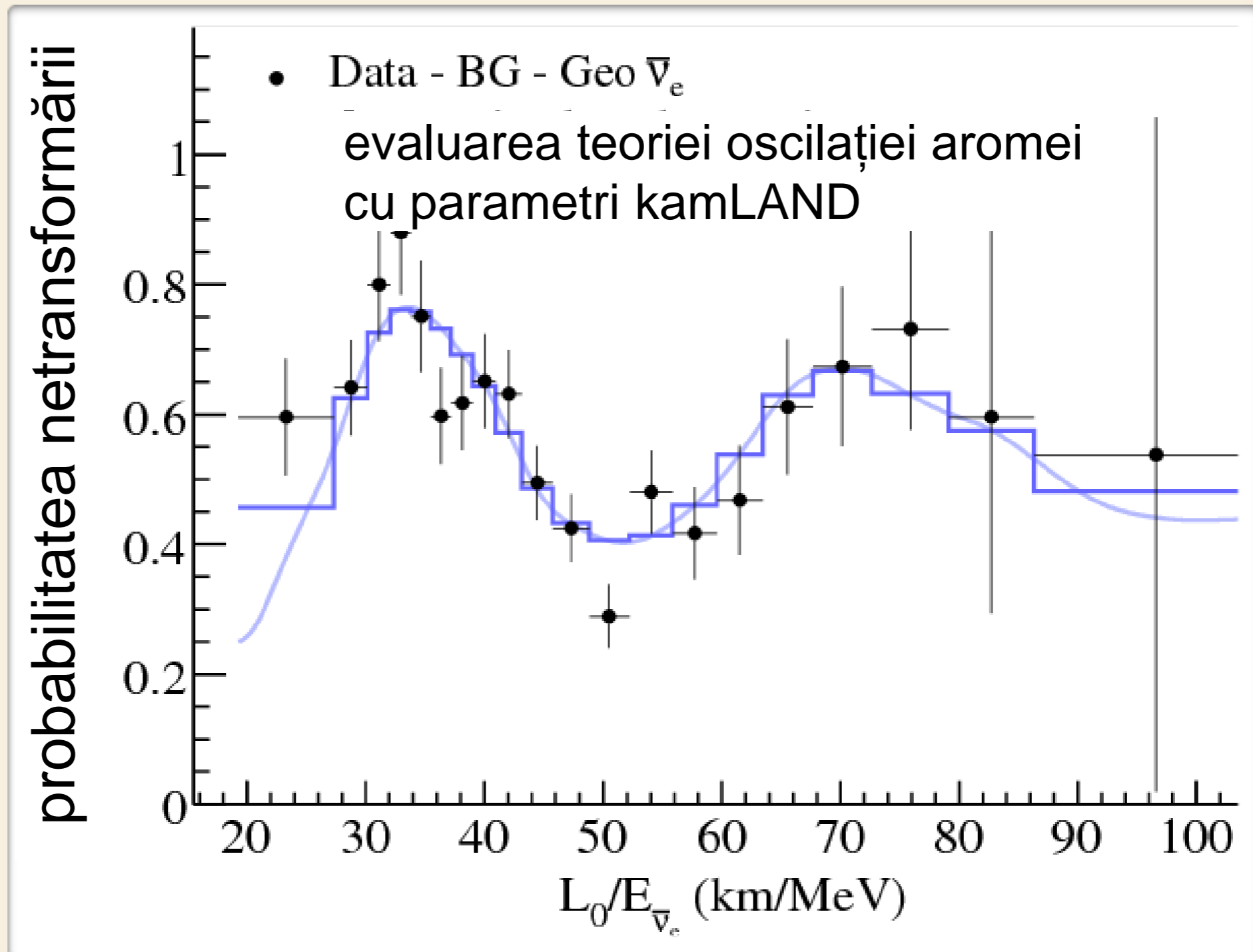
Urmări

Oscilația aromei neutrinilor arată dincolo de modelul standard

- În modelul standard neutrinii nu au masă
- Descoperirea oscilației aromei neutrinilor se poate înțelege numai dacă admitem că **din trei cel puțin doi au masă**
- Dar transformare de particulă poate avea loc numai **daca particula simte cel puțin două forțe**
- Se stie că, câmpul BEH acționează asupra neutrinilor, dar mecanismul Higgs cere ca neutrinii obișnuiți să aibă o pereche numită **neutrino steril** care simte numai câmpul BEH și alt câmp nu

observarea lor experimentală este dificilă

Oscilația aromei neutrinilor astăzi



Cuvânt final: Premiul Nobel Fizică 2015



Takaaki Kadzita

Arthur B. McDonald

*„pentru descoperirea oscilațiilor aromei neutrinilor,
care certifică existența masei neutrinilor”*

Cuvânt de încheiere

Pe 8 noiembrie 2015 s-a anunțat în San Francisco că, câștigătorii premiului **Descoperire în Fizică pe 2016** (Breakthrough prize in Fundamental Physics, 3 MUSD) sunt cinci echipe de cercetători pentru experimente cu neutrini.

Daya-Bay China, KamLAND, K2K/T2K, Szuper Kamiokande Japonia și SNO Canada

Percepția generală:

Prin analiza neutrinilor putem primi un răspuns pentru întrebările nelămurite din fizica particulelor și cosmologie.

Appendix