

Thăng giáng nhiệt động và vật lý thống kê



Albert Einstein, 1905, *Năm kỳ diệu*

Các bài báo sớm nhất của Einstein đề cập đến nhiệt động học. Trong đó ông cố gắng giải thích các hiện tượng từ quan điểm thống kê của nguyên tử.^[84]

Nghiên cứu của ông trong năm 1903 và 1904 tập trung vào hiệu ứng kích thước nguyên tử hữu hạn tác động đến hiện tượng tán xạ. Giống như nghiên

cứu của Maxwell, sự hữu hạn của kích thước nguyên tử dẫn đến các hiệu ứng có thể quan sát được. Nghiên cứu này nằm trong vấn đề chính của vật lý ở thời đại ông đó là tìm cách quan sát và chứng minh nguyên tử tồn tại. Chúng cũng là nội dung chính trong luận án tiến sĩ của ông.^[86]

Kết quả chính đầu tiên của ông trong lĩnh vực này là lý thuyết thăng giáng nhiệt động. Khi ở trạng thái cân bằng, một hệ có entropy cực đại, và theo cách hiểu của thống kê, nó chỉ có thăng giáng nhỏ. Einstein chỉ ra rằng thăng giáng thống kê của vật thể vĩ mô, có thể được hoàn toàn xác định bởi đạo hàm bậc hai của entropy.

Nghiên cứu cách kiểm tra quan hệ này, ông đã có đột phá lớn năm 1905. Ông nhận ra rằng lý thuyết này tiên đoán một hiệu ứng quan sát được cho một vật có thể di chuyển xung quanh tự do khi nằm trong môi trường nguyên tử hoạt động. Vì vật có vận tốc ngẫu nhiên do vậy nó có thể di chuyển ngẫu nhiên, giống như một nguyên tử đơn lẻ. Động năng trung bình của vật này là $k_B T$, và thời gian giảm thăng giáng có thể được xác định hoàn toàn bởi định luật ma sát.

Định luật ma sát cho quả cầu nhỏ trong chất lỏng nhớt giống nước được khám phá bởi George Stokes. Ông chỉ ra đối với vận tốc nhỏ, lực ma sát tỉ lệ với vận tốc, và bán kính của hạt. Quan hệ này được sử dụng để tính toán hạt chuyển động được một quãng đường bao nhiêu trong nước do chuyển động nhiệt ngẫu nhiên của nó, và Einstein chú ý là với những quả cầu kích thước khoảng một micron, chúng có thể di chuyển với vận tốc vài micron trong một giây. Chuyển động này đã được quan sát bởi nhà thực vật học Robert Brown

dưới kính hiển vi, hay chuyển động Brown. Einstein đã đồng nhất chuyển động này với tiên đoán của lý thuyết ông đưa ra. Từ thăng giáng gây ra chuyển động Brown cũng chính là thăng giáng vận tốc của các nguyên tử, nên việc đo chính xác chuyển động Brown sử dụng lý thuyết của Einstein đã cho thấy hằng số Boltzmann là khác không và cho phép đo được số Avogadro.

Các thí nghiệm này được thực hiện vài năm sau đó, cho một ước lượng thô về số Avogadro phù hợp với ước lượng chính xác hơn của lý thuyết vật đen của Max Planck, và thí nghiệm đo điện tích của Robert Millikan.^[87] Không như các phương pháp khác, đòi hỏi của Einstein cần rất ít các điều giả sử lý thuyết hay vật lý mới, vì đã trực tiếp đo chuyển động của nguyên tử qua các hạt nhìn thấy được.

Lý thuyết của Einstein về chuyển động Brown là bài báo đầu tiên về lĩnh vực vật lý thống kê. Nó thiết lập mối liên hệ giữa thăng giáng nhiệt động và sự tiêu tán năng lượng. Điều này được Einstein chỉ ra là đúng đối với thăng giáng độc lập thời gian, nhưng trong bài báo về chuyển động Brown ông chỉ ra rằng tỉ số nghỉ động học (dynamical relaxation rates) được tính toán từ cơ học cổ điển có thể được dùng là tỉ số nghỉ thống kê (statistical relaxation rates) để dẫn ra định luật khuếch tán động học. Những quan hệ này gọi là phương trình Einstein trong lý thuyết động học phân tử.

Lý thuyết về chuyển động Brown đã mở đầu năm kỳ diệu của Einstein, nhưng nó cũng đóng vai trò quan trọng trong việc thuyết phục các nhà vật lý chấp nhận thuyết nguyên tử.^[84]

Thí nghiệm tưởng tượng và nguyên lý vật lý tiên nghiệm

Suy nghĩ của Einstein phải trải qua một sự thay đổi vào năm 1905. Ông đã hiểu rằng các tính chất lượng tử của ánh sáng có nghĩa là các phương trình Maxwell chỉ là lý thuyết xấp xỉ. Ông biết rằng các định luật mới có thể thay thế chúng, nhưng ông chưa biết làm thế nào để tìm ra các định luật này. Ông cảm thấy rằng ước đoán các mối quan hệ hình thức sẽ không đi đến đâu.

Thay vào đó ông quyết định tập trung vào các nguyên lý tiên nghiệm, chúng nói rằng các định luật vật lý có thể được hiểu là thỏa mãn trong những trường hợp rất rộng thậm chí trong những phạm vi mà chúng chưa từng được áp dụng hay kiểm nghiệm. Một ví dụ được các nhà vật lý chấp nhận rộng rãi của nguyên lý tiên nghiệm đó là tính bất biến quay (hay tính đối xứng quay, nói rằng các định luật vật lý là bất biến nếu chúng ta quay toàn bộ không gian chứa hệ theo một hướng khác). Nếu một lực mới được khám phá trong vật lý, lực này có thể lập tức được hiểu nó có tính bất biến quay mà không cần phải suy xét. Einstein đã hướng tìm các nguyên lý mới theo phương pháp bất biến này, để tìm ra các ý tưởng vật lý mới. Khi các nguyên lý cần tìm đã đủ, thì vật lý mới sẽ là lý thuyết phù hợp đơn giản nhất với các nguyên lý và các định luật đã được biết trước đó.

Nguyên lý tiên nghiệm tổng quát đầu tiên do Einstein tìm ra là nguyên lý tương đối,^[88] theo đó chuyển động tịnh tiến đều không phân biệt được với trạng thái đứng im. Nguyên lý này được Hermann Minkowski mở rộng cho cả tính bất biến quay từ không gian vào không-thời gian. Những nguyên lý khác giả thiết bởi Einstein và sau đó mới được chứng minh là nguyên lý

tương đương và nguyên lý bất biến đoạn nhiệt của số lượng tử. Một nguyên lý tổng quát khác của Einstein, còn gọi là nguyên lý Mach, vẫn còn là vấn đề đang được tranh luận giữa các nhà khoa học.

Việc sử dụng các nguyên lý tiên nghiệm là một phương pháp đặc biệt độc đáo trong các nghiên cứu đầu tiên của Einstein, và nó trở thành một công cụ tiêu chuẩn trong vật lý hiện đại.

Thí nghiệm tưởng tượng và nguyên lý vật lý tiên nghiệm

Suy nghĩ của Einstein phải trải qua một sự thay đổi vào năm 1905. Ông đã hiểu rằng các tính chất lượng tử của ánh sáng có nghĩa là các phương trình Maxwell chỉ là lý thuyết xấp xỉ. Ông biết rằng các định luật mới có thể thay thế chúng, nhưng ông chưa biết làm thế nào để tìm ra các định luật này. Ông cảm thấy rằng ước đoán các mối quan hệ hình thức sẽ không đi đến đâu.

Thay vào đó ông quyết định tập trung vào các nguyên lý tiên nghiệm, chúng nói rằng các định luật vật lý có thể được hiểu là thỏa mãn trong những trường hợp rất rộng thậm chí trong những phạm vi mà chúng chưa từng được áp dụng hay kiểm nghiệm. Một ví dụ được các nhà vật lý chấp nhận rộng rãi của nguyên lý tiên nghiệm đó là tính bất biến quay (hay tính đối xứng quay, nói rằng các định luật vật lý là bất biến nếu chúng ta quay toàn bộ không gian chứa hệ theo một hướng khác). Nếu một lực mới được khám phá trong vật lý, lực này có thể lập tức được hiểu nó có tính bất biến quay mà không cần phải suy xét. Einstein đã hướng tìm các nguyên lý mới theo phương pháp bất biến này, để tìm ra các ý tưởng vật lý mới. Khi các nguyên lý cần tìm đã đủ, thì vật lý mới sẽ là lý thuyết phù hợp đơn giản nhất với các nguyên lý và các định luật đã được biết trước đó.

Nguyên lý tiên nghiệm tổng quát đầu tiên do Einstein tìm ra là nguyên lý tương đối,^[88] theo đó chuyển động tịnh tiến đều không phân biệt được với trạng thái đứng im. Nguyên lý này được Hermann Minkowski mở rộng cho cả tính bất biến quay từ không gian vào không-thời gian. Những nguyên lý khác giả thiết bởi Einstein và sau đó mới được chứng minh là nguyên lý

tương đương và nguyên lý bất biến đoạn nhiệt của số lượng tử. Một nguyên lý tổng quát khác của Einstein, còn gọi là nguyên lý Mach, vẫn còn là vấn đề đang được tranh luận giữa các nhà khoa học.

Việc sử dụng các nguyên lý tiên nghiệm là một phương pháp đặc biệt độc đáo trong các nghiên cứu đầu tiên của Einstein, và nó trở thành một công cụ tiêu chuẩn trong vật lý hiện đại.