

TIẾN TỚI GIỚI HẠN MỚI TRONG NGHIÊN CỨU KHÁM PHÁ ĐƠN CỰC TỪ

Đinh Văn Chiến

Cục Năng lượng Nguyên tử, Bộ Khoa học và Công nghệ

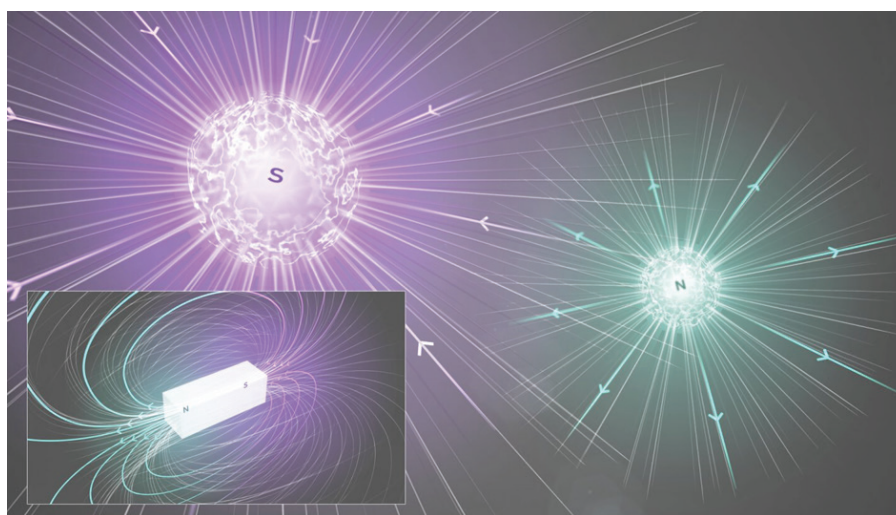
Khi chúng ta ví von “hạt của Chúa” - Boson Higgs là "cơn đau đầu" kéo dài nửa thế kỷ đã được giải quyết của các nhà khoa học thì vẫn còn đó một “cơn đau” khác âm ỉ từ một thế kỷ nay chưa có lời giải - đó là hạt đơn cực từ. Trong nghiên cứu được công bố mới đây, các nhà khoa học tại kênh thực nghiệm ATLAS của máy gia tốc hạt lớn (Large Hadron Collider - LHC) thuộc Hội đồng Nghiên cứu hạt nhân châu Âu (CERN) đã đặt ra những giới hạn mới liên quan đến hạt giả thuyết này.

Mặc dù đã được dự đoán tồn tại từ hơn nửa thế kỷ trước nhưng các nhà khoa học đã phải mất hàng thập kỷ để đưa ra bằng chứng phát hiện về Boson Higgs - “hạt của Chúa”. Sự tồn tại của Boson Higgs đã giải thích cơ chế mang khối lượng của các hạt sơ cấp hình thành nguyên tử, phân tử và vật chất, hay nói cách khác đó là sự tồn tại của vũ trụ vật chất như ngày nay. Chính bởi lý do đó nên Boson Higgs được gắn với tên gọi “hạt của Chúa”.

Tưởng như những khám phá về Boson Higgs đã đánh dấu sự kết thúc cho cuộc truy tìm về cấu trúc hạt trong tự nhiên. Thế nhưng những thách thức vẫn còn đó khi một loại hạt khác đã được vật lý lượng tử dự đoán gần một thế kỷ trước dường như vẫn đang biến mất trong tự nhiên - đó là đơn cực từ. Trên thực tế, đơn cực từ tổng hợp đã được tạo ra trong từ trường nhân tạo bởi ngưng tụ Bose-Einstein của một loại khí nguyên tử cực lạnh [1]. Tuy nhiên, đơn cực từ tự nhiên đến nay vẫn còn là một ẩn số dưới lăng kính khoa học, mặc dù các nỗ lực tìm kiếm vẫn không ngừng nghỉ.

Sự tồn tại của đơn cực từ

Những ai quan tâm đến lĩnh vực vật lý có lẽ đã quá quen thuộc với khái niệm “đơn cực điện” hay thường được biết đến phổ biến hơn với tên gọi “điện tích”. Các đơn cực điện tồn tại ở



Mô phỏng về đơn cực từ (hình lớn) và lưỡng cực từ (hình nhỏ).

dạng hạt mang điện tích dương hoặc âm như proton (điện tích dương) hoặc electron (điện tích âm). Các điện tích cùng dấu đẩy nhau, điện tích trái dấu hút nhau thông qua sự tương tác của điện trường và có hướng từ dương sang âm.

Thoạt nhiên, tính chất từ có vẻ mang những đặc trưng như một phiên bản của tính chất điện vì một từ trường tồn tại cũng có hướng và được xác định theo chiều Bắc - Nam. Tuy nhiên, điều tương tự dường như vẫn còn là ẩn số khi cố gắng tìm kiếm một phiên bản từ tính của điện tích. Hay nói cách khác, trong khi chúng ta có thể tìm thấy các đơn cực điện ở dạng hạt tích điện nhưng chúng ta lại chưa

bao giờ quan sát thấy các đơn cực từ trong tự nhiên.

Các cực từ thường đi theo cặp, chúng có cả cực Bắc và cực Nam giống như khi chia một thanh nam châm thành hai phần, sẽ không có bất kỳ phần cực Bắc và phần cực Nam riêng biệt. Thay vào đó, chúng ta sẽ nhận được hai nam châm mới, nhỏ hơn và mỗi nam châm đều có cực Bắc và cực Nam. Ngay cả khi thanh nam châm đó được chia thành các hạt riêng lẻ thì vẫn chỉ thu được lưỡng cực từ. Trong khi điều mà khoa học đang tìm kiếm là đơn cực từ - một hạt từ tính chỉ sở hữu một cực duy nhất, chỉ có độc lập cực Bắc không có cực Nam hoặc ngược lại.



Khi xem xét các hiện tượng điện từ học vĩ mô (bỏ qua các hiệu ứng của cơ học lượng tử), lý thuyết điện động lực học cổ điển [2] mà cụ thể là các phương trình Maxwell đang mô tả phù hợp với những quan sát thực tế trong các ứng dụng ở các ngành kỹ thuật, viễn thông, y học... Tuy nhiên, một trong những phương trình này - Định luật Gauss về từ trường cho thấy không có sự tồn tại của đơn cực từ. Theo đó, từ tính quan sát được là do sự chuyển động của điện tích. Khi một hạt tích điện di chuyển theo chiều chuyển động hình thành dòng điện sẽ tạo ra một từ trường bao quanh hướng của dòng điện. Ngoài ra, nguyên nhân thứ hai của từ tính liên quan đến một tính chất cơ học lượng tử gọi là "spin" - chuyển động quay nội tại quanh trục của hạt không theo hướng cụ thể. Spin này tạo ra một xung lượng góc trong hạt, làm cho electron hoạt động như một lưỡng cực từ, tương tự một thanh nam châm siêu nhỏ.

Như vậy, theo lý thuyết điện động lực học cổ điển, các hiện tượng từ có thể được mô tả mà không cần đến sự tồn tại của đơn cực từ. Tuy nhiên, điều này không có nghĩa là không có đơn cực từ. Hay nói đúng hơn là đơn cực từ không dễ dàng quan sát được ở bất cứ đâu và khi mở rộng lý thuyết điện động lực học cổ điển với các hiệu ứng lượng tử [3, 4], chúng ta mới bắt đầu tìm thấy những bằng chứng lý thuyết rõ ràng về sự hiện diện của đơn cực từ trong vũ trụ.

Vẻ đẹp của tính đối xứng

Kết hợp từ các nghiên cứu khác nhau, nhà vật lý thế kỷ XIX James Clerk Maxwell (Scotland) đã chỉ ra rằng, điện và từ là hai khía cạnh của cùng một yếu tố - đó là tương tác điện từ. Nhưng trong các phương trình Maxwell [2], lực điện và lực từ không hoàn toàn giống nhau. Lực điện có các điện tích dương và âm riêng lẻ. Lực từ thì không, không có cực từ đơn hay đơn cực từ. Điều này cho

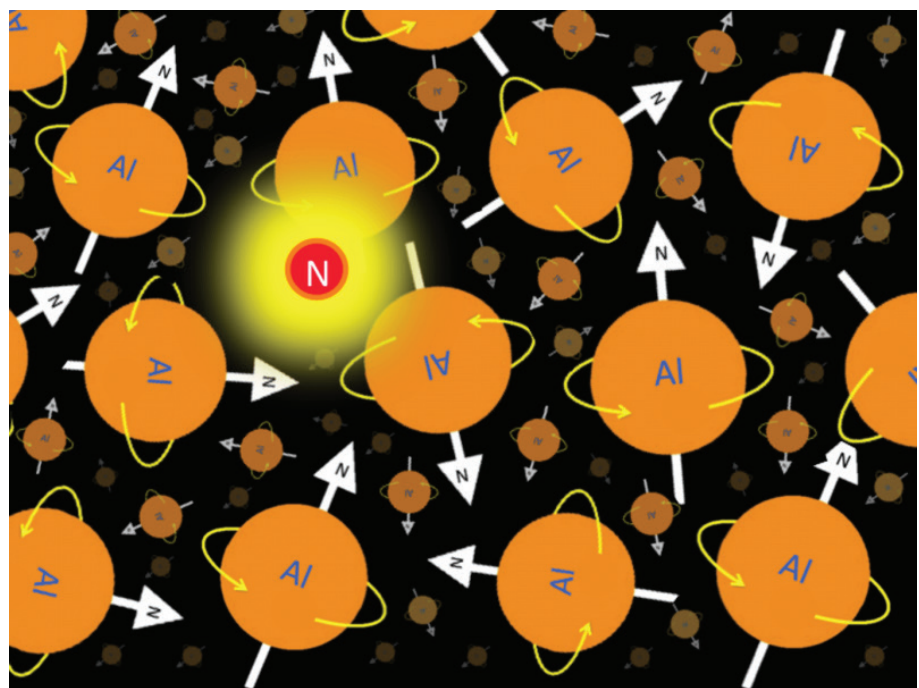
thấy, lý thuyết của Maxwell có vẻ bất đối xứng. Mặc dù Maxwell đã nghiên cứu rất nhiều về yếu tố thiếu điện tích từ, nhưng cuối cùng trong các phương trình của mình, yếu tố này đã không xuất hiện do không thể giải thích được sự tồn tại của đơn cực từ. Những nghiên cứu của Maxwell cho thấy, mặc dù đơn cực từ chưa xuất hiện nhưng cũng không thể tìm thấy bất cứ lý do nào để phủ nhận sự tồn tại của loại hạt này.

Năm 1931, nhà vật lý lý thuyết Paul Dirac (Anh) - đồng giải thưởng Nobel Vật lý năm 1933 cho những khám phá các hiện tượng mới của lý thuyết nguyên tử đã chứng minh rằng, sự tồn tại của đơn cực từ sẽ phù hợp theo cơ học lượng tử với điều kiện lượng tử hóa điện tích (lý thuyết điện động lực học lượng tử), tức là đơn cực từ tồn tại theo các phương trình Maxwell mở rộng, trong đó điện tích mang những giá trị rời rạc [4].

Vào thời của Dirac, các nhà vật lý đã phát hiện ra các electron và xác định chúng là những hạt không thể phân chia được và mang đơn vị

điện tích cơ bản. Dirac đã tính toán đặc trưng của một electron trong từ trường của đơn cực theo các nguyên tắc vật lý lượng tử. Kết quả Dirac nhận thấy, electron chỉ có thể mang đúng đặc trưng sóng nếu tích của điện tích đơn cực từ và điện tích cơ bản của electron là một số nguyên. Điều đó có nghĩa là các đơn cực từ giống như electron đều mang điện tích cơ bản và không thể phân chia.

Sự "lượng tử hóa" điện tích này là một trong những điều kiện của cơ học lượng tử. Sự tồn tại của đơn cực từ sẽ mang tính chất lưỡng tính giữa điện và từ. Khi đó lực điện và lực từ sẽ hoàn toàn đối xứng và dường như có một động lực hấp dẫn từ vẻ đẹp của sự đối xứng để mong đợi loại hạt này tồn tại. Vì vậy, nghiên cứu của Paul Dirac hướng tới việc chứng minh rằng điện động lực học cổ điển và điện động lực học lượng tử là những lý thuyết có sự tương thích theo tính đối xứng, nghĩa là giữa hai lý thuyết có sự liên hệ tương tự nhau. Điều này sẽ đặc biệt ý nghĩa trong trường hợp lực điện hoàn toàn đối xứng tương tự với lực từ



Đơn cực từ vẫn đang ẩn náu trong thế giới tự nhiên.

thì có thể các lực khác cũng sẽ tương tự với nhau. Khi đó sẽ xuất hiện mối liên hệ giữa lực hạt nhân mạnh với lực hạt nhân yếu, mở đường cho sự thống nhất của tất cả các lực trong tự nhiên.

Tiến tới giới hạn mới

Các nhà khoa học đã tiến gần đến việc quan sát thấy các đơn cực từ bằng cách tạo ra các cấu trúc giống như đơn cực trong phòng thí nghiệm thông qua việc sử dụng các cách sắp xếp phức tạp của từ trường trong các chất ngưng tụ và siêu lỏng Bose-Einstein [1]. Tuy nhiên, kết quả này mới chỉ cho thấy rằng, đơn cực từ không phải là điều không thể có về mặt vật lý, trong khi những khám phá một đơn cực từ tự nhiên vẫn còn trong các dự đoán.

Kể từ thời Dirac, nhiều lý thuyết đã đưa ra dự đoán về đơn cực từ, bao gồm các lý thuyết mới cố gắng thống nhất tất cả các lực cơ bản của tự nhiên (lý thuyết thống nhất lớn - Grand Unified Theory). Theo đó, các lý thuyết dự đoán đơn cực từ sẽ có khối lượng gấp 10 triệu triệu lần proton. Việc tạo ra những hạt như vậy sẽ cần nhiều năng lượng hơn mức mà các máy gia tốc trên Trái đất có thể đạt tới, nhưng đó là năng lượng chắc chắn đã có vào thời kỳ sơ khai của vũ trụ. Điều này có nghĩa là các đơn cực từ có thể đã hiện diện trong vũ trụ sơ khai nhưng bị loãng đến mật độ cực nhỏ, tới mức không thể nhận thấy trong giai đoạn giãn nở theo cấp số nhân ban đầu, được gọi là lạm phát vũ trụ.

Tuy nhiên, các lý thuyết thống nhất lớn không phải là lý thuyết duy nhất dự đoán được hiện tượng đơn cực từ. Các lý thuyết khác dự đoán đơn cực từ có khối lượng thấp hơn có thể được tạo ra bởi máy gia tốc hạt. Trong một công trình nghiên cứu mới đây được đăng tải vào tháng 8/2023 trên cơ sở lưu trữ dữ liệu điện tử arXiv [5], các nhà khoa học tại kênh thực nghiệm ATLAS của LHC thuộc CERN

đã công bố kết quả đặt ra những giới hạn mới liên quan đến hạt giả thuyết này. Đây là những ràng buộc tốt nhất hiện nay, bổ sung thêm manh mối mới cho việc tiếp tục tìm kiếm.

Theo đó, các nhà khoa học tại ATLAS đang tìm kiếm các cặp đơn cực từ dạng điểm có năng lượng khối lên tới khoảng 4,0 TeV. Những cặp đơn cực từ này có thể được tạo ra trong các va chạm giữa các proton có năng lượng 13 TeV thông qua hai cơ chế "Drell-Yan", trong đó một photon ảo được tạo ra trong các va chạm sẽ tạo ra các đơn cực từ, hoặc hai photon ảo được bức xạ bởi các proton sẽ tương tác với nhau để tạo ra các đơn cực từ.

Phương pháp tiếp cận trong nghiên cứu này dựa trên lý thuyết của Dirac cho biết, độ lớn của điện tích từ nhỏ nhất (gD) tương đương với 68,5 lần đơn vị cơ bản của điện tích - điện tích của electron (e). Do đó, một đơn cực từ có điện tích 1 gD sẽ ion hóa vật chất tương tự như một hạt mang điện tích cao.

Khi một hạt ion hóa vật chất trong kênh thực nghiệm, năng lượng tích tụ tỷ lệ với bình phương điện tích của hạt sẽ được thiết bị đo ghi lại. Do đó, các đơn cực từ hay hạt mang điện tích cao sẽ để lại những vết năng lượng lớn dọc theo quỹ đạo của chúng trong kênh dò ATLAS. Do kênh dò ATLAS được thiết kế để ghi lại các hạt trung tính và điện tích thấp nên việc xác định đặc tính của các vết năng lượng cao này là rất quan trọng để tìm kiếm các đơn cực từ và hạt mang điện tích cao.

Kết quả của nhóm nghiên cứu đã đặt ra một số giới hạn chặt chẽ nhất cho đến nay về tốc độ tạo ra các đơn cực từ, hướng tới tìm kiếm các đơn cực từ có điện tích từ 1 và 2gD và các hạt mang điện tích cao có điện tích 20, 40, 60, 80 và 100e với năng lượng khối từ 0,2 đến 4 TeV. Bên cạnh đó, những kết quả nghiên cứu này cũng

là phân tích ATLAS đầu tiên xem xét cơ chế tạo thành phản ứng tổng hợp photon.

Mặc dù chưa có bằng chứng nào về các đơn cực từ hoặc hạt mang điện tích cao trong kết quả phân tích, nhưng các nhà khoa học tại ATLAS đã thiết lập được các giới hạn mới về tốc độ tạo ra và năng lượng khối của các đơn cực từ có điện tích từ 1 và 2 gD. Hiện nay, ATLAS vẫn là thực nghiệm có độ nhạy cao nhất liên quan đến các đơn cực từ trong phạm vi điện tích từ này. Hy vọng rằng, với sự nỗ lực, kiên trì và những cải tiến về khoa học và công nghệ cùng phương pháp tiếp cận mới, các nhà khoa học sẽ sớm tìm ra lời giải cho bài toán thế kỷ về đơn cực từ, góp phần ngày càng làm sáng rõ hơn bức tranh của thế giới tự nhiên.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M.W. Ray, E. Ruokokoshi, S. Kandel, et al. (2014), "Observation of dirac monopoles in a synthetic magnetic field", *Nature*, **505(7485)**, pp.657-660, DOI: 10.1038/nature12954.
- [2] J.D. Jackson (1999), *Classical Electrodynamics* (3rd ed.), Wiley, 460pp.
- [3] P. Curie (1894), "Sur la possibilité d'existence de la conductibilité magnétique et du magnétisme libre" - *Phys. Theor. Appl.*, **5(1)**, pp.415-417 (in French).
- [4] P.A.M. Dirac (1931), "Quantised singularities in the electromagnetic field", *Proceedings of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **133(821)**, pp.60-72, DOI:10.1098/rspa.1931.0130.
- [5] The ATLAS Collaboration (2023), "Search for magnetic monopoles and stable particles with high electric charges in $\sqrt{s}=13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector", *arXiv: 2308.04835*, DOI: 10.48550/arxiv.2308.04835.