

Vật liệu siêu dẫn và hành trình khám phá chưa có hồi kết

Đình Văn Chiến

Cục Năng lượng nguyên tử, Bộ KH&CN

Những khám phá mới trong hơn một thế kỷ qua đã ngày càng làm sáng tỏ hơn bức tranh sinh động về những tính chất độc đáo của hiện tượng siêu dẫn. Mặc dù đến nay vẫn còn nhiều thách thức đối với ngành khoa học này, nhưng những kiểm chứng thực nghiệm dựa trên các dự đoán lý thuyết sẽ là cơ sở vững chắc để các nhà nghiên cứu tiếp tục khám phá ra những chất siêu dẫn ở nhiệt độ phòng với áp suất thấp, phục vụ các mục đích ứng dụng rộng rãi trong cuộc sống.

Những đặc tính riêng độc đáo của siêu dẫn

Việc chứng kiến hình ảnh một khối vật thể rắn có thể “lơ lửng” trong không gian mà không có bất kỳ sự tiếp xúc nào thực sự là một điều thú vị, với nhiều tò mò và hoài nghi. Trên thực tế đây không phải là một trò ảo thuật mang tính giải trí, cũng không phải là một hiện tượng siêu nhiên kỳ bí, mà chính là một hiện tượng vật lý có tên gọi “hiệu ứng Meissner” - thể hiện một trong những đặc tính riêng độc đáo của vật liệu siêu dẫn. Tuy nhiên, đây chỉ là đặc tính riêng thứ hai của chất siêu dẫn, được tìm thấy sau 22 năm kể từ khi hiện tượng siêu dẫn của vật chất được phát hiện lần đầu vào năm 1911 [1].

Ngày nay, khi những nghiên cứu đã dần sáng tỏ, thế giới khoa học biết đến siêu dẫn là một hiện tượng lượng tử. Hiện tượng này xảy ra đối với một số vật liệu ở nhiệt độ đủ thấp và cường độ từ trường đủ nhỏ, đặc trưng bởi điện trở bằng zero, dẫn đến sự suy giảm nội từ trường theo hiệu ứng Meissner. Hay nói cách khác, chất siêu dẫn là vật liệu đạt được tính siêu dẫn, là trạng thái vật chất không có điện trở và không cho phép từ trường đi xuyên qua.



Khối vật thể siêu dẫn “lơ lửng” trong không gian theo hiệu ứng Meissner.

Năm 1911, trong các nghiên cứu về tính chất điện của thủy ngân, nhà vật lý người Hà Lan H.K. Onnes (Đại học Leiden, Hà Lan) đã phát hiện ra điện trở trong thủy ngân hoàn toàn biến mất khi giảm nhiệt độ thủy ngân xuống tới 4,2 K, tương đương $-268,95^{\circ}\text{C}$ [1]. Điều này có nghĩa là dòng điện có thể chạy trong mẫu thủy ngân mà không có sự suy giảm nào và hiện tượng này được gọi là hiện tượng siêu dẫn của vật chất. Như vậy, nếu đưa một dòng điện vào mạch điện làm bằng chất siêu dẫn, năng lượng điện sẽ không bị tiêu hao trong quá trình truyền tải do không có trở kháng. Đây là đặc

tính riêng thứ nhất của chất siêu dẫn, mở ra hướng nghiên cứu ứng dụng mới để giảm tổn thất điện năng trong quá trình truyền tải. Mặc dù được phát hiện khá sớm nhưng cho đến năm 1950, hệ thống lý thuyết liên quan đến siêu dẫn mới dần được sáng tỏ. Trong đó, công bố đầu tiên về nguyên lý hoạt động của chất siêu dẫn theo mô hình GLAG (đặt tên theo các nhà vật lý Liên Xô đã xây dựng mô hình là: Ginzburg - Landau - Abrikosov - Gorkov) đã đặt nền tảng cho những ứng dụng thực tiễn của chất siêu dẫn. Mô hình này đã thành công trong việc dự đoán các tính chất siêu dẫn trên

phương diện vĩ mô mặc dù khi đó những gì diễn ra ở cấp độ vi mô vẫn chưa được giải đáp. Đến năm 1957, 3 nhà vật lý J. Bardeen, L.N. Cooper và J.R. Schrieffer [2] đã phát triển một lý thuyết vi mô hoàn chỉnh về hiện tượng siêu dẫn, có tên gọi là lý thuyết BCS. Theo đó, lý thuyết BCS chứng minh nguyên nhân vật liệu trở nên siêu dẫn là do ở điều kiện nhiệt độ rất thấp, những dao động mạng hay “phonon” mang lại tương tác hút, cho phép các điện tử tự do có thể bắt cặp với nhau và sắp xếp tạo thành chuỗi nối tiếp. Do đó, các điện tử chuyển động định hướng bên trong chất siêu dẫn mà không còn trở kháng, tức là dòng điện chuyển động mà không có điện trở.

Trong nhiều thập kỷ kể từ khi hiện tượng siêu dẫn được phát hiện, các nhà vật lý trên thế giới đã dành nhiều thời gian nghiên cứu để cố gắng tìm hiểu bản chất và nguyên nhân của hiện tượng này. Những nghiên cứu cho thấy, nhiều nguyên tố và vật liệu đều có thể trở nên siêu dẫn khi được làm lạnh đến dưới một “nhiệt độ chuyển tiếp” - nhiệt độ mà tại đó điện trở hoàn toàn biến mất. Một trong những kết quả nghiên cứu nổi bật trong thời gian này là việc 2 nhà vật lý W. Meissner và R. Ochsenfeld đã phát hiện ra đặc tính riêng thứ 2 của chất siêu dẫn vào năm 1933 [3]. Đây là một trong những tính chất kỳ lạ nhất của chất siêu dẫn, xảy ra khi chúng được đặt trong một từ trường. Ở nhiệt độ cao trên nhiệt độ chuyển tiếp và từ trường mạnh, các đường sức từ đi xuyên qua vật liệu như quy luật thông thường. Tuy nhiên, khi vật liệu đạt được siêu dẫn ở điều kiện làm lạnh xuống dưới nhiệt độ chuyển tiếp thì các đường sức từ bị đẩy ra khỏi chất siêu dẫn và phải đi vòng

qua mẫu chất. Điều này đã lý giải nguyên nhân tại sao chúng ta có thể quan sát được khối vật thể rắn “lơ lửng” được nâng lên bởi lực từ vô hình trong làn khói trắng đầy mê hoặc.

Sự độc đáo của siêu dẫn vẫn chưa dừng lại ở đó, năm 1962 nhà vật lý B.D. Josephson [4] tại Đại học Cambridge (Anh) đã phát hiện ra đặc tính riêng thứ 3 của siêu dẫn, được biết đến với tên gọi “hiệu ứng Josephson”. Trong hiệu ứng Josephson, các điện tử được mô tả có thể chạy qua giữa 2 chất siêu dẫn phân cách nhau bởi một lớp cách điện mỏng hoặc một hàng rào kim loại thông thường. Dòng điện chạy qua lớp phân cách này rất nhạy cảm với những biến đổi của điện trường và từ trường ngoài. Đây là cơ sở cho việc phát triển những thiết bị đo điện trường chính xác như thiết bị giao thoa lượng tử siêu dẫn (SQUID) được sử dụng để đo những từ trường rất nhỏ, đồng thời cung cấp một chuẩn điện áp cho các phòng thí nghiệm đo lường trên khắp thế giới.

Từ phát hiện ban đầu cho đến những ứng dụng công nghệ đi trước thời đại

Cùng với những khám phá mới trong hơn một thế kỷ qua, những tính chất của siêu dẫn đã không chỉ dừng lại ở sự độc đáo trong thế giới của lý thuyết khoa học, mà còn đi vào thực tiễn để phục vụ các hoạt động nghiên cứu cũng như ứng dụng trong cuộc sống. Trong lĩnh vực vật lý năng lượng cao, các nam châm siêu dẫn được sử dụng để tạo ra máy gia tốc mạnh để nghiên cứu về nguồn gốc của vật chất thông qua va chạm của các hạt sơ cấp có năng lượng cao. Large Hadron Collider (LHC) [5] là hệ thống gia tốc hạt đại nhất, lớn nhất và gia tốc hạt mạnh nhất trên thế giới hiện nay,

trong đó có 1.232 nam châm siêu dẫn, được sử dụng để định hướng chuyển động cong cũng như sự hội tụ của chùm hạt gia tốc mà không làm suy giảm năng lượng của chúng. Mỗi chiếc nam châm siêu dẫn trong LHC có chiều dài 15 m và khối lượng lên tới 35 tấn, hoạt động ở điều kiện nhiệt độ 1,9 K, tương đương -271,25°C.

Mục đích chính của LHC là để tiến hành những thí nghiệm nhằm phá vỡ những giới hạn và mặt định của mô hình chuẩn - đây là những lý thuyết cơ bản của vật lý hạt đương đại. Kết quả nghiên cứu từ các thí nghiệm trên LHC đã chứng minh được những dự đoán về sự tồn tại của các hạt sơ cấp như các hạt Quarks, Higgs và đặc tính khối lượng của chúng, đồng thời tiếp tục được kỳ vọng để giải thích về những liên kết chưa hoàn chỉnh trong mô hình chuẩn. Đây là dự án nghiên cứu khoa học lớn nhất hiện nay, được thực hiện với sự cộng tác của trên 8.000 nhà vật lý cũng như hàng trăm viện nghiên cứu, trường đại học và phòng thí nghiệm ở hơn 40 quốc gia, trong đó có Việt Nam.

Việc phát hiện ra những đặc tính độc đáo của vật liệu siêu dẫn đã thu hút sự quan tâm của các lĩnh vực năng lượng, giao thông vận tải, công nghiệp ngay từ buổi đầu bởi những kỳ vọng về sự cải tiến và phát triển các công nghệ mới. Giai đoạn 1970-1980, thế giới đã chứng kiến những thành công của sự áp dụng siêu dẫn ở Mỹ, Nhật Bản và các nước châu Âu trong các dự án về cáp điện, máy phát điện, máy biến áp siêu dẫn và tàu đệm từ. Thị trường cáp điện siêu dẫn được dự báo có sự tăng trưởng đáng kể từ nay đến năm 2028, do yêu cầu về phát triển cơ sở hạ tầng để đáp ứng nhu cầu sử dụng điện ngày càng tăng trên toàn cầu [6]. Việc tích

Khoa học và Công nghệ Nước ngoài

hợp chip máy tính vào các thiết bị điện tử, viễn thông hay sự phát triển của công nghệ chụp cộng hưởng từ hạt nhân hiện đại trong y tế cũng sẽ thúc đẩy tăng trưởng của thị trường cáp điện siêu dẫn, trong đó những khu vực tiềm năng bao gồm Bắc Mỹ (Mỹ, Canada, Mexico), châu Âu (Đức, Pháp, Nga, Italia, Vương quốc Anh) và châu Á - Thái Bình Dương (Trung Quốc, Nhật Bản, Hàn Quốc, Ấn Độ).

Ý tưởng về một phương tiện giao thông có thể di chuyển với tốc độ cao do giảm thiểu được ma sát trong quá trình chuyển động đã đưa tàu đệm từ trở thành ứng dụng tiêu biểu và được xem như biểu tượng của siêu dẫn. Nhật Bản và Đức là hai quốc gia đầu tiên trên thế giới thành công với dự án phát triển nguyên mẫu tàu đệm từ sử dụng công nghệ siêu dẫn từ những năm 1970 [7]. Việc sử dụng những nam châm siêu dẫn đã tạo ra lực từ cho phép tàu đệm từ được nâng lên và chuyển động trượt trong hệ thống dẫn. Mặc dù gặp phải những thách thức về chi phí đầu tư cũng như sự không đồng bộ với mạng lưới cơ sở hạ tầng tàu điện hay đường sắt hiện có nhưng đến nay, công nghệ tàu đệm từ siêu dẫn vẫn đang được nhiều quốc gia theo đuổi. Trong đó, Nhật Bản, Trung Quốc, Mỹ đang ở giai đoạn thực hiện dự án để đưa vào vận hành thương mại và những nước khác như Canada, Australia, Thụy Sĩ, Ấn Độ, Iran... đang trong giai đoạn nghiên cứu - triển khai. Theo dự kiến, dự án tàu đệm từ siêu dẫn L0 thương mại đầu tiên của Nhật Bản do Công ty Đường sắt Trung ương Nhật Bản (JR Tokai) phát triển sẽ đi vào hoạt động từ năm 2027 trên tuyến đường khoảng 300 km từ Tokyo đến Nagoya (giúp rút ngắn thời gian di chuyển giữa 2 thành phố



Tàu đệm từ siêu dẫn L0 trên đường chạy thử nghiệm tại Nhật Bản.

từ 90 phút xuống còn khoảng 40 phút) [8]. Trong một thử nghiệm năm 2015, tàu đệm từ siêu dẫn L0 đã được ghi nhận đạt tốc độ tối đa 603 km/giờ, tuy nhiên hạ tầng của dự án chỉ được thiết kế với vận tốc tối đa là 505 km/giờ. Cùng với xu hướng ngày càng gia tăng về trình độ phát triển kinh tế - xã hội, các dự án tàu đệm từ siêu dẫn đang được triển khai tại các nước sẽ là động lực thúc đẩy phát triển ứng dụng công nghệ tàu đệm từ siêu dẫn trên thế giới.

Tiến tới giới hạn và tiếp tục những khám phá mới

Mặc dù đã tìm ra và ứng dụng chất siêu dẫn ở nhiều lĩnh vực trong hơn một thế kỷ qua, song tính kinh tế đã làm hạn chế việc sử dụng các công nghệ có sự góp mặt của vật liệu siêu dẫn. Điều này đến từ việc trạng thái siêu dẫn của vật chất thường chỉ đạt được trong điều kiện ở nhiệt độ rất thấp của nhiệt độ tới hạn. Do đó, việc ứng dụng công nghệ siêu dẫn nhiệt độ thấp có thể yêu cầu tiêu tốn nhiều năng lượng hơn hoặc đòi hỏi thiết kế mới về cơ sở hạ tầng, dẫn đến sự không đồng bộ với cơ sở hạ tầng có sẵn của

các công nghệ truyền thống khác như đối với tàu đệm từ.

Năm 1986, các chất siêu dẫn được biết đến đều là chất siêu dẫn nhiệt độ thấp do nhiệt độ tới hạn của chúng ở trong khoảng thấp hơn 30 K, tương đương $-243,15^{\circ}\text{C}$. Đến năm 1993 [9], với việc phát hiện ra chất siêu dẫn cuprate có nhiệt độ tới hạn 133 K đã khởi xướng những nghiên cứu sâu rộng nhằm tìm kiếm các chất siêu dẫn nhiệt độ cao, trong đó giá trị nhiệt độ tới hạn tương đương nhiệt độ phòng 293,15 K (tương đương 20°C) trở thành mục tiêu chính. Tuy nhiên, việc tìm ra hợp chất siêu dẫn H_3S có nhiệt độ tới hạn 203 K ở áp suất cao 155 GPa vào năm 1995 mới chính thức đánh dấu bước tiến mới trong lĩnh vực nghiên cứu siêu dẫn nhiệt độ cao [10]. Đây là công trình khoa học đầu tiên tìm ra một chất siêu dẫn dựa trên tiên đoán của các lý thuyết BCS và Migdal - Eliashberg về khả năng xảy ra hiện tượng siêu dẫn nhiệt độ cao trong các vật liệu có tần số phonon cao. Theo đó, những vật liệu giàu hydro và cacbon được dự đoán có thể cung cấp các tần số cao trong phổ phonon cũng

như tương tác electron - phonon mạnh.

Những tiến bộ trong thực nghiệm tìm kiếm siêu dẫn nhiệt độ phòng từ sau đó đến nay được dựa trên những dự đoán về cấu trúc tinh thể. Các phổ electron và phonon, cũng như nhiệt độ chuyển tiếp có thể được dự báo từ các lý thuyết hàm mật độ và Migdal - Eliashberg. Kết quả từ những nghiên cứu lý thuyết rộng rãi đã xác định được một họ hợp chất hydrua như CaH_6 , YH_6 có liên quan chặt chẽ đến siêu dẫn ở nhiệt độ phòng. Trong các hydrua này, canxi và yttri nằm ở trung tâm mạng của các nguyên tử hydro và có vai trò đóng góp electron để tạo cặp điện tử, trong khi các nguyên tử hydro tạo liên kết cộng hóa trị yếu với nhau trong mạng. Những cấu trúc này tương đối khác so với cấu trúc của H_2S , trong đó mỗi nguyên tử hydro được kết nối bằng một liên kết cộng hóa trị mạnh với hai nguyên tử lưu huỳnh. Các tính toán lý thuyết hàm mật độ dự đoán giá trị nhiệt độ tới hạn của CaH_6 là 235 K ở 150 GPa, trong khi một số hợp chất giàu hydro có nhiệt độ tới hạn cao hơn với giá trị lần lượt là 305-326 K ở 250 GPa hoặc 303 K ở 400 GPa đối với YH_{10} và xấp xỉ 280 K ở khoảng 200 GPa đối với LaH_{10} . Trong một công bố trên Tạp chí Nature năm 2019 [11], A.P. Drozdov và các cộng sự đã báo cáo một thực nghiệm khẳng định lanthanum hydride LaH_{10} xuất hiện tính chất siêu dẫn ở 250 K dưới áp suất 150 GPa. Đây là nhiệt độ tới hạn cao nhất của chất siêu dẫn tính đến thời điểm đó, đồng thời kết quả này cho thấy sự phù hợp tương đối giữa những tiên đoán từ lý thuyết và kết quả thực nghiệm. Cho đến nay, nhiệt độ tới hạn cao nhất của chất siêu dẫn được công bố trong

công trình của E. Snider và cộng sự đăng trên Tạp chí Nature xuất bản năm 2020 [12] với giá trị là 287,7 K (tương đương 14,55°C) ở áp suất 267 GPa của một hợp chất hydrua gồm cacbon, lưu huỳnh và hydro.

Có thể thấy, hành trình tìm kiếm chất siêu dẫn đã dần tiến tới giới hạn nhiệt độ phòng, tuy nhiên việc tổng hợp các chất siêu dẫn dưới áp suất cao gấp hàng triệu lần áp suất khí quyển vẫn còn là một thử thách không nhỏ. Ngày nay, khi mà kim cương tổng hợp cũng đã có thể được tạo ra bằng cách sử dụng kỹ thuật lắng đọng hơi hóa học với áp suất thấp, chúng ta hoàn toàn có thể tin tưởng vào những khám phá mới về chất siêu dẫn ở nhiệt độ phòng với phương pháp áp suất thấp. Trong một công bố trên Tạp chí Physical Review Letters xuất bản tháng 3/2021, E. Snider và cộng sự [13] đã mô tả thực nghiệm tìm ra tính chất siêu dẫn của hợp chất yttrium hydride YH_{10} ở nhiệt độ tới hạn 262 K với áp suất 182 GPa - mức áp suất đã giảm đáng kể so với công bố trước đó. Mặc dù vẫn còn nhiều thách thức đối với ngành khoa học siêu dẫn, nhưng những dự đoán lý thuyết sẽ là cơ sở khoa học mạnh mẽ để thúc đẩy những kiểm chứng thực nghiệm nhằm tìm ra những chất siêu dẫn ở nhiệt độ phòng với áp suất thấp, phục vụ các mục đích ứng dụng rộng rãi trong cuộc sống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] H.K. Onnes (1911), "The superconductivity of mercury", *Comm. Phys. Lab. Univ., Leiden*, pp.122-124.
 [2] J. Bardeen, L.N. Cooper, J.R. Schrieffer (1957), "Theory of superconductivity", *Physical Review*, **108(5)**, pp.1175-1204.
 [3] W. Meissner, R. Ochsenfeld (1933), "Ein neuer effekt bei eintritt der

supraleitfähigkeit", *Naturwissenschaften*, **21(44)**, pp.787-788.

[4] B.D. Josephson (1962), "Possible new effects in superconductive tunnelling", *Physics Letters*, **1(7)**, pp.251-253.

[5] CERN (2017), *LHC the Guide*, CERN-Brochure-2017-002-Eng.

[6] <https://www.prnewswire.com/news-releases/superconducting-cables-market-size-to-grow-rapidly-based-on-high-usage-in-power-generation-transmission--distribution-sectors-till-2028--million-insights-300923826.html>.

[7] J.L. He, D.M. Rote, H.T. Coffey (1992), *Survey of Foreign Maglev Systems*, ANL/ESD-17, Argonne National Laboratory.

[8] <https://www.railway-technology.com/projects/chuo-shinkansen-maglev-line/>.

[9] A. Schilling, M. Cantoni, J.D. Guo, H.R. Ott (1993), "Superconductivity above 130 K in the Hg-Ba-Ca-Cu-O system", *Nature*, **363(6424)**, pp.56-58.

[10] A.P. Drozdov, M.I. Eremets, I.A. Troyan, V. Ksenofontov, S.I. Shylin (2015), "Conventional superconductivity at 203 K at high pressures", *Nature*, **525**, pp.73-76.

[11] A.P. Drozdov (2019), "Superconductivity at 250 K in lanthanum hydride under high pressures", *Nature*, **569**, pp.528-531.

[12] E. Snider, et al. (2020), "Room-temperature superconductivity in a carbonaceous sulfur hydride", *Nature*, **586**, pp.373-377.

[13] E. Snider, et al. (2021), "Synthesis of yttrium superhydride superconductor with a transition temperature up to 262 K by catalytic hydrogenation at high pressures", *Physical Review Letters*, **126**, pp.117003.