NGUYÊN LÝ TƯƠNG ĐỐI GALILEO

Một nền tảng nhận thức luận cho Nguyên lý tương đối Galileo

Vũ Tuấn Hiệp

"Không có không gian, chỉ có vật chất.
Không có thời gian, chỉ có vận động của vật chất."

Tóm tắt

Phát biểu quen thuộc của Nguyên lý tương đối giới hạn sự như nhau của các định luật vật lý vào các hệ quy chiếu quán tính. Tuy nhiên, Hệ quả VI trong Principia của Newton cho thấy tồn tại những hệ có gia tốc, như thang máy rơi tự do trong một trường hấp dẫn đều, vẫn thỏa Nguyên lý tương đối. Vì vậy, phát biểu quen thuộc của nguyên lý chưa đầy đủ. Hơn nữa, bài viết cho rằng việc giới hạn hiệu lực của định luật vào các hệ quán tính là sai lầm, bắt nguồn từ việc không phân biệt tầng biểu diễn hiện tượng trong nhận thức của quan sát viên với tầng hiện tượng khách quan: điều thay đổi trong hệ có gia tốc là hình thức của phương trình chuyển động toàn phần, không phải các quan hệ khách quan chi phối hiện tượng.

Để phân biệt hai tầng trong cơ học, bài viết tách chuyển động của một hệ vật thành hai phần: chuyển động nội tại, là chuyển động của các vật so với khối tâm của hệ, thuộc về hiện tượng; và chuyển động cơ sở, là chuyển động chung của hệ đối với quan sát viên, đối với hiện tượng đang xét chỉ xuất hiện trong biểu diễn và không tham gia vào động lực học nội tại. Từ sự phân biệt này, bài viết rút ra ba kết luận trong cơ học cổ điển. Thứ nhất, hệ quy chiếu được định nghĩa lại bằng chuyển động cơ sở: một chuẩn vật chất là hệ quy chiếu khi mọi phần của nó đồng chuyển động cơ sở, có gia tốc hay không. Bài viết chứng minh đây là điều kiện cần và đủ để phương trình của chuyển động nội tại không chứa số hạng nào phụ thuộc vào chuyển động của chính hệ. Sự quay vì vậy không phải chuyển động cơ sở mà là chuyển động nội tại của hiện tượng. Thứ hai, Nguyên lý tương đối được phát biểu lại và chứng minh trong cơ học Newton, với các lực tương tác chỉ phụ thuộc vào đại lượng tương đối: các quan hệ vật lý khách quan chi phối một hiện tượng cơ học là như nhau với mọi quan sát viên trong mọi hệ quy chiếu, kể cả quan sát viên dùng trục quay; chuyển động cơ sở được truyền đều không thể phát hiện từ bên trong; và không tồn tại hệ quy chiếu tiêu biểu chung cho mọi hiện tượng. Thứ ba, phép biến đổi Galileo và dạng mở rộng của nó cho hệ có gia tốc chỉ làm thay đổi chuyển động cơ sở và để nguyên chuyển động nội tại; chúng là phương tiện của tầng biểu diễn, không làm thay đổi hiện tượng. Khung lý thuyết giữ nguyên nội dung động lực học của cơ học cổ điển và tái tạo các Hệ quả IV, V, VI của Newton trong cùng một cấu trúc. Hệ trục không quay là yếu tố duy nhất chưa quy được về quan hệ giữa các vật.

1. Đặt vấn đề

Trong Đối thoại về hai hệ thống thế giới chính, Galileo mô tả một thí nghiệm trong khoang kín dưới boong tàu [1]. Ruồi bay, cá bơi trong bể, giọt nước rơi vào bình, người nhảy về phía mũi hay phía đuôi tàu: mọi hiện tượng đều diễn ra như nhau, dù con tàu đứng yên hay chuyển động đều. Người ở trong khoang không thể biết con tàu đang đứng yên hay đang chạy. Ngày nay, nhận xét ấy được phát biểu thành Nguyên lý tương đối Galileo: các định luật vật lý là như nhau đối với mọi quan sát viên trong mọi hệ quy chiếu quán tính.

Cơ học Newton xác nhận điều này một cách chặt chẽ. Hệ quả V trong Principia nói rằng chuyển động tương đối của các vật trong một không gian chuyển động thẳng đều diễn ra như khi không gian ấy đứng yên [2]. Giữa hai hệ chuyển động thẳng đều đối với nhau, gia tốc của một vật là như nhau và phương trình F = ma giữ nguyên dạng.

Chính Principia đã chứa một nhận xét vượt ra ngoài giới hạn của các hệ quán tính. Hệ quả VI nói rằng nếu các vật, dù chuyển động đối với nhau theo cách nào, cùng chịu những lực gia tốc bằng nhau theo các đường song song, thì chúng tiếp tục chuyển động đối với nhau như thể không chịu các lực ấy [2]. Trong một thang máy rơi tự do, trong giới hạn trường hấp dẫn đều, mọi thí nghiệm cơ học diễn ra như trong một hệ quán tính, dù thang máy có gia tốc. Ngay cả con tàu của Galileo cũng không nằm trong một hệ quán tính theo nghĩa chặt: nó đi cùng Trái Đất, mà Trái Đất đang rơi tự do quanh Mặt Trời. Nguyên lý vẫn đúng ở đó với độ chính xác rất cao, vì gia tốc hướng về Mặt Trời gần như được truyền đều cho mọi vật trên tàu, đúng điều kiện của Hệ quả VI.
Như vậy, tồn tại những hệ quy chiếu có gia tốc vẫn thỏa Nguyên lý tương đối, trong khi phát biểu quen thuộc giới hạn nguyên lý vào các hệ quán tính. Lớp hệ mà phát biểu quen thuộc nêu ra hẹp hơn lớp hệ thực sự thỏa nguyên lý.

> **Luận điểm thứ nhất.** Từ Hệ quả VI, tồn tại những hệ quy chiếu có gia tốc vẫn thỏa Nguyên lý tương đối theo đúng nội dung Galileo mô tả: mọi hiện tượng bên trong diễn ra như nhau. Do đó, phát biểu quen thuộc của Nguyên lý tương đối, giới hạn vào các hệ quán tính, là chưa đầy đủ.

Vấn đề không chỉ dừng ở phạm vi. Hiện tượng hai quả bi-a va chạm luôn diễn ra theo một cách xác định nếu cùng điều kiện ban đầu. Một người đứng trên sân ga và một người ngồi trong toa tàu đang tăng tốc mô tả va chạm ấy bằng những vận tốc khác nhau, và người thứ hai chỉ viết đúng được phương trình chuyển động khi thêm vào một lực không do vật nào tác dụng: phương trình F = ma không còn giữ nguyên dạng. Từ đó, cách hiểu quen thuộc kết luận rằng định luật chỉ có hiệu lực trong hệ quán tính. Nhưng khi phương trình đổi dạng, cái gì đã thay đổi: quy luật chi phối va chạm, hay chỉ là cách va chạm được biểu diễn đối với người ngồi trên tàu? Hai quả bi-a vẫn va chạm theo đúng một cách; chúng không biết người quan sát đang ở đâu.

Bài viết cho rằng việc giới hạn hiệu lực của định luật vào các hệ quán tính là sai lầm, và sai lầm ấy bắt nguồn từ việc không phân biệt hai tầng: các quan hệ khách quan cấu thành hiện tượng, và các đại lượng, phương trình mà quan sát viên dùng để biểu diễn hiện tượng ấy. Một

hệ được gọi là quán tính khi phương trình chuyển động toàn phần viết trong hệ ấy không cần thêm lực quán tính; đó là một điều kiện về hình thức của phương trình, thuộc tầng biểu diễn. Còn điều Galileo quan sát trong khoang tàu là các hiện tượng bên trong diễn ra như nhau; đó là một điều kiện thuộc tầng hiện tượng. Khi định luật bị đồng nhất với hình thức của phương trình, ranh giới của tầng biểu diễn bị lấy làm ranh giới hiệu lực của định luật. Khi hai tầng được phân biệt rạch ròi, định luật, hiểu là phát biểu về quan hệ khách quan chi phối hiện tượng, phải có hiệu lực như nhau đối với mọi quan sát viên trong mọi hệ quy chiếu; điều thay đổi giữa các quan sát viên chỉ là hình thức biểu diễn.

> **Luận điểm thứ hai.** Việc cho rằng định luật chỉ có hiệu lực trong hệ quy chiếu quán tính bắt nguồn từ việc không phân biệt tầng biểu diễn với tầng hiện tượng. Khi hai tầng được phân biệt rạch ròi, định luật phải có hiệu lực trong mọi hệ quy chiếu.

Để phân biệt hai tầng trong cơ học, bài viết dùng một công cụ cụ thể: tách chuyển động của một hệ vật thành chuyển động cơ sở và chuyển động nội tại. Chuyển động nội tại là chuyển động của các vật so với khối tâm của hệ; cùng với cấu hình nội tại và các tương tác, nó cấu thành hiện tượng. Chuyển động cơ sở là chuyển động chung của hệ đối với quan sát viên; nó chỉ có nghĩa khi đã chọn một chuẩn, nên đối với hiện tượng đang xét nó chỉ xuất hiện trong biểu diễn. Chuyển động ấy vẫn có thể là một quan hệ khách quan của một hiện tượng rộng hơn, chứa cả hệ đang xét lẫn nguồn của chuyển động chung. Sự phân biệt này là hình thức vật lý của sự phân biệt giữa hiện tượng và biểu diễn mà Mục 2 xác lập trên nền tảng nhận thức luận. Trong thang máy rơi tự do, gia tốc của thang máy là chuyển động cơ sở: nó làm phương trình toàn phần đổi dạng, nhưng không đi vào chuyển động nội tại.
Từ sự phân biệt ấy, bài viết rút ra ba kết luận trong cơ học cổ điển.

- **Kết luận thứ nhất: hệ quy chiếu.** Hệ quy chiếu được định nghĩa bằng chuyển động cơ sở: một chuẩn vật chất mà mọi phần của nó đồng chuyển động cơ sở, có gia tốc hay không. Định nghĩa được biện minh bằng Định lý 1: đó là điều kiện cần và đủ để chuyển động cơ sở tách được hoàn toàn khỏi phương trình của chuyển động nội tại. Sự quay không tách được, nên là chuyển động nội tại của hiện tượng.
- **Kết luận thứ hai: Nguyên lý tương đối.** Nguyên lý được phát biểu lại và chứng minh: các quan hệ vật lý khách quan chi phối một hiện tượng cơ học là như nhau với mọi quan sát viên trong mọi hệ quy chiếu (Định lý 2). Dạng thứ hai: chuyển động cơ sở được truyền đều không phát hiện được từ bên trong (Định lý 3). Hệ quả: không có hệ quy chiếu tiêu biểu chung cho mọi hiện tượng, nên không có hệ quy chiếu tuyệt đối về mặt chuyển động cơ sở (Định lý 4).
- **Kết luận thứ ba: phép biến đổi Galileo.**
- Phép biến đổi Galileo và dạng mở rộng $r' = r - R(t)$ chỉ tác động lên chuyển động cơ sở, để nguyên chuyển động nội tại. Phép quay trục giữ nguyên cấu hình nội tại; các số hạng mà nó sinh ra thuộc biểu diễn. Các phép biến đổi này thuộc tầng biểu diễn (Định lý 5). Chúng không làm thay đổi hiện tượng, mà là công cụ để chuyển biểu diễn giữa các chuẩn và qua đó nhận ra các quan hệ khách quan của hiện tượng. Việc phương trình

> toàn phần chỉ giữ nguyên dạng dưới phép Galileo là một tính chất của công cụ biểu diễn, không phải ranh giới hiệu lực của định luật.

Hệ quả VI cũng là điểm xuất phát trong nghiên cứu của Saunders [4]. Từ việc phân tích phương pháp của Principia, ông lập luận rằng lý thuyết chuyển động của Newton không cần đến khái niệm hệ quán tính, và cấu trúc không-thời gian mà nó đòi hỏi chỉ là tính song song của các phương không gian ở những thời điểm khác nhau. Hệ trục không quay mà bài viết thừa nhận ở Tiên đề 4 tương ứng với cấu trúc tối thiểu ấy. Bài viết dùng chung điểm xuất phát, nhưng đặt một câu hỏi khác và đi theo một con đường khác. Câu hỏi của bài viết không phải là cơ học Newton cần cấu trúc không-thời gian nào, mà là định luật có hiệu lực trong những hệ nào khi được hiểu ở tầng hiện tượng, và hệ quy chiếu khi ấy phải được hiểu thế nào. Con đường của bài viết là phân tích nhận thức luận về hiện tượng, quan sát viên, định luật và biểu diễn. Mục tiêu không phải là tìm một định nghĩa hệ quy chiếu bao quát mọi trường hợp; hệ quy chiếu ở đây là cơ sở để tách những gì thuộc về biểu diễn khỏi những gì thuộc về bản chất hiện tượng.

Đóng góp của bài viết. Bài viết chỉ ra rằng phát biểu quen thuộc của Nguyên lý tương đối chưa đầy đủ, và việc giới hạn hiệu lực của định luật vào các hệ quán tính bắt nguồn từ việc không phân biệt tầng biểu diễn với tầng hiện tượng. Bằng cách tách chuyển động cơ sở khỏi chuyển động nội tại, bài viết định nghĩa lại hệ quy chiếu, chứng minh Nguyên lý tương đối ở dạng tổng quát trong cơ học cổ điển, và xác định địa vị của phép biến đổi Galileo như một phương tiện của tầng biểu diễn. Khung lý thuyết không thay đổi nội dung động lực học của cơ học cổ điển; các Hệ quả IV, V và VI của Newton được tái tạo trong cùng một cấu trúc.

Mục 2 trình bày nền tảng nhận thức luận và bản thể luận của bài viết. Nền tảng triết học không phải bằng chứng. Nó xác lập sự phân biệt giữa hiện tượng và biểu diễn; Mục 3 cụ thể hóa sự phân biệt ấy thành công cụ vật lý; còn ba kết luận được chứng minh bằng toán học.

Phạm vi khảo sát là cơ học cổ điển của các hệ chất điểm. Mục 2 trình bày nền tảng triết học; Mục 3 đưa ra các định nghĩa, trong đó có sự tách chuyển động cơ sở và chuyển động nội tại, và định nghĩa hệ quy chiếu; Mục 4 phát biểu các tiên đề và tiêu chuẩn phân biệt hiện tượng với biểu diễn; Mục 5 khảo sát phép đổi hệ quy chiếu và phép đổi hệ tọa độ; Mục 6 chứng minh Định lý 1, biện minh cho định nghĩa hệ quy chiếu, và xử lý sự quay; Mục 7, 8 và 9 chứng minh Kết luận thứ hai; Mục 10 áp dụng khung lý thuyết vào ba hiện tượng cụ thể; Mục 11 xác định địa vị của phép biến đổi Galileo và tổng hợp Nguyên lý tương đối trong cơ học cổ điển; Mục 12 nêu các vấn đề còn mở; Mục 13 kết luận.

2. Nền tảng triết học

2.1. Điểm xuất phát của khoa học tự nhiên

Những vấn đề của siêu hình học và nhận thức luận về bản chất tối hậu của tồn tại, về quan hệ giữa vật chất và ý thức, hay về khả năng nhận thức thế giới như nó vốn có, nằm ở nền tảng của khoa học tự nhiên. Về nguyên tắc, việc giải quyết các vấn đề này sẽ quyết định cơ sở luận lý của khoa học. Tuy nhiên, cho đến nay chúng dường như vẫn chưa có câu trả lời cuối cùng.

Trong Lời tựa lần thứ nhất của Phê phán lý tính thuần túy, trước khi bắt tay vào công cuộc phê phán lý tính, Kant đã nhận xét rằng siêu hình học là đấu trường của những tranh cãi bất tận [3]. Trong Lời tựa lần thứ hai, ông chỉ ra rằng khoa học tự nhiên, ngược lại, đã tìm được con đường vững chắc của mình [3]. Bước ngoặt ấy gắn với Galileo: khi cho những viên bi lăn trên mặt phẳng nghiêng, Galileo không còn quan sát Tự nhiên một cách thụ động, mà chủ động đặt câu hỏi cho Tự nhiên bằng thí nghiệm, theo một kế hoạch do lý tính vạch ra, rồi diễn đạt câu trả lời bằng ngôn ngữ toán học. Từ đó, khoa học tự nhiên dần hình thành phương pháp và tiêu chuẩn xác tín của riêng mình, trong đó quan sát, thực nghiệm và khả năng kiểm chứng giữ vai trò trung tâm.

Bài viết không đánh giá các luận điểm của Kant. Điều được giữ lại là sự đối lập mà ông chỉ ra: siêu hình học là nền tảng của khoa học tự nhiên dường như vẫn còn dang dở, trong khi bản thân khoa học tự nhiên đã tìm được con đường vững chắc để tiến lên mà không cần chờ siêu hình học tìm ra những luận điểm vững chắc.

Mặc dù vậy, việc nghiên cứu khoa học mà bản chất là tìm kiếm quy luật của Tự nhiên được đặt trên cơ sở thừa nhận rằng hiện tượng tồn tại khách quan và diễn ra theo một trật tự xác định. Trong phạm vi của mình, khoa học tự nhiên đã lựa chọn một lập trường dứt khoát: coi Tự nhiên là một thực tại khách quan độc lập với nhận thức con người, lấy kinh nghiệm từ Tự nhiên làm cả điểm xuất phát lẫn tiêu chuẩn kiểm tra. Bài viết đứng trên lập trường này.

> **Cơ sở 1 (Tự nhiên và trật tự của Tự nhiên).** Tự nhiên tồn tại khách quan, và các hiện tượng của Tự nhiên diễn ra theo một trật tự không do nhận thức của quan sát viên tạo ra.

Cần khẳng định, đây là một lựa chọn phương pháp luận, không phải một kết luận siêu hình học. Bài viết không khẳng định chủ nghĩa duy vật là chân lý cuối cùng của triết học; bài viết chỉ khẳng định rằng khoa học tự nhiên đã lựa chọn đứng trên lập trường này để xây dựng và phát triển. Từ lập trường ấy, trong mọi nghiên cứu khoa học, cần phân biệt rạch ròi một hiện tượng khách quan với tri thức về hiện tượng đó. Tiêu chuẩn đánh giá một tri thức là có khớp với đối tượng trong Tự nhiên hay không, và sự đối chiếu này chỉ có thể được thực hiện thông qua kinh nghiệm.

2.2. Tự nhiên và tri thức về Tự nhiên

Tri thức khoa học là sản phẩm của nhận thức con người, không phải bản thân Tự nhiên. Hiện tượng là đối tượng của nhận thức; ý niệm, khái niệm, đại lượng, phương trình và định luật là những sản phẩm của nhận thức được sử dụng để biểu diễn hiện tượng. Các quan hệ khách quan cấu thành hiện tượng tồn tại độc lập với ý thức và biểu diễn của quan sát viên. Vì vậy, cùng một hiện tượng khách quan có thể được biểu diễn theo nhiều cách khác nhau, tùy thuộc vào phương tiện quan sát và đo đạc, hệ khái niệm, trạng thái chuyển động của quan sát viên và giới hạn của năng lực nhận thức. Một hiện tượng khách quan không đồng nhất với biểu diễn của nó trong nhận thức của quan sát viên.

Tri thức khoa học vì vậy mang tính tương đối: nó có thể sai, có thể chưa đầy đủ và có thể chỉ đúng trong một phạm vi nhất định. Nhưng tính tương đối ấy thuộc về tri thức, không thuộc về đối tượng của tri thức. Nhiều quan sát viên có thể thu được những giá trị hoặc biểu diễn khác nhau về cùng một hiện tượng, nhưng từ đó không thể suy ra rằng bản thân hiện tượng tồn tại theo nhiều cách khác nhau. Sự khác nhau giữa các biểu diễn không tự nó chứng minh sự khác nhau trong các quan hệ khách quan cấu thành hiện tượng.

> **Cơ sở 2.** Một hiện tượng khách quan không đồng nhất với những biểu diễn của nó trong nhận thức của các quan sát viên. Có thể tồn tại nhiều biểu diễn khác nhau của cùng một hiện tượng, nhưng các quan hệ khách quan cấu thành hiện tượng không được tạo ra hoặc thay đổi chỉ bởi sự khác nhau giữa các biểu diễn ấy.

Từ đó, khi khảo sát một hiện tượng, cần phân biệt hai tầng nhận thức. Tầng thứ nhất là biểu diễn của hiện tượng đối với từng quan sát viên, phụ thuộc vào điều kiện quan sát, đo đạc, chuẩn được lựa chọn và trạng thái chuyển động của quan sát viên. Tầng thứ hai là nhận thức hướng tới những quan hệ của hiện tượng được bảo toàn qua các biểu diễn tương đương của những quan sát viên khác nhau. Tầng thứ hai là mục tiêu mà tri thức khoa học hướng tới.

Trong phần cơ học tiếp theo, sự phân biệt này sẽ được cụ thể hóa: bài viết sẽ xác định những đại lượng nào thay đổi cùng biểu diễn của quan sát viên và những quan hệ nào thuộc về hiện tượng khách quan.

2.3. Vật chất và vận động

Ở mức khái quát cao nhất, bài viết xem những gì ta có thể nhận thức về một hiện tượng của Tự nhiên dưới hai phạm trù cơ sở: vật chất và sự vận động của vật chất. Vật chất là đối tượng cấu thành hiện tượng. Ta nhận biết sự tồn tại và trạng thái của vật chất thông qua những tương tác của nó với các vật khác và, trực tiếp hoặc gián tiếp, với quá trình nhận thức của chúng ta. Những tương tác giữa các vật có thể làm thay đổi trạng thái của chúng; sự thay đổi trạng thái của vật chất là cái mà bài viết gọi là vận động.

Vận động là sự thay đổi trạng thái của vật chất. Không có vận động tách rời khỏi vật chất: mọi vận động đều là vận động của một đối tượng vật chất nào đó. Ngược lại, vật chất bộc lộ sự tồn tại của mình đối với nhận thức thông qua trạng thái, sự vận động và những tương tác mà nó tham gia. Vì vậy, vật chất và vận động không được xem như hai thực thể độc lập, mà như hai phạm trù gắn liền trong việc nhận thức cùng một thực tại khách quan. Tâm thức là nơi những biểu hiện ấy được nhận thức, không phải nơi thực tại khách quan được tạo ra.

Trong cơ học, bài viết lấy vật chất và vận động làm nền tảng để xây dựng mô tả hiện tượng. Khi khảo sát một hiện tượng, những câu hỏi cơ sở là: những vật nào cấu thành hiện tượng, chúng đang ở những trạng thái nào, các trạng thái ấy thay đổi ra sao, và các vật tương tác với nhau như thế nào? Những khái niệm cơ học khác được xây dựng để biểu hiện và định lượng các quan hệ ấy.

> **Cơ sở 3 (Vật chất và vận động).** Trong cơ học, một hiện tượng khách quan được cấu thành bởi các vật, trạng thái và sự vận động của chúng, cùng những tương tác giữa các vật.

2.4. Không gian và thời gian

Nếu vật chất và vận động là những phạm trù cơ sở của hiện tượng, thì cần xác định địa vị của không gian và thời gian trong mô tả vật lý. Theo cách hiểu thông thường, mọi hiện tượng được nói là diễn ra "trong" không gian và "trong" thời gian, như thể không gian và thời gian là một sân khấu tồn tại sẵn, độc lập với những vật và những quá trình diễn ra trên đó. Bài viết không sử dụng cách hiểu này.

Không gian có ý nghĩa vật lý thông qua các quan hệ giữa những đối tượng vật chất. Nói một vật có vị trí chỉ có nghĩa khi vị trí của nó được xác định so với một vật hoặc một hệ vật được lấy làm chuẩn. Khoảng cách là quan hệ giữa các vị trí; phương hướng, hình dạng và cấu hình biểu hiện sự sắp xếp tương đối giữa các vật hoặc giữa những phần của một hệ vật. Những quan hệ này có thể hoàn toàn khách quan, nhưng tính khách quan của chúng không tự nó đòi hỏi sự tồn tại của một thực thể vật lý độc lập gọi là không gian.

Việc đo các đại lượng không gian cũng được thực hiện thông qua những chuẩn vật lý từ vật chất. Một mét không phải là một "mẩu không gian", mà là một đơn vị được quy ước và được hiện thực hóa bằng một chuẩn vật lý. Tương tự, hệ tọa độ là một cấu trúc toán học dùng để gán giá trị số cho vị trí, khoảng cách và phương hướng; nó biểu diễn những quan hệ không gian nhưng không đồng nhất với các quan hệ ấy.

Vì vậy, trong nghiên cứu này, không gian không được xem như một vật chứa tồn tại vật lý độc lập mà trong đó vật chất được đặt vào. Không gian là một khái niệm thứ cấp dùng để biểu hiện trật tự vị trí và các quan hệ tồn tại của vật chất. Mọi nội dung vật lý được gán cho không gian phải cuối cùng được truy về những thuộc tính hoặc quan hệ của các đối tượng vật chất dùng để xác lập nó.

Thời gian được xem xét theo cùng một nguyên tắc. Nếu vận động là sự thay đổi trạng thái của vật chất, thì việc đo thời gian về mặt vật lý là việc lượng hóa sự biến đổi ấy bằng cách so sánh một quá trình vật lý với một quá trình vật lý khác được lựa chọn làm chuẩn.

Đồng hồ không cần được hiểu như một thiết bị trực tiếp đo một thực thể độc lập gọi là thời gian. Bản thân đồng hồ là một hệ vật lý có một quá trình vận động đủ ổn định để làm chuẩn. Đo một khoảng thời gian là so sánh lượng biến đổi của quá trình được khảo sát với lượng biến đổi của quá trình chuẩn.

Theo cách hiểu đó, một mốc thời gian tương ứng với một trạng thái được lựa chọn làm mốc; một khoảng thời gian biểu hiện quan hệ định lượng giữa các quá trình vận động; còn thứ tự thời gian biểu hiện trật tự trước và sau của các trạng thái. Những đại lượng thời gian vì vậy có thể hoàn toàn khách quan mà không đòi hỏi phải giả định một "dòng thời gian" tồn tại độc lập với những quá trình vật lý được mô tả.

Vì vậy, trong nghiên cứu này, thời gian là một khái niệm thứ cấp dùng để biểu hiện trật tự và lượng biến đổi của vận động. Mọi nội dung vật lý được gán cho thời gian phải cuối cùng được truy về những quá trình vật lý và những quan hệ giữa các quá trình ấy.

> **Cơ sở 4 (Không gian và thời gian).** Không gian và thời gian là những khái niệm thứ cấp, không phải những thực thể vật lý tồn tại độc lập bên cạnh vật chất và vận động. Không gian biểu hiện các quan hệ tồn tại của vật chất; thời gian biểu hiện các quan hệ vận động của vật chất.

2.5. Từ nền tảng triết học tới Nguyên lý tương đối

Hiện tượng, quan sát viên, hệ quy chiếu và định luật là những đối tượng cơ bản của Nguyên lý tương đối. Các đối tượng này liên quan chặt chẽ với triết học. Theo Cơ sở 1, các quan hệ khách quan tồn tại và chi phối hiện tượng. Theo Cơ sở 2, những gì quan sát viên nhận thức và phát biểu về các quan hệ khách quan của hiện tượng, là biểu diễn của các quan hệ ấy trong nhận thức. Vì vậy, trước khi nói rằng các định luật vật lý là như nhau đối với mọi quan sát viên trong mọi hệ quy chiếu quán tính, cần hỏi: điều được khẳng định là như nhau là quan hệ khách quan chi phối hiện tượng, hay hình thức biểu diễn của quan hệ ấy trong nhận thức của quan sát viên?

Khi khảo sát mỗi hiện tượng, luôn có hai mạch song song. Mạch thứ nhất đi từ hiện tượng đến các quan hệ khách quan chi phối nó. Những quan hệ này thuộc về bản thân hiện tượng, nên không phụ thuộc vào việc ai quan sát hay quan sát từ hệ quy chiếu nào; đây là tầng của bất biến khách quan. Mạch thứ hai đi từ hiện tượng, qua nhận thức của quan sát viên, đến biểu diễn của hiện tượng. Đây là tầng biểu diễn trong nhận thức của quan sát viên; ở tầng này, giá trị các đại lượng và hình thức phương trình phụ thuộc vào chuẩn mà quan sát viên lựa chọn.

Hai cách hiểu về "định luật" vì vậy dẫn tới hai nguyên lý khác nhau. Nếu điều được khẳng định là như nhau, là hình thức phương trình, thì việc giới hạn vào các hệ quán tính có cơ sở toán học rõ ràng: chỉ giữa các hệ quy chiếu quán tính, phương trình mới giữ nguyên dạng. Nếu điều được khẳng định là quan hệ khách quan, thì từ Cơ sở 1 và Cơ sở 2, không có lý do để đặt giới hạn như vậy: các quan hệ chi phối hiện tượng thuộc về bản thân hiện tượng, còn việc chọn một hệ quy chiếu chỉ là chọn một biểu diễn của hiện tượng. Sự khác nhau giữa các biểu diễn không tự nó làm thay đổi các quan hệ cấu thành hiện tượng. Việc chứng minh điều này trong cơ học là nhiệm vụ của bài viết này.

Từ các cơ sở triết học trên, việc xây dựng một nguyên lý tương đối nhất quán và phổ quát trong phạm vi cơ học cổ điển là một đòi hỏi tất yếu. Trong cách hiểu thông thường, hệ quy chiếu là một vật mốc kèm một hệ tọa độ; khái niệm ấy không cho biết sự khác nhau nào giữa các quan sát viên thuộc về hiện tượng và sự khác nhau nào chỉ thuộc về biểu diễn. Điều này quan trọng vì hệ quy chiếu phải là công cụ nhằm trợ giúp quan sát viên nhận thức được hiện tượng. Vì vậy khái niệm hệ quy chiếu cần được xác định lại, sao cho việc chọn hệ quy chiếu chỉ là việc chọn một biểu diễn, không tác động tới hiện tượng

3. Các định nghĩa

Mục này chuyển các khái niệm của Mục 2 thành những định nghĩa vật lý có thể dùng trong suy luận. Mỗi nhóm định nghĩa được nêu kèm Cơ sở mà nó cụ thể hóa. Trong toàn bài, vận động được hiểu như ở Mục 2.3: sự thay đổi trạng thái của vật chất. Chuyển động cơ học, tức sự thay đổi vị trí, được xem là sự thay đổi của một quan hệ.

3.1. Vật, vị trí và cấu hình nội tại

Nhóm định nghĩa này cụ thể hóa Cơ sở 3 và Cơ sở 4. Cần phân biệt hai loại quan hệ không gian: loại cần một vật được chọn làm chuẩn, và loại chỉ liên quan tới chính các vật được xét.

Một vật là một đối tượng vật chất được mô hình hóa như một đơn vị khảo sát; một hệ vật là một tập hợp xác định các vật được khảo sát cùng nhau. Vị trí của một vật là quan hệ của nó với một vật hoặc hệ vật được chọn làm chuẩn, và chuyển động cơ học là sự thay đổi của quan hệ ấy. Vì phụ thuộc vào chuẩn được chọn, vị trí và chuyển động cơ học là những quan hệ, không phải trạng thái của riêng vật.

> **Định nghĩa 1 (Cấu hình nội tại và trạng thái nội tại).** Cấu hình nội tại của một hệ vật là tập hợp các khoảng cách giữa các vật của hệ và các góc giữa những đoạn nối chúng, tức hình dạng của hệ; nó chỉ liên quan tới chính các vật của hệ và không cần một vật ngoài hệ làm chuẩn. Trạng thái nội tại của hệ tại một thời điểm gồm cấu hình nội tại, vận tốc nội tại $\dot{\rho}_i$ của các vật so với khối tâm, biểu diễn bằng hệ trục không quay (Mục 3.5, 3.6), và các tương tác giữa các vật trong hệ. Các đại lượng chỉ thay đổi khi đổi chuẩn, như vị trí, vận tốc toàn phần và động lượng toàn phần, không thuộc trạng thái nội tại.

Theo Mục 2.3, vận động là sự thay đổi trạng thái của vật chất; trong cơ học, đó là sự thay đổi trạng thái nội tại. Một hệ vật chuyển động đối với một chuẩn mà trạng thái nội tại không đổi thì không có vận động theo nghĩa này; nó chỉ có chuyển động cơ học đối với chuẩn ấy. Đây là nội dung trực giác của Nguyên lý tương đối Galileo.

3.2. Tương tác và hiện tượng

Tương tác giữa các vật được định lượng bằng lực; một hệ vật là kín nếu không vật nào của nó tương tác với một vật ngoài hệ. Theo Cơ sở 3, một hiện tượng cơ học là một quá trình khách quan trong đó các vật của một hệ chuyển động đối với nhau và trạng thái nội tại của hệ được duy trì hoặc thay đổi theo những quan hệ vật lý xác định; hiện tượng tồn tại dù nó có được quan sát hay không.

3.3. Quan sát viên và biểu diễn

Nhóm định nghĩa này cụ thể hóa Cơ sở 2.

Quan sát viên được hiểu là một đối tượng hoặc hệ đo có khả năng xác lập các chuẩn vật lý và gán giá trị cho các đại lượng dùng để mô tả một hiện tượng; quan sát viên không nhất thiết là con người.

> **Định nghĩa 2 (Biểu diễn).** Biểu diễn của một hiện tượng đối với một quan sát viên là tập hợp các đại lượng, quan hệ và phương trình mà quan sát viên dùng để mô tả hiện tượng

> theo các chuẩn, hệ quy chiếu và hệ tọa độ đã chọn. Hai biểu diễn là tương đương nếu chúng mô tả cùng một hiện tượng và có thể quy đổi sang nhau.

Quan sát không giống với tác động lên một hiện tượng. Việc chọn một biểu diễn không làm thay đổi diễn biến khách quan của hiện tượng. Khi một quan sát viên hoặc một thiết bị đo thực sự tương tác với các vật của một hiện tượng, tương tác đó trở thành một phần của hiện tượng và phải được mô tả như mọi tương tác khác.

3.4. Quan hệ khách quan và định luật

> **Định nghĩa 3 (Quan hệ vật lý khách quan).** Các quan hệ vật lý khách quan của một hiện tượng cơ học là: cấu hình nội tại của hệ vật, chuyển động nội tại của các vật so với khối tâm, biểu diễn bằng hệ trục không quay, và các lực tương tác giữa các vật. Chúng được xác định bởi chính các vật cấu thành hiện tượng. Việc chúng có như nhau đối với mọi quan sát viên hay không không nằm trong định nghĩa này, mà được chứng minh ở Mục 7 (Định lý 2).
>
> **Định nghĩa 4 (Định luật và hiệu lực khách quan).** Một định luật cơ học là một phát biểu, thường dưới dạng toán học, mô tả một quan hệ vật lý khách quan trong những điều kiện và phạm vi được nêu rõ. Định luật có hiệu lực khách quan đối với một hiện tượng nếu quan hệ mà nó mô tả vẫn đúng đối với hiện tượng trong mọi biểu diễn tương đương, bất kể quan sát viên chọn hệ quy chiếu nào. Giá trị các đại lượng khác và dạng của các phương trình biểu diễn có thể thay đổi mà không làm thay đổi quan hệ ấy.

Định nghĩa 4 chỉ nêu tiêu chuẩn. Khi bài viết nói một định luật có hiệu lực trong một hệ, đó là theo nghĩa này: định luật là phát biểu, còn điều không thay đổi là quan hệ khách quan mà nó mô tả. Việc một định luật cụ thể có thỏa tiêu chuẩn này hay không không được giả định, mà phải được chứng minh (Bổ đề 1, Mục 7).

3.5. Hệ tọa độ và hệ trục không quay

Hệ tọa độ là một cấu trúc toán học gồm một gốc, một bộ trục có định hướng và một quy tắc gán số, dùng để biểu diễn vị trí, phương hướng và các đại lượng liên quan (Mục 2.4). Hệ tọa độ là một công cụ biểu diễn, không đồng nhất với một hệ quy chiếu; việc chọn và quay các trục thuộc về hệ tọa độ. Vận tốc góc ω của một bộ trục so với một bộ trục khác được xác định theo cách thông thường bởi $Q^{T}dQ/dt = [\omega]_{\times}$, trong đó $Q(t)$ là ma trận quay giữa hai bộ trục.

> **Định nghĩa 5 (Hệ trục không quay).** Hệ trục không quay là bộ trục tọa độ mà trục của các con quay hồi chuyển tự do giữ nguyên phương theo thời gian. Đây là khái niệm quen thuộc trong cơ học; trong bài viết, hệ trục không quay là một hệ tọa độ, dùng để biểu diễn; nó không phải một hệ quy chiếu và không xác định chuyển động cơ sở.

Hệ trục không quay không phải một quy ước tự do. Nó được xác định bằng thực nghiệm, qua con quay hồi chuyển hoặc con lắc Foucault. Với Trái Đất, vận tốc góc so với hệ trục không quay ứng với ngày sao, khoảng 23 giờ 56 phút, $\omega \approx 7{,}29\times10^{-5}$ rad/s, không ứng với ngày Mặt Trời. Định nghĩa 5 chỉ dựa vào con quay hồi chuyển; mối liên hệ giữa hệ trục không quay và các lực tương tác được nêu riêng ở Tiên đề 4. Bài viết nhận hệ trục không quay như một dữ kiện; nguồn gốc của nó được bàn ở Mục 12.

3.6. Chuyển động cơ sở và chuyển động nội tại

Đây là công cụ trung tâm của bài viết: hình thức vật lý của sự phân biệt giữa hiện tượng và biểu diễn. Phép tách dưới đây, khi chuẩn là khối tâm, chính là phép tách quen thuộc trong cơ học thành chuyển động của khối tâm và chuyển động so với khối tâm. Điều bài viết bổ sung không nằm ở bản thân phép tách, mà ở chỗ gán hai phần cho hai tầng đối với hiện tượng đang xét, chuyển động nội tại thuộc hiện tượng và chuyển động cơ sở thuộc biểu diễn, rồi dùng sự phân biệt ấy để định nghĩa hệ quy chiếu (Mục 3.7) và xác định địa vị của phép biến đổi Galileo (Mục 11.1).

Chuyển động cơ sở của một vật hoặc hệ vật làm chuẩn H được cho bởi một hàm vectơ $R_H(t)$, và vị trí của vật thứ i được tách thành:

$$r_i(t) = R_H(t) + \rho_i(t) \tag{1}$$

trong đó $\rho_i(t)$ là vị trí của vật i đối với H. Lấy đạo hàm theo thời gian:

$$v_i = V_H + \dot{\rho}_i, \quad V_H = dR_H/dt \tag{2}$$

$$a_i = A_H + \ddot{\rho}_i, \quad A_H = d^2R_H/dt^2 \tag{3}$$

Gia tốc cơ sở A_H là một vectơ, bao gồm sự thay đổi cả về độ lớn lẫn về hướng của vận tốc cơ sở. Một chuẩn chuyển động trên một đường cong, như Trái Đất coi là chất điểm trên quỹ đạo quanh Mặt Trời, vẫn có một chuyển động cơ sở hoàn toàn xác định.

Các vectơ trong (1)–(3) được biểu diễn bằng hệ trục không quay.

> **Định nghĩa 6 (Chuyển động cơ sở và chuyển động nội tại).** Chuyển động cơ sở của H là hàm $R_H(t)$. Chuyển động nội tại của vật i đối với H là hàm $\rho_i(t)$, tức phần còn lại của chuyển động sau khi chuyển động cơ sở đã được tách ra.

Khi chuẩn là khối tâm của chính hệ vật (Mục 3.8), chuyển động nội tại, cùng với cấu hình nội tại và các tương tác, thuộc về hiện tượng: nó được xác định bởi chính các vật của hệ. Chuyển động cơ sở thì phụ thuộc vào chuẩn mà quan sát viên chọn; đối với hiện tượng đang xét, nó chỉ xuất hiện trong biểu diễn và không tham gia vào động lực học nội tại. Điều này không có nghĩa chuyển động cơ sở luôn phi vật lý: gia tốc của thang máy hay của Trái Đất quanh Mặt Trời do một tương tác thật gây ra, và là quan hệ khách quan của một hiện tượng rộng hơn chứa cả nguồn của nó (Mục 6.7, Mục 10.2). Mệnh đề 1 ở Mục 6 chứng minh rằng việc đổi chuẩn chỉ làm thay đổi chuyển động cơ sở.

3.7. Hệ quy chiếu

Đến đây có thể nêu Kết luận thứ nhất dưới dạng định nghĩa. Mục 1 đã chỉ ra rằng điều kiện của Hệ quả VI, tức mọi phần của hệ cùng nhận một chuyển động chung, là điều kiện để một hệ có gia tốc vẫn thỏa Nguyên lý tương đối; Mục 2.5 đòi hỏi hệ quy chiếu được xác định sao cho việc chọn nó chỉ là việc chọn một biểu diễn. Định nghĩa dưới đây đáp ứng cả hai.

> **Định nghĩa 7 (Hệ quy chiếu).** Các vật đồng chuyển động cơ sở trên một khoảng khảo sát nếu chúng có chung một chuyển động cơ sở $R_H(t)$, tức tại mọi thời điểm của khoảng ấy cùng vận tốc cơ sở và cùng gia tốc cơ sở, cả về độ lớn lẫn hướng; chúng vẫn có thể có

> những chuyển động nội tại khác nhau. Một hệ quy chiếu là một chuẩn vật chất H, tức một vật hoặc hệ vật có cấu hình nội tại không đổi trên khoảng khảo sát và gồm ít nhất ba phần không thẳng hàng, mà mọi phần của nó đồng chuyển động cơ sở, cùng với biểu diễn gắn với nó: gốc tọa độ tại một phần của H và bộ trục xác định bởi cấu hình của H. Hệ quy chiếu được đặc trưng bởi chuyển động cơ sở $R_H(t)$ của chuẩn ấy.

Yêu cầu cấu hình không đổi không phải một hạn chế tùy tiện: một chuẩn dùng để xác lập vị trí và phương hướng phải giữ nguyên hình dạng, như một thước đo phải cứng. Ba phần không thẳng hàng là điều kiện tối thiểu để cấu hình của H xác định được một bộ trục. Định nghĩa 7 chỉ nói về chuyển động của chuẩn. Nó không chứa Nguyên lý tương đối, cũng không chứa điều kiện không phát hiện được chuyển động cơ sở; cả hai được chứng minh ở Mục 7 và Mục 8. Vì vậy, việc chứng minh nguyên lý từ định nghĩa này không vòng tròn.

Định nghĩa này hẹp hơn cách hiểu thông thường, trong đó mọi vật mốc kèm một hệ tọa độ, kể cả vật đang quay, đều là hệ quy chiếu. Bài viết dành thuật ngữ hệ quy chiếu cho lớp hẹp hơn này, và lựa chọn ấy có lý do vật lý. Ranh giới không được vạch giữa hệ có gia tốc và hệ không có gia tốc, mà giữa chuyển động tách được khỏi hiện tượng và chuyển động không tách được. Gia tốc tịnh tiến tác dụng lên mọi vật tỉ lệ với khối lượng, nên triệt tiêu khi lấy chuyển động so với khối tâm. Các số hạng do sự quay sinh ra phụ thuộc vào vị trí và vận tốc của từng vật, nên không triệt tiêu được. Định lý 1 ở Mục 6 chứng minh rằng điều kiện đồng chuyển động cơ sở là điều kiện cần và đủ để phương trình của chuyển động nội tại, biểu diễn gắn với chuẩn, không chứa số hạng nào phụ thuộc vào chuyển động của chính chuẩn. Với một chuẩn cứng, điều kiện này chính là chuẩn chuyển động tịnh tiến, không quay. Cái mà cơ học thông thường gọi là hệ quay vẫn được dùng trong bài viết, với tư cách một hệ tọa độ có trục quay, thuộc tầng biểu diễn.

Hệ quy chiếu ở đây được hiểu là hệ gắn với quan sát viên: chuẩn gồm chính quan sát viên và các vật đồng chuyển động cơ sở với họ, không nhất thiết là phương tiện chở quan sát viên. Hệ tọa độ mà quan sát viên dùng chỉ là cách biểu diễn. Đặc trưng của một hệ quy chiếu là toàn bộ hàm $R_H(t)$, không chỉ vận tốc cơ sở tại một thời điểm: hai hệ có cùng vận tốc tại một thời điểm nhưng gia tốc khác nhau sẽ tách xa nhau ngay sau đó; chúng không phải cùng một hệ.

Hai ví dụ cho thấy cách định nghĩa vận hành. Hai người đứng yên trên cùng một sân ga có cùng chuyển động cơ sở, nên thuộc cùng một hệ quy chiếu dù dùng hai hệ tọa độ khác nhau. Người lơ lửng giữa khoảng không và người trong thang máy rơi tự do thuộc hai hệ quy chiếu khác nhau, nhưng mỗi người đồng chuyển động cơ sở với các vật trong môi trường của mình.

3.8. Động lượng cơ sở, động lượng nội tại và khối tâm

Nhân (2) với khối lượng m_i, động lượng của vật i đối với H tách thành hai phần:

$$p_i = m_i V_H + m_i \rho_i = p_i^{b} + p_i^{in} \tag{4}$$

Với cả hệ, đặt $M = \Sigma m_i$, tổng động lượng là:

$$P = M V_H + \Sigma\, p_i^{in} \tag{5}$$

Phép tách (1) không duy nhất: thay R_H bằng $R_H + c(t)$ và ρ_i bằng $\rho_i - c(t)$ vẫn cho cùng r_i. Vì vậy chuyển động nội tại chỉ có nghĩa xác định khi đã nêu một quy tắc chọn chuyển động cơ sở. Với một hệ vật, quy tắc tự nhiên là lấy chuyển động của khối tâm:

$$R_C = (1/M)\ \Sigma\ m_i r_i \qquad (6)$$

Khi $R_H = R_C$, ta có $\Sigma m_i \rho_i = 0$, do đó $\Sigma p_i^{in} = 0$: toàn bộ động lượng của hệ là động lượng cơ sở. Khối tâm là một chuẩn được xác định bởi chính các vật của hệ, không bởi quan sát viên. Từ đây, khi nói đến chuyển động nội tại của một hệ vật mà không nói gì thêm, chuyển động cơ sở được hiểu là chuyển động của khối tâm.

> **Định nghĩa 8 (Quan sát viên tiêu biểu).** Quan sát viên tiêu biểu của một hiện tượng là quan sát viên đồng chuyển động cơ sở với hiện tượng, tức có chuyển động cơ sở trùng với chuyển động của khối tâm hệ vật cấu thành hiện tượng, và dùng hệ trục không quay (Định nghĩa 5) để biểu diễn. Về mặt cơ học, đây là hệ khối tâm quen thuộc; điều bài viết nhấn mạnh là trong biểu diễn này, các đại lượng biểu diễn trùng với các quan hệ khách quan (Hệ quả 3).

3.9. Hệ quán tính và hệ có gia tốc

Một hệ quy chiếu H được gọi là quán tính trên một khoảng khảo sát nếu $A_H(t) = 0$ trên toàn khoảng đó, và là hệ có gia tốc nếu $A_H(t) \neq 0$ trên ít nhất một phần của khoảng đó.

Hệ quán tính và hệ có gia tốc không phải hai loại đối tượng khác nhau, mà là hai trường hợp của cùng một khái niệm, phân biệt bởi dạng của chuyển động cơ sở. Sự phân biệt này chỉ có ý nghĩa ở tầng biểu diễn, trong hình thức của phương trình chuyển động toàn phần; nó không phải ranh giới hiệu lực của định luật. Sự quay không thuộc sự phân biệt này, vì nó không phải chuyển động cơ sở (Mục 6).

4. Các tiên đề và tiêu chuẩn

4.1. Các tiên đề

Tiên đề 1 và Tiên đề 2 là hình thức mà Cơ sở 1 và Cơ sở 2 mang trong cơ học. Tiên đề 3 và Tiên đề 4 đưa vào nội dung vật lý.

> **Tiên đề 1 (Tính quy luật của hiện tượng cơ học).** Mọi hiện tượng cơ học diễn ra theo những quan hệ khách quan xác định. Các quan hệ này thuộc về bản thân hiện tượng và không được tạo ra bởi việc chọn quan sát viên hay hệ quy chiếu.
>
> **Tiên đề 2 (Tính độc lập của hiện tượng đối với nhận thức).** Diễn biến khách quan của một hiện tượng cơ học không phụ thuộc vào nhận thức hay biểu diễn của quan sát viên. Một quan sát viên chỉ làm thay đổi một hiện tượng khi quan sát viên hoặc phương tiện quan sát tham gia vào các tương tác của nó.
>
> **Tiên đề 3 (Bảo toàn động lượng).** Trong một hệ vật kín, tổng động lượng được bảo toàn. Các tương tác bên trong hệ có thể làm thay đổi động lượng của từng vật nhưng không làm thay đổi tổng động lượng của hệ.

$$dP/dt = 0 \quad (7)$$

Hệ quả trực tiếp: tổng các lực tương tác bên trong một hệ kín bằng không, $\Sigma F_i = 0$. Giá trị của động lượng phụ thuộc vào hệ quy chiếu (Mục 5); sự bảo toàn này được biểu diễn thế nào trong các hệ khác nhau là một phần của điều cần khảo sát.

> **Tiên đề 4 (Hệ trục không quay và lực tương tác).** Tồn tại một chuẩn H_0 sao cho, khi biểu diễn bằng hệ trục không quay, mỗi vật thỏa $m_i a_i = F_i$, trong đó F_i là tổng lực tương tác lên vật i. Các lực tương tác chỉ phụ thuộc vào vị trí tương đối và vận tốc tương đối của các vật.

Tiên đề 4 thực chất là định luật II của Newton trong lớp hệ mà cơ học thông thường gọi là quán tính. Cần nói thẳng điểm này. H_0 chỉ là điểm xuất phát của tính toán, không có địa vị ưu tiên về nhận thức: các kết quả ở Mục 6 đến Mục 9 không phụ thuộc vào việc chọn H_0 nào trong lớp các chuẩn thỏa Tiên đề 4, và Định lý 1 sẽ cho thấy lớp hệ quy chiếu rộng hơn hẳn lớp ấy. Thừa nhận một điểm xuất phát như vậy là cái giá để giữ nguyên nội dung động lực học của cơ học Newton.

Bài viết làm việc trong cơ học Newton, với một tham số thời gian chung cho mọi hệ quy chiếu ($t' = t$). Đây là giả thiết của phạm vi khảo sát, có hiệu lực khi vận tốc tương đối giữa các hệ nhỏ so với tốc độ ánh sáng. Bài viết không đưa ra khẳng định nào về cấu trúc thời gian ngoài phạm vi ấy.

4.2. Tiêu chuẩn phân biệt hiện tượng với biểu diễn

> **Tiêu chuẩn 1 (Thay đổi khi đổi biểu diễn).** Một thành phần trong biểu diễn của một hiện tượng là phụ thuộc biểu diễn nếu nó xuất hiện, biến mất hoặc thay đổi chỉ do một sự thay đổi hệ tọa độ hoặc chuyển động cơ sở của hệ quy chiếu, trong khi các vật và tương tác của hiện tượng không đổi. Một thành phần thuộc về hiện tượng nếu sự thay đổi của nó gắn với một sự thay đổi của các vật hoặc tương tác ấy.

Tiêu chuẩn 1 chỉ xét hệ đang được khảo sát. Riêng nó thì chưa đủ: Mục 10.2 sẽ chỉ ra rằng trọng lực đều tác động lên chuyển động nội tại giống hệt một thành phần phụ thuộc biểu diễn. Tiêu chuẩn thứ hai được cung cấp bởi Tiên đề 3: trong cơ học chất điểm mà bài viết khảo sát, một tương tác có tính hai chiều, còn một thành phần phát sinh từ việc đổi hệ quy chiếu hay hệ tọa độ thì không có đối ứng.

> **Tiêu chuẩn 2 (Tương tác và đối ứng).** Trong lớp tương tác cơ học giữa các chất điểm được xét ở bài viết, một thành phần lực tác dụng lên một vật là một tương tác nếu tồn tại một vật khác nhận thành phần ngược lại, sao cho tổng động lượng của hệ mở rộng chứa cả hai vật được bảo toàn. Một thành phần lực không có đối ứng như vậy, trong bất kỳ hệ mở rộng nào, là phụ thuộc biểu diễn. Trong các lý thuyết trường, động lượng có thể nằm trong trường, và tiêu chuẩn này cần được mở rộng.

4.3. Đại lượng thuộc hiện tượng và đại lượng thuộc biểu diễn

Áp dụng hai tiêu chuẩn, các đại lượng cơ học được chia thành hai loại. Bảng dưới đây được kiểm chứng ở Mục 5, Mục 6 và Mục 11.

Thuộc hiện tượng (bất biến khách quan)	**Thuộc biểu diễn**
Khối lượng	Vị trí
Cấu hình nội tại: khoảng cách và góc giữa các vật	Quỹ đạo, quãng đường đi được
Chuyển động nội tại; vận tốc, gia tốc tương đối giữa các vật, biểu diễn bằng hệ trục không quay	Chuyển động cơ sở; vận tốc, động lượng, động năng toàn phần
Lực tương tác có đối ứng	Lực quán tính; lực Coriolis, ly tâm, Euler
Khoảng thời gian giữa hai sự kiện (trong cơ học cổ điển)	Gia tốc toàn phần khi đổi sang hệ có gia tốc

5. Đổi hệ quy chiếu và đổi hệ tọa độ

5.1. Đổi hệ quy chiếu đối với một vật

Xét hai hệ quy chiếu H và H′, biểu diễn bằng hai hệ tọa độ có các trục song song. Gọi R(t) là chuyển động cơ sở của H′ biểu diễn trong H, với V = dR/dt và A = d^2R/dt^2. Vị trí của cùng một vật trong hai hệ liên hệ bởi:

$$r' = r - R(t) \tag{8}$$

$$v' = v - V, \quad a' = a - A \tag{9}$$

$$p' = p - mV, \quad dp'/dt = dp/dt - mA \tag{10}$$

Theo Mục 3.1, vị trí, vận tốc và động lượng là những quan hệ với chuẩn, nên chúng thay đổi khi chuẩn thay đổi: vật không có hai trạng thái, nó chỉ được quy chiếu vào hai chuyển động cơ sở khác nhau. Vì A là một vectơ bất kỳ, các công thức này áp dụng cho mọi cặp hệ quy chiếu, kể cả khi chuyển động cơ sở của H′ là một đường cong.

5.2. Trường hợp Galileo

Khi H′ chuyển động thẳng đều đối với H, R(t) = R_0 + Vt với V không đổi, nên A = 0. Khi đó a′ = a và dp′/dt = dp/dt: giá trị vận tốc và động lượng khác nhau, nhưng gia tốc và tốc độ biến thiên động lượng như nhau. Đây là nội dung toán học của Hệ quả V và của phát biểu truyền thống.

5.3. Hệ có gia tốc và lực quán tính

Giả sử chuyển động của một vật trong H thỏa ma = F, với F là tổng lực do các vật khác tác dụng. Khi A ≠ 0, từ (9) suy ra trong H′:

$$ma' = F + F_{in}, \quad F_{in} = -mA \tag{11}$$

Lực F chỉ phụ thuộc vào các vật đang tương tác; thay H′ bằng một hệ khác không làm F thay đổi. Lực F_{in} chỉ phụ thuộc vào quan hệ chuyển động giữa H và H′, và không có vật nào nhận lực ngược lại với nó. Theo Tiêu chuẩn 1 và Tiêu chuẩn 2, F thuộc về hiện tượng, còn F_{in} thuộc

về biểu diễn. F_{in} như nhau cho mọi vật tính trên một đơn vị khối lượng; đó là dấu hiệu nó bắt nguồn từ một chuyển động cơ sở chung.

5.4. Hệ vật và tổng động lượng

Áp dụng (10) cho mọi vật của một hệ có tổng khối lượng M:

$$P' = P - MV, \quad dP'/dt = dP/dt - MA \tag{12}$$

Với hệ kín, dP/dt = 0 trong H. Giữa hai hệ Galileo, A = 0 nên dP′/dt = 0: giá trị tổng động lượng không bất biến, nhưng sự bảo toàn thì bất biến. Trong hệ có gia tốc, dP′/dt = −MA, chính là tổng lực quán tính; theo (5), nó bằng tốc độ biến thiên của động lượng cơ sở, trong khi các tương tác bên trong hệ không thay đổi.

5.5. Hệ tọa độ quay

Xét hai hệ tọa độ có chung gốc tại một điểm có chuyển động cơ sở R(t), các trục của hệ thứ hai quay so với các trục của hệ thứ nhất theo một ma trận quay Q(t), với vận tốc góc ω biểu diễn trên các trục của hệ thứ hai. Tọa độ x của một vật trong hệ thứ hai liên hệ với vị trí r của nó bởi:

$$r = R(t) + Q(t)\, x \tag{13}$$

Nếu ma = F đúng với bộ trục thứ nhất, lấy đạo hàm (13) hai lần và chiếu lên bộ trục thứ hai cho:

$$m\,\ddot{x} = Q^{T}F - mQ^{T}A - 2m\,\omega \times \dot{x} - m\,\omega \times (\omega \times x) - m\,\dot{\omega} \times x \tag{14}$$

Ba số hạng cuối là lực Coriolis, lực ly tâm và lực Euler. Chúng xuất hiện chỉ vì các trục tọa độ quay, trong khi các vật và tương tác không đổi, và không có vật đối ứng. Theo Tiêu chuẩn 1 và Tiêu chuẩn 2, chúng thuộc về biểu diễn. Khác với F_{in}, chúng phụ thuộc vào vị trí và vận tốc của từng vật, nên không như nhau cho mọi vật tính trên một đơn vị khối lượng.

Việc quay trục không làm thay đổi khoảng cách giữa hai vật, $|x_i - x_j| = |r_i - r_j|$, cũng không làm thay đổi góc giữa các đoạn nối các vật. Vì vậy cấu hình nội tại là như nhau trong mọi hệ tọa độ, quay hay không quay.

Ngược lại, vận tốc tương đối giữa hai vật biểu diễn trên trục quay, $\dot{x}_i - \dot{x}_j$, khác với vận tốc tương đối biểu diễn trên hệ trục không quay một lượng $\omega \times (x_i - x_j)$. Vì vậy, trong Bảng 4.3, vận tốc và gia tốc tương đối được hiểu là biểu diễn bằng hệ trục không quay.

6. Kết luận thứ nhất: hệ quy chiếu và sự quay

Mục này chứng minh Kết luận thứ nhất. Mục 6.1 và 6.2 thiết lập hai tính chất của chuyển động nội tại; Mục 6.3 chứng minh Định lý 1, biện minh cho Định nghĩa 7; các mục còn lại rút ra hệ quả đối với sự quay, loại chuyển động mà cơ học thông thường xếp chung vào “hệ phi quán tính”, nhưng theo bài viết lại có địa vị hoàn toàn khác.

6.1. Bất biến của chuyển động nội tại

> **Mệnh đề 1.** Với mọi phép đổi hệ quy chiếu (8), dù chuyển động cơ sở R(t) có gia tốc hay không, thẳng hay cong, chuyển động nội tại của các vật so với khối tâm của hệ là như nhau trong cả hai hệ: $\rho_i' = \rho_i$. Do đó vận tốc nội tại, gia tốc nội tại, động lượng nội tại và trạng thái nội tại của hệ cũng như nhau.

Chứng minh. Theo (8), $r_i' = r_i - R$ với mọi vật i. Thay vào (6): $R_C' = R_C - R$. Do đó $\rho_i' = r_i' - R_C' = r_i - R_C = \rho_i$. Lấy đạo hàm được $\dot{\rho}_i' = \dot{\rho}_i$ và $\ddot{\rho}_i' = \ddot{\rho}_i$. Cấu hình nội tại được xác định bởi các hiệu $\rho_i - \rho_j$, nên cũng không đổi; theo Mục 5.5, nó cũng không đổi khi quay trục. ■

Toàn bộ sự khác nhau giữa hai hệ được hấp thụ vào chuyển động cơ sở: $R_C' = R_C - R$. Đây là lý do việc chọn khối tâm không chỉ là một quy ước: khối tâm được xác định bởi chính các vật của hệ, nên chuyển động so với nó thuộc về hệ, không thuộc về quan sát viên.

6.2. Phương trình của chuyển động nội tại

> **Mệnh đề 2.** Với một hệ vật kín, đối với mọi chuẩn chuyển động tịnh tiến, có gia tốc hay không, nếu biểu diễn bằng hệ trục không quay, chuyển động nội tại của mỗi vật thỏa:

$$m_i \ddot{\rho}_i = F_i \tag{15}$$

Chứng minh. Trong H_0, cộng các phương trình của Tiên đề 4 cho mọi vật: $MA_C = \Sigma F_i = 0$ theo Tiên đề 3, nên $A_C = 0$ và $\ddot{\rho}_i = a_i$; vậy (15) đúng trong H_0. Chuyển sang một chuẩn tịnh tiến bất kỳ H': theo Mệnh đề 1, $\ddot{\rho}_i$ không đổi; vị trí và vận tốc tương đối của các vật cũng không đổi, nên theo Tiên đề 4 các lực F_i không đổi. Vậy (15) đúng trong H'. ■

So với (11), phương trình cho chuyển động toàn phần trong hệ có gia tốc chứa F_{in}, còn (15) thì không: lực quán tính tác dụng lên mọi vật tỉ lệ với khối lượng, nên tác dụng lên khối tâm đúng như lên từng vật và triệt tiêu khi lấy chuyển động so với khối tâm. Đây chính là chỗ hai tầng tách khỏi nhau: phương trình toàn phần đổi dạng, còn quan hệ khách quan (15) thì không. Bước $A_C = 0$ trong chứng minh là nội dung của Hệ quả IV của Newton: trạng thái chuyển động của khối tâm một hệ kín không bị thay đổi bởi tác động giữa các vật trong hệ [2].

6.3. Định lý 1: biện minh cho định nghĩa hệ quy chiếu

Với một chuẩn vật chất H, vì cấu hình nội tại không đổi, vận tốc của phần k của H có dạng $v_k = V_O + \omega_H \times (r_k - r_O)$, trong đó O là phần được chọn làm gốc và ω_H là vận tốc góc của bộ trục gắn với H so với hệ trục không quay. Biểu diễn gắn với H dùng bộ trục quay theo ma trận $Q_H(t)$. Với một hệ vật kín, đặt $\xi_i = Q_H^{\mathrm{T}} \rho_i$. Áp dụng (14) cho từng vật và cho khối tâm của hệ vật, rồi trừ vế theo vế, các số hạng chứa gia tốc của gốc triệt tiêu và còn lại:

$$m_i \ddot{\xi}_i = Q_H^{\mathrm{T}} F_i - 2m_i\, \omega_H \times \dot{\xi}_i - m_i\, \omega_H \times (\omega_H \times \xi_i) - m_i\, \dot{\omega}_H \times \xi_i \tag{16}$$

> **Định lý 1 (Biện minh cho định nghĩa hệ quy chiếu).** Cho H là một chuẩn vật chất. Với mọi hệ vật kín, phương trình chuyển động nội tại của các vật, biểu diễn gắn với H, có dạng $m_i \ddot{\xi}_i = Q_H^{\mathrm{T}} F_i$, tức lực tương tác chiếu lên các trục của H, không chứa số hạng bổ sung nào phụ thuộc vào chuyển động của H, khi và chỉ khi mọi phần của H đồng chuyển động cơ sở, tức H là một hệ quy chiếu theo Định nghĩa 7.

Chứng minh. (⇐) Nếu mọi phần của H có cùng vận tốc tại mọi thời điểm, thì $\omega_H \times (r_k - r_O) = 0$ với mọi k. Vì H có ít nhất ba phần không thẳng hàng, điều này buộc $\omega_H = 0$. Khi đó Q_H không đổi, ba số hạng cuối của (16) bằng không, và (16) trở thành $m_i\ddot{\xi}_i = Q_H^T F_i$, tức (15) chiếu lên một bộ trục cố định. Gia tốc cơ sở A_H của chuẩn, dù bằng bao nhiêu, không xuất hiện.
(⇒) Nếu không phải mọi phần của H có cùng vận tốc, thì tại một thời điểm t nào đó $\omega_H(t) \neq 0$. Xét một hệ vật kín mà tại thời điểm ấy có một vật i đứng yên trong biểu diễn của H, $\dot{\xi}_i = 0$, ở vị trí $\xi_i \neq 0$ vuông góc với ω_H. Khi đó số hạng Coriolis bằng không, số hạng Euler vuông góc với ξ_i, còn số hạng ly tâm bằng $m_i|\omega_H|^2\xi_i$. Thành phần của vế phải dọc theo ξ_i, ngoài lực tương tác, vì vậy bằng $m_i|\omega_H|^2|\xi_i|$ và khác không. Phương trình chuyển động nội tại chứa một số hạng bổ sung phụ thuộc vào chuyển động của H. ■

Định lý 1 cho thấy lớp chuẩn mà Định nghĩa 7 chọn có một đặc trưng vật lý xác định: những chuẩn đồng chuyển động cơ sở là những chuẩn duy nhất mà chuyển động của chúng tách được hoàn toàn khỏi phương trình của chuyển động nội tại. Hệ quán tính và hệ có gia tốc tịnh tiến đều thuộc lớp này; với chúng, gia tốc cơ sở không xuất hiện trong phương trình của chuyển động nội tại. Đây là nội dung toán học của Luận điểm thứ nhất. Định lý không đúng theo định nghĩa: Định nghĩa 7 chỉ nói về chuyển động của chuẩn, còn dạng của phương trình chuyển động nội tại được suy ra bằng tính toán từ (14) và Tiên đề 4.

6.4. Sự quay là chuyển động nội tại

> **Hệ quả 1 (Sự quay không phải chuyển động cơ sở).** Một vật đang quay so với hệ trục không quay không phải là một hệ quy chiếu, và không thể làm các số hạng do sự quay của nó sinh ra biến mất khỏi phương trình chuyển động nội tại biểu diễn gắn với nó. Sự quay của một vật là chuyển động nội tại của nó, không phải chuyển động cơ sở.

Chứng minh. Các phần của một vật quay với $\omega \neq 0$ có vận tốc $v_k = V_O + \omega \times (r_k - r_O)$ khác nhau, nên không đồng chuyển động cơ sở; theo Định nghĩa 7, vật ấy không phải hệ quy chiếu. Theo chiều (⇒) của Định lý 1, phương trình chuyển động nội tại biểu diễn gắn với vật ấy chứa số hạng phụ thuộc vào ω. Phần chung duy nhất của chuyển động các phần là chuyển động của khối tâm; phần còn lại thuộc chuyển động nội tại theo Định nghĩa 6. ■
Như vậy, sự quay không bị loại vì khó xử lý. Nó không phải chuyển động cơ sở vì không tách được khỏi hiện tượng: trong biểu diễn gắn với một vật đang quay, phương trình của chuyển động nội tại chứa các số hạng phụ thuộc vào ω và ω̇. Cũng vì các số hạng ấy khác nhau theo vị trí và vận tốc của từng vật, sự quay làm thay đổi trạng thái nội tại và phát hiện được từ bên trong, như thí nghiệm cái xô của Newton cho thấy (Mục 8 và Mục 10.3). Bài viết không tìm cách mở rộng định nghĩa để bao gồm "hệ quy chiếu quay". Cái mà cơ học thông thường gọi là hệ quay, ở đây là một hệ tọa độ có trục quay (Mục 5.5).
Sự quay nằm ngoài định nghĩa hệ quy chiếu không có nghĩa là hiệu lực của định luật bị giới hạn. Theo Luận điểm thứ hai, định luật có hiệu lực đối với mọi quan sát viên, kể cả quan sát viên trên vật đang quay; Mục 6.5 chứng minh điều đó. Quan sát viên trên một vật đang quay

vẫn có hệ quy chiếu của mình. Chẳng hạn, người ngồi trên đu quay có thể mang theo một bệ nhỏ được giữ không quay bằng con quay hồi chuyển: mọi phần của bệ có cùng vận tốc tại mỗi thời điểm, dù tâm bệ đi theo một đường tròn, nên bệ thỏa Định nghĩa 7 một cách chính xác; chuyển động cơ sở của nó là quỹ đạo tròn ấy. Cơ thể người, quay cùng đu quay, chỉ là một chuẩn gần đúng theo tiêu chí ε ở Mục 6.6. Chuyển động cơ sở và chuyển động nội tại được xác định đối với một hệ vật được chọn làm hiện tượng: một vật có quỹ đạo cong luôn có chuyển động cơ sở xác định, nhưng nếu nó là một phần của một hệ đang quay, chuyển động ấy thuộc về chuyển động nội tại của hệ.

6.5. Quan sát viên trên một vật đang quay

Cần phân biệt hai trường hợp, vì sự quay trong mỗi trường hợp có địa vị khác nhau.

- **Trường hợp a: hiện tượng không quay, quan sát viên dùng trục quay.** Một người trên đu quay nhìn một quả bóng lăn thẳng trên mặt đất sẽ thấy quả bóng đi theo đường cong. Đường cong này chỉ có trong biểu diễn của người ấy. Sự quay ở đây thuộc về biểu diễn và phải được loại bỏ.
- **Trường hợp b: hiện tượng quay.** Nước trong cái xô quay so với hệ trục không quay. Mặt nước lõm là cấu hình nội tại, tức một sự kiện khách quan. Sự quay ở đây thuộc về hiện tượng; loại nó đi là loại mất chính hiện tượng.

Như vậy, cái phải loại ra khỏi biểu diễn không phải mọi sự quay, mà là chuyển động của chuẩn và bộ trục của quan sát viên so với hiện tượng: vị trí, vận tốc và gia tốc của khối tâm hiện tượng so với quan sát viên, và sự quay của bộ trục quan sát viên so với hệ trục không quay. Phần còn lại, gồm cấu hình nội tại, chuyển động nội tại và các tương tác, thuộc về chính hiện tượng, kể cả khi hiện tượng tự nó đang quay.

> **Hệ quả 2 (Điều kiện nhận thức đúng của quan sát viên dùng trục quay).** Một quan sát viên dùng bộ trục quay với vận tốc góc $\omega(t)$ so với hệ trục không quay xác định được cùng các quan hệ khách quan của hiện tượng như quan sát viên tiêu biểu, nếu người ấy xác định được chuyển động của khối tâm hiện tượng so với mình và vận tốc góc $\omega(t)$. Khi đó các lực quán tính, Coriolis, ly tâm và Euler được nhận diện là thành phần thuộc biểu diễn.

Chứng minh. Biết chuyển động của khối tâm, quan sát viên tách được số hạng $-mQ^{\mathrm{T}}A$ trong (14). Biết $\omega(t)$, người ấy tính được ba số hạng cuối và đưa phương trình về dạng biểu diễn bằng hệ trục không quay. Theo Mục 5.5, cấu hình nội tại không phụ thuộc vào cách chọn trục, nên mọi quan hệ khách quan thu được là như nhau. ■

Vì sự quay là chuyển động nội tại, ω đo được từ bên trong, bằng con quay hồi chuyển hoặc con lắc Foucault. Vì vậy, điều kiện của Hệ quả 2 luôn có thể thỏa về nguyên tắc, trong giới hạn độ chính xác của phép đo.

6.6. Khi nào có thể bỏ qua sự quay

Khi quan sát viên và hiện tượng cùng ở trên một vật đang quay, có thể coi gần đúng rằng họ thuộc cùng một hệ quy chiếu nếu ảnh hưởng của sự quay nhỏ so với các tương tác của hiện tượng. Tiêu chí có thể định lượng:

$$\varepsilon = (|F_{\text{Coriolis}}| + |F_{\text{ly tâm}}| + |F_{\text{Euler}}|) \,/\, |F| \qquad (17)$$

Với Trái Đất, lực ly tâm so với trọng lực ở xích đạo là $\omega^2 R/g \approx 0{,}0034$; lực Coriolis với một vật chuyển động 10 m/s là $2\omega v/g \approx 1{,}5\times10^{-4}$; vận tốc góc của Trái Đất gần như không đổi nên lực Euler không đáng kể. Với thí nghiệm trong phòng thí nghiệm, ε rất nhỏ và có thể bỏ qua sự quay. Với con lắc Foucault, bão hay đạn tầm xa, hiệu ứng tích lũy theo thời gian hoặc quãng đường, nên không thể bỏ qua; khi đó trạng thái quay của hệ quan sát trở thành một điều kiện vật lý liên quan đến hiện tượng, và sự khác biệt không thể quy hoàn toàn cho một phép đổi biểu diễn.

6.7. Người trên Trái Đất thuộc hệ quy chiếu nào

Câu trả lời phụ thuộc vào hiện tượng được chọn.

Hiện tượng khảo sát	Chuyển động cơ sở	Chuyển động nội tại	Phát hiện được từ bên trong?
Trái Đất như một hệ vật trong hệ Mặt Trời	Quỹ đạo của khối tâm Trái Đất	Sự tự quay của Trái Đất, trong đó có chuyển động tròn của người	Quỹ đạo thì không, khi bỏ qua hiệu ứng thủy triều; sự quay thì có (Foucault)
Một thí nghiệm nhỏ trong phòng thí nghiệm	Chuyển động của phòng thí nghiệm, gần như chung cho mọi vật trong phòng	Chuyển động của các vật trong thí nghiệm	Gần như không; chỉ lộ ra qua hiệu ứng Coriolis nhỏ, theo tiêu chí ε

Hai cách nói không mâu thuẫn, vì chúng nói về hai hệ vật khác nhau. Người đứng trên mặt đất cảm thấy trọng lượng vì mặt đất đỡ họ qua một lực tiếp xúc, không truyền đều cho mọi phần cơ thể; còn lực hấp dẫn của Mặt Trời truyền gần như đều cho cả Trái Đất lẫn người, nên chuyển động trên quỹ đạo không cảm thấy được. Phần không đều của trường Mặt Trời chỉ lộ ra qua hiệu ứng thủy triều.

7. Kết luận thứ hai (a): Nguyên lý tương đối

7.1. Ba nghĩa của "bất biến"

Bất biến số trị: một đại lượng có cùng giá trị với mọi quan sát viên, như khối lượng. Bất biến hình thức: một phương trình giữ nguyên dạng sau một phép đổi hệ, như F = ma giữa các hệ Galileo. Bất biến khách quan: quan hệ vật lý mà một phương trình mô tả không thay đổi, dù giá trị các đại lượng và dạng của phương trình có thể thay đổi. Bất biến hình thức thuộc tầng biểu diễn; bất biến khách quan thuộc tầng các quan hệ của hiện tượng. Phát biểu quen thuộc được hình thức hóa theo nghĩa thứ hai, dù điều Galileo quan sát trong khoang tàu là về hiện tượng; đây chính là chỗ hai tầng bị đồng nhất. Bài viết phát biểu lại Nguyên lý tương đối theo nghĩa thứ ba và chứng minh nó.

7.2. Từ tính khách quan của hiện tượng đến hiệu lực khách quan của định luật

> **Bổ đề 1.** Xét một định luật chỉ liên hệ các đại lượng nội tại và các lực tương tác của một hiện tượng. Nếu các đại lượng ấy bất biến qua các biểu diễn tương đương của hiện tượng, thì định luật đúng trong một biểu diễn sẽ đúng trong mọi biểu diễn tương đương, tức có hiệu lực khách quan theo Định nghĩa 4.

Chứng minh. Theo Tiên đề 2, việc thay đổi quan sát viên hoặc hệ quy chiếu không thay đổi diễn biến khách quan của hiện tượng. Vì mọi đại lượng tham gia quan hệ đều giữ nguyên giá trị qua các biểu diễn tương đương, giá trị chân lý của quan hệ cũng giữ nguyên. ■

Bổ đề 1 gần như trực tiếp, nên không được trình bày như một kết quả lớn. Nó chỉ áp dụng cho những định luật được viết bằng các đại lượng nội tại. Phần có nội dung vật lý nằm ở Mệnh đề 1 và Mệnh đề 2: chúng chỉ ra rằng trong cơ học Newton, các đại lượng nội tại thực sự bất biến.

7.3. Định lý 2

> **Định lý 2 (Nguyên lý tương đối, dạng thứ nhất).** Các quan hệ vật lý khách quan chi phối một hiện tượng cơ học là như nhau với mọi quan sát viên trong mọi hệ quy chiếu. Quan sát viên dùng trục quay cũng xác định được cùng các quan hệ ấy; chỉ hình thức biểu diễn thay đổi.

Phạm vi: hệ vật kín trong cơ học cổ điển, với các lực tương tác thỏa Tiên đề 4.

Chứng minh. Theo Định nghĩa 3, các quan hệ khách quan là cấu hình nội tại, chuyển động nội tại và các tương tác. (i) Quan sát viên trong một hệ quy chiếu, quán tính hay có gia tốc: theo Mệnh đề 1, cấu hình và chuyển động nội tại như nhau; theo Tiên đề 4, các lực tương tác như nhau; theo Mệnh đề 2 và Định lý 1, quan hệ (15) đúng trong mọi hệ quy chiếu; theo Bổ đề 1, nó có hiệu lực khách quan. (ii) Quan sát viên trên một vật đang quay, dùng bộ trục quay theo vật: theo Hệ quả 2, người ấy đưa được biểu diễn của mình về biểu diễn bằng hệ trục không quay và thu được cùng các quan hệ khách quan. (iii) Những gì thay đổi giữa các quan sát viên là chuyển động cơ sở R_C' và các số hạng trong (11), (12), (14); theo Tiêu chuẩn 1 và Tiêu chuẩn 2, đó là các thành phần phụ thuộc biểu diễn. ■

Định lý 2 là nội dung toán học của Luận điểm thứ hai: khi định luật được hiểu là phát biểu về quan hệ khách quan, hiệu lực của nó không bị giới hạn vào các hệ quán tính, và cũng không bị giới hạn vào các hệ quy chiếu theo Định nghĩa 7. Nguyên lý ở đây được chứng minh trong cơ học Newton, từ Tiên đề 4. Cần nói rõ phần nào là giả thiết: Tiên đề 4 đòi hỏi lực tương tác chỉ phụ thuộc vào vị trí và vận tốc tương đối, và điều kiện này là cần thiết cho kết quả. Định nghĩa 7 chỉ nói về chuyển động của chuẩn; sự như nhau của các quan hệ khách quan được suy ra từ Mệnh đề 1, Mệnh đề 2 và Tiên đề 4. Nếu tồn tại một lực phụ thuộc vào vận tốc đối với một hệ đặc biệt, nguyên lý bị bác bỏ (Mục 11.2).

Về mặt cơ học, Mệnh đề 1 và Mệnh đề 2 là nội dung của Hệ quả V và VI trong Principia, còn bước $A_C = 0$ là Hệ quả IV [2]. Điều bài viết bổ sung là vị trí của chúng: ở Newton, chúng là những hệ quả rút ra sau các định luật; ở đây, chúng là nội dung vật lý của Nguyên lý tương đối.

8. Kết luận thứ hai (b): không phát hiện được chuyển động cơ sở

Chuyển động cơ sở của một hệ được truyền đều cho mọi phần của hệ nếu, ngoài các tương tác bên trong, mỗi vật i chỉ chịu một tác động bên ngoài có dạng $m_i G(t)$, với $G(t)$ như nhau cho mọi vật tại mỗi thời điểm. $G(t)$ có thể thay đổi cả về độ lớn lẫn hướng. Hệ chuyển động thẳng đều là trường hợp $G = 0$.

> **Định lý 3 (Nguyên lý tương đối, dạng thứ hai).** Các quan sát viên trong cùng một hệ quy chiếu không thể phát hiện chuyển động cơ sở của hệ bằng các hiện tượng diễn ra bên trong hệ, khi chuyển động ấy được truyền đều cho mọi vật của hệ.

Hệ quy chiếu ở đây là hệ gắn với quan sát viên, gồm quan sát viên và các vật đồng chuyển động cơ sở với họ (Mục 3.7), không nhất thiết là phương tiện chở quan sát viên.

Chứng minh. Gọi F_i là tổng lực tương tác bên trong lên vật i. Trong H_0, $m_i a_i = F_i + m_i G$. Theo Tiên đề 3, $\Sigma F_i = 0$; cộng mọi phương trình được $A_C = G$. Do đó $\ddot{\rho}_i = a_i - A_C = F_i/m_i$, nghĩa là:

$$m_i \ddot{\rho}_i = F_i \tag{18}$$

Phương trình (18) không chứa G và không chứa vận tốc cơ sở. Với cùng điều kiện ban đầu của chuyển động nội tại, nó cho cùng một diễn biến nội tại dù $G(t)$ bằng bao nhiêu. Theo Tiên đề 4, các lực F_i chỉ phụ thuộc vào đại lượng tương đối. Vì vậy không thí nghiệm nội tại nào phân biệt được hệ đang có chuyển động cơ sở với hệ không có. ■

Về mặt cơ học, Định lý 3 là Hệ quả VI của Newton [2], đọc theo nghĩa tức thời; trường hợp $G = 0$ là Hệ quả V. Trong khung lý thuyết của bài viết, hai hệ quả là một nguyên lý duy nhất về chuyển động cơ sở.

Định lý 3 khác Định lý 1 ở điều kiện. Định lý 1 nói về chuẩn: một chuẩn tịnh tiến có gia tốc bất kỳ vẫn là một hệ quy chiếu. Định lý 3 còn đòi hỏi chuyển động cơ sở được truyền đều. Đồng chuyển động cơ sở là điều kiện về chuyển động; truyền đều là điều kiện về cách lực tác dụng. Một hành khách ngồi trên đoàn tàu đang tăng tốc đồng chuyển động cơ sở với toa, nhưng vẫn cảm thấy gia tốc, vì gia tốc truyền tới người ấy qua lực tiếp xúc của ghế, không truyền đều cho mọi phần cơ thể (Mục 10.1).

Điều kiện "truyền đều" là thiết yếu. Nếu tác động bên ngoài không có dạng $m_i G(t)$, chẳng hạn một lực tiếp xúc chỉ tác dụng lên một phần của hệ, một trường lực không đều, hoặc sự quay mà gia tốc phụ thuộc vào vị trí (Hệ quả 1), thì vế phải của (18) chứa thêm một số hạng khác nhau cho từng vật, làm thay đổi trạng thái nội tại, nên phát hiện được. Đây là lý do Định lý 3 không áp dụng cho sự quay.

9. Kết luận thứ hai (c): không có hệ tiêu biểu chung

> **Hệ quả 3 (Quan sát viên tiêu biểu biểu diễn trực tiếp hiện tượng).** Với một hệ vật kín, trong biểu diễn của quan sát viên tiêu biểu: vị trí của mỗi vật trùng với vị trí nội tại, $r_i = \rho_i$;

> tổng động lượng bằng không; và phương trình chuyển động không chứa số hạng quán tính nào, $m_i a_i = F_i$.

Chứng minh. Khi chuyển động cơ sở của quan sát viên trùng với R_C, ta có $r_i = \rho_i$. Theo Mục 3.8, $\Sigma m_i \dot{\rho}_i = 0$, nên tổng động lượng bằng không. Theo Mệnh đề 2, $m_i \ddot{\rho}_i = F_i$, tức $m_i a_i = F_i$. ■

Mọi quan sát viên khác có biểu diễn $r_i' = R_C' + \rho_i$. Họ vẫn xác định được các quan hệ khách quan, nhưng phải tách R_C' ra trước. Quan sát viên tiêu biểu không phải người duy nhất nhận thức đúng hiện tượng; đó là quan sát viên mà biểu diễn trùng với các quan hệ khách quan, không cần quy đổi.

> **Định nghĩa 9 (Hệ quy chiếu tuyệt đối).** Một hệ quy chiếu là tuyệt đối nếu chuyển động cơ sở của nó được xác định độc lập với mọi hiện tượng, và các quan hệ khách quan của mọi hiện tượng chỉ được biểu diễn trực tiếp khi quy chiếu vào nó.
> **Định lý 4 (Không có hệ tiêu biểu chung).** Không tồn tại một hệ quy chiếu tiêu biểu chung cho mọi hiện tượng: mỗi hiện tượng tự xác định chuẩn để biểu diễn nó trực tiếp, qua chuyển động chung của chính các vật cấu thành nó. Vì vậy, về mặt chuyển động cơ sở, không có hệ quy chiếu nào là tuyệt đối theo Định nghĩa 9.

Chứng minh. (i) Theo Hệ quả 3, các quan hệ khách quan của một hiện tượng được biểu diễn trực tiếp trong hệ có chuyển động cơ sở trùng với khối tâm của chính hiện tượng ấy. Chuẩn này được xác định bởi các vật cấu thành hiện tượng. Hai hiện tượng mà khối tâm có gia tốc tương đối khác không, chẳng hạn một thí nghiệm trên Trái Đất và chuyển động của hệ Mặt Trời, có hai hệ tiêu biểu khác nhau; vì vậy không có một hệ tiêu biểu chung. (ii) Theo Định lý 2, các quan hệ khách quan xác định được từ mọi hệ quy chiếu, trực tiếp hoặc qua quy đổi, nên không hệ nào là điều kiện cần cho nhận thức đúng. (iii) Theo Định lý 3, không thí nghiệm nội tại nào phân biệt được các chuyển động cơ sở được truyền đều, nên không có cách vật lý nào nhận diện một hệ có chuyển động cơ sở tuyệt đối. ■

Định nghĩa 9 hẹp hơn khái niệm không gian tuyệt đối của Newton: không gian tuyệt đối không cần là hệ khối tâm chung của mọi hiện tượng. Nội dung chính của Định lý 4 vì vậy là phần (i): không có hệ tiêu biểu chung. Định lý 4 cũng không áp dụng cho hệ trục không quay. Mọi hệ quy chiếu trong bài viết đều dùng cùng hệ trục không quay để so sánh các phương, và hệ trục này chưa được quy về quan hệ giữa các vật (Mục 12). Vì vậy, kết luận của Định lý 4 chỉ nói về chuyển động cơ sở; nó không khẳng định rằng mọi yếu tố tuyệt đối đã bị loại khỏi cơ học.

Đối với Newton, vai trò vật lý của không gian tuyệt đối là làm hệ quy chiếu tuyệt đối cho chuyển động. Định lý 4 cho thấy vai trò ấy không cần thiết đối với chuyển động cơ sở. Bài viết không chứng minh rằng không gian tuyệt đối không tồn tại; nhưng khi nó không còn vai trò nào trong mô tả chuyển động cơ sở, không có lý do vật lý để thừa nhận nó như một thực thể, và lập trường ở Cơ sở 4 được củng cố.

10. Ba hiện tượng cụ thể

10.1. Quả bóng trong đoàn tàu đang tăng tốc

Một người ngồi trong đoàn tàu đang tăng tốc thả một quả bóng; so với người ấy, quả bóng trôi về phía sau. Người tựa vào ghế nên tiếp tục tăng tốc cùng toa; quả bóng khi được thả thì không còn nhận gia tốc của toa. Từ lúc đó, hai bên không còn chung một chuyển động cơ sở. Sự trôi về phía sau là hiệu của hai chuyển động cơ sở, xuất hiện trong biểu diễn của người ngồi trên tàu dưới dạng F_{in}; theo hai tiêu chuẩn, nó thuộc về biểu diễn. Người ngồi trên tàu cùng toa tàu vẫn tạo thành một hệ quy chiếu theo Định nghĩa 7, và định luật vẫn có hiệu lực đối với họ: khi tách F_{in}, họ thu được đúng quan hệ (15). Điều không được thỏa là điều kiện truyền đều của Định lý 3: người cảm thấy lưng bị ép vào ghế vì gia tốc được truyền qua lực tiếp xúc, không đều cho mọi phần cơ thể.

10.2. Thang máy rơi tự do

Trong thang máy rơi tự do, trọng lực tác dụng lên mỗi vật có dạng $m_i g$, đúng điều kiện truyền đều của Định lý 3 với $G = g$. Trong giới hạn trường hấp dẫn đều, không thí nghiệm cơ học nào bên trong phát hiện được gia tốc của thang máy. Trái Đất trên quỹ đạo quanh Mặt Trời là cùng trường hợp. Đây là ví dụ trực tiếp của Luận điểm thứ nhất: một hệ có gia tốc thỏa Nguyên lý tương đối.

Trọng lực là một tương tác thật, nhưng ở tầng chuyển động nội tại nó không phân biệt được với một thành phần phụ thuộc biểu diễn, nên Tiêu chuẩn 1 không tách được hai trường hợp. Tiêu chuẩn 2 thì tách được: Trái Đất kéo thang máy và thang máy kéo Trái Đất với lực bằng và ngược chiều, nên trọng lực có đối ứng; lực quán tính trong đoàn tàu thì không. Ngoài ra, một trường hấp dẫn thật không đều tuyệt đối, nên khi thang máy đủ lớn, hiệu ứng thủy triều xuất hiện trong chuyển động nội tại; một chuyển động cơ sở không bao giờ tạo ra hiệu ứng này. Sự tương đương giữa trọng lực đều và gia tốc là một tính chất cục bộ của biểu diễn, không phải sự đồng nhất của các hiện tượng.

10.3. Cái xô của Newton và con lắc Foucault

Newton làm quay một xô nước [2]: dần dần nước quay theo xô và mặt nước lõm xuống. Newton dùng thí nghiệm này để bảo vệ không gian tuyệt đối. Trong khung lý thuyết của bài viết, đây là trường hợp b của Mục 6.5: sự quay của nước là chuyển động nội tại của hiện tượng (Hệ quả 1), và mặt nước lõm là cấu hình nội tại, như nhau trong mọi hệ tọa độ. Sự quay phát hiện được vì nó là chuyển động nội tại, không phải vì tồn tại một hệ quy chiếu tuyệt đối.

Cùng một Trái Đất có hai chuyển động thuộc hai loại khác nhau (Mục 6.7). Chuyển động trên quỹ đạo quanh Mặt Trời là chuyển động cơ sở và, khi bỏ qua hiệu ứng thủy triều, không phát hiện được từ bên trong. Sự tự quay là chuyển động nội tại và phát hiện được bằng con lắc Foucault, so với hệ trục không quay.

11. Phép biến đổi Galileo và Nguyên lý tương đối trong cơ học cổ điển

11.1. Kết luận thứ ba: phép biến đổi Galileo thuộc tầng biểu diễn

Trong cách trình bày quen thuộc, phép biến đổi Galileo là phép biến đổi mà các định luật phải giữ nguyên dạng dưới nó, và giới hạn của nó trở thành giới hạn của nguyên lý: chỉ các hệ liên hệ với nhau bằng phép Galileo mới được coi là tương đương. Với sự phân biệt giữa chuyển động cơ sở và chuyển động nội tại, địa vị của phép biến đổi này được xác định rõ.

> **Định lý 5 (Phép biến đổi Galileo thuộc tầng biểu diễn).** Xét phép biến đổi Galileo, $r' = r - R_0 - Vt$, $t' = t$, dạng mở rộng $r' = r - R(t)$ với $R(t)$ bất kỳ, và phép quay trục (13). Khi đó: (i) các quan hệ khách quan của hiện tượng (Định nghĩa 3), gồm cấu hình nội tại, chuyển động nội tại và các lực tương tác, giữ nguyên; (ii) mọi đại lượng thay đổi, gồm vị trí, vận tốc, động lượng toàn phần, chuyển động cơ sở, các lực quán tính và các số hạng Coriolis, ly tâm, Euler, đều là thành phần phụ thuộc biểu diễn theo Tiêu chuẩn 1 và Tiêu chuẩn 2. Vì vậy các phép biến đổi này thuộc tầng biểu diễn: chúng không mô tả một sự thay đổi của hiện tượng, mà mô tả việc cùng một hiện tượng được biểu diễn đối với một chuẩn khác.

Chứng minh. (i) Theo (8) và Mệnh đề 1, $R_C' = R_C - R$ và $\rho_i' = \rho_i$, nên chuyển động nội tại và cấu hình nội tại giữ nguyên; vì vị trí và vận tốc tương đối của các vật không đổi, theo Tiên đề 4 các lực tương tác không đổi. Phép Galileo là trường hợp riêng $R(t) = R_0 + Vt$. Với phép quay trục, theo Mục 5.5, khoảng cách và góc giữa các vật không đổi, nên cấu hình nội tại giữ nguyên. (ii) Theo (8)–(12), toàn bộ tác động của phép tịnh tiến nằm ở chuyển động cơ sở, vị trí, vận tốc và động lượng toàn phần, và ở lực quán tính $F_{in} = -mA$; theo (14), phép quay trục sinh thêm các số hạng Coriolis, ly tâm và Euler. Các thành phần này xuất hiện chỉ do đổi chuẩn hay hệ tọa độ, trong khi các vật và tương tác không đổi, và không có đối ứng; theo Tiêu chuẩn 1 và Tiêu chuẩn 2, chúng thuộc biểu diễn. ■

Định lý 5 nói về phần không gian của phép biến đổi. Thành phần $t' = t$ không được suy ra trong bài viết: nó không làm thay đổi đại lượng nào, mà khẳng định rằng khoảng thời gian giữa hai sự kiện, một quan hệ khách quan giữa các quá trình vật chất, là như nhau trong mọi hệ quy chiếu. Đây là giả thiết về thời gian chung của cơ học Newton (Mục 4.1), không phải kết luận của Định lý 5.

Về ý nghĩa, phép biến đổi Galileo là công cụ để khắc phục tính phụ thuộc chuẩn của biểu diễn. Mỗi quan sát viên chỉ biểu diễn được hiện tượng đối với chuẩn của chính mình; phép biến đổi cho phép chuyển biểu diễn ấy sang biểu diễn đối với một chuẩn khác, khi biết chuyển động tương đối giữa hai chuẩn. Những gì giữ nguyên qua phép biến đổi là các quan hệ khách quan của hiện tượng (Tiêu chuẩn 1). Vì vậy phép biến đổi không chỉ thuộc tầng biểu diễn, mà còn là phương tiện để nhận ra tầng hiện tượng qua các biểu diễn khác nhau. Những gì thay đổi dưới các phép biến đổi này, gồm vị trí, vận tốc, động lượng toàn phần, dạng của phương trình toàn phần khi $A \neq 0$, các lực quán tính, Coriolis, ly tâm và Euler, đều là thành phần biểu diễn, đúng như Bảng 4.3. Phép biến đổi không mô tả một sự thay đổi của hiện tượng; nó mô tả việc cùng một hiện tượng được biểu diễn đối với một chuyển động cơ sở khác. Vì vậy định luật, hiểu là phát biểu về quan hệ khách quan, không thể mất hiệu lực khi đổi hệ: phép biến đổi không chạm tới tầng mà quan hệ ấy thuộc về.

Từ đây có thể thấy Luận điểm thứ hai từ phía phép biến đổi. Khi A = 0, cả phương trình chuyển động nội tại lẫn phương trình cho chuyển động toàn phần đều giữ nguyên dạng: bất biến khách quan và bất biến hình thức trùng nhau. Khi A ≠ 0, phương trình cho chuyển động toàn phần đổi dạng, nhưng quan hệ nội tại thì không. Giới hạn nguyên lý vào các hệ quán tính tức là lấy một tính chất của công cụ biểu diễn, sự giữ dạng của phương trình toàn phần dưới phép Galileo, làm ranh giới hiệu lực của định luật. Khi hai tầng được phân biệt, giới hạn ấy không còn lý do.

11.2. Nguyên lý tương đối trong cơ học cổ điển

	Chuyển động cơ sở	**Chuyển động nội tại**
Thuộc tầng	Biểu diễn	Hiện tượng
Điều kiện	Mọi phần của hệ có chung một chuyển động	Các phần có chuyển động khác nhau
Ví dụ	Đoàn tàu tăng tốc; thang máy rơi tự do; Trái Đất trên quỹ đạo	Va chạm, dao động, biến dạng; sự quay
Đặc trưng hệ quy chiếu	Có (Định nghĩa 7, Định lý 1)	Không (Hệ quả 1)
Dưới phép biến đổi Galileo	Thay đổi	Giữ nguyên (Định lý 5)
Phát hiện được từ bên trong	Không, nếu truyền đều (Định lý 3)	Có

Tổng hợp các kết quả, Nguyên lý tương đối trong cơ học cổ điển có hai dạng phát biểu.

> **Nguyên lý tương đối trong cơ học cổ điển.** (1) Các quan hệ vật lý khách quan chi phối một hiện tượng cơ học là như nhau với mọi quan sát viên trong mọi hệ quy chiếu. (2) Các quan sát viên trong cùng một hệ quy chiếu không thể phát hiện chuyển động cơ sở của hệ bằng các hiện tượng diễn ra bên trong hệ, khi chuyển động ấy được truyền đều cho mọi vật của hệ.

Ở đây, hệ quy chiếu là hệ gắn với quan sát viên, gồm quan sát viên và các vật đồng chuyển động cơ sở với họ, không nhất thiết là phương tiện chở quan sát viên. Dạng thứ nhất là Định lý 2, dạng thứ hai là Định lý 3. Lớp hệ quy chiếu được xác định bởi Định nghĩa 7 và được biện minh bởi Định lý 1; việc không có hệ tiêu biểu chung cho mọi hiện tượng là Định lý 4. Nguyên lý tương đối Galileo là trường hợp riêng khi A = 0.

Nguyên lý có nội dung kiểm tra được. Một nguyên lý chỉ đòi hỏi các phương trình viết được trong mọi hệ quy chiếu thì không có nội dung vật lý, vì thêm đủ số hạng thì phương trình nào cũng thỏa; đây là phản biện mà Kretschmann đã nêu đối với nguyên lý tương đối tổng quát. Nguyên lý của bài viết chỉ ra một đại lượng xác định, chuyển động nội tại so với khối tâm, và một phương trình xác định, (15). Nếu tồn tại một lực tương tác phụ thuộc vào vận tốc của vật đối với một hệ đặc biệt, (15) sẽ thay đổi khi đổi hệ, và nguyên lý bị bác bỏ.

12. Phạm vi và các vấn đề còn mở

- **Phạm vi của chứng minh.** Nguyên lý tương đối được chứng minh trong cơ học cổ điển, dựa trên Tiên đề 4. Chứng minh không tự động mở rộng ra ngoài phạm vi ấy; liệu các quan hệ khách quan có như nhau trong mọi hệ quy chiếu đối với những tương tác khác hay không là vấn đề vật lý cần khảo sát riêng.
- **Nguồn gốc của hệ trục không quay.** Đây là yếu tố duy nhất của mô hình chưa quy được về quan hệ giữa các vật; nó đi vào lý thuyết qua Định nghĩa 5 và Tiên đề 4.
- **Tính gần đúng của điều kiện truyền đều.** Trọng lực thực không đều tuyệt đối, nên điều kiện của Định lý 3 chỉ được thỏa gần đúng, trong giới hạn của hiệu ứng thủy triều. Thang máy rơi tự do và Trái Đất trên quỹ đạo vì vậy chỉ thỏa Định lý 3 gần đúng, theo cùng kiểu tiêu chí dùng cho sự quay ở Mục 6.6.
- **Chuẩn vật chất cứng.** Định nghĩa 7 đòi hỏi chuẩn có cấu hình nội tại không đổi; chiều ($\Rightarrow$) của Định lý 1 dựa vào giả thiết này. Chuẩn biến dạng chưa được xét.
- **Trọng lực ngoài trường hợp trường đều.** Mục 10.2 tách trọng lực đều khỏi lực quán tính bằng Tiêu chuẩn 2 và hiệu ứng thủy triều. Điều còn mở là cách giải thích này áp dụng được đến đâu cho các trường hấp dẫn mạnh hoặc biến đổi nhanh; vấn đề này nằm ở ranh giới với thuyết tương đối rộng.
- **Hệ không kín tổng quát.** Với một tổng ngoại lực F_{ext} bất kỳ, ta có $m_i\ddot{\rho}_i = F_i - (m_i/M)F_{ext}$ cộng với phần ngoại lực tác dụng riêng lên vật i. Trường hợp này cần được xử lý đầy đủ.
- **Phạm vi của các lực.** Tiên đề 4 loại trừ các lực phụ thuộc vào vận tốc tuyệt đối. Lực điện từ giữa các điện tích chuyển động không thuộc lớp này; mở rộng sang nó nằm ngoài cơ học cổ điển của bài viết.
- **Thời gian chung.** Mọi kết quả của bài viết dùng giả thiết $t' = t$ của cơ học Newton. Việc phân biệt hiện tượng và biểu diễn được áp dụng như thế nào cho các phép đo thời gian khi giả thiết này không còn đúng là một vấn đề nằm ngoài phạm vi bài viết.

13. Kết luận

Bài viết bắt đầu từ hai luận điểm. Thứ nhất, Hệ quả VI của Newton cho thấy tồn tại những hệ quy chiếu có gia tốc vẫn thỏa Nguyên lý tương đối, nên phát biểu quen thuộc, giới hạn vào các hệ quán tính, là chưa đầy đủ. Thứ hai, việc cho rằng định luật chỉ có hiệu lực trong hệ quán tính là sai lầm, bắt nguồn từ việc không phân biệt tầng biểu diễn với tầng hiện tượng: ranh giới của nguyên lý đã được vạch bằng hình thức của phương trình chuyển động toàn phần, trong khi nội dung của định luật là các quan hệ khách quan chi phối hiện tượng. Mục 2 xác lập sự phân biệt ấy trên nền tảng nhận thức luận.

Công cụ để đưa sự phân biệt vào cơ học là việc tách chuyển động thành chuyển động nội tại, thuộc về hiện tượng, và chuyển động cơ sở, đối với hiện tượng đang xét thuộc về biểu diễn. Từ đó rút ra ba kết luận. Thứ nhất, hệ quy chiếu được định nghĩa bằng chuyển động cơ sở, và Định lý 1 chứng minh rằng đây là lớp chuẩn duy nhất mà chuyển động của chúng tách được hoàn toàn khỏi hiện tượng; sự quay vì vậy là chuyển động nội tại. Thứ hai, Nguyên lý tương

đối được chứng minh ở dạng tổng quát trong cơ học Newton, từ Tiên đề 4: các quan hệ khách quan là như nhau với mọi quan sát viên trong mọi hệ quy chiếu, kể cả quan sát viên dùng trục quay (Định lý 2); chuyển động cơ sở được truyền đều không phát hiện được từ bên trong (Định lý 3); và không có hệ quy chiếu tiêu biểu chung cho mọi hiện tượng (Định lý 4). Thứ ba, phép biến đổi Galileo và dạng mở rộng của nó chỉ tác động lên chuyển động cơ sở, còn phép quay trục giữ nguyên cấu hình nội tại; các phép biến đổi này thuộc tầng biểu diễn (Định lý 5), và là công cụ để nhận ra tầng hiện tượng qua các biểu diễn khác nhau.

Khung lý thuyết tái tạo đúng cơ học Newton, đặt các Hệ quả IV, V và VI, thí nghiệm cái xô và nguyên lý tương đương ở mức cục bộ vào một cấu trúc khái niệm thống nhất. Yếu tố không quan hệ duy nhất còn lại là hệ trục không quay; xác lập nguồn gốc vật chất của nó là bước tiếp theo của chương trình nghiên cứu.

Tài liệu tham khảo

[1] Galileo Galilei, Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, Florence, 1632.

[2] I. Newton, Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, London, 1687.

[3] I. Kant, Kritik der reinen Vernunft, Riga, 1781 (A), 1787 (B). Bản tiếng Việt: Phê phán lý tính thuần túy, Bùi Văn Nam Sơn dịch, [nhà xuất bản, năm].

[4] S. Saunders, “Rethinking Newton’s Principia”, Philosophy of Science 80 (2013), 22–48.

[5] A. Einstein, “Zur Elektrodynamik bewegter Körper”, Annalen der Physik 17 (1905).

[6] A. Einstein, “Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen”, Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik 4 (1907), 411–462.

[7] A. Einstein, “Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie”, Annalen der Physik 49 (1916).