

HẠT NEUTRINO

VÀ NHỮNG TÍN HIỆU CỦA TRANG VẬT LÝ MỚI

Tạp chí Scientific American số tháng 4.2013 đã đăng tải bài viết chứa nhiều thông tin quan trọng về hạt neutrino của 3 tác giả: GS Martin Hirsh (Đại học Valencia, Tây Ban Nha), GS Heinrich Pas (Đại học Dortmund, Đức), GS Werner Porod (Đại học Wurzburg, Đức). Neutrino là một hạt đầy bí hiểm, những vấn đề mà neutrino đặt ra sẽ sớm mở đường đến những thực tại chưa được khám phá. Neutrino là ngọn đèn tín hiệu của một trang vật lý mới.

Các tính chất của hạt neutrino

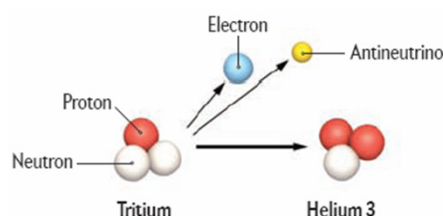
Trong mô hình SM (Standard Model) - mô hình thống nhất các tương tác điện từ, yếu, mạnh - neutrino được xếp vào bảng các hạt cơ bản (hình 1). Neutrino là một hạt fermion với spin = 1/2, không có điện tích, khối lượng rất bé và có 3 hương vị (flavor): neutrino electron, neutrino muon và neutrino tau tùy theo việc neutrino đi kèm với electron, muon, hay tau trong các phân rã.

	Fermions			Bosons
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson
Leptons	e electron	μ muon	τ tau	g gluon

Hình 1: các hạt cơ bản trong mô hình SM, các hạt trong hình ellip là các neutrino với 3 hương vị (electron, muon và tau)

Danh từ neutrino (tiếng Ý có nghĩa là neutron nhỏ) là tên do nhà vật lý

người Italia Enrico Fermi đặt cho hạt này. Neutrino phát sinh từ phân rã của các hạt phóng xạ (hình 2).



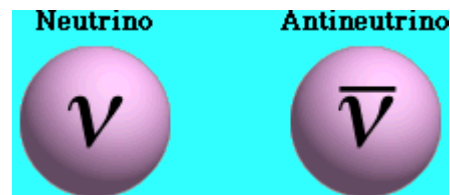
Hình 2: các hạt nhân phóng xạ có phân rã beta: tritium (một đồng vị của hydrogen) phân rã thành helium 3, một neutron biến thành proton và một phản neutrino

Neutrino còn có thể tìm thấy trong tia vũ trụ và trong thông lượng neutrino bức xạ từ mặt trời (atmospheric and solar neutrinos). Neutrino tương tác rất yếu với các hạt khác (hình 3).



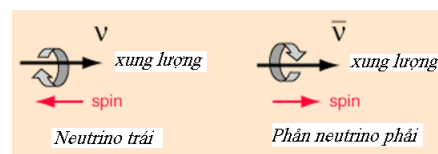
Hình 3: hàng tỷ hạt neutrino đi ngang qua ngón tay cái của chúng ta trong mỗi giây mà chúng ta không cảm nhận được

Ứng với mỗi neutrino có một hạt phản neutrino (hình 4).



Hình 4: neutrino và phản hạt của nó là phản neutrino

Hạt neutrino trong mô hình chuẩn SM là một *hạt trái*, điều này có nghĩa là spin và xung lượng chuyển động ngược chiều với nhau (hình 5), còn đối với phản neutrino thì đó là một *hạt phải* (spin hướng đồng chiều với xung lượng).



Hình 5: neutrino (trái) và phản neutrino (phải)

Khái niệm trái và phải không có ý nghĩa đối với các hạt như electron vì tính trái và phải sẽ biến thành ngược lại trong một hệ quy

chiều khác. Song đối với neutrino vì chúng chuyển động với tốc độ gần tốc độ ánh sáng nên không tìm được hệ quy chiếu để biến trái thành phải được, vì vậy đối với neutrino tính trái và phải là bất biến Lorentz. Hạt neutrino được tiên đoán bởi nhà vật lý người Áo Wolfgang Pauli năm 1930 khi nghiên cứu phân rã beta: *tôi đã làm một việc khủng khiếp là tiên đoán sự tồn tại của một hạt mà có thể không ghi đo được.*

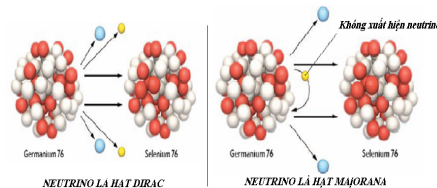
Thực tế neutrino có thể ghi đo được nhờ những cố gắng đặc biệt của các nhà vật lý. Neutrino không ở trong thành phần cấu tạo nguyên tử, neutrino cũng không tham gia vào các quá trình hóa học. Neutrino không mang điện, có khối lượng rất bé, khoảng một phần triệu khối lượng electron. Neutrino là hạt đã làm kinh ngạc thế giới trong 80 năm qua. Hiện vẫn còn những vấn đề còn bỏ ngỏ đối với neutrino mà chúng ta sẽ bàn đến trong bài viết này. Nhiều câu hỏi về neutrino sẽ có ảnh hưởng lớn đến vật lý trong tương lai, đến lý thuyết thống nhất. Mô hình SM hiện hành chưa gồm được hết các tính chất của neutrino và cần phải được mở rộng. Trên thế giới, tại những máy va chạm, lò phản ứng, trong các hầm mỏ, người ta đều đặt thiết bị để ghi đo và nghiên cứu nhiều vấn đề về neutrino.

Neutrino và phản neutrino, hạt dirac và hạt majorana

Các dữ liệu thực nghiệm cho thấy, các phản neutrino đều có helicity dương (hạt phải) còn neutrino có helicity âm (hạt trái). Nếu neutrino là một hạt *dirac* (như các hạt trong SM) thì neutrino và phản neutrino là hai hạt khác nhau. Song nếu neutrino là một hạt *majorana* thì neutrino và phản neutrino trùng nhau và là cùng

một hạt. Không giống như hạt dirac (hạt và phản hạt khác nhau), các hạt majorana đồng nhất với phản hạt.

Liệu neutrino là hạt dirac hay là hạt majorana? Đây là một vấn đề còn bỏ ngỏ đối với hạt neutrino. Câu hỏi này (hạt dirac hay hạt majorana?) có thể tìm được câu trả lời trong những *phân rã beta kép* không có neutrino (hình 6). Nhiều hạt nhân đồng vị có thể có hai phân rã beta đồng thời và thông thường sẽ phát ra hai electron và hai phản neutrino. Kết quả của phân rã kép beta sẽ không cho ta một neutrino nào nếu như neutrino là những hạt majorana.



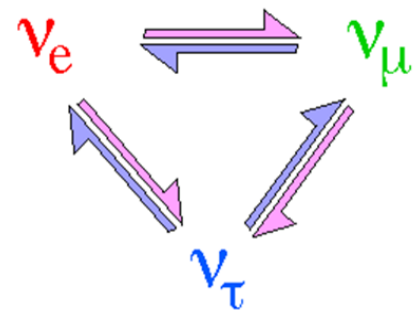
Hình 6: phân rã kép beta không có neutrino. Nếu neutrino cũng là phản neutrino (hạt majorana) thì phản neutrino phát sinh từ phân rã đầu sẽ bị hấp thụ bởi phân rã thứ hai (phân rã thứ hai hấp thụ neutrino tương đương với việc phát ra phản neutrino). Kết quả là phân rã kép beta không phát ra neutrino hoặc phản neutrino nào cả. Phía trái của hình trên mô tả quá trình phân rã beta với neutrino và phản neutrino khác nhau, bên phải với neutrino và phản neutrino là một

Mô hình majorana cho neutrino có ưu điểm giải thích được sự bất đối xứng vật chất/phản vật chất: vì sao vũ trụ lại có nhiều vật chất mà phản vật chất hầu như khó tìm ra?

Hiện tượng dao động (oscillation) neutrino

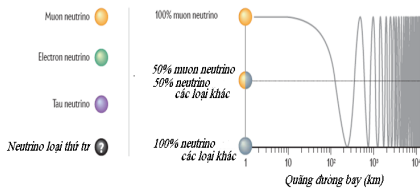
Từ 1975 và đặc biệt là từ 1995 trở lại đây, các nhà vật lý đã phát hiện rằng, số lượng neutrino đến từ mặt trời bị giảm hụt trên quãng đường bay đến mặt đất so với tính toán. Lý thuyết ước lượng dòng

neutrino mặt trời là vào khoảng 64 tỷ neutrino/giây.cm² xuống mặt đất. Song các detector như GALLEX hay SAGE chỉ đo được 40 tỷ/giây.cm². Vậy một số lượng neutrino mất đi đâu? Các nhà vật lý giải thích sự tụt giảm quan sát được trong thông lượng neutrino mặt trời bằng hiện tượng dao động neutrino (hình 7). Vậy thế nào là hiện tượng dao động neutrino?

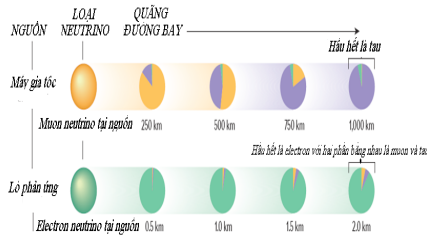


Hình 7: dao động neutrino

Nhiều thí nghiệm cho thấy, neutrino có thể thay đổi hương vị (flavor) trên đường bay. Điều đó có nghĩa rằng trong quá trình bay (hình 8 và 9) từ một nguồn bức xạ (mặt trời, máy gia tốc, lò phản ứng hạt nhân...), neutrino luôn biến từ một hương vị này sang một hương vị khác (hương vị electron, hương vị muon và hương vị tau). Hiện tượng biến đổi hương vị này được gọi là *dao động neutrino*, ý tưởng kỳ diệu này được nhà khoa học người Ý Bruno Pontecorvo (sau này sang làm việc cho Viện nghiên cứu Hạt nhân - JINR Dubna của Nga) đưa ra năm 1962 và được các nhà khoa học Nhật Bản Ziro Maki, Masami Nakagawa và Shoichi Sakata xây dựng thành mô hình dao động giữa các hương vị. Vào năm 1967, Pontecorvo đã tiên đoán rằng, sự dao động sẽ dẫn đến một sự thiếu hụt (deficit) các neutrino mặt trời quan sát từ mặt đất và điều này được thực nghiệm kiểm nghiệm vào năm 1968.



Hình 8: khi neutrino chuyển động gần tốc độ ánh sáng trong không gian, xuyên qua trái đất, xuyên qua cơ thể chúng ta thì hướng vị của nó thay đổi, nghĩa là có dao động giữa các loại neutrino. Các nhà vật lý có thể tính toán xác suất dao động theo quãng đường mà neutrino bay. Có thể tồn tại một loại neutrino thứ tư. Hình vẽ minh họa xác suất dao động của neutrino muon ban đầu theo quãng đường bay



Hình 9: các thí nghiệm về dao động neutrino đo tỷ lệ các loại neutrino từ một nguồn phát đến một địa điểm cách nguồn một quãng bay tính bằng km

Cơ học lượng tử bắt buộc, muốn có dao động thì các neutrino phải có khối lượng khác nhau. Nhiều thí nghiệm đã được đặt gần các nhà máy điện hạt nhân, các máy gia tốc là các nguồn có khả năng bức xạ neutrino nhằm mục đích đo khối lượng của neutrino trong vòng 20 năm nay. Việc đo đặc khối lượng neutrino phụ thuộc vào 2 thông số chính: góc trộn lượng tử (quantum mixing angle) giữa 2 hướng vị neutrino và hiệu bình phương khối lượng của hai loại đó. Góc trộn θ xuất hiện trong công thức quay sau:

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

Trong đó $\nu_i (i=1,2)$ là "hàm riêng của ma trận khối lượng". Một neutrino ban đầu trong quá

trình bay có thể dao động giữa hai hướng vị theo công thức trên. Hiện nay trị số góc trộn và khối lượng neutrino chưa đạt đến mức chính xác cao.

Neutralino

Trong lý thuyết các hạt cơ bản có một đối xứng quan trọng là *siêu đối xứng (supersymmetry)* nối liền fermion (spin phân số) và boson (spin nguyên). Vậy mỗi hạt có một siêu hạt song hành. Ví dụ, siêu hạt của Z là zino, siêu hạt của photon là photino, còn siêu hạt của higgs là higgsino. Các siêu hạt này đều có spin = 1/2. Vì các siêu hạt zino, photino và higgsino có cùng những số lượng tử như nhau nên chúng có thể kết hợp với nhau để cho ta hạt neutralino. Hạt này tương tác với các hạt khác với hằng số tương tác đặc trưng cho tương tác yếu tương tự như hạt neutrino.

Các nhà vật lý cho rằng, hạt neutralino = zino + photino + higgsino là hạt ứng viên của vật chất tối, neutralino phải có thời gian sống dài để làm nhiệm vụ đó. Hai trong số tác giả (Hirsch and Porod) của bài báo này cùng cộng tác với José Valle (Đại học Valencia, Tây Ban Nha) và Jorge C. Romaxo (Đại học Kỹ thuật Lisbon, Bồ Đào Nha) đã chứng minh rằng, mối liên hệ giữa neutrino và neutralino có thể kiểm nghiệm được tại LHC (Large Hadron Collider).

Cơ chế bập bênh (seesaw mechanism) và neutrino không hoạt tính (sterile neutrino)

Tháng 1.2011, Thierry Lasserre (Hiệp hội Điện tử tiêu dùng Mỹ - CEA) và cộng sự lại

tim thấy ở một khoảng cách vài mét của một lò phản ứng một sự thiếu hụt 6% neutrino so với lý thuyết. Và điều bất thường này không thể giải thích được bằng SM với 3 neutrino đã biết mà chỉ có thể giải thích nếu đưa vào một loại neutrino chưa từng biết đến đó là *neutrino không hoạt tính (sterile neutrino)*. Neutrino không hoạt tính là những neutrino phải (hoặc phản neutrino trái) không tương tác với các neutrino hoạt tính (active neutrino) trong khuôn khổ của SM và chỉ có tương tác hấp dẫn. Các neutrino không hoạt tính là những đơn tuyến chuẩn SM và chỉ tương tác với neutrino hoạt tính, nghĩa là các neutrino trong SM thông qua dao động.

$$\nu_{e,\mu,\tau} \rightleftharpoons \nu_s$$

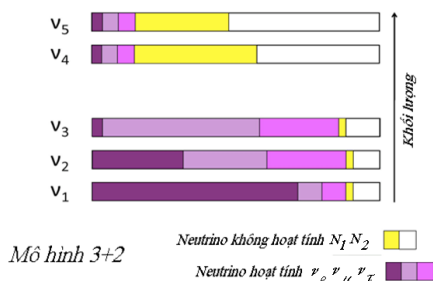
Trong sơ đồ trên chỉ số s chỉ neutrino không hoạt tính. Như vậy, ta phải cộng vào lagrangian L của SM những hạng số mô tả các neutrino không hoạt tính:

$$L = L_{SM} + L(\nu, N) = L(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, N_1, N_2, N_3),$$
 trong đó ν là các *neutrino hoạt tính thông thường* ν_e, ν_μ, ν_τ ; còn N là các *neutrino không hoạt tính* $N_1, N_2, N_3, \dots$ Lagrangian trên dẫn đến một ma trận khối lượng biểu hiện cơ chế bập bênh (seesaw mechanism). Cơ chế bập bênh là cơ chế theo đó nếu khối lượng của *neutrino không hoạt tính* là lớn thì khối lượng của *neutrino hoạt tính* lại nhỏ và ngược lại. Đó là lý do vì sao cơ chế này được gọi là cơ chế bập bênh.

Cơ chế bập bênh đòi hỏi sự du nhập vào SM một (hay nhiều hơn) neutrino phải (hình 10). Đây là một loại neutrino rất nặng khó ghi

đo và được gọi là *neutrino không hoạt tính*, các neutrino trong SM được gọi là *neutrino hoạt tính*. Trong mô hình bập bênh những neutrino mới chưa từng biết đến phải được đưa vào SM (như vậy là ta đã đi vượt quá SM), những neutrino này rất nặng, vượt quá xích (scale) điện yếu. Nhờ cơ chế này người ta giải thích được vì sao các neutrino trái thông thường lại có khối lượng nhỏ. Có một mối liên hệ chặt chẽ giữa khối lượng của neutrino trái và neutrino phải: khối lượng của chúng tỷ lệ nghịch với nhau. Cơ chế bập bênh làm cho khối lượng neutrino phải không hoạt tính nặng hơn nhiều so với neutrino của SM.

Các mô hình bập bênh này thường được ký hiệu là $(3+N)$, số 3 là số các neutrino hoạt tính, còn N là số neutrino không hoạt tính. Trong sơ đồ với 2 neutrino không hoạt tính chúng ta có hình sau:



Hình 10: các trạng thái hàm riêng của ma trận khối lượng v_i ($i=1,2,3,4,5$) trong mô hình với 3 neutrino hoạt tính + 2 neutrino không hoạt tính

Như vậy, ngoài những bất thường giải thích được nhờ hiện tượng dao động còn có những bất thường mà người ta không thể giải thích được bằng SM với 3 hương vị neutrino mà phải cầu cứu đến một loại neutrino thứ tư (gọi là *neutrino không hoạt tính*), neutrino này được gọi là không

hoạt tính vì nó chỉ tham gia tương tác hấp dẫn. Thêm các neutrino này vào lagrangian của SM làm cho các neutrino trái lập tức có khối lượng và như thế cho phép giải thích hiện tượng dao động một cách tự nhiên (nhớ rằng dao động đòi hỏi neutrino phải có khối lượng). Những hạt neutrino này là những đơn tuyến đối với nhóm chuẩn của SM.

Một neutrino không hoạt tính không tham gia tương tác yếu chỉ tham gia tương tác hấp dẫn và dao động neutrino trong khi neutrino thông thường (neutrino hoạt tính) có tham gia tương tác yếu. Nếu tồn tại neutrino phải thì điều này có thể cung cấp cơ sở để giải thích vì sao 3 loại neutrino của SM lại có khối lượng nhỏ như vậy. Những neutrino không hoạt tính (với khối lượng cỡ keV) có thể là ứng viên cho vật chất tối. Các hạt này có thể giúp các nhà vật lý giải thích tốc độ bất thường quan sát được của các pulsars (pulsar kicks). Sự phân rã của các neutrino không hoạt tính tàn dư có thể tạo nên một thông lượng tia X trong vũ trụ.

Kết luận

Những vấn đề lớn liên quan đến neutrino dẫn đến yêu cầu phải phát triển lý thuyết thống nhất trong vật lý là: 1- Trong biến hóa dao động (oscillation metamorphose) của neutrino (kể cả neutrino không hoạt tính) cần tìm chính xác góc trộn (mixing) và khối lượng neutrino. Dữ liệu hiện nay về khối lượng neutrino hoạt tính là $\nu_e < 2,5 \text{ eV}/c^2$, $\nu_\mu < 170 \text{ keV}/c^2$, $\nu_\tau < 18 \text{ MeV}/c^2$; 2- Mối liên hệ giữa hạt neutralino, một ứng viên vật chất tối (dark matter) và hạt neutrino nhờ máy gia tốc

siêu đại LHC; 3- Neutrino là hạt dirac hay là hạt majorana? (câu hỏi này có thể tìm được câu trả lời trong thí nghiệm phân rã kép beta không có neutrino). Một sự bất đối xứng giữa hạt và phản hạt có thể là cơ sở giải thích vì sao vật chất lại nhiều hơn phản vật chất trong vũ trụ; 4- Phát hiện hạt *neutrino không hoạt tính*, một ứng viên khác của vật chất tối. Neutrino không hoạt tính đòi hỏi sự mở rộng mô hình SM. Những vấn đề trên đang được các phòng thí nghiệm trên thế giới tiếp tục nghiên cứu để làm sáng tỏ. Như vậy, hạt neutrino đã đặt ra những vấn đề còn bỏ ngỏ buộc các nhà vật lý phải phát triển một mô hình sâu rộng hơn vượt qua giới hạn của SM, tức là phải xây dựng một lý thuyết thống nhất tổng quát hơn nữa. Có thể nói, neutrino là ngọn đèn tín hiệu của một trang vật lý mới trong tương lai. Giải quyết các bí ẩn của neutrino có thể đưa vật lý sang một trang mới ■

CC (biên dịch)

Tài liệu tham khảo

1. *Testing Neutrino Mixing at Future Collider Experiments*. W. Porod, M. Hirsch, J. Romaxo and J.W.F. Valle in *Physical Review D*, Vol. 63, No. 11, Article No. 115004; April 30, 2001.

2. *Neutrino Masses and Particle Physics beyond the Standard Model*. H. Päs in *Annalen der Physik*, Vol. 11, No. 8, pages 551-572; September 2002.