



▶ NGUYỄN DUY KHÁNH

TS. Nguyễn Duy Khánh tốt nghiệp đại học tại Khoa Vật lý, Đại học Khoa học Tự nhiên Thành phố Hồ Chí Minh, Thạc sĩ và Tiến sĩ tại Đại học Tohoku, Nhật Bản. Hiện tại TS. Nguyễn Duy Khánh công tác tại Khoa Vật lý Ứng dụng, Đại học Tokyo với hướng nghiên cứu tập trung vào một số lĩnh vực của vật lý chất rắn như vật liệu lượng tử, vật liệu đa sắt từ và các cấu trúc từ có tính chất tô pô.

SKYRMION TỪ TÍNH: CƠ CHẾ HÌNH THÀNH, ĐẶC TRƯNG VÀ CÁC TRIỂN VỌNG

Nguyễn Duy Khánh

Khoa Vật lý Ứng dụng, Đại học Tokyo
Email: khanh@ap.t.u-tokyo.ac.jp

TÓM TẮT:

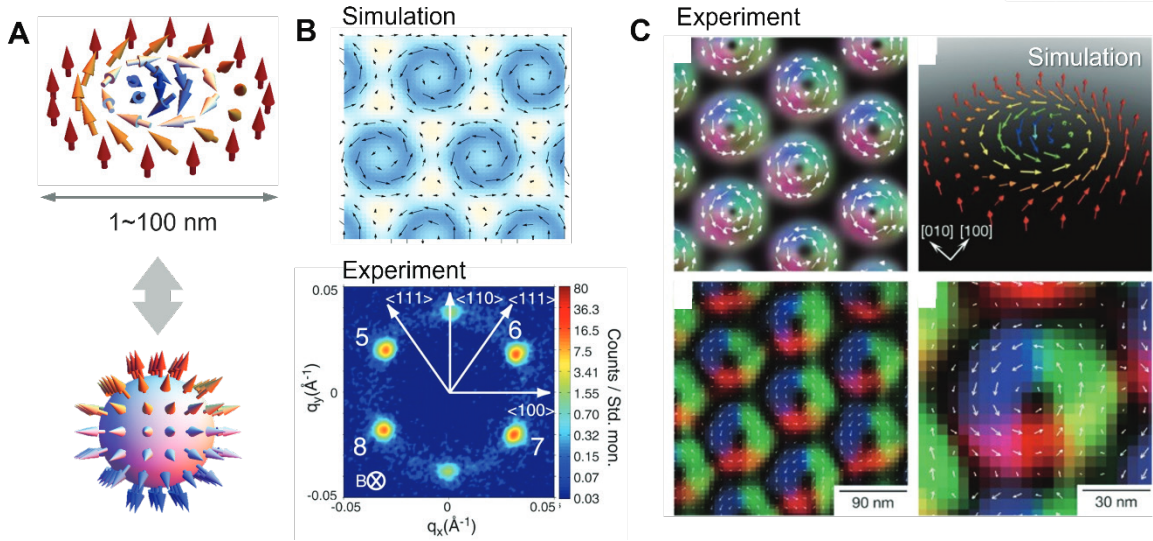
Các đối tượng có tính chất tô pô trong vật lý chất rắn thu hút nhiều sự quan tâm, được xem là nguồn gốc của các hiện tượng phong phú. Một ví dụ điển hình là skyrmion từ tính, một cấu trúc dạng xoáy mang các đặc tính tương tự các hạt, có vai trò quan trọng trong việc thiết kế các bit thông tin mật độ cao. Việc tìm kiếm các hệ vật liệu mới, cũng như các cơ chế mới giúp ổn định và điều khiển skyrmion một cách hiệu quả đóng vai trò quan trọng, hướng tới đưa skyrmion ứng dụng trong các thiết bị điện tử tiên tiến đa chức năng. Trong bài viết này, chúng tôi xin điểm qua một số đặc điểm tiêu biểu về tính chất vật lý, các vật liệu cũng như một số khía cạnh trong triển vọng ứng dụng loại giả hạt thú vị này.

Từ khóa: Skyrmion; spin texture; tô pôlogy; emergent magnetic field; racetrack memory

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Các vật liệu từ tính đóng vai trò quan trọng trong đời sống thường ngày cũng như các thiết bị điện tử thiết yếu. Trong các vật liệu như vậy, tính chất từ được hình thành sự sắp xếp của các mô-men từ (spin) thành các cấu trúc trật tự, chẳng hạn như vật liệu sắt từ (các mô-men từ song song, cùng hướng) hay phản sắt từ (mô-men từ song song, ngược hướng). Trong một số trường hợp (do cấu trúc tinh thể, cạnh tranh tương tác, các nhiễu loạn trường ngoài ...), các mô-men từ này không được ổn định trong các cấu trúc đơn giản, mà thay vào đó hình thành nên một số cấu trúc đặc biệt, được gọi là các cấu trúc không đồng hướng (non-collinear) hoặc không đồng phẳng (non-coplanar), có vai trò quan trọng trong việc tạo ra các tính chất mới. Trong đó, một trong những đặc tính nổi bật của các cấu trúc spin không đồng phẳng là các cấu trúc này có thể tạo ra một từ trường hiệu dụng (emergent magnetic field) thông qua cơ chế scalar spin chirality gắn liền với một số hiện tượng độc đáo, chẳng hạn như hiệu ứng Hall tô pô, giúp cung cấp một cơ chế mới để điều khiển các đặc tính điện tử trong vật liệu từ tính. Ngoài ra, các cấu trúc spin không đồng phẳng thường liên kết với các đặc tính cấu trúc tô pô giúp chúng đặc biệt ổn định trước các nhiễu loạn, đóng vai trò quan trọng đối với các ứng dụng tiềm năng trong lưu trữ dữ liệu. Nhìn chung, các kết cấu spin không đồng phẳng có thể mở ra những định hướng thú vị cho cả nghiên cứu cơ bản lẫn ứng dụng.

Một trong những cấu trúc không đồng phẳng được quan tâm nhất là các skyrmion từ tính, trong đó các mô-men từ được sắp xếp theo một trật tự tương tự như các xoáy nước. Khái niệm skyrmion được Tony Skyrme đề xuất lần đầu tiên vào những năm 1960 trong lĩnh vực vật lý hạt để giải thích tính ổn định của các hadron như là các khiếm khuyết tô pô được lượng tử hóa trong một trường liên



Hình 1. (A) Cấu trúc của skyrmion gồm các spin được sắp xếp theo dạng xoáy nước, trong đó spin ở lõi hướng xuống còn các spin ở rìa hướng lên (hoặc ngược lại). Các spin này có thể phủ kín bề mặt của một hình cầu đơn vị. (B) Quan sát không trực tiếp skyrmion bằng nhiễu xạ neutron góc nhỏ, trong đó mạng lục giác của skyrmion được thể hiện thông qua cấu trúc tán xạ dạng lục giác. (C) Quan sát trực tiếp mạng lưới skyrmion bằng kính hiển vi điện tử truyền quan Lorentz. (Hình ảnh được trích dẫn từ tài liệu tham khảo [4,5] với sự cho phép của American Association for the Advancement of Science và Springer Nature)

tục. Sau đó, khái niệm này dần trở nên phổ biến để mô tả các trật tự tô pô trong nhiều lĩnh vực của vật lý chất rắn và các trạng thái ngưng tụ, chẳng hạn như tinh thể lỏng, ngưng tụ Bose-Einstein, hiệu ứng Hall lượng tử... Gần đây, trong lĩnh vực từ học và vật liệu từ tính, khái niệm skyrmion được dùng để mô tả các cấu trúc spin cục bộ có tính chất hạt và thu hút được sự quan tâm mạnh mẽ trong cộng đồng vật lý chất rắn, spintronics cũng như vật liệu lượng tử [1-3].

Hình 1(A) giới thiệu sơ lược 1 cấu trúc skyrmion, trong đó các mũi tên ứng với định hướng của các spin $\mathbf{n}(\mathbf{r})$ tại vị trí không gian $\mathbf{r} = (x, y)$. Spin ở lõi skyrmion hướng xuống, còn các spin ở rìa của skyrmion hướng lên (hoặc ngược lại). Các skyrmion được đặc trưng bởi số tô pô skyrmion N_{sk} , định nghĩa số lần hướng của các spin $\mathbf{n}(\mathbf{r})$ bao quanh một mặt cầu đơn vị. Về mặt toán học, số skyrmion được định nghĩa:

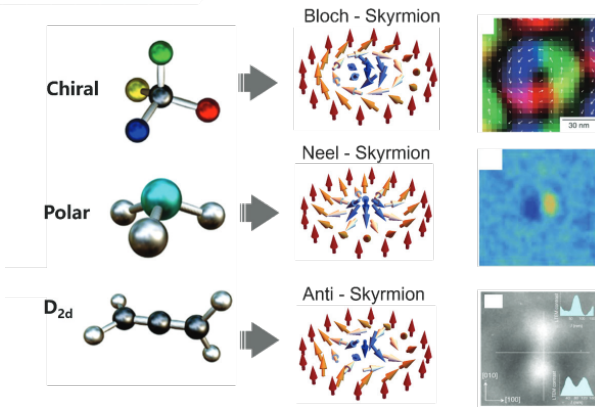
$$N_{sk} = \frac{1}{4\pi} \int \mathbf{n} \left(\frac{\partial \mathbf{n}}{\partial x} \times \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial y} \right) dx dy$$

Trong đó, $\mathbf{n}(\mathbf{r}) = \mathbf{m}(\mathbf{r})/|\mathbf{m}(\mathbf{r})|$ là vector đơn vị hướng dọc theo mômen từ cục bộ $\mathbf{m}(\mathbf{r})$. Điều này cho thấy các skyrmion từ tính có các đặc tính của một hạt đếm được. Thông thường, các skyrmion có kích thước dao động trong khoảng từ hàng trăm đến vài nanomet. Trong vật liệu kim loại, chuyển động của các skyrmion có thể được điều khiển một cách hiệu quả bởi dòng điện thông qua cơ chế spin transfer torque. Trong cơ chế này, động lượng của các electron dẫn được truyền cho các mômen từ cục bộ (localized moment) của vật liệu. Khi có dòng điện truyền qua, các electron dẫn sẽ bị phân cực spin. Nếu các electron phân cực spin này di chuyển qua một vùng

có từ trường cục bộ không đồng nhất, chẳng hạn như của skyrmion, chúng tác dụng một mô-men xoắn (torque) lên các mômen từ cục bộ, khiến skyrmion (hay các cấu trúc từ với từ trường cục bộ không đồng nhất) di chuyển hoặc thay đổi hình dạng. Ngoài ra, sự tương tác giữa các electron dẫn và skyrmion thông qua pha Berry lượng tử cũng dẫn đến các hiện tượng truyền vận độc đáo, chẳng hạn như hiệu ứng Hall tô pô. Với bản chất hạt ổn định, kích thước nhỏ và khả năng điều khiển hiệu quả bằng dòng điện, skyrmion từ tính được kỳ vọng là đóng vai trò tiềm năng trong việc truyền thông tin cũng như lưu trữ từ tính mật độ cao [1-3].

2. CƠ CHẾ HÌNH THÀNH VÀ CÁC HỆ VẬT LIỆU

Skyrmion trong các vật liệu từ được quan sát thành công lần đầu tiên vào năm 2009 thông qua một phương pháp gián tiếp là nhiễu xạ neutron góc nhỏ trên vật liệu MnSi [4], sau đó được quan sát trực tiếp bằng kính hiển vi điện tử ngay sau đó vào năm 2010 trên cùng hệ vật liệu [5]. Cho đến nay, các skyrmion từ tính chủ yếu được hình thành trong một nhóm các vật liệu đặc biệt có đối xứng nghịch đảo không gian (inversion symmetry) bị phá vỡ [6]. Trong các vật liệu như vậy tồn tại một loại tương tác đặc biệt, gọi là tương tác Dzyaloshinskii-Moriya (DM interaction) đóng vai trò quan trọng đối với sự hình thành skyrmion. Ở trạng thái cơ bản, tương tác DM sẽ cạnh tranh với các tương tác trao đổi (exchange interaction), hình thành nên trật tự xoắn ốc của các spin (helical order). Khi áp từ trường ngoài, các cấu trúc xoắn ốc tương tác với nhau, hình thành nên mạng lưới lục giác của các skyrmion từ tính. Trong cơ chế này, các skyrmion thường có kích thước trong khoảng từ vài chục đến hàng

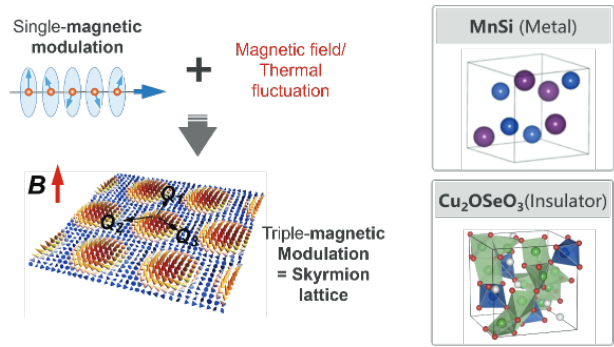


Hình 2. Các dạng skyrmion khác nhau được hình thành trong các hệ có cấu trúc tinh thể khác nhau. Skyrmion dạng Bloch trong các hệ lập thể (chiral), dạng Neel trong các hệ phân cực (polar) hoặc anti-skyrmion (các hệ D_{2d}). (Hình ảnh được trích dẫn từ tài liệu tham khảo [5,8,9] với sự cho phép của Springer Nature)

trăm nanomet. Bên cạnh đó, trong các hệ vật liệu này, cấu trúc tinh thể đóng vai trò quan trọng trong việc quyết định cấu trúc các skyrmion. Về cơ bản, skyrmion trong các hệ không có đối xứng nghịch đảo được chia thành 3 loại chính, tùy thuộc tính đối xứng trong cấu trúc tinh thể [6], bao gồm: (i) Bloch skyrmion trong các hệ đối xứng lập thể (*chiral symmetry*) [4,5,7], (ii) Neel skyrmion trong các hệ có đối xứng phân cực (*polar symmetry*) [8] và anti-skyrmion (trong các hệ không có đối xứng tâm, không phân cực nhưng cũng không lập thể, được gọi là các hệ có đối xứng D_{2d} hoặc S_4) [9]. Mỗi loại skyrmion nói trên có cấu trúc và tính chất đặc trưng, được tóm tắt trong Bảng 1.

Mặt khác, các nghiên cứu lý thuyết gần đây cho thấy skyrmion có thể được hình thành ngay cả trong các hệ có đối xứng tâm thông qua các cơ chế vi mô mới [10-14]. Trong đó có thể kể tới cơ chế bất ổn định hình học (*geometrical frustration*) [10-12], cho phép hình thành mạng lục giác của các skyrmion do cạnh tranh tương tác trao đổi cục bộ trên mạng tinh thể có cấu trúc tam giác hoặc kagome. Một cơ chế tiềm năng khác là tương tác đa spin (thường là 4) do các electron tự do trong kim loại hoặc hợp kim, giúp hình thành mạng skyrmion theo lưới vuông hoặc lục giác trên các hệ tinh thể có tính đối xứng cao (như lục giác hoặc tứ giác) [13,14].

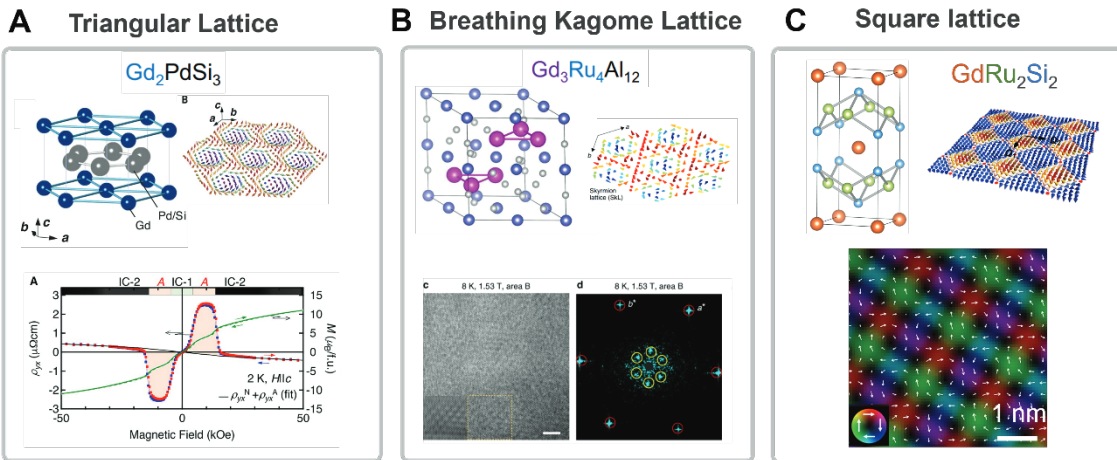
Song song với các nghiên cứu lý thuyết mới, việc tìm kiếm một hệ vật liệu thích hợp để xác định bằng thực nghiệm các cơ chế này là một thách thức quan trọng. Gần đây, một nghiên cứu phát hiện rằng có thể tồn tại một mạng lục giác của skyrmion trong một vật liệu có cấu trúc mạng tam giác có đối xứng tâm Gd_2PdSi_3 [15]. Các skyrmion trong vật liệu mới này có kích thước siêu nhỏ $\lambda_{sk} \sim 2,4$ nm. Về nguyên tắc, skyrmion có kích thước càng nhỏ thì từ trường hiệu dụng sinh ra càng lớn, tương ứng với hiệu ứng Hall tô pô khổng lồ quan sát được trong vật liệu này ở pha skyrmion. Sự hình thành mạng



Hình 3. Nguyên tắc cơ bản hình thành mạng skyrmion. Ở trạng thái cơ bản, các spin được sắp xếp theo trật tự có cấu trúc xoắn ốc (*helical state*) trên một trục nhất định. Dưới tác động của các trường ngoài (từ trường, dao động nhiệt), các cấu trúc này kết hợp với nhau tạo nên mạng lưới skyrmion lục giác hoặc tứ giác. Một số vật liệu skyrmion tiêu biểu không có đối xứng tâm có thể kể đến MnSi (kim loại) hay Cu_2OSeO_3 (điện môi).

lưới skyrmion lục giác cũng được báo cáo với vật liệu $Gd_3Ru_4Al_{12}$, cũng là một hệ có đối xứng trung tâm với mạng kagome bất đối xứng [16]. Trong các vật liệu này, sự bất định hình học (*geometrical frustration*) được coi là điểm mấu chốt đóng vai trò thiết yếu đối với sự hình thành skyrmion. Tuy nhiên, các vật liệu nói trên cũng được đặc trưng bởi các đặc tính vận chuyển kim loại và cơ chế tương tác 4 spin nói trên cũng có thể đóng vai trò quan trọng. Do đó, vẫn còn một câu hỏi quan trọng là liệu có thể hình thành skyrmion trong các hệ có đối xứng tâm mà nhưng không tồn tại sự bất định hình học (lưới tam giác, lưới kagome) hay không. Ngoài ra, hiện tượng bất định hình học thường xảy ra ở nhiệt độ tương đối thấp, trong khoảng từ millikelvin tới vài chục kelvin. Do đó, skyrmion hình thành theo cơ chế này sẽ hình thành trong khoảng nhiệt độ nói trên, tương ứng với sự hình thành các trật tự từ, khiến ứng dụng skyrmion vào các linh kiện điện tử bị giới hạn.

Nghiên cứu của chúng tôi tập trung giải quyết vấn đề nói trên, tập trung vào cơ chế hình thành skyrmion hoàn toàn mới thông qua một hệ vật liệu có mạng tinh thể tứ phương, giúp loại trừ yếu tố bất định hình học [13,14]. Cơ chế này sử dụng các tương tác do các electron dẫn trong kim loại đóng vai trò trung gian. Thông qua việc phân tích sự tương tác vi mô của các spin trong vật liệu này bằng phương pháp tán xạ công hưởng tia X kết hợp với kính hiển vi điện tử, nghiên cứu này phát hiện ra rằng hệ vật liệu tứ phương $GdRu_2Si_2$ với cấu trúc tinh thể đơn giản có thể hình thành mạng lưới vuông các skyrmion có đường kính chỉ 1,9 nm. Các kết quả trên cho thấy các skyrmion siêu nhỏ có thể được ổn định phổ biến trong các vật liệu có cấu trúc đối xứng cao (tứ phương, lục phương hay lập phương) với các tương tác được trung gian bởi các electron dẫn, giúp xây dựng một nguyên tắc mới trong việc thiết kế vật liệu skyrmion [17]. Khi xem xét skyrmion với vai trò là hạt mang thông tin, việc giảm kích thước có thể trực tiếp dẫn đến việc nâng cao mật độ



Hình 4. Một số hệ vật liệu skyrmion tiêu biểu sử dụng các hợp chất liên kim loại đất hiếm có đối xứng tâm. Trong các hệ này, mạng lưới skyrmion được ổn định thông qua các cơ chế mới như bất định hình học hoặc tương tác đa spin. (A) Mạng lưới tam giác trong hệ lục phương Gd_2PdSi_3 , trong đó mạng lục giác của skyrmion gây ra hiệu ứng Hall tô pô không lồ. Hiện tượng tương tự cũng được ghi nhận trong mạng kagome bất đối xứng $Gd_3Ru_4Al_{12}$ (B). (C) Mạng skyrmion vuông được phát hiện trong hệ tứ phương $GdRu_2Si_2$. Điều này cho thấy trong các hợp chất có đối xứng tâm, cấu trúc của mạng skyrmion được quyết định bởi cấu trúc tinh thể, một hoàn toàn khác với skyrmion trong các hệ không có đối xứng tâm. Trong các hệ này, mạng skyrmion luôn có cấu trúc lục giác, bất kể cấu trúc tinh thể. (Hình ảnh được trích dẫn từ tài liệu tham khảo [15-17] với sự cho phép của American Association for the Advancement of Science và Springer Nature)

thông tin. Do đó, nghiên cứu trên có ý nghĩa khá quan trọng đối với việc đưa skyrmion vào ứng dụng thực tế. Bên cạnh đó, các hợp chất liên kim loại đất hiếm là một lớp vật liệu rất rộng. Phát hiện nói trên giúp mở rộng phạm vi các vật liệu có thể hình thành skyrmion, chứ không chỉ giới hạn ở một số ít các vật liệu không có đối xứng tâm. Cuối cùng, hiện tượng bất định hình học chỉ xảy ra ở nhiệt độ rất thấp, do đó phát hiện skyrmion có thể được tạo ra mà không cần thông qua cơ chế này khiến gia tăng khả năng ổn định skyrmion ở nhiệt độ phòng, có vai trò thúc đẩy to lớn hướng tới việc đưa skyrmion vào các ứng dụng.

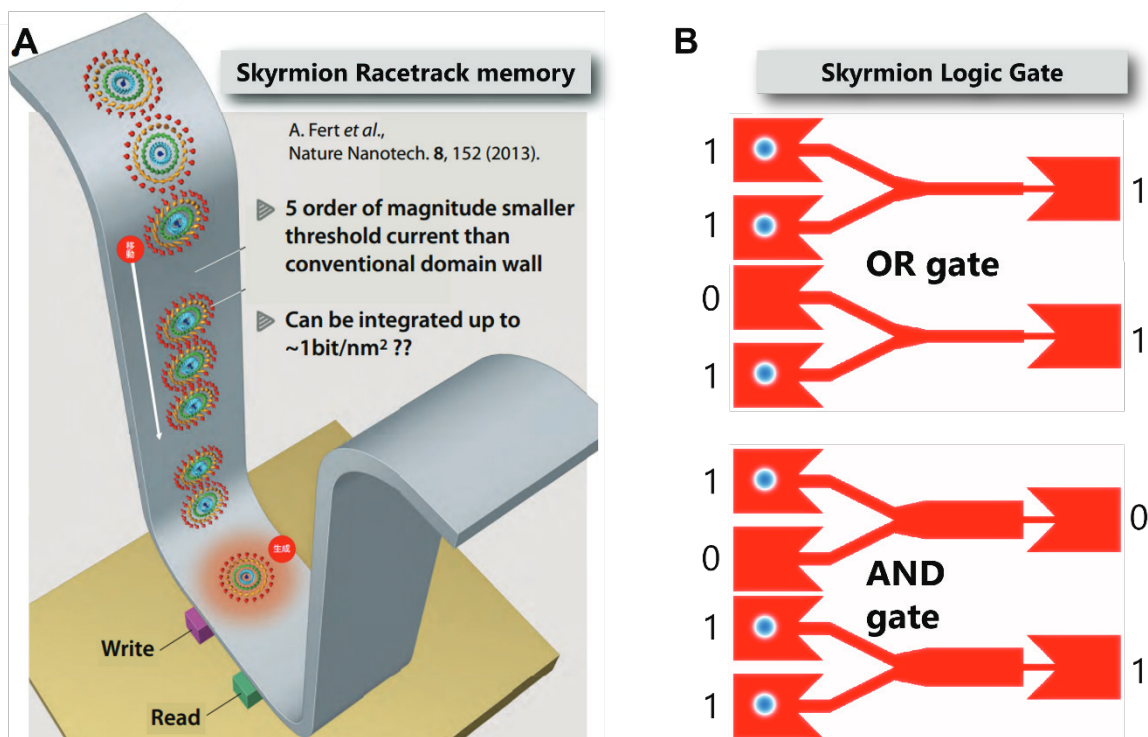
3. TRIỂN VỌNG VÀ CÁC ỨNG DỤNG

Việc đọc thông tin cũng như điều khiển các skyrmion có ý nghĩa quan trọng. Trong vật liệu kim loại, skyrmion tương tác với các electron dẫn thông qua cơ chế *spin transfer torque*, giúp skyrmion có thể chuyển động tịnh tiến theo dòng điện với mật độ dòng tới hạn cực thấp. Mặt khác, trường điện từ hiệu dụng sinh ra từ các skyrmion cũng liên quan đến hiệu ứng Hall tô pô và hiệu ứng Hall skyrmion. Ở đây, hiệu ứng Hall tô pô (*tô pôlogical Hall*) hoặc hiệu ứng Hall đồng phẳng (*planar Hall*) được xem phương pháp để phát hiện skyrmion một cách hiệu quả, còn lực động học spin (*spin motive force*) có thể cho phép tạo ra năng lượng hiệu quả thông qua chuyển đổi giữa spin và điện tích. Do cường độ của trường điện từ hiệu dụng tỷ lệ thuận với mật độ skyrmion, nên việc sử dụng skyrmion có kích thước nhỏ hơn là rất quan trọng. Các quá trình sinh và hủy skyrmion cũng liên quan đến các khái niệm nền tảng như đơn cực từ (*emergent magnetic monopole*), và việc nghiên cứu sâu hơn về tính chất của

chúng cũng là các đối tượng nghiên cứu thú vị. Ngoài ra, điều khiển skyrmion bằng các trường ngoài, chẳng hạn như dòng điện, sóng spin, nhiệt, ánh sáng ... cũng có nhiều ý nghĩa hướng tới việc phát triển các ứng dụng tương lai.

Đối với các vật liệu cách điện, cấu trúc skyrmion có thể sinh ra phân cực điện trường (*polarization*) và động lực học của chúng thể được điều khiển bởi điện trường ngoài mà không bị tổn hao do hiệu ứng Joule thông qua cơ chế kết hợp điện từ (*magnetoelectric coupling*) [7]. Hiện tượng kết hợp điện từ mạnh cũng có thể đóng vai trò quan trọng trong việc khám phá tính chất lan truyền không thuận nghịch của dòng các giả hạt khác nhau, chẳng hạn như photon (ánh sáng) hay magnon (kích thích tập thể của các spin). Cho tới nay, số lượng vật liệu cách điện chứa skyrmion vẫn còn hạn chế so với các vật liệu kim loại, một phần là do tương tác trao đổi ở trạng thái cách điện thường là phản sắt từ. Việc khám phá và tìm hiểu các skyrmion đa sắt từ ở nhiệt độ phòng với độ phân cực điện trường lớn là một thách thức quan trọng.

Liên quan đến các ứng dụng thực tế, một trong những hướng nghiên cứu thu hút nhiều sự quan tâm nhất là sử dụng các skyrmion cho bộ nhớ racetrack. Thiết bị này có nguyên tắc hoạt động tương tự đối với bộ nhớ racetrack cho các vách domain (*domain wall*) [3,18]. Thông qua việc khai thác đặc tính solitonic của skyrmion, thông tin có thể được mã hóa bằng một chuỗi các skyrmion riêng biệt trong một dải vật liệu từ 1 chiều (*racetrack*). So với các vách domain, skyrmions có lợi thế hơn vì mức độ tích hợp cao hơn. Bằng cách giảm chiều rộng của dải, trong quá trình chuyển động khi áp dòng điện, skyrmion di



Hình 5. Một số đề xuất về ứng dụng thực tế của skyrmion đối với công nghệ lưu trữ và truyền dữ liệu. (A) Bộ nhớ skyrmion racetrack, trong đó các skyrmion được truyền dọc theo một dải vật liệu từ bằng dòng điện. Skyrmion có thể được nhận ra và điều khiển thông qua các cổng “Read” và “Write” lắp đặt ở một số vị trí nhất định. (B) Các cổng logic dựa trên thiết bị có cấu trúc nano sử dụng sự chuyển đổi giữa skyrmion và vách domain. (Hình ảnh được trích dẫn từ tài liệu tham khảo [3,18] với sự cho phép của Springer Nature)

chuyển theo chính xác dọc theo dải này. Các nghiên cứu mô phỏng cho thấy khoảng cách giữa các skyrmion lân cận trên một dải có thể được xác định dựa trên kích thước của chúng, do đó so với vách domain, bộ nhớ racetrack sử dụng skyrmion có thể có mật độ cao hơn. Sự dịch chuyển của các skyrmion trên dải này có thể được phát hiện bằng cách sử dụng các thiết bị từ điện trở xuyên hầm tiêu chuẩn (tunnelling magnetoresistance), tương tự như đối với vách domain, hoặc thông qua các nguyên tắc khác dựa trên các hiện tượng truyền vận cụ thể liên quan đến bản chất cấu trúc của skyrmions, chẳng hạn như từ điện trở phi tuyến tính, hoặc hiệu ứng Hall tô pô. Về mặt tiêu thụ năng lượng, mặc dù tỷ lệ vận tốc và mật độ dòng điện giữa skyrmion và vách domain được cho là không có sự khác biệt đáng kể, tuy nhiên hình dạng và quỹ đạo linh hoạt cho phép skyrmion di chuyển với dòng điện điều khiển tương đối nhỏ. Một điểm nổi bật khác là bộ nhớ racetrack skyrmion có thể dễ dàng điều chỉnh để tạo ra skyrmion transistor có kích thước nano. Bằng cách bổ sung thêm công vào một số phần nhất định của dải và điều chỉnh cục bộ các tính chất từ thông qua việc áp điện trường, việc truyền skyrmion có thể được cho phép hoặc bị cấm, tương ứng với các trạng thái “1” và “0” trong các transistor.

Bên cạnh đó, skyrmion có thể được xem là một ‘hạt’ độc lập khiến chúng có khả năng được áp dụng trong các thiết bị logic spin [19]. Kết quả các mô phỏng đối với các dải vật liệu từ có kích thước nano với chiều rộng

khác nhau cho thấy một skyrmion có thể được chuyển đổi thành một cặp vách domain và ngược lại. Về nguyên tắc, cơ chế chuyển đổi này cho phép sao chép hoặc hợp nhất các skyrmion theo ý muốn thông qua việc thiết kế các cấu trúc nano cụ thể, khiến chúng có thể thực hiện các tính toán logic cơ bản. Dựa trên các nguyên tắc này, các nghiên cứu gần đây đề xuất xây dựng các cổng logic Skyrmion AND và OR, bước đầu tiên trong việc hiện thực hóa một cấu trúc logic hoàn chỉnh nhằm mục tiêu vượt qua các thiết bị logic quay hiện có cũng như đạt được chức năng tương tự với mức độ tích hợp cao hơn.

4. NGHIÊN CỨU SKYRMION TẠI NHẬT BẢN

Trong bối cảnh đó, Nhật Bản là một trong những quốc gia tiên phong trong các nghiên cứu liên quan đến skyrmion trên nhiều khía cạnh từ lý thuyết đến thực nghiệm, bao gồm cơ chế hình thành, các nghiên cứu thực nghiệm về tính chất và quan sát cấu trúc skyrmion, phát triển vật liệu và các nghiên cứu ứng dụng. Trong số này có thể kể đến một số công trình tiêu biểu như quan sát skyrmion và các cấu trúc spin tô pô bằng kính hiển vi điện tử Lorentz (L-TEM) của nhóm giáo sư Yoshinori Tokura và Tiến sĩ Xiuzhen Yu thuộc viện RIKEN, các nghiên cứu nền tảng về lý thuyết – cơ chế hình thành và điều khiển skyrmion của nhóm giáo sư Naoto Nagaosa (RIKEN) và giáo sư Yukitoshi Motome (Đại học Tokyo), Satoru Hayami (Đại học Hokkaido) hay các nghiên cứu về phát triển vật liệu, bao gồm skyrmion trong các vật



liệu multiferroic (đa sắt từ) đến các hệ đất hiếm liên kim loại của giáo sư Shinichiro Seki (Đại học Tokyo). Song song với các nghiên cứu cơ bản, một số công trình ứng dụng skyrmion trong các lĩnh vực điện tử và spintronics, tiêu biểu có thể kể đến các công trình về skyrmion trong các cấu trúc màng mỏng dị thể của nhóm giáo sư Yoshichika Otani (RIKEN, Đại học Tokyo) hay nghiên cứu về ứng dụng skyrmion trong tính toán mạng neuron của giáo sư Tomoyuki Yokouchi (RIKEN, Đại học Tokyo), cùng các công trình nổi bật khác của nhiều nhóm nghiên cứu trên cả nước.

Nhóm nghiên cứu tác giả hiện đang công tác (giáo sư Shinichiro Seki, Đại học Tokyo) tập trung vào thiết kế và phát triển vật liệu lượng tử dựa trên tính đối xứng và cấu trúc tô pô (bao gồm skyrmion, các cấu trúc phản sắt từ tô pô, altermagnetism...). Nhóm đặt mục tiêu phát hiện những hiện tượng lượng tử độc đáo thông qua thiết kế và tổng hợp các vật liệu mới bằng kỹ thuật tiên tiến, song song với tìm hiểu các chức năng điện tử mới sử dụng cho nhiều ứng dụng khác nhau.

5. KẾT LUẬN

Tóm lại, skyrmion là một giả hạt (*quasi particle*) ổn định về mặt cấu trúc, có thể được quan sát trong một số hệ vật liệu đặc biệt. Do skyrmion được tạo thành từ nhiều spin nên các nhiễu loạn do nhiệt hay các quá trình lượng tử khá nhỏ, có lợi cho các ứng dụng bộ nhớ. Bên cạnh đó, hiện vẫn còn nhiều vấn đề hấp dẫn và quan trọng cần được giải quyết, chẳng hạn như các quá trình tạo và hủy skyrmion, sự hình thành các cấu trúc phức hợp như meron, anti-meron, các cấu trúc skyrmion ba chiều (*hedgheg*), cũng như các hiện tượng không cân bằng dưới tác dụng của dòng điện. Từ góc độ ứng dụng, việc chế tạo các mẫu có kích thước nano, song song với việc thiết kế và đánh giá khả năng hoạt động của các mạch logic skyrmion thông qua các hiểu biết về tính chất vật lý cơ bản của skyrmion có vai trò quan trọng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Rößler, U. K. et al. "Spontaneous skyrmion ground states in magnetic metals", *Nature* vol. 442, pp. 797–801 (2006).
- [2] Schulz, T. et al. "Emergent electrodynamics of skyrmions in a chiral magnet", *Nat. Phys.* vol. 8, pp. 301–304 (2012).
- [3] Fert, A., Cros, V. & Sampaio, J. "Skyrmions on the track", *Nat. Nanotechnol.* vol. 8, pp. 152–156 (2013).
- [4] Mühlbauer, S. et al. "Skyrmion lattice in a chiral magnet", *Science* vol. 323, pp. 915–919 (2009).
- [5] Yu, X. Z. et al. "Real-space observation of a two-dimensional skyrmion crystal", *Nature* vol. 465, pp. 901–904 (2010).
- [6] Kanazawa, N. Seki, S. & Tokura, Y. "Noncentrosymmetric magnets hosting magnetic skyrmions", *Adv. Mater.* vol. 29, pp. 1603227 (2017).
- [7] Seki, S., Yu, X. Z., Ishiwata, S. & Tokura, Y. "Observation of skyrmions in a multiferroic material", *Science* vol. 336, pp. 198–201 (2012).
- [8] Kézsmárki, I. et al. "Néel-type skyrmion lattice with confined orientation in the polar magnetic semiconductor GaV_4S_8 ", *Nat. Mater.* vol. 14, pp. 1116–1122 (2015).
- [9] Nayak, A. K. et al. "Magnetic antiskyrmions above room temperature in tetragonal Heusler materials", *Nature* vol. 548, pp. 561–566 (2017).
- [10] Okubo, T., Chung, S. & Kawamura, H. "Multiple-q states and the skyrmion lattice of the triangular-lattice Heisenberg antiferromagnet under magnetic fields", *Phys. Rev. Lett.* vol. 108, pp. 017206 (2012).
- [11] Leonov, A. O. & Mostovoy, M. "Multiply periodic states and isolated skyrmions in an anisotropic frustrated magnet", *Nat. Commun.* vol. 6, pp. 8275 (2015).
- [12] Lin, S.-Z., Saxena, A. & Batista, C. D. "Skyrmion fractionalization and merons in chiral magnets with easy-plane anisotropy", *Phys. Rev. B* vol. 91, pp. 224407 (2015).
- [13] Ozawa, R., Hayami, S. & Motome, "Y. Zero-field skyrmions with a high topological number in itinerant magnets", *Phys. Rev. Lett.* vol. 118, pp. 147205 (2017).
- [14] Hayami, S., Ozawa, R. & Motome, "Y. Effective bilinear-biquadratic model for noncoplanar ordering in itinerant magnets", *Phys. Rev. B* vol. 95, pp. 224424 (2017).
- [15] Kurumaji, T. et al. "Skyrmion lattice with a giant topological Hall effect in a frustrated triangular-lattice magnet", *Science* vol. 365, pp. 914–918 (2019).
- [16] Hirschberger, M. et al. "Skyrmion phase and competing magnetic orders on a breathing kagomé lattice", *Nat. Commun.* vol. 10, pp. 5831 (2019).
- [17] Khanh, N. D. et al., "Nanometric square skyrmion lattice in a centrosymmetric tetragonal magnet", *Nat. Nanotechnol.* vol. 15, pp. 444 (2020).
- [18] Yu, G. et al., "Room-Temperature Skyrmion Shift Device for Memory Application", *Nano Lett.* vol. 17, pp. 261–268 (2017).
- [19] Zhang, X. et al., "Magnetic skyrmion logic gates: conversion, duplication and merging of skyrmions", *Sci. Rep.* vol. 5, pp. 9400 (2015).