

Thanh nam châm bay lơ lửng nhờ một siêu dẫn không nhìn thấy trong đó tỷ tử electron tạo thành một trạng thái liên đới với nhau. Điều đáng ngạc nhiên là trạng thái lượng tử của nhiều vật liệu hiện đại lại liên quan đến toán học lỗ đen

Dây và môi trường đông đặc

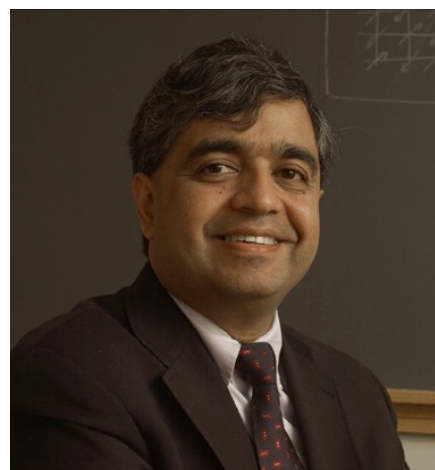
Lý thuyết dây (LTD) nghiên cứu thống nhất hấp dẫn và các tương tác cơ bản; lý thuyết môi trường đông đặc (MTĐĐ) nghiên cứu các vật liệu. Đây là hai lĩnh vực nghiên cứu rất xa rời nhau. Tuy nhiên, trong một bài báo đã được đăng trên Scientific American số tháng 1.2013, nhà nghiên cứu MTĐĐ Subir Sachdev (Đại học Harvard, Mỹ) đã chứng minh rằng, hai lý thuyết này có liên quan đến nhau và bổ sung cho nhau. Tạp chí KH&CN Việt Nam xin giới thiệu cùng bạn đọc bài báo lý thú này.

Lời “phi lộ” của Subir Sachdev

Tôi đã nhiều lần được tham gia hội thảo với các nhà LTD (Lý thuyết dây - String Theory), tuy nhiên, chuyên môn của tôi là MTĐĐ (Condensed Matter): nghiên cứu vật liệu như kim loại và siêu dẫn làm lạnh trong phòng thí nghiệm đến gần nhiệt độ không tuyệt đối.

Các nhà LTD nghiên cứu mô tả vũ trụ ở những năng lượng khó lòng đạt được trong phòng thí nghiệm, họ khảo sát một lĩnh vực vật lý xa lạ điều khiển các lỗ đen [1] và các chiều dư không thời gian (extra dimension - ED).

Các chuyên gia LTD cũng có nhiều điều chưa hiểu tường tận trong lĩnh vực của tôi. Trong MTĐĐ có nhiều phát hiện mà chúng tôi cũng không nghĩ rằng có thể xảy ra như vậy. Có những



Subir Sachdev

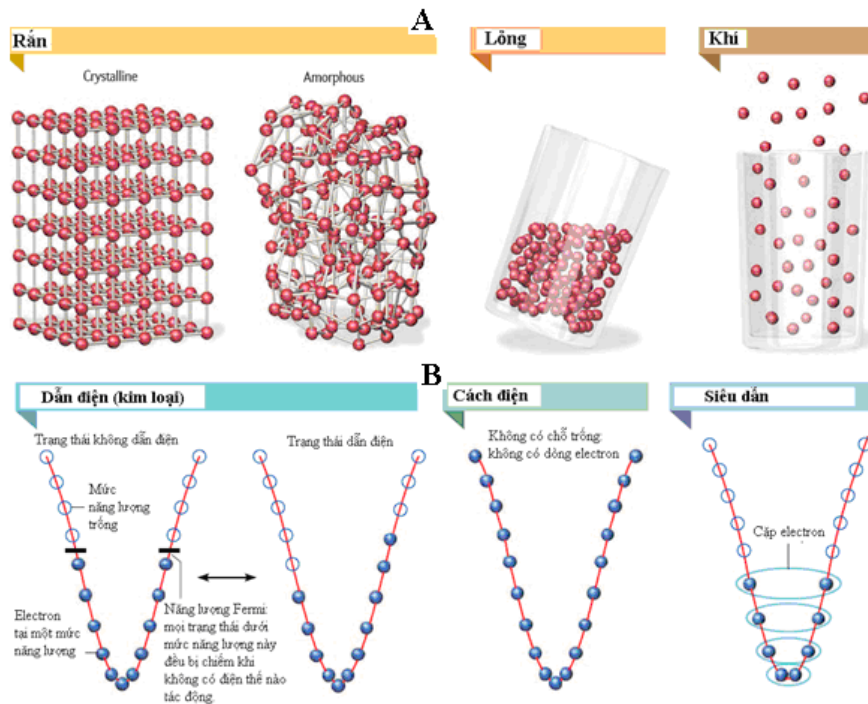
chuyển pha lượng tử của vật chất với cấu trúc kỳ lạ của thiên nhiên. Năm 1935, Albert Einstein, Boris Podolsky và Nathan Rosen đã phát hiện một tác động ma quái ở khoảng cách (“spooky action at a distance” - theo cách diễn tả của Einstein) đó là hiện tượng liên đới lượng tử (quantum entanglement). Hai hạt liên đới lượng tử có thể

nằm ở những khoảng cách rất xa nhau mà ít ai nghĩ rằng lại có thể tồn tại mối liên quan vật lý giữa chúng. Trong kim loại và siêu dẫn, chúng ta đối diện không phải với một cặp electron mà với một số rất lớn electron - khoảng 10^{23} electron. Vấn đề đã trở nên rất phức tạp. Hiện nay, bài toán MTĐĐ không còn mang ý nghĩa hàn lâm nữa: siêu dẫn đã trở thành vô cùng quan trọng về mặt công nghệ và các nhà lý thuyết đang tích cực nghiên cứu để làm sáng tỏ bản chất của vấn đề.

Các đồng nghiệp và tôi dường như đã hiểu được rằng, LTD có thể cung cấp một cách tiếp cận bài toán này. Khi tìm lý thuyết thống nhất các tương tác hạt cơ bản với hấp dẫn, các nhà LTD đã đối diện với các “đối ngẫu” (dualities) - đó là các mối liên quan tiềm ẩn giữa các vùng xa lạ của vật lý. Các đối ngẫu này nối liền những hiệu ứng lượng tử yếu và hấp dẫn mạnh với những hiệu ứng lượng tử mạnh và hấp dẫn yếu. Chúng tôi có thể chuyển bài toán liên đới lượng tử (quantum entanglement) trong MTĐĐ thành bài toán hấp dẫn và như thế thừa hưởng những kết quả nghiên cứu của các nhà LTD.

Những pha tiềm ẩn của vật chất

Pha rắn có kích thước và hình dạng cố định. Pha lỏng lấy dạng của bình chứa, pha khí tựa như pha lỏng song thể tích có thể thay đổi dễ dàng. Tuy vấn đề có vẻ đơn giản nhưng mãi đến đầu thế kỷ XX, người ta mới hiểu được cơ sở khoa học của những pha vật chất. Các nguyên tử có một cấu hình bất dịch trong chất rắn tinh thể song lại di động trong chất lỏng và khí (hình 1).



Hình 1: A. Các pha cổ điển: chất rắn có kích thước và hình dạng cố định: trong chất rắn tinh thể, các phân tử xếp thành mạng ổn định. Trong chất rắn vô định hình, các phân tử không xếp thành mạng song giữ các vị trí của chúng trong một thời gian dài. Chất lỏng có thể tích cố định song hình dạng thay đổi: các phân tử di động song vẫn còn gắn liền với nhau. Chất khí có thể tích và hình dạng thay đổi, các phân tử gần lỏng lẻo với nhau cho đến một nhiệt độ và áp suất nào đó (gọi là điểm tới hạn) thì chất lỏng, chất khí hòa với nhau và không còn sự phân biệt giữa chúng.

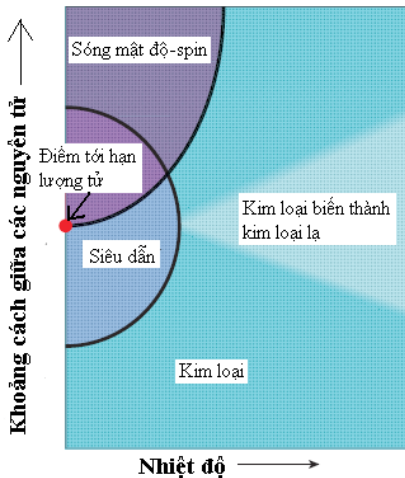
B. Các pha lượng tử: có 2 trường hợp: các kim loại là chất dẫn điện và chất cách điện không dẫn điện. Các nguyên tử không cung cấp các chỗ trống, cho nên, các electron bị giam giữ tại chỗ. Trong siêu dẫn, các electron không nằm riêng mà kết thành cặp và cặp hành xử như những hạt. Sự kết đôi này xảy ra dưới tác dụng của hiệu ứng spin lượng tử hoặc ảnh hưởng của những sóng lan truyền trên khắp các nguyên tử. Các cặp này không tuân theo các định luật của electron (fermion).

Ba pha trên vẫn chưa vét cạn hết các khả năng của vật chất. Một vật rắn không phải chỉ là một khung mạng các nguyên tử mà còn chứa một đám đông các electron. Mỗi nguyên tử cung cấp một vài electron và các electron này di chuyển trên toàn mạng tinh thể. Khi ta nối mẫu vật liệu này với một nguồn điện thì phát sinh một dòng điện. Ta có định luật Ohm: dòng tỷ lệ với điện thế chia cho điện trở. Những chất cách điện như Teflon có một điện trở cao, còn kim loại như đồng có điện trở

nhỏ và các chất bán dẫn có điện trở vô cùng nhỏ. Năm 1911, Heike Kamerlingh Onnes đã phát hiện chất bán dẫn khi ông làm giảm nhiệt độ thủy ngân xuống dưới -269 độ Celsius. Ngày nay, chúng ta biết bán dẫn cũng hoạt động ở nhiệt độ cao hơn -138 độ. Cách điện, dẫn điện và siêu dẫn là các pha khác nhau của vật chất, trong đó, electron lấy những hình dạng khác nhau.

Trong 2 thập kỷ vừa qua, các nhà vật lý đã phát hiện nhiều pha

bổ sung của electron trong chất rắn, trong đó có một pha đặc biệt lý thú mà các nhà vật lý gọi là *pha kim loại lạ - strange metall* (hình 2). Trong kim loại lạ, điện trở phụ thuộc vào nhiệt độ một cách bất thường.



Hình 2: sự xuất hiện của pha kim loại lạ

Nguyên nhân sự khác biệt giữa các pha là cách hành xử tập thể của các electron. Chuyển động của nguyên tử trong chất rắn chất lỏng và khí có thể mô tả bằng các nguyên lý cổ điển Newton. Cách hành xử của electron chỉ có thể mô tả được bằng lý thuyết lượng tử. Những nguyên lý lượng tử điều khiển cách hành xử của các electron trong MTĐĐ xuất nguyên tử những nguyên lý điều khiển electron trong nguyên tử. Một electron quay xung quanh hạt nhân và chuyển động của nó được mô tả như những sóng lan truyền xung quanh proton. Các electron có thể nằm trong các trạng thái khả dĩ với những đặc trưng quan sát được như năng lượng. Ngoài chuyển động quanh

hạt nhân của electron, còn phải xét đến spin quay quanh trục của electron. Các spin này có thể quay theo chiều hoặc ngược chiều kim đồng hồ, và chuyển động quay này không thể làm chậm lại hoặc gia tốc lên được: người ta quy ước gọi các trạng thái spin đó là *up* và *down*. Trong các nguyên tử với nhiều electron tồn tại một nguyên lý rất quan trọng là nguyên lý loại bỏ Pauli: không có 2 electron cùng chiếm một trạng thái (đó là nguyên lý Pauli cho các hạt fermion). Nếu chúng ta thêm một electron thì electron mới này chiếm trạng thái với năng lượng thấp nhất, giống như khi ta đổ đầy một cốc nước từ đáy lên. Điều đó cũng áp dụng cho 10^{23} electron trong một mẫu kim loại. Các electron di động này một khi đã rời khỏi nguyên tử ban đầu sẽ chiếm những trạng thái của toàn tinh thể và có thể xem là sóng sinus với một độ dài sóng ứng với năng lượng. Electron sẽ chiếm các trạng thái từ năng lượng thấp nhất cho phép đúng với nguyên lý loại bỏ Pauli đến một năng lượng ngưỡng gọi là năng lượng Fermi (hình 2).

Nếu áp đặt một điện thế thì một số electron có đủ năng lượng để nhảy lên một mức năng lượng trên năng lượng Fermi và electron này có thể di chuyển tự do. Trong một chất cách điện, mật độ electron chiếm hết các chỗ cho nên nếu áp đặt một điện thế nào đó thì electron cũng không còn chỗ để chuyển đi, vì thế sẽ không có một dòng điện nào cả. Trong chất siêu dẫn, mọi việc lại

phức tạp hơn: các electron kết đôi thành từng cặp theo lý thuyết do John Bardeen, Leon Cooper và John Robert Schriffer (BCS) thiết lập vào năm 1957. Tất nhiên là 2 electron đẩy nhau song sự dao động (vibration) của tinh thể lại tạo ra một lực hút vượt qua lực đẩy ban đầu giữa electron. Mỗi cặp hành xử không còn như một fermion mà như một boson vốn không tuân theo nguyên lý Pauli. Các cặp này có thể ngưng tụ trong cùng một trạng thái với năng lượng thấp nhất làm thành một ngưng tụ (condensat) Bose - Einstein. Tình huống này giống như khi ta đổ nước vào một cái cốc thì thông thường cốc đầy lên nhưng ở đây lại xuất hiện một lớp băng dưới đáy cốc có khả năng hấp thụ số nước mà chúng ta đổ vào. Nếu áp đặt một điện thế lên một chất như vậy, điện thế sẽ đẩy các cặp electron lên một trạng thái với năng lượng cao hơn (tuy rất nhỏ) và cho ta một dòng điện. Trạng thái với năng lượng cao hơn này là trống nên không có điều gì ngăn cản sự chảy của các cặp electron, vì vậy, chất siêu dẫn chuyển tải dòng điện với điện trở bằng không (0).

Tiến đến điểm tới hạn

Vào những năm đầu thập niên 80 của thế kỷ XX, lý thuyết lượng tử đã thắng lợi trong việc giải thích kim loại, cách điện, siêu dẫn và các vật liệu khác như bán dẫn (cơ sở của điện tử học hiện đại). Điều này đã khiến nhiều nhà vật lý tin rằng, họ đã tiến gần đến chỗ am hiểu tường tận về cách hành xử của electron trong chất

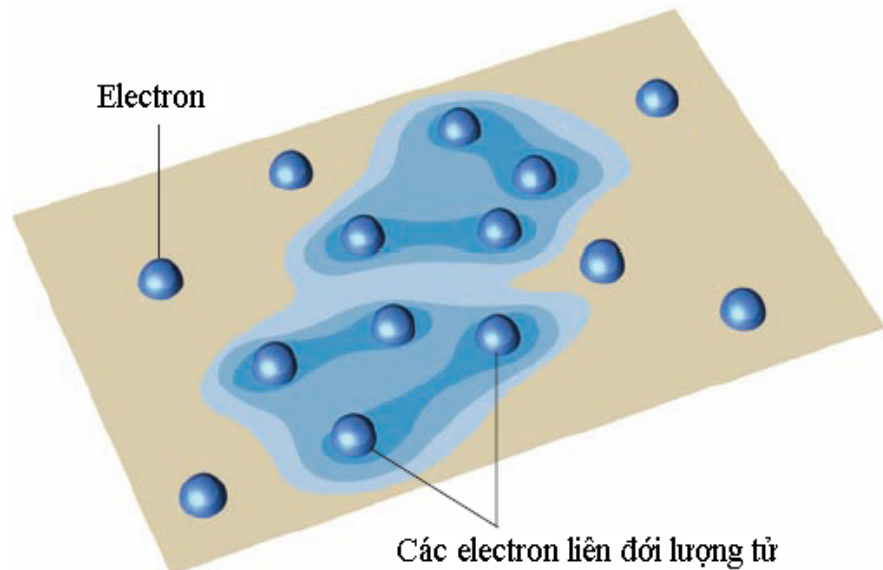
rắn và không còn gì để khám phá nữa. Song niềm tin của họ đã bị phá vỡ vì sự phát hiện siêu dẫn ở nhiệt độ cao. Thêm một ví dụ khác là *barium sắt arsenide*, trong đó người ta thay thế một phần *arsenic* bằng *phosphorus*. Ở nhiệt độ thấp chất này là một siêu dẫn và tuân theo lý thuyết BCS, ngoại trừ lực hút ở đây gây ra không phải do dao động mạng tinh thể mà gây ra bởi vật lý gắn liền với spin electron. Với một ít phosphorus, trong vật liệu xuất hiện trạng thái được gọi là sóng mật độ spin (spin - density wave). Trên một nửa vị trí của *sắt* thì spin electron là up (thay vì down) và xảy ra ngược lại tại số vị trí còn lại. Nếu ta thêm phosphorus thì biên độ của sóng mật độ - spin lại giảm đi. Và sẽ biến mất hoàn toàn nếu ta thay một lượng *arsenic* tới hạn khoảng 30%. Tại điểm tới hạn đó, spin electron với up và down ngang bằng nhau, và điều này dẫn đến hệ quả quan trọng. Dấu hiệu đầu tiên về bản chất bí ẩn của trạng thái tới hạn lượng tử là cách hành xử của hệ khi số lượng phosphorus là 30% và khi nhiệt độ tăng lên. Kết quả thu được không phải siêu dẫn cũng không phải sóng mật độ spin mà là một *kim loại lạ* (hình 2).

Ý tưởng chính cần thiết để mô tả điểm tới hạn lượng tử này là hiện tượng *liên đới lượng tử*. Hiện tượng liên đới lượng tử là sự chồng chất của hai trạng thái trong đó nếu một electron liên đới sẽ ở trạng thái up thì electron ở trạng thái down và ngược lại. Hãy tưởng tượng electron ở 2 vị trí của

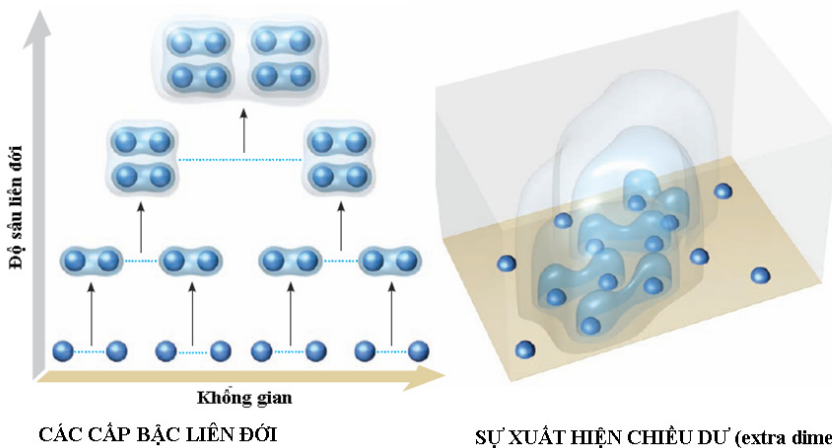
nguyên tử sắt. Về nguyên tắc thì electron không phân biệt được cho nên không thể nói electron nào up, electron nào down. Tuy nhiên, điều ta biết được chắc chắn là, nếu đo electron này ở up thì kết quả đo electron kia sẽ là down và khi các electron liên đới với nhau nếu ta biết được trạng thái của electron này thì biết được trạng thái của electron còn lại.

Đối với một electron, ta không biết được trạng thái nó là up hay down trừ khi đo đạc. Nói cách khác, electron vừa up vừa down đến khi bắt buộc nó phải lựa chọn. Điều bí ẩn là các electron vẫn bị liên đới như vậy cho dù ta tách chúng ra một khoảng cách rất xa. Đó là hiện tượng không định xứ của cái gọi là tác động ma quái ở khoảng cách (theo cách diễn tả của Einstein) ở hình 3.

Tính không định xứ đã được kiểm nghiệm bằng thực nghiệm. Einstein và đồng nghiệp đã nắm được khía cạnh phản trực giác này của cơ học lượng tử. Trong thập kỷ vừa qua, các nhà vật lý đã nghĩ rằng, hiện tượng liên đới có hy vọng giải thích về kim loại lạ. Khi gần đến điểm tới hạn lượng tử, các electron không còn độc lập, thậm chí không kết cặp từng đôi một mà hình thành một sự liên đới mở rộng cho tất cả 10^{23} electron. Hai electron gần nhau liên đới lượng tử với nhau, sau đó cặp này lại liên đới với cặp khác và tiếp tục như thế. Lý thuyết EPR (Einstein, Podolsky, Rosen) nói liên 2 electron bây giờ tạo nên một mạng lưới khổng lồ các liên đới (hình 4). Hiện tượng phức tạp này là một thách thức đối với các nhà vật lý tưởng chừng như không có lối thoát cho đến khi các nhà vật lý MTĐĐ nghĩ đến LTD thì một con đường sáng đã được mở ra.



Hình 3: pha lượng tử của vật chất chứa một chiều dư (ED) không gian tiềm ẩn. ED này xuất hiện trong quá trình chuyển pha giống như các hình trong một cuốn sách pop - up (sách với các hình dựng đứng lên khi ta mở sách). ED này cần thiết trong mô tả toán học của hiện tượng liên đới. Liên đới có nghĩa là nhiều hạt lượng tử tác động phối hợp như một toàn thể. Trong chuyển pha của vật liệu, nhiều electron có thể liên đới lượng tử với nhau



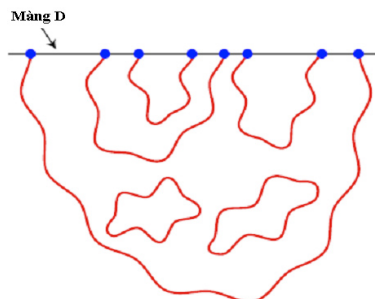
Hình 4: cấp bậc liên đới: hai electron liên đới thành một cặp rồi cặp này liên đới với cặp khác và liên tiếp như vậy (hình 4 bên trái). Như vậy, độ sâu của liên đới tác động như một chiều dư không gian tiềm ẩn nằm trên và ngoài không gian 3 chiều mà các electron đang cư trú (hình 4 bên phải). Bằng cách sử dụng sự tương tự toán học này, các nhà lý thuyết nghiên cứu các pha lượng tử có thể thừa hưởng các phát hiện của những nhà LTD khi nghiên cứu các chiều dư không gian

Liên hệ với LTD

LTD phát triển sự dao động của những dây vi mô: các mode dao động biểu diễn những hạt cơ bản. Tính chất dây của vật chất trở nên hiển nhiên ở năng lượng cực cao tại Big Bang và gần những lỗ đen rất đậm đặc. Vào giữa những năm 90 của thế kỷ XX, các nhà LTD như Joseph Polchinski (Viện Vật lý lý thuyết Kali, Đại học California, Santa Barbara) cho rằng, LTD không chỉ là dây mà còn có một đối tượng quan trọng nữa là màng (brane): đó là những mặt mà dây kết dính vào đó (hình 5).

Một hạt chất điểm là điểm cuối của một dây trải dài từ một màng ra chiều dư không gian. Chúng ta nhìn thấy, vũ trụ hoặc như bức tranh của những hạt chuyển động trong không - thời gian 4 chiều với nhiều tương tác phức tạp hoặc như bức tranh của những dây chuyển

động trong không - thời gian 5 chiều dính liền với các màng. Hai cách nhìn này tương đương với nhau, hay nói cách khác, là đối ngẫu (dual) của nhau và là hai cách miêu tả của cùng một thực tại. Hai cách nhìn đó bổ sung cho nhau. Khi bức tranh các hạt điểm quá phức tạp thì bức tranh các dây trở nên đơn giản hơn và ngược lại, nếu bức tranh các hạt là đơn giản thì bức tranh các dây trở nên phức tạp. Điều quan trọng đối với tôi là ý tưởng đối ngẫu



Hình 5: màng D là một mặt D chiều ở đấy các dây kết thúc. Và lý thuyết năng lượng thấp trên màng D chính là lý thuyết trường thông thường không có hấp dẫn

giúp tôi chuyển một bài toán khó giải quyết bằng toán học thành một bài toán dễ hơn, chuyển bài toán nghiên cứu vũ trụ thành bài toán MTĐĐ để nghiên cứu các vật liệu mới. Những trạng thái liên đới lượng tử khác nhau có thể dẫn đến nhiều dạng tinh thể mà chúng ta có thể sẽ phát hiện.

Và cũng có thể, bài toán về các pha của electron lại có thể giúp cho các nhà LTD nghiên cứu lỗ đen và những điều mới lạ khác. Khi các electron trong tinh thể có liên đới một cách hữu hạn, chúng có thể được mô tả như những hạt (hoặc cặp hạt). Nhưng khi một số lớn electron liên đới mạnh với nhau thì chúng ta không còn các hạt nữa. Trong cách tiếp cận mới của chúng tôi, các hệ đó được mô tả như những dây lan truyền trong ED của không gian (hình 4). Brian Swingle (Đại học Harvard) đã phác họa mối tương tự giữa ED không gian và mạng liên đới lượng tử (hình 4). Sự chuyển động xoắn quanh nhau và hòa nhập với nhau của các dây trong ED phản ánh quá trình tiến triển của sự liên đới giữa các hạt.

Những đối tượng đối ngẫu

Lợi thế thực hành của những đối ngẫu giữa LTD và lý thuyết MTĐĐ là các nhà LTD đã xây dựng sẵn một tủ sách đồ sộ các lời giải toán học cho bài toán kể từ động học các hạt cơ bản lúc Big Bang đến sự dao động của các trường lượng tử sát bờ lỗ đen... Các nhà nghiên cứu các chuyển pha lượng tử của vật chất có thể tìm thấy trong tủ sách đó một lời

giải thích hợp cho một bài toán riêng của mình và sử dụng toán học của phép đối ngẫu để chuyển từ tình huống *dây* sang tình huống *liên đới lượng tử* của MTĐĐ. Đặc biệt, chúng tôi tập trung vào các trạng thái năng lượng thấp nhất ở nhiệt độ không tuyệt đối, song chúng tôi có thể sẵn sàng mô tả vật chất ở *nhiệt độ khác không* (0) bằng cách sử dụng một kỹ thuật có vẻ lạ lùng: *thêm một lỗ đen* vào bức tranh của các dây. Việc đưa một lỗ đen vào đây chứng tỏ những đối ngẫu đề cập rất kỳ lạ: không ai nghĩ rằng các pha lượng tử của vật chất lại liên quan đến lỗ đen. Stephen Hawking (Đại học Cambridge) đã chứng minh rằng, mỗi lỗ đen có *một nhiệt độ* gắn liền với nó (nhìn từ bên ngoài vào, lỗ đen như một hòn than nóng rực). Một lỗ đen trong không - thời gian 5 chiều sẽ tương đương với bức xạ nóng trên hologram [2] - lỗ đen và bức xạ có cùng một entropy. Trong logic của đối ngẫu, hệ MTĐĐ tương ứng cũng nóng, nghĩa là có nhiệt độ và hiệu ứng tiếp theo là sóng mật độ spin hay siêu dẫn biến thành một kim loại lạ.

Những phương pháp này đã có những tiến bộ trong việc giải thích các kim loại lạ và các trạng thái khác của vật chất. Đặc biệt, chúng giúp nhiều nhất trong việc tìm hiểu các quá trình chuyển pha (transition) từ siêu chảy sang cách điện. Siêu chảy giống như siêu dẫn nhưng ở đây dòng được tạo thành bởi những nguyên tử trung tính không mang điện và chảy tự do không gặp một lực cản

nào. Trong những năm gần đây, các nhà thực nghiệm đã tạo nên nhiều chất siêu chảy nhân tạo và quan sát được quá trình chuyển pha siêu chảy - cách điện. Điểm tới hạn mô tả chuyển pha siêu chảy - cách điện là bất biến đối với các biến đổi conform, do đó là một lý thuyết trường conform CFT (Conformal Field theory) [3].

Các nhà thực nghiệm theo dõi chuyển pha này bằng cách đo dòng các nguyên tử dưới một áp suất ngoài. Trong pha siêu chảy, chúng chảy không có trở và trong pha cách điện, chúng gần như không chảy; còn tại điểm chuyển pha, chúng chảy theo một cách lạ thường. Ví dụ, nếu các nhà thực nghiệm loại bỏ nhiễu loạn từ bên ngoài thì các nguyên tử dừng lại với một tốc độ phụ thuộc vào nhiệt độ và hằng số Planck, một điều không quan sát được ở những pha vật chất khác.

Chúng tôi đã giải thích hiện tượng này bằng cách xem chất lỏng tới hạn lượng tử như một đối ngẫu, một sao bản (doppelgänger) của lỗ đen. Đối ngẫu cũng có mặt yếu. Về bản chất thì đối ngẫu biến một điều phức tạp thành một điều đơn giản. Song đối ngẫu là một hộp đen toán học và chúng ta rơi vào tình huống mất đi các chi tiết của các trạng thái liên đới phức tạp hoặc cách hình thành các trạng thái đó (đã xảy ra thế nào) trong vật liệu thực tiễn. Việc giải thích những điều gì thực sự xảy ra đang còn ở mức độ sơ khai. Đối với chúng tôi - những người nghiên cứu động học các electron trong tinh thể - thì LTD đã cho

thấy một viễn cảnh về các động học của những trạng thái lượng tử phức tạp có liên đới. Ngược lại, các nhà LTD cũng sẽ được kích thích bởi những vấn đề đa dạng về các chuyển pha trong các vật liệu lượng tử, một hiện tượng xa xôi nằm ngoài vật lý của vũ trụ sơ sinh hoặc trong các máy gia tốc hạt năng lượng cao. Sự hội tụ của hai dòng suy nghĩ này cũng đã chứng tỏ một cách kỳ diệu về sự thống nhất của thiên nhiên ■

CC biên dịch và chú thích

Chú thích

[1] Lỗ đen (Black hole), các ngôi sao lớn sau khi tiêu hao hết năng lượng hạt nhân của mình sẽ co lại dưới lực hấp dẫn để biến thành một lỗ đen, mọi vật rơi vào lỗ đen không có đường quay trở lại, kể cả ánh sáng.

[2] Hologram = bức ảnh D chiều của một vật D+1 chiều.

[3] Nhóm conform = nhóm đối xứng gồm các biến đổi kích thước không thời gian + biến đổi Lorentz. Không gian AdS và lý thuyết trường lượng tử conform CFT được dùng trong ánh xạ đối ngẫu AdS/CFT (Anti - de Sitter/ conform Field Theory). Anti - de Sitter là không - thời gian tựa như không - thời gian Minkowski với hằng số vũ trụ âm).