

# *Lược thuật về thuyết Tương Đối*

## **Phần I - Tương Đối Hẹp**

*Phạm Xuân Yêm*

Ai trong chúng ta đi máy bay cửa sổ đóng kín, sau khi máy đã vút lên cao để bay đều đều, mà không cảm thấy như vẫn ngồi yên, đâu có nhận ra mình di chuyển với vận tốc khoảng ngàn cây số trong một giờ? Hơn bốn trăm năm trước đây Galileo Galilei cũng đưa ra một thí dụ tương tự, mở đầu cho nguyên lý tương đối mang tên ông: trong hầm kín của một chiếc tàu thủy di chuyển thẳng và đều đặn (vector vận tốc cố định, không thay đổi với thời gian), ta hãy quan sát những con bướm lượn và những giọt nước tí tách rơi. Nay tàu đứng yên, nhịp độ bướm bay và nước rơi vẫn như khi tàu di chuyển, chẳng có gì thay đổi. Rồi tàu lại di chuyển nhưng với vận tốc và chiều hướng cố định khác, bướm vẫn lượn và nước vẫn rơi hệt như trước. Những định luật vật lý miêu tả sự vận hành của các hiện tượng tự nhiên (bướm lượn, nước rơi trong mấy thí dụ trên) không phụ thuộc vào vận tốc di chuyển thẳng và đều của hệ quy chiếu trong đó xảy ra các hiện tượng vật lý. Người ở trong tàu kín mít nếu chỉ quan sát đo lường những hiện tượng trong tàu mà không tiếp xúc với bên ngoài để so sánh thì chẳng sao biết là tàu đứng hay đi, và đi với vận tốc nào, chiều hướng nào. Nói cách khác, di động đều đặn chỉ là chuyện tương đối, chẳng sao phân biệt bên hay tàu cái nào đứng yên, cái nào chuyển vận.

Nguyên lý tương đối được Galilei tóm tắt trong một câu ngắn gọn “di chuyển đều đặn cũng như không”, hàm ý là những định luật cơ học không thay đổi dạng trong các hệ quy chiếu quán tính<sup>1</sup>. Thí dụ của hai hệ quy chiếu quán tính: hệ  $K$  bất động còn so với  $K$  thì hệ  $K'$  di chuyển đều đặn với vận tốc  $v$  cố định. Vì chuyển động của một vật (kể cả ánh sáng) là sự thay đổi vị trí không gian của vật đó theo thời gian, nên ta gọi tọa độ của đa tạp không- thời gian bốn chiều trong  $K$  là  $x, y, z, t$  (tọa độ của không gian ba chiều là  $x, y, z$  và của thời gian là  $t$ ) còn tọa độ trong  $K'$  là  $x', y', z', t'$ . Hai đa tạp đó có tung độ là trục thời gian  $Ot$  ( $O't'$ ) và hoành độ là ba trục không gian  $Ox, Oy, Oz$  ( $O'x', O'y', O'z'$ ).

Phương trình  $f(x,y,z,t)$  diễn tả một sự kiện vật lý trong hệ quy chiếu  $K$  phải bất biến khi ta chuyển sang hệ quy chiếu  $K'$ :  $f(x, y, z, t) = f(x', y', z', t')$ , không có hệ quy chiếu quán tính nào đặc thù,  $K$  hay  $K'$  đều tương đương. Khi nguyên lý tương đối áp dụng cho hiện tượng điện-từ để diễn tả tính bất biến của vận tốc ánh sáng  $c$  trong mọi hệ quy chiếu quán tính thì hàm  $f(x, y, z, t)$  mang dạng  $x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2$ . Lúc nào và ở đâu cũng tồn tại một đại lượng bất biến  $s^2 \equiv x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2$ , vì  $c = r/t$  với  $r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$  nên giá trị bằng số của  $s^2$  là 0.

Đồ thị của phương trình  $s^2 \equiv x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2$  trong đa tạp bốn chiều không-thời gian là một cái nón ánh sáng<sup>2</sup> (light cone) và biểu thức  $x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2$  đóng vai trò cực kỳ quan trọng trong sự khám phá thuyết tương đối (hẹp và rộng) như ta sẽ thấy.

## A- Không cần ether để truyền đi sóng điện-từ

Khởi đầu là một hiện tượng mà Albert Michelson và Edward Morley phát hiện năm 1887, nó trái ngược với trực giác và định kiến của mọi người trước năm thần kỳ 1905 (năm Albert Einstein sáng tạo ra thuyết tương đối hẹp). Như sóng nước và sóng âm thanh là dạng dao động tuần hoàn của nước và của không khí, theo thứ tự những loại sóng đó cần nước và không khí để truyền đi, do đó mọi người cho rằng phải có một chất liệu nào đó (tạm gọi là ether) để truyền ánh sáng. Vì ánh sáng đến với ta từ các thiên thể xa xăm, ether phải trải rộng tràn ngập khắp vũ trụ không gian, đâu và lúc nào cũng có, như vậy ether được coi là một hệ quy chiếu tuyệt đối bất động.

Lấy trường hợp vectơ vận tốc  $\mathbf{v}$  song song cùng chiều với hai trục  $Ox, O'x'$  như một thí dụ cụ thể của hai hệ quy chiếu quán tính đơn giản nhất là  $J$  (bến đứng yên) và  $J'$  (tàu chuyển động với vận tốc  $\mathbf{v}$  cố định). Nay ta hãy thay bến bằng ether và tàu bằng trái đất di chuyển trong ether. Theo cơ học cổ điển của Newton, nếu vận tốc ánh sáng ở trên tàu là  $c$  thì đối với người trên bến đứng yên, vận tốc ánh sáng ở trên tàu phải là  $c \pm v$  tùy theo ánh sáng phát ra song song cùng hay ngược chiều với tàu (luật cộng trừ vận tốc). Cũng vậy, người trên tàu khi đo vận tốc ánh sáng cũng thấy vận tốc đó *phải khác* cái vận tốc ánh sáng truyền đi trên bến, sự khác biệt đó sẽ cho ta vectơ vận tốc  $\mathbf{v}$  của tàu đối với bến. Michelson và Morley tìm kiếm vận tốc  $\mathbf{v}$  của làn gió ether thổi so với trái đất coi như đứng yên bằng cách đo lường sự khác biệt của khoảng cách mà ánh sáng truyền đi theo hai chiều thẳng góc với nhau (song song với  $\mathbf{v}$  và thẳng góc với nó như một thí dụ điển hình). Khoảng cách khác biệt đó, nếu có, sẽ được nhận diện bằng hiện tượng giao thoa ánh sáng, nhưng sau bao lần tìm kiếm hai vị chẳng thấy chút khác biệt nào và như vậy vận tốc ánh sáng không thay đổi trong bất kỳ chiều hướng nào nó phát ra trên trái đất, do đó chẳng sao phát hiện nổi ether.

Dùng kết quả thực nghiệm này, Einstein bèn chấp nhận *nguyên lý tương đối* áp dụng cho hiện tượng điện-từ như một tiên đề, theo đó vận tốc ánh sáng  $c$  bao giờ cũng bằng nhau trong tất cả các hệ quy chiếu quán tính, chúng đứng yên hay chuyển động đều đặn cũng như nhau. Như vậy hệ quy chiếu tuyệt đối bất động (chất liệu ether tràn ngập vũ trụ để cho ánh sáng truyền đi) không còn cần thiết nữa, ánh sáng có thể truyền đi trong chân không với vận tốc khoảng 300 ngàn km/s. Dùng tiên đề này, ông suy diễn những hệ quả và tiên đoán những hiện tượng kiểm soát đo lường được. Tiếp cận cách tân như vậy khởi đầu từ Galilei - trong đó suy luận, phê phán bằng lý tính và kiểm chứng bằng thực nghiệm đóng vai trò chủ đạo - là bài học sâu xa cho hậu thế và tiếp tục làm kim chỉ nam cho tiến trình nghiên cứu sáng tạo của khoa học ngày nay. Phương pháp của Einstein khác hẳn phương pháp của Hendrik Lorentz và Henri Poincaré vì hai vị (và nhiều nhà vật lý khác) đều phải đề xuất một vài giả thuyết nào đó về vật chất và lực tác động lên chúng để tìm cách chứng minh ngược lại là hiện tượng điện-từ phải tuân thủ *nguyên lý tương đối*. Một bên chấp nhận kết quả thực nghiệm của Michelson và Morley như một tiên đề không cần bàn cãi, còn một bên thì lại tìm cách chứng minh tiên đề này bằng một vài giả thuyết trong cơ học hay/và trong điện từ.

Hai cách tiếp cận tuy trái ngược nhưng đều cùng triển khai một phương trình diễn tả tính bất biến của vận tốc ánh sáng trong các hệ quy chiếu quán tính:  $c = r/t = r'/t'$  với  $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$ ,  $r'^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2$

$$s^2 \equiv x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 - (ct')^2.$$

Các tọa độ bốn chiều  $(x, y, z, t)$  và  $(x', y', z', t')$  của hai hệ quy chiếu quán tính phải liên kết, hoán chuyển giữa chúng với nhau như thế nào để sao cho đại lượng  $s^2$  bất biến.

### **B- Hoán chuyển Lorentz của không-thời gian và Cơ học tương đối tính**

Trong thí dụ trên về hai hệ quy chiếu đơn giản nhất  $J$  và  $J'$  (vận tốc  $\mathbf{v}$  và trục  $O'x'$  của  $J'$  nằm song song cùng chiều với trục  $Ox$  của  $J$ ) thì đẳng thức  $s^2$  thu hẹp thành  $x^2 - (ct)^2 = x'^2 - (ct')^2$  vì  $y = y'$  và  $z = z'$ . Để cho  $x^2 - (ct)^2 = x'^2 - (ct')^2$  thì sự hoán chuyển giữa các tọa độ  $(x', ct')$  và  $(x, ct)$  phải là:

$$x' = \gamma(x - vt) \quad \text{và} \quad t' = \gamma(t - xv/c^2) \quad \text{với} \quad \gamma \equiv 1/\sqrt{1 - (v/c)^2} \quad (\text{I})$$

Ngược lại, hệ quy chiếu  $J$  chạy với vận tốc  $-\mathbf{v}$  so với hệ quy chiếu  $J'$  và như vậy ta có :

$$x = \gamma(x' + vt') \quad \text{và} \quad t = \gamma(t' + x'v/c^2). \quad (\text{I})$$

Sự hoán chuyển không gian và thời gian hỗn hợp nhau như vậy trong hai công thức trên thường được gọi là phép hoán chuyển Lorentz<sup>3</sup> đặc biệt. Dùng phép hoán chuyển này, ta kiểm chứng dễ dàng là khi  $x = ct$  thì tự động ta cũng có  $x' = ct'$  kèm theo, vận tốc ánh sáng - đo lường trong các hệ quy chiếu quán tính di chuyển với bất kỳ vectơ vận tốc cố định  $\mathbf{v}$  nào - đều giống hệt nhau và bằng  $c$ .

Cũng trong hai hệ quy chiếu  $J$  và  $J'$  này, cơ học cổ điển (với phép hoán chuyển tọa độ không-thời gian của Galilei theo đó thời gian là phổ quát và không gian chẳng liên hệ với thời gian) cho ta  $x' = x - vt$ ,  $y' = y$ ,  $z' = z$ ,  $t' = t$ . Như vậy  $x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2$  và  $x'^2 + y'^2 + z'^2 - (ct')^2$  khác nhau, và  $s^2$  không bất biến đã làm đau đầu bao nhà khoa học vì không sao giải thích nổi mâu thuẫn giữa cơ học cổ điển và thực nghiệm của Michelson và Morley.

Einstein giải quyết mâu thuẫn nói trên như thế nào? Trước hết ông nhận xét là *tính đồng thời* của hai (hay nhiều) sự kiện phải phụ thuộc vào hệ quy chiếu, điều mà cơ học cổ điển Newton bỏ qua không xét kỹ. Thực thể, nếu định nghĩa tính đồng thời ở hai điểm xa nhau A và B trên trục  $Ox$  là tín hiệu ánh sáng phát ra từ A và từ B phải đi tới trung điểm M của AB cùng một lúc, ta thấy ngay cái đồng thời của sự kiện xảy ra đối với quan sát viên ngồi ở trên bến M phải khác cái đồng thời xảy ra ở trên tàu (chạy với vận tốc  $\mathbf{v}$  song song với **AB**). Thực thể, tín hiệu ánh sáng phát ra từ B để tới M (nay ngồi trên tàu) phải đến trước tín hiệu ánh sáng phát ra từ A, vì ánh sáng chạy theo B và bỏ lại A đằng sau. Vì vận tốc ánh sáng  $c$  tuy rất lớn nhưng không vô hạn, nó cần thời gian để gửi tín hiệu nên cái đồng thời của người đứng yên phải khác cái đồng thời của người di động. Khi phân tích sâu sắc khái niệm về thời gian, Einstein

nhận ra vai trò cực kỳ quan trọng của nó trong cách giải quyết mâu thuẫn, đó là một bước vượt (den Schritt) mà Einstein những năm cuối đời kể lại với Abraham Pais.

Thêm bước nữa, sáng tạo độc đáo của Einstein là ông nhận thấy luật cộng trừ vận tốc trong cơ học Newton thực ra chỉ là một định kiến vì nó dựa vào một giả thuyết chưa bao giờ được kiểm chứng bằng thực nghiệm. Giả thuyết đó cho rằng một mét chiều dài không gian và một giây thời gian của đồng hồ đo trên tàu cũng bằng một mét và một giây đồng hồ đo trên bến. Trước Einstein, chẳng ai đặt câu hỏi là đối với những vật chuyển động thì thước đo độ dài không gian và nhịp độ tích tắc của đồng hồ đếm thời gian có thay đổi hay không, và ông chứng minh là thực sự chúng phải thay đổi ra sao.

Nếu  $w$  là vận tốc đo trên tàu của bất kỳ một vật nào, còn  $v$  là vận tốc của tàu chạy so với bến đứng yên, thì vận tốc của vật đó đo trên bến mà cơ học cổ điển đương nhiên chấp nhận phải là  $w \pm v$ . Einstein nhận thấy luật này chỉ gần đúng và ông tìm ra công thức  $(w \pm v)/(1 \pm wv/c^2)$  thay thế nó<sup>4</sup>. Khi vật đó là ánh sáng ( $w = c$ ), kỳ thú thay công thức  $(c \pm v)/(1 \pm cv/c^2)$  không tùy thuộc vào  $v$  nữa mà lúc nào cũng bằng  $c$ , giải thích thoả đáng thực nghiệm của Michelson và Morley. Dù ta bay nhanh đến đâu chẳng nữa, thậm chí bay với  $v = 99,99\% c$ , ta vẫn không sao đuổi kịp ánh sáng vì nó vẫn chạy xa ta với vận tốc  $c$  như khi ta đứng yên ( $v = 0$ )!

Điểm then chốt là Lorentz, Poincaré, Einstein mỗi người mỗi cách khác nhau đã tìm ra công thức (I) và đặc biệt hệ số  $\gamma \equiv 1/\sqrt{1 - (v^2/c^2)} \geq 1$ , chia khoá mở đường cho cơ học *tương đối tính*<sup>5</sup> thay thế cơ học cổ điển. Phép hoán chuyển toạ độ  $t' = t$ ,  $x' = x - vt$  của Galilei trong cơ học cổ điển chỉ là dạng xấp xỉ của phép hoán chuyển Lorentz  $t' = \gamma(t - xv/c^2)$ ,  $x' = \gamma(x - vt)$  trong cơ học tương đối tính, khi  $v/c \ll 1$  hay  $c \rightarrow \infty$ ,  $\gamma \rightarrow 1$ . Tuy tất cả các vị đều cảm nhận thấy là phép hoán chuyển Lorentz phải đóng vai trò quan trọng trong cách giải thích thực nghiệm Michelson và Morley, nhưng chỉ riêng Einstein đã thành công vì ông nhận thức được bản chất của thời gian là không phổ quát mà co dãn, trong khi các vị khác vẫn tiếp tục suy luận với một thời gian duy nhất, tuyệt đối của Newton.

Thông điệp cách mạng của Einstein so với cơ học cổ điển Newton, là chẳng có một thời gian tuyệt đối và phổ quát trong một không gian biệt lập với thời gian, chúng mật thiết liên đới, mỗi thời-điểm phải gắn quyện với mỗi không-điểm trong một thực tại bốn chiều sau này gọi là thế giới Minkowski để diễn tả sự vận hành của các sự kiện vật lý, cái *lúc nào* phải kèm theo cái *ở đâu*. Sân khấu của các sự kiện không phải là thời gian, cũng không phải là không gian mà là đa tạp tích hợp: không-thời gian. Sự gắn bó chặt chẽ thời gian với không gian (qua thế giới bốn chiều Minkowski) để diễn tả các sự kiện vật lý phản ánh tính chất phong phú và độc đáo của thuyết tương đối. Hermann Minkowski là người đầu tiên năm 1908 đề xuất thế giới bốn chiều vì ông thấu hiểu bản chất gắn quyện thời gian với không gian của thuyết tương đối mà ngay cả Einstein năm 1905 cũng chưa nhận thấy khi ông gắn ký hiệu  $i$  ( $i^2 = -1$ ) vào thời gian  $t$  trong đẳng thức  $s^2 = x^2 + y^2 + z^2 + (ict)^2$ .

Thời gian thậm chí còn đóng vai trò thước đo độ dài của không gian, định nghĩa chính thức hiện đại của một mét là  $1/(299792458)$  của một giây-ánh sáng. Đơn vị của độ dài không gian như giây-ánh sáng (hay năm-ánh sáng) chỉ định khoảng cách mà ánh sáng di chuyển trong một giây (hay một năm). Vận tốc  $c$  như vậy đóng vai trò hằng số cơ bản của tự nhiên.

Có muôn ức thời gian,  $t$  và  $t'$  đều chỉ định thời gian trong hai hệ quy chiếu chuyển động với vận tốc khác nhau. Đồng hồ trong mỗi hệ quy chiếu quán tính đều có nhịp độ tích tắc nhanh chậm khác nhau, khoảng cách thời gian của mỗi hệ quy chiếu\_tùy thuộc vào vận tốc chuyển động của hệ ấy. Nhịp đập thời gian của bạn khác của tôi, ở mỗi điểm không gian lại gắn một đồng hồ đo thời gian với nhịp độ tích tắc khác nhau. Sở dĩ bạn và tôi tưởng rằng chúng ta chia sẻ một thời gian phổ quát, chỉ vì công nghiệp con người trong cái không gian quá nhỏ bé của trái đất so với vũ trụ, bạn và tôi đâu có xa nhau gì, vận tốc tương đối giữa chúng ta thậm gì so với vận tốc ánh sáng ( $v^2/c^2 \ll 1$ ,  $\gamma \approx 1$ ). Không có mũi tên thời gian lạnh lùng trôi của trực giác mà cơ học cổ điển Newton thừa nhận, không có cái *đồng thời* phổ quát và cái *hiện tại* chẳng thể xác định và giữ vai trò ưu tiên đặc thù nào hết vì liên tục có muôn vàn đỉnh nón ánh sáng (phụ chú 2) trong thế giới Minkowski của các sự kiện, mỗi đỉnh nón là một cái *bây giờ*. Đã không có hiện tại thì nói chi đến quá khứ và tương lai, đó là nội dung kinh ngạc của thuyết tương đối trong nhận thức về thời gian, cái ‘bây giờ’ chỉ là một ảo tưởng. Diễn tả hàm súc về nhận thức này có lẽ nằm trong bức thư Einstein gửi cho con trai của Besso<sup>6</sup> khi nghe tin bạn mất. Bức thư viết: “Vậy bạn đã trước tôi một chút già từ cái thế gian lạ lùng này. Nhưng cái đó chẳng nghĩa lý gì. Đối với chúng ta, những nhà vật lý có xác tín, sự chia cách quá khứ, hiện tại, tương lai chỉ là một ảo giác, dẫu nó dai dẳng đến thế nào”.

### ***C-Vài hệ quả kỳ diệu.***

**C1-** Hệ quả đầu tiên của thuyết Tương đối hẹp là khi chuyển động với vận tốc  $v$  thì một mét chiều dài không gian và một giây đồng hồ của thời gian sẽ thay đổi, độ dài của không gian co ngắn lại và của thời gian giãn nở ra. Sở dĩ Einstein khám phá ra hai điều quan trọng này vì ông thấu hiểu ý nghĩa vật lý của phương trình hoán chuyển  $x, t$ , trong khi Lorentz tuy cũng đã thấy không gian co cụm là một đáp số của phương trình trên, nhưng cho đó chỉ là một hiệu kỳ toán học của phép hoán chuyển không có ý nghĩa vật lý nào khả dĩ kiểm chứng được bằng thực nghiệm. Còn sự giãn nở của thời gian thì chỉ riêng Einstein khám phá ra.

1- Câu hỏi là một mét mà hai đầu đặt ở hai điểm  $O'$  và  $X'$  (toạ độ  $x'$  của  $J'$ ) thì người quan sát nằm trong  $J$  đo lường thấy là bao nhiêu ở bất kỳ một thời điểm  $t$  nào, đặc biệt  $t = 0$  ? Nói cách khác, khoảng cách  $OX$  (toạ độ  $x$  của  $J$ ) khác biệt ra sao so với khoảng cách  $x' = O'X'$  di động với vận tốc  $v$  ?

Phương trình  $x' = \gamma(x - vt)$  với  $t = 0$  cho ta  $x = x'/\gamma = x'\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ . Một mét ( $x' = 1\text{m}$ ) chuyển động với vận tốc  $v$ , độ dài ấy khi đo trong  $J$  (tức là  $OX = x$ ) bị co bởi  $\sqrt{1 - (v^2/c^2)} < 1$ . Nếu coi  $OX$  chuyển động (vận tốc  $-v$ ) so với  $O'X'$  đứng yên ( $J$  chuyển động so với  $J'$  đứng yên) thì phương trình  $x = \gamma(x' + vt)$  cũng cho kết quả tương tự  $x' = x/\gamma = x\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ , độ dài không gian của một vật di động với vận tốc  $\pm v$  bao giờ cũng bị co bởi  $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ . Độ dài không gian di chuyển theo hướng song song với vận tốc vector  $\mathbf{v}$  bị co ngắn lại, một mét trên tàu bằng  $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$  mét trên bến, cũng thế một mét trên bến bằng  $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$  mét trên tàu. Nhưng độ dài không gian khi di chuyển theo hướng thẳng góc với  $\mathbf{v}$  thì không thay đổi trong mọi trường hợp.

2- Câu hỏi là một giây của đồng hồ đặt ở điểm  $O'$  của  $J'$  di động với vận tốc  $v$  thì người quan sát nằm trong  $J$  đo lường thấy là bao nhiêu? Nói cách khác, khoảng cách thời gian  $t$  của đồng hồ trong  $J$  khác biệt ra sao so với khoảng cách thời gian  $t'$  của đồng hồ trong  $J'$ ?

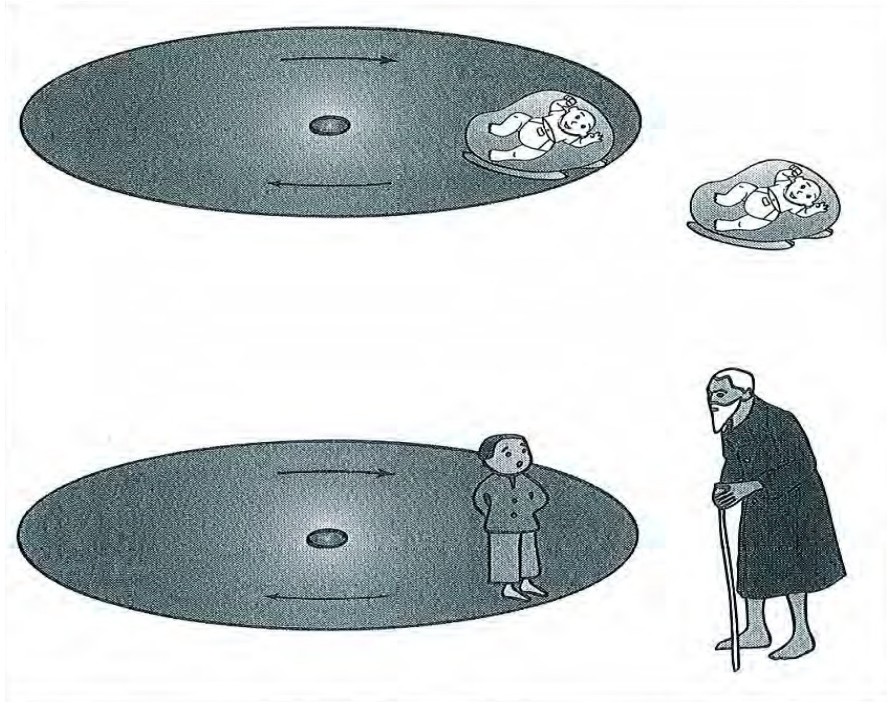
Phép hoán chuyển Lorentz cho ta:  $t = \gamma t' = t' / \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ . Thực tế, thời gian  $t'$  chỉ định bởi đồng hồ di động đặt ở trung tâm tọa độ  $O'$  ( $x' = 0$ ) cho ta  $(ct')^2 - 0 = (ct)^2 [1 - (x^2/c^2t^2)]$ , vậy  $(ct') = (ct) \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$  vì  $v = x/t$ , do đó  $t = \gamma t'$ . Cách chứng minh khác cho cùng một kết quả: với  $x' = 0$ , phương trình  $x' = \gamma(x - vt)$  cho ta  $x = vt$ . Thay thế  $x$  bằng  $vt$  trong phương trình thứ hai  $t' = \gamma(t - xv/c^2)$  cũng đưa đến  $t = \gamma t'$ .

Kết quả  $t = \gamma t'$  bảo cho ta là một giây đồng hồ ở trên tàu thì người trên bến thấy bằng  $\gamma$  giây, thời gian trên tàu như giãn nở ra  $\gamma$  lần. Nếu đồng hồ trên bến có nhịp đập mỗi tíc tắc là một giây thì nhịp đập mỗi tíc tắc của đồng hồ trên tàu phải mất  $\gamma$  giây, đồng hồ trên tàu đập chậm đi  $\gamma$  lần. Vật di chuyển càng nhanh thì thời gian  $t'$  của nó càng trôi chậm, thời gian của ánh sáng ngưng đọng như đóng băng hay dài vô tận.

Từ nay ta gọi chung tất cả các  $\tau \equiv t/\gamma$  là *thời gian riêng của hệ quy chiếu chuyển động với vận tốc  $v$* , còn  $t$  chỉ định thời gian của hệ quy chiếu bất động.

Sự giãn nở của thời gian (nhịp độ đồng hồ đập chậm đi) của các vật chuyển động với vận tốc lớn đã được thực nghiệm kiểm chứng nhiều lần từ những năm 1970 dùng đồng hồ nguyên tử đặt trên máy bay, hoả tiễn, tiếp nối bởi biết bao ứng dụng thực tiễn trong đời sống con người mà Hệ thống Định vị Toàn cầu (Global Positioning System, GPS) là một thí dụ. Trên các vệ tinh của GPS, sự chính xác cực kỳ của nhịp độ đồng hồ là điều kiện tối quan trọng cho GPS đo đạc khoảng cách không gian thành công. Các vệ tinh vì chuyển động nhanh so với mặt đất đứng yên nên thời gian trên đó giãn nở theo thuyết Tương đối hẹp. Trái lại theo thuyết Tương đối rộng (coi Phần II) thì thời gian lại co cụm vì cường độ trọng lực ở trên vệ tinh giảm đi so với mặt đất, như vậy ta phải kết nối hai hệ quả trái ngược (của thuyết tương đối hẹp và rộng) về sự thay đổi nhịp độ tích tắc đồng hồ trên vệ tinh GPS.

Câu chuyện ẩn dụ Từ thức thăm Thiên thai rồi trở về cố hương thấy cảnh vật đổi thay nhiều, thời gian dưới trần trôi quá nhanh, một kịch bản Đông phương của *nghịch lý* hai anh em sinh đôi, người anh bay với vận tốc cao trong vài năm rồi trở về thấy em ở lại nhà nay đã thành lão, hay với nhân vật M. Tompkins (trong truyện huyền thoại của nhà vật lý G. Gamow) có bà mẹ đặt một con sơ sinh trên vòng ngựa gỗ quay với vận tốc xấp xỉ bằng vận tốc ánh sáng, còn con sinh đôi đặt ở dưới đất bên cạnh. Quên đi năm sau trở lại thấy bé trên vòng ngựa gỗ vẫn gần như xưa còn hai mẹ con trên đất già thêm là một ẩn dụ khác<sup>7</sup>.



**C2-** Hệ quả tuyệt vời thứ hai là phương trình  $E = \gamma mc^2$  của thế kỷ, liên kết năng lượng  $E$  không lồ với khối lượng  $m$  nhỏ bé của vật chất, trong một gam khối lượng tiềm ẩn một năng lượng hơn hai mươi ngàn tỷ calorie, tương đương với nhu cầu dinh dưỡng của mấy chục ngàn người trong vài năm!

### 1-Mấy điều sơ đẳng trong cơ học cổ điển

Khối lượng của vật chất là một khái niệm quan trọng trong khoa học mà nhân loại đã ý thức ít nhiều về nó ngay từ thuở các nền văn hiến ngàn xưa. Một cách định tính, ta hãy khởi đầu với cơ học cổ điển của Galilei và Newton theo đó khối lượng  $m$  của một vật được hiểu như bản tính nội tại của nó,  $m$  gói ghém “số lượng của vật chất” kết tụ trong đó.

Còn năng lượng? Dưới dạng sức nóng - mà ta gọi là nhiệt năng - có lẽ con người đã cảm nhận ra khái niệm năng lượng ngay từ thuở họ phát minh ra lửa, không phải ngẫu nhiên mà ngôn từ calorie đã được dùng để chỉ định đơn vị năng lượng. Nó là căn nguyên tác động lên vạn vật để làm chúng biến đổi dưới mọi hình thái hoặc làm chúng di chuyển. Như vậy năng lượng chẳng thể tách rời khỏi lực và để diễn tả chính xác thì năng lượng được định nghĩa như tích số của vector lực  $\mathbf{F}$  nhân với vector chiều dài  $\mathbf{x}$  mà vật di chuyển do tác động của  $\mathbf{F}$  áp đặt lên nó. Thực vậy, tích số  $\mathbf{F} \cdot \mathbf{x}$  trước hết gọi là *công* (work) làm ra bởi lực  $\mathbf{F}$  tác động lên một vật. Đó là một định nghĩa hợp lý vì nó chỉ định cái công sức mà lực phải bỏ ra để làm cho vật di chuyển một đoạn chiều dài  $\mathbf{x}$  với vận tốc  $\mathbf{v} = d\mathbf{x}/dt$ . Khi ta mang cho vật cái *công* của  $\mathbf{F}$  thì vật đó phải biến đổi bởi vì nó thu nhận một *năng lượng*  $E$ , và ta định nghĩa năng lượng mà vật thu được chính là *công* của lực  $\mathbf{F}$  mang cho nó. Vậy  $E = \mathbf{F} \cdot \mathbf{x}$ , và dưới dạng vi phân  $dE = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{x}$ , ta suy ra là sự biến đổi theo thời gian  $t$  của năng lượng chính là tích số  $\mathbf{F} \cdot \mathbf{v}$ :  $dE/dt = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v}$  mà ta sẽ dùng để tìm ra phương trình  $E = \gamma mc^2$  của thế kỷ.

Trong cơ học có hai loại năng lượng thường được nhắc đến: thế năng và động năng. Thí dụ thứ nhất là trọng lực  $\mathbf{F}_g = m\mathbf{g}$  (với  $g = |\mathbf{g}| \approx 9.81\text{m/s}^2$  chỉ định gia tốc tạo nên bởi trọng trường

của trái đất). Sức hút  $F_g$  kéo khối lượng  $m$  rơi từ trên một độ cao  $l = |\mathbf{x}|$  xuống mặt đất. Vì  $F_g$  và  $\mathbf{x}$  song song và cùng hướng về trung tâm trái đất nên  $F_g \cdot \mathbf{x} = mgl$ . Đại lượng  $mgl$  gọi là *thế năng* của vật đặt ở độ cao  $l$  so với mặt đất. Ở bất kỳ một điểm cao  $l$  nào đó, vật mang sẵn một năng lượng  $mgl$  tiềm tàng, một thế năng.

Thí dụ thứ hai là với bất cứ một lực  $\mathbf{F}$  nào ta cũng có  $dE = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{x}$ , khi thay  $d\mathbf{x} = \mathbf{v}dt$  và dùng phương trình cơ bản  $\mathbf{F} = m\mathbf{a} = m d\mathbf{v}/dt$  của cơ học Newton, ta có  $dE = m\mathbf{v} \cdot d\mathbf{v}$ , làm tích phân ta được  $E = (\frac{1}{2})mv^2$ , với  $v = |\mathbf{v}|$ . Ta gọi năng lượng  $(\frac{1}{2})mv^2$  là động năng. Một vật khối lượng  $m$  chuyển động với vận tốc  $\mathbf{v}$  mang động năng  $(\frac{1}{2})mv^2$ . Một vật đứng yên ( $v = 0$ ) rơi từ một độ cao  $l$ , khi chạm đất nó có vận tốc  $v = (2gl)^{1/2}$  vì thế năng  $mgl$  của nó biến thành động năng  $(\frac{1}{2})mv^2$ , minh họa định luật bảo toàn năng lượng.

Sau hết, ta định nghĩa vector xung lượng  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$  và phương trình cơ bản  $\mathbf{F} = m d\mathbf{v}/dt$  nay viết dưới dạng  $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$ .

## 2- Hai con đường đến $E = \gamma mc^2$

Tại sao hai con đường? Nhà vật lý kỳ tài Richard Feynman từng khuyến khích là nếu có thể thì nên suy diễn, trình bày hay chứng minh một kết quả khoa học nào đó theo nhiều phương pháp khác nhau để rọi sáng vấn đề. Tập sách tuyệt vời *The Feynman Lectures on Physics* có nhiều thí dụ điển giảng, tiếp cận khác nhau mà lại bổ túc cho nhau.

Trước hết cần minh định là chỉ có phương trình  $E_0 = mc^2$  hay  $E = \gamma mc^2$  mới thực sự phản ánh ý nghĩa của thuyết tương đối hẹp,  $E$  thay đổi theo vận tốc của vật, động năng  $(\frac{1}{2})mv^2$  là thí dụ cụ thể nhất, còn  $E_0$  là năng lượng khi vật đứng yên ( $v = 0, \gamma = 1$ ). Phương trình  $\Delta E_0 = (\Delta m)c^2$  Einstein đã viết ra tháng 9 năm 1905 với đề xuất kiểm chứng nó bằng thực nghiệm, thí dụ hạt nhân phóng xạ tự nhiên (như radium) khi mất đi một chút năng lượng  $\Delta E_0$  thì khối lượng nó phải giảm đi  $\Delta m = \Delta E_0/c^2$  mà John Cockcroft và Ernest Walton ở Đại học Cambridge (Anh) đã chứng nghiệm gián tiếp năm 1932 (bắn proton vào hạt nhân lithium 7 để làm phân rã nó ra hai hạt nhân helium 4) và sau này năm 2005 bởi hai loại thí nghiệm trực tiếp khác ở Mỹ và Pháp với sai số rất nhỏ 0,00004 % (Nature, vol.438, 2005).

Trong cơ học tương đối tính (hay thuyết tương đối hẹp), theo Einstein<sup>8</sup> để tránh sự mơ hồ, thậm chí nhầm lẫn về khái niệm khối lượng, ta không nên đưa ra hai ký hiệu:  $m(v) \equiv \gamma m$  và  $m_0 \equiv m(v = 0)$  theo đó  $m_0$  là khối lượng bất động của một vật và  $m(v) = m_0/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$  là 'khối lượng tương đối tính' khi vật chuyển động với vận tốc  $v$ . Tích số của  $\gamma$  với  $m$  không nên hiểu theo nghĩa "khối lượng thay đổi với vận tốc" và viết  $\gamma m$  dưới dạng  $m_0/\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ . Tiếc thay hai ký hiệu  $m_0$  và  $m(v)$  và cách diễn tả chúng hãy còn thấy dùng trong nhiều sách giáo khoa ở Âu, Á, Mỹ hiện đại (kể cả cuốn the Feynman Lectures on Physics, tome 1), mặc dầu Einstein đã cảnh báo từ năm 1948.

a- Henri Poincaré, nhà toán học uyên bác và đa tài Pháp, năm 1900 (trước năm thần kỳ 1905) đã viết ra<sup>9</sup>  $E = mc^2$  (thiếu hệ số  $\gamma$  cốt lõi), nhưng phương pháp thiếu nhất quán của ông để tìm ra nó khiến tác giả đã quên hẳn đi đến nỗi năm 1908, ba năm sau khi Einstein khám phá ra  $E_0 = mc^2$ , Poincaré - khi so sánh một vật phát xạ ánh sáng với một khẩu đại bác bắn ra một viên đạn - còn viết trong La dynamique de l'électron, Science et Méthode (1908) mấy câu



sau: “ Khẩu đại bác giạt lùi vì viên đạn bị bắn ra đã tác động trở lại. Trường hợp vật phóng quang lại là chuyện khác, ánh sáng phát ra không phải là vật chất, đó là năng lượng, mà năng lượng thì không có khối lượng”. Qua câu trên, Poincaré tuy có viết ra  $E = mc^2$  tám năm trước nhưng ông đã quên nó rồi.

Poincaré tìm ra  $E = mc^2$  bằng cách nào? Trước hết, ông xem xét một chùm sóng ánh sáng có năng lượng  $E$  và vector xung lượng  $\mathbf{p}$ . Theo định lý Poynting trong điện-từ thì  $\mathbf{p} \equiv |\mathbf{p}| = E/c$ , điều chính xác đối với photon không có khối lượng. Cái khuyết điểm của Poincaré là dùng phương trình của cơ học cổ điển  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$  (với  $v = c$ ) để áp dụng cho ánh sáng vì năm 1900 ông chưa suy diễn ra hệ số quan trọng  $\gamma$ . Đó là một sai lầm vì cơ học cổ điển chỉ áp dụng cho những hệ di động chậm,  $v \ll c$ . Khi kết hợp hai cái xung khắc là  $\mathbf{p} = E/c$  với  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ , ông thấy  $E = mc^2$ . Thiếu hệ số  $\gamma$ , công thức này mang nghịch lý là photon có khối lượng  $m = E/c^2 \neq 0$ . Tiếc thay ngày nay hãy còn vài tác giả bảo hoàng hơn vua cho rằng Poincaré là tác giả của phương trình của thế kỷ<sup>10</sup>.

b- Cần nhắc điều quan trọng là trong thuyết tương đối hẹp, mỗi không-điểm  $\mathbf{x}$  (3 thành phần  $x, y, z$ ) phải gắn một thời-điểm  $t$  trong một thực tại không-thời gian bốn chiều Minkowski. Một tứ-vector không-thời gian là tập hợp có 4 thành phần mang ký hiệu  $x^\mu$  ( $x^0 = ct, x^1, x^2, x^3$ ), với  $x^1 = x, x^2 = y, x^3 = z$ , viết gọn là  $x^\mu$  ( $x^0 = ct, \mathbf{x}$ ). Từ tứ-vector  $x^\mu$ , ta lập một tứ-vector xung lượng  $\mathbf{p}^\mu = m dx^\mu/dt$ , và tính toán ra bốn thành phần của  $\mathbf{p}^\mu$  ( $p^0 = \gamma mc, \mathbf{p} = \gamma m\mathbf{v}$ ). Dùng định nghĩa quen thuộc của vector vận tốc  $\mathbf{v} = d\mathbf{x}/dt$ , vector gia tốc  $\mathbf{a} = d\mathbf{v}/dt$ , ta tính ra đẳng thức

$$d\gamma/dt = \gamma^3(\mathbf{v} \cdot \mathbf{a})/c^2$$

Phương trình  $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt = m d(\gamma\mathbf{v})/dt$  cho ta  $\mathbf{F} = [m\gamma^3(\mathbf{v} \cdot \mathbf{a})/c^2] \mathbf{v} + m\gamma\mathbf{a}$  của thuyết tương đối hẹp thay thế phương trình cơ bản  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$  của Newton, cũng như  $\mathbf{p} = m\gamma\mathbf{v}$  thay thế  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ ; tóm lại cơ học cổ điển là trường hợp giới hạn của cơ học tương đối tính khi  $c \rightarrow \infty$ .

c- Hai cách chứng minh  $E = \gamma mc^2$ .

Cách thứ nhất dựa vào  $dE/dt = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v}$  đề cập ở đoạn 1. Dùng  $\mathbf{F} = [m\gamma^3(\mathbf{v} \cdot \mathbf{a})/c^2] \mathbf{v} + m\gamma\mathbf{a}$  vừa thiết lập, ta có  $\mathbf{F} \cdot \mathbf{v} = m\gamma^3(\mathbf{v} \cdot \mathbf{a})$ , khi kết hợp nó với  $d\gamma/dt = \gamma^3(\mathbf{v} \cdot \mathbf{a})/c^2$ , ta được  $\mathbf{F} \cdot \mathbf{v} = mc^2 d\gamma/dt = dE/dt$  và như vậy  $E = \gamma mc^2$ .

Cách thứ hai là liên kết thành phần  $p^0 = \gamma mc$  (của tứ-vector xung lượng  $\mathbf{p}^\mu$ ) với năng lượng  $E$ , và xin chú tâm đến thứ nguyên  $ML^2/T^2$  của năng lượng (qua ba đại lượng cơ bản là khối lượng  $M$ , chiều dài không gian  $L$ , thời gian  $T$ ). Vậy phép phân tích thứ nguyên bảo ta  $p^0 = E/c$  chia cho một vận tốc nào đó. Ta chỉ có hai lựa chọn, đó là  $v$  hay  $c$ , nhưng  $v$  không thích hợp vì nó có thể bằng 0 và đưa  $p^0$  đến một giới hạn vô tận, vậy  $p^0 = E/c$ . Với  $p^0 = \gamma mc$ , ta có  $E = \gamma mc^2$ . Lựa chọn  $p^0 = E/c$  còn phù hợp với trường hợp  $v \ll c$ , vì khi ta khai triển hệ số  $\gamma m$  thành chuỗi  $(v/c)^n$  thì ta có  $\gamma mc^2 \sim mc^2 + (1/2)mv^2 + (3/8)m(v^4/c^2) \dots$ , ta nhận ra  $\gamma mc^2$  chứa đựng động năng  $(1/2)mv^2$  quen thuộc. Đó là phương pháp Einstein đã dùng để tìm ra phương trình của thế kỷ<sup>11</sup>.

Tuy hai đại lượng  $E = \gamma mc^2$  và  $\mathbf{p} = \gamma m\mathbf{v}$  đều thay đổi theo vận tốc  $\mathbf{v}$ , nhưng hiệu số  $E^2 - |\mathbf{p}|^2 c^2$  lại không phụ thuộc vào  $\mathbf{v}$  nữa, nó bất biến trong tất cả các hệ quy chiếu:

$$E^2 - |\mathbf{p}|^2 c^2 = m^2 c^4$$

Phương trình trên áp dụng cho mọi trường hợp của khối lượng  $m$  bằng hay khác 0. Với photon ( $m = 0$ ), phương trình trên cho ta  $E = pc$ , trùng hợp với định lý Poynting trong điện từ. Hơn nữa photon vì không có khối lượng, nó chẳng bao giờ bất động, vận tốc lúc nào cũng bằng  $c$ , do đó tích số  $\gamma m$  của photon mang dạng  $0/0$  và năng lượng  $E = \gamma mc^2$  của nó có thể là bất cứ con số nào khác 0, và ta đi vào lãnh vực của lượng tử với Max Planck:  $E = h\nu$ . Năng lượng của photon không xác định được trong thuyết tương đối mà lại đến bằng con đường lượng tử. Tuy khối lượng bằng 0, nhưng photon có năng lượng bằng bội số của  $h\nu$  (tần số dao động  $\nu$  của nó nhân với hằng số Planck  $h = 6.63 \times 10^{-34}$  Js).

*Sang trang từ hẹp sang rộng:* Mời bạn nhớ lại câu ở đầu Phần I “đi chuyển đều đặn cũng như không” của Galilei liên đới đến trường hợp đặc biệt của vận tốc cố định không thay đổi với thời gian (gia tốc = 0) trong các hệ quy chiếu quán tính, đặc trưng của thuyết Tương đối hẹp. Tính từ hẹp dùng ở đây để chỉ định sự chuyển động đều đặn, không gia tốc. Các kết quả của thuyết Tương đối sáng tạo năm 1905 sẽ thay đổi ra sao trong trường hợp di chuyển không đều đặn với gia tốc  $\neq 0$ ? Câu hỏi này chính là điểm khởi đầu cho thuyết Tương đối rộng.

## Phần II- Tương Đối Rộng

### A- Ý tưởng sung sướng nhất trong đời tôi

Một chiều chủ nhật cuối tháng 5 năm 1905 đẹp trời nắng ấm, Albert Einstein và anh bạn thân cùng sở làm Michele Angelo Besso dạo chơi trên đồi Gurten, xa xa dưới chân là thành phố Bern cổ kính hiền hoà, họ bàn luận trao đổi về bí hiểm ether (coi phần I), rồi ngay tối hôm đó ông suy nghĩ tính toán và dần dần hình thành thuyết tương đối hẹp để vài tuần sau gửi đăng trên Annalen der Physik, tạp chí uy tín thời đó. Trong vòng hai năm sau, công trình này gây được nhiều tiếng vang tán đồng trong giới hàn lâm và nghiên cứu (đặc biệt bởi Max Planck, người khai sáng ra khái niệm “lượng tử” mà dấu ấn ngày càng in đậm trong khoa học và công nghệ hiện đại), mặc dầu còn một số người nghi ngại vì tính chất cách mạng về thời gian không phổ quát mà cơ sở của thuyết này. Nhà vật lý thực nghiệm tiếng tăm Johannes Stark<sup>12</sup> mời Einstein viết một bài tổng hợp về lý thuyết mới mẻ đó và bình luận về những hệ quả cùng triển vọng. Công việc đòi hỏi thời gian vì ông vẫn phải tiếp tục tám giờ mỗi ngày, sáu ngày mỗi tuần làm việc ở Phòng Đăng ký Bằng Sáng chế của thành phố Bern, nhưng hoàn tất bài tổng hợp đó cũng là cách để Einstein hy vọng tìm được một chức vụ giảng dạy và nghiên cứu đại học mà ông hằng ước mơ sau khi tốt nghiệp trường Bách khoa Kỹ thuật ở Zürich (ETH). Chỉ lúc rảnh rang trong giờ cạo giấy ông mới có đôi phút suy tư về vật lý. Rồi một ngày trong tháng 11 năm 1907 đang ngồi trong Phòng Đăng ký, Einstein chợt nảy ra một ý tưởng mà ông coi như mãn nguyện nhất trong đời: “*một người rớt từ trên cao xuống không cảm thấy sức nặng của mình*”

Theo ông kể, ý tưởng giản dị có vậy thôi, nhưng nó gây một ấn tượng mạnh khiến tôi vô cùng sùng sốt và dần dà đưa đẩy tôi khám phá ra một lý thuyết mới để thay thế luật cổ điển

của Newton về hiện tượng hấp dẫn. Để hiểu cái mới lạ ra sao, có lẽ không gì hơn là trở về thời điểm khi Galileo Galilei (1564-1642) phát hiện ra *tính chất phổ quát* của vật chất rơi tự do trong không trung bởi sức hút của trái đất, theo đó nếu vắng một sức cản nào của môi trường, như không khí chẳng hạn, thì mọi vật bất kể khối lượng lớn nhỏ ra sao, ở chung một chỗ trên cao sẽ rơi xuống hết như nhau với cùng một gia tốc<sup>13</sup>. Chúng ta chưa quên hình ảnh mấy phi hành gia đầu tiên lên cung Hằng khoảng năm 1970 thả một cái búa cùng mấy sợi lông tơ để thấy chúng quả thực rơi xuống mặt trăng với cùng một gia tốc vì ở đây vắng không khí cản trở. Thí nghiệm trên mặt trăng này chỉ tượng trưng thôi chứ chẳng gây chút ngạc nhiên nào vì chính Isaac Newton (1642-1727), vài chục năm sau Galilei, đã chứng nghiệm tính phổ quát nói trên của Galilei khi quan sát các chu kỳ dao động giống hệt nhau của mấy chiếc quả lắc đồng hồ nặng nhẹ khác nhau. Thực là kỳ lạ mà luật hấp dẫn (tác động của trọng trường của trái đất như một thí dụ) mang đặc tính độc đáo là nó áp đặt một gia tốc duy nhất lên mọi vật thể đặt ở cùng một chỗ, bất kỳ khối lượng  $m$  lớn nhỏ của vật đó ra sao. Còn ba lực cơ bản khác (lực của điện-từ trường, lực mạnh và lực yếu của các hạt nhân nguyên tử), chẳng có lực nào khi tác động lên mọi vật khối lượng rất khác nhau lại làm chúng di chuyển với cùng chung một gia tốc, chắc phải có cái gì sâu sắc ẩn sau **mối tương đồng giữa trọng lực và sự vận chuyển có gia tốc**.

Ngoài ra còn thêm một khía cạnh nữa là phương trình căn bản của cơ học  $F = ma$  bảo cho ta khối lượng  $m$  mang một đặc trưng là nó diễn tả tính trây ỳ hay quán tính của vật thể. Thực tế bất kỳ một lực  $F$  nào (trọng lực, lực điện-từ, lực mạnh và lực yếu của hạt nhân nguyên tử, lực cơ bắp hay máy móc) khi áp đặt lên một vật A mang khối lượng  $m$ , vật đó sẽ chuyển động với gia tốc  $a$ . Cũng một lực  $F$  ấy khi tác động lên một vật B khác mang khối lượng ba lần lớn hơn khối lượng của A thì dĩ nhiên gia tốc của B so với A giảm đi ba lần, nó chuyển động chậm chạp hơn A hay có quán tính lớn gấp ba lần A. Vậy khối lượng biểu lộ khả năng quán tính của vật thể chống lại sự di động. Kết hợp hai điều trên, trọng lượng<sup>14</sup> của một vật (lực mà vật ấy bị lôi hút bởi trọng trường tạo nên bởi trái đất chẳng hạn) tỉ lệ thuận với tính trây ỳ của vật đó và gia tốc phổ biến của mọi vật được chứng minh khi ta dùng phương trình cơ bản<sup>15</sup> của động lực học<sup>16</sup>.

*Mối liên hệ sâu sắc giữa trọng lực, gia tốc và quán tính* đã được Newton miêu tả trong định luật hấp dẫn phổ quát. Chủ yếu Newton, tuy không tìm được nguyên nhân tại sao có sự liên hệ như vậy, nhưng đã nhận ra là khối lượng của một vật A mang ba đặc trưng: (i) quán tính của A, (ii) A phải phản ứng ra sao khi trọng lực (tạo ra bởi một vật B khác) tác động lên nó, và (iii) chính vật A cũng tự nó sinh ra một trọng trường để lôi hút mọi vật khác ở xung quanh<sup>17</sup> trong đó dĩ nhiên có vật B. Trong vòng hơn hai thế kỷ sau Newton, nhiều nhà khoa học, mặc dầu làm việc trong hệ hình của cơ học cổ điển, hầu như đã quên mất chuyện quan trọng này, chẳng còn mấy ai đào sâu tìm hiểu thêm ba vai trò tiên nghiệm rất biệt lập của khối lượng.

## **B- Và Einstein xắn tay mở khoá**

Mối liên hệ giữa quán tính, gia tốc và trọng lực mà trực giác Einstein linh cảm trong một buổi trưa tháng 11 năm 1907 phải gói ghém một tín hiệu nào đó và ông bắt đầu suy tư. Lao tâm

khô tũ, gian nan lặn lội trong tám năm trường<sup>18</sup> khi vui lúc nản để cuối cùng bùng sáng ngày 25 tháng 11 năm 1915, ông rẽ mây chỉ lối cho nhân loại khai thác một kho tàng vô ngần sâu sắc, không những của vật lý nói riêng mà cũng của vũ trụ quan và triết học nói chung. Ông mừng tượng trước hết ta sẽ quan sát được gì trong một cái thang máy đứt dây và rơi tự do trong không trung bởi tác động của trọng trường của quả đất. Theo tính chất gia tốc phổ quát của Galilei, tất cả mọi vật ở trong thang, kể cả chính cái thang, đều rơi như nhau với cùng một gia tốc  $g$ , nên so với sàn thang thì mọi vật trong thang hoặc đứng yên hoặc lướt đi đều đặn với vận tốc cố định. Bất kỳ mỗi điểm trong thang máy rơi tự do đều có thể coi như một hệ qui chiếu *quán tính* trong đó trọng lực như bị xóa đi, diễn tả ý tưởng sung sướng nhất trong đời Einstein theo đó trong thang máy rơi tự do không còn trọng lượng nữa. Ngày nay các phi hành gia lơ lửng trong những hỏa tiễn thám hiểm vũ trụ là hình ảnh quen thuộc của hiện tượng *vô trọng lực*.

Thêm bước nữa, ông mừng tượng một nơi xa lánh tất cả mọi thiên hà tinh tú, một không gian ở đó vắng mặt trọng trường. Trong cái không gian vô trọng lực ấy, ta đẩy mạnh một cái bình *lên cao* với một gia tốc nào đó, ta thấy *mọi vật* ở trong bình bị đẩy rơi ngược chiều *xuống thấp* với cùng một gia tốc, giống như nó bị hút xuống bởi một trọng lực, điều khá quen thuộc trên xe hơi khi ta bất chợt nhấn phanh để kéo xe về phía sau, mọi người trong xe như bị đẩy về phía trước. Vậy thì vận chuyển có gia tốc nào khác gì tác động của trọng trường, có một mối liên hệ mật thiết giữa gia tốc và trọng lực. Những tác dụng của một trọng trường *thực* có thể như bị *xóa bỏ* trong một hệ qui chiếu rơi tự do (gia tốc  $\neq 0$ ), hoặc khi ta khảo sát sự vận chuyển có gia tốc của một vật thể thì một trọng trường *ảo* như được *tạo* ra.

Để hiểu lý do tại sao Einstein lại chú tâm đến gia tốc khi đang viết bài tổng hợp về thuyết tương đối hẹp (trong đó chỉ có sự di chuyển *đều đặn* với gia tốc = 0), mời bạn đọc trở về với nguyên lý *tương đối hẹp* mà Galilei tóm tắt trong một câu ngắn gọn "di chuyển *đều đặn* cũng như không". Có lẽ trong tiềm thức, Einstein tự đặt câu hỏi các định luật của thuyết tương đối hẹp sẽ thay đổi ra sao trong trường hợp các hệ quy chiếu di chuyển *không đều đặn*, và khi phân tích những điều vừa kể trên về thang máy rơi, ông nhận ra vai trò quyết định của trọng trường trong sự nói rộng phạm vi *không gia tốc* của thuyết tương đối *hẹp* sang phạm vi *có gia tốc* của thuyết tương đối *rộng*. Câu "di chuyển *đều đặn* cũng như không" của Galilei, qua ý tưởng sung sướng nhất trong đời của Einstein, nay biến thành "di chuyển *không đều đặn* chẳng khác gì tác động của trọng lực" đã mở đầu một kỷ nguyên mới cho vật lý, nói rộng thuyết tương đối hẹp (hay đặc biệt) sang thuyết tương đối rộng (hay tổng quát) để thay thế thuyết hấp dẫn của Newton, định luật cổ điển này chỉ là trường hợp xấp xỉ gần đúng của thuyết tương đối rộng chính xác hơn. Ngoài ra còn thêm một nguyên nhân thúc đẩy Einstein mở rộng thuyết tương đối đặc biệt vì ông nhận ra có một mâu thuẫn giữa thuyết này (theo đó vận tốc của mọi tín hiệu đều *có hạn*, kể cả ánh sáng) và luật hấp dẫn của Newton (theo đó trọng lực truyền đi với vận tốc *vô hạn* để vạn vật hút nhau *tức thì*). Vậy bằng cách nào đó sửa đổi luật hấp dẫn cổ điển sao cho hòa đồng với thuyết tương đối hẹp sẽ tự động giải đáp được mâu thuẫn nói trên.

### **C- Không-thời gian bốn chiều biến dạng từ phẳng sang cong**

Trong thuyết tương đối hẹp và rộng cần nhấn mạnh là không gian và thời gian chẳng còn biệt lập nhưng mật thiết liên đới trong một thực thể bốn chiều không-thời gian mà Einstein sẽ khai thác với sự thay đổi hệ quy chiếu từ quán tính (gia tốc = 0) sang phi quán tính (gia tốc  $\neq 0$ ).

1- Chúng ta khởi đầu đi từ không gian ba chiều của Newton để sang thế giới không-thời gian bốn chiều của Minkowski (coi phần I), cả hai đều phẳng theo nghĩa của hình học Euclid. Trong không gian ba chiều, nếu ta viết bình phương khoảng cách giữa tâm O và một điểm tọa độ  $x,y,z$  là  $X^2 = x^2 + y^2 + z^2$  (quỹ tích của những điểm  $x,y,z$  là mặt cầu hai chiều  $S^2$  tron tru với O là tâm) thì bình phương khoảng cách  $s^2$  trong không-thời gian bốn chiều Minkowski của thuyết tương đối hẹp là  $s^2 = (x^2 + y^2 + z^2) - (ct)^2$  (quỹ tích của những điểm  $x, y, z, ct$  là hình hyperboloïd ba chiều  $S^3$  tron tru). Đó cũng là định lý Pythagoras mở rộng trong bốn chiều với bốn hệ số  $\pm 1$  của  $s^2$ , thay vì chỉ có ba hệ số  $+1$  của  $X^2$ . Khi mở rộng quy mô vận chuyển *không* gia tốc của thuyết tương đối *hẹp* (với hình học *phẳng* của không-thời gian bốn chiều Minkowski) sang quy mô vận chuyển *có* gia tốc của thuyết tương đối *rộng*, năm 1912 trực giác của Einstein cảm nhận thấy cấu trúc hình học phẳng sẽ phải biến dạng sang hình học cong<sup>19</sup> vì mặt phẳng hay hình cầu tron tru giản dị không diễn tả được hết cái phức tạp của quỹ đạo quay xoắn, uốn lượn của các vật thể chuyển động với gia tốc.

Để thống nhất các ký hiệu toán học dùng trong hình học bốn chiều phẳng hay cong, đáng lẽ dùng  $t, x, y, z$ , ta hãy thay chúng bằng bốn tọa độ  $ct \equiv x^0, x \equiv x^1, y \equiv x^2, z \equiv x^3$  và định nghĩa một *tứ-vectơ*  $x^\mu$  là vectơ có bốn thành phần  $x^0, x^1, x^2, x^3$  (thay vì vectơ quen thuộc  $\mathbf{x}$  với ba thành phần  $x, y, z$  trong không gian ba chiều). Trong hình học phẳng Minkowski, bình phương khoảng cách vi phân  $s^2 = (x^2 + y^2 + z^2) - (ct)^2$  giữa hai không-thời điểm  $x^\mu$  và  $x^\nu$  sẽ được viết dưới dạng  $s^2 = \eta_{\mu\nu} x^\mu x^\nu$ , các chỉ số  $\mu$  và  $\nu$  có giá trị là 0, 1, 2, 3 và hệ số  $\eta_{\mu\nu}$  là những con số thực như  $+1$  hay  $-1$  (thí dụ  $\eta_{00} = -1, \eta_{ii} = +1, \eta_{0i} = \eta_{i0} = \eta_{ij} = 0$  với  $i \neq j, i$  hay  $j$  là 1,2,3). Ngoài ra trong ký hiệu ngắn gọn  $\eta_{\mu\nu} x^\mu x^\nu$ , ta theo quy ước<sup>20</sup> Riemann-Einstein làm tổng hợp tất cả các đóng góp của cả hai chỉ số  $\mu, \nu$  từ 0 đến 3.

Làm sao mở rộng sang hình học cong những hệ số  $\eta_{\mu\nu}$  đơn sơ của hình học phẳng Minkowski? Einstein nhớ lại những bài giảng khi ông là sinh viên ở ETH về mặt cong hai chiều  $S^2$  của quả bầu dục lồi lõm, so với quả cầu tron tru mà nhà vật lý và toán học trứ danh Karl F. Gauss<sup>21</sup> đã từng phân tích cấu trúc của chúng. Ngoài ra còn công trình của Bernhard Riemann, môn đệ của Gauss, đã tổng quát hóa kết quả của thầy từ bề mặt hai chiều  $S^2$  sang trường hợp nhiều chiều  $S^n$  với  $n > 2$ . Để mở đầu ta hãy xét trường hợp giản dị nhất, đó là những bề mặt hai chiều và nhận thấy khoảng cách giữa hai điểm kế cận vi phân trên bề mặt quả cầu tron tru chẳng khác chút nào khoảng cách giữa hai điểm kế cận vi phân trên mặt phẳng, nếu ta hình dung bao quanh mỗi điểm trên mặt cầu bằng một trang giấy phẳng tiếp tuyến với hình cầu ở điểm ấy, và hai trục tọa độ thẳng góc trên hình cầu sẽ là hai đường kinh tuyến và vĩ tuyến quen thuộc của trái đất lý tưởng phẳng phiu. Mặt cầu cũng như mặt phẳng tiếp tuyến nó sẽ bị bao trùm bởi một mạng lưới gồm những hình vuông vi phân. Cũng như trên mặt phẳng, ta chỉ cần hai tọa độ  $x, y$  để xác định khoảng cách bình phương  $l^2$  giữa hai điểm  $x$  và  $y$  trên bề mặt hình cầu:  $l^2 = x^2 + y^2$ .

Nếu bề mặt của hình cầu (hay bầu dục) không phẳng phiu mà lồi lõm, ta chẳng cần một tọa độ thứ ba để đo chiều cao hay chiều sâu, nhưng mạng lưới hình vuông sẽ thành mạng lưới của

những hình bình hành bao bọc mặt cầu lồi lõm. Với những hình bình hành, khoảng cách bình phương  $l^2$  giữa hai điểm  $x$  và  $y$  của mặt cầu  $S^2$  lồi lõm là  $l^2 = g_{11} x^2 + 2g_{12} xy + g_{22} y^2$ . Không như trường hợp mặt cầu tròn tru chỉ có một hình vuông duy nhất để bao bọc mọi điểm của mặt cầu, *mỗi điểm* lồi lõm khác nhau bị bao quanh bởi một hình bình hành khác nhau nên ba hệ số  $g_{11}$ ,  $g_{12}$  và  $g_{22}$  không còn là những con số mà là *hàm* của  $x$ ,  $y$  trong trường hợp chung tổng quát, vậy ta có  $g_{11}(x, y)$ ,  $g_{12}(x, y)$ ,  $g_{22}(x, y)$ . Suy từ hai chiều sang bốn, với không-thời gian cong bốn chiều của hình học Riemann, bình phương khoảng cách  $s^2$  giữa hai điểm kế cận  $x^\mu$  và  $x^\nu$  phải là

$$s^2 = g_{\mu\nu}(x^\lambda) x^\mu x^\nu$$

và ta gọi  $g_{\mu\nu}(x^\lambda)$ , *hàm* của tứ-vectơ  $x^\lambda$ , là *metric* (như mét) để đo lường khoảng cách giữa hai không-thời điểm  $x^\mu$  và  $x^\nu$  trong cấu trúc hình học cong bốn chiều. Sự đối xứng toàn diện trong hoán chuyển  $\mu \leftrightarrow \nu$  của  $s^2$  bảo cho ta có tất cả mười<sup>22</sup> thành phần  $g_{\mu\nu}(x^\lambda)$ , cũng như những tứ-vectơ  $x^\lambda$ ,  $x^\mu$ ,  $x^\nu$  đều có bốn thành phần  $x^0, x^1, x^2, x^3$ .

Để tóm tắt, trong giai đoạn đầu thai nghén của thuyết tương đối rộng, Einstein đặt nền tảng hình học của một không-thời gian *cong* trong đó khoảng cách bình phương giữa những sự kiện vật lý tạo thành những hình hyperboloïd<sup>23</sup>. Hình này là tập hợp các điểm cách trung tâm hệ quy chiếu  $O$  một độ dài  $s$  trong thế giới cong bốn chiều, cũng như bề mặt hình cầu là quỹ tích các điểm cách trung tâm  $O$  một độ dài  $X$  trong thế giới phẳng ba chiều. Cấu trúc cốt lõi của hình học cong chính là *metric*  $g_{\mu\nu}(x^\lambda)$ , một hàm tổng quát của tứ-vectơ  $x^\lambda$ . Không có hệ qui chiếu nào ưu tiên hơn hệ khác để diễn tả các hiện tượng vật lý, các định luật vật lý đều giữ nguyên dạng trong bất kỳ hệ qui chiếu phi quán tính nào mà ta chọn. Einstein gọi nó là nguyên lý tương đối tổng quát, mở rộng nguyên lý tương đối hẹp của Galilei như đã trình bày ở phần I.

2- Giai đoạn thứ hai vô cùng quan trọng trong tiến trình xây dựng thuyết tương đối rộng là sự đồng nhất giữa *metric*  $g_{\mu\nu}(x^\lambda)$  của hình học với trọng trường của vật chất. Đó quả thật là một cách mạng trong tư duy khoa học của loài người khi Einstein gắn bó hai đại lượng cơ học và hình học mà trước ông ai cũng nghĩ rằng hoàn toàn khác biệt. Nó thể hiện ý tưởng sung sướng nhất đời của Einstein mà ông gọi là *nguyên lý tương đương* giữa gia tốc và trọng trường nói ở trên.

Thực tế chúng ta hãy xem xét một quan sát viên trong hệ quy chiếu quán tính của không-thời gian phẳng bốn chiều Minkowski, người ấy không nhận ra một trọng trường nào cả, mọi vật không chuyển động nhanh mà di chuyển đều đặn hay đứng yên, và thước đo lường khoảng cách không-thời gian là *metric* đơn sơ  $\eta_{\mu\nu}$  với các hệ số cố định  $\pm 1$ . Nay người ấy ở trong thang máy rơi với gia tốc  $\neq 0$ , anh ta thấy hai điều: (i) tọa độ không-thời gian sẽ biến đổi một cách phi tuyến tính với *metric*  $g_{\mu\nu}(x^\lambda)$  thay đổi từ điểm này sang điểm kia rất phức tạp, và (ii) mọi vật trong thang rơi khác nhau chính vì  $g_{\mu\nu}(x^\lambda)$  thay đổi từ điểm  $x^\lambda$  này sang điểm kế cận vì phân  $x^\lambda + dx^\lambda$  kia, sự chuyển động có gia tốc này giống như tác động của trọng lực, vậy *metric*  $g_{\mu\nu}(x^\lambda)$  diễn tả trọng trường theo nguyên lý tương đương. Cái gắn bó đồng nhất giữa hình học

và cơ học, giữa metric và trọng trường đưa ta đến kết luận là hai vật hút nhau chỉ vì hai vật đó tìm nhau theo con đường *trắc địa* của không gian hình học cong diễn tả bởi  $g_{\mu\nu}(x^\lambda)$ . Đường trắc địa<sup>24</sup> là con đường tối ưu ngắn nhất hay dài nhất tùy trường hợp, (với hệ số  $-$  và  $+$  trong metric  $\eta_{\mu\nu}$  thì trắc địa lại là đường dài nhất) nối kết hai điểm A và B với nhau. Đó chính là quỹ đạo của hai vật đặt ở A, B chuyển động tự nhiên (chẳng do một lực hút nhau nào tác động lên chúng cả) trong cái thế giới cong bốn chiều của không-thời gian. Dưới ánh đèn huyền ảo của thuyết tương đối rộng, hiện tượng vạn vật hấp dẫn cổ điển ‘cơ bắp’ của Newton nay tỏa hiện như cảnh tượng cong uốn của không gian để làm vật chất rơi tìm nhau!

3- Giai đoạn cuối cùng trong quá trình xây dựng thuyết này là Einstein truy tầm nguồn gốc của cấu trúc không-thời gian cong, nghĩa là khám phá ra phương trình mà metric  $g_{\mu\nu}(x^\lambda)$  - nay chính là trọng trường - phải tuân theo.

Newton đã chứng minh chính khối lượng của một vật, vừa là nguyên nhân tạo ra trọng trường tác động lên vạn vật, cũng vừa là quán tính của vật ấy chịu sự chi phối của trọng lực tạo ra bởi các vật khác nó. Vì năng lượng cũng là khối lượng theo  $mc^2 = E_0$  của thuyết tương đối hẹp, vậy mật độ năng lượng góp phần tạo ra cái cấu trúc cong của không-thời gian bốn chiều để vạn vật rơi tìm nhau theo những *đường trắc địa*. Hơn nữa, năng lượng  $E$  cũng gắn bó với vectơ xung lượng  $\mathbf{p}$  thành một tứ-vectơ năng-xung-lượng tuân theo  $E^2 - c^2|\mathbf{p}|^2 = m^2c^4$ , vậy mật độ năng lượng phân phối trong không-thời gian chỉ là một trong mười thành phần của tenxơ mật độ năng-xung lượng<sup>25</sup>  $T_{\mu\nu}$ , tenxơ  $T_{\mu\nu}$  này chính là nhân tố tạo ra metric  $g_{\mu\nu}(x^\lambda)$  để diễn tả cấu trúc cong của không-thời gian. Chẳng phải ngẫu nhiên mà cả hai tenxơ  $g_{\mu\nu}(x^\lambda)$  và  $T_{\mu\nu}$  đều có mười thành phần.

### **D- Lâu đài Himeji-jo và ống khói nhà máy**

Lý thuyết tương đối rộng, hay định luật vạn vật hấp dẫn của Einstein<sup>26</sup> có thể tóm tắt trong một câu: Không-Thời gian chẳng cứng nhắc mà đàn hồi, hình học Minkowski bốn chiều phẳng lặng bị biến dạng thành cong uốn bởi năng-khối lượng của vật chất. Chính sự phân phối năng lượng đã tạo ra tính đàn hồi và cấu trúc cong của không-thời gian nhờ đó vạn vật rơi vào nhau như một biểu hiện của trọng trường chứ không có sức hút nào giữa chúng cả. Ý tưởng vật lý đã thành hình, vấn đề còn lại của Einstein là tìm ra phương trình diễn tả sự biến dạng đàn hồi của không-thời gian phẳng Minkowski.

Tính đàn hồi của một vật là khả năng vật đó trở lại trạng thái cứng nhắc ban đầu khi mất đi lực áp đặt lên nó để làm nó biến dạng, và Robert Hooke<sup>27</sup> (1635-1703) người đồng thời với Newton và là viện trưởng Hàn lâm viện Hoàng gia Anh, đã đặt nền móng khảo sát tính chất này với phương trình  $\mathbf{B} = \kappa\mathbf{T}$ , ký hiệu  $\mathbf{B}$  chỉ định sự biến dạng đàn hồi của vật và  $\mathbf{T}$  là lực căng làm biến dạng vật đó. Trong trường hợp không-thời gian bị *biến dạng* bởi năng-khối lượng, lực căng này chính là tenxơ năng-xung lượng  $T_{\mu\nu}$  như đã phân tích ở trên, hệ số tỷ lệ  $\kappa$  nhỏ thì biến dạng ít, hay  $1/\kappa$  lớn thì không-thời gian càng cứng nhắc. Sự tìm kiếm toán tử  $\mathbf{B}$  làm biến dạng cấu trúc hình học phẳng kéo dài trong ba năm gian lao, khởi đầu vào tháng tám

năm 1912 khi Einstein từ chức nhiệm vụ giáo sư đại học ở Praha (thủ đô Tiệp Khắc) để trở về đảm nhận chức vụ giáo sư thực thụ ở trường cũ là viện Bách khoa công nghệ Zürich (ETH). Tại đây ông đề nghị cộng tác với bạn xưa cùng trường Marcel Grossmann, một nhà hình học nay là chủ nhiệm khoa toán-lý của ETH trong việc tìm kiếm toán tử  $\mathbf{B}$ . Nhà toán Grossmann, không quen thuộc với hình học không gian phức tạp chứa đựng vật chất và năng-xung lượng của nó mà nhà vật lý Einstein cần đến, bèn tham khảo tài liệu, thư mục và sách báo cho bạn những điều cần thiết chứa đựng trong công trình của Riemann và những nhà toán học kế tiếp như Christoffel, Ricci và Levi-Civita để Einstein đi từ  $g_{\mu\nu}(x^\lambda)$  mà xây dựng nên đối tượng toán học  $\mathbf{B}(g_{\mu\nu}(x^\lambda)) \equiv \mathbf{B}_{\mu\nu}$ .

Toán tử  $\mathbf{B}_{\mu\nu}$  làm biến dạng cấu trúc hình học phẳng thành cong không đơn sơ chỉ là hiệu số giữa  $g_{\mu\nu}(x^\lambda)$  và  $\eta_{\mu\nu}$  như ta có thể mơ hồ đoán vậy. Thực tế, theo nguyên lý tương đương giữa trọng trường và gia tốc ‘sung sướng nhất đời ông’, trong cái không-thời gian với cấu trúc tổng quát  $g_{\mu\nu}(x^\lambda)$ , ta để thang máy rơi tự do và câu hỏi là trọng trường có thực sự bị xoá bỏ đi ở *tất cả mọi điểm* trong cái thang đó không? Câu trả lời là sự xoá bỏ ấy không trọn vẹn, hãy còn chút đỉnh thặng dư vì thực ra hai điểm cách nhau vi phân *không* rơi đồng nhất như hết nhau với cùng một gia tốc. Điều này thể hiện qua việc metric  $g_{\mu\nu}(x^\lambda)$  thay đổi từ điểm  $x^\lambda$  này sang điểm kế cận vi phân  $x^\lambda + dx^\lambda$  kia. Cái thặng dư gia tốc đó có thể mượn tượng qua thí dụ thủy triều của nước biển sớm tối trào lên và rút đi. Thực vậy nước biển ở phần bán cầu trái đất gần mặt trăng (mặt trời) bị ‘roi kéo’ vào mặt trăng (mặt trời) với gia tốc *khác* gia tốc của nước biển ở bán cầu đối nghịch xa mặt trăng (mặt trời), và sự khác biệt kép của gia tốc nước biển chính là nguyên nhân của hiện tượng thủy triều. Vậy làm sao tính cái thặng dư gia tốc ở mỗi không-thời điểm? Mà sự khác biệt giữa  $g_{\mu\nu}(x^\lambda)$  và  $g_{\mu\nu}(x^\lambda + dx^\lambda)$  của hai điểm kế cận vi phân  $x^\lambda$  và  $x^\lambda + dx^\lambda$  chính là đạo hàm của nó, vậy ta không ngạc nhiên khi thấy đạo hàm của  $g_{\mu\nu}(x^\lambda)$  (như ký hiệu Christoffel và tenxơ Ricci  $\mathbf{R}_{\mu\nu}$  diễn tả độ cong của hình học Riemann) xuất hiện trong  $\mathbf{B}_{\mu\nu}$ , và ông tìm ra  $\mathbf{B}_{\mu\nu} = \mathbf{R}_{\mu\nu} - (1/2) \mathbf{R}g_{\mu\nu}$ , đó là chặng đường vất vả nhất kéo dài ba năm<sup>28</sup>.

Giai đoạn chót là xác định hệ số  $\kappa$  trong phương trình  $\mathbf{B}_{\mu\nu} = \kappa \mathbf{T}_{\mu\nu}$ . Để tìm nó, định luật hấp dẫn cổ điển của Newton được Einstein khai thác như một dạng xấp xỉ gần đúng<sup>29</sup> của phương trình  $\mathbf{R}_{00} - (1/2) \mathbf{R}g_{00} = \kappa \mathbf{T}_{00}$ . Thực tế, thành phần  $\mathbf{T}_{00}$  (phụ chú 25) vì tỷ lệ thuận với mật độ năng lượng  $E_0 = mc^2$  nên nó cũng tỷ lệ với mật độ khối lượng  $m$  của một vật nào đó (như trái đất chẳng hạn) và chính  $m$  tạo ra gia tốc  $Gm/R^2$  áp đặt lên các vật khác (ở cách nó một đoạn không gian  $R$ ) để làm chúng vận hành, và ông xác định được hệ số  $\kappa = 8\pi G/c^4$ ,  $G$  là hằng số Newton của lực hấp dẫn<sup>30</sup>. Ngày 25 tháng 11 năm 1915, Einstein sau ba năm lặn lội với hình học đã trao tặng cho nhân loại thuyết tương đối rộng mà càng ngày càng đầy tính thời sự khoa học nóng hổi, từ nghiên cứu cơ bản (Vũ trụ và sự hình thành, Big bang, Big crunch, Lỗ đen, Siêu dây, Năng lượng và Vật chất tối, Chân không lượng tử, Lý thuyết Thống nhất Toàn thể) đến công nghệ ứng dụng (Hệ thống Định vị Toàn cầu GPS<sup>31</sup> dùng trong các phương tiện di chuyển là một thí dụ). Mời bạn đọc chiêm ngưỡng phương trình Einstein mà về trái mô tả hình học không-thời gian bốn chiều trong đó vận hành vạn vật, còn về phải là vật chất tạo dựng nên cái cấu trúc cong uốn của không-thời gian:

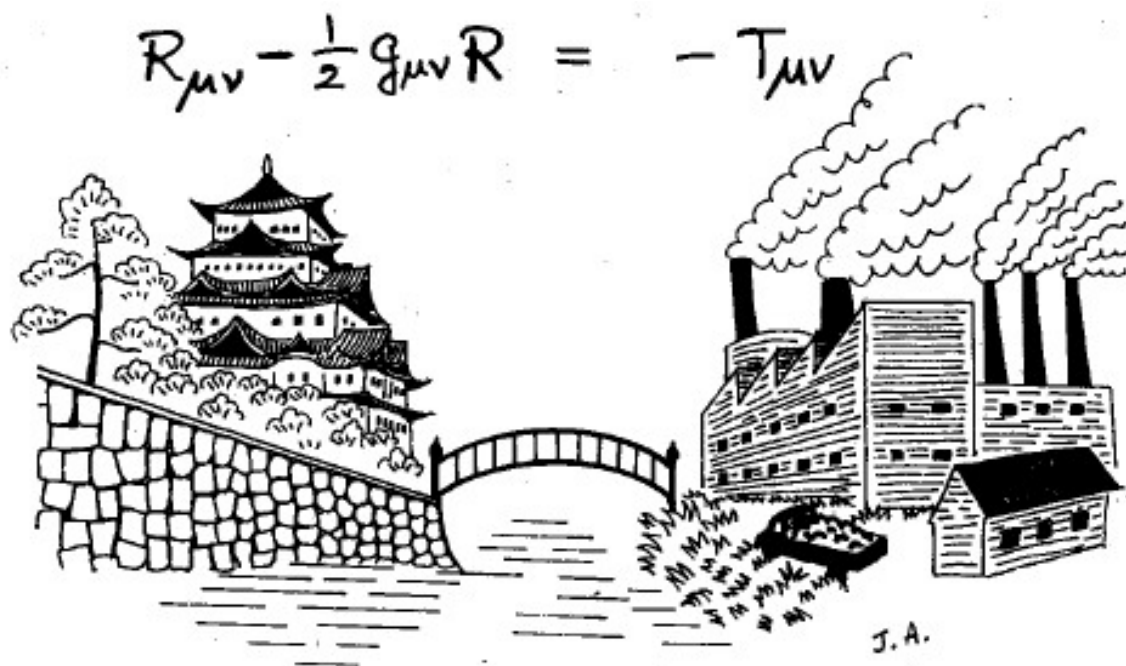
$$\mathbf{R}_{\mu\nu} - (1/2) \mathbf{R}g_{\mu\nu} = (8\pi G/c^4) \mathbf{T}_{\mu\nu} \quad (\text{II})$$



Trong mười thành phần của phương trình Einstein, chỉ có thành phần  $\mu\nu = 00$  là tương hợp với định luật cổ điển vạn vật hấp dẫn của Newton (sau khi ta áp dụng phép tính xấp xỉ gần đúng), còn chín cái khác là mới.

Thông điệp vật lý gói ghém trong phương trình trên có thể tóm lược như sau: khối lượng của vật chất áp đặt không-thời gian phải cong đi, còn không-thời gian cong này chi phối bất vật chất phải chuyển động ra sao. Sự vận hành của vật chất (ánh sáng cũng là vật chất) bởi trọng trường không do một lực cơ bắp nào hết mà thực ra sự di chuyển đó lại trầy lười nhất vì quỹ đạo của vật chất chính là những đường “trắc địa” trong một không-thời gian bị cong bởi sự hiện hữu và phân phối của vật chất. Đáp lại, vật chất và năng lượng luôn luôn biến chuyển của chúng cũng tác động tới độ cong của không-thời gian, và cứ thế tiếp diễn liên hồi vũ điệu giữa cơ học và hình học.

Mật độ năng-xung lượng càng lớn ở đâu thì không-thời gian cong uốn càng nhiều ở đấy, khi căng quá thành đứt gãy và đó là gốc nguồn của lỗ đen, một không-thời gian tận thế ở đó bất kỳ vật chất nào, kể cả ánh sáng và tín hiệu thông tin, khi đi gần đều bị hút chặt vào chẳng sao thoát khỏi. Mời bạn đọc coi bức thư Einstein gửi ngày 09 tháng 01 năm 1916 cho Karl Schwarzschild (nhà vật lý thiên văn Đức đang hành quân ở mặt trận Nga-Đức trong thế giới đại chiến 1914-1918, vào những giờ phút ngừng bắn đã đầu tiên giải được phương trình của thuyết tương đối rộng mà Einstein vừa công bố tháng trước): “cái đặc điểm của lý thuyết mới này (tương đối rộng) là không gian và thời gian tự chúng chẳng có tính chất vật lý gì cả. Nói đùa thôi, giả thử mọi vật trên đời biến mất thì theo Newton ta hãy còn một không gian rộng tuếch phẳng lặng mênh mang và mũi tên thời gian vẫn lặng lẽ trôi, nhưng theo tôi thì tuyệt nhiên chẳng còn chi hết, cả không gian lẫn thời gian và vật chất<sup>32</sup>!” Thực là một cuộc cách mạng về tư duy mà Einstein mang đến cho nhân loại: chính vật chất trong đó có da thịt tâm tư con người xây dựng ra vũ trụ. Vật chất và không-thời gian là hai khía cạnh của một bản thể duy nhất, cái này sinh cái kia, không có cái này thì cũng chẳng có cái kia. Nhà vật lý Nhật bản Yoichiro Nambu<sup>33</sup> qua bức tranh nửa trào lộng nửa trầm tư (Hình 1), minh họa về trái phương trình Einstein bằng lâu đài Himeji-jo xa xưa của một thoáng không gian trang nghiêm thanh thoát bên bờ suối, còn về phải bên kia cầu vương vấn trong cảnh trần ai bởi khói than nhà máy phản ánh vật chất nặng nề!



Hình 1

### ***E - Newton nhường ngôi, Einstein đăng quang!***

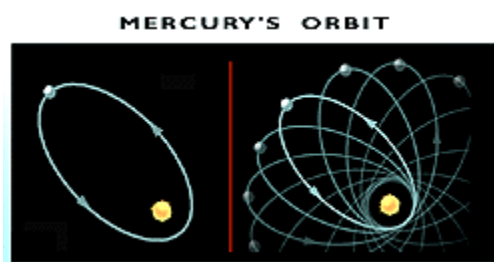
Trong một công trình ngắn gọn gửi cho Viện Hàn lâm Phổ ngày 18 tháng 11 năm 1915, Einstein giải thích và tiên đoán hai hiện tượng, hệ quả tất yếu của thuyết tương đối rộng. Ông tính toán chính xác được chúng là bao nhiêu để có thể kiểm chứng, quan sát đo lường được. Hai hiện tượng đó là:

1- Theo thuyết hấp dẫn cổ điển của Newton (với luật  $1/r^2$  thì càng ở gần càng bị lôi hút mạnh), trong tám hành tinh của hệ mặt trời thì hành tinh Thủy bị tác động không những bởi trọng trường rất mạnh của mặt trời vì ở gần nó nhất, mà cũng bởi cả trọng trường nhỏ hơn của các hành tinh khác, chủ yếu bởi Kim tinh gần nó hơn cả. Do đó quỹ đạo - hình bầu dục của Thủy tinh quay quanh mặt trời - không cố định, trục chính của hình bầu dục này lại chuyển dịch quay đi một chút do ảnh hưởng nhiễu loạn của các hành tinh bạn. Vì mỗi trục tương ứng với một quỹ đạo trong một chu kỳ, vậy có nhiều quỹ đạo liên hồi khác nhau chút xíu, coi Hình 2 được phóng đại rất nhiều để dễ cảm nhận. Hệ quả là điểm cận nhật (perihelion, điểm trên quỹ đạo gần mặt trời nhất) không cố định, mỗi chu kỳ khi Thủy tinh quay một vòng xung quanh mặt trời thì trục chính của quỹ đạo và điểm cận nhật lại lệch đi một chút, hiện tượng này gọi là “tuế sai”.

Khi dùng thuyết hấp dẫn cổ điển để tính toán các thông số (như quỹ đạo và khối lượng) của các hành tinh thì nhà thiên văn Pháp Le Verrier phát hiện năm 1859 một nghịch lý. Thực tế các nhà thiên văn thuộc nhiều thế hệ đã ghi chép điểm cận nhật của Thủy tinh trong một thế

kỷ và Le Verrier nhận thấy nó đến trước một tí chút, khoảng 43" so với tính toán của ông. Tuy độ lệch tuế sai của Thủy tinh chỉ có 43", nhỏ như vậy<sup>34</sup> nhưng ông biết là có thật mà không sao giải thích nổi, vì nếu muốn cho tính toán phù hợp với quan sát thì phải thay đổi đến 10% khối lượng của Thủy tinh, nhưng thay đổi này lại mâu thuẫn với tất cả các thông số chính xác khác của các hành tinh bạn.

Einstein giải thích nghịch lý này bằng độ cong của không gian ở gần mặt trời, độ cong đó tác động lên độ tuế sai. Ông tính toán là với mỗi chu kỳ 0.24 năm của Thủy tinh quay quanh mặt trời thì độ tuế sai phải thay đổi là  $\delta\phi = 6\pi GM_0/dc^2 \approx 0.1038''$  với  $M_0$  là khối lượng của mặt trời và  $d \approx 5.57 \times 10^7$  km là khoảng cách trung bình giữa mặt trời và Thủy tinh. Trong một thế kỷ với 415 chu kỳ của Thủy tinh, ông tìm ra kết quả rất sát với con số 43" thần diệu khiến tim ông dữ dội đập trong nhiều ngày như ông kể lại cho bạn bè. Những hành tinh khác vì ở xa mặt trời nên chẳng bị ảnh hưởng mấy bởi độ cong không gian quá nhỏ, ở xa mặt trời thuyết hấp dẫn cổ điển của Newton khá chính xác và khi dùng nó thì Le Verrier tháng tám năm 1846 đã tiên đoán sự hiện hữu của Hải Vương tinh màu xanh lơ rất đẹp mà ngay đêm 23 tháng chín năm ấy mọi người đã được đầu tiên nhìn thấy trên bầu trời nước Pháp.



Hình 2 (phía **trái** : duy nhất một quỹ đạo cố định của Thủy tinh nếu chỉ tính đến trọng trường mạnh của mặt trời, phía **phải**: nhiều quỹ đạo của Thủy tinh, chúng khác nhau tí chút do nhiễu loạn bởi những trọng trường yếu hơn của các hành tinh bạn, chủ yếu bởi Kim tinh).

2- Như bất kỳ mọi vật thể có hay không khối lượng, ánh sáng cũng bị tác động bởi sức hút của mặt trời, khi gần nó tia sáng không truyền theo đường thẳng tắp mà bị lệch một góc nhỏ. Theo thuyết hấp dẫn cổ điển với không gian phẳng thì góc lệch bằng  $2GM_0/R_0 c^2 = 0.875''$  với  $R_0 \cong 7.10^5$  km là bán kính của mặt trời và  $M_0$  là khối lượng của nó.

Với không gian cong của thuyết tương đối rộng, Einstein tiên đoán độ lệch của tia sáng phải là  $4GM_0/R_0 c^2 = 1.75''$ , gấp đôi kết quả của luật Newton. Bạn đọc lưu ý là đại lượng *không thứ nguyên* (*dimensionless*)  $GM/rc^2$ , viết dưới dạng hàm số của chiều dài không gian  $r$ , sẽ luôn luôn xuất hiện trong nhiều tính toán sau này về những hiện tượng của trọng lực, từ Newton đến Einstein qua Schwarzschild, Hawking, coi phụ chú 29 như một thí dụ.

Để quan sát và đo lường được độ lệch của tia sáng, phát ra từ một thiên thể xa xăm, khi đi sát mặt trời thì ban ngày ta cần mặt trăng che lấp nó (nhật thực) rồi so với ánh sáng ban đêm đến từ cùng một thiên thể nhưng lúc đó mặt trời đã ở xa. Sự khác biệt (giữa ban ngày nhật thực và ban đêm) của tia sáng cho ta biết nó bị lệch đi bao nhiêu bởi trọng trường của mặt trời. Nhân

dịp nhật thực ngày 29 tháng 5 năm 1919, hai phái đoàn người Anh do Arthur Eddington đề xướng, được gửi đi Sobral (Brasil) và đảo Principe bờ biển Phi châu để đo lường ánh sáng bị bẻ cong bao nhiêu. Kết quả là  $1.98 \pm 0.12''$  (Sobral) và  $1.61 \pm 0.31''$  (Principe) khác xa con số  $0.875''$  của thuyết trọng lực cổ điển với không gian phẳng mà lại đúng với tiên đoán của Einstein.

Sau buổi họp vô cùng căng thẳng và xúc động ngày 6 tháng 11 năm 1919 của Hàn lâm viện Hoàng gia Anh trong đó chỉ riêng nhà vật lý Ludwig Silberstein hơi chống đối, còn mọi người đều tin tưởng kết quả của hai phái đoàn, báo chí khắp nơi trên thế giới đưa tin “Newton nhường ngôi, Einstein đăng quang!” làm ông bỗng nhiên một sớm lừng danh trong đại chúng. Mặc dầu tin đồn trên thế giới chỉ có ba người thời ấy hiểu được sâu sắc thuyết tương đối rộng, và Silberstein tin rằng mình nằm trong số đó nên lại gần Eddington khen ngợi ông thì Eddington châm biếm trả lời không biết ai là người thứ ba.

Để đánh giá phần nào gia tài tri thức mà Einstein trao cho nhân loại, mời bạn đọc nhớ lại vào cuối thế kỷ 19, khoa học thời ‘tiền tương đối’ được hiểu như sau : Không gian ba chiều như một sự thực tiên nghiệm ‘trời cho’, một sân khấu lạnh lùng hoàn toàn biệt lập với vật chất thao diễn trong đó. Cấu trúc hình học của không gian phẳng (tổng cộng ba góc hình tam giác bằng 180 độ) đã được khai thông bởi các nhà hiền triết Hy Lạp Euclid, Pythagoras từ hơn hai thiên niên kỷ trước. Thời gian như một mạch đập ‘hiện sinh’ của vũ trụ, một mũi tên lặng lẽ trôi vô thủy vô chung. Vật chất là một thực thể thường trực không sinh không hủy, và sau hết lực tác động *một cách tức thì* lên vật chất để làm chúng vận hành.

Einstein đã cho ta một nhận thức khoa học và triết học khác: bước chuyển thời gian là một ảo tưởng, chỉ có một thực tại duy nhất không-thời gian bốn chiều gắn bó với nhau, chẳng có cái ‘bây giờ’. Vạn vật phù du, vô thường, không ngừng đổi biến. Bất kỳ lực nào cũng vậy, chúng không thể tác động tức thì lên vật chất mà cần thời gian dù rất nhỏ để truyền thông tin và ảnh hưởng. Hơn nữa toàn bộ Không gian, Thời gian, Lực, Vật chất chẳng sao tách biệt, cặp không-thời gian (cái vỏ chứa) và cặp lực-vật chất (cái được chứa) chùng chéo liên kết với nhau, cấu trúc không phẳng mà cong uốn của không-thời gian được xây dựng bởi chính nội dung vật chất chứa đựng trong đó. *Năng lượng là gốc nguồn chung cho tất cả, từ đó vật chất, lực, không gian, thời gian được tạo dựng nên.*

## **F- Hiện tình và Viễn tượng**

Dẫu mang quá khứ huy hoàng, hoạt động khoa học nghiên cứu ở Âu châu - quê hương của Lượng tử và Tương đối, hai trụ cột của vật lý hiện đại mà hơn ai hết Max Planck và Albert Einstein đóng góp vào - đã phần nào bị lu mờ trong nửa thế kỷ sau Đệ nhị Đại thế Chiến 1939-1945 thảm khốc và phân hoá Đông-Tây. Năm 2008 mở đầu một bước ngoặt đánh dấu sự phục hưng của nền vật lý ở châu lục này với hai sự kiện nổi bật: trên trời có vệ tinh Planck được phóng lên không trung với kính viễn vọng tân kỳ để quan sát đo lường ánh sáng tàn dư từ thừa Nổ lớn (Big bang) xảy ra cách đây khoảng 13.8 tỷ năm với chi tiết chưa từng đạt, dưới sâu hơn trăm thước trong lòng đất có máy gia tốc hạt LHC (Large Hadron Collider) ở CERN<sup>35</sup> với chu vi 27 cây số, khắp năm châu duy nhất chỉ có máy này đạt tới năng lượng cực cao 13

TeV (tháng 5 năm 2015) làm đầu tàu trong công cuộc khám phá, đào sâu tìm hiểu, nhằm thống nhất các định luật cơ bản của vạn vật. Chương trình khám phá ưu tiên của máy gia tốc LHC là việc săn tìm hạt cơ bản Higgs<sup>36</sup> hạt tạo ra khối lượng cho vật chất, đề tài mũi nhọn của vật lý hiện đại, mở đường cho khả năng thống nhất hoà quyện Lượng tử với Tương đối rộng. Xin nhắc lại khối lượng là cơ nguyên khởi đầu của không-thời gian, của vạn vật, của vũ trụ, không có khối lượng tức năng lượng thì chẳng còn gì hết. Yếu tố nền tảng của vật lý hạt cơ bản là sự hiện hữu thiết yếu của hạt boson Higgs vô hướng (spin 0) tràn ngập không gian để cung cấp khối lượng cho tất cả các hạt khác khi tương tác với nó. Lý thuyết và thực nghiệm, tay trong tay vươn tìm những bến bờ xa xăm sâu thẳm nhất của tri thức khoa học, tiếp nối khát vọng chung của con người xưa nay không ngừng tìm hiểu thiên nhiên và bản thể của các hiện tượng. Hơn bao giờ hết và càng ngày càng rõ nét là cách tiếp cận cách tân của hai thế giới liên thông mật thiết: vĩ mô của vũ trụ bao la diễn giải bởi thuyết Tương đối rộng và vi mô của hạt cơ bản diễn giải bởi trường lượng tử của Mô Hình Chuẩn. Vệ tinh Planck và máy gia tốc hạt LHC theo thứ tự là hai công cụ thực nghiệm tinh vi hiện đại nhất trong công cuộc đo lường, tìm hiểu, khám phá, giải thích nhất quán những bí ẩn của hai thế giới vĩ mô và vi mô nói trên. Ngành khoa học thống nhất và bổ túc lẫn nhau của hai thế giới đó mang tên gọi thiên văn-vật lý hạt (astro-particle physics).

Nhà thiên văn tìm hiểu sự vận hành của các tinh tú trong vũ trụ và vật chất cấu tạo nên nó, trong đó lịch sử sự hình thành toàn vũ và quá trình biến đổi của vạn vật là thí dụ trung tâm nhất. Những hiện tượng trong vũ trụ chủ yếu được quan sát, phân tích, hiểu biết và diễn tả bởi những định luật vật lý. Thực thể, từ nguồn gốc của năng lượng làm chói sáng các vì sao (tổng hợp nhiệt hạch, tương tác yếu làm phân rã hạt nhân nguyên tử), trạng thái plasma của quark và gluon trong thời nguyên thủy của vũ trụ, sự hình thành, vận chuyển, biến hóa bùng nổ hay tàn lụi của các thiên thể: sao lùn (trắng và nâu), sao siêu mới (supernovae), thiên hà, quasar rực sáng nhất mặc dầu ở rất xa tận biên giới của vũ trụ, sao neutron pulsar, lỗ đen, cho đến các hành tinh ngoài hệ mặt trời mới được khám phá gần đây thậm chí sự sống trên đó, sóng trọng trường tiên đoán bởi thuyết tương đối rộng..., tất cả đòi hỏi kiến thức đa ngành của vật lý và khoa học nói chung.

Thiên văn thời xa xưa, giới hạn trong sự chuyển động tuần hoàn của hệ mặt trời với các hành tinh và sao chổi trong cơ học cổ điển, đã trở thành thiên văn-vật lý trong đó hạt cơ bản đóng vai trò chủ động. Ngày nay thiên văn hầu như đồng nghĩa với vũ trụ học và gốc nguồn của nó (tinh nguyên học) mà cốt tủy là thuyết tương đối rộng. Thuyết này như nàng Bạch Tuyết sau hơn nửa thế kỷ thiu thiu ngủ đã bừng tỉnh cùng ông hoàng Lượng Tử cất cánh vươn xa tìm biên giới của tri thức.

1- **Thuở ban đầu:** Einstein là người trước tiên nhận ra cái toàn bộ chẳng sao tách biệt giữa vật chất-lực (cái nội dung) và không-thời gian (cái vỏ ngoài). Tất cả chỉ là một mà ông gọi là vũ trụ và khoa học nghiên cứu cái toàn bộ đó mang tên là vũ trụ học mà nguyên tắc - được ông xây dựng trong một công trình ra đời tháng 2 năm 1917- vẫn tiếp tục làm nền tảng rạng sáng cho mãi đến ngày nay, mặc dầu thay đổi nhiều về chi tiết và mô hình ban đầu. Trước hết ông nhận thấy phương trình (II) của thuyết tương đối rộng *không* có nghiệm số nào tương ứng với một vũ trụ vĩnh cửu bất biến với thời gian mà định kiến ngàn xưa đều tin chắc như vậy,

ngay cả với con người cấp tiến như Einstein! Ông dành thêm vào về trái phương trình (II) một số hạng  $\Lambda g_{\mu\nu}$  (ông gọi  $\Lambda > 0$  là hằng số vũ trụ vì nó chẳng có hệ quả cục bộ nào ở bất kỳ các quy mô lớn hay nhỏ) để có được một nghiệm số diễn tả vũ trụ âm êm tĩnh lặng, tuy *cong về không gian* nhưng lại *phẳng* (không thay đổi) *với thời gian*. Nhưng chỉ vài năm sau đó, các nhà thiên văn vật lý W. de Sitter (Hà Lan), A. Friedmann (Nga) và G. Lemaître (Bi) khi xem xét toàn diện mười thành phần của phương trình (II) chứng minh là vũ trụ không những cong về không gian mà cũng phải cong cả với thời gian, vậy vũ trụ hoặc giãn nở hoặc co nên chứ không tĩnh tại.

Hỗ trợ quyết định cho phân lý thuyết trên xảy ra năm 1929 khi nhà thiên văn Mỹ E. Hubble đo lường quang phổ ánh sáng của các thiên hà và phát hiện chúng đồng loạt có tần số sóng bị giảm đi so với quang phổ đo trên trái đất. Tương tự như hiệu ứng Doppler trong âm thanh, theo đó tiếng sáo phát ra trên tàu chạy xa bến thì người đứng yên trên bến nghe sáo trầm hơn, ngược lại nếu tàu tiến gần vào bến, tiếng sáo nghe bổng hơn<sup>37</sup>. Vì quan sát thấy tần số ánh sáng giảm đi trên các thiên thể, Hubble suy ra là khoảng cách từ trái đất tới các thiên hà tỷ lệ thuận với tốc độ của chúng, thiên hà càng ở xa vận tốc nó càng lớn. Như vậy vũ trụ không còn tĩnh lặng mà giãn nở như quả bóng khi ta bơm hơi vào, một thực tại chẳng sao chối cãi. Sự kiện thiên văn quan trọng hàng đầu này ngày nay được xác định rất vững vàng bởi nhiều đo lường khác, do đó hằng số  $\Lambda$  (mà Einstein đưa ra như một tiên đề để giữ tĩnh lặng cho vũ trụ) chẳng còn cần thiết nữa khiến ông coi đó là sai lầm lớn.

Nhưng cái gì làm vũ trụ giãn nở? Nhiều nhà vật lý thiên văn ngày nay cho rằng có thể chính là hằng số  $\Lambda$ . Ai ngờ cái *sai lầm* hơn nửa thế kỷ trước, nay có thể trở nên một thành viên chủ yếu chiếm ngự đến 68 % năng lượng của hoàn vũ dưới cái tên mới là *năng lượng tối* để làm giãn nở vũ trụ, cái năng lượng tối đầy bí ẩn này chưa ai biết là gì, tuy nhiên nó chẳng phải do vật chất tạo thành mà lại mang đặc tính năng lượng của *chân không*<sup>38</sup>. Việc tiên đoán vũ trụ giãn nở thực là một kỳ công của thuyết tương đối rộng.

**2- Vụ Nổ lớn (Big Bang):** Đo lường được vận tốc giãn nở (hằng số Hubble) của vũ trụ ngày nay, bạn hãy tưởng tượng thời gian lần ngược trở lại tựa như một cuộn phim chiếu giật lùi và thấy các thiên hà ngày nay xa nhau bao nhiêu lại càng sát gần nhau bấy nhiêu lúc xa xưa khiến cho vũ trụ trước kia nhỏ hơn và phải có lúc xuất phát từ một khoảng không gian li ti. Ta suy ra khoảng 13.8 tỷ năm trước có một hiện tượng kỳ dị theo đó, từ một nguồn năng lượng và nhiệt độ vô hạn, nén ép trong một không gian cực kỳ nhỏ bé đã xảy ra vụ Nổ lớn. Nơi xảy ra Big Bang chính là chỗ bạn đang ở, cũng như ở bất cứ nơi đâu trong vũ trụ bao la vì ở thời-điểm ấy, mọi chỗ ngày nay tách biệt hàng tỷ năm ánh sáng thực ra đã cùng chụm lại ở cái không-điểm kỳ dị<sup>39</sup>, chẳng có một trung tâm vũ trụ ban đầu nào cả.

Hiện tượng vũ trụ động chứ không tĩnh - nghĩa là không-thời gian chẳng phải sẵn có từ trước mà trái lại nó xuất hiện, giãn nở hay co cụm tùy thuộc vào mật độ năng-xung lượng của vật chất - là hệ quả của thuyết tương đối rộng, một trong hai trụ cột của vật lý hiện đại cùng với thuyết lượng tử. Theo thuyết trường lượng tử, vì không gian giãn nở và lạnh dần, từ năng lượng vô hạn thuần khiết ban đầu của Big Bang đã sinh ra muôn ngàn các cặp hạt và phản hạt, các hạt cơ bản này là mầm mống để tạo nên vật chất và vũ trụ mà ta quan sát ngày nay với hàng trăm tỷ thiên hà, trong đó có giải sông Ngân và trái đất thân thương của chúng ta.

Hơn nữa, theo G. Gamow, phương pháp tinh tế chính xác nhất để kiểm chứng bằng thực nghiệm mô hình Big Bang là quan sát được hiện tượng “bức xạ nền”<sup>40</sup>, đó là ánh sáng tàn dư rơi rớt lại từ thuở ban đầu. Bức xạ nền này có hệ quang phổ của một vật đen<sup>41</sup>, đối tượng nghiên cứu đã đưa Planck đến giả thuyết lượng tử<sup>42</sup>. Mười năm qua đã chứng kiến nhiều phát triển trong sự hiểu biết của chúng ta về *mô hình chuẩn vũ trụ*, mang tên gọi  $\Lambda$ CDM<sup>43</sup> mà nòng cốt là vụ Nổ lớn.

Sự khám phá tình cờ ra “bức xạ nền” năm 1965 bởi Arno Penzias và Robert Wilson là bằng chứng thực nghiệm rất thuyết phục về Big Bang. Khởi đầu với nhiệt độ cực kỳ lớn ( $10^{32}$  Kelvin) từ “pha lạm phát” - khi không gian ở thời điểm  $10^{-32}$  giây sau Big Bang, vụt tăng trưởng với vận tốc lớn hơn vận tốc ánh sáng trong một khoảnh khắc cực kỳ ngắn khoảng một phần ngàn giây - rồi vào khoảng 380 ngàn năm sau đó, không gian nguội dần còn chừng  $3.000^\circ$  và cho phép hạt ánh sáng (photon) thoát ra khỏi đám bụi mù dày đặc electron và proton của vũ trụ nguyên thủy để tung bay khắp phía từ chỗ bạn đang ngồi cũng như đến các thiên hà xa xăm nhất. Ngày nay, ánh sáng đó đã nhạt phai với nhiệt độ trung bình  $2.725^\circ$ . Kính thiên văn vi ba đặt trên hai vệ tinh COBE (Cosmic Background Explorer) và WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) đo lường trực tiếp bức xạ nền vũ trụ. Hơn thế nữa, lần đầu tiên hai vệ tinh thiên văn trên còn phát hiện và đo lường được những *thăng giáng nhiệt độ*, những nhiễu loạn li ti này chỉ hơn kém (khoảng  $10^{-5}$ ) so với nhiệt độ trung bình  $2.725^\circ$  của bức xạ nền vũ trụ. Nhiễu loạn đó chính là những thăng giáng vi phân của thế giới lượng tử với nguyên lý Heisenberg quen thuộc, chúng cực kỳ quan trọng vì liên đới mật thiết đến mầm mống và sự phân bố của vật chất, nghĩa là của hàng trăm tỷ thiên hà “nhỏ bé” trong hoàn vũ bao la ngày nay. Thực thế, ở đâu mật độ vật chất lớn (hay nhỏ) hơn trung bình một chút thì bức xạ nền phải lạnh (hay nóng) hơn một chút, vì ở đó ánh sáng bị mất nhiều (hay ít) năng lượng bởi nó phải tương tác với vật chất để thoát khỏi lực hấp dẫn. Một vũ trụ mịn màng tuyệt đối, không chút vẩn gợn tựa như một sa mạc mênh mông toàn cát đỏ chẳng hề có vài ốc đảo vui mát an lành và Louis Pasteur đã chẳng thốt lên “bất đối xứng chính là nguồn sống” sao? Phân tích những thăng giáng nhiệt độ ở các vùng mật độ khác nhau, các nhà thiên văn vật lý đã xác định được hình dạng chi tiết cong hay phẳng của vũ trụ cũng như những thành phần vật chất và năng lượng trong đó. Giải Nobel 2006 vinh tặng những người chủ chốt John C. Mather và George F. Smoot của nhóm COBE đã lần đầu đo lường được những thăng giáng vi phân nhiệt độ của bức xạ nền có hệ quang phổ của một vật đen lý tưởng, cái vũ trụ bao la của chúng ta ngày nay.

### 3-Tăng tốc.

Chưa hết, ngạc nhiên hơn nữa là một khám phá quan trọng khởi đầu từ năm 1998 và đang trên đà phát triển mạnh, nó bất ngờ vì trái ngược với trực giác và định kiến, đó là thay vì giảm tốc do áp lực co hút, nén vào của trọng trường vật chất, vũ trụ lại tăng tốc và dẫn nở mạnh hơn lên! Thực thế vụ nổ Big Bang kinh hoàng ban đầu với một lực đẩy ra cực kỳ mạnh đã tạo ra không-thời gian và làm nó giãn nở, nhưng sau đó vũ trụ nguội dần, đám mây các hạt cơ bản ban đầu đặc lại và hút lẫn nhau tạo nên những chùm thiên hà. Chúng tất nhiên phải gây ra một trọng trường để nén ép không gian co lại và vũ trụ vì thế có nhiều khả năng giảm dần tốc độ giãn nở. Để trả lời câu hỏi là không gian có giảm vận tốc giãn nở hay không, hai nhóm các nhà

thiên văn, dẫn đầu bởi Saul Perlmutter ở Berkeley (Mỹ) và Brian Schmidt ở Mount Stromlo (Úc) cùng đồng nghiệp Adam Riess tìm cách đo lường sự giảm tốc này bằng cách đo vận tốc tách rời nhau (qua sự xê dịch quang phổ về phía đỏ) của các siêu tân tinh (supernovae) loại Ia ở nhiều khoảng cách khác nhau (qua độ sáng vô cùng rực rỡ của chúng). Sao siêu mới loại Ia là sao lùn trắng nằm cận kề và quay cặp đôi với một tinh tú khác đang trong thời kỳ chói sáng, trọng lực của sao lùn thu hút vào nó năng-khối lượng của tinh tú bạn đồng hành, và làm cho sao lùn nặng dần lên. Khi vượt quá khối lượng tới hạn Chandrasekhar, trọng trường của sao lùn ngày càng cao nên vỏ bị nén ép mạnh, nhiệt độ tăng nhanh đến 600 triệu độ để trở thành sao siêu mới và phản ứng hạt nhân phát động làm nó bùng nổ tan tành với độ sáng rực như mười tỷ mặt trời. Sau gần mười năm cật lực tìm tòi khoảng 50 sao siêu mới loại Ia để đo lường khoảng cách cùng vận tốc tách rời nhau của chúng, hai nhóm Mỹ và Úc (giải Nobel 2011) đưa ra kết luận giống nhau và rất bất ngờ: vũ trụ tuy có giảm tốc tăng trưởng nhưng chỉ trong có hơn 7 tỷ năm đầu thôi, sau đó từ những năm tiếp theo nó lại tăng tốc dẫn nở cho đến nay. Biện minh và bổ sung thêm cho khám phá sừng sốt này đến từ những đo lường mới đây rất chính xác bởi vệ tinh WMAP về sự thăng giáng nhiệt độ của bức xạ nền, chúng cho ta một biên vũ trụ Euclid không lồi lõm mà phẳng và đang dẫn nở ngày càng nhanh. Điều này đòi hỏi một lực đẩy vận vật ra xa, chống lại lực hút vào của trọng trường vật chất, nghĩa là cần phải có một áp lực mới để sinh ra lực đẩy đó. Thành phần mới này mang tên *năng lượng tối*. Để có được sự tăng tốc dẫn nở bắt đầu ở thời điểm hơn 7 tỷ năm sau Big Bang, tính toán cho biết mật độ *năng lượng tối* phải chiếm đến khoảng 68% mật độ tổng năng-khối lượng của hoàn vũ. Trong 32% còn lại, chỉ chừng 4% là vật chất bình thường (quark, lepton, photon, boson W) mà phản ứng nhiệt hạch của chúng làm chói sáng bầu trời ban đêm. Phần 28% sau rốt là một loại *vật chất tối* hoàn toàn khác lạ. Vật chất tối kỳ lạ này không bức xạ, nghĩa là không bị chi phối bởi ba tương tác cơ bản quen thuộc (điện từ, mạnh và yếu của hạt nhân nguyên tử), khối lượng của nó chỉ có vai trò duy nhất là tạo ra trọng lực hút vào để giữ cho các thiên hà góp thành chùm chứ không tung bay khắp phía. Nguồn gốc và bản chất bí ẩn của năng lượng tối (mang tính chất đẩy ra) và vật chất tối (mang tính chất hút vào), hai thành phần chế ngự hầu như toàn diện vũ trụ, là đề tài nóng bỏng của thiên văn và vật lý hạt cơ bản hiện đại. Kỳ lạ và bí ẩn thay, 96% năng - khối lượng của vũ trụ ở ngoài tầm hiểu biết hiện nay của con người!

4- **Lỗ đen:** Ở đâu tập trung mật độ năng-khối lượng càng lớn thì ở đây sự biến dạng đàn hồi của không-thời gian càng mạnh, sự biến dạng tăng lên cho đến khi tính dẻo dai của không gian bị đứt, tựa như cao su nếu bị kéo quá căng sẽ hết co dãn đàn hồi và thay đổi tính chất. Hệ quả tất yếu của thuyết tương đối rộng là khi trọng trường vô cùng lớn thì sự thay đổi trạng thái của không-thời gian từ dẻo dai sang đứt vỡ làm xuất hiện các không-thời điểm kỳ dị, giai đoạn cuối đời của những thiên thể có khối lượng khổng lồ.

Đại lượng đo lường sự biến dạng của không gian bởi khối lượng của vật chất ở gần nó là hiệu số  $g_{00}(r) - \eta_{00} = h_{00}(r) \approx h_{ii}(r) \approx 2GM/(c^2r)$ , ở đây M là khối lượng vật chất và  $r = |\mathbf{x}|$  là chiều dài của vectơ không gian  $\mathbf{x}$  (coi phụ chú 29). Khi đại lượng không thứ nguyên này nhỏ, thí dụ  $2GM_0/(c^2R_0) \approx 4.2 \times 10^{-6}$  như trường hợp mặt trời (với  $M_0$  là khối lượng và  $R_0$  là bán kính của nó), ta có thể dùng phép tính xấp xỉ như Einstein đã dùng để giải đáp hiện tượng tuế sai của Thủy tinh và tiên đoán độ cong của ánh sáng khi đi gần mặt trời (coi tiểu đoạn E). Với khối



lượng  $M$  và bán kính  $R$  của trái đất thì đại lượng đặc trưng  $2GM/(c^2R)$  là  $1.38 \times 10^{-9}$ , nhưng nếu  $2GM/(c^2r) = 1$  thì lỗ đen xuất hiện như một biểu tượng tận cùng của các thiên hà, tinh tú.

Mô hình diễn tả cuộc đời của các thiên thể từ lúc phát sinh cho đến khi tàn lụi là tiến trình tổng hợp nhiệt hạch các nhiên liệu hạt nhân nguyên tử trong tâm lõi của chúng. Quá trình liên tục đó đưa đến cấu trúc nhiều vỏ bao quanh thiên thể, giống như củ hành với nhiều màng lớp. Tâm lõi ngôi sao sau khi đã đốt hết các nhiên liệu qua sự tổng hợp nhiệt hạch sẽ không còn phóng xạ và hết chói sáng. *Lực đẩy ra* (do phóng xạ tung bay mạnh và tạo nên áp suất) nay không còn nữa để chống lại *lực hút vào* (do trọng trường), vì thế khi tàn lụi ngôi sao sẽ bị co lại bởi chính khối lượng của nó nén ép nó. Khi bị nén ép quá độ, trong khoảnh khắc ngôi sao nở bùng, nhiệt độ và năng lượng kinh hoàng của nó phát ra tương đương với 10 tỷ mặt trời sáng chói, đó là những sao siêu mới (supernovae) với vỏ ngoài tung bay khắp phía còn tâm lõi lạnh dần để trở thành một trong ba trạng thái cuối đời: sao lùn trắng, sao neutron (hay pulsar) và lỗ đen. Tùy theo khối lượng  $M$  và bán kính  $R$  của ngôi sao, tiến trình biến chuyển của nó được diễn tả bởi hệ số  $\alpha \equiv 2GM/(c^2R)$  lớn nhỏ khác nhau, sao lùn trắng nếu  $\alpha$  vào khoảng  $10^{-3}$  hay  $10^{-4}$ , sao neutron nếu  $\alpha \approx 0.4$  và cuối cùng là lỗ đen nếu  $\alpha = 1$ . Sao neutron (electron và proton trong tâm của nó bị nén ép biến thành neutron và neutrino, neutrino bay đi chỉ còn lại neutron gắn chặt trong tâm lõi của sao nay lạnh dần và trở nên bền vững, thậm chí còn quay xung quanh trục của nó). Nó có mật độ khối lượng vô cùng lớn,  $1\text{cm}^3$  của sao neutron nặng một tỷ tấn, đường bán kính  $R$  của sao chỉ chừng 10 km mà khối lượng  $M$  của nó lại khoảng 1.6 khối lượng mặt trời, nên đại lượng đặc trưng  $\alpha$  của sao neutron xấp xỉ bằng 0.4. Không gian trên sao neutron cong đến nỗi tổng cộng ba góc hình tam giác bằng  $250^\circ$  (phụ chú 19), nhịp độ tích tắc khá chậm của đồng hồ trên sao này chỉ bằng 78% so với đồng hồ trên trái đất (phụ chú 31). Sao neutron còn quay nhanh chung quanh trục của nó và mỗi một vòng quay thì phóng ra một chùm sóng vô tuyến (tần số dưới 300 GHz) cứ thế đều đặn như những nhịp điệu đồng hồ nên còn thêm tên gọi pulsar mà cô nghiên cứu sinh Jocelyn Bell ở đại học Cambridge năm 1967 vô tình khám phá ra và mang giải Nobel cho thầy hướng dẫn luận án A. Hewitt.

Nhưng cái gì ngăn cản không cho các thiên thể (sau khi đã đốt hết nhiên liệu) bị nén ép bởi chính khối lượng của chúng để trở thành ngay lỗ đen mà phải dừng lại nửa chừng như sao lùn trắng và pulsar? Câu trả lời chủ yếu đến từ nhà vật lý-thiên văn Mỹ gốc Ấn độ giải Nobel 1983 Subrahmanyan Chandrasekhar<sup>44</sup> trong chuyến tàu thủy mang cậu chưa đầy 20 tuổi từ Mumbai sang du học ở Cambridge năm 1931 đã tài tình kết hợp vật lý lượng tử với trọng trường và tìm ra khối lượng tới hạn  $M_C$  để phân loại các thiên thể cuối đời bị nén ép. Khi tàn lụi, các tinh tú có khối lượng nhỏ hơn  $M_C \approx 1.44 M_0$  sẽ trở thành sao lùn trắng, nếu khối lượng bằng  $M_C$  hay lớn hơn chút ít sẽ trở thành sao neutron, còn nếu khối lượng không lồ (từ vài chục đến hàng triệu lần  $M_C$ ) thì tiếp tục sụp đổ tới cùng để xuất hiện một cấu trúc không-thời gian kỳ dị ở đó ánh sáng, tín hiệu thông tin và mọi vật chất mang khối lượng chẳng gì thoát ra khỏi để đến với người quan sát ở ngoài xa. Biên giới của vùng không-thời gian kỳ dị này gọi là chân trời sự kiện của lỗ đen, đó là tập hợp những đường truyền của các tia sáng bị kim hãm không thoát khỏi ra ngoài.

Karl Schwarzschild, một trong hai người đầu tiên năm 1916 khi giải phương trình Einstein, đã vô hình trung phát hiện ra tính chất độc đáo của một vật thể kỳ lạ có sức hút mạnh kinh hoàng đến nỗi lôi cuốn cả ánh sáng không cho thoát nổi ra ngoài mặt biên của nó.

Tuy nhiên ông không ý thức được ngay khái niệm cũng như tính chất kỳ dị của lỗ đen<sup>45</sup>, ý nghĩa và tầm quan trọng của nó phải đến nửa thế kỷ sau mới được thấu hiểu qua các công trình của Robert Oppenheimer và Hartland Snyder (năm 1939), của Martin Kruskal, Roger Penrose vào những năm 1960 và John Wheeler đặt tên Lỗ đen cho hiện tượng kỳ lạ này trong một hội thảo cuối năm 1967 rồi tiếp tục năm 1974 bởi Stephen Hawking với lỗ đen bức xạ.

Mặc dầu thiên hà, tinh tú đều muôn vàn phức tạp lúc hình thành và biến chuyển nhưng cuối đời sau khi đã kết thúc quá trình tổng hợp nhiệt hạch để trở thành lỗ đen thì vật thể tận cùng này lại vô cùng đơn giản, ngoài khối lượng  $M$  ra nó còn có thể mang điện tích  $Q$  và tự quay tròn với momen góc  $J$ , chỉ cần ba thông số  $M, Q, J$  là đủ để xác định tất cả các tính chất của lỗ đen qua metric tổng quát Kerr-Newman<sup>46</sup> với đầy đủ cả ba thông số  $M, Q, J$  thay thế metric Schwarzschild chỉ phụ thuộc vào  $M$  thôi.

“Lỗ đen là những vật thể vĩ mô hoàn hảo nhất trong vũ trụ: nguyên tố duy nhất tạo nên chúng là khái niệm về không gian và thời gian. Vì thuyết tương đối rộng cung cấp cho ta chỉ có một lời giải trong tất cả các đáp số để mô tả chúng, vậy lỗ đen cũng là những vật thể đơn giản nhất”, như Chandrasekhar viết.

Sau hết, có mối liên hệ sâu sắc giữa vật lý cổ điển (trọng trường, nhiệt động học) và vật lý lượng tử khi Stephen Hawking phát hiện một hệ quả tất yếu của lỗ đen là diện tích mặt biên  $\Sigma$  của nó tăng trưởng không ngừng. Tính chất độc đáo không ngừng tăng trưởng của mặt biên này nhắc nhở đến khái niệm entropy và định luật thứ hai trong nhiệt động học (entropy nôm na chỉ định mọi vật đều có xu hướng tiến về trạng thái hỗn độn hơn lên, mức độ hỗn loạn của mọi hệ thống vật chất không giảm mà chỉ tăng), khiến cho J.D. Bekenstein đề xuất là lỗ đen phải có entropy tỷ lệ với diện tích của chân trời sự kiện (nhân với hằng số Boltzmann  $k_B$  theo định nghĩa). Từ đó Hawking năm 1974 tìm ra công thức cho entropy  $S_{bh}$  của lỗ đen:

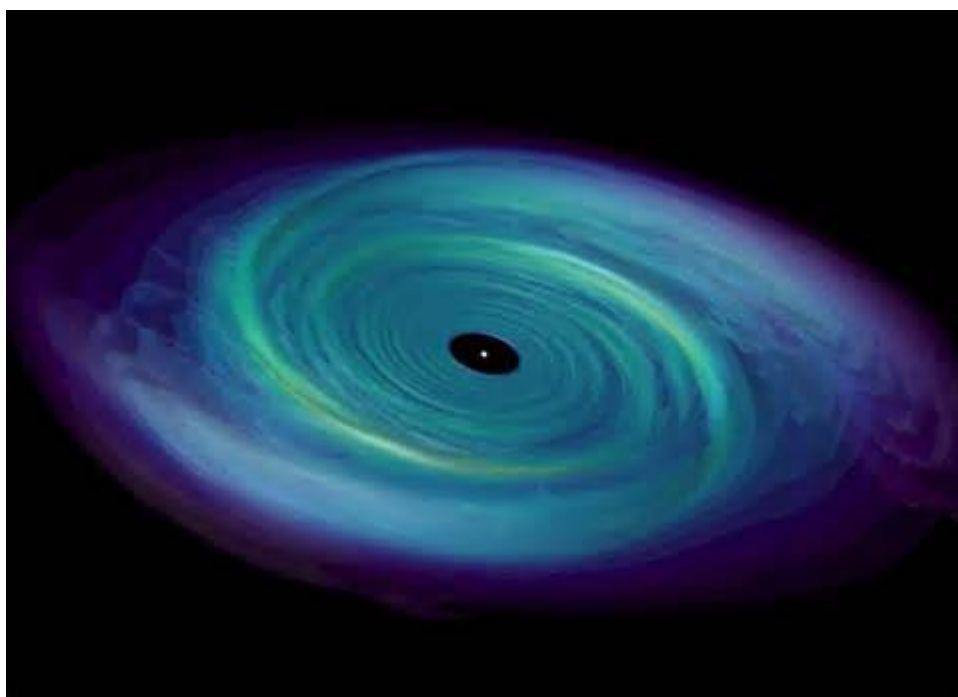
$$S_{bh} = \frac{1}{4} k_B (c^3/\hbar G) \Sigma = k_B (4\pi G/c\hbar) M^2 \quad (\text{III})$$

Trong  $S_{bh}$  có hai hằng số cơ bản:  $\hbar = h/2\pi$  của Planck và  $G$  của Newton; đây là lần đầu tiên vật lý lượng tử tiếp cận thành công với thuyết tương đối rộng. Công thức (III) tương ứng với trường hợp đơn giản của lỗ đen Schwarzschild, nhưng ta có thể dễ dàng nói rộng cho các loại lỗ đen tổng quát hơn với cả ba thông số  $M, Q, J$ .

Rồi từ  $S_{bh}$  ta tính ra nhiệt độ  $T$  của lỗ đen, vì có nhiệt độ nên lỗ đen phải bức xạ ra ngoài chân trời tối kín của nó như một vật đen quen thuộc (phụ chú 41), lỗ đen không còn đen tuyền nữa mà chỉ xám thôi<sup>47</sup>.

Bạn đọc lưu ý là sự tăng trưởng liên đới đến *diện tích* mặt biên của lỗ đen chứ không phải *thể tích* của nó, đặc tính này khởi nguồn cho những áp dụng của nguyên lý toàn ảnh (holographic principle) đối với các lý thuyết trọng lực ‘hậu tương đối rộng’. Thực vậy như ta biết trong quang học có một phương pháp gọi là toàn ảnh để ghi một vật thể 3 chiều bằng một ảnh 2 chiều, mọi thông tin mô tả vật thể trong thế giới ba chiều có thể mã hóa trong mặt biên hai

chiều. Nguyên lý toàn ảnh đại thể cho rằng trạng thái của một hệ thống vật lý xác định trong một không-thời gian  $N$  chiều cũng tương ứng 1- đối -1 với trạng thái của một hệ thống vật lý khác xác định trong một không-thời gian có chiều nhỏ hơn  $N$ . Lỗ đen bức xạ có entropy tỷ lệ thuận với *diện tích* (2 chiều) của mặt biên, chứ không phải với *thể tích* (3 chiều) của vùng không gian mà mặt biên bao bọc, quả là một thí dụ cụ thể của nguyên lý toàn ảnh. Như vậy ta có thể thay thế cách mô tả lỗ đen (ngụ trị trong một vùng không-thời gian  $N$  chiều) bằng một lý thuyết *phi* hấp dẫn (như vật lý chất đậm đặc ở vùng không-thời gian  $N-1$  chiều). Ta gọi nó là phép *đối ngẫu toàn ảnh* (holographic dual), hơn nữa đó lại là một đối ngẫu “mạnh  $\leftrightarrow$  yếu”, nghĩa là một thuyết có hằng số tương tác mạnh thì thuyết đối ngẫu của nó lại có hằng số tương tác yếu ở chiều nhỏ hơn, và ngược lại (coi Maldacena trong phụ chú 52).



Hình 3 minh họa một lỗ đen

5- **Đâu rồi phản vật chất?** Sự hiện hữu của phản vật chất (do Paul A.M. Dirac dùng suy luận mà tiên đoán và C. Anderson khám phá ra sau đó) là hệ quả sâu sắc của bản giao hưởng tuyệt vời giữa hai cột trụ của vật lý hiện đại: tương đối hẹp và lượng tử<sup>48</sup>. Có vật chất thì cũng phải có phản vật chất, khi tụ hội chúng tự hủy để biến thành năng lượng, và ngược lại nếu đủ năng lượng thì các cặp vật chất-phản vật chất được tạo ra và đó là chuyện thường xuyên xảy ra trong các máy gia tốc hạt. Máy chụp hình PET-scan (Positron Emission Tomography) trong y học ngày nay là một ứng dụng trực tiếp của hạt positron (*phản* electron) khi nó hòa tụ với electron sẵn có trong cơ thể con người thì cặp positron-electron biến thành tia bức xạ cực kỳ tinh vi để rọi sáng chi tiết của cơ thể.

Vũ trụ lúc nổ lớn chỉ chứa đựng duy nhất năng lượng với nhiệt độ vô cùng cao, từ đó khi nguội dần đã nảy sinh ra những cặp vật chất-phản vật chất. Chúng tương tác, biến chuyển,

phân rã tuân theo bốn định luật tương tác cơ bản của vật lý: mạnh, yếu, điện từ, hấp dẫn. Số lượng vật chất và phản vật chất phải bằng nhau, chẳng cái nào nhiều hơn cái nào vì vài phút sau Big Bang từ năng lượng thuần khiết ban đầu, chúng đều được hình thành theo từng cặp. Bức xạ nền - mà COBE, WMAP và sau hết vệ tinh Planck đo lường với chi tiết chưa từng đạt - chẳng bảo cho ta ánh sáng tàn dư đó chính là sản phẩm của sự va chạm cách đây 13.8 tỷ năm giữa vật chất và phản vật chất nảy sinh từ năng lượng cực lớn sao? Mà vật chất chính là nguyên tử, khí và thiên thể giăng đầy vũ trụ ngày nay, còn phản vật chất lại chẳng thấy tăm hơi, tại sao vũ trụ ngày nay lại chỉ có vật chất? Đó là một bí ẩn của mô hình Big Bang vì ba lực (mạnh, điện từ và hấp dẫn) trong bốn tương tác nói ở trên đều tuân theo luật đối xứng vật chất-phản vật chất (đối xứng CP, ngôn từ của các hạt cơ bản), không có sự dị biệt giữa chúng. Chỉ có tương tác yếu (ba thí dụ điển hình của tương tác yếu: sự tổng hợp nhiệt hạch trong tâm mặt trời và các tinh tú, sự phân rã  $\beta$  của các hạt nhân nguyên tử và vật lý hạt neutrino) mới vi phạm phép đối xứng CP, theo đó tương tác yếu của phản vật chất và của vật chất không giống y hệt nhau mà khác đôi chút. Sự khác biệt đó được diễn giải hoàn hảo trong Mô Hình Chuẩn của hạt cơ bản và được kiểm chứng vô cùng chính xác bằng thực nghiệm. Nhưng sự vi phạm nhỏ của phép đối xứng vật chất-phản vật chất trong các phòng thí nghiệm trên trái đất không giải thích nổi về mặt định lượng tại sao trong vũ trụ ngày nay vật chất lại áp đảo toàn diện phản vật chất, tại sao cái này lại biến đi ngay từ trong trứng nước thời Nổ lớn? Trong việc diễn giải sự vi phạm đối xứng vật chất-phản vật chất, tại sao hạt cơ bản thành công mà vũ trụ Big Bang lại thất bại? Đó là một trong vài đề tài nghiên cứu ưu tiên của LHC (phụ chú 35).

**6- Sóng trọng trường:** Nếu điện thoại và máy vi tính di động tân kỳ là tăng băng nổi của sóng điện từ trường với bốn phương trình Maxwell<sup>49</sup> mà công nghệ thông-truyền tin hiện đại khai thác tuyệt vời, thì sự hiện hữu của sóng trọng trường là hệ quả tất yếu của mười phương trình Einstein trong thuyết tương đối rộng, minh họa tính dẻo đàn hồi của không-thời gian. Tiến trình khai thác và ứng dụng của sóng trọng trường là cả một chân trời kỳ diệu đang hé mở. Thời cổ điển trước Einstein mọi người mặc nhiên chấp nhận khái niệm tiên nghiệm của không-thời gian cứng nhắc chẳng chút nào liên đới đến vật chất-năng lượng chứa đựng ở trong. Einstein qua thuyết tương đối rộng chỉ dẫn cho ta một nhận thức khác kỳ lạ: sự phân phối năng-khối lượng vật chất (thí dụ hai lỗ đen dao động và hút nhau rất mạnh) không những bẻ cong cấu trúc không-thời gian ở gần chúng mà sự biến dạng cấu trúc đó lại có thể truyền đi vô tận dưới dạng sóng với vận tốc  $c$  của ánh sáng. Vậy sóng trọng trường phản ánh sự biến dạng đàn hồi của không-thời gian, một đặc trưng của thuyết tương đối rộng. Một trong những tín hiệu để nhận diện và đo lường được sóng trọng trường là sự thay đổi  $\delta L$  của khoảng cách  $L$  giữa hai vật bị nhiễu loạn bởi sóng đi qua nó, cái thay đổi  $\delta L/L$  đó quá nhỏ khoảng  $10^{-22}$  mà các giao thoa kế như Ligo (Mỹ), Virgo (Âu châu), Tama (Nhật) cùng Lisa (quốc tế) đang và sẽ đo lường.

Giải Nobel Vật lý 2017 vinh tặng Reiner Weiss, Barry Barish và Kip Thorne đã bao năm dày công kiến tạo nên Ligo (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) để ở đó lần đầu tiên năm 2015 khám phá được sóng trọng trường.

**7- Chân không lượng tử và sự dẫn nổ vũ trụ với hằng số  $\Lambda$ :** Chân không lượng tử (quantum vacuum), viết gọn thành *Không* được định nghĩa như trạng thái cơ bản tận cùng của vạn vật, nó vô hướng, trung hòa, mang năng lượng cực tiểu trong đó vật chất, tức là tất cả các trường lượng tử kể cả điện từ, đều bị loại bỏ hết. Nhưng không phải vì *Không* chẳng chứa trường vật chất nào mà năng lượng của nó bằng 0. Theo nguyên lý bất định Heisenberg, năng lượng của bất cứ trạng thái vi mô nào là chuỗi  $(1/2)h\nu$ ,  $(3/2)h\nu$ ,  $(5/2)h\nu$ ...chứ không phải là  $0h\nu$ ,  $1h\nu$ ,  $2h\nu$ ...Cũng dễ hiểu thôi, nguyên lý bất định bảo ta nếu xung lượng  $|\mathbf{k}|$  được xác định rõ rệt bao nhiêu thì vị trí trong không gian  $|\mathbf{x}|$  lại mơ hồ rối loạn bấy nhiêu, vậy năng lượng tối thiểu  $\varepsilon = (1/2)h\nu \neq 0$  chính là một thỏa hiệp tối ưu bình đẳng cho cả hai bên  $|\mathbf{k}|$  và  $|\mathbf{x}|$ . Thực tế, nếu  $\varepsilon = 0$ ,  $|\mathbf{k}| = 0$ , vậy  $|\mathbf{x}|$  không sao được xác định nổi. Phản ánh nguyên lý này, thế giới vi mô luôn luôn dao động ngay ở nhiệt độ tuyệt đối thấp nhất (năng lượng cực tiểu) và đó là ý nghĩa của sự *thăng giáng lượng tử* (quantum fluctuation). Thang mức vi mô nói chung là cả một vũ đài náo nhiệt và hỗn loạn, ‘vạn vật sinh hủy, hủy sinh, ôi phí phạm thời gian’ như nhà vật lý kỳ tài Feynman từng ví von. Không gian trống rỗng tưởng như yên tĩnh phẳng lặng thực ra chỉ là tổng quan trung bình của một thực tại vô cùng phong phú và sôi sục ở mức độ sâu thẳm, tựa như biển hiền hòa nhìn phiến diện trên bề mặt phẳng mượt vậy mà dưới lòng sâu đang diễn ra một đợt sóng ngầm dao động liên hồi. Bởi năng lượng cực tiểu khác 0 và vì tần số  $\nu$  có thể là bất cứ con số nào từ 0 đến vô tận nên *Không* có năng lượng phân kỳ<sup>49</sup> khi ta lấy tích phân tất cả các một dao động. Tuy chẳng sao định lượng nổi (vì năng lượng phân kỳ), nhưng chân không lượng tử vẫn có thể biểu hiện tác động của nó qua hiệu ứng Casimir<sup>50</sup>, một đặc trưng quan sát đo lường được. Chính vì vô hướng, trung hòa lại có năng lượng vô hạn, nên chân không lượng tử mang ẩn dụ một hư vô mênh mang tĩnh lặng, từ đó do những kích thích nhiễu loạn của năng lượng trong *Không* mà vật chất (cùng phản vật chất) được tạo thành để rồi chúng tương tác, biến đổi, phân rã rồi trở về với *Không*, cứ thế tiếp nối bao vòng sinh hủy! Chân không lượng tử chính là trạng thái cơ bản, cội nguồn và chốn trở về cũng như ra đi của vạn vật. Nó không rỗng tuếch chẳng có gì mà là cái thể lắng đọng của tất cả. Chân không-Vật chất-Không gian-Thời gian chẳng sao tách biệt, đó là hệ quả của Tương đối (hẹp và rộng) phối hợp cùng Lượng tử! Nhưng năng lượng cực kỳ lớn của chân không lượng tử (*tai họa chân không*) lại vượt xa quá nhiều mật độ *năng lượng tối* làm dẫn nổ vũ trụ mà các nhà thiên văn ước lượng bằng cách đo lường gia tốc của các sao siêu mới. Xin nhắc lại *năng lượng tối* mang đặc tính của chân không (với hằng số  $\Lambda$  vô hướng, xem phụ chú 38). Điều này minh họa sự mâu thuẫn cơ bản giữa hai trụ cột của vật lý hiện đại Lượng tử và Tương đối rộng.

### **G-Tạm kết**

Hai thuyết Lượng tử và Tương đối rộng đều cần thiết để diễn tả các hiện tượng vật lý khi hai thế giới vi mô và vĩ mô cận kề chẳng còn tách biệt như trong trung tâm sâu thẳm của lỗ đen, trong trạng thái vũ trụ ở kỷ nguyên Planck (giây phút ban đầu của Big bang với nhiệt độ kinh hoàng, không gian độ dài  $L_p$  cực nhỏ, năng lượng  $E_p$  cực lớn, phụ chú 50), hoặc trong các máy gia tốc hạt năng lượng cao mà LHC là điển hình nhất. Ở những điều kiện thái cực đó, các định luật của trọng trường và của lượng tử không tương thích với nhau, hình học không-thời gian

cong uốn tròn tru của thuyết tương đối rộng lại xung đột sâu sắc nhất với cái sôi động, thăng giáng lượng tử, các phương trình của hai thuyết khi kết hợp cho ra những đáp số vô hạn, phi lý. Ngoài ra ở kỷ nguyên Planck, cường độ của trọng lực (không đáng kể ở nhiệt độ và năng lượng bình thường) không còn nhỏ nữa mà tương đương với cường độ của ba lực cơ bản khác: điện-từ, mạnh và yếu. Ba lực này đã thành công tuyệt vời trong sự hòa đồng với vật lý lượng tử, chúng diễn tả chính xác và nhất quán mọi vận hành của vật chất trong thế giới vi mô hạ nguyên tử cho đến thế giới vĩ mô của các thiên thể trong vũ trụ bao la. Theo thứ tự, sự phối hợp với lượng tử của ba lực cơ bản trên mang tên Điện Động học Lượng tử (QED, Quantum Electro-Dynamics), Sắc Động học Lượng tử (QCD, Quantum Chromo-Dynamics) và Điện-Yếu (Electro-Weak Interaction), tóm tắt trong Mô hình Chuẩn (Standard Model) của hạt cơ bản với không dưới ba chục giải Nobel trong khoảng 30 năm gần đây. Có thể nói điện động học lượng tử là nền tảng phát triển kỳ diệu của công nghệ thông-truyền tin hiện đại với vi điện tử, quang điện tử, spin-điện tử.

Nhưng trong trung tâm sâu thẳm của lỗ đen cũng như trong trạng thái vũ trụ ở kỷ nguyên Planck (giây phút ban đầu của Big bang) thì luật hấp dẫn của thuyết Tương đối rộng lại mâu thuẫn, không tương thích, nhất quán với Lượng tử. Nguyên nhân sự khác biệt giữa ba lực trên với trọng lực - khi cả bốn kết hợp với nguyên lý bất định Heisenberg (bị lượng tử hoá, nói theo ngôn từ chuyên môn) - có thể nhận ra như sau: các trường (vật chất và điện từ) của ba lực khi bị *lượng tử hóa* sẽ biến thành đơn vị rời rạc vận hành trong một không-thời gian liên tục tròn tru. Trái lại trọng trường theo thuyết tương đối rộng lại chính là metric của không-thời gian tròn tru liên tục đó, khi bị lượng tử hóa cái tròn tru ấy chẳng còn giữ lại được đặc tính dẻo dai nguyên thủy nữa mà bị mất tính đàn hồi, có nếp gấp và lỗ thủng (nói theo ngôn ngữ toán học topo) tựa như mảng cao su căng quá bị xé rách. Tại sao thiên nhiên lại có thể chính xác ở một quy mô nào đó, để rồi trở thành vô lý ở thang mức khác, cái nghịch cảnh này phản ánh sự thiếu sót trên con đường tìm kiếm định luật vận hành của trọng trường lượng tử (quantum gravitation). Đó quả là vấn đề số một của vật lý hiện đại mà *tai họa chân không* minh họa ở trên là một thí dụ.

Thuyết Siêu dây (Superstring) là một trong vài<sup>51</sup> lý thuyết mang khả năng, về nguyên tắc, dung hòa và giải quyết mâu thuẫn nói trên, khả dĩ mô tả nhất quán tất cả bốn tương tác cơ bản trong cả hai thế giới cực lớn của vũ trụ bao la và cực nhỏ của hạ nguyên tử, nhằm thống nhất mọi điều về một mối. Theo thuyết này, thành phần cấu trúc cơ bản của vạn vật không phải là hạt điểm (0 chiều) mà là dây hay màng (một hay nhiều chiều) cực nhỏ với độ dài Planck khoảng  $10^{-35}$  m, luôn dao động. Hai nền tảng mà thuyết siêu dây dựa vào là Tương đối hẹp và Lượng tử, như vậy lúc khởi đầu có sự cách biệt giữa cái *vỏ chứa* (không-thời gian phẳng Minkowski) và cái *bị chứa* (dây đàn hồi dao động). Ngạc nhiên thay, kết quả điểm đến là cái *bị chứa* chuyển giao tính đàn hồi cho cái *vỏ chứa*, cái không-thời gian phẳng này hết cứng nhắc mà trở thành cong uốn đàn hồi của thuyết tương đối rộng, như vậy trọng lực là hệ quả tất yếu suy ra từ siêu dây. Một đặc điểm khác, siêu dây là thuyết duy nhất đầu tiên trong vật lý xác định được con số  $D = 10$  chiều của không-thời gian (trước siêu dây, số chiều 4 của không-thời gian ta mặc nhiên chấp nhận chỉ là một định đề tiên nghiệm do cảm quan) minh họa không-thời gian là bộ phận chẳng thể tách rời khỏi vật chất mà thuyết tương đối rộng đã hé mở cho ta thấy. Sáu chiều không gian còn lại, tuy bị cuốn tròn quá nhỏ để ta không quan sát được trong đời sống hàng ngày, có thể làm thay đổi chút xíu luật  $1/R^2$  của trọng lực Newton,

một đề tài thực nghiệm nóng hổi. Máy gia tốc LHC cũng tìm kiếm gián tiếp chiều không gian ẩn này, qua cái gọi là hiện tượng ‘bất bảo toàn năng lượng ảo’, vì ta chẳng đo lường nổi một phần năng lượng chảy vào cái không gian ngoại vi đó. Đặc điểm thứ ba của siêu dây là khả năng thống nhất điện-từ với trọng lực mà Einstein trăn trở tìm kiếm không thành, nôm na điện-từ trường như siêu dây hở (hai đầu dây tự do) và trọng trường như siêu dây kín (vòng kín). Nhưng cần nhấn mạnh là mặc dầu có những tiến bộ kinh ngạc, nhiều khía cạnh lý thuyết của siêu dây còn xa mới hoàn toàn sáng tỏ và nhất là chưa/không có một tiên đoán nào của nó được chứng nghiệm dấu gián tiếp. Edward Witten - chuyên gia đầu ngành của thuyết này, nhà vật lý đầu tiên được huy chương Fields uy tín về toán, có lẽ không ai, kể cả những giải Nobel vật lý, có công trình được trích dẫn nhiều bằng ông - đã một lần tuyên bố: thuyết siêu dây là một bộ phận của vật lý thế kỷ 21 đã tình cờ rơi xuống thế kỷ 20, ngụ ý có lẽ cần biết bao năm nữa mới được hoàn tất! Cơ sở toán học của nó quá phức tạp, các chuyên gia siêu dây phải tự mình mò mẫm cũng như Newton khoảng 350 năm trước đây phải sáng tạo phép tính vi tích phân để diễn tả các định luật của cơ học và lực hấp dẫn cổ điển, khác với Einstein đã sẵn có hình học cong Riemann làm nền tảng để dựa vào mà khám phá ra thuyết tương đối rộng.

Vào cuối thế kỷ thứ 19, có một mâu thuẫn giữa một bên là lý thuyết điện từ + nhiệt động học - hai trụ cột cơ bản của vật lý thời đó - và bên kia là thực nghiệm đo lường về hiện tượng bức xạ nhiệt của vật đen. Thực thể, lý thuyết trên đưa đến một hệ quả phi lý là tổng năng lượng phóng xạ bởi vật đen phải vô hạn, cụ thể ngồi trước một bếp sưởi hồng, bất kỳ nhiệt độ cao thấp ra sao ta sẽ bị thiêu cháy tan biến hết! Vậy mà Lord Kelvin, người của nhiệt độ tuyệt đối, giáo hoàng của vật lý thời đó có câu tuyên bố năm 1892 xanh rờn vì quá lạc quan: “Vật lý đã hoàn chỉnh cả rồi về mặt căn bản, cái mà ta còn có thể đóng góp chỉ là xác định thêm vài thập phân sau dấu phẩy cho các đo lường, tính toán mà thôi. Tuy nhiên hãy còn hai vấn đề nhỏ...”. Hai *tiểu tiết* ông nêu lên là: thứ nhất Michelson và Morley chẳng tìm thấy chất liệu ether (xem phần I về thuyết Tương đối hẹp) tràn ngập vũ trụ trong đó dao động sóng điện từ, thứ hai các đo lường ngày càng chính xác về cường độ bức xạ nhiệt của vật đen (phụ chú 41) không phù hợp với nền tảng căn bản của vật lý kèm thêm cái hệ quả phi lý nói trên. Ngờ đâu đó chính là hai vấn đề cốt lõi làm ngọn hải đăng chỉ đường cho khoa học vượt trùng dương đi tìm biên giới của tri thức. Giải quyết được hai tiểu tiết trên theo thứ tự là Albert Einstein với thuyết tương đối hẹp, và Max Planck với thuyết lượng tử, hai trụ cột của vật lý hiện đại. Ai có thể tưởng tượng nổi trăm năm sau ý tưởng của Planck, theo ước tính của J. A. Wheeler, một phần ba tổng sản lượng kinh tế của cường quốc số một thế giới hiện nay có gốc nguồn từ những ứng dụng trực tiếp của công nghệ lượng tử. Lord Kelvin, rất tinh tường khi nêu lên hai tiểu tiết, vô hình trung đã nhấn ta bài học nhún nhường về kiến thức hạn hẹp cục bộ của con người so với cái không biết mênh mông. Qua con mắt ngây thơ của em trẻ hỏi ta đủ thứ, khát vọng hướng thượng, tìm hiểu, học hỏi, sáng tạo chính là đặc tính bẩm sinh của loài người. Như chim di đứng trên đôi cánh của chim bằng để cùng nhìn cao xa hơn mà Besso thờ nào nói về bạn Einstein, dựa trên thành quả của người đi trước, mong sao mỗi chúng ta từ trái đất nhỏ nhắn cùng nhau góp phần cho sự hài hòa giữa người với người và với môi trường thiên nhiên mà vươn tới hoàn vũ bao la.

Chúng ta không quên câu nhắc nhở sau đây của Einstein như lời tạm kết “ Tôi không biết thể chiến thứ ba con người dùng vũ khí gì nhưng tôi biết trong thế chiến thứ tư họ chỉ còn có gậy và đá!”.

### **Tài liệu tham khảo**

- 1- Thibault Damour, Si Einstein m’était conté, Le Cherche Midi (2005)
- 2- Roger Penrose, The Road to Reality, Vintage Books (2007)
- 3- Trịnh Xuân Thuận, Từ điển yêu thích bầu trời và các vì sao, nxb Tri Thức (2011)
- 4- David Langlois, Relativité Générale, Vuibert (2013)

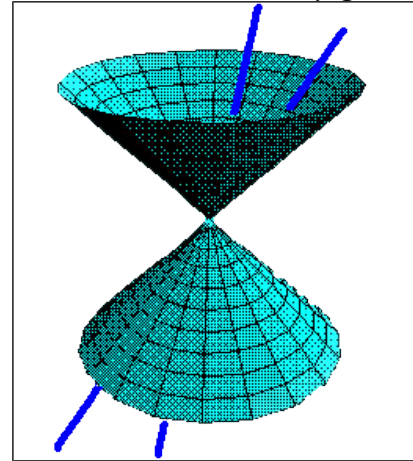


## Phụ Chú phần I

Hệ quy chiếu quán tính là hệ quy chiếu di chuyển với vector vận tốc  $\mathbf{v}$  đều đặn (độ dài và chiều hướng của  $\mathbf{v}$  cố định, không thay đổi với thời gian, như vậy gia tốc  $\mathbf{a} \equiv d\mathbf{v}/dt = \mathbf{0}$ ). Các vector trong không gian ba chiều đều viết dưới dạng in đậm như  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{k}$  và  $v \equiv |\mathbf{v}|$ ,  $k = |\mathbf{k}|$ . Vector  $\mathbf{X}$  có 3 thành phần không gian là  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , ta viết gọn  $\mathbf{X}(x, y, z)$ .

2

Đa tạp bốn chiều không-thời gian có tung độ là trục thời gian  $ct$ , hoành độ là không gian ba chiều với ba trục  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$ . Đồ thị của phương trình  $s^2 \equiv x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2$  trong đa tạp này là một *nón ánh sáng* với đỉnh là một điểm  $T$  nằm trên tung độ ( $OT = ct$ ), còn đáy nón là quả cầu  $S$  bán kính  $r$ , với  $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$ , nửa góc ở đỉnh nón bằng  $45^\circ$ . Quỹ đạo của các tia ánh sáng (khối lượng = 0, tương ứng với trường hợp  $s^2 = 0$  vì  $ct = r$ ) là vành biên của nón, nối đỉnh  $T$  với chu vi của mặt cầu, còn quỹ đạo của các vật mang khối lượng  $m \neq 0$  (tương ứng với trường hợp  $s^2 > 0$  vì  $v < c$ ) nằm bên trong *nón ánh sáng*. Các quỹ đạo vận hành của vật chất (sự kiện) đều có thể diễn tả bởi những đường cong nằm trong nón ánh sáng. Trong hình dưới đây, quả cầu  $S$  được tượng trưng bởi một vòng tròn nằm trong mặt phẳng của hai trục không gian  $Ox$ ,  $Oy$ , mặt phẳng này cắt quả cầu  $S$  bởi một mặt phẳng khác thẳng góc với trục không gian  $Oz$ . Nón úp diễn tả *quá khứ*, nón mở là *tương lai*, còn đỉnh nón  $T$  là *bây giờ*.



3

Nếu như  $x^2 + (ct)^2 = x'^2 + (ct')^2$  (dấu cộng thay dấu trừ trong  $s^2$ ) thì sự hoán chuyển các tọa độ  $(x, ct)$  để thành  $(x', ct')$  sẽ là phép quay một góc  $\varphi$  trong mặt phẳng hai chiều của chúng:

$$\begin{aligned}x' &= x \cos\varphi - (ct) \sin\varphi \\(ct') &= (ct) \cos\varphi + x \sin\varphi\end{aligned}$$

Tính toán cho biết  $\tan\varphi$  chính là  $v/c$ . Thực tế một quan sát viên đứng ở điểm  $x' = 0$  chẳng hạn cho ta:

$$x' = x \cos\varphi - (ct) \sin\varphi = 0 \rightarrow x/ct \equiv v/c = \tan\varphi.$$

Sự thay đổi dấu (+ trở thành -) trong  $s^2$  dẫn đến lượng giác hyperbolic:  $\text{ch}\varphi$  thay thế  $\cos\varphi$ ,  $\text{sh}\varphi$  thay thế  $\sin\varphi$ :

Để cho  $x^2 - (ct)^2 = x'^2 - (ct')^2$  thì sự hoán chuyển giữa các tọa độ  $(x', ct')$  và  $(x, ct)$  sẽ là:

$$\begin{aligned}x' &= x \text{ch}\varphi - (ct) \text{sh}\varphi \\(ct') &= (ct) \text{ch}\varphi - x \text{sh}\varphi\end{aligned}$$

với  $\text{th}\varphi = v/c$ . Gọi  $\beta \equiv v/c$  và  $\gamma \equiv 1/\sqrt{1-\beta^2}$ , ta có:

$$x' = \gamma (x - vt)$$

$$ct' = \gamma (ct - \beta x) \text{ hay } t' = \gamma (t - xv/c^2).$$

Poincaré là người đầu tiên gán tên Lorentz cho phép hoán chuyển này vì Lorentz viết nó ra dưới dạng gần đúng năm 1895 và dạng chính xác năm 1904. Thực ra Woldemar Voigt cũng tìm ra năm 1887 nhưng chỉ khác bởi một hệ số chung toàn bộ và Joseph Larmor năm 1900. Poincaré tổng quát hóa công thức của Lorentz bằng ma trận  $4 \times 4$  với cả bốn tọa độ  $x, y, z, t$ , thay vì hai tọa độ  $x, t$  của hoán chuyển Lorentz đặc biệt. Tuy đã biết công trình gần đúng năm 1895 của Lorentz nhưng Einstein khi phân tích những khái niệm cơ bản về thời gian và không gian đã suy diễn ra phương trình hoán chuyển giữa  $x$  và  $t$  này một cách độc đáo, khác với các vị trên. Còn cách giải thích và nhận xét ý nghĩa vật lý của sự hoán chuyển  $x, t$  thì có sự khác biệt giữa Einstein và các vị tiền bối khác.

4

Từ phép hoán chuyển Lorentz, ta có thể suy ra luật cộng trừ các vận tốc trong cơ học tương đối tính. Vận tốc  $w$  của một vật chuyển động trên tàu (hệ quy chiếu  $J'$  chạy với vận tốc  $v$  đối với hệ quy chiếu  $J$ ) theo định nghĩa chính là  $w \equiv x'/t'$ . Theo cơ học cổ điển  $x' = x - vt$ ,  $t' = t$ , thì người trên bến sẽ thấy vật di chuyển với vận tốc  $W \equiv x/t = (x' + vt')/t' = w + v$ . Nhưng trong cơ học tương đối tính, vận tốc  $W$  đo trên bến sẽ phải thay đổi theo công thức (I') của phép hoán chuyển Lorentz :  $W \equiv x/t = (x' + vt')/(t' + x'v/c^2) = (w + v)/(1 + wv/c^2)$ , dùng  $w \equiv x'/t'$ .

<sup>5</sup> Một cách đơn giản cơ học tương đối tính là cơ học cổ điển kèm thêm hệ số  $\gamma$ , trong các phương trình diễn tả cơ học Newton ta thay thế các đại lượng vật lý (khối lượng  $m$ , xung lượng  $\mathbf{p}$ ...) bằng tích số của chúng với  $\gamma$  để thành cơ học tương đối tính. Cơ học cổ điển (tương ứng với trường hợp các chuyển động chậm,  $v/c \ll 1$  hay  $c \rightarrow \infty$ ,  $\gamma \rightarrow 1$ ) là dạng xấp xỉ của cơ học tương đối tính.

<sup>6</sup> Michele Angelo Besso, người bạn thân thiết cùng sở làm ở Bern, người duy nhất ông cảm ơn trong công trình đề đời đăng trên Annalen der Physik về thuyết tương đối hẹp mà ông khám phá ra trong lúc hai người dạo chơi và bàn luận về bí hiểm ether ngày chủ nhật cuối tháng 5 năm 1905 trên đồi Gurten, xa xa dưới chân là thành phố Bern cổ kính. Trong bài đó ông rất tự tin, không hề trích dẫn bất kỳ tài liệu tham khảo nào mặc dầu lúc ấy chẳng ai biết đến ông. Chữ gläubige trong bức thư không nên hiểu theo nghĩa tín ngưỡng tôn giáo, mà hàm ý xác tín vào lý trí. Bức thư gửi chưa đến một tháng thì Einstein cũng vào cõi vĩnh hằng.

Mời bạn tham khảo bài của Craig Callender: *Is time an illusion?* Scientific American, tháng 6/ 2010 do Cao Chi biên dịch dưới nhan đề *Thời gian phải chăng chỉ là một ảo tưởng?* <http://tiasang.com.vn/Default.aspx?tabid=111&CategoryID=2&News=3316>

<sup>7</sup> Bạn đọc có thể thắc mắc là hai anh em di chuyển với vận tốc cố định so với nhau (như chuyển động tương đối giữa hai hệ quy chiếu  $J$  và  $J'$ , với vận tốc  $+v$  của  $J'$  so với  $J$  và  $-v$  của  $J$  so với  $J'$  nói trong bài), người này so với người kia biết ai bay ai ở, anh hay em người nào cũng thấy thời gian của mình dài hơn thời gian của người kia, làm sao biết ai già ai trẻ? Đúng vậy trong trường hợp vận tốc  $v$  của hỏa tiễn *mãi mãi cố định trên một đường thẳng duy nhất không thay đổi chiều hướng và cường độ*. Để thấy sự khác biệt, ta phải xét trường hợp có một bất đối xứng nào đó, một trong hai người di chuyển với vận tốc thay đổi về chiều hướng và/hay cường độ, thí dụ bay đến một hành tinh, đậu xuống đất và trở về trái đất.

8

Thư của Einstein cho Lincoln Barnett, ngày 19 tháng 6 năm 1948 (Hebrew University of Jerusalem, Israel). Xem thêm bài của Lev. B. Okun, Physics Today June 1989, 31-36. Trong cuộc trao đổi với các đồng nghiệp ở vài đại học và viện nghiên cứu Nga, Lev. Okun đó họ là trong bốn công thức sau:  $E = mc^2$ ,  $E_0 = mc^2$ ,  $E = m_0c^2$ ,  $E_0 = m_0c^2$  cái nào diễn tả đúng ý Einstein, chỉ có một thiếu sót trả lời trùng, đó là công thức thứ nhì !

<sup>9</sup> H. Poincaré, Arch. Neerland. 5, 252 (1900).

<sup>10</sup> Jean-Paul Auffray, Einstein et Poincaré, édition Le Pommier (1999). Jules Leveugle, La Relativité, Poincaré et Einstein, Planck, Hilbert, édition l'Harmattan (2004). Jean Hladik, Comment le jeune et ambitieux Einstein s'est approprié la Relativité restreinte de Poincaré, édition Ellipses (2004).

<sup>11</sup> Mặc dầu bốn thành phần của tứ-vectơ  $p^\mu$  vì phụ thuộc vào hệ số  $\gamma$  nên chúng đều thay đổi theo  $v$ , nhưng độ dài bình phương của tứ-vectơ  $(p^0)^2 - |\mathbf{p}|^2$  không phụ thuộc vào  $v$ , nó bất biến:  $(p^0)^2 - |\mathbf{p}|^2 = m^2c^2$ . Cũng vậy, năng lượng  $E = \gamma mc^2$  và xung lượng  $\mathbf{p} = \gamma m\mathbf{v}$  đều thay đổi theo  $v$  nhưng  $E^2 - |\mathbf{p}|^2c^2 = m^2c^4$  không phụ thuộc vào  $v$ , nó bất biến trong mọi hệ quy chiếu. Bất biến là điều kiện tiên quyết mà thuyết tương đối đòi hỏi, nếu  $E \neq \gamma mc^2$  (thí dụ  $E = \gamma mcv$ ) thì ta không có một bất biến nào.

<sup>12</sup>

## Phụ Chú phần II

Trớ trêu thay, Johannes Stark cũng như Philipp Lenard (người khám phá ra hiệu ứng quang điện mà cũng lại Einstein giải thích năm 1905 bằng thuyết lượng tử) sau này theo chủ nghĩa cực đoan phát xít, chống phá mạnh mẽ Einstein chỉ vì gốc Do thái của ông, con người của lương tâm và trí tuệ, của tự do dân chủ, ngay từ trước thế giới đại chiến thứ nhất (1914-1918) đã chống chủ nghĩa quốc gia dân tộc và tôn giáo hẹp hòi, nhìn xa đề xướng một Âu châu hòa hợp. Lịch sử từng chứng kiến chuyện trù dập trí thức như thời Staline bên Liên xô, Mc Carthy bên Mỹ, Cách mạng văn hóa của Mao bên Trung quốc. Việt Nam không là ngoại lệ với Nhân văn-Giai phẩm!

<sup>13</sup> Chuyện kể Galilei đứng trên đỉnh tháp nghiêng của thành phố Pisa thấy đá và giấy rơi hết như nhau rồi phát hiện tính chất phổ quát chỉ là huyền thoại, thực ra ông làm thí nghiệm trên những mặt phẳng nằm nghiêng mà suy luận ra tính phổ quát nói trên.

<sup>14</sup> Trọng lượng của A là sức hút (hay trọng lực) F của trái đất (hay của mặt trăng, tinh tú hoặc của bất kỳ vật B nào khác A) áp đặt lên A. Nếu M là khối lượng của vật B (trái đất chẳng hạn) và m là khối lượng của vật A, thì theo Newton, trọng lực F của B áp đặt lên A bằng  $GMm/R^2$ , với R là khoảng cách không gian giữa A và B, G là hằng số hấp dẫn. Nói cách khác, B tạo ra một trọng trường để lôi hút mọi vật về nó. Trường (tỏa rộng khắp không gian và thay đổi với thời gian để diễn tả tác động của lực) là một khái niệm sâu sắc của vật lý mà trực giác của Faraday (một nhà thực nghiệm xuất chúng, tự học, làm thợ in để sinh sống mà chỉ mê say nghiên cứu khoa học) nhận ra khi ông nhìn những vụn sắt trải đều đặn chung quanh hai trục bắc nam của thanh nam châm. Điện tích di chuyển sinh ra điện-từ trường, còn khối lượng tạo ra trọng trường.

<sup>15</sup> Ở thời điểm Galilei và Newton, người ta nghĩ rằng có hai loại khối lượng  $m$  và  $m'$  khác nhau,  $m$  là khối lượng của vật A (để tạo ra trọng trường của nó và hút các vật B khác với khối lượng M) trong công thức  $F = GMm/R^2$ , còn  $m'$  (trong phương trình cơ bản của động lực học  $F = m'a$ ) là khối lượng diễn tả khả năng trầy ỳ của A chống lại sự di chuyển do bất kỳ lực F nào (không nhất thiết phải là trọng lực của trái đất) áp đặt lên nó. Tính phổ quát của Galilei được Newton minh giảng bằng giả thuyết  $m = m'$  (phụ chú 16). Giả thuyết  $m = m'$  này được chứng nghiệm bởi von EötVös vào cuối thế kỷ 19 với sai số  $10^{-9}$ , ngày nay sai số giảm xuống  $10^{-12}$ .

<sup>16</sup> Thực tế, trọng lượng  $F = GMm/R^2$  của A (lực tạo nên bởi trọng trường của trái đất khối lượng M áp đặt lên A) tỉ lệ thuận với  $m$ , khi kết hợp với phương trình cơ bản của động lực học  $F = m'g = mg$  mà Newton phát hiện năm 1686, cho ta thấy gia tốc  $g = GM/R^2$  của A không phụ thuộc vào khối lượng  $m$  của nó nữa, đó là tính phổ quát của trọng trường mà Galilei tìm ra. Các sách giáo khoa thường hay dùng ký hiệu  $g$  (gravitation) để chỉ định gia tốc chung cho mọi vật lôi kéo bởi trọng trường của trái đất. Đo được  $g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$  là gián tiếp đo được khối lượng khổng lồ  $M \approx 5.97 \times 10^{24} \text{ kg}$  của trái đất (thực nghiệm của H. Cavendish năm 1798). Trái lại vectơ điện-từ trường  $\mathbf{E}$  và  $\mathbf{H}$  áp đặt lên một vật thể (mang điện tích q) làm cho nó chuyển động với gia tốc thay đổi theo khối

lượng  $m$  của vật ấy.

Thực tế, lực điện-từ  $\mathbf{f} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{H})$ , khi kết hợp với  $\mathbf{f} = m\mathbf{a}$  làm cho vật chuyển động với gia tốc  $\sim q/m$ . Còn trong thế giới vi mô hạ nguyên tử, lực mạnh (sắc động học lượng tử tác động lên các hạt cơ bản quark để làm chúng gắn kết với nhau thành hạt nhân nguyên tử) lại chẳng giống trọng lực hay điện-từ lực chút nào. Lực mạnh giảm rất nhẹ nhàng với khoảng cách  $r$  giữa hai quark, trong khi lực cổ điển của thế giới vĩ mô (trọng lực và điện-từ) giảm rất nhanh như  $1/r^2$ .

<sup>17</sup> Sự đối xứng hoán chuyển toàn diện giữa  $M$  và  $m$  trong sức hút lẫn nhau  $F = GMm/R^2$  của hai vật  $A$  và  $B$  cho ta thấy ngay chính  $A$  cũng tác động lên  $B$  làm cho  $B$  di chuyển với gia tốc  $Gm/R^2$  và ngược lại trọng trường tạo ra bởi  $B$  làm cho  $A$  vận chuyển với gia tốc  $GM/R^2$ .

<sup>18</sup> Như tác giả kể lại, so với gian lao ‘siêu phàm’ trong việc sáng tạo ra thuyết tương đối rộng thì thuyết tương đối hẹp (với những kết quả kỳ diệu như  $E_0 = mc^2$ , thời gian giãn nở, không gian co cụm trong những hệ quy chiếu di động đều đặn) chỉ là trò con trẻ mà ông khám phá ra trong có một buổi chiều chủ nhật cuối tháng 5 năm 1905, sau bữa dạo chơi và trò chuyện về bí hiểm ether với bạn thân thiết Michele Besso cùng sở làm ở thành phố Bern

<sup>19</sup> Tựa như đường thẳng (quỹ đạo của hạt di chuyển không gia tốc) biến dạng ra các hình conic (quỹ đạo của hạt di chuyển có gia tốc), hay hình cầu biến dạng ra bóng bầu dục (ellipsoid) vì tác động của trọng lực. Hình học cong này có thể nhận ra khi ta đứng yên quan sát một người đứng ở trong một sàn quay chung quanh trục thẳng góc với sàn. Anh ta đo chu vi của sàn sẽ thấy lớn hơn  $\pi = 3.1416$  lần đường kính của sàn. Thực tế, vận tốc  $\mathbf{v}$  của sàn quay tiếp tuyến với chu vi của nó, vậy thước đo chiều dài chu vi sàn bị co lại (coi Phần I về thuyết tương đối hẹp, đoạn C1), trong khi đường kính sàn vì thẳng góc với  $\mathbf{v}$  nên thước không co. Vòng tròn trong hình học phẳng có chu vi bằng  $\pi$  đường kính của nó, nhưng trong hình học cong vì thước đo chu vi co cụm nên chu vi lớn hơn  $\pi$  đường kính. Cũng vậy tổng số ba góc của hình tam giác cong lớn hơn  $180^\circ$ .

<sup>20</sup> Khi viết  $A^\mu B_\mu$  hay  $A^{\mu\nu} B_{\mu\nu}$  (với một hay nhiều chỉ số cái trên, cái dưới), thì ta phải cộng tất cả các đóng góp của các chỉ số lại, thí dụ  $A^\mu B_\mu = A^0 B_0 + A^1 B_1 + A^2 B_2 + A^3 B_3$ ,  $\eta_{\mu\nu} x^\mu x^\nu = \eta_{00} (x^0)^2 + \eta_{11} (x^1)^2 + \eta_{22} (x^2)^2 + \eta_{33} (x^3)^2 + \eta_{ij} x^i x^j$  ( $i, j = 1, 2, 3$  và  $i \neq j$ ). Xin nhớ rằng tuy  $A^\mu, B_\mu$  hay  $A^{\mu\nu}, B_{\mu\nu}$  đều là những vectơ hay tenxơ mang nhiều thành phần, quy ước tổng hợp Riemann-Einstein cho ta  $A^\mu B_\mu$  hay  $A^{\mu\nu} B_{\mu\nu}$  chỉ có một thành phần duy nhất, nó là một đối tượng hình học vô hướng (scalar).

<sup>21</sup> Gauss mới khoảng vài tuổi ở một lớp tiểu học, để giữ cho học trò khỏi quấy, ông giáo cho bài toán: tính tổng số của một trăm số nguyên liên tục  $1+2+\dots+100$ . Trong khi cả lớp loay hoay cộng dần vài số và kiểm điểm từng đoạn các tính toán cho chắc, Gauss nhìn trăm số nguyên một cách tổng quát, thấy từng cặp số đầu (1) + số cuối (100) cũng như số thứ nhì (2) + số áp cuối (99),  $3 + 98$  vân vân, tất cả 50 cặp đều như nhau và bằng 101. Vậy chỉ vài phút sau, cậu nhỏ Carl Friedrich hãnh diện mang đáp số  $101 \times 50 = 5050$ , trước nỗi kinh ngạc của cả lớp từ thầy đến bạn. Tên ông cũng gắn liền với đơn vị cường độ từ trường, với định lý Gauss dùng trong điện tĩnh. Để mua vui bạn đọc, xin nhắc đến một thân đồng nước ta Lê Quý Đôn, sinh trước Gauss, mới vài tuổi mà đã sáng tác nổi bài thơ tạ lỗi vì cậu trần truồng và dạng chân tay (giống chữ Thái trong Hán tự) đổ bạn của cha mình là chữ gì (ông bạn tưởng là chữ Đại), hai chữ Thái và Đại viết khác nhau chỉ có một cái chấm mà riêng con trai mới có. Cái độc đáo là mỗi câu thơ mang tên một con rắn: Chẳng phải liu điu vẫn giống nhà, Rắn đầu biếng học lẽ không tha, Thẹn đèn hổ lửa đau lòng mẹ, Nay thét mai gầm rất cổ cha, Ráo mép chỉ quen tuồng dối trá, Lằn lưng cam chịu vết roi cha, Từ nay trâu lỗ xin siêng học, Kẻo hổ mang danh tiếng thế gia.

<sup>22</sup> Mỗi hệ số  $\mu, \nu$  có bốn giá trị 0, 1, 2, 3, vậy ma trận  $4 \times 4$   $g_{\mu\nu}$  có  $4 \times (4 + 1) / 2 = 10$  thành phần đối xứng trong hoán chuyển  $\mu \leftrightarrow \nu$ , và  $4 \times (4 - 1) / 2 = 6$  thành phần bất đối xứng.

<sup>23</sup>

Khi tất cả 10  $g_{\mu\nu}$  đều cùng dấu, ta có bóng bầu dục (ellipsoide, đề tài của Riemann), khi  $g_{\mu\nu}$  có dấu khác nhau như trường hợp  $\eta_{\mu\nu}$ , ta có hình hyperboloid mà Einstein nghiên cứu.

<sup>24</sup> Đường trắc địa trên bề mặt quả cầu là những hình tròn lớn (cùng đường kính với quả cầu). Trong hình học Minkowski vì  $\eta_{\mu\nu}$  mang dấu  $\pm 1$  nên cạnh AC (trên trục thời gian) của tam giác ABC lại dài hơn tổng cộng hai cạnh AB + BC, và đường thẳng trắc địa nối A và C lại là đường dài nhất. Để con đường  $L_{AB} = \int_A^B ds$  (diễn tả sự di chuyển của điểm  $x^\lambda(s)$ , thông số  $s$  đo độ dài trên con đường) có chiều dài tối ưu thì  $x^\lambda(s)$  phải tuân theo phương trình vi phân bậc hai:

$$d^2x^\lambda/ds^2 + \Gamma^\lambda_{\mu\nu} [dx^\mu/ds] [dx^\nu/ds] = 0 \quad (1)$$

Ký hiệu Christoffel  $\Gamma^\lambda_{\mu\nu}$  trong phương trình (1) là những đạo hàm của metric  $g_{\mu\nu}(x^\lambda)$ , tính theo công thức sau (với định nghĩa  $\partial_\mu g_{\nu\sigma} \equiv dg_{\nu\sigma}/dx^\mu$ ):

$$\Gamma^\lambda_{\mu\nu} = (1/2) g^{\lambda\sigma} [\partial_\mu g_{\nu\sigma} + \partial_\nu g_{\mu\sigma} - \partial_\sigma g_{\mu\nu}] \quad (2)$$

Có  $4 \times 10 = 40$  ký hiệu Christoffel  $\Gamma^\lambda_{\mu\nu}$  (4 từ  $\lambda$ , 10 từ  $\mu\nu$ ), và  $g^{\lambda\sigma}$  là ma trận nghịch đảo của  $g_{\lambda\sigma}$  ( $g^{\lambda\alpha} g_{\alpha\beta} = \delta^\alpha_\beta$ , ký hiệu Kronecker  $\delta^\alpha_\beta = 0$  khi  $\alpha \neq \beta$  và  $= 1$  khi  $\alpha = \beta$ ). Trong hình học phẳng Minkowski không gia tốc, vì metric  $\eta_{\mu\nu}$  chỉ là những con số  $\pm 1$  đơn giản nên theo (2), ký hiệu Christoffel  $\Gamma^\lambda_{\mu\nu} = 0$ , vậy (1) rút gọn thành  $d^2x^\lambda/ds^2 = 0$ , do đó  $x^\lambda(s) = a^\lambda s + b^\lambda$ , chứng tỏ đường trắc địa trong hình học phẳng là đường thẳng.

<sup>25</sup> Sự liên kết  $ct$  với vector không gian ba chiều  $\mathbf{x}$  tạo ra tứ-vector không-thời gian  $x^\mu (ct, \mathbf{x})$ , một đại lượng bốn thành phần, thường xuyên dùng trong thuyết tương đối. Cũng vậy năng lượng  $E$  và xung lượng  $\mathbf{k} = \gamma m \mathbf{v}$  liên kết thành tứ-vector năng-xung lượng với bốn thành phần:  $k^\mu (E, c\mathbf{k})$ . Từ  $k^\mu$  ta xây dựng tenxơ năng-xung lượng  $T^{\mu\nu}$ , một ma trận  $4 \times 4$  (đối xứng  $\mu \leftrightarrow \nu$ ) mà 4 thành phần đường chéo là mật độ năng lượng  $E$  và mật độ áp suất  $\mathbf{P}$  (tỉ lệ với xung lượng  $\mathbf{k}$ ), cùng 6 thành phần hỗn hợp giữa  $E$  với  $\mathbf{P}$ . Sau chót ta định nghĩa  $T_{\mu\nu} \equiv g_{\mu\alpha} g_{\nu\beta} T^{\alpha\beta}$ , và  $T_{00} \sim E = \gamma m c^2$ .

<sup>26</sup> Thuyết tương đối rộng của Einstein thay thế và bổ xung cho định luật vạn vật hấp dẫn của Newton, thuyết cổ điển này chỉ là trường hợp xấp xỉ gần đúng của thuyết Einstein khi mật độ vật chất nhỏ (trọng trường yếu).

<sup>27</sup> Nhà thực vật học đầu tiên phát hiện ra tế bào, nhà thiên văn lỗi lạc có nhiều công trình phong phú (dự đoán luật hấp dẫn  $1/r^2$  và động lực học) nhưng bị thiên tài Newton áp đảo nên ít được nhắc đến. Lò xo một đầu buộc chặt vào tường, đầu kia kéo dài bởi một quả cân là thí dụ điển hình của hiện tượng đàn hồi, sự biến dạng sẽ từ từ mất đi khi lực căng nhỏ dần.

<sup>28</sup> Tenxơ Ricci  $R_{\mu\nu}$  lấy từ những ký hiệu Christoffel như sau:

$R_{\mu\nu} \equiv \partial_\alpha \Gamma^\alpha_{\mu\nu} - \partial_\nu \Gamma^\alpha_{\mu\alpha} + \Gamma^\alpha_{\beta\alpha} \Gamma^\beta_{\mu\nu} - \Gamma^\alpha_{\beta\nu} \Gamma^\beta_{\mu\alpha}$ . Sau hết khi nhân ma trận  $g^{\mu\nu}$  (nghịch đảo của  $g_{\mu\nu}$ ) với  $R_{\mu\nu}$ , ta có một đại lượng vô hướng  $R \equiv g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$ . Chính đại lượng  $R$  (mà riêng Einstein đã tìm ra và đặt thêm vào  $R_{\mu\nu}$  ngày 25/11/1915) này đóng vai trò cần thiết để tương thích với luật bảo toàn năng lượng mà  $T_{\mu\nu}$  phải tuân theo. Trước đó năm 1913 khi Grossmann và Einstein cộng tác, hai người đã đi gần tới đích với  $B_{\mu\nu} = R_{\mu\nu}$  không thôi.

<sup>29</sup> Trường hợp trọng trường yếu (mật độ năng khối lượng nhỏ như trái đất hay mặt trời), metric  $g_{\mu\nu}$  không khác metric phẳng  $\eta_{\mu\nu}$  bao nhiêu:  $g_{\mu\nu}(x) = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}(x)$ , với  $x = |\mathbf{x}|$ , và  $|h_{\mu\nu}(x)| \ll 1$ ,  $h_{\mu\nu}(x)$  thay đổi chậm chạp, cũng như  $T_{ij} \ll T_{0i} \ll T_{00}$  (xung lượng  $\mathbf{k} = m\mathbf{v} \approx 0$ ). Phương trình trội nhất  $R_{00} - (1/2)R g_{00} = (8\pi G/c^4)T_{00}$  cho ta luật của Newton: thí dụ trọng trường của trái đất thì  $h_{00}(x) = 2GM/(c^2x) \equiv 2U(x)/c^2 \approx 1.38 \times 10^{-9}$ ,  $M$  là khối lượng trái đất,  $x$  là khoảng cách từ tâm trái đất đến một vật thể ngoài mặt đất, và  $U(x) = GM/x$  là thế năng lôi hút của trái đất làm cho vật ở sát gần mặt đất rơi với gia tốc  $g = -dU(x)/dx \approx 9.81 \text{ m/s}^2$ .

<sup>30</sup> Trong hệ thống đo lường mét (m), kilogram (kg), giây (s),  $G = 6.67 \times 10^{-11}$  và  $\kappa \approx 2 \times 10^{-43}$  quá nhỏ, không gian quá cứng nhắc khiến ta hiểu tại sao xưa nay chẳng ai ngờ nó bị uốn cong bởi vật chất, chỉ ở đâu và khi nào có mật độ năng lượng lớn mới biến dạng độ phẳng lặng của không-thời gian.

<sup>31</sup>

Tần số  $N$  - ở đây là nhịp độ tích tắc của đồng hồ (đặt ở điểm  $x$ ) - thay đổi với cường độ của trọng trường vì metric  $g_{00}(x)$  thay đổi với  $x$ :  $g_{00}(x) = \eta_{00} + 2GM/(c^2x) \equiv -1 + 2U(x)/c^2$  (phụ chú 29). Đó chính là ý nghĩa của thời gian cong. Xin nhớ  $g_{00}(x)$  là hệ số của  $(cdt)^2$  trong phương trình vi phân  $ds^2 = g_{\mu\nu}(x^\lambda) dx^\mu dx^\nu$  nên ta suy từ đó ra mối liên đới giữa tần số  $N$  và  $g_{00}(x)$ :

$$N_1/N_2 = [g_{00}(x_2)/g_{00}(x_1)]^{1/2} \approx 1 + (1/c^2) [U(x_1) - U(x_2)] \quad (3)$$

Ở trên các vệ tinh GPS (điểm  $x_1$ ), cường độ trọng trường nhỏ hơn so với mặt đất (điểm  $x_2$ ),  $U(x_1) < U(x_2)$ , vậy theo (3)  $N_1 < N_2$ , thời gian như co lại (nhịp độ tích tắc đồng hồ chạy nhanh hơn) trên các vệ tinh GPS. Cũng trên các vệ tinh này di chuyển với vận tốc  $v$  so với dưới đất, thời gian trên đó lại giãn nở ra (nhịp độ tích tắc đồng hồ chạy chậm lại) theo thuyết tương đối hẹp. Tác động của thuyết tương đối rộng và hẹp về nhịp độ thời gian đối nghịch nhau nhưng không hoàn toàn triệt tiêu trên vệ tinh, và nhu liệu máy tính được gắn trong GPS để phối hợp hai hệ quả đó. Sự co giãn thời gian trên các vệ tinh GPS được ước tính vào khoảng một phần tỷ ( $10^{-9}$ ), tuy nhỏ vậy nhưng cực kỳ quan trọng vì hệ thống định vị toàn cầu đòi hỏi sự chính xác bền vững đến một phần mười ngàn tỷ ( $10^{-13}$ ) của đồng hồ nguyên tử. Theo thuyết tương đối rộng, hai anh em sinh đôi một ở trên núi cao, một ở dưới đồng bằng, người ở dưới (vì trọng trường lớn hơn so với trên núi) thấy thời gian giãn nở ra hay đồng hồ chạy chậm lại và như vậy trẻ hơn người ở trên cao (một giây trong trăm năm!). Hiệu ứng Einstein về thời gian co giãn bởi trọng trường được kiểm chứng nhiều lần trên các hỏa tiễn bay cách xa mặt đất khoảng 10000 km, ở đây đồng hồ chạy nhanh hơn khoảng  $4 \cdot 10^{-9}$  giây.

<sup>32</sup> Thực ra khi vắng vật chất (vế phải của phương trình Einstein là  $T_{\mu\nu} = 0$ ), không-thời gian chỉ mất đi cấu trúc cong thôi, ta vẫn còn không-thời gian phẳng của Minkowski (vì metric  $\eta_{\mu\nu}$  là những con số  $\pm 1$  nên những đạo hàm của metric  $\eta_{\mu\nu}$  bằng 0, do đó vế trái của phương trình Einstein là tenxơ Ricci cũng bằng 0 như vế phải  $T_{\mu\nu}$ ). Ngoài ra còn có sóng trọng trường dao động trong một không-thời gian rỗng tuếch phi vật chất chẳng do đâu tạo ra cả. Khi  $T_{\mu\nu} = 0$  không-thời gian chỉ thực sự biến mất nếu Einstein thêm vào vế trái của phương trình (II) một số hạng mới  $\Lambda g_{\mu\nu}$  và ông gọi  $\Lambda > 0$  là hằng số vũ trụ. Tuy nhiên cái nội dung sâu sắc của bức thư là Einstein nhấn mạnh đến sự liên đới chẳng sao tách biệt giữa vật chất, lực, năng lượng, không gian, thời gian; một cách mạng trong nhận thức.

<sup>33</sup> Bài tổng kết trong hội thảo quốc tế về vật lý hạt cơ bản và năng lượng cao, Tokyo, 1978.

<sup>34</sup> Một arcsecond với ký hiệu  $1'' = 1^\circ / 3600 = \pi / (180 \times 3600) = 4.848 \times 10^{-6}$ .

<sup>35</sup> Quả là một bài học vượt xa đối tượng khoa học thuần túy. Trên cánh đồng hoang ở Ferney-Voltaire biên giới Pháp-Thụy sĩ gần thành phố Genève, ngay sau đệ nhị thế chiến nhiều nhà vật lý Âu châu di tản khắp nơi vì nạn phát xít đã trở về cố hương cùng đồng nghiệp để xây dựng nên Trung tâm Âu châu Nghiên cứu Hạt nhân (CERN). Vì hòa bình và phát triển qua nghiên cứu cơ bản, với sự hỗ trợ tích cực của một số chính khách có tầm nhìn xa, họ đã chung sức mở đường cho sự hồi sinh và hoà giải của các nước Âu châu, đặc biệt Đức-Pháp. Vì mỗi nước riêng lẻ không sao đủ nhân sự và phương tiện để hoàn thành sứ mạng, nguyên tắc tổ chức của CERN (tập hợp đóng góp tài năng ngân quỹ từ nhiều nước châu Âu) đã tiên phong làm mô hình cho nhiều ngành hoạt động khác phỏng theo như thiên văn, sinh học, thậm chí cả kinh tế, chính trị (CERN ra đời nhiều năm trước Liên hiệp Âu châu). Mạng lưới toàn cầu (world wide web) của internet ra đời ở CERN là một trong nhiều thành công kỳ diệu từ nghiên cứu cơ bản sang ứng dụng của cơ quan này, kỹ thuật siêu dẫn điện từ dùng trong máy gia tốc hạt khổng lồ LHC là một thí dụ khác. Năm 1993 (đúng 501 năm Columbus khám phá ra châu Mỹ) máy gia tốc hạt SSC (Superconducting Super

Collider) đầu tàu thế giới về vật lý hạt cơ bản đang được xây ở Waxahachie, Texas bị Quốc hội Mỹ cắt đứt hỗ trợ. May thay CERN quyết tâm thay thế sự hẫng hụt này và trong mười năm xây dựng nên LHC để mở đầu chu kỳ thăng trầm rồi Mỹ sang Âu của ngành vật lý hạt mũi nhọn này.

<sup>36</sup> Peter Higgs, ở Đại học Edinburg đề xuất phải có hạt này để mang khối lượng cho vật chất. Bosc Higgs được khám phá ở CERN tháng 7 năm 2012, F. Englert và P. Higgs nhận giải Nobel 2013. Tất cả các hạt cơ bản khác của mô hình chuẩn như quark, lepton, gluon, photon, W, Z đều đã được khám phá nhiều năm trước với độ chính xác tuyệt vời. Cõi Kỹ yếu “Hạt Higgs và Mô hình chuẩn”, nxb Tri Thức (2014).

<sup>37</sup> Các chuyên gia gọi tần số ánh sáng bị giảm đi là sự xô dịch về phía đỏ (red shift), hàm nghĩa ánh sáng màu đỏ có tần số nhỏ hơn ánh sáng màu xanh. Lý do là vì nếu nguồn sáng hay âm thanh chuyển động ra xa (đến gần) bên, ánh sáng hay âm thanh sẽ mất nhiều (ít) thời gian hơn để tới người quan sát trên bên, bước sóng trên bên vì đó sẽ dài (ngắn) đi, hay tần số sóng sẽ giảm (tăng).

<sup>38</sup> Khi ta chuyển  $\Lambda g_{\mu\nu}$  từ về trái sang về phải của phương trình Einstein (II), ta thấy tenxơ năng-xung lượng  $T_{\mu\nu}$  có thêm một số hạng mới  $\delta T_{\mu\nu} = -(\Lambda c^4/8\pi G) g_{\mu\nu}$ . Số hạng mới này mang đặc tính của một chân không (vì  $\Lambda$  vô hướng và  $g_{\mu\nu}$  có gốc nguồn thuần hình học, chẳng do năng-xung lượng của vật chất tạo nên), hơn nữa dấu trừ của  $\delta T_{\mu\nu}$  có tác động đẩy ra (thay vì hút vào bởi lực hấp dẫn  $+8\pi G/c^4 T_{\mu\nu}$  của vật chất làm không gian co lại). Vậy  $\delta T_{\mu\nu}$  coi như tác động phản hấp dẫn của chân không làm dẫn nở vũ trụ và năng lượng tối chỉ định tính chất này.

<sup>39</sup> Một số sách báo phổ biến khoa học khi đề cập đến Big Bang thường dùng ngôn từ gợi ý có dòng thời gian trôi chảy từ quá khứ đến tương lai mà cả hai thuyết tương đối hẹp và rộng đều phủ định. Big Bang không phải là sự khai sinh ra vũ trụ từ hư vô, nó là một khoảnh mếp không-thời gian bị biến dạng rất mạnh bởi năng-xung lượng cực kỳ lớn, do đó trạng thái đàn hồi của không-thời gian bị đứt từa như miếng cao su quá căng mà bị xé rách.

<sup>40</sup> A. Penzias và R. Wilson năm 1965 đã tình cờ gián tiếp phát hiện ra bức xạ nền của vũ trụ (CMB, Cosmic Microwave Background), rồi năm 1992 J. Mather và G. Smoot dùng vệ tinh COBE chụp ảnh trực tiếp đầu tiên, mới đây 2003 là vệ tinh WMAP với chi tiết tinh vi hơn và vệ tinh Planck cũng như nhóm thực nghiệm Bicep2 ở Nam cực hy vọng chứng nghiệm được thời lạm phát tức là khoảng  $10^{-35}$  giây sau Big bang.

<sup>41</sup> Đúng là các nhà vật lý ít người có cái duyên thi sĩ nên chỉ đặt toàn những tên vật đen, lỗ đen, nổ lớn, vật chất tối, dây! Trong đời sống hàng ngày, ta gọi vật đen (black body) là một chất liệu chỉ hấp thụ ánh sáng chiếu lên nó mà không phản xạ nhưng vẫn bức xạ. Trong phòng thí nghiệm, vật đen là một lò bịt kín nung nóng ở nhiệt độ T và ta đục một lỗ nhỏ trên thành lò để quan sát, đo lường, nghiên cứu bức xạ nhiệt phát ra qua lỗ. Sự phân phối cường độ bức xạ phát ra bởi vật đen chỉ phụ thuộc vào T thôi chứ không vào bất cứ chất liệu nào ở trong lò. Điều này chứng tỏ bức xạ của vật đen chỉ phụ thuộc vào sự dao động của các thành phần cơ bản chung cho tất cả các chất liệu, do đó mang tính chất rất phổ quát. Bức xạ nhiệt của vật đen là một trường hợp hi hữu trong vật lý có tính phổ quát tuyệt đối. Cường độ bức xạ là một hàm phổ quát của nhiệt độ T và tần số  $\nu$  của ánh sáng bức xạ, mỗi tần số lại gắn liền với một màu (từ đỏ vàng sang tím) của ánh sáng đó. Một thanh sắt đen ở nhiệt độ bình thường nhưng thành đỏ khi nung nóng lên và trở nên trắng khi tăng nhiệt độ lên cao nữa. Công thức về bức xạ của vật đen mà Planck viết ra tháng 10 năm 1900 chính xác đến nỗi nó áp dụng từ lò kín nung nóng của phòng thí nghiệm ở đại học Berlin thế kỷ 19 cho đến bức xạ nền của Vũ trụ sau vụ Nổ lớn mà hai vệ tinh COBE và WMAP đo lường tàn dư nhiệt lượng phóng xạ cách đây khoảng 13.8 tỷ năm. Biết đâu trăm năm sau, ở thế kỷ 22, con người sẽ đo lường được bức xạ của một vật đen khác kỳ dị hơn nhiều, đó là lỗ đen bức xạ nhiệt ra ngoài chân trời tối kín của nó, lỗ đen chẳng còn hoàn toàn đen nữa theo S. Hawking, phụ chú 47.

<sup>42</sup> Bằng một ‘hành động hầu như tuyệt vọng’ để giải đáp cường độ và nghịch lý (năng lượng vô hạn) của vật đen, Planck đưa ra một giả thuyết theo đó các vật thể khi dao động với tần số  $\nu$  thì năng lượng  $E$  phát ra phải theo từng ‘gói’ rời rạc như  $1h\nu, 2h\nu, 3h\nu \dots$  chứ không liên tục. Kỳ lạ thay năng lượng phun ra từng gói từng chùm chứ không tuôn chảy đều đặn. Einstein là người đầu tiên dùng giả thuyết này để diễn giải hiện tượng quang điện, mở đầu cho sự khám phá ra lưỡng tính vừa sóng vừa hạt của ánh sáng cũng như của các vật thể vi mô khác (như electron) với Louis de Broglie và sự ra đời của vật lý lượng tử với nguyên lý bất định Heisenberg. Hằng số Planck  $h$  (trong phương trình  $E = h\nu$ ) có gốc nguồn ở chữ hilfe (tiếng Đức nghĩa là phụ trợ), chi tiết này nói lên cái khiêm tốn của một nhà bác học lớn, dẫu trong thâm tâm Planck biết mình vừa hé mở một chân trời mới khi thổ lộ với con trai Erwin 7 tuổi: hôm nay bố phát minh ra một điều phi thường chẳng kém Newton.

43

$\Lambda$  chỉ định hằng số vũ trụ  $\Lambda$  gắn liền với năng lượng tối, còn CDM viết tắt của Cold Dark Matter. Vật chất tối (dark matter), chiếm tới 28% tổng khối lượng vật chất trong vũ trụ, là vật chất không bức xạ mà chỉ có vai trò tác động lên cách vận hành của các thiên hà, nó khác lạ với vật chất bình thường (chỉ chiếm khoảng 4% khối lượng vũ trụ) của những thiên hà sáng ngời mà ta quan sát được. Gốc nguồn của giả thuyết vật chất tối đi từ sự đo lường vận tốc quay rất cao của các thiên hà, hệ quả của vận tốc quá cao này là các thiên thể phải tung bay khắp phía mà không gộp lại được thành chòm như ta quan sát, do đó giả thuyết phải có vật chất tối để lôi hút các thiên hà sát lại gần nhau không cho chúng tung bay. Phần còn lại (khoảng 68% tổng năng-khối lượng trong vũ trụ) là năng lượng tối (dark energy) để làm vũ trụ giãn nở càng ngày càng tăng. Cần nhấn mạnh tính bí ẩn của năng lượng tối (mang tính chất đẩy ra) và của vật chất tối (mang tính chất hút vào), bản chất chúng là gì, một đề tài nóng hổi của vũ trụ học và vật lý hạt cơ bản.

<sup>44</sup> Các electron (của sao lùn trắng) và neutron (của sao neutron) vì chúng là fermion nên phải tuân theo nguyên lý loại trừ Pauli của vật lý lượng tử, chúng không thể chung sống trong cùng một trạng thái nên sẽ đẩy nhau mạnh khi bị nén ép quá độ để sát gần nhau. Sự xô đẩy nhau này tạo thành một **áp lực đẩy ra ngoài** và mang tên *áp suất suy biến* (degeneracy pressure) chống lại **lực ép vào trong** của trọng trường. Nhưng áp suất suy biến này cũng chỉ chống đối nổi sức ép tương đối nhỏ của một khối lượng tới hạn Chandrasekhar  $M_C$  khoảng 1.44 khối lượng mặt trời thôi. Nếu khối lượng của sao vượt quá  $M_C$  thì trọng trường rất mạnh của nó không chế ngự áp suất suy biến, tâm lõi của sao tiếp tục bị nén ép rồi sụp đổ và bùng nổ, vỏ ngoài tung bay khắp phía, đó là sao siêu mới (supernovae) trong khoảnh khắc chói sáng như 10 tỷ mặt trời để kết thúc cuối cùng là Lỗ đen. Mặt trời vì có khối lượng  $M_0 < M_C$  nên sau khi đã đốt hết các nhiên liệu helium và hydrogene của nó khoảng 5 tỷ năm nữa sẽ co lại với bán kính khoảng 10.000 km để trở thành một sao lùn trắng với mật độ khối lượng là  $1\text{cm}^3$  nặng một tấn. Lùn là vì nhỏ còn trắng là vì tâm lõi của sao hãy còn rất nóng  $30.0000^\circ$  nên ánh sáng phát ra màu trắng, nhiệt độ cao này không phải do tổng hợp nhiệt hạch đã hết rồi mà chỉ vì sao lùn hãy còn giữ được nhiệt độ trước lúc tàn lụi khi đốt helium thành carbon.

45

Schwarzschild tìm metric  $g_{\mu\nu}(x^\lambda)$  *tĩnh* (không phụ thuộc vào thời gian  $t$ ) mang đối xứng cầu, tạo ra bởi một ngôi sao khối lượng  $M$  chìm trong một không gian rộng tuếch, do đó ở ngoài ngôi sao thì về phía phương trình Einstein tức là  $\text{ten}_{\sigma} T_{\mu\nu} = 0$ . Ông dùng tọa độ cầu  $r, \theta, \varphi$  thay thế tọa độ phẳng  $x, y, z$ , và đặc biệt metric  $g_{00}(r)$  chỉ phụ thuộc vào  $r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ .

Dạng tổng quát mà ông tìm ra cho metric vì phân  $ds^2$  của phương trình  $R_{\mu\nu} - (1/2) R g_{\mu\nu} = 0$  nay thu ngắn thành  $R_{\mu\nu} = 0$  (vì  $R = 0$  khi nhân  $R_{\mu\nu} - (1/2) R g_{\mu\nu} = 0$  với metric nghịch đảo  $g^{\mu\nu}$ ):

$$ds^2 = -A c^2 dt^2 + dr^2 / A + r^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \quad \text{với } A = 1 - (2GM / c^2 r)$$

Johannes Droste, môn đệ của Hendrik Lorentz, cũng tìm thấy kết quả tương tự, tuy hậu thế ít biết đến. Metric  $g_{00} = -A$  sẽ bằng 0 nếu  $r = R_S \equiv 2GM/c^2$ . Khi  $g_{00}(R_S) = 0$ , theo phương trình (3) của phụ chú 31, ánh sáng tần số  $\nu_0 \neq 0$  phát ra từ bất kỳ một điểm nằm trên bề mặt của hình cầu bán kính  $R_S$  thì người ở ngoài hình cầu ( $D > R_S$ ) thấy ánh sáng ấy chỉ có duy nhất một tần số  $\nu$  lúc nào cũng



bằng 0 ( $v/v_0 = [g_{00}(R_S)/g_{00}(D)]^{1/2} = 0$ ). Vật hình cầu bán kính  $R_S$  này diễn tả chân trời của một lỗ đen đơn giản nhất, ánh sáng ở chân trời này không phát hiện nổi ra ngoài cho người ở đây ( $D > R_S$ ) quan sát được. Khi ánh sáng còn không thoát nổi ra ngoài thì dĩ nhiên mọi vật chất mang khối lượng lại càng bị giam giữ chặt chẽ hơn ở phần dưới chân trời sự kiện của lỗ đen. Tóm lại những tính chất của lỗ đen gói tròn trong các nghiệm số của phương trình  $g_{00}(r) = 0$ , vậy đầu tiên khi giải phương trình Einstein là tìm metric  $g_{00}(r)$ .

Nhưng khi  $A = 0$  (hay  $r = R_S$ ) thì số hạng  $dr^2/A$  của metric Schwarzschild- Droste phải vô tận về mặt toán học, cái điểm kỳ dị (singular) này có thật hay không vì chân trời lỗ đen hình cầu bán kính  $R_S$  chẳng liên hệ gì đến một không-điểm kỳ dị. Nếu thiên thể ấy có bán kính  $R > R_S$  thì không xảy ra vô hạn vì hình cầu bán kính  $R_S$  nằm ở trong thiên thể nên metric ở đó phải khác metric Schwarzschild (tenxơ  $T_{\mu\nu}$  phải khác 0 vì trong ngôi sao chứa đầy vật chất ở trạng thái nóng đặc). Trường hợp  $R \leq R_S$  thì sao? thiên thể có bị co nén để bán kính  $R$  của nó nhỏ hơn  $R_S$  không? Trong vài chục năm, người ta cho rằng điều này không thể xảy ra (vì  $R \leq R_S$  hàm nghĩa là lỗ đen nằm ở ngoài ngôi sao mà ở đây chỉ có không gian rỗng, nay lại xuất hiện một lỗ đen lạ lùng). Nhưng  $R \leq R_S$  phải xảy ra vì sự sập đổ không tránh khỏi của một thiên thể có khối lượng lớn do tác động lôi hút mạnh của trọng trường (phụ chú 44 về khối lượng tới hạn Chandrasekhar). Phân tích kỹ vấn đề, Martin Kruskal chứng minh là tính 'kỳ dị'  $dr^2/A$  (khi  $A = 0$ ) của metric Schwarzschild không có thực, nó xảy ra bởi vì cách chọn các tọa độ  $t, r, \theta, \phi$  không thích hợp để diễn tả mọi tình huống.

Thay thế chúng là tọa độ hỗn hợp không gian và thời gian (điều quen thuộc trong thuyết tương đối):  $ct = \pm\{r + R_S \log(r/R_S - 1)\}$ , và metric Kruskal mang dạng  $4(R_S)^3/r \times \text{Exp}(-r/R_S)$ , nó không kỳ dị khi  $r = R_S$ , và chỉ vô tận khi  $r = 0 = ct$ . Tóm lại bất kỳ bán kính lớn hay nhỏ của ngôi sao, nếu  $2GM/R_S c^2 = 1$  thì luôn luôn hiện hữu một lỗ đen bình thường (không vô tận khi  $r = R_S$ ).

46

Metric của Schwarzschild-Droste tương ứng với sự vắng mặt của vật chất ( $T_{\mu\nu} = 0$ ) ở ngoài ngôi sao, nay ta xét trường hợp vật chất ở trong ngôi sao với vẻ phải  $T_{\mu\nu} \neq 0$ . Chủ yếu có ba loại lỗ đen, loại có điện tích  $Q$  (ở đây  $T_{\mu\nu}$  là tenxơ năng-xung lượng của điện từ trường) loại tự quay với momen góc  $J$  và loại hỗn hợp có cả  $Q$  và  $J$ .

Lỗ đen khối lượng  $M$  và điện tích  $Q$  được diễn tả bởi metric Reissner-Nordström, hệ số  $g_{00}(r) = 1 - (R_S/r) + (Rq/r)^2$  với  $(Rq)^2 = (1/4\pi\epsilon_0) \times GQ^2/c^4$ . Lỗ đen khối lượng  $M$ , moment góc  $J$  được diễn tả bởi metric Kerr, hệ số  $g_{00}(r) = 1 - (R_S/r) + (R_J/r)^2$  với  $R_J = J/cM$ , còn lỗ đen tổng quát nhất có khối lượng  $M$ , điện tích  $Q$ , moment góc  $J$  được diễn tả bởi metric Kerr-Newman với hệ số  $g_{00}(r) = 1 - (R_S/r) + (Rq/r)^2 + (R_J/r)^2$ .

Hình cầu mà bán kính là một trong hai nghiệm số của phương trình bậc hai  $g_{00}(r) = 0$  cho các loại lỗ đen.

47 Diện tích của chân trời lỗ đen Schwarzschild  $\Sigma_S = 4\pi (R_S)^2 = 16\pi G^2 M^2/c^4$ .

Bán kính của lỗ đen Kerr-Newman  $R_{KN} = (1/2)\{R_S + \sqrt{(R_S)^2 - (2Rq)^2 - (2R_J)^2}\}$ , từ đó diện tích mặt biên của lỗ đen Kerr-Newman  $\Sigma_{KN} = 8\pi(G^2/c^4) M\{M + \sqrt{(M^2 - (Mq)^2 - (M_J)^2)}\}$

với  $(Mq)^2 = (1/4\pi\epsilon_0) Q^2/G$  và  $(M_J)^2 = (Jc/GM)^2$ . Lỗ đen Schwarzschild là trường hợp riêng lẻ của lỗ đen tổng quát Kerr-Newman khi  $Q = 0, J = 0$ .

Vì entropy theo định nghĩa là hằng số Boltzmann  $k_B$  nhân với một đại lượng "không thứ nguyên (dimensionless)" luôn tăng trưởng tương trưng bởi  $\text{Log } \Omega$ , nhưng ở đây mặt biên  $\Sigma$  có thứ nguyên là diện tích, vậy  $\Sigma$  phải tính theo một đơn vị diện tích phổ quát chỉ phụ thuộc duy nhất vào ba hằng số cơ bản  $c, G, h$ . Đó là bình phương chiều dài Planck  $L_P = [Gh/c^3]^{1/2}$  (phụ chú 50), vậy  $\Sigma$  phải chia cho  $(L_P)^2 = [Gh/c^3]$  để thành đại lượng không thứ nguyên trong entropy.

Nhiệt độ  $T$  của lỗ đen được tính theo công thức quen thuộc trong nhiệt động học  $1/T = dS/dE$ , kết quả là:  $1/(k_B T) = 4\pi GM\{1 + [1 - (Mq)^2/M^2 - (M_J)^2/M^2]^{-1/2}\}/(c^3 h)$ . Nhiệt độ của lỗ đen (mà khối lượng  $M$  bằng khối lượng  $M_0$  của mặt trời) chỉ khoảng  $10^{-7}$  K.

Sau hết, Hawking tính ra hệ số  $1/4$  trong công thức (III) cho entropy của lỗ đen để sao cho nó có phổ bức xạ của một vật đen ở nhiệt độ  $T$  (bức xạ Planck).

48

Theo thuyết tương đối hẹp (phần I), vật thể khối lượng  $m$  chuyển động với vận tốc  $v$  có năng lượng  $E = \gamma mc^2$  và xung-lượng  $\mathbf{k} = \gamma m\mathbf{v}$ , hai đại lượng đó liên kết bởi  $E^2 = |\mathbf{k}|^2 c^2 + m^2 c^4$ . Công thức  $E^2 = |\mathbf{k}|^2 c^2 + m^2 c^4$  của thuyết tương đối hẹp và chùm năng lượng  $h\nu$  của thuyết lượng tử là điểm khởi đầu mà Dirac kết hợp được để khám phá ra một chân trời mới: sự xuất hiện của phản hạt có cùng khối lượng với hạt, nhưng tất cả các đặc trưng khác (điện tích, spin) của hạt và phản hạt đều ngược dấu. Sự thống nhất lượng tử với thuyết tương đối hẹp là điều tối cần thiết vì thế giới vi mô của lượng tử luôn dao động với vận tốc rất cao, mà trường hợp này chỉ thuyết tương đối hẹp mới diễn tả được chính xác.

Để chứng minh phản hạt, Dirac đi từ nhận xét sau: vì  $E = \pm (|\mathbf{k}|^2 c^2 + m^2 c^4)^{1/2}$ , và  $E_0 = \pm mc^2$  với một vật bất động ( $\mathbf{k} = 0$ ). Trong vật lý cổ điển,  $E > 0$ . Trái lại trong thế giới vi mô của vật lý lượng tử, năng lượng của một hạt có thể mất đi hay nhận được từng gói  $h\nu$ , vậy không có gì ngăn cản hạt khi mất đi quá nhiều gói  $h\nu$  có thể mang năng lượng âm, hay ngược lại một hạt với  $E < 0$  khi nhận được nhiều gói  $h\nu$  có thể trở về trạng thái năng lượng dương. Thí dụ trong đại dương của muôn vàn electron (điện tích  $-e$ ) mang  $E < 0$ , nếu có đủ năng lượng để kéo một electron trong đại dương ấy ra ngoài, tức là đại dương ấy mất đi một electron mang  $E < 0$ ,  $-e$ . Nhưng mất đi (tượng trưng bằng dấu  $-$ ) cái âm thì cũng như nhận được cái dương,  $-(-) = +$ , vậy kết cục là ta thấy xuất hiện một hạt mang năng lượng  $E > 0$  và có điện tích dương  $+e$ . Đó là hạt phản electron hay positron. Tóm lại, hạt và phản hạt đều có  $E > 0$ , chúng có chung khối lượng nhưng mọi đặc trưng khác (điện tích, spin, lượng tử tính) đều ngược dấu.

<sup>49</sup> Làm sao ước tính được năng lượng của Không? Phép phân tích thứ nguyên cho ta cách trả lời. Với ba đại lượng cơ bản phổ quát trong vật lý là:  $h = 2\pi\hbar$  (hằng số Planck),  $G$  hằng số trọng lực Newton và  $c$  vận tốc ánh sáng, ta chỉ có một cách duy nhất để lập nên những đại lượng mang thứ nguyên chiều dài ( $L$ ), khối lượng ( $M$ ), và thời gian ( $T$ ). Đó là chiều dài Planck  $L_p = [G\hbar/c^3]^{1/2} = 1.6 \times 10^{-35}$  m, khối lượng Planck  $M_p = \hbar/(cL_p) = 2.1 \times 10^{-8}$  kg, và đơn vị thời gian Planck  $T_p = L_p/c = 5.3 \times 10^{-44}$ s.

Từ đó, năng lượng Planck  $E_p = M_p c^2 = 2 \times 10^{+9}$  joule. Mật độ năng lượng của Không được ước tính theo  $(27/16\pi^2) E_p/(L_p)^3 = 8.4 \times 10^{112}$  joule/  $m^3$  với những đóng góp của các trường ảo tràn đầy trong Không: photon trong tương tác điện từ, ba boson  $W^\pm, Z^0$  của tương tác yếu, và tám gluon trong tương tác mạnh. Đóng góp của các hạt cơ bản quark và lepton cũng chẳng thay đổi nhiều công thức trên.

<sup>50</sup> Trong một hư không kín rỗng, không ánh sáng không chút vật chất, ta đặt hai phiến gương mỏng song song. Mặc dầu năng lượng giữa hai phiến và ngoài hai phiến của Không đều phân kỳ như ta biết, nhưng năng lượng của Không ở giữa nhỏ hơn ở ngoài hai phiến (vì kích thước ở giữa nhỏ hơn ở ngoài), sự khác biệt hữu hạn đó gây nên một áp suất làm chúng hút lẫn nhau. Đó là lực Casimir, một đặc trưng của lượng tử. Ông tính ra  $F_c = (\pi\hbar c/120) (L^2/d^4)$  với  $L^2$  là diện tích của gương và  $d$  là khoảng cách giữa hai phiến. Nguồn gốc lượng tử của  $F_c$  được biểu hiện rõ ràng qua  $h$  (hằng số Planck) trong công thức trên. Ở khoảng cách  $d \approx$  nanô-mét (một phần tỷ mét) trong công nghệ tương lai, lực này có thể đóng vai trò quan trọng. Các phòng thực nghiệm ở Riverside, Padova, Stockholm, Paris đã đo  $F_c$  với độ sai biệt nhỏ hơn 1% so với tính toán. Trong hư không tất cả đều vắng bóng chẳng có điện từ, ánh sáng, vật chất, khối lượng, điện tích, sắc tích...chỉ cả, kỳ lạ thay đột khởi một lực mà gốc nguồn rút tia từ năng lượng cực tiểu (nhưng vô hạn) của chân không lượng tử! Nhà vật lý Hòa lan Hendrik Casimir (1909-2000), sau khi công bố năm 1948 lực mang tên ông, đã giữ chức vụ tổng giám đốc nghiên cứu đại tập đoàn công kỹ nghệ quốc tế Philips.

<sup>51</sup> Một thuyết khác là hình học phi giao hoán (non-commutative geometry) do A. Connes (nhà toán học Pháp giải Fields) đề xướng, theo đó không-thời gian cũng chẳng còn trơn tru liên tục nữa mà rời rạc thành đơn vị như vật chất.

Coi thêm Juan Maldacena "The illusion of Gravity", Scientific American 2005, bản dịch của Cao Chi và Hoàng Tô "Ảo giác Hấp dẫn" và cuốn sách phản biện thuyết siêu dây của Peter Woit "Not Even Wrong".

