

# METAMORFOZA NEUTRINILOR

Roman Chirilă

roman.chirila@ici.ro

Institutul Național de Cercetare – Dezvoltare în Informatică - ICI București

**Rezumat:** Procesul de metamorfoză a neutrinelor constă în transformarea incredibilă a unui tip de neutrino în altul, pe durata parcursului lor prin spațiu. În fizica particulelor elementare acest fenomen este cunoscut sub denumirea de „oscilație” și reprezintă o dovadă serioasă a faptului că neutrinii au masă, deci ei pot oscila, adică își pot schimba identitatea și implicit natura lor. Spre deosebire de alte particule, neutrino are o identitate dublă: el poate fi una dintre cele trei arome ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) și să posede una dintre cele trei mase ( $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ ), dar o aromă dată nu implică și o anumită masă, sau invers. Masa exactă a fiecărei arome nu se cunoaște încă. Totuși, problema este de ce au neutrinii masă și cum se explică micimea acestor mase. În Modelul Standard, neutrinii nu au masă. Prin urmare, este nevoie de o îmbunătățire a acestui model, de a adăuga noi rezultate experimentale și explicații teoretice care pot avea implicații profunde în astrofizică, cosmologie, sau chiar asupra naturii fizicii. Lucrarea de față este un scurt rezumat despre natura cuantică a procesului de oscilație a neutrinelor, dar și despre o serie de rezultate experimentale legate de schimbarea identității neutrinelor. În plus, neutrinii par a constitui miezul unui alt mister: de ce trăim într-un univers alcătuit din materie și nu din antimaterie?

**Cuvinte cheie:** neutrino, oscilația neutrinelor, neutrino Dirac, neutrini Majorana, mecanismul seesaw.

**Abstract:** The neutrino metamorphosis process consists of the incredible transformation of one type of neutrino into another one along the way. In the particle physics it is known as „oscillation” phenomenon which is a strong evidence that neutrino particles have mass, therefore they can oscillate, i.e. they can change their identities and implicitly their nature. Unlike other types of particles, neutrino has dual identities: it can be one of three flavor ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) and have one of three masses ( $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ ) but a given flavor does not imply a given mass, or vice versa. Exactly how much mass they have is still unknown. The larger question, however, is why the neutrinos have mass at all and what about their extremely small mass values. In the Standard Model developed by physicists in order to explain the Universe, neutrinos are massless particles. Thus, it is absolutely necessary to improve this model, to add new data results and explanations which could have deeper implications in astrophysics, cosmology or nature of physics itself.

The present paper is a short review about the quantum aspects of the neutrinos oscillation process but about several experiments related to the neutrino identity changing too. Furthermore, neutrinos seem to be at the heart of a larger mystery: why we live in a universe made of matter and not antimatter?

**Key words:** neutrino, neutrinos oscillation, Dirac neutrino, Majorana neutrinos, seesaw mechanism.

*De ce există ceva mai degrabă decât nimic?  
(Leibniz)*

## 1. Introducere

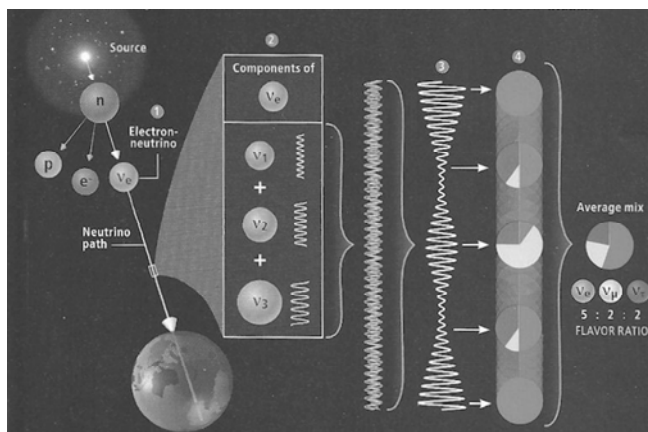
Oscilația neutrinelor, care determină uimitoarea metamorfoză a acestor particule, constituie un fenomen profund cuantic, prin care un neutrino creat cu o anumită aromă leptonică (electron, muon sau tauon) poate fi detectat ulterior ca având o aromă complet diferită. Probabilitatea de măsurare a unei anumite arome de neutrino variază periodic, pe parcursul propagării acesteia prin spațiu [1].

Această proprietate a neutrinelor de a oscila, combinată cu delicata problemă a micimii masei acestora, fac din neutrini cele mai misterioase particule din cosmos. Observațiile cosmologice și experiențele de laborator, indică faptul că masele celor trei arome de neutrini trebuie să fie extrem de mici și că originea acestora este strâns legată de procesele subatomice care au avut loc imediat după Big Bang [2]. Neutrinii sunt particule subatomice care se deplasează cu viteze colosale, apropiate de viteza luminii. Chiar dacă sunt cele mai răspândite particule din univers, doar una dintre o mie de miliarde din neutrinii produși de Soare interacționează cu un atom de pe Pământ, motiv pentru care Isaac Asimov le-a botezat „particulele fantomă”[3].

Pe durata parcursului lor prin spațiu, particulele de neutrino au proprietatea ciudată de a se transforma dintr-o aromă în alta, fenomen înlesnit de dubla lor identitate. Pe de o parte, ele pot fi una dintre cele trei arome ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ), iar pe de altă parte ele pot avea una dintre cele trei mase ( $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ ), fără ca o aromă dată să implice o anumită masă dată, și nici invers [4]. Aroma neutrinelor determină modul în care particula interacționează cu materia, iar masa sa determină modul de propagare al particulei prin spațiu.

Ceea ce numim noi *neutrino* nu este altceva decât o *stare cuantică* produsă într-o interacție nucleară slabă. Altfel spus, un neutrino este o stare proprie de aromă, în sensul că un neutrino este produs întotdeauna cu (sau absorbit pentru a rezulta) un lepton încărcat al unei arome de electron, muon sau de tauon, rezultând un neutrino electronic, neutrino muonic, sau neutrino tauonic. Stările proprii de arome nu sunt identice cu stările proprii de masă [5].

De pildă, dezintegrarea beta a unui neutron produce un proton, un electron și un neutrino electronic,  $\nu_e$  [6]. Acest neutrino nu are o masă proprie specifică, ci este un amestec al celor trei posibilități de masă, adică este o sumă de trei unde cu lungimi de undă diferite, așa cum este redat sugestiv în figura de mai jos [6] [7]:



Pe măsură ce neutrino se propagă prin spațiu, acest amestec al maselor poate varia, astfel încât la detecție putem avea o aromă metamorfozată, complet diferită de aroma inițială, produsă de procesul astrofizic respectiv. După cum se observă în figură, neutrino electronic trece într-o suprapunere de 3 stări de masă. Compoziția amestecului variază în timpul deplasării prin spațiu, deci nu rămâne constantă. Statistic, în acest caz, se poate observa un raport de  $5\nu_e : 2\nu_\mu : 2\nu_\tau$ , adică un detector prezintă o probabilitate de 5/9 de a detecta  $\nu_e$ , și de numai 4/9 pentru  $\nu_\mu$  și  $\nu_\tau$ .

Prin urmare, în cazul neutrinelui, proporția inițială dintre arome poate diferi complet de proporția dintre arome ajunsă la suprafața pământului, la detector, după cum se observă în tabelul de mai jos [6],[7]:

Sursa	Proporția la Sursă	Proporția la nivelul Pământului
Dezintegrare neutron	$1\nu_e : 0\nu_\mu : 0\nu_\tau$	$5\nu_e : 2\nu_\mu : 2\nu_\tau$
Dezintegrare pion	1 : 2 : 0	1 : 1 : 1
Dezintegrare pion (incompletă)	0 : 1 : 0	4 : 7 : 7
Dezintegrare materie întunecată	1 : 1 : 2	7 : 8 : 8
Spuma spațiu-timp	oricare	1 : 1 : 1
Dezintegrare neutrino ( $\nu_1$ )	oricare	4 : 1 : 1
Dezintegrare neutrino ( $\nu_3$ )	oricare	0 : 1 : 1

Merită de remarcat și faptul că aromele muonic,  $\nu_\mu$ , și tauonic,  $\nu_\tau$ , sosesc întotdeauna la suprafața pământului în proporții riguros egale, drept consecință a simetriei lor intrinseci, indiferent de procesul astrofizic care a generat amestecul initial, distinct, de arome.

## 2. Confirmări ale oscilației neutrinilor

Procesul de metamorfoză al unui neutrino a fost observat direct, pentru prima dată, la Gran Sasso National Laboratories al INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare), după mai mult de trei ani de cercetări, în cadrul experimentului OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus), când s-a observat pentru prima dată un neutrino tau,  $\nu_\tau$ , în urma analizei de neutriini

produși la CERN [8]. În esență, este vorba de o *oscilație* a neutrinelui, în care o particulă își modifică identitatea, schimbându-și aroma [9]. Pentru a surprinde acest eveniment atât de rar, fizicienii implicați în proiectul OPERA au trimis un fascicul de neutrini de tip muonic  $\nu_\mu$  de la laboratorul de fizică de la CERN, din Elveția, pe un traseu de 730 km, până la Laboratorul Gran Sasso, aflat sub un munte din Italia, în regiunea Abruzzo. Pe această distanță, o foarte mică parte dintre neutrini și-au schimbat în mod natural tipul și, când au ajuns la laborator, un foarte mic număr dintre aceștia au fost detectați de un fel de aparat fotografic uriaș, de 4.000 de tone, în timp ce se transformau în particula corespunzătoare, care, apoi, se dezintegra, după un scurt parcurs. Aceste evenimente extrem de rapide produceau o slabă emisie de radiație, detectată de una dintre cele 9 milioane de plăci fotografice ale aparatului. Cum neutrinii nu au sarcină electrică, ei interacționează cu materia doar prin intermediul forței nucleare slabe, una dintre cele patru tipuri de forțe fundamentale din Modelul Standard (MS), ceea ce se întâmplă însă rar. De menționat ar fi faptul că masa neutrinelor, oricât de mică ar fi ea, determină viteza cu care oscilează neutrinii de la un tip la altul și, în consecință, frecvența cu care pot fi ei detectați [10].

Experimentul OPERA a operat cu premisa că neutrinii nu au o masă proprie definită, ci sunt o combinație de stări, fiecare cu masa sa proprie, diferită. Neutrinii cu masă diferită evoluează în mod diferit. De la CERN au fost trimiși numai neutrini muonici. După un timp, neutrinii deveneau un amestec al celor două componente, muonic și tau, altfel spus neutrinii inițiali începeau să oscileze. După cele 2,4 ms, timp în care au parcurs distanța de 730 km, o mare parte dintre neutrinii muonici  $\nu_\mu$  s-au transformat în neutrini tau  $\nu_\tau$ , confirmând ipoteza fizicianului italian Bruno Pontecorvo, cea de *oscilație* a neutrinelor [11] [12].

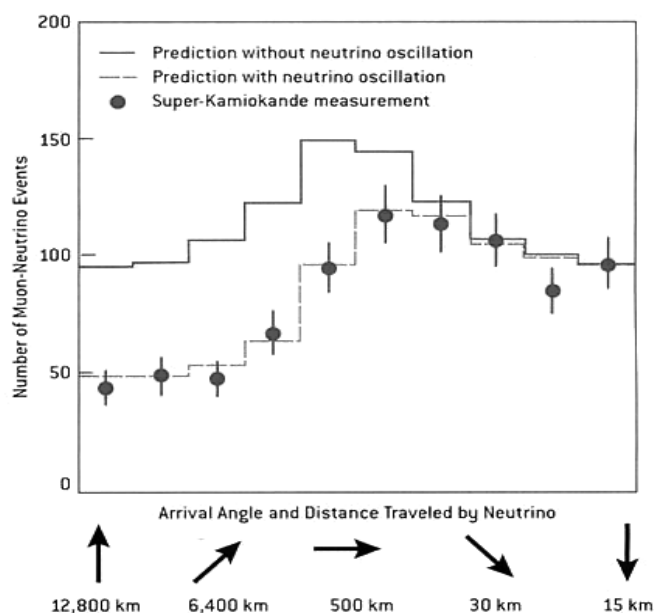
Chiar și înainte de acest experiment crucial, cu circa 15 ani în urmă, o serie de experimente au scos în evidență fenomenul de metamorfoză, sau de oscilație a neutrinelor, prin dispariția neutrinelor (sau prezența unui straniu *deficit* de neutrini) proveniți din Soare, din atmosferă, sau din alte surse. Totuși, experimentul OPERA pune în evidență transformarea cameleonică *directă* a unui neutrino dintr-o aromă în alta, ceea ce constituie o veritabilă premieră istorică pentru fizica experimentală.

O altă confirmare experimentală a oscilației neutrinelor vine din Japonia, de la **SuperK**.

În Japonia, în localitatea Kamioka, s-a construit în 1998 un nou complex experimental, urmașul mai vechiului Kamiokande. Complexul a primit numele de **SuperKamiokande** (SuperK). Cu un rezervor înalt de 40 de metri, conținând 50 de mii de tone de apă ultrapură și înconjurat de 11.000 de tuburi fotomultiplicatoare, complexul propunea un nou proiect cu ajutorul căruia putea fi detectată *direcția* din care veneau neutrinii. Teoretic, fluxul de neutrini ar fi trebuit să fie același din toate direcțiile, planeta nereprezentând un obstacol semnificativ pentru aceste particule fantomă. Numai că observațiile experimentale au relevat faptul că neutrinii miuonici veniți de deasupra complexului (practic cei formați în atmosfera de deasupra Japoniei) sunt în număr dublu față de cei care traversaseră întreg miezul planetei pentru a ajunge la complex (cei formați în urma reacțiilor radiației cosmice cu atmosfera superioară din acea zonă a planetei, diametral opusă Japoniei). Faptul că *deficitul* constatat manifesta o dependență de direcția din care veneau neutrinii a reprezentat dovada faptului că au loc *oscilații* ale neutrinelor. Neutrinii miuonici veniți din cealaltă parte a planetei erau mai puțini, pentru că avuseseră mai mult timp la dispoziție să oscileze, transformându-se în alte tipuri de neutrini.

Datele de la **SuperK**, corelate cu cele obținute în 1999 la Subdury National Observatory (**SNO**), Ontario, Canada au dovedit fără urmă de îndoială faptul că și *neutrinii electronici*, cei proveniți de la Soare, *oscilează* la rândul lor.

Figura de mai jos prezintă corelarea dintre măsurătorile efectuate la **SuperK** și predicțiile teoretice, ținând seama de *oscilațiile* neutrinelor. Se observă o concordanță excelentă între teorie și rezultatele experimentale [6]:



De remarcat faptul că particulele de neutrino care se deplasează pe verticală au de parcurs circa 13.000 km, adică lungimea diametrului planetei noastre. Pe direcția orizontală, neutrinii ar avea de parcurs circa 500 km, ceea ce înseamnă distanța până la marginea atmosferei terestre. Observatorul SNO (Sudbury Neutrino Observatory) din Ontario a măsurat numărul total de neutrino din Soare și separat numărul de neutrini electronici. S-a constatat că numărul total de neutrini este cu mult mai mare decât cel al neutrinelor electronici [6], acest fapt fiind datorat tocmai procesului de *oscilație* al neutrinelor.

### 3. Oscilația neutrinelor. Aspecte cuantice

Oscilația neutrinelor reprezintă un fenomen care se datorează faptului că stările proprii de aromă nu coincid cu stările proprii de masă [13]. Între stările de masă există o mică diferență, ceea ce face ca ele să se propage diferit. Vom nota stările de masă prin  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  și  $\nu_3$  și să presupunem că masele sunt foarte apropiate ca valoare, dar diferite. De fiecare dată când generăm un electron într-o interacție nucleară slabă, noi generăm de fapt una dintre aceste stări proprii de masă. Mai presupunem că generăm aceste stări de masă cu probabilități diferite. În urma acestei interacții nucleare slabe, noi nu știm de fapt care masă anume este, prin urmare vom considera că avem o suprapunere coerentă de stări de masă  $\nu_i$ , iar această suprapunere coerentă o numim *neutrino electronic* sau electron-neutrino, pentru care avem [19]:

$$|\nu_e\rangle = U_{e1} |\nu_1\rangle + U_{e2} |\nu_2\rangle + U_{e3} |\nu_3\rangle$$

În acest caz avem următorul fenomen: presupunem că la sursă s-a produs un neutrino. Acest neutrino va avea o aromă definită, dar va fi produsă ca o combinație liniară de stări definite de masă. Aceste stări definite de masă se vor propaga de la sursă către detector. Dacă stările au mase diferite, atunci faza dintre stări se va modifica odată cu distanța parcursă de la sursă spre detector. La nivelul detectorului, stările de masă vor avea faze relative diferite în raport cu cele ale stărilor de masă avute la nivelul sursei, și atunci când le detectăm, este posibil să detectăm starea de aromă care nu a fost prezentă în fasciculul inițial. Dacă introducem restricția de oscilații cu două arome, atunci expresia probabilității de a porni cu o aromă, să zicem  $\nu_x$ , la sursă, dar să detectăm o alta,  $\nu_y$ , la detector, este următoarea [19]:

$$P(\nu_x \rightarrow \nu_y) = \sin^2(2\theta) \sin^2(1.27 \Delta m^2 L(\text{km}) / E(\text{GeV}))$$

La relația scrisă mai sus, putem face următoarele comentarii:

Unghiul de amestec  $\theta$ : acesta definește în esență cât de diferite sunt stările de aromă față de stările de masă. Dacă  $\theta = 0$ , atunci stările de aromă sunt identice cu stările de masă, deci  $\nu_\alpha$  se va

propaga de la sursă către detector ca o undă cu impuls bine definit. Evident, în acest caz, nu se produce oscilația. Dacă, însă,  $\theta = \pi / 4$ , atunci oscilațiile sunt *maxime*, astfel încât într-un punct de-a lungul traiectoriei dintre sursă și detector, *toate* aromele  $\nu_\alpha$  se vor metamorfoza în  $\nu_\beta$ .

Pătratul diferenței de masă  $\Delta m^2$ : dacă vorbim de cazul a două arome, atunci avem două stări de masă. Acest parametru exprimă diferența dintre pătratele acestor stări de masă:  $\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$ . Pentru ca fenomenul de oscilație să fie posibil, cel puțin una dintre stările de masă trebuie să fie diferită de zero. Această observație, banală în aparență, are implicații uriașe, și anume: pentru ca oscilația să fie posibilă, neutrino *trebuie să aibă masă*. Fără *masă*, nu avem *oscilație*, deci fenomenul de oscilație presupune existența masei neutrinoilor, contrar prevederilor MS. Mai mult, masele stărilor de masă trebuie să fie diferite, altfel avem  $\Delta m^2 = 0$  și  $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = 0$ . Masele determină diferența de fază ale celor două funcții de undă asociate maselor. Dacă valorile stărilor de masă ar fi egale, atunci stările de masă nu ar putea niciodată să iasă din fază, iar experimental am măsura la detector aceeași combinație liniară a stărilor de masă precum cea generată la sursă. De asemenea, să observăm și faptul că experimentele asupra oscilației neutrinoilor ne oferă informații doar despre *diferența* dintre valorile maselor, nicidecum despre valorile absolute ale stărilor de masă și nici dacă  $m_1$  este mai mare decât  $m_2$ . Dacă  $\Delta m^2 \rightarrow -\Delta m^2$ , atunci probabilitatea de oscilație va fi aceeași.

L/E: acest raport este cel pe care îl controlează cu adevărat experimentatorul, L fiind distanța dintre sursă și detector, iar E este energia neutrinoilor incidenți. Pentru un  $\Delta m^2$  dat, probabilitatea de oscilație se va modifica pe măsură ce ne îndepărtăm de detector, sau dacă scanăm neutrini cu energii diferite. Din punct de vedere experimental, dacă avem o valoare particulară pentru  $\Delta m^2$ , atunci configurația experimentală ar trebui realizată astfel încât pentru probabilitatea de oscilație sensibilitatea să fie maximă. Să presupunem că dorim o configurație care să corespundă relației:

$$1.27\Delta m^2 L/E = \pi/2 \quad \text{sau} \quad L/E = \pi/2.54 \Delta m^2$$

În această situație, putem alege fie energia fasciculului, fie linia de bază (L), fie ambele. Ideal ar fi să-l maximizăm pe L și să-l minimizăm pe E. Mai trebuie ținut cont și de faptul că fasciculul incident de neutrino este divergent, iar suprafața detectorului aflat la distanța L crește cu  $L^2$ , deci implicit crește și costul. În același timp, secțiunea eficace a neutrinoilor scade pe măsură ce scade energia acestuia, deci timpul scurs pentru colectarea de evenimente experimentale crește liniar și implicit cresc și costurile.

Dacă, însă, valoarea lui L/E ne este impusă prin natura lucrurilor, cum ar fi, de pildă, cazul neutrinoilor solari, atunci putem încerca o combinație optimă dintre  $\Delta m^2$  și  $\theta$ , astfel încât probabilitatea de oscilație să fie într-un domeniu de maxim valoric.

În principiu, ne putem imagina două tipuri de experimente pentru studiul oscilației neutrinoilor [19]. Primul este de "dispariție", iar al doilea este de „aparitie”. În primul caz, pornim cu un fascicul pur de aromă cunoscută  $\nu_x$  și căutăm să vedem câte particule au dispărut. În cadrul acestui experiment de "dispariție" se măsoară probabilitatea de supraviețuire:

$$P(\nu_x \rightarrow \nu_x) = 1 - \sin^2(2\theta)\sin^2(1.27 \Delta m^2 L(\text{km})/E (\text{GeV})).$$

În cadrul celui de-al doilea experiment, se pornește de la un fascicul pur cu aromă cunoscută  $\nu_x$  și căutăm să vedem câți neutrini de altă aromă  $\nu_y$  „apar” la detecție.

**Cazul cu 2 arome:** pentru simplitate, fără a insista asupra detaliilor de calcul, vom urma notațiile și demersul matematic din [13][19], și vom defini stările de aromă ca fiind combinații liniare ale stărilor de masă. Astfel, avem:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_j U_{\alpha j} |\nu_j\rangle$$

unde,  $\alpha = e, \mu, \tau$  și  $j = 1, 2, 3$ , iar U este o matrice unitară de amestec, iar  $U^\dagger = U^{-1}$ , de unde rezultă:

$$|\nu_j\rangle = \sum_\alpha U_{\alpha j}^* |\nu_\alpha\rangle.$$

În acest caz, studiarea oscilațiilor neutrinilor între cele două arome,  $\nu_\alpha$  și  $\nu_\beta$ , presupune scrierea unei matrici de amestec, sub forma unei matrici de rotație, de tipul următor:

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

După efectuarea calculelor, se obține următoarea expresie pentru probabilitatea de oscilație:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = 2 \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2}\right),$$

cu  $\phi_i = E_i t - p_i x$ .

Diferența de fază de mai sus se mai poate scrie astfel:

$$\phi_2 - \phi_1 = \left( \frac{m_1^2}{2E_1} - \frac{m_2^2}{2E_2} \right) L$$

Presupunând că neutrinii sunt particule relativiste, atunci,  $t = x = L$ , cu  $L =$  distanța dintre sursă și detector. Atunci, putem scrie relația:

$$p_i = \sqrt{E_i^2 - m_i^2} = E_i \sqrt{1 - \frac{m_i^2}{E_i^2}} \approx E_i \left( \sqrt{1 - \frac{m_i^2}{E_i^2}} \right),$$

În această situație, diferența de fază devine:

$$\phi_2 - \phi_1 = \left( \frac{m_1^2}{2E_1} - \frac{m_2^2}{2E_2} \right) L$$

În ipoteza că energiile stărilor de masă sunt identice, atunci diferența de fază se scrie astfel:

$$\phi_2 - \phi_1 = \left( \frac{m_1^2}{2E_1} - \frac{m_2^2}{2E_2} \right) L = \frac{\Delta m^2 L}{2E}$$

unde:  $\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$  și  $E_1 = E_2 = E$ .

Dacă se exprimă distanța  $L$  în km și energia  $E$  în GeV, folosind valorile numerice pentru  $\hbar$  și  $c$ , și înlocuind în ecuația probabilității, se obține relația finală[13][19]:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E_\nu}\right)$$

Relația de mai sus reprezintă, deci, probabilitatea ca generând neutrinii  $\nu_\alpha$  să detectăm neutrinii  $\nu_\beta$ , sau, mai simplu, probabilitatea de oscilație. Invers, probabilitatea de supraviețuire pentru  $\nu_\alpha$ , adică generând neutrinii  $\nu_\alpha$  și să detectăm tot neutrinii  $\nu_\alpha$ , va fi:

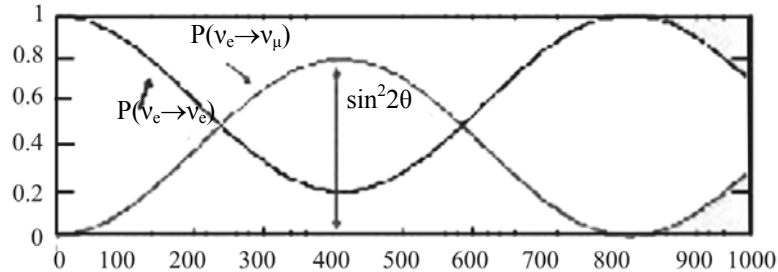
$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta).$$

unde,  $\theta$  (sau  $\theta_{\alpha\beta}$ ) este unghiul de amestec,  $L$  – distanța parcursă de neutrino până la detector,  $E$  este energia neutrino în GeV, iar  $\Delta m^2 = \Delta m_{\beta\alpha}^2 = m_\beta^2 - m_\alpha^2$  este diferența dintre pătratele maselor celor două arome exprimate în  $eV^2$ . Unghiurile de amestec pot fi determinate din amplitudinile de oscilație, iar  $\Delta m_{\beta\alpha}^2$  poate fi determinată din perioadele de oscilație.

Grafic, funcția probabilității de oscilație obținută mai sus se prezintă în figura de mai jos, pentru câteva valori particulare:  $\Delta m^2 = 0.003 eV^2$ ,  $\sin^2 2\theta = 0.8$  și  $E_\nu = 1 \text{ GeV}$  [19]. Se observă că pentru  $L = 0$ , probabilitatea de oscilație este nulă, în timp ce probabilitatea de supraviețuire este unu. Pe măsură ce  $L$  crește, oscilațiile cresc și ele până ce ating un maxim pentru valoarea  $1.27 \Delta m^2 L / E = \pi/2$ , sau  $L = 400$  km. La acest punct, oscilația este maximă, dar unghiul de amestec are

valoarea  $\sin^2 2\theta = 0.8$ , deci la maximum de oscilație avem doar 80% din neutrinii inițiali care au oscilat. Pe măsură ce  $L$  crește în continuare, oscilația scade, astfel încât în jurul valorii de  $L = 820$  km fasciculul de neutrino se recombina integral sub aspectul aromei inițiale. Dacă am fi avut  $\sin^2(2\theta) = 1$ , atunci am fi putut spune că pe drumul către detector, toți neutrinii din fascicul s-au metamorfozat, adică au oscilat.

$$\Delta m^2 = 0.003 eV^2, \quad \sin^2 2\theta = 0.8 \quad E_\nu = 1 \text{ GeV}$$



**Cazul cu 3 arome:** oscilațiile neutrinelor pentru acest caz necesită folosirea unei matrici tridimensionale corespunzătoare, și anume:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Aceasta este o matrice de schimb unitară, numită și matricea PMNS (Pontecorvo, Maki, Nakagawa și Sakata) și este exprimată, de obicei, ca 3 matrici de rotație și o fază complexă [13][19]:

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Expresia probabilității de oscilație capătă expresia celei de mai jos:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin\left(\Delta m_{ij}^2 \frac{L}{4E}\right) + 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin\left(\Delta m_{ij}^2 \frac{L}{2E}\right)$$

Prima matrice este numită “sectorul 12”, a doua “sectorul 13”, iar a treia “sectorul 23”. A doua matrice este responsabilă pentru violarea simetriei  $\hat{C}\hat{P}$  (conjugarea de sarcină și paritatea). Dacă nu există violare, atunci  $\delta_{CP} = 0$ . În acest caz, termenul imaginat dispare și rămâne:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2\left(\Delta m_{ij}^2 \frac{L}{4E}\right)$$

Sunt 3 stări proprii de masă pentru neutrini și, deci, două  $\Delta m$  independente, și anume  $\Delta m_{23}^2$  și  $\Delta m_{12}^2$ . A treia este definită de relația:

$$\Delta m_{12}^2 + \Delta m_{23}^2 + \Delta m_{31}^2 = 0$$

Din experimente legate de neutrini solari și atmosferici s-a ajuns la concluzia că diferența de

masă legată de sectorul 23 este cea a neutrinelor atmosferice ( $\Delta m_{23}^2 \approx 3 \times 10^{-3} eV^2$ ), iar cea legată de sectorul 12 este cea a neutrinelor solari ( $\Delta m_{12}^2 \approx 8 \times 10^{-5} eV^2$ ) [19].

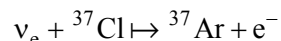
#### 4. Dovezi experimentale

**Homestake:** Fuziunea nucleară care are loc în interiorul stelelor este însoțită de emiterea unui număr imens de neutrini, botezați **neutrini solari**. Spre deosebire de energia produsă în interiorul Soarelui, care ajunge la noi la mii de ani după ce a fost generată în urma fuziunii, neutrinelor le sunt suficiente aproximativ 8 minute pentru a ajunge pe Pământ.

Studiul acestor neutrini care provin din reacțiile de fuziune nucleară din interiorul Soarelui și care sunt toți *neutrini electronici*, poate oferi informații cu privire la mecanismele interne de funcționare ale stelelor. John Bahcall a pus la punct un model matematic care descrie reacțiile nucleare solare, model matematic conform căruia emisia de neutrini solari trebuia să fie într-un număr impresionant. Ray Davis își propune să confirme experimental calculele lui Bahcall și pune în practică, în anul 1965, unul dintre cele mai îndrăznețe experimente din istoria fizicii, cu scopul de a “număra” neutrini solari care ajung pe Pământ. Experimentul a rămas cunoscut sub numele de *experimentul Homestake* (sau *experimentul Davis*), iar unele programe de televiziune de popularizare îl menționează și drept *proiectul Poltergeist*, aluzie la faptul că neutrini sunt extrem de dificil de detectat.

Davis a folosit un rezervor cu o capacitate de aproximativ 375.000 de litri, pe care l-a umplut cu un lichid pe bază de clor. Rezervorul a fost plasat la mai bine de 1 km sub pământ. Rezervorul de această capacitate era necesar deoarece probabilitatea de capturare a neutrinelor solari era extrem de mică, iar adâncimea foarte mare împiedica interferența cu orice altă formă de radiație solară. Neutrini pătrundeau nestingheriți la acea adâncime, neavând sarcină electrică, în timp ce alte forme de radiație nu ar fi putut penetra materialul de deasupra, neajungând până la locul experimentului.

Schema nucleară gândită de autori era următoarea: după coliziunea cu un neutrino, un atom de clor se transformă într-un izotop radioactiv de argon, izotopi pe care Davis îi extrăgea din lichid pentru a-i număra. La câteva săptămâni, Davis pompa heliu în rezervoare pentru a extrage argonul format, determinând apoi numărul de neutrini capturați:



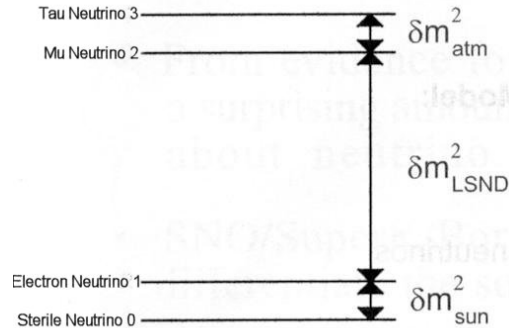
Concluziile experimentului au fost dezamăgitoare, Davis numărând doar o treime din neutrini anticipați de modelul matematic al lui Bahcall. Rata neutrinelor detectați a fost  $2.56 \pm 0.25$  SNU ( $1 \text{ SNU} = 10^{-36}$  interacții de neutrini per atom, per secundă), în timp ce modelul matematic prezicea o valoare de  $8.1 \pm 1.2$  SNU, deci aproximativ de trei ori mai mare decât rata măsurată [19]. Rezultatele experimentale ale lui Davis au fost rând pe rând reconfirmate de versiuni îmbunătățite ale experimentului Homestake, dând naștere așa-zisei *probleme a neutrinelor solari*. Majoritatea fizicienilor a luat atunci în considerare *oscilația neutrinelor*, deci posibilitatea ca neutrini lipsă să se fi transformat de fapt într-un alt tip de neutrino [2].

În cadrul experimentului de la **SNO** s-a utilizat apă grea drept țintă, pentru simplul motiv că nucleul de deuteriu este un nucleu fragil. Este nevoie de numai 2 MeV pentru a rupe protonul de neutron, iar neutrini solari au o energie de circa 30 MeV. Prin urmare, oricare dintre aromele neutrinelor,  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ , sau  $\nu_\tau$  pot rupe deuteriul într-o interacție obișnuită [19]. În esență, SNO este capabilă să detecteze neutrini prin trei canale de interacții distincte. Folosind măsurătorile acestor canale independente, s-a constatat că fluxul de neutrino muonic și taonic de la Soare este de  $(3.33 \pm 0.63) 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , adică de circa trei ori mai mare decât fluxul de neutrini electronici,  $\nu_e$ . Cum Soarele nu produce decât neutrini electronici, singura explicație a anomaliilor constatate experimental constă în *oscilația* neutrinelor electronici, pe durata parcursului lor dintre Soare și Pământ [6].

În plus, măsurătorile de neutrini solari efectuate la **SNO** au condus la următoarele rezultate:  $\theta_{12}$

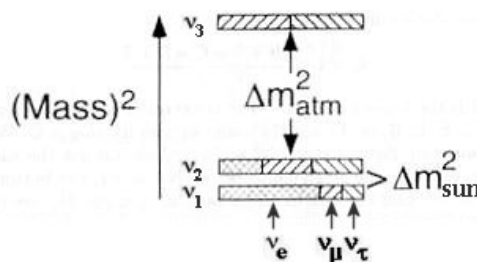


$\approx 30^\circ$  și  $\Delta m_{21}^2$  (Soare) =  $5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ , în timp ce de la **SuperK** s-au obținut valorile:  $\theta_{23} \approx 45^\circ$  și  $\Delta m_{23}^2$  (atm) =  $3,5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ . Măsurătorile de oscilație a lui  $\nu_\mu$  în  $\nu_e$  efectuate de către **LSND** (Liquid Scintillator Neutrino Detector), au condus la valorile:  $\theta \approx 0^\circ$  și  $\Delta m^2 \approx 1$ , valori total diferite de celelalte măsurători. Prin urmare, corelarea tuturor acestor rezultate a impus introducerea conceptului de *neutrino steril* (v. figura, preluată după [6]). Alte rezultate experimentale au stabilit valori de  $\theta_{13} \approx 0^\circ$  și un defazaj  $\delta \approx 0^\circ$ .



O analiză de neutrino efectuată în anul 2011 a arătat faptul că modelul cel mai potrivit de luat în calcul ar fi cel care conține 3 neutrino activi și 2 neutrino sterili [6]. Această schemă permite violarea simetriei  $\hat{C}\hat{P}$  (prin aplicarea simultană a operatorilor respectivi, de sarcină și paritate, se schimbă particulele din stânga unei reacții nucleare cu antiparticule din dreapta, deci reacția rezultată este permisă), ceea ce poate explica, printre altele, asimetria cosmologică inițială dintre materie și antimaterie [19]. Rezultatele indică un amestec consistent între neutrino, dar și o micime a masei acestora, și anume de cel puțin un milion de ori mai mică decât cea a electronului, dar nu furnizează absolut nicio informație legată de valoarea absolută a masei neutrinilor. Totuși, măsurătorile directe au impus niște limite superioare ale acestora, după cum urmează:  $\nu_e < 2, 2 \text{ eV}$ ;  $\nu_\mu < 190 \text{ KeV}$ ;  $\nu_\tau < 18, 2 \text{ MeV}$  [6].

Rezultatele de la Fermilab din anul 2007 arată faptul că nu există dovezi clare de oscilație a neutrinilor  $\nu_\mu$  în  $\nu_e$  pe distanța până la detectorul aflat la 440 m depărtare, ceea ce contrazice rezultatele de la LSND, adică ar anula ipoteza existenței unor neutrino sterili [6]. Pe de o parte, acești neutrino sterili nu își găsesc locul în cadrul MS, pe de altă parte ar avea impact asupra galaxiilor și a modificării distribuției de materie în univers, lucruri care nu s-au observat experimental, deci din punct de vedere cosmologic acești neutrino sterili nu ar trebui să existe. Totuși, experimentul de la MiniBooNE (Mini Booster Neutrino Experiment) a condus la rezultatele:  $\theta_{12} \approx \theta$  (Soare) și  $\theta_{23} \approx \theta_{\text{atm}}$  și a scos în evidență un fond anormal de mare cu  $\nu_e$  de joasă energie (v. figura, preluată după [6]):



Tot la **MiniBooNE**, în anul **2010**, s-a desfășurat un alt experiment, folosind de data aceasta antineutrino și care avansează ideea existenței celor patru tipuri de neutrino, adică se repune pe tapet existența neutrinilor sterili. Acești neutrino sterili, dacă ar exista cu adevărat, atunci ar fi de tipul right-handed, exact particula postulată în mecanismul "seesaw" și care nu participă la interacția nucleară slabă – motivul pentru care s-ar detecta cu atâta dificultate. În plus, a fost negată propensiunea neutrinilor  $\nu_e$  de a se transforma în neutrino sterili [6][19].

În martie **2012**, lângă Hong Kong, **Daya Bay Neutrino Experiment** prezintă rezultatele măsurătorilor efectuate:  $\theta_{13} \approx 8, 83^\circ$  cu un nivel de încredere de 5, 2 sigma, în ipoteza de lucru  $\Delta m_{13}^2$

$\approx \Delta m_{23}^2$ , ceea ce s-ar traduce prin probabilitatea de supraviețuire a antineutrinoilor electronici =  $1 - P(1 \rightarrow 3)$ . Acest rezultat diferit de zero (contrar altor estimări care erau aproximativ zero, sau sub relevanța statistică) poate încuraja efectuarea pe viitor de alte experimente mult mai rafinate și mai precise, și anume de a stabili dacă neutrinii și antineutrinii au comportamente complet diferite, ceea ce ar putea explica prevalarea materiei în raport cu antimateria în perioada universului timpuriu[6].

În concluzie, iată **rezultatele actuale** care se cunosc cu certitudine despre oscilația neutrinoilor și masa neutrinoilor rezultată din experiențele de oscilație [19]. Există trei neutrino ușori. Stările de masă ale neutrinoilor sunt diferite de stările de aromă. Se cunosc următoarele valori:

$$\Delta m_{12}^2 = 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 - \text{neutrini solari}$$

$$|\Delta m_{23}^2| = 2.3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 - \text{neutrini atmosferici}$$

Se mai știe semnul lui  $\Delta m_{12}^2$ , dar nu și al lui  $\Delta m_{23}^2$ . De asemenea, se cunosc valorile și pentru unghiurile de amestec, prezentate mai jos:

$$\sin^2(2\theta_{12}) \rightarrow \theta_{12} = (32.5 \pm 2.4)^\circ$$

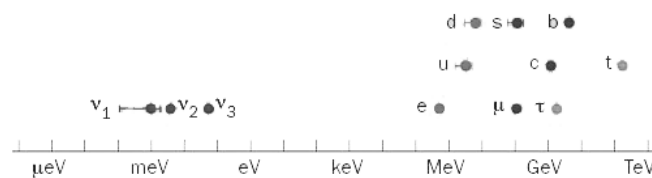
$$\sin^2(2\theta_{23}) \rightarrow \theta_{23} = (45.0 \pm 2.4)^\circ$$

$$\sin^2(2\theta_{13}) \rightarrow \theta_{13} = (8.9 \pm 0.3)^\circ$$

Rezultatele de mai sus corespund calculului matematic, folosind matricea PMNS.

## 5. Originea masei neutrinoilor

Faptul că neutrinii au masă a constituit o bombă neașteptată pentru edificiul impecabil al MS, dar și o provocare pentru teoreticienii chemați să rezolve această aparentă contradicție dintre predicțiile MS și rezultatele experimentale. Pe de altă parte, măsurătorile indirecte au indicat faptul că electronii par a fi de cel puțin 500.000 de ori mai grei decât neutrinii, așa cum se observă în figura de mai jos [14][15]:



În esență, s-a încercat extinderea MS, cu corecțiile necesare, abordări pe care le vom sintetiza pe scurt în cele ce urmează.

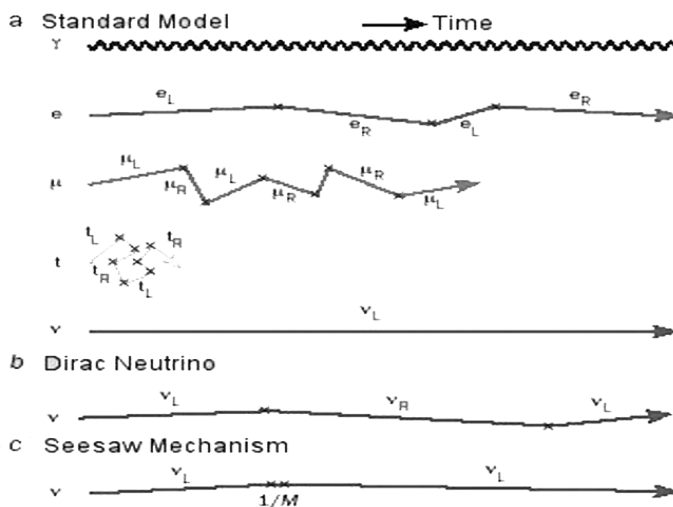
O primă abordare este cea în care neutrinii sunt considerați **fermioni Dirac** și presupune că aceste particule capătă masă prin mecanismul Higgs. Se mai consideră că neutrinii RH (Right Handed) au scăpat detecției, datorită interacției lor foarte slabe, cu 26 ordine de mărime mai slabe decât a neutrinoilor obișnuiți. Prin urmare, neutrinii ar trebui să aibă o masă comparabilă cu masa celorlalte particule elementare din cadrul MS. Pentru aceasta, interacția neutrinoilor cu bozonul Higgs ar trebui să fie cu cel puțin 12 ordine de mărime mai slabă decât cea a quarcului top, lucru de neacceptat ca această ipoteză de lucru să devină o constantă fundamentală a naturii.

A doua abordare pleacă de la ideea de **neutrini Majorana**, adică neutrinii pot fi propriile lor antiparticule. Prin urmare, nu mai este nevoie să invocăm neutrinii RH cu interacțiile lor extrem de slabe. Pe de altă parte, suntem nevoiți să renunțăm la distincția fundamentală dintre materie și antimaterie, deoarece neutrinii și antineutrinii pot fi particule identice deoarece nu au sarcină electrică.

Și, totuși, cum este generată masa neutrinoilor? În această abordare, este posibil ca neutrinii RH să posede propria lor masă fără nicio legătură cu bozonul Higgs. Spre deosebire de alți leptoni și quarci, masa neutrinoilor RH,  $M$ , nu este legată de scala de masă a bozonului Higgs, putând fi mult mai mare decât a altor particule. Astfel, când un neutrino LH se ciocnește cu un bozon Higgs, el

capătă masa  $m$  care este comparabilă cu masa altor leptoni sau quarci. În același timp, el se transformă în neutrino RH, care este mult mai greu decât ar permite normal o conservare a energiei. Totuși, principiul de incertitudine al lui Heisenberg permite existența acestei stări pentru un interval de timp foarte scurt  $\Delta t$ , dat de expresia:  $\Delta t \sim h / Mc^2$ , după care particulele se transformă la loc într-un neutrino LH cu masa  $m$ , prin ciocnirea din nou cu bozonul Higgs, iar ciclul se repetă. Altfel spus, se poate afirma că neutrino va avea o masă medie dată de raportul  $m^2/M$ . Acesta este **mecanismul seesaw** care poate genera, în principiu, neutrini ușori. În mod normal, noi ne-am face griji că neutrini cu masa  $m$ , comparabilă cu cea a altor leptoni sau quarci, ar fi prea grei. Cu toate acestea, se pot obține neutrini ușori, dacă  $M$  este mult mai mare decât masa tipică a leptonilor sau quarurilor. În concluzie, neutrinii RH trebuie să fie foarte grei, după cum prezice GUT (Grand Unified Theories). Experiența sugerează faptul că aceste forțe erau unificate atunci când universul era de circa  $10^{32}$  m în diametru. Datorită principiului de incertitudine, particulele care erau generate atunci aveau un impuls și, deci, o masă mare, adică neutrinii RH cu o masă suficient de mare puteau produce neutrini ușori prin **mecanismul seesaw**.

Figura de mai jos reprezintă sinteza grafică a celor afirmate anterior [15]. Astfel, (a) - conform mecanismului Higgs din MS, particulele capătă masă după ciocnirea cu bozonul Higgs. Fotonii nu interacționează cu bozonul Higgs, fiind fără masă. După ciocnirea cu bozonul Higgs, toate particulele LH (Left Handed), inclusiv electronii, muonii și quarzii top, devin particule RH și invers. Neutrinii sunt întotdeauna LH. Cum neutrinii RH nu există în MS, teoria spune că neutrinii nu pot avea niciodată masă. (b) - În cazul unei prime extinderi a MS, neutrinii LH și RH există. Acești neutrini Dirac capătă masă prin mecanismul Higgs, doar că neutrinii RH interacționează mult mai slab decât oricare alte particule. (c) - În conformitate cu o altă extindere a MS, neutrinii RH extrem de grei sunt generați pentru intervale de timp foarte scurte, înainte de ciocnirea cu bozonul Higgs, pentru a produce neutrini ușori LH, adică neutrini Majorana.



## 6. Cum e cu puțință mai curând materia decât antimateria?

Așa cum se știe deja, în univers există foarte puțină materie, dar nu și în faza universului timpuriu. Atunci se pare s-au creat cantități egale de materie și antimaterie, care, pe măsură ce universul s-a răcit, această materie și antimaterie s-au anihilat reciproc, degajând energie pură. Totuși, faptul că în prezent noi existăm ca materie într-un univers material ne conduce la ideea existenței unei asimetrii dintre materie și antimaterie, la un raport de unu la zece miliarde. Oamenii de știință consideră că masa finită a neutrinelor este cea care a înclinat balanța în favoarea materiei, jucând astfel un rol fundamental în nașterea universului nostru actual. Toate particulele neutrino detectate sunt LH (left-handed), adică au spinul îndreptat pe direcția opusă deplasării, iar toți antineutrino sunt RH (right-handed). În principiu, acești neutrino care au o masă diferită de zero, se deplasează cu o viteză mai mică decât viteza luminii, iar unui observator, care s-ar deplasa mai rapid și ar privi peste umăr la acești neutrino, i-ar observa ca particule RH. Ce particule sunt acestea, despre care MS nu poate spune nimic? Evident, sunt anti-neutrino. În acest caz, ar trebui să

abandonăm distincția fundamentală dintre neutrino și anti-neutrino și, în consecință, cea dintre materie și anti-materie. Și atunci vorbim despre neutrino Majorana, caz în care neutrino și anti-neutrino sunt unul și același obiect. Așa stând lucrurile, nu este greu de presupus procesul de transformare al materiei în antimaterie și invers. Prin urmare, existența masei neutrinilor face cu puțință mecanismul asimetric dintre materie și antimaterie în perioada universului timpuriu, când vorbim de *leptogeneza*. Cu alte cuvinte, însăși existența noastră ca ființe materiale o datorăm masei nenule a neutrinilor. Pe de altă parte, s-a demonstrat și faptul că leptogeneza este posibilă și cu neutrinii Dirac.

Dacă neutrinii nu sunt particule Majorana, atunci, probabil, neutrinii oscilează între arome cu alte rate decât o fac antineutrinii. Această diferență de rate poate constitui cauza pentru care neutrinii au supraviețuit erei de anihilare materie-antimaterie din perioada universului timpuriu [16]. Asimetria materie – antimaterie are la bază *leptogeneza* (sau bariogeneza), susțin alți autori [17], un proces fizic ipotetic care a generat această asimetrie dintre barioni și antibarioni, în perioada universului foarte timpuriu. De altfel, fizicianul Andrei Sakharov a evidențiat condițiile necesare pentru producerea unei astfel de asimetrii. În primul rând, universul nu trebuie să fie în echilibru. Această condiție este o consecință naturală a expansiunii universului, când particulele și antiparticulele lor nu ajung să atingă echilibrul termic datorită procesului rapid de expansiune, permițând, astfel, apariția asimetriei barionice. A doua condiție constă în violarea legii de conservare a numărului barionic, proces inevitabil în perioada marii unificări a forțelor fundamentale din perioada universului timpuriu, atunci când numărul barionic nu se conserva. A treia observație constă în faptul că legile fizicii nu sunt aceleași pentru materie și antimaterie. Altminteri, orice proces care schimbă cantitatea de materie ar fi balansat de un efect corespunzător pentru antimaterie.

Evident, în perioada universului timpuriu a fost nevoie de o foarte modestă asimetrie, pentru ca astăzi să avem doar un rest de un singur proton la  $10^9$  fotoni, presupunând că toți fotonii au fost creați în urma procesului de anihilare dintre particule și antiparticule.

Pentru explicarea acestei asimetrii materie-antimaterie, există trei teorii: 1) – violarea simetriei CP; 2) – supersimetria, ca cea mai completă extindere a MS pentru particulele elementare; 3) – leptogeneza, un model explicativ care impune o nouă fizică, dincolo de MS [17].

Această nouă teorie, **leptogeneza**, avansează ideea existenței unui nou tip de neutrino, un neutrino foarte greu, dar instabil, numit *neutrino singlet* [17], din perioada universului foarte timpuriu, sau *neutrino Majorana greu* [18]. Conform scenariului leptogenezei, neutrinii singlet s-ar dezintegra fie în neutrinii, fie în antineutrinii. În acest caz, MS prevede că anumite reacții ar putea să aibă loc în condiții de temperatură înaltă, pentru a transforma antineutrinii în particule de materie (și, astfel, numărul leptonic nu se conservă), eventual, producerea de neutroni și protoni lăsând universul lipsit de antimaterie (reacție de tipul  $0\nu\beta\beta$ , sau NDB – Neutrinoless Double Beta Decay). Până în prezent, există doar o singură reacție controversată de acest fel, declarată în anul 2001. Calculele teoretice arată că leptogeneza funcționează bine pentru valori ale masei neutrinilor cuprinse în domeniul 0.1 eV–1 MeV, iar reîncălzirea temperaturii trebuie să fie peste  $10^9$  GeV [17].

## 7. Concluzii

Am văzut că experimentul SuperK din 1998 a pus în evidență fenomenul de oscilație al neutrinilor prin care aceștia își modificau aroma pe măsură ce se propagau prin spațiu. În 2001, experimentul de la SNO a pus în evidență faptul că oscilația neutrinilor este cauza fundamentală a deficitului de neutrini solari observați. Confirmarea experimentală a fenomenului de oscilație stabilește cu certitudine faptul că neutrinii au masă, contrar predicției făcute de MS.

Dincolo de evidența rezultatelor obținute, rămân o serie de probleme nerezolvate [19][20][21] și care impun alte experimente noi, cu configurații mai ingenioase, pentru a răspunde la câteva întrebări esențiale, cum ar fi:

- Estimarea exactă pentru  $\sin^2(2\theta_{23})$ ;  $\sin^2(2\theta_{12})$ ;  $\Delta m_{23}^2$ ;  $\Delta m_{12}^2$ ;
- Este  $\theta_{13} > 0$  și dacă da, atunci care este valoarea sa exactă?

- Este  $\theta_{23} = 45^\circ$ , sau nu?
- Care este semnul lui  $\Delta m_{23}^2$ ?
- Care este ierarhia de masă a neutrinilor? La ora actuală, există două astfel de ierarhii, cea directă ( $M_e < M_\mu < M_\tau$ , exact cum electronul este mai ușor decât muonul, iar muonul este mai ușor decât tauonul) și cea inversă.
- Este neutrino propria sa antiparticulă? Adică, sunt neutrinii particule Majorana? Răspunsul la această întrebare nu poate fi obținut prin experiențe de oscilație. În perioada universului timpuriu, a existat la un moment dat un mic exces de materie în raport cu antimateria, ceea ce a condus la realitatea materială, vizibilă, a universului de azi. Fenomenul care ar explica această asimetrie materie-antimaterie este *leptogeneza*, dar care presupune ca neutrinii să fie particule Majorana.
- Violează neutrinii simetria CP - o altă exigență a leptogenezei?
- Care este masa absolută a neutrinilor? Prin experiențele de oscilație nu se pot măsura astfel de valori. Totuși, cunoașterea acestora poate conduce la elaborarea de modele mai exacte despre evoluția universului nostru.

Masa neutrinilor și amestecul acestora, oscilația cameleonică între aromele sale diferite, pe distanțe macroscopice (cu faza  $\sim \Delta m^2 L/E$ ) și posibilitatea de a fi propriile sale antiparticule, toate acestea fac din neutrino mesagerii autentici pentru noua fizică și posibila cauză a profundeii asimetrii inițiale materie-antimaterie, datorită căreia existăm noi, în acest univers material, care face cu puțință observarea lui [22]. Oare, leptogeneza constituie cu adevărat sursa ultimă a materialității lumii noastre? Există, oare, și al patrulea tip de neutrino, acel neutrino singlet, greu și instabil, sau acesta nu-i decât rodul unei construcții teoretice elaborate? Vor confirma, oare, experiențele viitoare existența acestui al patrulea tip de neutrino? Dacă da, violarea simetriei leptonice CP, împreună cu neutrinii Majorana ( $0\nu 2\beta$ ) ar induce ca fiind plauzibilă ideea existenței aceluia neutrino greu  $\nu_R$ , scalat de noua fizică la  $m_R$ , și, implicit, a asimetriei cosmologice materie-antimaterie (prin mecanismul leptogenezei), precum și a minusculei valori de masă a neutrinelui Majorana (din mecanismul seesaw).

Aceste particule fantomă, neutrinii, reprezintă, deci, la ora actuală, fragmentele materiale ale unei noi fizici și a supersimetriei care se nasc sub ochii noștri, și, care, împreună cu alte fragmente de astro-particule, își vor revărsa într-o bună zi, lumina certitudinii lor asupra unei noi reprezentări a lumii noastre materiale, în toată splendoarea ei divină.

## BIBLIOGRAFIE

1. **BARGER, V.; MARFATIA, D.; WHISNANT, K. L.:** The Physics of Neutrinos. Princeton University Press, 2012.
2. **WINTER, K.:** Neutrino Physics. Cambridge University Press, 2000.
3. **CLOSE, F.:** Neutrino. Oxford University Press, 2010.
4. **GRIFFITHS, D. J.:** Introduction to Elementary Particles, Wiley, John & Sons Inc., 1987.
5. **BROMLEY, D. A.:** Gauge Theory of Weak Interactions, 2000, Springer.
6. \*\*\* Neutrino – A Review of the Universe ; <https://universe-review.ca/R15-13-neutrino.htm>.
7. \*\*\* [http://www.hwdsb.on.ca/hillpark/departments/science/Watts/Interesting\\_Readings/Physics\\_Papers/Neutrino\\_Metamorphosis.pdf](http://www.hwdsb.on.ca/hillpark/departments/science/Watts/Interesting_Readings/Physics_Papers/Neutrino_Metamorphosis.pdf).
8. **INFN** – press release: The Metamorphosis of a Neutrino Directly Observed for the First Time - <http://www.infn.it/news/newsen.php?id=576> ; 31-05-2010.
9. **NITA, L.:** <https://www.facebook.com/>.
10. **BROMLEY, D. A.:** Gauge Theory of Weak Interactions, 2000, Springer.
11. **PONTECORVO, B.:** Zh. Eksp. Teor. Fiz. 33, 549 (1957) și 34, 247 (1958).

12. **MAKI, Z.; NAKAGAWA, M.; SAKATA, S.:** Prog. Theor. Phys. 28, 870 (1962).
13. \*\*\* <http://brahms.fizica.unibuc.ro/sitecentru/Raport%20etapa%202.pdf>.
14. **HITOSHI MURAYAMA:** Origin of Neutrino Mass. Physics World, May 2002.
15. \*\*\* <http://hitoshi.berkeley.edu/neutrino/neutrino5.html>.
16. **MOSKOWITZ, CLARA:** Scientific American, 2014, November 4th.
17. \*\*\* Matter Antimatter Asymmetry; <https://universe-review.ca/R02-14-CPviolation.htm>.
18. **MOSKOWITZ, CLARA:** Scientific American, 2015, February 20th.
19. \*\*\* [http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/physics/current/teach/module\\_home/px435/lec\\_oscillations.pdf](http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/physics/current/teach/module_home/px435/lec_oscillations.pdf) March 24, 2015.
20. **ELLIS, J.:** Why does CP violation matter to the universe? – September, 1999 in [cerncourier.com/cws/article/cern/28092](http://cerncourier.com/cws/article/cern/28092).
21. \*\*\* Neutrino Physics, în <https://sharepoint.washington.edu/phys/research/Pages/Neutrino-Physics.aspx>.
22. **LISI, ELIGIO** (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare – INFN), Neutrinos: Theory Review - Proceedings of ICHEP 2010/35 (International Conference on High Energy Physics); INIS-Vol.42, INIS Issue13/2010.