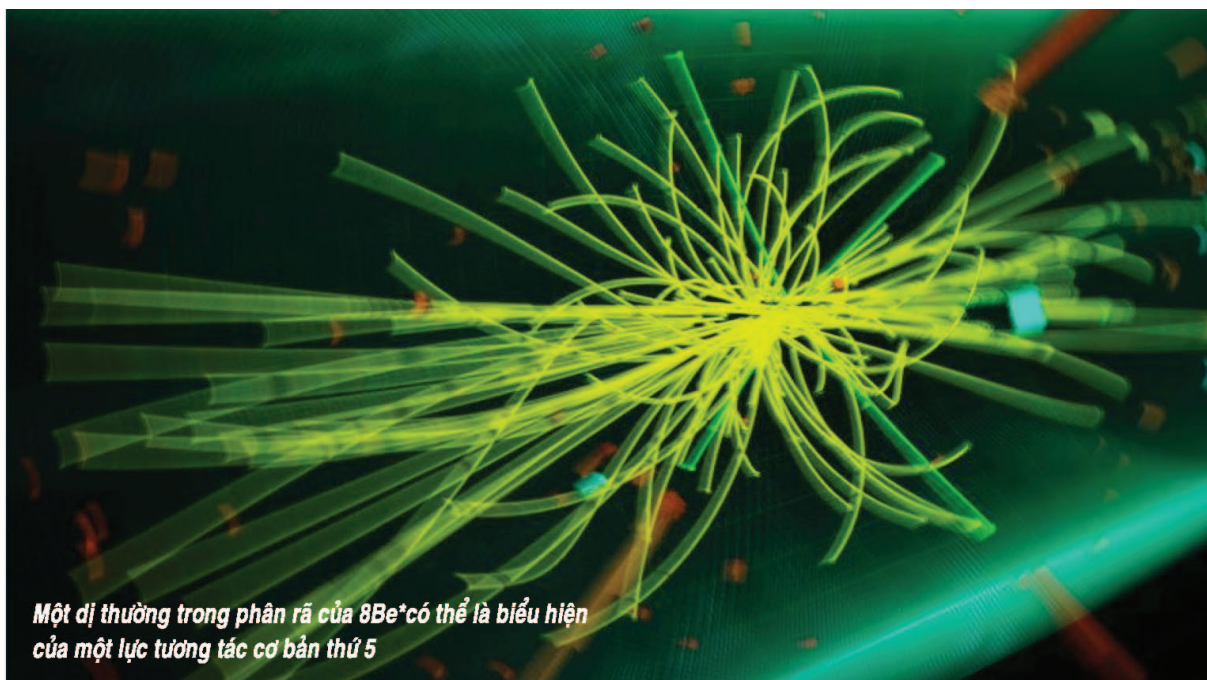


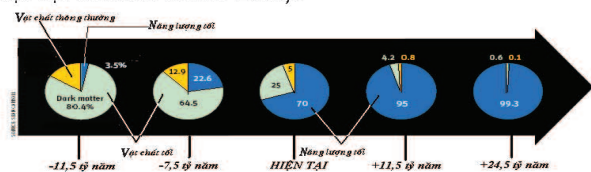


Một dị thường trong phân rã của 8Be^* có thể là biểu hiện của một lực tương tác cơ bản thứ 5

Lực tương tác cơ bản thứ 5: có hay không?

Lâu nay mọi người vẫn tin rằng: thế giới xung quanh chúng ta vận động và phát triển không ngừng, nhưng dù phức tạp thế nào thì cũng chỉ có 4 loại lực cơ bản tạo nên vũ trụ, đó là: lực hấp dẫn, điện từ, hạt nhân mạnh và yếu. Tuy nhiên, “chân lý” này dường như đang bị lung lay, khi có những bằng chứng cho thấy khả năng tồn tại của một lực tương tác cơ bản thứ 5.

Như chúng ta biết, trong thiên nhiên có 4 loại lực tương tác: lực hấp dẫn, điện từ, hạt nhân mạnh và yếu. Song 4 tương tác này chỉ mới điều khiển được vật chất thông thường, còn một thành phần quan trọng là vật chất tối (dark matter) thì chúng ta chưa tiếp cận được. Một phần lớn vật chất trong vũ trụ là vật chất tối, không có vật chất tối thì không có sao, thiên hà với sự sống. Vật chất tối đã giữ chặt vũ trụ lại [1]. Siêu hạt nhẹ nhất trong siêu đối xứng - hạt nhẹ nhất chuyển động trong các chiều dư - hạt *axion* trong Thuyết sắc động lực học lượng tử (QCD), có thể thuộc về vật chất tối hay không vẫn là câu hỏi, vì vật chất tối có thể cảm nhận hấp dẫn song vô cảm với các tương tác khác. Hơn 80 năm đã trôi qua mà bài toán vật chất tối - một trong những bài toán cơ bản của vật lý - vẫn chưa có lời giải. Xin xem hình 1 để hình dung được tỷ lệ vật chất tối qua lịch sử của vũ trụ (hiện tại vật chất tối chiếm 25%).



Hình 1: trong vũ trụ có năng lượng tối, vật chất tối (màu xanh nhạt) và vật chất thông thường xếp thứ tự theo chiều kim đồng hồ trên hình vẽ. Vật chất có nhiều ở giai đoạn sơ sinh của vũ trụ. Trong quá trình giãn nở, vật chất loãng dần và năng lượng tối dần chiếm ưu thế và quyết định số phận của vũ trụ

Hiện nay, mô hình chuẩn (SM - Standard Model) không hàm chứa được vật chất tối. Trong SM ta có các hạt như sau (hình 2):

u d	u d	u d	c s	c s	c s	t b	t b	t b	Quarks
e⁻	ν_e	μ⁻	ν_μ	τ⁻	ν_τ				Leptons
ū d̄	ū d̄	ū d̄	c̄ s̄	c̄ s̄	c̄ s̄	t̄ b̄	t̄ b̄	t̄ b̄	Anti-Quarks
e⁺	ν̄_e	μ⁺	ν̄_μ	τ⁺	ν̄_τ				Anti-Leptons
g g g g g g g g g <td rowspan="2">Bosons</td>	Bosons								
γ W⁻ W⁺ Z⁰ H									

Hình 2: các hạt trong SM (không có vật chất tối trong mô hình này)

Vậy nhiệm vụ trước mắt của các nhà vật lý là tìm được lý thuyết mở rộng bao gồm cả vật chất tối.

Photon tối (dark photon)

Theo các nhà vật lý, phải tồn tại một hạt lạ - photon tối, tương tự như photon song có khối lượng. Việc tìm ra một photon tối sẽ mở ra một trang mới của vật lý. Các hạt mới và lực mới trong thế giới tối (dark sector) sẽ trộn lẫn (mixing) với thế giới thấy được mô tả bởi

SM, như vậy cần có một lực (yếu) thứ 5 giữa các hạt. Một thí nghiệm lớn mang tên *DarkLight* đã được tiến hành tại Viện Công nghệ Massachusetts (MIT) bởi Peter Fisher, Richard Milner cùng các đồng nghiệp tại Phòng thí nghiệm gia tốc quốc gia Jefferson (Virginia, Mỹ) nhằm mục đích phát hiện hạt photon tối có khối lượng và được ký hiệu là hạt A' [2].

Khi hạt A' có khối lượng nhỏ và khi việc trộn với hạt boson Z không đáng kể thì chúng ta có thể sử dụng hệ mô tả việc trộn giữa photon thông thường với photon tối. Và Lagrangian hiệu dụng cho hệ photon - photon tối sẽ là:

$$L = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}F'_{\mu\nu}F'^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_{A'}^2 A'^2 - \sum_f q_f e(A_\mu + \varepsilon A'_\mu) \bar{f} \gamma^\mu f - g_X A'_\mu \bar{f} \gamma^\mu f$$

Phép lấy tổng thực hiện trên các fermion của SM với điện tích q_f .

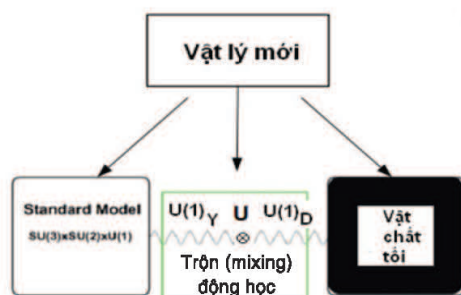
A = photon, hạt A' = photon tối có khối lượng: $m_{A'} \sim \text{MeV} - \text{GeV}$.

ε = thông số trộn động học (kinetic mixing parameter): $10^{-9} \leq \varepsilon \leq 10^{-7}$.

g_X = hằng số tương tác chuẩn tối U(1) (dark U(1) gauge coupling).

f = hạt vật chất tối, $\leq 100 \text{ GeV}$ $m_{f'} \leq 10 \text{ TeV}$

Sơ đồ trộn [3] được minh họa ở hình 3.



Hình 3: sơ đồ trộn giữa vật chất tối và vật chất thông thường mô tả bởi SM. $U(1)_Y$ = nhóm chuẩn siêu tích, $U(1)_D$ = nhóm chuẩn vật chất tối, U = hạt vật chất tối, dấu $\otimes$ = mixing

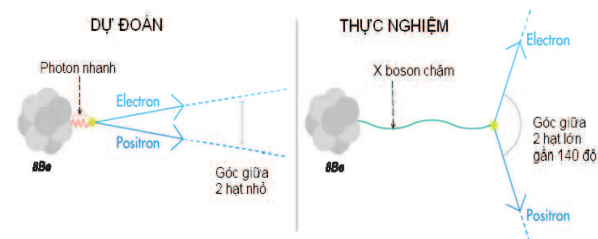
Boson X phát hiện tại Hungary

Một nhóm nghiên cứu tại Hungary lãnh đạo bởi Attila Krasznahorkay cũng tiến hành thí nghiệm về vật chất tối. Song khi đi tìm A' họ lại phát hiện ra một hạt mới X cũng có khả năng là một hạt chuyển tải một lực cơ bản mới, một lực thứ 5. Hạt họ tìm ra không phải là photon

tối mà là hạt X boson protophobic (hậu tố *phobic* có nghĩa là sợ, tránh), chuyển tải một lực siêu ngắn. Kết quả này đã được công bố trên *Physical Review Letters* [4] song không thu hút được nhiều sự quan tâm cho mãi đến khi Jonathan Feng và đồng nghiệp (Đại học California) [5] kiểm tra và nhận thấy rằng, không có điều gì sai trong công trình của các nhà vật lý Hungary.

Nhóm các nhà vật lý Hungary đã bắn một chùm proton vào bia ^7Li để tạo nên trạng thái kích thích của $^8\text{Be}^*$, rồi nghiên cứu phân rã của $^8\text{Be}^*$. Dữ liệu cho thấy rằng phát sinh một vector chuẩn (gauge) boson X (khối lượng 17 MeV) trong quá trình phân rã của trạng thái kích thích xuống trạng thái cơ bản: $^8\text{Be}^* \rightarrow ^8\text{Be} + X$ và sau đó có phân rã $X \rightarrow e+e-$.

Boson X chuyển tải một lực tương tác thứ 5 có hằng số tương tác điện tích với các quark u&d và e. Còn tương tác với proton thì bị lấn át bởi tương tác với neutron, từ đó có danh từ protophobic X. Các tác giả [5] còn cho thấy, hạt boson X có thể giúp giải quyết vấn đề dị thường của momen từ của muon. Trong phân rã của $^8\text{Be}^*$, người ta mong đợi một góc θ rất nhỏ giữa $e+$ và $e-$. Song trong thực tế các nhà vật lý Hungary đã quan sát được một điều dị thường: góc θ rất lớn $\rightarrow 140^\circ$ và $m(e+e-) \approx 17 \text{ MeV}$ (hình 4).



Hình 4: dị thường trong phân rã của $^8\text{Be}^*$

Hiện tượng trên có thể giải thích nhờ một hạt mới X phát sinh trong phân rã $^8\text{Be}^* \rightarrow ^8\text{Be} + X$ với $m_X = 16,7 \text{ MeV}$.

X có thể là một boson vô hướng, giả vô hướng, vector, vector trục hoặc hạt spin 2. Song sử dụng các định luật bảo toàn (chẵn lẻ, momen...) người ta đi đến kết luận X là một vector spin 1 chuyển tải một tương tác mới. Hạt X lại là một hạt protophobic. Các tác giả [5] giải thích điều này như sau: xét boson X tương tác với các fermion SM với điện tích ε_f (trong đơn vị e). Lagrangian sẽ là:

$$L = -\frac{1}{4}X_{\mu\nu}X^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_X^2 X_\mu X^\mu - X^\mu J_\mu$$

Ở mức nucleon $J_\mu = e\epsilon_p \bar{p}\gamma_\mu p + e\epsilon_n \bar{n}\gamma_\mu n$

Với $\epsilon_p = 2\epsilon_u + \epsilon_d$ và $\epsilon_n = \epsilon_u + 2\epsilon_d$

Ta cần xem với tỷ số điện tích nào ϵ_p / ϵ_n thì phù hợp với các dữ liệu trong phân rã 8Be^* .

Dữ liệu cho thấy rằng $-0,067 < \frac{\epsilon_p}{\epsilon_n} < 0,078$

Như vậy ta thấy rằng, X dường như lảng tránh proton (protophobic = sợ proton) hơn là neutron. Feng và đồng nghiệp cũng giải thích rằng một photon tối (dark photon) không đáp ứng được các dữ liệu phân rã 8Be^* (xin xem chi tiết tại [5]).

Họ cho rằng hạt 17 MeV (một khối lượng không phù hợp với photon tối) không phải là một photon tối mà đó là một hạt boson protophobic. Hạt này có thể mang một lực tầm ngắn khoảng nhiều lần độ rộng của hạt nhân. Trong khi một photon tối (tương tự như photon thông thường trong QCD) phải tương tác với electron và proton thì boson X lại tương tác ưu tiên với electron và neutron (như vậy có hiện tượng protophobic). Hạt boson X có thể mang một lực tương tác cơ bản thứ 5. Các nhà nghiên cứu tại Phòng thí nghiệm gia tốc quốc gia Jefferson và nhiều nhóm khác ở Mỹ và châu Âu hiện đang tiến hành công việc nhằm khẳng định hay bác bỏ các kết quả của nhóm các nhà khoa học Hungary trong vòng một đến hai năm.

Momen từ dị thường của hạt muon (muon g-2 anomaly)

Sau đây là kết quả tính momen dị thường của hạt muon trong khuôn khổ SM (Standard Model).

$$\vec{\mu} = g \left(\frac{Qe}{2m} \right) \vec{S} \quad g = 2(1 + a); \quad a = \frac{(g-2)}{2}$$

a là dị thường của muon ($g=2$ theo phương trình Dirac)

a lý thuyết = $116591797(60) \times 10^{-11}$

a thực nghiệm = $116592080(33) \times 10^{-11}$

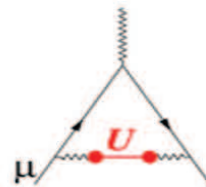
a thực nghiệm - a lý thuyết = $(283 \pm 87) \times 10^{-11}$

Hình 5: dị thường của momen từ của hạt muon

Trong kết quả thu được trong khuôn khổ SM có một sự sai khác giữa lý thuyết và thực nghiệm khi xác định momen từ của hạt muon. Các nhà vật lý cho rằng, phải vượt ra khỏi khuôn khổ SM và chú ý đến vật chất tối mới có hy vọng giải quyết được vấn đề này. Vì vậy phải sử dụng Lagrangian trộn (mixing) sau này

$$L_{\text{mix}} = -\frac{\epsilon}{2} F_{\mu\nu}^{QED} F^{\mu\nu}_{\text{DARK}}. \text{ Lagrangian đó biểu diễn tương tác}$$

giữa vật chất mô tả trong SM và vật chất tối. Tương ứng với việc thay Lagrangian, ta phải thay giản đồ ở hình 5 (không có vật chất tối) bằng giản đồ ở hình 6 (có vật chất tối).



Hình 6: giản đồ tính momen từ của muon sử dụng vật chất tối U

Bài toán dị thường của momen từ của muon có triển vọng được giải quyết sau việc thay Lagrangian và giản đồ để tính đến tương tác với vật chất tối.

Kết luận

Người ta hy vọng trong tương lai rất gần sẽ có thể làm tan biến mọi nghi vấn xung quanh dữ liệu thực nghiệm và cơ sở lý thuyết các hạt chuyển tải lực tương tác thứ 5. Nếu những hạt đó tồn tại thì vật lý sẽ mở ra một trang mới vô cùng phong phú - *Vật lý mới (New Physics)*. Ngoài 4 tương tác (điện từ, mạnh và yếu hạt nhân, hấp dẫn), con người có thể sẽ phát hiện một tương tác mới trộn/nối liền vật chất thông thường với vật chất tối và về đến Stockholm để nhận giải Nobel sẽ nằm trong tay của một số nhà vật lý hoạt động trong lĩnh vực này ✍

Tài liệu tham khảo

[1] Natalie Wolchover, "Evidence of a 'Fifth Force' Faces Scrutiny", <https://www.quantamagazine.org/20160607-new-boson-claim-faces-scrutiny/>.

[2] The Dark 'Fifth Force' of the Universe - "It's Totally Beyond Anything We Understand", http://www.dailygalaxy.com/my_weblog/2016/05/epic-search-for-a-dark-fifth-force-of-the-universe-its-totally-beyond-anything-we-understand.html.

[3] Andrzej Kupś, "Search for a dark photon": https://indico.cern.ch/event/287488/contributions/1640617/attachments/534979/737630/KUPSC_darkAK.pdf.

[4] A.J. Krasznahorkay et al (2016), "Observation of Anomalous Internal Pair Creation in 8Be : A. Possible Indication of a Light Neutral Boson", *Physical Review Letters*.

[5] Jonathan L. Feng, Bartosz Fornal, Itzhak Galon, Susan Gardner, Jordan Smolinsky, Tim M.P. Tait and Philip Tanedo, "Evidence for a Protophobic Fifth Force from 8Be Nuclear Transitions", <https://arxiv.org/pdf/1604.07411v1.pdf>.