



Tác giả: TS. Cao Văn Sơn

Đơn vị công tác: Viện Nghiên cứu Hạt nhân và Hạt cơ bản (IPNS), KEK, Nhật Bản

Email: [cvson@post.kek.jp](mailto:cvson@post.kek.jp)

Tác giả tốt nghiệp Ph.D năm 2014 tại Trường Đại học Texas ở Austin, bang Texas, Mỹ với đề tài liên quan đến thí nghiệm MINOS, là một thí nghiệm đo dao động neutrino sử dụng nguồn neutrino từ máy gia tốc đặt tại Fermilab, IL cách máy dò chính khoảng 735km. Sau khi tốt nghiệp, tác giả từng làm việc tại Trường Đại học Okayama, Đại học Kyoto, và Trung tâm Nghiên cứu Máy gia tốc Năng lượng cao, và tiếp tục nghiên cứu về neutrino chủ yếu với thí nghiệm T2K, là một thí nghiệm quốc tế về neutrino đặt tại Nhật Bản. Với mong muốn phát triển khoa học neutrino ở Việt Nam, tác giả đã cùng với Hội Gặp gỡ Việt Nam, với sự giúp đỡ của các chuyên gia Nhật Bản, đã lập ra nhóm Neutrino tại Viện Nghiên cứu Khoa học và Giáo dục Liên ngành IFIRSE, Quy Nhơn từ năm 2017 và tham gia thí nghiệm T2K cho đến nay.

<https://doi.org/10.15625/yap.2021.0001>

## Khoa học Neutrino: Hiện tại và Tương lai

Cao Văn Sơn<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Tiến sĩ, Viện Nghiên cứu Hạt nhân và Hạt cơ bản (IPNS), Trung tâm Nghiên cứu Máy gia tốc Năng lượng cao (KEK), Nhật Bản

<sup>2</sup> Viện Nghiên cứu Khoa Học và Giáo dục Liên ngành (IFIRSE), Quy Nhơn, Việt Nam

### TÓM TẮT:

Tương tự như *electron*, *neutrino* là hạt cơ bản cấu thành nên thế giới vật chất. Tuy nhiên phải đến năm 1956, *neutrino* mới được quan sát bằng thực nghiệm mặc dù sự tồn tại của nó đã được tiên đoán từ trước đó khoảng 26 năm. *Neutrino* bước lên vũ đài của các hạt cơ bản và phá vỡ các tiền lệ trước đó, trở thành một trong những vấn đề được quan tâm nhiều nhất trong hơn năm thập kỷ vừa qua và chắc chắn trong vài thập kỷ tiếp theo. *Neutrino* có khối lượng là bằng chứng cụ thể nhất cho *vật lý mới* bên ngoài *Mô Hình Chuẩn* của các hạt cơ bản. *Neutrino* tương tác rất yếu với vật chất và vì vậy rất khó được phát hiện, nhưng cũng vì vậy *neutrino* mang những thông tin với giá trị rất riêng và không thể thay thế. Nghiên cứu *neutrino* sẽ không chỉ mang đến niềm hi vọng mới trong việc hiểu thế giới hạt cơ bản, mà còn mở ra những chân trời mới cho khoa học *neutrino* với những lợi ích thiết thực cho thế giới chúng ta.

**Từ khóa:** *Neutrino*, dao động neutrino, đối xứng vật chất-phản vật chất, phá vỡ CP

### 1. Sơ lược về Neutrino

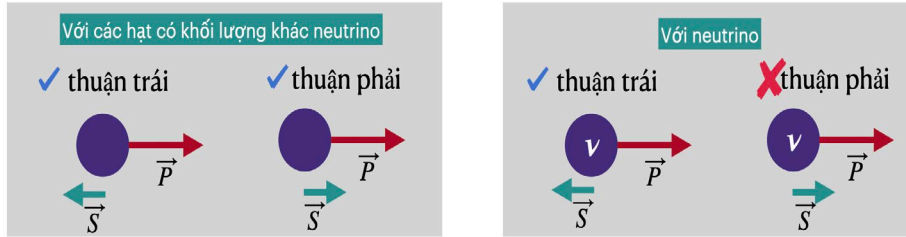
#### 1.1. *Neutrino*, sinh ra từ một “lời giải tuyệt vọng”

Trong những năm 1930, các nhà vật lý loay hoay đi tìm lời giải liên quan đến phổ năng lượng liên tục của *electron* trong phân rã beta, là phân rã trong đó neutron ở các hạt nhân không bền sẽ chuyển thành proton và sinh ra *electron*.

Phân rã beta: Trước 1930:  $n \rightarrow p^+ + e^-$

➡ Pauli đề xuất (1930):  $n \rightarrow p^+ + e^- + \nu$

Từ thực nghiệm, người ta nhận thấy rằng phổ năng lượng của *electron* trong phân rã này là liên tục. Nếu chỉ *electron* được sinh ra trong phân rã này, theo định luật bảo toàn năng lượng, phổ năng lượng của *electron* cần phải xác định, chứ không thể là liên tục. Một số nhà vật lý đã thậm chí nghi ngờ định luật bảo toàn năng lượng tại thời điểm đó. W.Pauli, trong một lá thư gửi đến một hội nghị năm 1930 do ông không thể đến, đã đề xuất một “lời giải tuyệt vọng” để giải thích sự liên tục của phổ năng lượng *electron* trong phân rã beta mà vẫn giữ được định luật bảo toàn năng lượng. Ông đề xuất sự tồn tại của một hạt không mang điện tích với mô-men quay nội tại (*spin*) bằng 1/2, giống như *electron*. *Neutrino* [1] sinh ra và mang theo một phần năng lượng, cùng với *electron*, nó cho phép quá trình phân rã beta diễn ra một cách bình thường (năng lượng được bảo toàn). Theo tiên đoán của lý thuyết tương tác yếu đề xuất bởi E. Fermi năm 1933, tương tác *neutrino* với vật chất là rất yếu và W. Pauli đã cược một thùng rượu sâm banh cho người phát hiện ra loại hạt khó tìm này.



**Hình 1.** Các hạt vật chất có khối lượng thông thường có cả thuận trái và thuận phải, riêng chỉ có neutrino là thuận trái được phát hiện còn thuận phải thì chưa

Mãi đến năm 1956, *neutrino* mới lần đầu tiên tìm thấy qua thí nghiệm tiên hành bởi F. Reines và C. L. Cowan với nguồn phản-*neutrino* sinh ra từ một lò phản ứng hạt nhân. W. Pauli giữ lời hứa của mình và gửi thùng rượu sâm banh đến cho F. Reines và C. L. Cowan.

Chín mươi năm sau khi sự tồn tại của mình được hé mở, *neutrino* vẫn là một trong những hạt cơ bản bí ẩn nhất và là một trong những chủ đề rất nóng của vật lý đương đại.

**1.2. Neutrino, kẻ phá bình hay chìa khóa của hi vọng?**

Năm 1958 tính thuận tay (một tính chất lượng tử biểu thị hướng của spin so với chiều chuyển động) của *neutrino* được đo bởi M. Goldhaber và các đồng nghiệp, và một kết luận được đưa ra rằng 100% *neutrino* là thuận trái (chiều spin ngược hướng với chiều chuyển động), xem minh họa ở **Hình 1**. Điều này cũng ám chỉ là *neutrino* không có khối lượng bởi vì nếu *neutrino* có khối lượng, theo lý thuyết tương đối hẹp, vận tốc sẽ luôn nhỏ hơn vận tốc ánh sáng trong chân không và vì vậy với người quan sát di chuyển với vận tốc ánh sáng, *neutrino* sẽ trở thành thuận phải (điều này sẽ trái với quan sát của M. Goldhaber và các đồng nghiệp).

Trong nhiều thập kỉ, *neutrino* vì vậy được cho là không có khối lượng và điều này được thiết lập trong *Mô Hình Chuẩn (MHC)*, xem tổng hợp ở **Hình 2**, của các hạt vật chất cơ bản (bao gồm 6 hạt *quark*, 6 hạt *lepton*) và các hạt truyền tương tác (photon truyền tương tác điện từ,  $W^{+/-}$  và  $Z$  boson truyền tương tác yếu và 8 *gluons* truyền tương tác mạnh).

MHC đã rất rất thành công trong việc thống nhất ba trong bốn tương tác mà chúng ta biết đến: tương tác điện từ, tương tác yếu, tương tác mạnh. Mặc dù MHC không tiên đoán khối lượng của các hạt cơ bản, nó đưa ra một cơ chế gọi là cơ chế Higgs cho phép các hạt có thể có khối lượng thông qua tương tác Yukawa giữa các hạt Higgs và các hạt cơ bản. Việc phát hiện ra hạt Higgs (hạt vô hướng, trung hoà, spin bằng 0), hay còn gọi là hạt của Chúa, năm 2012 với máy gia tốc lớn LHC ở châu Âu là một trong những tiên đoán thành công của MHC. Photon không tương tác với

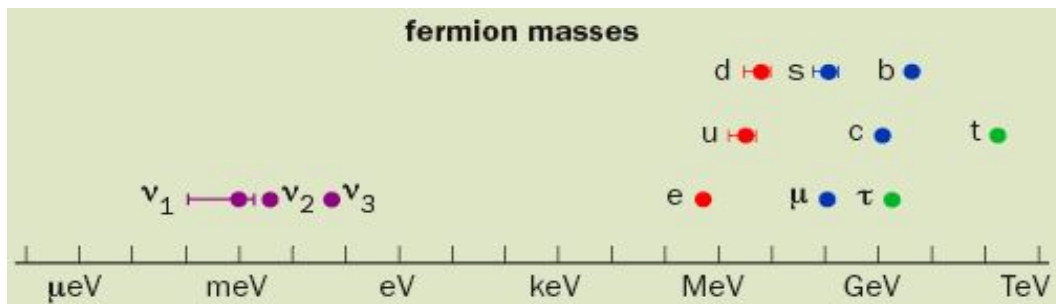
hạt Higgs và vì vậy không có khối lượng. MHC tiên đoán *neutrino* không có khối lượng do không tương tác với hạt Higgs. MHC mặc dù rất thành công, không có câu trả lời cho những câu hỏi cơ bản như sự tồn tại của vật chất tối và năng lượng tối, sự bất đối xứng giữa vật chất và phản vật chất trong vũ trụ, v.v. Và vì vậy có vẻ các nhà vật lý rơi vào bế tắc khi không có dấu hiệu vật lý mới nào từ các phép đo với máy gia tốc lớn LHC.

Năm 1998 một lần nữa *neutrino* làm ngỡ ngàng thế giới vật lý. Trong hội nghị Neutrino'98 tổ chức ở Nhật Bản, GS. T. Kajita cùng các đồng nghiệp ở thí nghiệm Super-Kamiokande công bố quan sát thành công hiện tượng dao động *neutrino*, hiện tượng lượng tử chỉ xảy ra khi *neutrino* có khối lượng. Với công bố này, và những kiểm nghiệm sau đó từ các thí nghiệm khác, GS. T.Kajita nhận giải thưởng Nobel cùng với GS. M. Donald năm 2015. *Neutrino* có khối lượng và điều này trái với tiên đoán của MHC. Đây là bằng chứng thực nghiệm đầu tiên và cho đến hiện tại vẫn là duy nhất

**Standard Model of Elementary Particles**

		three generations of matter (fermions)						
		I	II	III				
mass	=2.2 MeV/c <sup>2</sup>	=1.28 GeV/c <sup>2</sup>	=173.1 GeV/c <sup>2</sup>	0	=125.09 GeV/c <sup>2</sup>			
charge	2/3	2/3	2/3	0	0			
spin	1/2	1/2	1/2	0	0			
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs			
QUARKS	=4.7 MeV/c <sup>2</sup>	=96 MeV/c <sup>2</sup>	=4.18 GeV/c <sup>2</sup>	0				
	-1/3	-1/3	-1/3	0				
	1/2	1/2	1/2	1				
	d down	s strange	b bottom	γ photon				
LEPTONS	=0.511 MeV/c <sup>2</sup>	=105.66 MeV/c <sup>2</sup>	=1.7768 GeV/c <sup>2</sup>	=91.19 GeV/c <sup>2</sup>				
	-1	1	-1	0				
	1/2	1/2	1/2	1				
		e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson			
GAUGE BOSONS	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<1.7 MeV/c <sup>2</sup>	=15.5 MeV/c <sup>2</sup>	=80.39 GeV/c <sup>2</sup>				
	0	0	0	+1				
	1/2	1/2	1/2	1				
		ν <sub>e</sub> electron neutrino	ν <sub>μ</sub> muon neutrino	ν <sub>τ</sub> tau neutrino	W W boson			

**Hình 2.** Mô Hình Chuẩn [2] của các hạt cơ bản với các hạt vật chất (còn gọi là fermion, với 6 hạt quark và 6 lepton) và các hạt truyền tương tác (còn gọi là boson, với photon truyền tương tác điện từ,  $W^{+/-}$  và  $Z$  boson truyền tương tác yếu và 8 gluons truyền tương tác mạnh)



**Hình 3.** Thang khối lượng (ở đây vận tốc ánh sáng  $c=1$ ) của các hạt cơ bản [3]. So với các hạt cơ bản khác, neutrino có khối lượng nhỏ một cách “bất thường”

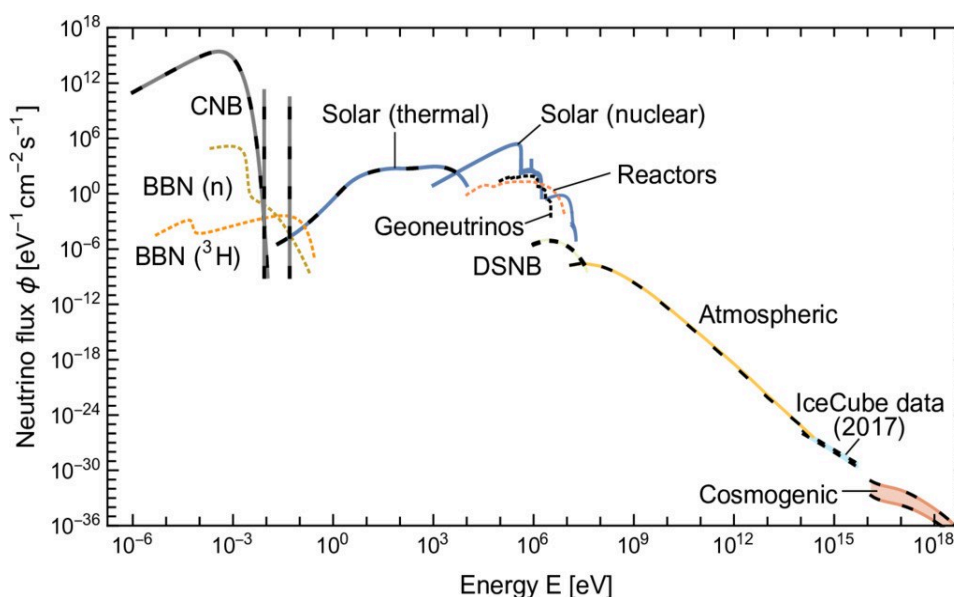
khẳng định rằng MHC là không hoàn hảo. *Neutrino* có khối lượng, nhưng khối lượng của chúng rất nhỏ, nhỏ hơn *electron* khoảng 10,000 lần, xem thêm ở **Hình 3**. Tại sao lại như vậy? Liệu *neutrino* có khối lượng qua cơ chế Higgs hay là là một cơ chế khác chưa được biết đến? Các nhà vật lý lấy làm phấn khích với khả năng là *neutrino* là một kẻ phá bình vĩ đại, không tuân theo MHC và vì vậy những hiểu biết với *neutrino* sẽ cho phép họ hi vọng tìm ra chìa khoá để tiến lên mô hình thống nhất tương tác hoàn chỉnh hơn MHC.

## 2. Những điều chúng ta biết về Neutrino

### 2.1. Những hiểu biết cơ bản

- *Neutrino* là một loại hạt cơ bản không thể bị chia nhỏ thành các phần nhỏ hơn, tương tự như *electron* và các hạt *quark* cấu thành nên *proton* và *neutron*.
- Có 3 loại *neutrino* đã được thực nghiệm phát hiện, tương ứng với 3 loại vị (*flavor*, là một số lượng tử), *neutrino vị electron* (kí hiệu  $\nu_e$ ), *neutrino vị muon* (kí hiệu  $\nu_\mu$ ) và *neutrino vị tau* (kí hiệu  $\nu_\tau$ ).

- *Neutrino* được tin là đã được tạo ra chỉ chưa đến một giây sau Vụ Nổ Lớn (Big Bang). Vì *neutrino* tương tác rất yếu với vật chất, phần lớn những *neutrino* này vẫn còn tồn tại trong vũ trụ với mật độ vào cỡ 300 hạt trên một  $\text{cm}^3$ . Cùng với các nguồn *neutrino* khác, như được tổng hợp ở **Hình 4**, mật độ trung bình của *neutrino* trong vũ trụ vào khoảng 330 hạt trên một  $\text{cm}^3$ , gấp cỡ 1 tỷ lần mật độ trung bình của *proton*. Chính vì thế, mặc dù khối lượng *neutrino* (cỡ  $eV$ ) chỉ cỡ 1 phần tỷ khối lượng *proton* (cỡ  $GeV$ ), thì tổng khối lượng của *neutrino* trong vũ trụ là cùng cỡ khối lượng của tất cả các ngôi sao gộp lại! *Neutrino* chắc hẳn phải có vai trò rất lớn trong sự tiến triển của vũ trụ.
- Có khoảng một nghìn tỷ ( $10^{12}$ ) *neutrino* đi qua cơ thể chúng ta mỗi giây, phần lớn chúng được sinh ra từ phản ứng tổng hợp hạt nhân bên trong lõi của Mặt trời. Tuy nhiên do *neutrino* tương tác rất yếu với vật chất, hầu hết chúng đi qua cơ thể chúng ta mà không để lại bất kì dấu vết gì.



**Hình 4.** Tổng hợp [4] các nguồn sinh ra neutrino có mặt ở trái đất theo thang của năng lượng, trải dài từ  $10^6 eV$  đến  $10^{19} eV$



- 99% năng lượng của các vụ nổ siêu tân tinh (*supernova*) được giải phóng qua *neutrino*. Ánh sáng chói loà từ các vụ nổ sao này mà nhờ đó chúng ta có thể quan sát được bằng mắt thường hay với các ống kính trợ giúp chỉ mang đi chưa đến 1% năng lượng liên kết của ngôi sao đó. Nguồn gốc của các nguyên tố nặng trên trái đất như *cacbon trong xương của chúng ta, kim loại trong máy tính chúng ta dùng*, đều được hình thành trong các lõi của các ngôi sao và bị phân tán trong vũ trụ khi các vụ nổ sao diễn ra. Nghiên cứu *neutrino* từ các vụ nổ siêu tân tinh đóng vai trò rất quan trọng trong việc tìm hiểu nguồn gốc các kim loại nặng trên trái đất.

## 2.2. Dao động neutrino và các tham số cơ bản

Neutrino có thể thay đổi vị lepton khi di chuyển ví dụ như từ *neutrino vị muon* ( $\nu_\mu$ ) sang *neutrino vị electron* ( $\nu_e$ ). Hiện tượng này được gọi là *dao động neutrino*. Một cách giải thích đơn giản nhất cho hiện tượng này đó là các *neutrino* có vị xác định ( $\nu_e, \nu_\mu$ ) là trạng thái chồng chập lượng tử của các trạng thái riêng *neutrino* có khối lượng xác định ( $\nu_1, \nu_2$ ) với khối lượng tương ứng ( $m_1, m_2$ ), với mức độ trộn được đặc trưng bởi góc trộn  $\theta$  như minh họa ở **Hình 5**.

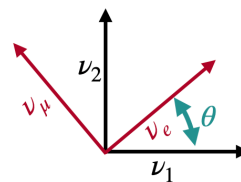
Trong chân không, các trạng thái riêng khối lượng ( $\nu_1, \nu_2$ ) được truyền đi như những sóng phẳng với pha phụ thuộc vào năng lượng  $E_i$ , động lượng  $p_i$ , và khoảng cách, thời gian truyền đi ( $t, x$ )  $|\nu_i(t)\rangle = e^{-i(E_it - p_ix)} |\nu_i(0)\rangle$ . Từ đây có thể tính được xác suất chuyển vị  $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \frac{L}{4E} (m_2^2 - m_1^2) \right)$ . Điểm mấu chốt ở đây cho phép hiện tượng dao động *neutrino* diễn ra đó là các trạng thái riêng có khối lượng khác nhau, đồng nghĩa với việc là tồn tại *neutrino* có khối lượng. Trên thực tế, 3 vị neutrino ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) đã được phát hiện và theo lý thuyết được chấp nhận rộng rãi hiện tại, có 3 trạng thái neutrino riêng có khối lượng nhất định ( $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ ) và liên hệ với 3 vị neutrino qua một *ma trận trực giao* (unitary)  $3 \times 3$  gọi là *ma trận Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata* (PMNS). Ma trận này được tham số hoá bởi 3 góc trộn ( $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$ ) và một pha vi phạm đối xứng CP,  $\delta_{CP}$ , đặc trưng cho sự khác nhau giữa dao động neutrino và dao động phản-neutrino, sẽ được thảo luận kĩ hơn ở phần sau.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{PMNS}^*(\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \delta_{CP}) \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

(ở đây dấu \* chỉ liên hợp phức)

**Bảng 1.** Kết quả đo các tham số dao động neutrino dựa vào số liệu từ nhiều thí nghiệm neutrino [5]

$\theta_{12}$ [°]	$\theta_{13}$ [°]	$\theta_{23}$ [°]	$\delta_{CP}$ [°]	$\Delta m_{21}^2 [eV^2/c^4]$	$\Delta m_{31}^2 [eV^2/c^4]$
$33.44^{+0.78}_{-0.75}$	$8.57^{+0.13}_{-0.12}$	$49.0^{+1.1}_{-1.4}$	$197^{+27}_{-24}$	$7.42^{+0.21}_{-0.20} \times 10^{-5}$	$2.514^{+0.028}_{-0.027} \times 10^{-3}$



$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

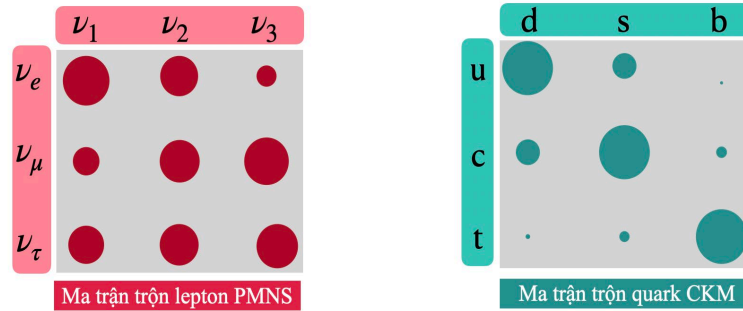
**Hình 5.** Minh họa sự trộn giữa các trạng thái riêng khối lượng và trạng thái riêng có vị xác định của neutrino.

Ngoài bốn tham số này, xác suất chuyển đổi vị của *neutrino* còn phụ thuộc vào bình phương khối lượng  $\Delta m_{21}^2 = (m_2^2 - m_1^2)$  và  $\Delta m_{31}^2 = (m_3^2 - m_1^2)$ . Cho đến thời điểm hiện tại, người ta biết  $\Delta m_{21}^2 \sim 7.4 \times 10^{-5} eV^2/c^4$  trong khi đó  $|\Delta m_{31}^2| \sim 2.5 \times 10^{-3} eV^2/c^4$ . Chú ý ở đây chúng ta biết giá trị  $|\Delta m_{31}^2|$  nhưng chúng ta không biết nếu  $m_3 > m_1$  hay  $m_3 < m_1$ . Trường hợp đầu, người ta gọi là *thứ tự khối lượng chuẩn*, trong khi trường hợp thứ hai người ta gọi là *neutrino thứ tự ngược*. **Bảng 1** tổng kết lại những hiểu biết hiện tại của chúng ta về các tham số liên quan đến *dao động neutrino*. Dựa trên các kết quả này, ma trận trộn lepton PMNS được xây dựng và biểu diễn như ở **Hình 6** với sự so sánh tương quan với *ma trận trộn CKM* của các hạt quark. Chúng ta có thể thấy rằng hai ma trận trộn này là khác nhau và các nhà khoa học vẫn đang đang tìm hiểu bí ẩn phía sau.

## 2.3. Những câu hỏi mở trong vật lý neutrino

Dưới đây là một số câu hỏi chủ đạo mà các nhà vật lý neutrino đang cố gắng tìm hiểu. Neutrino luôn mang đến những bất ngờ và rất có thể trên con đường đi tìm lời giải cho những câu hỏi này, những bí ẩn khác của neutrino lại được hé lộ.

- *Làm sao neutrino có khối lượng?* Liệu neutrino có khối lượng giống cái cách mà các hạt khác có khối lượng hay nó có từ một cơ chế khác? *Neutrino* là hạt duy nhất có khả năng là *hạt Majorana*, là loại hạt mà trạng thái của hạt và trạng thái của phản hạt là không phân biệt. Trong khi đó các loại hạt khác, trạng thái hạt và phản hạt là có thể phân biệt được, hay còn được gọi là *hạt Dirac*. Việc hiểu được bản chất khối lượng của *neutrino* là một trong những ưu tiên hàng đầu của vật lý *neutrino*.



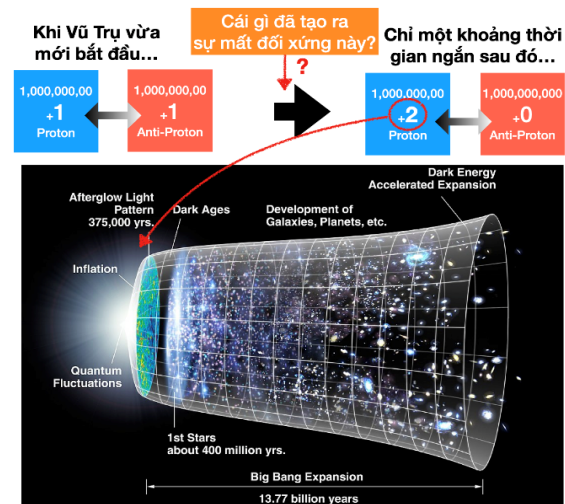
**Hình 6.** So sánh ma trận trộn do từ dao động neutrino, ma trận trộn lepton PMNS (trái) và ma trận trộn CKM của hạt quark [6]. Bán kính đường tròn tỉ lệ với giá trị của phần tử ma trận. Có thể thấy là hai ma trận có khác biệt rõ ràng và ý nghĩa vật lý đằng sau vẫn là câu hỏi còn bỏ ngỏ

- Liệu neutrino có phá vỡ đối xứng CP? Nếu có, liệu nó có thể là chìa khoá giải quyết cho câu hỏi vì sao vũ trụ vật chất được sinh ra? Trong phần tiếp theo, chúng tôi sẽ đề cập đến vấn đề này sâu hơn.
- Neutrino có khối lượng nhưng khối lượng tuyệt đối của neutrino là bao nhiêu? Người ta biết rằng neutrino có khối lượng rất nhỏ, nhưng bởi vì mật độ neutrino rất nhiều, nó có ảnh hưởng rất lớn đến sự phát triển của vũ trụ.
- Liệu có tồn tại loại neutrino thứ 4 ngoài 3 loại vi neutrino mà chúng ta biết đến? Có rất nhiều thí nghiệm trên thế giới đang và sẽ được xây dựng để kiểm tra những câu hỏi mở ở trên. Những thí nghiệm lớn với sự tham gia của hàng trăm đến hàng nghìn nhà vật lý quốc tế phải kể đến như thí nghiệm DUNE ở Mỹ, Hyper-Kamiokande ở Nhật Bản, JUNO ở Trung Quốc, INO ở Ấn Độ, cùng với rất nhiều thí nghiệm có quy mô nhỏ hơn với sự tham gia của rất nhiều nước trên thế giới. Việt Nam, cụ thể là viện IFIRSE, từ 2017 đã tham gia thí nghiệm T2K, một thí nghiệm quốc tế về neutrino với gần 500 nhà khoa học quốc tế đến từ 12 nước trên thế giới, mở ra những tiềm năng phát triển khoa học neutrino ở Việt Nam.

### 3. Phá vỡ đối xứng CP và sự hình thành vũ trụ vật chất

**3.1. Bất đối xứng CP và sự hình thành vũ trụ vật chất**  
Đối xứng CP (C được lấy từ tiếng Anh Charge - điện tích và P là từ Parity - trái phải hay chẵn lẻ) là đối xứng trong đó các định luật vật lý không thay đổi nếu ta thay hạt bằng phản hạt và đổi toạ độ vật lý từ trái sang phải. Do tại thời điểm ban đầu của vũ trụ, số lượng vật chất và phản vật chất được cho là cân bằng do các định luật vật lý về cơ bản là đối xứng giữa vật chất và phản vật chất. Nếu tất cả các quá trình vật lý xảy ra với vật chất và phản vật chất là hoàn toàn như nhau, chúng ta sẽ không có vũ trụ vật chất như ngày nay bởi vì vật chất và phản vật chất phân hủy lẫn nhau khi chúng gặp nhau. Đối xứng CP vì vậy cần phải bị vi phạm để tạo

ra sự bất đối xứng giữa vật chất và phản vật chất như được minh họa ở **Hình 7**. Và thật sự năm 1964, J. Cronin, V. Fitch và các đồng



**Chính sự mất đối xứng giữa vật chất và phản vật chất đã tạo ra Vũ Trụ vật chất như ngày hôm nay**

**Hình 7.** Khi vũ trụ vừa mới bắt đầu, số lượng vật chất và phản vật chất là như nhau vì chúng cùng tuân theo những định luật vật lý như nhau. Tuy nhiên để tạo ra vũ trụ vật chất như ngày nay chúng ta quan sát được, phải tồn tại một quá trình cho phép sự bất đối xứng giữa vật chất và phản vật chất xảy ra, và vì vậy vật chất được tạo ra nhiều hơn so với phản vật chất. Khi vật chất và phản vật chất gặp nhau, chúng phân hủy lẫn nhau và để lại gần như chỉ vật chất, là khởi nguồn cho sự hình thành các thiên hà, các sao, hành tinh .. và trái đất của chúng ta. Neutrino, cụ thể là phá vỡ đối xứng CP của neutrino, có thể là chìa khoá để mở ra câu trả lời cho câu hỏi rất cơ bản và tối quan trọng này.

nghiệp đã lần đầu tiên quan sát phá vỡ đối xứng CP qua phân rã của hạt Kaon  $K^0$  (là hạt cấu thành nên từ một hạt quark và một phản quark) và nhận giải thưởng Nobel năm 1980. Từ đó đến nay các nhà vật lý cũng đã quan sát thấy vi phạm CP ở các loại hạt quark khác nhau. Tuy nhiên mức độ vi phạm CP ở các hạt quark không đủ lớn để giải thích sự bất đối xứng giữa vật

chất và phản vật chất trong vũ trụ. Chính vì vậy các nhà vật lý tin rằng có một nguồn vi phạm CP khác. Vi phạm CP ở *neutrino* là một trong số đó. Ý tưởng xuất phát là về hệ sinh lepton (*leptogenesis*) ở đó tại thời điểm sau khi vụ nổ Big Bang tồn tại những hạt lepton trung hoà nặng, cũng chính là phản hạt của nó tức là loại hạt Majorana. Những hạt này phân rã thành hạt và phản hạt nhưng do vi phạm đối xứng CP, nên số lượng hạt và phản hạt là không bằng nhau. Loại hạt này cũng được tiên đoán bởi cơ chế “đòn bẩy” giải thích khối lượng nhỏ bất thường của *neutrino*.

### 3.2. Đo pha đối xứng CP với thí nghiệm T2K

Để tìm kiếm phá vỡ CP, thông thường quá trình với hạt và phản hạt được so sánh với nhau. Tuy nhiên phương pháp này thường chỉ áp dụng khi hạt và phản hạt là phân biệt được. Như nói ở trên *neutrino* có khả năng là hạt Majorana, tức là hạt và phản hạt là giống nhau. Việc tìm kiếm vi phạm đối xứng CP với *neutrino* được tiến hành thông qua quá trình *dao động neutrino* bằng cách so sánh xác suất chuyển đổi của *neutrino* có vị *alpha*  $\nu_\alpha$  thành *neutrino* có vị *beta*  $\nu_\beta$  và xác suất của quá trình CP tương ứng. Trong môi trường chân không, mối liên hệ giữa hai xác suất này được thể hiện qua

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta) (\delta_{CP} \rightarrow -\delta_{CP})$$

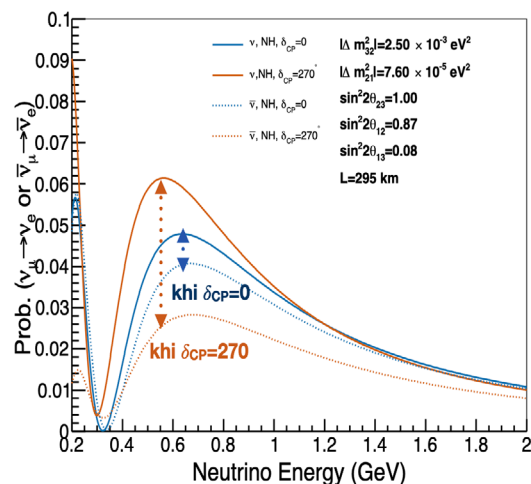
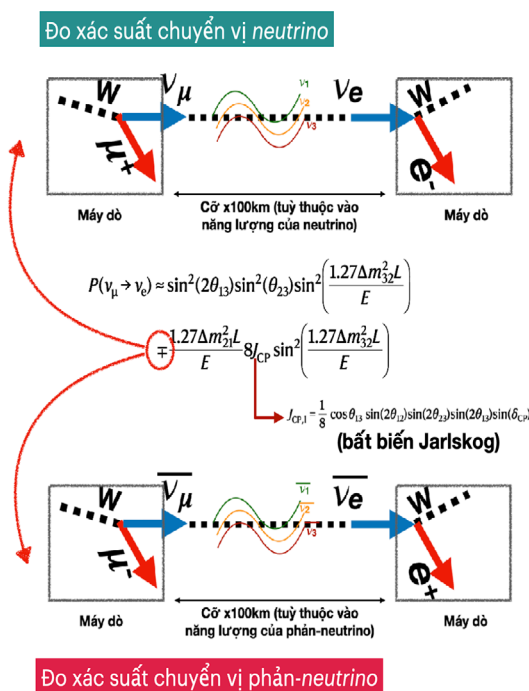
Khi đo trong môi trường vật chất, cần phải tính đến tương tác giữa vật chất và môi trường, được thể hiện qua một thể hiệu dụng tương tác  $V_{mat}$ .

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta) (\delta_{CP} \rightarrow -\delta_{CP}, V_{mat} \rightarrow -V_{mat}.)$$

Nếu phép đo có thể khẳng định  $\delta_{CP} \neq 0$  thì cũng có nghĩa là CP bị vi phạm trong dao động neutrino.

T2K là một thí nghiệm quốc tế được đặt ở Nhật Bản được xây dựng để đo *dao động neutrino* bằng cách tạo ra một nguồn *neutrino* vị *muon*  $\nu_\mu$  với máy gia tốc được đặt ở bờ đông của Nhật Bản và sử dụng máy dò Super-Kamiokande cách đó 295km về phía tây. Để đo pha phá vỡ đối xứng CP,  $\delta_{CP}$ , T2K so sánh xác suất xuất hiện *neutrino* vị *electron*  $\nu_e$  từ nguồn *neutrino* vị *muon*  $\nu_\mu$  trong máy đo với xác suất xuất hiện *phản-neutrino* vị *electron*  $\bar{\nu}_e$  từ nguồn *phản-neutrino* vị *muon*  $\bar{\nu}_\mu$ . Nguyên lý đo được thể hiện ở **Hình 8**. Kết quả đo với số liệu lấy đến năm 2018 được tóm tắt ở **Hình 9**.

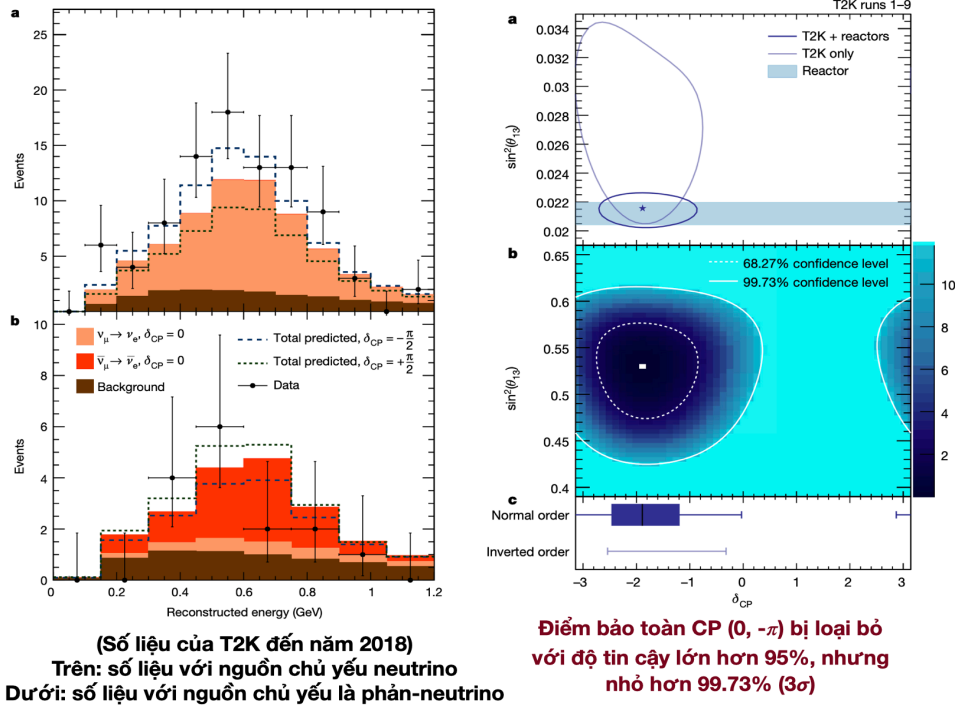
T2K loại bỏ giá trị bảo toàn của  $\delta_{CP}$ ,  $\delta_{CP} = 0, +\pi, -\pi$ , với độ tin cậy lớn hơn 95%. Đây là lần đầu tiên, một thí nghiệm về *neutrino* công bố kết quả phép đo pha phá vỡ đối xứng  $\delta_{CP}$ . Kết quả hiện tại vẫn chưa đủ tin cậy về mặt thống kê để công bố là đã tìm thấy bằng chứng vi phạm phá vỡ đối xứng CP và sẽ cần thêm số liệu để kiểm chứng kết quả này. Nếu kết quả này được kiểm chứng là đúng, đây sẽ là một bước đột phá lớn trong hiểu biết của nhân loại không chỉ về thế giới hạt cơ bản mà còn có thể ở một thái cực khác, sự hình thành của vũ trụ vật chất.



So sánh xác suất chuyển vị của *neutrino* và *phản-neutrino*. Sự chênh lệch giữa 2 xác suất là lớn nhất khi  $\delta_{CP} = -90$  và nhỏ nhất khi  $\delta_{CP} = 0$ . Khi  $\delta_{CP} = 0$ , sự chênh lệch giữa 2 xác suất là do tương tác khác nhau của *neutrino* và *phản neutrino* với vật chất.

**Hình 8.** Nguyên lý đo pha vi phạm đối xứng CP: đo xác suất chuyển vị neutrino và quá trình tương ứng với phản-neutrino; sự chênh lệch giữa 2 quá trình này nếu quan sát được sẽ ám chỉ  $\delta_{CP} \neq 0$  hay neutrino vi phạm đối xứng CP. Hình phải thể hiện xác suất chuyển vị theo một hàm của năng lượng với các giá trị khác nhau của pha phá vỡ đối xứng CP,  $\delta_{CP}$  cho thấy thí nghiệm T2K nhạy với tham số này.





**Hình 9.** Kết quả đo pha vi phạm đối xứng CP thông qua hiện tượng dao động neutrino và dao động phản-neutrino với thí nghiệm T2K được công bố trên tạp san Nature [7]. Hình trái so sánh số liệu đo với kết quả mô phỏng tại các giá trị  $\delta_{CP}$  khác nhau của chuyển vị neutrino (hình trên) và chuyển vị phản-neutrino (hình dưới). Hình phải là độ tin cậy của tham số  $\delta_{CP}$  trong sự tương quan với tham số góc trộn  $\theta_{13}$  được rút ra từ số liệu.

#### 4. Vai trò của khoa học Neutrino

“Tôi không nói rằng Neutrino sẽ là một thứ thiết thực, nhưng có một mô hình được tôn vinh theo thời gian đó là: khoa học đi trước, và sau đó công nghệ xuất hiện, cùng với nhau tạo ra sự khác biệt to lớn trong cách chúng ta sống”- Fredrick Reines, giải thưởng Nobel, đồng phát hiện ra neutrino, NYT 1997.

Neutrino không chỉ là chìa khoá hi vọng cho vật lý mới ngoài MHC của các hạt cơ bản hay có thể là chìa khoá cho lời giải của câu hỏi vì sao vũ trụ vật chất được tạo nên, neutrino còn có vai trò quan trọng trong vũ trụ học, Thiên văn học, khoa học trái đất và là một công cụ đặc biệt cho an ninh quốc gia.

Cũng như các hạt cơ bản khác, neutrino, ước tính với khoảng  $10^{87}$  hạt [10], được sinh ra chỉ vài tích tắc sau vụ nổ Big Bang và tại thời điểm ban đầu (khoảng 1 giây sau vụ nổ) duy trì quá trình cân bằng nhiệt với plasma nguyên thủy của vũ trụ như photon, electron, positron, v.v.. Tại thời điểm này, sự phân bố của neutrino ở các cấp năng lượng tuân theo thống kê Fermi-Dirac cho các hạt đồng nhất có spin bán nguyên và nhiệt độ của neutrino và photon là như nhau. Cùng với thời gian, vũ trụ giãn nở (được mô tả bởi hệ số giãn nở Hubble) và nhiệt độ giảm xuống, kéo theo tỷ lệ tương tác của các hạt cũng giảm. Một khi tỷ lệ tương tác của hạt nhỏ hơn tỷ lệ giãn nở của vũ trụ, hạt đó sẽ

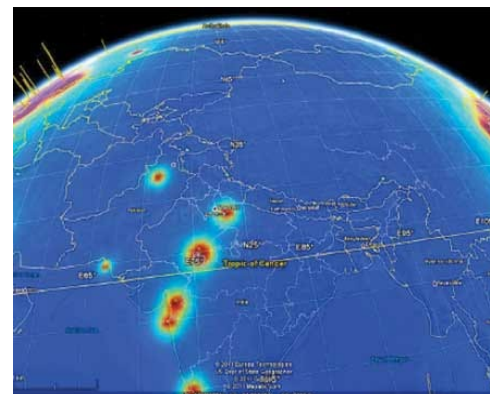
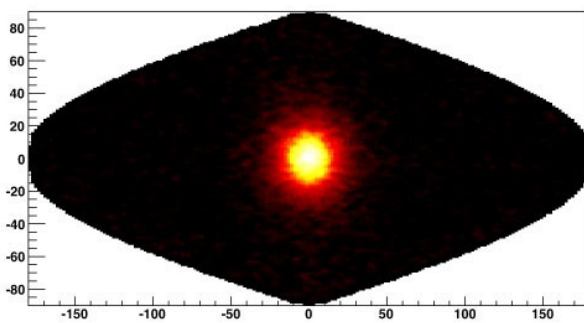
bị tách ra khỏi plasma nguyên thủy: số lượng hạt không thay đổi và cùng một nhiệt độ, và mật độ hạt đơn thuần giảm xuống do vũ trụ giãn nở trong khi tỉ số mật độ hạt trên mật độ photon là không thay đổi. Neutrino tương tác yếu nhất cũng đồng nghĩa là neutrino bị tách ra khỏi plasma nguyên thủy sớm nhất. Theo tính toán, neutrino bị tách rời khỏi plasma nguyên thủy ở nhiệt độ khoảng 10 tỷ độ K (tương ứng với mức năng lượng  $\sim 1$  MeV,  $E \sim k_B T$  với  $k_B$  là hằng số Boltzman), và tạo nên một bức xạ nền neutrino vũ trụ gọi là CNB, tương tự như bức xạ nền vi sóng CMB mà chúng ta có thể quen thuộc. Mỗi quan hệ nhiệt độ giữa hai bức xạ nền này được thể hiện qua công thức  $T_\nu = \left(\frac{4}{11}\right)^{1/3} T_\gamma$ . Công thức này vẫn đúng cho đến ngày nay, cũng có nghĩa là với nhiệt độ bức xạ nền vi sóng CMB cỡ 2.725 K, nhiệt độ bức xạ nền neutrino CNB là cỡ 1.75 K. Cho đến thời điểm hiện tại, bức xạ nền neutrino vẫn chưa được phát hiện trong thực nghiệm. Tuy vậy, có thể nhận định rằng neutrino có ảnh hưởng trực tiếp đến những quan sát vũ trụ học, cụ thể là lịch sử giãn nở vũ trụ tại thời điểm cân bằng giữa vật chất và bức xạ và ảnh hưởng của bức xạ nền neutrino lên sự hình thành cấu trúc lớn của vũ trụ. Vì vậy hiểu các tính chất của neutrino giúp chúng ta hiểu hơn về vũ trụ và ngược lại bằng cách đo chính xác những thông số và cấu trúc của vũ trụ, nó cũng giúp chúng ta tìm hiểu thêm về loại hạt đặc biệt này.

Năm 2002 giải thưởng Nobel vật lý được trao cho GS. Raymond Davis và GS. Masatoshi Koshiba cho những đóng góp tiên phong trong lĩnh vực nghiên cứu Thiên văn học với neutrino. Với GS. Davis đó là sự phát hiện neutrino từ mặt trời, qua đó khẳng định rằng năng lượng mà mặt trời sinh ra đến từ quá trình tổng hợp hạt nhân diễn ra trong lõi của nó. Hình ảnh mặt trời được xây dựng bởi máy dò neutrino có thể thấy ở bên trái của **Hình 10**. GS Koshiba, với máy dò Kamioka, không chỉ khẳng định quan sát của GS. Davis về sự tồn tại của neutrino từ mặt trời, mà còn lần đầu tiên phát hiện ra neutrino từ vụ nổ siêu tân tinh năm 1987, cách trái đất khoảng 168,000 năm ánh sáng. Có đến 99% năng lượng của vụ nổ siêu tân tinh được cho là mang đi bởi neutrino trong khoảng vài chục giây bùng cháy, và chỉ 1% năng lượng còn lại là ánh sáng mà chúng ta có thể quan sát thấy trên bầu trời. Bên cạnh đó, do neutrino tương tác rất yếu với vật chất, neutrino có thể rất nhanh chóng thoát ra khỏi bề mặt của ngôi sao (nhanh hơn ánh sáng do ánh sáng tương tác với môi trường đậm đặc ở trong lõi của ngôi sao) và đi đến trái đất. Ước tính tần suất xuất hiện vụ nổ sao trong thiên hà giống thiên hà của chúng ta là một trong mười đến năm mươi năm. Từ sau vụ nổ 1987 đến nay, các nhà khoa học chưa quan sát được thêm một vụ nổ siêu tân tinh nào. Nếu một vụ nổ tương tự như vụ nổ năm 1987 diễn ra, thay vì quan sát thấy khoảng vài chục sự kiện neutrino trong máy đo như trước đây, những máy dò neutrino hiện đại với kích thước lớn hơn rất nhiều có thể quan sát thấy hàng nghìn đến hàng chục nghìn sự kiện neutrino. Đó thực sự sẽ là những thông tin cực kỳ quý giá bởi nó cho phép chúng ta hiểu thêm về quá trình sụp đổ của ngôi sao, hay hệ quả của nó, sự hình thành của các sao neutron và lỗ đen. Neutrino là một sứ giả thiên văn tuyệt vời. Năm 2018, trạm quan sát neutrino IceCube ở Nam Cực công bố việc tìm thấy một sự kiện neutrino có năng lượng cực lớn vào ngày 22 tháng 9 năm 2017, trùng hợp về hướng đi và thời gian với nguồn tia X năng lượng cao được biết đến trước đó là plazar TXS 0506+056, một thiên hà với

một hố đen khổng lồ ở trung tâm, cách trái đất khoảng 3.7 tỷ năm ánh sáng. Phát hiện đã mở ra một chương mới trong ngành Thiên văn học: thiên văn đa sứ giả!

Năm 2005, thí nghiệm KamLAND [11] phát hiện ra phản neutrino sinh ra bởi quá trình phân rã beta bên trong lòng trái đất bởi các nguyên tố như Kali ( $^{40}\text{K}$ ), Thori ( $^{232}\text{Th}$ ), Urani ( $^{238}\text{U}$ ), v.v. , gọi là neutrino địa chất (*geoneutrino*). Năm năm sau, thí nghiệm Borexino [12] đã khẳng định phát hiện loại neutrino này với độ tin cậy cao hơn, mở ra một hướng đi mới cho khoa học trái đất: sử dụng neutrino như là một nhiệt kế của trái đất. Bên cạnh một lượng nhiệt khổng lồ nhận được từ mặt trời, trái đất cũng sinh ra một lượng nhiệt với công suất khoảng 46 triệu triệu oát ( $10^{12}\text{ W}$ )<sup>[3]</sup>. Một phần năng lượng đến từ phân rã beta và các nhà khoa học hiện tại vẫn chưa chắc chắn phần đóng góp và sự phân bố của nó trên trái đất. Việc đo được neutrino địa chất sẽ giúp chúng ta trả lời những câu hỏi này. Ngành khoa học địa chất neutrino (*geoneutrino science*) vẫn còn rất mới mẻ, tuy nhiên hứa hẹn có nhiều đóng góp quan trọng cho hiểu biết của chúng ta về trái đất, thành phần của nó, sự hình thành của trái đất trong hệ Mặt Trời và tương lai của nó.

Neutrino lần đầu tiên (năm 1956) được phát hiện ra nhờ nguồn neutrino từ lò phản ứng hạt nhân, và giờ đây với những hiểu biết mà chúng ta có được sau hơn năm thập kỷ và những tiến bộ về công nghệ phát hiện ánh sáng yếu và xử lý tín hiệu, neutrino trở thành một công cụ để giám sát hoạt động của chính những lò phản ứng hạt nhân, trở thành một công cụ đặc biệt cho an ninh quốc gia. Do neutrino tương tác rất yếu với vật chất, một số lượng rất lớn neutrino sinh ra (cỡ  $10^{20}$  trên một giây và tỷ lệ với công suất của lò phản ứng) khi một quốc gia nào đó chạy lò phản ứng hạt nhân cho những mục đích không minh bạch như làm giàu Urani cho việc tạo ra vũ khí hạt nhân, sẽ không thể bị giữ lại ở bên trong biên giới của quốc gia đó. Bằng cách đặt



**Hình 10.** Bên trái là hình ảnh mặt trời dưới “ánh sáng” (tín hiệu) neutrino quan sát bởi thí nghiệm Super-Kamiokande [8], nằm sâu 1000 m dưới lòng đất. Bên phải là bản đồ mô phỏng mật độ neutrino sinh ra từ các lò phản ứng hạt nhân [9].



máy dò neutrino, ví dụ, ở gần biên giới của quốc gia đó, một quốc gia láng giềng có khả năng phát hiện ra nếu quốc gia đó đang chạy lò phản ứng hạt nhân hay không. Bên phải của **Hình 10** hiển thị bản đồ neutrino sinh ra từ các lò phản ứng hạt nhân trên thế giới, cho thấy sự hiểu biết tường tận của chúng ta về lượng neutrino sinh ra dựa trên những lò hạt nhân đã được công bố. Một khi máy dò cho thấy sự vượt trội của sự kiện neutrino quan sát được so với dự đoán, điều đó cũng có nghĩa là có những hoạt động hạt nhân không được minh bạch đang diễn ra.

## 5. Kết luận

Neutrino được “khai sinh” theo một cách hết sức đặc biệt và những bất ngờ mà loại hạt nhỏ bé này mang lại cho khoa học vẫn chưa dừng lại. Không có neutrino, mặt trời sẽ không sinh ra năng lượng từ tổng hợp hạt nhân để sưởi ấm trái đất. Không có neutrino hay

neutrino có khối lượng khác đi, Vũ trụ ngày nay có lẽ đã rất khác. Neutrino mang đi hầu như tất cả năng lượng của các ngôi sao khi chúng chết đi, nhưng cũng là những sứ giả đem lại những thông tin thiên văn hết sức quý giá. Bắt được neutrino đã là một công việc hết sức khó khăn, nhưng các nhà khoa học đã đi rất xa để rồi có thể sử dụng nó như là một công cụ để đo lượng nhiệt sinh ra của trái đất, tình trạng bên trong lõi của Mặt Trời, hay giám sát hoạt động liên quan đến vũ khí hạt nhân. Trên con đường khám phá và tìm hiểu loại hạt đặc biệt này, các nhà vật lý đã thách thức và phát triển rất nhiều công nghệ liên quan và những công nghệ này say đó được áp dụng rộng rãi cho nhiều lĩnh vực khác. Khoa học neutrino, với vai trò nền tảng cho vật lý hạt và hạt nhân, Vũ trụ học và Thiên văn học, đã phát triển rất mạnh mẽ trong những thập niên vừa qua và sẽ tiếp tục trong những thập niên tới. Những bất ngờ từ loại hạt đặc biệt này vẫn đang còn ở phía trước.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Pauli ban đầu gọi hạt này là neutron. Tuy nhiên sau đó 2 năm thì neutron được J. Chadwick phát hiện ra, nhưng không phải là hạt Pauli tiên đoán. Sau đó E. Fermi là người đầu tiên gọi hạt đó là neutrino. Tên gọi *neutrino* là kết hợp của từ “*neutral*” tức trung hoà về điện, và “*ino*” có nghĩa là nhỏ.
- [2] Wikipedia, “Standard Model”, [https://en.wikipedia.org/wiki/Standard\\_Model](https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model), (Accessed: March 1, 2021), (Accessed: March 1, 2021)
- [3] Hitoshi Murayama, “Implication of neutrino mass”, <http://hitoshi.berkeley.edu/neutrino/neutrino4.html>
- [4] Edward Vitagliano *et al*, “Grand Unified Neutrino Spectrum at Earth: Sources and Spectral components”, <https://arxiv.org/abs/1910.11878>, (Accessed: March 1, 2021)
- [5] Ivan Esteban *et al*, “Three-neutrino fit based on data available in July 2020”, <http://www.nu-fit.org/?q=node/228>, (Accessed: March 1, 2021)
- [6] Particle Data Group, “CKM quark-mixing matrix”, <https://pdg.lbl.gov/2019/reviews/rpp2019-rev-ckm-matrix.pdf>, (Accessed: March 1, 2021)
- [7] The T2K collaboration, “Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations”, *Nature* 580 (2020) 7803, 339-344, *Nature* 583 (2020) 7814, E16 (erratum)
- [8] The Super-Kamiokande collaboration, “Solar neutrinos”, <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/sk/solar-e.html>, (Accessed: March 1, 2021)
- [9] “Neutrinos and national security”, <https://www.aps.org/publications/apsnews/2014/04/neutrinos.cfm>, (Accessed: March 1, 2021)
- [10] Yvonne Y.Y. Wong, “Neutrino mass in Cosmology: Status and Prospects”, *Ann.Rev.Nucl.Part.Sci.* 61 (2011), 69-98
- [11] The KamLAND collaboration, “Experimental investigation of geologically produced antineutrinos with KamLAND”, *Nature* 436 (2005), 499-503
- [12] The Borexino collaboration, “Measurement of geo-neutrinos from 1353 days of Borexino”, *Phys.Lett.B* 722 (2013), 295-300