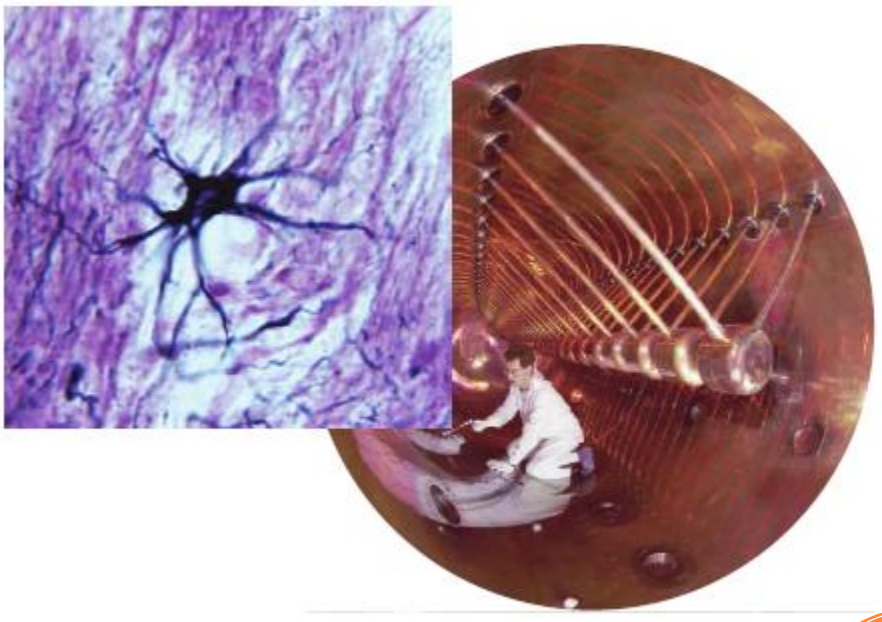
Trao đổi trực tuyến tại:

www.mientayvn.com/chat_box_li.html

HTTP://WWW.THUVIENVATLY.COM
© HIEPKHACHQUAY

BENJAMIN CROWELL

BÀI GIẢNG ĐIỆN HỌC



An Minh, Xuân Mậu Tý 2008

Tặng Lớp Sư phạm Vật lí K2000
Trường Cao đẳng Cộng đồng Kiên Giang

Nguyên bản: Electricity and Magnetism (freebook)
Tác giả: Benjamin Crowell
Người dịch: hiepkhachquay
Bản dịch còn nhiều sai sót, mong nhận được ý kiến góp ý của các bạn
mailto: manhan101@yahoo.com

MỤC LỤC

Chương 1
Điện và Nguyên tử

1.1 Cuộc truy tìm lực nguyên tử 2
1.2 Điện tích, điện tính và từ tính 3
1.3 Nguyên tử 6
1.4 Lượng tử hóa điện tích 11
1.5 Electron 14
1.6 Mô hình bánh bông lan rắc nho của nguyên tử 18
Bài tập 21

Chương 2
Hạt nhân

2.1 Phóng xạ 24
2.2 Mẫu hành tinh nguyên tử 27
2.3 Số nguyên tử 31
2.4 Cấu trúc của hạt nhân 35
2.5 Lực hạt nhân mạnh, phân rã alpha và sự phân hạch 38
2.6 Lực hạt nhân yếu, phân rã beta 40
2.7 Sự nhiệt hạch 44
2.8 Năng lượng hạt nhân và năng lượng liên kết 45
2.9 Tác dụng sinh học của bức xạ ion hóa 47
2.10 Sự hình thành các nguyên tố 49
Bài tập 52

Chương 3
Mạch điện, Phần 1

3.1 Dòng điện 54
3.2 Mạch điện 57
3.3 Điện thế 58
3.4 Điện trở 61
3.5 Tính dẫn điện của vật chất 68
3.6 Áp dụng tính toán 71
Bài tập 73

Chương 4
Mạch điện, Phần 2

4.1 Sơ đồ mạch điện 78
4.2 Các điện trở mắc song song và quy tắc mối nối 78
4.3 Các điện trở mắc nối tiếp 83
Bài tập 88

Chương 5
Các trường lực

5.1 Tại sao lại là các trường lực 92
5.2 Trường hấp dẫn 94
5.3 Điện trường 97
5.4 Điện thế đối với trường không đều 102
5.5 Hai hoặc ba chiều 103
5.6 Điện trường của sự phân bố điện tích liên tục 105
Bài tập 107

Chương 6
Điện từ học

6.1 Từ trường 109
6.2 Tính từ trường và lực từ 112
6.3 Cảm ứng điện từ 115
6.4 Sóng điện từ 120
6.5 Năng lượng của trường 123
6.6 Sự đối xứng và khuynh hướng thuận một bên 125
Bài tập 127

Chương A
Điện dung và Độ tự cảm

A.1 Điện dung và độ tự cảm 132
A.2 Mạch dao động 135
A.3 Điện thế và dòng điện 137
A.4 Sự tắt dần 140
A.5 Trở kháng 143
Bài tập 145

Chương 1
ĐIỆN VÀ NGUYÊN TỬ

Nơi kết thúc của kính thiên văn là nơi bắt đầu của kính hiển vi. Trong hai tầm nhìn vĩ mô và vi mô này, cái nào quan trọng hơn ?

Victor Hugo

Cha của ông qua đời khi mẹ ông đang thai nghén. Cậu con trai bị mẹ hắt hủi nên ông bị tống khứ đến một trường nội trú khi mẹ ông tái giá. Bản thân ông chưa hề lấy vợ, nhưng ở tuổi trung niên, ông có quan hệ gần gũi với một người phụ nữ trẻ tuổi hơn nhiều, mối quan hệ đó đã chấm dứt khi ông đột phát chứng thần kinh. Sau những thành công khoa học buổi đầu, ông đã sống phần lớn quãng đời còn lại của mình trong sự thất vọng vì bất lực không giải mã được bí mật của thuật giả kim.

Con người được mô tả ở trên chính là Isaac Newton, nhưng không phải một Newton hoan hỉ trong các sách giáo khoa tiểu sử thông thường. Vậy tại sao ta lại chú ý đến mặt buồn bã của cuộc đời ông ? Đối với các nhà giáo dục khoa học hiện đại, nỗi ám ảnh lâu dài của Newton với thuật giả kim có thể xem là một sự bối rối, một sự xao lãng khỏi thành tựu chủ yếu của ông là sáng lập nền cơ học hiện đại. Tuy nhiên, đối với Newton, việc nghiên cứu thuật giả kim của ông có liên quan tự nhiên với nghiên cứu của ông về lực và chuyển động. Gốc rễ của phép phân tích chuyển động của Newton là tính phổ quát của nó: nó đã thành công trong việc mô tả thế giới trên trời và dưới đất với cùng những phương trình đó, trong khi trước đấy người ta vẫn cho rằng mặt trời, mặt trăng, các sao và hành tinh khác biệt về cơ bản so với những vật thể thuộc trái đất. Nhưng Newton nhận thấy rằng nếu như khoa học mô tả được mọi thế giới tự nhiên theo một cách thống nhất, thì nó không đủ khả năng thống nhất quy mô con người với quy mô vũ trụ: ông sẽ không hài lòng cho đến khi nào ông hợp nhất được vũ trụ vi mô vào trong bức tranh đó.

Chúng ta không gì phải ngạc nhiên trước thất bại của Newton. Mặc dù ông là một tín đồ chắc chắn về sự tồn tại của các nguyên tử, nhưng không hề có thêm bằng chứng thực nghiệm nào cho sự tồn tại của chúng kể từ khi những người Hi Lạp cổ đại lần đầu tiên thừa nhận chúng trên cơ sở thuần túy triết học. Thuật giả kim làm việc dốc sức dưới truyền thống bí mật và thần bí. Newton đã chuyển hóa lĩnh vực "triết học tự nhiên" thành cái mà chúng ta công nhận là khoa học vật lí hiện đại, và thật là không công bằng nếu như phê

bình ông đã thất bại trong việc biến thuật giả kim thành ngành hóa học hiện đại. Thời gian lúc đó chưa chín muồi. Kính hiển vi là một phát minh mới, và nó là một khoa học mũi nhọn khi người đương thời của Newton là Hooke khám phá những cơ thể sống cấu tạo nên tế bào.

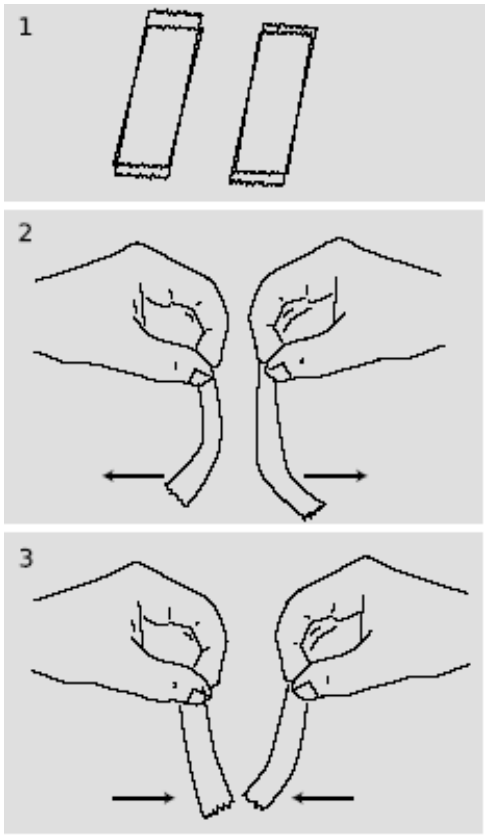
1.1 Cuộc truy tìm lực nguyên tử

Newton không phải là nhà khoa học đầu tiên. Ông là thầy phù thủy cuối cùng.

John Maynard Keynes

Tuy nhiên, sẽ cần phải nắm bắt được chuỗi tư tưởng của Newton và xét nơi nó đưa chúng ta đến với sự thuận lợi của nhận thức khoa học hiện đại. Trong việc thống nhất quy mô con người và vũ trụ của sự tồn tại, ông đã hình dung lại cả hai sân khấu trên đó các diễn viên (cây cối và nhà cửa, hành tinh và các sao) tương tác qua lực hút và lực đẩy. Ông cũng bị thuyết phục rằng đối tượng ngự trị thế giới vi mô là các nguyên tử, cho nên vấn đề còn lại chỉ là xác định xem chúng tác dụng lên nhau bằng loại lực gì.

Sự sáng suốt tiếp theo của ông cũng không kém nổi bật so với sự bất lực của ông mang nó đến đơm hoa kết trái. Ông nhận thấy nhiều lực ở quy mô con người – như lực ma sát, lực nhớt, những lực thông thường giữ các vật chiếm giữ cùng một không gian, và vân vân – đều phải đơn giản là biểu hiện của một loại lực cơ bản hơn tác dụng giữa các nguyên tử. Băng dính vào giấy vì các nguyên tử trong băng hút các nguyên tử trong giấy. Nhà của tôi không đổ sập xuống tâm của trái đất vì các nguyên tử của nó đẩy các nguyên tử bùn đất nằm dưới nó.



Bốn miếng băng được làm cho nhiễm điện, 1. Tùy thuộc vào loại kết hợp chọn để kiểm tra, lực tương tác có thể là lực hút, 2, hoặc lực đẩy, 3.

Ở đây ông đã bị sa lầy. Thật cám dỗ khi nghĩ rằng lực nguyên tử là một hình thức của hấp dẫn, loại lực ông biết là phổ quát, cơ bản và đơn giản về mặt toán học. Tuy nhiên, hấp dẫn luôn luôn là lực hút, nên làm sao có thể sử dụng nó để giải thích sự tồn tại lực nguyên tử cả đẩy lẫn hút ? Lực hấp dẫn giữa các vật có kích thước bình thường cũng cực kì nhỏ, đó là lí do tại sao chúng ta chưa hề chú ý tới xe cộ và nhà cửa hút chúng ta về mặt hấp dẫn. Thật khó hiểu được làm sao hấp dẫn có thể gây ra bất cứ thứ gì mãnh liệt như nhịp đập của con tim hay sự nổ của thuốc súng. Newton tiếp tục viết lách hàng triệu từ ghi chép thuật giả kim đầy luận cứ về một số lực khác, có lẽ "lực thần thánh" hay "lực sinh dưỡng" là ví dụ lực được mang bởi tinh dịch đến trứng.

Thật may mắn, ngày nay chúng ta có đủ kiến thức để nghiên cứu một mối hoài nghi khác với tư cách là ứng cử viên cho lực nguyên tử: đó là lực điện. Lực điện thường thấy giữa các vật chuẩn bị bằng cách cọ xát (hay những tương tác bề mặt khác), chẳng hạn như quần áo chà xát lên nhau trong máy sấy. Một ví dụ hữu ích được chỉ rõ trong hình a/ 1: dán hai miếng băng lên mặt bàn, và sau đó đặt thêm hai miếng nữa lên trên chúng. Kéo mỗi cặp lên khỏi bàn, và rồi tách chúng ra. Hai miếng phía trên sẽ đẩy nhau, a/2, hai miếng dưới cũng vậy. Tuy nhiên, một miếng phía

dưới sẽ hút một miếng phía trên, a/3. Lực điện như thế này có một số điểm tương tự như lực hấp dẫn, loại lực khác mà chúng ta biết là lực cơ bản:

- Lực điện là phổ biến. Mặc dù một số chất, ví dụ như lông thú, cao su, và chất dẻo, phản ứng với sự nhiễm điện mạnh hơn những chất khác, nhưng mọi vật chất đều tham gia vào lực điện ở một mức độ nào đó. Không có chất nào là chất "phi điện". Vật chất vốn có tính hấp dẫn lẫn tính điện.
- Thí nghiệm cho thấy lực điện, giống như lực hấp dẫn, là lực tỉ lệ nghịch với bình phương. Nghĩa là, lực điện giữa hai quả cầu tỉ lệ với $1/r^2$, trong đó r là khoảng cách tâm-nối-tâm giữa chúng.

Ngoài ra, lực điện còn có ý nghĩa hơn lực hấp dẫn về phương diện là ứng cử viên cho lực cơ bản giữa các nguyên tử, vì chúng ta đã thấy chúng có thể hút nhau hoặc đẩy nhau.

1.2 Điện tích, điện tính và từ tính

Điện tích

"Điện tích" là thuật ngữ chuyên môn dùng để chỉ cho biết một vật đã được làm nhiễm để tham gia vào tương tác điện. Cần phân biệt với cách sử dụng phổ biến, trong đó thuật ngữ này được sử dụng bừa bải để chỉ bất cứ tính chất điện nào. Chẳng hạn, mặc dù chúng ta nói một cách thông tục là "điện tích" của pin, nhưng bạn có thể dễ dàng xác minh là pin không hề có điện tích nào về ý nghĩa chuyên môn, tức là nó không tác dụng bất cứ lực điện nào lên một miếng băng đã bị làm cho nhiễm điện như đã mô tả ở phần trước.

Hai loại điện tích

Chúng ta có thể dễ dàng thu thập hàng loạt dữ liệu về lực điện giữa các chất khác nhau được làm cho tích điện theo những cách khác nhau. Ví dụ, chúng ta lấy lông mèo nhiễm điện bằng cách cọ xát lên lông thỏ sẽ hút thủy tinh đã chà xát lên lụa. Vậy chúng ta có thể hiểu tất cả những thông tin này như thế nào ? Chúng ta có thể thu được một sự đơn giản hóa rất lớn bằng cách lưu ý rằng thực tế chỉ có hai loại điện tích. Giả sử chúng ta chọn lông mèo cọ xát lên lông thỏ là đại diện của loại A, và thủy tinh cọ lên lụa là đại diện cho loại B. Bây giờ chúng ta sẽ thấy là không có "loại C". Bất kì vật nào được làm cho nhiễm điện bằng bất cứ phương pháp nào thuộc loại A, hút các vật mà A hút và đẩy các vật mà A đẩy, hoặc là thuộc loại B, có cùng tính chất hút và đẩy như B. Hai loại, A và B, luôn luôn biểu hiện tương tác ngược nhau. Nếu như A biểu hiện lực hút đối với một số vật tích điện, thì B chắc chắn sẽ đẩy nó ra xa, và ngược lại.

Đơn vị coulomb

Mặc dù chỉ có hai loại điện tích, nhưng mỗi loại có thể biểu hiện lượng điện khác nhau. Đơn vị hệ mét của điện tích là coulomb, được định nghĩa như sau:

Một coulomb (C) là lượng điện tích sao cho một lực 9,0. 10^9 N xuất hiện giữa hai chất điểm có điện tích 1 C nằm cách nhau 1 m.

Kí hiệu cho lượng điện tích là q. Hệ số trong định nghĩa có nguồn gốc lịch sử, và không phải học thuộc lòng chính xác. Định nghĩa phát biểu cho chất điểm, tức là những vật rất nhỏ, vì nếu không thì những phần khác nhau của chúng sẽ cách nhau những khoảng khác nhau.

Mô hình hai loại hạt mang điện

Thí nghiệm cho thấy mọi phương pháp cọ xát hoặc bất kì phương pháp nào khác làm tích điện cho vật đều gồm hai vật, và cả hai cuối cùng đều tích điện. Nếu một vật cần một lượng nhất định của một loại điện tích, thì vật kia sẽ có lượng tương đương loại điện

tích kia. Có thể có nhiều cách hiểu khác nhau về điều này, nhưng cách đơn giản nhất là những viên gạch cấu trúc cơ bản của vật chất có hai vị, mỗi vị ứng với một loại điện tích. Việc cọ xát các vật lên nhau làm di chuyển một số hạt này từ vật này sang vật kia. Theo mô hình này, một vật chưa bị làm cho nhiễm điện có thể thật sự có một lượng lớn *cả hai* loại điện tích, nhưng số lượng của chúng bằng nhau và chúng phân bố đều nhau bên trong vật. Vì loại A đẩy bất cứ thứ gì mà loại B hút, và ngược lại, nên vật sẽ tác dụng một lực tổng hợp bằng không lên bất cứ vật nào khác. Phần còn lại của chương này sẽ làm sáng tỏ mô hình này và bàn xem những hạt bí ẩn này có thể được hiểu như thế nào với ý nghĩa là những phần cấu trúc nội của nguyên tử.

Sử dụng kí hiệu điện tích dương và âm

Vì hai loại điện tích có xu hướng triệt tiêu lực lẫn nhau, nên người ta gán nhãn cho chúng bằng kí hiệu dương và âm, và nói về điện tích *toàn phần* của một vật. Việc gọi điện tích này là dương, điện tích kia là âm, là hoàn toàn độc đoán. Benjamin Franklin quyết định mô tả loại thứ nhất mà chúng ta gọi là "A" là âm, nhưng thật ra không có vấn đề gì nếu như ai ai cũng đều gọi như vậy. Một vật có điện tích toàn phần bằng không (lượng điện tích thuộc hai loại bằng nhau) được gọi là trung hòa điện.

♥ Hãy bình luận phát biểu sau: "Có hai loại điện tích, hút và đẩy".

Định luật Coulomb

Một đối tượng lớn của những quan sát thực nghiệm có thể được tóm tắt như sau:

Định luật Coulomb: Cường độ của lực tác dụng giữa hai điện tích điểm cách nhau một khoảng r cho bởi phương trình

$$|F| = k\frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

trong đó k = 9,0. 10^9 N.m^2/C^2. Lực là lực hút nếu như các điện tích khác dấu, là lực đẩy nếu như chúng cùng dấu.

Những kĩ thuật hiện đại tài tình cho phép dạng $1/r^2$ của định luật Coulomb được kiểm tra đến độ chính xác không thể tin nổi, cho thấy số mũ nằm trong khoảng từ 1,99999999999999998 đến 2,0000000000000002.

Lưu ý là định luật Coulomb rất giống với định luật hấp dẫn của Newton, trong đó độ lớn của lực là Gm_1m_2/r^2, ngoại trừ chỉ có một loại khối lượng, chứ không phải hai, và lực hấp dẫn không bao giờ là lực đẩy. Do sự tương tự gần gũi này giữa hai loại lực, nên chúng ta có thể sử dụng lại rất nhiều hiểu biết của chúng ta về lực hấp dẫn. Chẳng hạn, có một tương đương điện của định lí lớp vỏ: lực điện tác dụng ra bên ngoài bởi một vỏ cầu tích điện đều có độ lớn như thể toàn bộ điện tích tập trung tại tâm của nó, và lực tác dụng vào bên trong là bằng không.

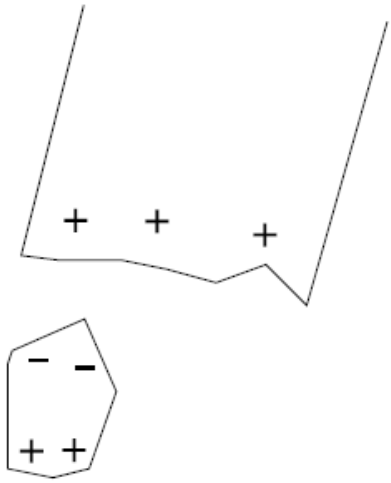
Bảo toàn điện tích

Một lí do còn cơ bản hơn nữa cho việc sử dụng kí hiệu dương và âm cho điện tích là các thí nghiệm cho thấy điện tích được bảo toàn theo định nghĩa này: trong bất kì hệ cô lập nào, tổng lượng điện tích là một hằng số. Đây là lí do vì sao chúng ta thấy việc cọ xát những chất ban đầu không tích điện lên nhau luôn luôn có kết quả là một chất có một lượng nhất định một loại điện tích, còn chất kia cần một lượng tương đương điện tích kia. Bảo toàn điện tích trông có vẻ tự nhiên trong mô hình của chúng ta trong đó vật chất cấu thành từ những hạt dương và âm. Nếu điện tích trên mỗi hạt là một tính chất cố định của loại hạt đó, và nếu chính những hạt đó không thể tự sinh ra hoặc phá hủy, thì bảo toàn điện tích là điều không thể tránh được.

Lực điện với các vật trung hòa

Như chỉ rõ trong hình b, một vật tích điện có thể hút một vật không tích điện. Làm sao điều này có thể xảy ra ? Vấn đề mấu chốt là ở chỗ mặc dù mỗi miếng giấy có tổng điện tích bằng không, nhưng ít nhất nó có một số hạt mang điện bên trong nó có một mức độ tự do chuyển động nào đó. Giả sử miếng băng tích điện dương, c. Các hạt di động trong miếng giấy sẽ phản ứng với lực của miếng băng, làm cho một đầu của miếng giấy trở nên tích điện âm và đầu kia trở nên dương. Lực hút giữa giấy và băng bây giờ mạnh hơn lực đẩy, vì đầu tích điện âm ở gần miếng băng hơn.

b/ Miếng băng tích điện hút các mẫu giấy không tích điện ở gần, làm nhấc bổng chúng lên.



c/ Mẫu giấy có tổng điện tích bằng không, nhưng nó có những hạt tích điện bên trong nó có thể di chuyển được.

♥ Điều gì sẽ xảy ra nếu như miếng băng tích điện âm ?

Lối đi phía trước

Chúng ta bắt đầu làm việc với những hành vi điện phức tạp mà chúng ta chưa bao giờ nhận thấy xuất hiện rành rành ngay trước mắt mình. Không giống như chiếc ròng rọc, cái puli, và mặt phẳng nghiêng của cơ học, các diễn viên trên sân khấu điện và từ học là những hiện tượng không nhìn thấy xa lạ với kinh nghiệm hàng ngày của chúng ta. Vì lí do này nên nửa thứ hai của chương trình vật lí học của bạn khác hoàn toàn, tập trung nhiều hơn vào các thí nghiệm và kĩ thuật. Mặc dù bạn sẽ không bao giờ thật sự nhìn thấy điện tích chuyển động qua một sợi dây, nhưng bạn có thể học cách sử dụng máy đo ampe để đo dòng chuyển động đó.

Sinh viên cũng có xu hướng bị gây ấn tượng từ học kì vật lí đầu tiên của họ rằng nó là môn khoa học chết người. Không phải như thế ! Chúng ta đang lần theo vết tích lịch sử dẫn trực tiếp đến nghiên cứu vật lí mũi nhọn mà bạn đọc thấy trên báo chí. Những thí nghiệm nguyên tử xuất sắc bắt đầu vào khoảng năm 1900, mà chúng ta sẽ nghiên cứu trong chương này, không khác gì mấy với những thí nghiệm của năm 2000 – chỉ có điều nhỏ hơn, đơn giản hơn, và rẻ tiền hơn nhiều.

Lực từ

Nghiên cứu toán học chi tiết của từ học sẽ không xuất hiện mãi cho đến phần cuối của cuốn sách này, nhưng chúng ta cần phát triển một vài khái niệm đơn giản về từ học ngay bây giờ vì lực từ thường được sử dụng trong các thí nghiệm và kĩ thuật mà chúng ta sắp nói tới. Các nam châm thông dụng hàng ngày nói chung có hai loại. Nam châm vĩnh cửu, ví dụ như loại nằm trên tủ lạnh nhà bạn, cấu tạo từ sắt hoặc những chất giống thép có chứa những nguyên tử sắt. (Những chất khác nhất định cũng có từ tính, nhưng sắt rẻ nhất

và thông dụng nhất) Loại nam châm kia, ví dụ là loại làm cho loa máy hát của bạn rung động, gồm những cuộn dây có dòng điện chạy trong đó. Cả hai loại nam châm đều có khả năng hút sắt chưa nhiễm từ, chẳng hạn như cánh cửa tủ lạnh.

Một cách xem xét khiến cho những hiện tượng trông có vẻ phức tạp này trở nên dễ hiểu hơn nhiều : đó là lực từ là tương tác giữa các điện tích đang chuyển động, xuất hiện cùng với lực điện. Giả sử một nam châm vĩnh cửu được mang tới gần một nam châm loại cuộn dây. Cuộn dây có các điện tích chuyển động bên trong nó vì chúng ta buộc các điện tích chạy thành dòng. Nam châm vĩnh cửu cũng có các điện tích chuyển động bên trong nó, nhưng trong trường hợp này các điện tích xoáy tròn tự nhiên bên trong sắt. (Cái làm cho một mẫu sắt bị từ hóa khác với một khối gỗ là ở chỗ chuyển động của điện tích bên trong gỗ là ngẫu nhiên chứ không có tổ chức) Các điện tích chuyển động trong cuộn dây nam châm tác dụng một lực lên các điện tích chuyển động trong nam châm vĩnh cửu, và ngược lại.

Cơ sở toán học của từ học phức tạp hơn nhiều so với định luật Coulomb đối với điện học, đó là lí do vì sao chúng ta phải chờ sang chương 6 mới nghiên cứu sâu về chúng. Hai cơ sở đơn giản sẽ được trình bày ngay bây giờ:

(1) Nếu một hạt mang điện chuyển động trong vùng không gian gần một hạt mang điện khác cũng đang chuyển động, thì lực từ tác dụng lên nó tỉ lệ với vận tốc của nó.

(2) Lực từ tác dụng lên một hạt mang điện chuyển động luôn luôn vuông góc với hướng hạt chuyển động.

Ví dụ 1. La bàn từ

Trái Đất có nhân nóng chảy bên trong, giống như một bình nước sôi, nó khuấy động và nổi sóng. Để đơn giản hóa, điện tích có thể đi theo những chuyển động khuấy tròn, nên Trái Đất chứa những điện tích chuyển động. Kim nam châm của la bàn từ chính là một nam châm vĩnh cửu nhỏ. Điện tích chuyển động bên trong Trái Đất tương tác từ với điện tích chuyển động bên trong kim la bàn, làm cho kim la bàn xoay tròn và chỉ hướng bắc.

Ví dụ 2. Ống phóng điện tử

Hình ảnh trên ti vi được vẽ bằng chùm electron bắn từ phía sau ống phóng ra phía trước. Chùm hạt quét qua toàn bộ mặt ống giống như một người đọc xem lướt qua một trang sách. Lực từ được sử dụng để lái chùm hạt. Khi chùm hạt đi từ phía sau ra phía trước ống, cần có lực theo hướng trên-dưới, trái- phải để lái chúng. Nhưng không thể sử dụng lực từ để làm tăng tốc chùm hạt, vì chúng chỉ có thể đẩy vuông góc với hướng chuyển động của các electron, chứ không cùng chiều với chúng.

Câu hỏi thảo luận

A. Nếu lực hút điện giữa hai chất điểm nằm cách nhau 1m là 9×10^9 N thì tại sao chúng ta không thể suy ra điện tích của chúng là + 1 C và – 1 C ? Chúng ta cần phải có thêm những quan sát gì để chứng minh điều này ?

B. Một miếng băng tích điện sẽ hút dính vào tay bạn. Điều đó có cho phép chúng ta nói rằng các hạt mang điện tự do bên trong tay bạn là dương hay âm, hoặc cả hai, hay không ?

1.3 Nguyên tử

Tôi đi tới chỗ xem nguyên tử là người bạn xinh đẹp, khó tính, có màu xám hoặc màu đỏ tùy theo cảm nhận.

Rutherford

Thuyết nguyên tử

Người Hi Lạp chịu rất nhiều áp bức trong hai thiên niên kỉ qua: bị người La Mã thống trị, bị ức hiếp trong cuộc thập tự chinh bởi những kẻ thánh chiến đi đến và đến từ Miền đất hứa, và bị người Thổ Nhĩ Kì chiếm đóng mãi cho đến gần đây. Không có gì ngạc

nhiên khi mà họ thích nhớ tới những ngày tháng lộn xộn đó, vào lúc những nhà tư tưởng lỗi lạc nhất của họ đã tiến rất gần tới các quan niệm như nền dân chủ và thuyết nguyên tử. Hi Lạp trở lại dân chủ sau một giai đoạn độc tài quân sự, và hình nguyên tử được in một cách hãnh diện trên một trong những đồng tiền của họ. Đó là lí do vì sao khiến tôi xúc động phải nói rằng giả thuyết Hi Lạp cổ đại rằng vật chất cấu thành từ các nguyên tử là một công trình dự đoán thuần túy. Không có bằng chứng thực nghiệm thực tế nào cho các nguyên tử, và sự hồi sinh khái niệm nguyên tử vào thế kỉ thứ 18 bởi Dalton có ít tính chất Hi Lạp hơn tên gọi, có nghĩa là "không thể chia tách". Thậm chí tiếng tăm Hi Lạp còn bị sứt mẻ nhiều khi tên gọi đó được chỉ rõ là không thích hợp vào năm 1899, lúc nhà vật lí J.J. Thomson chứng minh bằng thực nghiệm cho thấy các nguyên tử có những thứ còn nhỏ hơn nữa bên trong chúng, tức là chúng có thể chia tách ra được (Thomson gọi chúng là "electron"). Sau cùng thì "không thể phân tách" là có thể phân tách được.

Nhưng hãy tiếp tục câu chuyện của chúng ta. Điều gì đã xảy ra với khái niệm nguyên tử trong hai ngàn năm ở giữa ? Những người có học thức tiếp tục bàn luận ý tưởng đó, và những người yêu thích nó có thể thường sử dụng nó để mang lại những lời giải thích hợp lí cho nhiều sự việc và hiện tượng khác nhau. Một thực tế được giải thích dễ dàng là sự bảo toàn khối lượng. Ví dụ, nếu bạn trộn 1 kg nước với 1 kg bụi đất, bạn sẽ có chính xác 2 kg bùn, không hơn không kém. Điều tương tự đúng cho nhiều quá trình như sự đông đặc của nước, lên men bia, hoặc nghiền sa thạch. Nếu bạn tin vào các nguyên tử, thì sự bảo toàn khối lượng mang lại sự cảm nhận đầy đủ, vì tất cả những quá trình này có thể xem là sự trộn lẫn hoặc bố trí lại các nguyên tử, chứ không làm thay đổi tổng số nguyên tử. Tuy nhiên, đây vẫn chẳng phải là bằng chứng cho thấy nguyên tử tồn tại.

Nếu các nguyên tử thật sự tồn tại, thì có những loại nguyên tử gì, và cái gì phân biệt rõ những loại khác nhau đó ? Chúng có kích thước, hình dạng, trọng lượng và một số đại lượng khác không ? Hố ngăn cách giữa thuyết nguyên tử cổ đại và hiện đại trở nên hiển hiện khi chúng ta xét đến những nghiên cứu sơ khai đã có về vấn đề này cho đến thế kỉ hiện nay. Những người cổ đại quyết định có bốn loại nguyên tử, đất, nước, không khí và lửa; quan điểm phổ biến nhất cho rằng chúng phân biệt nhau ở hình dạng của chúng. Các nguyên tử nước có hình cầu, nên nước có khả năng chảy một cách êm đềm. Các nguyên tử lửa có những điểm sắc nhọn, đó là lí do vì sao lửa làm đau khi nó chạm vào da một người nào đó (Không có khái niệm nhiệt độ mãi cho đến hai ngàn năm sau này). Cách hiểu hiện đại khác một cách cơ bản về cấu trúc của nguyên tử thu được trong giai đoạn cách mạng 10 năm từ 1895 đến 1905. Mục tiêu chính của chương này là mô tả những thí nghiệm trọng yếu đó.

Bạn có bao giờ nghe nói tới thuyết nguyên tử chưa ?

"Bạn là thứ bạn ăn". Câu nói hiện đại lém lĩnh đó ít nhiều mang cách hiểu nguyên tử về sự tiêu hóa. Xét cho cùng thì sự tiêu hóa là một bí ẩn thú vị vào thời cổ đại, và các nền văn hóa tiền hiện đại thường tin rằng sự ăn cho phép bạn giải phóng một số dạng "lực sự sống" khỏi thực phẩm. Chuyện thần thoại đầy dãy những năng lực trừu tượng như sự can đảm hoặc sự ô uế lễ nghi có thể đi vào cơ thể bạn thông qua thực phẩm mà bạn ăn. Trái với những quan điểm siêu nhiên này, những nhà nguyên tử luận cổ đại có một cách hiểu hoàn toàn mang tính tự nhiên về sự tiêu hóa. Thức ăn cấu tạo từ các nguyên tử, và khi bạn tiêu hóa nó, bạn đã đơn giản là phóng thích một số nguyên tử ra khỏi nó và sắp xếp chúng vào những hợp chất cần thiết cho các mô cơ thể của bạn. Các nhà khoa học xa xưa tiến bộ hơn và các nhà khoa học thời phục hưng yêu thích loại giải thích này. Họ nóng lòng cởi trói cho mối ràng buộc lên trung tâm của nền vật lí Aristotle (và phiên bản thân nhà thờ, thêm mắm dặm muối của nó, tức triết học kinh viện), theo quan điểm của họ nền vật lí đó có quá nhiều tính chất huyền bí và "mục tiêu" cho các vật. Ví dụ, trường phái Aristotle giải thích nguyên nhân hòn đá rơi trở lại đất là vì đó là "bản chất" hay "mục tiêu" của nó phải đến nằm nghỉ trên mặt đất.

Tuy nhiên, nỗ lực có vẻ ngây thơ nhằm giải thích sự tiêu hóa một cách tự nhiên cuối cùng khiến các nhà nguyên tử luận gặp rắc rối to với Giáo hội. Vấn đề là ở chỗ thánh lễ quan trọng nhất của nhà thờ gồm ăn bánh mì và rượu và nhờ đó mà nhận được tác động siêu nhiên của sự tha thứ

cho tội lỗi. Đề cập đến nghi lễ này, học thuyết hóa thể khẳng định rằng phúc lành của bánh mì và rượu thánh thể đúng là chuyển hóa thành máu và thịt của Chúa. Thuyết nguyên tử được nhận thức là mâu thuẫn với thuyết hóa thể, vì thuyết nguyên tử phủ nhận phúc lành có thể làm thay đổi bản chất của các nguyên tử. Mặc dù thông tin lịch sử cung cấp trong đa số sách giáo khoa khoa học nói về Galileo miêu tả sự bất đồng của ông với Tòa án dị giáo là khơi mào cuộc tranh luận xem Trái Đất có chuyển động hay không, nhưng một số nhà sử học tin rằng sự bị trừng phạt của ông có nhiều thứ để tìm hiểu hơn là sự biện hộ của ông cho thuyết nguyên tử làm lật đổ thuyết hóa thể. (Những vấn đề khác ở trong trạng thái phức tạp là phong cách đối đầu của Galileo, vấn đề vũ trang của Tòa thánh, và tin đồn cho rằng nhân vật xuẩn ngốc trong tác phẩm của Galileo là ám chỉ đức giáo hoàng) Trong một thời gian dài, niềm tin vào thuyết nguyên tử đóng vai trò là biểu hiện của sự không theo lề thói đối với các nhà khoa học, một cách khẳng định sở thích hiểu hiện tượng theo lẽ tự nhiên chứ không phải siêu nhiên. Sự tán thành thuyết nguyên tử của Galileo và Newton là một hoạt động nổi loạn, giống như sự chấp nhận của các thế hệ sau này về học thuyết Darwin và Marxism.

Một mâu thuẫn khác giữa triết học kinh viện và thuyết nguyên tử đến từ cái nằm giữa các nguyên tử. Nếu bạn hỏi một người hiện đại câu hỏi này, họ sẽ có thể trả lời "không có gì cả" hoặc "không gian trống rỗng". Nhưng Aristotle và những người kế tục sự nghiệp của ông tin rằng không thể nào có không gian trống rỗng, tức chân không, như thế được. Đó không phải là một quan điểm vô lí, vì không khí có xu hướng tràn vào bất kì không gian nào mà bạn mở ra, và câu hỏi đó tồn tại mãi cho tới thời kì phục hưng khi người ta chỉ ra được cách tạo ra chân không.

Nguyên tử, ánh sáng, và mọi thứ khác

Mặc dù tôi có khuynh hướng giễu cợt các nhà triết học Hi Lạp cổ đại như Aristotle, nhưng hãy dành ra một chút để tán dương ông về một số điều. Nếu bạn đọc các tác phẩm của Aristotle về vật lí (hoặc chỉ xem lướt qua chúng, giống như tôi đã làm), thì điều thu hút sự chú ý nhất là mức độ cẩn thận khi ông phân loại hiện tượng và phân tích mối quan hệ giữa các hiện tượng. Não người hình như tự nhiên thực hiện được sự phân biệt giữa hai loại hiện tượng vật lí: các vật và chuyển động của các vật. Khi một hiện tượng xảy ra tự nó không tức thời là một trong những loại này, thì có một xu hướng mạnh mẽ là quan niệm hóa nó là loại này hoặc loại kia, hoặc thậm chí bỏ qua sự tồn tại của nó hoàn toàn. Chẳng hạn, các thầy giáo vật lí hay rùng mình trước phát biểu của học sinh rằng "thuốc nổ phát nổ, và lực giải phóng khỏi nó theo mọi hướng". Trong những ví dụ này, khái niệm phi vật chất của lực được phân loại ngầm như thể nó là một chất vật lí. Phát biểu "lên dây cót chiếc đồng hồ làm lưu trữ chuyển động trong lò xo" là một sự thiếu phân loại của năng lượng điện dưới dạng chuyển động. Một ví dụ bỏ qua sự tồn tại của hiện tượng hoàn toàn có thể gợi ra bằng cách hỏi mọi người tại sao chúng ta cần đến bóng đèn. Câu trả lời thường là "đèn rọi sáng căn phòng để cho chúng ta có thể nhìn thấy mọi thứ", không chú ý tới vai trò thiết yếu của ánh sáng đi vào mắt chúng ta đến từ những thứ được rọi sáng.

Nếu bạn yêu cầu một ai đó nói cho bạn biết ngắn gọn về các nguyên tử, câu trả lời có khả năng là "mọi thứ cấu thành từ các nguyên tử", nhưng bây giờ chúng ta thấy hiển nhiên là từ "mọi thứ" trong phát biểu này không còn thích hợp nữa. Đối với các nhà khoa học của những năm đầu thập niên 1900, những người đang cố gắng khảo sát nguyên tử, đây không phải là một định nghĩa tầm thường. Đã có một dụng cụ mới gọi tên là ống chân không, giống như ống phóng hình trong ti vi ngày nay. Tóm lại, những người thợ hàn điện đã phát hiện ra toàn bộ nhóm hiện tượng xảy ra bên trong và xung quanh ống chân không, và đặt cho chúng những cái tên hoa mĩ như "tia X", "tia catôt", "sóng Hertz", và "tia N". Đây là những loại quan sát cuối cùng cho chúng ta biết chúng ta biết gì về vật chất, nhưng sau đó cũng phát sinh những cuộc tranh luận nảy lửa xem chính những đối tượng này có phải là những dạng vật chất hay không.

Chúng ta hãy xem mức phân loại các hiện tượng do các nhà vật lí của năm 1900 sử dụng. Họ ghi nhận ba loại:

- Vật chất có khối lượng, có thể có động năng, và có thể chuyển động trong chân không, mang theo khối lượng của nó và động năng theo nó. Vật chất được bảo toàn, cả bảo toàn khối lượng và bảo toàn số nguyên tử của từng nguyên tố. Các nguyên

tử không thể chiếm cùng khoảng không gian như các nguyên tử khác, nên cách thuận tiện khảo sát cái gì đó không phải là vật chất là chỉ ra nó có thể truyền qua một chất rắn, trong đó các nguyên tử nhồi nhét rất gần nhau.

- Ánh sáng không có khối lượng, luôn luôn có năng lượng, và có thể truyền qua chân không, mang theo năng lượng cùng với nó. Hai chùm tia sáng có thể xuyên qua nhau và hiện ra khỏi chỗ va chạm mà không bị suy yếu, lệch hướng, hoặc bất kì ảnh hưởng nào khác. Ánh sáng có thể đi xuyên qua những loại chất nhất định, ví dụ như thủy tinh.
- Loại thứ ba là mọi thứ không phù hợp với định nghĩa ánh sáng hoặc vật chất. Ví dụ thuộc loại này có thời gian, vận tốc, nhiệt, và lực.

Nguyên tố hóa học

Làm thế nào người ta khám phá được có bao nhiêu loại nguyên tử gì ? Ngày nay, việc tiến hành một chương trình thực nghiệm nhằm phân loại các loại nguyên tử không phải là việc gì quá khó. Đối với từng loại nguyên tử, phải có một nguyên tố tương ứng, tức là một chất tinh khiết cấu tạo từ không gì hơn ngoài loại nguyên tử đó. Các nguyên tử được cho là không thể chia tách được, nên một chất như sữa chẳng hạn không có khả năng là cơ bản, vì khuấy mạnh nó sẽ làm nó tách thành hai chất khác nhau: bơ và nước sữa. Tương tự, gỉ sét không thể là một nguyên tố, vì nó có thể được tạo ra bằng sự kết hợp hai chất: sắt và ôxi. Bất chấp tính hợp lí hiển nhiên của nó, không có chương trình nào như thế được thực hiện mãi cho đến thế kỉ thứ 18. Người cổ đại có lẽ không làm thế vì quan sát không được chấp nhận rộng rãi là phương pháp đúng đắn để trả lời câu hỏi tự nhiên, và cũng vì họ không có trong tay những kĩ thuật cần thiết hoặc những kĩ thuật đó thuộc về lĩnh vực lao động có địa vị xã hội thấp, ví dụ như thợ rèn và thợ mỏ. Các nhà giả kim thuật bị ngăn cản bởi tiếng tăm của thuyết nguyên tử lật đổ và bởi xu hướng nghiêng về chủ nghĩa thần bí và huyễn hoặc. (Thách thức nổi tiếng nhất mà các nhà giả kim thuật đối mặt là biến chì thành vàng, ngày nay chúng ta biết điều đó là không thể được, vì chì và vàng đều là các nguyên tố).

Tuy nhiên, vào năm 1900, các nhà hóa học đã thực hiện được một việc hợp lí khám phá xem nguyên tố là cái gì. Họ cũng xác định được tỉ số khối lượng của các nguyên tử khác nhau một cách khá chính xác. Phương pháp tiêu biểu là đo bao nhiêu gam natri (Na) kết hợp với một gam chlorine (Cl) tạo ra muối (NaCl). (Đấy là đã giả sử bạn đã biết dựa trên một bằng chứng khác rằng muối cấu tạo gồm số nguyên tử Na và Cl bằng nhau) Khối lượng của từng nguyên tử, khi so sánh với tỉ số khối lượng, được biết chỉ trong vài bậc độ lớn dựa trên bằng chứng gián tiếp, và nhiều nhà vật lí và hóa học phủ nhận rằng từng nguyên tử chẳng là cái gì khác hơn ngoài những kí hiệu cho tiện lợi.

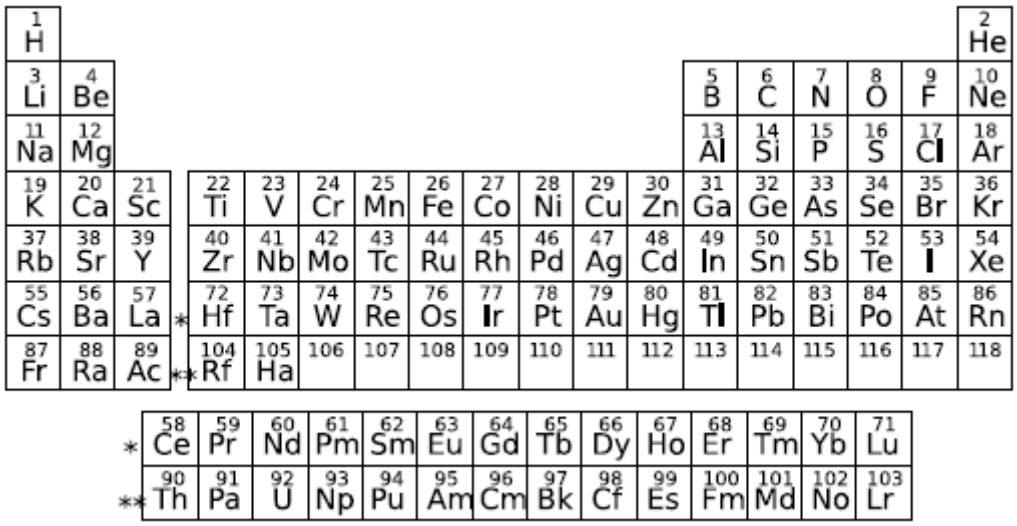
$$\frac{m_{\mathrm{He}}}{m_{\mathrm{H}}} = 3.97$$
$$\frac{m_{\mathrm{Ne}}}{m_{\mathrm{H}}} = 20.01$$
$$\frac{m_{\mathrm{Sc}}}{m_{\mathrm{H}}} = 44.60$$

d/ Khối lượng một số nguyên tử so với khối lượng nguyên tử hydro. Chú ý là một số giá trị rất gần với số nguyên, nhưng không hoàn toàn là số nguyên.

Ý nghĩa của các nguyên tố

Khi thông tin chất đống, thách thức là tìm một cách thức hệ thống hóa nó; óc thẩm mĩ của các nhà khoa học hiện đại không ưa những thứ lộn xộn. Sự hỗn tạp này của các

nguyên tố là một sự lúng túng. Một nhà quan sát đương thời, William Crookes, đã mô tả các nguyên tố mở ra "trước chúng ta rộng như Đại Tây Dương trải ra trước con mắt đăm chiêu của Columbus, chế giễu, châm chọc, và thì thầm những điều lạ lùng, và từ trước đến nay không ai có thể giải quyết được". Không bao lâu sau, người ta bắt đầu nhận thấy rằng nhiều khối lượng nguyên tử rất gần với bội số nguyên của khối lượng nguyên tử hydro, nguyên tố nhẹ nhất. Một vài người dễ kích động bắt đầu cho rằng hydro là viên gạch cấu trúc cơ bản, và những nguyên tố nặng hơn cấu thành từ nhiều cụm hydro. Tuy nhiên, không bao lâu sau thì những phép đo chính xác hơn đã bác bỏ luận điệu đó của họ, chúng cho thấy không phải tất cả các nguyên tố đều có khối lượng nguyên tử gần với bội số nguyên của khối lượng hydro, và những trường hợp gần với bội số nguyên của hydro cũng bị sai lệch một phần trăm hoặc ngần ấy.



e/ Bảng tuần hoàn hóa học hiện đại.
Các nguyên tố trong cùng một cột có tính chất hóa học giống nhau. Số nguyên tử hiện đại, sẽ nói tới trong phần 2.3, không được biết tới vào thời của Mendeleev, vì bảng có thể lật theo những cách khác nhau.

Giáo sư hóa học Dmitri Mendeleev, trong khi soạn bài giảng của ông vào năm 1869, muốn tìm một số cách tổ chức kiến thức của ông cho sinh viên có thể dễ hiểu hơn. Ông viết tên của tất cả các nguyên tố lên những tấm thẻ và bắt đầu sắp xếp chúng theo những cách khác nhau trên bàn làm việc của ông, thử tìm một sắp xếp dễ nhớ. Sự sắp xếp hàng-cột ông nêu ra về cơ bản là bảng tuần hoàn hóa học hiện đại của chúng ta. Các cột của phiên bản hiện đại biểu diễn các nguyên tố có tính chất hóa học tương tự nhau, và mỗi hàng phía dưới thì nặng hơn hàng phía trên nó. Ngang qua từng hàng, hầu như luôn luôn đặt các nguyên tử trong chuỗi khối lượng tăng dần. Cái gì khiến cho hệ thống có giá trị tuần hoàn của nó. Có ba chỗ Mendeleev phải bỏ trống trong bảng sắp xếp của ông để giữ các nguyên tố giống nhau về mặt hóa học nằm trong cùng một cột. Ông tiên đoán sẽ tồn tại những nguyên tố lấp đầy những chỗ trống này, và ngoại suy hoặc nội suy từ những nguyên tố khác trong cùng cột đó, dự đoán những tính chất dạng số của nó, ví dụ như khối lượng, điểm nóng chảy, và tỉ trọng. Tiếng tăm của Mendeleev trở nên lẫy lừng khi ba nguyên tố của ông (sau này được đặt tên là gallium, scandium, và germanium) được tìm thấy và có tính chất rất gần với tính chất ông dự đoán.

Một điều mà bảng tuần hoàn Mendeleev làm sáng tỏ là khối lượng không phải là đặc trưng cơ bản phân biệt các nguyên tử thuộc những nguyên tố khác nhau. Để thiết lập công trình bảng tuần hoàn của mình, ông đã phải đi xa khỏi việc sắp xếp có trật tự các nguyên tố hoàn toàn theo khối lượng. Chẳng hạn, nguyên tử iodine nhẹ hơn tellurium, nhưng Mendeleev phải đặt iodine sau tellurium sao cho nó nằm chung cột với các nguyên tố có tính chất hóa học tương tự.

Bằng chứng trực tiếp cho thấy nguyên tử tồn tại

Thành công của lí thuyết động lực học của nhiệt đã mang lại bằng chứng mạnh mẽ cho thấy, ngoài chuyển động của vật nói chung, còn có một loại chuyển động không nhìn thấy ở khắp nơi xung quanh chúng ta: chuyển động ngẫu nhiên của các nguyên tử bên trong mỗi vật. Nhưng nhiều kẻ bảo thủ không bị thuyết phục rằng các nguyên tử thật sự tồn tại. Xét cho cùng thì chưa ai từng nhìn thấy một nguyên tử cả. Mãi cho đến khi thuyết nhiệt động lực học được phát triển chứng minh thuyết phục rằng các nguyên tử thật sự tồn tại và chúng tham gia vào những chuyển động liên tục không bao giờ ngưng nghỉ.

Phát đạn chứng minh nguyên tử một cách trừu tượng hơn về mặt toán học phát nổ khi một số quan sát cũ kĩ, mờ mịt được xem xét lại bởi một viên thư kí không tiếng tăm gì ở phòng đăng kí phát minh Thụy Sĩ tên là Albert Einstein. Nhà thực vật học Brown, sử dụng một chiếc kính hiển vi lúc nó còn là một sản phẩm nghệ thuật vào năm 1827, quan sát những hạt phấn hoa nhỏ xíu trong một giọt nước nằm trên bàn soi hiển vi và nhận thấy chúng nhảy nhót một cách ngẫu nhiên không vì lí do gì rõ ràng cả. Ban đầu, nghi ngờ rằng phấn hoa mà ông cho là đã chết thật sự còn sống, ông thử quan sát các hạt bồ hóng, và nhận thấy các hạt bồ hóng cũng chuyển động lộn xộn. Kết quả tương tự xảy ra với bất kì hạt nhỏ nào khác lơ lửng bên trong chất lỏng. Hiện tượng đó được gọi là chuyển động Brown, và sự tồn tại của nó được nhiều thế hệ xem là một sự kì quặc và là một thực tế hoàn toàn không quan trọng, chỉ là một điều phiền toái cho các nhà hiển vi học.

Mãi cho tới năm 1906, Einstein mới tìm ra được lời giải thích đúng đắn cho quan sát của Brown: các phân tử nước ở trạng thái chuyển động ngẫu nhiên liên tục, và va chạm với hạt phấn hoa ở mọi lúc, sút nó đi theo mọi hướng. Sau cả một thiên niên kỉ nghiên cứu về nguyên tử, cuối cùng đã có một bằng chứng chắc chắn. Tính toán của Einstein xua tan mọi nghi ngờ, vì ông có thể đưa ra những tiên đoán chính xác về những thứ như quãng đường trung bình một hạt đi được trong một khoảng thời gian nhất định. (Einstein nhận giải thưởng Nobel không cho lí thuyết tương đối của ông mà cho những bài báo của ông về chuyển động Brown và hiệu ứng quang điện).

Câu hỏi thảo luận

A. Làm thế nào từ sự hiểu biết kích thước của một nguyên tử nhôm có thể suy ra ước tính khối lượng của nó, và ngược lại ?

B. Làm thế nào người ta có thể kiểm tra cách giải thích của Einstein cho chuyển động Brown bằng cách quan sát nó ở những nhiệt độ khác nhau ?

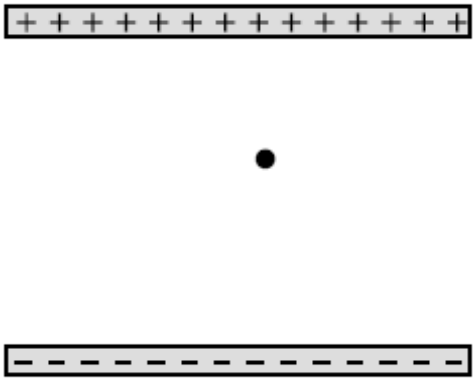
1.4 Lượng tử hóa điện tích

Chứng tỏ nguyên tử thật sự tồn tại là một mục tiêu lớn đã đạt, nhưng việc chứng minh sự tồn tại của chúng không giống với việc tìm hiểu những tính chất của chúng. Lưu ý các quan sát Brown-Einstein rốt cuộc chẳng có liên quan gì tới điện học cả, và cho tới đây chúng ta biết rằng vật chất vốn dĩ có tính chất điện, và chúng ta đã thành công trong việc giải thích những tính chất điện nhất định dưới hình thức các hạt mang điện dương và âm linh động. Những hạt này có phải là nguyên tử không ? Hay chúng là những bộ phận của nguyên tử ? Các hạt đó có hoàn toàn tách khỏi nguyên tử ? Có lẽ thật là quá sớm nếu như cố gắng trả lời những câu hỏi này mà không có bằng chứng thuyết phục ủng hộ mô hình hạt tích điện của điện học.

Bằng chứng ủng hộ mạnh mẽ cho mô hình hạt tích điện đến từ một thí nghiệm trong năm 1911 do nhà vật lí Robert Millikan thực hiện ở trường đại học Chicago. Hãy xét một dòng giọt nước hoa hoặc chất lỏng khác cho thổi qua một lỗ đinh ghim nhỏ xíu. Các giọt đi ra từ lỗ phải nhỏ hơn lỗ và thực tế thì chúng còn vi mô hơn nữa, vì dòng xoáy của không khí có xu hướng làm tản loạn chúng ra. Millikan lập luận rằng những giọt đó cần một chút điện tích khi chúng cọ xát lên thành lỗ mà chúng đi qua, và nếu mô hình hạt tích

điện của điện học là đúng đắn, thì điện tích có thể tách vỡ trong số quá nhiều giọt chất lỏng nhỏ xíu nên một giọt có thể có lượng điện tích toàn phần thừa thải của một vài hạt tích điện – có lẽ là sự thừa thải của một hạt tích điện dương trên một giọt nhất định, hoặc sự thừa thải hai điện tích âm trên giọt khác.

f/ Nhà khoa học trẻ Robert Millikan



g/ Hình vẽ đơn giản hóa thiết bị của Millikan

Thiết bị khéo léo của Millikan, g, gồm hai bản kim loại, chúng có khả năng tích điện khi cần thiết. Ông phun một đám giọt dầu vào không gian giữa hai bản, và chọn một giọt qua kính hiển vi để nghiên cứu. Ban đầu, khi không có điện tích trên các bản, ông xác định khối lượng của giọt bằng cách cho nó rơi trong không khí và đo vận tốc giới hạn của nó, tức là vận tốc ở đó lực ma sát của không khí triệt tiêu lực hấp dẫn. Lực kéo theo của không khí tác dụng lên một quả cầu chuyển động chậm đã được tìm ra bằng thực nghiệm là bvr^2, trong đó b là một hằng số. Đặt lực toàn phần bằng không khi giọt chất lỏng rơi ở vận tốc giới hạn cho ta

$$bvr^2 - mg = 0$$

và đặt tỉ trọng đã biết của dầu bằng với khối lượng của giọt chất lỏng chia cho thể tích của nó cho ta phương trình thứ hai

$$\rho = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi r^3}$$

Mọi thứ trong những phương trình này có thể đo trực tiếp, ngoại trừ m và r, nên đây là hai phương trình hai ẩn, người ta có thể giải chúng để biết giọt chất lỏng lớn cỡ nào.

Sau đó, Millikan tích điện cho các bản kim loại, điều chỉnh lượng điện tích trung hòa chính xác với lực hấp dẫn và đẩy giọt chất lỏng nằm lơ lửng. Chẳng hạn, nếu giọt chất lỏng được làm cho có điện tích toàn phần là âm, thì điện tích dương đặt trên bản trên sẽ hút nó, kéo nó lên, và điện tích âm nằm trên bản dưới sẽ đẩy nó, nâng nó lên. (Về mặt lí thuyết chỉ cần một bản thôi, nhưng trên thực tế sự sắp xếp hai bản như thế này cho lực điện có độ lớn đều hơn trong toàn vùng không gian giọt chất lỏng rơi) Lượng điện tích trên hai bản cần thiết cho giọt dầu lơ lửng cho Millikan một cơ sở xác định lượng điện tích giọt chất lỏng mang. Điện tích giọt chất lỏng mang càng lớn, thì lực điện tác dụng lên nó sẽ càng mạnh, và thủ thuật là phải đặt điện tích trên các bản nhỏ thôi. Thật không may, việc biểu diễn mối quan hệ này bằng định luật Coulomb sẽ không thực tế, vì nó cần sự hiểu biết trọn vẹn về việc điện tích phân bố như thế nào trên mỗi bản, cùng với khả năng thực hiện phép

cộng vectơ của tất cả các lực tác dụng lên giọt chất lỏng bởi tất cả các điện tích trên bản. Thay vì vậy, Millikan sử dụng một cơ sở thực tế là lực điện mà một điện tích điểm chịu tại một điểm trong không gian tỉ lệ với điện tích của nó

$$\frac{F}{q} = const$$

Với lượng điện tích cho trước trên các bản, hằng số này có thể được xác định chẳng hạn bằng cách vứt bỏ giọt dầu đi, xen giữa hai bản một vật lớn hơn và dễ cầm nắm hơn có một điện tích đã biết trên nó, và đo lực với phương pháp thông thường. (Thật ra, Millikan sử dụng một bộ kĩ thuật hơi khác để xác định hằng số đó, nhưng ý tưởng cũng tương tự) Độ lớn của lực tác dụng lên giọt dầu thực tế phải bằng *mg*, vì lực chỉ vừa đủ để nâng bổng nó lên, và một khi hằng số định cỡ đã được xác định, thì điện tích của giọt chất lỏng khi đó có thể tìm ra được dựa trên khối lượng đã xác định trước đó của nó.

q (C)	q /(1.64 $\times 10^{-19}$ C)
-1.970×10^{-18}	-12.02
-0.987×10^{-18}	-6.02
-2.773×10^{-18}	-16.93

h/ Một vài số liệu thí nghiệm của Millikan

Bảng h cho một vài kết quả từ bài báo năm 1911 của Millikan. (Millikan xử lí dữ liệu trên cả những giọt tích điện âm và dương, nhưng trong bài báo của ông, ông chỉ mang ra ví dụ dữ liệu về những giọt tích điện âm, nên ở đây toàn là số âm) Chỉ cần liếc qua số liệu trên cũng thấy ngay rằng điện tích không đơn giản là một loạt số ngẫu nhiên. Chẳng hạn, điện tích thứ hai hầu như chính xác bằng phân nửa điện tích thứ nhất. Millikan giải thích điện tích quan sát được đều là bội số nguyên của một con số đơn giản, 1,64 x 10^{-19} C. Trong cột thứ hai, lấy điện tích chia cho hằng số này được kết quả về cơ bản là số nguyên, cho phép sai lệch ngẫu nhiên có mặt trong thí nghiệm. Millikan phát biểu trong bài báo của ông rằng những kết quả này là

> … bằng chứng trực tiếp và xác thực… của sự đúng đắn của quan điểm đã được cải tiến trong nhiều năm qua và được củng cố bởi bằng chứng từ nhiều nguồn cho thấy mọi điện tích, là những bội số chính xác của một điện tích cơ bản, hữu hạn, hay nói cách khác, một điện tích rải đều trên bề mặt tích điện có một cấu trúc dạng hạt hữu hạn, trên thực tế, gồm những hạt nhỏ, hay những nguyên tử điện, tất cả đều giống hệt nhau, rắc trên bề mặt của vật mang điện.

Nói cách khác, ông đã cung cấp bằng chứng trực tiếp cho mô hình hạt tích điện của điện học và bác bỏ những mô hình trong đó mô tả điện là một số loại chất lỏng. Điện tích cơ bản được kí hiệu là *e*, và giá trị hiện nay là 1,60 x 10^{-19} C. Từ "lượng tử hóa" được sử dụng trong vật lí để mô tả một đại lượng chỉ có thể có những giá trị số nhất định, và không thể có bất kì giá trị nào nằm giữa những giá trị đó. Theo cách hiểu này, chúng ta nói rằng Millikan đã phát hiện điện tích bị lượng tử hóa. Điện tích e thường được gọi là lượng tử điện tích.

♥ Tiền tệ có bị lượng tử hóa ? Lượng tử của tiền tệ là gì ?

Ghi chép lịch sử về trò gian lận của Millikan

Rất ít sách giáo khoa vật lí phổ thông đề cập đến thực tế rõ ràng rằng mặc dù những kết luận của Millikan là đúng đắn, nhưng ông là một kẻ gian lận khoa học. Kĩ thuật của ông khó và đòi hỏi phải thật cẩn thận khi thực hiện, và sổ sách ghi chép nguyên bản của ông, đến nay vẫn còn giữ

được, cho thấy số liệu kém hoàn hảo hơn nhiều so với như ông khẳng định trong những bài báo khoa học đã công bố của ông. Trong những ấn phẩm này, ông phát biểu thẳng thừng rằng mỗi giọt dầu quan sát có điện tích là một bội số của e, với không có ngoại lệ và sai sót nào. Nhưng sổ ghi chép của ông có thừa những ghi chú đại loại như "số liệu đẹp, giữ" và "tệ quá, bỏ đi". Sau đó, Millikan đã giành giải thưởng Nobel vật lí cho sự mô tả không trung thực về số liệu của ông.

Tại sao các tác giả sách giáo khoa quên không nói tới trò gian lận của Millikan ? Hình như họ nghĩ rằng học sinh, sinh viên còn quá ngây thơ để đánh giá chính xác ngụ ý của thực tế rằng đôi khi vẫn tồn tại những trò gian trá khoa học và thậm chí còn được trao giải thưởng của những tổ chức khoa học. Có lẽ họ e ngại sinh viên sẽ làm qua loa số liệu gian trá cho xong, vì Millikan đoạt giải Nobel cũng bằng cách đó mà. Nhưng xuyên tạc lịch sử không hơn gì là mỉa mai. Chẳng phải các thầy giáo người Anh đã cải biên bi bịch của Sheakspeare sao cho nhân vật xấu luôn luôn bị đối xử thậm tệ, còn nhân vật tốt thì chưa bao giờ bị đối xử như thế đó hay sao !

Một lời giải thích khả dĩ khác đơn giản là thiếu căn cứ; có khả năng là một số giáo trình có tiếng không muốn phê phán trò bịp của Millikan và những tác giả sau đó cũng xử sự như thế. Nhà sinh vật học Stephen Jay Gould đã viết một bài tiểu luận vạch ra một ví dụ chỉ rõ các tác giả sách giáo khoa sinh học có xu hướng đi theo cách xử lí truyền thống của một chủ đề, sử dụng cái cổ của con hươu cao cổ để bàn về tính không kế thừa của những đặc điểm cần thiết. Lúc ấy, một lời giải thích khác là các nhà khoa học có được địa vị từ hình ảnh trước công chúng của họ là những người tìm kiếm sự thật một cách vô tư, và họ không muốn công chúng nhận ra bản chất con người và không hoàn hảo của họ. (Chính Millikan là một nhà cải cách giáo dục, và ông đã viết một loạt sách giáo khoa có chất lượng cao hơn nhiều so với trước thời kì của ông).

Ghi chú thêm vào tháng 9/2002

Vài năm sau khi tôi viết câu chuyện lịch sử ngoài lề này, tôi đã bắt gặp một sự bênh vực lí thú cho Millikan từ phía David Goodstein (American Scientist, Jan-Feb 2001, trang 54-60). Goodstein biện hộ rằng mặc dù Millikan đã viết một câu dối trá trong bài báo của ông, nhưng Millikan không đáng trách là kẻ lừa dối khi ông đưa câu đó vào trong ngữ cảnh. Millikan phát biểu rằng ông chưa bao giờ vứt đi bất kì số liệu nào, và ông thật sự đã vứt bỏ số liệu, nhưng ông có lí do chính đáng, khách quan cho việc loại bỏ số liệu đó. Vấn đề Millikan có thể vẫn gây tranh cãi trong số các nhà sử học, nhưng ở đây tôi sẽ rút ra hai bài học:

- Tình tiết đó có thể làm giảm sự tín cẩn của chúng ta vào Millikan, nhưng nó làm tăng thêm niềm tin của chúng ta vào khoa học. Kết quả đúng đắn cuối cùng sẽ được công nhận, chứ không thể như trong lĩnh vực giả khoa học giống như y học.
- Trong khoa học, sự tùy tiện cũng tồi tệ như trò lừa bịp cờ gian bạc lận. Nếu khoa học biết đôi điều về sự thật tuyệt đối, thì nó sẽ không cần lí do gì để giải thích cả.

1.5 Electron

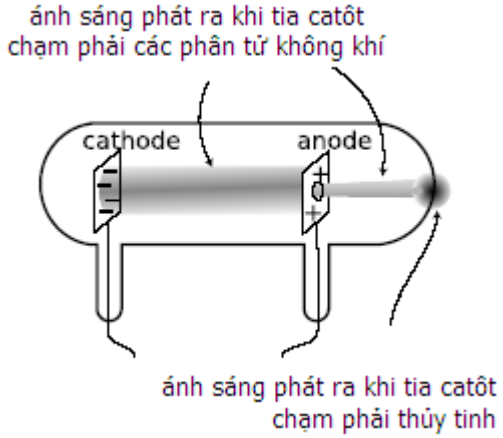
Tia catôt

Các nhà vật lí thế kỉ thứ 19 đã mất rất nhiều thời gian cố gắng đi tới những phương pháp lộn xộn, ngẫu nhiên nhằm nghiên cứu điện học. Những thí nghiệm tốt nhất thuộc loại này là những thí nghiệm tạo ra những tia lửa điện khổng lồ hay những màu sắc rực rỡ.

Một thủ thuật mang tính dịch vụ như thế là tia catôt. Để tạo ra nó, trước tiên bạn phải thuê một người thợ thổi thủy tinh giỏi và tìm một cái bơm chân không tốt. Thợ thổi thủy tinh sẽ chế tạo ra một cái ống rỗng ruột và gắn hai miếng kim loại trong nó, gọi là các điện cực, chúng được nối với bên ngoài thông qua dây kim loại xuyên qua thủy tinh. Trước khi để anh thợ hàn kín toàn bộ ống, bạn sẽ mắc vào nó một cái bơm chân không, và mất vài giờ bực dọc với cái tay bơm để tạo ra chân không tốt bên trong. Sau đó, khi lúc bạn vẫn còn đang bơm trên ống, người thợ thổi thủy tinh sẽ làm tan chảy thủy tinh và hàn kín toàn bộ lại. Cuối cùng, bạn đặt một lượng lớn điện tích dương lên một dây dẫn và một lượng lớn điện tích âm lên dây dẫn kia. Kim loại có tính chất là cho điện tích chuyển động dễ dàng trong chúng nên điện tích gởi lên một dây sẽ nhanh chóng tràn ra do từng phần của nó đẩy nhau ra xa. Quá trình dàn trải này làm cho hầu như toàn bộ điện tích đi tới đích ở các điện cực, ở đó có nhiều khoảng trống để dàn trải ra hơn so với trong dây dẫn. Vì những

lí do lịch sử không rõ lắm, điện cực âm được gọi là catôt và điện cực dương được gọi là anôt.

Hình i cho thấy dòng phát sáng quan sát được. Nếu, như biểu diễn trong hình này, một lỗ trống được tạo ra trong anôt, thì chùm tia sẽ kéo dài qua lỗ trống cho tới khi nó chạm phải thủy tinh. Tuy nhiên, khoan một lỗ trên catôt sẽ không gây ra bất kì chùm tia nào đi ra ở phía bên trái cả, và điều này cho thấy đối tượng, cho dù nó là cái gì đi nữa, có nguồn gốc từ catôt. Vì vậy, những tia này được đặt tên là "tia catôt" (Thuật ngữ đó vẫn được dùng cho đến ngày nay dưới cái tên "ống tia catôt" hoặc "CRT" cho ống phóng hình của ti vi hoặc màn hình máy vi tính).



i/ Tia catôt quan sát thấy trong ống chân không

Tia catôt là một dạng ánh sáng hay vật chất ?

Tia catôt là một dạng ánh sáng, hay vật chất ? Ban đầu, không ai thật sự quan tâm xem chúng là cái gì, nhưng khi tầm quan trọng khoa học của chúng ngày càng trở nên thấy rõ, thì vấn đề ánh sáng hay vật chất trở thành một cuộc tranh luận xuyên biên giới quốc gia, với người Đức thì tán thành chúng là ánh sáng, còn người Anh thì giữ quan điểm xem chúng là vật chất. Những người ủng hộ cách giải thích vật chất tưởng tượng tia catôt gồm một chùm nguyên tử bốc ra từ chất của catôt.

Một trong những đặc trưng hạn chế vật chất của chúng ta là đối tượng vật chất không thể truyền xuyên qua nhau. Thí nghiệm cho thấy tia catôt có khả năng đâm xuyên ít nhất là qua một số chiều dày vật chất nhỏ, ví dụ một lá kim loại dày một chục milimét, gợi ý rằng chúng là một dạng ánh sáng.

Tuy nhiên, những thí nghiệm khác hướng tới kết luận ngược lại. Ánh sáng là một hiện tượng sóng, và một tính chất đặc trưng của sóng được chứng minh bằng cách nói vào một đầu của một ống cuộn bằng giấy báo. Sóng âm không đi ra khỏi đầu kia của ống dưới dạng một chùm hội tụ. Thay vì vậy, chúng bắt đầu trải rộng ra theo mọi hướng ngay khi chúng ra khỏi ống. Điều này cho thấy sóng nhất thiết không phải truyền theo đường thẳng. Nếu đặt một lá kim loại hình ngôi sao hoặc hình chữ thập trên đường đi của tia catôt, thì sẽ xuất hiện "bóng" có hình tương tự trên thủy tinh, cho thấy tia catôt truyền theo đường thẳng. Chuyển động theo đường thẳng này gợi ý rằng tia catôt là một dòng hạt vật chất nhỏ xíu.

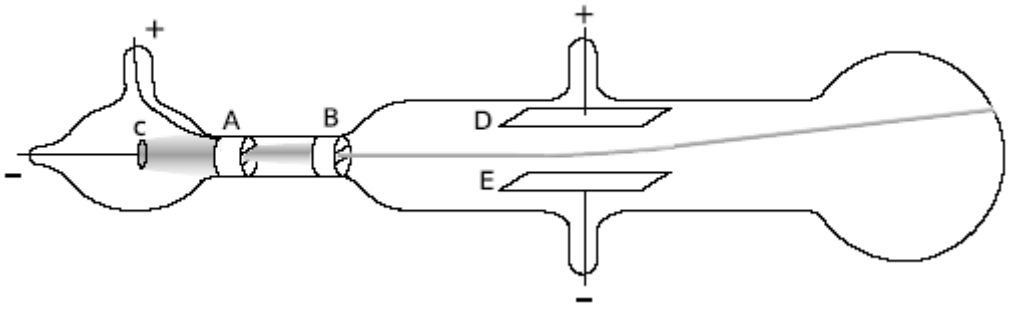
Những quan sát này không có sức thuyết phục, nên cái thật sự cần thiết là phải xác định xem tia catôt có khối lượng và trọng lượng hay không. Khó khăn là ở chỗ không thể thu tia catôt vào một cái tách rồi đưa lên bàn cân. Khi ống tia catôt hoạt động, người ta không thấy bất cứ sự mất mát vật chất nào từ catôt, hay bất kì lớp vỏ nào lắng trên anôt.

Không ai có thể nghĩ ra cách nào tối ưu để cân tia catôt, nên cách hiển nhiên nhất tiếp theo giải quyết cuộc tranh cãi ánh sáng/vật chất là kiểm tra xem tia catôt có điện tích hay không. Ánh sáng được biết là không tích điện. Nếu tia catôt mang điện tích thì chúng dứt khoát là vật chất và không phải là ánh sáng, và chúng có thể được làm cho nhảy qua kẽ hở bằng lực đẩy đồng thời của điện tích âm ở catôt và lực hút của điện tích dương ở anôt. Tia catôt sẽ đi vượt quá anôt vì xung lượng của chúng. (Mặc dù những hạt mang điện thông thường không nhảy qua được một khe chân không, nhưng có một lượng rất lớn điện tích được sử dụng, nên lực tác dụng mạnh một cách khác thường).

Thí nghiệm của Thomson

Nhà vật lí J.J Thomson ở Cambridge đã thực hiện một loạt thí nghiệm rõ ràng về tia catôt trong khoảng năm 1897. Bằng việc điều khiển chúng một cách nhẹ nhàng tất nhiên bằng lực điện, k, ông chỉ ra rằng chúng thật sự tích điện, đó là bằng chứng mạnh mẽ cho thấy chúng là vật chất. Không chỉ thế, ông còn chứng minh rằng chúng có khối lượng, và đo được tỉ số khối lượng trên điện tích của chúng, *m/q*. Vì khối lượng của chúng khác không, ông kết luận chúng là một dạng vật chất và có lẽ cấu thành từ một dòng hạt vi mô mang điện âm. Khi Millikan công bố kết quả nghiên cứu của ông 14 năm sau này, thật hợp lí khi cho rằng điện tích của một hạt như thế bằng với trừ điện tích cơ bản, $q = -e$, và kết hợp kết quả của Millikan và Thomson, người ta có thể xác định khối lượng của một hạt tia catôt.

j/ J.J Thomson trong phòng thí nghiệm



k/ Thí nghiệm của Thomson chứng tỏ tia catôt có điện tích (hình vẽ lấy từ bài báo gốc của ông). Catôt C và anôt A có mặt trong bất kì ống tia catôt nào. Tia catôt truyền qua một lỗ trên anôt và một lỗ thứ hai, B, đặt vào để làm cho chùm tia mỏng hơn loại bỏ các tia không đi thẳng. Các bản tích điện D và E cho thấy tia catôt có điện tích: chúng bị hút về phía bản dương D và bị đẩy ra xa bản âm E.

Kĩ thuật cơ bản xác định tỉ số *m/q* đơn giản là đo góc mà các bản tích điện làm lệch chùm tia. Lực điện tác dụng lên một hạt tia catôt trong khi nó nằm giữa các bản sẽ tỉ lệ với điện tích của nó

$$F_{điện} = (\text{hằng số đã biết}) \cdot q$$

Áp dụng định luật II Newton, $a = F/m$, sẽ cho phép xác định *m/q*

$$\frac{m}{q} = \frac{const}{a}$$

Đó chỉ là một sự nắm bắt ý tưởng. Thomson cần phải biết vận tốc của hạt tia catôt để tính ra gia tốc của nó. Tuy nhiên, vào lúc đó, không ai có thậm chí là một dự đoán tốc độ của tia catôt tạo ra trong một ống chân không cho trước. Chùm tia có vẻ băng qua ống chân không hầu như tức thời, cho nên việc đo thời gian của nó với một chiếc đồng hồ bấm giây không phải là vấn đề đơn giản !

Giải pháp khéo léo của Thomson là quan sát kết quả của cả lực điện và lực từ tác dụng lên chùm tia. Lực từ tác dụng bởi một nam châm nhất định sẽ phụ thuộc vào cả điện tích của tia catôt và tốc độ của nó

$$F_{từ} = (\text{hằng số đã biết \#2}).\ qv$$

Thomson làm việc với lực từ và lực điện cho tới khi mỗi lực tạo ra một kết quả bằng nhau trên chùm tia, cho phép ông tính được tốc độ

$$v = (\text{hằng số đã biết})/(\text{hằng số đã biết \#2})$$

Biết được tốc độ (vào cỡ 10% tốc độ ánh sáng trong cơ cấu thí nghiệm của ông), ông có thể tìm được gia tốc và do đó là tỉ số khối lượng trên thể tích, *m/q*. Kĩ thuật của Thomson tương đối thô sơ (và có lẽ độ lượng hơn, chúng ta có thể nói rằng chúng vẫn còn trong giai đoạn là sản phẩm nghệ thuật vào thời đó), nên với những phương pháp khác nhau, ông đi đến các giá trị *m/q* dao động trong khoảng hệ số 2, cả với tia catôt phát ra từ catôt cấu tạo từ một đơn chất. Giá trị tốt nhất hiện nay là $m/q = 5{,}69 \times 10^{-12}$ kg/C, phù hợp với giới hạn dưới của ngưỡng số liệu của Thomson.

Tia catôt là một hạt hạ nguyên tử: electron

Tuy nhiên, về thí nghiệm của Thomson, điều quan trọng không phải là giá trị bằng số thực tế của *m/q*, mà kết hợp với giá trị điện tích nguyên tố của Millikan, nó cho khối lượng của hạt tia catôt nhỏ hơn hàng ngàn lần khối lượng của cả những nguyên tử nhẹ nhất. Ngay cả khi không có kết quả của Millikan, phải chờ tới 14 năm sau đó mới có, Thomson đã công nhận tỉ số *m/q* đối với tia catôt nhỏ hơn hàng ngàn lần tỉ số *m/q* đo được đối với các nguyên tử tích điện trong dung dịch hóa học. Ông giải thích đúng đắn đây là bằng chứng cho thấy tia catôt là những viên gạch cấu trúc còn nhỏ hơn nữa – ông gọi chúng là *electron* – hình thành nên chính các nguyên tử. Đây là một khẳng định rất cấp tiến, được nêu ra vào lúc các nguyên tử chưa hề được chứng minh là tồn tại ! Cả những người sử dụng từ "nguyên tử" cũng thường xem chúng là sự trừu tượng hóa mang tính toán học nhiều hơn, chứ không phải là những đối tượng hiểu theo nghĩa đen. Ý tưởng tìm kiếm cấu trúc bên trong của các nguyên tử "không thể chia tách" bị một số người xem là điên rồ, nhưng trong vòng có 10 năm, quan niệm của Thomson đã được xác nhận đầy đủ bởi nhiều thí nghiệm chi tiết hơn.

Câu hỏi thảo luận

A. Thomson bắt đầu trở nên bị thuyết phục trong thí nghiệm của ông rằng "tia catôt" quan sát thấy phát ra từ catôt của ống chân không là những viên gạch cấu trúc của nguyên tử - cái mà ngày nay chúng ta gọi là electron. Sau đó, ông tiến hành quan sát với catôt làm bằng nhiều kim loại khác nhau, và nhận thấy tỉ số m/q hầu như bằng nhau trong mỗi trường hợp, có tính đến độ chính xác giới hạn của ông. Cho rằng là ông nghi ngờ, tại sao ông phải cố thử với nhiều kim loại khác nhau ? Làm thế nào giá trị thích hợp của m/q lại đóng vai trò kiểm tra cho giả thuyết của ông ?

B. Sinh viên của tôi hay thắc mắc tỉ số m/q mà Thomson đo là giá trị cho một electron, hay cho toàn bộ chùm tia. Bạn có thể trả lời câu hỏi này không ?

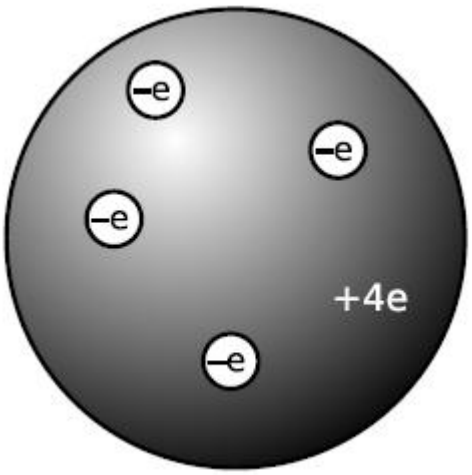
C. Thomson tìm thấy tỉ số m/q của một electron nhỏ hơn hàng ngàn lần tỉ số đó của các nguyên tử tích điện trong dung dịch hóa học. Đây có phải là gợi ý rằng electron có điện tích lớn hơn hay không ? Hay là chúng có khối lượng nhỏ hơn ? Có phải là không có cách nào nói như vậy ? Hãy giải thích. Lưu ý rằng kết quả của Millikan mãi nhiều năm nữa mới có, cho nên q chưa biết.

D. Bạn có thể dự đoán bất kì lí do thực tế nào lí giải tại sao Thomson không thể nào chỉ để cho một electron bay qua khe trước khi ngắt pin và tắt chùm tia, và rồi đo lượng điện tích bám trên anôt, như vậy cho phép ông đo được điện tích của một electron một cách trực tiếp ?

E. Tại sao không thể xác định chính m và q, thay cho tỉ số của chúng, bằng cách quan sát chuyển động của electron trong điện trường và từ trường ?

1.6 Mô hình bánh bông lan rắc nho của nguyên tử

Dựa trên thí nghiệm của ông, Thomson đề xuất một bức tranh của nguyên tử trở nên nổi tiếng là mẫu bánh bông lan rắc nho. Trong nguyên tử trung hòa, l, có 4 electron với điện tích tổng cộng -4e, nằm trong một hình cầu ("bánh bông lan") có điện tích +4e rải đều qua nó. Người ta đã biết rằng các phản ứng hóa học không thể biến đổi nguyên tố này thành nguyên tố khác, nên trong ngữ cảnh của Thomson, mỗi quả cầu bánh của nguyên tố có một bán kính, khối lượng, và điện tích dương cố định vĩnh cửu, khác với quả cầu bánh của nguyên tố khác. Tuy nhiên, các electron không phải là đặc điểm cố định của nguyên tử và có thể được nhận thêm hoặc lấy bớt để hình thành nên các ion tích điện. Ví dụ, mặc dù ngày nay chúng ta biết rằng nguyên tử trung hòa có bốn electron là nguyên tố beryllium, nhưng các nhà khoa học thời đó không biết có bao nhiêu electron có trong những nguyên tử trung hòa khác nhau.



l/ Mô hình bánh bông lan rắc nho của nguyên tử với bốn đơn vị điện tích, ngày nay chúng ta biết đây là beryllium.

Mô hình này rõ ràng là khác với mô hình mà bạn đã học ở trường phổ thông hoặc qua nền văn hóa cộng đồng của bạn, theo đó điện tích dương tập trung tại hạt nhân nhỏ xíu nằm ở chính giữa nguyên tử. Một thay đổi không kém phần quan trọng trong ý tưởng về nguyên tử là sự nhận thức rằng nguyên tử và những hạt hạ nguyên tử thành phần của nó xử sự hoàn toàn khác với các vật có kích thước hàng ngày. Chẳng hạn, chúng ta sẽ thấy trong phần sau rằng một electron có thể ở nhiều hơn một nơi tại một thời điểm. Mô hình bánh bông lan rắc nho là một phần của truyền thống lâu dài cố gắng tạo ra mô hình cơ giới của các hiện tượng, và Thomson cùng những người đương thời của ông chưa bao giờ đặt vấn đề sự thích đáng của việc xây dựng một mô hình nguyên tử như một cỗ máy với những bộ phận nhỏ bên trong nó. Ngày nay, mô hình cơ giới của nguyên tử vẫn được sử dụng (ví dụ như bộ lắp ráp mô hình phân tử kiểu đồ chơi mà Watson và Crick đã sử dụng để tìm hiểu cấu trúc xoắn kép của DNA), nhưng các nhà khoa học nhận thấy rằng các đối tượng vật chất chỉ là sự trợ giúp cho quá trình xử lí hình ảnh và biểu tượng của não nghĩ về các nguyên tử.

Mặc dù không có bằng chứng thực nghiệm rõ ràng nào cho nhiều chi tiết của mô hình bánh bông lan rắc nho, nhưng các nhà vật lí vẫn tiến lên và bắt đầu nghiên cứu những hàm ý của nó. Ví dụ, giả sử bạn có một nguyên tử 4 electron. Cả 4 electron sẽ đẩy lẫn

nhau, nhưng chúng cũng đều bị hút về phía tâm của quả cầu "bánh". Kết quả sẽ là một số dạng sắp xếp đối xứng, ổn định, trong đó tất cả các lực triệt tiêu lẫn nhau. Những người đủ khéo léo với toán học sớm thấy rằng các electron trong một nguyên tử 4 electron sẽ bố trí ở các đỉnh của một hình chóp theo kiểu kim tự tháp Ai Cập thu nhỏ, tức là một tứ diện đều. Suy luận này hóa ra sai lầm, vì nó dựa trên những đặc điểm không chính xác của mô hình đó, nhưng mô hình cũng có thành công nhất định, một vài thành công trong số đó chúng ta sẽ nói tới ngay bây giờ.

Ví dụ 3. Dòng điện tích trong dây dẫn

Một trong những học trò của tôi là con trai của một người thợ điện, và chính anh ta cũng trở thành một người thợ điện. Anh ta kể với tôi làm sao mà cha anh ta cả đời mình vẫn từ chối tin rằng các electron thật sự chảy qua dây dẫn. Nếu chúng chảy như vậy, ông giải thích, kim loại đó sẽ dần dần bị phá hủy, cuối cùng thì vỡ vụn ra thành bụi.

Quan điểm của ông không phải không có lí dựa trên thực tế là các electron là những hạt vật chất, và vật chất bình thường không thể truyền xuyên qua vật chất mà không tạo ra một lỗ trống trong đó. Các nhà vật lí thế kỉ thứ 19 sẽ chia sẻ quan điểm này với ông phản đối mô hình hạt tích điện của dòng điện tích. Tuy nhiên, trong mô hình bánh bông lan rắc nho, các electron có khối lượng rất thấp, và do đó có lẽ cũng có kích thước rất nhỏ. Không có gì ngạc nhiên khi chúng có thể chạy qua giữa các nguyên tử mà không làm phá hủy chúng.

Ví dụ 4. Dòng điện tích băng qua màng tế bào

Hệ thần kinh của bạn hoạt động trên cơ sở các tín hiệu mang bởi điện tích đi từ tế bào thần kinh này tới tế bào thần kinh khác. Cơ thể của bạn về cơ bản đều ở thể lỏng, và các nguyên tử trong một chất lỏng thì luôn linh động. Điều này có nghĩa là, không giống như trạng thái điện tích chạy trong dây dẫn rắn, toàn bộ các nguyên tử tích điện có thể chạy trong hệ thần kinh của bạn.

Ví dụ 5. Sự phát xạ electron trong ống tia catôt

Tại sao các electron tự bứt ra khỏi catôt của ống chân không ? Tất nhiên, chúng được khuyến khích làm như thế bởi lực đẩy của điện tích âm đặt trên catôt và lực hút từ phía lưới điện tích dương của anôt, nhưng những lực này không đủ mạnh để bứt các electron ra khỏi nguyên tử bằng lực chính – nếu chúng làm được, thì toàn bộ cơ cấu sẽ bốc hơi ngay tức thì vì mỗi nguyên tử đồng thời cũng bị xé toạc ra!

Mô hình bánh bông lan rắc nho đưa tới một lời giải thích đơn giản. Chúng ta biết rằng nhiệt là năng lượng của chuyển động ngẫu nhiên của các nguyên tử. Do đó, các nguyên tử trong bất kì vật nào cũng xô đẩy nhau một cách dữ dội mọi lúc, và một vài trong số những va chạm đó đủ mạnh để đánh bật electron ra khỏi nguyên tử. Nếu như điều này xảy ra ở gần bề mặt của một vật rắn, thì electron có lẽ có thể bị thất thoát. Tuy nhiên, bình thường thì sự thất thoát electron này là một quá trình tự hạn chế; sự mất electron để lại cho vật một điện tích tổng thể dương, nó sẽ hút chú cừu non đi lạc kia trở lại với gia đình. (Đối với các vật nằm trong không khí chứ không phải trong chân không, cũng sẽ có một sự trao đổi cân bằng của các electron giữa không khí và vật).

Cách hiểu này giải thích sự ấm lên và lóe sáng màu vàng thân thiện của ống chân không của chiếc radio cổ. Để khuyến khích sự phát xạ electron từ catôt của ống chân không, catôt được cố ý làm nóng lên bằng cuộn dây cấp nhiệt.

Câu hỏi thảo luận

A. Ngày nay, nhiều người định nghĩa ion là một nguyên tử (hay phân tử) bị mất electron hoặc nhận thêm electron. Hỏi làm thế nào người ta có thể định nghĩa từ "ion" trước khi khám phá ra electron ?

B. Vì nguyên tử trung hòa về điện được biết là tồn tại, nên phải có một chất liệu hạ nguyên tử tích điện dương để triệt tiêu với các electron tích điện âm trong nguyên tử. Dựa trên nền tảng kiến thức vừa mới biết sau những thí nghiệm của Millikan và Thomson, liệu có thể nào chất liệu tích điện dương đó có một lượng điện tích không bị lượng tử hóa hay không ? Nó có thể được lượng tử hóa bằng đơn vị +e hay không ? Hay bằng đơn vị +2e ? Bằng đơn vị +5/7e ?

Tóm tắt chương

Từ khóa chọn lọc

nguyên tử	đơn vị cơ bản của một nguyên tố hóa học
phân tử	một nhóm nguyên tử gắn chặt với nhau
lực điện	một trong những lực cơ bản của tự nhiên; một lực không tiếp xúc, có thể đẩy hoặc hút
điện tích …….	số đo mức độ mạnh mà một vật tham gia vào lực điện
ion …….	nguyên tử hay phân tử tích điện
tia catôt ……..	tia bí ẩn phát ra từ catôt trong ống chân không; Thomson chỉ ra rằng đó là một dòng hạt nhỏ hơn nguyên tử
electron ……..	tên do Thomson đặt cho hạt cấu thành nên tia catôt
Lượng tử hóa …….	mô tả số lượng ví dụ như tiền hoặc điện tích, chúng chỉ có thể tồn tại ở những lượng nhất định

Kí hiệu

q ..... điện tích

e ..... lượng tử điện tích

Tóm tắt

Mọi lực mà chúng ta gặp trong cuộc sống hàng ngày rút lại có hai loại cơ bản: lực hấp dẫn và lực điện. Một lực như lực ma sát hay "lực nhớt" phát sinh từ lực điện giữa từng nguyên tử với nhau.

Giống như việc chúng ta sử dụng từ "khối lượng" để mô tả mức độ mạnh mà một vật tham gia vào lực hấp dẫn, chúng ta dùng từ "điện tích" cho cường độ lực điện của nó. Có hai loại điện tích. Hai điện tích cùng loại đẩy nhau ra, nhưng những vật có điện tích khác nhau thì hút nhau lại. Điện tích được đo bằng đơn vị coulomb (C).

Mô hình hạt mang điện linh động: Rất nhiều hiện tượng có thể hiểu dễ dàng nếu chúng ta tưởng tượng vật chất gồm hai loại hạt tích điện, ít nhất thì chúng cũng

có phần nào đó chuyển động ra xung quanh.

Điện tích dương và điện tích âm: Những vật bình thường không bị làm cho nhiễm điện có cả hai loại điện tích trải đều đặn trong chúng với số lượng bằng nhau. Khi đó, vật không có xu hướng tác dụng lực điện lên bất kì vật nào khác, vì bất kì lực hút nào do một loại điện tích sẽ cân bằng với lực đẩy từ loại điện tích kia. (Chúng ta nói "có xu hướng không" bởi vì mang vật đó đến gần một vật có lượng điện tích không cân bằng có thể làm cho điện tích của nó tách ra xa nhau và lực sẽ không còn triệt tiêu do khoảng cách không bằng nhau). Do đó, người ta mô tả hai loại điện tích bằng kí hiệu dương và âm, cho nên một vật không nhiễm điện sẽ có điện tích *toàn phần* bằng không.

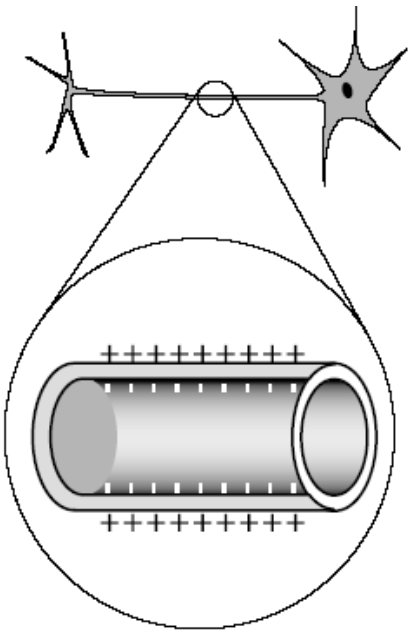
Định luật Coulomb phát biểu rằng độ lớn của lực điện giữa hai hạt mang điện được cho bởi biểu thức $|F| = k\,|q_1||q_2|/r^2$.

Bảo toàn điện tích: Một lí do còn cơ bản hơn nữa cho việc sử dụng kí hiệu dương và âm cho điện tích là với định nghĩa này, điện tích toàn phần của một hệ cô lập là một đại lượng được bảo toàn.

Lượng tử hóa điện tích: Thí nghiệm giọt dầu của Millikan cho thấy điện tích toàn phần của một vật chỉ có thể là bội số nguyên của một đơn vị cơ bản của điện tích (e). Kết quả này củng cố cho ý tưởng cho rằng "dòng" điện tích là chuyển động của những hạt nhỏ xíu chứ không phải chuyển động của một số loại chất lỏng điện bí ẩn.

Phân tích của Einstein về chuyển động Brown là bằng chứng dứt khoát đầu tiên cho sự tồn tại của nguyên tử. Thí nghiệm của Thomson với ống chân không chứng minh sự tồn tại của một loại hạt vi mô mới có tỉ số khối lượng trên điện tích rất nhỏ. Thomson nhận thức một cách đúng đắn đây là những viên gạch cấu trúc của vật chất còn nhỏ hơn cả nguyên tử: đó là khám phá đầu tiên ra một hạt hạ nguyên tử. Những hạt này được gọi là electron.

Bằng chứng thực nghiệm trên đây đã đưa tới mô hình hữu ích đầu tiên của cấu trúc bên trong của nguyên tử, gọi là mô hình bánh bông lan rắc nho. Theo mô hình bánh bông lan rắc nho, quả cầu tích điện dương có một số nhất định các electron tích điện âm ấn vào nó.



Bài toán 1. Hình trên: Hình ảnh thực của một neuron. Hình dưới: Hình vẽ đơn giản hóa một đoạn của sợi trục (axon).

Bài tập

1. Hình bên là một neuron, một loại tế bào cấu tạo nên hệ thần kinh của bạn. Neuron đảm nhận việc chuyển tải thông tin cảm giác lên não, và truyền lệnh từ não đến các cơ. Tất cả những dữ liệu này được truyền bằng điện, nhưng ngay cả khi tế bào nằm nghỉ và không truyền bất kì thông tin nào, vẫn có một lớp điện tích âm ở bên trong màng tế bào, và một lớp điện tích dương nằm ngay bên ngoài nó. Điện tích này ở dưới dạng ion hòa tan trong chất lỏng bên trong và bên ngoài tế bào. Tại sao điện tích âm đó vẫn dính vào bên trong của màng tế bào, và tương tự, tại sao điện tích dương đó không tản mạn ra khỏi mặt bên ngoài của tế bào ?

2. Hãy sử dụng thông tin dinh dưỡng trên một số thực phẩm đóng gói thực hiện một ước tính bậc độ lớn của lượng năng lượng hóa học trữ trong một nguyên tử thực phẩm, bằng đơn vị joule (J). Giả sử một nguyên tử tiêu biểu có khối lượng 10^{-26} kg. Từ đó thiết lập một ước tính thô lượng năng lượng có trên quy mô nguyên tử. (Chú ý rằng cal trên bao bì thực phẩm thật ra là kcal).

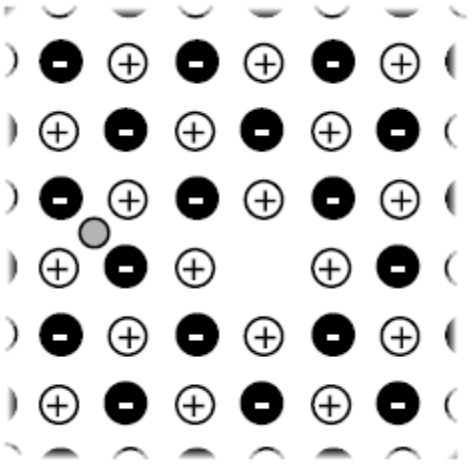
3. (a) Nhắc lại năng lượng hấp dẫn của hai quả cầu tương tác hấp dẫn được cho bởi $PE = - Gm_1m_2/r$, trong đó r khoảng cách tâm-nối-tâm của hai vật. Phương trình tương tự cho hai quả cầu tương tác điện sẽ là gì ? Giải thích việc bạn chọn dấu cộng hay dấu trừ, hãy xét lực hút và lực đẩy.

(b) Sử dụng biểu thức này ước tính năng lượng cần thiết để xé toạc một nguyên tử bánh bông lan rắc nho thuộc loại một electron, giả sử nó có bán kính 10^{-10} m.

(c) So sánh kết quả này với kết quả của bài toán 2.

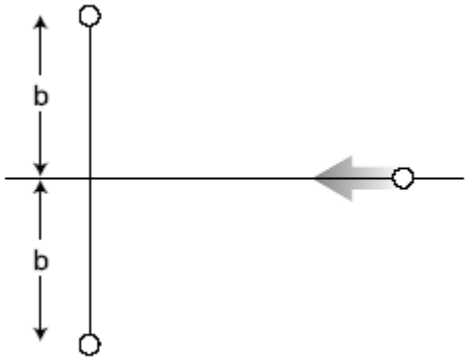
4. Một đèn neon gồm một ống thủy tinh dài chứa đầy neon, với nắp kim loại ở hai đầu. Điện tích dương được đặt ở một đầu của ống, và điện tích âm nằm ở đầu kia. Lực điện phát sinh có thể đủ mạnh, bứt electron ra khỏi một số nguyên tử neon nhất định. Giả sử cho đơn giản rằng chỉ một electron bị bứt ra khỏi một nguyên tử neon. Khi một electron bị bứt ra khỏi một nguyên tử, cả electron và nguyên tử neon (lúc này là ion) đều có điện tích và chúng được gia tốc bởi lực tác dụng bởi hai đầu tích điện của ống. (Chúng không nhận ra được bất kì lực nào đáng kể từ phía những ion và electron khác bên trong ống, vì chỉ có một phần thiểu số rất nhỏ nguyên tử neon bị ion hóa). Cuối cùng ánh sáng được tạo ra khi các ion hợp nhất trở lại với các electron. Hãy cho một so sánh bằng số về độ lớn và hướng của gia tốc của electron và ion.

5. Nếu bạn đặt hai nguyên tử hydrogen gần nhau, chúng sẽ cảm nhận một lực hút, và chúng sẽ hút nhau hình thành nên một phân tử. (Phân tử gồm hai nguyên tử hydrogen là dạng bình thường của khí hydrogen). Tại sao chúng lại cảm thấy một lực hút khi chúng ở gần nhau, vì chúng đều trung hòa về điện ? Có phải lực hút và lực đẩy không triệt tiêu nhau hoàn toàn ? Sử dụng mô hình bánh bông lan rắc nho (Học trò có học hóa thường cố gắng sử dụng những mô hình khác lạ để giải thích hiện tượng này, nhưng nếu bạn không thể giải thích nó bằng một mô hình đơn giản, có thể là bạn cũng chẳng hiểu gì mô hình khác lạ đó mặc dù bạn tưởng rằng mình đã hiểu!).



6. Hình bên biểu diễn một lớp cấu trúc ba chiều của tinh thể muối ăn. Các nguyên tử mở rộng ra xa hơn nhiều theo mọi hướng, nhưng ở đây chỉ biểu diễn một hình vuông 6 x 6. Các vòng tròn lớn là ion chlorine, chúng có điện tích – e. Các vòng tròn nhỏ hơn là ion natri, với điện tích + e. Khoảng cách tâm-nối-tâm giữa những ion lân cận là khoảng 0,3 nm. Những tinh thể thật không bao giờ hoàn hảo, và tinh thể biểu diễn ở đây có hai sai hỏng: một nguyên tử bị thiếu ở một nơi, và một nguyên tử lithium, vẽ bằng vòng tròn màu xám, xen vào một trong những lỗ trống. Nếu nguyên tử lithium đó có điện tích + e, thì đâu là hướng và độ lớn của lực tổng hợp tác dụng lên nó ? Giả sử không có sai hỏng nào khác ở gần đó bên trong tinh thể ngoài hai sai hỏng đã nêu rõ ở đây. (Gợi ý: Lực tác dụng lên ion lithium đó là tổng vectơ của tất cả các lực của hàng nghìn triệu triệu nguyên tử natri và chlorine, chúng rõ ràng là quá khó tính được. Tuy nhiên, hầu như tất cả những lực này đều bị triệt tiêu bởi một lực do một ion ở phía đối diện của nguyên tử lithium tác dụng).

7. Trái Đất và Mặt Trăng liên kết với nhau bằng lực hấp dẫn. Để thay thế, nếu lực hút đó là kết quả của mỗi vật có điện tích cùng độ lớn nhưng trái dấu nhau, hãy tìm lượng điện tích phải đặt trên mỗi vật đó để có lực hút cần thiết.



8. Trong trận bán kết vòng thi đấu bóng vô tĩnh điện, Jessica bắt quả bóng tích điện dương của cô ta, ném nó đi qua sân chơi, lăn sang phía bên trái dọc theo trục *x*. Nó bị đẩy bởi hai điện tích dương khác. Hai điện tích bằng nhau này nằm cố định trên trục *y* ở khoảng cách cho trong hình vẽ. (a) Hãy biểu diễn lực tác dụng lên quả bóng theo vị trí *x* của quả bóng. (b) Hỏi ở giá trị nào của *x* quả bóng chịu sự giảm tốc lớn

nhất ? Biểu diễn câu trả lời của bạn theo b (Trích từ một bài toán của Halliday và Resnick).

a/ Marie và Pierre Curie là những người đầu tiên tinh chế radium với số lượng lớn. Tính phóng xạ mạnh của radium cho phép thực hiện được những thí nghiệm đưa đến mẫu hành tinh nguyên tử hiện đại, trong đó các electron quay tròn xung quanh hạt nhân cấu thành từ proton và neutron.

Chương 2
HẠT NHÂN

2.1 Sự phóng xạ

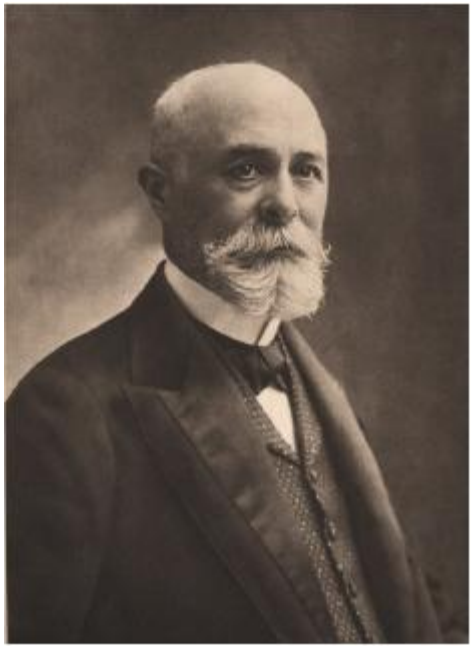
Becquerel khám phá ra hiện tượng phóng xạ

Làm thế nào các nhà vật lí luận ra được mô hình bánh bông lan rắc nho là không chính xác, và điện tích dương của nguyên tử tập trung trong một hạt nhân nhỏ xíu, ở chính giữa ? Câu chuyện bắt đầu với việc nhà hóa học người Pháp Becquerel phát hiện ra hiện tượng phóng xạ. Mãi cho đến khi khám phá ra sự phóng xạ, tất cả mọi quá trình của tự nhiên đều được cho là có nguyên nhân từ các phản ứng hóa học, chúng là sự sắp xếp lại những kết hợp khác nhau của các nguyên tử. Nguyên tử tác dụng lực lên nhau khi chúng ở gần nhau, nên việc gắn kết hoặc không gắn kết chúng sẽ giải phóng hoặc dự trữ năng lượng điện. Năng lượng đó có thể chuyển hóa thành dạng khác hoặc chuyển hóa từ dạng khác thành, lúc cây xanh sử dụng nó trong ánh sáng Mặt Trời tạo ra đường và carbohydrate, hay khi một đứa trẻ nhỏ ăn đường, giải phóng năng lượng dưới dạng động năng.

Becquerel đã phát hiện ra một quá trình có vẻ giải phóng năng lượng từ một nguồn mới không biết không có bản chất hóa học. Becquerel, người có cha và ông nội là những nhà vật lí, đã trải qua hai chục năm đầu của quãng đời nghiên cứu chuyên nghiệp của ông là một kĩ sư công dân thành công, giảng dạy vật lí học bán thời gian. Ông được trao ghế chủ nhiệm bộ môn vật lí ở trường Musée d'Histoire Naturelle tại Paris sau khi cha ông qua đời, trước đó ông ta giữ ghế đó. Giờ thì ông đã có nhiều thời gian dành cho vật lí học, ông bắt đầu nghiên cứu tương tác của ánh sáng và vật chất. Ông trở nên hứng thú với hiện tượng lân quang, trong đó một chất hấp thụ năng lượng từ ánh sáng, rồi giải phóng năng lượng qua một ánh sáng rực rỡ chỉ tắt đi từ từ. Một trong những chất mà ông nghiên cứu là hợp chất của uranium, muối $UKSO_5$. Một ngày vào năm 1896, bầu trời kéo đầy mây đã làm hỏng kế hoạch của ông phơi chất này dưới ánh sáng Mặt Trời để quan sát sự huỳnh quang của nó. Ông cho nó vào một ngăn kéo, ngẫu nhiên nằm trên một bản phim trắng –

kiểu phim chụp cũ mặt sau là thủy tinh. Bản phim đó được bọc lại cẩn thận, nhưng vài ngày sau khi Becquerel kiểm tra nó trong một căn phòng tối trước khi mang ra sử dụng, ông thấy nó đã bị hỏng, cứ như thể nó đã bị phơi ra hoàn toàn trước ánh sáng.

Lịch sử mang lại nhiều ví dụ về những khám phá khoa học xảy ra như thế này: một trí tuệ cảnh giác và tò mò quyết định nghiên cứu một hiện tượng mà đa số người ta không ai nghi ngại việc giải thích nó. Ban đầu Becquerel xác định bằng cách làm thêm thí nghiệm mà hiệu ứng đó được tạo ra bởi muối uranium, bất chấp lớp giấy dày bọc bản phim đã chặn hết mọi ánh sáng. Ông thử với nhiều loại hợp chất và nhận thấy chỉ có muối uranium làm được như vậy: hiệu ứng xảy ra với bất kì hợp chất uranium nào, nhưng không xảy ra với bất kì hợp chất nào không chứa các nguyên tử uranium. Hiệu ứng đó ít nhất thì cũng bị chặn lại một phần bởi một tấm kim loại đủ dày, và ông có thể tạo ra bóng của đồng tiền bằng cách đặt chúng vào giữa uranium và tấm phim. Điều này cho thấy hiệu ứng đó truyền đi theo đường thẳng, cho nên nó phải là một loại tia nào đó chứ không phải sự rò rỉ hóa chất qua tấm giấy. Ông đã dùng từ "phát xạ", vì hiệu ứng đó phát ra từ muối uranium.



b/ Henri Becquerel (1852 – 1908)

c/ Tấm phim của Becquerel. Trong sự phơi sáng ở phía dưới hình, ông nhận thấy ông có thể làm hấp thụ bức xạ, bắt bóng của một chữ thập xứ Maltese đặt giữa tấm phim và muối uranium.

Ở đây, Becquerel vẫn tin rằng các nguyên tử uranium đang hấp thụ năng lượng từ ánh sáng và rồi giải phóng từ từ năng lượng đó dưới dạng những tia bí ẩn, và đây là cách thức mà ông đã đưa hiện tượng vào trong bài thuyết trình công bố đầu tiên của ông mô tả những thí nghiệm của ông. Thật hấp dẫn, nhưng không làm đảo lộn mọi thứ. Nhưng sau đó, khi ông thử xác định thời gian cần thiết cho uranium sử dụng hết năng lượng được cho là dự trữ trong nó bởi ánh sáng, ông nhận thấy nó chưa bao giờ có vẻ nào yếu đi, cho dù là ông có đợi cho tới bao lâu đi nữa. Không chỉ thế, một mẫu vật được đem ra phơi ánh sáng Mặt Trời mạnh trong suốt cả buổi chiều cũng không mạnh hay kém hoạt tính hơn một mẫu vật luôn luôn giữ ở trong nhà. Đây là có phải là một sự vi phạm nguyên lí bảo toàn năng lượng ? Nếu năng lượng không đến từ sự phơi sáng, thì nó có nguồn gốc từ đâu ?

Ba loại "phát xạ"

Không thể xác định trực tiếp nguồn gốc của năng lượng đó, thay vì vậy, các nhà vật lí cuối thế kỉ 19 nghiên cứu hành vi của các "phát xạ" một khi chúng được phát ra. Becquerel chỉ ra rằng phóng xạ có thể đâm xuyên qua vải vóc và giấy, nên việc hiển nhiên trước tiên phải thực hiện là nghiên cứu chi tiết hơn chiều dày của chất mà phóng xạ có thể xuyên qua. Họ sớm nhận ra rằng một phần nhất định của cường độ phóng xạ sẽ bị loại trừ

ngay cả bởi một vài inch không khí, nhưng phần còn lại không bị loại mất khi truyền đi quãng không khí dài hơn. Như vậy, rõ ràng phóng xạ là hỗn hợp của hơn một loại, trong đó một loại bị chặn lại bởi không khí. Sau đó, họ nhận thấy trong số phần có thể đi xuyên qua không khí, một lượng nữa có thể bị loại mất bằng một mảnh giấy hay một lá kim loại rất mỏng. Tuy nhiên, cái còn lại sau đó, là loại thứ ba, loại đâm xuyên cực mạnh, một số trong đó sẽ vẫn còn sau khi xuyên qua một bức tường gạch. Họ kết luận điều này cho thấy có ba loại phóng xạ, và không hề có chút ý tưởng mờ nhạt nào xem thật ra chúng là thứ gì, họ đã đặt tên cho chúng. Loại đâm xuyên ít nhất được gọi tùy tiện là α (alpha), kí tự thứ nhất của bảng chữ cái Hi Lạp, và cứ thế đến β (beta), cuối cùng là γ (gamma) cho loại đâm xuyên mạnh nhất.

Radium: một nguồn phóng xạ còn mạnh hơn nữa

Những dụng cụ đo dùng để phát hiện phóng xạ thật thô sơ: các tấm phim hay thậm chí là mắt người (phóng xạ gây ra lóe sáng trong thủy dịch bên trong mắt người, nó có thể nhìn thấy nếu như ở trong phòng rất tối). Vì phương pháp phát hiện phóng xạ quá thô sơ và không nhạy, nên những tiến bộ khác bị cản trở bởi thực tế lượng phóng xạ phát ra bởi uranium không thật sự rất lớn. Đóng góp mang tính sống còn của nhà vật lí/hóa học Marie Curie và chồng bà là Pierre là khám phá ra nguyên tố radium, và tinh chế và tách được một lượng đáng kể chất đó. Radium phát ra nhiều phóng xạ hơn uranium khoảng một triệu lần trên đơn vị khối lượng, mang lại khả năng thực hiện những thí nghiệm cần thiết để tìm hiểu bản chất thật sự của phóng xạ. Sự nguy hiểm của phóng xạ đối với sức khỏe con người lúc ấy chưa được biết tới, và Marie đã chết vì bệnh bạch cầu 30 năm sau đó. (Pierre thì qua đời vì một vụ tai nạn).

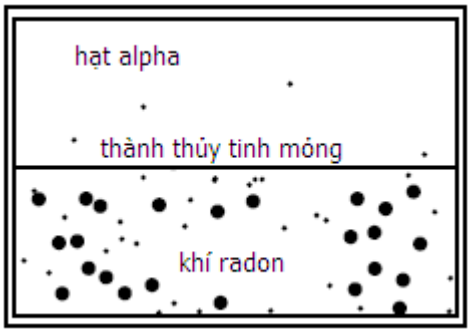
Lần theo bản chất của tia alpha, beta và gamma

Khi radium trở nên sẵn dùng, một nhà khoa học tập sự tên là Ernest Rutherford đã rời quê hương New Zealand đến Anh và bắt đầu nghiên cứu phóng xạ tại Phòng thí nghiệm Cavendish. Thành công đầu tiên của chàng trai xứ thuộc địa là đo được tỉ số khối lượng trên điện tích của tia beta. Kĩ thuật đó về cơ bản giống như kĩ thuật Thomson đã dùng để đo tỉ số khối lượng trên điện tích của tia catôt, bằng cách đo sự lệch của chúng trong điện trường và từ trường. Sự khác biệt duy nhất là ở chỗ thay catôt của ống chân không bằng một cục radium để cung cấp tia beta. Không chỉ kĩ thuật sử dụng tương tự nhau, mà kết quả thu được cùng giống nhau. Tia beta có cùng tỉ số *m/q* như tia catôt, cho thấy chúng là một loại và đồng nhất. Ngày nay, để hiểu đơn giản, người ta dùng từ "electron", và tránh dùng những từ cổ xưa như "tia catôt" và "hạt beta", nhưng những tên gọi cũ vẫn được sử dụng rộng rãi, và điều cần thiết không hay cho học sinh vật lí là phải ghi nhớ cả ba tên này là chỉ cùng một thứ.

Ban đầu, có vẻ là tia alpha hay gamma đều không bị lệch trong điện trường hoặc từ trường, khiến có vẻ như chúng đều không tích điện. Nhưng Rutherford sớm có được một nam châm mạnh hơn nhiều, và ông có thể dùng nó làm lệch tia alpha, nhưng không làm lệch được tia gamma. Tia alpha có giá trị *m/q* lớn hơn nhiều so với tia beta (khoảng 4000 lần), đấy là lí do tại sao chúng khó bị lệch hướng. Tia gamma không tích điện, và sau này được nhận ra là một dạng của ánh sáng.

Tỉ số m/q của hạt alpha hóa ra bằng với tỉ số này của hai loại ion khác, He^{++} (một nguyên tử helium mất đi hai electron) và H_2^+ (hai nguyên tử hydrogen liên kết thành một phân tử và bị mất một electron), nên hình như chúng chỉ là một hay là cái gì đó tương tự. Hình dưới đây biểu diễn một mẫu đơn giản hóa của thí nghiệm khéo léo của Rutherford chứng tỏ chúng là ion He^{++}. Nguyên tố ở thể khí radon, một nguồn phát hạt alpha, được đưa vào một nửa của một buồng thủy tinh đôi. Thành thủy tinh chia buồng ra làm hai được chế tạo cực kì mỏng, nên một số hạt alpha chuyển động nhanh có thể đi xuyên qua nó.

Buồng phía bên kia, ban đầu được hút chân không, từ từ bắt đầu tích góp số hạt alpha (chúng sẽ nhanh chóng bắt lấy electron từ môi trường xung quanh và trở nên trung hòa về điện). Sau đó, Rutherford xác định được có mặt khí helium trong buồng thứ hai. Như vậy, hạt alpha được chứng minh là ion He^{++}. Hạt nhân khi ấy vẫn chưa được khám phá, nhưng trong thuật ngữ hiện đại, chúng ta mô tả ion He^{++} là hạt nhân của nguyên tử helium.



d/ Hình vẽ đơn giản hóa thí nghiệm năm 1908 của Rutherford, cho thấy hạt alpha là nguyên tử helium bị ion hóa hai lần.

e/ Những viên nhiên liệu uranium này sẽ được chèn vào thanh nhiên liệu kim loại dùng trong lò phản ứng hạt nhân. Các viên nhiên liệu đó phát ra bức xạ alpha và beta mà chiếc bao tay đủ dày chặn lại được.

Tóm lại, ở đây có ba loại bức xạ phát ra bởi các nguyên tố phóng xạ, và mô tả của chúng như sau:

hạt α	dừng lại bởi vài inch không khí	hạt nhân He
hạt β	dừng lại bởi một tấm giấy	electron
tia γ	đâm xuyên qua tấm chắn dày	một dạng ánh sáng

Câu hỏi thảo luận

A. Đa số nguồn phóng xạ phát ra tia alpha, beta và gamma, chứ không phải một trong ba loại. Trong thí nghiệm radon, làm thế nào Rutherford biết được là ông đang nghiên cứu tia alpha ?

2.2 Mẫu hành tinh nguyên tử

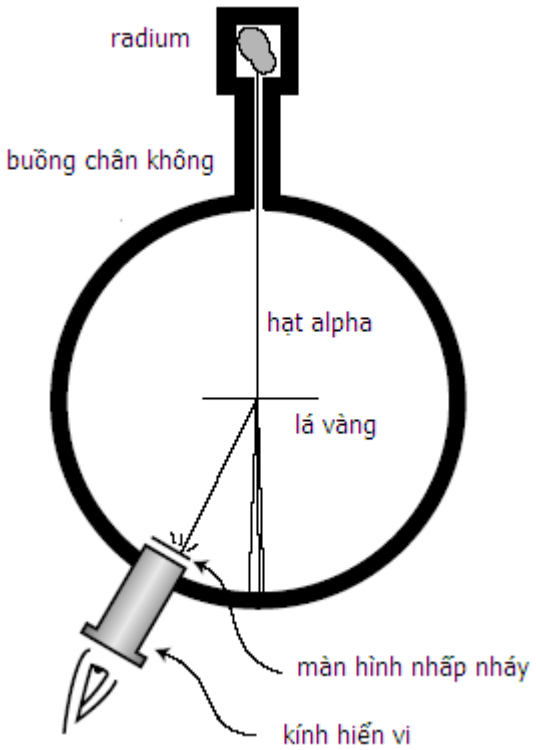
Tình huống lúc này dẫn đến khám phá không mong đợi là phần tích điện dương của nguyên tử là một cục nhỏ xíu, đậm đặc, nằm ở chính giữa nguyên tử chứ không phải là "bột bánh" trong mô hình bánh bông lan rắc nho. Vào năm 1909, Rutherford là một giáo sư mới được phong, và có sinh viên làm việc dưới sự hướng dẫn của ông. Đối với chàng sinh viên non nớt tên là Marsden, anh ta đã chọn một dự án nghiên cứu vốn được xem là chán ngắt nhưng dễ thực hiện.

Lúc này, mặc dù người ta biết rằng hạt alpha sẽ bị dừng lại bởi một tấm giấy, nhưng chúng có thể xuyên qua một lá kim loại đủ mỏng. Marsden nghiên cứu với lá vàng chỉ dày 1000 nguyên tử. (Lá vàng đó có thể chế tạo bằng cách cho bốc hơi một ít vàng trong buồng chân không sao cho một lớp mỏng vàng sẽ lắng trên một bản kính thủy tinh hiển vi. Sau đó, lá vàng được tách khỏi bản kính bằng cách dìm bản kính vào trong nước).

Rutherford vừa xác định được trong những thí nghiệm trước đó của ông về tốc độ của hạt alpha do radium phát ra, một tốc độ vô cùng lớn: $1{,}5 \times 10^7$ m/s. Những người thí nghiệm trong nhóm làm việc của Rutherford hình dung chúng là những quả đại bác rất nhỏ, rất nhanh đâm xuyên qua phần "bột bánh" của nguyên tử vàng to lớn. Một mảnh giấy có bề dày cỡ một trăm ngàn nguyên tử hay ngần ấy sẽ đủ để làm dừng chúng hoàn toàn,

nhưng việc đâm qua một lớp dày 1000 nguyên tử cũng chỉ làm chúng chậm đi chút ít và làm chúng hơi lệch khỏi đường đi ban đầu của mình.

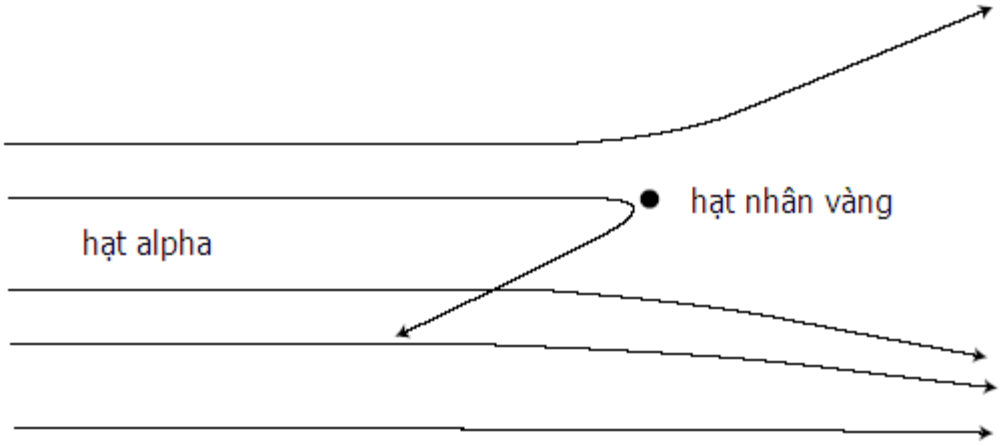
f/ Ernest Rutherford (1871 – 1937)



g/ Thiết bị thí nghiệm của Marsden và Rutherford

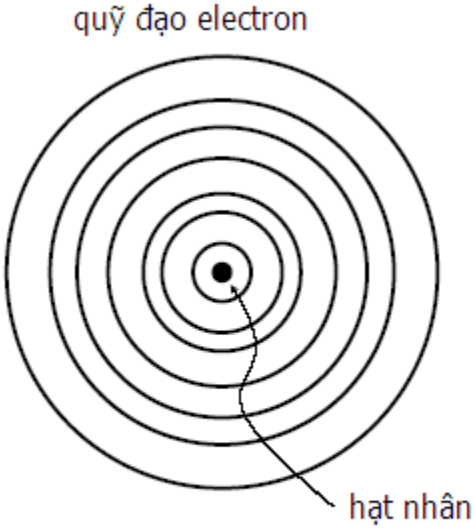
Nhiệm vụ được cho là chán ngắt của Marsden là sử dụng thiết bị trong hình g/ đo xem bao lâu thì những hạt alpha lại bị lệch ở những góc khác nhau. Một cục radium nhỏ xíu nằm trong hộp phát ra hạt alpha, và một chùm hạt mỏng được tạo ra bằng cách chặn lại hết hạt alpha, trừ những hạt xuất hiện đi thẳng qua ống. Thường thì bị lệch ở lá vàng chỉ một chút ít, nên chúng sẽ đi tới màn hình rất giống với màn hình của ống đèn hình ti vi, chúng sẽ gây ra lóe sáng khi chạm lên đó. Đây là ví dụ đầu tiên mà chúng ta bắt gặp của một thí nghiệm trong đó một chùm hạt là đối tượng bị phát hiện tại một thời điểm. Có thể thực hiện được điều này vì mỗi hạt alpha mang quá nhiều động năng, nên chúng chuyển động ở khoảng chừng tốc độ như các electron trong thí nghiệm của Thomson, nhưng chúng có khối lượng lớn hơn chục ngàn lần.

Marsden ngồi trong phòng tối, theo dõi thiết bị từ giờ này sang giờ khác và ghi lại số lóe sáng trên màn hình di chuyển sang những góc khác nhau. Tốc độ lóe sáng là cao nhất khi ông đặt màn hình ở góc gần với đường đi thẳng ban đầu của hạt alpha, nhưng nếu ông dõi theo một vùng nằm ngoài bản kính, thỉnh thoảng ông cũng nhìn thấy một hạt alpha bị lệch ở một góc lớn. Sau khi nhìn thấy một vài hạt như thế này, ông đi đến một ý tưởng điên rồ là di chuyển màn hình sang nhìn nếu những góc lớn hơn nữa cũng xuất hiện hạt alpha, có lẽ cả những góc lớn hơn 90 độ.



h/ Hạt alpha bị tán xạ bởi một hạt nhân vàng. Ở quy mô này, nguyên tử vàng có kích thước của một chiếc xe hơi, vì thế tất cả các hạt alpha biểu diễn trong hình đều tiến gần một cách khác thường đến hạt nhân vàng. Đối với những hạt alpha khác thường này, lực điện do các electron tác dụng là không quan trọng, vì chúng nằm xa hơn hạt nhân rất nhiều.

Ý tưởng điên rồ đó có tác dụng: một vài hạt alpha bị lệch ở góc lên tới 180 độ, và thí nghiệm bình thường trở thành thí nghiệm mang tính lịch sử. Rutherford nói "Chúng tôi có thể thu được một số hạt alpha dội ngược trở lại. Nó hầu như không thể tin được, như thể bạn bắn một quả đạn 15 inch lên một miếng giấy và nó bay trở lại và chạm vào bạn". Khó có lời giải thích nào theo như mô hình bánh bông lan rắc nho. Lực điện mạnh mẽ nào đã có thể làm cho một số hạt alpha, đang chuyển động ở tốc độ cực lớn như thế, thay đổi một cách quá đột ngột ? Vì mỗi nguyên tử vàng là trung hòa điện, nên nó sẽ không thể tác dụng lực lớn lên một hạt alpha nằm bên ngoài nó. Thật vậy, nếu hạt alpha ở rất gần hay nằm bên trong một nguyên tử nhất định, thì lực đó sẽ không nhất thiết phải triệt tiêu hoàn toàn; nếu hạt alpha tiến rất gần đến một electron nhất định, thì dạng thức $1/r^2$ của định luật Coulomb sẽ mang lại lực rất mạnh. Nhưng Marsden và Rutherford đã biết một hạt alpha nặng hơn 8000 lần một electron, và thật đơn giản là không thể nào một vật có khối lượng lớn hơn bị nảy trở lại từ sự va chạm với một vật nhẹ hơn trong khi năng lượng và xung lượng vẫn bảo toàn. Về nguyên tắc, có khả năng một hạt alpha đi theo một quỹ đạo rất gần một electron, và rồi rất gần với một electron khác, và cứ thế, với kết quả cuối cùng là bị lệch đi một góc lớn, nhưng những tính toán cẩn thận cho thấy nhiều "chạm trán gần gũi" như thế với electron sẽ quá hiếm hơn hàng triệu lần để giải thích cái thật sự quan sát thấy.



i/ Mẫu hành tinh nguyên tử

Ở đây, Rutherford và Marsden đã làm xuất hiện một mẫu nguyên tử không được phổ biến và chú ý tới, trong đó tất cả các electron chuyển động tròn xung quanh một lõi, hay hạt nhân, nhỏ, tích điện dương, giống hệt như các hành tinh chuyển động tròn xung quanh Mặt Trời. Toàn bộ điện tích dương và hầu hết khối lượng của nguyên tử tập trung ở hạt nhân, chứ không trải đều trong nguyên tử như trong mô hình bánh bông lan rắc nho. Hạt alpha tích điện dương sẽ bị hạt nhân vàng đẩy ra, nhưng đa số hạt alpha sẽ không tiến đủ gần đến bất kì hạt nhân nào để đường đi của chúng bị lệch quá nhiều. Tuy nhiên, một vài hạt thật sự tiến gần đến một hạt nhân có thể bị nảy trở lại từ một sự chạm trán như thế,

vì hạt nhân của nguyên tử vàng nặng gấp 50 lần hạt alpha. Thật ra không quá khó tìm ra công thức cho tần số lệch tương đối qua những góc khác nhau, và tính toán này phù hợp khá tốt với số liệu thí nghiệm (trong vòng 15%), có xét tới khó khăn trong việc thực hiện các thống kê thí nghiệm ở những góc hiếm, rất lớn.

Cái lúc bắt đầu là một bài tập chán ngắt để một chàng sinh viên bắt tay vào nghiên cứu khoa học cuối cùng là một cuộc cách mạng trong sự hiểu biết của chúng ta về tự nhiên. Thật vậy, toàn bộ câu chuyện nghe có vẻ giống như một truyền thuyết luân lí về phương pháp khoa học với gợi ý của thể loại Horatio Alger. Độc giả đa nghi có lẽ tự hỏi tại sao mẫu hành tinh lại bị bỏ qua hoàn toàn cho tới khám phá của Marsden và Rutherford. Có phải khoa học thật sự là một sự nghiệp mang tính xã hội, trong đó những ý tưởng nhất định trở nên được chấp nhận bởi sự áp đặt, và những cách giải thích hợp lí khác lại bị bỏ qua một cách tùy tiện ? Một số nhà khoa học xã hội hiện nay đang làm xù lông của rất nhiều khoa học với những bài bình luận rất giống như thế này, nhưng trong trường hợp này, có những lí do rất hợp lí cho việc loại bỏ mẫu hành tinh. Như bạn sẽ tìm hiểu chi tiết hơn ở phần sau của cuốn sách này, bất kì hạt mang điện nào chịu sự gia tốc cũng làm tiêu tan năng lượng dưới dạng ánh sáng. Trong mẫu hành tinh nguyên tử, các electron quay xung quanh hạt nhân theo những quỹ đạo tròn hoặc elip, nghĩa là chúng chịu sự gia tốc, giống hệt như gia tốc mà bạn cảm nhận được khi ngồi trong một chiếc xe hơi đang ngoặt cua. Chúng phải phóng thích năng lượng dưới dạng ánh sáng, và cuối cùng chúng sẽ mất hết năng lượng của mình. Các nguyên tử không tự phát suy sụp như thế, đó là lí do tại sao mô hình bánh bông lan rắc nho, với các electron tĩnh tại của nó, ban đầu lại được ưa chuộng hơn. Cũng còn có những vấn đề khác nữa. Theo mẫu hành tinh, nguyên tử một electron sẽ bằng phẳng, điều đó không phù hợp với sự thành công của mô hình phân tử với những quả cầu biểu diễn cho hydrogen và các nguyên tử. Những mô hình phân tử này cũng tỏ ra hoạt động tốt nhất nếu sử dụng những kích thước nhất định cho các nguyên tử khác nhau, nhưng không có lí do rõ ràng trong mẫu hành tinh lí giải tại sao bán kính quỹ đạo của một electron phải là một con số cố định. Tuy nhiên, theo quan điểm của kết quả của Marsden-Rutherford, đây trở thành những câu hỏi khó hiểu mới trong vật lí nguyên tử, chứ không phải lí do để hoài nghi mẫu hành tinh nguyên tử.

Một số hiện tượng giải thích được bằng mẫu hành tinh nguyên tử

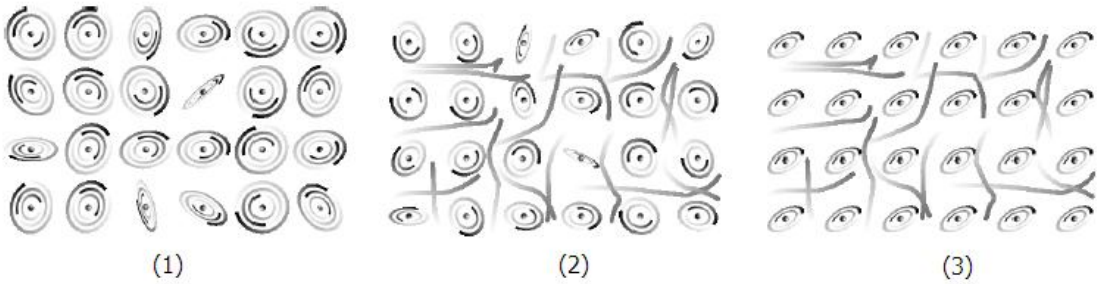
Mẫu hành tinh không phải là mô hình tối hậu, hoàn hảo của nguyên tử, nhưng không nên đánh giá thấp sức mạnh của nó. Nó cho phép chúng ta hình dung đúng đắn rất nhiều hiện tượng.

Ví dụ, hãy xét sự khác biệt giữa phi kim, kim loại có từ tính, và kim loại không có từ tính. Như biểu diễn trong hình j, kim loại khác với phi kim ở chỗ các electron lớp ngoài cùng của nó tự do hơn. Kim loại có thể bị từ hóa sẽ sắp chuyển động quay của một số electron của nó sao cho trục của chúng song song nhau. Nhắc lại lực từ là lực tác dụng bởi các điện tích chuyển động; chúng ta không bàn về toán học và hình học của lực từ, nhưng thật dễ thấy sự định hướng ngẫu nhiên của các nguyên tử trong chất phi từ tính sẽ dẫn đến sự triệt tiêu các lực.

Mặc dù mẫu hành tinh không trả lời ngay những câu hỏi đại loại như tại sao nguyên tố này là kim loại, còn nguyên tố kia là phi kim, nhưng những ý tưởng này thật khó hay không thể nào quan niệm được trong mô hình bánh bông lan rắc nho.

Câu hỏi thảo luận

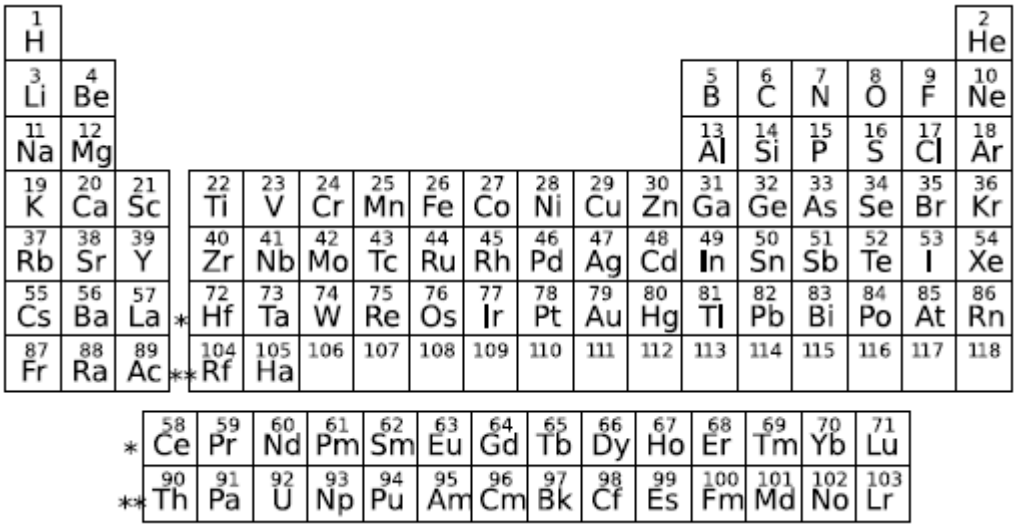
A. Trong thực tế, các điện tích cùng loại thì đẩy nhau, và các điện tích khác loại thì hút nhau. Giả sử quy luật diễn ra ngược lại, cho lực đẩy giữa các điện tích trái dấu và lực hút giữa những điện tích cùng dấu. Vũ trụ lúc bấy giờ sẽ ra sao ?



j/ Mẫu hành tinh áp dụng cho một phi kim (1), một kim loại không bị từ hóa (2) và một kim loại bị từ hóa (3). Lưu ý là những hình này đã vẽ đơn giản hóa đi nhiều. Các electron của một nguyên tử không quay tròn xung quanh hạt nhân trong cùng một mặt phẳng. Rất hiếm có trường hợp nào một kim loại bị từ hóa mạnh đến 100% nguyên tử của nó có trục quay sắp thẳng hàng nhau như trong hình.

2.3 Số nguyên tử

Như đã nói tới trong câu hỏi thảo luận trong một phần trước, các nhà khoa học thuộc giai đoạn này đã có một ý tưởng rất gần đúng có bao nhiêu đơn vị điện tích nằm trong hạt nhân của các nguyên tố hóa học khác nhau. Mặc dù ngày nay chúng ta liên tưởng số đơn vị điện tích hạt nhân với vị trí của nguyên tố trong bảng tuần hoàn hóa học, và gọi nó là số nguyên tử, nhưng họ thì không hề có ý tưởng gì về một mối quan hệ như thế. Bảng tuần hoàn của Mendeleev trông chỉ như một công cụ mang tính tổ chức hóa, chứ không có tầm quan trọng vật lí cần thiết nào cả. Và mọi thứ mà Mendeleec đã làm cũng hợp lí nếu như bạn chuyển lộn ngược bảng lại, hoặc đảo phía bên trái và bên phải của nó, hay thậm chí bạn muốn đánh số nguyên tố liên tiếp với những số nguyên thì cũng có tình trạng cho bạn làm như vậy. Bảng tuần hoàn gốc của Mendeleev trong thực tế là lộn ngược so với bảng tuần hoàn hiện nay.

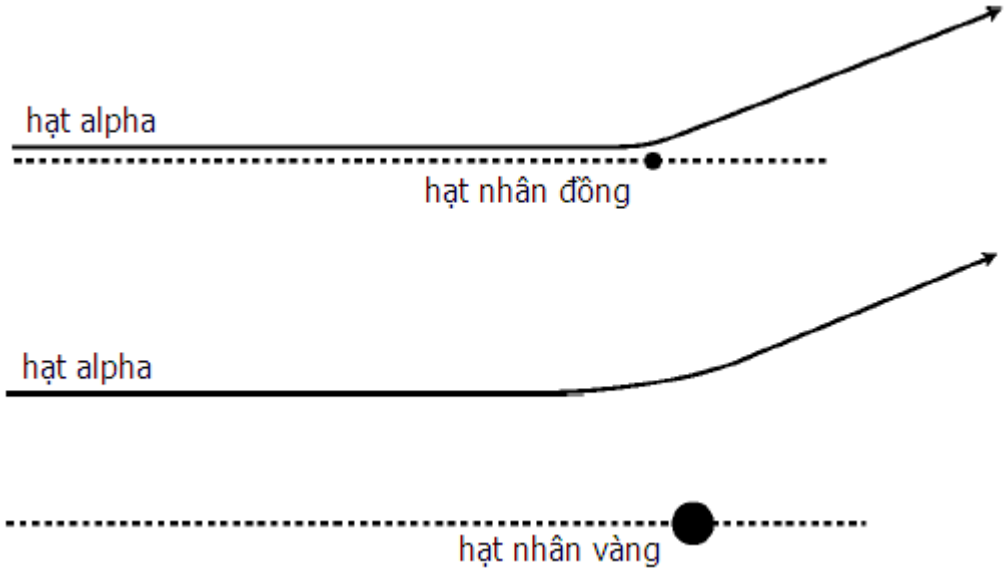


k/ Bảng tuần hoàn hóa học hiện đại, có đánh số nguyên tử. Bảng tuần hoàn nguyên gốc của Mendeleev lộn ngược so với bảng này.

Trong thời kì ngay sau khi khám phá ra hạt nhân, các nhà vật lí chỉ có sự ước tính thô về điện tích của những hạt nhân khác nhau. Trong trường hợp của hạt nhân nhẹ nhất, họ dễ dàng tìm được số electron tối đa mà họ có thể bứt ra bằng những phương pháp khác nhau: phản ứng hóa học, cho phóng điện, chiếu ánh sáng cực tím, và vân vân. Ví dụ, họ có thể dễ dàng bóc ra một hoặc hai electron khỏi helium, tạo ra He^{+} hay He^{++}, nhưng không ai tạo ra được He^{+++}, có thể đoán chừng là do điện tích hạt nhân của helium chỉ là +2e. Thật không may, chỉ có một vài nguyên tố nhẹ nhất có thể bị bóc ra hoàn toàn, vì càng có nhiều

electron bị bứt ra, thì các electron tích điện âm còn lại sẽ bị giữ càng chặt. Số nguyên tử của các nguyên tố nặng chỉ có thể ngoại suy thô từ các nguyên tố nhẹ, trong đó số nguyên tử vào khoảng phân nửa khối lượng nguyên tử biểu diễn bằng đơn vị khối lượng nguyên tử hydrogen. Ví dụ, vàng có khối lượng gấp khoảng 197 lần hydrogen, nên số nguyên tử của nó được ước tính là khoảng phân nửa giá trị đó, hay đâu đó trên dưới 100. Ngày nay chúng ta biết nó là 79.

Cuối cùng, chúng ta giải quyết vấn đề đó như thế nào ? Bức màn bí ẩn của điện tích hạt nhân cuối cùng đã bị chọc thủng thành công bằng hai kĩ thuật khác nhau, cho kết quả phù hợp nhau. Một bộ thí nghiệm, sử dụng tia X, được thực hiện bởi chàng trai trẻ Henry Mosely, người có tài năng khoa học sớm hi sinh trong một trận đánh giữa các đế quốc châu Âu tranh giành quyền sở hữu xứ Dardanelles, trong cuộc xung đột vô nghĩa khi ấy gọi là cuộc chiến nhằm kết thúc mọi cuộc chiến, còn ngày nay gọi là Thế chiến thứ nhất.



l/ Hạt alpha tiến gần hơn nhiều đến sát hạt nhân đồng điện tích thấp để bị lệch qua góc như nhau.

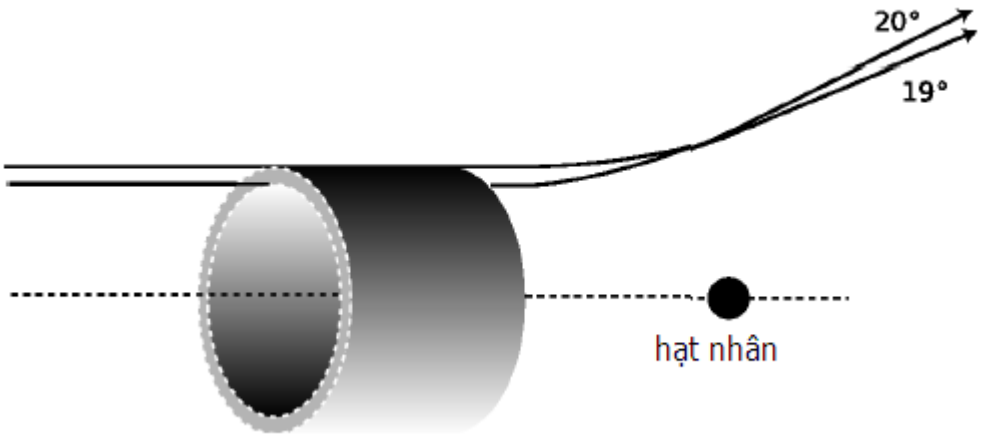
Vì phân tích của Mosely yêu cầu một vài khái niệm mà đến đây bạn vẫn chưa quen thuộc, nên thay vì vậy, chúng ta sẽ mô tả kĩ thuật do James Chadwick sử dụng vào khoảng thời gian đó. Một cái lợi nữa của việc mô tả những thí nghiệm của Chadwick là chúng báo trước sự ra đời của kĩ thuật hiện đại quan trọng nghiên cứu sự *va chạm* của các hạt hạ nguyên tử. Ở trường đại học, tôi đã từng làm việc với một vị giáo sư có cố vấn của cố vấn luận án của ông là Chadwick, và ông đã kể một số mẫu chuyện lí thú về nhà khoa học đó. Chadwick nhìn bên ngoài hơi bảnh trai và hoàn toàn cuồng tín với khoa học, cho tới khi ông bị bắt giữ trong nhà tù Đức trong Thế chiến thứ hai, ông vẫn phỉnh phờ những kẻ giam giữ ông cho phép ông "chôm" những bộ phận radio vỡ nát để ông có thể cố gắng thực hiện những thí nghiệm vật lí.

Thí nghiệm của Chadwick hoạt động như thế này. Giả sử bạn tiến hành hai phép đo tán xạ hạt alpha theo kiểu Rutherford, thí nghiệm đầu với lá vàng làm bia như trong thí nghiệm gốc của Rutherford, và thí nghiệm thứ hai với một lá đồng. Trong cả hai trường hợp đều có thể thu được góc lệch lớn, nhưng như chỉ rõ trong hinh m, hạt alpha phải hướng gần như thẳng về phía hạt nhân đồng để có cùng góc lệch như xảy ra với những hạt alpha ở xa mục tiêu hơn nhiều; điện tích của hạt nhân vàng lớn hơn nhiều so với điện tích của hạt nhân đồng, nên nó tác dụng lực lớn lên hạt alpha ngay cả khi hạt này ở xa. Tình huống rất giống với một người bịt mắt chơi trò ném phi tiêu. Giống như không thể nhắm một hạt alpha lên một hạt nhân nào đó trên bia, người bị bịt mắt thật sự không thể nào nhắm được phi tiêu. Thu được một va chạm rất gần với hạt nhân đồng tương tự như ném lọt vào vòng tròn trong trên bảng phóng tiêu. Còn na ná hơn nữa là người ta luôn có cơ may ném trúng

vòng tròn ngoài, nó bao phủ số inch vuông lớn hơn. Tương tự, nếu bạn đo tần suất hạt alpha bị tán xạ bởi hạt nhân đồng ở một số góc nhất định, ví dụ giữa 19 và 20 độ, và rồi tiến hành cùng phép đo ở cùng góc đó với hạt nhân vàng, bạn sẽ thu được tỉ lệ phần trăm cho vàng cao hơn nhiều so với cho đồng.

Trên thực tế, tỉ số điện tích của hai hạt nhân có thể thu được từ tỉ số cùng được xác định bằng thực nghiệm này. Sử dụng kí hiệu chuẩn *Z* cho số nguyên tử (điện tích của hạt nhân chia cho *e*), phương trình sau có thể chứng minh được (ví dụ 1):

$$\frac{Z_{vàng}^{\ 2}}{Z_{đồng}^{\ 2}} = \frac{\text{Số hạt alpha bị tán xạ bởi vàng ở góc 19 - 20}^{o}}{\text{Số hạt alpha bị tán xạ bởi đồng ở góc 19 - 20}^{o}}$$



m/ Hạt alpha phải hướng thẳng tới vòng tròn ở phía trước ống hình trụ tưởng tượng để tạo ra sự tán xạ ở góc giữa 19 và 20 độ. Diện tích của vòng tròn này được gọi là "tiết diện" cho sự tán xạ ở góc 19-20 độ, vì nó là diện tích lát cắt ngang của ống trụ.

Bằng cách tiến hành những phép đo như thế đối với bia xây dựng từ tất cả các nguyên tố, người ta có thể suy ra tỉ số của tất cả các số nguyên tử, và vì số nguyên tử của những nguyên tố nhẹ nhất đã được biết, nên số nguyên tử có thể gán cho toàn bộ bảng hệ thống tuần hoàn. Theo Mosely, số nguyên tử của đồng, bạc và platinum là 29, 47 và 78, tương ứng tốt với vị trí của chúng trong bảng tuần hoàn. Số liệu của Chadwick cho ba nguyên tố trên là 29,3; 46,3 và 77,4, với sai số khoảng 1,5 lần điện tích nguyên tố, nên hai thí nghiệm phù hợp tốt với nhau.

Ở đây, không nhất thiết bạn phải sẵn sàng đưa những con số vào phương trình ở trên cho một bài tập ở nhà hay giải bài toán! Mục tiêu tổng thể của tôi trong chương này là giải thích làm sao chúng ta biết được những gì chúng ta biết về các nguyên tử. Một lợi thế của việc mô tả thí nghiệm của Chadwick là phương pháp đó rất giống với phương pháp sử dụng trong những thí nghiệm vật lí hạt hiện đại, và ý tưởng dùng trong phép phân tích đó quan hệ gần gũi với khái niệm ngày nay gặp ở mọi ngóc ngách, đó là khái niệm "tiết diện". Trong sự tương tự với bảng phóng tiêu, tiết diện sẽ là diện tích của vòng tròn mà bạn ném tới. Lí do tiềm ẩn sau phát minh ra từ "tiết diện" có thể hình dung như trong hình m. Theo ngôn ngữ này, phát minh ra mẫu hành tinh của Rutherford đến từ khám phá bất ngờ của ông rằng có một tiết diện khác không cho hạt alpha tán xạ khỏi vàng ở những góc lớn, và Chadwick xác nhận sự xác định số nguyên tử của Rutherford bằng cách đo tiết diện tán xạ hạt alpha.

Ví dụ 1. Bằng chứng cho mối quan hệ giữa Z và sự tán xạ

Phương trình ở trên có thể thu nhận từ bằng chứng không chặt chẽ lắm sau đây. Để làm lệch hạt alpha ở một góc nhất định, cần phải có một thành phần động lượng nhất định theo hướng vuông góc với động lượng ban đầu của nó. Mặc dù lực do hạt nhân tác dụng lên hạt alpha không

phải là một hằng số, nhưng chúng ta có thể giả sử nó xấp xỉ là một hằng số trong thời gian hạt alpha ở trong khoảng cách, nói ví dụ, bằng 150% khoảng cách của nó tới điểm gần nhất, và lực là bằng không trước và sau phần chuyển động đó. (Nếu chúng ta chọn 120% hay 200%, thì không có sự chênh lệch nào trong kết quả cuối cùng, vì kết quả cuối cùng là một tỉ số nên các ảnh hưởng lên tử và mẫu số sẽ triệt tiêu lẫn nhau). Trong sự gần đúng về lực không đổi, độ biến thiên thành phần vuông góc của hạt alpha khi đó bằng $F\Delta t$. Định luật Coulomb cho phát biểu lực tỉ lệ với Z/r^2. Mặc dù r thật sự thay đổi một chút trong khoảng thời gian đã chọn, nhưng vẫn có thể xem nó là một số không đổi, vì chúng ta chỉ tính tỉ số giữa hai kết quả thí nghiệm. Vì chúng ta lấy gần đúng lực tác dụng theo thời gian trong khi khoảng cách không quá lớn so với khoảng cách đến điểm gần nhất, nên khoảng thời gian Δt phải tỉ lệ với r, và xung lượng ngang truyền cho hạt alpha, $F\Delta t$, tỉ lệ với $(Z/r^2)r$ hay Z/r. Nếu chúng ta so sánh hạt alpha tán xạ ở cùng góc từ vàng và đồng, thì Δp bằng nhau trong cả hai trường hợp, và hệ thức $\Delta p \alpha Z/r$ cho chúng ta biết hạt alpha bị tán xạ từ đồng ở góc đó phải hướng theo một đường thẳng nằm gần trục chính giữa hơn một khoảng bằng với $Z_{vàng}/Z_{đồng}$. Nếu bạn tưởng tượng "vòng phóng tiêu" là nơi mà hạt alpha phải chạm tới, thì vòng tròn cho thí nghiệm vàng cũng cân xứng như vòng tròn cho thí nghiệm đồng, nhưng nó lớn hơn $Z_{vàng}/Z_{đồng}$ lần. Nghĩa là, không những bán kính của vòng tròn lớn hơn chừng ấy, mà chiều dày của vòng bên ngoài của lớn hơn theo tỉ lệ với bán kính của nó, chứ không giống như các vòng trong bảng phóng tiêu bình thường. Khi bạn làm cho hình dạng và quy mô của vật lớn hơn theo kiểu như chụp ảnh phóng to, thì diện tích của nó tăng tỉ lệ với bình phương của hệ số phóng đại, nên diện tích của vòng phóng tiêu trong thí nghiệm vàng tăng lên $(Z_{vàng}/Z_{đồng})^2$ lần. Vì hạt alpha được nhắm hoàn toàn ngẫu nhiên, nên cơ hội cho một hạt alpha chạm trong vòng tỉ lệ với diện tích của vòng, điều đó chứng minh cho phương trình đã cho ở trên.

Như một ví dụ cho việc sử dụng hiện đại thí nghiệm tán xạ và phép đo tiết diện, có lẽ bạn đã từng nghe nói tới bằng chứng thực nghiệm gần đây cho sự tồn tại của một hạt gọi là quark top. Trong số 12 hạt hạ nguyên tử hiện nay được tin là những thành phần nhỏ nhất của vật chất, 6 dạng thuộc một họ gọi là quark, khác với 6 dạng kia ở chỗ lực hút mạnh làm cho các quark dính chặt vào nhau (Sáu hạt kia gồm có electron cộng với năm hạt nữa, kì lạ hơn). Chỉ có hai loại quark được tìm thấy vốn dĩ tự nhiên trong vật chất là "quark top" và "quark down", chúng là hạt cấu thành nên proton và neutron, còn 4 hạt kia trên lí thuyết được tiên đoán là tồn tại, nên cộng lại có 6 hạt. (Thuật ngữ kì quái "quark" có nguồn gốc từ một dòng trong truyện của James Joyce "Ba quark cho ngài Mark"). Mãi cho đến gần đây, chỉ có 5 loại quark được chứng minh là tồn tại qua các thí nghiệm, và quark thứ sáu, quark top, chỉ có trên lí thuyết. Không có tia hi vọng nào cho việc phát hiện quark top một cách trực tiếp, vì nó có tính phóng xạ và chỉ tồn tại trong một phần vô cùng nhỏ của một giây trước khi bốc hơi. Thay vì vậy, các nhà nghiên cứu tìm kiếm nó tại Phòng thí nghiệm máy gia tốc quốc gia Fermi gần Chicago, Mĩ, đo tiết diện tán xạ của hạt nhân khỏi hạt nhân khác. Thí nghiệm rất giống với thí nghiệm của Rutherford và Chadwick, ngoại trừ chỗ hạt nhân tới phải được nâng lên đến tốc độ cao hơn nhiều trong một máy gia tốc hạt. Va chạm thu được với hạt nhân bia quá mạnh nên cả hai hạt nhân bị phá hủy hoàn toàn, nhưng, như Einstein chứng minh, năng lượng có thể chuyển hóa thành vật chất, và năng lượng của va chạm tạo ra một chùm hạt phóng xạ, kì lạ, giống như trận mưa mạt gỗ chết người do một quả đạn pháo gây ra trong một trận đánh thủy kiểu xưa. Trong số những hạt này có một số quark top. Tiết diện đo được là tiết diện cho sự sản sinh những kết hợp nhất định của những hạt thứ cấp này. Tuy khác về chi tiết, nhưng nguyên tắc là giống nhau như đã sử dụng hồi đầu thế kỉ: bạn đập thứ gì đó vào nhau và xem các mảnh vỡ bay ra để nhìn thấy cái bên trong chúng. Phương pháp đó có thể sánh như dùng súng trường bắn vào cái đồng hồ và rồi nghiên cứu các mảnh vỡ bay ra để tìm hiểu xem đồng hồ hoạt động như thế nào.

Câu hỏi thảo luận

A. Biểu đồ ở trên, biểu diễn các hạt alpha bị hạt nhân vàng làm lệch đi, được vẽ với giả định rằng các hạt alpha đến theo những đường thẳng nằm ở những khoảng cách khác nhau tính từ hạt nhân. Tại sao chúng không đến dọc theo cùng một đường thẳng, vì chúng đều cùng đi ra từ cùng một ống ?

B. Tại sao phải hiểu, như chỉ rõ trong hình, rằng các quỹ đạo tán xạ cắt nhau góc 19^o và 20^o?

C. Rutherford đã biết vận tốc của hạt alpha do radium phát ra, và dự đoán phần tích điện dương của nguyên tử vàng có điện tích khoảng +100e (ngày nay chúng ta biết là +79e). Xét thực tế là một số hạt alpha bị lệch 180^o, làm thế nào khi đó ông có thể sử dụng sự bảo toàn năng lượng để thu được một giới hạn trên cho kích thước của hạt nhân vàng ? (Để đơn giản, giả sử kích thước của hạt alpha là không đáng kể so với hạt nhân vàng, và bỏ qua thực tế là hạt nhân vàng giật lùi một chút do va chạm, lấy thêm một ít động năng).

2.4 Cấu trúc của hạt nhân

Proton

Thực tế điện tích hạt nhân đều là bội số nguyên của *e* khiến nhiều nhà vật lí nghĩ rằng hạt nhân có lẽ gồm những hạt nhỏ hơn có điện tích riêng là $+e$, chứ không phải là một chất điểm. Bằng chứng ủng hộ cho ý tưởng này xuất hiện không bao lâu sau đó. Rutherford giải thích nếu ông bắn phá các nguyên tử của một nguyên tố rất nhẹ bằng hạt alpha, thì điện tích nhỏ của hạt nhân bia sẽ mang lại lực đẩy rất yếu. Có lẽ một vài hạt alpha đó sẽ đến va chạm trực diện, tiến gần đến nỗi chúng xâm nhập thật sự vào một số hạt nhân bia. Hạt alpha chính là một hạt nhân, nên đây sẽ là va chạm giữa hai hạt nhân, và sự va chạm diễn ra dữ dội do tốc độ cao. Rutherford đã đào trúng mỏ vàng trong một thí nghiệm với hạt alpha đập vào bia chứa các nguyên tử nitrogen. Các hạt tích điện được phát hiện bay ra khỏi bia giống như các phần bay ra khỏi chiếc xe hơi trong một vụ tai nạn va chạm tốc độ cao. Phép đo sự lệch của những hạt này trong điện trường và từ trường cho thấy chúng có cùng tỉ số điện tích trên khối lượng như các nguyên tử hydrogen bị ion hóa một lần. Rutherford kết luận rằng có những hạt tích điện riêng phỏng đoán đã giữ điện tích của hạt nhân, và sau này chúng được đặt tên là proton. Hạt nhân hydrogen gồm một proton, và nói chung, số nguyên tử của một nguyên tố cho biết số proton chứa trong từng hạt nhân của nó. Khối lượng của proton lớn hơn khối lượng của electron khoảng 1800 lần.

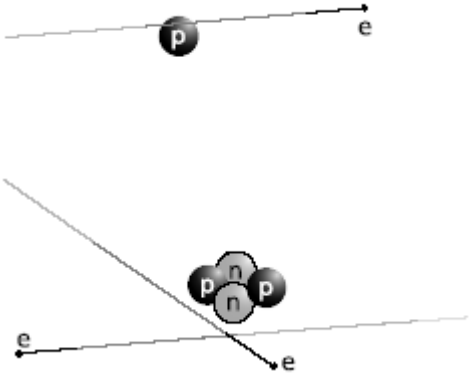
Neutron

Sẽ thật đẹp và đơn giản nếu như mọi hạt nhân đều có thể cấu thành chỉ từ các proton, nhưng không phải như vậy. Nếu bạn chịu mất chút ít thời gian quan sát bảng tuần hoàn hóa học, bạn sẽ sớm lưu ý thấy mặc dù một số khối lượng nguyên tử rất gần với bội số nguyên của khối lượng nguyên tử hydrogen, nhưng nhiều nguyên tử khác thì không như vậy. Ngay cả khi khối lượng nguyên tử gần với số nguyên nhất, thì khối lượng của một nguyên tố ngoài hydrogen luôn lớn hơn số nguyên tử của nó, chứ không bằng số nguyên tử. Chẳng hạn, nguyên tử helium có hai proton, nhưng khối lượng của nó gấp 4 lần khối lượng nguyên tử hydrogen.

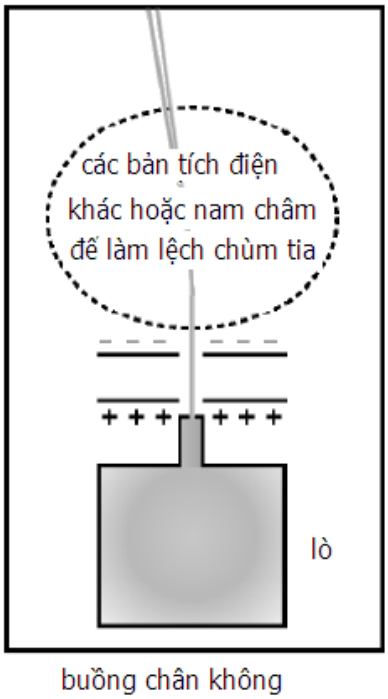
Chadwick làm sáng tỏ tình trạng lộn xộn bằng cách chứng minh sự tồn tại của một hạt hạ nguyên tử mới. Không giống như electron và proton là những hạt mang điện, hạt này trung hòa về điện, và ông đặt tên cho nó là neutron. Thí nghiệm của Chadwick được mô tả chi tiết trong chương 4, quyển 2 của loạt bài giảng này, nhưng nói chung phương pháp đó là phơi một mẫu nguyên tố nhẹ beryllium trước dòng hạt alpha phát ra từ một cục radium. Beryllium chỉ có 4 proton, nên một hạt alpha tình cờ nhắm thẳng tới một hạt nhân beryllium có thể thật sự va chạm với nó chứ không bị lực đẩy điện đẩy lệch sang va chạm bên. Các neutron được quan sát thấy dưới dạng một dạng bức xạ mới phát ra từ va chạm, và Chadwick suy luận đúng đắn rằng chúng là những thành phần không còn nghi ngờ gì nữa của hạt nhân đã bị khám phá ra. Như đã mô tả trong cuốn *Các định luật bảo toàn*, Chadwick cũng đã xác định được khối lượng của neutron, nó rất gần với khối lượng của proton.

Tóm lại, nguyên tử cấu thành từ ba loại hạt sau:

	Điện tích	Khối lượng tính theo đơn vị khối lượng proton	Vị trí trong nguyên tử
Proton	+ e	1	Trong hạt nhân
Neutron	0	1,001	Trong hạt nhân
Electron	- e	1/1836	Xung quanh hạt nhân



m/ Ví dụ cấu trúc của nguyên tử hydrogen (hình trên) và helium (hình dưới). Ở kích cỡ này, quỹ đạo của electron sẽ có kích thước cỡ sân trường.



o/ Một mẫu thiết bị Thomson cải tiến dùng đo tỉ số khối lượng trên điện tích của các ion chứ không phải electron. Một mẫu nhỏ của nguyên tố đang nghi vấn, trong ví dụ của chúng ta là đồng, được đun sôi trong lò để tạo ra một lớp hơi mỏng. (Một ống chân không liên tục hút lên buồng chính, giữ nó khỏi bị tích góp đủ chất khí làm dừng chùm ion). Một số nguyên tử hơi bị ion hóa bởi tia lửa điện hoặc tia cực tím. Các ion đi ra khỏi miệng vòi và đi vào vùng giữa các bản tích điện khi đó được gia tốc hướng lên phía trên của hình. Như trong thí nghiệm Thomson, tỉ số khối lượng trên điện tích được suy ra từ độ lệch của chùm tia.

Sự tồn tại của neutron giải thích khối lượng bí ẩn của các nguyên tố. Chẳng hạn, helium có khối lượng rất gần với bốn lần khối lượng hydrogen. Đấy là do ngoài hai proton của nó ra, nó còn chứa thêm hai neutron. Khối lượng của một nguyên tử về cơ bản được xác định bằng tổng số neutron và proton. Tổng số neutron và proton do đó thường được gọi là *số khối* của nguyên tử.

Đồng vị

Bây giờ chúng ta đã có cách hiểu rõ ràng của thực tế là helium nặng gần gấp bốn lần hydrogen, và tương tự cho tất cả số nguyên tử gần với một bội số nguyên lần khối lượng của hydrogen. Nhưng chẳng hạn còn đồng thì sao, nó có khối lượng nguyên tử gấp 63,5 lần hydrogen ? Rõ ràng không thể nào nghĩ rằng có nó thêm một nửa neutron nữa! Lời giải được tìm ra bằng cách đo tỉ số khối lượng trên điện tích của các nguyên tử bị ion hóa bậc một (các nguyên tử mất đi một electron). Kĩ thuật về cơ bản giống như kĩ thuật mà Thomson sử dụng cho tia catôt, ngoại trừ ở chỗ toàn bộ các nguyên tử không tự phát bứt ra khỏi bề mặt vật như các electron thỉnh thoảng vẫn làm. Hình o cho một ví dụ các ion được tạo ra và bơm vào giữa hai bản tích điện như thế nào để gia tốc.

Bơm một chùm ion đồng vào dụng cụ đó, chúng ta tìm thấy một điều thật ngạc nhiên – chùm tia bị tách ra làm hai phần ! Các nhà hóa học vốn đã nâng cao đức tin vào sự giả định rằng mọi nguyên tử của một nguyên tố cho trước là đồng nhất, nhưng chúng ta tìm thấy 69% nguyên tử đồng có một khối lượng, và 31% lại có khối lượng khác. Không những thế, cả hai khối lượng đều rất gần với bội số nguyên của khối lượng hydrogen (lần lượt là 63 và 65). Đồng có được sự đồng nhất hóa tính của nó từ số proton trong hạt nhân của nó, 29, vì các phản ứng hóa học hoạt động bằng lực điện. Nhưng rõ ràng là một số nguyên tử đồng có 63 – 29 = 34 neutron, trong khi một số khác có 65 – 29 = 36 neutron. Số nguyên tử của đồng - 63,5 – phản ánh tỉ lệ của loại khối lượng 63 và loại khối lượng 65. Các trạng thái khối lượng khác nhau của một nguyên tố cho trước được gọi là đồng vị của nguyên tố đó.

Các đồng vị có thể được gọi tên bằng cách thêm số khối vào góc trên bên trái của kí hiệu nguyên tố, ví dụ ^{65}Cu. Ví dụ:

	proton	neutron	số khối
^{1}H	1	0	0 + 1 = 1
^{4}He	2	2	2 + 2 = 4
^{12}C	6	6	6 + 6 = 12
^{14}C	6	8	6 + 8 = 14
^{262}Ha	105	157	105 + 157 = 262

♥ Tại sao điện tích dương và điện tích âm của các bản gia tốc trong thiết bị tách đồng vị lại đảo ngược so với thiết bị Thomson ?

Các phản ứng hóa học đều là sự trao đổi hoặc chia sẻ electron: hạt nhân phải ngồi ngoài trò khiêu vũ này vì lực đẩy điện ngăn cản chúng tiến tới đủ gần để tiếp xúc với nhau. Mặc dù proton thật sự có ảnh hưởng vô cùng quan trọng lên quá trình hóa học vì lực điện của chúng, nhưng neutron có thể không có ảnh hưởng nào lên phản ứng hóa học của nguyên tử. Chẳng hạn, không thể nào tách ^{63}Cu ra khỏi ^{65}Cu bằng phản ứng hóa học. Đây là lí do tại sao các nhà hóa học chưa bao giờ nhận ra sự tồn tại của các đồng vị khác nhau. (Những đồng vị khác nhau, chính xác hoàn toàn phải xử sự hơi khác nhau, vì các nguyên tử càng nặng thì chuyển động càng chậm, và do đó phản ứng hơi khác nhau một chút về cường độ. Sự khác biệt rất nhỏ này được sử dụng, chẳng hạn, để tách những đồng vị uranium cần thiết cho chế tạo bom nguyên tử. Tính nhỏ yếu của hiệu ứng này khiến cho quá trình tách là một quá trình chậm chạp và khó khăn, đó là điều chúng ta phải cảm ơn vì nhờ thế mà vũ khí hạt nhân không được chế tạo bởi từng nhóm băng đảng khủng bố trên hành tinh).

Kích thước và hình dạng của hạt nhân

Vật chất hầu như đều là hạt nhân nếu chúng ta đếm chúng bằng trọng lượng, nhưng tính theo thể tích thì hạt nhân không nhiều như thế. Bán kính của một neutron hoặc proton rất gần với 1 fm (1 fm = 10^{-15} m), cho nên dù là một hạt nhân chì lớn với số khối 208 vẫn có đường kính chỉ khoảng 13 fm, nhỏ hơn mười ngàn lần đường kính của một nguyên tử điển hình. Trái với hình tượng quen thuộc của hạt nhân là một quả cầu nhỏ, hóa ra thì nhiều hạt nhân lại có dạng thon dài, giống như quả bóng bầu dục Mĩ, và một số thì có hình dạng không đối xứng một cách kì lạ giống như quả lê, hay con kiwi.

Câu hỏi thảo luận

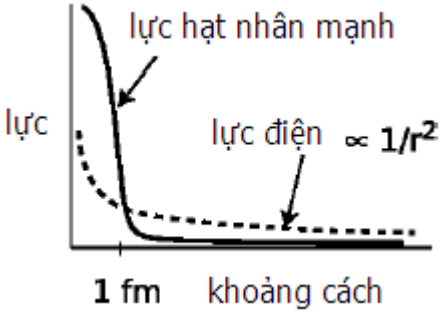
A. Giả sử toàn bộ vũ trụ là một chiếc hộp ngũ cốc (rất lớn), và nhãn hàng hóa được giả sử là cho khách hàng thần thánh biết là bao nhiêu phần trăm bên trong hàng hóa là hạt nhân. Như vậy,

đại khái thì sẽ có bao nhiêu phần trăm hạt nhân nếu dán nhãn theo khối lượng ? Còn khi dán nhãn theo thể tích thì sao ?

p/ Nhà máy điện hạt nhân tại Cattenom, Pháp. Không giống như các nhà máy chạy than và dầu lửa cung cấp đa phần nguồn điện cho nước Mĩ, một nhà máy điện hạt nhân như thế này không giải phóng chất độc hay các khí nhà kính vào bầu khí quyển của Trái Đất, và do đó không góp phần vào sự ấm lên toàn cầu. Khói trắng thoát ra từ nhà máy này là hơi nước không phóng xạ. Mặc dù nhà máy điện hạt nhân làm phát sinh chất thải hạt nhân có thời gian sống lâu dài, nhưng người ta cho rằng chất thải đó ít gây đe dọa cho sinh quyển hơn các khí nhà kính.

2.5 Lực hạt nhân mạnh, phân rã alpha và sự phân hạch

Một khi các nhà vật lí nhận ra hạt nhân gồm có những proton tích điện dương và neutron không mang điện, họ lại có trong tay một vấn đề phải giải quyết. Lực điện giữa các proton đều là lực đẩy, nên hạt nhân phải dễ dàng bay tản ra từng mảnh! Lí do mà mọi hạt nhân trong cơ thể bạn không nổ tung tức thời tại thời điểm này là còn có một lực khác nữa tác dụng. Lực này, gọi là lực hạt nhân mạnh, luôn luôn là lực hút, và tác dụng giữa neutron với neutron, neutron với proton, và proton với proton với độ lớn xấp xỉ bằng nhau. Lực hạt nhân mạnh không có bất kì tác dụng nào lên electron, đó là lí do tại sao nó không ảnh hưởng tới các phản ứng hóa học.

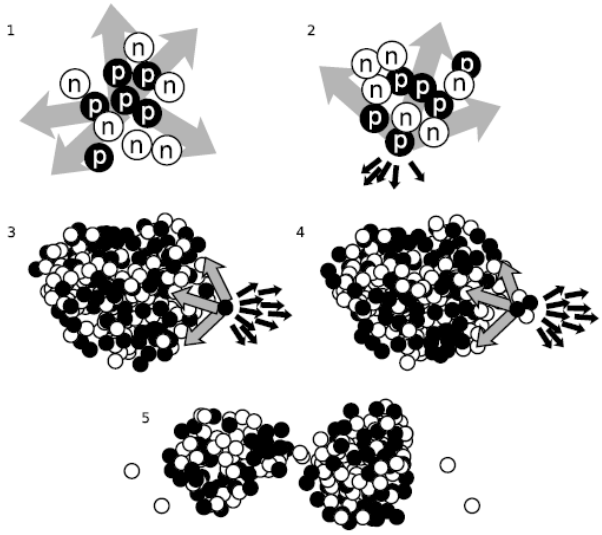


q/ Lực hạt nhân mạnh đột ngột rất mạnh khi khoảng cách dưới 1 fm.

Không giống như lực điện, lực có độ lớn cho bởi định luật Coulomb có dạng đơn giản, không có công thức đơn giản nào cho mức độ mà lực hạt nhân phụ thuộc vào khoảng cách. Nói đại khái, nó phát huy tác dụng trong ngưỡng ~ 1 fm, nhưng giảm cực kì nhanh ở

những khoảng cách lớn hơn (nhanh hơn $1/r^2$ nhiều). Vì bán kính của một neutron hay proton là vào khoảng 1 fm, nghĩa là khi một bó neutron và proton gói chặt vào nhau để hình thành nên hạt nhân, nên lực hạt nhân mạnh chỉ hiệu quả giữa những hạt lân cận.

Hình r minh họa cách thức lực hạt nhân mạnh tác dụng để giữ hạt nhân bình thường lại với nhau, nhưng nó không thể giữ hạt nhân rất nặng khỏi bị phá vỡ thành từng phần. Trong hình r/1, một proton ở giữa một hạt nhân cacbon cảm nhận lực hạt nhân mạnh (các mũi tên) hút từ những lân cận gần nhất của nó. Các lực đó đều có hướng khác nhau, và có xu hướng triệt tiêu nhau. Điều tương tự cũng đúng cho các lực điện đẩy (không chỉ trong hình). Trong hình r/2, một proton ở rìa của hạt nhân chỉ có các lân cận ở một phía, và do đó tất cả lực hạt nhân mạnh tác dụng lên nó có xu hướng hút nó trở vào. Mặc dù tất cả lực điện từ năm proton kia (mũi tên đen) đều đẩy nó ra khỏi hạt nhân, nhưng chúng không đủ để thắng được lực hạt nhân mạnh.



r/1. Các lực triệt tiêu nhau. 2. Các lực không triệt tiêu nhau. 3. Trong một hạt nhân nặng, số lượng lớn lực đẩy điện có thể thêm một lực so sánh được với lực hạt nhân mạnh.
4. Phát xạ alpha. 5. Sự phân hạch.

Trong một hạt nhân rất nặng, r/3, một proton ở rìa chỉ có vài lân cận đủ gần để hút nó đáng kể thông qua lực hạt nhân mạnh, nhưng mỗi proton khác trong hạt nhân tác dụng một lực đẩy điện lên nó. Nếu hạt nhân đủ lớn, thì lực đẩy điện tổng hợp có thể đủ để thắng được sức hút của lực mạnh, và hạt nhân có thể nhả ra một proton. Tuy nhiên, sự phát xạ proton khá hiếm; loại phân rã phóng xạ phổ biến hơn ở hạt nhân nặng là phân rã alpha, minh họa trong hình r/4. [Phân rã alpha phổ biến hơn vì hạt alpha là sự sắp xếp rất bền của các neutron và proton]. Sự không cân bằng lực tương tự như trên, nhưng kẻ bị phóng ra là hạt alpha (hai proton và hai neutron) chứ không phải một proton.

Hạt nhân cũng có khả năng tách thành hai mảnh có kích thước xấp xỉ bằng nhau, r/5, một quá trình gọi là sự phân hạch. Lưu ý là ngoài hai mảnh vỡ lớn, còn có một chùm neutron riêng lẻ. Trong quả bom phân hạch hạt nhân hoặc lò phản ứng phân hạch hạt nhân, một số neutron này bay ra và va chạm với hạt nhân khác, làm cho chúng cũng chịu sự phân hạch. Kết quả là một phản ứng dây chuyền.

Khi một hạt nhân có thể chịu một trong những quá trình này, người ta nói nó có tính phóng xạ và chịu sự phân rã phóng xạ. Một số hạt nhân xuất hiện tự nhiên trên Trái Đất có tính phóng xạ. Thuật ngữ "phóng xạ" có nguồn gốc từ hình ảnh của Becquerel về những tia phát ra từ một thứ gì đó, chứ không phải từ sóng vô tuyến, chúng là một hiện tượng hoàn toàn khác. Thuật ngữ "phân rã" cũng có thể hơi dễ nhầm lẫn, vì nó ám chỉ hạt nhân chuyển hóa thành bụi hay dễ dàng biến mất – thật ra thì nó tách thành hai hạt nhân

mới với cùng tổng số proton và neutron, nên thuật ngữ "biến đổi phóng xạ" sẽ thích hợp hơn. Mặc dù các electron của nguyên tử gốc chỉ là khán giả trong quá trình phân rã phóng xạ yếu, nhưng chúng ta thường nói kém chặt chẽ là "nguyên tử phóng xạ" chứ không nói "hạt nhân phóng xạ".

Sự ngẫu nhiên trong vật lí học

Làm sao một nguyên tử quyết định khi nào thì phân rã ? Chúng ta có thể tưởng tượng điều đó giống như một ngôi nhà bị mối mọt phá hoại càng ngày càng suy yếu đi, cho đến cuối cùng thì đến cái ngày trù định nó sẽ đổ sập xuống. Tuy nhiên, các thí nghiệm đã không thành công trong việc phát hiện "chiếc đồng hồ tíc tắc" như thế nằm dưới nền nhà; bằng chứng là mọi nguyên tử của một đồng vị cho trước là hoàn toàn đồng nhất. Tại sao một nguyên tử uranium lại phân rã vào lúc này, trong ngày hôm nay, còn nguyên tử kia thì sống thêm hàng triệu năm nữa ? Câu trả lời có vẻ nó là hoàn toàn ngẫu nhiên. Chúng ta có thể phát biểu chung chung về thời gian trung bình cần thiết cho một đồng vị nhất định phân rã, hay cần bao lâu cho phân nửa số nguyên tử trong một vật phân rã (chu kì bán rã của nó), nhưng chúng ta chưa bao giờ có thể tiên đoán được hành vi của một nguyên tử nhất định.

Đây là ví dụ đầu tiên mà chúng ta gặp phải của sự ngẫu nhiên không thể tránh được trong các định luật vật lí. Nếu sự ngẫu nhiên này khiến cho bạn bực bội, hẳn bạn là một kẻ nghiêm túc. Câu nói nổi tiếng của Einstein là "… tôi bị thuyết phục rằng Ông ta (Chúa) không chơi trò xúc xắc". Sự không ưa tính ngẫu nhiên của Einstein, và sự liên tưởng của ông về tính quyết định luận với thần thánh, quay lại với quan niệm thời kì Khai sáng xem vũ trụ là một bộ máy khổng lồ chỉ được đưa vào chuyển động ban đầu bởi Đấng sáng tạo. Vật lí học phải được xây dựng lại toàn bộ trong thế kỉ thứ 20 để hợp nhất với tính ngẫu nhiên cơ bản của vật lí, và cuộc cách mạng hiện đại này là chủ đề của quyển thứ sáu trong loạt bài giảng này. Đặc biệt, chúng ta sẽ gác lại sự phát triển của khái niệm chu kì bán ra cho đến lúc ấy.

2.6 Lực hạt nhân yếu; phân rã beta

Mọi quá trình hạt nhân mà chúng ta đã nói tới ở trên đều liên quan tới sự sắp xếp của các proton và neutron, không có sự thay đổi nào ở tổng số proton hay tổng số neutron. Bây giờ hãy xét tỉ lệ neutron và proton trong cơ thể bạn và trong hành tinh Trái Đất: neutron và proton nhiều xấp xỉ bằng nhau trong hạt nhân cacbon và oxygen trong cơ thể bạn, và cũng như trong nikel và sắt cấu thành nên đa phần Trái Đất. Tỉ lệ khoảng chừng 50 – 50. Nhưng, như thảo luận chi tiết hơn trong phần 2.10 không bắt buộc, những nguyên tố hóa học duy nhất được tạo ra với số lượng đáng kể trong Big Bang là hydrogen (khoảng 90%) và helium (khoảng 10%). Nếu vũ trụ sơ khai hầu như không có gì cả ngoài các nguyên tử hydrogen, hạt nhân của chúng chỉ là proton, thì tất cả neutron từ đâu mà có ?

Câu trả lời là có một lực hạt nhân nữa, lực hạt nhân yếu, có khả năng chuyển hóa neutron thành proton và ngược lại. Hai phản ứng có khả năng là:

$$n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu} \text{ [phân hủy electron]}$$

và

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu \text{ [phân hủy positron]}$$

(Cũng còn có một loại thứ ba gọi là bắt electron, trong đó một proton tóm lấy một trong số các electron của nguyên tử và chúng tạo ra một neutron và một neutrino).

Trong khi phân hủy alpha và sự phân hạch chỉ là sự phân chia lại của những hạt đã tồn tại trước đó, thì những phản ứng này liên quan tới sự phân hủy một hạt và hình thành ba hạt mới trước đó không tồn tại.

Ở đây có ba hạt mới bạn chưa bao giờ gặp từ trước tới giờ. Kí hiệu e^+ dành cho phản electron, hạt giống hệt electron về mọi mặt, trừ ở chỗ điện tích của nó là dương chứ không phải âm. Phản electron còn được gọi là positron. Không ai biết tại sao electron thì phổ biến trong vũ trụ, còn phản electron thì lại khan hiếm. Khi một phản electron chạm phải một electron, chúng hủy lẫn nhau, tạo ra tia gamma, và đây là định mệnh của mọi phản electron sinh ra bởi sự phóng xạ tự nhiên trên Trái Đất. Phản electron là một ví dụ của phản vật chất. Một nguyên tử hoàn toàn phản vật chất sẽ gồm các phản proton, phản electron và phản neutron. Mặc dù từng hạt phản vật chất xuất hiện phổ biến trong tự nhiên do sự phóng xạ tự nhiên và tia vũ trụ, nhưng chỉ có một vài nguyên tử hoàn toàn phản hydrogen được tạo ra bằng phương pháp nhân tạo.

Kí hiệu ν dành cho một hạt gọi là neutrino, và $\tilde{\nu}$ có nghĩa là phản neutrino. Neutrino và phản neutrino đều không có điện tích (vì thế mới có tên).

Giờ chúng ta hãy liệt kê bốn lực cơ bản của vật lí:

- lực hấp dẫn
- lực điện từ
- lực hạt nhân mạnh
- lực hạt nhân yếu

Các lực khác mà chúng ta đã biết, như lực ma sát và lực thông thường, đều phát sinh từ tương tác điện từ giữa các nguyên tử, và do đó không được xem là lực cơ bản của vật lí học.

Ví dụ 2. Phân rã của ^{212}Pb

Như một ví dụ, hãy xét đồng vị phóng xạ của chì ^{212}Pb. Nó gồm 82 proton và 130 neutron. Nó phân rã bởi quá trình $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}$. Proton mới sinh được giữ bên trong hạt nhân bằng lực hạt nhân mạnh, nên hạt nhân mới chứa 83 proton và 129 neutron. Có 83 proton khiến nó là nguyên tố bismuth, nên nó sẽ là nguyên tử ^{212}Bi.

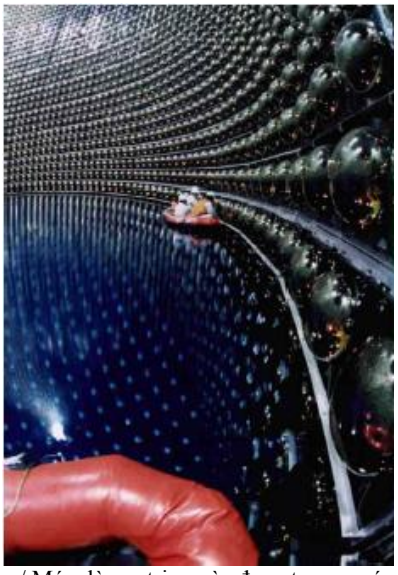
Trong một phản ứng giống như phản ứng này, electron bay ra ở tốc độ cao (thường gần tốc độ ánh sáng), và electron thoát ra là thứ khiến cho một lượng lớn loại phóng xạ này trở nên nguy hiểm. Electron thoát ra là cái đầu tiên mách nước cho các nhà khoa học đầu những năm 1900 về sự tồn tại của loại phóng xạ này. Vì họ không biết các hạt phát ra là electron, nên họ gọi chúng là hạt beta, và loại phân rã phóng xạ này do đó có tên là phân rã beta. Một thuật ngữ sáng sủa hơn nhưng kém thông dụng gọi hai quá trình này là phân hủy electron và phân hủy positron.

Neutrino hay phản neutrino phát ra trong một phản ứng đẹp như thế bỏ qua hết mọi vật chất, vì nó không có điện tích nên nó được miễn trừ lực điện, và nó cũng vẫn tách khỏi tương tác hạt nhân mạnh. Cho dù là nó bay ra thẳng xuống đất, thì hầu như nhất định nó sẽ đi qua toàn bộ Trái Đất mà không tương tác với bất kì nguyên tử nào theo bất kì kiểu nào. Nó sẽ bay ra ngoài không gian xa thẳm mãi mãi. Hành vi của neutrino khiến nó cực kì khó phát hiện, và khi phân rã beta lần đầu tiên được phát hiện, không ai nhận ra neutrino tồn tại. Ngày nay chúng ta biết neutrino mang hết một số năng lượng sinh ra trong phản ứng, nhưng vào lúc đó, người ta thấy hình như năng lượng toàn phần sau phản ứng (không tính đến năng lượng của neutrino) lớn hơn năng lượng toàn phần trước phản ứng, vi phạm sự bảo toàn năng lượng. Các nhà vật lí đã sẵn sàng ném nguyên lí bảo toàn năng lượng ra ngoài cửa sổ như một định luật cơ bản của vật lí khi bằng chứng gián tiếp dẫn họ tới kết luận rằng neutrino tồn tại.

Vấn đề neutrino Mặt Trời

Những hạt neutrino này là gì ? Tại sao trước đây bạn chưa hề nghe nói tới chúng ? Không phải vì chúng khan hiếm – khoảng một tỉ neutrino đi xuyên qua cơ thể bạn trong mỗi micro giây, nhưng cho đến gần đây hầu như người ta chẳng biết gì về chúng. Được tạo ra như một hiệu ứng phụ của phản ứng hạt nhân cung cấp năng lượng cho Mặt Trời và những ngôi sao khác, những mảnh vật chất ma quỷ này được cho là hạt có số lượng nhiều nhất trong vũ trụ. Nhưng chúng tương tác quá yếu với vật chất thông thường nên hầu như toàn bộ neutrino đi vào Trái Đất ở phía bên này sẽ đi ra phía bên kia hành tinh của chúng ta mà không hề bị làm cho chậm lại.

Cái nhìn trộm thật sự của chúng ta vào tính chất của neutrino hay lảng tránh đến từ một máy dò khổng lồ đặt trong một mỏ thiếc ở Nhật Bản, s. Một đội các nhà vật lí quốc tế đã trang bị cho hầm mỏ phủ kín những bộ cảm biến ánh sáng, và rồi lấp đầy toàn bộ mọi thứ trong nước tinh khiết đến mức bạn có thể nhìn xuyên qua nó một trăm mét, so với chỉ vài mét nước vòi chảy bình thường. Dòng neutrino liên tục đi qua 50 triệu lít nước, giống như chúng đã gây ngập lụt mọi thứ khác xung quanh chúng ta, và đa số chúng không bao giờ tương tác với một phân tử nước. Tuy nhiên, một phần trăm rất nhỏ thật sự tự hủy trong nước, và lóe sáng nhỏ xíu mà chúng tạo ra có thể phát hiện bởi các ống chân không có kích thước bằng quả bóng chuyền bãi biển nằm sắp hàng trong hầm mỏ tối đen. Đa số neutrino xung quanh chúng ta đến từ Mặt Trời, nhưng vì những lí do kĩ thuật, loại máy dò kiểu nước này lại nhạy hơn với những neutrino kém phổ biến nhưng có năng lượng tính cao hơn tạo ra khi các tia vũ trụ va chạm với bầu khí quyển của Trái Đất.

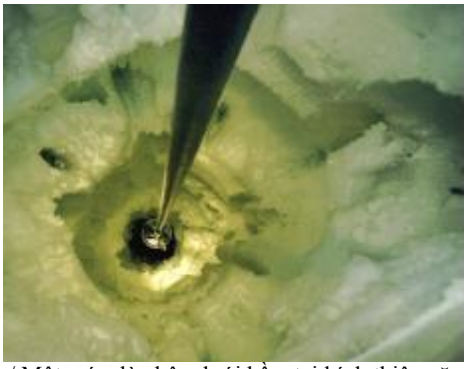


s/ Máy dò neutrino này đang trong quá trình bơm đầy nước siêu tinh khiết.

Neutrino được biết là có ba "mùi", có thể phân biệt chúng bằng những hạt sinh ra khi chúng va chạm với vật chất. Một "neutrino mùi electron" tạo ra một electron bình thường khi chúng phân hủy, còn hai loại kia tạo ra những hạt kì lạ hơn gọi là hạt mu và tau. Hãy nghĩ ba loại neutrino là sôcôla, vani và dâu. Khi bạn mua một nón kem sôcôla, bạn mong rằng nó sẽ giữ vị sôcôla khi bạn ăn nó. Kết quả không mong đợi từ thí nghiệm ở Nhật Bản là một số neutrino thay đổi mùi vị giữa thời gian khi chúng được tạo ra bởi tia vũ trụ và thời điểm khi chúng nhấp nháy chứng tỏ tồn tại trong nước. Trong chừng mực nào đó, nó giống như nón kem sôcôla của bạn đã tự chuyển hóa một cách kì diệu sang vị dâu khi bạn quay lưng sang chỗ khác.

Làm thế nào các nhà vật lí tìm hiểu được sự thay đổi mùi vị đó ? Thí nghiệm đó phát hiện một số neutrino phát sinh trong bầu khí quyển phía trên Nhật Bản, và cũng có nhiều neutrino đến từ những phần xa xôi trên Trái Đất. Một neutrino tạo ra phía trên Đại Tây Dương đến Nhật Bản từ dưới lòng đất, và thí nghiệm đó có thể phân biệt những neutrino xuyên từ dưới lên này với neutrino địa phương xuyên từ trên xuống. Họ tìm thấy hỗn hợp neutrino đến từ phía dưới khác với hỗn hợp neutrino đến từ phía trên, với một số neutrino mùi electron và mùi tau rõ ràng biến đổi thành neutrino mùi mu trong hành trình của chúng xuyên qua Trái Đất. Những neutrino đến từ phía trên không có thời gian để biến đổi mùi trong hành trình ngắn hơn nhiều của chúng.

Điều này được hiểu là bằng chứng cho thấy neutrino liên tục biến đổi tới lui giữa ba mùi. Trên cơ sở lí thuyết, người ta tin rằng một sự dao động như thế chỉ có thể xảy ra nếu như neutrino có khối lượng. Ở đây chỉ có thể có một ước tính thô về khối lượng đó: hình như neutrino có khối lượng đâu đó trong khoảng lân cận một phần tỉ khối lượng của một electron, hay khoảng 10^{-39} kg.



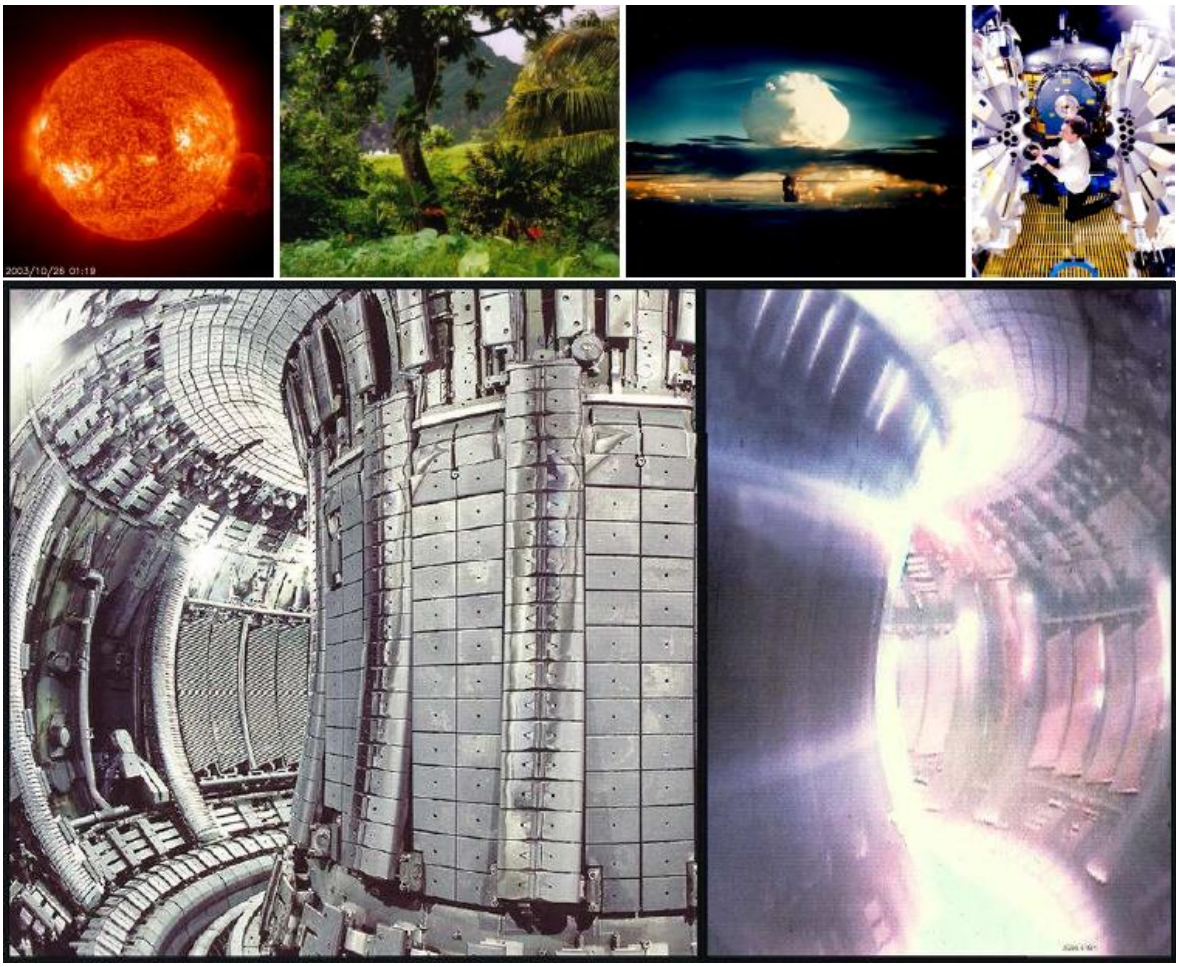
r/ Một máy dò chôn dưới hầm tại kính thiên văn neutrino IceCube ở Nam Cực.

Nếu khối lượng neutrino quá nhỏ như vậy, nó có còn là vật chất không ? Nó có ý nghĩa với các nhà thiên văn học. Neutrino là những hạt duy nhất có thể dùng để khảo sát những hiện tượng nhất định. Ví dụ, chúng là máy dò trực tiếp duy nhất mà chúng ta có để kiểm tra mô hình của chúng ta về lõi của Mặt Trời của chúng ta, nguồn năng lượng cho mọi sự sống trên Trái Đất. Một khi các nhà thiên văn có được sự nắm bắt tốt về những tính chất cơ bản của neutrino, họ có thể bắt đầu nghĩ một cách nghiêm túc việc sử dụng chúng cho mục đích thiên văn học. Như trong năm 2006, khối lượng neutrino đã được xác nhận bằng một thí nghiệm dựa trên máy gia tốc, và những quan sát neutrino đã và đang hoạt động trong vài năm ở Nam Cực, sử dụng khối băng tự nhiên khổng lồ theo kiểu giống như nước dùng trong thí nghiệm ở Nhật Bản.

Câu hỏi thảo luận

A. Trong các phản ứng $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}$ và $p \rightarrow n + e^+ + \nu$, hãy kiểm tra điện tích được bảo toàn. Trong phân rã beta, khi một trong những phản ứng này xảy ra với một neutron hay proton trong một hạt nhân, một hay nhiều tia gamma cũng có thể được phát ra. Hiện tượng này có ảnh hưởng tới sự bảo toàn điện tích ? Có khả năng cho một số electron nữa được giải phóng mà không vi phạm sự bảo toàn điện tích hay không ?

B. Khi một phàn electron và một electron hủy nhau, chúng tạo ra hai tia gamma. Điện tích có được bảo toàn trong phản ứng này ?



u/ 1. Nguồn gốc năng lượng Mặt Trời của chúng ta là sự nhiệt hạch hạt nhân, nên sự nhiệt hạch hạt nhân cũng là nguồn cung cấp năng lượng cho mọi sự sống trên Trái Đất, trong đó có cánh rừng nhiệt đới này ở Fatu-Hiva, 2. 3. Sự giải phóng năng lượng lần đầu tiên bởi sự nhiệt hạch hạt nhân bằng công nghệ của con người là vụ thử Ivy Mike năm 1952 tại Enewetak Atoll. 4. Dãy máy dò tia gamma này có tên là GAMMASPHERE. Khi hoạt động, dãy này đóng lại, và một chùm ion tạo ra bởi một máy gia tốc hạt va chạm với bia tại tâm của nó, tạo ra phản ứng nhiệt hạch hạt nhân. Nghiên cứu tia gamma có thể cung cấp thông tin về cấu trúc của hạt nhân nóng chảy, những trạng thái thường không tìm thấy trong tự nhiên. 5. Sự phân hạch hạt nhân hứa hẹn một nguồn năng lượng sạch, vô tận. Tuy nhiên, mục tiêu của năng lượng nhiệt hạch hạt nhân có thể thực hiện về mặt thương mại vẫn còn khó nắm được, do những khó khăn kĩ thuật, như việc giam giữ bằng từ một khối plasma (khí ion hóa) ở một nhiệt độ và mật độ đủ cao. Hình này cho thấy lò phản ứng thí nghiệm JET, với thiết bị mở phía bên trái, và đang hoạt động ở phía bên phải.

2.7 Sự nhiệt hạch

Như chúng ta đã thấy, hạt nhân nặng có xu hướng tách ra vì mỗi proton bị từng proton khác trong hạt nhân đẩy, nhưng chỉ bị hút bởi những lân cận gần nhất của nó. Hạt nhân vỡ thành hai mảnh, và ngay khi hai mảnh đó cách nhau hơn 1 fm, lực hạt nhân mạnh không còn làm cho hai mảnh hút nhau nữa. Lực đẩy điện khi đó gia tốc chúng, làm cho chúng thu được một lượng lớn động năng. Sự giải phóng động năng này là cái cung cấp năng lượng cho lò phản ứng hạt nhân và bom phân hạch.

Khi đó dường như hạt nhân nhẹ nhất là bền nhất, nhưng không phải như vậy. Hãy so sánh một hạt nhân cực nhẹ như ^{4}He với một hạt nhân nào đó nặng hơn như ^{16}O. Một neutron hay proton trong ^{4}He có thể bị ba hạt kia hút, nhưng trong ^{16}O, có thể có 5 hay 6 láng giềng hút nó. Do đó hạt nhân ^{16}O bền hơn.

Hóa ra những hạt nhân bền nhất đều là những hạt nhân xung quanh nickel và sắt, có khoảng 30 proton và 30 neutron. Giống như một hạt nhân quá nặng để bền vững có thể giải phóng năng lượng bằng cách tách thành hai mảnh gần với kích thước bền nhất, hạt nhân

nhẹ có thể giải phóng năng lượng nếu như bạn gắn chúng lại với nhau tạo ra hạt nhân lớn hơn gần với kích thước bền nhất. Hợp nhất một hạt nhân với hạt nhân khác gọi là sự nhiệt hạch hạt nhân. Nhiệt hạch hạt nhân là cái mang lại năng lượng cho Mặt Trời và những ngôi sao khác.

2.8 Năng lượng hạt nhân và năng lượng liên kết

Theo cách tương tự như phản ứng hóa học có thể phân loại là tỏa nhiệt (giải phóng năng lượng) hay thu nhiệt (yêu cầu năng lượng để phản ứng), các phản ứng hạt nhân có thể giải phóng hoặc sử dụng hết năng lượng. Năng lượng có trong phản ứng hạt nhân lớn hơn rất nhiều lần. Phải đốt hàng ngàn tấn than đá mới tạo ra được năng lượng lớn như năng lượng do một kg nhiên liệu của nhà máy điện hạt nhân tạo ra.

Mặc dù các phản ứng hạt nhân tiêu hao năng lượng (phản ứng thu năng lượng) có thể khởi tạo trong máy gia tốc, trong đó một hạt nhân được cho đâm vào một hạt nhân khác ở tốc độ cao, nhưng chúng không xảy ra trong tự nhiên, không xảy ra cả trong Mặt Trời. Đơn giản là vì lượng động năng cần thiết không sẵn có.

Để tìm lượng năng lượng tiêu hao hoặc giải phóng trong một phản ứng hạt nhân, bạn cần phải biết bao nhiêu năng lượng tương tác hạt nhân, U_{hn}, được dự trữ hoặc giải phóng. Các nhà thực nghiệm đã xác định được lượng năng lượng hạt nhân dự trữ trong hạt nhân của mỗi nguyên tố bền, cũng như nhiều nguyên tố không bền. Đây là lượng công cơ học cần thiết để tách hạt nhân ra thành từng neutron và proton của nó, và ngày nay gọi là năng lượng liên kết hạt nhân.

Ví dụ 3. Phản ứng xảy ra trong Mặt Trời

Mặt Trời sản sinh năng lượng của nó qua một chuỗi phản ứng nhiệt hạch hạt nhân. Một trong các phản ứng đó là

$$^1H + {}^2H \rightarrow {}^3He + \gamma$$

Năng lượng thừa hầu như đều được mang bởi tia gamma (chứ không phải bởi động năng của nguyên tử ^{3}He). Năng lượng liên kết tính bằng đơn vị pJ (pico joule) là

^{1}H 0 pJ

^{2}H 0,35593 pJ

^{3}He 1,23489 pJ

Năng lượng hạt nhân toàn phần ban đầu là 0 pJ + 0,35593 pJ, và năng lượng hạt nhân cuối cùng là 1,23489 pJ, nên theo sự bảo toàn năng lượng, tia gamma phải mang khỏi năng lượng 0,87896 pJ. Tia gamma khi đó bị Mặt Trời hấp thụ và chuyển hóa thành nhiệt.

♥ Tại sao năng lượng liên kết của ^{1}H chính xác bằng không ?

Sự chuyển hóa khối lượng thành năng lượng và năng lượng thành khối lượng

Nếu bạn cộng khối lượng của ba hạt sinh ra trong phản ứng $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}$, bạn sẽ thấy chúng không bằng với khối lượng của neutron, nên khối lượng không được bảo toàn. Một ví dụ còn hiển nhiên hơn nữa là sự hủy của một electron với một positron, $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$, trong đó khối lượng ban đầu bị triệt tiêu hoàn toàn, vì tia gamma không có khối lượng. Sự không bảo toàn khối lượng không chỉ là một tính chất của phản ứng hạt nhân. Nó cũng xảy ra trong các phản ứng hóa học, nhưng sự thay đổi khối lượng quá nhỏ để phát hiện với những chiếc cân thông thường trong phòng thí nghiệm.

Lí do khối lượng không bảo toàn là khối lượng đã chuyển hóa thành năng lượng, theo phương trình nổi tiếng của Einstein, $E = mc^2$, trong đó c là tốc độ ánh sáng. Trong phản ứng $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$, chẳng hạn, tưởng tượng cho đơn giản là electron và positron đang chuyển động rất chậm khi chúng va chạm, nên chúng không có năng lượng khởi đầu nào đáng kể. Chúng ta đang bắt đầu với khối lượng và không có năng lượng, và kết thúc với hai tia gamma có năng lượng nhưng không có khối lượng. Phương trình $E = mc^2$ của Einstein cho chúng ta biết hệ số chuyển đổi giữa khối lượng và năng lượng bằng với bình phương của tốc độ ánh sáng. Vì c là một số rất lớn, nên năng lượng

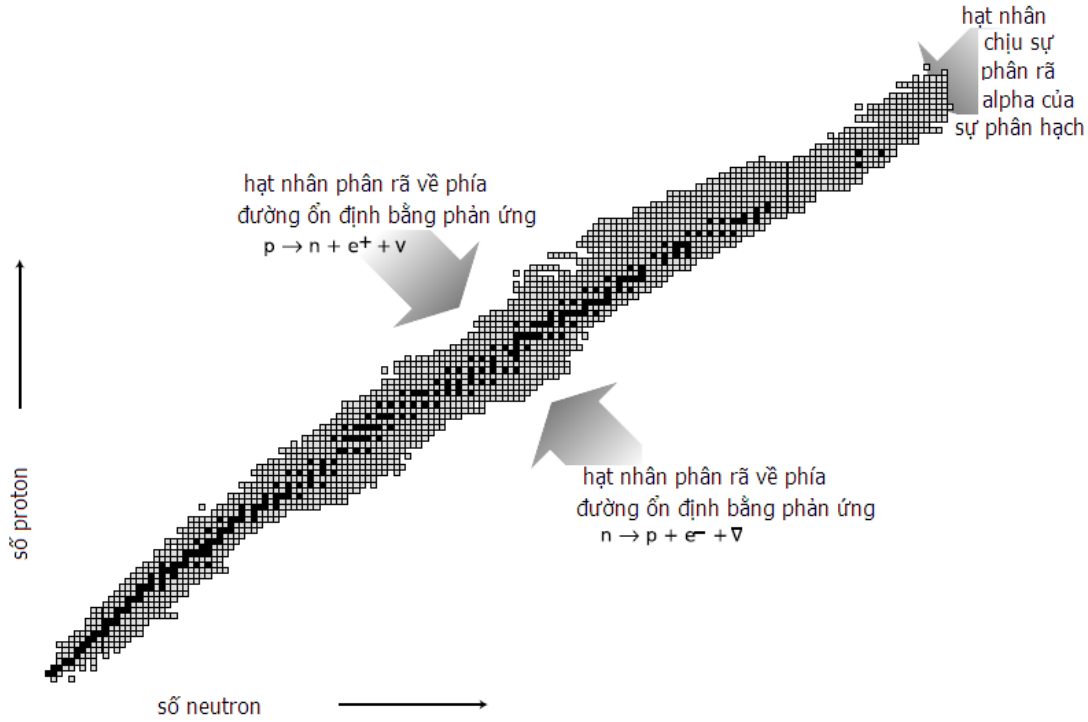
tiêu hao hoặc giải phóng bởi một phản ứng hóa học chỉ lộ ra phần thay đổi nhỏ xíu ở khối lượng. Nhưng trong phản ứng hạt nhân, phản ứng có một lượng lớn năng lượng, sự thay đổi khối lượng có thể nhiều lên tới một phần ngàn. Lưu ý là trong ngữ cảnh này, c không nhất thiết là tốc độ của hạt nào. Chúng ta chỉ sử dụng giá trị bằng số của nó làm hệ số chuyển đổi. Cũng nên lưu ý là $E = mc^2$ không có nghĩa là một vật có khối lượng m có động năng bằng với mc^2, mà năng lượng mô tả bởi phương trình $E = mc^2$ là năng lượng bạn có thể giải phóng nếu bạn phá hủy một hạt và chuyển toàn bộ khối lượng của nó thành năng lượng, và năng lượng đó sẽ cộng thêm với động năng hay thế năng mà vật có.

Bây giờ có phải chúng ta đã bị lừa lấy mất hai định luật bảo toàn hoàn hảo một cách tuyệt vời, định luật bảo toàn khối lượng và định luật bảo toàn năng lượng? Không, theo Einstein, đại lượng bảo toàn là $E + mc^2$, không phải riêng E cũng không phải riêng m. Đại lượng $E + mc^2$ được gọi là khối lượng-năng lượng, và từ trước đến nay không hề có sự vi phạm nào đối với định luật bảo toàn khối lượng-năng lượng được quan sát thấy. Trong đa số những tình huống thực tế, hoàn toàn có thể xem khối lượng và năng lượng là những đại lượng bảo toàn độc lập.

Ngày nay, thật dễ dàng giải thích tại sao các proton đơn độc (hạt nhân hydrogen) được tìm thấy trong tự nhiên, nhưng neutron người ta chỉ gặp ở bên trong hạt nhân, chứ không thấy riêng lẻ. Trong quá trình $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}$, tổng khối lượng sau cùng nhỏ hơn khối lượng neutron, nên khối lượng đã chuyển hóa thành năng lượng. Trong phân hủy beta của proton, $p \rightarrow n + e^+ + \nu$, khối lượng sau cùng lớn hơn khối lượng ban đầu, nên cần phải cung cấp một số năng lượng để chuyển hóa thành khối lượng. Một proton nằm trong một nguyên tử hydrogen không thể phân hủy, vì nó không có nguồn cấp năng lượng. Chỉ những proton nằm bên trong hạt nhân có thể phân hủy, và chỉ khi nào sự chênh lệch thế năng giữa hạt nhân ban đầu và hạt nhân mới gây ra sự giải phóng năng lượng. Nhưng bất kì neutron đơn độc nào được tạo ra trong những phản ứng tự nhiên hoặc nhân tạo đều sẽ phân hủy trong vòng khoảng vài giây, giải phóng một số năng lượng.

Phương trình $E = mc^2$ xuất hiện tự nhiên như là một phần của thuyết tương đối đặc biệt của Einstein, chúng ta sẽ không nghiên cứu lí thuyết đó lúc này. Vấn đề chủ yếu ở đây chỉ là làm sáng tỏ xem khối lượng đã biến đi đâu trong một số phản ứng hạt nhân mà chúng ta nói tới.

Hình v là một cách súc tích biểu diễn sự đa dạng của hạt nhân. Mỗi ô biểu diễn một số proton và neutron nhất định. Ô màu đen là hạt nhân bền, tức là cần cung cấp năng lượng để làm biến đổi nó thành hạt nhân khác. Ô màu xám là toàn bộ những hạt nhân không bền đã được nghiên cứu bằng thực nghiệm. Một số hạt nhân này tồn tại trung bình hàng tỉ năm trước khi phân rã và đã được tìm thấy trong tự nhiên, nhưng một số có thời gian sống trung bình ngắn hơn nhiều, và chỉ có thể tạo ra và nghiên cứu trong phòng thí nghiệm.



v/ Những hạt nhân đã biết, biểu diễn trên biểu đồ số proton theo số neutron. Lưu ý hai hạt nhân ở hàng dưới cùng có không proton. Một hạt chỉ là một neutron đơn độc. Còn hạt kia là một cụm bốn neutron. "Tetraneutron" này đã được báo cáo, gây bất ngờ, là một hệ liên kết thu được từ một thí nghiệm năm 2002. Kết quả đó có thể gây tranh cãi. Nếu đúng, nó sẽ ngụ ý sự tồn tại của một loại vật chất từ trước đến nay không biết, đó là giọt neutron, chúng ta có thể nghĩ đó là một nguyên tử không có proton hay electron nào.

Đường cong mà các hạt nhân bền nằm dọc theo đó gọi là đường cong ổn định. Hạt nhân nằm dọc theo đường này có tỉ lệ neutron trên proton bền vững nhất. Đối với hạt nhân nhẹ, sự pha trộn bền nhất là khoảng 50 – 50, nhưng chúng ta có thể thấy những hạt nhân nặng bền có số neutron nhiều hơn số proton hai hoặc ba lần. Đấy là do lực đẩy điện của tất cả các proton trong hạt nhân nặng cộng lại thành một lực mạnh có xu hướng làm nó vỡ ra. Sự có mặt của một số lượng lớn neutron làm tăng khoảng cách giữa các proton, và cũng làm tăng số lực hút do lực hạt nhân mạnh.

2.9 Tác dụng sinh học của bức xạ ion hóa

Là một người giảng dạy khoa học, tôi cảm thấy nản lòng khi không tìm thấy ở đâu trong số lượng tạp chí khổng lồ đưa tin về thảm họa Chernobyl thật sự đưa ra sự trình bày bằng số về lượng bức xạ mà người ta phải hứng chịu. Bất kì ai có khả năng hiểu được những thống kê thể thao hay báo cáo thời tiết cũng đều phải có khả năng hiểu được những phép đo như thế, miễn là một cái gì đó giống như đoạn thanh minh sau được xen vào đâu đó trong bài báo đó:

Sự phơi bức xạ được đo bằng đơn vị milirem. Một người trung bình hứng chịu khoảng 200 milirem mỗi năm từ các nguồn phóng xạ tự nhiên.

Với bối cảnh này, người ta có thể đi đến kết luận có tính am hiểu dựa trên những phát biểu như "Trẻ em ở Phần Lan nhận lượng phóng xạ trung bình là ___ milirem trên mức phóng xạ tự nhiên do thảm họa Cernobyl".

Một milirem, hay 1mrem, tất nhiên là một phần ngàn của một rem, nhưng một rem là gì ? Nó đo lượng năng lượng/kg gởi lên cơ thể bởi bức xạ ion hóa, nhân cho một "hệ số chất lượng" để tính sự nguy hại cho sức khỏe gây ra bởi bức xạ alpha, beta, gamma, neutron hay những loại bức xạ khác. Chỉ có bức xạ ion hóa được tính đến, vì bức xạ không

ion hóa chỉ đơn giản làm nóng cơ thể chứ không giết chết tế bào hay làm biến đổi DNA. Chẳng hạn, hạt alpha thường chuyển động quá nhanh nên động năng của chúng đủ để làm ion hóa hàng ngàn nguyên tử, nhưng cũng có thể có hạt alpha chuyển động quá chậm nên nó sẽ không có đủ động năng để làm ion hóa cả một nguyên tử thôi.

w/ Một ngôi nhà bị bỏ hoang ở gần Chernobyl.

x/ Bản đồ biểu diễn mức bức xạ ở gần nơi xảy ra thảm họa Chernobyl. Tại ranh giới của những khu vực bị ô nhiễm nặng nhất (vùng màu đỏ), người ta phải hứng chịu khoảng 1300 milirem/năm, hay gấp khoảng 4 lần mức phóng xạ tự nhiên. Trong khu vực màu hồng, bức xạ vẫn còn dày đặc, sự phơi bức xạ có thể so sánh với mức tự nhiên tìm thấy ở một thành phố có độ cao trên mực nước biển lớn như thành phố Denver.

Tuy nhiều người đã quen với hình ảnh về những kẻ khổng lồ dị thường, nhưng không có khả năng cho một động vật đa bào "biến thái" như thế. Trong đa số trường hợp, một hạt của bức xạ ion hóa sẽ không chạm tới DNA, và cho dù nó có chạm tới, thì nó sẽ chỉ ảnh hưởng tới DNA của một tế bào đơn độc, chứ không phải mọi tế bào trong cơ thể động vật. Thông thường, tế bào đó dễ dàng bị tiêu diệt, vì DNA đó không thể đảm nhận chức năng thích hợp nữa. Tuy nhiên, đôi khi DNA bị biến đổi tạo nên tế bào ung thư. Chẳng hạn, ung thư da có thể do ánh sáng tử ngoại chạm tới tế bào da trên cơ thể người tắm nắng gây ra. Nếu tế bào đó bị ung thư và bắt đầu sinh sôi không có kiểm soát, người bệnh sẽ chết cùng với ung bướu hai mươi năm sau đó.

Ngoài ung thư, hiệu ứng kịch tính duy nhất khác nữa có thể gây ra từ sự biến đổi DNA của một tế bào là nếu tế bào đó là tinh trùng hay trứng, thì nó có thể gây ra chứng vô sinh hoặc trẻ dị dạng. Đàn ông tương đối miễn dịch với những tổn hại sinh sản do bức xạ gây ra, vì tế bào tinh trùng của họ thường xuyên được thay thế. Phụ nữ dễ bị vô sinh hơn do họ giữ cùng một bộ buồng trứng trong suốt quãng đời họ sống.

Một liều lượng 500.000 mrem chiếu lên toàn cơ thể người sẽ giết chết người đó trong vòng một tuần hay tương đương khoảng thời gian đó. Thật may mắn, chỉ có một số ít người đã từng bị phơi đến mức độ đó: một nhà khoa học làm việc ở Dự án Mahattan, một số nạn nhân của vụ nổ Nagasaki và Hiroshima, và 31 công nhân tại Chernobyl. Cái chết xảy ra do hàng loạt tế bào bị tiêu diệt, nhất là tế bào sản xuất máu của tủy xương.

Những mức thấp hơn, vào cỡ 100.000 mrem giáng lên một số người tại Nagasaki và Hiroshima. Không có triệu chứng cấp tính nào gây ra từ mức độ hứng xạ này, nhưng những loại ung thư nhất định đặc biệt phổ biến ở những người này. Ban đầu người ta cho rằng bức xạ gây ra nhiều đột biến mang đến những dị tật khi sinh, nhưng rất ít tác dụng di truyền như thế được quan sát thấy.

Người ta đã mất rất nhiều thời gian tranh luận về ảnh hưởng của những mức độ rất thấp của bức xạ ion hóa. Tia X dùng trong y khoa, chẳng hạn, có thể gây ra liều lượng phóng xạ vào cỡ 100 mrem, tức là thấp hơn hai lần mức phóng xạ nền bình thường. Liều lượng phóng xạ vượt quá mức nền trung bình như thế có thể nhận được ở những người sống ở nơi có độ cao trên mực nước biển lớn, hay những người có sự tập trung cao khí radon trong nhà họ. Thật không may (hay may mắn, tùy theo cách bạn nhìn nhận nó), mức độ rủi ro do ung thư hay dị tật khi sinh có nguyên nhân từ những mức độ hứng xạ này là cực kì nhỏ, và do đó hầu như không thể đo được. Như đối với nhiều hóa chất bị nghi ngờ là gây ung thư, phương pháp thực tế duy nhất ước tính sự rủi ro là cho các con vật trong phòng thí nghiệm hứng liều lượng phóng xạ lớn hơn nhiều bậc, và rồi giả sử sự nguy hại cho sức khỏe tỉ lệ trực tiếp với liều lượng phóng xạ. Dưới những giả định này, sự rủi ro do tia X nha sĩ sử dụng hay radon trong tường nhà là không đáng kể ở mức độ cá nhân, và chỉ đáng kể dưới dạng sự tăng một chút tỉ lệ ung thư trong dân cư. Là một vấn đề của chính sách xã hội, sự hứng chịu bức xạ quá mức không phải là một vấn đề sức khỏe chung quá to tát so với tai nạn giao thông hay tệ hút thuốc lá.

Câu hỏi thảo luận

A. Có phải hệ số chất lượng đối với neutrino là rất nhỏ, vì chúng hầu như không tương tác với cơ thể bạn ?

B. Có phải một nguồn phát hạt alpha có thể gây ra những loại ung thư khác nhau tùy thuộc vào nguồn đó ở bên ngoài cơ thể hay nằm trong máu người bị nhiễm ? Còn nguồn phát tia gamma thì sao ?

2.10 Sự hình thành các nguyên tố

Sự hình thành hydrogen và helium trong Big Bang

Có phải mọi nguyên tố hóa học cấu thành nên chúng ta đều có nguồn gốc từ trong Big Bang ? Nhiệt độ trong những micro giây đầu tiên sau Big Bang là quá cao nên các nguyên tử và hạt nhân nói chung không thể giữ lại với nhau. Sau khi mọi thứ lạnh xuống đủ cho nguyên tử và hạt nhân tồn tại, có một thời kì khoảng chừng ba phút trong đó nhiệt độ và mật độ đủ cao cho sự nhiệt hạch xảy ra, nhưng không quá cao nên các nguyên tử có thể giữ lại với nhau. Chúng ta có được sự hiểu biết tốt và tường tận về các định luật vật lí áp dụng dưới những điều kiện này, nên các nhà lí thuyết có thể nói quả quyết rằng nguyên tố duy nhất nặng hơn hydrogen được tạo ra với số lượng đáng kể là helium.

Chúng ta là bụi sao

Trong trường hợp đó, mọi nguyên tố hóa học có từ đâu ? Các nhà thiên văn đã tiến gần tới câu trả lời. Bằng cách nghiên cứu sự kết hợp của những bước sóng ánh sáng, gọi là quang phổ, phát ra từ những ngôi sao khác nhau, họ đã có thể xác định loại nguyên tử mà chúng chứa. (Chúng ta sẽ nói nhiều hơn về quang phổ ở phần cuối cuốn sách này). Họ nhận thấy các sao chia ra làm hai loại. Một loại hầu như 100% là hydrogen và helium, còn loại kia chứa 99% hydrogen và helium và 1% các nguyên tố khác. Họ giải thích đây là hai thế hệ sao. Thế hệ thứ nhất hình thành từ những đám khí còn mới nguyên từ Big Bang, và thành phần của chúng phản ánh thành phần của vũ trụ sơ khai. Phản ứng nhiệt hạch hạt nhân, mà nhờ đó chúng chiếu

y/ Tinh vân Con Cua là tàn dư của một vụ nổ sao siêu mới. Hầu như mọi nguyên tố cấu thành nên hành tinh của chúng ta có nguồn gốc từ những vụ nổ như thế.

sáng, chỉ làm tăng tỉ lệ tương đối của helium so với hydrogen, chứ không tạo ra bất kì nguyên tố nặng hơn nào.

Tuy nhiên, những thành viên thuộc thế hệ thứ nhất mà chúng ta thấy ngày nay chỉ là những thành viên đã sống một thời gian lâu dài. Những ngôi sao nhỏ bủn xỉn với nhiên liệu của chúng hơn so với những ngôi sao lớn, chúng có thời gian sống ngắn. Những ngôi sao lớn thuộc thế hệ thứ nhất vừa hoàn tất cuộc đời của chúng. Gần cuối quãng thời gian sống của nó, ngôi sao cạn kiệt hydrogen và chịu một loạt sự tái cấu trúc dữ dội và ngoạn mục khi nó làm tan chảy những nguyên tố ngày càng nặng hơn. Những ngôi sao rất lớn kết thúc chuỗi sự kiện này bằng sự bùng nổ sao siêu mới, trong đó một số vật chất của chúng bị ném vào không gian, còn phần còn lại thì đổ sập lại thành một đối tượng kì lạ, như lỗ đen hay sao neutron.

Thế hệ sau thứ hai, trong số đó Mặt Trời của chúng ta là một ví dụ, cô đặc từ những đám mây khí đã được làm giàu thêm những nguyên tố nặng do sự bùng nổ sao siêu mới. Đó là những nguyên tố nặng cấu tạo nên hành tinh của chúng ta và cơ thể của chúng ta.

Sự tổng hợp nhân tạo các nguyên tố nặng

z/ Cấu tạo của máy gia tốc UNILAC ở Đức, một trong những máy được sử dụng cho thí nghiệm tạo ra những nguyên tố rất nặng. Trong một thí nghiệm như thế, sản phẩm nhiệt hạch nảy trở lại qua một dụng cụ gọi là SHIP (không có trong hình) tách chúng ra dựa trên tỉ số điện tích trên khối lượng của chúng – về cơ bản, nó chỉ là một mẫu quy mô lớn của thiết bị của Thomson. Một thí nghiệm tiêu biểu hoạt động trong vài tháng, và sản phẩm của hàng tỉ phản ứng nhiệt hạch sinh ra trong thời gian này, chỉ một hoặc hai có thể mang lại sự sản sinh các nguyên tố siêu nặng. Trong phần còn lại, hạt nhân tan chảy vỡ tan ngay tức thì. SHIP được dùng để nhận dạng số lượng nhỏ phản ứng "tốt" và tách chúng ra khỏi toàn cảnh dữ dội này.

Các nguyên tố lên tới uranium, số nguyên tử 92, được tạo ra bởi những quá trình thiên văn này. Cao hơn số nguyên tử đó, lực đẩy điện của các proton tăng lên dẫn tới chu kì bán rã càng ngắn lại. Cho dù một sao siêu mới một tỉ năm trước đây thật sự đã tạo ra một số lượng của một nguyên tố như berkelium, số nguyên tử 97, nhưng nó không còn gì trong lớp vỏ Trái Đất ngày nay. Những nguyên tố nặng nhất đều được tạo ra bằng những phản ứng nhiệt hạch nhân tạo trong các máy gia tốc. Như vào năm 2006, nguyên tố nặng nhất được tạo ra là nguyên tố 116. [Một khẳng định trước đó đã tạo ra được nguyên tố 116 do một nhóm tại Berbeley công bố hóa ra là một trò gian lận khoa học, nhưng nguyên tố đó sau đó đã được tạo ra bởi một nhóm khác, tại Dubna, Nga].

Mặc dù việc tạo ra một nguyên tố mới, tức là một nguyên tử có số proton mới lạ, về phương diện lịch sử đã được xem là một thành tựu đầy quyến rũ, nhưng đối với nhà vật lí hạt nhân, việc tạo ra một nguyên tử có số neutron cho đến nay không ai thấy cũng có tầm quan trọng không kém. Số neutron lớn nhất đạt được từ trước đến nay là 179. Một mục tiêu trêu ngươi của loại nghiên cứu này là tiên đoán lí thuyết có thể có một ốc đảo ổn định nằm ngoài chóp biểu đồ hạt nhân đã được khảo sát tỉ mỉ trước đây, đã nói tới trong phần 2.8. Giống hệt như số lượng electron nhất định đã đưa tới sự ổn định hóa tính của các chất khí trơ (helium, neon, argon…), số lượng neutron và proton nhất định cũng đưa tới sự sắp xếp ổn định đặc biệt của các quỹ đạo. Những tính toán lùi lại thập niên 1960 cho biết có thể có hạt nhân tương đối bền có khoảng 114 proton và 184 neutron. Các đồng vị của nguyên tố 114 và 116 đã được tạo ra trước đây có chu kì bán ra trong ngưỡng

giây hoặc mili giây. Giá trị này không thể xem là rất lâu, nhưng thời gian sống trong ngưỡng micro giây thì điển hình hơn đối với các nguyên tố siêu nặng đã được khám phá trước đây. Còn có suy đoán cho rằng những đồng vị siêu nặng nhất định sẽ đủ bền để được tạo ra với số lượng chẳng hạn cân được hay dùng trong các phản ứng hóa học.

Tóm tắt chương 2

Từ khóa chọn lọc

hạt alpha ……..	một dạng phóng xạ gồm các hạt nhân helium
hạt beta ……	một dạng phóng xạ gồm các electron
tia gamma ……...	một dạng phóng xạ gồm một dạng ánh sáng tần số rất cao
proton ……..	một hạt tích điện dương, một trong các loại cấu thành nên hạt nhân
neutron ……	một hạt không tích điện, một loại khác cấu thành nên hạt nhân
đồng vị ……	một trong những biến thể khả dĩ của nguyên tử của một nguyên tố cho trước, có một số lượng neutron nhất định
số nguyên tử ……...	số proton trong hạt nhân của một nguyên tử, xác định nó là nguyên tố gì
khối lượng nguyên tử …	khối lượng của một nguyên tử
số khối ……	số proton cộng với số neutron trong một hạt nhân, xấp xỉ tỉ lệ với khối lượng nguyên tử của nó
lực hạt nhân mạnh …….	lực giữ hạt nhân lại với nhau chống lại lực đẩy điện
lực hạt nhân yếu ……	lực gây ra phân rã beta
phân rã beta ……	phân rã phóng xạ của một hạt nhân qua phản ứng $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}$, hay $n \rightarrow p + e^+ + \nu$; gọi như thế vì một electron hay phản electron cũng còn gọi là hạt beta
phân rã alpha ……..	phân rã phóng xạ của một hạt nhân thông qua sự phát ra một hạt alpha
phân hạch ……	phân rã phóng xạ của một hạt nhân bằng cách tách thành hai mảnh
nhiệt hạch ……..	phản ứng hạt nhân trong đó hai hạt nhân gắn chặt với nhau hình thành nên một hạt nhân lớn hơn
milirem ……..	đơn vị đo độ hứng phóng xạ của một người

Kí hiệu

e^- ..... electron

e^+ ..... phản electron, giống như electron nhưng có điện tích dương

n ..... neutron

p ..... proton

ν ..... neutrino

$\tilde{\nu}$ ..... phản neutrino

Kí hiệu và thuật ngữ khác

Z ..... số nguyên tử (số proton trong một hạt nhân)

N ..... số neutron trong một hạt nhân

A ..... số khối ($N + Z$)

Tóm tắt

Rutherford và Marsden quan sát thấy một số hạt alpha từ một chùm hạt va chạm với một lá vàng mỏng nảy trở lại ở những góc lên tới 180 độ. Điều này không thể giải thích theo mô hình bánh bông lan rắc nho được ưa chuộng khi ấy, và đưa đến việc chấp nhận mẫu hành tinh nguyên tử, trong đó các electron quay tròn xung quanh một hạt nhân nhỏ xíu, tích điện dương. Các thí nghiệm thêm nữa cho thấy chính bản thân hạt nhân là một cụm proton tích điện dương và neutron không mang điện.

Hạt nhân phóng xạ là hạt nhân có khả năng giải phóng năng lượng. Đa số loại phóng xạ phổ biến là phân rã alpha (phát ra hạt nhân helium), phân rã beta (sự chuyển hóa neutron thành proton và ngược lại), và phân rã gamma (phát ra loại ánh sáng tần số rất cao). Các sao được cấp năng lượng bằng phản ứng nhiệt hạch hạt nhân, trong đó hai hạt nhân nhẹ va chạm và hình thành nên một hạt nhân lớn hơn, đồng thời giải phóng năng lượng.

Sự hứng chịu của con người trước bức xạ ion hóa được đo bằng đơn vị milirem. Một người điển hình phải hứng chịu khoảng 200 mrem bức xạ nền tự nhiên/năm.

Tìm đọc quyển *Ba phút đầu tiên* của Steven Weinberg. Cuốn sách này mô tả ba phút đầu tiên của sự tồn tại của vũ trụ.

Bài tập

1. Một nguyên tử helium tự sắp xếp nó như thế này tại một thời điểm. Hãy tìm hướng và độ lớn của lực tác dụng lên electron phía bên phải. Hai proton trong hạt nhân quá gần nhau (~ 1 fm) nên bạn có thể xem chúng nằm chồng lên nhau.

2. Nguyên tử helium của bài toán 1 có một số trải nghiệm mới, đi qua một số biến đổi sự sống, và sau đó tự sắp xếp theo cấu hình như trong hình. Đâu là hướng và độ lớn của lực tác dụng lên electron ở dưới ? (Vẽ đường kéo dài để làm sáng tỏ cách bạn sử dụng góc để xác định hướng).

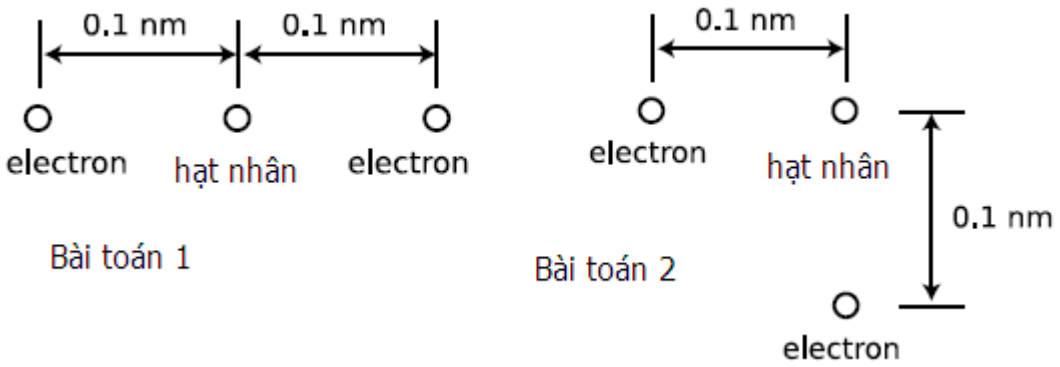
3. Giả sử bạn giữ hai tay của mình ở phía trước mặt, cách nhau 10 cm.

(a) Hãy ước tính tổng số electron trong mỗi tay.

(b) Hãy ước tính lực đẩy tổng cộng của tất cả electron trong một tay tác dụng lên tất cả electron trong tay kia.

(c) Tại sao bạn không cảm nhận được hai tay bạn đang đẩy lẫn nhau ?

(d) Hãy ước tính bao nhiêu điện tích của một proton có thể khác về độ lớn với điện tích của một electron mà không tạo ra một lực đáng chú ý nào giữa hai tay bạn.



4. Giả sử một proton trong hạt nhân chì đi lệch khỏi bề mặt hạt nhân đó, và chịu một lực hạt nhân mạnh khoảng 8 kN từ những neutron và proton lân cận hút nó trở vào. Hãy so sánh giá trị số này với lực đẩy điện từ những proton khác, và xác nhận lực tổng hợp là lực hút. Hạt nhân chì có dạng rất gần hình cầu, và có bán kính khoảng 6,5 fm.

5. Những hạt hạ nguyên tử tên là muon xử sự giống hệt electron, ngoại trừ khối lượng muon lớn hơn 206,77 lần. Muon liên tục bắn phá Trái Đất, là một phần của dòng hạt đến từ không gian, gọi là tia vũ trụ. Khi một muon va chạm với một nguyên tử, nó có thể thay thế một trong các electron của nó. Nếu nguyên tử đó là nguyên tử hydrogen, thì muon có quỹ đạo trung bình gần proton hơn 206,77 lần so với electron bị bắn ra. Hỏi lực điện chịu bởi muon lớn hơn lực điện chịu bởi electron trước đó bao nhiêu lần ?

6. Quá trình hạt nhân của phân rã beta bằng cách bắt electron đã được mô tả trong phần chú thích ở mục 2.6. Phản ứng đó là $p + e^- \rightarrow n + \nu$.

(a) Hãy chỉ ra điện tích được bảo toàn trong phản ứng này.

(b) Sự bảo toàn giữa năng lượng và khối lượng đã được nói tới trong phần 2.8. Dựa trên những ý tưởng này, hãy giải thích tại sao sự bắt electron không xảy ra trong nguyên tử hydrogen. (Nếu nó xảy ra, vật chất sẽ không tồn tại!)

7. ^{234}Pu phân rã hoặc là bằng phân hủy electron, hoặc là bằng phân hủy alpha. (Một hạt nhân ^{234}Pu cho trước có thể phân rã theo một trong hai kiểu, nó là ngẫu nhiên) Các đồng vị tạo ra dưới dạng sản phẩm của hai mode phân rã này là gì?

Chương 3
MẠCH ĐIỆN, PHẦN I

Thưa bà, thế nào là một đứa trẻ ngoan ?

Micheal Faraday, khi trả lời nữ hoàng Victoria về những dụng cụ điện trong phòng thí nghiệm của ông dùng để làm gì.

Cách đây vài năm, vợ tôi và tôi mua một căn nhà có cá tính. Cá tính là một cơ chế sống còn theo xu thế phát triển nhà, nhằm thuyết phục người ta đồng ý trả khoản tiền thế chấp lớn hơn số tiền họ có thể hình dung ra lúc ban đầu. Dẫu sao, một trong những đặc điểm mang lại cá tính cho ngôi nhà của chúng tôi là nó có, xây hẳn vào trong tường nhà, một bộ ba máy chơi pachinko. Những dụng cụ cờ bạc kiểu Nhật Bản này thuộc loại giống như máy chơi pinball thẳng đứng. (Những bài báo hợp pháp chúng tôi mua từ tay những người bán báo vội vã cho chúng tôi biết chúng "chỉ nhằm mục đích tiêu khiển") Thật không may, chỉ một trong ba máy là hoạt động khi chúng tôi chuyển đến ở, và nó sớm "tiêu tùng" trên tay chúng tôi. Đang thành một kẻ nghiện pachinko, tôi quyết định sửa nó, nhưng nói thì dễ hơn làm. Bên trong nó là cả một cơ chế Rube Goldsberg thực sự gồm các đòn bẩy, móc khóa, lò xo, và đường trượt. Tính tự cao đã ăn sâu trong máu của tôi, cùng với trình độ tiến sĩ vật lí của mình, cho tôi cảm giác nhất định sẽ thành công, và sau cùng nó đã mang lại sự thất bại hoàn toàn làm tôi mất hết tinh thần.

Ngẫm lại thất bại của mình, tôi nhận ra mức độ phức tạp của các dụng cụ cơ giới mà tôi sử dụng từ ngày này sang ngày khác. Ngoài chiếc xe hơi và cái saxophone của tôi, mọi dụng cụ công nghệ trong hệ thống yểm trợ cuộc sống hiện đại của chúng là đồ điện chứ không phải đồ cơ.

3.1 Dòng điện

Thống nhất mọi loại điện

Chúng ta bị vây quanh bởi những thứ mà chúng ta *nghe nói* là "điện", nhưng rõ ràng còn lâu chúng mới có chung thứ để xác nhận là chung nhóm với nhau. Có mối quan hệ gì giữa cách thức những miếng tất dính vào nhau và cách thức pin thắp sáng bóng đèn ? Chúng ta nghe nói tới cả con cá chình điện và não của mình vì lí do gì đó vốn tự nhiên có tính chất điện, nhưng thật ra chúng có cái gì chung ?

Nhà vật lí học người Anh Micheal Faraday (1791 – 1867) đã bắt tay vào giải quyết vấn đề này. Ông nghiên cứu điện từ nhiều nguồn đa dạng – trong đó có cả cá chình điện! – xem chúng có tạo ra những tác dụng giống nhau không, ví dụ như va chạm và tia lửa điện,

lực hút và lực đẩy. Chẳng hạn, "nung nóng" là cách dây tóc bóng đèn đạt tới đủ nóng để rực lên và phát ra ánh sáng. Cảm ứng từ là một hiệu ứng do chính Faraday khám phá liên kết điện học và từ học. Chúng ta sẽ không nghiên cứu hiệu ứng này, nó là cơ sở cho các máy phát điện, chi tiết sẽ được nói tới trong phần sau của cuốn sách này.

nguồn	kết quả			
	sốc	tia lửa	hút và đẩy	nóng lên
cọ xát	✓	✓	✓	✓
pin	✓	✓	✓	✓
động vật	✓	✓	(✓)	✓
cảm ứng từ	✓	✓	✓	✓

Bảng trên trình bày tóm tắt một số kết quả của Faraday. Các dấu kiểm cho biết Faraday hay những người đương thời của ông có thể xác nhận một nguồn điện nhất định có khả năng tạo ra những hiệu ứng nhất định. (Họ rõ ràng đã thất bại trong việc chứng minh lực hút và đẩy giữa những vật tích điện bằng cá chình điện, mặc dù những người thợ hiện đại đã nghiên cứu chi tiết các loài này và có thể hiểu được mọi đặc tính điện của chúng tương tự các dạng thức điện khác).

a/ Gymnotus carapo, một loài cá điện, sử dụng tín hiệu điện để cảm nhận môi trường và truyền tin với những đồng loại khác của nó.

Kết quả của Faraday cho thấy không có sự khác biệt cơ bản nào về các loại điện do những nguồn khác nhau cung cấp. Chúng đều tạo ra những hiệu ứng đa dạng giống hệt nhau. Faraday viết "Kết luận chung phải rút ra từ bộ thu thập thực tế này là điện, cho dù nguồn phát ra nó là gì đi nữa, đều giống nhau về bản chất của nó".

Nếu các loại điện là cùng một thứ, vậy thì thứ đó là gì ? Câu trả lời được cung cấp bởi thực tế là mọi nguồn điện đều có thể làm cho các vật đẩy hoặc hút lẫn nhau. Chúng ta sử dụng từ "tích điện" để mô tả tính chất của một vật cho phép nó tham gia vào những lực điện như thế, và chúng ta biết rằng điện tích có mặt trong vật chất dưới dạng hạt nhân và electron. Rõ ràng là những hiện tượng điện này rút lại là chuyển động của các hạt tích điện trong vật chất.

b / André Marie Ampère (1775-1836).

Dòng điện

Nếu hiện tượng cơ bản đó là chuyển động của các hạt mang điện, thì làm sao chúng ta có thể vạch ra một số đo bằng số có ích của nó ? Chúng ta có thể mô tả dòng chảy của sông dễ dàng bằng vận tốc của nước, nhưng vận tốc sẽ không thích hợp đối với mục tiêu điện, vì chúng ta phải tính đến bao nhiêu điện

tích có trong các hạt mang điện chuyển động, và trong bất kì trường hợp nào cũng không có dụng cụ thực tế bán tại cửa hàng đồ điện có thể cho chúng ta biết vận tốc của các hạt mang điện. Thí nghiệm cho thấy cường độ của những hiệu ứng điện khác nhau tỉ lệ với một đại lượng khác: số coulomb điện tích đi qua một điểm nhất định trong một giây. Tương tự như dòng nước chảy, đại lượng này được gọi là *dòng* điện, *I*. Đơn vị coulomb/giây của nó thường được sử dụng ngắn hơn là ampere, 1 A = 1 C/s.

Sự khéo léo chủ yếu có trong định nghĩa này là làm sao đếm hai loại điện tích. Dòng nước chảy ra từ vòi nước cấu thành từ các nguyên tử chứa các hạt tích điện, nhưng nó không tạo ra hiệu ứng nào cho chúng ta liên tưởng tới dòng điện. Chẳng hạn, bạn không bao giờ bị sốc điện khi bạn bị một vòi nước phun vào. Loại thí nghiệm này cho thấy hiệu ứng đó được tạo ra bởi chuyển động của một loại hạt tích điện có thể bị triệt tiêu bởi chuyển động của loại hạt tích điện trái dấu trong cùng hướng đó. Trong nước, mỗi nguyên tử oxygen có điện tích + 8e bị bao quanh bởi 8 electron có điện tích – e, và tương tự như thế đối với nguyên tử hydrogen.

Do đó, chúng ta có thể trau chuốt định nghĩa dòng điện của mình như sau:

định nghĩa dòng điện

Khi các hạt tích điện trao đổi giữa các vùng không gian A và B thì dòng điện chạy từ A sang B là

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

trong đó Δq là sự thay đổi điện tích toàn phần của vùng B xảy ra trong khoảng thời gian Δt.

Trong ví dụ vòi nước trong vườn cây, cơ thể của bạn bắt được lượng điện tích dương và âm bằng nhau, nên không gây ra sự thay đổi điện tích toàn phần của bạn, cho nên dòng điện chạy qua bạn là bằng không.

Ví dụ 1. Giải thích $\frac{\Delta q}{\Delta t}$

Phải hiểu biểu thức $\Delta q / \Delta t$ như thế nào khi dòng điện không phải là không đổi ?

Bạn đã thấy nhiều phương trình thuộc dạng này trước đây: $\Delta x / \Delta t, F = \Delta p / \Delta t$ ... Đây đều là sự mô tả tốc độ biến thiên, và chúng đều yêu cầu tốc độ biến thiên không đổi. Nếu tốc độ biến thiên không phải không đổi, thì bạn phải sử dụng độ dốc của đường tiếp tuyến trên đồ thị. Độ dốc của đường tiếp tuyến tương ứng với đạo hàm trong tính toán; ứng dụng của phép tính đó sẽ được nói tới trong phần 3.6.

Ví dụ 2. Ion chuyển động qua màng tế bào

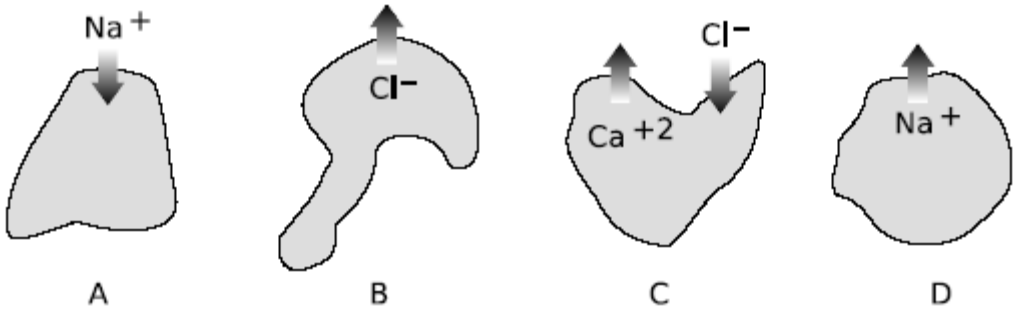
Hình c/ biểu diễn các ion, có ghi tên với điện tích của chúng, chuyển động vào hoặc ra khỏi màng của ba tế bào. Nếu các ion đều đi qua màng tế bào trong cùng khoảng thời gian như nhau, thì dòng điện chạy vào tế bào so sánh với nhau như thế nào ?

Tế bào A có dòng điện dương đi vào nó, vì điện tích của nó tăng lên, tức là có giá trị Δq dương.

Tế bào B có cùng dòng điện như tế bào A, vì việc mất một đơn vị điện tích âm cũng làm tăng điện tích toàn phần của nó lên một đơn vị.

Điện tích toàn phần của tế bào C giảm ba đơn vị, nên có dòng điện âm, lớn đi vào.

Tế bào D mất một đơn vị điện tích nên có có dòng điện âm, nhỏ đi vào.



c/ Ví dụ 2

Có vẻ thật lạ khi nói rằng một hạt tích điện âm chuyển động theo một chiều tạo ra dòng điện chạy theo chiều kia, nhưng chuyện này khá bình thường. Như chúng ta sẽ thấy, dòng điện chạy qua dây dẫn kim loại thông qua sự chuyển động của các electron, chúng tích điện âm, nên hướng chuyển động của các electron trong mạch điện luôn luôn ngược với hướng của dòng điện. Tất nhiên, sẽ tiện lợi biết bao nhiêu nếu như Benjamin Franklin định nghĩa dấu của điện tích âm và dương theo kiểu ngược lại, vì nhiều dụng cụ điện hoạt động trên cơ sở dây dẫn kim loại.

Ví dụ 3. Số electron chạy qua bóng đèn

Nếu một bóng đèn có dòng điện 1,0A chạy qua, hỏi có bao nhiêu electron đi qua dây tóc trong 1 giây ?

Chúng ta chỉ tính số electron chạy thành dòng, nên chúng ta có thể bỏ qua các dấu dương và âm. Giải phương trình $\Delta q = I\,\Delta t$ cho dòng điện tích 1,0 C trong khoảng thời gian này. Số electron là

$$\text{số electron} = 1{,}0\ \text{C/e} = 6{,}2 \times 10^{18}$$

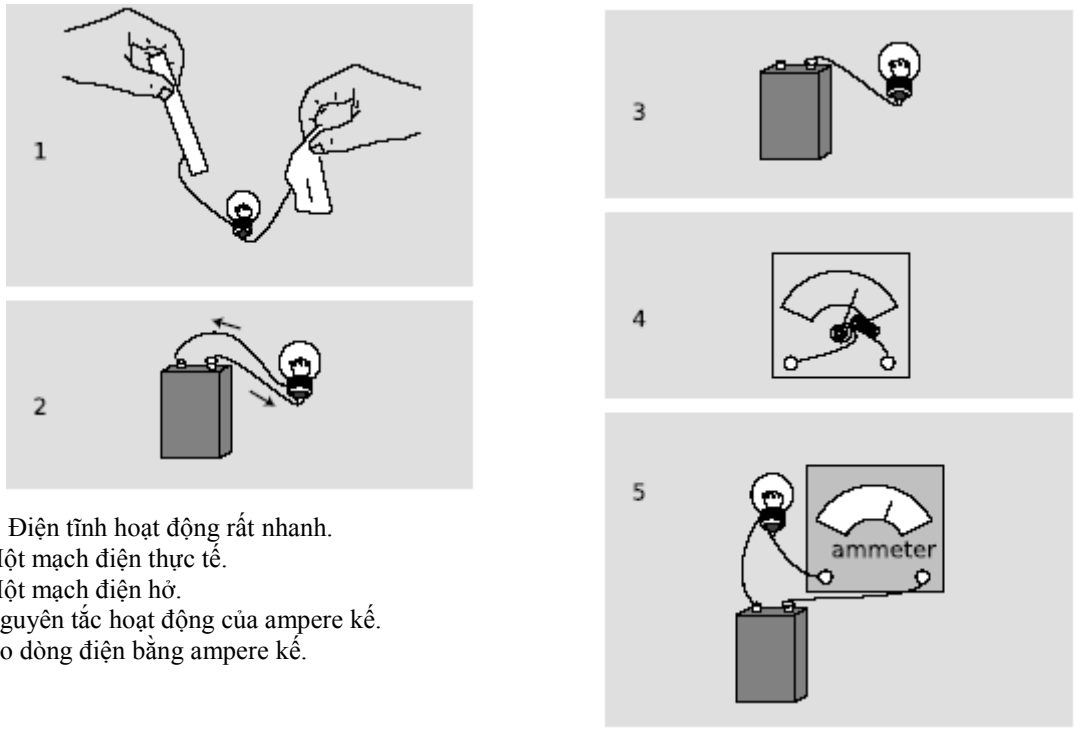
3.2 Mạch điện

Làm thế nào chúng ta có thể đặt cho dòng điện hoạt động ? Phương pháp duy nhất điều khiển điện tích mà chúng ta đã biết trước đây là tích điện cho các chất khác nhau, ví dụ như nhựa cao su và lông thú, bằng cách cọ xát chúng lên nhau. Hình d/1 cho thấy một cố gắng sử dụng kĩ thuật này để thắp sáng một bóng đèn. Phương pháp này không ổn. Thật vậy, dòng điện sẽ chạy qua bóng đèn, vì các electron có thể chuyển động qua dây kim loại, và các electron dư thừa trên thanh nhựa do đó sẽ đi qua dây dẫn và bóng đèn do lực hút của lông thú tích điện dương và lực đẩy của các electron khác. Vấn đề là ở chỗ sau một phần vô cùng nhỏ của giây của dòng điện, cả thanh nhựa và lông thú đều mất hết điện tích. Sẽ không có dòng điện chạy qua nữa, và bóng đèn sẽ tắt.

Hình d/2 biểu diễn một cơ cấu hoạt động được. Pin đẩy điện tích qua mạch điện, và cứ thế xoay chuyển nó theo vòng. (Chúng ta sẽ có nhiều thứ để nói hơn ở phần sau cuốn sách này về sự hoạt động của pin) Dòng này được gọi là một dòng điện kín. Ngày nay, từ "mạch điện" đã ăn sâu vào tâm trí đối với đa số mọi người, nhưng ý nghĩa ban đầu của nó là truyền đi xung quanh và thực hiện một hành trình khép kín, giống như một vị quan tòa cưỡi ngựa đi khắp vùng hoang vu phân phát sự công bằng cho từng thành phố vào một ngày nhất định.

Lưu ý là một ví dụ như hình d/3 sẽ không hoạt động. Dây dẫn sẽ nhanh chóng bắt đầu thu được một điện tích thực, vì nó không có cách nào giải phóng lượng điện tích đã chạy vào nó. Lực đẩy của điện tích này sẽ khiến nó càng lúc càng khó gởi thêm bất kì điện tích nào nữa vào, và chẳng bao lâu thì lực điện tác dụng bởi pin sẽ triệt tiêu nhau hoàn

toàn. Toàn bộ quá trình diễn ra nhanh đến nỗi sợi dây tóc không có đủ thời gian để nóng và sáng lên. Mạch điện này được gọi là mạch hở. Hiện tượng giống hệt như thế sẽ xảy ra nếu như mạch điện kín trong hình d/2 bị cắt đứt đâu đó bằng một cái kéo, và trên thực tế nguyên tắc hoạt động của một công tắc bóng đèn là đóng/mở khe hở trong mạch điện.



d/ 1. Điện tĩnh hoạt động rất nhanh.
2. Một mạch điện thực tế.
3. Một mạch điện hở.
4. Nguyên tắc hoạt động của ampere kế.
5. Đo dòng điện bằng ampere kế.

Định nghĩa dòng điện mà chúng ta đã phát triển có hiệu quả to lớn ở chỗ nó dễ đo. Trong hoạt động điện thực tế, người ta hầu như luôn luôn đo dòng điện, chứ không phải điện tích. Dụng cụ dùng để đo dòng điện gọi là ampere kế. Một ampere kế đơn giản, hình d/4, gồm một cuộn dây nam châm có lực làm xoắn một cái kim sắt dưới sức cản của lò xo. Dòng điện càng lớn thì lực càng mạnh. Mặc dù cấu tạo của ampere kế có thể khác đi, nhưng việc sử dụng chúng luôn luôn giống nhau. Chúng ta cắt ngang đường đi của dòng điện và đặt vào giữa một máy đo, giống như một ê-cốt nằm trên đường, d/5. Vẫn có một mạch điện kín, và chừng nào pin và bóng đèn còn nối với nhau, ampere kế chỉ là một đoạn khác của dây dẫn mà thôi.

Chúng ta phải đặt ampere kế vào chỗ nào trong mạch điện ? Liệu ta có thể đặt nó ở phía bên trái của mạch điện, chẳng hạn, thay cho bên phải được không ?Sự bảo toàn điện tích cho chúng ta biết điều này có thể thực hiện được mà không có sự khác biệt nào cả. Điện tích không bị phá hủy hay "sử dụng hết" bởi bóng đèn, nên chúng ta sẽ đo được cùng một dòng điện cho dù là ở phía bên nào cũng vậy. Cái bị "sử dụng hết" là năng lượng dự trữ trong pin, nó đã chuyển hóa thành nhiệt và năng lượng ánh sáng.

3.3 Điện thế

Đơn vị volt

Mạch điện có thể dùng để gửi tín hiệu, lưu trữ thông tin, hay thực hiện tính toán, nhưng mục đích phổ biến nhất của chúng từ trước đến nay là thao tác năng lượng, như trong ví dụ pin và bóng đèn trong mục trước. Chúng ta biết bóng đèn có tốc độ đo bằng đơn vị watt, tức là bao nhiêu joule/giây năng lượng chúng có thể chuyển hóa thành nhiệt và ánh sáng, nhưng làm sao điều này lại quan hệ với dòng điện tích như đo trong ampere kế ? Bằng cách tương tự, giả sử bạn của bạn, người đó không học vật lí, không tìm được việc gì tốt hơn là ngồi ném những kiện cỏ khô. Số calo anh ta đốt cháy mỗi giờ nhất định sẽ phụ thuộc vào số lượng kiện cỏ anh ta ném trong một phút, nhưng nó cũng sẽ tỉ lệ với lượng

công cơ học mà anh ta thực hiện trên từng kiện cỏ. Nếu công việc của anh ta là ném chúng vào một vựa cỏ khô, anh ta sẽ mệt nhanh hơn kẻ chỉ làm công việc chuyền cỏ từ xe tải xuống. Trong đơn vị hệ mét

$$\frac{\text{số joule}}{\text{giây}} = \frac{\text{số kiện cỏ}}{\text{giây}} \times \frac{\text{số joule}}{\text{kiện cỏ}}$$

Tương tự, tốc độ biến đổi năng lượng bởi pin sẽ không chỉ phụ thuộc vào bao nhiêu coulomb trên giây nó đẩy qua một mạch điện, mà còn phụ thuộc vào bao nhiêu công cơ học nó đã thực hiện trên từng coulomb điện tích

$$\frac{\text{số joule}}{\text{giây}} = \frac{\text{số coulomb}}{\text{giây}} \times \frac{\text{số joule}}{\text{coulomb}}$$

hay công suất = dòng điện x công trên đơn vị điện tích

e / Alessandro Volta (1745-1827).

Đơn vị J/C được gọi gọn lại là volt, 1 V = 1 J/C, theo tên nhà vật lí người Italia Alessandro Volta. Mọi người đều biết pin được đánh giá theo đơn vị volt, nhưng khái niệm điện thế tổng quát hơn; hóa ra điện thế là một tính chất của mỗi điểm trong không gian. Để hiểu kĩ hơn, hãy nghĩ thận trọng hơn về cái diễn ra trong pin và mạch điện bóng đèn.

Khái niệm điện thế

Để thực hiện công trên một hạt tích điện, tất nhiên là pin phải tác dụng lực lên nó. Vậy pin thực hiện việc này như thế nào ? Chỉ có một thứ có thể tác dụng lực lên một hạt tích điện là một hạt tích điện khác. Cứ như thể là những kiện cỏ đẩy và hút nhau vào vựa cỏ khô! Đây có thể là một tình huống quá phức tạp. Cho dù là chúng ta biết có bao nhiêu điện tích dương và âm dư thừa tại mỗi điểm trong mạch điện (trên thực tế thì chúng ta không biết được), thì chúng ta phải tính vô số lực bằng định luật Coulomb, thực hiện mọi phép cộng vectơ, và cuối cùng tính được bao nhiêu công đã thực hiện trên các điện tích khi chúng chuyển động qua. Còn khiếp đảm hơn nữa, có tới hơn một loại hạt mang điện chuyển động: electron là thứ chuyển động trong dây dẫn và dây tóc bóng đèn, còn ion là những hạt mang điện tích chuyển động bên trong pin. Thật may mắn, có hai cách chúng ta có thể là đơn giản hóa mọi thứ:

Trạng thái đó không biến đổi. Không giống như cơ cấu tưởng tượng trong đó chúng ta cố gắng thắp sáng một bóng đèn bằng một thanh nhựa và một mảnh lông thú, mạch điện này tự nó duy trì ở trạng thái cân bằng (có lẽ sau khoảng thời gian chừng một micro giây sau khi ráp mạch điện). Dòng điện đó ổn định, và khi điện tích chạy ra khỏi một nơi nào đó của mạch điện, nó được thay thế bằng cùng lượng điện tích chạy vào. Lượng điện tích dương hay âm dư thừa trong bất cứ phần nào của mạch điện, do đó, vẫn giữ không đổi. Tương tự, khi chúng ta nhìn một dòng sông chảy, nước vẫn trôi đi nhưng dòng sông không biến mất.

Lực chỉ phụ thuộc vào vị trí. Vì sự phân bố điện tích là không thay đổi, nên lực điện tổng hợp tác dụng lên một hạt tích điện chỉ phụ thuộc vào điện tích riêng của nó và vào vị trí của nó. Nếu một hạt tích điện khác cùng loại đi đến đúng vị trí đó vào lúc sau, nó sẽ cảm nhận một lực đúng bằng như cũ.

Quan sát thứ hai cho chúng ta biết không có sự khác biệt nào về sự trải nghiệm của một hạt tích điện so với một hạt tích điện khác. Nếu chúng ta chọn một hạt để chú ý tới, và tính lượng công thực hiện trên nó bởi lực điện khi nó đi từ điểm A đến điểm B dọc theo

một quỹ đạo nhất định, thì cũng lượng công này sẽ thực hiện trên bất kì hạt tích điện nào khác cùng loại với nó đi theo cùng quỹ đạo đó. Cho dễ hình dung, hãy nghĩ về quỹ đạo bắt đầu từ một cực của pin, đi qua dây tóc của bóng đèn, và kết thúc tại điện cực bên kia. Khi một vật chịu một lực chỉ phụ thuộc vào vị trí của nó (và khi những điều kiện kĩ thuật khác được thỏa mãn), chúng ta có thể định nghĩa năng lượng điện gắn với vị trí của vật đó. Công do lực điện thực hiện trên hạt đó khi nó di chuyển từ điểm A tới điểm B bằng với độ giảm năng lượng điện giữa A và B. Năng lượng điện này là thứ đã chuyển hóa thành những dạng năng lượng khác, như nhiệt và ánh sáng. Vì vậy, chúng ta định nghĩa điện thế nói chung là năng lượng điện trên đơn vị điện tích:

định nghĩa hiệu điện thế

Hiệu điện thế giữa hai điểm trong không gian được định nghĩa là

$$\Delta V = \Delta U_{điện}/q$$

trong đó $\Delta U_{điện}$ là độ biến thiên năng lượng điện của một hạt có điện tích q khi nó đi từ điểm đầu tới điểm cuối.

Công suất tiêu thụ (tức là tốc độ chuyển hóa năng lượng bởi dòng điện) được cho bởi phương trình

$$P = I\,\Delta V$$

f/ Ví dụ 4

Ví dụ 4. Năng lượng dự trữ trong pin

Pin sạc 1,2 V trong hình f được dán nhãn 1800 miliampere-giờ. Hỏi pin này có thể dự trữ năng lượng tối đa bằng bao nhiêu ?

Một ampere-giờ là một đơn vị dòng điện nhân với một đơn vị thời gian. Dòng điện là điện tích trên đơn vị thời gian, nên ampere-giờ thật ra là một đơn vị hơi lạ của điện tích

$$(1\ A)\ (1\ h) = (1\ C/s)\ (3600\ s) = 3600C$$

Do đó, 1800 mAh sẽ là $1800 \times 10^{-3} \times 3600\ C = 6{,}5 \times 10^{3}\ C$.

Đó là một số khổng lồ hạt tích điện, nhưng độ giảm năng lượng điện toàn phần sẽ chỉ bằng điện tích tổng cộng của chúng nhân với hiệu điện thế qua đó chúng di chuyển

$$\Delta U_{điện} = q\Delta V = (6{,}5 \times 10^{3}\ C)\ (1{,}2\ V) = 7{,}8\ kJ$$

Ví dụ 5. Đơn vị volt-ampere

Chuông cửa thường được đánh giá bằng đơn vị volt-ampere. Sự kết hợp đơn vị này có nghĩa là gì ?

Dòng điện nhân với hiệu điện thế cho đơn vị công suất, $P = I\ \Delta V$, nên VA thật ra chỉ là một cách ghi watt không chuẩn. Chúng cho chúng ta biết công suất mà chuông cửa yêu cầu.

Ví dụ 6. Công suất tiêu hao bởi pin và bóng đèn

Nếu một pin 9,0 V gây ra dòng 1,0 A chạy qua một bóng đèn, hỏi công suất tiêu thụ là bao nhiêu ?

Điện thế ước tính của pin cho chúng ta biết hiệu điện thế được thiết kế duy trì giữa hai cực của nó.

$$P = I\ \Delta V = 9{,}0\ A.V = 9{,}0\ (C/s)\ (J/C) = 9{,}0\ J/s = 9{,}0\ W$$

Điều đáng kể duy nhất trong bài toán này là đơn vị. Người ta nhanh chóng quen với việc chuyển những kết hợp thông dụng như A.V sang những đơn vị đơn giản hơn.

Ở đây là một số câu hỏi và trả lời về khái niệm điện thế.

Hỏi: OK, vậy thì thật ra điện thế là gì ?

Trả lời: Một dụng cụ giống như pin có điện tích dương và âm bên trong nó đẩy các điện tích khác chạy vòng tròn theo mạch điện ngoài. Pin có điện thế càng cao thì có mật độ điện tích trong nó càng dày, nó sẽ thực hiện công lớn hơn lên từng hạt tích điện chuyển động qua mạch ngoài.

Nhằm để tương tự với hấp dẫn, bạn có thể đặt một bánh guồng tại đáy một thác nước cao hay một thác nước ngắn, nhưng một kg nước rơi qua hiệu thế năng hấp dẫn càng lớn sẽ càng có nhiều năng lượng trao cho bánh guồng ở đáy thác.

Hỏi: Tại sao chúng ta định nghĩa điện thế là năng lượng điện chia cho điện tích, thay vì chỉ định nghĩa nó là một dạng năng lượng điện ?

Trả lời: Người ta trả lời rằng đó là định nghĩa duy nhất làm cho phương trình $P = I\Delta V$ hoạt động. Câu trả lời tổng quát hơn là chúng ta muốn định nghĩa được hiệu điện thế giữa hai điểm bất kì trong không gian mà không cần phải biết trước có bao nhiêu điện tích mà các hạt chuyển động giữa chúng sẽ có. Nếu bạn để một cái pin 9V lên lưỡi của mình, thì các hạt tích điện đi qua lưỡi của bạn và mang cho bạn cảm giác ngứa ran không phải là các electron mà là các ion, chúng có thể có điện tích +e, - 2e, hay bất cứ giá trị thực nào khác. Nhà sản xuất có lẽ mong đợi pin được sử dụng chủ yếu trong mạch điện với dây kim loại, trong đó các hạt tích điện chạy thành dòng là các electron với điện tích – e. Nếu dòng hạt tích điện chạy qua lưỡi bạn có điện tích – 2e, thì hiệu thế năng của chúng sẽ lớn gấp đôi, nhưng chia cho điện tích – 2e của chúng theo định nghĩa sẽ vẫn cho kết quả là 9 V.

Hỏi: Có phải có hai vai trò tách biệt cho các hạt tích điện trong mạch điện, một loại vẫn dẫm chân tại chỗ và tác dụng lực, và loại kia thì chuyển động dưới tác dụng của những lực đó ?

Trả lời: Không. Mỗi hạt tích điện đồng thời đảm nhận cả hai vai trò. Định luật III Newton nói rằng bất cứ hạt nào có lực điện tác dụng lên nó cũng phải tác dụng một lực điện trở lại hạt kia. Không hề có "kẻ di chuyển chỉ định" hay "kẻ tác dụng lực chỉ định".

Hỏi: Tại sao định nghĩa điện thế chỉ nói tới *hiệu* điện thế ?

Trả lời: Hoàn toàn OK để định nghĩa điện thế là $V = U_{điện}/q$. Nhưng nhắc lại, chỉ có hiệu năng lượng tương tác, U, là có ý nghĩa vật lí trực tiếp. Tương tự, hiệu điện thế thật sự có ích hơn điện thế tuyệt đối. Volt kế đo hiệu điện thế, chứ không đo điện thế tuyệt đối.

Câu hỏi thảo luận

A. Con lăn là một dạng giống như mạch điện, nhưng nó sử dụng lực hấp dẫn tác dụng lên xe hơi thay cho lực điện. Cái gì đóng vai trò điện thế cao trong trường hợp con lăn ? Còn dòng điện cao chạy qua con lăn là cái gì ?

B. Bình luận những phát biểu sau:

"Anh ta chạm trúng dây dẫn, và 10.000 V đi qua anh ta".

"Chiếc pin đó có điện tích 9 V".

"Bạn đã dùng hết điện tích của pin".

C. Khi bạn để một chiếc pin 9 V chạm vào lưỡi mình, cả điện tích dương và điện tích âm đều đi qua nước bọt của bạn. Các ion đó đi theo đường nào ?

D. Có một lần tôi chạm trúng một mẫu thiết bị vật lí được nối dây không đúng cách, và nhận một hiệu điện thế vài nghìn volt qua tay mình. Cái gì là nguyên nhân gây sốc không đủ sức làm hại đến tôi ?

3.4 Điện trở

Điện trở

Ở phần trước, chúng ta đã dễ dàng quan sát thấy một thực tế là một mạch điện pin và bóng đèn nhanh chóng được đặt vào dòng ổn định, nhưng tại sao lại như vậy ? Định luật II Newton, $a = F/m$, hình như tiên đoán rằng lực ổn định tác dụng lên những hạt tích điện đó phải làm cho chúng chạy vòng tròn trong mạch điện càng lúc càng nhanh hơn. Câu trả lời là khi các hạt tích điện chạy qua vật chất, luôn luôn có những lực, tương tự như lực ma

sát, cản trở chuyển động đó. Những lực này cần phải đưa vào định luật II Newton, nên nó thật ra là $a = F_{tổnghợp}/m$, chứ không phải $a = F/m$. Nếu, bằng cách tương tự, bạn đẩy một cái sọt chạy trên sàn nhà ở tốc độ không đổi, tức là với gia tốc bằng không, thì lực tổng hợp tác dụng lên nó phải bằng không. Sau khi bạn đẩy chiếc sọt chuyển động, lực ma sát của sàn nhà sẽ triệt tiêu chính xác với lực của bạn. Năng lượng hóa học dự trữ trong cơ thể bạn đang chuyển hóa thành nhiệt trong cái sọt và sàn nhà, và không còn làm tăng động năng của cái sọt nữa. Tương tự, năng lượng hóa học bên trong pin chuyển hóa thành nhiệt, chứ không làm tăng liên tục động năng của của các hạt tích điện. Sự biến đổi năng lượng thành nhiệt có thể là một tổn thất trong một số mạch điện, ví dụ như chip máy tính, nhưng nó là cần thiết trong trường hợp bóng đèn sợi đốt, loại bóng đèn cần phải đủ nóng để sáng lên. Cho dù bạn có thích nó hay không thì loại hiệu ứng nhiệt này vẫn cứ xảy ra bất cứ khi nào các hạt tích điện chuyển động qua vật chất.

Cái gì xác định lượng nhiệt đó ? Một bóng đèn flash được thiết kế làm việc với pin 9 V có thể được dán nhãn 1,0 watt, một bóng khác dán 5,0 watt. Chúng hoạt động như thế nào ? Ngay cả không cần biết tường tận loại ma sát này ở mức độ nguyên tử, bạn có thể liên hệ nhiệt tiêu hao với dòng điện chạy thông qua phương trình $P = I\,\Delta V$. Nếu hai bóng đèn flash có hai giá trị P khác nhau khi sử dụng với cùng một pin duy trì cùng một hiệu điện thế ΔV, thì bóng đèn 5,0 watt cho dòng điện lớp gấp 5 lần chạy qua nó.

Đối với nhiều chất, gồm cả tungsten chế tạo nên sợi tóc bóng đèn, thí nghiệm cho thấy lượng điện sẽ chạy qua nó tỉ lệ thuận với hiệu điện thế đặt vào hai đầu của nó. Đối với một vật cấu tạo từ một chất như thế, chúng ta định nghĩa điện trở của nó như sau:

định nghĩa điện trở

Nếu một vật nằm trong một mạch điện biểu hiện dòng điện tỉ lệ thuận với hiệu điện thế hai đầu của nó, thì chúng ta định nghĩa điện trở của nó là tỉ số không đổi

$$R = \Delta V / I$$

Đơn vị của điện trở là volt/ampere, thường được gọi tắt là ohm, kí hiệu bằng chữ cái Hi Lạp in hoa omega, Ω.

Ví dụ 7. Điện trở của bóng đèn

Một bóng đèn flash được cấp nguồn bằng một pin 9 V có điện trở 10 Ω. Hỏi dòng điện chạy qua nó bằng bao nhiêu ?

Giải phương trình định nghĩa điện trở cho I, ta có

$$\begin{aligned} I &= \Delta V/R \\ &= 0.9\ \mathrm{V}/\Omega \\ &= 0.9\ \mathrm{V}/(\mathrm{V}/\mathrm{A}) \\ &= 0.9\ \mathrm{A} \end{aligned}$$

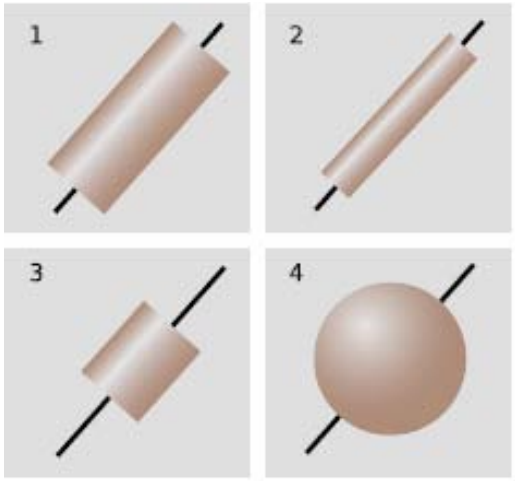
g / Georg Simon Ohm (1787-1854).

Định luật Ohm phát biểu rằng nhiều chất, gồm nhiều chất rắn và một số chất lỏng, biểu hiện loại hành vi này, ít nhất là đối với những hiệu điện thế không quá lớn. Thật ra định luật Ohm được gọi là "định luật" không có nghĩa là mọi chất đều tuân theo nó, hay có nó tầm quan trọng cơ sở như định luật Newton chẳng hạn. Các chất gọi là omic hay phi omic tùy thuộc vào chúng có tuân theo định luật Ohm hay không.

Nếu các vật có kích thước và hình dạng giống nhau chế tạo từ hai chất omic khác nhau có điện trở khác nhau, chúng ta nói một chất có điện trở lớn hơn chất kia hay kém dẫn điện hơn chất kia đều được. Các chất, ví dụ như kim loại, có tính dẫn rất mạnh, được nói là chất dẫn điện tốt. Những chất có tính dẫn quá kém, ví dụ như gỗ hay cao su, được phân loại là chất cách điện. Không có sự khác biệt sâu sắc nào giữa hai loại chất. Một số chất, ví dụ như silicon, nằm giữa hai thái cực đó, và được gọi là chất bán dẫn.

Ở mức độ trực giác, chúng ta có thể hiểu ý tưởng điện trở bằng cách tạo ra âm thanh "hhhhhh" và "ffffff". Để đưa dòng không khí ra khỏi miệng bạn, bạn phải sử dụng cơ hoành để nén không khí trong ngực mình. Sự chênh lệch áp suất giữa không khí trong ngực bạn và không khí bên ngoài miệng bạn tương tự như sự chênh lệch điện thế. Khi bạn phát ra âm "h", bạn điều khiển miệng và cổ họng mình theo kiểu cho phép không khí chảy ra dễ dàng. Dòng không khí mạnh giống như dòng điện lớn. Chia cho dòng điện lớn trong định nghĩa điện trở có nghĩa là chúng ta có điện trở nhỏ. Chúng ta nói điện trở nhỏ của miệng và cổ họng bạn cho phép dòng điện lớn chạy qua. Khi bạn phát âm "f", bạn làm tăng điện trở và gây ra dòng chảy nhỏ hơn.

Lưu ý mặc dù điện trở của một vật phụ thuộc vào chất cấu tạo nên nó, nhưng chúng ta không thể nói đơn giản là "điện trở của vàng" hay "điện trở của gỗ". Hình h biểu diễn bốn vật ví dụ có dây gắn ở hai đầu nối vào mạch điện. Nếu chúng cấu tạo từ cùng một chất, chũng sẽ vẫn có điện trở khác nhau, vì hình dạng và kích thước của chúng khác nhau. Chúng ta sẽ bàn tới vấn đề này chi tiết hơn trong chương sau, nhưng thật không có gì ngạc nhiên nếu điện trở của h/2 lớn hơn của h/1 – hình ảnh nước chảy qua ống, tuy không đúng lắm, nhưng nó mang lại cho chúng ta sự trực giác tốt. Vật h/3 sẽ có điện trở nhỏ hơn h/1 vì các hạt tích điện đi qua nó đoạn đường ngắn hơn.



h/ Bốn vật cấu tạo từ cùng một chất nhưng có điện trở khác nhau.

Các chất siêu dẫn

Mọi chất đều biểu hiện một số biến thiên về điện trở theo nhiệt độ (hiện tượng này được khai thác trong bộ ổn nhiệt làm nhiệt kế có thể tiếp xúc dễ dàng với một mạch điện). Kì lạ hơn nữa, người ta thấy đa số kim loại biểu hiện sự thay đổi đột ngột đến điện trở bằng không khi nhiệt độ lạnh tới một nhiệt độ tới hạn nhất định. Khi đó, người ta gọi chúng là chất siêu dẫn. Về mặt lí thuyết, các chất siêu dẫn sẽ cho phép chế tạo nhiều dụng cụ lớn, ví dụ như các cuộn dây nam châm dùng để lái đoàn xe lửa. Trong thực tế, nhiệt độ tới hạn của tất cả các kim loại rất thấp, và yêu cầu phải làm chúng thật lạnh khiến việc ứng dụng chúng không có tính kinh tế, ngoại trừ những ứng dụng chuyên biệt như trong máy gia tốc hạt cho nghiên cứu vật lí.

Nhưng gần đây các nhà khoa học đã có phát hiện thật ngạc nhiên rằng những chất ceramic nhất định là chất siêu dẫn ở nhiệt độ cao hơn một chút. Rào chắn kĩ thuật hiện nay là tìm kiếm phương pháp chế tạo dây dẫn từ những chất dễ vỡ này. Wall Street hiện đang đầu tư hàng tỉ đô la cho việc phát triển những dụng cụ siêu dẫn dùng cho điện thoại cầm tay dựa trên những chất liệu này. Năm 2001, thành phố Copenhagen đã thay thế một đoạn ngắn mạng lưới điện của mình bằng cáp siêu dẫn, và hiện nay chúng đang hoạt động và cấp điện cho người tiêu dùng.

Hiện nay, nói chung không có lí thuyết nào về siêu dẫn làm thỏa mãn được mọi người, mặc dù sự siêu dẫn trong kim loại đã được hiểu khá tốt. Thật không may, tôi chưa tìm ra lời giải thích cơ bản của sự siêu dẫn trong kim loại hoạt động ở quy mô công nghiệp.

i/ Một đoạn siêu dẫn của máy gia tốc ATLAS tại Phòng thí nghiệm quốc gia Mĩ, gần Chicago. Nó được dùng để gia tốc chùm ion đến vài phần trăm của tốc độ ánh sáng, dùng cho nghiên cứu vật lí hạt nhân. Bề mặt màu bạc sáng bóng chế tạo từ nguyên tố niobium, một chất siêu dẫn ở nhiệt độ tương đối cao so với những kim loại khác – tương đối cao nhưng cũng ngang với nhiệt độ của helium lỏng! Chùm ion đi qua các lỗ trong hai hình trụ nhỏ ở hai đầu của thanh cong. Điện tích chạy tới lui giữa chúng ở tần số 12 triệu chu trình mỗi giây, nên chúng chuyển hóa thành dương và âm. Chùm tích điện dương gồm những phun trào ngắn mỗi lần khi chúng ở trong một trong các đoạn nó sẽ bị hút về phía trước bởi điện tích âm trên hình trụ ở phía trước và bị đẩy ra phía trước bởi điện tích dương ở đằng sau. Dòng điện khổng lồ này (xem ví dụ 9) sẽ nhanh chóng làm tan chảy bất kì kim loại nào không siêu dẫn, nhưng trong chất siêu dẫn chúng không hề tạo ra chút nhiệt nào.

Điện thế không đổi trên một vật dẫn

Ý tưởng về chất siêu dẫn đưa chúng ta đến câu hỏi chúng ta mong đợi một vật sẽ xử sự như thế nào nếu nó được chế tạo từ một chất dẫn điện rất tốt. Các chất siêu dẫn là trường hợp cực đoan, nhưng thường thì một dây dẫn kim loại có thể xem là một vật dẫn hoàn hảo, chẳng hạn nếu như các phần của mạch điện ngoài dây dẫn ra chế tạo từ những chất dẫn điện kém hơn nhiều. Điều gì xảy ra nếu R bằng không trong phương trình $R = \Delta U/I$? Kết quả của phép chia hai số cho nhau chỉ có thể bằng không nếu như số trên tử bằng không. Điều này cho chúng ta biết nếu chúng ta chọn bất kì hai điểm nào trong một vật dẫn hoàn hảo, thì hiệu điện thế giữa chúng phải bằng không. Nói cách khác, toàn bộ vật dẫn phải ở cùng một điện thế.

Điện thế không đổi có nghĩa là không có công nào được thực hiện trên điện tích khi nó di chuyển từ điểm này tới điểm kia trong vật dẫn. Nếu công bằng không được thực hiện chỉ dọc theo một quỹ đạo nhất định giữa hai điểm đặc biệt đó, thì nó có nghĩa là công dương được thực hiện dọc theo một phần của quỹ đạo và công âm thực hiện trên phần còn lại, kết quả là chúng khử lẫn nhau. Nhưng không có cách nào mà công có thể đạt tới bằng không đối với mọi quỹ đạo có thể có, trừ khi lực điện tác dụng lên điện tích thực tế là bằng không tại mọi điểm. Ví dụ, giả sử bạn tạo ra một điện tích tĩnh bằng cách cọ chân bạn lên tấm thảm, và rồi bạn gửi một số điện tích đó lên núm cửa, nó là một vật dẫn tốt. Làm thế nào điện tích đó có thể ở bên trong núm cửa mà không tác dụng bất kì lực nào lên bất kì điểm nào bên trong nó ? Câu trả lời khả dĩ duy nhất là điện tích đó chuyển động tròn cho đến khi nó tự phân bố theo một cấu hình thích hợp sao cho lực do các phần điện tích nhỏ dư thừa trên bề mặt lên bất cứ hạt mang điện nào bên trong núm cửa chính xác triệt tiêu lẫn nhau.

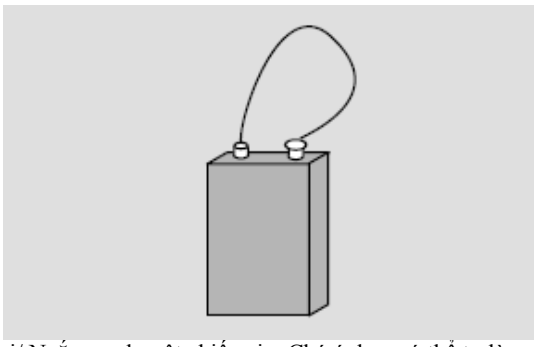
Chúng ta có thể giải thích hành vi này nếu như chúng ta giả sử rằng điện tích nằm trên núm cửa đó cuối cùng sẽ được đặt vào trạng thái cân bằng bền. Vì núm cửa là một vật dẫn nên điện tích tự do di chuyển trong nó. Nếu nó tự do chuyển động và bất kì phần nào của nó cũng chịu một lực tổng hợp khác không do phần điện tích còn lại tác dụng, thì nó sẽ chuyển động và chúng ta không có được trạng thái cân bằng.

Thành ra là điện tích nằm trên một vật dẫn, một khi đạt tới cấu hình cân bằng, thì hoàn toàn nằm trên bề mặt, chứ không phải phần bên trong. Chúng ta sẽ không chứng minh

điều này, nhưng nó có thể giải thích được bằng trực giác. Chẳng hạn, giả sử điện tích toàn phần trên một vật dẫn là âm, tức là nó có thừa electron. Những electron này sẽ đẩy lẫn nhau, và lực đẩy này có xu hướng đẩy chúng lên phía trên bề mặt, vì nằm ở trên bề mặt cho phép chúng nằm xa nhau nhất

Ngắn mạch

Ở phần trước, chúng ta đã giả định một vật dẫn hoàn hảo. Vậy thì thế nào là một vật dẫn tốt, nếu nó không phải là vật dẫn hoàn hảo ? Khi đó, chúng ta có thể giải phương trình $\Delta V = IR$. Một dòng điện cỡ bình thường sẽ cho kết quả rất nhỏ khi chúng ta nhân nó với điện trở của một vật dẫn tốt, ví dụ như dây kim loại. Hiệu điện thế giữa hai đầu dây khi đó sẽ gần như không đổi. Mặt khác, nếu dòng điện là cực lớn, thì chúng ta có sự chênh lệch điện thế đáng kể. Đây là điều xảy ra trong một *đoản mạch*: một mạch điện trong đó một đường dẫn điện trở thấp nối giữa hai cực của nguồn cấp điện thế. Lưu ý là từ này được sử dụng trong ngữ cảnh đặc biệt hơn nhiều so với ý nghĩa phổ biến của thuật ngữ nằm ám chỉ bất cứ sự cố điện nào. Chẳng hạn, nếu bạn ngắn mạch một chiếc pin 9V như biểu diễn trong hình j, bạn sẽ tạo dòng điện có lẽ lên tới một ngàn ampe, đưa tới giá trị $P = I\Delta V$ rất lớn. Dây dẫn đó sẽ nóng lên!



j/ Ngắn mạch một chiếc pin. Chú ý: bạn có thể tự làm phỏng mình hoặc làm phát ra lửa ! Nếu bạn muốn thử như thế này, hãy nối dây trong thời gian rất ngắn, sử dụng pin điện thế thấp, và tránh chạm vào pin hoặc dây, cả hai vật đó đều nóng lên.

♥ Điều gì sẽ xảy ra với chiếc pin bị ngắn mạch như thế này ?

Điện trở

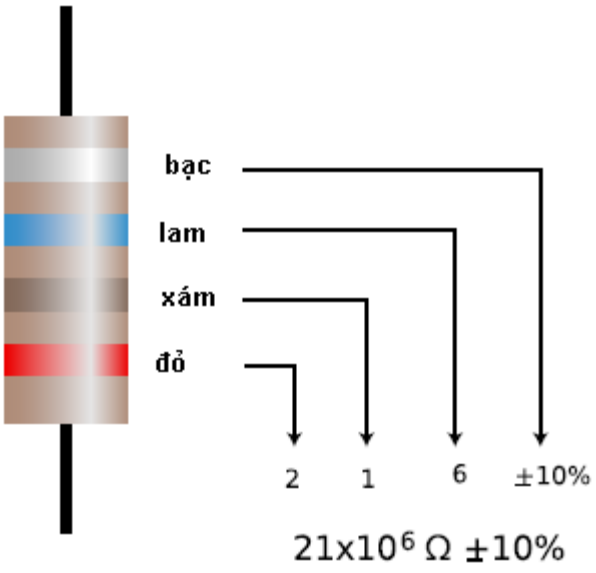
Trong bất cứ đồ dùng điện nào, bạn sẽ thấy một vài nguyên tố mạch điện giống như mạch vẽ trong hình dưới đây. Những điện trở này đơn giản là một khối trụ vật liệu ohm tính có dây dẫn gắn ở hai đầu.

Trong ngữ cảnh này, đa số sinh viên thấy khó hiểu nổi tại sao điện trở lại được sử dụng bên trong chiếc radio hay máy vi tính. Hiển nhiên là chúng ta muốn bóng đèn hay bếp điện có một thành phần mạch điện làm cản trở dòng điện và nóng lên, nhưng nóng lên là thứ phiền phức trong radio hay máy vi tính. Không cần bàn chi xa xôi, hãy dùng một sự tương tự cơ học để có được một ý niệm chung xem tại sao điện trở lại được sử dụng trong radio.

k/ Kí hiệu của điện trở trong mạch điện

Những bộ phận chính của máy thu radio là ăntен, bộ điều chỉnh chọn tần số, và bộ khuếch đại gia cố tín hiệu đủ mạnh để phát ra loa. Bộ điều chỉnh cộng hưởng ở tần số được chọn, giống như ví dụ cộng hưởng cơ đã nói tới ở quyển 3 của loạt bài giảng này. Hành vi của bộ cộng hưởng cơ phụ thuộc vào ba thứ: quán tính của nó, độ cứng của nó, và mức độ ma sát hay tắt dần. Hai thông số đầu nằm ở đỉnh của đường cong cộng hưởng, còn mức tắt dần xác định chiều rộng của cộng hưởng. Trong bộ điều chỉnh radio, chúng ta có một hệ dao động điện cộng hưởng ở một tần số nhất định. Thay cho một vật chuyển động tới lui, những dao động này gồm những dòng điện ban đầu chạy theo một hướng, sau đó chạy theo

hướng ngược lại. Trong một hệ cơ học, sự tắt dần có nghĩa là sự mất mát năng lượng dao động dưới dạng nhiệt, và ý niệm giống hệt như vậy được áp dụng cho một hệ điện học: điện trở mang lại sự tắt dần, và do đó điều khiển chiều rộng cộng hưởng. Nếu chúng ta loại trừ mọi sự cản trở trong mạch điều chỉnh, bằng cách không gắn điện trở hoặc bằng cách nào đó loại bỏ hẳn sự cản trở điện vốn có của dây dẫn, chúng ta sẽ có một cái radio vô dụng. Sự cộng hưởng của bộ điều chỉnh đó sẽ quá hẹp nên chúng ta không bao giờ có thể đạt gần tới tần số thích hợp mang đi từ đài phát thanh. Vai trò của quán tính và độ cứng do những thành phần khác của mạch điện đảm nhận, chúng ta sẽ không nói tới (tụ điện và cuộn cảm).



l/ Ví dụ điện trở với các mã màu

Màu	Ý nghĩa
Đen	0
Nâu	1
Đỏ	2
Cam	3
Vàng	4
Lục	5
Lam	6
Tím	7
Xám	8
Trắng	9
Bạc	± 10%
Vàng	± 5%

m/ Mã màu dùng trong điện trở

Nhiều dụng cụ điện hoạt động trên cơ sở sự cản trở điện và định luật Ohm, mặc dù chúng không có những thành phần nhỏ bên trong chúng trông giống như điện trở thông thường Sau đây là một số ví dụ.

Bóng đèn

Không có gì đặc biệt về dây tóc bóng đèn – bạn có thể dễ dàng chế tạo một cái bóng đèn bằng cách cắt một eo hẹp trên mảnh giấy gói kẹo cao su và nối mảnh giấy gói đó với các cực của một chiếc pin 9V. Vấn đề là ở chỗ nó sẽ bốc cháy ngay tức thì. Edison đã giải quyết thách thức kĩ thuật này bằng cách cho dây tóc vào trong một bóng hút chân không, ngăn cản sự cháy, vì sự cháy cần đến oxygen.

Polygraph

Polygraph, hay "máy dò nằm", là một bộ dụng cụ đo dùng để ghi lại những số đo vật lí của sự căng thẳng tâm lí của các đối tượng, ví dụ như sự đổ mồ hôi hay nhịp tim dồn dập. Phép đo mồ hôi thực tế hoạt động trên nguyên tắc da khô là một chất cách điện tốt, nhưng da đẫm mồ hôi là một vật dẫn. Tất nhiên một đối tượng chân thật có thể trở nên bồn chồn vì hoàn cảnh đó, và một kẻ lừa dối có lẽ thậm chí không đổ mồ hôi. Các nhà thực hành của phương pháp đó khẳng định rằng họ có thể nói lên sự khác biệt, nhưng bạn cần suy nghĩ thận trọng trước khi cho phép bản thân mình kiểm tra polygraph. Đa số tòa án ở Mĩ không chấp nhận bằng chứng polygraph, nhưng một số ông chủ thường cố ngăn chặn những người lao động không lương thiện bằng cách kiểm tra polygraph đối với người nộp đơn xin việc, một sự lạm dụng có thể xếp ngang với phép phân tích chữ kí mang tính khoa học giả tạo.

Cầu chì

Cầu chì là dụng cụ xen vào giữa mạch điện theo kiểu nối tiếp giống như ampe kế. Nó đơn giản là một mẩu dây dẫn chế tạo từ kim loại có điểm nóng chảy tương đối thấp. Nếu dòng điện quá mạnh chạy qua cầu chì, nó sẽ tan chảy, làm hở mạch điện. Mục đích của viêc sử dụng cầu chì là đảm bảo dây dẫn trong nhà không mang dòng điện quá lớn khiến chúng nóng đến mức bốc lửa. Đa số nhà ở hiện đại sử dụng cầu dao ngắt điện thay cho cầu chì, mặc dù cầu chì vẫn được dùng phổ biến trong xe hơi và trong những dụng cụ nhỏ. Cầu dao ngắt mạch hoạt động bằng một cuộn dây nam châm, nó làm hở mạch khi dòng điện chạy qua đủ lớn. Thuận lợi là ở chỗ một khi bạn tắt nguồn một số thiết bị hút nhiều dòng điện, bạn có thể lập tức đảo công tắc đóng. Trong thời thịnh hành của cầu chi, người ta có thể gặp phải rắc rối không có cầu chì thay thế, hay thậm chí dùng một sợi dây nhôm thay thế, bỏ qua cả yêu cầu an toàn

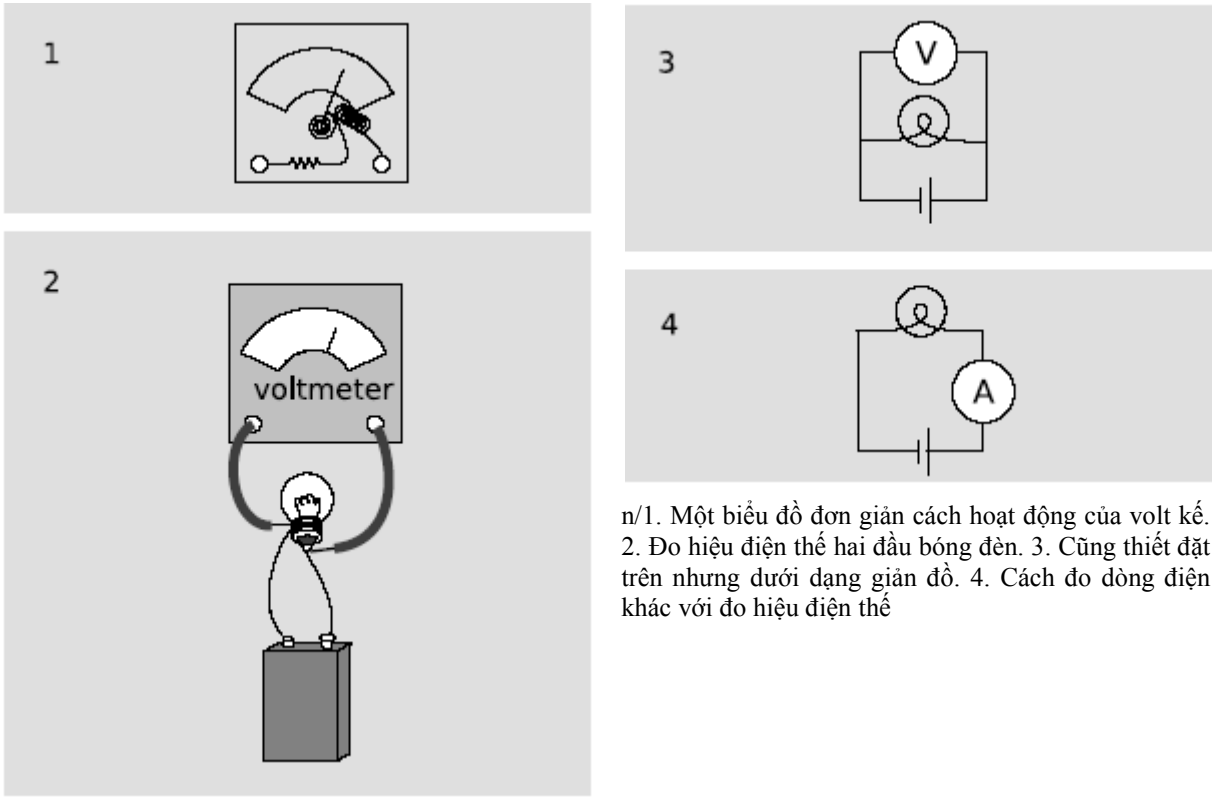
Volt kế

Volt kế không gì hơn chính là một máy đo điện có giá trị điện trở cao mà qua đó dòng điện buộc phải chạy qua. Định luật Ohm liên hệ dòng điện chạy qua điện trở tỉ lệ thuận với hiệu điện thế giữa hai đầu nó, nên điện kế có thể chia độ theo đơn vị volt dựa trên giá trị đã biết của điện trở. Hai đầu của volt kế gắn với hai nơi của mạch điện mà giữa đó chúng ta muốn đo hiệu điện thế, n/2. Chú ý mức độ cồng kềnh của loại hình vẽ theo kiểu này, và sự khó khăn khi diễn tả cái gì nối với cái gì. Đây là lí do vì sao hình vẽ mạch điện thường được biểu diễn dưới dạng giản đồ. Hình n/3 là giản đồ biểu diễn hình n/2.

Cơ cấu thiết đặt đo dòng điện và hiệu điện thế là khác nhau. Khi chúng ta đ dòng điện, chúng ta tìm xem "có bao nhiêu chất đi qua", nên chúng ta đặt điện kế ở nơi mà toàn bộ dòng điện buộc phải đi qua nó. Tuy nhiên, hiệu điện thế không phải là "lượng chất đi qua", mà nó là số đo năng lượng điện. Nếu ampe kế giống như cái đồng hồ nước nhà bạn, thi volt kế giống như một cái sào đo cho bạn biết thác nước cao bao nhiêu, nên bạn có thể xác định bao nhiêu năng lượng sẽ được giải phóng bởi từng kilogam nước rơi xuống. Chúng ta không cần buộc nước phải đi qua cái sào đo! Sắp xếp trong hình n/3 là một mạc *song song*: có một "ngã ba đường", tại đó một số dòng điện sẽ chạy theo một lối, và một số sẽ chạy theo lối kia. Hình n/4 là cách mắc dây nối tiếp: toàn bộ dòng điện sẽ lần lượt đi qua tất cả mọi thành phần mạch điện. Chúng ta sẽ khảo sát mạch điện nối tiếp và song song chi tiết hơn trong chương tiếp theo.

Nếu bạn nối volt kế không đúng, nối tiếp với bóng đèn và pin, thì điện trở trong lớn của nó sẽ chặn dòng điện xuống thấp đến mức bóng đèn không sáng lên được. Bạn sẽ làm ảnh hưởng gay gắt đến mạch điện khi cố đo một vài thứ gì đó về nó.

Nối ampe kế không đúng, nối song song, còn thậm tệ hơn nữa. Ampe kế không có gì ngoài một sợi dây bên trong nó mang lại điện trở, nên là sự một sự lựa chọn, đa phần dòng điện sẽ chạy qua nó chứ không qua bóng đèn. Trên thực tế, dòng điện quá lớn chạy qua ampe kế có nguy cơ gây cháy pin hay dụng cụ đo, và có thể là cả hai! Vì lí do này, đa số ampe kế đều có cầu chì hay bộ ngắt mạch bên trong nó. Một số mẫu ampe kế sẽ ngắt cầu dao ngắt mạch của nó và tạo ra âm thanh báo hiệu có thể nghe rõ khi rơi vào tình huống này, còn một số mẫu khác chỉ đơn giản là nổ cầu chì và ngừng hoạt động cho đến khi bạn thay cầu chì mới.



n/1. Một biểu đồ đơn giản cách hoạt động của volt kế. 2. Đo hiệu điện thế hai đầu bóng đèn. 3. Cũng thiết đặt trên nhưng dưới dạng giản đồ. 4. Cách đo dòng điện khác với đo hiệu điện thế

Câu hỏi thảo luận

A. Trong hình n/1, có sự khác biệt nào về hiệu điện thế đo được không nếu như chúng ta gắn hai đầu volt kế với hai điểm khác dọc theo cùng đoạn dây dẫn đó?

B. Giải thích tại sao sẽ không chính xác khi định nghĩa điện trở là lượng điện tích mà vật không cho phép chạy qua.

3.5 Tính dẫn điện của vật chất

Định luật Ohm có một tính chất đáng chú ý, đó là dòng điện sẽ chạy đáp lại sự chênh lệch điện thế có giá trị nhỏ tới mức mà chúng ta còn có thể cẩn thận tạo ra được. Tương tự như việc đẩy một cái sọt trên nền nhà, ví dụ như một con bọ đẩy trượt cái sọt trên nền nhà, mặc dù ở tốc độ rất chậm. Con bọ không thể làm đươc việc này vì lực ma sát tĩnh, chúng ta nghĩ đó là một hiệu ứng phát sinh từ khuynh hướng của những chỗ lồi và lõm vi mô trên cái sọt và nền nhà khóa lại với nhau. Thực tế thì định luật Ohm áp dụng cho hầu hết chất rắn có một cách giải thích thú vị: ít nhất thì cũng có một số electron không bị "khóa chân" hoàn toàn trong bất kì nguyên tử đặc biệt nào.

Tổng quát hơn, chúng ta có thể hỏi có bao nhiêu điện tích thật sự chạy trong những chất rắn, chất lỏng, và chất khí khác nhau. Câu hỏi này sẽ đưa chúng ta tới chỗ giải thích nhiều hiện tượng thú vị, như tia sét, lớp vỏ xanh xanh gắn trên các cực của bình xe hơi, và nhu cầu điện phân trong thức uống thể thao.

Chất rắn

Theo thuật ngữ nguyên tử, đặc trưng xác định của chất rắn là các nguyên tử của nó liên kết chặt chẽ với nhau, và hạt nhân không thể chuyển động quá xa vị trí cân bằng của chúng. Như vậy, các electron, chứ không phải ion, là hạt mang điện khi dòng điện chạy trong chất rắn. Sự thật này đã được Tolman và Stewart xác minh bằng thực nghiệm, trong một thí nghiệm trong đó họ xoay tròn một cuộn dây lớn rồi bất ngờ làm nó dừng lại. Họ thấy dòng điện trong dây ngay tức thì sau khi cuộn dây dừng lại, cho thấy các hạt mang điện không phải bị khóa cố định vào một nguyên tử đặc biệt nào tiếp tục chuyển dời vì quán tính riêng của chúng, ngay cả sau khi vật chất của dây nói chung đã dừng lại. Hướng

của dòng điện cho thấy các hạt mang điện âm đang tiếp tục chuyển dời. Tuy nhiên, dòng điện chỉ tồn tại trong một khoảnh khắc; vì khi các hạt mang điện âm tập trung ở đầu cuối dòng của dây, thì những hạt khác bị ngăn gia nhập vào đó vì lực đẩy điện của chúng, cũng như lực hút từ phía đầu ngược dòng, nơi còn lại điện tích toàn phần dương. Tolman và Stewart còn xác định được cả tỉ số khối lượng trên điện tích của các hạt đó. Chúng ta không cần đi vào phân tích chi tiết ở đây, nhưng các hạt có khối lượng lớn sẽ khó giảm tốc, dẫn tới xung điện mạnh hơn và lâu hơn, còn các hạt có điện tích lớn sẽ chịu lực điện mạnh hơn làm hãm chúng lại, gây ra xung điện yếu hơn và ngắn hơn. Như thế, tỉ số khối lượng trên điện tích xác định được phù hợp với tỉ số m/q của electron trong phạm vi độ chính xác của thí nghiệm đó, về cơ bản đã xác minh các hạt đó là electron.

Thực tế chỉ có các electron mang điện trong chất rắn, chứ không phải ion, có nhiều ứng dụng quan trọng. Một ví dụ là nó giải thích tại sao các dây không bị cọ sờn hay hóa thành bụi sau khi dẫn điện một thời gian dài. Các electron rất nhỏ (có thể xem như chất điểm), và thật dễ hình dung chúng truyền qua giữa các khe hở giữa các nguyên tử mà không tạo ra chỗ trống hay khe nứt trong cấu trúc nguyên tử. Với những người có chút kiến thức hóa học, nó cũng giải thích được tại sao mọi chất dẫn điện tốt nhất đều nằm bên trái của bảng tuần hoàn hóa học. Những nguyên tố trong vùng đó chỉ liên kết rất lỏng lẻo với những electron lớp ngoài cùng của chúng.

Chất khí

Các phân tử trong chất khí trải qua đa số thời gian ở cách nhau những khoảng cách lớn, nên chúng không thể dẫn điện theo cách như chất rắn, bằng cách chuyển dời electron từ nguyên tử này sang nguyên tử khác. Do đó, không có gì phải ngạc nhiên trước việc chất khí là một chất cách điện tốt.

Chất khí cũng thường phi ohm tính. Khi các điện tích trái dấu thiết lập trên một đám mây giông và mặt đất bên dưới, sự chênh lệch điện thế càng lúc càng lớn dần. Tuy nhiên, không hề có dòng điện nào chạy mãi cho đến khi hiệu điện thế đạt tới một giá trị ngưỡng nào đó và chúng ta có một ví dụ ấn tượng về cái được gọi là tia lửa điện hay sự phóng điện. Nếu không khí tuân theo định luật Ohm, thì dòng điện giữa đám mây và mặt đất sẽ tăng một cách đều đặn đơn giản khi hiệu điện thế tăng lên, chứ không bằng không cho đến khi hiệu điện thế đạt tới giá trị ngưỡng. Hành vi này có thể giải thích như sau. Tại một số chỗ, lực điện tác dụng lên các electron và hạt nhân của các phân tử không khí trở nên mạnh đến mức các electron bị bứt ra khỏi một số phân tử. Khi đó, các electron gia tốc về phía đám mây hoặc mặt đất, tùy thuộc phía nào tích điện dương, và các ion dương gia tốc về phía ngược lại. Khi những hạt mang điện này gia tốc, chúng va chạm và làm ion hóa các phân tử khác, tạo nên đợt thác hạt phát triển nhanh chóng.

Chất lỏng

Các phân tử chất lỏng có thể trượt qua nhau, nên các ion cũng như electron đều có thể mang dòng điện. Nước tinh khiết là một chất dẫn điện kém vì các phân tử nước có xu hướng giữ chặt các electron của chúng, và do đó không có nhiều electron hay ion sẵn có để chuyển dời. Tuy nhiên, nước có thể trở thành một chất dẫn điện khá tốt, nếu chúng hòa tan thêm một lượng nhỏ những chất nhất định gọi là chất điện phân, chúng thường là muối. Ví dụ, nếu chúng ta thêm muối ăn, NaCl, vào nước, các phân tử NaCl sẽ phân li thành các ion Na^+ và Cl^-, khi đó chúng có thể chuyển dời và tạo ra dòng điện. Đây là nguyên nhân vì sao dòng điện có thể chạy giữa các tế bào trong cơ thể bạn: thể lỏng của tế bào có hòa tan một ít muối. Khi chúng ta đổ mồ hôi, chúng ta không chỉ mất nước mà còn mất chất điện phân, nên sự khử nước đóng vai trò hủy hoại hệ thống điện tế bào của chúng ta. Đây là lí do cho

sự có mặt của chất khoáng trong thức uống thể thao và nước cấp thêm cho trẻ em bị tiêu chảy.

Vì dòng điện trong chất lỏng toàn bộ là các ion, nên không có gì ngạc nhiên khi chúng ta nhìn thấy bằng chứng vật chất khi nó xảy ra. Ví dụ, sau khi dùng bình xe hơi một thời gian, axit H_2SO_4 trong bình trở nên cạn kiệt các ion hydrogen, chúng là hạt mang điện chủ yếu khép kín dòng điện bên trong bình. Khi đó, phần SO_4 thừa lại hình thành nên một lớp bụi màu xanh nhìn thấy được trên các cực của bình.

Tốc độ của dòng điện và tín hiệu điện

Khi tôi nói chuyện điện thoại với mẹ vợ của mình ở cách đây hai ngàn dặm, tôi không để ý thấy sự trì hoãn nào trong khi các tín hiệu truyền tới lui trong hành trình dài của nó. Do đó, các tín hiệu điện phải truyền rất nhanh, nhưng chính xác là nhanh cỡ nào ? Câu trả lời khá tinh vi. Để chắc chắn, chúng ta hãy tự giới hạn chỉ xét dòng điện trong kim loại, chúng bao gồm các electron.

Bản thân các electron có lẽ chỉ di chuyển ở tốc độ vài ngàn dặm một giờ, và chuyển động của chúng là chuyển động nhiệt chủ yếu là ngẫu nhiên. Như vậy, các electron trong chiếc điện thoại của tôi không thể chạy tới chạy lui giữa California và New York đủ nhanh để mang các tín hiệu điện. Cho dù chuyển động ngàn-dặm-một-giờ của chúng là chuyển động có tổ chức chứ không phải ngẫu nhiên, nhưng chúng vẫn phải mất nhiều phút để đi về. Trên thực tế, trung bình còn mất nhiều thời gian hơn nữa cho electron thực hiện cuộc hành trình. Dòng điện trong dây chỉ gồm một sự trôi giạt chung chậm chạp, ở tốc độ vào bậc vài centimét một giây, hòa cùng với chuyển động nhiệt ngẫu nhiên nhanh hơn. Chúng ta có thể so sánh tốc độ này với sự di cư từ từ sang phía tây của dân số nước Mĩ. Nếu chúng ta quay phim về sự chuyển dời của toàn bộ dân cư nước Mĩ từ không gian bên ngoài, và có thể chiếu nó ở tốc độ cao sao cho người ta có vẻ đi lại hối hả như những con kiến, chúng ta nghĩ chuyển động đó là khá ngẫu nhiên, và trong tức thời chúng ta không chú ý tới sự chuyển dịch sang phía tây. Chỉ sau nhiều năm chúng ta mới nhận ra số dân tràn sang miền tây đã vượt quá số người đi sang phía đông, nên dân cư ở California đã tăng lên.

Vậy tại sao tín hiệu điện lại truyền nhanh như thế nếu như tốc độ trôi giạt trung bình là quá chậm ? Câu trả lời là một sự nhiễu loạn trong hệ thống điện truyền đi nhanh hơn rất nhiều so với chính các điện tích. Để hình dung, bạn hãy cho những quả bóng golf vào đầy trong một cái ống và sau đó chèn thêm một quả nữa ở đầu phía bên này, khiến cho một quả rơi ra ở đầu bên kia. Lực truyền đến đầu kia chỉ trong một phần của giây, nhưng trong khoảng thời gian đó các quả bóng chỉ đi được vài centimét.

Vì thực tế sự dẫn điện quá phức tạp nên chúng ta thường mô tả hiện tượng bằng những biểu tượng không chính xác về mặt kĩ thuật. Điều này còn phù hợp chừng nào chúng ta còn biết chúng chỉ là những biểu tượng. Ví dụ, giả sử tổng thống Pháp và tổng thống Nga bắt tay nhau, và vị chính khách nước Pháp tình cờ bắt được một điện tích dương, điện tích đó làm sốc vị chính khách người Nga kia. Chúng ta có thể nói rằng các hạt tích điện dương có thừa trong cơ thể vị người Pháp, chúng đều đẩy lẫn nhau, khiến cái bắt tay là một cơ hội để các điện tích phân bố ra xa nhau. Trên thực tế, phải mất hàng phút các ion trong cơ thể của một người mới có thể thật sự trôi giạt sâu vào cơ thể một người khác. Cái thật sự xảy ra là trong cơ thể của người nhận cú sốc đã có sẵn những ion dương và âm khác nhau tự do di chuyển. Ngay trước khi bàn tay tích điện của kẻ thủ phạm chạm vào bàn tay đẫm mồ hôi của người nạn nhân, các điện tích trong cơ thể của người bị sốc bắt đầu đẩy các ion dương và hút các ion âm trong cơ thể người kia. Cảm giác sốc rất nhanh gây ra bởi sự phóng đột ngột của các ion của nạn nhân qua khoảng cách có lẽ là một micromét, hiệu ứng này xảy ra đồng thời trong toàn bộ cơ thể, mặc dù nó diễn ra mạnh hơn ở cánh tay và bàn tay, vì chúng ở gần cơ thể người kia hơn.

3.6 Áp dụng tính toán

Như đã nói ở ví dụ 1, việc định nghĩa dòng điện là tốc độ biến thiên điện tích theo thời gian phải được biểu diễn lại dưới dạng đạo hàm trong trường hợp tốc độ

biến thiên không phải là một hằng số.

$$I = \frac{dq}{dt}$$

Ví dụ 8. Tìm dòng điện, cho biết điện tích

Một quả khinh khí cầu tích điện rơi xuống đất, và điện tích của nó bắt đầu thoát vào Trái Đất. Giả sử điện tich trên khí cầu được cho bởi $q = ae^{-bt}$. Tìm dòng điện dưới dạng một hàm của thời gian và giải thích câu trả lời.

Lấy đạo hàm, ta có:

$$I = \frac{dq}{dt} = -abe^{-bt}$$

Hàm lũy thừa tiến đến không khi số mũ càng có giá trị âm lớn. Điều này có nghĩa là cả điện tích và dòng điện đều giảm độ lớn theo thời gian. Cần nhớ rằng điện tích tiến tới không, vì khi cầu đang mất dần điện tích của nó. Cũng phải hiểu rằng dòng điện giảm về độ lớn, vì điện tích không thể chạy qua ở cùng một tốc độ mãi mãi mà không giảm dần đến không.

Ví dụ 9. Tìm điện tích, cho biết dòng điện

Trong đoạn máy gia tốc ATLAS biểu diễn trên hình i, dòng điện chạy tới lui giữa hai hình trụ được cho bởi $I = a\cos bt$. Hỏi điện tích trên một trong các trụ có dạng hàm gì theo thời gian ?

Chúng ta đã biết dòng điện và muốn tìm điện tích, tức là chúng ta đã biết đạo hàm và muốn tìm nguyên hàm đã mang lại đạo hàm đó. Điều này có nghĩa là chúng ta phải lấy tích phân

$$q = \int Idt = \int a\cos btdt = \frac{a}{b}\sin bt + q_0$$

trong đó q_0 là hằng số tích phân.

Chúng ta có thể làm sáng tỏ kết quả này để giải thích tại sao cần sử dụng chất siêu dẫn. Hằng số b phải rất lớn, vì dòng điện được cho dao động tới lui hàng triệu lần mỗi giây. Nhìn vào kết quả cuối cùng, chúng ta thấy nếu b là một số rất lớn, và q là một lượng điện tích đáng kể, thì a cũng phải là một số rất lớn. Nếu a là một con số lớn thì dòng điện phải rất lớn, nên nó sẽ làm nóng máy gia tốc lên rất nhiều nếu như nó chạy qua một vật dẫn bình thường.

Tóm tắt chương

Từ khóa chọn lọc

dòng điện ……..	tốc độ điện tích đi qua một ranh giới nhất định
ampe …….	đơn vị hệ mét của dòng điện, 1A = 1C/s
ampe kế ……	dụng cụ đo dòng điện
mạch điện …….	một dụng cụ điện trong đó điện tích có thể quay trở lại vị trí xuất phát của nó, chứ không phóng điện một lần rồi biến mất
mạch hở ……	mạch điện không thực hiện được chức năng của nó vì có khe hở trong nó
ngắn mạch ……	mạch điện không thực hiện được chức năng vì điện tích được cho đi qua một "lối tắt" điện

	trở thấp, thay vì đi qua một đường dẫn thực hiện một cái gì đó có ích
điện thế ……	thế năng điện trên đơn vị điện tích có bởi một hạt mang điện nằm ở một nơi nhất định trong không gian
volt ……..	đơn vị hệ mét của điện thế, 1V = 1J/C
volt kế …….	dụng cụ đo hiệu điện thế
ohm tính …….	mô tả một chất trong đó dòng điện giữa hai điểm tỉ lệ thuận với hiệu điện thế giữa chúng
điện trở ……	tỉ số của hiệu điện thế và dòng điện trong một vật cấu tạo từ một chất ohm tính
ohm …….	đơn vị hệ mét của điện trở, 1Ω = 1V/A

Kí hiệu

I	dòng điện
A	đơn vị ampe
V	điện thế
V	đơn vị volt
R	điện trở
Ω	đơn vị ohm

Thuật ngữ và kí hiệu khác

thế điện ……	kém chính thức hơn từ "điện thế" dùng ở đây, mặc dù tên gọi dễ gây nhầm lẫn, nhưng nó không đồng nhất với thế năng điện
eV …….	đơn vị năng lượng, bằng *e* nhân với 1 volt; 1,6 x 10^{-19} J

Tóm tắt

Mọi hiện tượng điện đều phát sinh từ sự có mặt hay dịch chuyển của các điện tích. Đa số thiết bị điện thực tế hoạt động trên cơ sở chuyển động của điện tích vòng quanh một mạch điện hoàn chỉnh, nên điện tích có thể chạy vòng tròn và không biến mất ở đầu bên kia. Số đo hữu dụng nhất của dòng điện là cường độ dòng điện, $I = \Delta q/\Delta t$.

Một thiết bị điện có nhiệm vụ là chuyển hóa từ dạng này sang dạng khác, ví dụ, một bóng đèn, sử dụng năng lượng ở tốc độ phụ thuộc cả vào mức độ nhanh mà dòng điện chạy qua nó và bao nhiêu công được thực hiện trên mỗi đơn vị điện tích. Đại lượng thứ hai vừa nói được biết là hiệu điện thế giữa điểm dòng điện đi vào và điểm dòng điện đi ra khỏi nó. Vì có một loại thế năng liên quan tới lực điện, nên lượng công mà chúng thực hiện bằng với hiệu thế năng giữa hai điểm, và vì vậy chúng ta có thể định nghĩa hiệu điện thế trực tiếp dưới dạng thế năng điện, $\Delta V = \Delta PE_{điện}/q$. Tốc độ tiêu hao năng lượng là $P = I\,\Delta V$.

Nhiều hiện tượng điện quan trọng chỉ có thể giải thích được nếu chúng ta hiểu cơ chế của dòng điện chạy ở mức độ nguyên tử. Trong kim loại, dòng điện được mang bởi các electron, trong chất lỏng là các ion. Chất khí bình thường là một chất dẫn điện kém, trừ khi các nguyên tử của chúng bị tác động lực điện mạnh đến mức chúng bị ion hóa.

Nhiều chất, gồm tất cả chất rắn, phản ứng với lực điện theo cách dòng điện giữa hai điểm tỉ lệ thuận với hiệu điện thế giữa hai điểm đó. Một chất như thế được gọi là có ohm tính, và một vật cấu thành từ một chất ohm tính có thể được lượng giá qua điện trở của nó, $R = \Delta V/I$. Một hệ quả quan trọng là một vật dẫn hoàn hảo, có $R = 0$, phải có cùng một điện thế tại mọi điểm bên trong nó.

Bài tập

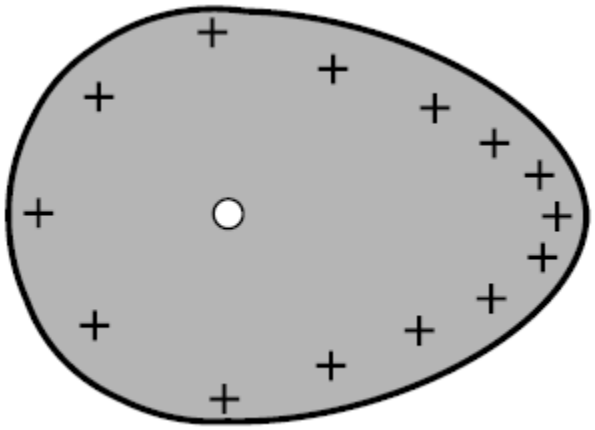
1. Một điện trở có hiệu điện thế ΔV giữa hai đầu nó, cho dòng điện I chạy qua.

(a) Tìm phương trình cho công suất tiêu hao dưới dạng nhiệt chỉ theo các biến I và R, loại bỏ ΔV.

(b) Nếu đường dây điện dẫn vào nhà bạn mang một dòng điện cho trước nào đó, hãy làm sáng tỏ từng phần phương trình của bạn để giải thích xem điện trở của dây dẫn là lớn hay nhỏ.

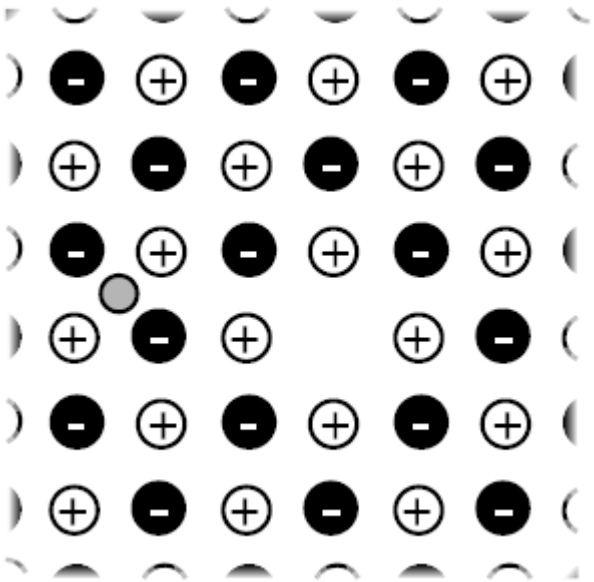
2. (a) Hãy biểu diễn công suất tiêu hao bởi một điện trở chỉ theo R và ΔV, loại bỏ I.

(b) Ổ điện trong nhà bạn chủ yếu là 110V, nhưng mạch điện cho bếp điện, điều hòa không khí, máy giặt và máy sấy thường là 220V. Hai loại mạch điện này có ổ cắm hình dạng khác nhau. Giả sử bạn mắc lại dây của máy sấy sao cho nó có thể cắm vào ổ điện 110V. Điện trở sinh ra nhiệt của máy sấy lúc bình thường là 200W. Hỏi lúc này nó thật sự tiêu thụ bao nhiêu công suất ?



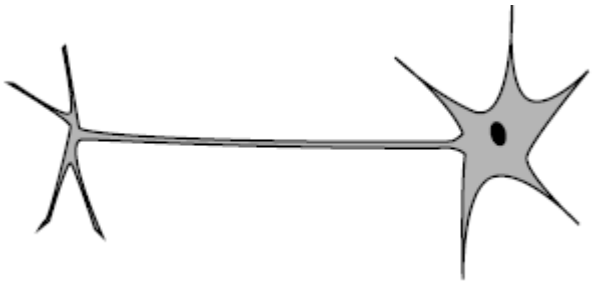
3. Như đã đề cập trong bài giảng, khi một vật dẫn đạt tới cân bằng trong đó điện tích của nó nằm cố định, thì luôn luôn có một lực điện bằng không tác dụng lên một điện tích nằm bên trong nó, và bất kì điện tích dư thừa nào sẽ tự dàn lên trên mặt của nó. Lớp điện tích mặt tự sắp xếp sao cho tạo ra một lực tổng hợp bằng không tác dụng lên bất cứ điểm nào bên trong vật. (Nếu không thì điện tích tự do bên trong vật không thể nào nằm yên được) Giả sử bạn có một vật dẫn hình giọt nước mắt giống như ở hình bên. Vì giọt nước mắt là một vật dẫn nên có những điện tích tự do ở khắp nơi bên trong nó, nhưng hãy xét một hạt mang điện tự do nằm ở nơi đánh dấu vòng tròn trắng. Giải thích tại sao, để tạo ra lực bằng không tác dụng lên điện tích này, lớp điện tích mặt phải dày đặc hơn ở phần nhọn của giọt nước mắt. (Nguyên nhân tương tự giải thích tại sao cột thu lôi lại được làm nhọn. Những đám mây giông tích điện khiến cho các điện tích dương và âm chuyển động tới hai đầu đối diện của cột. Ở đầu nhọn phía trên của cột thu lôi, điện tích có xu hướng tập trung ở chỗ nhọn, và điện tích này hút lấy tia chớp).

4. Sử dụng kết quả bài tập 3 chương 1, tìm phương trình cho điện thế tại một điểm cách điện tích điểm Q một khoảng r (Lấy $V = 0$ ở bất cứ đâu mà bạn thích).



5. Trở lại bài tập 6 chương 1 về tinh thể natri cloride, giả sử ion lithium nhảy từ chỗ trống đó sang chiếm giữ một trong bốn chỗ trống lân cận gần nó nhất. Hỏi nó sẽ nhảy sang chỗ trống nào, và nếu nó bắt đầu nằm nghỉ, thì nó sẽ ở chỗ đó trong bao lâu ? (Nó vẫn tiếp tục và chuyển động và gia tốc sau đó, nhưng chúng ta không xét tới điều này) [Gợi ý: Cách giải tương tự như đối với những bài toán khác, nhưng bạn phải làm việc với điện thế và thế năng chứ không phải lực].

6. Trở lại với anh bạn neuron quen thuộc của chúng ta trong bài tập 1 chương 1, bây giờ hãy xem điều gì xảy ra khi dây thần kinh bị kích thích truyền thông tin. Khi giọt chất ở phía trên (thân tế bào) bị kích thích, nó làm cho các ion Na^+ đi vào phần trên của phần đuôi (axon). Xung điện này sau đó truyền xuống axon, giống như lửa cháy lan xuống từ đầu cầu chì, với các ion Na^+ ở mỗi đầu ban đầu đi ra, sau đó lại quay vào. Nếu 10^{10} ion Na^+ đi qua màng tế bào trong 5 ms, thì dòng điện sinh ra có độ lớn bao nhiêu ?



7. Nếu một bóng đèn điển hình tiêu thụ khoảng 900 mA từ mạch điện gia dụng 110 V, thì điện trở của nó bằng bao nhiêu ? (Đừng quan tâm là trong thực tế dòng điện biến thiên liên tục).

8. Ngày nay, ngay cả một chiếc xe hơi sang trọng loại lớn như Cadillac cũng có thể có hệ thống điện có công suất tương đối thấp, vì nó không cần thực hiện nhiều công việc ngoài việc thắp sáng các bóng đèn, bật mở cửa, vân vân. Tuy nhiên, trong tương lai gần, các nhà chế tạo đã lên kế hoạch bắt đầu sản xuất những chiếc xe có hệ thống điện mạnh hơn khoảng năm lần. Như thế sẽ cho phép những bộ phận tiêu hao năng lượng nhất định như cái bơm nước bật mở động cơ điện và tắt đi khi chúng không cần thiết nữa – hiện nay chúng chạy trực tiếp từ động cơ, nên chúng không thể tắt được. Người ta còn có thể chế tạo loại động cơ có thể tắt khi gặp đèn đỏ và rồi mở trở lại mà không cần khởi động lại, vì các van có thể được cấp nguồn bằng điện. Hệ thống điện của xe hơi có acquy 12 V (với bộ nạp điện 14 V), nhưng những hệ thống mới sẽ có bình acquy 36 V (với bộ nạp điện 42 V).

(a) Giả sử bình acquy trong một chiếc xe hơi đời mới được dùng để chạy một dụng cụ yêu cầu công suất ngang với dụng cụ tương ứng trong xe đời cũ. Dựa trên những đặc điểm vừa nêu ở trên, hãy so sánh dòng điện chạy trong dây dẫn của hệ thống điện của xe đời mới so với xe đời cũ ?

(b) Mục đích thực tế của việc dùng điện thế cao hơn là để sử dụng những dụng cụ yêu cầu công suất lớn hơn. Bạn có thể đoán xem vì sao người ta quyết định đổi sang dùng acquy 36 V chứ không tăng công suất mà không tăng hiệu điện thế ?

9. (a) Bạn lấy một đĩa LP ra khỏi bao đựng của nó, và nó cần một điện tích tĩnh điện 1 nC. Bạn để cho nó quay ở tốc độ bình thường $33\frac{1}{3}$ vòng/phút, và điện tích chuyển động theo vòng tròn tạo nên dòng điện. Hỏi cường độ dòng điện bằng bao nhiêu ampe ?

(b) Mặc dù mẫu hành tinh nguyên tử có thể hoạt động được mà không cần bất kì giá trị nào cho bán kính quỹ đạo của các electron, nhưng những mô hình tiến bộ hơn mà chúng ta sẽ nghiên cứu trong phần sau bộ sách này tiên đoán những bán kính xác định. Nếu electron được tưởng tượng đang quay tròn xung quanh hạt nhân với tốc độ 2,2 x 10^6 m/s, trong một quỹ đạo có bán kính 0,5 An Minh, thì cường độ dòng điện có giá trị bao nhiêu ?

10. Chúng ta đã nói là các điện trở làm tiêu tán nhiệt, tức là chúng ta đã giả sử $P = I\,\Delta V$ luôn luôn lớn hơn không. Hỏi $I\,\Delta V$ có thể nào là số âm đối với một điện trở ? Nếu thế, hỏi người ta có thể chế tạo một cái tủ lạnh bằng cách mắc vào đó một điện trở theo kiểu sao cho nó hấp thụ nhiệt thay vì tiêu tán nhiệt ?

11. Bạn nhận được một chiếc pin, một cái bóng đèn và một đoạn dây dẫn. Hãy vẽ ít nhất là hai cơ cấu của những thiết bị này mang lại kết quả là bóng đèn sáng, và ít nhất là hai cơ cấu không làm sáng bóng đèn (Đừng vẽ giản đồ). Nếu bạn không chắc chắn điều gì sẽ xảy ra, hãy mượn dụng cụ từ chỗ thầy giáo của bạn và hãy thử nó. Lưu ý là bóng đèn có hai tiếp xúc điện: một là đế kim loại lắp ngoài, và một là chỗ đầu nhọn.

12. Trong một dây dẫn có mang dòng điện 1 pA, hỏi bạn phải đợi bao lâu, tính trung bình, để thấy electron tiếp theo đi qua một điểm cho trước ? Biểu diễn đáp số của bạn bằng đơn vị mili giây.

$$\Delta t = Dq / I = e / I = 0{,}160\mu s$$

13. Hình bên dưới là giản đồ đơn giản của một ống phóng electron theo kiểu ống phóng dùng trong thí nghiệm Thomson, hay ống phóng tạo ra chùm electron trong ống hình tivi. Các electron tự bứt ra khỏi điện cực âm (catôt) sau đó gia tốc về phía điện cực dương, điện cực có lỗ trống bên trong nó. (Một khi chúng đi qua lỗ trống, chúng sẽ chậm dần. Tuy nhiên, nếu hai điện cực khá gần nhau, thì sự chậm dần này là một hiệu ứng nhỏ, vì lực hút và lực đẩy mà các electron chịu có xu hướng triệt tiêu lẫn nhau).

(a) Nếu hiệu điện thế giữa hai điện cực là ΔV, thì vận tốc của electron khi nó ló ra ở B là bao nhiêu ? (Giả sử vận tốc ban đầu của nó, ở A, là không đáng kể).

5,9 x 10^7 m/s (20% c)

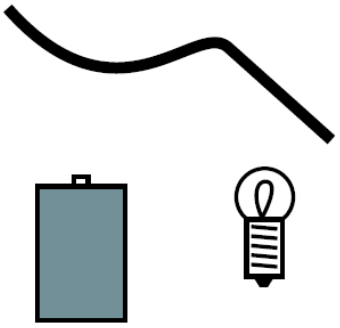
(b) Đánh giá câu trả lời của bạn bằng số cho trường hợp trong đó ΔV = 10 kV, và so sánh kết quả với tốc độ ánh sáng.

14. Hình trên biểu diễn một giản đồ đơn giản của cái gọi là máy gia tốc tandem, dùng để gia tốc chùm ion lên tới tốc độ vào bậc 1% tốc độ ánh sáng. Hạt nhân của những ion này va chạm với hạt nhân của những nguyên tử trong bia, tạo ra phản ứng hạt nhân dùng cho các thí nghiệm nghiên cứu cấu trúc của hạt nhân. Lớp vỏ bên ngoài của máy gia tốc là một vật dẫn ở điện thế bằng không (tức là cùng điện thế với mặt đất). Điện cực ở chính giữa, gọi là "điện cực", nằm ở mức điện thế dương cao, có lẽ là hàng triệu volt. Các ion âm có điện tích – 1 đơn vị (tức là các nguyên tử có dư một electron) được tạo ra ở phía bên ngoài phía bên phải, thường là bằng phản ứng hóa học với cesium, một nguyên tố hóa học có xu hướng giải phóng electron mạnh mẽ. Lực điện và từ tương đối yếu được dùng để đưa những ion – 1 đơn vị này vào máy gia tốc, ở đó chúng bị hút về phía điện cực. Mặc dù

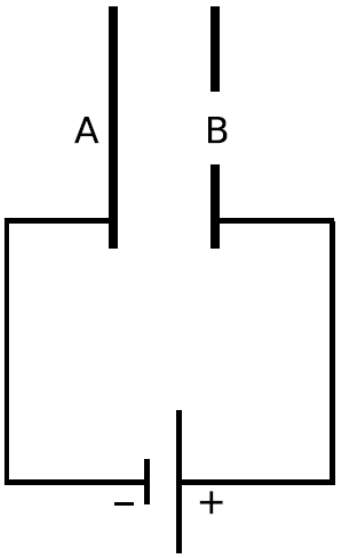
ở giữa điện cực có một lỗ trống bên trong nó để cho các ion đi qua, nhưng trong đó có một lá cabon rất mỏng mà chúng phải xuyên qua. Đi qua tấm chắn sẽ tước mất một số electron, làm cho nguyên tử biến đổi thành ion dương có điện tích + *n* lần điện tích nguyên tố. Giờ thì nguyên tử mang điện dương, nên nó bị điện cực đẩy, và gia tốc theo đường đi của nó ra khỏi máy gia tốc.

(a) Tìm vận tốc *v* của chùm ion dương ló ra theo *n*, khối lượng *m* của chúng và điện thế cực *V*, và những hằng số cơ bản. Bỏ qua sự thay đổi nhỏ về khối lượng do sự mất electron khi đi qua tấm chắn.

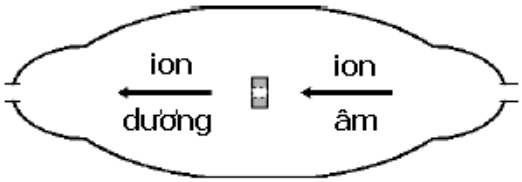
(b) Để hợp nhất proton với proton, cần vận tốc chùm tia tối thiểu là vào khoảng 11% tốc độ ánh sáng. Trong trường hợp này, điện thế cực cần thiết sẽ là bao nhiêu ?



Bài 11



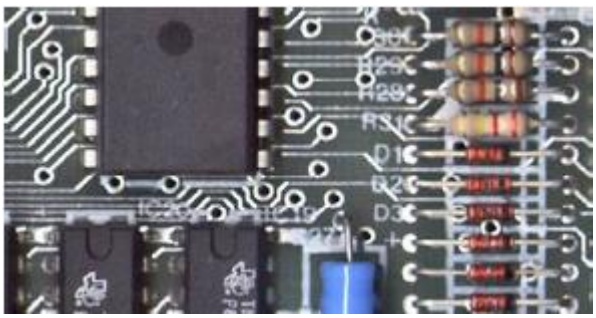
Bài 13



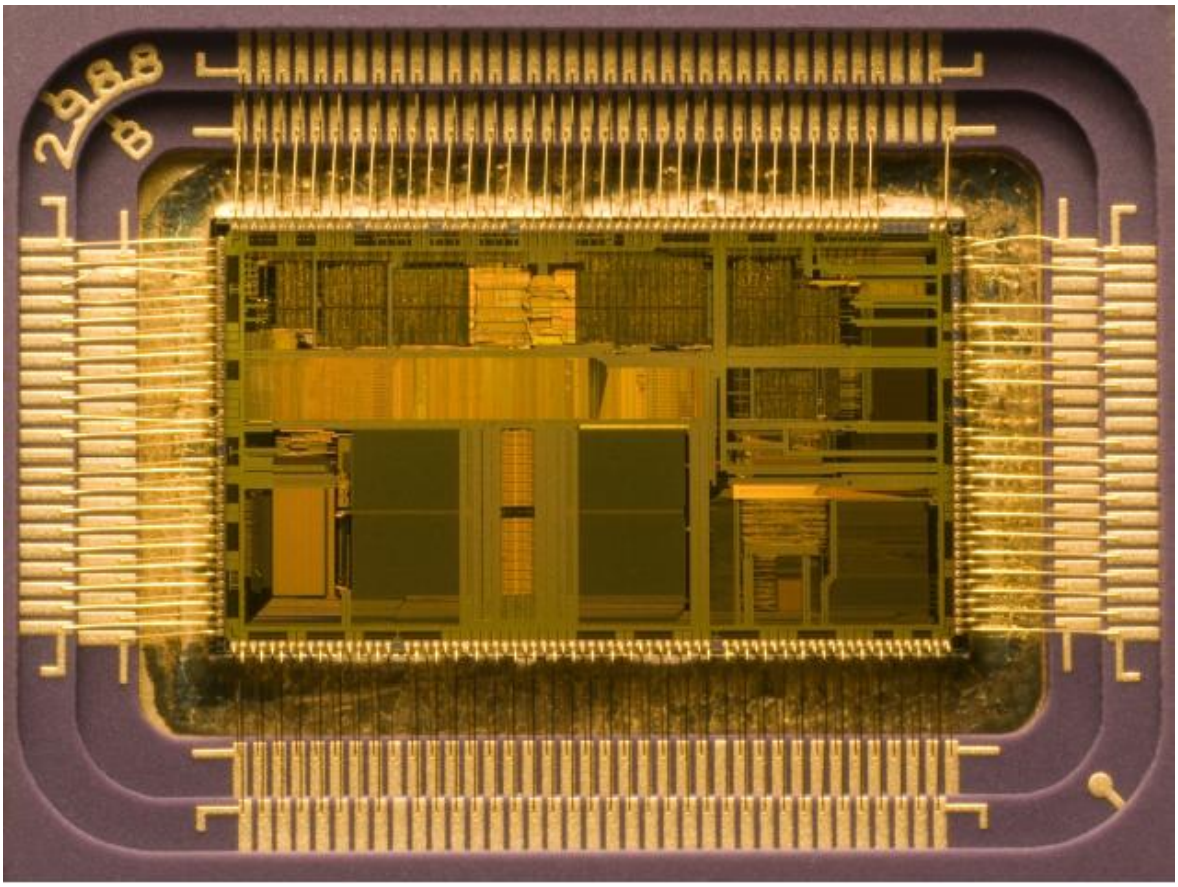
Bài 14

15. Ba điện tích, mỗi điện tích có độ lớn Q ($Q > 0$) nằm cân bằng ở ba đỉnh của một tam giác cân có cạnh bên là b. Bạn ném một hạt khối lượng m và điện tích dương q ra xa, với vận tốc ban đầu v. Mục đích của bạn là muốn hạt đó đi qua tâm của tam giác, và tay ném của bạn là hoàn hảo, và bạn thoải mái ném theo bất cứ hướng nào mà bạn thích. Hỏi giá trị nhỏ nhất đối với v là bao nhiêu ?

16. Để đo dòng điện, bạn phải làm nhiều thao tác khác nhau hơn đối với mạch điện so với đo hiệu điện thế. Hỏi đo đại lượng nào sẽ dễ thực hiện hơn đối với một bản mạch in sẵn, trong đó các dây dẫn thật ra là những rãnh kim loại gắn bên trong bản mạch ?



Một bản mạch in sẵn, giống như bản đề cập tới trong bài toán 16.



Chip máy tính Intel 486 trên bản mạch của nó

Chương 4
MẠCH ĐIỆN, PHẦN 2

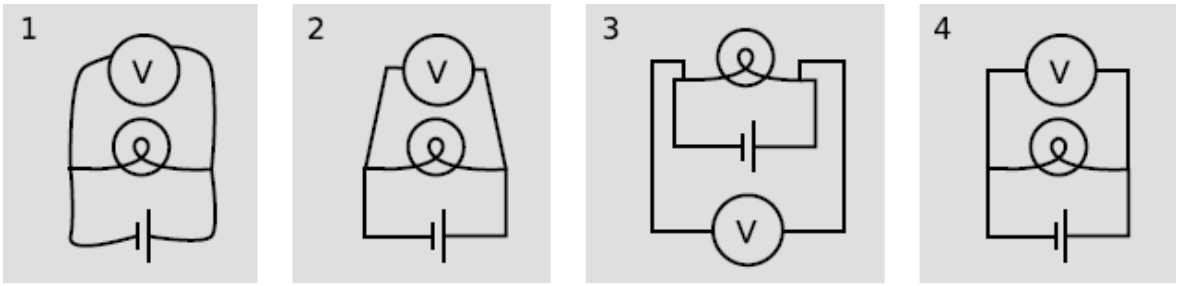
Trong chương 3, chúng ta đã tự giới hạn chỉ khảo sát những mạch điện tương đối đơn giản, về cơ bản không gì hơn ngoài ngoài một chiếc pin và một cái bóng đèn. Mục tiêu của chương này là giới thiệu với bạn những mạch điện phức tạp hơn, gồm nhiều điện trở hay nguồn điện thế mắc nối tiếp, song song, hoặc cả hai.

Tại sao chúng ta cần phải biết những thứ này ? Xét cho cùng, nếu bạn có dự định trở thành một kĩ sư điện, có thể bạn không cần học vật lí từ cuốn sách này. Tuy nhiên, hãy xem xét mỗi khi bạn cắm một cái bóng đèn hay một cái radio, bạn đã thêm một thiết bị điện vào mạng điện gia đình và làm cho nó phức tạp thêm lên. An toàn điện cũng sẽ không thực sự được hiểu biết tốt nếu như không hiểu những mạch điện nhiều thành phần, vì bị sốc điện thường thì gồm ít nhất hai thành phần: dụng cụ tiêu thụ điện cộng với cơ thể của người bị nạn. Nếu bạn là một sinh viên chuyên về khoa học sự sống, bạn phải nhận thức được rằng mọi tế bào vốn dĩ đều có tính chất điện, và do đó trong bất cứ cơ thể đa bào nào cũng sẽ có những mạch điện nối tiếp và song song đa dạng.

Cho dù không kể đến những mục tiêu thực tế này, vẫn có một lí do rất cơ bản để đọc chương này: đó là để hiểu chương 3 tốt hơn. Ở quan điểm này, trong chuyện học hành của sinh viên, tôi luôn quan sát họ sử dụng từ ngữ và đủ thứ kiểu giải thích cho thấy họ chưa hoàn toàn thoải mái và lĩnh hội hết các khái niệm điện thế và dòng điện. Họ hỏi "điện thế và dòng điện có phải là cùng loại ý tưởng hay không ?". Họ nói điện thế "đi qua" một bóng đèn. Một khi họ bắt đầu rèn luyện kĩ năng của mình về những mạch điện phức tạp hơn, tôi luôn thấy lòng tin và sự hiểu biết của họ tăng lên rất nhiều.

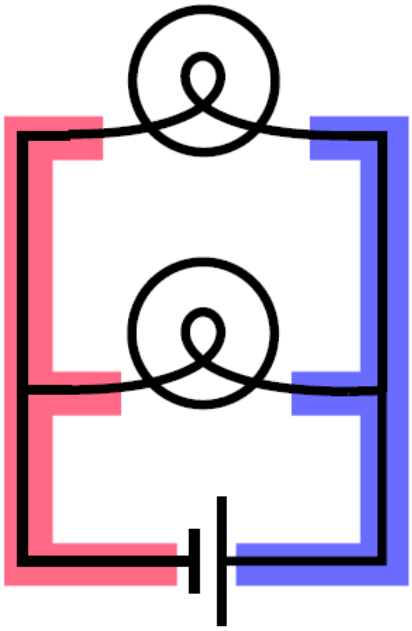
4.1 Sơ đồ mạch điện

Tôi xem một ván cờ; Kasparov đấu với Ruy Lopez. Đối với những người không am hiểu, giản đồ trông khó hiểu như những hình vẽ ngoằn ngoèo của người Maya, nhưng bạn có thể xem lướt qua để tìm ý nghĩa của chúng. Sơ đồ mạch là hình vẽ đơn giản hóa và cách điệu hóa của mạch điện. Mục đích là nhằm loại bỏ bớt càng nhiều đặc điểm không có liên quan càng tốt, nên những đặc điểm có liên quan sẽ dễ nắm bắt hơn.



a/ 1. Sai: Hình dạng của các dây dẫn không thích hợp. 2. Sai: Cần phải sử dụng các góc vuông. 3. Sai: Mạch điện đơn giản được vẽ trông xa lạ và phức tạp. 4. Đúng.

Một ví dụ về đặc điểm không có liên quan là hình dạng, chiều dài và đường kính của dây dẫn. Trong hầu như toàn bộ mạch điện, một sự gần đúng rất tốt là giả sử dây dẫn là vật dẫn hoàn hảo, nên bất kì đoạn dây dẫn nào nối liên tục những thành phần khác đều có điện thế không đổi trong suốt đoạn dây dẫn đó. Việc thay đổi chiều dài dây dẫn, chẳng hạn, không làm thay đổi thực tế này. (Tất nhiên, nếu chúng ta sử dụng hàng dặm dài dây dẫn, như trong đường dây điện thoại, thì điện trở sẽ bắt đầu tăng lên và chiều dài của nó sẽ trở thành một vấn đề cần giải quyết) Hình dạng của dây dẫn cũng không có liên quan, nên chúng ta vẽ chúng theo hình dạng đã chuẩn hóa và quy ước hóa là những đường thẳng đứng và nằm ngang vuông góc với nhau. Cách biểu diễn này làm cho những mạch điện tương tự nhau trông giống nhau hơn và giúp chúng ta nhận ra những đặc điểm quen thuộc, giống như chữ in trên trang báo sẽ dễ nhận ra hơn so với chữ viết tay. Hình a biểu diễn một số ví dụ của những quan điểm này.



b/ Hai vùng có hình chữ "E" là vùng có điện thế như nhau

Bước đầu tiên quan trọng nhất trong việc học cách đọc mạch điện là học cách nhận ra những đoạn dây dẫn liền nhau phải có điện thế không đổi trên cả đoạn đó. Ví dụ, trên hình b, hai mẫu dây dẫn có hình dạng chữ E mỗi mẫu phải có điện thế như nhau. Hình này làm chúng ta tập trung chú ý tới hai biến chính mà chúng ta có thể dự đoán được: đó là điện thế của chữ E bên trái và điện thế của chữ E bên phải.

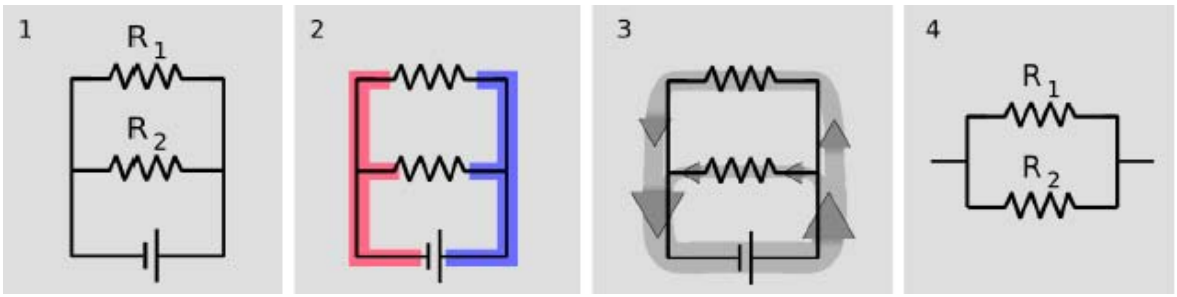
4.2 Các điện trở mắc song song và quy tắc mối nối

Một trong những ví dụ đơn giản nhất để phân tích mạch điện trở song song là ví dụ trong hình b. Nói chung, chúng ta có thể có các điện trở không bằng nhau R_1 và R_2, như trong hình c/1. Vì chỉ có hai vùng điện thế không đổi trong mạch điện, c/2, nên cả ba thành phần này đều có hiệu điện thế ở hai đầu chúng giống nhau. Một chiếc pin thông thường

liên tục duy trì hiệu điện thế giữa hai cực của nó mà nó được thiết kế, nên độ giảm thế ΔV_1 và ΔV_2 qua các điện trở phải bằng hiệu điện thế của pin:

$$\Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V_{nguồn}$$

Như vậy, mỗi điện trở chịu cùng một hiệu điện thế như thể nó là thành phần duy nhất trong mạch điện, và định luật Ohm cho chúng ta biết rằng cường độ dòng điện chạy qua mỗi điện trở cũng giống như cường độ dòng điện chạy trong mạch một điện trở. Đây là lí do vì sao mạch điện gia dụng mắc dây song song với nhau. Chúng ta muốn mỗi thiết bị làm công việc giống nhau, cho dù là những thiết bị khác có được cắm vào hay không cắm vào, đang mở hay đang tắt. (Tất nhiên, công ti điện lực không sử dụng pin, nhưng sự phân tích của chúng ta cũng giống như vậy đối với bất kì dụng cụ nào duy trì một hiệu điện thế không đổi).



c/1. Hai điện trở mắc song song. 2. Có hai vùng điện thế không đổi. 3. Dòng điện đi ra khỏi pin tách ra giữa hai điện trở, sau đó nhập trở lại. 4. Hai điện trở mắc song song có thể xem là một điện trở đơn giản có giá trị nhỏ hơn.

Dĩ nhiên công ti cấp điện có thể nói khi nào chúng ta bật mỗi bóng đèn trong nhà mình. Làm sao họ biết được ? Câu trả lời là chúng ta tiêu thụ dòng điện lớn hơn. Mỗi điện trở tiêu thụ một lượng dòng điện nhất định, và lượng điện phải cung cấp là tổng của hai dòng điện riêng rẽ. Dòng điện giống như một con sông tách thành hai nhánh, c/3, và sau đó hợp nhất lại. Cường đô dòng điện tổng cộng sẽ là

$$I_{tổngcộng} = I_1 + I_2$$

Đây là một ví dụ của một thực tế chung gọi là quy tắc mối nối:

quy tắc mối nối

Trong bất kì mạch điện nào không tích trữ hay giải phóng điện tích, sự bảo toàn điện tích đưa đến dòng điện tổng cộng chạy ra khỏi bất kì mối nối nào cũng phải bằng với dòng điện tổng cộng đi vào mối nối đó.

Trở lại với phép phân tích mạch điện của chúng ta, chúng ta áp dụng định luật Ohm cho từng điện trở, kết quả là

$$I_{toànphần} = \Delta V/R_1 + \Delta V/R_2 = \Delta V\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)$$

Trong chừng mực mà công ti điện lực nắm được, toàn bộ ngôi nhà bạn chỉ là một điện trở với điện trở R nào đó gọi là *điện trở tương đương*. Chúng ta viết định luật Ohm như sau:

$$I_{toànphần} = \Delta V / R$$

từ đó chúng ta có thể xác định điện trở tương đương bằng cách so sánh với phương trình trước

$$\frac{1}{\boldsymbol{R}} = \frac{1}{\boldsymbol{R}_1} + \frac{1}{\boldsymbol{R}_2}$$

$$\boldsymbol{R} = \left(\frac{1}{\boldsymbol{R}_1} + \frac{1}{\boldsymbol{R}_2} \right)^{-1}$$

[điện trở tương đương của hai điện trở mắc song song]

Hai điện trở mắc song song, c/4, tương đương với một điện trở với giá trị cho bởi phương trình trên.

Ví dụ 1. Hai bóng đèn trong cùng mạch điện gia đình

∇ Bạn bật hai bóng đèn trong cùng mạng điện gia đình. Mỗi bóng đèn có điện trở 1 ohm. Hãy tính điện trở tương đương và so sánh công suất tiêu hao với trường hợp chỉ có một bóng đèn.

⇒ Điện trở tương đương của hai đèn mắc song song là

$$R = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{1\Omega} + \frac{1}{1\Omega} \right)^{-1} = \left(1\Omega^{-1} + 1\Omega^{-1} \right)^{-1} = \left(2\Omega^{-1} \right)^{-1} = 0,5\Omega$$

Hiệu điện thế hai đầu toàn bộ mạch điện luôn luôn là 110 V do công ti điện lực thiết đặt (dòng điện của nó biến thiên, nhưng điều đó không có liên quan). Điện trở của toàn bộ mạch điện sẽ giảm đi phân nửa lúc bật bóng đèn thứ hai, cho nên hiệu điện thế ổn định sẽ tạo ra cường độ dòng điện gấp đôi. Dòng điện gấp đôi chạy qua cùng một hiệu điện thế có nghĩa là công suất tiêu hao cũng tăng gấp đôi.

Việc giảm một nửa điện trở làm nhiều sinh viên thấy ngạc nhiên, vì chúng ta "thêm điện trở nữa" vào mạch điện bằng cách đặt vào đó bóng đèn thứ hai. Tại sao điện trở tương đương lại nhỏ hơn điện trở của một bóng đèn ? Đây là trường hợp mà sự giải thích thuần túy bằng lời có thể gây hiểu lầm. Một thành phần điện trở của mạch điện, ví dụ như dây tóc bóng đèn, vừa không là vật cách điện hoàn hảo vừa không phải là vật dẫn hoàn hảo. Thay vì phân tích loại mạch điện này dưới dạng các "điện trở", tức là những vật cách điện một phần, chúng ta có thể nói về "vật dẫn". Khi đó thí dụ này trông có vẻ giải thích được, vì chúng ta "thêm độ dẫn điện", nhưng điều này sẽ không chính xác đối với trường hợp các điện trở mắc nối tiếp mà chúng ta sẽ nói tới trong phần sau.

Có lẽ cách dễ hình dung hơn khi nghĩ về nó là sử dụng trực giác cơ giới. Tương tự, lỗ mũi của bạn làm cản trở không khí đi qua nó, nhưng có hai lỗ mũi thì việc thở dễ thực hiện hơn hai lần.

Ví dụ 2. Ba điện trở mắc song song

∇ Hiện tượng xảy ra như thế nào nếu chúng ta có ba hay nhiều điện trở mắc song song ?

⇒ Đây là một thí dụ quan trọng, vì lời giải có liên quan tới một kĩ thuật quan trọng dùng để tìm hiểu mạch điện: phá vỡ chúng thành những phần nhỏ hơn, và rồi đơn giản hóa những phần đó. Trong mạch điện hình d/1, với ba điện trở mắc song song, chúng ta có thể nghĩ hai điện trở hình thành nên một điện trở, d/2, với điện trở tương đương

$$R_{12} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1}$$

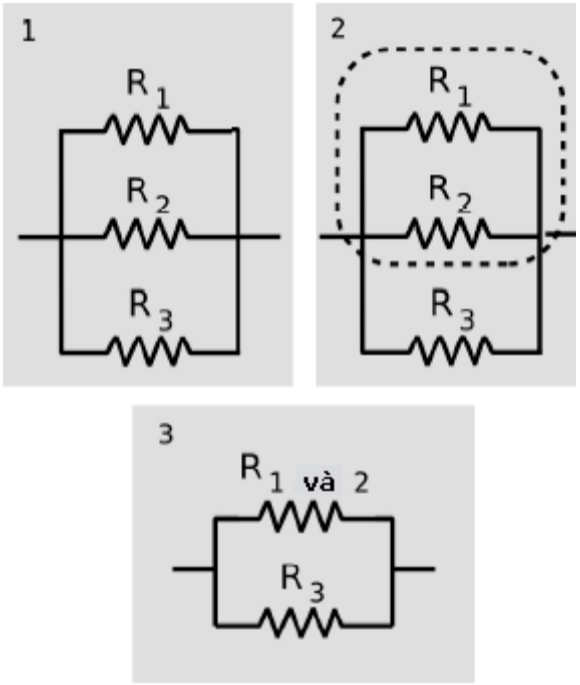
Sau đó, chúng ta có thể đơn giản hóa mạch điện như chỉ rõ trong hình d/3, sao cho nó chỉ gồm hai điện trở. Điện trở tương đương của toàn bộ mạch điện khi đó được cho bởi

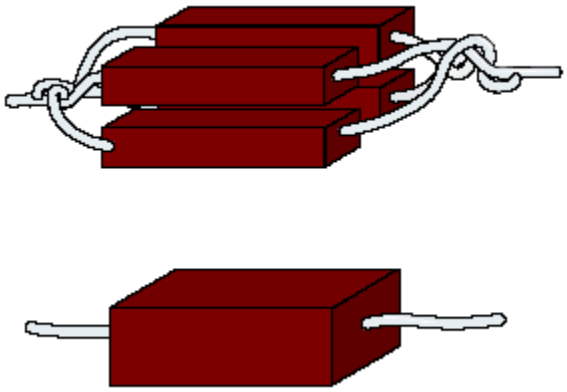
$$R_{123} = \left(\frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_3} \right)^{-1}$$

Thay thế R_{12} và đơn giản hóa, chúng ta thu được kết quả

$$R_{123} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)^{-1}$$

Đó là kết quả bạn có thể dự đoán được. Điều lí thú ở đây là quan điểm chia-và-nghịch đảo, chứ không phải kết quả toán học.





e/ Hợp nhất bốn điện trở mắc song song tương đương với một điện trở có cùng chiều dài nhưng có tiết diện ngang lớn gấp 4 lần. Kết quả là một điện trở có điện trở 1/4.

d/ Ba điện trở mắc song song

Ví dụ 3. Nhiều điện trở giống hệt nhau mắc song song

∇ Tìm điện trở tương đương của N điện trở giống hệt nhau mắc song song ?

$\Rightarrow$ Khái quát hóa kết quả đối với trường hợp hai và ba điện trở, chúng ta có

$$R_N = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots \right)^{-1}$$

trong đó dấu "…" có nghĩa là lấy tổng hết tất cả các điện trở. Nếu tất cả các điện trở là giống hệt nhau thì

$$R_N = \left(\frac{N}{R} \right)^{-1} = \frac{R}{N}$$

Ví dụ 4. Sự phụ thuộc của điện trở vào tiết diện ngang

Chúng ta đã từng nói tới thực tế là điện trở của một vật phụ thuộc vào kích thước và hình dạng của nó, nhưng giờ thì chúng ta bắt đầu tìm những cách phát biểu mang tính toán học hơn về nó. Như chỉ rõ trong hình e, việc tăng tiết diện ngang của một điện trở tương đương với việc mắc thêm điện trở nữa theo kiểu song song, chúng sẽ mang lại sự giảm điện trở. Bất kì điện trở thực tế nào có các mặt thẳng, song song nhau, đều có thể bị cắt thành một số lớn mảnh, mỗi mảnh có tiết diện ngang, chẳng hạn, 1 μm^2. Số N mảnh như thế tỉ lệ với tiết diện ngang tổng cộng của điện trở, và bằng cách áp dụng kết quả của ví dụ trước, chúng ta tìm được điện trở của một vật tỉ lệ nghịch với tiết diện ngang của nó.

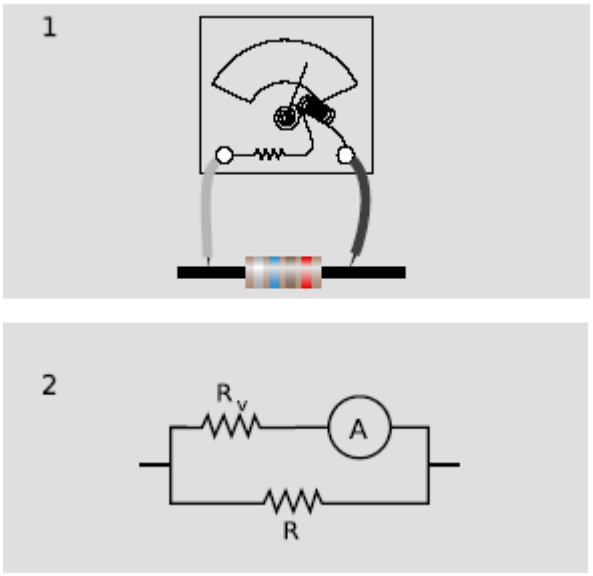
f/ Ống béo có điện trở nhỏ hơn ống gầy.

Một mối quan hệ tương tự đối với các ống nước, đó là lí do tại sao các đường dẫn dòng chảy lớn thường có tiết diện ngang lớn. Để làm cho nhiều nước (dòng điện) chảy qua một ống gầy, chúng ta cần sự chênh lệch áp suất (điện thế) lớn không thực tế.

Ví dụ 5. Sai số của volt kế

Volt kế thực ra chỉ là một điện kế có điện trở trong, và chúng ta mắc volt kế song song với đối tượng chúng ta muốn đo hiệu điện thế hai đầu của nó. Điều này có nghĩa là hễ khi nào chúng ta đo độ giảm thế qua một điện trở, về cơ bản chúng ta đã đặt hai điện trở song song nhau. Điện kế bên trong volt kế có thể bỏ qua vì mục đích phân tích dòng điện chạy qua mạch điện như thế nào, vì về cơ bản nó chỉ là một số cuộn dây có điện trở rất thấp.

Bây giờ, nếu chúng ta tiến hành phép đo này trên một điện trở là một phần của một mạch điện lớn, chúng ta đã làm thay đổi hành vi của mạch điện qua hoạt động đo của chúng ta. Giống như là chúng ta đã làm biến đổi mạch điện bằng cách thay thế điện trở R bằng điện trở tương đương nhỏ hơn của R và R_V mắc song song nhau. Vì lí do này mà volt kế phải chế tạo sao cho có điện trở trong lớn nhất có thể. Lấy ví dụ số, nếu chúng ta sử dụng volt kế có điện trở trong 1 MΩ để đo độ giảm thế qua một điện trở 1 Ω, thì điện trở tương đương là 0,999999 Ω, không đủ khác biệt để gây ra sự chênh lệch. Nhưng nếu chúng ta thử dùng volt kế trên đo độ giảm thế qua một điện trở 2 MΩ, chúng ta có thể làm giảm điện trở của phần mạch điện đó đi ba lần, gây ra sự thay đổi đáng kể trong hành vi của toàn bộ mạch điện.



g/ Volt thực ra là một điện kế có điện trở trong. Khi chúng ta đo hiệu điện thế hai đầu một điện trở, 1, thật ra chúng ta đã xây dựng một mạch điện trở mắc song song, 2.

Đây là lí do tại sao bạn không thể sử dụng volt kế để đo hiệu điện thế giữa hai điểm khác nhau giữa chừng không khí, hay giữa hai đầu của một mảnh gỗ. Đây không phải là muốn làm một việc ngu ngốc, vì thế giới xung quanh chúng ta không phải là môi trường đẳng thế, ví dụ dễ thấy nhất là khi một cơn bão đang hình thành. Nhưng nó sẽ không hoạt động với một volt kế bình thường vì điện trở của không khí hay gỗ là vào bậc nhiều giga ohm. Kết quả của việc vẫy cặp mũi đo volt kế trong không khí là chúng ta mang lại một đường dẫn phù hợp cho các điện tích dương và âm tách rời nhau – đi qua chính volt kế, nó là một vật dẫn tốt so với không khí. Việc này làm giảm tới 0 sự chênh lệch điện thế mà chúng ta muốn đo.

Tóm lại, volt được cấu tạo với một mạch điện hở (hay điện trở rất lớn) giữa hai đầu đo "trôi nổi" của nó. Một điện kế analog kiểu cũ thuộc loại mô tả ở đây sẽ chỉ số 0 khi để trôi nổi, kết quả tương tự như khi đặt nó nằm trên kệ. Còn volt kế kĩ thuật số đang trôi nổi thường hiện thông báo lỗi.

4.3 Các điện trở mắc nối tiếp

Hai cách mắc mạch điện cơ bản là mắc song song và mắc nối tiếp, nên cặp điện trở nối tiếp nhau, h/1, là dạng khác của đa số mạch điện mà chúng ta có thể chế tạo. Theo sự bảo toàn điện tích, toàn bộ dòng điện chạy qua một điện trở phải bằng dòng điện chạy qua điện trở kia (cũng như dòng điện chạy qua pin):

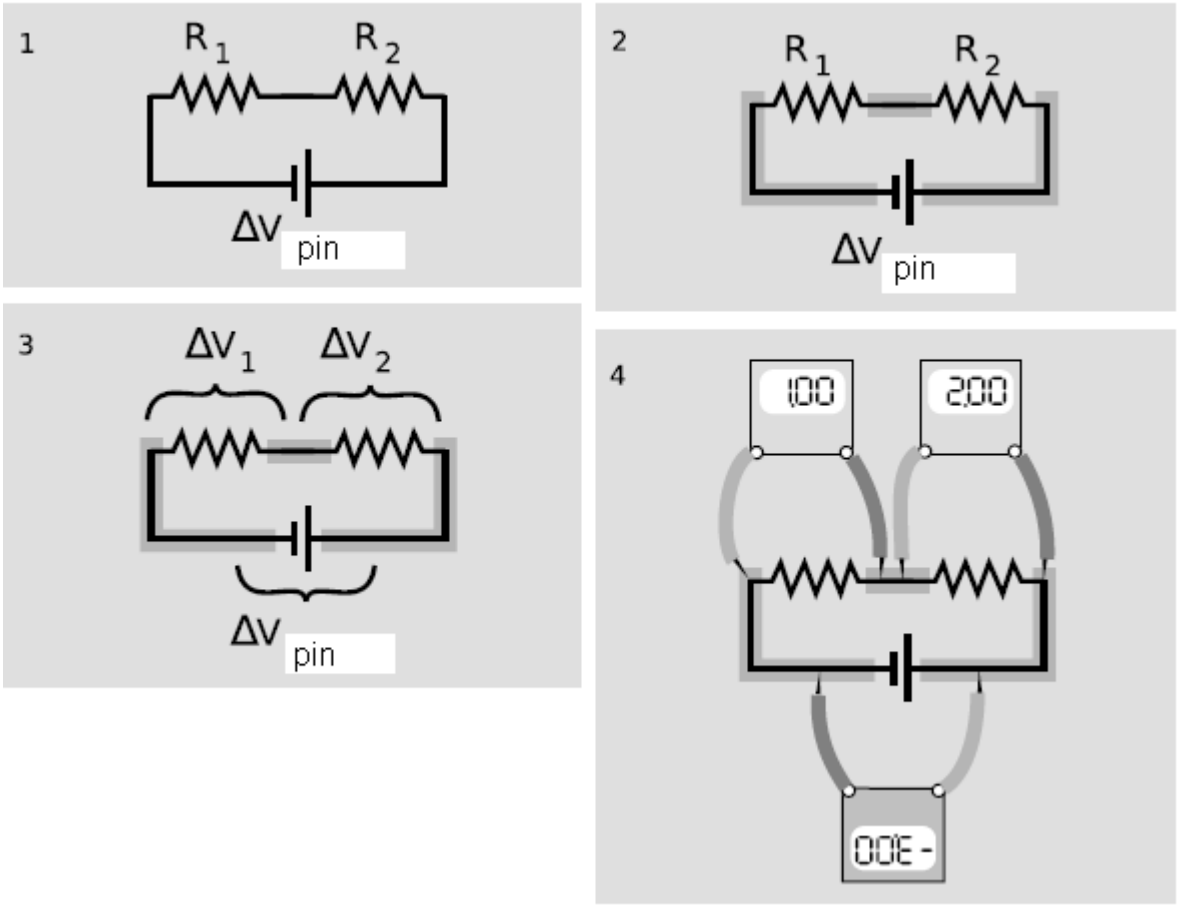
$$I_1 = I_2$$

Cách duy nhất để biết thông tin về hai giá trị điện trở sẽ có ích là nếu chúng ta có thể áp dụng định luật Ohm, định luật liên hệ điện trở của từng điện trở với dòng điện chạy qua nó và hiệu điện thế hai đầu nó. Hình h/2 chỉ rõ ba vùng đẳng thế. Hiệu điện thế có ý nghĩa quan trọng hơn điện thế, nên chúng ta biểu diễn kí hiệu cho hai hiệu điện thế của hai điện trở trong hình h/3.

Chúng ta có ba vùng đẳng thế, cùng với kí hiệu sự chênh lệch điện thế giữa từng cặp trong số chúng. Ba hiệu điện thế này phải liên hệ với nhau. Giống như tôi cho bạn biết rằng Fred cao hơn Ginger 1 foot, Ginger cao hơn Sally 1 foot, và Fred thì cao hơn Sally 2 foot. Thông tin cho ở đây là thừa, và bạn thật ra chỉ cần hai trong số ba mẫu dữ liệu để suy ra cái thứ ba. Trong trường hợp hiệu điện thế của chúng ta, chúng ta có

$$|\Delta V_1| + |\Delta V_2| = |\Delta V_{\text{pin}}|$$

Kí hiệu giá trị tuyệt đối vì chưa biết rõ cách chúng ta xác định hiệu điện thế. Nếu chúng ta mắc ngược hai đầu đo của volt kế, chúng ta sẽ thu được kết quả trái dấu. Volt kế kĩ thuật số thật sự sẽ hiện dấu trừ trên màn hình nếu chúng ta nối châm cắm "V" với điểm có điện thế thấp hơn điểm nối vào chân cắm "COM". Volt kế analog sẽ quay kim về phía chốt ngoài nếu bạn thử dùng chúng đo hiệu điện thế âm, nên bạn phải luôn nối dây theo chiều thuận, sau đó tự thêm vào dấu trừ nếu cần thiết.



h/4. Pin cấp dòng điện chạy qua hai điện trở mắc nối tiếp. 2. Có ba miền đẳng thế. 3. Ba hiệu điện thế có liên quan với nhau. 4. Nếu điện kế mắc qua mạch điện không đảo chiều hay nối chéo chân cắm của nó, thì điện thế đo được sẽ có dấu cộng và dấu trừ khiến cho chúng cộng lại bằng không.

Hình h/4 biểu diễn một cách chuẩn cẩn thận với sự nhập nhằng dấu. Đối với từng phép đo trong số ba phép đo hiệu điện thế xung quanh mạch kín, chúng ta giữ cùng một đầu đo (đầu tô đậm hơn) ở phía chiều kim đồng hồ. Cứ như thể là volt kế bò qua mạch điện như một con cua, không bao giờ "bắt chéo chân của nó". Với quy ước này, mối quan hệ giữa các độ giảm thế trở thành

$$\Delta V_1 + \Delta V_2 = - \Delta V_{\text{pin}}$$

hay ở dạng đối xứng hơn

$$\Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_{\text{pin}} = 0$$

Tổng quát hơn, kết quả này được gọi là định luật vòng kín cho phép phân tích mạch điện:

định luật vòng kín

Giả sử quy ước chuẩn cho các dấu cộng và trừ, thì tổng độ giảm thế qua bất kì một vòng kín nào của mạch điện đều phải bằng không.

Việc tìm một ngoại lệ cho định luật vòng kín giống như đòi hỏi một lối đi xuống dốc theo mọi hướng quay trở lại điểm xuất phát của nó!

Đối với mạch điện mà chúng ta đưa ra phân tích, phương trình

$$\Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_{pin} = 0$$

bây giờ có thể viết lại bằng cách áp dụng định luật Ohm cho từng điện trở

$$I_1R_1 + I_2R_2 + \Delta V_{pin} = 0$$

Dòng điện là như nhau, nên chúng ta có thể nhóm nó làm thừa số chung

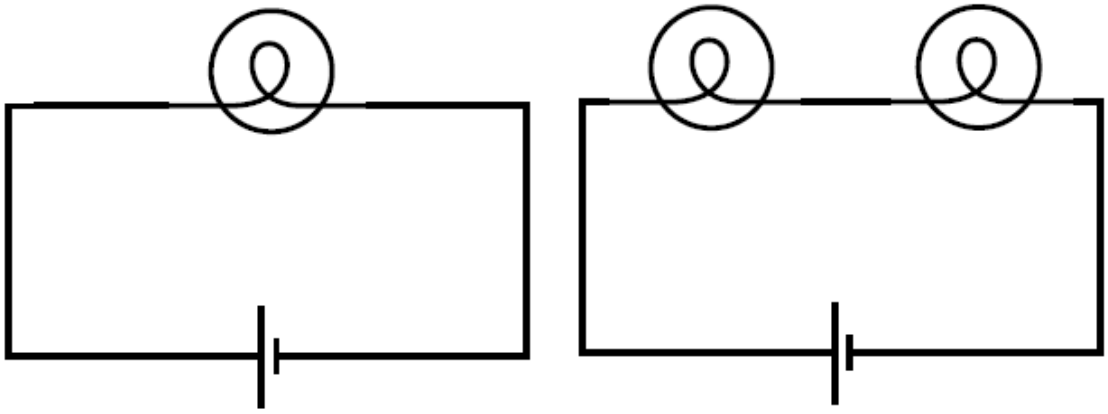
$$I\,(R_1 + R_2) + \Delta V_{pin} = 0$$

Và đây là kết quả chúng ta thu được nếu chúng ta phân tích mạch điện một điện trở có điện trở $(R_1 + R_2)$. Như vậy, điện trở của tương đương của các điện trở mắc nối tiếp bằng tổng điện trở của chúng.

Ví dụ 6. Hai bóng đèn mắc nối tiếp

∇ Nếu hai bóng đèn giống hệt nhau được mắc nối tiếp với nhau, thì độ sáng của chúng so sánh như thế nào với độ sáng của chỉ một bóng đèn ?

⇒ Xét toàn thể, hai bóng đèn hoạt động như một điện trở kép, nên chúng sẽ cho dòng điện chạy từ tường lên bằng phân nửa. Mỗi bóng đèn sẽ tối hơn trong trường hợp chỉ một bóng đèn.



i/ Ví dụ 6

Công suất toàn phần tiêu tán bởi mạch điện là I ΔV. Độ giảm thế qua toàn mạch giống như trước đây, nhưng dòng điện chia đôi, nên mạch hai bóng đèn chỉ bằng nửa công suất mạch một bóng đèn. Mỗi bóng đèn tiêu thụ một phần tư công suất bình thường.

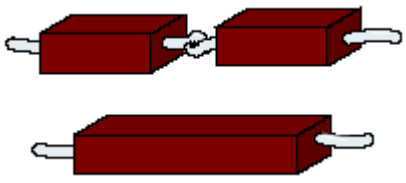
Nói đại khái, chúng ta có thể mong chờ điều này mang lại một phần tư ánh sáng được tạo ra bởi mỗi bóng đèn, nhưng trong thực tế các bóng đèn lãng phí một phần trăm khá cao công suất của chúng dưới dạng nhiệt và bước sóng của ánh sáng không nhìn thấy (hồng ngoại và tử ngoại). Sẽ tạo ra ít ánh sáng hơn, nhưng thật khó tiên đoán chính xác là ít hơn bao nhiêu, vì hiệu suất của bóng đèn thay đổi khi cho chúng hoạt động dưới những điều kiện khác nhau.

Ví dụ 7. Nhiều điện trở mắc nối tiếp

Bằng cách áp dụng trực tiếp kĩ thuật chia-và-trị đã nói tới trong phần trước, chúng ta tìm thấy điện trở tương đương của N điện trở R mắc nối tiếp sẽ là NR.

Ví dụ 8. Sự phụ thuộc của điện trở vào chiều dài

Trong phần trước, chúng ta đã chứng minh rằng điện trở tỉ lệ nghịch với tiết diện ngang Bằng lí giải tương tự về các điện trở mắc nối tiếp, chúng ta thấy điện trở tỉ lệ thuận với chiều dài. Tương tự, thật khó thổi hơi qua một cọng rơm dài hơn so với cọng rơm ngắn.



j/ Tăng gấp đôi chiều dài của một điện trở giống như mắc hai điện trở nối tiếp nhau. Điện trở tăng gấp đôi.

Đặt hai đối số lại với nhau, chúng ta tìm được điện trở của một vật có các mặt thẳng, song song nhau cho bởi

$$R = (\text{hằng số}).\ L/A$$

Hằng số tỉ lệ được gọi là điện trở suất, và nó phụ thuộc vào chất cấu tạo nên điện trở đó. Phép đo điện trở suất có thể được sử dụng, chẳng hạn, để nhận biết một vật cấu tạo từ một chất chưa biết.

Ví dụ 9. Chọn hiệu điện thế cao cho đường dây tải điện

Thomas Edison đã bị lôi cuốn vào một cuộc tranh luận kĩ thuật nổi tiếng về hiệu điện thế dùng cho đường dây tải điện. Vào thời đó, công chúng chưa quen thuộc với điện, và dễ dàng bị nó làm cho hoảng sợ. Chẳng hạn, tổng thống Mĩ đã từ chối thắp đèn điện trong Nhà Trắng khi nó được thương mại hóa, vì ông xem nó là không an toàn, và ưa chuộng mối nguy hiểm về lửa đã biết của đèn dầu hơn là nguy cơ bí ẩn của dòng điện. Chủ yếu là một biện pháp để vượt qua nỗi sợ hãi của công chúng, Edison tin rằng dây tải điện phải truyền bằng hiệu điện thế nhỏ và ông công khai quan điểm của ông bằng cách đưa ra bằng chứng theo đó một con chó bị nhử vào vị trí bị giết chết bởi hiệu điện thế lớn giữa hai bản kim loại trên mặt đất (Các đối thủ của Edison cũng chủ trương dòng điện biến thiên thay cho dòng điện một chiều, và điện xoay chiều cũng nguy hiểm hơn điện một chiều. Như chúng ta sẽ thảo luận ở phần sau, điện xoay chiều có thể dễ dàng tăng lên và hạ xuống đến mức điện thế mong muốn bằng một dụng cụ gọi là máy biến thế).

Ngày nay, nếu chúng ta muốn phân phối một lượng công suất P_L nhất định đến tải, ví dụ như bóng đèn điện, chúng ta chỉ bị thúc ép bởi phương trình $P_L = I\Delta V_L$. Chúng ta có thể phân phối bất kì lượng công suất nào mà chúng ta muốn, cả với hiệu điện thế thấp, nếu chúng ta sử dụng dòng điện lớn. Tuy nhiên, các mạng lưới phân phối điện hiện đại sử dụng hiệu điện thế cao đến mức nguy hiểm vào bậc hàng chục nghìn volt. Tại sao Edison thất bại trong cuộc tranh luận đó ?

Vấn đề là bài toán chi phí. Công ti điện phải phân phối lượng công suất P_L mà khách hàng mong muốn qua đường truyền có điện trở R_T cố định do nền kinh tế và địa lí quyết định. Dòng điện chạy qua tải và dây truyền dẫn là như nhau, tiêu thụ công suất có ích ở tải và công suất vô ích ở dây truyền. Hiệu suất của hệ thống là

$$\text{Hiệu suất} = \frac{\text{Công suất do khách hàng trả tiền}}{\text{Công suất thực tiễn phải trả}}$$

$$= \frac{P_L}{P_L + P_T}$$

$$= \frac{1}{1 + P_T / P_L}$$

Đặt vai trò chúng ta là công ti điện, chúng ta muốn tống khứ đi biến P_T, vì nó là thứ gì đó chúng ta chỉ điều khiển gián tiếp bởi cách chúng ta chọn ΔV_T và I. Thay $P = I\Delta V_T$, chúng ta tìm được

$$\text{Hiệu suất} = \frac{1}{1 + \dfrac{I\Delta V_T}{P_L}}$$

Chúng ta giả sử đường truyền (không nhất thiết là tải) là tuân theo định luật Ohm, nên thay $\Delta V_T = IR_T$ mang lại

$$\text{Hiệu suất} = \frac{1}{1 + \dfrac{I^2 R_T}{P_L}}$$

Đại lượng này rõ ràng có thể làm cho cực đại bằng cách làm cho I càng nhỏ càng tốt, vì khi đó chúng ta sẽ chia cho con số nhỏ nhất có thể có ở mẫu của biểu thức. Mạch điện có dòng điện nhỏ chỉ có thể phân phối lượng đáng kể công suất nếu nó sử dụng hiệu điện thế cao, đó là lí do vì sao các hệ thống truyền dẫn điện sử dụng điện thế cao nguy hiểm.

Ví dụ 10. Sử dụng ampe kế thành thạo

Giống như vot kế, ampe kế có thể cho hàng loạt giá trị đo nếu nó được sử dụng theo kiểu làm thay đổi hành vi của mạch điện. Ampe kế được sử dụng mắc nối tiếp, nên nếu sử dụng nó đo dòng điện chạy qua một điện trở, thì giá trị điện trở thật sự thay đổi thành $R + R_a$, trong đó R_a là điện trở của ampe kế. Các ampe kế được chế tạo có điện trở rất thấp để làm cho $R + R_a$ không khác biệt nhiều so với R.

Trên thực tế, mối nguy hại thật sự là sự chết chóc, chứ không phải số đo sai! Hầu như chỉ có những mạch điện có điện trở nhỏ hơn nhiều so với điện trở của ampe kế là những mạch điện được thiết kế để mang những dòng điện khổng lồ. Một ampe kế chèn vào mạch điện như thế có khả năng tan chảy dễ dàng. Khi tôi làm việc trong phòng thí nghiệm do Bộ Năng lượng (DOE) tài trợ, chúng tôi thường xuyên nhận được những bản tin đều đặn từ văn phòng an toàn điện DOE về những vụ tai nạn nguy hiểm ở những nơi khác, và chúng mang lại một sức thôi miên ghê tởm nhất định. Một trong các tai nạn này là một người công nhâ DOE đã bị thiêu trụi hoàn toàn bởi vụ nổ sinh ra khi ông chèn một ampe kế Radio Shack bình thường vào một mạch điện có dòng điện cao. Những ước tính sau này cho thấy nhiệt có khả năng mạnh đến mức vụ nổ là một quả cầu plasma – một chất khí bị nóng đến mức các nguyên tử của nó bị ion hóa.

Câu hỏi thảo luận

A. Chúng ta đã phát biểu quy luật vòng kín ở dạng đối xứng trong đó loạt giảm thế nối tiếp nhau cộng lại bằng không. Để làm việc này, chúng ta đã phải định nghĩa một cách thức chuẩn nối volt kế vào mạch điện sao cho các dấu cộng và trừ được hiển thị đúng. Giả sử chúng ta muốn phát biểu lại theo cách khác quy luật nút theo một kiểu đối xứng tương tự, sao cho thay thế cách nói dòng điện đi vào bằng dòng điện đi ra, chúng ta chỉ đơn giản phát biểu rằng tổng của các dòng điện tại một nút nhất định là bằng không. Như vậy, chúng ta phải sử dụng cách thức chuẩn nào để chèn ampe kế vào để thực hiện công việc này ?

Tóm tắt

Sơ đồ mạch là hình vẽ mạch điện đã tiêu chuẩn hóa và cách điệu hóa những đặc điểm của nó làm cho nó dễ hiểu hơn. Bất kì mạch điện nào cũng có thể phân tích thành những thành phần nhỏ hơn. Chẳng hạn, một mạch điện lớn có thể hiểu là hai mạch điện nhỏ mắc nối tiếp, trong trường hợp khác là ba mạch điện mắc song song. Khi các thành phần mạch điện kết hợp theo kiểu song song và nối tiếp, chúng ta có hai quy luật cơ bản hướng dẫn chúng ta tìm hiểu xem các bộ phận đảm nhận vai trò như thế nào xét như một tổng thể:

quy luật nút mạng: Trong bất kì mạch điện nào không tích trữ hay tái giải phóng điện tích, sự bảo toàn điện tích ngụ ý rằng dòng điện tổng cộng chạy ra khỏi một nút phải bằng dòng điện tổng cộng chạy vào nút đó.

quy luật vòng kín: Giả sử sử dụng quy ước chuẩn cho các kí hiệu cộng và trừ, tổng độ giảm thể tính theo bất kì vòng khép kín nào của một mạch điện cũng phải bằng không.

Áp dụng đơn giản nhất của những quy luật này là xét các cặp điện trở ghép theo kiểu nối tiếp hay song song. Trong những trường hợp như vậy, cặp điện trở đóng vai trò giống hệt như một đơn vị đơn lẻ có giá trị điện trở nhất định gọi là điện trở tương đương của chúng. Các điện trở mắc nối tiếp cộng lại tạo ra điện trở tương đương lớn hơn

$$R_{nốitiếp} = R_1 + R_2$$

vì dòng điện phải tiếp tục hành trình của nó qua cả hai điện trở. Các điện trở mắc song song tạo ra giá trị điện trở tương đương nhỏ hơn từng điện trở thành phần

$$R_{\text{songsong}} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1}$$

vì có hai lối khác nhau mở ra cho dòng điện đi qua.

Một thí dụ quan trọng của các điện trở mắc nối tiếp và song song là việc sử dụng volt kế và ampe kế trong mạch điện có điện trở. Volt kế tác dụng như một điện trở lớn mắc song song với điện trở mà người ta muốn đo độ giảm thế qua nó. Thực tế điện trở của nó không phải vô hạn có nghĩa là nó làm thay đổi dòng điện dùng trong khảo sát, tạo ra điện trở tương đương nhỏ hơn. Ampe kế tác dụng như một điện trở nhỏ mắc nối tiếp với mạch điện mà ta muốn xác định dòng điện chạy qua đó. Điện trở của nó không hẳn bằng không, dẫn đến sự tăng điện trở của mạch điện mà ta kiểm tra.

Bài tập

1. (a) Nhiều dụng cụ hoạt động bằng pin cần nhiều hơn một pin. Nếu bạn nhìn kĩ vào ngăn chứa pin, bạn sẽ thấy các pin được mắc dây nối tiếp nhau. Xét một mạch điện đèn flash. Quy luật vòng kín cho bạn biết điều gì về tác dụng của việc đặt vài chiếc pin nối tiếp nhau theo kiểu này ?

(b) Các tế bào của hệ thần kinh của cá chình điện không khác mấy so với chúng ta – mỗi tế bào có thể phát triển một hiệu điện thế hai đầu của nó đâu đó vào bậc 1 volt. Như vậy, bạn nghĩ như thế nào khi một con cá chình điện có khả năng tạo ra hiệu điện thế hàng nghìn volt giữa các phần khác nhau của cơ thể nó ?

2. Bộ phận nung nóng của lò sưởi điện mắc nối tiếp với một công tắc mở và đóng nhiều lần trong một giây. Khi bạn xoay nút cho công suất lớn hơn, thì phần thời gian công tắc đóng tăng lên. Giả sử ai đó đề xuất một cải tiến đơn giản hơn cho việc điều chỉnh công suất bằng cách đặt bộ phận đun nóng nối tiếp với một biến trở điều chỉnh bằng nút xoay. (Với nút xoay hết theo chiều kim đồng hồ thi điện trở của biến trở hầu như bằng không, và khi nó xoay hết theo ngược chiều kim đồng hồ thì điện trở của nó về cơ bản là vô hạn)

(a) Hãy vẽ giản đồ mạch điện.

(b) Vì sao thiết kế đơn giản hơn này không được ưa chuộng ?

3. Một lò nướng bánh 1,0 Ω và một bóng đèn 2,0 Ω mắc song song với nguồn cấp điện 110 V của nhà bạn. (Bỏ qua thực tế điện thế là xoay chiều chứ không phải một chiều)

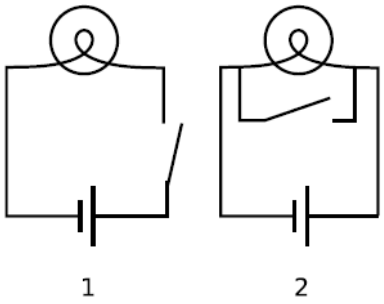
(a) Vẽ sơ đồ mạch điện.

(b) Đối với mỗi trong số ba thành phần trong mạch điện, tìm cường độ dòng điện chạy qua nó và độ giảm thế qua nó.

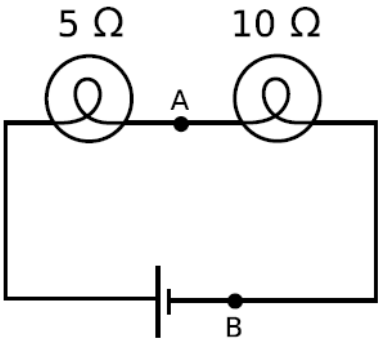
(c) Giả sử ba thành phần trên được thay thế bằng cách mắc nối tiếp. Hãy vẽ sơ đồ mạch điện và tính lại các yêu cầu tương tự như ở trên.

4. Dây điện bán ngoài chợ có đường kính nhất định gọi là "tiêu chuẩn". Sự chênh lệch đường kính giữa dây chuẩn và dây cận chuẩn mắc nối tiếp là khoảng 20%. Hãy so sánh điện trở của một chiều dài cho trước của dây dẫn chuẩn với điện trở của cùng chiều dài đó của dây dẫn chuẩn và dây cận chuẩn mắc nối tiếp.

5. Hình bên dưới cho thấy hai cách mắc dây đèn flash với một công tắc. Cả hai cách đều sẽ bật và tắt bóng đèn, mặc dù công tắc đảm nhận vai trò theo kiểu có vẻ ngược nhau. Vì sao phương pháp 1 được ưa chuộng hơn ?



Bài 5



Bài 6

6. Trong hình trên, pin là 9 V.

(a) Hiệu điện thế giữa hai đầu mỗi bóng đèn bằng bao nhiêu ?

(b) Dòng điện chạy qua mỗi trong số ba thành phần của mạch điện bằng bao nhiêu ?

(c) Nếu một dây dẫn mới được thêm vào nối điểm A với điểm B, thì độ sáng của các bóng đèn sẽ thay đổi như thế nào ? Hiệu điện thế và dòng điện trong trường hợp mới này sẽ bằng bao nhiêu ?

(d) Giả sử không có dây nối từ A sang B, nhưng hai bóng đèn đổi chỗ cho nhau. Kết quả sẽ như thế nào so với kết quả thu được từ cách mắc ban đầu như đã vẽ ?

7. Bạn có một mạch điện gồm hai điện trở chưa biết mắc nối tiếp, và một mạch điện thứ hai gồm hai điện trở chưa biết mắc song song.

(a) Bạn có thể kết luận gì về các điện trở trong mạch điện mắc nối tiếp khi tìm thấy dòng điện chạy qua chúng là bằng nhau ?

(b) Nếu bạn tìm thấy hiệu điện thế giữa hai đầu các điện trở trong mạch điện mắc nối tiếp là bằng nhau thì bạn kết luận như thế nào ?

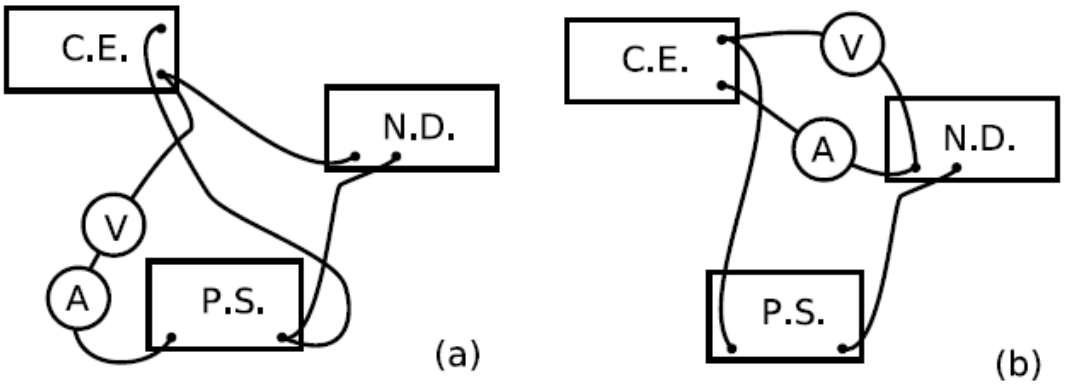
(c) Bạn biết gì về các điện trở trong mạch điện mắc song song từ việc biết dòng điện chạy qua chúng là bằng nhau ?

(d) Nếu hiệu điện thế trong mạch điện song song bằng nhau thì sao ?

8. Một sinh viên trong phòng thí nghiệm sinh học được cung cấp những lời hướng dẫn như sau: “Nối cục tẩy não (C.E.) và chất khử cực thần kinh (N.D.) song song với nguồn cấp điện (P.S.) (Không bao giờ bạn nên cho phép cục tẩy não nằm gần trong phạm vi cách đầu bạn 20 cm) Nối volt kế để đo hiệu điện thế hai đầu cục tẩy não, và đồng thời chèn một ampe kế vào mạch điện sao cho bạn có thể đảm bảo rằng bạn không đặt hơn 100 mA chạy qua chất khử cực thần kinh”. Các sơ đồ bên dưới biểu diễn hai nỗ lực của nhóm nghiên cứu trong phòng thí nghiệm theo sự chỉ dẫn trên.

(a) Hãy vẽ lại sơ đồ a thành sơ đồ mạch điện kiểu chuẩn. Đâu là cái sai và cái đúng của cách mắc mạch của nhóm nghiên cứu ?

(b) Thực hiện yêu cầu trên với sơ đồ b.



Hình 8

9. Có bao nhiêu giá trị điện trở khác nhau có thể tạo ra bằng cách kết hợp ba điện trở không bằng nhau ? (Không tính đến những khả năng trong đó không sử dụng hết cả ba điện trở)

10. Một người ở khu vực nông thôn không có điện sử dụng kéo một đường dây dẫn cực kì dài đến nhà một người bạn ở cuối con đường nên cô ta có thể thắp sáng một bóng đèn điện. Dây dẫn dài đến mức điện trở của nó, *x*, không phải là không đáng kể. Hãy chỉ ra rằng độ sáng của bóng đèn là lớn nhất nếu như điện trở của nó, *y*, bằng với *x*. Giải thích về mặt vật lí vì sao bóng đèn tối đi trong trường hợp giá trị *y* quá nhỏ hay quá lớn.

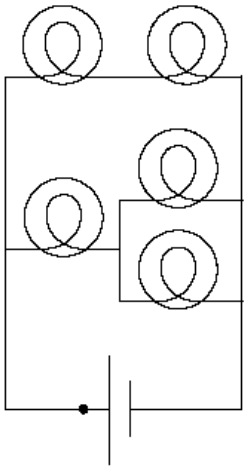
11. Các giá trị điện trở có thể bằng bao nhiêu khi kết hợp một điện trở 1 kΩ với một điện trở 10 kΩ ?

12. Giả sử có 6 điện trở giống hệt nhau, mỗi điện trở có giá trị R, nối với nhau sao cho chúng hình thành nên các cạnh của một tứ diện (hình chóp có ba mặt bên cộng với một mặt đáy, tức là một hình thu nhỏ của kim tự tháp Ai Cập). Hỏi giá trị điện trở thu được có thể bằng bao nhiêu khi nối dây với hai điểm bất kì trong cấu hình này ?

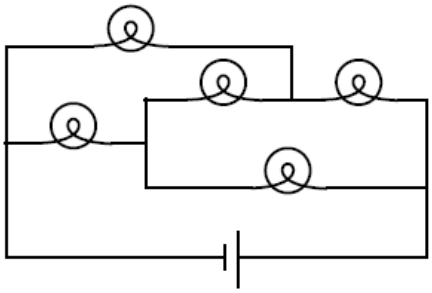
R/2

13. Hình bên dưới biểu diễn một mạch điện gồm 5 bóng đèn nối với một pin. Giả sử bạn chuẩn bị nối một đầu của volt kế với mạch điện ở điểm đánh dấu chấm đen. Hỏi có bao nhiêu giá trị hiệu điện thế khác không mà bạn có thể đo khi nối đầu còn lại của volt kế với mạch điện ?

14. Các bóng đèn trong hình dưới là giống hệt nhau. Nếu bạn chèn một ampe kế vào những nơi khác nhau trong mạch điện, có bao nhiêu giá trị dòng điện bạn có thể đo được ? Nếu phép đo dòng điện cho cùng một giá trị số ở nhiều hơn một nơi, hãy chỉ đếm đó là một giá trị dòng điện thôi.



Bài 13 và 14

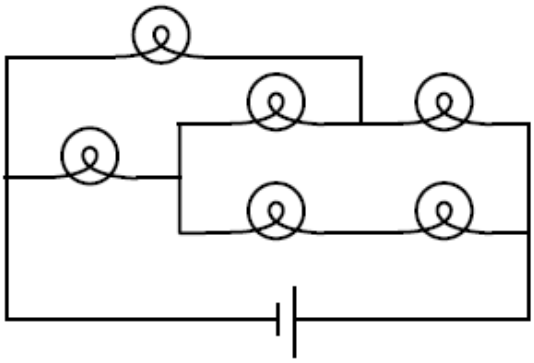


Bài 15

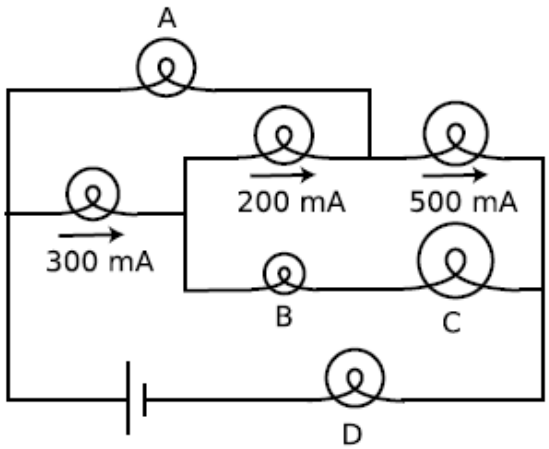
15. Các bóng đèn giống hệt nhau. Hỏi đèn nào không sáng ?

16. Mỗi bóng đèn có điện trở 1 ohm. Hỏi công suất cấp bởi nguồn pin 1 volt bằng bao nhiêu ?

17. Tất cả các bóng đèn có điện trở không bằng nhau. Cho ba giá trị dòng điện như trong hình, hãy tính dòng điện chạy qua các đèn A, B, C và D.



Bài 16



Bài 17

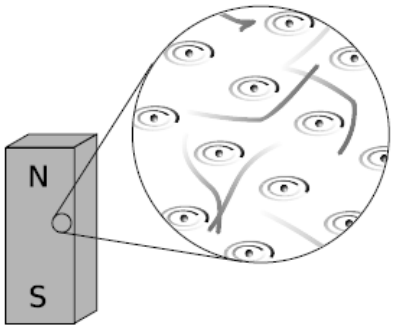
Chương 5
CÁC TRƯỜNG LỰC

Nền khoa học mũi nhọn dễ dàng thâm nhập vào nền văn hóa công chúng, đôi khi qua hình thức bị bóp méo. Trí tưởng tượng Newton thống trị khắp nơi chủ yếu với chất liệu đẹp vững chắc gọi là vật chất, nó được cấu thành từ những quả cầu có phần rắn chắc gọi là nguyên tử. Vào đầu thế kỉ 20, các vị khách hàng của tiểu thuyết giật gân và nền khoa học đại chúng hóa bắt đầu nghe nói tới một hình ảnh mới của vũ trụ, toàn đầy tia X, tia N và sóng Hertz. Cái mà họ bắt đầu thấm nhập qua da của họ là sự xét lại triệt để quan niệm của Newton về một vũ trụ cấu thành từ các khối vật chất có vẻ tương tác thông qua các lực. Trong bức tranh mới xuất hiện, vũ trụ cấu thành từ lực, hay nói mang tính kĩ thuật hơn, từ những gợn sóng trong các trường lực phổ biến. Không giống như đa số độc giả của tác phẩm *Những câu chuyện vũ trụ* hồi năm 1941, bây giờ bạn có đủ kiến thức kĩ thuật để hiểu được một trường lực thật sự là cái gì.

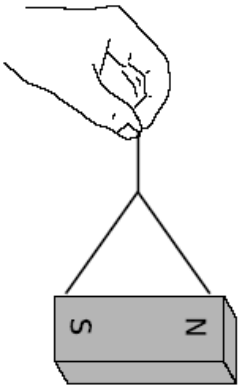
5.1 Tại sao lại là các trường lực ?

Sự trễ thời gian tác dụng lực từ xa

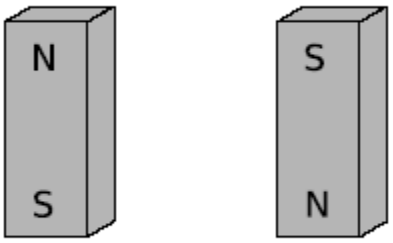
Cái gì đã thuyết phục các nhà vật lí rằng họ cần đến quan niệm mới này về một trường lực ? Mặc dù chúng ta đã quen thuộc nhiều với lực điện, nhưng hãy bắt đầu với một ví dụ lực từ. (Thật ra lí do chủ yếu khiến tôi hoãn chưa bàn tới từ học quá lâu vì các phép tính toán học của các hiệu ứng từ sẽ dễ nắm bắt hơn nhiều với quan niệm về trường lực) Trước hết, hãy nói qua một chút về cơ sở dẫn đến ví dụ của chúng ta. Một thanh nam châm, a, có một trục mà nhiều quỹ đạo electron định hướng dọc theo đó. Chính Trái Đất cũng là một nam châm, mặc dù không phải loại dạng thanh. Tương tác giữa nam châm-Trái Đất và thanh nam châm, b, làm cho chúng sắp thẳng hàng trục của chúng theo hướng ngược nhau (nói cách khác, các electron của chúng quay trong những mặt phẳng song song, nhưng một quỹ đạo quay theo chiều kim đồng hồ và quỹ đạo kia quay ngược chiều kim đồng hồ khi nhìn dọc theo trục) Ở kích thước nhỏ hơn, bất kì hai thanh nam châm nào đặt ở gần nhau cũng sẽ tự sắp chúng đầu nối đuôi, c.



a/ Các nguyên tử của thanh nam châm sắp thẳng hàng với nhau (một phần).



b/ Thanh nam châm tương tác với hành tinh từ tính của chúng ta.



c/ Các nam châm sắp theo hướng bắc-nam.

Bây giờ chúng ta xét một ví dụ có liên quan. Rõ ràng là hai người cách nhau một bức tường mỏng cỡ tờ giấy có thể sử dụng một cặp thanh nam châm để truyền tín hiệu cho nhau. Mỗi người sẽ cảm thấy nam châm của mình cố gắng xoay đi phản ứng lại với bất kì chuyển động quay nào thực hiện bởi nam châm của người bên kia. Phạm vi thực tế của sự truyền thông sẽ rất ngắn đối với cách sắp đặt này, nhưng một thiết bị nhạy có thể thu được

các tín hiệu từ tính từ những khoảng cách xa hơn nhiều. Thật ra, ở đây không khác gì mấy so với radio thực hiện: các electron chạy lên chạy xuống trong ăntен phát tạo ra lực tác dụng lên các electron trong ăntен thu ở xa. (Cả lực điện lẫn lực từ đều có mặt trong các tín hiệu radio thực tế, nhưng cho đến lúc này chúng ta không phải lo ngại gì về điều đó).

Bây giờ, một câu hỏi tự nhiên phát sinh là có hay không sự chậm trễ thời gian trong loại truyền thông qua các lực từ (và điện) này. Newton nghĩ rằng không, vì ông quan niệm về nền vật lí dưới dạng tác dụng lực tức thời xuyên khoảng cách. Tuy nhiên, ngày nay chúng ta biết rằng có một sự chậm trễ thời gian như thế. Nếu bạn thực hiện một cuộc gọi điện thoại đường dài gửi tín hiệu qua vệ tinh viễn thông, bạn sẽ dễ dàng có thể phát hiện sự chậm trễ khoảng chừng nửa giây trên hành trình 50.000 dặm khép kín của tín hiệu. Các phép đo hiện đại cho thấy các lực điện, lực từ và lực hấp dẫn đều truyền đi ở tốc độ ánh sáng, 3×10^8 m/s. (Thật ra, chúng ta sẽ sớm bàn đến việc chính bản thân ánh sáng cũng được cấu thành từ điện và từ).

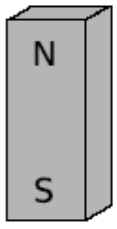
Nếu như mất chút ít thời gian cho lực truyền qua không gian, thì rõ ràng phải có một *thứ* gì đó truyền *qua* không gian. Thật ra thì hiện tượng truyền ra xa ở cùng tốc độ như nhau theo mọi hướng gợi ý rõ ràng tới phép ẩn dụ sóng như các gợn sóng trên mặt hồ.

Nhiều bằng chứng cho thấy các trường lực là có thật: chúng mang năng lượng

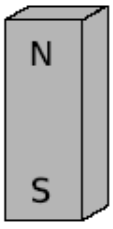
Luận cứ đanh thép cho khái niệm lạ lùng này về các gợn sóng lực xuất phát từ thực tế là chúng mang năng lượng.

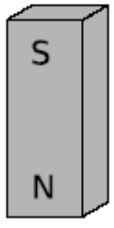
Đầu tiên, hãy giả sử một người đang cầm thanh nam châm ở phía bên phải quyết định lộn ngược nó lại, kết quả thu được là cấu hình d. Cô ta phải thực hiện công cơ học để làm xoay nó, và nếu cô ta buông thanh nam châm ra, năng lượng sẽ được giải phóng khi nó quay ngược trở lại c. Rõ ràng cô ta đã dự trữ năng lượng khi chuyển từ c sang d. Trong chừng mực nào đó, mọi thứ dễ dàng được giải thích mà không cần khái niệm trường lực.

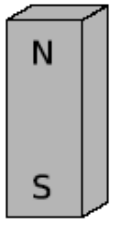
Nhưng bây giờ hãy tưởng tượng hai người bắt đầu ở vị trí c và đồng thời lật thanh nam châm của họ cực kì nhanh sang vị trí e, giữ chúng thẳng hàng với nhau trong toàn bộ thời gian đó. Hãy tưởng tượng, vì mục đích lập luận, rằng họ có thể làm việc này nhanh đến mức từng nam châm bị đảo ngược trong khi tín hiệu lực từ nam châm kia vẫn còn trên đường truyền đi. (Đối với một ví dụ mang tính thực tế hơn, chúng ta phải có hai ăntен radio, nhưng các nam châm thì dễ hình dung hơn) Trong khi lật, từng nam châm vẫn cảm nhận lực từ cách thức mà nam châm kia *thường* định hướng. Dù cho hai nam châm vẫn thẳng hàng trong khi lật, sự chậm trễ thời gian khiến cho mỗi người cảm thấy sự cản trở khi cô ta xoay tròn thanh nam châm của mình. Làm thế nào lại có chuyện này ? Cả hai người họ rõ ràng đang thực hiện công cơ học, nên họ phải đang dự trữ năng lượng từ bằng cách nào đó. Nhưng theo quan niệm kiểu Newton truyền thống về vật chất tương tác thông qua các lực tức thời xuyên khoảng cách, năng lượng tương tác phát sinh từ vị trí tương đối của các vật đang tương tác thông qua lực. Nếu các nam châm không bao giờ thay đổi sự định hướng tương đối của chúng đối với nhau, thì làm thế nào mà năng lượng từ có thể được dự trữ ?



d/ Nam châm thứ hai bị lật ngược





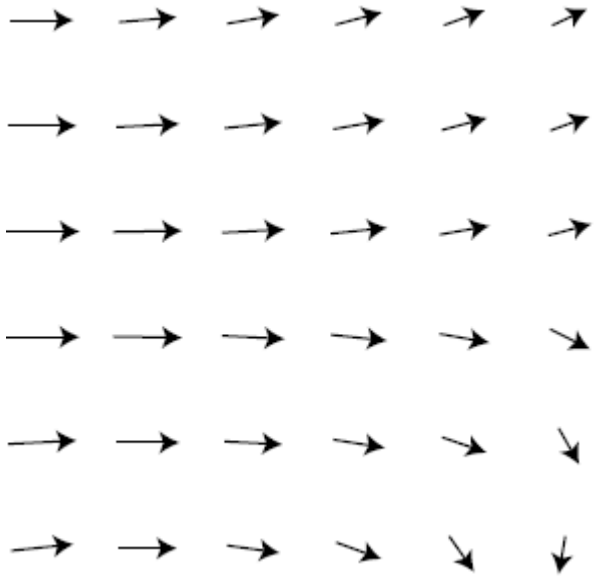


e/ Cả hai nam châm bị lật ngược

Câu trả lời khả dĩ duy nhất là năng lượng phải rơi vào các gợn lực từ bắt chéo không gian giữa các nam châm. Chúng ta quen thuộc với ý tưởng rằng một ăntenphát sóng radio tiêu thụ một lượng lớn công suất, và bằng cách nào đó phát nó ra vũ trụ. Một người làm việc xung quanh một ăntennhư thế cần phải thận trọng không tiến quá gần nó, vì toàn bộ năng lượng đó có thể dễ dàng nấu chín da thịt người (một hiện tượng đau đớn gọi là "sự đốt cháy RF").

5.2 Trường hấp dẫn

Cho rằng các trường lực là có thực, vậy làm thế nào chúng ta định nghĩa, đo lường và tính toán chúng ? Một phép ẩn dụ dễ hình dung là giống như gió thổi mà con tàu biển phải chịu. Cho dù là con tàu tiến về phía nào, nó sẽ cảm nhận một lượng lực nhất định từ ngọn gió, và lực đó sẽ ở vào một hướng nhất định. Tất nhiên thời tiết luôn luôn biến đổi, nhưng bây giờ hãy chỉ tưởng tượng đến hình ảnh ngọn gió ổn định thôi. Các định nghĩa trong vật lí học là có tính hành động, tức là chúng mô tả làm thế nào đo được thứ đã định nghĩa. Thuyền trưởng của con tàu có thể đo "trường lực" của ngọn gió bằng cách tiến tới vị trí thấy thích và xác định cả hướng gió lẫn cường độ mà nó đang thổi. Lập đồ thị tất cả những phép đo này trên một bản vẽ đưa đến một sự miêu tả của trường lực gió giống như trong hình minh họa. Đây là phương pháp "biển vecto" của việc hình dung trường.



f/ Hình ảnh gió trên một khu vực nhất định của đại dương có thể lập biểu đồ theo phương pháp "biển vecto" như thế này. Mỗi mũi tên biểu diễn cho cả cường độ gió và hướng của nó tại một nơi nhất định.

Bây giờ hãy xem làm thế nào những khái niệm này áp dụng được cho các trường lực cơ bản của vũ trụ. Chúng ta bắt đầu với trường hấp dẫn, đó là đối tượng dễ hiểu nhất. Như đối với hình ảnh gió thổi, chúng ta bắt đầu bằng việc tưởng tượng hấp dẫn là một trường tĩnh, mặc dù sự tồn tại của thủy triều chứng tỏ có sự thay đổi liên tục ở trường hấp dẫn trong vùng không gian của chúng ta. Việc định nghĩa hướng của trường hấp dẫn khá dễ: chúng ta chỉ đơn giản tiến đến vị trí thấy thích và đo hướng của lực hấp dẫn tác dụng lên vật, ví dụ như một quả nặng buộc vào đầu một sợi dây.

Nhưng làm thế nào chúng ta định nghĩa được cường độ của lực hấp dẫn ? Lực hấp dẫn trên mặt trăng yếu hơn nhiều so với trên Trái Đất, nhưng không thể nào định rõ một cách đơn giản cường độ hấp dẫn bằng cách cho đại một số newton nhất định. Số newton của lực hấp dẫn không những phụ thuộc vào cường độ trường hấp dẫn địa phương mà còn phụ thuộc vào khối lượng của vật mà chúng ta kiểm tra sự hấp dẫn, tức "khối lượng thử" của chúng ta. Một tảng đá trên mặt trăng cảm nhận lực hấp dẫn mạnh hơn một hòn sỏi trên Trái Đất. Chúng ta có thể giải quyết vấn đề này bằng cách định nghĩa cường độ của trường hấp dẫn là lực tác dụng lên một vật, *chia cho khối lượng của vật đó.*

định nghĩa trường hấp dẫn

Vectơ trường hấp dẫn, $\boldsymbol{g}$, ở bất kì vị trí nào trong không gian được xác định bằng cách đặt một khối lượng thử m_t tại điểm đó. Vectơ trường khi đó được xác định bởi $\boldsymbol{g} = \boldsymbol{F}/m_t$, trong đó $\boldsymbol{F}$ là lực hấp dẫn tác dụng lên khối lượng thử.

Độ lớn của trường hấp dẫn ở gần bề mặt Trái Đất vào khoảng 9,8 N/kg và không phải là sự trùng hợp ngẫu nhiên mà con số này trông quen thuộc, hay kí hiệu $\boldsymbol{g}$ là giống hệt như kí hiệu cho gia tốc trọng trường. Lực hấp dẫn tác dụng lên khối lượng thử sẽ bằng $m_t\boldsymbol{g}$, trong đó $\boldsymbol{g}$ là gia tốc trọng trường. Vậy tại sao lại định nghĩa một tên gọi mới và đơn vị mới cho cùng một đại lượng cũ ? Lí do chủ yếu là nó dọn đường cho chúng ta tiếp cận việc định nghĩa các trường khác.

Điều tinh tế nhất ở đây là trường hấp dẫn sẽ cho chúng ta biết lực gì sẽ tác dụng lên một khối lượng thử bởi Trái Đất, Mặt Trời, Mặt Trăng và toàn bộ phần còn lại của vũ trụ, *nếu* chúng ta xen một khối lượng thử vào điểm khảo sát. Trường hấp dẫn vẫn tồn tại ở mọi nơi mà chúng ta không đo nó.

Ví dụ 1. Trường hấp dẫn của Trái Đất

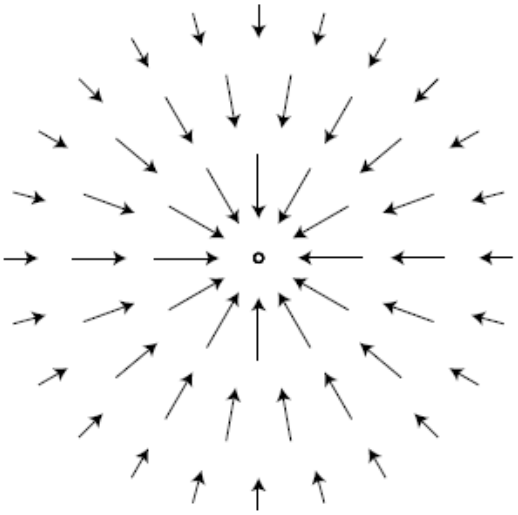
Độ lớn của trường hấp dẫn của Trái Đất, theo khối lượng M của nó và khoảng cách r tính từ tâm của nó, bằng bao nhiêu ?

Thay $|\mathbf{F}| = GMm_t/r^2$ vào định nghĩa trường hấp dẫn, chúng ta tìm được $|\mathbf{g}| = GM/r^2$. Biểu thức này có thể dùng cho trường hấp dẫn của bất kì sự phân bố khối lượng đối xứng cầu nào khác, vì phương trình chúng ta thừa nhận cho lực hấp dẫn áp dụng được cho những trường hợp như thế.

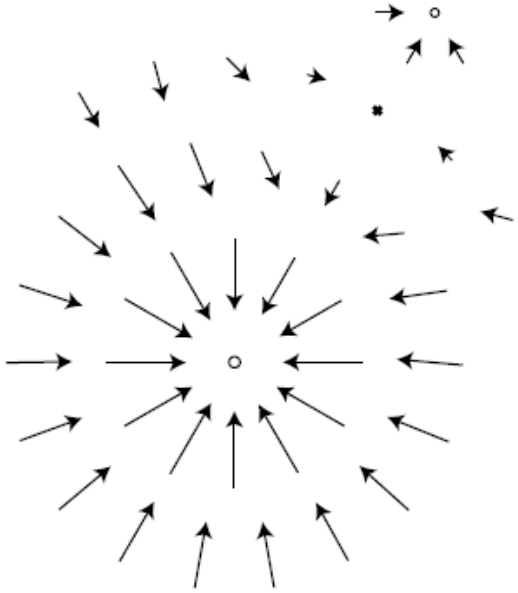
Nguồn và bồn

Nếu chúng ta thực hiện một bức tranh biển-mũi-tên của trường hấp dẫn xung quanh Trái Đất, g, kết quả làm liên tưởng đến hình ảnh nước chảy xuống một cái rãnh. Vì lí do này mà bất cứ thứ gì tạo ra một trường ở xung quanh hướng vào bên trong nó được gọi là bồn. Trái Đất là một bồn hấp dẫn. Thuật ngữ "nguồn" có thể chỉ riêng những thứ tạo ra một trường hướng xa ra bên ngoài, hoặc nó có thể được dùng làm thuật ngữ khái quát hơn cho cả trường hợp "hướng ra" và "hướng vào". Tuy lộn xộn thuật ngữ, nhưng chúng ta biết rằng trường hấp dẫn chỉ có tính hút, nên chúng ta sẽ không cần tìm vùng không gian có hình ảnh trường hướng ra bên ngoài.

Kiến thức về trường có thể hoán đổi cho kiến thức về nguồn của nó (ít nhất là trong trường hợp trường tĩnh, không biến thiên). Nếu những sinh vật lạ nhìn thấy hình ảnh trường hấp dẫn của Trái Đất, họ có thể lập tức suy ra sự tồn tại của hành tinh, và ngược lại nếu họ biết khối lượng của Trái Đất, họ có thể tiên đoán ảnh hưởng của nó lên trường hấp dẫn xung quanh.



g/ Trường hấp dẫn xung quanh một cụm khối lượng giống như Trái Đất.



h/ Trường hấp dẫn của Trái Đất và Mặt Trăng chồng chất lên nhau. Lưu ý làm thế nào các trường triệt tiêu nhau tại một điểm, và làm thế nào không có ranh giới giữa các trường xuyên nhập vào nhau giữa hai vật thể.

Sự chồng chất trường

Một cơ sở rất quan trọng về mọi trường lực là khi có nhiều hơn một nguồn (hay bồn), các trường cộng lại với nhau theo quy luật cộng vectơ. Trường hấp dẫn nhất định sẽ có tính chất này, vì nó được định nghĩa dưới dạng lực tác dụng lên khối lượng thử, và lực cộng giống như cộng vectơ. Sự chồng chất là một đặc trưng quan trọng của sóng, nên tính chồng chất của các trường phù hợp với ý tưởng rằng sự nhiễu loạn có thể truyền ra bên ngoài dưới dạng sóng trong một trường.

Ví dụ 2. Sự giảm lực hấp dẫn tác dụng lên Io do sự hấp dẫn của Mộc tinh

Trường hấp dẫn trung bình trên vệ tinh Io của Mộc tinh là 1,81 N/kg. Trường hấp dẫn này giảm đi bao nhiêu khi Mộc tinh nằm ngay phía trước trên đầu ? Quỹ đạo của Io có bán kính $4{,}22 \times 10^8$ m, và khối lượng của Mộc tinh là $1{,}899 \times 10^{27}$ kg.

Theo định luật lớp vỏ, chúng ta có thể xem Mộc tinh như thể toàn bộ khối lượng của nó tập trung tại tâm của nó, và tương tự đối với Io. Nếu chúng ta đến thăm Io và tiếp đất tại nơi mà Mộc tinh nằm ngay phía trên đầu, chúng ta cũng nằm trên đường thẳng nối liền hai tâm, nên toàn bộ bài toán có thể xem là một chiều, và phép cộng vectơ giống hệt như phép cộng vô hướng. Hãy sử dụng số dương cho trường hướng xuống (hướng vào tâm của Io) và số âm cho trường hướng lên. Thay số liệu thích hợp vào trong biểu thức thu được ở ví dụ 1, chúng ta tìm được đóng góp của Mộc tinh cho trường là – 0,71 N/kg. Sự chồng chất trường cho biết rằng chúng ta có thể tìm được trường hấp dẫn thật sự bằng cách cộng gộp các trường tạo ra bởi Io và Mộc tinh: 1,81 – 0,71 N/kg = 1,1 N/kg. Bạn có thể nghĩ sự suy giảm này sẽ tạo ra một số hiệu ứng kì lạ, và khiến cho Io là một đích đến du lịch lí thú. Thật ra thì bạn sẽ không phát hiện ra bất kì sự khác biệt nào nếu bạn bay từ phía bên này của Io sang phía bên kia. Đấy là do cơ thể bạn và Io đều chịu sức hấp dẫn của Mộc tinh, nên bạn cũng đi theo quỹ đạo cong trong không gian xung quanh Mộc tinh.

Sóng hấp dẫn

Một nguồn đứng yên sẽ tạo ra một hình ảnh trường tĩnh, giống như một quả cầu thép nằm yên bình trên tấm cao su. Một nguồn chuyển động sẽ tạo ra hình ảnh sóng trải rộng ra trong trường, giống như con côn trùng đang đạp nước trên mặt hồ. Mặc dù chúng ta đã khởi đầu với trường hấp dẫn là ví dụ đơn giản nhất của một trường tĩnh, nhưng các sao và hành tinh thật sự đang lướt đi hơn là chuyển động tại chỗ, nên sóng hấp dẫn không dễ gì phát hiện được. Lí thuyết hấp dẫn của Newton không mô tả sóng hấp dẫn, nhưng

chúng được tiên đoán bởi thuyết tương đối rộng của Einstein. J.H. Taylor và R.A. Hulse đã được trao giải Nobel năm 1993 cho việc mang lại bằng chứng gián tiếp rằng sóng hấp dẫn của Einstein thật sự tồn tại. Họ đã phát hiện ra một cặp sao kì lạ, cực kì đậm đặc gọi là sao neutron đang quay xung quanh nhau rất gần, và chỉ ra rằng chúng đang mất dần năng lượng quỹ đạo ở tốc độ tiên đoán bởi lí thuyết của Einstein.

i/ Một phần của máy dò sóng hấp dẫn LIGO tại Dải đất hạt nhân Hanford, gần Richland, Washington. Nửa kia của máy dò nằm ở Louisiana.

Chương trình hợp tác Caltech-MIT đã xây dựng một cặp máy dò sóng hấp dẫn gọi là LIGO nhằm tìm kiếm bằng chứng trực tiếp hơn của sóng hấp dẫn. Vì về cơ bản chúng là những máy dò dao động nhạy nhất từng được chế tạo, nên chúng nằm ở những khu vực khá thôn dã, và các tín hiệu sẽ được so sánh giữa chúng để đảm bảo rằng chúng không phải do xe cộ chạy qua gây ra. Dự án bắt đầu hoạt động ở độ nhạy trọn vẹn vào năm 2005, và hiện nay có khả năng phát hiện một dao động gây ra sự thay đổi 10^{-18} m ở khoảng cách giữa các gương ở hai đầu ống chân không dài 4 km. Khoảng cách này lớn gấp một nghìn lần kích thước của hạt nhân nguyên tử! Chỉ có vừa vặn tiền tài trợ để giữ cỗ máy hoạt động trong vài ba năm nữa, nên các nhà vật lí chỉ có thể hi vọng trong thời gian đó, ở nơi nào đó trong vũ trụ, một biến động đủ dữ dội sẽ xảy ra để tạo ra một sóng hấp dẫn có thể phát hiện được. (Chính xác hơn là họ muốn sóng đó đến hệ Mặt Trời của chúng ta trong thời gian đó, mặc dù nó đã được tạo ra từ hàng triệu năm trước).

5.3 Điện trường

Định nghĩa

Định nghĩa của điện trường hoàn toàn tương tự, và có cùng động cơ, như định nghĩa trường hấp dẫn.

định nghĩa điện trường

Vectơ điện trường, $\boldsymbol{E}$, tại một điểm bất kì trong không gian được xác định bằng cách đặt một điện tích thử q_t tại điểm đó. Vectơ điện trường được cho bởi $\boldsymbol{E} = \boldsymbol{F}/q_t$, trong đó $\boldsymbol{F}$ là lực điện tác dụng lên điện tích thử.

Các điện tích là cái tạo ra điện trường. Không giống như lực hấp dẫn, chỉ là lực hút, lực điện biểu hiện cả sự hút và đẩy. Một điện tích dương là nguồn của điện trường, và một điện tích âm là bồn của điện trường.

Điểm khó khăn nhất về định nghĩa điện trường là lực tác dụng lên một điện tích âm có hướng ngược lại so với trường. Điều này tuân theo định nghĩa, vì việc chia vectơ cho một số âm làm đảo hướng của nó. Nó giống như thể chúng ta có một số vật rơi lên thay vì rơi xuống.

♥ Tìm biểu thức độ lớn của điện trường do một điện tích điểm Q gây ra.

$$(F / q_t = \left(kQq_t / r^2\right) / q_t = kQ / r^2)$$

Ví dụ 3. Sự chồng chất điện trường

∇ Các điện tích q và – q nằm cách nhau một khoảng b như hình vẽ. Hỏi điện trường tại điểm P, nằm tại đỉnh thứ ba của hình vuông, bằng bao nhiêu ?

j/ Vĩ dụ 3

⇒ Điện trường tại P là tổng vectơ của các trường tạo ra độc lập bởi hai điện tích. Chọn trục x hướng sang phải và trục y hướng lên trên.

Các điện tích âm có trường hướng vào chúng, nên điện tích – q tạo ra một điện trường hướng sang phải, tức là có thành phần x dương. Sử dụng kết quả câu hỏi ♥ ở trên, chúng ta có

$$E_{-q,x} = \frac{kq}{b^2}$$
$$E_{-q,y} = 0$$

Lưu ý rằng nếu chúng ta mù quáng bỏ qua kí hiệu giá trị tuyệt đối và thay – q vào phương trình, chúng ta sẽ có kết luận không chính xác rằng từ trường hướng sang bên trái.

Áp dụng định lí Pythagore, điện tích dương nằm cách P khoảng cách $\sqrt{2}b$ nên độ lớn do nó đóng góp cho trường là $E = kq/2b^2$.

Điện tích dương có trường hướng ra xa chúng, nên vectơ trường hợp một góc 135^o ngược chiều kim đồng hồ tính từ trục x.

$$E_{q,x} = \frac{kq}{2b^2} cos135^o = -\frac{kq}{2^{3/2}b^2}$$

$$E_{q,y} = \frac{kq}{2b^2} sin135^o = \frac{kq}{2^{3/2}b^2}$$

Trường tổng hợp là

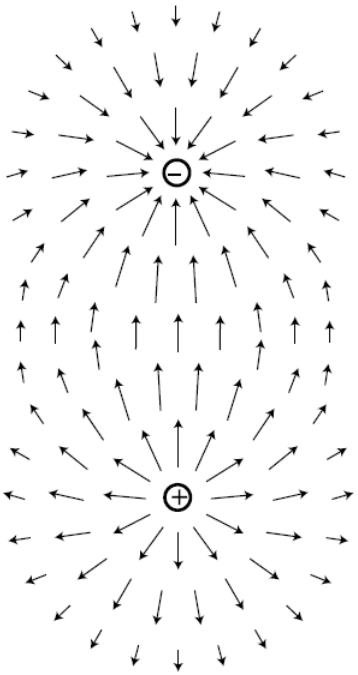
$$E_x = \left(1 - 2^{-3/2}\right)\frac{kq}{b^2}$$

$$E_y = \frac{kq}{2^{3/2}b^2}$$

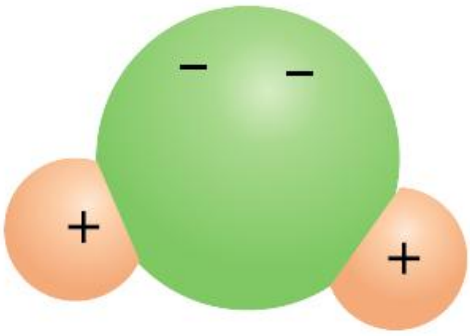
Lưỡng cực điện

Tập hợp đơn giản nhất của các nguồn có thể xảy ra với điện học những không xảy ra với lực hấp dẫn là lưỡng cực, gồm một điện tích dương và một điện tích âm có độ lớn bằng nhau. Tổng quát hơn, một lưỡng cực điện có thể là bất kì vật nào có sự bất cân bằng của điện tích dương ở phía bên này và điện tích âm ở phía bên kia. Phân tử nước, l, là một lưỡng cực vì các electron có xu hướng bị lệch khỏi nguyên tử hydrogen và chạy sang nguyên tử oxygen.

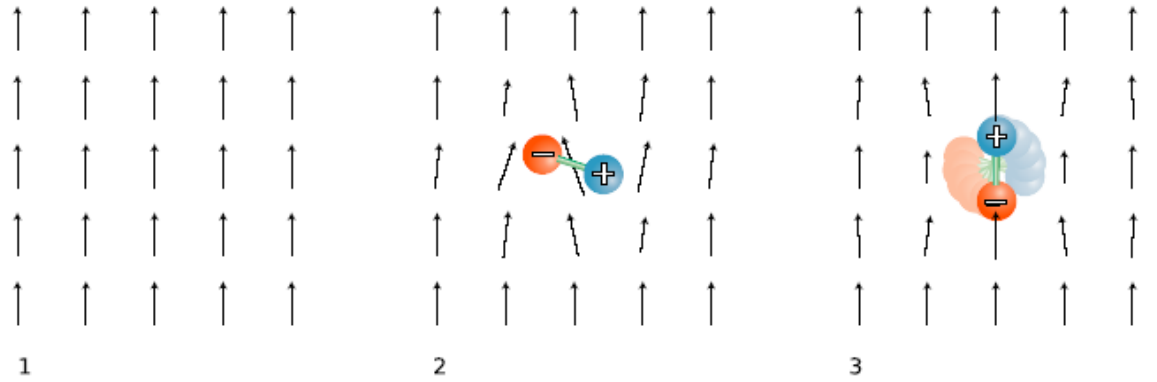
Lò vi sóng trong nhà bạn tác dụng lên các phân tử nước bằng điện trường. Chúng ta hãy tưởng tượng điều gì xảy ra nếu chúng ta bắt đầu với một điện trường đồng đều, m/1, do một số điện tích ngoài gây ra, và sau đó đưa vào một lưỡng cực, m/2, gồm hai điện tích nối với nhau bằng một thanh rắn. Lưỡng cực làm nhiễu hình ảnh trường, nhưng quan trọng hơn trong mục đích của chúng ta là nó chịu một mômen quay. Trong ví dụ này, điện tích dương chịu một lực hướng lên trên, còn điện tích âm thì bị kéo xuống. Kết quả là lưỡng cực có xu hướng tự sắp thẳng hàng với trường, m/3. Lò vi sóng đun nóng thức ăn với sóng điện (và từ). Sự luân phiên của mômen quay làm cho các phân tử lắc lư và làm tăng lượng chuyển động ngẫu nhiên. Định nghĩa hơi mơ hồ của lưỡng cực cho ở trên có thể cải thiện bằng cách phát biểu rằng lưỡng cực là bất kì vật nào chịu mômen quay trong điện trường.



k/ Trường lưỡng cực. Điện trường đi ra ở điện tích dương và đi vào ở điện tích âm.



l/ Phân tử nước là một lưỡng cực



m/1. Điện trường đều do một số điện tích "bên ngoài" gây ra.
2. Một lưỡng cực đặt trong điện trường. 3. Lưỡng cực sắp thẳng hàng với trường.

Cái gì xác định mômen quay tác dụng lên một lưỡng cực đặt trong một trường ngoài tạo ra ? Mômen phụ thuộc vào lực, khoảng cách tính từ trục quay mà lực tác dụng, và góc giữa lực và đường nối từ trục quay đến điểm đặt của lực. Xét một lưỡng cực gồm hai điện tích + q và – q cách nhau khoảng l đặt trong một trường ngoài có độ lớn |**E**|, hợp một góc θ so với trường. Mômen quay toàn phần tác dụng lên lưỡng cực là

$$\tau = \frac{l}{2} e|E| \sin\theta + \frac{l}{2} q|E| \sin\theta = lq|E| \sin\theta$$

(Lưu ý mặc dù hai lực có hướng ngược nhau, nhưng mômen quay không triệt tiêu vì chúng đều cố làm xoắn lưỡng cực theo cùng một hướng). Đại lượng lq được gọi là mômen lưỡng cực, kí hiệu là D. (Các lưỡng cực phức tạp hơn cũng có thể gán cho một mômen lưỡng cực – chúng được định nghĩa là có cùng mômen lưỡng cực như lưỡng cực hai điện tích chịu cùng một mômen quay).

Ví dụ 4. Mômen lưỡng cực của phân tử hơi NaCl

∇ Trong phân tử hơi NaCl, khoảng cách tâm-nối-tâm giữa hai nguyên tử là khoảng 0,6 nm. Giả sử Cl hoàn toàn lấy mất một trong các electron của Na, hãy tính độ lớn mômen lưỡng cực của phân tử này.

⇒ Điện tích tổng cộng bằng không, nên việc chúng ta chọn gốc tọa độ ở đâu không ảnh hưởng gì. Để cho tiện, ta chọn nó là một trong hai nguyên tử, nên điện tích ở nguyên tử đó không góp phần cho mômen lưỡng cực. Độ lớn của mômen lưỡng cực khi đó bằng

$$\begin{aligned} D &= (6 \times 10^{-10}\ \text{m})\ (e) \\ &= (6 \times 10^{-10}\ \text{m})\ (1{,}6 \times 10^{-19}\ \text{C}) \\ &= 1 \times 10^{-28}\ \text{C.m} \end{aligned}$$

Định nghĩa khác của điện trường

Hành vi của lưỡng cực điện trong điện trường ngoài đưa chúng ta đến một định nghĩa khác của điện trường:

định nghĩa khác của điện trường

Vectơ cường độ điện trường, ***E***, tại một điểm bất kì trong không gian được định nghĩa bằng cách quan sát mômen quay tác dụng lên một lưỡng cực thử D_t đặt tại đó. Hướng của trường là hướng mà trường có xu hướng sắp thẳng hàng lưỡng cực (từ - sang +), và độ lớn của trường là $|\mathbf{E}| = \tau / D_t \sin\theta$.

Lí do chủ yếu đưa ra định nghĩa thứ hai của cùng khái niệm trên là từ trường dễ được định nghĩa nhất bằng phương pháp tương tự.

Liên hệ giữa hiệu điện thế và cường độ điện trường

Hiệu điện thế là thế năng trên đơn vị điện tích, và cường độ điện trường là lực trên đơn vị điện tích. Do đó, chúng ta có thể liên hệ hiệu điện thế và trường nếu chúng ta bắt đầu từ mối quan hệ giữa thế năng và lực,

$\Delta PE = - Fd$ [giả sử lực không đổi và chuyển động song song với lực]

và chia cho điện tích

$\Delta PE = - Fd$ [giả sử lực không đổi và chuyển động song song với lực]

cho ta

$\Delta V = - Ed$ [giả sử lực không đổi và chuyển động song song với lực]

Nói cách khác, sự chênh lệch điện thế giữa hai điểm bằng với cường độ điện trường nhân với khoảng cách giữa chúng. Lời giải thích là ở chỗ điện trường mạnh là vùng không gian trong đó điện thế thay đổi nhanh. Tương tự, sườn đồi dốc là nơi trên bản đồ độ cao thay đổi nhanh.

Ví dụ 5. Điện trường do cá chình điện phát ra

∇ Giả sử một con cá chình điện dài 1 m, và làm phát sinh hiệu điện thế 1000 V giữa đầu và đuôi của nó. Hỏi cường độ điện trường trong nước xung quanh nó bằng bao nhiêu ?

⇒ Chúng ta chỉ tính độ lớn của trường, chứ không tính đến hướng của nó, nên chúng ta bỏ qua các kí hiệu dương và âm. Với giả thiết là chấp nhận điều không chính xác là điện trường không đổi song song với cơ thể con cá chình, ta có

$$|\mathbf{E}| = \frac{\Delta V}{\Delta x}$$

$$= 1000 \text{ V/m}$$

Ví dụ 6. Liên hệ giữa đơn vị của cường độ điện trường và hiệu điện thế

Từ định nghĩa ban đầu của chúng ta về điện trường, chúng ta muốn nó có đơn vị newton trên coulom, N/C. Tuy nhiên, ví dụ ở trên lại cho đơn vị volt trên mét, V/m. Có gì mâu thuẫn nhau không ? Hãy kiểm tra lại mọi phép tính đều chính xác. Trong trường hợp này, chiến lược tốt nhất thường là đơn giản những đơn vị phức tạp hơn sao cho chúng chỉ chứa các đơn vị mks và coulomb. Vì hiệu điện thế được định nghĩa là năng lượng điện trên đơn vị điện tích, nên nó có đơn vị J/C:

$$\frac{V}{m} = \frac{J/C}{m} = \frac{J}{C.m}$$

Liên hệ joule với newton, ta nhớ lại rằng công bằng lực nhân với khoảng cách, nên J = N.m, vậy

$$\frac{V}{m} = \frac{N.m}{C.m} = \frac{N}{C}$$

Như với những khó khăn khác kiểu như thế đối với các đơn vị điện, người ta nhanh chóng bắt đầu nhận ra những tổ hợp xuất hiện thường xuyên.

Câu hỏi thảo luận

A. Trong định nghĩa cường độ điện trường, điện tích thử có cần là 1 coulomb ? Nó có cần là một điện tích dương ?

B. Một hạt tích điện, chẳng hạn như electron hoặc proton, có chịu lực tác dụng từ điện trường của riêng nó ?

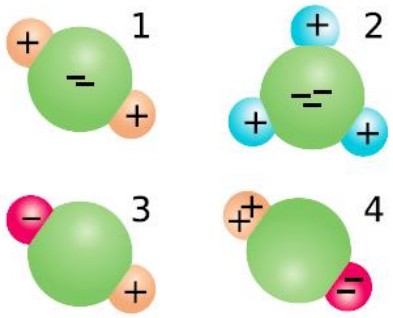
C. Có hay không điện trường xung quanh một hốc tường không có gì cắm vào nó, hay một cái pin vừa mới đặt nằm trên bàn ?

D. Trong một đèn flash cấp nguồn bằng pin, điện trường hướng theo chiều nào ? Trường đó sẽ trông như thế nào bên trong các dây dẫn ? Còn trong dây tóc của đèn sợi đốt thì sao ?

E. Phê bình phát biểu sau: "Điện trường có thể biểu diễn bằng một biển mũi tên chỉ chiều dòng điện đang chạy".

F. Điện trường của một điện tích điểm, $|\mathbf{E}| = kQ/r^2$, có được trong phần câu hỏi tự kiểm tra ở trên. Hãy so sánh hình dạng trường của một quả cầu tích điện đều với trường của một điện tích điểm ?

G. Bên trong của một vật dẫn điện hoàn hảo ở trạng thái cân bằng phải có điện trường bằng không, vì nếu không thì điện tích tự do bên trong nó sẽ bị trôi giạt đối với trường, và nó sẽ không còn ở trạng thái cân bằng. Còn điện trường ngay tại bề mặt vật dẫn hoàn hảo thì sao? Xét khả năng trường vuông góc với bề mặt hay song song với nó.



n/ Câu hỏi thảo luận H

H. So sánh mômen lưỡng cực của các phân tử và ion phân tử cho trong hình n.

I. Những mẩu giấy nhỏ không bị làm cho nhiễm điện bằng bất kì cách nào có thể bị hút lên với một vật tích điện như một miếng băng tích điện. Theo thuật ngữ mới của chúng ta, chúng ta có thể mô tả điện tích của miếng băng gây ra một mômen lưỡng cực trên mẩu giấy. Có thể sử dụng một kĩ thuật tương tự để gây ra không chỉ một mômen lưỡng cực mà là một điện tích hay không ?

J. Trái Đất và Mặt Trăng khá chênh lệch về kích thước và cách xa nhau, giống như một quả bóng chày và một quả bóng bàn cầm trên hai tay giang rộng của bạn. Tưởng tượng thay thế hệ hành tinh với đặc tính của hành tinh kép: hai hành tinh có kích thước bằng nhau, nằm gần nhau. Hãy phác họa biểu đồ biển mũi tên cho trường hấp dẫn của chúng.

5.4 Điện thế đối với trường không đều

Bạn đọc am hiểu tính toán sẽ không gặp khó khăn gì trong việc khái quát mối quan hệ cường độ điện trường-hiệu điện thế cho trường hợp trường biến thiên. Thế năng liên quan đến một lực biến thiên là

$$\Delta PE = -\int F dx\,, \qquad \text{[một chiều]}$$

nên đối với điện trường, chúng ta đem chia cho q, được

$$\Delta V = -\int E dx\,, \qquad \text{[một chiều]}$$

Áp dụng định lí cơ bản của phép tính tích phân

$$E = -\frac{dV}{dx} \qquad \text{[một chiều]}$$

Ví dụ 7. Điện thế do một điện tích điểm gây ra

∇ Tìm biểu thức của điện thế do một điện tích điểm gây ra.

⇒ Như đã có từ câu hỏi tự kiểm tra ở phần trước, điện trường do một điện tích điểm gây ra là

$$|\mathbf{E}| = \frac{kQ}{r^2}$$

Hiệu điện thế giữa hai điểm trên cùng một đường bán kính là

$$\Delta V = -\int dV = -\int E_x dx$$

Trong thảo luận chung ở trên, x chỉ là một kí hiệu chung cho khoảng cách truyền dọc theo đường sức tính từ điểm này đến điểm kia, nên trong trường hợp này x thật ra là r

$$\Delta V = -\int_{r_1}^{r_2} E_r dr = -\int_{r_1}^{r_2} \frac{kQ}{r^2} dr = \frac{kQ}{r}\Big]_{r_1}^{r_2} = \frac{kQ}{r_2} - \frac{kQ}{r_1}$$

Quy ước chung là sử dụng $r_1 = \infty$ làm một điểm tham chiếu, nên điện thế tại một điểm bất kì cách điện tích khoảng r là

$$V = \frac{kQ}{r}$$

Lời giải thích là nếu bạn mang điện tích thử dương đến càng gần một điện tích dương, thì năng lượng điện của nó tăng lên; nếu nó được phóng thích, nó sẽ nhảy ra xa, giải phóng năng lượng này dưới dạng động năng.

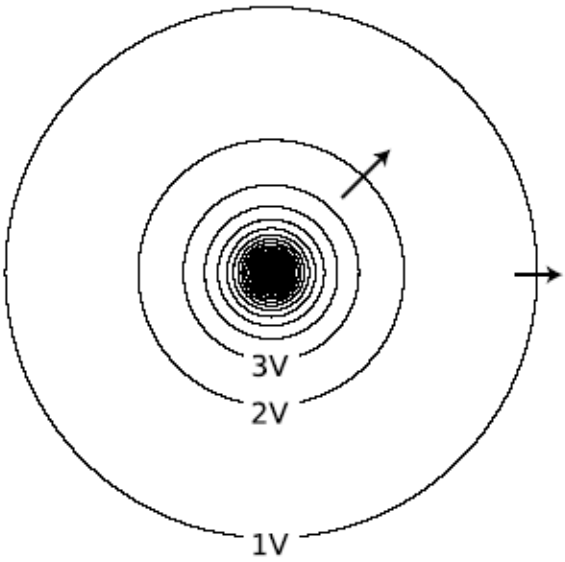
♥ Hãy chỉ ra rằng bạn có thể tìm được biểu thức cho điện trường của một điện tích điểm bằng cách định giá đạo hàm $E_x = -\,dV/dx$.

o/ Hình bên trái: Bản đồ địa hình của vùng Stowe,Vermont. Độ cao chênh lệch từ đường đẳng mức này đến đường đẳng mức kế tiếp là 200 feet. Các đường càng cách xa nhau, như trong ngôi làng ở thấp hơn, cho thấy địa hình tương đối bằng phẳng, còn các đường càng gần nhau, giống như các đường ở phía tây thành phố chính, biểu diễn độ dốc nhảy bậc. Các dòng suối chảy từ trên đồi xuống, vuông góc với đường đẳng mức. Hình bên phải: Cũng bản đồ trên nhưng được vẽ lại có chiều sâu, với bóng đổ cho dễ nhìn.

5.5 Hai hoặc ba chiều

Bản đồ địa hình nêu trong hình o gợi ý một phương pháp tốt để hình dung mối liên hệ giữa điện trường và điện thế trong không gian hai chiều. Mỗi đường viền trên bản đồ là một đường đẳng mức; một vài trong số này được ghi rõ độ cao của chúng theo đơn vị feet. Chiều cao liên quan đến thế năng hấp dẫn, nên trong sự tương tự hấp dẫn, nên chúng ta có thể nghĩ chiều cao là biểu diễn cho điện thế. Ở nơi các đường viền cách xa nhau, như trong thành phố, độ dốc là thoai thoải. Các đường càng gần nhau cho thấy độ dốc càng lớn.

Nếu chúng ta đi dọc theo một đường thẳng, nói ví dụ như đi từ thành phố thẳng sang phía đông, thì chiều cao (điện thế) là một hàm của tọa độ x đông-tây. Sử dụng định nghĩa toán học thường dùng của độ dốc, và viết V cho chiều cao để nhắc nhở chúng ta sự tương tự điện, thì độ dốc dọc theo một đường như thế là $\Delta V/\Delta x$. Nếu độ dốc không phải là một hằng số, chúng ta cần sử dụng độ dốc của đồ thị V-x, hoặc sử dụng phép tính và nói về đạo hàm dV/dx.

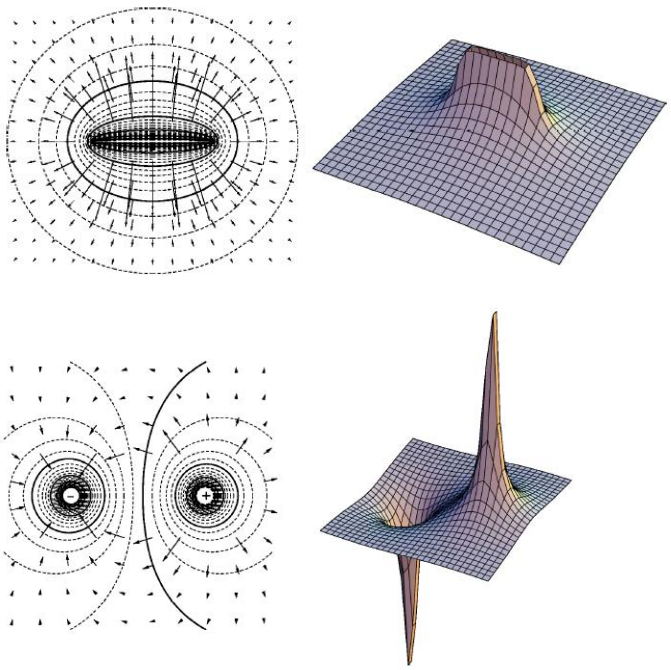


p/ Các đường cong đẳng thế xung quanh một điện tích điểm. Ở gần điện tích, các đường cong nằm sát nhau nên chúng nhập lại trong hình vẽ này do kích thước có hạn biểu diễn trên hình vẽ. Một số vectơ cường độ điện trường được chỉ rõ bằng mũi tên.

Nếu như mọi thứ không giới hạn theo một đường thẳng thì sao ? Nước chảy từ trên đồi xuống. Lưu ý cách thức các dòng suối trên bản đồ cắt vuông góc qua các đường đẳng mức.

Người ta có thể lập bản đồ điện thế theo kiểu tương tự, như chỉ rõ trong hình p. Điện trường mạnh nhất ở nơi các đường cong đẳng thế gần nhau nhất, và vectơ cường độ điện trường luôn hướng vuông góc với các đường đẳng thế.

Hình r biểu diễn một số ví dụ về cách thức hình dung hình ảnh trường và điện thế.



r/ Hình ảnh điện trường và điện thế hai chiều. Hình trên: Một thanh tích điện đều. Hình dưới: Một lưỡng cực. Trong mỗi trường hợp, biểu đồ ở bên trái biểu diễn các vectơ trường và đường cong đẳng thế, còn đồ thị bên phải biểu diễn điện thế (hệ tọa độ trên-dưới) là hàm của *x* và *y*. Chú thích các biểu đồ trường: Mỗi mũi tên biểu diễn trường tại điểm nơi ngọn của nó định vị. Để cho rõ ràng, một số mũi tên trong vùng cường độ điện trường rất mạnh không biểu diễn như trên, chúng quá dài nên vẽ ra được. Chú thích cho các đường cong đẳng thế: Trong những vùng điện trường rất mạnh, các đường cong không được chỉ rõ vì chúng nhập lại thành vùng đen đậm. Chú thích cho các đồ thị phối cảnh: Cần nhớ rằng mặc dù chúng ta hình dung các thứ trong không gian ba chiều, nhưng đây thật ra là biểu diễn điện thế hai chiều. Chiều thứ ba (trên-dưới) biểu diễn điện thế, chứ không phải vị trí.

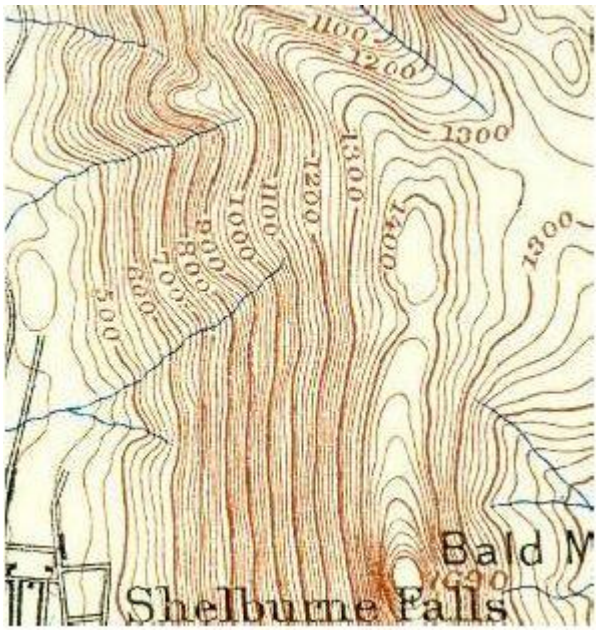
Về mặt toán học, các phép tính của phần 5.4 khái quát hóa cho không gian ba chiều như sau:

$$E_x = - dV/dx$$

$$E_y = - dV/dy$$

$$E_z = - dV/dz$$

♥ Tưởng tượng rằng bản đồ địa hình trong hình q biểu diễn điện thế chứ không phải độ cao. (a) Xét dòng chảy bắt đầu ở gần chính giữa của bản đồ. Hãy xác định dấu dương và âm của dV/dx và dV/dy, và liên hệ chúng với hướng của lực đang đẩy dòng điện chạy về phía trước chống lại sức cản của ma sát. (b) Nếu bạn muốn tìm thật nhiều điện tích trên bản đồ này, thì bạn sẽ tìm ở chỗ nào ?



Hình q

5.6 Điện trường của sự phân bố điện tích liên tục

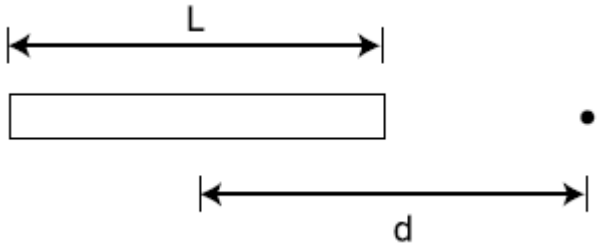
Điện tích thật sự xuất hiện thành những phần riêng biệt, nhưng thông thường để cho tiện lợi về mặt toán học, người ta xem tập hợp các điện tích như thể chúng giống như một dòng chất lưu liên tục trải ra trong một vùng không gian. Ví dụ, một quả cầu kim loại tích điện sẽ có điện tích trải ra gần như đồng đều trên toàn bộ bề mặt của nó, và trong đa số mục đích người ta thường bỏ qua thực tế là tính chất đều đặn này bị phá vỡ ở mức độ nguyên tử. Điện trường do một sự phân bố điện tích liên tục như thế gây ra là tổng các điện trường do từng phần của nó gây ra. Nếu chúng ta đặt các "phần" đó trở nên nhỏ tí xíu, thì chúng ta có tổng của một số vô hạn những số vô cùng nhỏ, tức là một tích phân. Nếu nó là một tổng rời rạc, thì chúng ta có điện trường tổng cộng theo hướng x là tổng của mọi thành phần x của từng trường riêng lẻ, và tương tự chúng ta sẽ có tổng cho các thành phần y và z. Trong trường hợp liên tục, chúng ta có ba tích phân.

Ví dụ 8. Điện trường của một thanh tích điện đều

∇ Một thanh chiều dài L có điện tích Q trải đều dọc theo nó. Tìm điện trường tại điểm nằm cách chính giữa thanh một khoảng d, dọc theo trục của thanh.

⇒ Đây là một tình huống một chiều, nên chúng ta thật ra chỉ cần tiến hành một phép tích phân biểu diễn điện trường tổng cộng dọc theo trục. Chúng ta tưởng tượng chia thanh ra thành những phần ngắn có chiều dài dz, mỗi phần có điện tích dq. Vì điện tích trải đều theo thanh, nên chúng ta có dq = λdz, trong đó λ = Q/L là điện tích trên đơn vị chiều dài, có đơn vị coulom trên mét. Vì các phần chia vô cùng ngắn, nên chúng ta xem chúng là điện tích điểm và sử dụng biểu thức kdq/r^2 cho sự đóng góp của chúng vào điện trường, trong đó $r = d - z$ là khoảng cách tính từ điện tích tại z đến điểm mà chúng ta thích.

$$E_z = \int \frac{kdq}{r^2} = \int_{-L/2}^{+L/2} \frac{k\lambda dz}{r^2} = k\lambda \int_{-L/2}^{+L/2} \frac{dz}{(d-z)^2}$$



s/ Ví dụ 8

Tích phân có thể tìm trong bảng kê, hay hạ bậc xuống dạng cơ bản bằng cách đặt một biến mới thay cho (d – z). Kết quả là

$$E_z = k\lambda \left(\frac{1}{d-z} \right)_{-L/2}^{+L/2} = \frac{kQ}{L} \left(\frac{1}{d-L/2} - \frac{1}{d+L/2} \right)$$

Đối với các giá trị lớn của d, biểu thức này cho giá trị nhỏ hơn vì hai nguyên do: (1) mẫu của phân thức trở nên lớn, và (2) hai phân thức trở nên gần như bằng nhau, và có xu hướng triệt tiêu nhau. Điều này có ý nghĩa, vì trường sẽ phải yếu hơn khi ta đi xa điện tích hơn. Trên thực tế, trường ở khoảng cách lớn phải tiến tới kQ/d^2, vì từ một khoảng cách thật lớn, thanh trông như một điểm

Cũng thật hứng thú lưu ý rằng điện trường trở nên vô hạn ở hai đầu thanh, nhưng không vô hạn trên phần trong của thanh. Bạn có thể giải thích tại sao điều này xảy ra không ?

Tóm tắt chương 5

Từ khóa chọn lọc

trường ……	tính chất của một điểm trong không gian mô tả lực sẽ tác dụng lên một hạt nếu nó nằm tại đó
bồn …….	điểm tại đó các vectơ trường hội tụ
nguồn …….	điểm từ đó các vectơ trường phân kì; thường được dùng khái quát hơn để chỉ các điểm hoặc phân kì hoặc hội tụ
điện trường …….....	lực trên đơn vị điện tích tác dụng lên một điện tích thử đặt tại một điểm cho trước trong không gian
trường hấp dẫn ……..	lực trên đơn vị khối lượng tác dụng lên một khối lượng thử đặt tại một điểm cho trước trong không gian
lưỡng cực điện ……..	một vật có sự bất cân bằng giữa điện tích dương ở một đầu và điện tích âm ở đầu kia; một vật sẽ chịu một mômen quay trong điện trường

Kí hiệu

g ..... trường hấp dẫn

E ..... điện trường

D ..... mômen lưỡng cực điện

Thuật ngữ khác và kí hiệu

d, p, m ..... những kí hiệu khác cho mômen lưỡng cực điện

Tóm tắt

Newton đã khai sinh ra một vũ trụ trong đó các lực tác dụng tức thời xuyên không gian, nhưng ngày nay chúng ta biết rằng có sự chậm trễ thời gian trước khi một sự thay đổi cơ cấu khối lượng và điện tích ở một góc của vũ trụ làm cho nó tự cảm thấy một sự thay đổi lực chịu tác dụng từ xa. Chúng ta tưởng tượng sự trải rộng ra phía ngoài của một sự thay đổi như thế giống như sự gợn sóng trong một *trường lực* không nhìn thấy lấp đầy vũ trụ.

Chúng ta định nghĩa trường hấp dẫn tại một điểm cho trước là lực trên đơn vị khối lượng tác dụng lên các vật đặt tại điểm đó, và tương tự, điện trường được định nghĩa là lực trên đơn vị điện tích. Những trường này là vectơ, do trường do nhiều nguồn sinh ra cộng lại theo quy tắc cộng vectơ.

Khi điện trường không đổi, hiệu điện thế giữa hai điểm nằm dọc theo một đường song song với trường liên hệ với trường bởi phương trình $\Delta V = - Ed$, trong đó d là khoảng cách giữa hai điểm.

Bài tập

1. Trong neuron quen thuộc của chúng ta, hiệu điện thế giữa mặt trong và mặt ngoài của màng tế bào vào khoảng $V_{\text{ngoài}} - V_{\text{trong}} = - 70$ mV ở trạng thái nghỉ, và bề dày màng khoảng chừng 6,0 nm (tức là chỉ dày khoảng hàng trăm nguyên tử). Vậy thì điện trường bên trong màng bằng bao nhiêu ?

2. Khe hở giữa hai điện cực của hệ thống đánh lửa của động cơ ô tô là 0,060 cm. Để tạo ra tia lửa điện trong hỗn hợp xăng-không khí, cần phải đạt tới điện trường $3,0 \times 10^6$ V/m.

(a) Khi khởi động xe hơi, cần phải đặt một hiệu điện thế tối thiểu bằng bao nhiêu vào mạch điện đánh lửa ? Giả sử điện trường là đều.

(b) Kích thước nhỏ của khe hở giữa hai điện cực thật bất lợi vì nó có thể bị khóa dễ dàng, và cần phải có những công cụ đặc biệt để đo nó. Vậy tại sao người ta không thiết kế hệ thống đánh lửa có khe hở rộng hơn ?

3. (a) Lúc $t = 0$, một hạt tích điện dương đặt nằm, ở trạng thái nghỉ, trong chân không, trong đó có một điện trường đều có độ lớn E. Hãy thiết lập phương trình cho tốc độ của hạt, v, theo t, E, khối lượng m và điện tích q của nó.

(b) Nếu tiến hành điều tương tự với hai vật khác nhau và chúng được quan sát thấy có chuyển động giống nhau, thì bạn có thể kết luận gì về khối lượng và điện tích của chúng ? (Chẳng hạn, khi phóng xạ được phát hiện, người ta nhận thấy một dạng của nó có cùng chuyển động giống như electron trong loại thí nghiệm này).

4. Hãy chỉ ra rằng độ lớn của điện trường tạo ra bởi một lưỡng cực hai điện tích đơn giản, tại một điểm ở xa dọc theo trục của lưỡng cực, là tỉ lệ gần đúng với D/r^3, trong

đó r là khoảng cách tính từ lưỡng cực. [Gợi ý: Sử dụng phép gần đúng $(1 + \varepsilon)^p \approx 1 + p\varepsilon$, biểu thức đúng với ε nhỏ]

5. Cho rằng điện trường của một lưỡng cực tỉ lệ với D/r^3 (xem bài toán 4), hãy chỉ ra rằng điện thế của nó biến thiên theo hàm D/r^2 (Bỏ qua dấu dương và âm và các hằng số tỉ lệ).

6. Một phân tử carbon dioxide có cấu trúc O-C-O, với cả ba nguyên tử nằm trên một đường thẳng. Các nguyên tử oxygen chiếm dư một chút điện tích âm, làm cho carbon mang điện dương. Tuy nhiên, sự đối xứng của phân tử có nghĩa là nó không có mômen lưỡng cực tổng cộng, không giống như một phân tử nước hình chữ V chẳng hạn. Trong khi điện thế của một lưỡng cực có độ lớn D tỉ lệ với D/r^2 (bài toán 5), thì hóa ra điện thế của một phân tử carbon dioxide dọc theo trục của nó bằng k/r^3, trong đó r là khoảng cách tính từ phân tử và k là một hằng số. Điện trường của một phân tử carbon dioxide tại khoảng cách r bằng bao nhiêu ?

7. Một proton nằm trong vùng trong đó điện trường được cho bởi $E = a + bx^3$. Nếu proton bắt đầu ở trạng thái nghỉ tại $x_1 = 0$, hãy tìm tốc độ v của nó khi nó tiến tới vị trí x_2. Biểu diễn câu trả lời của bạn theo a, b, x_2, và e và m, điện tích và khối lượng của proton.

8. Xét điện trường tạo ra bởi một vòng tích điện đều có điện tích tổng cộng q và bán kính b.

(a) Hãy chỉ ra rằng điện trường tại một điểm trên trục của vòng nằm cách mặt phẳng vòng một khoảng a là $kqa(a^2 + b^2)^{-3/2}$.

(b) Hãy chỉ ra rằng biểu thức này đúng cho trường hợp $a = 0$ và cho a lớn hơn nhiều so với b.

9. Xét điện trường tạo ra bởi một mặt phẳng tích điện đều rộng vô hạn. Bắt đầu từ kết quả của bài toán 8, hãy chỉ ra rằng điện trường tại một điểm bất kì là $2\pi k\sigma$, trong đó σ là mật độ điện tích trên mặt phẳng, đo bằng đơn vị coulomb trên mét vuông. Lưu ý là kết quả độc lập với khoảng cách tính từ mặt phẳng [Gợi ý: Chia mặt phẳng thành các vòng đồng tâm vô cùng nhỏ, có tâm tại điểm trong mặt phẳng gần nhất với điểm mà ở đó điện trường được định giá. Lấy tích phân sự phân bố của các vòng cho trường tại điểm này để tính trường tổng cộng].

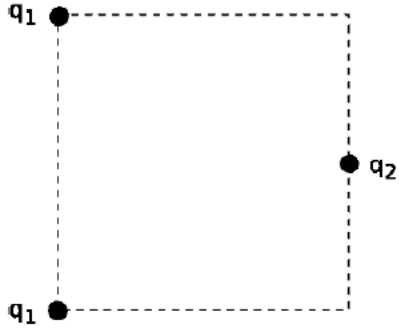
$$E = 2\pi\delta k$$

10. Xét điện trường tạo ra bởi một hình trụ tích điện đều kéo dài ra vô hạn ở một phía.

(a) Bắt đầu từ kết quả của bài 8, hãy chỉ ra rằng điện trường tại tâm của mặt trụ là $2\pi k\sigma$, trong đó σ là mật độ điện tích trên hình trụ, tính bằng đơn vị coulomb trên mét vuông. [Gợi ý: Bạn có thể sử dụng phương pháp tương tự như trong bài toán 9].

(b) Biểu thức này độc lập với bán kính của hình trụ. Giải thích tại sao biểu thức này lại như thế. Ví dụ, điều gì sẽ xảy ra nếu như bạn tăng gấp đôi bán kính của hình trụ ?

11. Ba điện tích sắp xếp trên một hình vuông như hình vẽ. Cả ba đều là điện tích dương. Hỏi giá trị q_2/q_1 bằng bao nhiêu sẽ tạo ra điện trường bằng không tại tâm của hình vuông ?



a/ Hai người đầu tiên bước được ánh sáng sao là cái gì: James Clerk Maxwell và Katherine Maxwell, 1869

Chương 6
ĐIỆN TỪ HỌC

Trong chương này, chúng ta sẽ thảo luận mối quan hệ mật thiết giữa từ học và điện học do James Clerk Maxwell khám phá ra. Maxwell nhận ra rằng ánh sáng là một sóng cấu thành điện trường và từ trường liên kết với nhau. Người ta đồn rằng có một đêm ông đã đi dạo cùng với vợ của ông và nói với bà ta rằng bà là người khác duy nhất trên thế giới biết được ánh sáng sao thật sự là cái gì.

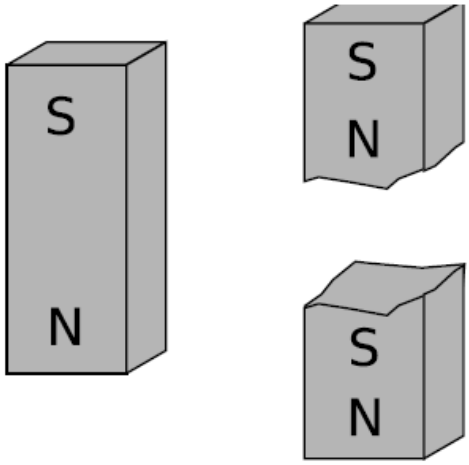
6.1 Từ trường

Không có đơn cực từ

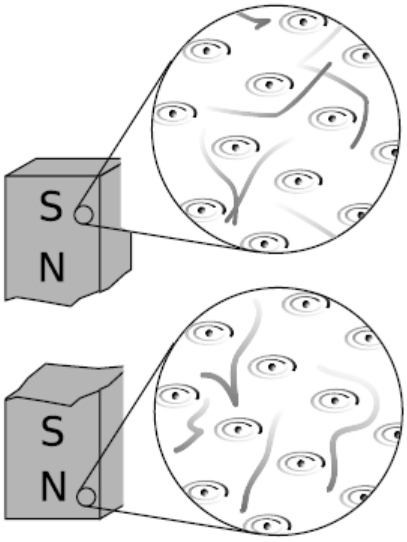
Nếu bạn chơi với một nắm lưỡng cực từ và một nắm nam châm thanh, bạn sẽ thấy chúng rất giống nhau. Chẳng hạn, một cặp nam châm thanh có xu hướng tự sắp thẳng hàng nối đuôi nhau, và một cặp lưỡng cực điện làm giống hệt như vậy (Thật không may là không dễ dàng gì làm cho một lưỡng cực điện vĩnh cửu có thể cầm nắm như thế này, vì điện tích có xu hướng rò rỉ).

Tuy nhiên, rốt cuộc bạn sẽ chú ý thấy sự khác biệt quan trọng giữa hai loại đối tượng. Các lưỡng cực điện có thể bị phá vỡ, hình thành nên các hạt tích điện dương và âm cô lập nhau. Dụng cụ hai đầu có thể bị chia cắt thành các phần không phải hai đầu. Nhưng

nếu bạn cắt thanh nam châm thành hai nửa, b, bạn sẽ dễ dàng thấy mình vừa tạo ra hai vật hai cực nhỏ hơn.



b/ Cắt một thanh nam châm thành hai nửa không tạo ra hai đơn cực từ, mà tạo ra hai lưỡng cực nhỏ hơn.



c/ Giải thích ở cấp độ nguyên tử.

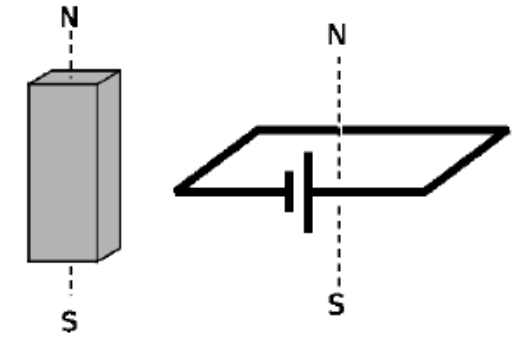
Lí giải cho hành vi này không khó khăn gì từ bức tranh vi mô của chúng ta về các nam châm sắt vĩnh cửu. Một lưỡng cực điện có dư "chất" dương tập trung ở một đầu và dư chất âm ở đầu kia. Mặt khác, thanh nam châm có từ tính của nó không phải từ sự thiếu cân bằng "chất" từ ở hai đầu mà từ sự định hướng của chuyển động quay của các electron. Một cực là cực mà từ đó chúng ta có thể nhìn xuống trục và thấy các electron đang quay theo chiều kim đồng hồ, và cực kia là cực mà từ đó chúng sẽ xuất hiện chuyển động ngược chiều kim đồng hồ. Không có sự chênh lệch giữa "chất" ở cực này và cực kia của nam châm, c.

Chưa ai từng thành công trong việc tách riêng một đơn cực từ. Theo ngôn ngữ kĩ thuật, chúng ta nói rằng các đơn cực từ hình như không tồn tại. Các đơn cực điện thì *thật sự* tồn tại – đó là các điện tích.

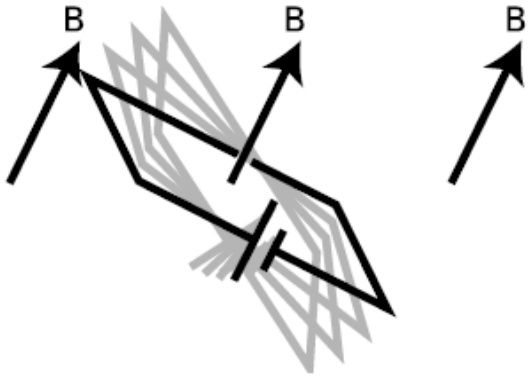
Lực điện và lực từ giống nhau ở nhiều phương diện. Cả hai đều tác dụng từ xa, cả hai đều có thể là lực hút hoặc lực đẩy, và cả hai đều liên quan mật thiết đến một tính chất của vật chất gọi là điện tích. (Nhắc lại từ tính là tương tác giữa các điện tích đang chuyển động) Óc thẩm mĩ của các nhà vật lí đã bị xâm phạm suốt một thời gian dài vì cái có vẻ đối xứng này bị phá vỡ bởi sự tồn tại của các đơn cực điện và sự thiếu vắng các đơn cực từ. Có lẽ một số dạng kì lạ của vật chất có tồn tại, gồm các hạt là những đơn cực từ. Nếu những hạt như thế có thể tìm thấy trong tia vũ trụ hay đất đá mặt trăng, nó sẽ là bằng chứng cho thấy sự thiếu đối xứng biểu kiến chỉ là sự thiếu đối xứng trong kết cấu của vũ trụ, chứ không phải là một quy luật vật lí. Vì những lí do phải công nhận là chủ quan này, đã có vài ba tìm kiếm cho đơn cực từ. Các thí nghiệm đã được tiến hành, với kết quả âm tính, nhằm tìm kiếm đơn cực từ có trong vật chất thông thường. Các nhà vật lí Liên Xô trong thập niên 1960 đã đưa ra những khẳng định kích động rằng họ đã tạo ra và phát hiện được các đơn cực từ trong các máy gia tốc hạt, nhưng không hề có thành công nào trong nỗ lực tái tạo lại kết quả ở đó hay ở những máy gia tốc khác. Cuộc tim kiếm mới đây nhất cho các đơn cực từ bằng cách phân tích lại dữ liệu từ cuộc tìm kiếm quark top tại Fermilab, hóa ra không có ứng cử viên nào, cho thấy hoặc là đơn cực từ không tồn tại trong tự nhiên hoặc là chúng cực kì nặng và do đó thật khó tạo ra trong các máy gia tốc hạt.

Định nghĩa từ trường

Vì các đơn cực từ dường như không tồn tại, nên không thể nào nghĩ tới việc định nghĩa từ trường dưới dạng lực tác dụng lên một đơn cực thử. Thay vì vậy, chúng ta tuân theo triết lí của sự định nghĩa khác của điện trường, và định nghĩa từ trường dưới dạng mômen quay tác dụng lên lưỡng cực từ thử. Đây chính xác là cái mà la bàn từ hoạt động: kim la bàn là một nam châm sắt nhỏ hoạt động giống như một lưỡng cực từ và cho chúng ta thấy hướng của từ trường Trái Đất.



d/ Một lưỡng cực chuẩn cấu tạo từ một vòng dây hình vuông làm ngắn mạch một chiếc pin. Nó hoạt động rất giống với nam châm thanh, nhưng độ lớn của nó dễ định lượng hơn.



e/ Lưỡng cực có xu hướng tự sắp thẳng hàng với từ trường xung quanh.

Tuy nhiên, để định nghĩa độ lớn của từ trường, chúng ta cần một số cách định nghĩa độ lớn của lưỡng cực thử, tức là chúng ta cần có một định nghĩa của mômen lưỡng cực từ. Chúng ta có thể sử dụng một nam châm sắt vĩnh cửu được chế tạo theo những kĩ thuật nhất định, nhưng một vật như thế thật sự là một hệ quá phức tạp gồm nhiều nguyên tử sắt, chỉ có một số trong chúng sắp thẳng hàng. Một lưỡng cực chuẩn cơ bản hơn là một vòng điện vuông. Đây có thể là một mạch điện có chút ít điện trở gồm một hình vuông dây dẫn nối ngắn mạch qua một chiếc pin.

Chúng ta sẽ thấy rằng một vòng như thế, khi đặt trong từ trường, chịu một mômen quay có xu hướng sắp mặt phẳng sao cho mặt của nó hướng theo một hướng nhất định. (Vì vòng là đối xứng, nên không hề hấn gì nếu chúng ta quay nó giống như bánh xe mà không làm thay đổi mặt phẳng nó nằm trong đó) Từ hướng quay mặt ưu tiên này, chúng ta sẽ đi đến định nghĩa hướng của từ trường.

Các thí nghiệm cho thấy nếu vòng dây không thẳng hàng với từ trường, thì mômen xoắn tác dụng lên nó tỉ lệ với cường độ dòng điện, và cũng tỉ lệ với diện tích giới hạn của vòng dây. Sự tỉ lệ với dòng điện là có ý nghĩa, vì lực từ là tương tác giữa các điện tích đang chuyển động, và dòng điện là số đo chuyển động của điện tích. Sự tỉ lệ với diện tích vòng dây cũng không khó hiểu, vì việc tăng chiều dài các cạnh của hình vuông làm tăng cả điện tích chứa trong "con sông" chảy tròn này và lượng lực đòn bẫy tạo ra mômen quay. Hai nguyên nhân vật lí độc lập cho sự tỉ lệ với chiều dài mang lại sự tỉ lệ tổng quát với bình phương chiều dài, đó đúng là diện tích của vòng dây. Vì những lí do này, chúng ta định nghĩa mômen lưỡng cực từ của một vòng dây điện vuông là

$$D_m = IA$$

[định nghĩa mômen lưỡng cực từ của một dòng điện vuông]

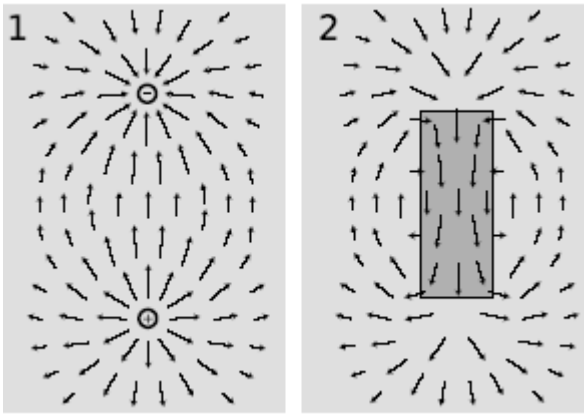
Bây giờ chúng ta định nghĩa từ trường theo kiểu hoàn toàn tương tự với kiểu định nghĩa thứ hai của điện trường.

định nghĩa từ trường

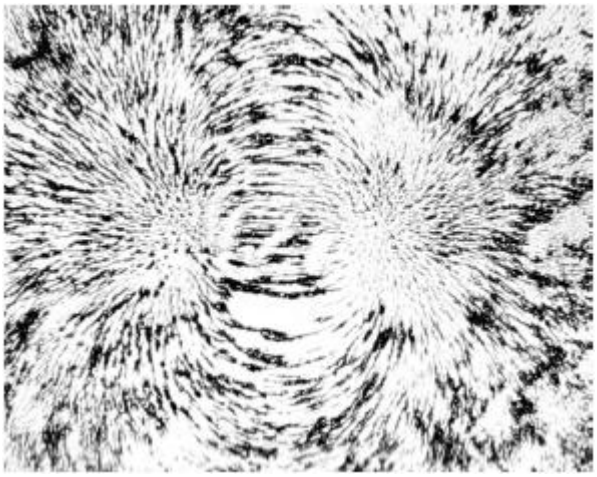
Vectơ từ trường, **B**, tại một điểm bất kì trong không gian được xác định bằng cách quan sát mômen quay tác dụng lên một lưỡng cực từ thử D_{mt} gồm một vòng dây điện hình vuông. Độ lớn của trường là $|\mathbf{B}| = \tau/D_m \sin\theta$, trong đó θ là góc lệch của vòng dây. Hướng của từ trường vuông góc với vòng dây, chúng ta chọn hướng sao cho nếu chúng ta nhìn dọc theo nó, dòng điện chạy trong vòng là ngược chiều kim đồng hồ.

Chúng ta tìm thấy từ định nghĩa này từ trường có đơn vị $N.m/A.m^2 = N/A.m$. Tổ hợp đơn vị khó sử dụng này được gọi tắt là tesla, 1 T = 1 N/A.m. Nhắc lại cần ghi nhớ về hướng ngược chiều kim đồng hồ ở một đầu; trong phần 6.4 chúng ta sẽ thấy làm thế nào hiểu khái niệm này theo những nguyên lí cơ bản hơn.

Sự không tồn tại của các đơn cực từ có nghĩa là không giống như điện trường, f/1, từ trường, f/2, không bao giờ có nguồn phát ra hay bồn hút vào. Các vectơ từ trường hướng theo những đường khép kín trở lại chính nó, chứ không hội tụ hay phân kì tại một điểm.



f/ Điện trường, 1, có điểm phát ra và điểm thu vào, còn từ trường, 2, thì không.



g/ Hình dạng từ phổ của thanh nam châm. Hình ảnh này có được bằng cách rải mạt sắt lên tờ giấy, và mang một thanh nam châm đặt bên dưới nó. Lưu ý cách thức từ phổ đi qua thân nam châm, hình thành các vòng khép kín, như trong hình f/2. Không có nguồn phát ra hay bồn thu vào.

6.2 Tính từ trường và lực từ

Tĩnh từ học

Nghiên cứu của chúng ta về từ trường được xây dựng trên sự hiểu biết trước đó của chúng ta về lực từ, sau cùng là dựa trên định luật Coulomb cho lực điện giữa hai điện tích điểm. Vì từ tính sau rốt là tương tác giữa các dòng điện, tức là giữa các điện tích đang chuyển động, cho nên thật có lí khi muốn có một sự tương tự từ học của định luật Coulomb, một phương trình sẽ cho chúng ta biết lực từ giữa bất kì hai điện tích đang chuyển động nào.

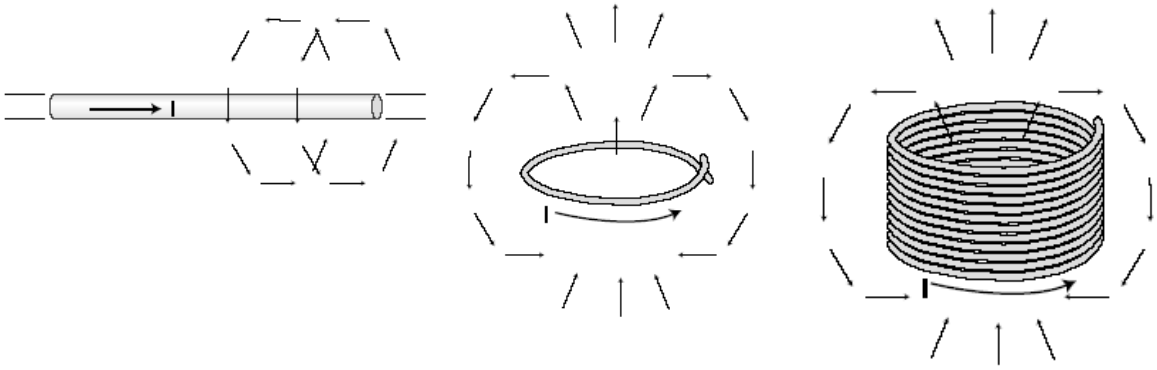
Thật không may, một định luật như thế không tồn tại. Định luật Coulomb mô tả trường hợp đặc biệt của tĩnh điện học: nếu một tập hợp điện tích nằm ì ra đó và không chuyển động, nó cho chúng ta biết tương tác giữa chúng. Định luật Coulomb thất bại nếu như các điện tích đang chuyển động, vì nó không hợp nhất bất kì sự thừa nhận nào trong sự trễ thời gian ở sự truyền ra ngoài một thay đổi vị trí của các điện tích.

Một cặp điện tích điểm đang chuyển động nhất định sẽ tác dụng lực từ lên nhau, nhưng từ trường của chúng trông như con sóng vòm hình chữ V để lại phía sau những con

tàu. Mỗi điện tích điểm chịu một từ trường phát ra từ điện tích kia khi nó ở một số vị trí trước đó. Không có cách nào xây dựng một định luật lực cho chúng ta biết lực giữa chúng chỉ dựa trên vị trí hiện tại của chúng trong không gian.

Tuy nhiên, có khoa học tĩnh từ bao quát nhiều trường hợp quan trọng lớn. Tĩnh từ học mô tả lực từ giữa các dòng điện trong trường hợp đặc biệt trong đó dòng điện là đều là liên tục, dẫn đến từ trường trong không gian không thay đổi theo thời gian.

Nếu chúng ta không thể xây dựng tĩnh từ học từ một định luật lực cho các điện tích điểm, thì chúng ta bắt đầu từ đâu ? Vấn đề có thể giải quyết được, nhưng trình độ toán học cần thiết (phép tính vectơ) không thích hợp trong giáo trình này. Thật may mắn là có một sự chọn lựa nằm gần tầm với của chúng ta hơn. Các nhà vật lí thuộc những thế hệ quá khứ đã sử dụng toán học trừu tượng để thu được những phương trình đơn giản cho từ trường tạo ra bởi các phân bố dòng điện tĩnh tại khác nhau, ví dụ như một cuộn dây, một vòng dây tròn, hay một sợi dây thẳng. Hầu như mọi tình huống thực tế đều có thể xem xét hoặc là trực tiếp bằng những phương trình này, hoặc bằng phép cộng vectơ, ví dụ như trường hợp hai vòng dây tròn có từ trường cộng gộp lên nhau. Hình h biểu diễn các phương trình cho một số cấu hình thường gặp, cùng với minh họa hình ảnh trường của chúng.



h/ Một số từ trường

Từ trường của một dây dẫn thẳng, dài mang dòng điện I:

$$B = \frac{\mu_o I}{2\pi r}$$

Ở đây *r* là khoảng cách tính từ tâm của sợi dây. Các vectơ trường hướng theo những vòng tròn nằm trong mặt phẳng vuông góc với dây, hướng theo chiều kim đồng hồ khi nhìn dọc theo hướng của dòng điện.

Từ trường của một vòng điện tròn:

Các vectơ trường tạo ra hình ảnh giống như lưỡng cực, đi xuyên qua vòng dây và quay trở lại ở phía bên kia. Mỗi hành trình hình bầu dục mà các vectơ trường lần theo trông thuận chiều kim đồng hồ nếu nhìn dọc theo hướng dòng điện đang chạy khi nó xuyên qua. Không có phương trình đơn giản nào cho trường tại một điểm bất kì trong không gian, nhưng cho một điểm nằm *dọc theo trục chính giữa* vuông góc với vòng dây, từ trường là

$$B = \frac{1}{2}\mu_0 I b^2 \left(b^2 + z^2\right)^{-3/2}$$

Trong đó *b* là bán kính của vòng dây và *z* là khoảng cách từ điểm đó đến mặt phẳng vòng dây.

Từ trường của một solenoid (ống dây hình trụ):

Từ phổ tương tự như từ phổ của một vòng dây, nhưng đối với solenoid dài, đường đi của các vectơ trường trở nên rất thẳng ở bên trong của ống dây và ở ngay phía ngoài sát bên ống dây. Đối với một solenoid đủ dài, trường bên trong ống cũng trở nên rất gần đều, với độ lớn

$$B = \mu_0 IN/l$$

trong đó N là số vòng dây, còn l là chiều dài của solenoid. Từ trường ở gần miệng hay bên ngoài ống thì không đều và khó tính toán hơn. Đối với solenoid dài, từ trường bên ngoài nhỏ hơn nhiều so với từ trường bên trong.

Không cần nhớ các phương trình! Kí hiệu μ_0 là viết tắt cho hằng số $4\pi \times 10^{-7}$ T.m/A. Nó là tương đương từ học của hằng số lực Coulomb k. Hằng số Coulomb cho chúng ta biết bao nhiêu điện trường được tạo ra bởi một lượng điện tích cho trước, còn μ_0 liên hệ dòng điện với từ trường. Không giống như k, μ_0 có giá trị số hữu hạn do cách sắp xếp của hệ mét.

Lực tác dụng lên điện tích chuyển động trong từ trường

Giờ thì chúng ta đã biết cách tính từ trường trong một số trường hợp đơn giản, nhưng người ta cũng có thể tính được lực từ, ví dụ như lực của solenoid tác dụng lên một hạt mang điện đang chuyển động, hay lực tác dụng giữa hai dây dẫn mang dòng điện song song nhau.

Chúng ta sẽ giới hạn bản thân mình với trường hợp lực tác dụng lên một hạt tích điện đang chuyển động trong từ trường, kết quả cho phép chúng ta tính được lực giữa hai vật khi một vật là hạt mang điện đang chuyển động và vật kia là vật có từ trường mà chúng ta biết cách tính. Một thí dụ là việc sử dụng solenoid bên trong đèn hình TV để dẫn đường cho các chùm electron khi nó phát hình.

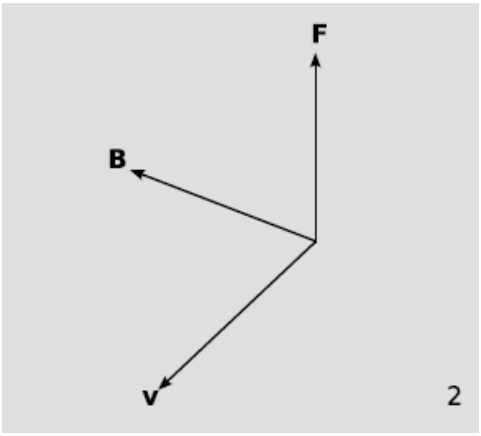
Các thí nghiệm cho thấy lực từ tác dụng lên một hạt tích điện đang chuyển động có độ lớn

$$|\mathbf{F}| = q\,|\mathbf{v}|\,|\mathbf{B}|\sin\theta$$

Trong đó **v** là vectơ vận tốc của hạt, và θ là góc giữa các vectơ **v** và **B**. Không giống như lực điện và lực hấp dẫn, lực từ không nằm trên cùng một đường thẳng với vectơ trường. Với hai vectơ cho trước, chỉ có một đường thẳng vuông góc với cả hai chúng, nên vectơ lực hướng theo một trong hai chiều khả dĩ của đường thẳng này. Đối với một hạt tích điện dương, hướng của vectơ lực có thể tìm như sau. Ban đầu, trượt đuôi của các vectơ **v** và **B** lại với nhau. **F** hướng theo chiều sao cho nếu bạn nhìn dọc theo nó, vectơ **B** nằm theo chiều kim đồng hồ so với vectơ **v**; đối với một hạt tích điện âm, hướng của lực ngược lại. Chú ý là vì lực vuông góc với chuyển động của vật, nên từ trường không bao giờ thực hiện công trên nó

Ví dụ 1. Nâng bằng từ

Trong hình i, một nam châm vĩnh cửu nhỏ, hình đĩa đặt dính trên mặt của một chiếc pin, và một dây dẫn móc hờ xung quanh pin, làm ngắn mạch nó. Dòng điện lớn chạy qua dây dẫn. Các electron chuyển động trong dây chịu lực tác dụng từ phía từ trường do nam châm vĩnh cửu gây ra, và lực này làm nâng dây lên.

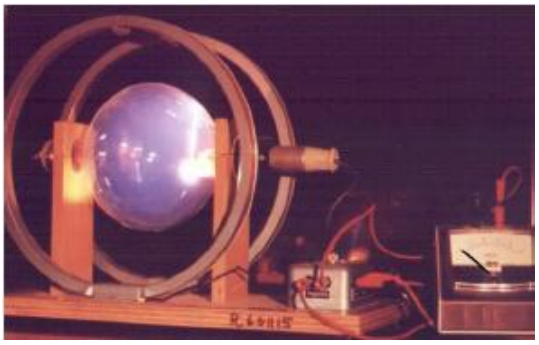


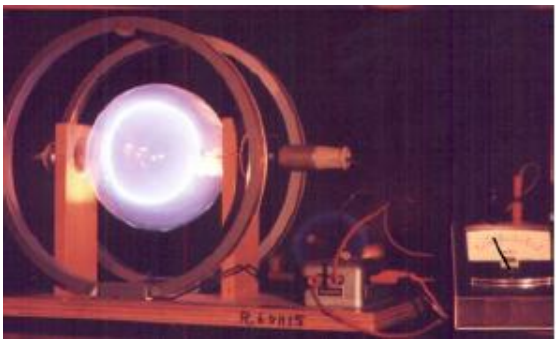
i/ Ví dụ 1

Từ trên hình có thể tìm ra hướng của từ trường do nam châm vĩnh cửu gây ra. Các electron trong dây đồng mang điện âm nên chúng chạy từ cực âm (phẳng) của pin sang cực dương (cực có núm nhô lên, ở phía trước). Khi các electron bị nam châm vĩnh cửu đẩy qua, chúng ta có thể tưởng tượng rằng chúng chịu một trường hoặc là hướng về phía nam châm, hoặc là hướng ra xa nó, tùy thuộc vào cách đặt nam châm dính lên trên pin. Tưởng tượng nhìn thẳng lên vectơ lực, điều bạn có thể làm được nếu bạn là một con rệp nằm bên dưới sợi dây. Vì các electron tích điện âm, nên vectơ **B** phải nằm về phía ngược chiều kim đồng hồ tính từ vectơ **v**, nghĩa là hướng về phía nam châm.

Ví dụ 2. Quỹ đạo tròn

Lực từ làm cho một chùm electron chuyển động theo vòng tròn. Chùm tia được tạo ra trong ống chân không, trong đó còn lại một lượng nhỏ khí hydrogen. Một vài electron va chạm với các phân tử hydrogen, phát ra ánh sáng và làm cho chúng ta nhìn thấy chùm tia. Từ trường được tạo ra bằng cách cho dòng điện chạy qua các vòng dây tròn ở phía trước và phía sau ống. Trong hình bên phải, với từ trường mở, lực vuông góc với hướng chuyển động của electron làm cho chúng chuyển động theo vòng tròn.





j/ Ví dụ 2

Ví dụ 3. Ảo giác trong chụp ảnh quét MRI

Trong phép chụp ảnh quét cắt lớp MRI của đầu, hệ thần kinh của bệnh nhân phơi ra trước từ trường mạnh. Vận tốc trung bình của các ion mang điện trong các tế bào thần kinh khá thấp, nhưng nếu bệnh nhân đột ngột cử động đầu, vận tốc đó có thể đủ cao khiến từ trường tác dụng lực đáng kể lên các ion. Hiện tượng này có thể mang lại ảo giác nhìn và nghe, ví dụ như nghe thấy mùi thịt rán.

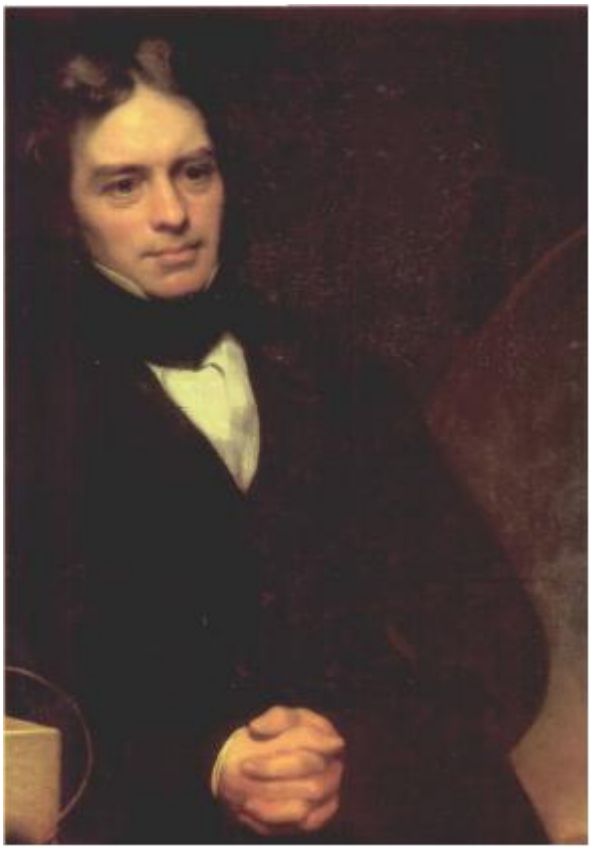
6.3 Cảm ứng điện từ

Điện từ học và chuyển động tương đối

Lí thuyết điện trường và từ trường xây dựng đến đây có một nghịch lí. Một trong những nguyên lí cơ bản nhất của vật lí học, lùi ngày tháng trở lại với Newton và Galileo và vẫn còn ảnh hưởng mạnh ngày nay, phát biểu rằng chuyển động là tương đối, chứ không phải tuyệt đối. Như vậy, các định luật vật lí phải không tác dụng khác nhau trong một hệ quy chiếu chuyển động, nếu không chúng ta sẽ có thể nói hệ quy chiếu nào là hệ quy chiếu ở trạng thái nghỉ tuyệt đối. Lấy ví dụ từ cơ học, tưởng tượng một đứa trẻ đang tâng một

quả bóng lên xuống ở ghế ngồi phía sau của một chiếc ô tô đang chuyển động. Trong hệ quy chiếu của đứa trẻ, chiếc xe ở trạng thái nghỉ và phong cảnh đang chuyển động; trong hệ quy chiếu này, quả bòng đi lên xuống theo đường thẳng, và tuân theo các định luật Newton và định luật hấp dẫn của Newton. Trong hệ quy chiếu của một nhà quan sát đang nhìn từ bên lề đường, chiếc ô tô đang chuyển động và lòng đường thì không. Trong hệ quy chiếu này, quả bóng đi theo một cung parabol, nhưng nó vẫn tuân theo các định luật Newton.

Tuy nhiên, khi xét với điện học và từ học, chúng ta có một vấn đề, lần đầu tiên được nói rõ ràng bởi Einstein: nếu chúng ta phát biểu rằng từ tính là tương tác giữa các điện tích đang chuyển động, thì rõ ràng chúng ta vừa sáng tạo ra một định luật vật lí vi phạm nguyên tắc cho rằng chuyển động là tương đối, vì những người quan sát khác nhau trong những hệ quy chiếu khác nhau sẽ không thống nhất với nhau về mức độ nhanh mà các điện tích đang chuyển động, hay thậm chí rốt cuộc chúng có chuyển động hay không. Lời giải không chính xác mà Einstein được chỉ dạy (và hoài nghi) khi còn là sinh viên khoảng thời gian năm 1900 là bản chất tương đối của chuyển động chỉ áp dụng cho cơ học, chứ không áp dụng được cho điện học và từ học. Toàn bộ câu chuyện làm sao Einstein phục hồi nguyên lí chuyển động tương đối vào vị trí chính đáng của nó trong vật lí học có liên quan tới thuyết tương đối đặc biệt của ông, chúng ta sẽ không bàn đến lí thuyết đó ở trong tập sách này. Tuy nhiên, một vài thí nghiệm tưởng tượng đơn giản và định lượng sẽ đủ để chỉ ra làm thế nào, dựa trên nguyên lí chuyển động là tương đối, phải có một số mối quan hệ mới và trước nay không ngờ tới giữa điện học và từ học. Những quan hệ này hình thành nên cơ sở của nhiều thiết bị thực tế, sử dụng hàng ngày, ví dụ như máy phát điện và máy biến thế, và chúng cũng đưa đến một cách giải thích chính bản thân ánh sáng là một hiện tượng điện từ học.



k/ Micheal Faraday (1791 – 1867), con của một người thợ rèn nghèo, đã phát minh ra hiện tượng cảm ứng điện từ bằng thực nghiệm.

l/ Một đường điện tích dương

Hãy tưởng tượng một ví dụ điện của chuyển động tương đối theo tinh thần giống như câu chuyện đứa trẻ ngồi phía sau xe ô tô. Giả sử chúng ta có một đường các điện tích dương, l. Nhà quan sát A ở trong hệ quy chiếu nằm yên so với những điện tích này, và quan sát thấy chúng tạo ra một hình ảnh điện trường hướng ra bên ngoài, ra xa khỏi các

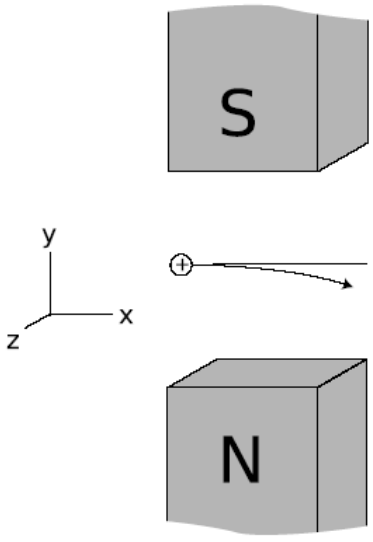
điện tích, và theo mọi hướng, giống như một bó chổi. Tuy nhiên, giả sử nhà quan sát B đang chuyển động sang bên phải đối với các điện tích. Đối với B, cô ta thấy mình đang đứng yên, còn các điện tích (và nhà quan sát A) di chuyển sang bên trái. Đồng ý kiến với A, cô ta quan sát thấy một điện trường, nhưng vì đối với cô ta các điện tích là đang chuyển động nên cô ta cũng phải quan sát thấy một từ trường trong cùng vùng không gian đó, giống hệt như từ trường do một sợi dây dẫn thẳng, dài gây ra.

Vậy thì ai đúng ? Cả hai đều đúng. Trong hệ quy chiếu của A, chỉ có một mình **E,** còn trong hệ quy chiếu của B có cả **E** lẫn **B**. Nguyên lí chuyển động tương đối buộc chúng ta kết luận rằng tùy theo hệ quy chiếu của chúng ta, chúng ta sẽ thấy một sự kết hợp khác nhau của các trường. Mặc dù chúng ta sẽ không chứng minh nó (việc chứng minh cần đến thuyết tương đối đặc biệt, không được bàn tới trong tập sách này), nhưng đúng là mỗi hệ quy chiếu mang lại một sự mô tả hoàn toàn trước sau như một của mọi thứ. Chẳng hạn, nếu một electron truyền qua vùng không gian này, cả A và B đều thấy nó chệch hướng, tăng tốc và giảm tốc. A sẽ giải thích thành công đây là kết quả của điện trường, còn B sẽ quy cho hành vi của electron là một kết hợp của lực điện và lực từ.

Như vậy, nếu chúng ta tin vào nguyên lí chuyển động tương đối, thì chúng ta phải chấp nhận rằng điện trường và từ trường là những hiện tượng liên quan mật thiết với nhau, giống như hai mặt của một đồng xu.

Bây giờ hãy xét hình m. Nhà quan sát A đứng yên so với các thanh nam châm, và thấy hạt đang bị lệch theo hướng *z*, theo quy luật cho trong phần 6.2 (nhìn dọc theo vectơ lực, tức là từ phía sau trang giấy, vectơ **B** nằm xuôi chiều kim đồng hồ so với vectơ **v**). Mặt khác, giả sử nhà quan sát B đang chuyển động sang bên phải dọc theo trục *x*, ban đầu ở tốc độ bằng với tốc độ hạt. B nhìn thấy các thanh nam châm đang chuyển động sang bên trái và hạt ban đầu đứng yên nhưng sau đó gia tốc dọc theo trục *z* theo đường thẳng. Từ trường không có khả năng làm cho một hạt chuyển động nếu như ban đầu nó đứng yên, vì từ tính là tương tác giữa các điện tích đang chuyển động với các điện tích đang chuyển động. Như vậy khiến B không thể tránh khỏi kết luận rằng có một điện trường trong vùng không gian này, trường đó hướng dọc theo trục *z*. Nói cách khác, cái A nhận thấy là trường **B** thuần túy, thì B nhìn thấy là hỗn hợp của **E** và **B.**

Nói chung, các nhà quan sát không đứng yên so với nhau sẽ nhìn thấy những hỗn hợp khác nhau của điện trường và từ trường.



m/ Nhà quan sát A thấy một hạt tích điện dương chuyển động qua vùng từ trường hướng từ dưới lên, chúng ta giả sử đó là trường đều, giữa các cực của hai nam châm. Lực thu được dọc theo trục *z* làm cho đường đi của hạt bị lệch về phía chúng ta.

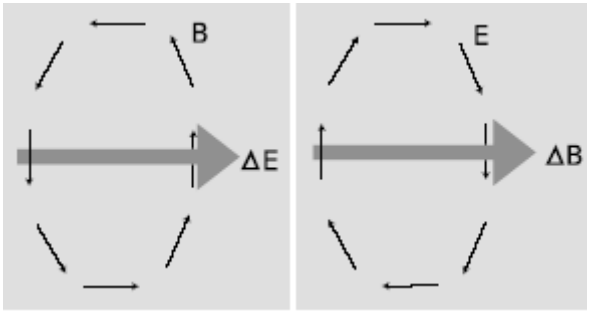
Nguyên lí cảm ứng

Cho đến đây, mọi thứ chúng ta làm không có vẻ gì thực sự có ích, vì dường như sẽ không có gì bất ngờ xảy ra khi chúng ta dựa vào một hệ quy chiếu, và không phải lo lắng về cái mà những người trong những hệ quy chiếu khác nghĩ tới. Tuy nhiên, đó chưa phải là toàn bộ câu chuyện, như đã được khám phá bằng thực nghiệm bởi Faraday vào năm 1831 và khảo sát bằng toán học do Maxwell thực hiện sau đó cũng trong thế kỉ 19. Chúng ta hãy phát biểu ý tưởng của Faraday trước, và sau đó nhìn xem làm thế nào cái gì đó giống như nó phải chắc chắn tuân theo nguyên lí chuyển động là tương đối:

nguyên lí cảm ứng

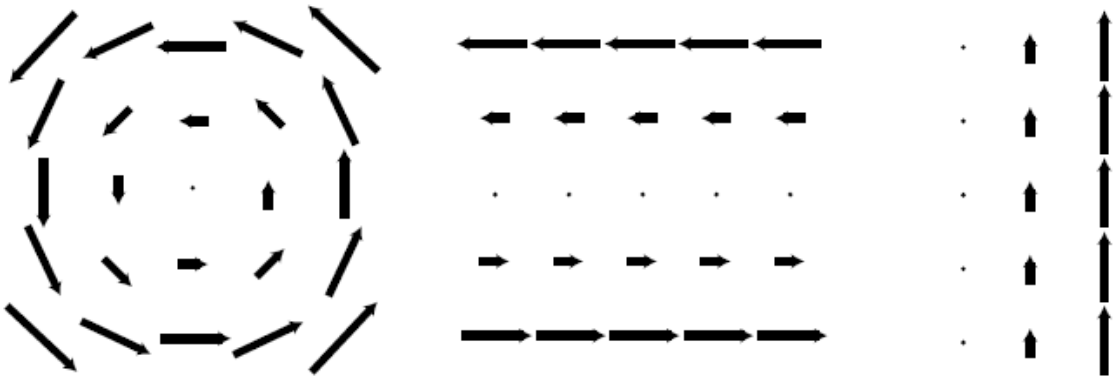
Bất kì một điện trường biến thiên theo thời gian sẽ tạo ra một từ trường trong không gian xung quanh nó.

Bất kì một từ trường biến thiên theo thời gian sẽ tạo ra một điện trường trong không gian xung quanh nó.

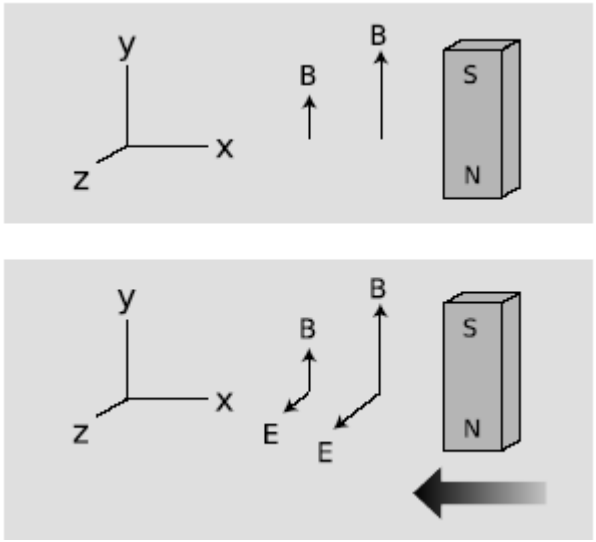


n/ Hình dạng của trường cảm ứng. Trường cảm ứng có xu hướng hình thành một hình ảnh xoáy theo sự biến thiên vectơ tạo ra nó. Lưu ý cách thức chúng quay tròn theo những hướng ngược nhau.

Trường cảm ứng có xu hướng có hình ảnh xoáy, như chỉ ra trong hình n, nhưng hình ảnh xoáy không nên quá hiểu theo nghĩa đen; nguyên lí cảm ứng thật ra chỉ yêu cầu một hình ảnh trường như thế này, nếu người ta xen một kim nam châm vào trong nó, kim nam châm đó sẽ quay tròn. Tất cả hình ảnh trường biểu diễn trên hình o đều là trường có thể tạo ra bằng sự cảm ứng; tất cả đều có "xoáy" ngược chiều kim đồng hồ đối với chúng.



o/ Ba trường xoáy ngược chiều kim đồng hồ



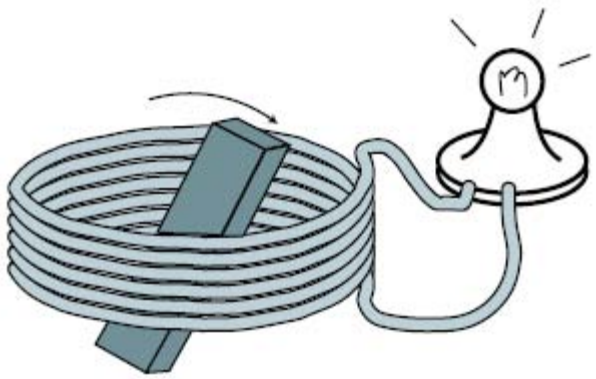
p/ 1. Nhà quan sát A đứng yên so với thanh nam châm, và thấy từ trường có cường độ khác nhau tại những khoảng cách khác nhau tính từ thanh nam châm. 2. Nhà quan sát B, ở trong vùng phía bên trái thanh nam châm, nhìn thấy nam châm đang chuyển động về phía cô ta, và phát hiện thấy từ trường trong vùng đó mạnh hơn khi thời gian trôi qua. Như trong hình 1, có một điện trường dọc theo trục z vì cô ta chuyển động so với thanh nam châm. Vectơ ΔB hướng lên trên, và điện trường có xoáy: một bánh guồng đưa vào trong điện trường này sẽ quay theo chiều kim đồng hồ khi nhìn từ trên xuống, vì xoáy theo chiều kim đồng hồ do điện trường mạnh ở phía bên phải sinh ra lớn hơn xoáy ngược chiều kim đồng hồ do điện trường yếu ở phía bên trái sinh ra.

Hình p cho thấy một ví dụ của nguyên nhân cơ bản vì sao một trường **B** biến thiên lại sinh ra một trường **E**. Điện trường sẽ không thể giải thích được với nhà quan sát B nếu như cô ta chỉ tin ở định luật Coulomb, và nghĩ rằng mọi điện trường đều phải do các điện tích gây ra. Tuy nhiên, nếu cô ta biết về nguyên lí cảm ứng, thì sự tồn tại của trường này là cần thiết.

Ví dụ 4. Máy phát điện

Một máy phát, q, gồm một nam châm vĩnh cửu quay bên trong một cuộn dây. Nam châm được điều khiển bằng một động cơ hoặc một cái quay tay (không chỉ ra trong hình). Khi nó quay, từ trường xung quanh sẽ biến thiên. Theo nguyên lí cảm ứng, từ trường biến thiên này sinh ra một điện trường xoáy. Điện trường này tạo ra một dòng điện chạy trong các cuộn dây, và chúng ta có thể sử dụng dòng điện này để thắp sáng bóng đèn điện.

♥ Khi bạn lái xe hơi thì động cơ xe liên tục nạp điện lại cho bình ăcquy bằng một dụng cụ gọi là máy dao điện, nó thật ra chỉ là một máy phát giống như cái mô tả ở trang trước, ngoại trừ ở chỗ cuộn dây quay còn nam châm vĩnh cửu thì cố định tại chỗ. Vậy tại sao bạn không thể sử dụng máy dao điện để khởi động động cơ xe nếu như bình ăcquay xe bạn bị hỏng ?

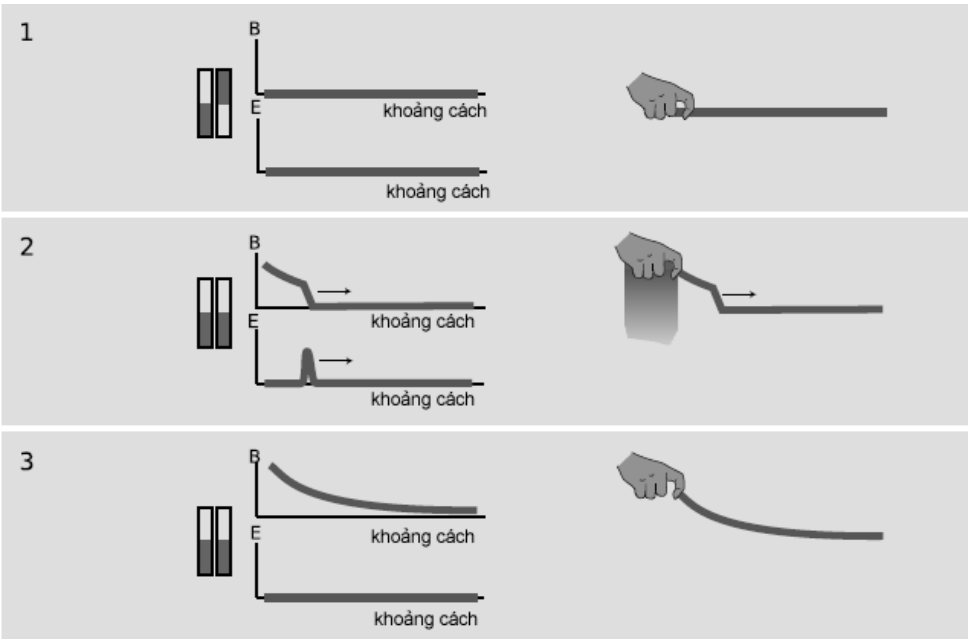


q/ Máy phát điện

Ví dụ 5. Máy biến thế

Trong phần 4.3, chúng ta đã nói về sự thuận lợi của công suất truyền tải trên đường dây điện bằng hiệu điện thế cao và dòng điện thấp. Tuy nhiên, chúng ta chẳng ai muốn các ổ cắm tường hoạt động ở 10 000 volt! Vì lí do này, công ti điện sử dụng một thiết bị gọi là máy biến thế, (g), để chuyển thành điện thế thấp hơn và dòng điện lớn hơn trong nhà bạn. Cuộn dây ở mạch vào tạo ra một từ trường. Máy biến thế làm việc với dòng điện biến thiên, nên từ trường xung quanh cuộn dây vào luôn luôn biến thiên. Từ trường này cảm ứng ra một điện trường, tạo ra dòng điện chạy trong cuộn dây ra.

Nếu cả hai cuộn dây là như nhau, thì sự sắp xếp là đối xứng, và công suất ra bằng với công suất vào, nhưng cuộn dây ra có số vòng dây ít hơn cho lực điện khoảng cách đẩy electron nhỏ hơn. Công cơ học trên đơn vị điện tích kém hơn có nghĩa là hiệu điện thế thấp hơn. Tuy nhiên, sự bảo toàn năng lượng bảo đảm rằng lượng công suất ở ngõ ra phải bằng với lượng công suất vào lúc ban đầu, $I_{vào}V_{vào} = I_{ra}V_{ra}$, nên hiệu điện thế giảm đi này phải đi cùng với dòng điện tăng lên.



r/ Ví dụ 6

Ví dụ 6. Sự tương tự điện – cơ

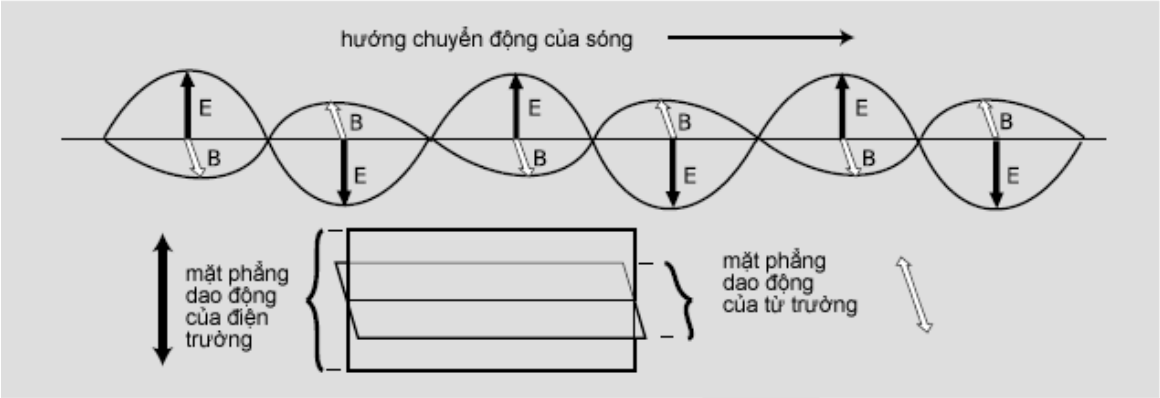
Hình r biểu diễn một ví dụ của sự cảm ứng (bên trái) với sự tương tự cơ học (bên phải). Hai thanh nam châm ban đầu định hướng ngược nhau, 1, và từ trường của chúng triệt tiêu nhau. Nếu một thanh nam châm đảo lật lại, 2, thì trường của chúng tăng cường nhau, nhưng sự thay đổi từ trường cần thời gian để lan truyền trong không gian. Cuối cùng, 3, từ trường sẽ trở thành cái mà bạn mong đợi từ lí thuyết tĩnh từ học. Trong sự tương tự cơ học, chuyển động đột ngột của bàn tay tạo ra một nút thắt hay xung sóng ở trong dây, xung đó truyền dọc theo dây, và cần có thời gian cho sợi dây ổn định trở lại. Một điện trường cũng được cảm ứng ra bởi từ trường biến thiên, mặc dù không hề có điện tích tổng thể nào ở đâu đó đóng vai trò nguồn phát sinh. (Những hình ảnh đơn giản hóa này không phải là biểu diễn chính xác của hình ảnh ba chiều hoàn chỉnh của điện trường và từ trường)

Câu hỏi thảo luận

Trong hình m và q, nhà quan sát B đang chuyển động sang phía bên phải. Điều gì sẽ xảy ra nếu cô ta di chuyển sang bên trái ?

6.4 Sóng điện từ

Hệ quả quan trọng nhất của sự cảm ứng là sự tồn tại của sóng điện từ. Trong khi sóng hấp dẫn sẽ gồm không gì hơn là một sự gợn lăn tăn của các trường hấp dẫn, thì nguyên lí cảm ứng cho chúng ta biết rằng có thể không thể có sóng điện thuần túy hay sóng từ thuần túy. Thay vì vậy, chúng ta có các sóng trong đó có cả điện trường và từ trường, giống như sóng sin biểu diễn trên hình bên dưới. Maxwell đã chứng minh rằng các sóng như thế là hệ quả của các phương trình của ông, và nhận được tính chất của chúng bằng toán học. Việc thiết lập nằm ngoài khuôn khổ toán học của cuốn sách này, nên chúng ta sẽ chỉ phát biểu các kết quả.



s/ Một sóng điện từ

Một sóng điện từ kiểu sin có dạng hình học biểu diễn trên hình s. Các trường **E** và **B** vuông góc với hướng chuyển động, và đồng thời vuông góc với nhau. Nếu bạn nhìn dọc theo hướng chuyển động của sóng, vectơ **B** luôn luôn lệch 90 độ theo chiều kim đồng hồ so với vectơ **E**. Độ lớn của hai trường liên hệ với nhau bởi phương trình $|\mathbf{E}| = c\,|\mathbf{B}|$.

Sóng điện từ được tạo ra như thế nào ? Nó có thể được phát ra, chẳng hạn, bởi một electron đang quay xung quanh một nguyên tử hoặc bởi các dòng điện chạy tới lui trong một ăntenn phát sóng. Nói chung, bất kì điện tích đang gia tốc nào cũng sẽ tạo ra một sóng điện từ, mặc dù chỉ có dòng điện biến thiên dạng sin theo thời gian mới tạo ra sóng dạng sin. Một khi phát sinh, sóng lan tỏa trong không gian mà không cần điện tích hay dòng điện để tiếp tục lan tỏa. Khi điện trường dao động tới lui, nó cảm ứng ra từ trường, và từ trường dao động lại tạo ra điện trường. Toàn bộ dạng sóng truyền trong không gian trống rỗng ở tốc độ c = 3 x 10^8 m/s, tốc độ này liên hệ với các hằng số k và μ_0 bởi công thức $c = \sqrt{4\pi k / \mu_0}$.

Sự phân cực

Hai sóng điện từ truyền cùng chiều nhau trong không gian có thể không giống nhau vì điện trường và từ trường của chúng có hướng khác nhau, một tính chất của sóng gọi là sự phân cực.

Ánh sáng là sóng điện từ

Một khi Maxwell nhận ra sự tồn tại của sóng điện từ, ông trở nên chắn chắn rằng chúng là cùng hiện tượng như ánh sáng. Cả hai đều là sóng ngang (tức là dao động vuông góc với hướng sóng chuyển động), và vận tốc là như nhau.

Heinrich Hertz (tên ông đặt cho đơn vị tần số) đã xác nhận ý tưởng của Maxwell bằng thực nghiệm. Hertz là người đầu tiên thành công trong việc tạo ra, phát hiện, và nghiên cứu sóng điện từ một cách chi tiết bằng ăntenn và mạch điện. Để tạo ra sóng, ông phải làm cho dòng điện dao động rất nhanh trong một mạch điện. Thật ra, thật sự không có chút hi vọng nào tạo ra dòng điện đảo chiều ở tần số 10^{15} Hz mà ánh sáng khả kiến có. Dao động điện nhanh nhất ông có thể tạo ra là 10^9 Hz, cho bước sóng khoảng 30 cm. Ông đã thành công trong việc chỉ ra rằng, giống hệt như ánh sáng, các sóng do ông tạo ra có thể phân cực, và có thể bị phản xạ và khúc xạ (tức là bị bẻ cong, ví dụ do thấu kính gây ra), và ông đã chế tạo được các dụng cụ ví dụ như gương parabol hoạt động theo cùng nguyên lí quang học như ánh sáng sử dụng. Kết quả của Hertz là bằng chứng thuyết phục rằng ánh sáng và sóng điện từ là một và giống nhau.

Phổ điện từ

Ngày nay, các sóng điện từ trong vùng mà Hertz sử dụng được gọi là sóng vô tuyến. Các nghi ngờ rằng "sóng Hertz", như khi đó nó được gọi, là cùng loại sóng như sóng ánh sáng nhanh chóng bị xua tan bởi các thí nghiệm trong toàn bộ ngưỡng tần số ở giữa, cũng như ở các tần số nằm ngoài phạm vi đó. Tương tự như phổ ánh sáng khả kiến, chúng ta nói về toàn bộ phổ điện từ, trong đó phổ khả kiến chỉ là một đoạn.

Thuật ngữ dành cho các phần khác nhau của phổ điện từ thật đáng để nhớ, và dễ học nhất bằng cách nhận ra mối quan hệ lôgic giữa bước sóng và tính chất của sóng mà bạn đã quen thuộc. Sóng vô tuyến có bước sóng có thể sánh với kích thước của các ăntenn vô tuyến, tức là từ hàng mét tới hàng chục mét.

t / Heinrich Hertz (1857-1894).

Vi sóng được gọi tên như thế vì chúng có bước sóng ngắn hơn nhiều so với sóng vô tuyến; khi thực phẩm nấu không đều trong lò vi sóng, khoảng cách nhỏ giữa các điểm nóng và lạnh bằng một nửa bước sóng của sóng dừng mà lò vi sóng tạo ra. Sóng hồng ngoại, khả kiến, và tử ngoại hiển nhiên có bước sóng ngắn hơn nhiều, vì nếu không thì bản chất sóng của ánh sáng sẽ rõ ràng trước con người như bản chất sóng của sóng đại dương. Để nhớ tia tử ngoại, tia X và tia gamma đều nằm ở phía bước sóng ngắn của ánh sáng khả kiến, hãy nhớ lại rằng cả ba sóng này đều có thể gây ra ung thư. (Như chúng ta sẽ thảo luận ở phần sau tập sách này, có một nguyên do cơ bản lí giải vì sao sự hỏng hóc gây ung thư của ADN chỉ có thể gây ra bởi những song điện từ bước song rất ngắn. Trái với niềm tin phổ biến, vi song không thể gây ra ung thư, đó là lí do vì sao chúng ta có lò vi song, chứ không phải lò tia X!).

Ví dụ 7. Tại sao bầu trời có màu xanh ?

Khi ánh sáng Mặt Trời đi vào bầu khí quyển tầng trên, một phân tử không khí nhất định tự bị gột sạch bởi một song điện từ có tần số f. Các hạt tích điện của phân tử đó (hạt nhân và electron) hoạt động giống như các dao động tử bị chi phối bởi một lực dao động, và phản ứng bằng cách dao động ở cùng tần số f. Năng lượng bị rút khỏi chùm ánh sang Mặt Trời tới và chuyển hóa thành động năng của các hạt dao động. Tuy nhiên, những hạt này đang gia tốc, nên chúng hoạt động giống như các ăntenn vô tuyến nhỏ và đưa năng lượng ra khỏi trở lại dưới dạng sóng ánh sang cầu trải ra theo mọi hướng. Một vật đang dao động ở tần số f có gia tốc tỉ lệ với f^2, và một hạt tích điện đang gia tốc tạo ra một sóng điện từ có các trường vuông góc với gia tốc của nó, nên trường của sóng cầu tái phát xạ tỉ lệ với f^2. Năng lượng của một trường tỉ lệ với bình phương cường độ trường, nên năng lượng của sóng tái phát xạ tỉ lệ với f^4. Vì ánh sáng xanh có tần số gấp khoảng 2 lần ánh sáng đỏ, nên quá trình này diễn ra với ánh sáng xanh mạnh gấp $2^4 = 16$ lần so với ánh sáng đỏ, và đó là lí do vì sao bầu trời có màu xanh.

6.5 Năng lượng của trường

Chúng ta đã thấy rằng năng lượng dự trữ trong một sóng (thật ra là mật độ năng lượng) thường tỉ lệ với bình phương biên độ của sóng. Các trường lực có thể gây ra các kiểu sóng mà chúng ta có thể trông đợi điều tương tự là đúng. Điều này hóa ra không chỉ đúng đối với các kiểu trường dạng sóng mà còn đúng cho mọi trường:

Năng lượng dự trữ trong trường hấp dẫn trên mỗi $m^3 = -\frac{1}{8\pi G}|\mathbf{g}|^2$

Năng lượng dự trữ trong điện trường trên mỗi $m^3 = \frac{1}{8\pi k}|\mathbf{E}|^2$

Năng lượng dự trữ trong từ trường trên mỗi $m^3 = \frac{1}{2\mu_0}|\mathbf{B}|^2$

Mặc dù thừa số 8π ngổ ngộ và các dấu cộng và trừ có lẽ ban đầu đập vào mắt bạn, nhưng chúng không phải là điểm chủ chốt. Ý tưởng quan trọng là ở chỗ mật độ năng lượng tỉ lệ với bình phương cường độ trường trong cả ba trường hợp này. Trước tiên, chúng ta cho một thí dụ đơn giản bằng số và tìm hiểu một chút về các khái niệm, rồi sau đó sẽ chuyển sự chú ý của chúng ta sang thừa số nằm phía trước.

Ví dụ 8. Năng lượng trữ trong solenoid

Solenoid là những dụng cụ điện rất thông dụng, nhưng chúng có thể gây nguy hiểm cho những ai làm việc với chúng. Hãy tưởng tượng một solenoid ban đầu có dòng DC chạy qua nó. Dòng điện tạo ra từ trường bên trong và xung quanh nó, từ trường đó chứa năng lượng. Bây giờ giả sử chúng ta phá vỡ mạch điện. Vì không còn là một mạch điện hoàn chỉnh nữa, nên dòng điện sẽ nhanh chóng ngừng chạy, và từ trường sẽ co lại rất nhanh. Từ trường có năng lượng dự trữ trong nó, và chỉ cần một lượng nhỏ năng lượng cũng có thể tạo ra một đợt sóng nguồn nguy hiểm nếu nó được giải phóng trong một khoảng thời gian đủ ngắn. Hãy thận trọng không nên đùa nghịch với solenoid có dòng điện chạy qua nó, vì việc phá vỡ mạch điện có thể gây nguy hại cho sức khỏe của bạn.

Lấy ước tính điển hình bằng số, hãy giả sử một solenoid 40 cm x 40 cm x 40 cm có từ trường bên trong là 1,0 T (từ trường khá mạnh). Nhằm mục tiêu ước tính sơ bộ, chúng ta bỏ qua từ trường bên ngoài, chúng thật yếu, và cho rằng solenoid có hình khối. Năng lượng dự trữ trong từ trường là

$$\text{(năng lượng trên đơn vị thể tích) (thể tích)} = \frac{1}{2\mu_0}|\mathbf{B}|^2 V$$

$$= 3 \times 10^4 \text{ J}$$

Đó là năng lượng lớn!

Trong chương 5, khi chúng ta nói về nguyên nhân ban đầu dẫn đến khái niệm trường lực, động cơ hàng đầu là nếu không thì không có cách nào giải thích cho sự truyền năng lượng có liên quan khi lực bị trễ bởi khoảng cách ở giữa. Chúng ta thường xem năng lượng của vũ trụ bao gồm

động năng

+ thế năng hấp dẫn dựa trên khoảng cách giữa các vật tương tác hấp dẫn

+ thế năng điện dựa trên khoảng cách giữa các vật tương tác điện

+ thế năng từ dựa trên khoảng cách giữa các vật tương tác từ

Nhưng trong những trường hợp không tĩnh, chúng ta phải sử dụng một phương pháp khác:

Động năng

+ thế năng hấp dẫn dự trữ trong trường hấp dẫn

+ thế năng điện dự trữ trong điện trường

+ thế năng từ dự trữ trong từ trường

Thật ngạc nhiên, phương pháp mới lại cho cùng đáp án như cho các trường hợp trường tĩnh.

Ví dụ 9. Năng lượng dự trữ trong tụ điện

Hai bản kim loại song song nhau, nhìn từ mặt bên trong hình u, có thể dùng để dự trữ năng lượng điện bằng cách tích điện dương ở bản này và tích điện âm ở bản kia. Một dụng cụ như thế được gọi là tụ điện (Chúng ta đã gặp một sự sắp xếp như thế trước đây, nhưng mục tiêu của nó là làm lệch chùm electron, chứ không phải dự trữ năng lượng).

Theo phương pháp cũ mô tả thế năng, 1, chúng ta nghĩ dưới dạng công cơ học phải thực hiện nhằm tách các điện tích âm và điện tích dương trên hai bản, công chống lại lực hút điện của chúng. Cách mô tả mới, 2, gán sự dự trữ năng lượng cho điện trường mới sinh ra chiếm giữ thể tích giữa hai bản. Vì đây là trường tĩnh, nên cả hai phương pháp cho đáp án như nhau và chính xác.

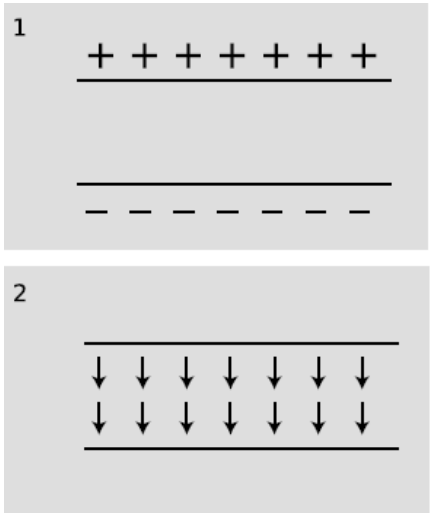
Ví dụ 10. Thế năng của cặp điện tích trái dấu

Tưởng tượng có hai điện tích trái dấu, v, ban đầu cách xa nhau và cho phép chúng tiến lại gần nhau dưới tác dụng của lực hút điện của chúng.

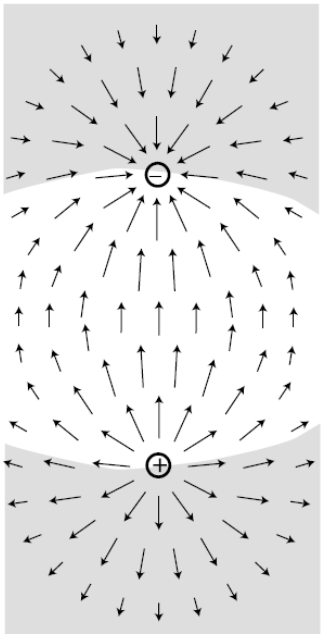
Theo phương pháp cũ, thế năng bị mất đi vì lực điện thực hiện công dương khi nó mang các điện tích lại gần nhau. (Điều này dễ hiểu, vì khi chúng tiến lại gần nhau và gia tốc, thế năng của chúng bị mất đi và chuyển hóa thành động năng).

Theo phương pháp mới, chúng ta cần phải biết năng lượng được dự trữ như thế nào trong điện trường đã thay đổi. Trong vùng đánh dấu phỏng chừng bằng cách tô sậm trên hình, các trường chồng chất của hai điện tích chịu sự triệt tiêu một phần vì chúng ngược chiều nhau. Năng lượng trong vùng tô sậm giảm đi do hiệu ứng này. Trong vùng không tô sậm, các trường tăng cường nhau, và năng lượng tăng lên.

Thật khí tiến hành tính toán bằng số thực sự năng lượng thu được và mất đi trong hai vùng (đây là trường hợp phương pháp cũ tìm năng lượng cho sự thoải mái ước tính hơn), nhưng thật dễ dàng thuyết phục một ai đó rằng năng lượng nhỏ hơn khi các điện tích ở gần nhau hơn. Đấy là vì mang các điện tích lại gần nhau làm co bớt vùng năng lượng cao không tô sậm và mở rộng vùng năng lượng thấp tô sậm.



u/ Ví dụ 9



v/ Ví dụ 10

Ví dụ 11. Năng lượng trong sóng điện từ

Phương pháp cũ sẽ cho năng lượng bằng không trong vùng không gian chứa sóng điện từ mà không có điện tích. Điều đó sai ! Chúng ta chỉ có thể sử dụng phương pháp cũ trong các trường hợp trường tĩnh.

Bây giờ, hãy cho ít nhất là một số chứng minh cho những đặc điểm khác của ba biểu thức mật độ năng lượng, $-\frac{1}{8\pi G}|\mathbf{g}|^2$, $\frac{1}{8\pi k}|\mathbf{E}^2|$, và $\frac{1}{2\mu_0}|\mathbf{B}|^2$, ngoài việc tỉ lệ với bình phương của cường độ trường.

Trước tiên, tại sao lại có các dấu cộng và trừ khác nhau ? Ý tưởng cơ bản là các dấu phải ngược nhau trong trường hợp hấp dẫn và điện vì có lực hút giữa hai khối lượng dương (đó là loại duy nhất tồn tại), nhưng hai điện tích dương sẽ đẩy nhau. Vì chúng ta đã thấy ví dụ trong đó dấu dương ở năng lượng điện làm cho có ý nghĩa, nên phương trình năng lượng hấp dẫn phải là phương trình có dấu trừ.

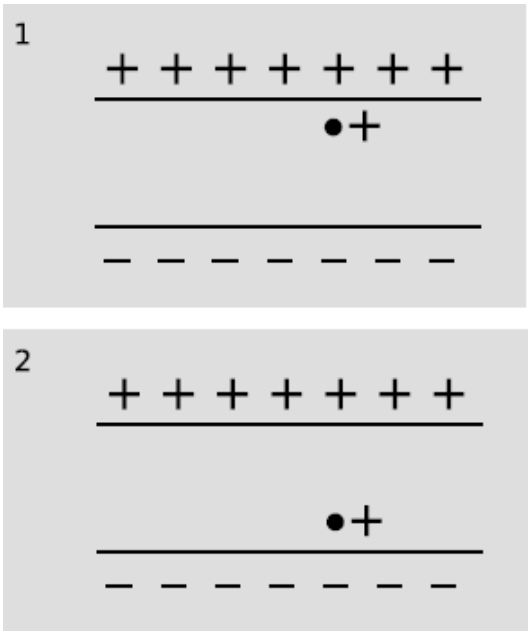
Cũng trông thật lạ các hằng số *G*, *k*, và μ_0 ở mẫu thức. Chúng cho chúng ta biết mức độ mạnh của ba lực khác nhau, nhưng sao chúng không nằm trên tử ? Không thể. Hãy xét, chẳng hạn, một vũ trụ khác trong đó lực hấp dẫn mạnh gấp đôi trong vũ trụ của chúng ta. Giá trị số của *G* tăng gấp đôi. Vì G tăng gấp đôi nên mọi cường độ trường hấp dẫn cũng sẽ tăng gấp đôi, làm gấp bốn lần tử số. Trong biểu thức $-\frac{1}{8\pi G}|\mathbf{g}|^2$, chúng ta có tử tăng gấp bốn và mẫu tăng gấp đôi, nên năng lượng lớn gấp đôi. Điều đó mang lại ý nghĩa hoàn hảo.

Câu hỏi thảo luận

A. Hình bên cho thấy một điện tích dương nằm trong khe giữa hai bản tụ điện. Trước tiên, hãy vẽ kiểu dạng trường hình thành bởi chính tụ điện, không tính đến điện tích nằm ở giữa. Sau đó, hãy chỉ xem kiểu trường thay đổi như thế nào khi bạn thêm vào một hạt tại hai vị trí này. So sánh năng lượng của điện trường trong hai trường hợp. Giá trị này có phù hợp với cái mà bạn trông đợi trên cơ sở kiến thức của bạn về lực điện hay không ?

B. Bình luận câu phát biểu sau: "Một solenoid tạo ra một điện tích trong không gian xung quanh nó, điện tích đó tiêu tan mất khi bạn giải phóng năng lượng".

C. Trong ví dụ ở trang trước, tôi đã biện luận rằng trường xung quanh một điện tích dương và âm chứa ít năng lượng hơn khi các điện tích ở gần nhau hơn. Có lẽ phương pháp đơn giản hơn là xét hai khả năng thái cực: trường hợp các điện tích cách xa nhau vô hạn, và trường hợp chúng cách nhau khoảng cách bằng không, tức là điện tích này chồng lên điện tích kia. Hãy thực hiện cách lí giải này cho trường hợp (1) một điện tích dương và một điện tích âm có độ lớn bằng nhau, (2) hai điện tích dương có độ lớn bằng nhau, (3) năng lượng hấp dẫn của hai khối lượng bằng nhau.



w/ Câu hỏi thảo luận A

6.6 Sự đối xứng và khuynh hướng thuận một bên

Nhà vật lí Richard Feynman đã giúp gắn chặt tôi vào vật lí học với một mẫu chuyện giáo dục chứa nghi vấn sau. Tưởng tượng bạn thiết lập được một tiếp xúc vô tuyến với một người thông minh trên một hành tinh khác. Cả bạn lẫn người đó đều không biết hành tinh của người kia là gì và bạn không thể nào thiết lập một mốc giới nào để cả hai cùng nhận ra. Bạn xoay xở học được chút ít ngôn ngữ của người kia, nhưng bạn bối rối khi bạn cố thiết lập định nghĩa bên phải và bên trái (hay, tương đương, thuận và ngược chiều kim đồng hồ). Liệu có cách nào thực hiện điều đó không ?

Nếu có cách nào thực hiện điều đó mà không tham chiếu đến một mốc giới bên ngoài, thì nó sẽ ngụ ý rằng chính các định luật vật lí là không đối xứng, một điều thật là lạ. Tại sao chúng phải phân biệt bên trái với bên phải ? Dạng trường hấp dẫn xung quanh một ngôi sao hay hành tinh trông giống hệt khi nhìn trong một cái gương, và đối với các điện trường cũng tương tự như vậy. Tuy nhiên, kiểu trường biểu diễn trong hình 6.2 dường như vi phạm nguyên lí này, nhưng có thật sự như vậy không ? Bạn có thể sử dụng những kiểu trường này để giải thích thế nào là bên trái và bên phải với con người thông minh kia không ? Nếu bạn xem lại định nghĩa điện trường trong phần 6.1, nó cũng chứa một sự dính líu tới tính thuận một bên: hướng ngược chiều kim đồng hồ của dòng điện vòng khi nhìn dọc theo từ trường. Những người thông minh kia có thể đảo ngược định nghĩa của họ về từ trường, trong trường hợp đó hình vẽ kiểu dạng trường của họ trông giống như ảnh qua gương của kiểu dạng trường của chúng ta.

Mãi cho đến giữa thế kỉ 20, các nhà vật lí vẫn giả định rằng bất kì tập hợp hợp lí nào của các định luật vật lí đều phải có loại đối xứng này giữa bên trái và bên phải. Một sự không đối xứng sẽ là kì cục. Bất kể cảm giác thẩm mĩ của họ như thế nào, họ phải thay đổi quan điểm của mình về thực tại khi các thí nghiệm cho thấy lực hạt nhân yếu (phần 6.5) vi phạm đối xứng trái-phải! Thật vẫn là một bí ẩn tại sao sự đối xứng trái-phải được quan sát thấy nói chung quá tỉ mỉ, nhưng lại bị vi phạm bởi một loại quá trình vật lí đặc biệt.

Tóm tắt

Từ khóa chọn lọc

từ trường ……..	một trường lực, được định nghĩa dưới dạng mômen quay tác dụng lên một lưỡng cực thử
lưỡng cực từ ……	một vật, ví dụ như một vòng dây điện, một nguyên tử, hay một thanh nam châm, chịu mômen quay do lực từ gây ra; độ lớn của lưỡng cực từ được đo bằng cách so sánh với một lưỡng cực chuẩn gồm một vòng dây dẫn vuông có kích thước cho trước và mang một dòng điện cho trước
sự cảm ứng ……..	sự sản sinh điện trường do từ trường biến thiên, hoặc ngược lại

Kí hiệu

B ..... từ trường

D_m ..... mômen lưỡng cực từ

Tóm tắt

Từ tính là tương tác của các điện tích đang chuyển động với những điện tích đang chuyển động khác. Từ trường được định nghĩa theo mômen quay tác dụng lên một lưỡng cực từ thử. Nó không có nguồn phát tỏa ra hay thu vào; hình dạng từ trường không bao giờ hội tụ vào hay phân kì từ một điểm.

Từ trường và điện trường có liên hệ mật thiết với nhau. Nguyên lí cảm ứng phát biểu rằng bất kì điện trường biến thiên nào đều tạo ra một từ trường trong không gian xung

quanh, và ngược lại. Những trường cảm ứng này có xu hướng hình thành nên hình ảnh xoáy.

Hệ quả quan trọng nhất của nguyên lí cảm ứng là không có sóng từ thuần túy hay sóng điện thuần túy. Sự nhiễu loạn trong điện trường và từ trường truyền ra xa bên ngoài dưới dạng sóng điện và từ kết hợp, với mối quan hệ rõ ràng giữa biên độ và hướng của chúng. Những sóng điện từ này là cái cấu thành nên ánh sáng, nhưng những dạng sóng điện từ khác tồn tại ngoài vùng ánh sáng khả kiến, bao gồm sóng vô tuyến, tia X và tia gamma.

Các trường lực mang năng lượng. Mật độ năng lượng tỉ lệ với bình phương độ lớn của trường. Trong trường hợp trường tĩnh, chúng ta có thể tính thế năng hoặc bằng định nghĩa trước đây theo công cơ học, hoặc bằng cách tính năng lượng dự trữ trong trường. Nếu trường là không tĩnh, thì phương pháp cũ cho kết quả không chính xác và phải sử dụng phương pháp mới.

Bài tập

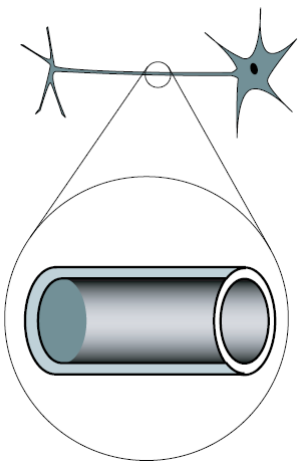
1. Trong cơn bão điện, đám mây và mặt đất tác dụng giống như một tụ điện bản song song, thường tích điện thêm do ma sát điện trong sự va chạm của các hạt băng trong bầu khí quyển lạnh tầng trên. Sét xuất hiện khi độ lớn của điện trường đạt tới giá trị tới hạn, E_C, ở giá trị đó không khí bị ion hóa.

(a) Xem đám mây như một hình vuông phẳng có chiều dài các cạnh là L. Nếu ở tại chiều cao h so với mặt đất, hãy tìm năng lượng giải phóng trong cú sét.

(b) Dựa trên câu trả lời từ phần a, hỏi trường hợp nào nguy hiểm hơn, cú sét từ một đám mây cao hay cú sét từ một đám mây thấp ?

(c) Hãy ước tính bậc độ lớn của năng lượng giải phóng bởi một cú sét tiêu biểu, lấy giả thiết những giá trị hợp lí cho kích thước của nó và độ cao. E_c vào khoảng 10^6 V/m.

Xem thêm bài tập 21 để biết nghiên cứu hiện nay ảnh hưởng như thế nào đến giá trị ước tính này.



2. Neuron trong hình bên vẽ hơi ngắn, nhưng một số neuron trong dây sống của bạn có các đuôi (axon) dài tới một mét. Mặt bên trong và bên ngoài của màng tế bào đóng vai trò như các "bản" của một tụ điện. (Thực tế thì nó cuộn lại thành thành một hình trụ có tác động rất ít) Để thực hiện chức năng, neuron phải tạo ra hiệu điện thế V giữa mặt bên trong và mặt bên ngoài của màng. Đặt chiều dày, bán kính và chiều dài của màng là t, r, và L.

(a) Hãy tính năng lượng phải dự trữ trong điện trường cho neuron thực hiện nhiệm vụ của nó (Trong sự sống thực, màng cấu thành từ một chất gọi là điện môi có tính chất điện làm tăng lượng năng lượng phải dự trữ. Nhằm mục tiêu phân tích này, hãy bỏ qua thực tế này) [Gợi ý: Thể tích của màng về cơ bản là như nhau cho dù nó cuộn lại hay trải căng ra]

(b) Sự thích nghi tiến hóa của sinh vật sẽ tốt hơn nếu như nó cần ít năng lượng hơn để điều hành hệ thần kinh của mình. Dựa trên câu trả lời của bạn cho phần a, bạn sẽ mong đợi sự tiến hóa thực hiện điều gì đối với các kích thước t và r ? Những sự ràng buộc nào khác sẽ giữ cho sự tiến hóa này không đi quá xa ?

3. Xét hai solenoid, một cái nhỏ hơn sao cho nó có thể đặt bên trong cái kia. Giả sử chúng đủ dài sao cho mỗi cái chỉ góp phần đáng kể cho trường bên trong của chính nó, và trường bên trong gần như là đều. Xét cấu hình trong đó solenoid nhỏ nằm trong solenoid lớn có dòng điện chạy cùng chiều nhau, và cấu hình thứ hai trong đó hai dòng điện chạy ngược chiều nhau. So sánh năng lượng của hai cấu hình này với năng lượng khi hai solenoid cách xa nhau. Dựa trên sự lí giải này, thì cấu hình nào là bền, và cấu hình nào thì solenoid nhỏ có xu hướng xoắn quanh hay xuyên ra ngoài ? [Gợi ý: Một hệ bền thì có năng lượng thấp; năng lượng sẽ phải cấp thêm để làm thay đổi cấu hình của nó]

4. Hình bên cho thấy một cặp vòng dây tròn hình tổ chim được sử dụng để tạo ra từ trường. (Sự bện xoắn các sợi dây chì là một thủ thuật nhằm làm giảm từ trường mà chúng góp vào, nên trường rất gần với cái chúng ta chờ đợi cho một vòng điện tròn lí tưởng) Hệ tọa độ chọn sẵn bên dưới nhằm dễ nói về các hướng trong không gian hơn. Một vòng dây nằm trong mặt phẳng $y - z$, còn vòng kia nằm trong mặt phẳng $x - y$. Mỗi vòng dây có bán kính 1,0 cm và mang dòng điện 1,0 A chạy theo chiều mũi tên.

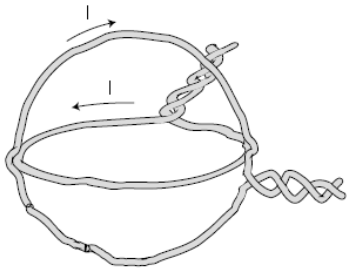
(a) Sử dụng phương trình trong phần tự chọn 6.2, hãy tính từ trường do *mỗi* vòng dây như thế gây ra tại tâm của nó.

(b) Mô tả hướng của từ trường được tạo ra, tại tâm của nó, chỉ bởi vòng dây nằm trong mặt phẳng $x - y$.

(c) Tính tương tự cho vòng dây kia.

(d) Tính độ lớn của từ trường tạo ra bởi cả hai vòng dây tại tâm chung của chúng. Mô tả hướng của nó.

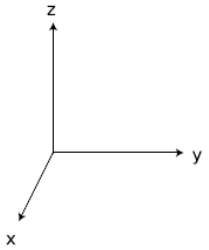
5. (a) Hãy chỉ ra rằng đại lượng $\sqrt{4\pi k / \mu_0}$ có đơn vị của vận tốc.



(b) Hãy tính bằng số và chỉ ra rằng nó bằng với vận tốc ánh sáng.

(c) Chứng minh rằng trong một sóng điện từ, phân nửa năng lượng nằm ở điện trường và phân nửa năng lượng nằm ở từ trường.

6. Một mô hình của nguyên tử hydrogen có electron quay tròn xung quanh proton ở tốc độ 2,2 x 10^6 m/s, trong một quỹ đạo có bán kính 0,05 nm. (Mặc dù electron và proton thật ra quay xung quanh khối tâm chung của chúng, nhưng khối tâm đó rất gần với proton, vì nó nặng hơn đến 2000 lần. Trong bài toán này, giả sử proton đứng yên) Trong bài tập ở phần trước, bạn đã tính dòng điện được tạo ra.



(a) Bây giờ hãy ước tính từ trường do electron gây ra tại tâm của nguyên tử. Chúng ta xem electron đang quay tròn là vòng điện, mặc dù nó chỉ là một hạt thôi.

(b) Hỏi proton có chịu một lực khác không do từ trường của electron hay không ? Hãy giải thích.

(c) Electron có chịu một từ trường từ phía proton hay không ? Hãy giải thích.

(d) Electron có chịu một từ trường do dòng điện của chính nó gây ra hay không ? Giải thích.

(e) Có lực điện tác dụng giữa electron và proton hay không ? Nếu có, hãy tính nó.

(f) Có lực hấp dẫn tác dụng giữa electron và proton hay không ? Nếu có, hãy tính nó.

(g) Một lực hướng vào trong là cần thiết để giữ electron trên quỹ đạo của nó – nếu không nó sẽ tuân theo định luật I Newton và đi thẳng, rời khỏi nguyên tử. Dựa trên câu trả lời của bạn cho những phần trước, lực hay những lực nào (điện, từ, và hấp dẫn) góp phần đáng kể cho lực hướng vào trong này ?

7. [Bạn cần đọc phần tự chọn 6.2 để làm bài tập này] Giả sử một hạt tích điện đang chuyển động qua một vùng không gian trong đó có một điện trường vuông góc với vectơ vận tốc của nó, và đồng thời có một từ trường vuông góc với cả vectơ vận tốc của hạt và điện trường. Hãy chỉ ra rằng sẽ có một vận tốc nhất định mà hạt có thể chuyển động do tổng hợp lực tác dụng lên nó bằng không. Liên hệ vận tốc này với độ lớn của điện trường và từ trường. (Một sự sắp xếp như thế, gọi là bộ lọc vận tốc, là một cách xác định vận tốc của một hạt chưa biết)

8. Nếu bạn tăng dòng điện chạy qua một solenoid lên bốn lần thì năng lượng dự trữ trong từ trường của nó tăng lên bao nhiêu lần ?

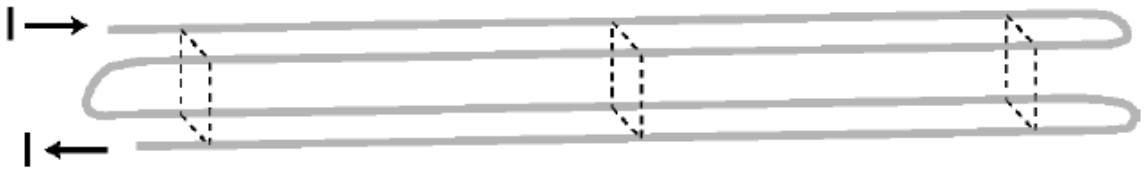
9. Giả sử chúng ta có một nam châm vĩnh cửu có hình dạng phức tạp, không đối xứng. Hãy mô tả một loạt phép đo với một la bàn từ có thể sử dụng để sử dụng cường độ và hướng của từ trường của nó tại một điểm nào đó. Giả sử bạn chỉ có thể nhìn thấy hướng mà kim la bàn nằm ổn định; bạn không thể đo mômen quay tác dụng lên nó.

10. Xét hai solenoid, một cái nhỏ hơn sao cho nó có thể đặt bên trong cái kia. Giả sử chúng đủ dài sao cho mỗi cái chỉ góp phần đáng kể cho trường bên trong của chính nó, và trường bên trong gần như là đều. Xét cấu hình trong đó solenoid một phần nằm bên trong và một phần nằm bên ngoài solenoid lớn, với dòng điện của chúng chạy cùng chiều nhau. Trục của chúng trùng với nhau.

(a) Tìm thế năng từ là hàm của chiều dài x của phần solenoid nhỏ nằm bên trong cái lớn (Phương trình của bạn sẽ chứa các biến có liên quan khác mô tả hai selonoid).

(b) Dựa trên câu trả lời của bạn cho phần (a), tìm lực tác dụng giữa hai solenoid.

11. Bốn dây dẫn được sắp xếp, như hình vẽ, sao cho tiết diện ngang của chúng hình thành nên một hình vuông, với mối nối ở các đầu sao cho dòng điện chạy qua cả bốn dây trước khi đi ra.



Chú ý rằng dòng điện chạy sang bên phải trong hai dây phía sau, nhưng chạy sang bên trái trong hai dây phía trước. Nếu kích thước của hình vuông tiết diện (chiều cao và chiều trước-sau) là b, hãy xác định từ trường (độ lớn và hướng) theo trục dài ở chính giữa.

12. Để làm bài toán này, bạn cần phải biết tính tích phân khối trong hệ tọa độ trụ và hệ tọa độ cầu. (a) Hãy chỉ ra rằng nếu như bạn cố lấy tích phân năng lượng dự trữ trong từ trường của một dây dẫn thẳng, dài, thì năng lượng thu được trên đơn vị chiều dài sẽ phân kì cả khi $r \to 0$ và $r \to \infty$. Nhận giá trị này, ngụ ý một quá trình thực nhất định, sự khởi đầu của dòng điện trong dây, sẽ không thể, vì nó đòi hỏi thay đổi từ trạng thái năng lượng từ bằng không đến trạng thái năng lượng từ vô hạn. (b) Giải thích tại sao các vô hạn tại $r \to 0$ và $r \to \infty$ không thật sự xảy ra trong một tình huống thực. (c) Hãy chỉ ra rằng năng lượng điện của một điện tích điểm phân kì tại $r \to 0$, nhưng không xảy ra tại $r \to \infty$.

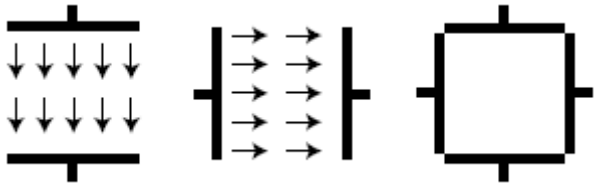
Nhận xét về câu c: Tự nhiên thật sự dường như cung cấp cho chúng ta các hạt tích điện và giống như chất điểm, ví dụ như electron, nhưng người ta có thể cãi nhau rằng năng lượng vô hạn không thật sự là một vấn đề gì, vì electron chuyển động tròn và không thực hiện điều gì làm nhận thêm hay mất bớt năng lượng vô hạn; chỉ có sự thay đổi vô hạn thế năng mới là phiền toái thực sự. Tuy nhiên, có những quá trình thực tạo ra và phân hủy các hạt tích điện giống như chất điểm, ví dụ như sự phân hủy của một electron với một phản electron phát ra hai tia gamma. Thật ra, các nhà vật lí đã vật lộn với các vô hạn như thế này kể từ khoảng năm 1950, và vấn đề đó còn lâu mới được giải quyết. Một số nhà lí thuyết đề xuất rằng các hạt hình như giống như chất điểm thực sự không giống như chất điểm: nhìn gần thì một electron có thể giống như một vòng dây tròn nhỏ.

13. Mục tiêu của bài tập này là tìm lực chịu bởi một dây dẫn thẳng, mang dòng điện chạy vuông góc với một từ trường đều. (a) Gọi A là tiết diện của dây, n là số hạt mang điện tự do trên đơn vị thể tích, q là điện tích trên mỗi hạt, và v là vận tốc trung bình của các hạt. Hãy chỉ ra rằng dòng điện $I = Avnq$. (b) Chứng minh rằng lực từ tác dụng lên mỗi đơn vị chiều dài là $AvnqB$. (c) Kết hợp những kết quả này, chứng minh rằng lực tác dụng lên dây trên mỗi đơn vị chiều dài bằng IB.

14. Giả sử hai dây dẫn dài, song song mang dòng điện I_1 và I_2. Hai dòng điện có thể cùng hướng hoặc ngược hướng nhau. (a) Sử dụng thông tin từ phần 6.2, hãy xác định dưới những điều kiện nào thì lực là lực hút, và dưới những điều kiện nào nó là lực đẩy. Lưu ý do những khó khăn đã khảo sát trong bài tập 12, có thể bạn sẽ tự làm khó mình nếu bạn sử dụng phương pháp năng lượng của phần 6.5. (b) Bắt đầu từ kết quả của bài tập 13, hãy tính lực trên đơn vị chiều dài.

$$F / L = \mu_0 I_1 I_2 / 2\pi r$$

15. Hình bên dưới biểu diễn hình nhìn ngang của hai tụ điện hình lập phương, và hình nhìn ngang của cũng hai tụ điện đó đặt lại với nhau sao cho phần bên trong của chúng trùng nhau. Tụ điện có các bản nằm gần nhau có một điện trường gần như đều giữa các bản, và trường hầu như bằng không ở phía ngoài; hai tụ này không có các bản của chúng nằm quá gần nhau so với kích thước của các bản, nhưng với mục tiêu của bài toán này, giả sử chúng vẫn có loại trường lí tưởng hóa như biểu diễn trong hình. Mỗi tụ điện có thể tích bên trong 1,00 m^3 và tích điện lên đến điểm mà trường bên trong của nó là 1,00 V/m. (a) Hãy tính năng lượng dự trữ trong mỗi tụ điện khi hai tụ độc lập với nhau. (b) Tính độ lớn của điện trường bên trong khi hai tụ được đặt chung với nhau theo kiểu như trong hình. Bỏ qua các ảnh hưởng phát sinh do sự phân bố lại điện tích của mỗi tụ dưới tác dụng của tụ kia. (c) Tính năng lượng của cấu hình hai tụ đặt chung. Việc lắp ghép chúng như thế này làm giải phóng năng lượng, tiêu thụ năng lượng, hay là chẳng ảnh hưởng gì ?



16. Phần 6.2 phát biểu quy luật như sau:

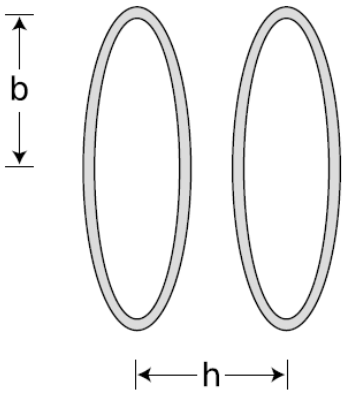
Đối với một hạt tích điện dương, vectơ F có hướng sao cho nếu bạn nhìn theo nó vectơ B nằm về phía chiều quay kim đồng hồ của vectơ v.

Hãy lập mô hình ba chiều của ba vectơ bằng bút chì hay các mẫu giấy cuộn biểu diễn các vectơ ghép đuôi của chúng lại với nhau. Bây giờ hãy ghi lại từng phương pháp

khả dĩ trong đó quy luật có thể được viết lại bằng cách xáo trộn ba kí hiệu *F*, *B*, và *v*. Hãy xét mô hình của bạn, mô hình nào chính xác và mô hình nào không chính xác ?

17. Chứng minh rằng bất kì hai vòng dây dẫn phẳng nào có cùng giá trị *IA* sẽ chịu cùng một mômen quay trong một từ trường, bất chấp hình dạng của chúng. Nói cách khác, mômen lưỡng cực của một vòng dây điện có thể định nghĩa là *IA*, cho dù hình dạng của nó không phải là hình vuông.

18. Cuộn Helmholtz được định nghĩa là một cặp cuộn dây tròn giống hệt nhau cách nhau một khoảng cách *h* bằng với bán kính của chúng, *b*. (Mỗi cuộn dây có thể có nhiều hơn một dây) Dòng điện chạy theo vòng tròn theo cùng hướng trong mỗi cuộn, nên các trường có xu hướng củng cố lẫn nhau trong vùng bên trong. Cấu hình có thuận lợi là khá mở, nên thiết bị khác có thể dễ dàng đặt bên trong và làm biến đổi trường trong khi vẫn nhìn thấy từ bên ngoài. Việc chọn lựa $h = b$ mang lại trường khả dĩ đều nhất gần chính giữa. (a) Tìm phần trăm độ giảm trường tại tâm của một cuộn dây, so với cường độ toàn vẹn tại tâm của toàn bộ thiết bị. (b) Giá trị nào của *h* (không bằng với *b*) sẽ làm cho độ chênh lệch phần trăm này bằng không ?



19. (a) Trong hình thiết bị ống chân không ở phần 6.2, hãy suy ra hướng của từ trường từ chuyển động của chùm electron. (b) Dựa trên câu trả lời của bạn cho phần a, hãy tìm chiều của dòng điện trong cuộn dây. (c) Các electron bên trong cuộn dây đi theo chiều nào ? (d) Dòng điện trong cuộn dây đang đẩy hay hút dòng điện tạo bởi chùm tia bên trong ống ? So sánh với câu a của bài 14.

20. Trong hình thiết bị ống chân không ở phần 6.2, một từ trường gần đều gây ra chuyển động tròn. Hỏi còn có khả năng nào khác ngoài một quỹ đạo tròn không ? Nói chung, hiện tượng gì có khả năng xảy ra ?

21. Trong bài 1, bạn đã ước tính năng lượng giải phóng trong một cú sét, dựa trên năng lượng dự trữ trong điện trường ngay trước khi tia sét xảy ra. Giả thiết là điện trường được thiết đặt đến một giá trị nhất định, giá trị cần thiết để làm ion hóa không khí. Tuy nhiên, các phép đo thực tế dường như luôn luôn cho thấy cường độ điện trường đại khái nhỏ hơn chục lần so với điện trường cần thiết trong mô hình đó. Trong một thời gian dài, không có gì rõ ràng là các phép đo trường sai, hay mô hình sai. Nghiên cứu thực hiện hồi năm 2003 dường như cho thấy mô hình là sai. Bây giờ người ta tin rằng khởi sự cuối cùng của cú sét do các tia vũ trụ đi vào bầu khí quyển và làm ion hóa một số không khí. Nếu như điện trường nhỏ hơn 10 lần so với giá trị giả định trong bài 1, thì điều này có ảnh hưởng như thế nào lên kết quả cuối cùng trong bài 1 ?

22. Trong phần 6.2, tôi đã cung cấp một phương trình cho từ trường ở bên trong một solenoid, nhưng phương trình đó không cho câu trả lời đúng ở gần miệng hay ở bên ngoài solenoid. Mặc dù nói chung các tính toán trên máy tính của trường trong những vùng khác này thật phức tạp, nhưng người ta có thể tìm một kết quả đơn giản, chính xác cho trường tại tâm của một trong hai miệng ống, chỉ sử dụng phép đối xứng và phép cộng vectơ. Giải pháp đó là gì ?

Chương A
ĐIỆN DUNG VÀ ĐỘ TỰ CẢM

Chương này là phần tự chọn.

Con đường dài dẫn từ bóng đèn điện đến máy vi tính bắt đầu với một bước tiến rất quan trọng: việc đưa khái niệm hồi tiếp vào các mạch điện tử học. Mặc dù nguyên lí hồi tiếp đã được hiểu và ứng dụng cho các hệ cơ trong nhiều thế kỉ, và cho các hệ điện kể từ đầu thế kỉ 20, nhưng đối với đa số chúng ta thì từ này vẫn gợi lên hình ảnh một Jimi Hendrix (hay một số tay ghita gần đây hơn) cố tình sáng tạo ra những tiếng rít chói tai, hay hình ảnh nhân vật trường học tình cờ thực hiện điều tương tự trong thính phòng. Trong ví dụ đàn ghita, nhà soạn nhạc đứng trước dòng ampe và bật nó lên cao đến mức sóng âm phát ra từ loa dội trở lại dây ghita và làm cho nó rung mạnh hơn. Đây là một ví dụ về sự hồi tiếp *dương*: dây dao động càng mạnh thì sóng âm càng mạnh, và sóng âm càng mạnh thì dây dao động càng mạnh. Hạn chế duy nhất là khả năng làm chủ công suất khuếch đại.

Sự hồi tiếp âm cũng quan trọng không kém. Bộ ổn nhiệt của bạn, chẳng hạn, mang lại sự hồi tiếp âm bằng cách tắt bếp lò khi ngôi nhà trở nên đủ ấm áp, và bằng cách bật nó lên trở lại khi ngôi nhà trở nên quá lạnh. Cơ chế này làm cho nhiệt độ của ngôi nhà dao động tới lui trong một ngưỡng nhất định. Giống như sự tiến triển theo hàm mũ ngoài tầm kiểm soát là một hành vi của các hệ hồi tiếp dương, sự dao động là tiêu biểu trong các trường hợp hồi tiếp âm. Bạn đã nghiên cứu kĩ lưỡng sự hồi tiếp âm trong cuốn *Dao động và Sóng* (cuốn tập 3 của bộ sách này) trong trường hợp một hệ cơ, mặc dù chúng ta đã không gọi nó như thế.

A.1 Điện dung và độ tự cảm

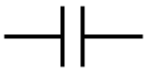
Trong một dao động cơ học, năng lượng biến đổi tuần hoàn giữa dạng động năng và thế năng, và có lẽ còn chuyển sang dạng nhiệt tiêu hao do ma sát. Trong một mạch điện, các điện trở là thành phần tiêu thụ nhiệt. Đâu là đối tượng tương tự điện học của việc dự trữ và giải phóng thế năng và động năng của một vật đang dao động ? Khi bạn nghĩ về năng lượng dự trữ trong một mạch điện, bạn có thể tưởng tượng tới một cái pin, nhưng ngay cả các pin nạp lại được cũng chỉ có thể nạp 10 đến 100 lần trước khi chúng cạn kiệt. Ngoài ra, các pin không có khả năng biến đổi năng lượng trong khoảng thời gian đủ ngắn cho đa số các ứng dụng. Mạch điện trong các nhạc cụ điện có thể dao động hàng ngàn lần trong một giây, và lò vi sóng của bạn hoạt động ở tần số gigahertz. Thay cho pin, chúng ta thường sử dụng tụ điện và cuộn cảm để dự trữ năng lượng trong các mạch dao động. Các tụ điện, đối tượng chúng ta đã bắt gặp, dự trữ năng lượng trong điện trường. Cuộn cảm làm điều tương tự trong từ trường.

Tụ điện

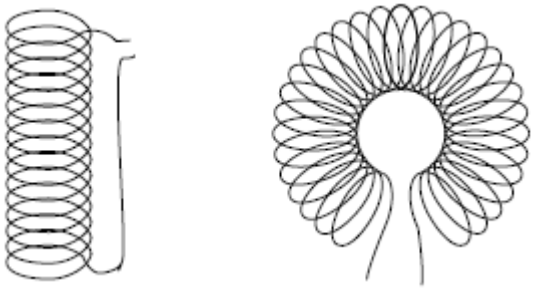
Năng lượng của tụ điện tồn tại trong điện trường xung quanh của nó. Nó tỉ lệ với bình phương cường độ trường, cường độ trường thì tỉ lệ với điện tích trên các bản tụ. Nếu chúng ta giả sử các bản mang điện tích có độ lớn như nhau, $+q$ và $-q$ thì năng lượng dự trữ trong tụ điện phải tỉ lệ với q^2. Vì lí do lịch sử, chúng ta viết hằng số tỉ lệ là 1/2C

$$E_C = \frac{1}{2C} q^2$$

Hằng số C là một thuộc tính hình học của tụ điện, gọi là điện dung của nó.



a/ Kí hiệu tụ điện



c/ Hai dạng hình học phổ biến đối với cuộn cảm. Kiểu hình trụ ở bên trái gọi là solenoid.

b/ Một số tụ điện

d/ Kí hiệu cuộn cảm

e/ Một số cuộn cảm

Dựa trên định nghĩa này, đơn vị của điện dung phải là C^2/J, và sự kết hợp này thường được viết gọn lại là farad, 1 F = 1 C^2/J. "Cái tích điện" là một tên gọi kém chính thức hơn đối với tụ điện. Chú ý nhãn in trên các tụ điện thường sử dụng MF để chỉ μF, mặc dù MF thật ra là kí hiệu cho megafarad, chứ không phải microfarad. Sự lộn xộn không do sự kí hiệu không theo chuẩn này, vì các giá trị picofarad và nanofarad là thông dụng nhất, và mãi cho đến thập niên 1990 thì các giá trị milifarad và farad mới trở nên có sẵn ở kích thước vật lí thật tế. Hình a cho biết kí hiệu dùng trong sơ đồ biểu diễn tụ điện.

Cuộn cảm

Bất kì dòng điện nào cũng sẽ tạo ra một từ trường, nên thật ra mỗi dây dẫn mang điện trong mạch điện đều đóng vai trò một cuộn cảm! Tuy nhiên, loại độ tự cảm "tản lạc" này thường bị bỏ qua, giống như chúng ta thường có thể bỏ qua điện trở tản lạc của các dây dẫn và chỉ xét tới các điện trở thật sự. Để dự trữ bất kì lượng đáng kể nào của năng lượng từ, người ta thường sử dụng một cuộn dây được thiết kế đặc biệt thành một cuộn cảm. Tất cả đóng góp của các vòng cho từ trường cộng lại với nhau cho từ trường mạnh hơn. Không giống như tụ điện và điện trở, các cuộn cảm thực tế dễ dàng chế tạo bằng tay. Chẳng hạn, người ta có thể cuộn một số dây xung quanh một chốt gỗ ngắn, đặt cuộn dây bên trong chai nhựa aspirin với dây chì đưa ra ngoài, và đổ đầy epoxy vào chai làm cho toàn bộ lổn nhổn. Một cuộn cảm giống như thế này, ở dạng cuộn dây hình trụ, được gọi là solenoid, c, và một solenoid cách điệu hóa, d, là kí hiệu sử dụng để biểu diễn một cuộn cảm trong mạch điện, bất kể dạng hình học thật sự của nó.

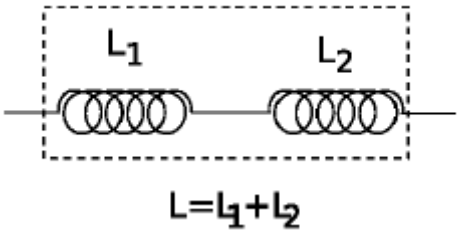
Một cuộn cảm dự trữ được bao nhiêu năng lượng ? Mật độ năng lượng tỉ lệ với bình phương cường độ từ trường, cường độ trường tỉ lệ với dòng điện chạy qua cuộn dây, nên năng lượng dự trữ trong cuộn cảm phải tỉ lệ với I^2. Chúng ta viết $L/2$ cho hằng số tỉ lệ

$$E_L = \frac{L}{2} I^2$$

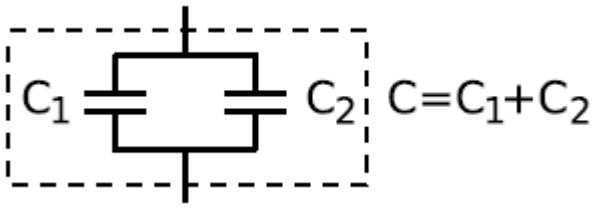
Như trong định nghĩa điện dung, chúng ta có hệ số 1/2, đó thuần túy là vấn đề định nghĩa. Đại lượng *L* được gọi là độ tự cảm của cuộn cảm, và chúng ta thấy rằng đơn vị của nó phải là J/A^2. Tổ hợp đơn vị khó coi này thường được viết gọn lại là henry, $1\ H = 1\ J/A^2$. Thay vì ghi nhớ định nghĩa này, điều có ý nghĩa hơn là tìm thấy nó khi cần thiết từ định nghĩa của độ tự cảm. Nhiều người biết đến cuộn cảm đơn giản là "cuộn dây" và sẽ không hiểu ý bạn nếu bạn nhắc tới "phần cảm điện", nhưng họ vẫn nhớ tới *L* là "độ tự cảm".

Ví dụ 1. Các cuộn cảm giống nhau mắc nối tiếp

Nếu hai cuộn cảm mắc nối tiếp, thì dòng điện đi qua cuộn cảm ghép đôi phải đi qua cả hai phần của nó. Như vậy, theo định nghĩa độ tự cảm, độ tự cảm cũng tăng gấp đôi. Nói chung, các độ tự cảm mắc nối tiếp cộng gộp lại, giống như điện trở. Lí giải tương tự cho thấy độ tự cảm của một solenoid xấp xỉ tỉ lệ với chiều dài của nó, giả sử số vòng dây trên đơn vị chiều dài giữ không đổi.



f/ Các độ tự cảm mắc nối tiếp cộng lại



g/ Các điện dung mắc song song cộng lại

Ví dụ 2. Các tụ điện giống nhau mắc song song

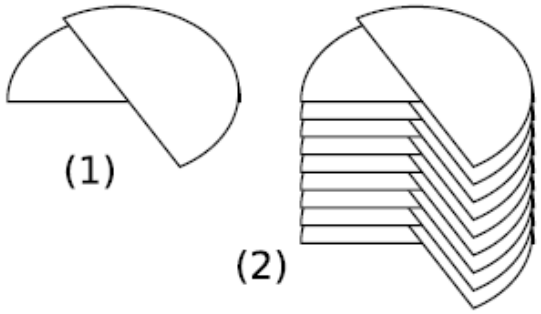
Khi hai tụ điện giống nhau mắc song song, bất kì điện tích nào tích ở hai đầu của tụ ghép cũng sẽ tự chia đều giữa hai phần. Điện trường xung quanh mỗi tụ sẽ chia đôi cường độ, và do đó dự trữ một phần tư năng lượng. Hai tụ điện, mỗi tụ dự trữ một phần tư năng lượng, mang lại phân nửa năng lượng dự trữ toàn phần. Vì điện dung tỉ lệ nghịch với năng lượng dự trữ, nên điều này hàm ý rằng hai điện dung giống nhau mắc song song cho điện dung gấp đôi. Nói chung, các điện dung mắc song song cộng gộp lại. Điều này không giống với hành vi của cuộn cảm và điện trở, với chúng cấu hình mắc nối tiếp thì cộng lại.

Điều này phù hợp với thực tế là điện dung của tụ phẳng tỉ lệ với diện tích các bản tụ. Nếu chúng ta có tụ hai bản song song, và chúng ta ghép chúng theo kiểu song song và mang chúng lại rất gần nhau bản liền bản, chúng ta đã tạo ra một tụ với các bản có diện tích gấp đôi, và nó có điện dung gần như gấp đôi.

Các độ tự cảm mắc song song và điện dung mắc nối tiếp được khảo sát trong bài tập 4 và 6.

Ví dụ 3. Tụ xoay

Hình h/1 cho thấy cấu trúc của một tụ xoay gồm hai bản kim loại hình bán nguyệt song song nhau. Một bản cố định, còn bản kia có thể quay xung quanh trục chung của chúng với một núm xoay. Các điện tích trái dấu trên hai bản hút nhau lại, và do đó có xu hướng làm tăng diện tích chồng lên nhau. Diện tích chồng lấn này là diện tích duy nhất góp phần hiệu quả cho điện dung, và việc chỉnh nút xoay làm thay đổi điện dung. Thiết kế đơn giản chỉ có thể mang lại giá trị điện dung rất nhỏ, nên trong thực tế người ta thường sử dụng một dãy tụ, mắc dây song song, với tất cả các phần chuyển động có cùng trục xoay.

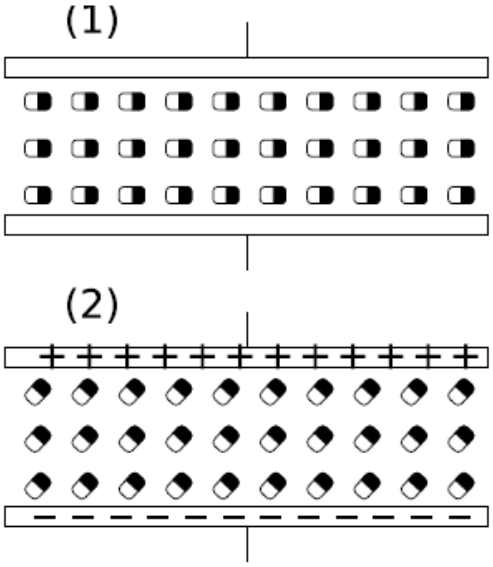


h/ Tụ xoay

Câu hỏi thảo luận

A. Giả sử hai tụ bản song song mắc dây song song nhau, và đặt rất gần nhau, bản liền bản, sao cho điện trường của chúng chồng lên nhau. Điện dung thu được sẽ là quá nhỏ, hay quá lớn ? Bạn có thể nào xoay mạch điện sang hình dạng khác và làm cho hiệu ứng xảy ra tương tự, hoặc là hiệu ứng bị loại trừ ? Còn trường hợp hai cuộn cảm mắc nối tiếp thì sao ?

B. Đa số tụ điện thực tế không có khe không khí hay khe chân không giữa các bản; thay vì vậy chúng có một chất cách điện gọi là điện môi. Chúng ta nghĩ tới các phân tử trong chất này dưới dạng các lưỡng cực tự do quay (ít nhất là cũng phần nào đó), nhưng chúng không tự do chuyển động ra xung quanh, vì nó là chất rắn. Hình bên dưới cho thấy một cách đã cách điệu hóa cao độ và không thật để hình dung điều này. Chúng ta tưởng tượng tất cả các lưỡng cực ban đầu xoay sang một bên (1), và khi tụ tích điện, chúng đều phản ứng bằng cách xoay đi một góc nhất định (2) (Trong thực tế, tình cảnh có thể lộn xộn hơn nhiều, và hiệu ứng sắp thẳng hàng yếu hơn nhiều).



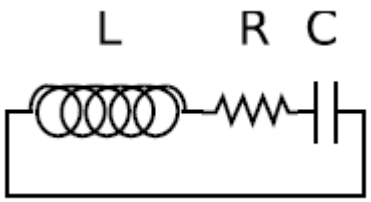
i/ Câu hỏi thảo luận B

Cho đơn giản, hãy tưởng tượng đưa chỉ một lưỡng cực điện vào khe chân không. Đối với một lượng điện tích cho trước trên các bản, thì điều này ảnh hưởng như thế nào đến lượng năng lượng dự trữ trong điện trường ? Điều này ảnh hưởng thí nghiệm đến điện dung ?

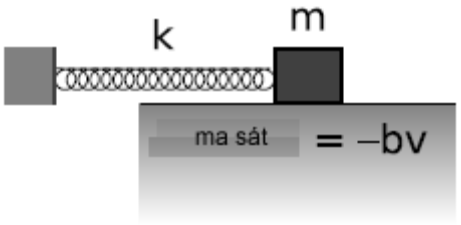
Bây giờ, hãy lặp lại phép phân tích dưới dạng công cơ học cần thiết để tích điện cho các bản.

A.2 Mạch dao động

Hình j biểu diễn mạch dao động khả dĩ đơn giản nhất. Đối với bất kì ứng dụng thực tế nào, thật ra người ta cần nhiều thành phần hơn. Ví dụ, nếu là một phím chuyển kênh radio, nó cần phải nối với một ăntenn và một bộ khuếch đại. Tuy nhiên, toàn bộ cơ sở vật lí cần thiết là ở đó.



j/ Mạch RLC nối tiếp



k/ Tương đương cơ học đối với mạch RLC

Chúng ta có thể phân tích mà không cần đổ mồ hôi sôi nước mắt gì cả, đơn giản bằng cách xây dựng một tương đương với hệ cơ học. Trong một dao động tử cơ học, chúng ta có hai dạng năng lượng dự trữ

$$E_{lòxo} = \frac{1}{2}kx^2 \qquad (1)$$

$$K = \frac{1}{2}mv^2 \qquad (2)$$

Trong trường hợp của dao động tử cơ học, chúng ta thường giả sử lực ma sát thuộc dạng cho kết quả toán học đẹp nhất, $F = - bv$. Trong mạch điện, sự tiêu hao năng lượng thành nhiệt xảy ra qua điện trở, không có lực cơ học nào có liên quan, cho nên để tạo ra sự tương tự, chúng ta phải trình bày lại vai trò của lực ma sát dưới dạng năng lượng. Công suất tiêu hao do ma sát bằng với công cơ học mà nó thực hiện trong khoảng thời gian Δt, chia cho Δt, $P = W/\Delta t = F\Delta x/\Delta t = Fv = -bv$, nên

$$\text{Tốc độ tiêu thụ nhiệt} = - bv^2 \qquad (3)$$

♥ Phương trình (1) có *x* bình phương, còn phương trình (2) và (3) có *v* bình phương. Vì chúng bình phương lên, nên kết quả không phụ thuộc vào những biến này là dương hay âm. Điều này có ý nghĩa vật lí gì không ?

Trong mạch điện, dạng dự trữ của năng lượng là

$$E_C = \frac{1}{2C}q^2 \qquad (1')$$

$$E_L = \frac{1}{2}LI^2 \qquad (2')$$

và tốc độ tiêu thụ nhiệt ở điện trở là

$$\text{tốc độ tiêu thụ nhiệt} = - RI^2 \qquad (3')$$

So sánh hai hệ phương trình, trước hết chúng ta thiết lập sự tương tự giữa các đại lượng biểu diễn trạng thái của hệ tại một số thời điểm trong thời gian

$$x \leftrightarrow q$$

$$v \leftrightarrow I$$

♥ *v* liên hệ như thế nào với *x* về mặt toán học ? *I* liên hệ với *q* như thế nào ? Hai mối liên hệ có tương tự với nhau không ?

Tiếp theo, chúng ta liên hệ các đại lượng mô tả các đặc điểm cố định của hệ:

$$k \leftrightarrow 1/C$$

$$m \leftrightarrow L$$

$$b \leftrightarrow R$$

Vì hệ cơ vốn dao động với chu kì $T = 2\pi\sqrt{m/k}$, nên chúng ta có thể giải ngay phương trình điện bằng cách lấy tương tự, cho ta

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

Thay cho chu kì, *T*, và tần số, *f*, sẽ tiện lợi hơn nếu chúng ta làm việc với đại lượng $\omega = 2\pi f$, đại lượng có thể hiểu là số radian trên giây. Khi đó

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Vì điện trở R tương đương với b trong trường hợp cơ, nên chúng ta tìm được Q (hệ số tỉ lệ, chứ không điện tích) của mạch cộng hưởng tỉ lệ nghịch với R, và biên độ cộng hưởng tỉ lệ trực tiếp với R.

Ví dụ 4. Điều chỉnh máy thu radio

Máy thu radio sử dụng loại mạch điện này để chọn đài phát. Vì máy thu cộng hưởng ở một tần số nhất định, các đài có tần số lệch quá xa sẽ không kích thích bất kì phản ứng nào ở mạch điện. Giá trị của R phải đủ nhỏ sao cho chỉ một đài tại một thời điểm được bắt sóng, nhưng phải đủ lớn sao cho đài không quá nhiễu. Tần số cộng hưởng có thể chỉnh bằng cách điều chỉnh L hoặc C, nhưng tụ xoay thì dễ chế tạo hơn là cuộn cảm biến thiên.

Ví dụ 5. Áp dụng bằng số

Công ti điện thoại gửi nhiều hơn một cuộc thoại tại một thời điểm trên cùng một sợi dây, điều đó được thực hiện bằng cách chuyển từng tín hiệu giọng nói thành những vùng tần số khác nhau trong quá trình truyền. Số tín hiệu trên dây có thể tăng lên tối đa bằng cách làm cho từng vùng tần số (gọi là dải thông) càng nhỏ càng tốt. Thành ra chỉ một vùng tương đối hẹp của tần số là cần thiết để làm cho giọng nói con người nhận thức được, nên công ti điện thoại lọc hết mọi tần số quá cao và quá thấp. (Đây là lí do vì sao giọng nói qua điện thoại của bạn khác với giọng nói bình thường của bạn).

Nếu như bộ lọc gồm một mạch RLC với tần số cộng hưởng chừng 1 kHz và tụ điện là 1 μF, thì giá trị độ tự cảm phải sử dụng bằng bao nhiêu ?

Giải phương trình cho L, chúng ta có

$$L = \frac{1}{C\omega^2} = \frac{1}{\left(10^{-6}F\right)\left(2\pi.10^3 s^{-1}\right)^2} = 2{,}5 \text{ x } 10^{-3}\ F^{-1}s^2$$

Kiểm tra xem kết quả này có thật sự cùng đơn vị như henri là một việc hơi buồn tẻ, nhưng đúng như vậy.

$$F^{-1}s^2 = (C^2/J)^{-1}s^2 = J.C^{-2}s^2 = J/A^2 = H$$

Kết quả là 25 mH.

Đây thật sự là một giá trị độ tự cảm lớn, và sẽ cần một cuộn dây to, nặng, và đắt tiền. Thật ra, có một thủ thuật chế tạo loại mạch điện này nhỏ và rẻ tiền. Có một loại chip silicon gọi là op-amp, trong số nhiều chất khác, chúng có thể dùng để mô phỏng hành vi của một cuộn cảm. Hạn chế chủ yếu của op-amp là nó hạn chế với các ứng dụng công suất thấp.

A.3 Điện thế và dòng điện

Hiện tượng vật lí gì đang xảy ra ở một trong các mạch dao động này ? Trước tiên, hãy nhìn vào trường hợp cơ, và sau đó sẽ vạch ra sự tương tự cho mạch điện. Để cho đơn giản, hãy bỏ qua sự tồn tại của sự tắt dần, cho nên không có ma sát trong dao động tử cơ học, và không có điện trở trong mạch dao động điện.

Giả sử chúng ta lấy một dao động tử cơ học và kéo vật nặng ra khỏi trạng thái cân bằng, sau đó buông nó ra. Vì ma sát có xu hướng chống lại lực của lò xo, nên chúng ta chất phác mong đợi rằng việc không có ma sát sẽ cho phép vật nặng nhảy tức thời về vị trí cân bằng. Tuy nhiên, điều này không thể xảy ra, vì vật nặng sẽ phải có vận tốc vô hạn để thực hiện một sự nhảy tức thời như thế. Vận tốc vô hạn sẽ yêu cầu động năng vô hạn, nhưng loại năng lượng duy nhất có sẵn cho việc biến đổi thành động năng là năng lượng dự trữ trong lò xo, và năng lượng đó là hữu hạn, chứ không phải vô hạn. Tại mỗi bước trên hành trình của nó trở lại trạng thái cân bằng, vận tốc của vật nặng được điều khiển chính xác bằng lượng năng lượng của lò xo trước đó chuyển hóa thành động năng. Sau khi vật nặng đạt tới trạng thái cân bằng, nó sẽ đi qua vị trí đó do quán tính riêng của nó. Nó thực hiện

các dao động giống hệt nhau ở cả hai phía của trạng thái cân bằng, và nó không bao giờ mất độ cao vì ma sát không có mặt để chuyển hóa năng lượng cơ thành nhiệt.

Bây giờ hãy xét dao động tử điện, đối tượng tương tự của vị trí là điện tích. Việc kéo vật nặng ra khỏi trạng thái cân bằng giống như việc tích điện $+q$ và $-q$ ở hai bản của tụ điện. Vì điện trở có xu hướng chống lại dòng điện tích, nên chúng ta có thể tượng tượng không có mặt ma sát, thì điện tích sẽ chạy tức thời qua cuộn cảm (thật ra nó chỉ là một mẫu dây dẫn), và tụ điện sẽ phóng điện tức thời. Tuy nhiên, một sự phóng điện tức thời như thế là không thể, vì nó yêu cầu một dòng điện vô hạn cho sự phóng điện tức thời. Dòng điện vô hạn sẽ tạo ra từ trường vô hạn xung quanh cuộn cảm, và trường này sẽ có năng lượng vô hạn. Thay vì vậy, tốc độ chạy của dòng điện được điều khiển ở mỗi thời điểm bởi mối quan hệ giữa lượng năng lượng dự trữ trong từ trường và lượng dòng điện phải tồn tại để có từ trường mạnh đó. Sau khi tụ điện đạt tới $q = 0$, nó vượt quá khỏi giá trị đó. Mạch điện có loại "quán tính" điện riêng của nó, vì nếu điện tích ngừng chạy, thì phải có dòng điện bằng không qua cuộn cảm. Nhưng dòng điện trong cuộn cảm phải liên hệ với lượng năng lượng dự trữ trong từ trường riêng của nó. Khi tụ điện ở trạng thái $q = 0$, toàn bộ năng lượng điện là ở trong cuộn cảm, cho nên nó phải có từ trường mạnh ở xung quanh nó và có một chút dòng điện chạy qua nó.

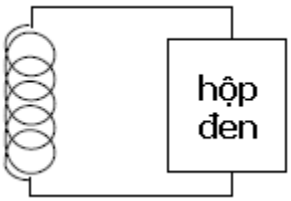
Điều duy nhất có thể trông hoang mang ở đây là chúng ta thường nói dòng điện trong cuộn cảm gây ra từ trường, nhưng bây giờ nghe có vẻ như từ trường gây ra dòng điện. Thật ra đây là triệu chứng của bản chất khó hiểu của nhân và quả trong vật lí học. Thật không kém phần hợp lí khi nghĩ tới mối quan hệ nhân quả theo kiểu như thế này. Tuy nhiên, điều này trông có vẻ không thỏa ý, và chẳng hạn không thật sự trả lời được câu hỏi đâu là nguyên nhân gây ra sự chênh lệch điện thế giữa hai đầu điện trở (trong trường hợp điện trở là hữu hạn); phải có sự chênh lệch điện thế như thế, vì nếu không có, định luật Ohm sẽ tiên đoán dòng điện bằng không chạy qua điện trở.

Như vậy, điện thế là cái thật sự còn thiếu trong câu chuyện của chúng ta từ trước đến giờ.

Hãy bắt đầu nghiên cứu hiệu điện thế hai đầu một tụ điện. Điện thế là thế năng điện trên đơn vị điện tích, cho nên hiệu điện thế giữa hai bản tụ liên hệ với lượng năng lượng của nó sẽ tăng lên nếu chúng ta tăng giá trị tuyệt đối của điện tích trên các bản tụ từ q lên $q + \Delta q$:

$$\begin{aligned} V_C &= \left(E_{q+\Delta q} - E_q\right) / \Delta q \\ &= \frac{\Delta E_C}{\Delta q} \\ &= \frac{\Delta}{\Delta q}\left(\frac{1}{2C} q^2\right) \\ &= \frac{q}{C} \end{aligned}$$

Nhiều sách sử dụng phương trình này làm định nghĩa của điện dung. Nhân thể, phương trình này có khả năng giải thích nguyên nhân lịch sử vì sao C được định nghĩa sao cho năng lượng tỉ lệ nghịch với C đối với một giá trị cho trước của C: người đưa ra định nghĩa nghĩ tới tụ điện là một dụng cụ tích điện chứ không phải tích năng lượng, và lượng điện tích dự trữ đối với một hiệu điện thế ổn định ("sức chứa" điện tích) thì tỉ lệ với C.



l/ Cuộn cảm giải phóng năng lượng và đưa nó vào hộp đen

Trong trường hợp cuộn cảm, chúng ta biết nếu có một dòng điện không đổi, ổn định chạy qua nó, thì từ trường là không đổi,và nó là lượng năng lượng dự trữ; không có trao đổi năng lượng giữa cuộn cảm và bất kì thành phần nào khác của mạch điện. Nhưng nếu dòng điện biến thiên thì sao ? Từ trường tỉ lệ với dòng điện, nên sự thay đổi ở đối tượng này cũng là sự thay đổi ở đối tượng kia. Để cụ thể, hãy tưởng tượng là từ trường và dòng điện đều đang giảm. Năng lượng dự trữ trong từ trường do đó sẽ giảm, và theo sự bảo toàn năng lượng, năng lượng này không thể nào biến mất – một số thành phần khác của mạch điện phải nhận năng lượng từ cuộn cảm. Ví dụ đơn giản nhất, biểu diễn trong hình l, là loạt mạch điện chứa một cuộn cảm và một thành phần mạch điện khác. Không quan trọng thành phần mạch điện kia là cái gì, nên chúng ta chỉ gọi nó là một hộp đen, nhưng nếu thích bạn có thể nghĩ nó là một điện trở, trong trường hợp đó năng lượng mất đi ở cuộn cảm đang bị điện trở chuyển hóa thành nhiệt. Quy luật mối nối cho chúng ta biết rằng cả hai thành phần mạch điện trên có cùng dòng điện chạy qua chúng, nên I có thể là kí hiệu cho một trong hai dòng điện, và tương tự như vậy, định luật vòng kín cho chúng ta biết $V_{cuộn\ cảm} + V_{hộp\ đen} = 0$, nên hai độ giảm thế phải có cùng một giá trị tuyệt đối, chúng ta có thể kí hiệu nó là V. Cho dù hộp đen là cái gì đi nữa thì tốc độ mà nó nhận năng lượng từ cuộn cảm được cho bởi $|P| = |IV|$,vì thế

$$|IV| = \left|\frac{\Delta E_L}{\Delta t}\right| = \left|\frac{\Delta}{\Delta t}\left(\frac{1}{2}LI^2\right)\right| = \left|LI\frac{\Delta I}{\Delta t}\right|$$

Hay

$$|V| = \left|L\frac{\Delta I}{\Delta t}\right|$$

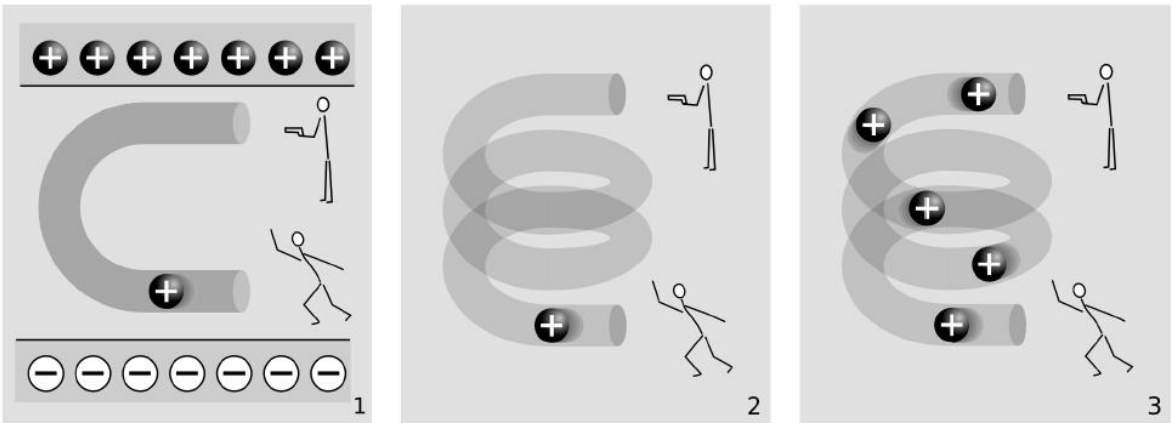
trong nhiều sách giáo khoa, đây là định nghĩa của độ tự cảm. Chiều của độ giảm thế (dấu cộng hay trừ) sao cho cuộn cảm chống lại sự thay đổi dòng điện.

Có một thứ rất thú vị với kết quả này. Giả sử, để cụ thể, hộp đen trong hình l là một điện trở, và năng lượng của cuộn cảm đang giảm, và đang chuyển hóa thành nhiệt trong điện trở. Độ giảm thế qua điện trở cho biết có một điện trường bên trong nó, điện trường đó chi phối dòng điện. Nhưng điện trường này từ đâu mà có ? Không có điện tích nào ở đâu đây để có thể tạo ra nó! Cái chúng ta vừa phát hiện là một trường hợp đặc biệt của một nguyên lí tổng quát hơn, đó là nguyên lí cảm ứng: một từ trường biến thiên tạo ra một điện trường, ngoài điện trường do các điện tích tạo ra. (Điều ngược lại cũng đúng: bất kì điện trường nào biến thiên theo thời gian cũng tạo ra một từ trường) Sự cảm ứng hình thành nên cơ sở cho các công nghệ như máy phát điện và máy biến thế, và cuối cùng nó dẫn tới sự tồn tại của ánh sáng, đó là một dạng sóng trong điện trường và từ trường. Đây là các chủ đề của chương 6, nhưng điều thật sự đáng lưu ý là chúng ta có thể đi tới kết luận này mà không cần biết chi tiết về từ học.

Tranh hoạt hình trong hình m so sánh điện trường do điện tích gây ra, 1, với điện trường do từ trường biến thiên gây ra, 2-3. Trong hình m/1, hai nhà vật lí ở trong căn phòng có trần tích điện dương và sàn tích điện âm. Nhà vật lí ở phía dưới ném một quả

bóng bowling tích điện dương vào ống dẫn uốn cong. Nhà vật lí ở phía trên sử dụng một súng radar để đo tốc độ của quả bóng khi nó đi ra khỏi ống. Họ nhận thấy quả bóng bị chậm lại vào lúc nó đi lên tới trên cùng. Bằng cách đo sự biến đổi động năng của quả bóng, hai nhà vật lí đóng vai trò giống hệt như một volt kế. Họ kết luận rằng phía trên của ống ở điện thế cao hơn phía dưới của ống. Sự chênh lệch điện thế xác nhận một điện trường, và trường này rõ ràng gây ra bởi các điện tích ở sàn và trần nhà.

Trong hình m/2, không có điện tích nào ở trong phòng, ngoại trừ quả bóng bowling tích điện. Các điện tích chuyển động gây ra từ trường, nên có một từ trường xung quanh ống xoắn ốc trong khi quả bóng chuyển động trong nó. Một từ trường được tạo ra nơi trước đó không có gì, và trường đó có năng lượng. Năng lượng đó do đâu mà có ? Nó chỉ có thể đến từ chính quả bóng, cho nên quả bóng phải mất động năng của nó. Hai nhà vật lí làm việc với nhau một lần nữa đóng vai trò như một volt kế, và một lần nữa họ kết luận rằng có một sự chênh lệch điện thế giữa phần trên và phần dưới của ống. Hiệu điện thế này xác nhận một điện trường, nhưng điện trường không thể do một điện tích nào tạo ra, vì không có điện tích nào có mặt trong phòng cả. Điện trường này được tạo ra bởi sự thay đổi từ trường.



m/ Điện trường do điện tích gây ra, 1, và do từ trường biến thiên gây ra, 2 và 3

Nhà vật lí ở phía dưới tiếp tục ném các quả bóng vào trong ống, cho đến khi ống chứa đầy các quả bóng, m/3, và cuối cùng một dòng điện ổn định được thiết lập. Trong khi ống chứa đầy các quả bóng, năng lượng trong từ trường tăng lên đều đặn, và năng lượng đó lấy từ động năng của các quả bóng. Nhưng một khi dòng điện ổn định được thiết lập, thì năng lượng trong từ trường không còn biến thiên nữa. Các quả bóng không còn phải cung cấp năng lượng để tích lũy trường, và nhà vật lí ở phía trên nhận thấy các quả bóng đang đi ra khỏi ống ở tốc độ trọn vẹn trở lại. Không còn có sự chênh lệch điện thế nữa. Mặc dù có một dòng điện, $\Delta I / \Delta t$ bằng không.

Câu hỏi thảo luận

A. Điều gì xảy ra khi nhà vật lí ở phía dưới trong hình m/3 bắt đầu mệt mỏi, và làm giảm dòng điện?

A. 4 Sự tắt dần

Cho tới lúc này, tôi chỉ mới "khều nhẹ" thực tế là bằng cách thay đổi các đặc trưng của một dao động tử, người ta có thể tạo ra hành vi không dao động. Ví dụ, tưởng tượng lấy một hệ vật nặng trên lò xo và làm cho lò xo càng lúc càng yếu đi. Trong giới hạn k nhỏ, cứ như thể là không có lò xo gì cả, và hành vi của hệ là nếu bạn kích vật nặng thì nó bắt đầu chuyển động chậm dần. Trong trường hợp ma sát tỉ lệ với v, như chúng ta giả định, kết quả là vận tốc tiến tới không, nhưng không bao giờ thật sự đạt tới không. Điều này không chân thật đối với một dao động tử cơ học, nó sẽ không có ma sát biến mất ở những vận tốc nhỏ, nhưng nó khá thực tế trong trường hợp mạch điện, trong đó sự giảm thế qua điện trở thật sự đạt tới không khi dòng điện đạt tới không.

Các mạch điện có thể biểu hiện mọi hành vi tương tự. Để cho đơn giản, chúng ta sẽ chỉ phân tích trường hợp mạch LRC có $L = 0$ hoặc $C = 0$.

Mạch RC

Trước tiên, chúng ta phân tích mạch RC, n. Trong thực tế, người ta sẽ phải "kích" mạch điện, ví dụ bằng cách chèn vào một cái pin trong thời gian ngắn, để có được hành vi hấp dẫn. Chúng ta bắt đầu với định luật Ohm và phương trình cho hiệu điện thế hai đầu một tụ điện

$$V_R = IR$$

$$V_C = q/C$$

Định luật vòng kín cho ta

$$V_R + V_C = 0$$

và kết hợp ba phương trình trên cho ta mối quan hệ giữa q và I:

$$I = -\frac{1}{RC} q$$

Dấu trừ cho chúng ta biết rằng dòng điện có xu hướng làm giảm điện tích trên tụ điện, tức là làm cho nó phóng điện. Cần nhớ rằng cường độ dòng điện tỉ lệ với q: nếu q lớn, thì lực hút giữa các điện tích $+q$ và $-q$ trên hai bản tụ lớn, và điện tích sẽ chạy nhanh hơn qua điện trở để hợp nhất. Nếu có điện tích bằng không trên các bản tụ, thì không có nguyên do gì để cho dòng điện chạy. Vì ampe, đơn vị của dòng điện, tương đương với coulomb trên giây, nên hình như đại lượng RC phải có đơn vị là giây, và bạn có thể tự kiểm tra điều này là đúng. RC vì thế là hằng số thời gian của mạch điện.

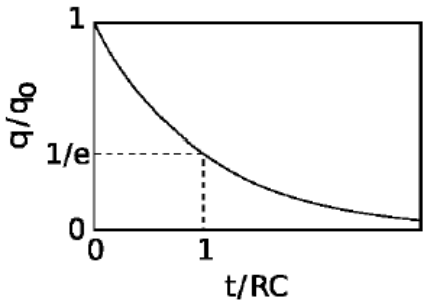
I và q thay đổi chính xác theo thời gian như thế nào ? Viết lại I dưới dạng $\Delta q / \Delta t$, chúng ta có

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} = -\frac{1}{RC} q$$

Phương trình này mô tả một hàm $q(t)$ luôn luôn giảm theo thời gian, và tốc độ giảm của nó lúc đầu là lớn, khi q lớn, nhưng càng lúc càng nhỏ khi q tiến tới không. Là một thí dụ của loại hành vi toán học này, chúng ta có thể tưởng tượng một người đàn ông có 1024 cây cần sa trong sân sau nhà ông ta, và quyết tâm nhổ phân nửa trong số chúng mỗi ngày. Vào ngày thứ nhất, ông ta nhổ phân nửa, và còn lại 512 cây. Ngày tiếp theo, ông ta nhổ phân nửa số cây còn lại, để lại 256 cây. Số cây còn lại tiếp tục giảm theo hàm mũ: 128, 64, 32, 16, 8, 4, 2, 1. Trở lại ví dụ điện của chúng ta, hàm $q(t)$ hình như cần một lũy thừa, lũy thừa đó chúng ta có thể viết dưới dạng ae^{bt}, trong đó $e = 2{,}718\ldots$ là cơ số logarith tự nhiên. Chúng ta có thể viết nó với cơ số 2, như trong câu chuyện cây cần sa, thay cho cơ số e, nhưng cơ sở toán học ở phần sau hóa ra đơn giản hơn nếu chúng ta sử dụng e. Không thể đưa một số có đơn vị vào hàm làm số mũ, nên bt không có đơn vị, và b do đó phải có đơn vị là nghịch đảo của giây. Số b xác định mức độ nhanh của sự tắt dần theo hàm mũ. Các thông số vật lí duy nhất của mạch điện mà b có khả năng phụ thuộc vào đó là R và C, và cách duy nhất là đặt các đơn vị ohm và farad với nhau để cho đơn vị nghịch đảo của giây bằng cách tính $1/RC$. Như vậy, thật ra chúng ta có thể sử dụng $7/RC$, hay $3\pi/RC$, hay bất cứ con số không có đơn vị nào chia cho RC, nhưng đây là nơi việc sử dụng cơ số e thành ra có lợi: đối với cơ số e, thì hằng số không có đơn vị hóa ra đúng *bằng* 1. Như vậy, đáp số của chúng ta là

$$q = q_0 exp\left(-\frac{t}{RC}\right)$$

Con số RC, với đơn vị là giây, được gọi là hằng số thời gian RC của mạch điện, và nó cho chúng ta biết chúng ta phải chờ bao lâu nếu chúng ta muốn thấy điện tích giảm đi 1/*e*.



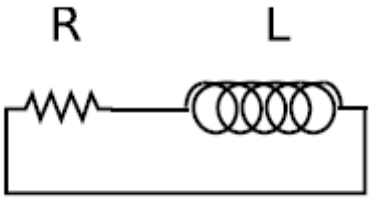
o/ Trong khoảng thời gian RC, điện tích trên tụ điện giảm đi e lần.

Mạch RL

Mạch RL, p, có thể khảo sát với phương pháp tương tự, và người ta có thể dễ dàng chỉ ra rằng nó cho ta

$$I = I_0 exp\left(-\frac{R}{L}t\right)$$

Hằng số thời gian RL bằng *L/R*.



p/ Mạch RL

Ví dụ 6. Mối nguy hiểm của solenoid; ổ cắm xẹt điện

Khi chúng ta đột ngột phá vỡ một mạch RL, điều gì sẽ xảy ra ? Có thể hình như là chúng ta đối mặt với một nghịch lí, vì chúng ta chỉ có hai dạng năng lượng, năng lượng từ và nhiệt, và nếu dòng điện giảm đột ngột, thì từ trường phải co lại đột ngột. Nhưng năng lượng từ trường bị mất sẽ đi đâu ? Nó không thể chuyển hóa thành nhiệt cản trở của điện trở, vì mạch điện bây giờ đã bị hở, và dòng điện không thể chạy!

Cách thoát ra khỏi câu đố này là nhận ra rằng khe hở trong mạch điện có một điện trở lớn, nhưng không vô hạn. Điện trở lớn này làm cho hằng số thời gian RL *L/R* rất nhỏ. Như vậy, dòng điện tiếp tục chạy trong một thời gian rất ngắn và chạy thẳng qua khe không khí nơi mạch điện bị hở. Nói cách khác, có một tia lửa điện!

Chúng ta có thể xác định dựa trên vài cách lí giải khác nhau rằng độ giảm thế từ đầu này của tia lửa điện đến đầu kia phải rất lớn. Trước hết, điện trở của không khí lớn, cho nên $V = IR$ cần một điện thế lớn. Chúng ta cũng có thể giải thích rằng tất cả năng lượng trong từ trường bị tiêu hao trong một thời gian ngắn, nên công suất tiêu hao ở tia lửa điện, $P = IV$ là lớn, và điều này cần giá trị lớn của *V*. (*I* không lớn – nó đang giảm từ giá trị ban đầu của nó) Nhưng cách thứ ba đi tới cùng một kết quả là xét phương trình $V_L = \Delta I/\Delta t$: vì hằng số thời gian ngắn, cho nên đạo hàm thời gian $\Delta I/\Delta t$ lớn.

Đây đúng là cách thức bộ đánh lửa xe hơi hoạt động. Một ứng dụng khác là an toàn điện: có thể thật nguy hiểm khi phá vỡ một mạch cảm kháng đột ngột, vì quá nhiều năng lượng được giải phóng

trong một thời gian ngắn. Cũng chẳng ai hoan nghênh tia lửa điện phóng qua khe không khí; nó thể đi qua người của bạn, vì cơ thể bạn có điện trở thấp hơn.

Câu hỏi thảo luận

A. Một con chuột cắn mòn mất một trong các dây dẫn của hệ thống thắp sáng DC ở sân trước nhà bạn, và bóng đèn bị tắt. Ngay lúc khi mạch điện trở nên bị hở, chúng ta có thể xem hai đầu trần của dây dẫn giống như hai bản của một tụ điện, với một khe không khí (hay khe chuột) ở giữa chúng. Ở đây chúng ta đang nói tới loại giá trị điện dung nào ? Giá trị đó có cho bạn biết gì về hằng số thời gian RC hay không ?

A. 5 Trở kháng

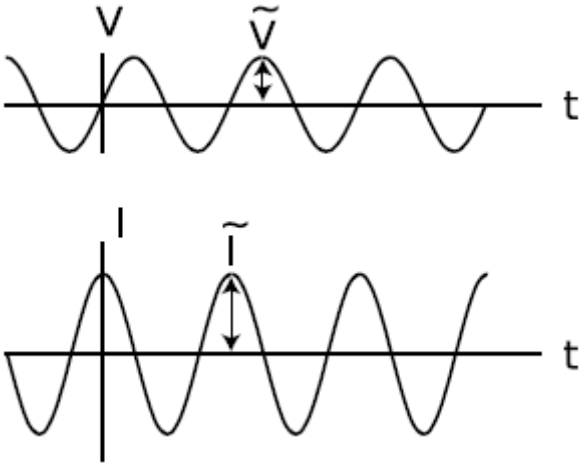
Từ trước đến đây, chúng ta đã nghĩ về các dao động tự do của một mạch điện. Đây giống như một dao động tử cơ học đã được kích thích nhưng sau đó để cho nó tự dao động theo cách riêng của nó mà không có bất kì ngoại lực nào giữ cho dao động không bị tắt dần. Giả sử một mạch LRC được điều khiển bởi một điện thế biến thiên dạng sin, ví dụ như điều xảy ra khi một bộ chỉnh radio xoay với một ăntên thu. Chúng ta biết rằng dòng điện sẽ chạy trong mạch điện, và chúng ta biết rằng sẽ có một hành vi cộng hưởng, nhưng không nhất thiết đơn giản là liên hệ dòng điện với điện thế như trong trường hợp tổng quát nhất. Hãy bắt đầu với những trường hợp đặc biệt của mạch LRC gồm chỉ một điện trở, chỉ một điện dung và chỉ một độ tự cảm. Chúng ta chỉ quan tâm tới sự hưởng ứng trạng thái bền.

Trường hợp điện trở thuần thật dễ. Định luật Ohm cho ta

$$I = \frac{V}{R}$$

Trong trường hợp thuần điện dung, mối quan hệ V = q/C cho ta tính được

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = C\frac{\Delta V}{\Delta t}$$



q/ Trong một tụ điện, dòng điện sớm pha 90^o so với điện thế

Nếu hiệu điện thế biến thiên, chẳng hạn $V(t) = \tilde{V}\,sin(\omega t)$, thì dòng điện sẽ là $I(t) = \omega C\tilde{V}\,cos(\omega t)$, nên dòng điện cực đại là $\tilde{I} = \omega C\tilde{V}$. Bằng cách lấy tương tự với định luật Ohm, chúng ta có thể viết

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{V}}{Z_C}$$

Trong đó đại lượng

$$Z_C = \frac{1}{C\omega} \qquad \text{[trở kháng của tụ điện]}$$

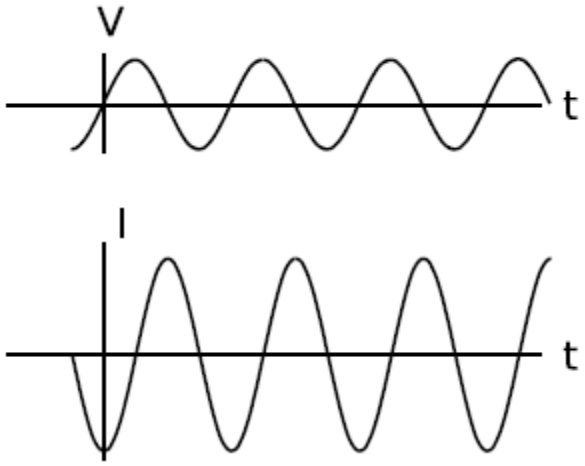
có đơn vị ohm, được gọi là trở kháng của tụ điện ở tần số này. Lưu ý là chỉ có *cực đại* dòng điện, $\tilde{I}$, tỉ lệ với *cực đại* hiệu điện thế, $\tilde{V}$, nên tụ điện không hành xử giống như một điện trở. Cực đại của *V* và *I* xảy ra tại các thời điểm khác nhau, như biểu diễn trên hình q. Cần chú ý rằng trở kháng trở nên vô hạn ở tần số bằng không. Tần số bằng không có nghĩa là cần một thời gian vô hạn trước khi hiệu điện thế biến thiên một lượng bất kì nào đó. Nói cách khác, đây giống như tình huống trong đó tụ điện được nối qua hai cực của một cái pin và được phép ổn định ở một trạng thái trong đó có điện tích không đổi ở cả hai cực. Vì điện trường giữa hai bản là không đổi, nên không có năng lượng nào được thêm vào hay lấy ra khỏi trường. Một tụ điện không thể trao đổi năng lượng với bất kì thành phần mạch điện nào khác không gì hơn là một mạch điện hở.

♥ Tại sao tụ điện không có trở kháng của nó in trên nhãn cùng với điện dung của nó ?

Tính toán tương tự cho ta

$$Z_L = \omega L \qquad \text{[trở kháng của cuộn cảm]}$$

đối với một cuộn cảm. Cần lưu ý rằng cuộn cảm có trở kháng thấp hơn ở tần số thấp hơn, vì ở tần số bằng không, không có sự biến thiên nào ở từ trường theo thời gian. Không có năng lượng thêm vào hay giải phóng từ từ trường, cho nên không có hiệu ứng cảm ứng, và cuộn cảm đóng vai trò như một mẫu dây dẫn có điện trở không đáng kể Thuật ngữ "kháng" dùng cho cuộn cảm ám chỉ khả năng của nó "kháng lại" các tần số cao.



r/ Dòng điện chạy qua cuộn cảm chậm pha 90^o so với hiệu điện thế

Mối quan hệ pha biểu diễn trên hình q và r có thể ghi nhớ bằng cách nhớ riêng của tôi, "eVIL", nghĩa là hiệu điện thế (*V*) đi trước dòng điện (*I*) trong mạch tự cảm, còn điều ngược lại đúng trong mạch điện dung. Cách nhớ thông dụng hơn là "ELI là ICE", trong đó sử dụng kí hiệu E cho suất điện động, một khái niệm quan hệ gần gũi với hiệu điện thế.

Những nội dung chính cần thận trọng với trở kháng là (1) khái niệm chỉ áp dụng cho mạch điện điều khiển dưới dạng sin, (2) trở kháng của cuộn cảm hay tụ điện phụ thuộc vào tần số và, (3) các trở kháng mắc song song hay nối tiếp không kết hợp theo các quy luật như ghép điện trở. Tuy nhiên, người ta có thể khắc phục hạn chế này.

Bài tập

1. Nếu một bộ dò radio FM gồm một mạch LRC chứa một cuộn cảm 1 μH, thì ngưỡng điện dung mà tụ xoay có thể cung cấp sẽ là bao nhiêu ?

2. (a) Chứng minh rằng phương trình $V_L = L\Delta I / \Delta t$ có đơn vị phù hợp.

(b) Xác nhận RC có đơn vị thời gian.

(c) Xác nhận L/R có đơn vị thời gian.

3. Tìm năng lượng dự trữ trong một tụ điện theo điện dung của nó và hiệu điện thế hai đầu của nó.

4. Tìm độ tự cảm của hai cuộn cảm giống hệt nhau mắc song song.

5. Bản thân dây dẫn trong một mạch điện có thể có điện trở, độ tự cảm và điện dung. Độ tự cảm và điện dung "tản lạc" sẽ quan trọng nhất đối với các mạch điện tần số cao hay tần số thấp ? Để cho đơn giản, giả sử dây dẫn tác dụng giống như chúng mắc nối tiếp với một cuộn cảm hoặc một tụ điện.

6. (a) Tìm điện dung của hai tụ điện giống hệt nhau mắc nối tiếp.

(b) Dựa trên kết quả a, bạn sẽ mong đợi điện dung của một tụ bản song song phụ thuộc như thế nào vào khoảng cách giữa hai bản ?

7. Tìm điện dung của bề mặt trái đất, giả sử có một "bản" cầu bên ngoài ở vô cùng (Trong thực tế, bản bên ngoài này chỉ miêu tả một bộ phận xa trong chừng mực nào đó của vũ trụ mà chúng ta mang một số điện tích khỏi đó để tích điện cho trái đất)

8. Bắt đầu từ quan hệ $V = L\Delta I / \Delta t$ cho hiệu điện thế hai đầu một cuộn cảm, hãy chỉ ra rằng cuộn cảm có trở kháng bằng Lω.

An Minh, Xuân Mậu Tý 2008
02/02/2008, 17:15:04