



TUYỂN TẬP ĐỀ THI APHO

PHẦN II: 2012-2019

PGS.TS. NGUYỄN THẾ KHÔI
ĐHSP HÀ NỘI
136 Xuân Thủy, Cầu Giấy, Hà Nội



Mục lục

APhO 13 – 2012 tại Ấn độ	3
Bài lí thuyết I: Sự hấp đối với một nam châm đang rơi	3
Bài lí thuyết II: Giới hạn Chandrasekhar	5
Bài lí thuyết III: Pha Pancharatnam	7
Bài thí nghiệm 1: MA SẮT	10
Bài thí nghiệm 2: CẢM ỨNG ĐIỆN TỪ	14
APhO 14 – 2013 tại Indonesia	21
Lý thuyết 1: Hệ vật dẫn trong chất lỏng	21
Lý thuyết 2: Hiệu chỉnh tương đối tính cho vệ tinh GPS	21
Lý thuyết 3: Physics of Spin	26
THỰC NGHIỆM: NĂNG LƯỢNG GIÓ VÀ CÁC PHÉP ĐO	29
APhO 15 – 2014 tại Singapore	41
Lý thuyết 1	41
Lý thuyết 2	44
Lý thuyết 3	46
BÀI THI THỰC HÀNH	48
Thí nghiệm A	51
Thí nghiệm B	55
Thí nghiệm C	57
Thí nghiệm D	58
APhO 16 – 2015 tại Hangzhou, Trung Quốc	59
Bài toán số 1	59
Bài toán số 2: Gió Mặt Trời đã tạo ra cực quang như thế nào?	62
Bài toán số 3	68
Bài thi thí nghiệm	71
Thí nghiệm A	78
Thí nghiệm B	78
Thí nghiệm C	81
Thí nghiệm D	82
Thí nghiệm E	86
APhO 17 – 2016 tại Hong Kong	87
Câu hỏi lí thuyết – T1: Cơ học mạng có thể biến dạng	87
Câu hỏi lí thuyết – T2	89
Câu hỏi lí thuyết – T3: Các hiệu ứng từ trường trong siêu dẫn	92
Bài thí nghiệm – E1	97

Bài thí nghiệm – E2.....	107
APhO 18 – 2017 tại YAKUTSK Nga	116
Bài lí thuyết 1	116
Bài lí thuyết 2	124
Bài lí thuyết 3	130
Thực nghiệm	136
APhO 19 – 2018 tại Hà Nội, Việt Nam.....	153
Bài lí thuyết 1	153
Bài lí thuyết 2	159
Bài lí thuyết 3	164
Thực nghiệm	171
APhO 20 – 2019 tại Adelaide, Úc.....	185
Bài lí thuyết 1	185
Bài lí thuyết 2	191
Bài lí thuyết 3	197
Thực nghiệm	201

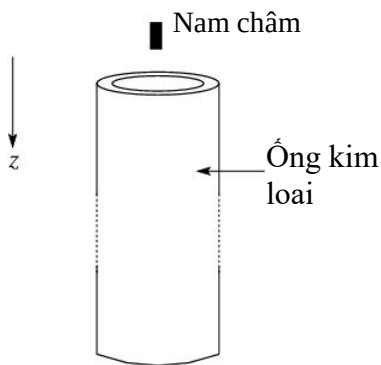
APhO 13 – 2012 tại Ấn độ

Bài lý thuyết I: Sự hãm đối với một nam châm đang rơi

Nhà vật lý người Anh James H. Jeans (1877-1946), trong cuốn sách của ông mang tên “Lý thuyết toán học về điện và từ” (1925), lần đầu tiên đã trình bày rõ ràng và chi tiết về dòng điện xoáy. Bài toán này dựa trên cơ sở điện và từ.



James H. Jeans
(1877-1946)



Một nam châm nhỏ có mômen lưỡng cực từ p và khối lượng m rơi trong lòng một ống kim loại rất dài, không có từ tính, đặt thẳng đứng, như thấy trong Hình 1 (hình không vẽ đúng tỉ lệ). Nhìn chung, sự rơi được mô tả bởi phương trình:

$$m\ddot{z} = mg - k\dot{z} \quad \dots\dots\dots(1)$$

với g là gia tốc trọng trường.

k gọi là tham số hãm. Sự hãm được gây nên bởi dòng điện xoáy xuất hiện trong ống kim loại.

I.1 Xác định vận tốc cuối cùng (v_T) của nam châm.

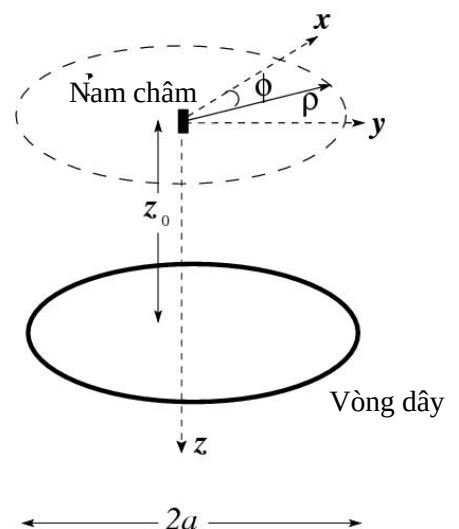
[0.5 điểm]

I.2 Tìm biểu thức $z(t)$, xác định vị trí của nam châm tại thời điểm t .

Lấy $v(t = 0) = 0$ và $z(t = 0) = 0$.

[1.0 điểm]

Ta sẽ tìm hiểu về động lực học của sự rơi. Muốn vậy, ta xét trong các phần từ (I.3) đến (I.8) một bài toán đơn giản về một nam châm rơi về phía một vòng dây cố định, dọc theo trục của vòng dây. Vòng dây làm bằng kim loại không có từ tính, có bán kính a , điện trở R và độ tự cảm L như thấy trên Hình 2. Trong bài toán này, ta bỏ qua các hiệu ứng bức xạ.



Hình 2

Trong trường hợp này, sẽ tiện lợi hơn khi dùng hệ tọa độ trụ (ρ, φ, z) như trên Hình 2, trong đó trục z trùng với trục của vòng dây. Ban đầu, nam châm đứng yên ở gốc tọa độ; tâm vòng dây cách gốc tọa độ một khoảng z_0 . Các trục tọa độ Đề-các (x, y, z) cũng được cho trên hình. Nam châm có momen lưỡng cực $\vec{p}$ hướng theo chiều dương của trục z ($\vec{p} = p\hat{k}$), với $\hat{k}$ là vectơ đơn vị trên trục z . Ta giả thiết rằng trong khi rơi, momen từ của nam châm giữ nguyên hướng. Khi nam châm nằm ở gốc tọa độ, thì từ trường gây bởi nam châm tại một điểm có tọa độ (ρ, φ, z) có thành phần dọc trục (B_z) và thành phần xuyên tâm (B_ρ) được cho bởi:

$$B_z = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{p}{(\rho^2 + z^2)^{3/2}} \left[\frac{3z^2}{\rho^2 + z^2} - 1 \right]$$

$$B_\rho = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3pz\rho}{(\rho^2 + z^2)^{5/2}}$$

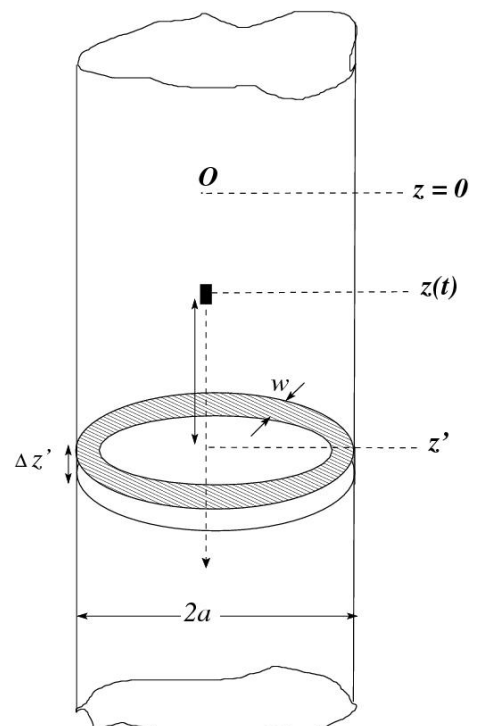
với μ_0 là độ từ thẩm của chân không.

- I.3 Gọi tốc độ tức thời của nam châm là v . Hãy xác định độ lớn suất điện động cảm ứng ($\mathcal{E}_i$) trong vòng dây. **[1.5 điểm]**
- I.4 Suất điện động này gây nên dòng cảm ứng (i) trong vòng dây. Hãy xác định độ lớn của lực điện từ tức thời (f_{em}) tác dụng lên vòng dây theo i . **[1.0 điểm]**
- I.5 Độ lớn của lực mà vòng dây tác dụng lên nam châm bằng bao nhiêu? **[0.5 điểm]**
- I.6 Hãy biểu thị suất điện động trong vòng dây theo L , R và i . Không cần giải để tìm i . **[0.5 điểm]**
- I.7 Khi nam châm rơi, nó mất dần thế năng trọng trường. Hãy chỉ ra ba dạng chính của năng lượng mà thế năng trọng trường chuyển hóa thành, và viết các công thức mà em sẽ dùng nếu cần tính từng dạng năng lượng đó. **[1.0 điểm]**
- I.8 Trong quá trình này, từ trường của nam châm có thực hiện công hay không? Hãy đánh dấu vào ô thích hợp. **[0.5 điểm]**

Tiếp theo, ta ước lượng tham số hãm k cho trường hợp của ống (xem phương trình (1)). Xét ống dài vô hạn, có bán kính a , độ dày nhỏ w , và độ dẫn điện σ . Từ phần này trở đi, ta bỏ qua độ tự cảm của ống. Ta xem ống như được tạo thành từ nhiều vòng dây, mỗi vòng dây có độ cao $\Delta z'$, bán kính a , độ dày rất mỏng w và độ dẫn điện σ (xem Hình 3). Để đơn giản, ta coi hai đầu ống có tọa độ là $z = -\infty$ và $z = \infty$.

- I.9 Tìm điện trở của mỗi vòng dây đó.

[0.5 điểm]



Hình 3

- I.10 Tìm tham số hãm k gây nên bởi toàn bộ ống theo p, σ và các tham số hình học của vòng dây. Vì rằng thành ống rất mỏng, nên có thể coi rằng từ trường là như nhau trong toàn bộ bề dày của vòng và bằng $B_\rho (\rho = a)$. Giả thiết rằng ở thời điểm t , nam châm có tọa độ $z(t)$ và có tốc độ tức thời $\dot{z}$. Em cần viết kết quả dưới dạng một biểu thức có chứa tích phân I , theo biến không thứ nguyên $u = (z - z')/a$.

[2.0 điểm]

- I.11 Giả sử tham số hãm k là hàm số:

$$k = f(\mu_0, p, R_0, a)$$

với R_0 là điện trở hiệu dụng của ống. Bằng cách sử dụng phép phân tích thứ nguyên, hãy tìm biểu thức của k . Lấy hệ số tỉ lệ không thứ nguyên bằng đơn vị.

[1.0 điểm]

Tích phân sau có thể được sử dụng:

$$\int \frac{u du}{(u^2 + a^2)^n} = \frac{1}{2} \frac{(a^2 + u^2)^{1-n}}{1-n} + \text{Constant} \quad (\text{với } n > 1)$$

Chú ý: $\dot{z} = \frac{dz}{dt}$; $\ddot{z} = \frac{d^2z}{dt^2}$

Bài lý thuyết II: Giới hạn Chandrasekhar

Trong công trình nổi tiếng được tiến hành vào năm 1930, nhà vật lý người Ấn độ, giáo sư Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995) đã nghiên cứu tính ổn định của các vì sao. Bài toán này sẽ giúp em hình thành một phương án đơn giản hóa những phân tích của ông.

Em có thể thấy những kí hiệu và giá trị sau là có ích.

Tốc độ ánh sáng trong chân không	$c = 3.00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
Hằng số Planck	$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
Hằng số hấp dẫn	$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$
Khối lượng nghỉ của electron	$m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Khối lượng nghỉ của proton	$m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$



S. Chandrasekhar
(1910-1995)

- II.1. Xét một sao dạng cầu với mật độ đồng nhất, bán kính R và khối lượng M . Hãy thiết lập biểu thức tính thế năng hấp dẫn của ngôi sao (E_G) gây ra bởi trường hấp dẫn của chính nó (năng lượng tự hấp dẫn).

[1.0 đ]

- II.2. Ta giả sử rằng ngôi sao được cấu tạo hoàn bởi hidro và tất cả các nguyên tử hidro đều đã bị ion hóa. Ta xét tình huống trong đó, sự tạo ra năng lượng từ phản ứng nhiệt hạch đã chấm

dứt. Các electron tuân theo nguyên lí loại trừ Pauli và năng lượng toàn phần của chúng được tính theo thống kê lượng tử, theo đó, năng lượng toàn phần của các electron (bỏ qua năng lượng của các proton) là:

$$E_e = \frac{\hbar^2 \pi^3}{10 m_e 4^{2/3}} \left(\frac{3}{\pi} \right)^{7/3} \frac{N_e^{5/3}}{R^2}$$

trong đó N_e là tổng số electron và $\hbar = h/2\pi$.

Hãy tìm điều kiện cân bằng của ngôi sao, liên hệ bán kính R_{wd} với khối lượng của ngôi sao. Bán kính này được gọi là bán kính “Sao lùn trắng” (White Dwarf radius).

[2.0 điểm]

- II.3.** Tính giá trị bằng số của R_{wd} . Cho biết ngôi sao này có cùng khối lượng với Mặt Trời, là $M_S = 2.00 \times 10^{30} \text{ kg}$.

[1.5 điểm]

- II.4.** Giả thiết rằng electron phân bố đều, hãy ước tính độ lớn của khoảng cách trung bình giữa các electron (r_{sep}), nếu bán kính của sao là R_{wd} như đã thu được từ phần (II.3).

[1.0 điểm]

- II.5.** Ta hãy ước tính tốc độ của electron. Muốn vậy, giả thiết rằng mỗi electron tạo thành một sóng dừng trong hộp một chiều với cạnh r_{sep} . Sử dụng giả thuyết De Broglie, hãy ước tính tốc độ (v) của electron ở trạng thái năng lượng thấp nhất.

[1.0 điểm]

- II.6.** Bây giờ, ta xét một tình huống khác của cách phân tích có trong phần II.2. Ta xét electron trong giới hạn siêu tương đối ($E = pc$), với phân tích tương tự ta thu được:

$$E_e^{rel} = \frac{\pi^2}{4^{4/3}} \left(\frac{3}{\pi} \right)^{5/3} \frac{\hbar c}{R} N_e^{4/3}$$

Hãy tìm biểu thức cho khối lượng của ngôi sao, để nó đạt trạng thái cân bằng, theo các hằng số đã cho ở đầu bài. Ta gọi khối lượng này là khối lượng tới hạn (M_c).

[1.5 điểm]

- II.7.** Nếu khối lượng M của ngôi sao lớn hơn khối lượng tới hạn M_c nhận được ở phần (II.6), hãy cho biết ngôi sao đó dẫn nổ hay co lại. Hãy đánh dấu vào ô thích hợp.

[0.5 điểm]

- II.8.** Hãy ước tính giá trị bằng số của khối lượng tới hạn này theo đơn vị là khối lượng mặt trời (M_S).

(Chú ý: Đáp án của em có thể khác với kết quả nổi tiếng của Chandrasekhar do ta đã dùng các phép gần đúng trong khi phân tích).

[1.5 điểm]

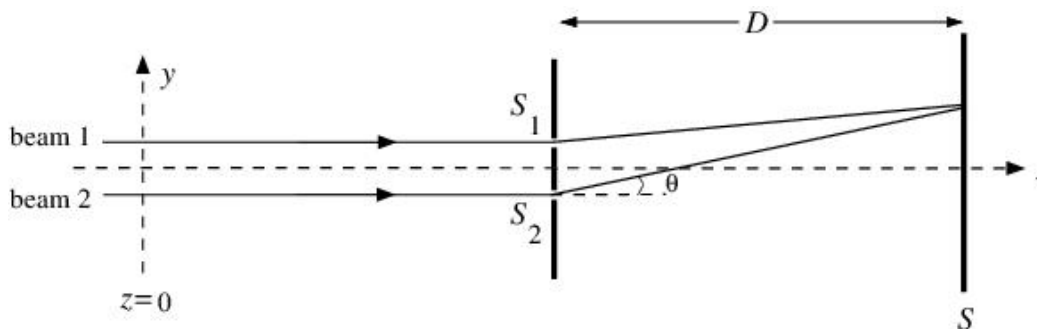
Bài lý thuyết III: Pha Pancharatnam

Bài toán này xét hiện tượng liên quan đến hai chùm tia sáng: sự giao thoa, phân cực và chồng chất của chúng. Một trường hợp riêng của bài toán này đã được nghiên cứu bởi nhà vật lý Ấn Độ t S. Pancharatnam (1934–1969).



S. Pancharatnam
(1934–1969)

Xét thí nghiệm được thấy trên Hình 1. Hai chùm sáng đơn sắc kết hợp (gọi là chùm 1 và chùm 2), truyền theo phương z , đi đến hai khe hẹp cách nhau một khoảng d ($S_1S_2 = d$). Sau khi đi qua khe, hai chùm tia giao thoa và hình ảnh giao thoa được quan sát trên màn S . Khoảng cách giữa các khe là D , với $D \gg d$. Giả thiết rằng độ rộng của các khe S_1 và S_2 nhỏ hơn nhiều so với bước sóng ánh sáng.



III.1. Cho chùm tia 1 và 2 là các chùm tia phân cực thẳng tại $z = 0$. Các vector điện trường tương ứng là

$$\vec{E}_1 = \hat{i}E_0 \cos(\omega t) \quad \dots\dots\dots(1a)$$

$$\vec{E}_2 = \hat{i}E_0 \cos(\omega t) \quad \dots\dots\dots(1b)$$

trong đó, $\hat{i}$ là vector đơn vị trên trục x , ω là tần số góc của ánh sáng và E_0 là biên độ. Hãy tìm biểu thức của cường độ sáng $I(\theta)$, mà ta quan sát thấy trên màn, trong đó θ là góc được chỉ ra trên Hình 1. Hãy biểu thị đáp án theo θ, d, E_0, c và , trong đó c là tốc độ ánh sáng. Cũng cần chú ý rằng cường độ sáng tỉ lệ với trị trung bình theo thời gian của bình phương cường độ điện trường. Ở đây, em có thể lấy hệ số tỉ lệ bằng β . Em có thể bỏ qua sự giảm dần của cường độ điện trường theo khoảng cách từ các khe đến mọi điểm trên màn.

[1.0 điểm]

III.2. Một tấm thủy tinh hoàn toàn trong suốt, có độ dày w và chiết suất μ được đưa vào đường đi của chùm 1, ở trước các khe. Hãy tìm biểu thức cho cường độ sáng $I(\theta)$ mà ta quan sát được trên màn. Biểu thị đáp án của em theo $\theta, d, E_0, c, \omega, \mu$ và w .

[1.0 điểm]

III.3. Một dụng cụ quang học có tên là bản phần tư sóng (quarter wave plate (QWP)) được đưa vào đường đi của chùm 1, phía trước các khe, thay chỗ cho tấm thủy tinh. Dụng cụ này biến đổi sự phân cực của chùm từ trạng thái phân cực thẳng

$$\vec{E}_1 = \hat{i}E_0 \cos(\omega t)$$

sang trạng thái phân cực tròn, được cho bởi

$$\vec{E}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} [\hat{i}E_0 \cos(\omega t) + \hat{j}E_0 \sin(\omega t)] \quad \dots\dots\dots(2)$$

trong đó, $\hat{j}$ là vectơ đơn vị trên trục y .

Giả sử rằng dụng cụ này không làm thay đổi quang trình, và nó hoàn toàn trong suốt. Chú ý rằng đầu mút của vectơ điện trường vạch một đường tròn khi thời gian trôi đi, và do đó, ta nói chùm phân cực tròn. Ta giả sử rằng góc θ là đủ nhỏ để cho cường độ từ khe 1 không phụ thuộc vào góc θ kể cả với phân cực $\hat{j}$.

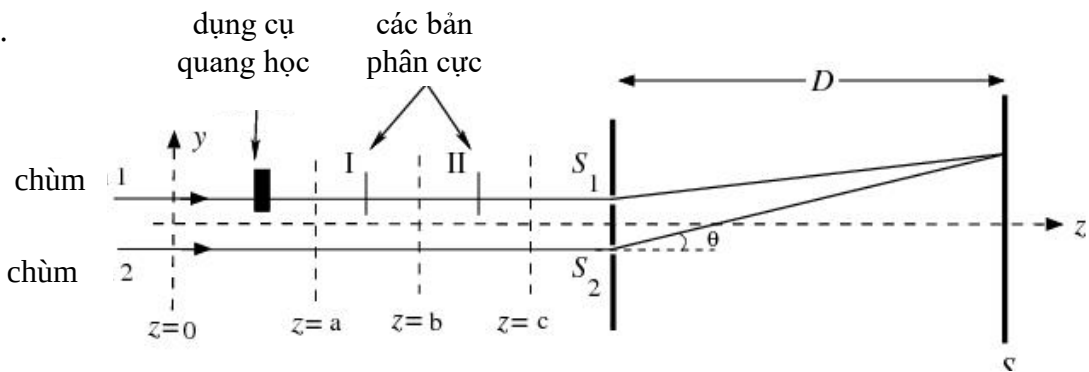
III.3.a. Hãy tìm biểu thức cho cường độ sáng $I(\theta)$ mà ta quan sát được trên màn. Biểu thị đáp án theo θ, d, E_0, c và ω .

III.3.b. Hãy xác định cường độ sáng cực đại I_{max} .

III.3.c. Hãy xác định cường độ sáng cực tiểu I_{min} .

[2.0 điểm]

III.4.



Hình 5

Bây giờ, ta xét thí nghiệm (xem Hình 2), trong đó, trên đường đi của chùm 1, có:

- dụng cụ quang học (QWP) đã được mô tả ở phần 3 và,
- một bản phân cực thẳng (kí hiệu là I), ở khoảng giữa $z = a$ và $z = b$; nó chỉ cho đi qua nó thành phần của điện trường song song với một trục, ở đây là trục $\hat{i}'$. Vectơ đơn vị $\hat{i}'$ được định nghĩa là

$$\hat{i}' = \hat{i} \cos \gamma + \hat{j} \sin \gamma$$

và,

- một bản phân cực thẳng nữa (kí hiệu là II) ở khoảng giữa $z = b$ và $z = c$; bản này làm cho chùm sáng phân cực trở lại phương ban đầu $\hat{i}$.

Như vậy, chùm 1 lại quay trở lại trạng thái phân cực ban đầu. Giả sử rằng các bản phân cực không làm thay đổi quang trình, và chúng hoàn toàn trong suốt.

III.4.a. Hãy viết biểu thức cường độ điện trường của chùm 1 ở phía sau của bản phân cực thứ nhất, tại $z = b$, tức là $[\vec{E}_1(z = b)]$.

III.4.b. Hãy viết biểu thức cường độ điện trường của chùm 1 ở phía sau của bản phân cực thứ hai, tại $z = c$, tức là $[\vec{E}_1(z = c)]$.

III.4.c. Hãy xác định hiệu số pha (α) giữa hai chùm tại vị trí các khe.

[2.0 điểm]

Dạng phân cực tổng quát nhất là phân cực elip. Một cách thuận tiện để biểu diễn phân cực elip là coi nó như chồng chất của hai thành phần phân cực thẳng vuông góc với nhau, tức là:

$$\vec{E} = \hat{i}' E_0 \cos e \cos(\omega t) + \hat{j}' E_0 \sin e \sin(\omega t) \dots\dots\dots (3) \quad \text{v\grave{a}} \quad \hat{j}'$$

và trạng thái phân cực này được mô tả trên Hình 3.

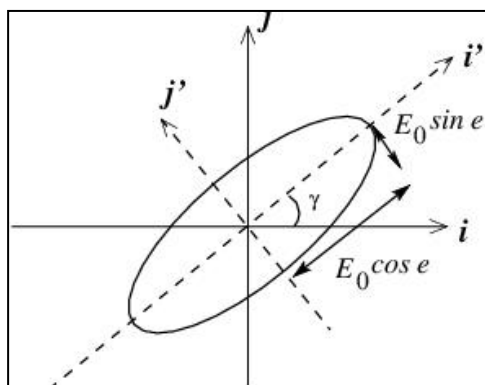


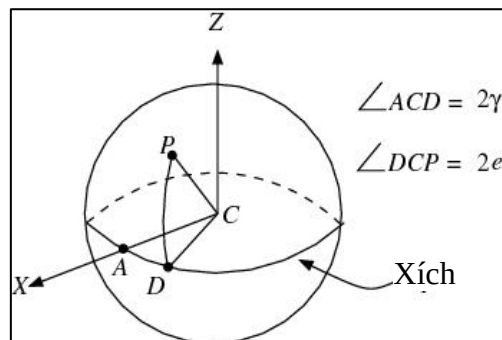
Figure 6

Đầu mút của vector điện trường vạch nên một đường elip khi thời gian trôi đi. Ở đây, e biểu thị độ elip và được cho bởi:

$$\tan e = \frac{\text{Bán trục nhỏ của elip}}{\text{Bán trục lớn của elip}}$$

Phân cực thẳng (phương trình (1)) và phân cực tròn (phương trình (2)) là những trường hợp riêng của phân cực elip (phương trình (3)). Hai tham số $\gamma (\in [0, \pi])$ và $e (\in [-\pi/4, \pi/4])$ mô tả đầy đủ trạng thái phân cực.

Trạng thái phân cực cũng có thể được biểu diễn bằng một điểm trên một mặt cầu có bán kính bằng đơn vị, gọi là mặt cầu Poincare. Sự phân cực của chùm sáng được mô tả ở phương trình (3) được biểu diễn bởi điểm P trên mặt cầu Poincare (xem Hình 4), với vĩ độ $\angle PCD = 2e$ và kinh độ $\angle ACD = 2\gamma$. Ở đây, C là tâm mặt cầu.



Hình 7

III.5. Xét một điểm trên xích đạo của mặt cầu Poincare.

III.5.a. Hãy viết vector điện trường ($\vec{E}_{\text{Eq}}$) ứng với điểm đó.

III.5.b. Trạng thái phân cực của nó là thế nào?

[0.5 điểm]

III.6. Xét một điểm ở cực bắc của mặt cầu Poincare.

III.6.a Hãy viết vector điện trường ($\vec{E}_{NP}$) ứng với điểm đó.

III.6.b

[0.5 điểm]

III.7. Bây giờ, xét ba trạng thái phân cực của chùm 1 như đã cho ở phần 4. Ta biểu diễn phân cực ban đầu (ở $z = 0$) bằng điểm A_1 trên mặt cầu Poincare; ta biểu diễn trạng thái sau dụng cụ quang học, (ở $z = a$) bằng điểm A_2 , và biểu diễn trạng thái sau bản phân cực thứ nhất (chẳng hạn, ở $z = b$) bằng điểm A_3 . Ở $z = c$, phân cực trở về trạng thái ban đầu, được biểu diễn bằng điểm A_1 . Hãy xác định vị trí của ba điểm này (A_1, A_2 , và A_3) trên mặt cầu Poincare.

[1.5 điểm]

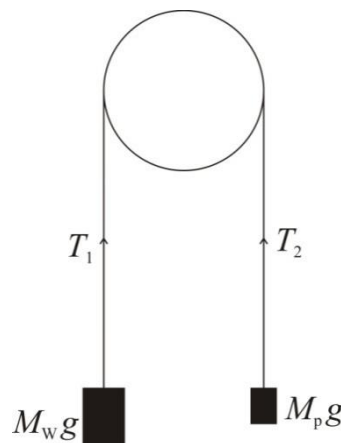
III.8. Nếu ta nối ba điểm (A_1, A_2 , và A_3) thu được ở phần (III.7) với nhau bằng các đường tròn lớn trên mặt cầu, thì ta thu được một tam giác cong trên mặt cầu. (Chú ý: Đường tròn lớn là đường tròn trên mặt cầu mà tâm của nó trùng với tâm mặt cầu). Hiệu số pha α thu được ở phần 4 và diện tích S của phần mặt cầu nằm trong tam giác cong có quan hệ với nhau. Hãy tìm mối quan hệ giữa S và α .

Hệ thức này là tổng quát và đã được Pancharatnam tìm ra. Hiệu số pha được gọi là *pha Pancharatnam*.

[1.5 điểm]

Bài thí nghiệm 1: MA SÁT

Nếu một sợi dây vắt qua một trục hoặc một ống và sức căng ở hai đoạn dây hai bên là khác nhau, thì ma sát giữa dây và trục đóng vai trò kiểm soát sự chuyển động của dây (Hình 1). Ta đã biết rằng, để giữ một vật treo được ở một đầu của sợi dây, ta cần tác dụng lên đầu kia của dây một lực tối thiểu nhỏ hơn trọng lượng của vật đó, nhờ có lực ma sát. Nếu tăng số vòng dây quấn quanh trục, thì lực cần để giữ vật sẽ giảm đi rất mạnh. Các thủy thủ đã biết sử dụng ý tưởng này để hãm sự chuyển động của các con tàu bằng cách quấn dây thừng nhiều vòng vào các trụ ở bến tàu.



Hình 1

Mục đích:

Để khảo sát mối quan hệ của ba đại lượng: tải trọng $W (=M_w g)$, lực tối thiểu $P (=M_p g)$ cần để giữ cho hệ ở trạng thái cân bằng và góc θ được trưng bởi phần của sợi dây tiếp xúc với một hoặc

vài trụ, ta thay đổi các đại lượng này một cách hệ thống và biểu diễn mối quan hệ cần tìm dưới dạng một phương trình.

Dụng cụ:

Số thứ tự	Tên	Số lượng
1	Thiết bị gồm bốn đoạn ống thép đặt cố định ở bốn cạnh tấm gỗ hình vuông và một ống thẳng đứng ở tâm tấm gỗ.	1
2	Một tấm nhựa (có các đường kẻ cách nhau 1.5 mm) được gắn trước một trong các ống nằm ngang.	1
3	Một giỏ nhựa có khung treo với khối lượng (M_{pan}) được ghi trên giỏ.	1
4	Một kính lúp có đèn pin.	1
5	Sợi dây mảnh, màu trắng có những vạch dấu xanh (gọi là dây kéo).	2 sợi
6	Một sợi dây màu hồng	1 sợi
7	Một hộp quả cân gồm những quả sau:	
	500.0 g	1
	200.0 g	2
	100.0 g	1
	50.0 g	1
	20.0 g	2
	10.0 g	1
	5.0 g	1
	2.0 g	2
	1.0 g	1
8	Một vật có khối lượng chưa biết, M_u	1
9	Một móc treo các quả cân có khe (mỗi quả 100.0 g và khối lượng tổng cộng là 800.0 g)	1
10	Một mảnh vải lau	1

Công tắc màu xanh dùng để bật- tắt đèn ON/OFF. Tấm nhựa có các đường kẻ giúp nhận biết sự chuyển động của sợi dây. Các đường kẻ trên tấm nhựa này được coi như những vật làm mốc để quan sát sự dịch chuyển của sợi dây.

		
Hình 2(a) Các ống thép được gắn trên tấm gỗ vuông	Hình 2(b) Hộp đựng quả cân	Hình 2. Giỏ nhựa
		
Hình 2(d) Dây kéo	Hình 2(e) Dây hồng	Hình 2(f). Kính lúp có đèn pin
		
Hình 2(g) Vật có khối lượng chưa biết, M_u	Hình 2(h) Các quả cân có khe và móc treo	Hình 2(i) Toàn bộ thiết bị thí nghiệm

Tiến hành thí nghiệm:

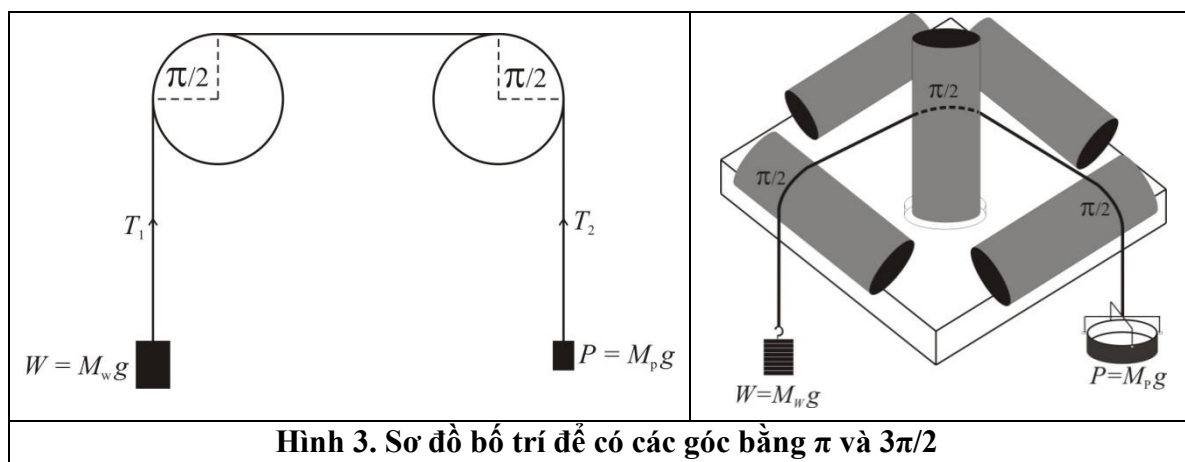
Chú ý: Không chạm vào bề mặt của các ống mà sợi dây tựa vào. Bất kì vật liệu nào có dính dầu mỡ cũng có thể làm thay đổi hệ số ma sát của bề mặt mà nó chạm vào (bề mặt của ống và của sợi dây). Nếu cần, có thể dùng vải được cấp để lau.

Phần 1:

(Chú ý: Dùng sợi dây kéo trong phần này.)

Dùng giá treo với các quả cân có khe để làm tải trọng M_w . Mắc tải trọng vào một đầu của dây kéo được cấp (khối lượng của dây có thể bỏ qua) và giỏ (có khối lượng đã biết) vào đầu kia. Các em

cũng được cấp một hộp đựng quả cân. Có thể thay đổi góc θ tương bởi sợi dây bằng cách vắt sợi dây đi qua phía trên hoặc quấn quanh hai hay nhiều ống đã cho (xem Hình 3).



Góc θ nhỏ nhất thu được khi sợi dây đi qua hai ống song song nhau mà không chạm vào ống thẳng đứng ở giữa. (Hình 3). Bằng cách quấn sợi dây quanh ống thẳng đứng và vắt dây treo giỏ qua các ống khác nhau, có thể thay đổi góc θ từng bước bằng $\pi/2$. Tải trọng M_w luôn được treo vào ống có gắn tấm nhựa kẻ vạch.

Để tăng góc θ , sợi dây cần được quấn quanh ống thẳng đứng. Để quan sát xem sợi dây treo tải trọng có trượt trên mặt ống hay không, ta dùng tấm nhựa trong suốt có kẻ vạch. Em có thể dùng kính lúp gắn đèn pin để quan sát xem sợi dây có trượt hay không. Cách tốt nhất là ghi lại khối lượng giữ M_p khi tải trọng M_w bắt đầu bị trượt xuống (thắng lực ma sát nghỉ). Tuy nhiên, ta không làm được như vậy. Thay vào đó, ta có thể xác định khoảng $[M_{p-}, M_{p+}]$ mà trong đó có giá trị M_p cần tìm. Độ rộng của khoảng này cho biết độ bất định (**sai số**) về giá trị của M_p , ta cần xác định nó càng nhỏ càng tốt.

Với $\theta = \pi$, hãy tiến hành quan sát trên một khoảng càng rộng càng tốt với các quả cân được cấp. Hãy ước lượng các độ bất định trong các phép đo. Hãy vẽ các đồ thị cần thiết và kết hợp các kết quả từ các đồ thị để thu được phương trình mong muốn. Trên cơ sở phân tích các dữ liệu thu được, em hãy viết mối quan hệ định lượng cho giá trị của P theo W và θ . Giá trị của P cũng phụ thuộc vào ma sát giữa dây và ống. Trong phương trình thu được, hãy xác định đại lượng đặc trưng cho ma sát và gọi nó là hệ số ma sát μ cho hệ đang xét. Hãy xác định độ bất định mở rộng của giá trị này.

Phần 2:

(Chú ý: Hãy dùng sợi dây màu hồng trong phần này)

Em được cấp một vật có khối lượng M_u chưa biết và một sợi dây màu hồng. Hãy treo vật có khối lượng chưa biết vào một đầu của sợi dây màu hồng, và treo giỏ vào đầu kia. Hãy viết các phương trình cần thiết để xác định M_u và μ_u . Với $\theta = \pi$, hãy tiến hành các quan sát cần thiết để xác định

khối lượng của vật và hệ số ma sát giữa dây màu hồng và ống, bằng cách dùng các hệ thức đã thu được qua thí nghiệm. Hãy ước tính độ bất định mở rộng của các kết quả thu được.

Ghi chú về cách ước tính độ bất định

- 1) Nếu ta quan sát thấy độ lớn X của một đại lượng nằm đâu đó trong khoảng $[X_1, X_2]$, và xác suất để nó có giá trị bất kì trong khoảng đó là như nhau, thì ta nói rằng phân bố xác suất là đồng nhất hay hình chữ nhật. Độ bất định chuẩn cho phân bố như vậy được cho bởi
$$\frac{|X_1 - X_2|}{2\sqrt{3}}.$$
- 2) Sau khi ước tính độ bất định chuẩn tổ hợp của một đại lượng đo được gián tiếp, kết quả được viết kèm theo độ bất định mở rộng. Độ bất định mở rộng được lấy bằng hai lần độ bất định chuẩn tổ hợp, khi đó độ tin cậy khoảng 95 %. Con số chỉ độ bất định mở rộng được làm tròn lên, để (thường) chỉ giữ lại một chữ số, còn con số chỉ độ lớn của đại lượng đo được được làm tròn, chỉ giữ lại số chữ số thích hợp, sao cho chữ số cuối cùng bên phải có cùng bậc với độ bất định mở rộng.

Bài thí nghiệm 2: CẢM ỨNG ĐIỆN TỪ

Kĩ thuật hiện đại dùng dòng điện xoay chiều để phát hiện các sai hỏng phía dưới bề mặt của các vật bằng kim loại dựa trên nguyên tắc cảm ứng điện từ. Dòng điện cảm ứng chạy trong các vật dẫn điện, do sự biến thiên của từ thông tại nơi đặt chúng gây nên, được gọi là dòng điện xoáy. Các sai hỏng được phát hiện thông qua việc quan sát những thay đổi của điện trở và độ tự cảm của một cuộn dây có dòng điện xoay chiều đi qua, khi cuộn dây được đặt ở gần bề mặt của vật.

Từ thông ϕ qua cuộn dây tỉ lệ với dòng điện i chạy trong cuộn dây, trừ trường hợp cuộn dây có lõi bằng vật liệu sắt từ. Hệ số tỉ lệ được gọi là độ tự cảm của cuộn dây và kí hiệu bằng L . Suất điện

động tự cảm trong một cuộn dây có độ tự cảm L được cho bởi $-L \frac{di}{dt}$.

Trong một hệ gồm hai mạch điện liên kết với nhau, nếu trong một mạch có dòng điện i_1 , thì từ thông qua mạch đó được cho bởi

$$\phi_1 = L_1 i_1 + M_{21} i_2$$

trong đó, L_1 là độ tự cảm của mạch này, còn M_{21} là độ hồ cảm của hai mạch.

Ta có hệ thức tương tự cho mạch thứ hai, và $M_{12} = M_{21}$

Đoạn mạch L-R

Dòng điện xoay chiều hình sin với tần số góc ω , khi chạy qua đoạn mạch nối tiếp gồm một điện trở R và một cuộn cảm L , gây nên một điện áp ở hai đầu đoạn mạch.

Nếu ta biểu diễn dòng điện là $i = I_0 \sin \omega t$, thì điện áp ở hai đầu điện trở là $I_0 R \sin \omega t$ và điện áp ở hai đầu cuộn cảm là $I_0 \omega L \cos \omega t$. Ta có thể kết hợp lại để thu được điện áp giữa hai đầu đoạn mạch có R - L mắc nối tiếp. Đại lượng ωL được gọi là cảm kháng và được kí hiệu bằng X . Ta có thể chứng minh rằng điện áp ở hai đầu đoạn mạch là $I_0 Z \sin (\omega t + \theta)$, trong đó

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (1)$$

và

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \right) \quad (2)$$

Điện áp và dòng điện xoay chiều biến thiên liên tục về độ lớn và về dấu theo thời gian, nhưng giá trị hiệu dụng của các đại lượng này không phụ thuộc thời gian, và ta có hệ thức $V = IZ$ trong đó V và I là các giá trị hiệu dụng, tương tự như định luật Ôm. Từ đó, ta thấy rằng

$$V^2 = (IR)^2 + (IX)^2 \quad (3)$$

(Chú ý: Khái niệm điện trở của một mạch điện liên quan đến sự tiêu tán năng lượng điện trong mạch, và giá trị điện trở của một cuộn dây trong mạch điện xoay chiều có thể khác với giá trị của nó khi ta đo với dòng điện một chiều, bằng cách áp dụng định luật Ôm.)

Khi có thêm điện trở hoặc/và cuộn cảm mắc nối tiếp với một cuộn dây, ta vẫn có thể lấy điện áp hai đầu đoạn mạch bằng căn bậc hai của tổng bình phương điện áp trên điện trở toàn phần và bình phương điện áp trên cuộn cảm toàn phần.

Đo độ tự cảm và điện trở của một cuộn dây

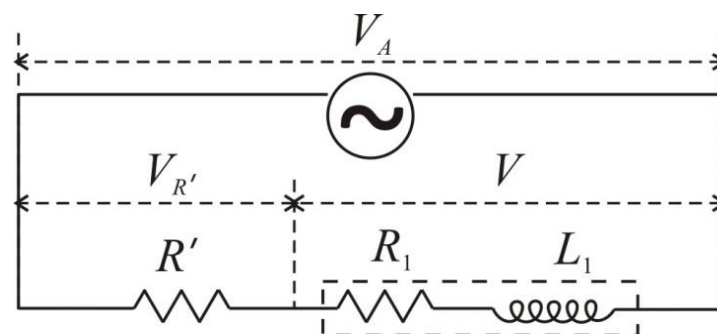
Để đo dòng điện và điện áp xoay chiều, thường người ta dùng các giá trị hiệu dụng. Từ các phương trình (2) và (3), ta có

$$V \cos \theta = IR \quad (4)$$

và

$$V \sin \theta = IX \quad (5)$$

Để thu được các giá trị R và L của cuộn dây, ta có thể dùng các phương trình trên. Ta có thể đo điện áp V và dòng điện I . Nhưng, vì ta có ba đại lượng chưa biết là θ , R và X , nên ta cần có thêm một phương trình nữa.



Hình 1

Nếu điện áp ở hai đầu đoạn mạch nối tiếp, gồm một điện trở đã biết R' và cuộn dây, là V_A , thì hệ thức giữa điện áp V_A đặt vào đoạn mạch, điện áp $V_{R'}$ đặt vào điện trở R' , điện áp V đặt vào cuộn dây, và góc θ là

$$V_A^2 = V_{R'}^2 + V^2 + 2V_{R'}V \cos \theta \quad (6)$$

Tất cả các đại lượng trong phương trình (6), trừ θ đều có thể đo được.

Như vậy, bằng cách đo ba điện áp V_A , $V_{R'}$ và V , và dùng phương trình (4), (5) và (6), ta có thể xác định được θ , R và X . Biết tần số của dòng điện xoay chiều, có thể tính được L .

Ngoài ra, từ các phương trình (4) và (6), ta có thể biểu thị giá trị của R theo ba điện áp đo được như sau

$$R = \left(\frac{R'}{2} \right) \left[\frac{V_A^2 - V^2}{V_{R'}^2} - 1 \right] \quad (7)$$

Trở kháng Z của cuộn dây có thể tính được từ công thức $Z = \frac{V}{V_{R'}} R'$ và giá trị của X được tính theo

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (1A)$$

Mạch liên kết

Năng lượng do nguồn cung cấp cho cuộn sơ cấp bị tiêu tán một phần trong cuộn sơ cấp, phần còn lại bị tiêu tán trong các cuộn thứ cấp được liên kết bằng hồ cảm với cuộn sơ cấp. Khi không có công cơ học được sản ra, sự tiêu tán năng lượng chỉ xảy ra trong các điện trở. Các cuộn cảm dự trữ năng lượng trong từ trường do chúng gây ra. Với dòng điện I (giá trị hiệu dụng) năng lượng trung bình dự trữ trong cuộn cảm L là $\frac{1}{2}LI^2$.

Khi một dòng điện chạy trong cuộn thứ cấp, suất điện động cảm ứng do nó gây ra trong cuộn sơ cấp làm thay đổi dòng điện trong cuộn sơ cấp. Nếu nhìn từ phía cuộn sơ cấp, ta thấy hiện tượng này là kết quả của sự thay đổi điện trở hiệu dụng và trở kháng hiệu dụng của cuộn sơ cấp, mà không cần biết đến các tham số của mạch thứ cấp. Tổng năng lượng tiêu tán trong cuộn sơ cấp và trong cuộn thứ cấp được coi như tiêu tán trên điện trở hiệu dụng khi ta xét từ phía cuộn sơ cấp.

Giá trị của điện trở hiệu dụng R_{PE} và độ tự cảm hiệu dụng L_{PE} của cuộn sơ cấp có thể liên hệ với điện trở ‘phản hồi’ R_R và độ tự cảm ‘phản hồi’ L_R từ phía cuộn thứ cấp. Công suất (trung bình) tiêu tán trên điện trở phản hồi R_R trong cuộn sơ cấp phải bằng công suất tiêu tán trên điện trở R_S trong mạch thứ cấp. Tức là

$$I_P^2 R_R = I_S^2 (R_S + R_L) \quad (8)$$

Tương tự, ta có thể liên hệ độ tự cảm phản hồi L_R với độ tự cảm L_S của cuộn thứ cấp như sau

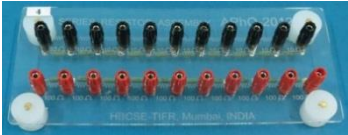
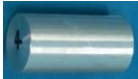
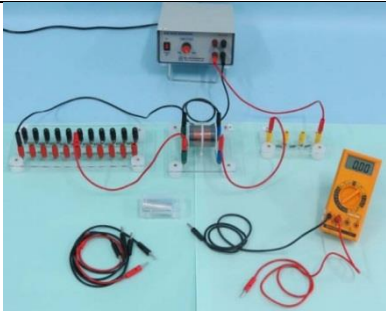
$$\frac{1}{2} L_R I_P^2 = \frac{1}{2} L_S I_S^2 \quad (9)$$

Để ý rằng suất điện động cảm ứng trong cuộn thứ cấp, được gây nên bởi dòng điện xoay chiều I_p trong cuộn sơ cấp, có độ lớn là ωMI_p , ta có thể viết phương trình ứng với định luật Kirchhoff đối với mắt mạng cho dòng điện trong cuộn thứ cấp theo các giá trị hiệu dụng của dòng điện trong cuộn sơ cấp và cuộn thứ cấp như sau

$$\omega MI_p = I_s Z_s \quad (10)$$

trong đó, Z_s là trở kháng của mạch thứ cấp. Khi trở kháng của mạch thứ cấp là vô cùng lớn, suất điện động hồ cảm chính là bằng điện áp ở hai đầu của cuộn thứ cấp khi mạch hở.

DỤNG CỤ:

			
Bảng điện trở	Dây nối	Máy đo đa năng	Hai cuộn dây cuốn lồng vào nhau
			
Máy phát hình sin	Bảng điện trở	Thanh nhôm	Toàn bộ các dụng cụ

Các dụng cụ được cấp cho thí nghiệm này như sau.

1. Máy phát hình sin có điện áp lối ra khoảng 10 V (hiệu dụng) ở tần số 1000 Hz
2. Máy đo đa năng (DMM) được dùng làm vôn kế
3. Một bộ hai cuộn dây được quấn đồng trục trên một lõi rỗng không dẫn điện, không có từ tính.
4. Một thanh bằng nhôm, có thể đưa vào lòng cuộn dây.

5. Hai dây, mỗi dây gồm 10 điện trở, lắp trên một bảng bằng nhựa: một dây gồm các điện trở $100\ \Omega$, một dây gồm các điện trở $10\ \Omega$, cùng với các đầu nối điện.
6. Giá trị cần thiết của điện trở tải R_L hoặc điện trở mẫu R' có thể thu được bằng cách dùng bảng điện trở này và các dây nối. Một bảng điện trở nữa, có chứa điện trở $300\ \Omega$, có thể được dùng làm điện trở mẫu khi bảng kia được dùng cho điện trở tải.
7. Một bộ 5 dây đỏ và 5 dây đen có phích cắm ở đầu (cặp dây đỏ-đen dài được dùng để mắc vào máy đo đa năng).

Lõi ra của máy phát hình sin tần số $1000\ \text{Hz}$ được dùng làm nguồn điện áp xoay chiều. Hãy dùng thang $20\ \text{V}$ trên máy đo đa năng để đo các điện áp xoay chiều hiệu dụng.

Độ lớn của các dòng điện I_P và I_S , khi cần đến, được tính từ các điện áp ở trên các điện trở có giá trị đã biết R' ở mạch sơ cấp và R_L ở mạch thứ cấp.

THÍ NGHIỆM

PHẦN 1: Xác định điện trở và độ tự cảm của một cuộn dây có lõi không khí và lõi nhôm (Al) [3.4]

Nối cuộn 1 (các chốt màu xanh lam) nối tiếp với một điện trở R' (được lấy từ bảng điện trở) vào hai chốt ra của máy phát hình sin. Máy phát hình sin cần được bật trước khi làm thí nghiệm để tín hiệu ở lõi ra được ổn định. Không tắt máy phát. Giữ cho điện áp ra luôn cực đại (Máy đo đa năng phải chỉ điện áp lõi ra khoảng $10\ \text{V}$).

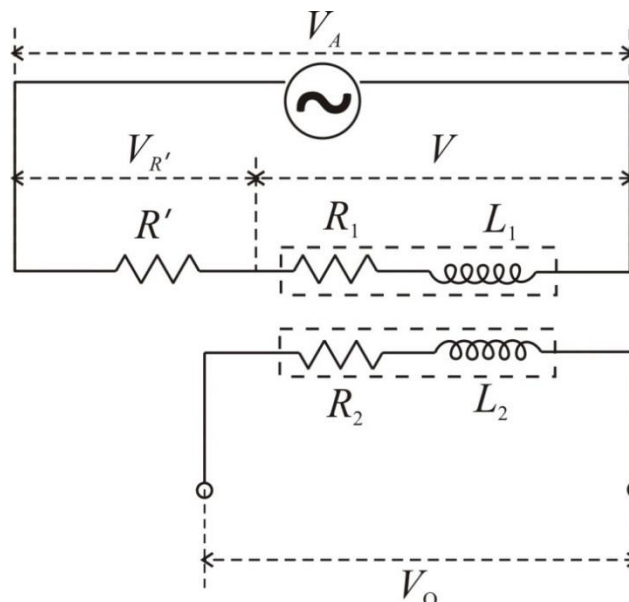


Fig.2

Tín hiệu xoay chiều ở lõi ra của máy phát có thể hơi không đối xứng. Trong trường hợp này, số chỉ của máy đo đa năng sẽ hơi khác nhau khi ta đổi chỗ hai dây nối vào chốt ‘V/Ω’ và ‘com’. Để sửa sai sót do sự không đối xứng, cần lặp lại phép đo bằng cách đổi chỗ hai dây nối vào máy đo đa năng và lấy giá trị trung bình của hai lần đo.

Chọn giá trị của R' sao cho $V_{R'}$ và V gần bằng nhau, để cho sai số hệ thống của Z là không đáng kể và có thể được bỏ qua.

a) Đo các điện áp V_A , $V_{R'}$ và V , cùng với V_O ở hai đầu của cuộn dây thứ hai. Hãy xác định điện trở R_1 và độ tự cảm L_1 của cuộn 1 (các chốt màu xanh lam) và ước tính độ bất định (sai số) của các giá trị cần xác định. (0.9)

b) Nối cuộn dây thứ hai (các chốt màu xanh lá cây), tiến hành các phép đo cần thiết, rồi xác định R_2 và L_2 . Ước tính độ bất định của các giá trị thu được. (0.9)

c) Bây giờ, đưa thanh nhôm vào lòng ống dây và lặp lại quá trình như trên để thu được các giá trị của độ tự cảm L_1^* và điện trở R_1^* và độ bất định của chúng, cho cuộn dây 1. (0.8)

d) Tiến hành các phép đo cần thiết và xác định độ tự cảm L_2^* và điện trở R_2^* của cuộn dây 2 khi nó có lõi nhôm. Hãy ước tính độ bất định của các giá trị. (0.8)

Chú ý: Không cần xác định độ bất định cho các phần 2, 3 và 4.

PHẦN 2: Độ hồ cảm và hằng số liên kết

[3.0]

f) Độ hồ cảm M có thể thu được từ các giá trị đo được của $V_{R'}$ và V_O (thu được ở **Phần 1**). Hãy tìm các giá trị trung bình cho các cuộn dây khi có lõi không khí và khi có lõi nhôm. Mối quan hệ giữa độ hồ cảm và độ tự cảm của hai cuộn dây liên kết được cho bởi $M = k (L_1 L_2)^{1/2}$. Hãy xác định giá trị của k , được gọi là hệ số liên kết, trong hai trường hợp. (0.4)

g) Lấy cuộn dây 1 (các chốt màu xanh lam) làm cuộn sơ cấp và cuộn dây 2 (các chốt màu xanh lá cây) làm cuộn thứ cấp. Mắc cuộn sơ cấp nối tiếp với điện trở mẫu $R' = 300 \Omega$ vào lối ra của máy phát. Mắc điện trở tải biến thiên R_L vào mạch thứ cấp. Điện áp ra V_O được đo ở hai đầu R_L . Thay đổi R_L và đo các điện áp V_A , $V_{R'}$, V và V_O ứng với mỗi giá trị của R_L . (0.8)

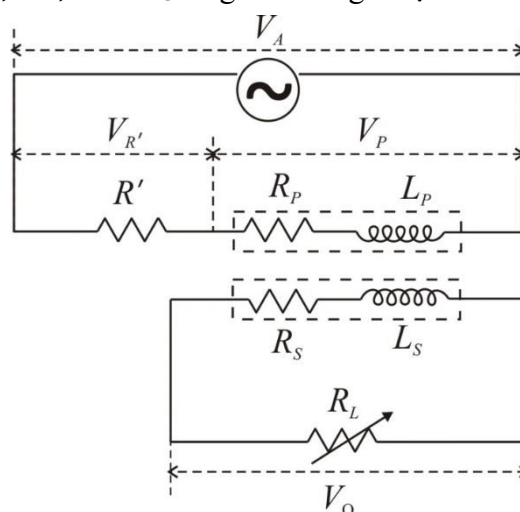


Fig.3

h) Có thể vẽ một đồ thị tuyến tính kết hợp các đại lượng xuất hiện trong phương trình (10) được viết dưới dạng khai triển. Hãy viết một biểu thức tuyến tính để vẽ một đồ thị mà độ dốc của nó có

thể được dùng để thu được giá trị của M và giao điểm có thể dùng để thu được giá trị của cảm kháng thứ cấp X_S . (0.2)

i) Hãy tính các đại lượng cần thiết bằng cách dùng các dữ liệu từ mục **(g)** để vẽ đồ thị ứng với biểu thức thu được ở bước **(h)** ở trên. (0.9)

j) Hãy vẽ đồ thị và xác định các giá trị của M và X_S . (0.7)

PHẦN 3: Hệ thức giữa trở kháng hiệu dụng của mạch sơ cấp và các đại lượng phản hồi từ mạch thứ cấp. [2.4]

k) Hãy dùng các dữ liệu thu được ở Phần 2 để xác định điện trở hiệu dụng R_{PE} và cảm kháng hiệu dụng X_{PE} của mạch sơ cấp ứng với mỗi giá trị của R_L ở mạch thứ cấp. (0.6)

l) Hãy dùng các dữ liệu ở **Phần 2** để tính các giá trị của điện trở phản hồi R_R như đã định nghĩa ở phương trình (8) và của cảm kháng phản hồi X_R theo phương trình (9) ứng với các giá trị của R_L . (0.6)

m) Hãy vẽ đồ thị của X_{PE} theo X_R . Xét đến các độ bất định có thể xảy ra cho các đại lượng được biểu diễn trên đồ thị, hãy viết phương trình cho mối liên hệ giữa cảm kháng hiệu dụng của mạch sơ cấp và cảm kháng phản hồi. (0.6)

n) Biểu diễn bằng đồ thị quan hệ giữa R_R và R_L trong khoảng nghiên cứu và tìm giá trị của R_L sao cho điện trở phản hồi đạt cực đại. *Nếu cần, có thể tiến hành thêm một số phép đo để bổ sung cho các phép đo ở Phần 2, nhằm xác định chính xác hơn giá trị cần tìm.* (0.6)

PHẦN 4: Các tác dụng của dòng điện xoáy [1.2]

o) Một mô hình dựa trên việc phân tích các dữ liệu ở **Phần 3** gợi ý cách ước tính tỉ số của độ tự cảm và điện trở được nhìn thấy bởi dòng điện xoáy trong lõi của cuộn dây được mắc vào nguồn điện.

Việc phân tích các dữ liệu ở **Phần 2(i) và (j)** cho thấy rằng $R_{PE} = R_P + R_R$. Mối quan hệ giữa X_{PE} và X_R thu được từ **Phần 3(m)**.

Dùng dữ liệu thu được ở **Phần 1(c)** và ước tính tỉ số của độ tự cảm và điện trở được nhìn thấy bởi dòng điện xoáy trong lõi nhôm khi nguồn điện được mắc vào cuộn dây 1 và khi nguồn điện được mắc vào cuộn dây 2. (0.8)

p) Mắc các cuộn dây như ở **Phần 2 Hình 3** và đưa thanh nhôm vào lòng cuộn dây. Hãy viết biểu thức của công suất tiêu tán ΔP trong lõi nhôm.

Lấy $R' = 300 \Omega$ và $R_L = 1000 \Omega$. Chọn cho V_A bằng 9.0 V. Hãy tiến hành các phép đo cần thiết và tính công suất tiêu tán bởi dòng điện xoáy trong lõi nhôm. (0.4)

APhO 14 – 2013 tại Indonesia

Lý thuyết 1: Hệ vật dẫn trong chất lỏng

Một hệ gồm hai vật dẫn được nhúng chìm trong một chất điện môi lỏng đồng chất, dẫn điện kém. Khi một hiệu điện thế không đổi được đặt vào giữa hai vật dẫn, thì hệ có cả điện trường và từ trường. Trong bài toán này, ta sẽ khảo sát một hệ như vậy.

1. **(0.4 đ)** Đầu tiên, xét một dây dài vô hạn, đặt trong chân không, với điện tích trên một đơn vị chiều dài là λ . Tính cường độ điện trường $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ do dây gây ra.
2. **(0.4 đ)** Điện thế gây bởi dây dài tích điện có thể được viết dưới dạng

$$V(r) = f(r) + K,$$

trong đó, K là hằng số. Hãy xác định $f(r)$.

3. **(0.7 đ)** Hãy tính điện thế trong toàn không gian $V(x,y,z)$ được gây nên một dây dài vô hạn với điện tích trên một đơn vị chiều dài là λ , đặt tại $x = -b$ và một dây dài vô hạn khác với điện tích trên một đơn vị chiều dài là $-\lambda$, đặt tại $x = b$. Cả hai dây đều song song với trục z . Lấy $V = 0$ tại gốc tọa độ.
Hãy phác họa các mặt đẳng thế.

Đối với các câu hỏi sau đây, bỏ qua mọi hiệu ứng rìa.

4. **(2.0 đ)** Bây giờ, xét hai vật dẫn hình trụ rỗng giống nhau, có bán kính $R = 3a$, đặt trong chân không. Độ dài của hai vật bằng nhau và lớn hơn nhiều so với bán kính của vật ($l \gg R$). Các trục của cả hai vật đều thuộc mặt phẳng xz và song song với trục z , một trục cắt trục x tại $x = -5a$ và trục kia cắt trục x tại $x = 5a$. Một hiệu điện thế V_0 được đặt vào giữa hai vật (vật ở $x = -5a$ có điện thế cao hơn) bằng cách mắc chúng vào một bộ pin. Tính điện thế trong tất cả các miền không gian. Lấy $V = 0$ tại gốc tọa độ.
5. **(0.5 đ)** Tính điện dung C của hệ.
6. **(1.0 đ)** Bây giờ nhúng cả hai vật dẫn hình trụ trong một chất lỏng dẫn điện kém, với độ dẫn điện là σ . Hãy tính dòng điện toàn phần chạy giữa hai vật này. Giả sử hằng số điện môi của chất lỏng bằng hằng số điện môi của chân không, $\epsilon = \epsilon_0$.
7. **(0.5 đ)** Tính điện trở R và tích RC của hệ hai vật hình trụ.
8. **(1.5 đ)** Hãy xác định từ trường của dòng điện được đề cập trong câu 6. Cho rằng độ từ thẩm của chất lỏng bằng độ từ thẩm của chân không $\mu = \mu_0$.

Ghi chú: $\int \frac{adx}{a^2+x^2} = \arctan \frac{x}{a} + const$

Lý thuyết 2: Hiệu chỉnh tương đối tính cho vệ tinh GPS

Hệ thống định vị toàn cầu (GPS) là công nghệ dùng tín hiệu từ các vệ tinh để xác định vị trí của một vật (thí dụ máy bay). Tuy nhiên, do các vệ tinh chuyển động trên quỹ đạo với tốc độ lớn, cần có sự hiệu chỉnh theo thuyết tương đối hẹp, và do các vệ tinh ở độ cao lớn, cần có sự hiệu chỉnh theo thuyết tương đối rộng. Cả hai phép hiệu chỉnh này đều có vẻ là nhỏ, nhưng lại rất quan trọng để xác định vị trí một cách chính xác. Ta sẽ khảo sát cả hai phép hiệu chỉnh này trong bài toán dưới đây.

Trước tiên, ta sẽ nghiên cứu hiệu ứng tương đối tính hẹp lên một hạt chuyển động có gia tốc. Ta xét hai loại hệ quy chiếu, hệ thứ nhất là **hệ nghỉ** (gọi là hệ S hay hệ Trái Đất), mà ở đó, lúc đầu hạt ở trạng thái nghỉ. Hệ thứ hai là **hệ riêng** (gọi là S'), là hệ chuyển động tức thời cùng với hạt chuyển động có gia tốc. Cần chú ý rằng đây không phải là hệ quy chiếu có gia tốc, mà là hệ có vận tốc không đổi; ở mỗi thời điểm, hệ này có cùng vận tốc với hạt có gia tốc. Trong khoảng thời gian ngắn đó, tốc độ trôi của thời gian đối với hạt **bằng** tốc độ trôi của thời gian trong hệ riêng. Tất nhiên, hệ riêng này chỉ là một hệ tốt trong một khoảng thời gian vô cùng ngắn, và ngay sau đó, ta cần phải xác định một hệ riêng khác. Lúc đầu, ta làm đồng bộ đồng hồ gắn với hạt và đồng hồ trong hệ nghỉ, bằng cách chỉnh chúng về số không, $t = \tau = 0$ (t là thời gian trong hệ nghỉ, còn τ là thời gian trên đồng hồ gắn với hạt).

Áp dụng **nguyên lý tương đương**, ta có thể thu được các hiệu ứng tương đối tính rộng từ các kết quả tương đối tính hẹp mà không cần dùng đến các phép tính tenxơ metric phức tạp. Kết hợp các hiệu ứng tương đối tính rộng và tương đối tính hẹp, ta có thể tính toán được các hiệu chỉnh cần thiết để một vệ tinh GPS cho ta vị trí chính xác.

Một số công thức toán học có thể có ích

- $\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$
- $\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$
- $\tanh x = \frac{\sinh x}{\cosh x}$
- $1 + \sinh^2 x = \cosh^2 x$
- $\sinh(x - y) = \sinh x \cosh y - \cosh x \sinh y$
- $\int \frac{dx}{(1-x^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{x}{\sqrt{1-x^2}} + C$
- $\int \frac{dx}{1-x^2} = \ln \sqrt{\frac{1+x}{1-x}} + C$

Phần A. Hạt riêng lẻ chuyển động có gia tốc (2.8 điểm)

Xét một hạt có khối lượng nghỉ m chịu tác dụng của một trường lực đều và không đổi F (được xác định trong hệ nghỉ), hướng theo chiều dương của trục x . Lúc đầu, ($t = \tau = 0$) hạt đứng yên ở gốc tọa độ ($x = 0$).

1. **(0.5 đ)** Khi vận tốc của hạt là v , hãy tính gia tốc a của hạt (đối với hệ nghỉ).
2. **(0.5 đ)** Hãy tính vận tốc của hạt $\beta(t) = \frac{v(t)}{c}$ ở thời điểm t (trong hệ nghỉ), theo F , m , t và c .
3. **(0.3 đ)** Hãy xác định vị trí $x(t)$ của hạt, ở thời điểm t , theo F , m , t và c .

4. **(0.7 đ)** Hãy chứng tỏ rằng gia tốc riêng của hạt, $a' \equiv g = F/m$, là một hằng số. Gia tốc riêng là gia tốc của hạt được đo trong hệ riêng tức thời.
5. **(0.4 đ)** Hãy tính vận tốc $\beta(\tau)$ của hạt khi thời gian của hạt là τ . Hãy biểu diễn kết quả theo g , τ , và c .
6. **(0.4 đ)** Hãy xác định thời gian t trong hệ nghỉ theo g , τ , và c .

Phần B. Thời gian bay (2.0 điểm)

Trong Phần A, ta đã **không** xét đến thời gian bay của thông tin để đi đến người quan sát. Phần này là phần duy nhất trong toàn bài, mà trong đó ta có xét đến thời gian bay.

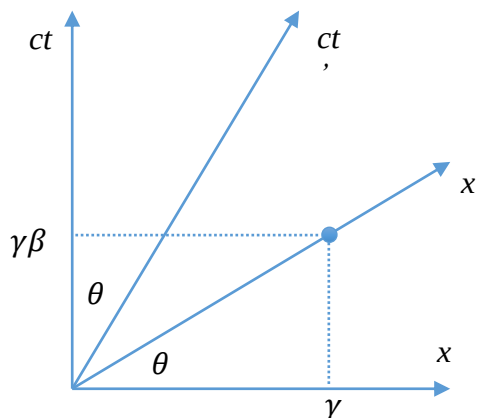
1. **(1.2 đ)** Ở một thời điểm nào đó, thời gian của hạt là τ . Hạt quan sát được số chỉ t_0 của một đồng hồ cố định đặt ở $x = 0$ là bao nhiêu? Sau một khoảng thời gian dài, số chỉ t_0 có tiến dần đến một giá trị nào đó không? Nếu có, thì giá trị đó bằng bao nhiêu?
2. **(0.8 đ)** Bây giờ, ta xét theo quan điểm ngược lại. Nếu một quan sát viên ở điểm ban đầu ($x = 0$) đang quan sát đồng hồ gắn với hạt khi thời gian của quan sát viên là t , thì số chỉ τ_0 của đồng hồ gắn với hạt là bao nhiêu? Sau một khoảng thời gian dài, số chỉ đó có tiến dần đến một giá trị nào đó không? Nếu có, thì giá trị đó bằng bao nhiêu?

Phần C. Giản đồ Minkowski (1.0 điểm)

Trong nhiều trường hợp, việc minh họa các sự kiện tương đối tính là rất thuận lợi, khi dùng giản đồ gọi là Giản đồ Minkowski. Để vẽ giản đồ, ta chỉ cần dùng phép biến đổi Lorentz giữa hệ nghỉ S và hệ chuyển động S' , chuyển động với vận tốc $v = \beta c$ đối với hệ nghỉ.

$$\begin{aligned}x &= \gamma(x' + \beta ct'), \\ct &= \gamma(ct' + \beta x'), \\x' &= \gamma(x - \beta ct), \\ct' &= \gamma(ct - \beta x).\end{aligned}$$

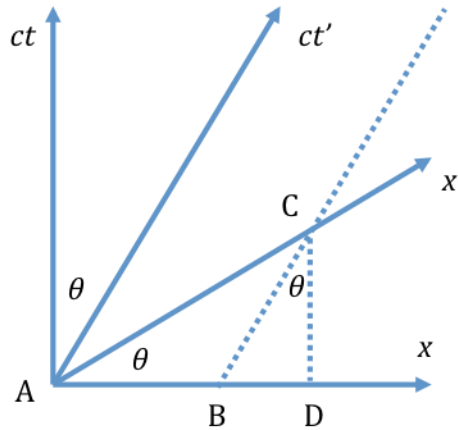
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



Ta hãy chọn x và ct là các trục vuông góc với nhau. Một điểm $(x', ct') = (1, 0)$ trong hệ chuyển động S' có tọa độ $(x, ct) = (\gamma, \gamma\beta)$ trong hệ nghỉ S . Đường thẳng nối điểm đó với gốc tọa độ xác định trục x' . Một điểm khác $(x', ct') = (0, 1)$ trong hệ chuyển động S' có tọa độ $(x, ct) = (\gamma\beta, \gamma)$ trong hệ nghỉ S . Đường thẳng nối điểm đó với gốc tọa độ xác định trục ct' . Góc giữa trục x và trục

x' là θ , với $\tan \theta = \beta$. Một đơn vị độ dài trong hệ chuyển động S' thì bằng $\gamma\sqrt{1+\beta^2} = \sqrt{\frac{1+\beta^2}{1-\beta^2}}$ trong hệ nghỉ S .

Để hiểu hơn về giản đồ Minkowski, ta hãy xét thí dụ sau. Xét một cái gậy có độ dài riêng L trong một hệ chuyển động S' . Ta muốn tìm độ dài của cái gậy trong hệ nghỉ S . Ta xét hình vẽ dưới đây.



Trong hệ S' , cái gậy được biểu diễn bằng đoạn AC . Trong hệ S , độ dài AC thì bằng $\sqrt{\frac{1+\beta^2}{1-\beta^2}}L$. Độ dài của cái gậy trong hệ S được biểu diễn bằng đoạn AB .

$$\begin{aligned} AB &= AD - BD \\ &= AC \cos \theta - AC \sin \theta \tan \theta \\ &= L\sqrt{1-\beta^2} \end{aligned}$$

1. **(0.5 đ)** Dùng giản đồ Minkowski, hãy tính độ dài của một cái gậy, mà độ dài riêng trong hệ nghỉ là L , khi ta đo nó trong hệ chuyển động.
2. **(0.5 đ)** Bây giờ xét trường hợp trong phần A. Hãy vẽ đồ thị của thời gian ct theo vị trí x của hạt. Hãy vẽ trục x' và trục ct' khi $\frac{gt}{c} = 1$ trong cùng một đồ thị, bằng cách dùng thang đo độ dài $x(c^2/g)$ và $ct(c^2/g)$.

Phần D. Hai hạt chuyển động có gia tốc (2.3 điểm)

Trong phần này, ta sẽ xét hai hạt chuyển động có gia tốc, cả hai hạt đều có cùng gia tốc riêng g theo chiều dương của x , nhưng hạt thứ nhất khởi hành từ $x = 0$, còn hạt thứ hai khởi hành từ $x = L$. Nhớ rằng, trong phần này, ta **KHÔNG** xét đến thời gian bay.

1. **(0.3 đ)** Sau một lát, một người quan sát trong hệ nghỉ tiến hành quan sát và nhận thấy đồng hồ gắn với hạt thứ nhất chỉ thời gian τ_A . Vậy đối với người quan sát trong hệ nghỉ, số chỉ τ_B của đồng hồ gắn với hạt thứ hai là bao nhiêu?

2. **(1.0 đ)** Bây giờ ta xét sự quan sát từ hệ gắn với hạt thứ nhất. Ở một thời điểm nào đó, một quan sát viên chuyển động cùng với hạt thứ nhất quan sát thấy rằng số chỉ của đồng hồ riêng của anh ta là τ_1 . Cũng tại thời điểm đó, anh ta quan sát đồng hồ gắn với hạt thứ hai, và thấy số chỉ là τ_2 . Hãy chứng tỏ rằng

$$\sinh \frac{g}{c} (\tau_2 - \tau_1) = C_1 \sinh \frac{g\tau_1}{c}$$

trong đó C_1 là một hằng số. Hãy xác định C_1 .

3. **(1.0 đ)** Hạt thứ nhất sẽ nhìn thấy hạt thứ hai đi ra xa nó. Hãy chứng tỏ rằng tốc độ thay đổi khoảng cách giữa hai hạt đối với hạt thứ nhất là

$$\frac{dL'}{d\tau_1} = C_2 \frac{\sinh \frac{g\tau_2}{c}}{\cosh \frac{g}{c} (\tau_2 - \tau_1)}$$

trong đó, C_2 là một hằng số. Hãy xác định C_2 .

Phần E. Hệ quy chiếu gia tốc đều (2.7 điểm)

Trong phần này, ta sẽ dàn xếp gia tốc riêng của các hạt, sao cho khoảng cách giữa hai hạt là không đổi đối với mỗi hạt. Lúc đầu, cả hai hạt đều đứng yên, hạt thứ nhất ở $x = 0$, hạt thứ hai ở $x = L$.

1. **(0.8 đ)** Hạt thứ nhất có gia tốc riêng g_1 theo chiều dương của trục x . Khi nó đang gia tốc, tồn tại một điểm cố định trong hệ nghỉ, ở $x = x_p$, có khoảng cách tới hạt thứ nhất là không đổi, đối với hạt thứ nhất, trong suốt quá trình chuyển động. Hãy xác định x_p .
2. **(1.3 đ)** Cho biết gia tốc riêng của hạt thứ nhất là g_1 , hãy xác định gia tốc riêng g_2 của hạt thứ hai, sao cho khoảng cách giữa hai hạt là không đổi, đối với hạt thứ nhất.
3. **(0.6 đ)** Hãy xác định tỉ số tốc độ trôi của thời gian của hạt thứ hai so với của hạt thứ nhất $\frac{dt_2}{dt_1}$, đối với hạt thứ nhất.

Phần F. Hiệu chỉnh cho GPS (2.2 điểm)

Phần E chỉ ra rằng tốc độ trôi của thời gian của các đồng hồ ở những độ cao khác nhau là không giống nhau, ngay cả nếu không có chuyển động tương đối giữa các đồng hồ.

Theo **nguyên lý tương đương** trong thuyết tương đối rộng, một người quan sát trong một phòng nhỏ khép kín không thể nói gì về sự khác nhau giữa lực kéo hấp dẫn g và lực giả định xuất hiện trong hệ quy chiếu có gia tốc g . Do đó, ta có thể kết luận rằng hai đồng hồ đặt ở các thế hấp dẫn khác nhau sẽ có tốc độ trôi thời gian khác nhau.

Bây giờ, ta xét một vệ tinh GPS quay quanh Trái Đất với chu kì 12 giờ.

1. **(0.6 đ)** Cho gia tốc hấp dẫn trên bề mặt Trái Đất là 9.78 m.s^{-2} , và bán kính Trái Đất là 6380 km, hãy thiết lập biểu thức tính bán kính quỹ đạo và vận tốc của vệ tinh GPS. Hãy tính các giá trị bằng số của bán kính và của vận tốc.
2. **(1.2 đ)** Sau một ngày, số chỉ của đồng hồ trên Mặt Đất và của đồng hồ trên vệ tinh sẽ chênh lệch nhau do cả hiệu ứng tương đối hẹp và tương đối rộng. Hãy tính độ chênh lệch do mỗi hiệu ứng gây ra, trong một ngày. Hãy tính độ chênh lệch tổng cộng trong một ngày. Đồng hồ nào chạy nhanh hơn, đồng hồ trên Mặt Đất hay đồng hồ trên vệ tinh?
3. **(0.4 đ)** Sau một ngày, hãy ước tính sai số về vị trí do hiệu ứng tổng cộng này gây nên.

Lý thuyết 3: Physics of Spin

Tất cả các chất trong vũ trụ ngoài khối lượng, điện tích, còn có một thuộc tính cơ bản gọi là spin. Spin là một hình thức nội tại của momen động lượng được mang bởi các hạt. Tuy rằng, muốn mô tả đầy đủ về spin phải dùng cơ học lượng tử, song vẫn có thể nghiên cứu vật lý của spin bằng cách sử dụng hình thức luận cổ điển quen thuộc. Trong bài toán này, chúng ta sẽ khảo sát ảnh hưởng của từ trường lên spin bằng sử dụng tương tự cổ điển của nó.

Phương trình mô-men xoắn cổ điển của spin được cho bởi

$$\boldsymbol{\tau} = \frac{d\mathbf{L}}{dt} = \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B}.$$

Trong trường hợp này, momen động lượng $\mathbf{L}$ thể hiện spin "nội tại" của các hạt, $\boldsymbol{\mu}$ là momen từ của các hạt, và $\mathbf{B}$ là từ trường. Spin của một hạt liên hệ với một mômen từ qua phương trình

$$\boldsymbol{\mu} = -\gamma \mathbf{L}$$

trong đó, γ là tỉ số quay từ

Trong bài toán này, thuật ngữ "tần số" có nghĩa là tần số góc (rad/s) và là một đại lượng vô hướng. Các chữ in đậm biểu thị đại lượng vector, các chữ không in đậm biểu thị đại lượng vô hướng.

Phần A. Tiến động Larmor (1.6 điểm)

1. **(0.8 đ)** Hãy chứng minh rằng, dưới tác động của trường từ $\mathbf{B}$, độ lớn của momen từ μ luôn luôn là hằng số. Trong trường hợp đặc biệt, từ trường là từ trường dừng (không đổi), hãy chứng tỏ rằng góc giữa $\boldsymbol{\mu}$ và $\mathbf{B}$ là hằng số
(Gợi ý: Em có thể dùng các tính chất của tích vector)
2. **(0.8 đ)** Một từ trường đều có véc tơ cảm ứng từ $\mathbf{B}$ tạo một góc ϕ với momen từ $\boldsymbol{\mu}$ của hạt. Do mômen xoắn tạo bởi từ trường, mômen từ $\boldsymbol{\mu}$ quay quanh véc tơ cảm ứng từ $\mathbf{B}$. Hiện tượng này được gọi là tiến động Larmor. Hãy xác định tần số tiến động Larmor ω_0 của momen từ đối với véc tơ cảm ứng từ $\mathbf{B} = B_0 \mathbf{k}$.

Phần B. Hệ quy chiếu quay (3.4 điểm)

Trong mục này, ta chọn một hệ quay S' làm hệ quy chiếu. Hệ quay $S' = (x', y', z')$ quay với vận tốc góc $\omega \mathbf{k}$ đối với một người quan sát trong hệ phòng thí nghiệm $S = (x, y, z)$, trong đó, các trục x', y', z' cắt các trục x, y, z ở thời điểm $t = 0$. Mọi vector $\mathbf{A} = A_x \mathbf{i} + A_y \mathbf{j} + A_z \mathbf{k}$ trong

một hệ phòng thí nghiệm có thể được viết thành $\mathbf{A} = A_x' \mathbf{i}' + A_y' \mathbf{j}' + A_z' \mathbf{k}'$ trong hệ quay S' . Đạo hàm theo thời gian của các vector trở thành

$$\frac{d\mathbf{A}}{dt} = \left(\frac{dA_x'}{dt} \mathbf{i}' + \frac{dA_y'}{dt} \mathbf{j}' + \frac{dA_z'}{dt} \mathbf{k}' \right) + \left(A_x' \frac{d\mathbf{i}'}{dt} + A_y' \frac{d\mathbf{j}'}{dt} + A_z' \frac{d\mathbf{k}'}{dt} \right)$$

$$\left(\frac{d\mathbf{A}}{dt} \right)_{lab} = \left(\frac{d\mathbf{A}}{dt} \right)_{rot} + (\omega \mathbf{k} \times \mathbf{A}),$$

trong đó, $\left(\frac{d\mathbf{A}}{dt} \right)_{lab}$ là đạo hàm theo thời gian của vector $\mathbf{A}$ được thấy bởi một người quan sát trong hệ phòng thí nghiệm, và $\left(\frac{d\mathbf{A}}{dt} \right)_{rot}$ là đạo hàm theo thời gian được thấy bởi một người quan sát trong hệ quay. Trong các câu hỏi của phần này, các đáp án đều được xét đối với hệ quay S' .

1. **(0.8 đ)** Hãy chứng tỏ rằng sự tiến triển theo thời gian của momen từ tuân theo phương trình sau đây

$$\left(\frac{d\boldsymbol{\mu}}{dt} \right)_{rot} = -\gamma \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B}_{eff},$$

trong đó $\mathbf{B}_{eff} = \mathbf{B} - \frac{\omega}{\gamma} \mathbf{k}'$ là từ trường hiệu dụng.

2. **(0.4 đ)** Với $\mathbf{B} = B_0 \mathbf{k}$, hãy xác định tần số tiến động mới Δ theo ω_0 và ω ?
3. **(1.2 đ)** Bây giờ, ta xét trường hợp của một từ trường biến thiên theo thời gian. Cùng với một từ trường không đổi, ta đặt vào thêm một từ trường quay $\mathbf{b}(t) = b(\cos \omega t \mathbf{i} + \sin \omega t \mathbf{j})$, do đó, $\mathbf{B} = B_0 \mathbf{k} + \mathbf{b}(t)$. Hãy chứng tỏ rằng tần số tiến động Larmor mới của momen từ là

$$\Omega = \gamma \sqrt{\left(B_0 - \frac{\omega}{\gamma} \right)^2 + b^2}.$$

4. **(1.0 đ)** Thay vì đặt vào từ trường $\mathbf{b}(t) = b(\cos \omega t \mathbf{i} + \sin \omega t \mathbf{j})$, ta đặt từ trường $\mathbf{b}(t) = b(\cos \omega t \mathbf{i} - \sin \omega t \mathbf{j})$, quay theo chiều ngược lại, do đó, $\mathbf{B} = B_0 \mathbf{k} + b(\cos \omega t \mathbf{i} - \sin \omega t \mathbf{j})$. Hãy tìm từ trường hiệu dụng $\mathbf{B}_{eff}$ cho trường hợp này (tính theo các vector đơn vị $\mathbf{i}', \mathbf{j}', \mathbf{k}'$)? Hãy xác định từ trường trung bình theo thời gian $\overline{\mathbf{B}_{eff}}$ (nhắc lại rằng $\overline{\cos 2\pi t/T} = \overline{\sin 2\pi t/T} = 0$)?

Phần C. Dao động Rabi (3.0 điểm)

Với một tập hợp gồm N hạt dưới tác dụng của một từ trường mạnh, spin có thể có hai trạng thái lượng tử: “up” (hướng lên trên) and “down” (hướng xuống dưới). Do đó, tổng số các hạt có spin hướng lên trên $N_\uparrow$ và các hạt có spin hướng xuống dưới $N_\downarrow$ tuân theo phương trình

$$N_\uparrow + N_\downarrow = N.$$

Hiệu của số hạt có spin hướng lên trên và có spin hướng xuống dưới xác định độ nhiễm từ vĩ mô dọc theo trục z:

$$M = (N_\uparrow - N_\downarrow) \mu = N \mu_z.$$

Trong một thí nghiệm thực, thông thường, hai từ trường được đặt vào, một từ trường định thiên mạnh $B_0 \mathbf{k}$ và một từ trường dao động với biên độ $2b$, vuông góc với từ trường định thiên ($b \ll B_0$). Lúc đầu, chỉ có từ trường định thiên được đặt vào, làm cho mọi hạt đều nằm trong trạng thái spin hướng lên trên ($\boldsymbol{\mu}$ hướng theo trục z ở $t = 0$). Sau đó, từ trường dao động được bật lên, với

tần số ω được chọn để cộng hưởng với tần số tiến động Larmor ω_0 , tức là $\omega = \omega_0$. Nói khác đi, từ trường toàn phần sau thời điểm $t = 0$ được cho bởi

$$\mathbf{B}(t) = B_0 \mathbf{k} + 2b \cos \omega_0 t \mathbf{i}.$$

1. **(1.2 đ)** Trong hệ quay S' , hãy chứng tỏ rằng từ trường hiệu dụng có thể làm gần đúng bằng

$$\mathbf{B}_{eff} \approx b \mathbf{i}',$$

mà ta thường gọi là phép gần đúng sóng quay. Hãy xác định tần số tiến động Ω trong hệ S' ?

2. **(0.6 đ)** Hãy xác định góc α mà $\boldsymbol{\mu}$ lập với $\mathbf{B}_{eff}$. Hãy chứng minh rằng độ nhiễm từ thay đổi theo thời gian theo quy luật

$$M(t) = N\mu(\cos \Omega t).$$

3. **(1.2 đ)** Khi có từ trường như trên tác dụng vào, hãy xác định tỉ phần số hạt có spin hướng lên trên $P_\uparrow = N_\uparrow/N$ và hướng xuống dưới $P_\downarrow = N_\downarrow/N$ theo thời gian. Hãy vẽ trên cùng một đồ thị các hàm theo thời gian $P_\uparrow(t)$ và $P_\downarrow(t)$. Sự thay đổi số hạt có spin hướng lên trên và spin hướng xuống dưới theo thời gian được gọi là dao động Rabi.

Phần D. Sự không tương thích của phép đo (2.0 điểm)

Spin thực chất là một đại lượng vector; nhưng do các tính chất lượng tử của nó, mà ta không thể đo được mọi thành phần của nó đồng thời (tức là ta có thể biết được cả $|\boldsymbol{\mu}|$ và μ_z trong các bài toán trên đây, nhưng không thể biết được tất cả các đại lượng $|\boldsymbol{\mu}|, \mu_x, \mu_y$, và μ_z cùng một lúc). Trong bài toán này, ta sẽ tính toán trên cơ sở nguyên lý bất định của Heisenberg (dùng hệ thức $\Delta p_q \Delta q \geq \hbar$) để chỉ ra các phép đo này không tương thích với nhau như thế nào

1. **(1.0 đ)** Ta hãy xét một cái lò nung có cửa ra hẹp, là nguồn phát ra các nguyên tử bạc. Luồng nguyên tử đi từ cửa lò ra dọc theo hướng $-y$ (xem hình dưới đây) và đi vào khu vực có từ trường $\mathbf{B}_1$ biến thiên theo không gian. Từ trường $\mathbf{B}_1$ có thành phần định thiên mạnh theo trục z , trong đó các nguyên tử có mômen từ khác nhau, $\mu_z = \pm \gamma \hbar$, bị tách theo phương z . Ở khoảng cách D tính từ cửa lò, có một màn chắn SC_1 chỉ cho các nguyên tử có spin hướng lên trên đi qua (và hãm các nguyên tử có spin hướng xuống dưới). Như vậy, ở thời điểm sau khi đi qua màn chắn, các nguyên tử đều được sắp đặt ở trong trạng thái spin hướng lên trên. Sau màn chắn, các nguyên tử đi vào một vùng có từ trường không đều $\mathbf{B}_2$, ở đó, các nguyên tử chịu tác dụng của lực

$$F_x = \mu_x C.$$

Từ trường $\mathbf{B}_2$ có thành phần định thiên mạnh hướng theo trục x , trong đó, các nguyên tử có mômen từ $\mu_x = \pm \gamma \hbar$.

1. Ống gió cùng với dây nichrom (niken-crôm)
2. Quạt máy tính với cảm biến tần số
3. Quả bóng bàn
4. Dây tóc (Hotwire filament): **Hãy cẩn thận không chạm vào dây tóc**
5. Hộp điện tử dùng cho dây tóc
6. Tuabin với cảm biến tần số
7. Đồng hồ đa năng hiện số (DMM) #1: dùng để đo tần số
8. Đồng hồ đa năng hiện số (DMM) #2 và #3
9. Nguồn cấp điện từ hai điện áp ra điều chỉnh được: đến 9 V và đến 15 V
10. Thước (50 cm)
11. Giá đỡ
12. Dây nối, hai đầu có phích cắm hình quả chuối (3 đôi)
13. Dây nối, một đầu có phích cắm hình quả chuối và một đầu có kẹp cá sấu (1 đôi).

HẰNG SỐ VÀ SỐ LIỆU

Gia tốc trọng trường:	$g = 9.81 \text{ m/s}^2$
Khối lượng riêng của không khí:	$\rho_A = 1.2 \text{ kg/m}^3$
Đường kính quả bóng bàn:	$d_B = (39.5 \pm 0.1) \text{ mm}$

Không cần tính sai số

MỞ ĐẦU

Năng lượng gió là một nguồn năng lượng tái tạo, sạch, phát triển nhanh chóng và đang trở nên quan trọng hơn trong việc cung cấp năng lượng khi dân số tăng nhanh. Năng lượng gió có thể được chuyển đổi thành năng lượng điện tiện lợi bằng cách dùng tuabin gió, như thể hiện trong Hình 2.

Ta sẽ khám phá một số tính chất vật lý của năng lượng gió và tuabin gió cũng như các phép đo liên quan đến chúng. Ta sẽ khảo sát hai phương pháp đo tốc độ gió dùng phong tốc kế “quả bóng bàn” và phong tốc kế “dây tóc nóng”. Ta cũng sẽ khám phá tính chất vật lý của tuabin gió và hiệu suất chuyển đổi năng lượng của nó. Ta sẽ sử dụng một ống gió, một đầu có quạt hút tạo ra luồng gió chảy thành lớp (không xoáy).

Bài thí nghiệm này được chia thành 5 phần:

- A. Cơ sở lý thuyết
- B. Ống gió
- C. Phong tốc kế quả bóng bàn
- D. Phong tốc kế dây tóc nóng,
 - (1) Phương pháp nhiệt độ không đổi
 - (2) Phương pháp dòng điện không đổi
- E. Tuabin gió

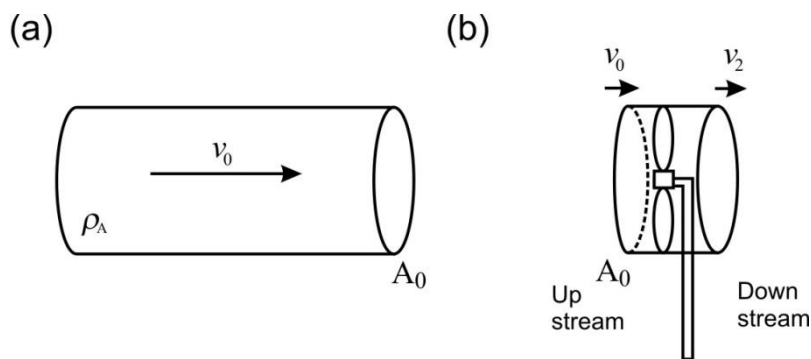


Hình 9. Dây tuabin gió

THÍ NGHIỆM VÀ CÂU HỎI

[A] Cơ sở lý thuyết [1.0 điểm]

Ta sẽ khám phá các khía cạnh lý thuyết cơ bản của năng lượng gió và hiệu suất chuyển đổi năng lượng của một tuabin gió.



Hình 10. (a) Một khối khí hình ống (b) Một tuabin gió chặn luồng gió

Chú thích của hình: up stream = đầu luồng; down stream = cuối luồng.

[A.1] Xét một khối không khí với khối lượng riêng ρ_A chảy qua một ống có diện tích tiết diện ngang A_0 như thấy trong Hình 3 (a). Hãy chứng tỏ rằng công suất của gió là

$$P_W = \frac{1}{2} \rho_A A_0 v_0^n. \quad (1)$$

Giá trị của n là bao nhiêu? Ta sẽ xác định giá trị của n bằng thí nghiệm ở phần B.2.

[0.4 điểm]

[A.2] Bây giờ ta xét một tuabin gió với diện tích rôto (cánh quạt) A_0 , chặn một phần luồng gió có cùng một tiết diện ngang, như thể hiện trên Hình 3 (b). Vận tốc gió phía đầu luồng là v_0 và phía cuối luồng là v_2 . Vận tốc gió tại rôto là vận tốc trung bình, tức là $(v_0 + v_2)/2$. Công suất lớn nhất mà tuabin gió thu được từ gió là

$$P_R = \frac{1}{4} \rho_A A_0 (v_0 + v_2)(v_0^2 - v_2^2) \quad (2)$$

Sự chậm lại của gió ở cuối luồng được đặc trưng bởi tham số λ , với $\lambda = v_2 / v_0$. Để tuabin thu được công suất cực đại, λ không thể quá thấp (vì luồng gió sẽ dừng lại) hoặc quá cao (có nghĩa là tuabin thu được rất ít năng lượng từ gió). Hãy xác định giá trị tối ưu của λ để cho tuabin gió đạt được công suất tối đa.

[0.4 điểm]

[A.3] Ta định nghĩa hiệu suất của rôto (hoặc hệ số công suất) C_p là tỉ số công suất P_R mà rôto của tuabin gió thu được và công suất P_W của gió:

$$C_p = \frac{P_R}{P_W}. \quad (3)$$

Dựa trên đáp án của em trong câu hỏi A.2, hãy xác định giá trị cực đại của C_p . Giá trị này được gọi là hiệu suất Betz, nó xác định giới hạn lí thuyết của hiệu suất chuyển đổi năng lượng cực đại của một tuabin gió.

[0.2 điểm]

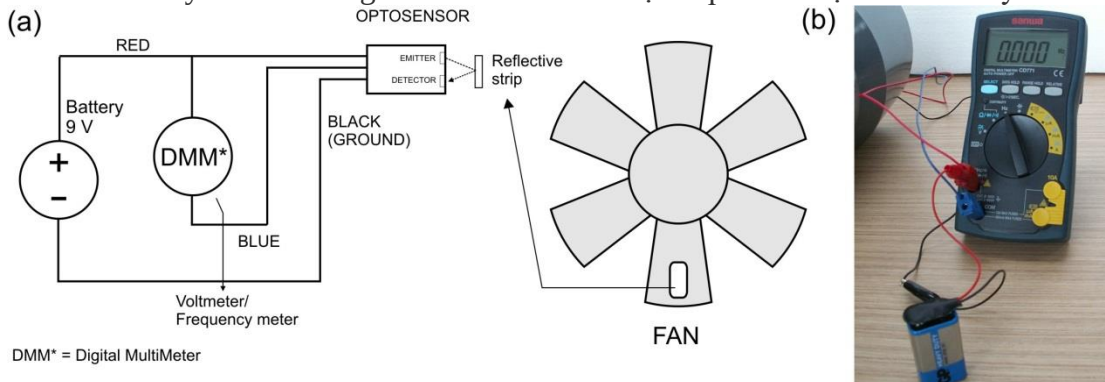
[B] Ống gió [3.2 điểm]

Ta sẽ sử dụng một ống gió, trong đó một cái quạt máy tính được dùng làm *máy tạo gió*, bằng cách thổi gió ra khỏi ống gió (ống gió kiểu hút), tạo ra một dòng chảy thành lớp của gió.

Việc đo tốc độ quay của động cơ hoặc của tuabin gió là rất quan trọng trong kĩ thuật năng lượng gió. Ta sẽ sử dụng một mạch cảm biến quang-điện đơn giản như thấy trong hình dưới đây để đo tần số vòng của động cơ. Cảm biến quang-điện gồm một đầu phát và một đầu thu hồng ngoại. Cảm biến phát hiện ra dải phản xạ dán trên cánh, khi động cơ quay (Hình 4).

CHỈ DẪN & CẢNH BÁO:

- (a) Mắc cảm biến quang-điện như thấy trên Hình 4.
- (b) **CẢNH BÁO:** *Hãy cẩn thận khi dùng cặp cá sấu trên bộ pin để mắc vào cảm biến quang-điện, vì chúng rất dễ hỏng!*
- (c) **CẢNH BÁO:** *Khi không cần phải đọc tần số động cơ, hãy ngắt mạch để tránh tiêu hao pin.*
- (d) **CẢNH BÁO:** Nếu cần phải đọc điện áp của nguồn điện, em có thể sử dụng đồng hồ đa năng hiện số (DMM) để có được nhiều chữ số có nghĩa hơn.
- (e) **CẢNH BÁO:** Nếu em sử dụng DMM như một ampe kế, hãy chú ý đến giới hạn đo. Nếu em làm cháy cầu chì trong DMM thì em chỉ được cấp thêm một cầu chì thay thế!



Hình 4. Cách mắc cảm biến quang-điện vào DMM #1 để đo điện áp hoặc tần số.

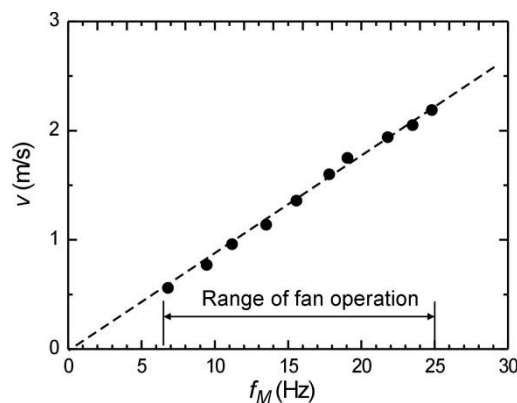
Chú thích trên hình: battery=pin; voltmeter/frequency meter=vôn kế/máy đo tần số; blue=xanh; black=đen; ground=đất; opto sensor=cảm biến quang-điện; reflective strip=dải phản xạ.

[B.1] Không nối nguồn điện vào động cơ, chuyển DMM #1 sang chế độ vôn kế (kí hiệu V trên DMM), rồi xoay quạt từ từ bằng tay, em sẽ thấy số chỉ của vôn kế thay đổi. Hãy vẽ phác đồ thị tín hiệu của cảm biến quang-điện như là một hàm của góc quay của cánh quạt (hoặc hàm của thời gian). Nêu rõ chu kì của tín hiệu

[0.8 điểm]

Tốc độ gió bên trong ống gió chủ yếu được xác định bởi tần số quay (f_M) của động cơ tạo gió. Mỗi quan hệ giữa tốc độ gió (đo tại tâm của ống) và tần số của động cơ đã được đo và được biểu diễn trên Hình 5 dưới đây, và được diễn tả bằng mối quan hệ tuyến tính đơn giản:

$$v = 0.0873 \text{ m/s} \times f_M \quad (4)$$



Hình 5. Tốc độ gió (ở tâm của ống gió) phụ thuộc vào tần số quay của cánh quạt mô-tơ.

Chú thích trong hình: Range of fan operation: phạm vi làm việc của quạt

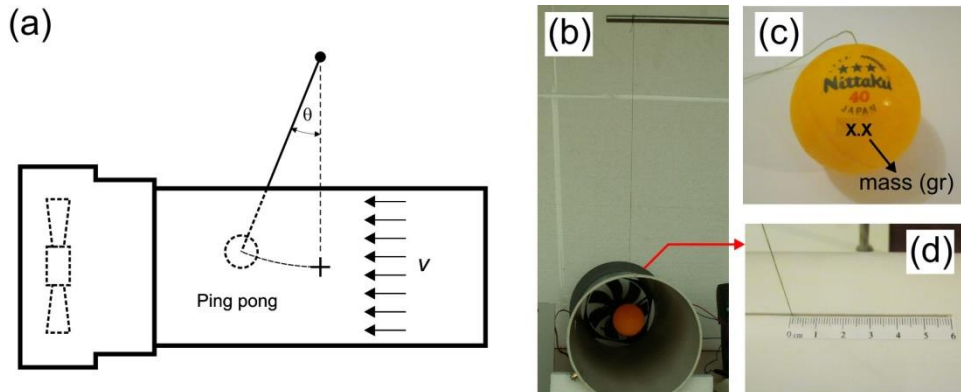
[B.2] Động cơ quạt có hiệu suất cơ học khá xác định (bằng tỉ số của công suất gió P_W được tạo ra và công suất điện cấp cho động cơ quạt P_M), với điện áp trong khoảng: $3 \text{ V} < V_M < 12 \text{ V}$. Hiệu suất

cơ học này được cho bởi: $\eta_M = P_W / P_M$ Hãy tiến hành một thực nghiệm để xác định hiệu suất cơ học η_M và số mũ n cho công suất gió P_W trong phương trình (1). Hãy phác thảo sơ đồ mắc mạch của em.

[2.4 điểm]

[C] Phong tốc kế dùng quả bóng bàn [5 điểm]

Đo tốc độ gió là một công việc quan trọng trong kỹ thuật năng lượng gió. Ta sẽ nghiên cứu một phương pháp rất đơn giản để đo tốc độ gió bằng một con lắc làm từ một quả bóng bàn như thấy trên Hình 6.



Hình 6. Thí nghiệm phong tốc kế bằng quả bóng bàn

Nguyên tắc hoạt động rất đơn giản, gió tạo lực kéo và làm lệch con lắc quả bóng bàn một góc θ . Lực kéo đó được cho bởi:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_A A_B v^m, \quad (5)$$

trong đó, C_D là hệ số kéo của vật, ρ_A là khối lượng riêng của chất lưu (không khí), A_B là tiết diện ngang của quả bóng bàn, v là vận tốc của quả bóng so với chất lưu và m là số mũ. Khối lượng của quả bóng bàn là m_B (tính bằng gam) được ghi trên quả bóng bàn như thấy trên Hình 6 (c). Xem thêm mục **Các hằng số và dữ liệu** ở trang 2, để biết về các số liệu khác.

CHỈ DẪN VÀ CẢNH BÁO:

- (a) Đưa dây treo con lắc vào khe mà trên đó có in thước đo, như thấy trên Hình 6 (d). Để quả bóng bàn ở giữa ống.
Thước đo giúp em tính toán góc lệch θ .
- (b) **CẢNH BÁO.** Mỗi nối giữa sợi dây và quả bóng bàn rất yếu. Cần nhẹ tay.
- (c) **CẢNH BÁO.** Cần chắc chắn rằng sợi dây có thể chuyển động tự do, mà không bị vướng vào khe. Có thể kiểm tra điều này, sao cho khi con lắc bị gió làm lệch đi, thì khi không có gió nữa, con lắc lại trở về vị trí nghỉ ban đầu. Em có thể dùng một cái bút gạt nhẹ vào sợi dây, để chắc chắn rằng dây không bị kẹt vào khe.
- (d) **CẢNH BÁO.** Nếu em không cần đo tần số của mô tơ, thì hãy ngắt mạch của pin 9 V để nó không bị hết điện.

[C.1] Hãy tìm hệ thức giữa tốc độ gió v với góc lệch θ . Hãy vẽ giản đồ lực. Hãy biểu thị đáp án theo khối lượng riêng của không khí (ρ_A) và khối lượng của quả bóng bàn (m_B), cùng với các tham số khác.

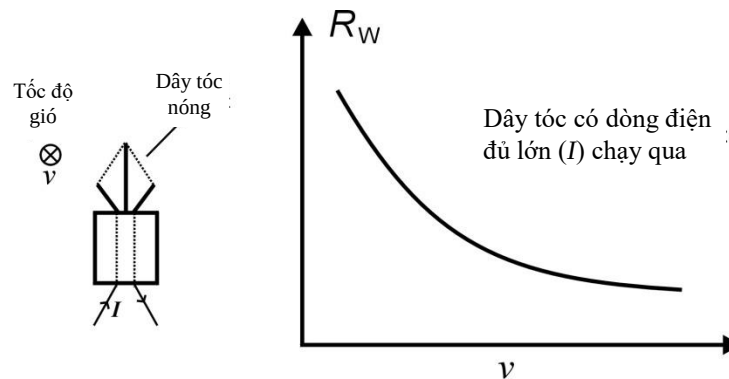
[0.7 điểm]

[C.2] Hãy thực hiện một thí nghiệm để xác định C_D và m .

[2.8 điểm]

[D] Phong tốc kế có dây đốt nóng [6.7 điểm]

Phong tốc kế dùng quả bóng bàn mà ta vừa xét không thích hợp cho các ứng dụng thực tế, trong đó ta thường đọc các đại lượng thông qua các tín hiệu điện. Vì vậy, ta hãy nghiên cứu một phương pháp khác để đo tốc độ gió: phong tốc kế có dây đốt nóng (hot-wire anemometer, hay HWA). HWA dùng một dây tóc bóng đèn, dây này bị đốt nóng khi có dòng điện chạy qua nó. Khi gió thổi, gió tạo ra sự đối lưu cưỡng bức làm mất nhiệt của dây tóc, khiến cho nhiệt độ và cả điện trở của dây tóc giảm đi, như thấy trên Hình 7 (trừ phi ta bù lại bằng cách tăng công suất điện). Hiện tượng này có thể được khai thác để đo tốc độ gió. Trong thí nghiệm này, ta sẽ nghiên cứu các đặc trưng của dây tóc nóng khi vận tốc gió thay đổi.



Hình 7. Phong tốc kế dùng dây nóng khi có gió thổi vuông góc với mặt phẳng hình vẽ.

Ta dùng một dây tóc kim loại (vonfram) của một bóng đèn thông thường, mà ta đã loại bỏ vỏ thủy tinh để lộ ra sợi dây tóc. Khi nhiệt độ thay đổi ít, điện trở của dây tóc biến thiên tuyến tính theo nhiệt độ:

$$R_w = R_0[1 + \alpha(T_w - T_0)], \quad (6)$$

trong đó, R_w là điện trở của dây tóc ở nhiệt độ T_w , R_0 là điện trở ở nhiệt độ T_0 và α là hệ số nhiệt của điện trở. Với vonfram, $\alpha = 4.5 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$.

Bây giờ, ta xét sự truyền nhiệt giữa dây tóc và môi trường xung quanh. Sự truyền nhiệt có thể xảy ra thông qua sự đối lưu tự nhiên (không có nguồn từ bên ngoài gây chuyển động của chất lưu), sự đối lưu cưỡng bức (có nguồn từ bên ngoài gây nhiễu loạn), sự dẫn nhiệt (chủ yếu qua giá đỡ dây tóc) và sự bức xạ.

Ta xét trường hợp trong đó dây tóc bị đốt nóng bằng nguồn năng lượng bên ngoài, chẳng hạn, bởi dòng điện, và truyền nhiệt ra môi trường xung quanh thông qua tất cả các quá trình nêu trên. Sau khi hệ đã đạt được cân bằng, sự cân đối công suất được biểu thị như sau:

$$P_{\text{input}} = Q_{\text{forced convection}} + Q_{\text{natural convection}} + Q_{\text{conduction}} + Q_{\text{radiation}},$$

$$V_w \cdot I_w = h' A_w (T_w - T_0) + Q_{\text{nc}} + Q_{\text{conduction}} + A_w \sigma \varepsilon (T_w^4 - T_0^4), \quad (7)$$

trong đó, A_w là diện tích bề mặt của dây tóc, T_0 là nhiệt độ của phòng/môi trường xung quanh (giả thiết là nhiệt độ ban đầu của dây tóc), σ là hằng số Stefan-Boltzmann, ε là độ phát xạ và h' là hệ số truyền nhiệt do đối lưu cưỡng bức.

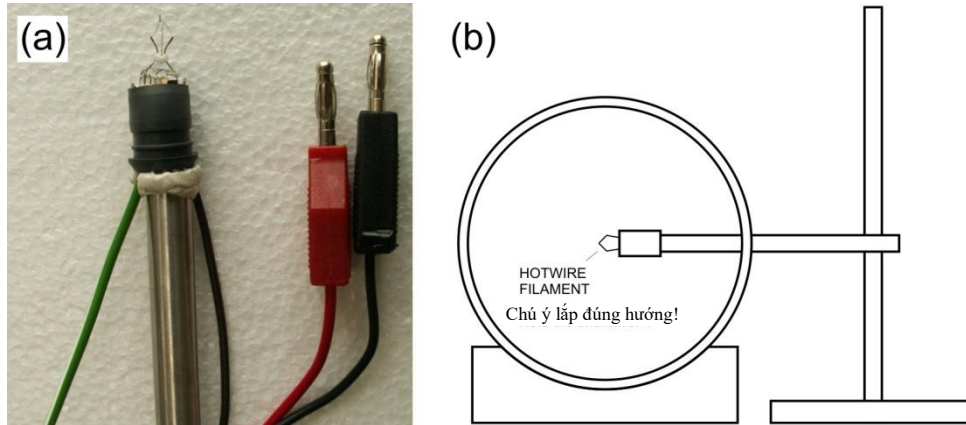
Đối với sự đối lưu cưỡng bức của dây tóc nóng, quá trình đối lưu cưỡng bức có thể được biểu thị qua định luật King: $h' = a' + b v^c$, trong đó a' và b là các hằng số và c là số mũ của vận tốc gió. Độ dài của dây tóc lớn hơn nhiều độ rộng của nó, nên sự truyền nhiệt do dẫn nhiệt có thể được bỏ qua. Với các độ chênh lệch nhiệt độ nhỏ, ($T_w \sim T_0$), thì $T_w^4 - T_0^4 \sim T_0^3(T_w - T_0)$, do đó sự truyền nhiệt do bức xạ có thể được viết thành $4A_w \sigma \varepsilon T_0^3(T_w - T_0) \rightarrow k(T_w - T_0)$ và Q_{nc} có thể coi như không đổi. Sau khi kể đến tất cả các điều đó, ta có thể viết lại (7) thành

$$V_w \cdot I_w = (a + b v^c) A_w (T_w - T_0), \quad (8)$$

với $a = a' + Q_{\text{nc}} / (T_w - T_0) + 4A_w \sigma \varepsilon T_0^3$.

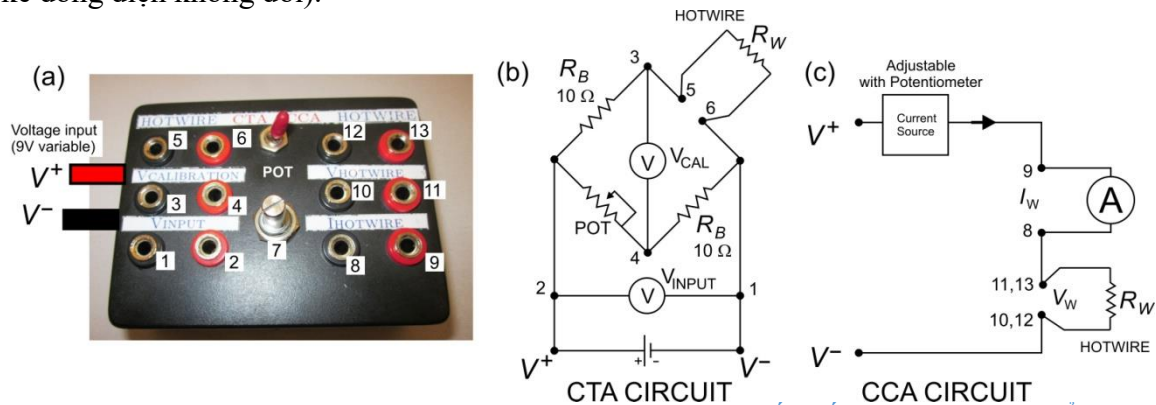
Bây giờ, ta tiến hành các thí nghiệm để xác định giá trị của b/a và c với hai phương pháp khác nhau: dây nóng với nhiệt độ không đổi và dây nóng với dòng điện không đổi qua nó.

Lắp dây tóc vào thanh thép như thấy trên Hình 8(a) và đặt nó vào trong ống gió, qua lỗ trên thành ống (em có thể xoay ống gió khi cần thiết). Khi lắp dây tóc vào ống gió, hãy chắc chắn rằng em lắp theo đúng hướng: tiết diện ngang lớn nhất của dây tóc phải vuông góc với luồng gió, như ở Hình 8(b). **CẢNH BÁO: Không được chạm vào dây tóc.**

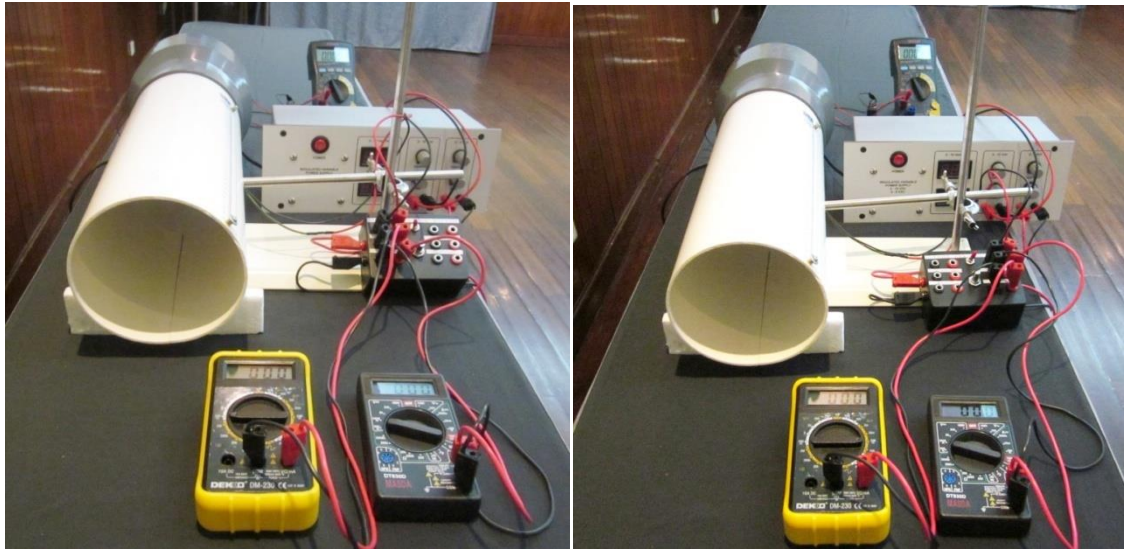


Hình 8. (a) Dây tóc (hotwire filament) (b) Dây tóc trong ống gió

Hai thí nghiệm đòi hỏi một số mạch điện tử mà chúng tôi đặt vào trong một cái hộp điện tử, như trong Hình 9 dưới đây. Để tiến hành mỗi thí nghiệm, em chỉ cần dùng một phía của mạch. **Có một cái chuyển mạch nhỏ trên mặt hộp** để chuyển giữa hai phía, có tên là CTA (Constant Temperature Anemometer-Phong tốc kế nhiệt độ không đổi) và CCA (Constant Current Anemometer-Phong tốc kế dòng điện không đổi).



Hình 9. (a) Hộp điện tử của dây tóc (b) Mạch điện của phong tốc kế nhiệt độ không đổi (CTA); (c) Mạch điện của phong tốc kế dòng điện không đổi (CCA).



Hình 10. (a) Cách bố trí phong tốc kế nhiệt độ không đổi (CTA), bên trái. (b) Cách bố trí phong tốc kế dòng điện không đổi (CCA), bên phải.

[D.1] Phương pháp nhiệt độ không đổi [3.2 đ]

Phương pháp nhiệt độ không đổi được thực hiện bằng cách giữ cho nhiệt độ của dây tóc (và do đó, điện trở của nó) không đổi với các tốc độ gió khác nhau. Muốn vậy, ta dùng cầu Wheatstone với một biến trở (POT) mắc đối diện với dây tóc, để cân bằng cầu, như thấy trên Hình 9(b).

Trước tiên, ta cân bằng cầu dùng cách chỉnh chiết áp (POT) để đặt $V_{CALIBRATION}$ về số không. Khi tốc độ gió tăng lên, R_W giảm đi và cầu mất cân bằng. Để phục hồi giá trị R_W và làm cầu cân bằng trở lại, ta cần tăng V_W (bằng cách tăng V_{INPUT}) để tăng công suất tiêu tán.

Công thức sau đây được dùng trong thí nghiệm nhiệt độ không đổi.

$$\frac{V_W^2}{R_W} = (a + bv^c) A_w (T_w - T_0), \quad (9)$$

với V_W và R_W là điện áp và điện trở của dây tóc. Ta không đo điện áp trên dây tóc, mà thay vào đó, ta đo độ giảm điện thế trên cầu Wheatstone (V_{INPUT}). Khi đó, phương trình (9) trên đây được viết lại thành:

$$V_{INPUT}^2 = A + Bv^c. \quad (10)$$

[D.1.1] Tìm biểu thức cho A và B .

[0.4 điểm]

Phương trình (10) có thể được viết lại dưới dạng tuyến tính, mà em có thể dùng để hồi quy tuyến tính:

$$\ln y = \ln \frac{b}{a} + c \ln v. \quad (11)$$

[D.1.2] y là gì?

[0.3 điểm]

[D.1.3] Tiến hành thí nghiệm để thu được b/a và c!

[2.5 điểm]

CHỈ DẪN VÀ CẢNH BÁO:

- Mắc hộp điện tử vào chế độ nhiệt độ không đổi (CTA).
- Mắc các dây nối và phích cắm như Hình 9(b) và Hình 10(a). Dùng nguồn điện 9V cho hộp điện tử của dây tóc.
- CẢNH BÁO: Hãy thận trọng không chạm vào và không làm hỏng dây tóc. Nếu em làm hỏng dây tóc, em sẽ chỉ được cấp lại một dây thay thế trong suốt buổi thi.**

- (d) Kiểm tra lại cẩn thận việc mắc mạch điện và chắc chắn rằng các núm trên nguồn điện đều được xoay hết về phía trái (trị số nhỏ nhất) trước khi bật nguồn.
- (e) Bật nguồn điện và từ từ tăng điện áp của hộp điện tử lên khoảng 1 V. Sau đó, em cần điều chỉnh chiết áp trên cầu Wheatstone sao cho V_{CALIB} bằng không. Trước khi gió thổi, chỉnh chiết áp sao cho V_{CALIB} bằng không. Ta nói rằng cầu trong trường hợp này là cân bằng.
- (f) Khi cầu đã cân bằng, em không cần điều chỉnh điện trở của chiết áp cho phép đo sau đó.
- (g) **CẢNH BÁO: không dùng điện áp cao quá 2 V khi không có gió, vì em có thể làm hỏng dây tóc. Dây tóc bị hỏng nếu nó nóng sáng. Nhớ rằng dây tóc chỉ được thay một lần trong cả bài thí nghiệm.**
- (h) Tăng tốc độ gió, chỉnh V_{INPUT} sao cho cầu lại cân bằng, tức là điện trở dây tóc trở lại giá trị ban đầu của nó.
- (i) Lặp lại bước (h) đến khi em có đủ số liệu. Ghi các số liệu vào answer sheet và vẽ đồ thị để xác định b/a và c .

CẢNH BÁO: Không được hạ công suất của động cơ trước khi tắt nguồn đốt dây tóc. Nếu em làm thế, dây tóc sẽ bị quá nóng và bị hỏng. **Nhớ rằng dây tóc chỉ được thay một lần trong cả bài thí nghiệm.**

[D.2] Phương pháp dòng điện không đổi [3.5 đ]

Thí nghiệm dòng điện không đổi được thực hiện bằng cách giữ cho cường độ dòng điện qua dây tóc không đổi, thông qua việc dùng hộp điện tử làm nguồn dòng không đổi. Dòng điện có thể được chỉnh bằng cách quay núm chiết áp trên hộp.

Công thức sau đây được dùng cho thí nghiệm dòng điện không đổi:

$$V_w \cdot I_w = (a + bv^c) \frac{A_w}{\alpha R_0} (R_w - R_0), \quad (12)$$

Công thức này thu được từ phương trình (8) khi ta sử dụng phép thay thế sau: $T_w - T_0 = \frac{R_w - R_0}{\alpha R_0}$.

Trong thí nghiệm này, trước hết, ta cần đo R_0 , lúc không có gió ($v=0$). Phương trình (12) được viết lại thành:

$$\frac{V_w}{I_w} = \frac{R_0}{k} V_w \cdot I_w + R_0. \quad (13)$$

[D.2.1] Tìm biểu thức cho K .

[0.2 điểm]

[D.2.2] Hãy tiến hành một thí nghiệm để xác định giá trị của R_0 .

[1.2 điểm]

CHỈ DẪN VÀ CẢNH BÁO:

- (a) Chuyển hộp điện tử sang chế độ dòng không đổi (CCA).
- (b) Mắc các dây dẫn và các phích cắm theo Hình 9(c) và Hình 10 (b).
Kiểm tra cẩn thận việc mắc mạch điện và chắc chắn rằng các núm trên nguồn điện đều được xoay hết về phía trái (giá trị nhỏ nhất) trước khi bật nguồn.
- (c) **CẢNH BÁO: không dùng dòng điện lớn hơn 180 mA, vì em có thể làm hỏng dây tóc. Dây tóc bị hỏng nếu nó nóng sáng. Nhớ rằng dây tóc chỉ được thay một lần trong cả bài thí nghiệm.**
- (d) Bật nguồn điện và tăng từ từ điện áp hoặc dòng điện của dây tóc
- (e) Chú ý rằng em có thể hạn chế dòng điện vào dây tóc bằng cách chỉnh chiết áp trên hộp (nghĩa là dòng điện và điện áp trên dây tóc sẽ không tăng ngay cả khi em tăng điện áp trên nguồn điện). Chúng tôi gợi ý em đặt điện áp trên nguồn ở 7.5 V để có điện áp làm việc ổn định cho hộp điện tử.

- (f) **Hãy chắc chắn rằng đồng hồ hiện số đa năng dùng để đo dòng điện đang hoạt động, nghĩa là số chỉ của nó không phải là không. Mạch đo dòng điện được bảo vệ bằng một cái cầu chì. Nếu cầu chì bị đứt, máy đo đa năng vẫn có vẻ như đang hoạt động, nhưng số chỉ dòng điện luôn là số không.**
- (g) Ghi lại giá trị dòng điện và điện áp trên dây tóc.
- (h) Lặp lại bước (g) đến khi em có đủ dữ liệu. Ghi các dữ liệu vào answer sheet và vẽ đồ thị để xác định k và R_0 .

Bây giờ ta đã sẵn sàng để xác định b/a và c giống như trong trường hợp nhiệt độ không đổi. Ta viết lại phương trình (12) thành dạng sau:

$$\ln y = \ln \frac{b}{a} + c \ln v. \quad (14)$$

[D.2.3] Trong trường hợp này, y là gì?

[0.2 điểm]

[D.2.4] Tiến hành thí nghiệm để xác định b/a và c .

[1.9 điểm]

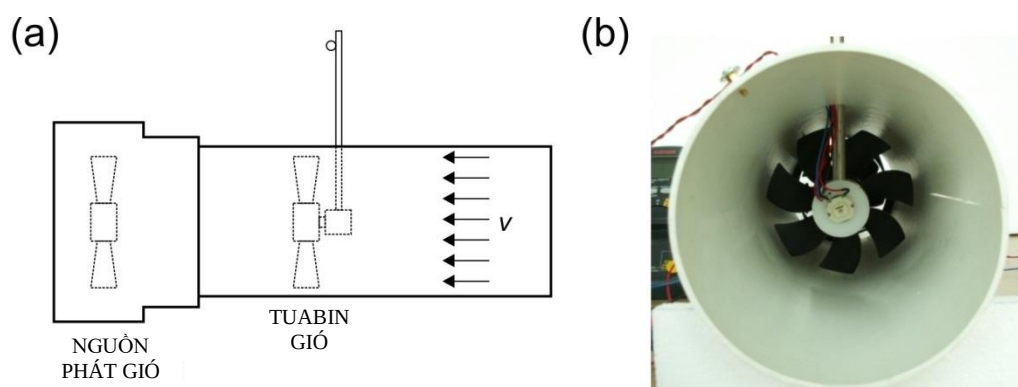
CHỈ DẪN VÀ CẢNH BÁO:

- (a) **Chắc chắn rằng các núm trên nguồn điện đều được xoay hết về phía trái (giá trị nhỏ nhất) trước khi bật nguồn.** Bật nguồn điện và tăng từ từ điện áp hoặc dòng điện của dây tóc.
- (b) Chính chiết áp đến giá trị dòng điện mà em muốn.
CẢNH BÁO: không dùng dòng điện **lớn hơn 180 mA**, vì em có thể làm hỏng dây tóc. Dây tóc bị hỏng nếu nó nóng sáng. **Nhớ rằng dây tóc chỉ được thay một lần trong cả bài thí nghiệm.**
- (c) Bật điện áp cho động cơ tạo gió.
- (d) Ghi lại giá trị dòng điện và điện áp trên dây tóc ứng với tốc độ gió này.
- (e) Chính lại tốc độ gió và lặp lại bước (d) cho đến khi em có đủ số liệu.
- (f) Ghi chép các số liệu của em vào answer sheet và vẽ đồ thị để xác định b/a và c .

[E] Tuabin gió [5.6 điểm]

Ta sẽ khảo sát vật lý của tuabin gió và nghiên cứu hiệu suất chuyển đổi năng lượng của nó. Trong thí nghiệm này, ta dùng một động cơ điện một chiều đơn giản làm tua bin gió, để chuyển đổi cơ năng từ rôto thành điện năng.

Một tham số xác định hiệu suất của tua bin gió là tải ngoài (điện trở mắc ở mạch ngoài) của nó. Trong thí nghiệm này, ta sẽ nghiên cứu tải gây nên hiệu suất cực đại của tuabin gió, bằng cách dùng một sợi dây điện trở niken-crom (nichrom) để làm điện trở tải có giá trị điện trở thấp ($< 2 \Omega$). Tải này có thể thay đổi được bằng cách thay đổi độ dài của sợi dây. Ta dùng các kẹp cá sấu để tiếp xúc với sợi dây.



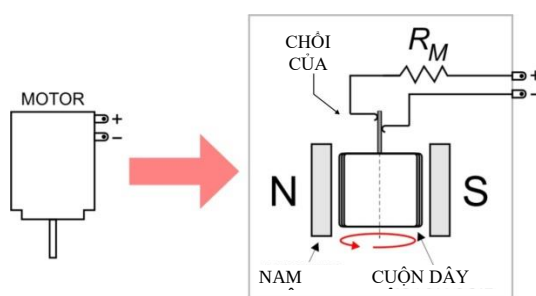
Hình 11. Bố trí thí nghiệm tuabin gió

Một tham số mấu chốt làm ảnh hưởng đến hiệu suất của tuabin gió là Tip Speed Ratio (TSR), được định nghĩa là:

$$TSR = \frac{\Omega R}{v}, \quad (15)$$

trong đó, Ω là tốc độ góc của cánh quạt, R là bán kính của vùng quét bởi cánh quạt và v là tốc độ gió đi đến đầu mút của cánh quạt rôto. Ta giả thiết rằng tốc độ gió là đồng đều trên toàn tiết diện ngang của ống gió.

Động cơ của tuabin có một mạch điện bên trong, như thấy ở hình dưới. Một cuộn dây quay cung cấp suất điện động khi mô tơ quay. Cuộn dây có một điện trở nối tiếp hiệu dụng R_M , là tổng điện trở của cuộn dây trong lõi động cơ. R_M là bé, nhưng không thể bỏ qua được ($< 2 \Omega$). Vậy, động cơ thực có thể được mô hình hóa như một động cơ lí tưởng (trong đó, cuộn dây không có điện trở) cộng với một điện trở nối tiếp R_M như thấy trong hình dưới đây.



Hình 12. Mạch tương đương của mô tơ (tuabin gió)

[E.1] Hãy xác định điện trở trong nối tiếp R_M của động cơ tuabin. Chú ý rằng tiếp điểm di động giữa rôto và chổi của stato trong động cơ điện một chiều (xem Hình 12) có thể gây nên một điện trở thêm vào, điện trở này có thể thay đổi theo vị trí của cánh quạt tuabin.

[0.4 điểm]

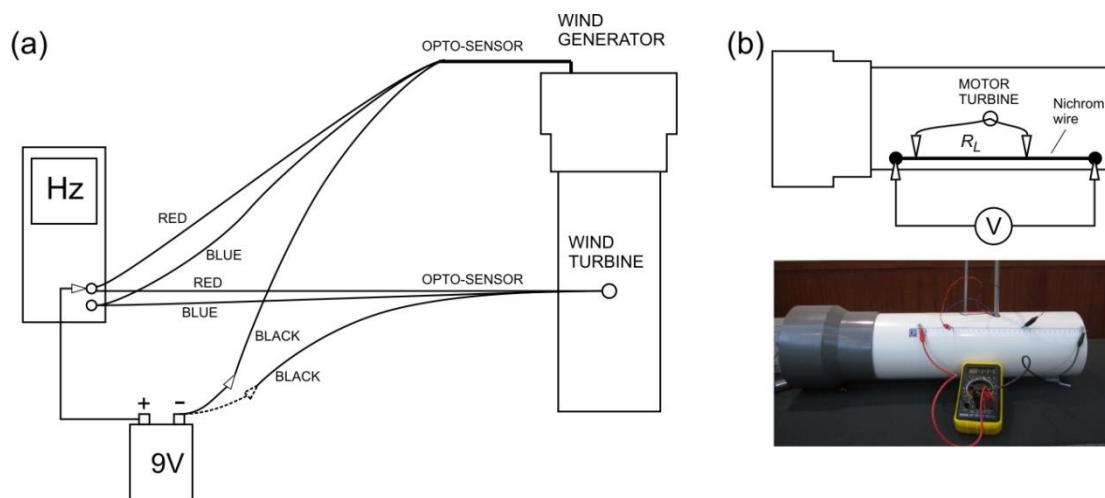
[E.2] Hãy xác định điện trở trên một đơn vị chiều dài của sợi dây nichrom, λ_R (tính theo Ω/m). Chú ý rằng điện trở của dây nichrom là bé ($< 7 \Omega$), có thể so sánh được với điện trở của dây nối của đồng hồ hiện số đa năng.

[1.2 điểm]

Nếu em cần nguồn dòng không đổi, em có thể dùng hộp điện tử ở chế độ Phong tốc kế dòng điện không đổi (Constant Current Anemometer (CCA)). **Nếu em cần dùng ampe kế, hãy dùng máy đo đa năng DMM#2 hoặc #3 và hãy cẩn thận để không vượt quá giới hạn đo, nếu không sẽ làm cháy cầu chì.**

CHỈ DẪN:

- Đặt tuabin vào trong ống gió. Trước hết, từ phía trong ống gió, đưa các dây nối có đầu kẹp cá sấu và phích cắm của tuabin ra ngoài ống, qua lỗ nhỏ ở trên đỉnh của ống gió. Sau đó, đưa thanh thép (đã dùng để gắn dây tóc) vào lỗ đó, rồi cắm nó vào động cơ, như thấy ở Hình 11.
- Em sẽ cần đo hai giá trị tần số trong thí nghiệm này: tần số của máy tạo gió (để biết tốc độ gió) và tần số của tuabin gió. Em có thể làm việc này bằng cách mắc các dây nối như thấy trên Hình 13(a). Em có thể dùng kẹp cá sấu màu đen để chuyển từ chế độ đọc tần số của máy tạo gió sang chế độ đọc tần số của tuabin gió.
- Hãy nối dây nichrom làm tải cho động cơ tuabin bằng cách dùng các kẹp cá sấu. Em có thể đo điện áp trên một phần của dây bằng cách mắc vôn kế vào hai đầu của sợi dây nichrom như thấy trên Hình 13 (b)



Hình 13 (a) Cách mắc để đọc hai tần số. Dùng dây màu đen (black) để chuyển giữa hai phép đo cho máy tạo gió và tua bin gió (b). Cách mắc vào dây nichrom để làm tải. Chú ý rằng vôn kế được mắc vào hai đầu của sợi dây nichrom.

Chú thích trên hình: red= đỏ; blue=xanh; black=đen; opto-sensor=cảm biến quang điện; wind generator=máy tạo gió; wind turbine=tuabin gió; motor turbine= động cơ tuabin; nichrom wire=dây nichrom.

[E.3] Tiến hành thí nghiệm xác định tải tối ưu R_L để có sự truyền công suất cực đại. Hãy vẽ đồ thị của công suất cung cấp cho R_L theo giá trị của điện trở R_L , hoặc độ dài l của đoạn dây nichrom. Em dự đoán bằng lý thuyết giá trị R_L bằng bao nhiêu?

[2.4 điểm]

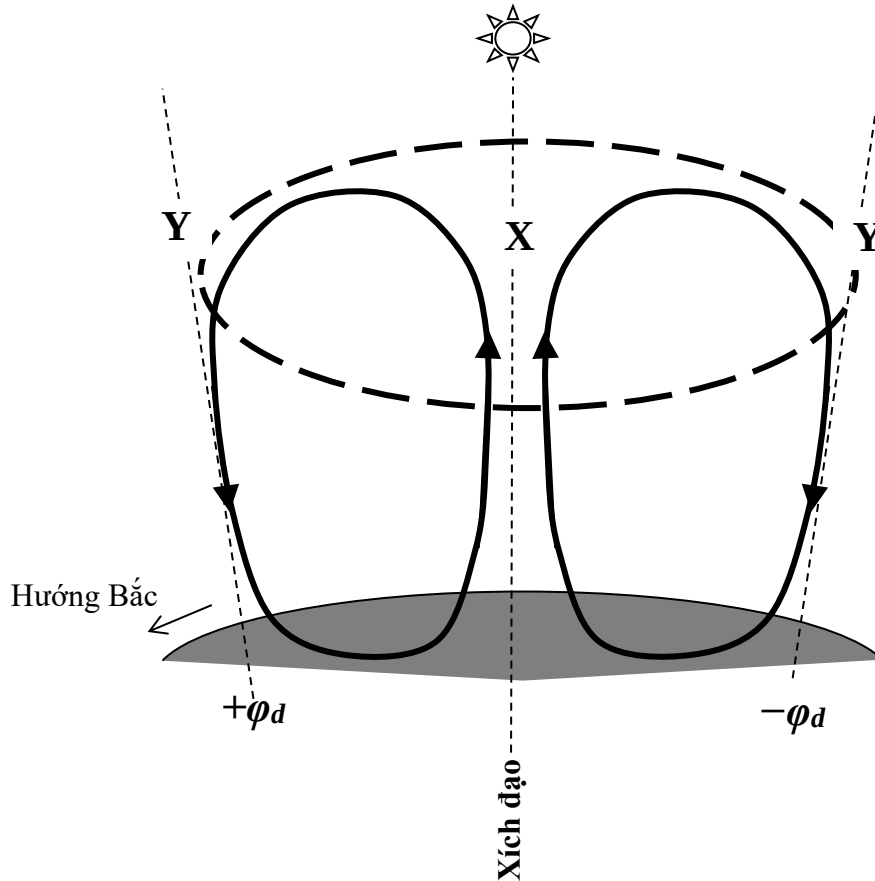
Hiệu suất η_{WT} của tuabin gió được định nghĩa bằng tỉ số của công suất cung cấp cho tải R_L và công suất gió P_w .

[E.4] Dùng tải tối ưu R_L mà em đã tìm được bằng thực nghiệm ở E.3, hãy vẽ đồ thị của η_{WT} theo TSR. [1.6 điểm]

APhO 15 – 2014 tại Singapore

Lý thuyết 1

Hình vẽ dưới đây biểu diễn dòng lưu chuyển Hadley của không khí trong khí quyển ở vùng nhiệt đới xung quanh thời điểm Xuân phân. Ở cả hai bán cầu, dòng không khí đi lên từ Xích Đạo và di chuyển về hai cực Trái Đất trước khi đi xuống ở vùng cận nhiệt đới tại các vĩ độ $\pm \varphi_d$ (dấu dương ứng với bán cầu Bắc và dấu âm ứng với bán cầu Nam). Các nhánh trên của dòng Hadley (ở trong vùng được giới hạn bởi hình bầu dục nét đứt) có momen xung lượng đối với trục quay của Trái Đất được bảo toàn. Chú ý rằng hình vẽ không theo đúng tỉ lệ thực.



(a) **(2 điểm)**

Giả sử rằng xung quanh điểm X không có vận tốc gió theo hướng Đông-Tây. Tại điểm Y, vận tốc gió theo hướng Đông-Tây u_Y được biểu diễn bởi công thức như thế nào? Vận tốc được quy ước là dương khi hướng từ Tây sang Đông.

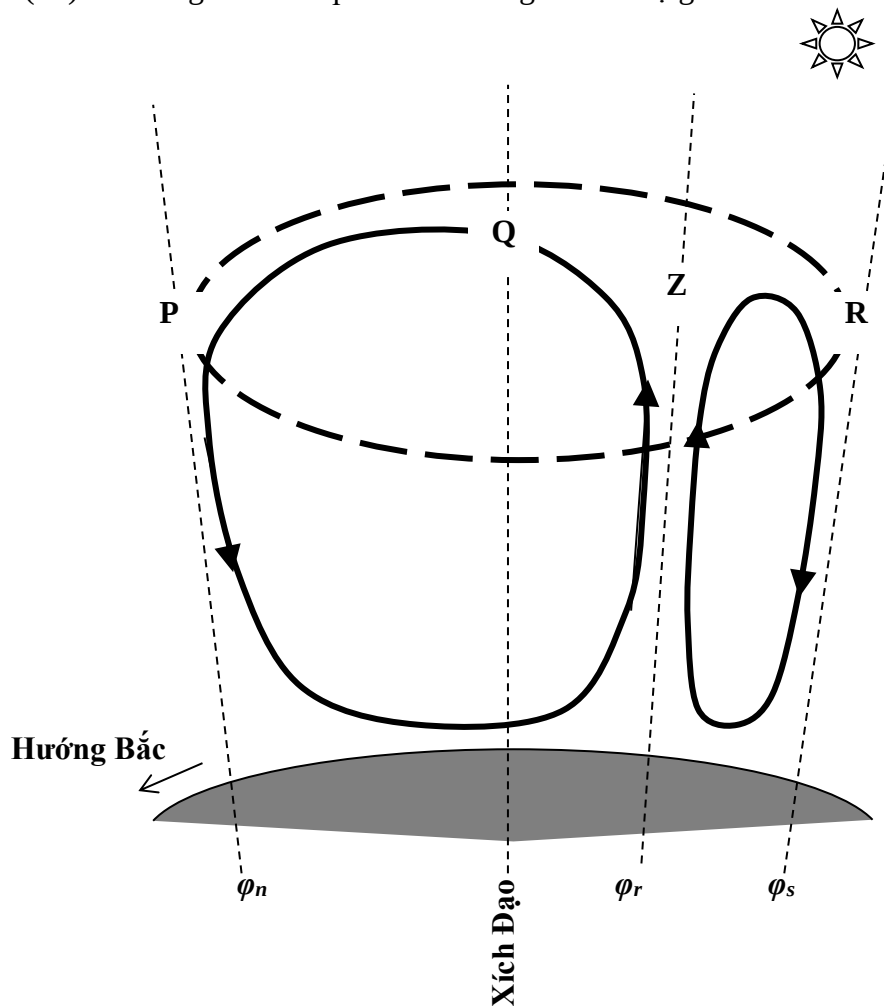
(Trái Đất có bán kính là a , quay quanh trục với tốc độ góc Ω ; độ dày của khí quyển nhỏ hơn rất nhiều so với bán kính Trái Đất).

(b) **(1 điểm)** Do những nguyên nhân nào sau đây mà ở vùng nhánh dưới của dòng Hadley, momen xung lượng không được bảo toàn?

Tích vào phương án đúng. Có thể có nhiều hơn một phương án đúng. Tích vào phương án sai sẽ bị trừ điểm.

- (I) Do ma sát giữa không khí và bề mặt Trái Đất.
- (II) Có sự chảy rối (chảy không thành lớp) trong tầng thấp của khí quyển.
- (III) Không khí phía dưới đặc hơn nên chuyển động quay của nó quanh trục Trái Đất chậm hơn.

(IV) Không khí ẩm ở phía dưới làm giảm tốc độ gió.



Trong khoảng thời gian mà ở bán cầu Bắc có Đông chí, dòng Hadley đi lên ở nơi có vĩ độ φ_r và đi xuống ở các nơi có vĩ độ φ_n và φ_s như trên hình vẽ. (Hình vẽ này được sử dụng cho các phần (c), (d) và (e)).

(c) **(2 điểm)**

Giả sử rằng xung quanh điểm Z không có tốc độ gió theo hướng Đông-Tây. Cho biết $\varphi_r = -8^\circ$, $\varphi_n = 28^\circ$ và $\varphi_s = -20^\circ$, hãy tính các tốc độ gió theo hướng Đông-Tây u_P , u_Q và u_R tại các điểm P, Q và R tương ứng.

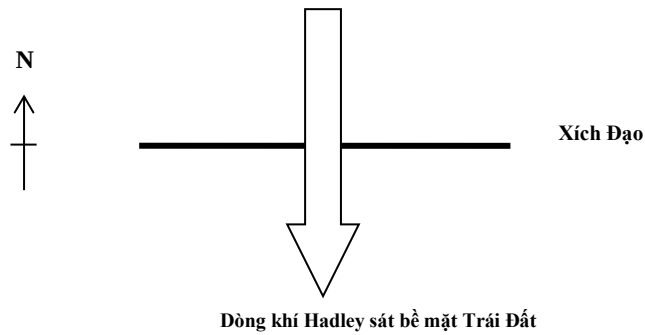
Từ đây, cho biết bán cầu nào dưới đây có dòng không khí mạnh hơn?

- (I) Bán cầu đang trong mùa đông
- (II) Bán cầu đang trong mùa hè
- (III) Cả hai bán cầu có dòng không khí mạnh như nhau.

(Bán kính Trái Đất là $a = 6370$ km).

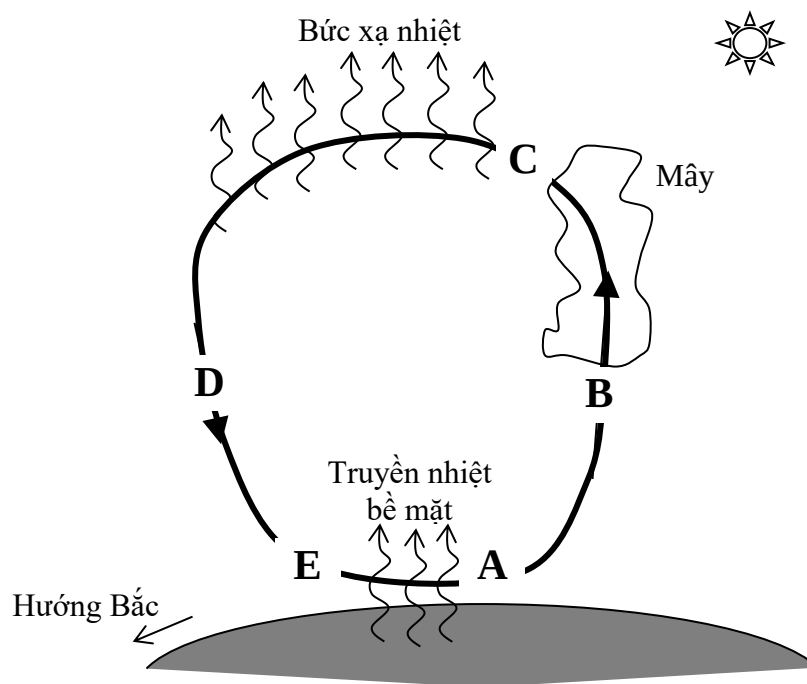
(d) **(1 điểm)** Nhánh sát bề mặt Trái Đất của dòng Hadley từ bán cầu Bắc lưu chuyển xuống bán cầu Nam qua Xích Đạo (hình vẽ bên dưới). Hãy vẽ mũi tên vào hình này để chỉ chiều của thành phần Đông-Tây của lực Coriolis tác dụng vào dòng khí lưu chuyển

- (A) ở phía bắc của đường Xích Đạo;
- (B) ở phía nam của đường Xích Đạo.



- (e) **(1 điểm)** Sử dụng kết quả phần (d) và biết rằng lực ma sát giữa gió và bề mặt chỉ gần cân bằng với lực Coriolis theo hướng Đông-Tây, hãy vẽ phác đường đi của gió ở gần bề mặt trong vùng nhiệt đới hai bên Xích Đạo xung quanh thời điểm Đông chí ở bán cầu Bắc.

Giả sử dòng Hadley có thể được đơn giản hóa như một động cơ nhiệt thể hiện trong hình dưới đây. Xét dòng Hadley ở bán cầu đang trong mùa đông như hình vẽ, quá trình khối khí chuyển từ A đến B và từ D đến E là đoạn nhiệt; từ B đến C, từ C đến D và từ E đến A là đẳng nhiệt. Khí thu nhiệt do tiếp xúc với bề mặt Trái Đất và do hơi nước trong khí quyển ngưng tụ, còn mất nhiệt do bức xạ nhiệt vào không gian.

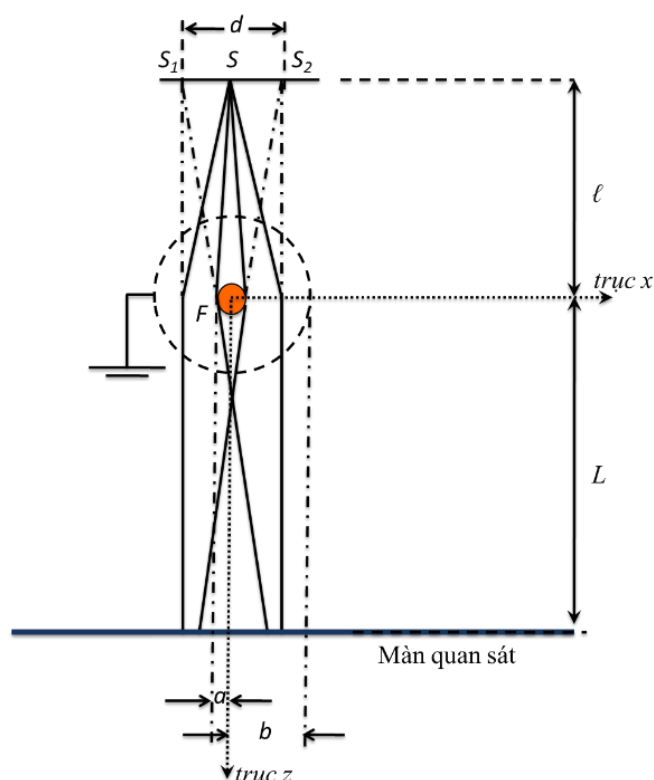


- (f) **(2 điểm)** Cho rằng áp suất khí quyển ở một độ cao nào đó được gây bởi trọng lượng của lớp không khí ở phía trên, hãy sắp xếp, theo thứ tự độ lớn, các áp suất p_A , p_B , p_C , p_D , p_E , tương ứng tại các điểm A, B, C, D, E bằng một dãy các bất đẳng thức.

- (Cho biết $p_A = 1000 \text{ hPa}$ và $p_D = 225 \text{ hPa}$; $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$).
- (g) **(2 điểm)** Gọi nhiệt độ gần bề mặt Trái Đất là T_H và ở trên cùng của khí quyển là T_C . Cho rằng áp suất tại điểm A và áp suất tại điểm E chênh nhau 20 hPa , cho $T_H = 300 \text{ K}$, hãy tính T_C .
 Đối với không khí, tỉ số giữa hằng số khí (R) và nhiệt dung mol đẳng áp (C_p) là $\kappa = 2/7$.
- (h) **(2 điểm)** Tính áp suất p_B .
- (i) Đối với khối không khí di chuyển một vòng theo dòng Hadley vào mùa đông, sử dụng hằng số khí R và các đại lượng được xác định ở trên, hãy tìm biểu thức xác định
 (A) **(2 điểm)** công thực hiện (tính cho một mol), W_{net} , bỏ qua ma sát bề mặt;
 (B) **(1 điểm)** nhiệt lượng bị mất (tính cho một mol), Q_{loss} , tại lớp trên cùng của khí quyển.
- (j) **(1 điểm)** Tính hiệu suất ε_i lý tưởng cho dòng Hadley về mùa đông?
- (k) **(2 điểm)** Hãy chứng minh rằng hiệu suất ε thực tế của dòng Hadley mùa đông luôn luôn nhỏ hơn ε_i , bằng cách trình bày tất cả các bước tính toán.
- (l) **(1 điểm)** Để giải thích tại sao ε thấp hơn giá trị lý tưởng, các phát biểu nào sau đây phù hợp?
 Tích vào phương án đúng. Có thể có nhiều hơn một phương án đúng; tích vào phương án sai sẽ bị trừ điểm.
- (I) Chúng ta đã bỏ qua công thực hiện để chống lại ma sát bề mặt.
 - (II) Sự ngưng tụ xảy ra ở nhiệt độ thấp hơn nhiệt độ của nguồn nhiệt.
 - (III) Có sự hóa hơi nước không thuận nghịch trên bề mặt.
 - (IV) Hiệu suất lý tưởng chỉ áp dụng trong trường hợp không có sự chuyển thể (chuyển pha) của nước.

Lý thuyết 2

Thí nghiệm giao thoa điện tử hai khe được thực hiện lần đầu tiên bởi Möllenstedt cùng cộng sự, Merli-Missiroli và Pozzi vào năm 1974, Tonomura cùng cộng sự vào năm 1989. Trong thí nghiệm này, một nguồn điện tử dạng điểm S phát ra các điện tử (electron) có cùng năng lượng. Những điện tử đó, trước tiên đi qua một “lưỡng lăng kính điện tử” rồi đập vào màn quan sát. S_1 và S_2 là các nguồn ảo cách nhau một khoảng d .



Lưỡng lăng kính điện tử bao gồm một lưới kim loại hình trụ nối đất và một dây kim loại mảnh F được đặt trên trục của lưới hình trụ. Khoảng cách giữa nguồn và lưỡng lăng kính là ℓ , khoảng cách giữa lưỡng lăng kính và màn là L . Trong hình vẽ, dây mảnh F hướng vuông góc với mặt phẳng giấy. Chú ý rằng dây rất mảnh (hình vẽ không tỉ lệ với kích thước thực).

- (a) **(2 điểm)** Lấy tâm của tiết diện dây làm gốc tọa độ O , tìm điện thế tại một điểm rất gần dây, có tọa độ (x, z) , theo các đại lượng V_a , a và b . Trong đó, V_a là điện thế tại bề mặt của dây, a là bán kính dây và b là khoảng cách giữa tâm sợi dây và lưới. (Bỏ qua hiệu ứng ảnh điện).
- (b) **(4 điểm)** Một sóng điện từ phẳng có vectơ sóng k_z đi tới và bị lệch bởi lưỡng lăng kính do thành phần theo phương x của lực điện tác dụng lên điện tử. Hãy xác định k_x (thành phần theo phương x của vectơ sóng) được gây bởi lưỡng lăng kính theo các đại lượng: e , v_z , V_a , k_z , a và b . Trong đó, e và v_z là điện tích và thành phần vận tốc theo phương z của điện tử ($k_x \ll k_z$). Chú ý rằng $\vec{k} = \frac{2\pi\vec{p}}{h}$ với h là hằng số Planck.
- (c) Trước khi thoát ra từ S , điện tử được gia tốc bởi điện thế V_0 . Hãy xác định bước sóng của điện tử theo các đại lượng: khối lượng nghỉ m_0 , điện tích e và V_0 trong các trường hợp:
- (2 điểm)** Bỏ qua hiệu ứng tương đối tính.
 - (3 điểm)** Tính đến hiệu ứng tương đối tính.
- (d) Trong thí nghiệm của Tonomura cùng cộng sự:

$$\begin{aligned}
v_z &= c/2, \\
V_a &= 10 \text{ V}, \\
V_0 &= 50 \text{ kV}, \\
a &= 0.5 \text{ }\mu\text{m}, \\
b &= 5 \text{ mm}, \\
\ell &= 25 \text{ cm}, \\
L &= 1.5 \text{ m}, \\
h &= 6.6 \times 10^{-34} \text{ Js}, \\
\text{điện tích điện tử là } -e &= -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}, \\
\text{khối lượng điện tử là } m_0 &= 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}, \\
\text{tốc độ ánh sáng trong chân không là } c &= 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}
\end{aligned}$$

- (i) **(2 điểm)** Tính giá trị của k_x .
- (ii) **(2 điểm)** Xác định khoảng vân giao thoa trên màn quan sát.
- (iii) **(1 điểm)** Nếu sóng điện từ là sóng cầu thay vì là sóng phẳng thì khoảng vân giao thoa lớn hơn, giữ nguyên hay nhỏ hơn so với khoảng cách vân tính ở câu (ii)?
- (iv) **(2 điểm)** Ở phần (c), hãy xác định sai số tỉ đối của bước sóng điện từ khi sử dụng phương pháp phi tương đối tính.
- (v) **(2 điểm)** Tính khoảng cách d giữa hai nguồn ảo.

Lý thuyết 3

Hiệu ứng thấu kính hấp dẫn là một hiện tượng trong đó ánh sáng từ một nguồn ở xa bị lệch do sự cong của không-thời gian, được gây nên bởi một vật thể có khối lượng lớn nằm gần hoặc nằm trên đường nối giữa người quan sát và nguồn sáng. Điều này đã được quan sát trực tiếp lần đầu tiên trong dịp nhật thực năm 1919, trong đó vị trí quan sát được của các ngôi sao phía sau Mặt Trời khác với vị trí thiên văn của chúng, như Einstein đã tiên đoán.

Trong trường hợp mà người quan sát, vật có khối lượng M gây hiệu ứng thấu kính và nguồn sáng cùng nằm trên một đường thẳng, ánh sáng từ nguồn bị lệch một góc α , tính bằng radian, (α là góc tạo bởi phương của tia sáng xuất phát từ nguồn và phương của chính tia sáng đó tới người quan sát) được cho bởi

$$\alpha = \frac{4GM}{r_E c^2}$$

trong đó, G là hằng số hấp dẫn ($6.67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$), c là tốc độ ánh sáng ($3.00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$), và r_E là bán kính Einstein, tức là khoảng cách ngắn nhất giữa vật gây hiệu ứng thấu kính và đường đi biểu kiến của tia sáng.

- (m) **(4 điểm)** Hãy vẽ sơ đồ mô tả sự sắp xếp trong một hệ thấu kính lí tưởng (là hệ mà ở đó, người quan sát, thấu kính và nguồn cùng trên một đường thẳng). Hãy vẽ đường đi của tia sáng và ghi trên hình các đại lượng α , r_E , bán kính góc Einstein θ_E (góc giữa phương nối nguồn với người quan sát và phương nhìn ảnh của nguồn từ Trái Đất), và các đại lượng khác mà người quan sát ở Trái Đất có thể đo được.

- (n) **(2 điểm)** Hãy vẽ phác ảnh của nguồn (chẳng hạn là một ngôi sao) mà người quan sát ở Trái Đất nhìn thấy, trong trường hợp mà nguồn, vật gây hiệu ứng thấu kính và người quan sát cùng trên một đường thẳng.
- (o) **(3 điểm)** Hãy vẽ phác ảnh của nguồn sáng (chẳng hạn là một ngôi sao), mà người quan sát ở Trái Đất nhìn thấy, trong trường hợp không lí tưởng, trong đó, nguồn, vật gây hiệu ứng thấu kính và người quan sát không cùng trên một đường thẳng. Hãy vẽ phác hệ nguồn-thấu kính để giải thích vì sao lại như vậy.

Hiệu ứng thấu kính hấp dẫn đã được đề nghị như là một phương pháp để phát hiện các vật thể có khối lượng lớn gây quầng (massive compact halo objects -MACHO) trong Thiên hà của chúng ta; chúng có thể là những ứng viên cho các khối vật chất tối. Các vật thể này thường là những tàn dư của các sao tối, như sao neutron và các lỗ đen. Vì rằng các ngôi sao và các MACHO chuyển động trong thiên hà, hiệu ứng thấu kính có khả năng xảy ra khi một lỗ đen hay sao neutron đi qua phía trước một ngôi sao ở xa nó.

- (p) **(3 điểm)** Bán kính Schwarzschild của một lỗ đen xác định cái được gọi là “điểm không quay trở lại”. Biểu thức chính xác cho bán kính Schwarzschild có thể thu được bằng cách coi nó là bán kính mà ở đó, tốc độ thoát bằng tốc độ ánh sáng. Điều đó có nghĩa là bất cứ cái gì nằm trong bán kính Schwarzschild đều không thể thoát ra khỏi lỗ đen. Dùng cơ học Newton, hãy tìm ra công thức cho tốc độ thoát ở khoảng cách r đối với một vật dạng điểm có khối lượng M . Từ đó, hãy tính bán kính Schwarzschild cho một vật dạng điểm có khối lượng M theo hằng số hấp dẫn G và tốc độ ánh sáng c . Hãy nêu rõ ràng các bước tiến hành và cách lập luận. (Điều thú vị là kết quả này trùng với kết quả tính được theo thuyết tương đối rộng).
- (q) **(1 điểm)** Trong trường hợp mà nguồn, thấu kính và người quan sát cùng trên một đường thẳng, nếu đã đo được α và r_E , em làm thế nào để tính được bán kính Schwarzschild của một vật gây hiệu ứng thấu kính?
- (r) **(2 điểm)** Xét trường hợp trong đó ta có một vật gây hiệu ứng thấu kính có khối lượng bằng vài lần khối lượng Mặt Trời (M cỡ vài lần 10^{30} kg) nằm trong một vùng gần ở trong thiên hà (khoảng cách từ người quan sát đến vật gây hiệu ứng thấu kính là D_L , cỡ vài lần 10^{18} m) và một vật nguồn ở xa hơn nữa (khoảng cách từ người quan sát đến nó là D_S , cỡ vài lần D_L).
- Các điều kiện nào sau đây áp dụng được cho trường hợp được mô tả trong câu hỏi:
- | | |
|--|--|
| • α là lớn và $\tan \alpha$, $\sin \alpha$, $\cos \alpha$ cần phải được tính một cách chính xác | • θ_E là lớn và $\tan \theta_E$, $\sin \theta_E$, $\cos \theta_E$ phải được tính một cách chính xác |
| • α là bé và các phép tính gần đúng cho các góc bé có thể được dùng cho $\tan \alpha$, $\sin \alpha$, $\cos \alpha$ | • θ_E là bé và các phép tính gần đúng cho các góc bé có thể được dùng cho $\tan \theta_E$, $\sin \theta_E$, $\cos \theta_E$ |
| • α không có liên quan và không cần tính | • θ_E không có liên quan và không cần tính |
- (s) **(3 điểm)** Dùng các điều kiện ở phần (f), hãy viết lại biểu thức ở phần (e) theo các đại lượng đo được (tức là θ_E , D_S và D_L) cho một vật gây hiệu ứng thấu kính có khối lượng bằng vài lần khối lượng Mặt Trời (M cỡ vài lần 10^{30} kg) nằm trong một vùng gần ở

trong thiên hà (D_L cỡ vài lần 10^{18} m) với một nguồn ở xa hơn nữa (D_S cỡ vài lần D_L). Hãy nêu cách tiến hành của em.

- (t) **(2 điểm)** Giả sử ta có một sự kiện, trong đó một vật gây hiệu ứng thấu kính có khối lượng 6.0×10^{30} kg (3.0 lần khối lượng Mặt Trời), cách Trái Đất 2.6×10^{18} m đi qua phía trước một ngôi sao ở cách Trái Đất 9.2×10^{18} m. Trong quá trình diễn ra sự kiện này, cấu hình là lý tưởng. Bán kính góc Einstein θ_E (nhìn từ Trái Đất) bằng bao nhiêu trong quá trình sự kiện này xảy ra, khi mà nguồn, thấu kính và người quan sát cùng trên đường thẳng?

BÀI THI THỰC HÀNH

Trước tiên, hãy đọc cẩn thận phần này:

1. Thời gian dành cho làm bài thực nghiệm là 5 tiếng.
2. Chỉ được sử dụng bút được phát.
3. Có một tập Answer Sheet mà em phải điền kết quả
4. Viết Mã học sinh (**Student Code**) và các ô ở trên cùng mỗi tờ Answer Sheet và các tờ giấy bổ sung.
5. Em được cấp một số tờ Giấy viết (Writing Sheet).
6. Nếu sử dụng thêm Writing Sheet, hãy viết mã học sinh, số thứ tự câu hỏi và số thứ tự trang vào đó.
7. Nếu em dùng thêm các Writing Sheet mà em không muốn được chấm điểm thì hãy gạch chéo toàn bộ trang giấy bằng 'X'.
8. Em hãy chủ yếu dùng phương trình, số, kí hiệu, đồ thị, hình và dùng ít chữ viết càng tốt. Hãy sử dụng kí hiệu đã được định nghĩa trong câu hỏi.
9. Cuối buổi thi, hãy xếp các tờ giấy theo thứ tự sau:
 - a. Các Answer Sheet chính
 - b. Các Writing Sheet sẽ được chấm
 - c. Các Writing Sheet có gạch chéo bằng chữ 'X'
 - d. Các Writing Sheet chưa sử dụng
 - e. Đề bài.
10. Cho tất cả các tờ giấy trên vào phong bì và để trên bàn.
11. **Em không được cầm bất kì tờ giấy hay dụng cụ thí nghiệm nào ra khỏi phòng thi.**

Tốc độ sóng âm trong dung dịch

1. Mở đầu

Siêu âm có nhiều ứng dụng trong công nghiệp, trong việc kiểm tra mà không làm ảnh hưởng đến cấu trúc của mẫu, trong định vị bằng âm thanh, trong y tế, vv. Hiệu ứng âm-quang được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu về sóng siêu âm. Hiện nay, các thiết bị âm-quang được sử dụng trong điều biến, xử lý tín hiệu và thay đổi tần số của chùm tia sáng. Nhờ có laser mà hiệu ứng âm-quang có thể được quan sát dễ dàng. Ngoài ra, sự phát triển của đầu phát áp điện tần số cao có thể được sử dụng để tạo ra các hiệu ứng âm-quang.

Trong thí nghiệm ở kì APhO 2014 này, chúng ta sẽ khám phá các tính chất của sự truyền sóng âm trong một số dung dịch:

- (i) bằng cách sử dụng hiệu ứng âm-quang trong nhiễu xạ Raman-Nath,
- (ii) bằng quan sát trực tiếp sóng dừng.

Ngoài ra, chúng ta cũng sẽ thấy rằng các thí nghiệm thú vị có thể được thực hiện bằng cách dùng các vật dụng đơn giản, rẻ tiền và dễ tìm.

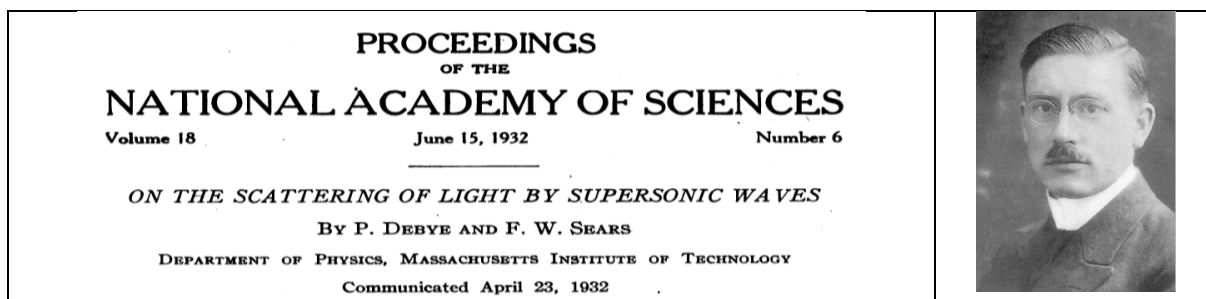
2. Chú ý an toàn:

- (1) Không nhìn trực tiếp vào chùm laser.
- (2) Đầu phát áp điện chỉ được BẬT **khi nó đã được đặt an toàn dưới nước trong bình thủy tinh.**
- (3) Không nhúng tay vào bình thủy tinh khi đầu phát áp điện đang hoạt động.
- (4) Cần thận không để nước lọt vào ổ điện.
- (5) Cầm bình thủy tinh và các đế một cách cẩn thận.
- (6) Không uống các chất lỏng dùng trong thí nghiệm này.
- (7) Hãy đeo kính khi laser được BẬT.
- (8) Tắt laser khi không sử dụng.
- (9) Hãy tắt đầu phát áp điện khi không sử dụng để tránh làm nóng nước, vì tốc độ sóng âm trong nước phụ thuộc nhiệt độ.
- (10) Em được cung cấp một cặp nhựa đựng bài làm để tránh bị ướt.
- (11) Do không gian làm việc không đủ rộng, hãy để các dụng cụ không dùng vào trong hộp và đặt trên nền nhà.
- (12) Em sẽ được cung cấp ba bình thủy tinh để thay mỗi khi làm thí nghiệm với dung dịch khác.

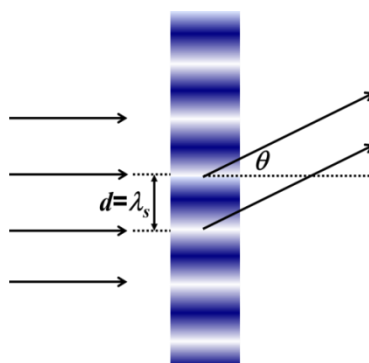
Khoa Vật lí – Trường ĐHSP Hà Nội

Thí nghiệm A

Đo tần số của sóng siêu âm bằng phương pháp nhiễu xạ



Khi sóng âm truyền trong một môi trường, nó gây nên sự thay đổi áp suất, khiến cho chiết suất của môi trường biến thiên. Trong các điều kiện thích hợp, sóng âm làm cho chiết suất biến thiên tuần hoàn, tạo ra trong vật liệu một “cách tử do chiết suất biến thiên tuần hoàn” (ta kí hiệu CTBT), có thể phát hiện bằng phương pháp quang học. Đó là hiệu ứng âm-quang. Debye và Sears, vào năm 1932, thuộc những người đầu tiên đã biểu diễn sự nhiễu xạ ánh sáng bởi các cách tử này. Khảo sát lý thuyết một cách chi tiết đã được thực hiện bởi Raman và Nath vào năm 1935.



Hình 2: CTBT do sóng siêu âm tạo nên trong chất lỏng

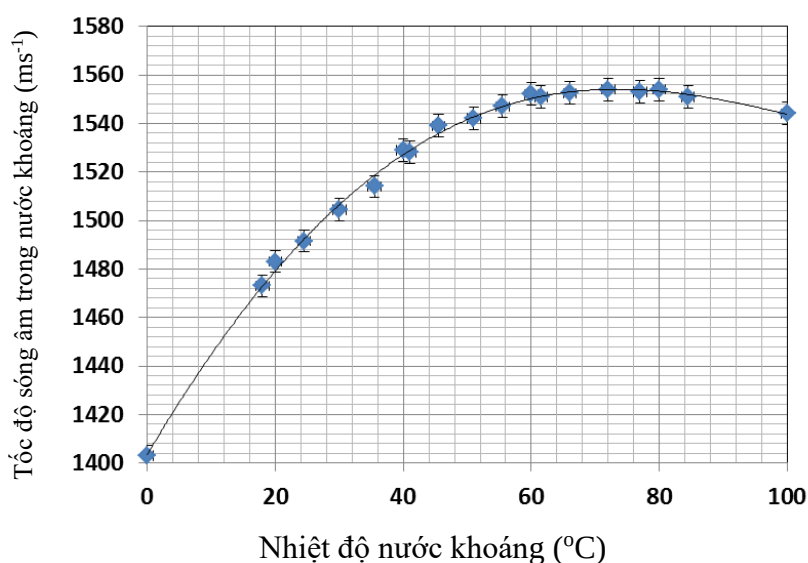
Hình 2 biểu diễn một chùm ánh sáng bị nhiễu xạ bởi CTBT. Sự nhiễu xạ này tuân theo phương trình.

$$d \sin(\theta) = i \lambda_{\text{medium}} \quad (1)$$

ở đây, d là hằng số cách tử, θ là góc nhiễu xạ, i là bậc nhiễu xạ và λ_{medium} là bước sóng ánh sáng trong môi trường.

Theo Raman và Nath, hằng số cách tử d bằng bước sóng λ_s của sóng âm trong môi trường, như được chỉ ra trên Hình 2.

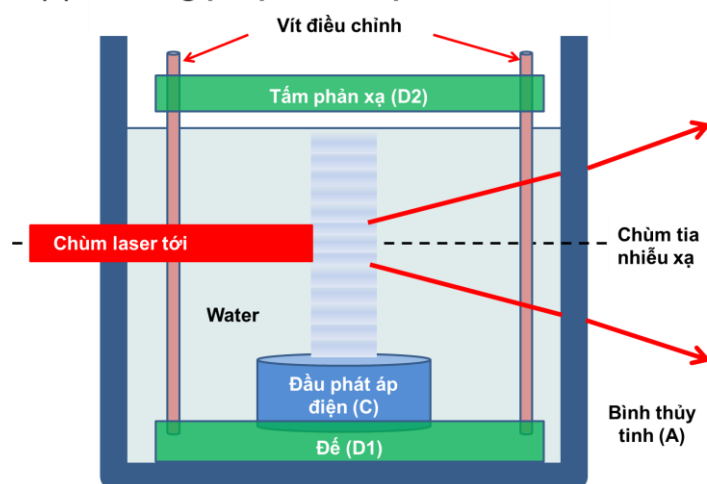
Trong thí nghiệm này, phương pháp nhiễu xạ sẽ được sử dụng để đo tần số của sóng siêu âm tạo ra bởi một Đầu phát áp điện (C) bằng cách sử dụng giá trị đã biết của tốc độ sóng âm trong nước khoáng. Hình 3 cho thấy tốc độ của sóng âm trong nước khoáng phụ thuộc vào nhiệt độ.



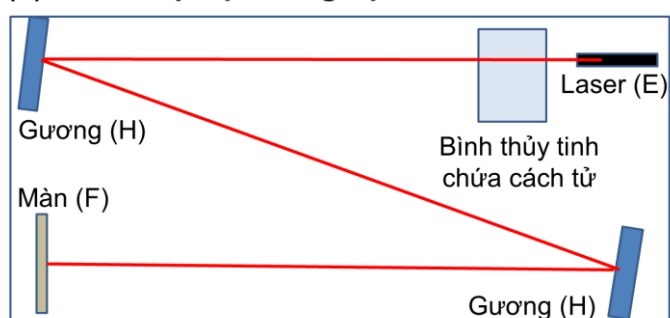
Hình 3: Tốc độ sóng âm trong nước khoáng phụ thuộc vào nhiệt độ.

Đầu phát áp điện (C) được đặt trong khe cắm tròn của đế (D1), cả hệ được đặt trong bình thủy tinh (A) chứa đầy 1.5 l nước khoáng. Đầu phát áp điện (C) tạo ra các CTBT theo phương thẳng đứng trong nước, như trên Hình 4 (a). Với thí nghiệm A, phải đảm bảo rằng tấm phản xạ (D2) ở vị trí cao hơn mực nước. Chùm tia laser tới, vuông góc với CTBT, tạo nên các vân nhiễu xạ. Với khoảng cách đến CTBT đủ lớn, có thể tạo ra trên màn quan sát (F) các vân nhiễu xạ tách biệt đủ để đo lường và phân tích, như được mô tả trên Hình 4 (b).

(a) Phương pháp nhiễu xạ



(b) Sơ đồ lắp đặt thí nghiệm A.

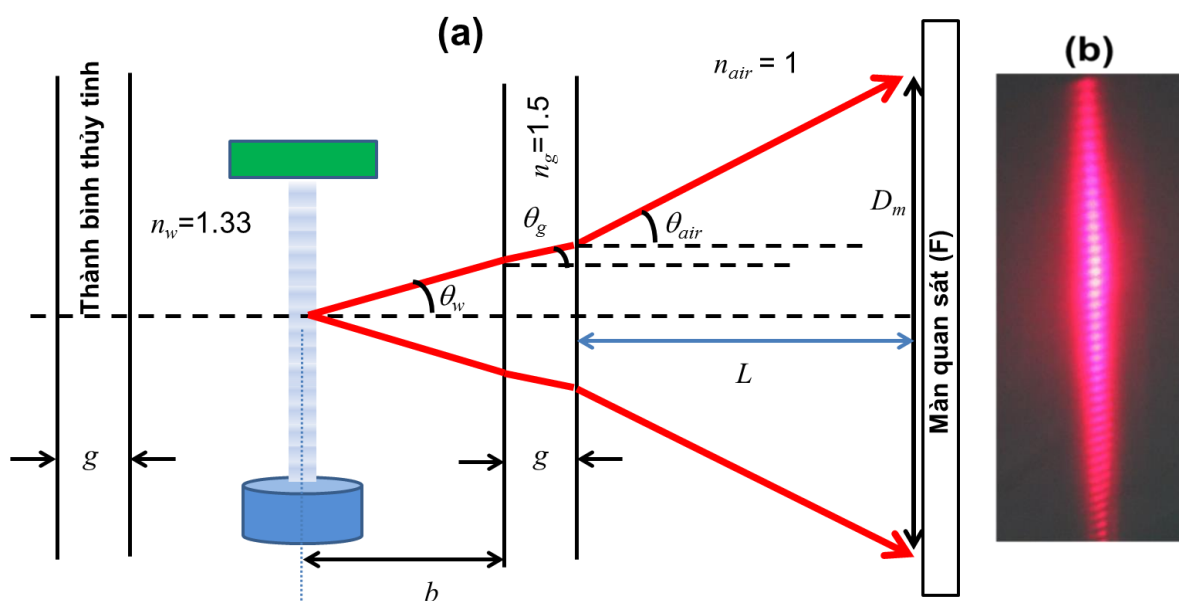


Hình 4: (a) Sơ đồ thí nghiệm để khảo sát CTBT (kích thước không theo tỉ lệ thực).

(b) Cách bố trí các thiết bị thí nghiệm.

Để tính được tần số của sóng siêu âm tạo ra bởi đầu phát áp điện trong nước khoáng, đầu tiên phải xác định bước sóng của sóng âm trong nước, λ_s . Dùng phương trình (1) và Hình 5, trong đó có tất cả các thông số liên quan, hãy trả lời câu hỏi A1.

A1.	Với gần đúng góc nhỏ, λ_s được cho bởi (2). $\lambda_s = A(m - 1) \frac{n_{air}\lambda_{air}}{D_m} \quad (2)$ Hãy tìm hệ thức biểu diễn A theo các đại lượng b, g, L, n_w, n_g, và n_{air}. λ_s là bước sóng siêu âm trong nước, b là khoảng cách từ tâm của CTBT đến thành trong của bình thủy tinh, g là độ dày thành bình thủy tinh, m là tổng số vân nhiễu xạ đếm được trên màn, n_w, n_g và n_{air} tương ứng là chiết suất của nước, của thủy tinh và của không khí L là khoảng cách từ thành ngoài bình thủy tinh đến màn, λ_{air} là bước sóng laser trong không khí, D_m là khoảng trải rộng của m vân trên màn.	1.5
------------	---	-----



Hình 5: (a) Sơ đồ đường truyền chùm sáng nhiễu xạ và kí hiệu của các đại lượng có liên quan. (b) Một ví dụ của hình ảnh vân nhiễu xạ trên màn.

Hãy lắp đặt thí nghiệm dựa vào sơ đồ Hình 4 và Hình 5. Nên tạo ra số vân nhiễu xạ có thể. Đối với phần này, em cần đính Answer Sheet A2 vào màn (F) để vẽ các vân nhiễu xạ. Do chùm tia laser không hoàn toàn đối xứng nên em cần phải quay đèn laser để thu được hình ảnh vân tốt nhất. Nên giữ không gian làm việc của em gọn gàng, sạch sẽ. Do tốc độ âm thanh trong nước phụ thuộc nhiệt độ nước nên phải ghi lại nhiệt độ của nước. Em được cấp một cặp nhựa để đựng bài nhằm tránh thấm nước.

A2.	Dùng các vạch để vẽ tất cả các vân nhiễu xạ vào Answer Sheet A2. Ghi rõ số vân m đếm được và khoảng trải rộng D_m của các vân. Ghi lại nhiệt độ của nước khoáng. Đừng quên ghi lại các tham số thí nghiệm có liên quan vào Answer Sheet A3 để dùng cho tính toán sau này.	2.5
------------	--	-----

Chú ý: Khi em vẽ xong các vân nhiễu xạ, hãy tắt đầu phát áp điện (C) và đèn laser (E), trong khi đang tính toán xử lý số liệu.

Để trả lời câu hỏi, em có thể cần dùng các đại lượng sau:

- Chiết suất của nước $n_w = 1.333 \pm 0.007$
- Chiết suất của không khí $n_{air} = 1.000 \pm 0.0003$
- Chiết suất của thủy tinh $n_g = 1.50 \pm 0.05$
- Bước sóng laser trong không khí $\lambda_{air} = 660 \pm 3 \text{ nm}$
- Hình 3 để xác định tốc độ sóng âm trong nước khoáng.

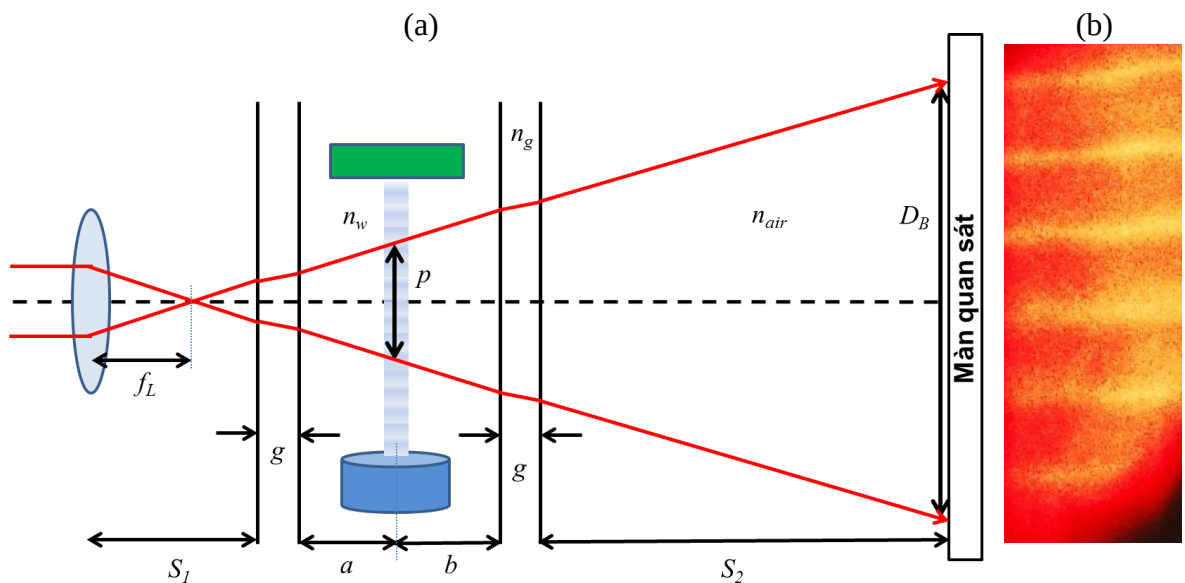
Chú ý: Để tính sai số, nhằm đơn giản hóa việc tính toán, em có thể bỏ qua sai số của các đại lượng n_w , n_g , n_{air} và λ_{air} .

A3.	Hãy đo và ghi lại tất cả các tham số liên quan vào Answer Sheet A3 và tính bước sóng âm λ_s trong nước khoáng.	1.0
A4.	Hãy tính và ghi tần số sóng siêu âm f_s trong nước khoáng.	0.5
A5.	Trình bày các phép tính để tính sai số của f_s .	1.0

Thí nghiệm B

Đo tần số của sóng siêu âm bằng Phương pháp chiếu

Trong Thí nghiệm B, một phương pháp khác, gọi là Phương pháp chiếu, sẽ được dùng để đo tần số của sóng siêu âm trong nước khoảng một cách trực quan. Muốn vậy, ta tạo nên sóng dừng trong nước khoảng bằng cách dùng Tấm phản xạ điều chỉnh được (D2) làm cái phản xạ sóng siêu âm. Sự chồng chất của hai sóng chạy chuyển động ngược chiều nhau, từ bộ phát áp điện và từ tấm D2, tạo ra sóng dừng. Hình 6 trình bày sơ đồ của Phương pháp chiếu. Như thấy trên sơ đồ, một Thấu kính (I) được đặt giữa Laser (E) và thành của Bình thủy tinh (A). Sóng dừng trong bình thủy tinh được chiếu lên màn quan sát với độ phóng đại $M = D_B/p$.



Hình 6: (a) Sơ đồ phương pháp chiếu với các tham số có liên quan. (b) Một thí dụ của hình ảnh sóng dừng được chiếu lên màn quan sát.

Độ phóng đại M của vùng p trên màn quan sát (F), theo các tham số trên Hình 6, được cho bởi phương trình (3)

$$M = \frac{\left[\frac{(S_1 - f_L)}{n_{air}} + \frac{2g}{n_g} + \frac{(a + b)}{n_w} + \frac{S_2}{n_{air}} \right]}{\left[\frac{(S_1 - f_L)}{n_{air}} + \frac{g}{n_g} + \frac{a}{n_w} \right]} \quad (3)$$

Ở đây,

S_1 là khoảng cách từ tâm thấu kính đến thành ngoài của bình thủy tinh,

S_2 là khoảng cách từ thành ngoài của bình thủy tinh đến màn quan sát (F),

f_L là tiêu cự của thấu kính,

a là khoảng cách từ tâm của cách tử đến thành trong bên trái của bình thủy tinh,

b là khoảng cách từ tâm của cách tử đến thành trong bên phải của bình thủy tinh,

g là độ dày của thành bình thủy tinh,

n_w là chiết suất của nước,

n_g là chiết suất của thủy tinh,

n_{air} là chiết suất của không khí.

Các vùng sáng và tối trên màn quan sát có liên quan đến các nút và các bụng của sóng dừng.

B1.	Giả sử rằng số các vùng sáng có trong khoảng độ dài D_B trên màn quan sát là m_B . Dùng phương trình (3), hãy viết biểu thức cho λ_s theo các tham số đo được và các tham số đã được cho.	1.0
------------	---	-----

Bây giờ, hãy lắp thí nghiệm như gợi ý trong Hình 6. Trong phần này, em cần đính tờ Giấy trả lời (Answer sheet) B2 lên Màn quan sát (F) để ghi lại hình ảnh sóng dừng được chiếu lên đó.

Một vài điều cần chú ý trong quá trình thí nghiệm:

- Để thu được sóng dừng siêu âm dùng cho Phương pháp chiếu, cần cho Tấm phản xạ (D2) chìm trong nước.
- Cần thận điều chỉnh các ốc vít để thay đổi vị trí của Tấm phản xạ nhằm thu được hình ảnh ổn định và rõ nét như thấy trên Hình 6(b).
- Hai thấu kính có tiêu cự 5.0 cm và 15.0 cm được cấp. Em chỉ dùng một thấu kính trong Thí nghiệm B.

B2.	Hãy dùng các vạch để ghi lại hình ảnh sóng dừng vào tờ Giấy trả lời (Answer sheet) B2. Hãy viết rõ số các vùng sáng (m_B) mà em đếm được và độ rộng D_B của khoảng đó. Ghi lại nhiệt độ của nước khoảng. Đừng quên ghi vào cả tờ Answer Sheet B3 các tham số thí nghiệm có liên quan, cần thiết cho việc tính toán.	2.0
------------	--	-----

B3.	Hãy đo và ghi lại mọi tham số có liên quan vào tờ Answer Sheet B3 và tính bước sóng λ_s của sóng siêu âm trong nước khoáng.	1.5
------------	---	-----

B4.	Hãy tính và ghi lại tần số f_s của sóng siêu âm trong nước khoáng.	0.5
------------	--	-----

Để đơn giản hoá việc phân tích sai số trong phần tới đây, em có thể bỏ qua sai số của n_w , n_g , n_{air} và f_L .

B5.	Hãy tiến hành các phép tính để tính sai số của f_s .	1.0
------------	--	-----

Thí nghiệm C

Xác định nồng độ muối trong một dung dịch

Trong thí nghiệm này, em được cấp một chai (L) được ghi là “Unknown Concentration” (Nồng độ chưa biết) có chứa dung dịch muối với lượng muối hoà tan chưa biết. Mục đích của Thí nghiệm C là xác định nồng độ của dung dịch muối.

Cách tiến hành trong phương pháp này là pha các lượng muối được biết và tăng dần vào 1.5 lit nước khoáng ở trong Bình thủy tinh (A) và lần lượt đo tốc độ âm thanh trong dung dịch với nồng độ muối đã biết, bằng cách dùng tần số của sóng siêu âm được xác định trong Thí nghiệm A hoặc B. Sau khi pha một lượng muối đã biết vào nước, hãy đo tốc độ âm thanh trong dung dịch muối, bằng cách dùng **CHỈ MỘT** trong hai phương pháp đã nói ở Thí nghiệm A và Thí nghiệm B.

Em sẽ cần phải vẽ đồ thị của tốc độ sóng âm theo nồng độ muối C_s (trong đó C_s là khối lượng của muối hoà tan trong nước, chia cho khối lượng tổng cộng của nước và muối). Đó sẽ là đường cong chuẩn của em.

Tiếp theo, đo tốc độ sóng âm trong dung dịch với nồng độ chưa biết (L), được ghi là “Unknown Concentration” và dùng đường cong chuẩn của em để xác định nồng độ muối trong dung dịch đó.

Giả sử rằng chiết suất của dung dịch muối thay đổi không đáng kể khi muối được pha thêm vào và giá trị của nó vẫn có thể được lấy là 1.333 ± 0.007 .

Với Thí nghiệm C, chỉ làm MỘT phép đo ứng với mỗi nồng độ muối.

Nhớ TẮT Bô phát áp điện và Laser khi em không dùng các dụng cụ này.

Em cần đính tờ Answer Sheet C1 lên Màn quan sát (F) để ghi lại hình ảnh thu được.

C1.	Hãy dùng các vạch để ghi lại hình ảnh quan sát được vào tờ Answer Sheet C1 với mỗi nồng độ muối mà em dùng. Ghi vào dưới mỗi hình nồng độ muối tương ứng. Đừng quên ghi lại vào tờ Answer Sheet C2 các tham số thí nghiệm có liên quan, cần thiết cho việc tính toán. Nếu em cần thêm giấy để ghi lại các hình ảnh thì hãy dùng các Tờ giấy viết (Writing Sheet).	1.0
C2.	Hãy đo và ghi lại tất cả các tham số có liên quan vào tờ Answer Sheet và tính tốc độ sóng âm v_s cho mỗi nồng độ muối.	2.0
C3.	Vẽ đồ thị của tốc độ sóng âm v_s theo nồng độ muối C_s của dung dịch. Hãy ghi các vạch sai số, với giả thiết là sai số tính theo phần trăm cho mỗi điểm thí nghiệm là giống như sai số đã thu được ở Thí nghiệm A hay thí nghiệm B.	1.0

Bây giờ tiến hành thí nghiệm để xác định nồng độ muối chưa biết C_s của dung dịch được ghi là “Unknown Concentration” (L) (Nồng độ chưa biết).

C4.	Hãy dùng các vạch để ghi lại hình ảnh quan sát được vào tờ Answer Sheet C4 đối với dung dịch có nồng độ muối chưa biết. Ghi lại nhiệt độ của dung dịch. Hãy ghi lại các tham số thí nghiệm liên quan vào tờ Answer Sheet C4, và tính tốc độ sóng âm v_s trong dung dịch đó.	0.8
C5.	Hãy xác định nồng độ muối của dung dịch chưa biết. Hãy viết kết quả cùng với sai số vào tờ Answer Sheet C5.	0.2

Thí nghiệm D

Đo tốc độ sóng âm trong dung dịch sirô ngô

Trong thí nghiệm này, các em được cấp dung dịch sirô ngô (M). Khi làm thí nghiệm, em cần đổ dung dịch này vào một Bình thủy tinh (A) mới.

Tốc độ sóng âm trong dung dịch sirô ngô sẽ được đo bằng Phương pháp Nhiễu xạ được nói đến trong Thí nghiệm A. Tuy nhiên, để tính tốc độ sóng âm thì trước hết, cần xác định chiết suất của dung dịch sirô ngô.

Dùng các dụng cụ được cấp, hãy thiết kế và tiến hành một thí nghiệm để xác định chiết suất của dung dịch sirô ngô.

D1.	Hãy vẽ phác sơ đồ của thí nghiệm mà em đã thiết kế. Hãy tiến hành thí nghiệm, ghi lại các tham số liên quan và tính chiết suất của dung dịch sirô ngô.	1.5
------------	---	-----

Bây giờ, hãy lặp một thí nghiệm theo phương pháp nhiễu xạ ở Thí nghiệm A để xác định tốc độ sóng âm trong dung dịch sirô ngô.

D2.	Hãy dùng các vạch để vẽ các vân vào tờ Answer Sheet D2. Hãy đo và ghi lại mọi tham số liên quan cần thiết để tính tốc độ v_s của sóng âm trong dung dịch sirô ngô.	1.0
------------	---	-----

Không cần tính sai số của thí nghiệm D.

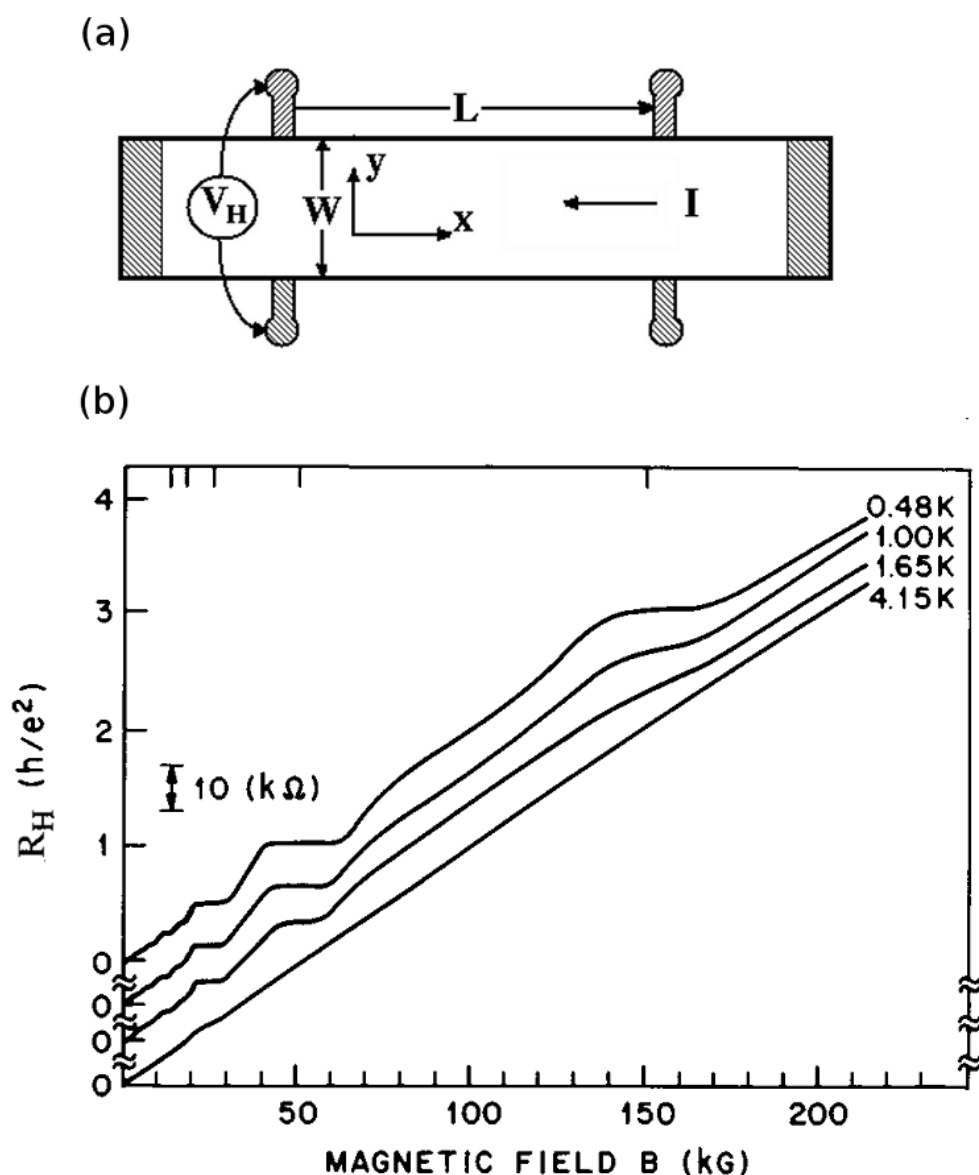
----Hết bài----

APhO 16 – 2015 tại Hangzhou, Trung Quốc

Bài toán số 1

Hiệu ứng Hall lượng tử phân số (fractional quantum Hall effect - FQHE) được phát hiện bởi D.C. Tsui và H. Stormer ở Bell Labs năm 1981. Trong thí nghiệm này, electron được giam giữ trong hai chiều không gian ở phía GaAs bởi một hàng rào thế ở mặt tiếp giáp của hai loại bán dẫn GaAs và AlGaAs (còn gọi là cấu trúc dị thể GaAs/AlGaAs) do A.C. Gossard chế tạo ra (ở đây, ta bỏ qua độ dày của lớp electron hai chiều). Một từ trường đều, mạnh B được đặt vuông góc với hệ electron hai chiều. Như thấy trên Hình 1, khi dòng điện cường độ I chạy qua mẫu, đường cong biểu diễn hiệu điện thế V_H (theo phương vuông góc với dòng điện) theo từ trường ngoài có một đoạn nằm ngang (gọi là plateau) bất thường (ứng với điện trở Hall $R_H = 3h/e^2$), khi nhiệt độ đủ thấp. Sự xuất hiện của plateau gợi ý về sự có mặt của các chuẩn hạt có điện tích phân số (không phải số nguyên lần điện tích nguyên tố) mà ta sẽ phân tích dưới đây. Để cho đơn giản, ta bỏ qua sự tán xạ electron bởi các thế hỗn loạn, và không xét đến spin của electron.

- (a) Trong mô hình cổ điển, khí electron hai chiều có tính chất giống như các viên bi tích điện đặt trên mặt bàn. Trong mẫu GaAs/AlGaAs, khối lượng electron được thay bằng khối lượng hiệu dụng m^* do có tương tác với các ion.
- (i) (2 điểm) Hãy viết phương trình chuyển động của một electron trong điện trường vuông góc $\vec{E} = -E_y \hat{y}$ và từ trường vuông góc $\vec{B} = B \hat{z}$.
 - (ii) (1 điểm) Hãy xác định vận tốc v_s của các electron trong trạng thái dừng.
 - (iii) (1 điểm) Hãy chỉ ra chiều của vectơ vận tốc.
- (b) (2 điểm) Điện trở Hall được định nghĩa là $R_H = V_H/I$. Trong mô hình cổ điển, hãy tìm R_H theo số electron N và từ thông $\phi = BA = BWL$, trong đó A là diện tích của mẫu, với W là độ rộng và L là độ dài hiệu dụng của mẫu.
- (c) (2 điểm) Ta biết rằng electron chuyển động theo các quỹ đạo tròn trong từ trường. Theo quan điểm cơ học lượng tử, từ trường B có thể coi như có tác dụng tạo nên các “xoáy nước” nhỏ, gọi là vortex, trong “biển” electron. Ứng với mỗi xoáy là một lượng tử từ thông h/e , trong đó h là hằng số Planck và e là điện tích nguyên tố. Với trường hợp $R_H = 3h/e^2$ mà Tsui và Stormer đã phát hiện ra, hãy xác định tỉ số giữa số electron N và số các lượng tử từ thông N_ϕ , mà ta gọi là tham số lấp đầy ν .



Hình 1: (a) Sơ đồ bố trí thí nghiệm để quan sát hiệu ứng Hall lượng tử phân số FQHE. Như thấy trên hình, dòng điện I chạy qua một hệ electron hai chiều theo chiều dọc với độ dài hiệu dụng L . Điện áp Hall V_H được đo theo phương ngang với độ rộng hiệu dụng W . Thêm vào đó, một từ trường đều B được đặt vuông góc với mặt phẳng. Chiều của dòng điện được vẽ để minh họa, và có thể không đúng. (b) Điện trở Hall R_H theo từ trường B ở bốn nhiệt độ khác nhau (các đường được dịch xa nhau cho rõ) trong công bố về FQHE. Điểm đặc biệt ở $R_H = 3h/e^2$ là do FQHE.

- (d) (2 điểm) Người ta thấy rằng sự liên kết một số nguyên các vortex ($n > 1$) với mỗi electron tạo nên một xoáy lớn bao quanh, do đó, nó đẩy các electron khác ra xa. Như vậy, hệ có thể giảm một cách đáng kể năng lượng tĩnh điện Coulomb ứng với cùng một tham số lấp đầy. Hãy xác định số mũ α cho phần năng lượng giảm đi tính cho một electron $\Delta U(B) \sim B^\alpha$.
- (e) (2 điểm) Khi từ trường lệch khỏi tham số lấp đầy chính xác $\nu = 1/n$ về phía từ trường mạnh hơn, có nhiều xoáy được tạo thêm ra. Chúng không gắn với electron và có tính chất giống như

các hạt mang điện tích dương hiệu dụng, mà ta gọi là các chuẩn lỗ trống, để so sánh với các electron mang điện âm. Lượng điện tích bị thiếu trong mỗi chuẩn lỗ trống đúng bằng $1/n$ lần điện tích của electron. Ta cũng có thể xét tương tự khi từ trường hơi nhỏ hơn so với trường hợp v và thấy sự tạo thành các chuẩn electron có điện tích âm $e^* = -e/n$. Giả thiết mẫu có điện tích A . Ở plateau Hall lượng tử hóa với $R_H = 3h/e^2$, hãy tính độ thay đổi của B ứng với việc đưa vào đúng một chuẩn lỗ trống có điện tích phân số. (Khi các chuẩn hạt có mật độ nhỏ, chúng được giam giữ bởi thể hỗn loạn được gây nên bởi các tạp chất và sai hỏng của tinh thể, do đó điện trở Hall vẫn bị lượng tử hóa trong một khoảng hữu hạn các giá trị của B).

- (f) Trong thí nghiệm của Tsui và cộng sự, từ trường ứng với điểm giữa của plateau Hall lượng tử hóa

$$R_H = 3h/e^2, B_{1/3} = 15 \text{ Tesla},$$

khối lượng hiệu dụng của electron trong GaAs, $m^* = 0.067 m_e$,

khối lượng electron, $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$,

hằng số Coulomb, $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$,

hằng số điện $\epsilon_0 = 1/4\pi k = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$,

hằng số điện môi tương đối của GaAs, $\epsilon_r = 13$,

điện tích nguyên tố, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$,

hằng số Planck, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, và

hằng số Boltzmann, $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$.

Trong cách phân tích của chúng ta, ta đã bỏ qua nhiều yếu tố, mà năng lượng tương ứng của chúng so với $\Delta U(B)$ được xét ở mục (d), là quá lớn để có thể kích thích được, hoặc quá nhỏ để có vai trò đáng kể.

- (i) **(1 điểm)** Hãy tính năng lượng nhiệt E_{th} ở nhiệt độ $T = 1.0 \text{ K}$.
- (ii) **(2 điểm)** Các electron bị giam giữ trong không gian của các xoáy có động năng lớn. Dùng hệ thức bất định, hãy ước tính bậc độ lớn của động năng. (Lượng năng lượng này cũng là phần năng lượng cần thêm vào nếu ta muốn đặt hai electron vào cùng một xoáy, thay vì đặt mỗi electron vào vào một xoáy tách biệt. Đó là do nguyên lý loại trừ Pauli)
- (g) Còn có một dãy các plateau ở $R_H = h/ie^2$, với $i = 1, 2, 3, \dots$ trong thí nghiệm của Tsui và cộng sự, như thấy trên Hình 1b. Các plateau này, được biết với tên là hiệu ứng Hall lượng tử nguyên (integer quantum Hall effect - IQHE), được K. von Klitzing nói đến vào năm 1980. Bằng cách lặp lại các mục từ (c)-(f) cho các plateau số nguyên, người ta nhận thấy rằng điều mới lạ của hiệu ứng Hall lượng tử phân số chính là ở chỗ tồn tại các chuẩn hạt mang điện tích phân số. R. de-Picciotto cùng cộng sự và L. Saminadayar cùng cộng sự đã báo cáo độc lập với nhau về việc quan sát thấy các điện tích phân số ở hệ số lấp đầy $\nu = 1/3$ năm 1997. Trong các thí nghiệm, họ đã đo nhiễu (hay còn gọi là tiếng ồn) trong dòng điện tích chảy qua một chỗ thắt, được gọi là tiếp xúc điểm lượng tử (quantum point contact - QPC). Trong một mô hình thống kê đơn giản, các hạt tải điện với điện tích gián đoạn e^* xuyên hầm qua QPC và gây nên dòng điện tích I_B (trên đỉnh của một dòng điện nền thông thường). Số các hạt tải điện n_τ đi đến điện cực trong khoảng thời gian đủ ngắn τ tuân theo phân bố xác suất Poisson với tham số λ

$$P(n_\tau = k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}$$

trong đó $k!$ là giai thừa của k . Em có thể cần phép tổng sau đây

$$e^\lambda = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\lambda^k}{k!}$$

- (i) **(2 điểm)** Hãy xác định dòng điện tích I_B theo λ và τ ; dòng này là tổng điện tích trong một đơn vị thời gian.
- (ii) **(2 điểm)** Nhiều dòng điện được xác định là độ thẳng giáng của điện tích trong một đơn vị thời gian. Ta có thể phân tích nhiều bằng cách đo độ lệch toàn phương trung bình của số điện tích mang dòng điện. Hãy xác định nhiều S_I của dòng điện được gây nên bởi sự gián đoạn của các điện tích mang dòng điện, tính theo λ and τ .
- (iii) **(1 điểm)** Hãy tính tỉ số nhiều trên dòng điện S_I/I_B ; tỉ số này đã được kiểm nghiệm bởi R. de-Picciotto cùng cộng sự, và L. Saminadayar cùng cộng sự vào năm 1997. (Một năm sau, Tsui và Stormer cùng nhận giải Nobel về vật lí với R. B. Laughlin, là người đã đề xuất một dạng của hàm sóng trạng thái cơ bản ứng với $\nu = 1/3$.)

Bài toán số 2: Gió Mặt Trời đã tạo ra cực quang như thế nào?

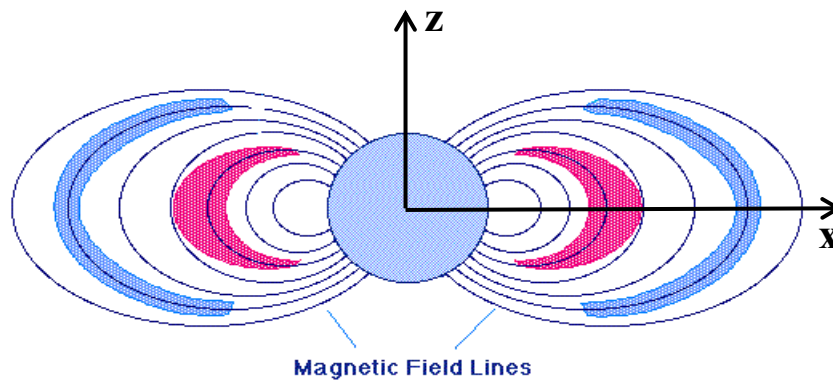


Hình 1

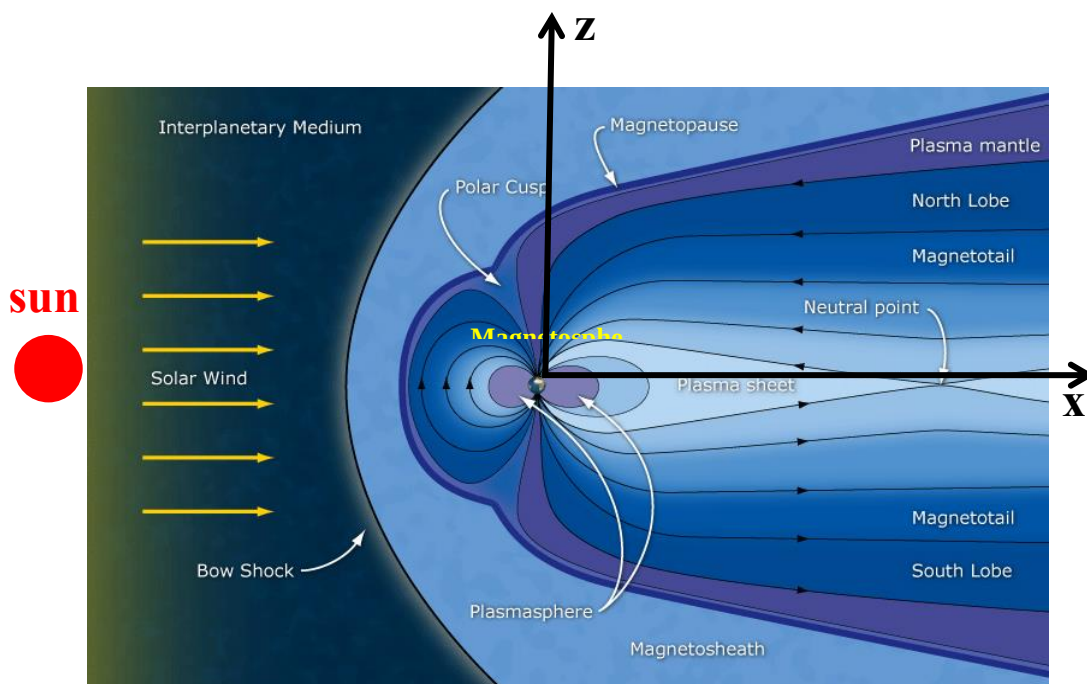
Các câu hỏi sau đây sẽ từng bước giúp bạn tìm ra câu trả lời

Kiến thức nền về tương tác giữa gió Mặt Trời và từ trường Trái Đất

Chúng ta đều biết Trái Đất có từ trường. Các đường sức từ đã chứng tỏ cấu trúc của từ trường Trái Đất giống như của một thanh nam châm thẳng (hình 2). Từ trường Trái Đất bị rối loạn bởi gió Mặt Trời, là dòng plasma nóng có tốc độ cao. Plasma là khí ion hóa gần trung hòa. Plasma phun ra từ Mặt Trời và thay đổi cường độ theo mức độ hoạt động bề mặt của Mặt Trời. Gió Mặt Trời nén từ trường Trái Đất. Nói cách khác, từ trường Trái Đất che chắn gió Mặt Trời cho Trái Đất. Khi gió Mặt Trời chạm vào từ trường Trái Đất, nó bị lệch hướng giống như dòng nước bao quanh mũi tàu (Hình 3).

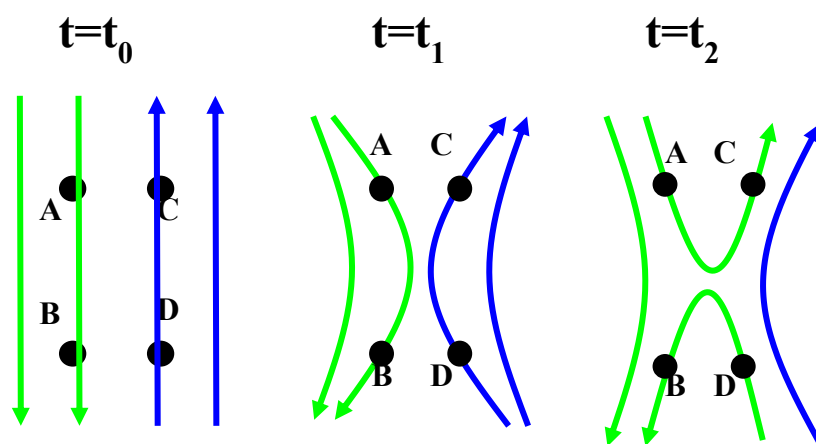


Hình 2

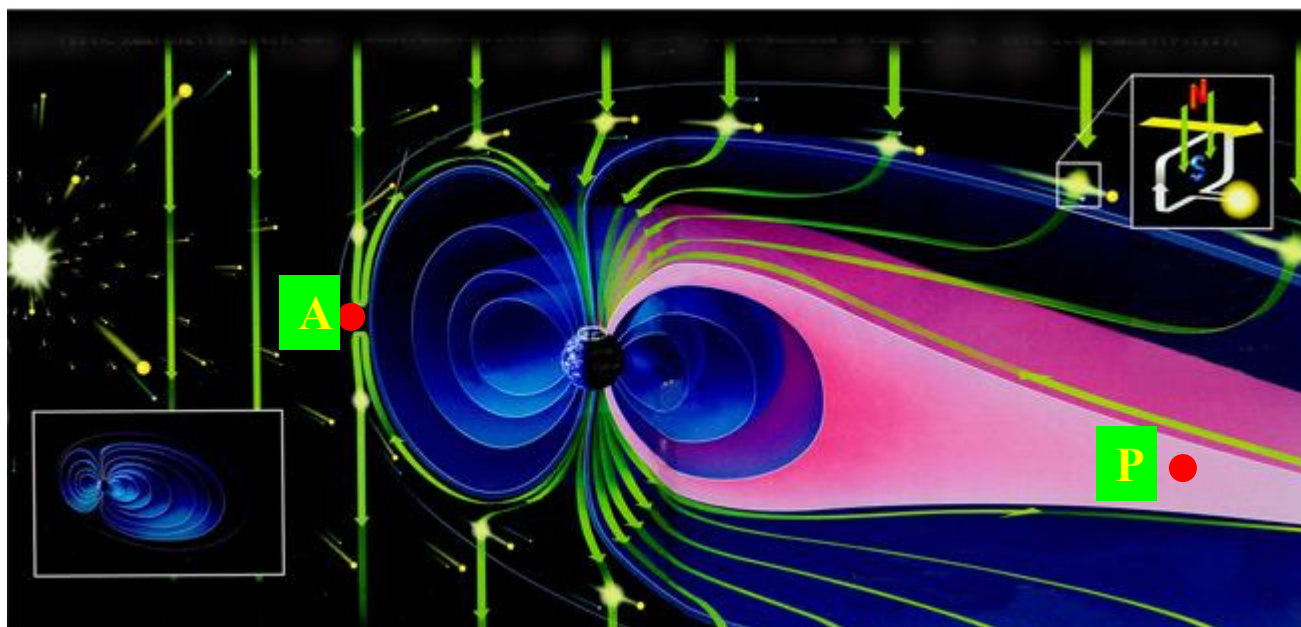


Hình 3

Mặt cong ở chỗ gió Mặt Trời đổi hướng lần đầu tiên được gọi là *bow shock*. Vùng ở ngay sau *bow shock* và thuộc phần trước của từ trường Trái Đất được gọi là *magnetosheath*. Vùng không gian xung quanh mặt Đất được bao quanh bởi gió Mặt Trời được gọi là *từ quyển (magnetosphere)*. Từ trường Trái Đất chặn phần lớn sự thâm nhập của gió Mặt Trời vào từ quyển. Vùng tiếp xúc giữa gió Mặt Trời và từ trường Trái Đất (là khu vực giữa từ quyển và không gian) được gọi là, *magnetopause* (vùng dừng từ). Vị trí của magnetopause được xác định bằng độ lớn và hướng từ trường của gió Mặt Trời. Khi hướng từ trường của gió Mặt Trời ngược với hướng của từ trường Trái Đất, quá trình kết nối đường sức từ, như thấy trên Hình 4, xảy ra ở vùng “dừng từ ban ngày” (dayside magnetopause) và ở đó các hạt điện tích của gió Mặt Trời chuyển từ A tới P thuộc vùng đuôi từ (ở phía ban đêm của Trái Đất), như trên Hình 5. Gió Mặt Trời mạnh có thể đẩy vùng “dừng từ ban ngày” tới gần bề mặt Trái Đất, làm cho các vệ tinh tầm cao, như vệ tinh địa tĩnh, hoàn toàn nằm trong vùng gió Mặt Trời. Các hạt năng lượng cao trong gió Mặt Trời có thể làm hư hại các bộ phận điện tử kỹ thuật cao trong vệ tinh. Vì thế, việc nghiên cứu chuyển động của các hạt mang điện trong từ trường là rất quan trọng. Nó cho ta câu trả lời về sự hình thành cực quang, cũng như giúp ta hiểu được cơ chế tương tác giữa gió Mặt Trời và từ trường của Trái Đất.



Hình 4



Hình 5

Trị số của các hằng số vật lý, và biểu thức trường lưỡng cực từ của Trái Đất :

Tốc độ ánh sáng trong chân không: $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$;

Hằng số điện: $\epsilon_0 = 8.9 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$;

Hằng số từ: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$;

Điện tích nguyên tố: $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$;

Khối lượng electron: $m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$;

Khối lượng proton: $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$;

Hằng số Boltzmann: $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$;

Gia tốc trọng trường: $g = 9.8 \text{ m/s}^2$;

Hằng số Planck: $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

Bán kính Trái Đất $R_E = 6.4 \times 10^6 \text{ m}$.

Trường lưỡng cực từ của Trái Đất có thể viết như sau

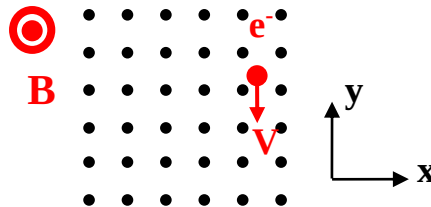
$$\vec{B}_d = \frac{B_0 R_E^3}{r^5} [3xz\hat{x} - 3yz\hat{y} + (x^2 + y^2 - 2z^2)\hat{z}] \quad , \quad (r \geq R_E) \quad (1)$$

với $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, $B_0 = 3.1 \times 10^{-5} \text{ T}$, và $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ là các vectơ đơn vị theo các phương trục x, y, z .

Câu hỏi:

(a) (3 điểm)

(i) (1 điểm) Trước khi nghiên cứu chuyển động của hạt mang điện trong trường lưỡng cực từ của Trái Đất, chúng ta xem xét chuyển động của electron trong từ trường đều $\vec{B}$. Nếu vận tốc ban đầu $\vec{v}$ của electron vuông góc với từ trường đều như trên Hình 6, hãy tìm phương trình quỹ đạo của electron. Biết rằng lúc đầu electron ở vị trí $(x, y, z) = (0, 0, 0)$.



Hình 6

(ii) (1 điểm) Hãy xác định cường độ dòng điện gây bởi chuyển động của electron và tính mô men từ $\vec{\mu} = I\vec{A}$, với $\vec{A}$ là vectơ diện tích, có độ lớn là diện tích giới hạn bởi quỹ đạo tròn của electron và có hướng được xác định bởi quy tắc bàn tay phải.

(iii) (1 điểm) Nếu vận tốc ban đầu $\vec{v}$ không vuông góc với từ trường, nghĩa là góc θ giữa $\vec{B}$ và $\vec{v}$ thỏa mãn $0^\circ < \theta < 90^\circ$, hãy tìm bước xoắn của quỹ đạo electron.

(b) (4 điểm) Trong từ trường đều như ở Hình 6, mật độ plasma là không đều theo trục x . Để đơn giản, ta coi nhiệt độ và sự phân bố của các ion và electron là giống nhau. Vì vậy, áp suất plasma có thể biểu thị như sau

$$p(x) = kT[n_i(x) + n_e(x)] = 2kTn(x) = 2kT(n_0 + \alpha x),$$

Với B, T, k, n_0 và α là các hằng số dương, $n_i(x)$ và $n_e(x)$ là mật độ của ion và electron.

(i) (2 điểm) Hãy giải thích cơ chế hình thành dòng điện bằng hình vẽ.

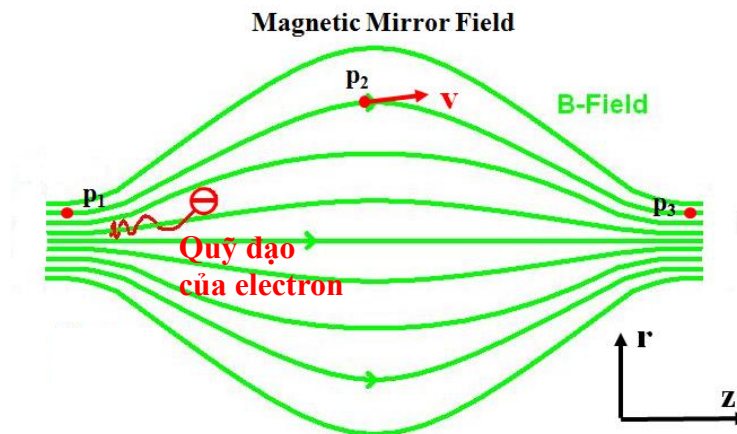
(ii) (2 điểm) Cả ion và electron tuân theo phân bố Maxwell; hàm phân bố cho ion là ,

$$f_i(x, v_{\perp}, v_{\parallel}) = n_i(x) \left(\frac{m_i}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-m_i(v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2)/2kT}$$

hãy tính hằng số β trong biểu thức độ từ hoá $M = \beta n(x) \frac{kT}{B}$, trong đó độ từ hóa M là mômen từ trên một đơn vị thể tích. (Gợi ý: $\int_0^{\infty} x \exp(-x) dx = 1$ và $\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-x^2) dx = \sqrt{\pi}$)

(c) (1 điểm) Bây giờ chúng ta quay lại bài toán trường lưỡng cực từ của Trái Đất. Áp dụng kết quả từ mục (b) hãy tính tỉ số của trường nghịch từ và trường lưỡng cực từ Trái Đất trong phương trình (1), tại vị trí $(x=10R_E, y=0, z=1 R_E)$. Biết áp suất plasma là $p(z) = p_0 e^{-(z/a)^2}$, với $p_0 = 3 \times 10^{-10} Pa$ và $a = 2R_E$. Từ trường quanh vị trí này cũng được coi là đều. Cần chú ý về sự khác nhau giữa các hệ tọa độ trong mục (b) và mục (c). (Gợi ý: Trường nghịch từ là $B_{mx} = \mu_0 M$.)

(d) (4 điểm) Từ các Hình 2, 3, và 5, dễ dàng nhận thấy độ lớn của từ trường Trái Đất dọc theo một đường sức từ là lớn nhất tại các cực và nhỏ nhất tại mặt phẳng xích đạo. Do trường lưỡng cực từ của Trái Đất là đối xứng trục và biến đổi chậm dọc theo đường sức, nên có thể đơn giản hóa dạng trường gương từ (magnetic-mirror field) như trên Hình 7. Độ lớn từ trường dọc theo đường sức từ là nhỏ nhất (B_0) tại điểm "P₂" và lớn nhất (B_m) tại các điểm "P₁" và "P₃". Một electron có vận tốc ban đầu $\vec{v}$ nằm tại điểm "P₂" và di chuyển về phía điểm "P₃". Góc giữa vận tốc đầu $\vec{v}$ và từ trường tại điểm "P₂" là θ với $0^\circ < \theta < 90^\circ$. Với trường gương từ $\vec{B} = B_r \hat{r} + B_z \hat{z}$ (trong đó $B_r \ll B_z$), ta có thể coi $\frac{dB}{dz} = \frac{dB}{ds}$, với $\frac{dB}{ds}$ là đạo hàm riêng phần của B dọc theo đường sức từ. Vì không tồn tại đơn cực từ, nên ta có $\langle B_r \rangle = -\frac{1}{2} \frac{dB}{dz} r_c \ll B_z$, trong đó $\langle B_r \rangle$ là giá trị trung bình hồi chuyển (gyro-average) của B_r và r_c bán kính hồi chuyển (gyroradius) của electron.

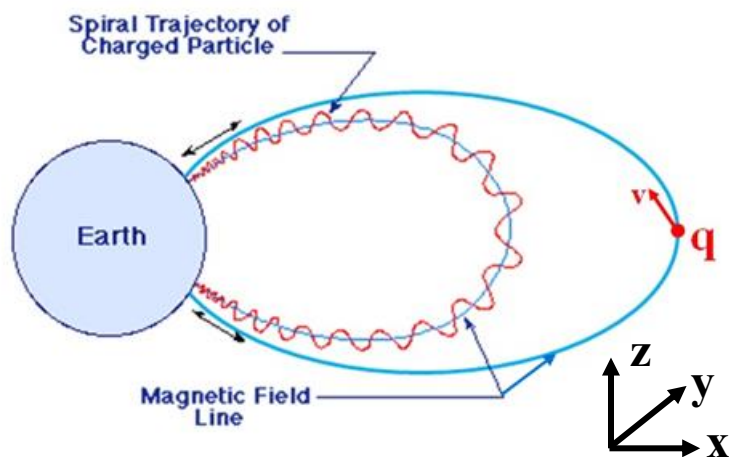


Hình 7

(i) (3 điểm) Hãy tìm lực từ trường hồi chuyển trung bình (gyro-averaged magnetic-field force) dọc theo đường sức từ tác dụng lên electron, và chứng tỏ rằng momen từ là một hằng số chuyển động, nghĩa là $\frac{d\mu}{dt} = 0$, bằng cách dùng định luật bảo toàn động năng toàn phần.

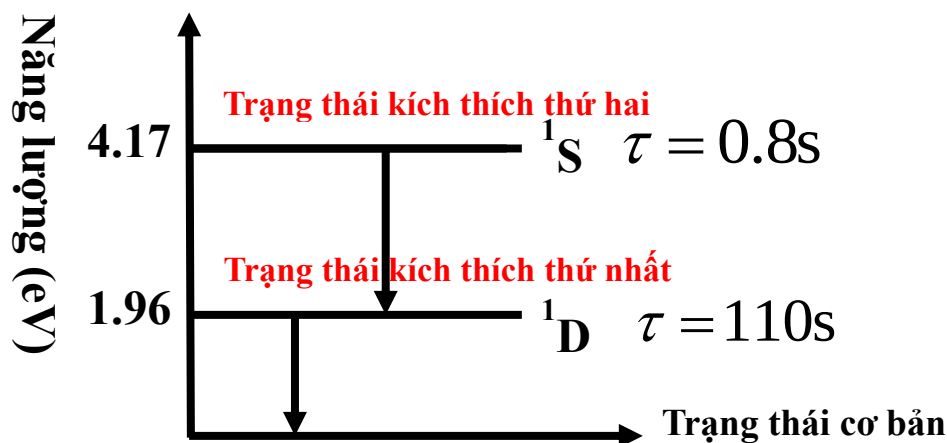
(ii) (1 điểm) Ta đã biết rằng momen từ là một hằng số chuyển động, hãy tìm điều kiện của góc θ giữa vận tốc ban đầu $\vec{v}$ của electron và từ trường tại điểm "P₂" để electron không thoát ra khỏi trường gương từ.

(e) (1 điểm) Các đường sức của lưỡng cực từ Trái Đất (đường màu xanh) được chỉ ra trên Hình 8. Quỹ đạo xoắn của hạt mang điện (đường cong màu đỏ) được coi như nằm trong mặt phẳng $y=0$ vì gradient của từ trường và độ cong của đường sức từ có thể được bỏ qua. Nếu hạt mang điện có khối lượng m , điện tích q , và vận tốc $\vec{v}$ ban đầu nằm trên mặt phẳng xích đạo [$x=6R_E, y=0, z=0$], góc ban đầu giữa vận tốc $\vec{v}$ của electron và từ trường là θ , hãy xác định điều kiện cần thỏa mãn của góc θ để hạt mang điện xuống đến được điểm có độ cao thấp hơn 200 km tại vĩ độ 60° .



Hình 8

(f) (5 điểm) Như chỉ ra trên hình 5, khi sự kết nối đường sức xảy ra tại vùng “dùng từ ban ngày”, các đường sức từ được nối sẽ dịch về phía ban đêm do gió Mặt Trời thổi về phía sau. Do đó, một số electron trong gió Mặt Trời ở vùng "A" cũng di chuyển về phía đuôi từ, ở vùng "P". Sau khi các electron đến vùng "P", một số electron được tăng tốc đến khoảng 1 keV. Nếu các electron năng lượng cao đến thượng tầng khí quyển (trong vùng có độ cao 85 km-800 km), chúng có thể va chạm với các nguyên tử trung hòa và làm các nguyên tử trung hòa chuyển sang trạng thái kích thích. Một photon sẽ được phát ra khi có sự chuyển mức từ trạng thái kích thích cao về trạng thái kích thích thấp hơn hoặc về trạng thái cơ bản của nguyên tử trung hòa. Ánh sáng rực rỡ (Hình 1) hình thành trong vùng cực quang dạng oval do các photon phát ra có bước sóng khác nhau. Cực quang chủ yếu được tạo ra bởi các photon phát ra từ các nguyên tử oxy. Các mức năng lượng trong các trạng thái kích thích thứ nhất và thứ hai so với trạng thái cơ bản tương ứng là 1.96 eV và 4.17 eV. Thời gian sống ứng với hai trạng thái kích thích của nguyên tử oxy là 110 s và 0.8 s được chỉ ra trên hình 9.



Hình 9

(i) (2 điểm) Hãy xác định mật độ khí quyển theo độ cao và tìm tỉ số mật độ oxy ứng với hai độ cao $H = 160 \text{ km}$ và $H = 220 \text{ km}$. Để đơn giản, coi nhiệt độ khí quyển không phụ thuộc vào độ cao và không khí là khí lý tưởng. (Cho $\rho_0 g / P_0 = 0.13 / \text{km}$, với ρ_0 và P_0 là mật độ và áp suất khí quyển ứng với mực nước biển).

(ii) (3 điểm) Hãy tìm màu của cực quang tại độ cao $H = 160 \text{ km}$ và $H = 220 \text{ km}$. (Gợi ý: sự phụ thuộc của tần số va chạm của các phân tử không khí vào mật độ khí quyển là $\nu = \nu_0 \rho / \rho_0$, với $\nu_0 \approx 10^9 / \text{s}$ là tần số va chạm của các phân tử không khí tại mực nước biển. Nguyên tử oxy ở trạng thái kích thích sẽ mất một phần năng lượng khi nguyên tử va chạm).

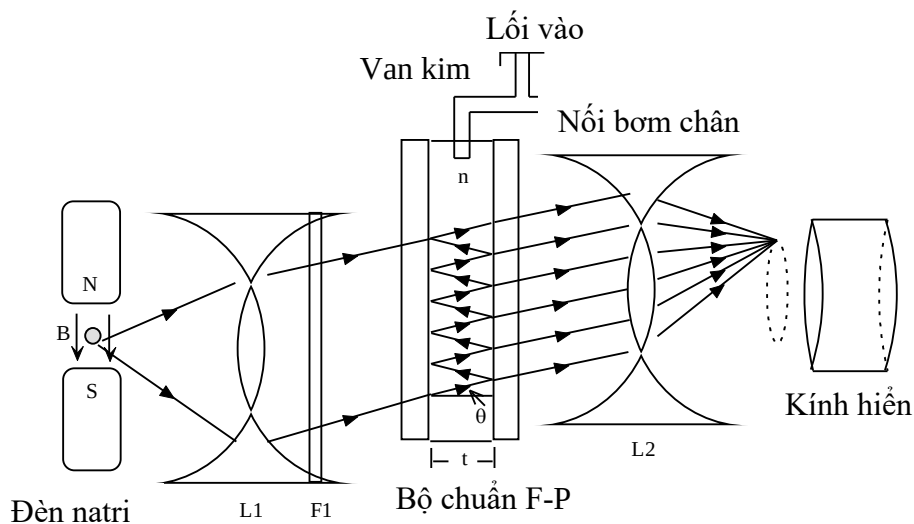
(g) (2 điểm) Như đã nói ở trên, một trận gió Mặt Trời mạnh có thể đẩy vùng dừng từ ban ngày tới gần Trái Đất. Điều này có thể dẫn đến một vệ tinh có quỹ đạo cao lộ ra hoàn toàn trong gió Mặt Trời. Các hạt năng lượng cao trong gió Mặt Trời có thể làm hư hỏng các bộ phận điện tử công nghệ cao trong vệ tinh. Để đơn giản, trường lực cực từ Trái Đất được giả thiết là không thay đổi khi gió Mặt Trời nén nó và coi như không có plasma trong từ quyển. Hãy tìm tốc độ gió Mặt Trời nhỏ nhất có thể gây hư hại cho vệ tinh địa tĩnh, nếu cường độ từ trường là $B_s = 5nT$ và mật độ plasma của gió Mặt Trời là $\rho_s = 50 \text{ proton} / \text{cm}^3$. (Gợi ý: lực từ tác dụng lên một đơn vị diện tích là $f = B^2 / 2\mu_0$. Chúng ta chỉ xét đến sự thay đổi theo x của mọi đại lượng vật lý, có nghĩa là các đại lượng vật lý không phụ thuộc vào y và z).

Bài toán số 3

Hình 1 mô tả bộ chuẩn Fabry-Perot (F-P), trong đó áp suất không khí có thể điều chỉnh được. Bộ chuẩn F-P gồm hai tấm thủy tinh phẳng với mặt bên trong có độ phản xạ cao. Hai tấm tạo thành một hốc trong đó ánh sáng có thể phản xạ qua lại. Các mặt ngoài của các tấm không song song với mặt trong và không ảnh hưởng đến sự phản xạ qua lại. Mật độ khí trong bộ chuẩn có thể được điều chỉnh. Ánh sáng từ đèn hơi natri (Na) được chuẩn trực bởi thấu kính sẽ đi qua bộ chuẩn F-P. Độ

truyền qua của bộ chuẩn F-P là $T = \frac{I_0}{1 + F \sin^2 \frac{\delta}{2}}$, trong đó, I_0 là cường độ ánh sáng tới, $F = \frac{4R}{(1-R)^2}$

, với R là hệ số phản xạ của mặt trong, $\delta = \frac{4\pi n t \cos \theta}{\lambda}$ là độ dịch pha của hai tia sáng cạnh nhau, n là chiết suất của khí, t là khoảng cách giữa hai mặt trong, θ là góc tới, và λ bước sóng ánh sáng.



Hình 1

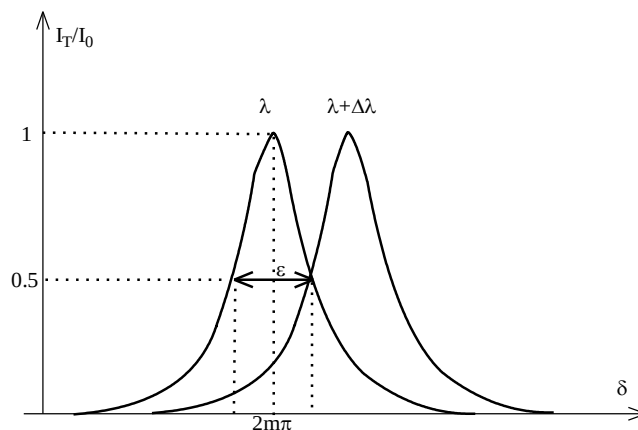
Đèn hơi Na phát ra các vạch phổ D1 ($\lambda = 589.6nm$) và D2 ($589nm$) và được đặt trong một từ trường đều. Để đơn giản, một kính lọc quang F1 được dùng để chỉ cho vạch D1 đi qua. Vạch D1 được chuẩn trực và đưa đến bộ chuẩn F-P nhờ thấu kính L1. Vân giao thoa tròn sẽ được hiển thị trên mặt phẳng tiêu của thấu kính L2, có tiêu cự $f = 30cm$. Một kính hiển vi được dùng để quan sát các vân. Ta lấy hệ số phản xạ $R = 90\%$, và khoảng cách giữa các mặt trong $t = 10mm$. Một vài hằng số hữu ích: $h = 6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$, $e = 1.6 \times 10^{-19} C$, $m_e = 9.1 \times 10^{-31} kg$, $c = 3.0 \times 10^8 ms^{-1}$

(a) (3 điểm) Vạch D1 ($\lambda = 589.6nm$) được chiếu đến bộ chuẩn F-P. Trong trường hợp chân không ($n = 1.0$), tính bậc vân giao thoa m_i , góc tới θ_i và đường kính D_i cho ba vân đầu tiên ($i=1, 2, 3$) tính từ tâm của mặt phẳng tiêu.

(b) (3 điểm) Trên Hình 2, độ rộng ε của vạch phổ được định nghĩa là độ rộng ứng với nửa chiều cao của độ dịch pha δ . Độ phân giải của bộ chuẩn F-P được định nghĩa như sau: với hai bước sóng λ và $\lambda + \Delta\lambda$, khi hiệu pha trung tâm $\Delta\delta$ của hai vạch phổ lớn hơn ε , chúng được xem là có thể phân biệt; thì độ phân giải của bộ chuẩn là $\lambda / \Delta\lambda$ khi $\Delta\delta = \varepsilon$. Trong trường hợp chân không, vạch D1 ($\lambda = 589.6nm$), và góc tới $\theta = 0$, hãy tính :

(1) Độ rộng ε của vạch phổ.

(2) Độ phân giải $\lambda / \Delta\lambda$ của bộ chuẩn.



Hình 2

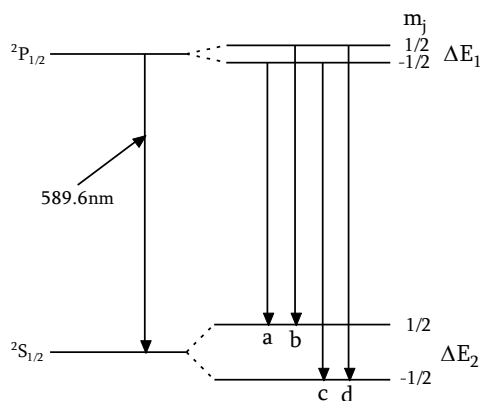
c) (1 điểm) Như thấy trên Hình 1, áp suất không khí ban đầu bằng 0, nghĩa là chân không, có $n = 1.0$. Bằng cách điều chỉnh van kim từ từ, không khí được tiêm dần vào bộ chuẩn F-P và cuối cùng áp suất không khí đạt tới áp suất khí quyển tiêu chuẩn. Khi đó, người ta quan sát thấy 10 vân mới được tạo thêm ra từ tâm của mặt phẳng tiêu. Dựa vào hiện tượng này, hãy tính chiết suất không khí n_{air} tại áp suất khí quyển tiêu chuẩn.

(d) (2 điểm) Các mức năng lượng của nguyên tử natri bị tách ra khi nguyên tử được đặt trong từ trường. Hiện tượng này được gọi là hiệu ứng Zeeman. Độ tách mức năng lượng được cho bởi $\Delta E = m_j g_k \mu_B B$, với số lượng tử m_j có thể lấy các giá trị $J, J-1, \dots, -J+1, -J$, với J là số lượng

từ momen động lượng toàn phần, g_k là thừa số Landé, $\mu_B = \frac{he}{4\pi m_e}$, h là hằng số Planck, e là

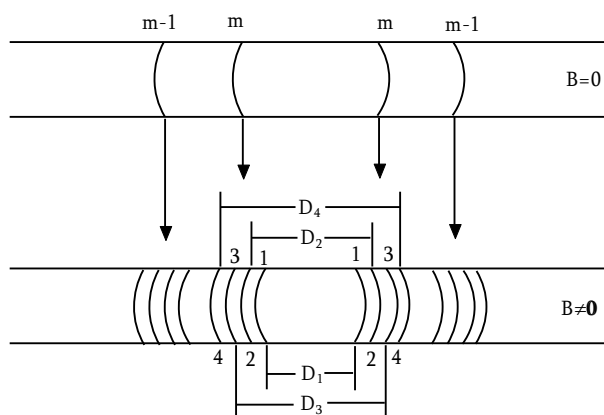
điện tích nguyên tố, m_e là khối lượng electron, B là cảm ứng từ. Như thấy trên Hình 3, vạch phổ D1 được phát ra khi nguyên tử natri chuyển dời từ mức năng lượng $^2P_{1/2}$ về $^2S_{1/2}$. Ở các trạng thái $^2P_{1/2}$ và $^2S_{1/2}$, thì $J = \frac{1}{2}$. Do đó, trong từ trường, mỗi mức năng lượng sẽ tách làm hai. Ta gọi độ

tách mức năng lượng là ΔE_1 cho $^2P_{1/2}$ và ΔE_2 cho $^2S_{1/2}$ ($\Delta E_1 < \Delta E_2$). Kết quả là vạch D1 bị tách thành 4 vạch phổ (a, b, c và d), như thấy trên Hình 3. Hãy viết biểu thức của tần số (ν) cho 4 vạch a, b, c và d.



Hình 3

(e) (3 điểm) Như thấy trên Hình 4, khi có từ trường, mỗi vân của vạch D1 sẽ tách thành 4 vân con (1, 2, 3 và 4). Đường kính của bốn vân con gần trung tâm là D_1 , D_2 , D_3 và D_4 . Hãy viết biểu thức của độ tách mức năng lượng ΔE_1 của $^2P_{1/2}$ và ΔE_2 của $^2S_{1/2}$.



Hình 4

(f) (3 điểm) Với từ trường $B = 0.1T$, đường kính của 4 vân con đo được là: $D_1 = 3.88mm$, $D_2 = 4.05mm$, $D_3 = 4.35mm$, và $D_4 = 4.51mm$. Hãy tính các thừa số Landé g_{k1} của $^2P_{1/2}$ và g_{k2} của $^2S_{1/2}$.

(g) (2 điểm) Từ trường của Mặt Trời có thể được xác định nhờ đo hiệu ứng Zeeman của vạch natri D1 tại một số vùng đặc biệt của Mặt Trời. Khi đo quang phổ Mặt Trời, người ta thấy trong bốn vạch tách ra, hiệu của bước sóng dài nhất và bước sóng ngắn nhất là $0.012nm$. Hãy tìm giá trị cảm ứng từ B trong vùng này của Mặt Trời?

(h) (3 điểm) Chùm sáng từ một điốt phát quang (LED) có bước sóng trung tâm $\lambda = 650nm$ và độ rộng phổ $\Delta\lambda = 2.0nm$ được chiếu vuông góc ($\theta = 0$) vào bộ chuẩn F-P như trên Hình 1. Trong trường hợp chân không, hãy tìm (i) số vạch và (ii) độ rộng tần số $\Delta\nu$ của các vạch phổ truyền qua.

Bài thi thí nghiệm

Có tất cả 22 trang kể cả trang đầu

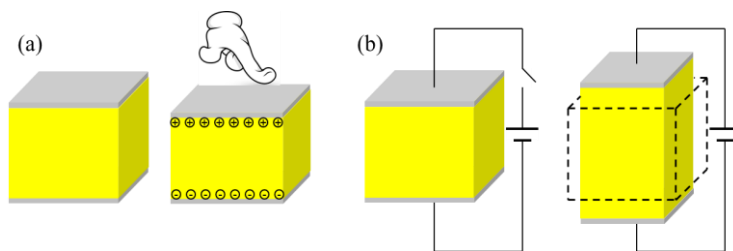
Trước hết, hãy đọc kĩ các hướng dẫn sau đây:

1. Thời gian làm bài thí nghiệm là 5 giờ.
2. Chỉ dùng bút và thiết bị được cấp.
3. Điền số liệu và kết quả vào các Phiếu trả lời (Answer Sheets).
4. Điền mã học sinh (Student Code) vào các ô ở đầu các phiếu trả lời (Answer Sheets) và số tờ giấy mà em nộp thêm.
5. Em được cấp các tờ giấy viết (Writing Sheets).
6. Nếu em dùng thêm giấy viết (Writing Sheets), hãy điền mã học sinh (**Student Code**), số bài toán (**Question Number**) và số trang (**Page Number**) trên các tờ giấy này.
7. Nếu em dùng thêm giấy viết (Writing Sheets) mà em không muốn chấm điểm thì hãy gạch chéo '**X**' toàn bộ tờ giấy.
8. Em nên dùng chủ yếu là các phương trình, con số, kí hiệu, đồ thị, hình vẽ và càng ít từ càng tốt. Cần dùng các kí hiệu đã được định nghĩa trong đề bài.
9. Cuối buổi thi, em hãy xếp các tờ giấy theo thứ tự sau:
 - a. Các tờ Phiếu trả lời (Answer Sheets)
 - b. Các tờ giấy viết.
 - c. Các tờ giấy viết được gạch chéo '**X**'
 - d. Các tờ giấy không dùng đến
 - e. Đề bài thi
10. Cho tất cả vào trong phong bì và đặt phong bì lên bàn.
11. **Em không được mang ra khỏi phòng bất kì tờ giấy nào hay bất kì vật gì trong bộ thí nghiệm.**

Hiệu ứng áp điện và ứng dụng

1. Mở đầu

Hiệu ứng áp điện là hiệu ứng mà các điện tích trong một khối vật liệu rắn được tích tụ lại khi khối vật liệu chịu ứng suất cơ học (xem Hình 1 (a)). Đây là một hiệu ứng thuận nghịch, nghĩa là khi có tác dụng của điện trường, ứng suất cơ học sẽ xuất hiện trong vật liệu (xem Hình 1 (b)).



Hình 11. (a) Hiệu ứng áp điện. Bên trái: một khối vật liệu áp điện dạng lập phương màu vàng không bị nén. Bên phải: các điện tích tích tụ ở các bề mặt đối diện của khối lập phương khi khối lập phương chịu ứng suất. (b) Hiệu ứng áp điện ngược. Trái: không có điện trường, khối lập phương không chịu ứng suất và giữ nguyên hình dạng tự nhiên của nó. Phải: khối lập phương chịu ứng suất và bị biến dạng khi chịu tác dụng của điện trường.

Vật liệu áp điện được sử dụng rất rộng rãi trong kỹ thuật và đời sống, chẳng hạn như để tạo ra và phát hiện âm thanh, tạo ra điện áp cao, chế tạo cân chính xác, tinh chỉnh các hệ quang học, phát tia lửa trong bật lửa, trong đồng hồ điện tử.

Ngoài những ứng dụng nói trên, vật liệu áp điện cũng được sử dụng trong nghiên cứu khoa học. Một điện trường mạnh cũng chỉ làm thay đổi rất ít kích thước của khối vật liệu áp điện, vì thế vật liệu áp điện trở thành công cụ quan trọng nhất để định vị các đối tượng với độ chính xác cao. Chúng là cơ sở của các công cụ để nghiên cứu bề mặt là hiển vi quét xuyên ngầm (scanning tunneling microscope - STM)), và các biến thể của nó. Giải Nobel vật lý năm 1986 đã được trao cho Gerd Binnig và Heinrich Rohrer do đã chế tạo ra STM.

Một đặc tính ưu việt khác của vật liệu áp điện là chúng cho phép chuyển đổi giữa các kiểu tín hiệu khác nhau như cơ, điện, quang. Với sự giúp đỡ của nhiệt độ cực thấp và điện từ học đỉnh cao, các nhà nghiên cứu có thể làm lạnh các kiểu dao động cơ học về trạng thái cơ bản và quan sát thấy sự lượng tử hóa chuyển động. Thí nghiệm tạo ra máy lượng tử như vậy, một bộ cộng hưởng cơ học dùng nitrit nhôm áp điện, đã được tạp chí Science coi là sự “Đột phá của năm 2010”.

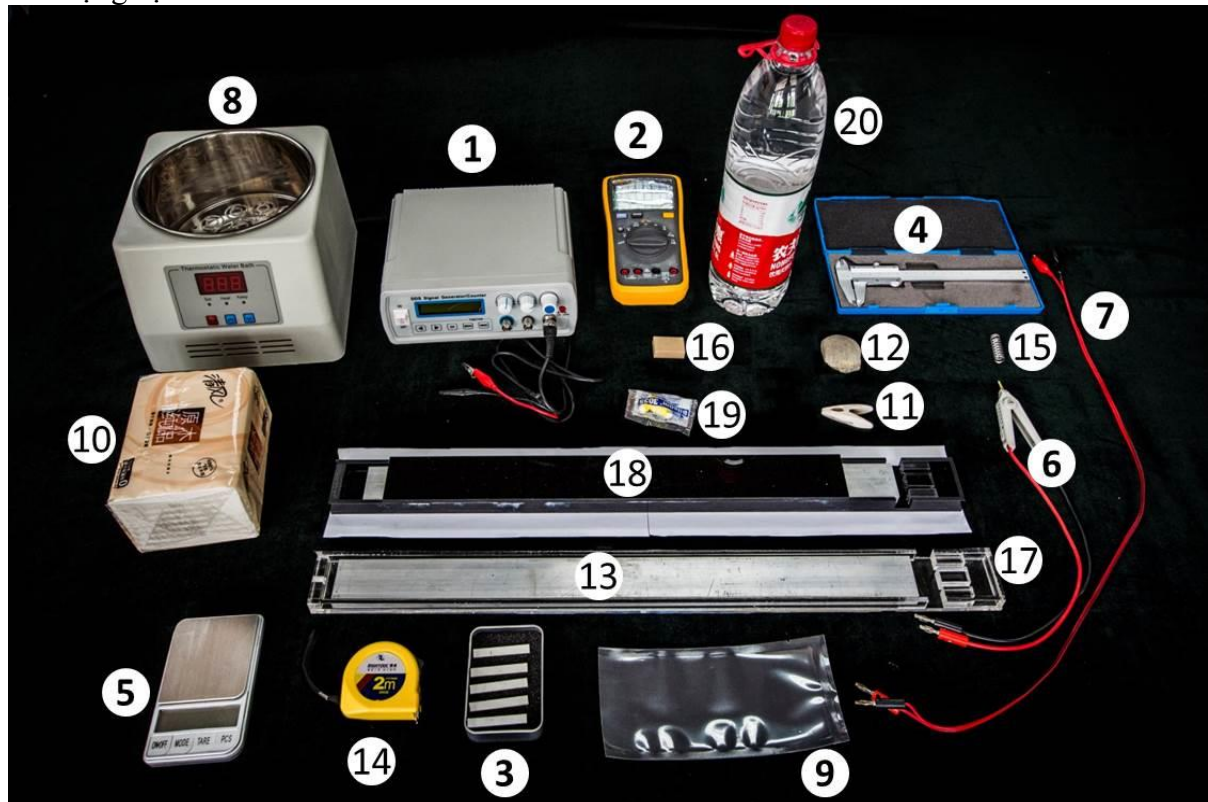
Có nhiều loại vật liệu áp điện, cả vật liệu tự nhiên và nhân tạo. Một số loại có trong tự nhiên như thạch anh, xương, tơ. Các vật liệu nhân tạo có thể là gốm, bán dẫn, polymer. Chì zirconat titanat ($\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$), được gọi là PZT, là loại gốm áp điện được dùng phổ biến vì có tính áp điện mạnh.

Trong bài thí nghiệm APhO2015 này, chúng ta sẽ khảo sát các tính chất và ứng dụng của PZT. Ta sẽ đo đặc tính áp điện bằng phương pháp cộng hưởng và ước lượng nhiệt độ Curie của bằng ngoại suy tuyến tính cho một tấm PZT. Ta sẽ dùng một tấm PZT làm một bộ chuyển đổi để tạo ra chuyển động cơ và sóng âm trong môi trường; ta cũng dùng một tấm PZT làm cảm biến để đo cường độ sóng âm. Với bộ chuyển đổi và cảm biến tự làm này, ta sẽ đo tốc độ sóng âm dọc và tốc độ sóng âm ngang trong một thanh nhôm.

2. Những chú ý về an toàn:

- 1) Luôn tắt các thiết bị trước khi cắm hoặc rút ra khỏi nguồn điện. Nếu không sẽ hỏng thiết bị.
- 2) Không được bật bình ổn nhiệt nếu không có nước trong bình.
- 3) Cần thận tránh làm bắn nước vào các thiết bị điện tử và ổ cắm điện.
- 4) Cần thận với nước nóng.
- 5) Cần thận để không bị điện giật.
- 6) Không được uống hoặc ăn bất kì vật liệu nào được cấp cho thí nghiệm.

3. Dụng cụ



- 1) Máy phát tín hiệu có thể phát ra các dạng sóng điện khác nhau trong một dải tần số rộng.
- 2) Dụng cụ đo điện đa năng (Digital multimeter - DMM).
- 3) 5 tấm PZT. Hai mặt phẳng của mỗi tấm được phủ một lớp bạc mỏng.
- 4) Một thước kẹp.
- 5) Một cân điện tử.
- 6) Một cái kẹp Kelvin. Kẹp Kelvin là một kẹp cá sấu với hai hàm cách điện với nhau, được nối với hai phích cắm. Nó được dùng để kẹp tấm PZT.
- 7) Một cặp dây điện nối với hai phích cắm và hai kẹp cá sấu. Ở mỗi kẹp cá sấu, có một hàm được bọc bằng ống cách điện màu đen. Cần chú ý đến cực tính (màu đen hoặc đỏ của vỏ kẹp cá sấu) khi mắc vào mạch điện.
- 8) Một bộ điều nhiệt dùng nước.
- 9) Một túi nhựa.
- 10) Khăn giấy.
- 11) Một cái kẹp nhựa.
- 12) Một viên đá.
- 13) Một thanh nhôm.
- 14) Một thước dây bằng thép.

- 15) Một lò xo.
- 16) Một cái tẩy.
- 17) Một hộp nhựa trong suốt để đặt thanh nhôm cùng với các tấm PZT.
- 18) Một hộp nhựa đen với một thanh nhôm ở bên trong. Một khuyết tật không thấy được từ phía bên ngoài hộp đã được tạo ra ở một vị trí theo chiều dọc của thanh nhôm.
- 19) Một cặp nút lỗ tai.
- 20) 1.5 L nước đóng chai.

Hướng dẫn dùng cân điện tử (xem Hình 2)

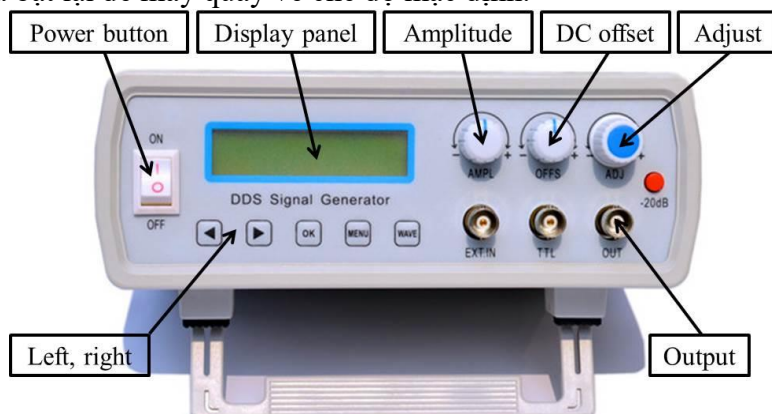
- Đặt cân lên mặt phẳng ổn định.
- Ấn nút “ON/OFF” để bật cân.
- Đợi cho số chỉ của cân ổn định. Nếu cân không hiện số không, hãy ấn nút “TARE” để đưa cân về số không.
- Ấn nút “MODE” để chuyển giữa các đơn vị “g”, “gn”, “oz”, “ozt”, “dwt”, “ct” và “tl”. Em cần dùng đơn vị “g” (gam).



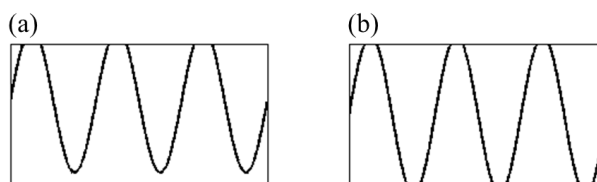
Hình 12. Cân điện tử.

Hướng dẫn dùng máy phát tín hiệu (xem Hình 3)

- Nối dây USB vào adapter AC, đầu còn lại cắm vào ổ ở phía sau máy. Cắm adapter vào ổ điện, rồi bật ON ở phía trước máy.
- Tần số sóng và dạng sóng (sin, vuông hoặc tam giác) được hiển thị trên màn. Trong thí nghiệm này, ta dùng sóng hình sin.
- Dùng nút “Amplitude” (Biên độ) để chỉnh biên độ của tín hiệu.
- Dùng nút “Adjust” để thay đổi tần số của tín hiệu. Dùng “◀” hoặc “▶” để dịch chuyển dấu nhắc (cursor) trên màn hiển thị. Vị trí của dấu nhắc cho ta bước thay đổi của tần số khi ta xoay nút.
- **Cẩn thận khi chỉnh nút “DC offset” . Nút này làm thay đổi nền một chiều (DC) của tín hiệu. Nền DC lớn có thể làm tín hiệu bị cắt một phần như thấy trên Hình 4 (a). Em cần hiệu chỉnh nền DC trước khi dùng máy phát tín hiệu như sau: nối DMM ở chế độ đo điện áp một chiều với lõi ra của máy phát đặt ở tần số 0 Hz, xoay nút “DC Offset” đến khi điện áp một chiều hiển thị trên máy đo DMM bằng không.**
- Em không nên xoay nút “Amplitude” đến giá trị lớn nhất để tránh gây cắt tín hiệu (xem Hình 4 (b)). Em nên chỉnh biên độ tín hiệu ra vào khoảng 3.0 V khi làm thí nghiệm như sau: mắc DMM ở chế độ đo điện áp xoay chiều (AC) với lõi ra của máy phát ở một tần số nào đó, thí dụ 1 kHz, xoay nút “Amplitude” cho đến khi điện áp khoảng 3.0 V.
- Nếu em ấn nhầm một nút mà không biết cách quay về trạng thái trước đó, thì hãy tắt máy và bật lại để máy quay về chế độ mặc định.



Hình 13. Máy phát tín hiệu.



Hình 14. Hai trường hợp tín hiệu bị cắt. (a) Do nền DC khác không. (b) Do biên độ ở lõi ra quá lớn.

Hướng dẫn dùng máy đo đa năng (DMM. Xem Hình 5)

- Dùng các lỗ cắm “VΩ” và “COM” để đo điện áp, điện trở và điện dung.
- Dùng các lỗ cắm “mA” và “COM” để đo cường độ dòng điện.
- Dùng núm xoay để chọn chức năng và thang đo.
- Chuyển qua lại giữa chế độ xoay chiều (AC) và một chiều (DC) bằng cách ấn nút màu VÀNG.
- Máy DMM chuyển sang chế độ ngủ (“Sleep mode”) và xóa màn hiển thị nếu DMM được để yên trong hơn 20 phút. Xoay núm chọn chức năng về OFF rồi quay lại vị trí đang dùng để đánh thức DMM. Để loại trừ chế độ ngủ, cần ấn và giữ nút màu VÀNG khi xoay núm chọn chức năng lần đầu.
- **Chú ý:** Mặc dù DMM có thể được dùng để đo đến tần số 40 kHz, nhưng kết quả đo biên độ ở các tần số cao hơn 1 kHz là không chính xác. Do đó, khi chuẩn biên độ của tín hiệu từ máy phát em hãy đặt tần số của tín hiệu dưới 1 kHz.



Hình 15. Máy đo đa năng hiện số.

Hướng dẫn sử dụng bộ điều nhiệt dùng nước (xem Hình 6)

- **Các bề mặt sẽ nóng khi sử dụng.**
- **Cấm bật máy khi không có nước trong bình.**
- **Cẩn thận tránh làm bắn nước vào các thiết bị điện tử và ổ cắm điện.**
- Đổ nước đến khoảng nửa bình chứa. Cắm dây điện và bật điện.
- Để đặt nhiệt độ mong muốn, ấn nút “Set” để vào chế độ đặt, khi đó đèn “Set” sáng lên. Dùng nút Tăng (hoặc Giảm) để tăng (hoặc giảm) giá trị của nhiệt độ cần đặt. Ấn nút “Set” một lần nữa để thoát khỏi chế độ đặt. Nước bắt đầu được đun nóng tự động. Đọc nhiệt độ thực tế của nước trên màn hiển thị.
- Trong quá trình đun nước, đèn “Heat” sáng. Khi nhiệt độ đến giá trị đã đặt, đèn “Keep” sáng lên và quá trình đun nước dừng lại.
- Trong thí nghiệm này, em nên đo trong quá trình nhiệt độ tăng dần.



Hình 16. Bộ điều nhiệt dùng nước.

Thí nghiệm A

Phép đo cơ bản [3.0 điểm]

Trong thí nghiệm này, em cần phải đo kích thước, khối lượng và điện dung của tấm PZT, rồi tính khối lượng riêng ρ và hằng số điện môi tỉ đối ϵ_r .

Hãy chọn một tấm PZT. Em chỉ dùng tấm này khi làm các Thí nghiệm A, B and C.

Trong các thí nghiệm từ A đến E, em chỉ phải phân tích sai số khi được yêu cầu.

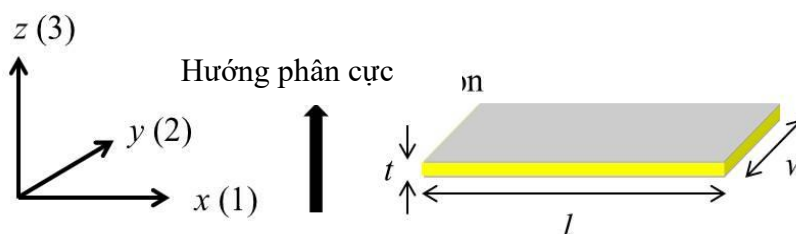
A.1	Chọn một tấm PZT và dùng thước kẹp để đo độ dài l , độ rộng w , và độ dày t của tấm. Dùng cân điện tử để xác định khối lượng m . Dùng DMM và kẹp Kelvin để đo điện dung C (ở nhiệt độ môi trường). Vì rằng hình dạng của tấm PZT không hoàn toàn đều đặn, và phép đo có sai số đọc, nên với mỗi đại lượng, em hãy đo một số giá trị ở các vị trí khác nhau, rồi tính giá trị trung bình và sai số chuẩn.	1.6 điểm
-----	---	----------

Chú ý: Hằng số điện môi tỉ đối của tấm PZT phụ thuộc vào nhiệt độ (xem **Thí nghiệm C**). Em phải đo điện dung ở nhiệt độ phòng, do đó cần tránh làm nóng tấm PZT do sờ tay vào nó.

A.2	Hãy tính khối lượng riêng ρ và hằng số điện môi tỉ đối ϵ_r của tấm PZT. Dựa trên sai số đã tìm được từ A.1, hãy dẫn ra công thức và tính sai số chuẩn của ρ và ϵ_r (hằng số điện $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m).	1.4 điểm
-----	--	----------

Thí nghiệm B

Phương pháp cộng hưởng để đo hệ số áp điện [4.5 điểm]



Hình 17. Tấm PZT.

Như đã nói trong phần mở đầu, tấm áp điện sẽ bị biến dạng (đặc trưng bởi ứng suất S) khi có điện trường tác dụng. Tỉ số giữa ứng suất S và cường độ điện trường E được gọi là hệ số áp điện:

$$d = \frac{S}{E}.$$

Thực tế, tấm PZT là dị hướng. Có một hướng đặc biệt gọi là hướng phân cực. Trong quá trình chế tạo tấm PZT, một điện trường một chiều mạnh được đặt vào dọc theo phương chiều dày của tấm (Trục z trong Hình 7) để định hướng các lưỡng cực phân tử của chất gốm ở nhiệt độ cao hơn nhiệt độ Curie (xem **Thí nghiệm C**). Sự phân cực này vẫn được giữ nguyên sau khi hạ nhiệt độ xuống dưới nhiệt độ Curie và tắt điện trường một chiều.

Mặt trên và mặt dưới của tấm phẳng được phủ bởi lớp bạc mỏng để làm điện cực (xem Hình 7). Khi các điện cực được nối với nguồn điện, điện trường hướng theo trục z (3), và được gọi là E_3 . Ta định nghĩa

$$d_{31} = \frac{S_1}{E_3},$$

$$d_{33} = \frac{S_3}{E_3},$$

Với $S_1 = \Delta l / l$ và $S_3 = \Delta t / t$ là các ứng suất tương ứng với các trục x (1) và z (3). Chú ý rằng phương biến dạng không bắt buộc phải song song với phương điện trường E_3 . Với vật liệu PZT, giá trị d_{31} cỡ một nửa giá trị d_{33} . Theo các tham số trong **Thí nghiệm A**, ta nhận thấy chiều dài l thay đổi nhiều nhất khi điện áp V được đặt vào hai điện cực, nghĩa là

$$\Delta l = l d_{31} E_3 = \frac{l}{t} d_{31} V,$$

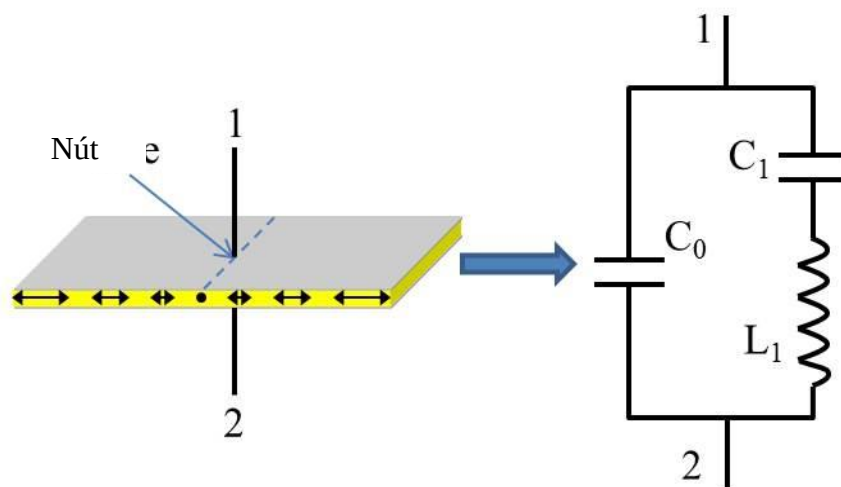
$$\Delta w = \frac{w}{t} d_{31} V,$$

$$\Delta t = t d_{33} E_3 = d_{33} V = 2 d_{31} V,$$

với $l/t \gg w/t \gg 2$. Để đơn giản việc tính toán, với tấm mỏng và dài như vậy, các dao động dọc theo phương chiều rộng (trục y) và chiều dày (trục z) có thể bỏ qua và bài toán rút về bài toán dao động một chiều. Vì vậy ta bỏ qua chỉ số dưới không cần thiết và ký hiệu d_{31} là d . Trong **Thí nghiệm D** và **E** việc bỏ qua dao động dọc theo phương chiều rộng (trục y) có thể gây nên một sai lệch nhỏ với phép đo.

Tấm PZT có thể coi như là một tụ điện (có điện dung C tính ở mục A.1) khi có tín hiệu tần số thấp đặt vào. Tuy nhiên, khi tần số tăng, dao động của tấm PZT làm thay đổi đáng kể tính chất điện của nó. Ở một vài tần số xác định, gọi là **tần số cộng hưởng**, tấm PZT dao động mạnh và tổng trở của mạch điện tương đương với tấm là cực tiểu. Cùng với các tần số cộng hưởng, còn có các tần số mà ứng với các tần số đó, tổng trở của mạch điện tương đương đạt cực đại, gọi là **các tần số phản cộng hưởng**.

Tần số cộng hưởng đầu tiên f_r của tấm liên quan đến kiểu dao động cơ bản dọc theo phương chiều dài của tấm (trục x). Ở gần tần số f_r , tấm PZT có thể được coi là mạch điện gồm hai tụ điện (C_0 và C_1) và một cuộn cảm (L_1) mắc như trên Hình 8.



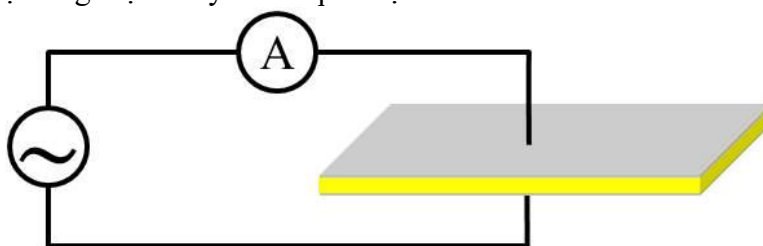
Hình 18. Sơ đồ mạch điện tương đương của tấm PZT khi có tín hiệu bên ngoài đặt vào ở tần số gần với tần số cộng hưởng đầu tiên. Tấm PZT dao động ở kiểu cơ bản. Trong điều kiện các biên của tấm là tự do, thì điểm chính giữa tính theo chiều dài tấm là nút (node).

B.1	Hãy tìm ra biểu thức tần số cộng hưởng f_r và tần số phản cộng hưởng f_a của mạch điện tương đương.	1.0 điểm
-----	---	----------

Hệ số áp điện d được tính như sau

$$d = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{128 f_r^4 l^2 \rho \left[\frac{1}{(2\pi f_a)^2 - (2\pi f_r)^2} + \frac{1}{32 f_r^2} \right]}}$$

Ta tiến hành thí nghiệm để xác định f_r và f_a . Từ sơ đồ mạch điện trên Hình 9. Ta đặt vào tấm PZT một điện áp xoay chiều có biên độ V không đổi. Tổng trở của tấm PZT được xác định thông qua cường độ dòng điện xoay chiều qua mạch.



Hình 9. Sơ đồ mạch đo các tần số cộng hưởng và phản cộng hưởng.

B.2	Đo dòng xoay chiều I chạy qua tấm PZT khi tần số f của máy phát thay đổi. Vẽ đồ thị $I-f$, rồi xác định tần số cộng hưởng f_r và tần số phản cộng hưởng f_a . Tính hệ số áp điện d .	3.5 điểm
-----	---	----------

Hướng dẫn:

- (1) Nối máy phát tín hiệu, máy đo DMM và tấm PZT theo Hình 9. **Chú ý rằng tấm PZT cần được kẹp chặt tại điểm chính giữa theo phương chiều dài bằng kẹp Kelvin**, vì điểm

- chính giữa là nút trong điều kiện các biên là tự do.
- (2) Biên độ của tín hiệu ở đầu ra của máy phát ít thay đổi theo tần số nếu ta không chạm vào nút “Amplitude”. Tuy nhiên, máy đo DMM có thể đáp ứng không đúng với tín hiệu có tần số trên 40 kHz. Không cần số liệu với tần số trên 40 kHz.
 - (3) **Chú ý: tấm PZT đã kẹp phải được để yên trong suốt quá trình thí nghiệm. Dịch chuyển nhỏ có thể làm thay đổi giá trị đo.**
 - (4) **Chú ý: như đã nói đến trong mục A.1, phép đo phải được thực hiện ở nhiệt độ phòng. Tránh làm nóng tấm do chạm tay vào.**
 - (5) **Chú ý: nếu bạn không nghe thấy âm thanh có tần số cao phát ra từ bộ thí nghiệm khi thay đổi tần số và tự tin vào sự bố trí thí nghiệm của mình, hãy liên hệ với giám thị, vì dụng cụ của bạn có thể đã bị hỏng.**

Thí nghiệm C

Nhiệt độ Curie của tấm PZT [4.0 điểm]

Phần lớn các chất cách điện có hằng số điện môi không phụ thuộc vào nhiệt độ. Tuy nhiên hằng số điện môi tĩnh tỉ đối (static relative permittivity) của gốm PZT thay đổi theo nhiệt độ như sau

$$\epsilon_r = A + \frac{B}{T - T_c}, \quad \text{với } T > T_c.$$

với A và B là các hằng số không phụ thuộc vào nhiệt độ. Mối quan hệ này được gọi là định luật **Curie-Weiss**. Thừa số B và T_c được gọi là hằng số Curie và nhiệt độ Curie.

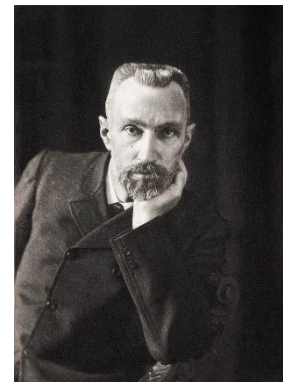
Sự chuyển pha xảy ra ở nhiệt độ chuyển tiếp T_c . Trên nhiệt độ T_c , vật liệu ở pha thuận điện (paraelectric phase), khi đó các lưỡng cực nguyên tố của các ô đơn vị khác nhau trong tinh thể định hướng ngẫu nhiên. Dưới nhiệt độ T_c , các lưỡng cực nguyên tố tương tác với nhau, làm tăng điện trường bên trong và làm các lưỡng cực định hướng cùng chiều. Sự phân cực tự phát xuất hiện khi không có điện trường ngoài. Hằng số điện môi tỉ đối ở dưới T_c là

$$\epsilon_r = 1 + \frac{B}{2(T_c - T)} \quad \text{với } T < T_c.$$

Từ **Thí nghiệm A** ta biết rằng $\epsilon_r \gg 1$. Bỏ qua số 1, ta có công thức gần đúng là

$$\epsilon_r = \frac{B}{2(T_c - T)} \quad \text{với } T < T_c.$$

Vì thế, điện dung của tấm PZT thu được ở mục A.1 cũng thay đổi theo nhiệt độ. Nhiệt độ Curie của tấm PZT rất cao so với nhiệt độ sôi của nước, nên ta sẽ tìm nhiệt độ Curie bằng phép ngoại suy tuyến tính.



Pierre Curie

C.1	Đo điện dung của tấm PZT ở các nhiệt độ khác nhau và ghi lại số liệu	1.5 điểm
-----	--	----------

Hướng dẫn:

- (1) Dùng cặp dây có phích cắm và kẹp cá sấu để nối tấm PZT với DMM. Cần chú ý đến cực của kẹp cá sấu khi kẹp tấm PZT. **Không dùng kẹp Kelvin vì nó làm bằng nhựa ABS, nên nó sẽ bị mềm ra khi bị nóng.**
- (2) Đặt tấm PZT vào trong túi nhựa. Sử dụng kẹp nhựa để kẹp chặt cặp dây vào miệng túi.
Chú ý: Túi nhựa đã có một đầu hở. Không được xé đầu còn lại!

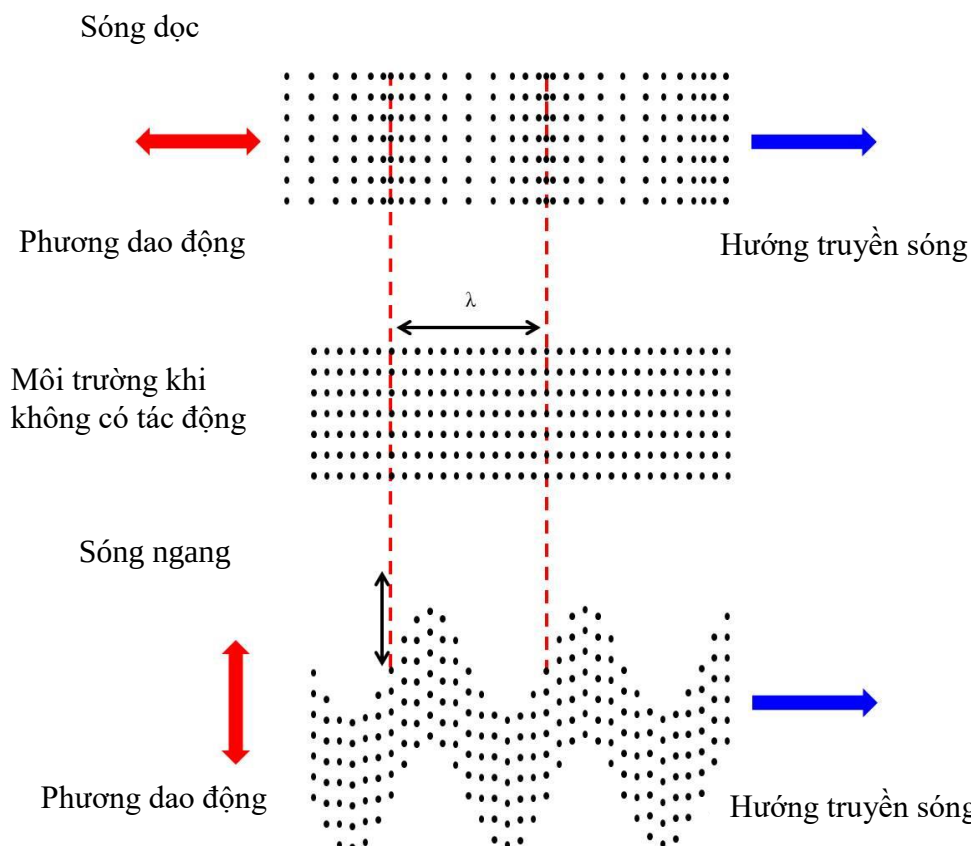
- (3) Đổ nước đóng chai vào bộ điều nhiệt. Nhúng túi nhựa vào trong nước, nhưng giữ không cho nước tràn vào trong túi. Dùng hòn đá để giữ túi nhựa chìm trong nước.
- (4) Bật công tắc điện và đặt nhiệt độ mong muốn. **Chú ý: Không được bật công tắc khi chưa có nước trong nồi.**
- (5) **Cảnh báo: hãy cẩn thận với nước nóng ở trong nồi. Nhớ rằng nước ở nhiệt độ trên 50 °C có thể gây bỏng. Để an toàn, không đặt nhiệt độ lớn hơn 90°C.**
- (6) Nhiệt độ sẽ tăng rất chậm. Hãy ghi lại điện dung C của tấm PZT ứng với các nhiệt độ khác nhau.
- (7) Tắt công tắc và rút dây cảm khỏi ổ cắm khi phép đo kết thúc.
- (8) Gợi ý: Để tiết kiệm thời gian, em có thể đặt nhiệt độ là 90°C và ghi lại giá trị điện dung trong quá trình nhiệt độ tăng.

C.2	Phân tích số liệu, vẽ đồ thị thích hợp và tìm giá trị nhiệt độ Curie.	2.5 điểm
-----	---	----------

Thí nghiệm D

Ứng dụng: Đo tốc độ truyền âm trong nhôm [6.5 điểm]

Trong các chất rắn, sóng âm có thể được truyền ở cả hai dạng sóng dọc và sóng ngang. Chuyển động của môi trường tương ứng với hai dạng truyền sóng ở trên được minh họa ở hình vẽ bên dưới.



Hình 10. Các sóng dọc và sóng ngang trong chất rắn.

Trong sóng dọc, phương dao động trùng với phương truyền sóng. Các sóng dọc có thể hình thành trong chất lỏng cũng như trong chất rắn, do năng lượng truyền đi thông qua các chuyển động nén và giãn của cấu trúc nguyên tử.

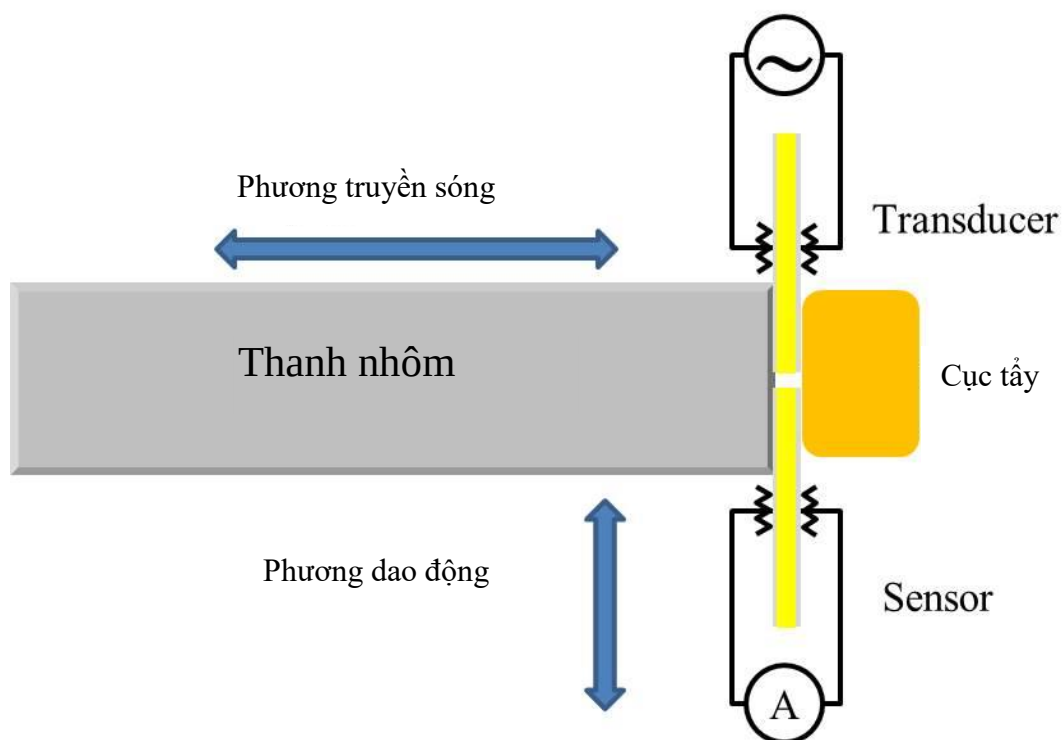
Trong sóng ngang, dịch chuyển của môi trường vuông góc với phương truyền sóng. Các sóng ngang lan truyền tốt trong môi trường rắn, mà không truyền tốt trong chất lỏng hoặc chất khí.

Trong thí nghiệm này, chúng ta sẽ đo tốc độ truyền sóng dọc và sóng ngang trong thanh nhôm. Đầu tiên ta sẽ đo tốc độ truyền sóng ngang, sau đó sẽ đo tốc độ truyền sóng dọc.

D.1	Gọi chiều dài của thanh nhôm là L và tốc độ truyền sóng là u . Trong điều kiện các biên tự do, hãy tìm biểu thức của các tần số f_n ứng với các sóng dừng (cộng hưởng) dọc theo chiều dài thanh. Sau đó, tìm biểu thức của u theo f_n .	0.6 điểm
-----	---	----------

Bây giờ, ta dùng tấm PZT như là bộ phát (transducer) sóng âm vào thanh nhôm và một tấm PZT khác làm cảm biến (sensor) dao động để thu các sóng âm phản xạ.

Đầu tiên, ta đo tốc độ truyền sóng ngang. Như đã nêu trong **Thí nghiệm B**, dao động dọc theo phương chiều dài là chính. Ta đặt bộ phát và cảm biến thu tại một đầu của thanh như trên Hình 11. Dao động tạo từ bộ phát sẽ truyền vào thanh thông qua ma sát và hình thành nên sóng ngang.

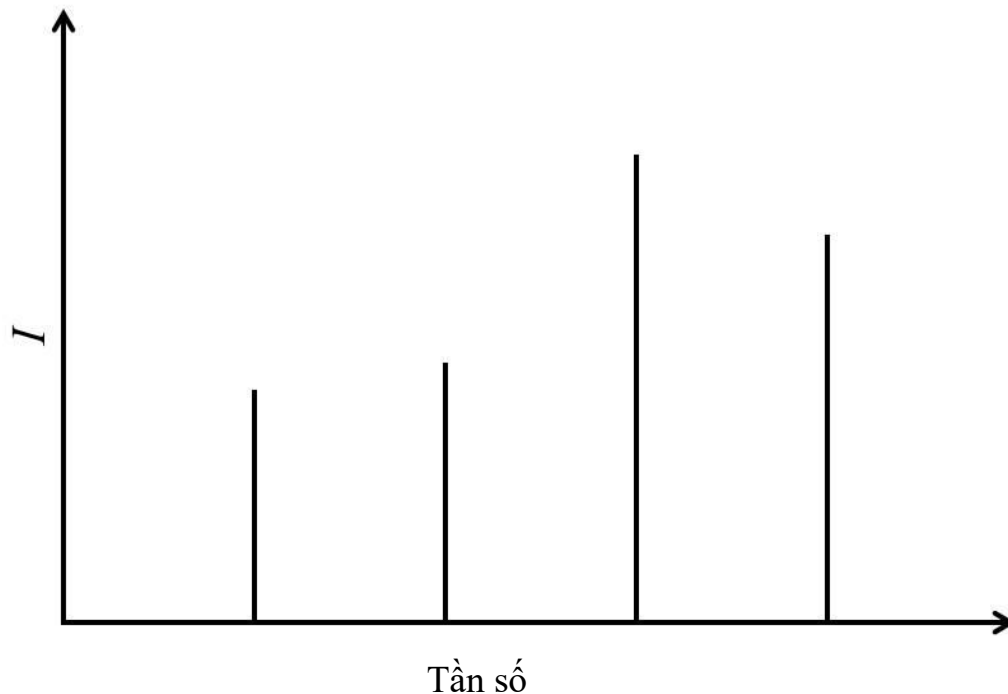


Hình 11. Minh họa việc lắp đặt để đo tốc độ truyền sóng ngang (nhìn từ trên xuống).

D.2	Dùng thước cuộn để đo chiều dài L của thanh nhôm. Hãy đo vài lần để tìm giá trị trung bình và sai số. Khi thay đổi tần số của sóng âm từ bộ phát, hãy ghi lại giá trị các đỉnh nhận được từ cảm biến. Hãy vẽ phổ tập hợp tất cả các đỉnh cộng hưởng nhận được, để đưa ra phổ có dạng như ở Hình 12.	1.6 điểm
-----	--	----------

Hướng dẫn:

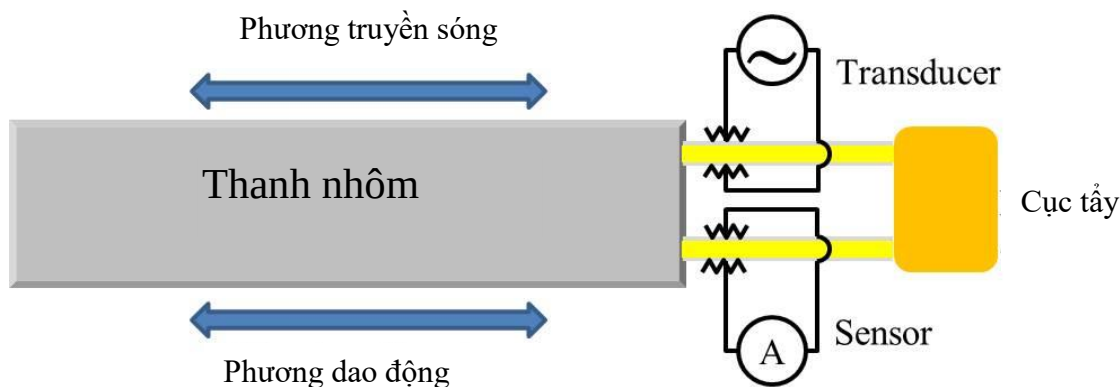
- (1) Thực hiện từ bước 2 đến bước 4 để lắp đặt thí nghiệm giống như minh họa trên Hình 11. Lưu ý hộp nhựa được thiết kế riêng cho việc lắp đặt này.
- (2) Đặt thanh nhôm theo chiều dài rãnh của hộp nhựa, dùng cái tẩy để ép các tấm PZT vào một đầu thanh nhôm như trên Hình 11. Hai tấm PZT không được chạm vào nhau.
- (3) Đặt lò xo vào đầu kia của rãnh để đẩy thanh ép vào các tấm PZT.
- (4) Nối một tấm PZT với máy phát tín hiệu để làm bộ phát. Nối tấm PZT còn lại với máy đo DMM để làm cảm biến. Cần chú ý cực tính khi sử dụng kẹp cá sấu.
- (5) Tấm PZT dễ bị gãy và sẽ không có thêm đồ thay thế.**
- (6) Sử dụng cái bịt tai nếu bạn bị làm phiền bởi âm thanh tần số cao.
- (7) Nên thay đổi tần số trong khoảng từ 0 đến 40 kHz.



Hình 12. Dạng phổ mô tả các đỉnh cộng hưởng.

D.3	Hãy xác định các đỉnh cộng hưởng gây bởi sóng ngang. Tính tốc độ sóng ngang ứng với các đỉnh đó, đưa ra công thức sai số và tính sai số. Lưu ý: Do sự không hoàn hảo của thiết bị, nên có thể có một số đỉnh phụ không liên quan đến vấn đề đang xét. Em cần phải xem xét và loại bỏ các đỉnh này.	1.4 điểm
-----	--	----------

Bằng việc thay đổi cách tiếp xúc giữa các tấm PZT và thanh nhôm, ta có thể đo tốc độ sóng dọc trong thanh. Hãy lắp đặt bộ phát và cảm biến như ở Hình 13. Dao động dọc theo chiều dài của tấm PZT ở bộ phát sẽ lan truyền vào thanh nhôm do sự nén và hình thành các sóng dọc.



Hình 13. Minh họa việc lắp đặt đo tốc độ sóng dọc.

Như đã nói trong **Thí nghiệm B**, mặc dù dao động dọc theo chiều dài là chính, nhưng vẫn tồn tại các dao động theo các hướng khác, điều này gây ra các sóng âm ở trong thanh và tạo thêm các đỉnh cộng hưởng trong phổ. Các đỉnh cộng hưởng thêm này không trùng với các đỉnh gây bởi các sóng dừng dọc.

D.4	Thay đổi tần số sóng âm từ bộ phát và ghi lại giá trị các đỉnh thu được bởi cảm biến. Vẽ phổ chứa tất cả các đỉnh cộng hưởng thu được, giống như trên Hình 12.	1.5 điểm
-----	--	----------

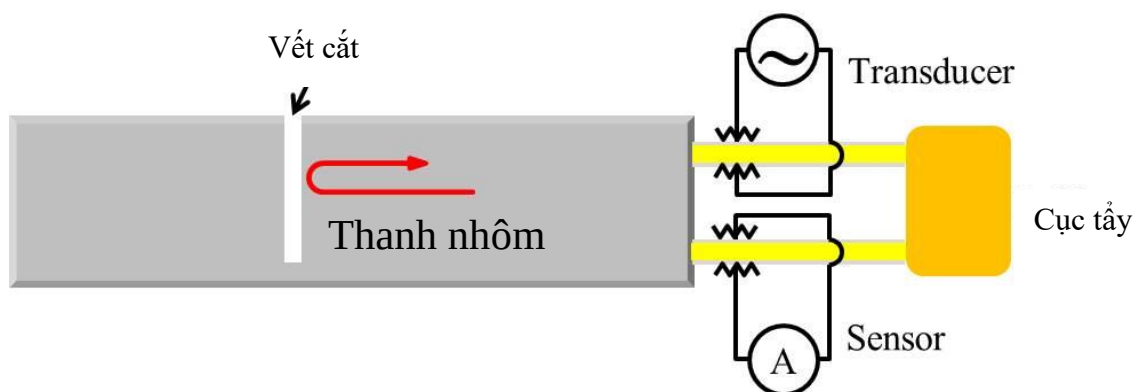
Hướng dẫn:

- (1) Thực hiện từ bước 2 tới bước 5 để lắp đặt thí nghiệm như trên Hình 13. Hộp nhựa được thiết kế riêng cho thí nghiệm này.
- (2) Đặt hai tấm PZT vào hai khe hẹp ở đầu của hộp nhựa.
- (3) Với thanh nhôm dọc theo rãnh, dùng cục tẩy để ép các tấm PZT vào một đầu của thanh.
- (4) Chèn lò xo vào máng để đẩy ép thanh vào các tấm PZT.
- (5) Nối một tấm PZT với máy phát tín xung để làm bộ phát. Nối tấm PZT còn lại với máy đo DMM để làm cảm biến. Cần chú ý cực tính khi sử dụng kẹp cá sấu.
- (6) **Lưu ý: Tiếp xúc giữa các tấm PZT và thanh cần phải tốt. Các cạnh của tấm PZT cần tiếp xúc hoàn toàn với mặt của thanh nhôm, tránh trường hợp tiếp xúc điểm hoặc tiếp xúc một phần.**
- (7) **Lưu ý: Nếu em thấy có quá nhiều đỉnh cộng hưởng trong phổ, em có thể giảm biên độ tín hiệu từ máy phát xung và/hoặc nhẹ nhàng giảm áp lực giữa các tấm PZT và thanh để giảm việc sinh ra các sóng ngang. Em cũng có thể bỏ lò xo tại đầu thanh nếu tiếp xúc giữa các tấm PZT và thanh nhôm vẫn ổn.**
- (8) Nên thay đổi tần số trong khoảng từ 0 đến 40 kHz.

D.5	So sánh với kết quả từ mục D.2, hãy xác định các đỉnh cộng hưởng gây bởi sóng ngang. Hãy chọn các đỉnh liên quan đến sóng dọc và từ đó tính tốc độ truyền sóng dọc. Hãy đưa ra công thức sai số và tính sai số.	1.4 điểm
-----	---	----------

Thí nghiệm E

Ứng dụng: Phát hiện sai hỏng trong thanh nhôm [2.0 điểm]



Hình 14. Minh họa việc lắp đặt thí nghiệm phát hiện sai hỏng trong thanh nhôm.

Sau khi biết được tốc độ truyền sóng dọc từ **Thí nghiệm D**, ta xác định vị trí sai hỏng là một vết cắt nhân tạo trên thanh (vết cắt sâu ngang thanh).

Các sóng âm truyền qua các vật liệu rắn đã được sử dụng để phát hiện các sai hỏng, đứt gãy ngầm cũng như các vùng không liên tục bên trong các vật kim loại, composit, nhựa và gốm. Kiểm tra siêu âm trong công nghiệp được thực hiện bằng cách phát liên tục xung ngắn có tần số vài MHz với biên độ lên đến vài trăm vôn để điều khiển bộ transducer, và rồi khuếch đại tín hiệu thu được để xem có bất kì việc phản xạ từ sai hỏng bên trong hay không. Kỹ thuật này quá phức tạp đối với thí nghiệm hiện tại của chúng ta. Thay vào đó, với một mô hình đơn giản, ta dùng phương pháp cộng hưởng để phát hiện vết cắt sâu, phẳng trên thanh. Khác với trường hợp trong **Thí nghiệm D**, các sóng âm sẽ bật ngược trở lại tại vị trí vết cắt, thay vì tại đầu thanh. Do đó, vị trí các đỉnh cộng hưởng trong phổ sẽ khác so với trong **Thí nghiệm D**. Từ đó, ta xác định được vị trí vết cắt.

Trong thí nghiệm này, ta dùng sóng dọc.

E.1	Thay đổi tần số sóng âm từ bộ phát và ghi lại giá trị các đỉnh thu được bởi cảm biến. Vẽ phổ chứa tất cả các đỉnh cộng hưởng thu được, giống như trên Hình 12.	1.2 điểm
E.2	Từ phổ đo được, hãy xác định các đỉnh cộng hưởng liên quan đến sự tồn tại của vết cắt. Tính khoảng cách từ vị trí cắt đến đầu thanh nơi tiếp xúc với các tấm PZT.	0.8 điểm

APhO 17 – 2016 tại Hong Kong

Câu hỏi lý thuyết – T1: Cơ học mạng có thể biến dạng

(Tổng điểm:
20)

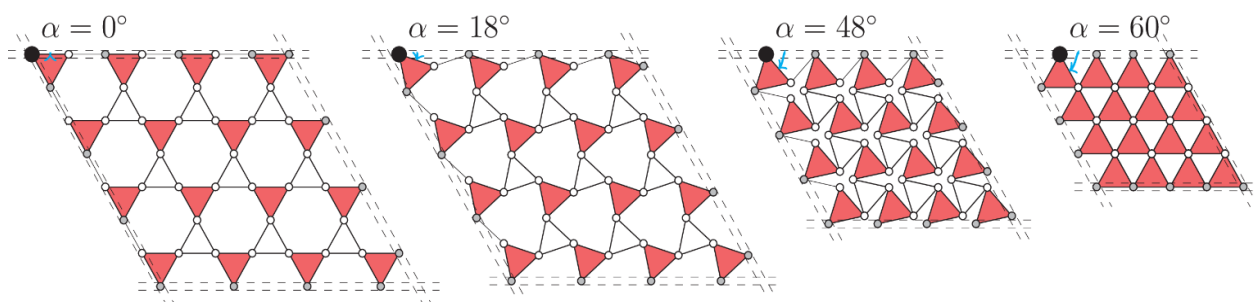
Ta xét một mạng có thể biến dạng, được treo trong trọng trường và được xem như một con lắc vật lý có thể biến dạng. Hệ chỉ có một bậc tự do, tức là chỉ có một cách biến dạng, và cấu hình của hệ được mô tả đầy đủ bằng góc α . Cấu trúc loại này đã được nghiên cứu bởi nhà vật lý nổi tiếng James Maxwell ở thế kỷ 19 và một vài tính chất thú vị đã được phát hiện gần đây.

Như thấy trên Hình 1, N^2 tấm phẳng hình tam giác đều (màu đỏ) được liên kết với nhau bằng những khớp nối qua các thanh giống hệt nhau, và tạo thành một mạng $N \times N$ ($N > 1$). Các khớp nối ở đỉnh của tam giác được biểu thị bằng các vòng tròn nhỏ. Độ dài cạnh của tam giác đều bằng độ dài của thanh và bằng l . Các đường đứt nét ở mỗi hình vẽ biểu diễn bốn cái ống, mỗi ống chứa N đỉnh (vòng tròn nhỏ màu xám) và N đỉnh này có thể trượt trong ống, nghĩa là mỗi ống giống như một đường ray để các đỉnh trượt trên đó.

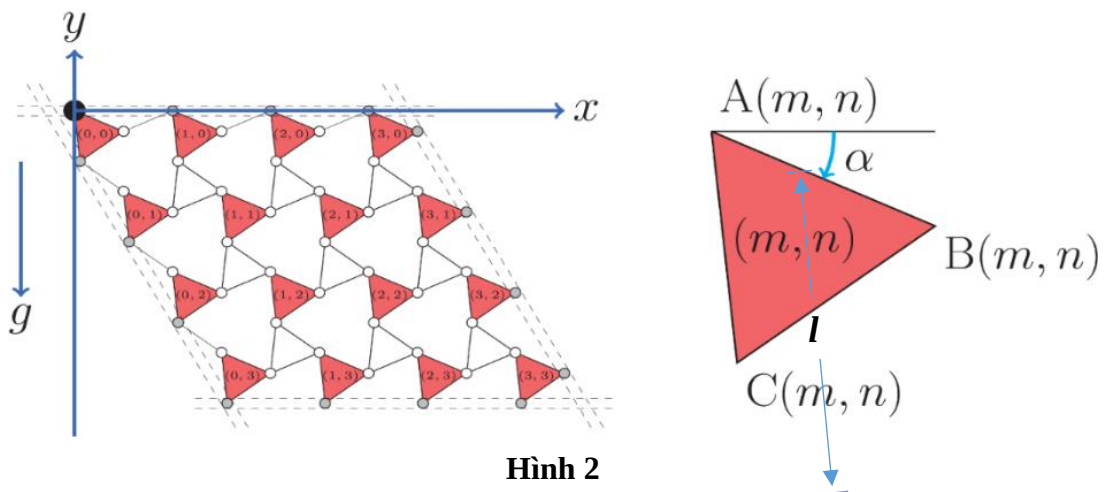
Bốn ống được liên kết với nhau theo hình thoi, với hai góc luôn bằng 60° , và hai góc còn lại luôn bằng 120° như thấy trên Hình 1. Mỗi tấm tam giác mật độ đồng nhất và có khối lượng M ; các phần còn lại của hệ không có khối lượng. Cấu hình của mạng được xác định duy nhất bởi góc α , với $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ (xem các ví dụ với các giá trị khác nhau của α trên Hình 1). Hệ được treo thẳng đứng như một bức rèm, với ống trên cùng được giữ cố định theo phương ngang.

Hệ tọa độ được cho trên Hình 2. Mức không của thế năng được lấy ở $y = 0$. Mỗi tấm tam giác được xác định bởi cặp chỉ số (m, n) , với $m, n = 0, 1, 2, \dots, N-1$, biểu thị số thứ tự theo phương x và phương y . $A(m, n)$, $B(m, n)$ và $C(m, n)$ là 3 đỉnh của tấm tam giác (m, n) . Đỉnh trên cùng bên trái, $A(0, 0)$ (hình tròn đen to) được giữ cố định.

Chuyển động của cả hệ được giới hạn trong mặt phẳng x - y . Mô men quán tính của tấm tam giác đều, đồng chất, đối với khối tâm, là $I = MI^2/12$. Gia tốc rơi tự do là g . Em hãy dùng E_k để chỉ động năng và E_p để chỉ thế năng.

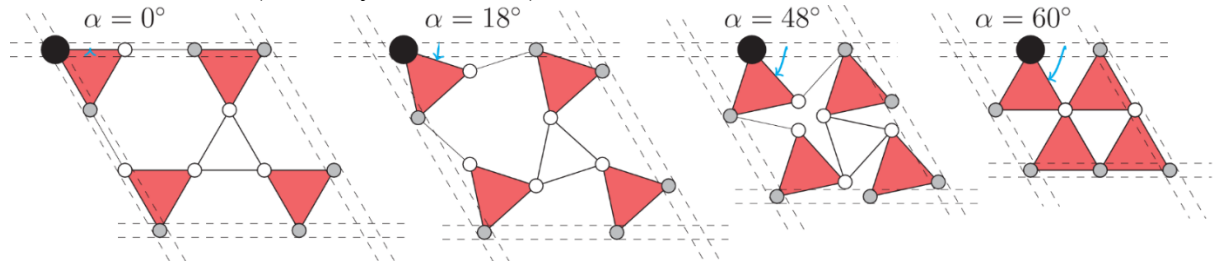


Hình 1



Hình 2

Phần A: Khi $N = 2$ (như thấy trên Hình 3):



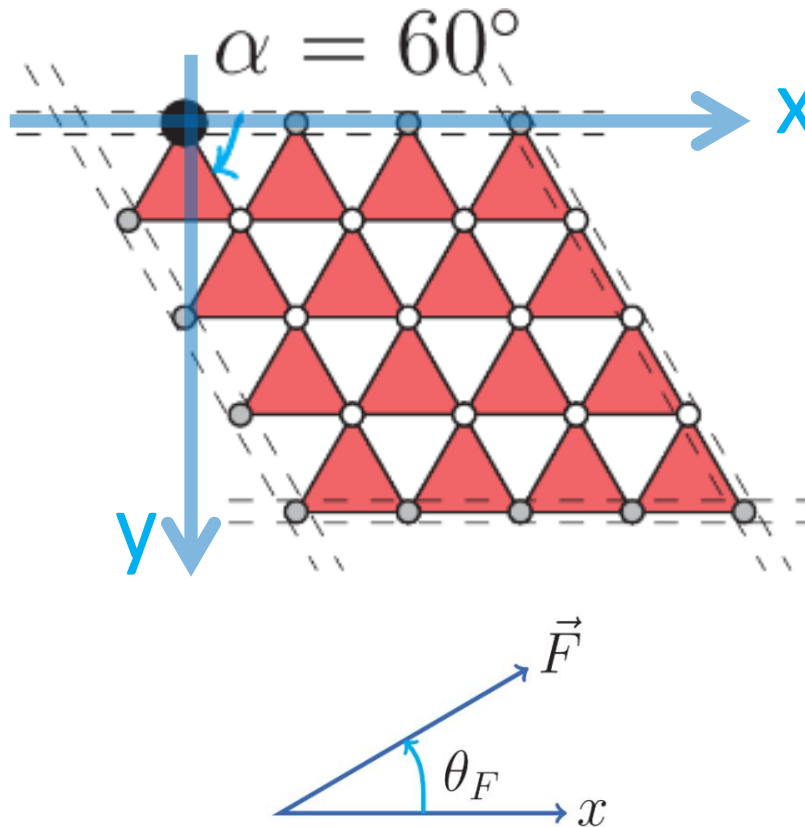
Hình 3

A1	Hãy tìm biểu thức thế năng E_p của hệ theo góc α , khi $N = 2$	2 điểm
A2	Hãy xác định góc α_E cho hệ ở trạng thái cân bằng dưới tác dụng của trọng lực, khi $N = 2$.	1 điểm
A3	Sau khi bị làm lệch nhẹ khỏi trạng thái cân bằng, hệ thực hiện dao động điều hòa. Hãy xác định động năng của hệ theo $\Delta\alpha \equiv d(\Delta\alpha)/dt$. Hãy tính tần số dao động f_E khi $N = 2$.	5 điểm

Phần B: Với N bất kì

B1	Hãy xác định góc α'_E cho hệ ở trạng thái cân bằng dưới tác dụng của trọng lực, khi N có giá trị bất kì.	3 điểm
B2	Xét trường hợp khi $N \rightarrow \infty$. Với một nhiễu loạn nhỏ của góc α , biến thiên thế năng của hệ là $\Delta E_p \propto N^{\gamma_1}$, động năng của hệ là $E_k \propto N^{\gamma_2}$, còn tần số dao động là $f'_E \propto N^{\gamma_3}$. Hãy tìm giá trị của γ_1, γ_2 và γ_3 . (α là dấu tỉ lệ).	3 điểm

Phần C: Tác dụng lực lên một trong $3N^2$ đỉnh tam giác sao cho hệ duy trì ở trạng thái ứng với $\alpha_m = 60^\circ$.



Hình 4

C1	Ta cần chọn đỉnh nào để độ lớn của lực tác dụng là nhỏ nhất?	1 điểm
C2	Hãy xác định hướng và độ lớn của lực nhỏ nhất này. Hướng này được xác định bằng góc θ_F được định nghĩa trên Hình 4.	5 điểm

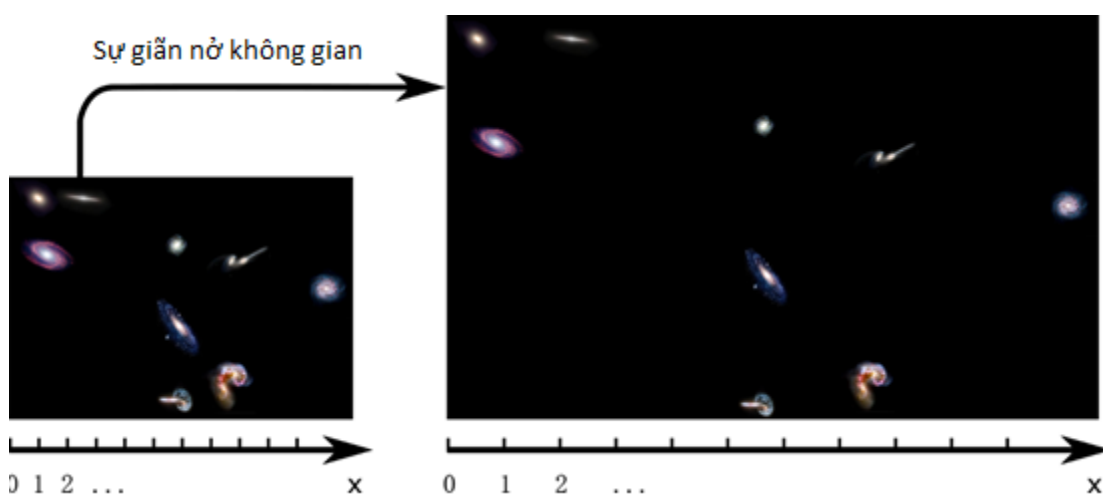
Câu hỏi lí thuyết – T2

Vũ trụ giãn nở

(Tổng điểm:
20)

Sự kiện nổi bật nhất trong vũ trụ học là vũ trụ của chúng ta đang giãn nở. Không gian được tạo ra liên tục khi thời gian trôi đi. Sự giãn nở của không gian chỉ ra rằng khi vũ trụ giãn nở, khoảng cách giữa các vật trong vũ trụ cũng giãn nở. Để thuận tiện, ta dùng hệ tọa độ đồng chuyển động (comoving coordinate system) $\vec{r} = (x, y, z)$ để đánh dấu những điểm trong vũ trụ đang giãn nở của chúng ta, trong hệ tọa độ đó, khoảng cách $\Delta r = |\vec{r}_2 - \vec{r}_1| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$ giữa vật 1 và 2 luôn không thay đổi. (Ở đây, ta giả thiết rằng không có chuyển động riêng, nghĩa là những vật đó không có thêm chuyển động nào ngoài chuyển động

theo sự mở rộng của vũ trụ.) Trạng thái này được minh họa trong các hình phía dưới (hình vẽ là không gian hai chiều, nhưng thực tế vũ trụ là không gian ba chiều).



Lý thuyết hiện đại của vũ trụ học được xây dựng dựa trên thuyết tương đối rộng của Einstein. Tuy nhiên, với những giả định thích hợp, có thể hiểu đơn giản trong khuôn khổ lý thuyết hấp dẫn của Newton. Trong những câu hỏi sau đây, chúng ta sẽ tính toán trong khuôn khổ lý thuyết hấp dẫn của Newton.

Đề đo khoảng cách vật lí, một “hệ số tỉ lệ” $a(t)$ được đưa vào, theo đó khoảng cách vật lí Δr_p giữa hai điểm đồng chuyển động $\vec{r}_1$ và $\vec{r}_2$ là

$$\Delta r_p = a(t)\Delta r,$$

Sự giãn nở của vũ trụ dẫn tới $a(t)$ là một hàm tăng dần theo thời gian.

Ở quy mô lớn – quy mô lớn hơn các thiên hà và các đám thiên hà – vũ trụ của chúng ta gần đúng là đồng nhất và đẳng hướng. Ta xem xét vũ trụ của chúng ta theo một mô hình đồ chơi, trong đó vũ trụ chứa đầy các hạt giống nhau được phân bố đều. Do có quá nhiều hạt, ta mô hình chúng như là một chất lỏng liên tục. Thêm nữa, chúng ta giả thiết số hạt là luôn không đổi.

Hiện nay, trong vũ trụ của chúng ta chủ yếu là vật chất phi tương đối, động năng của nó là không đáng kể so với năng lượng ứng với khối lượng của nó. Đặt $\rho_m(t)$ là mật độ năng lượng vật lí (nghĩa là năng lượng trên một đơn vị thể tích vật lí, trong đó chủ yếu là năng lượng ứng với khối lượng, và thế năng hấp dẫn không đóng góp vào “mật độ năng lượng vật lí”) của vật chất phi tương đối ở thời điểm t . Ta dùng t_0 để biểu thị thời điểm hiện tại.

A	Hãy tìm biểu thức $\rho_m(t)$ ở thời điểm t theo các đại lượng $a(t)$, $a(t_0)$ và $\rho_m(t_0)$.	2 điểm
----------	---	-------------------

Bên cạnh vật chất phi tương đối, còn có một lượng nhỏ bức xạ trong vũ trụ của chúng ta hiện nay, chúng tạo bởi những hạt không khối lượng, ví dụ như photon. Bước sóng vật lí của những hạt không khối lượng tăng cùng với sự giãn nở của vũ trụ như sau $\lambda_p \propto a(t)$. ($\propto$ là dấu tỉ lệ). Gọi mật độ năng lượng vật lí của bức xạ là $\rho_r(t)$.

B	Hãy tìm biểu thức mật độ năng lượng vật lí của bức xạ $\rho_r(t)$ ở thời điểm t theo các đại lượng $a(t)$, $a(t_0)$ và $\rho_r(t_0)$.	2 điểm
----------	---	---------------

Xét môi trường khí photon gồm các photon không tương tác, và tuân theo phân bố cân bằng nhiệt. Trong trường hợp này, nhiệt độ của photon phụ thuộc thời gian theo quy luật $T(t) \propto [a(t)]^\nu$.

C	Hãy tính giá trị bằng số của γ .	2 điểm
----------	---	---------------

Khảo sát nhiệt động học của một loại hạt không tương tác X. Lưu ý rằng không gian giãn nở đủ chậm và đoạn nhiệt đề entropy của X không đổi theo thời gian. Gọi mật độ năng lượng vật lí của hạt X là $\rho_X(t)$, nó bao gồm năng lượng ứng với khối lượng và nội năng. Gọi áp suất vật lí là $p_X(t)$.

D	Hãy tìm biểu thức của $d\rho_X(t)/dt$ theo $a(t)$, $da(t)/dt$, $\rho_X(t)$, và $p_X(t)$.	4 điểm
----------	--	---------------

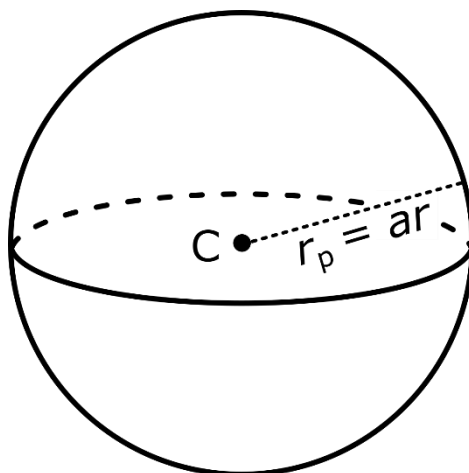
Xét ngôi sao S. Ở thời điểm t_0 , ngôi sao này ở khoảng cách vật lí $r_p = a(t_0)r$ so với Trái Đất, với r là khoảng cách đồng chuyển động (comoving distance). Ở đây, ta bỏ qua các chuyển động riêng, nghĩa là cả ngôi sao và Trái Đất chỉ tuân theo sự giãn nở của vũ trụ mà không có chuyển động thêm nào khác.

Ngôi sao bức xạ năng lượng dưới dạng ánh sáng với công suất P_e một cách đẳng hướng. Ta dùng kính thiên văn để quan sát ánh sáng của ngôi sao. Để đơn giản, giả thiết rằng kính thiên văn có thể ghi nhận được tất cả các tần số của ánh sáng với hiệu suất 100%. Gọi diện tích vật kính của kính thiên văn là A .

E	Hãy tìm biểu thức công suất P_r thu được bởi kính thiên văn từ ngôi sao S, như một hàm của r , A , P_e , hệ số tỉ lệ $a(t_e)$ ở thời điểm ánh sáng ngôi sao được phát ra t_e , và hệ số tỉ lệ tại thời điểm quan sát $a(t_0)$.	4 điểm
----------	---	---------------

Nếu không có lực hấp dẫn, tốc độ giãn nở của vũ trụ là một hằng số. Trong khuôn khổ thuyết hấp dẫn của Newton, điều này có thể hiểu là, khi không có lực, vật chất chỉ chuyển động ra xa nhau với tốc độ không đổi, và do đó, $da(t)/dt$ là một hằng số phụ thuộc vào điều kiện ban đầu.

Bây giờ, ta xem lực hấp dẫn Newton ảnh hưởng như thế nào tới hệ số tỉ lệ $a(t)$, trong một vũ trụ được lấp đầy một cách đồng nhất và đẳng hướng bởi vật chất phi tương đối.



Như minh họa ở hình trên, ta giả thiết C là tâm của vũ trụ (giả thiết này có thể bị loại bỏ trong thuyết tương đối rộng của Einstein, nhưng nó vượt ra ngoài phạm vi của bài toán này). Ta cắt vật chất thành những lớp vỏ mỏng quanh C . Ta tập trung vào một lớp vỏ mỏng (hình cầu ở hình phía trên) mà khoảng cách đồng chuyển động từ tâm là r (nhớ lại rằng khoảng cách đồng chuyển động là luôn không đổi theo thời gian)

F	Hãy dùng chuyển động của lớp vỏ để tìm mối liên hệ giữa $da(t)/dt$, $a(t)$ và mật độ năng lượng ứng với khối lượng $\rho(t)$. (Trong biểu thức cuối cùng, nếu em gặp một hằng số phụ thuộc vào điều kiện ban đầu, em có thể giữ nguyên nó)	5 điểm
G	Dựa trên mô hình mô tả ở Phần (F), hãy cho biết sự giãn nở của vũ trụ (a) nhanh hơn hoặc (b) chậm lại? chọn (a) hoặc (b).	1 điểm

Thông tin thêm, năm 1998, một thành phần năng lượng mới của vũ trụ đã được phát hiện. Nó làm thay đổi kết luận ở Phần (G).

Câu hỏi lí thuyết – T3: Các hiệu ứng từ trường trong siêu dẫn

(Tổng điểm: 20)

Electron là một hạt sơ cấp mang điện tích và có momen từ riêng liên quan đến momen động lượng spin. Do tương tác Coulomb, các electron trong môi trường chân không thì đẩy nhau. Tuy nhiên, trong một vài kim loại, lực tác dụng tổng hợp giữa các electron có thể trở thành lực hút, do tương tác với các dao động của mạng tinh thể. Khi nhiệt độ của kim loại là đủ thấp, thấp hơn nhiệt độ tới hạn T_c , các electron có động lượng đối song và spin đối song có thể tạo thành các cặp, gọi là cặp Cooper (Cooper pair). Nhờ việc tạo thành cặp Cooper, năng lượng của mỗi electron giảm đi một lượng bằng D so với năng lượng $\frac{p^2}{2m_e}$ của electron chuyển động tự do trong kim loại, với p là động

lượng và m_e là khối lượng của electron. Các cặp Cooper có thể di chuyển không chịu bất kì cản trở nào, và kim loại trở thành chất siêu dẫn.

Tuy nhiên, ngay cả khi nhiệt độ thấp hơn T_c , tính siêu dẫn vẫn có thể bị phá hủy nếu chất siêu dẫn chịu tác dụng của từ trường ngoài. Trong bài toán này, em sẽ tính toán xem cặp Cooper có thể bị phá hủy như thế nào khi có mặt từ trường ngoài thông qua hai hiệu ứng sau.

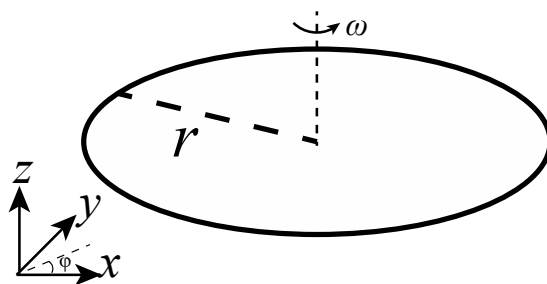
Đầu tiên là hiệu ứng thuận từ, trong đó, tất cả các electron có thể giảm năng lượng của chúng bằng việc sắp xếp các momen từ electron theo phương song song với từ trường ngoài, thay vì ở dạng cặp Cooper ứng với các spin đối song.

Thứ hai là hiệu ứng nghịch từ, trong đó, một từ trường mạnh dần lên sẽ làm thay đổi chuyển động quỹ đạo của các cặp Cooper và làm tăng năng lượng của chúng. Khi từ ngoài đặt vào mạnh hơn một giá trị ngưỡng B_c , thì độ tăng năng lượng lớn hơn 2Δ . Kết quả là các electron không tạo các thành cặp Cooper nữa.

Gần đây, một loại chất siêu dẫn có tên gọi siêu dẫn Ising đã được tìm ra. Các chất siêu dẫn này có thể tồn tại ngay cả khi đặt trong từ trường ngoài có cường độ lớn cỡ 60 Tesla, là từ trường lớn nhất có thể tạo được ở trong phòng thí nghiệm. Em sẽ tính toán xem tại sao chất siêu dẫn Ising có thể vượt qua cả các hiệu ứng thuận từ và nghịch từ của từ trường.

A. Electron trong từ trường

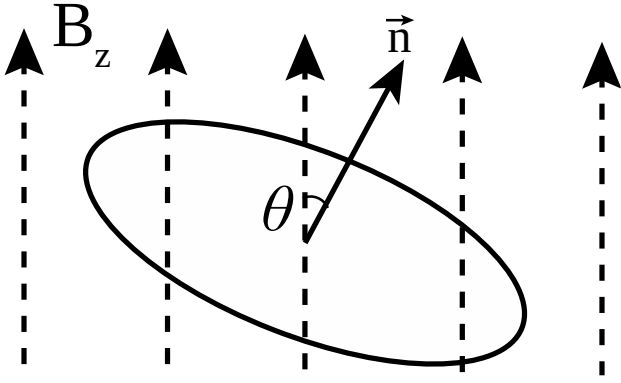
Xét một cái vòng bán kính r , có điện tích $-e$ và khối lượng m . Khối lượng và điện tích phân bố đều trên vòng (xem Hình 1).



Hình 1

A1	Hãy xác định momen động lượng $\vec{L}$ (độ lớn và hướng) của vòng nếu vòng quay với vận tốc góc $\vec{\omega}$?	2 điểm
A2	Độ lớn của momen từ được định nghĩa là $ \vec{M} = IA$, với I là cường độ dòng điện và A là diện tích giới hạn bởi vòng. Tìm mối quan hệ giữa momen từ $\vec{M}$ và momen động lượng $\vec{L}$ của vòng?	2 điểm

Pháp tuyến của vòng là $\vec{n}$ và nó tạo góc θ so với phương từ trường ngoài như trên Hình 2.

A3	Với vòng được mô tả như ở Phần (A1), hãy tìm thế năng U của vòng khi vòng đặt trong từ trường đều B_z hướng theo trục z? Em nên lấy thế năng bằng không ứng với $\theta = \pi/2$.  Hình 2	2 điểm
----	---	--------

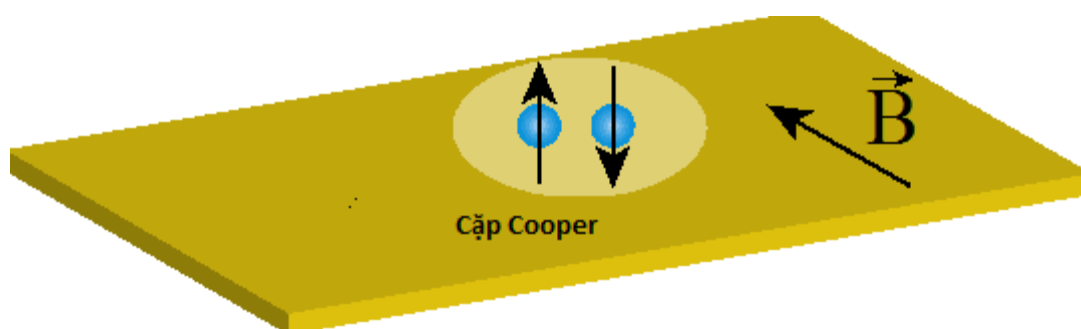
A4	Electron có momen động lượng riêng được gọi là spin. Ta biết rằng độ lớn của spin theo một phương phân biệt là $\frac{\hbar}{2}$, với $\hbar = h / 2\pi$ và h là hằng số Planck. Hãy tìm thế năng U_{up} và U_{down} tương ứng là thế năng của electron có spin song song cùng chiều và có spin song song ngược chiều với từ trường ngoài? Hãy biểu thị các kết quả tìm được qua manheton Bohr $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 5.788 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{T}^{-1}$ và cảm ứng từ B.	1 điểm
A5	Theo cơ học lượng tử, thế năng $\tilde{U}_{\text{up}}$ và $\tilde{U}_{\text{down}}$ là gấp đôi giá trị U_{up} và U_{down} tìm được trong Phần (A4). Giả thiết từ trường ngoài là 1 Tesla. Hãy tìm thế năng $\tilde{U}_{\text{up}}$ và $\tilde{U}_{\text{down}}$ của electron ứng với trường hợp có spin song song cùng chiều và spin song song ngược chiều với từ trường ngoài? Trong các phần tiếp theo của bài toán này, em cần dùng các biểu thức $\tilde{U}_{\text{up}}$ and $\tilde{U}_{\text{down}}$ cho các tính toán.	1 điểm

B. Hiệu ứng thuận từ của từ trường lên các cặp Cooper

Trong câu hỏi dưới đây, ta xét hiệu ứng thuận từ gây bởi từ trường ngoài tác động lên các cặp Cooper (xem Hình 3).

Các nghiên cứu lý thuyết cho thấy trong các chất siêu dẫn, hai electron có spin đối song có thể tạo thành cặp Cooper để giảm năng lượng của hệ. Năng lượng của một cặp

Cooper có thể được tính qua biểu thức $\frac{p_1^2}{2m_e} + \frac{p_2^2}{2m_e} - 2\Delta$, ở đây hai số hạng đầu liên quan đến động năng của cặp Cooper và số hạng cuối liên quan đến năng lượng giảm đi do hai electron tạo thành cặp Cooper. Ở đây, Δ là hằng số dương.



Hình 3

B1	Giả thiết từ trường ngoài chỉ tác động lên spin của các electron, mà không làm ảnh hưởng đến chuyển động quỹ đạo của chúng. Hãy xác định năng lượng E_s của cặp Cooper trong từ trường đều $\vec{B} = (B_x, 0, 0)$? Nhớ rằng hai electron trong cặp Cooper phải có spin đối song.	1 điểm
B2	Ở trạng thái thường (không phải trạng thái siêu dẫn), các electron không tạo thành cặp Cooper. Hãy xác định năng lượng nhỏ nhất E_N của hai electron trong từ trường đều $\vec{B} = (B_x, 0, 0)$ có hướng theo trục x ? Hãy sử dụng $\tilde{U}_{\text{up}}$ and $\tilde{U}_{\text{down}}$ được định nghĩa ở Phần (A5) trong tính toán của em và bỏ qua tác động của từ trường đến chuyển động quỹ đạo của electron.	1 điểm
B3	Ở nhiệt độ 0 K, hệ sẽ ở trạng thái có năng lượng thấp nhất. Hãy tìm giá trị tới hạn B_p theo Δ , để khi $ \vec{B} > B_p$ thì tính siêu dẫn bị mất đi?	1 điểm

C. Hiệu ứng nghịch từ của từ trường lên các cặp Cooper

Trong câu hỏi dưới đây, ta bỏ qua tác động của từ trường ngoài đến spin của electron và chỉ quan tâm đến tác động của từ trường ngoài đến chuyển động quỹ đạo của cặp Cooper.

Ở nhiệt độ 0 K, hiệu năng lượng giữa trạng thái siêu dẫn và trạng thái thường trong từ trường $\vec{B} = (0, 0, B_z)$ là

$$F = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi \left(-\alpha \psi - \frac{\hbar^2}{4m_e} \frac{d^2 \psi}{dx^2} + \frac{e^2 B_z^2 x^2}{m_e} \psi \right) dx$$

Ở đây $\psi(x)$ là hàm của tọa độ x và không phụ thuộc vào y . $\psi^2(x)$ là xác suất tìm thấy cặp Cooper ở lân cận x . Ở đây, $\alpha > 0$ là một hằng số, và nó liên quan đến phần năng lượng giảm đi do tạo thành cặp Cooper. Số hạng thứ hai và thứ ba trong biểu thức của F liên quan đến động năng của cặp Cooper có tính đến tác dụng của từ trường.

Ở không độ tuyệt đối, hệ có xu hướng cực tiểu hóa năng lượng F của nó. Trong trường hợp này, $\psi(x)$ có dạng $\psi(x) = \left(\frac{2\lambda}{\pi} \right)^{\frac{1}{4}} e^{-\lambda x^2}$, với $\lambda > 0$.

C1	Hãy tính F theo e, B_z, và $\hbar$. Cho biết các tích phân sau $\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ax^2} dx = \sqrt{\frac{\pi}{a}}, \quad \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 e^{-ax^2} dx = \frac{1}{2a} \sqrt{\frac{\pi}{a}}.$ với a là một hằng số.	3 điểm
C2	Hãy xác định giá trị tới hạn B_z theo α, mà ở đó tính siêu dẫn không còn nữa.	2 điểm

D Chất siêu dẫn Ising

Trong những chất có tương tác spin-quỹ đạo, một electron với động lượng $\vec{p}$ chịu tác dụng của một từ trường nội tại $\vec{B}_{\perp} = (0, 0, -B_z)$. Ngược lại, một electron với động lượng $-\vec{p}$ chịu tác dụng của một từ trường ngược lại $\vec{B}_{\perp} = (0, 0, B_z)$. Những từ trường nội tại này chỉ tác dụng lên spin của electron như thấy trên Hình 4.. Những chất siêu dẫn trong đó có từ trường nội tại như vậy được gọi là chất siêu dẫn Ising.



Cooper pair

Hình 4: Hai electron tạo thành một cặp Cooper. Electron 1 với momen động lượng $\vec{p}$ chịu tác dụng của từ trường nội tại $\vec{B}_{1\perp} = (0, 0, -B_z)$, nhưng electron 2 với momen động lượng $-\vec{p}$ chịu tác dụng của từ trường nội tại ngược chiều $\vec{B}_{2\perp} = (0, 0, B_z)$. Các từ trường nội tại được biểu diễn bằng các mũi tên đứt nét.

D1	Hãy xác định năng lượng E_I của một cặp Cooper trong chất siêu dẫn Ising?	1 điểm
D2	Ở trạng thái thường của vật liệu có tương tác spin-quỹ đạo, hãy tính năng lượng $E_{ }$ của hai electron chịu tác dụng của một từ trường đều nằm trong mặt phẳng $\vec{B}_{ } = (B_x, 0, 0)$? (Ở đây, từ trường nội tại vẫn tồn tại và vuông góc với $\vec{B}_{ }$. Em cần bỏ qua tác dụng của từ trường trong mặt phẳng lên chuyển động quỹ đạo của các cặp Cooper)	2 điểm
D3	Hãy xác định giá trị tới hạn B_I sao cho khi $ \vec{B}_{ } > B_I$, thì $E_{ } < E_I$?	1 điểm

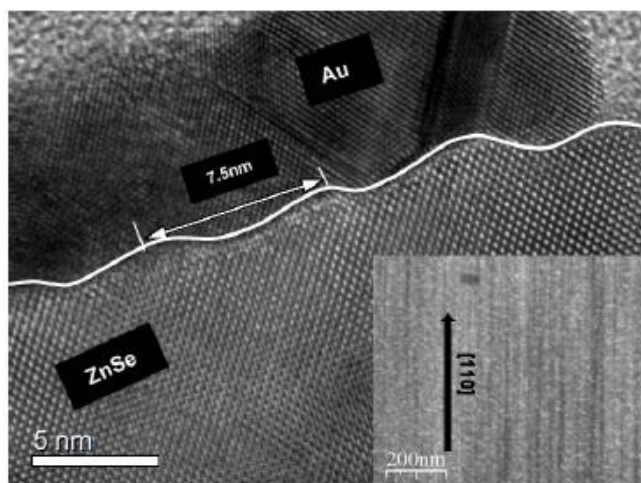
Bài thí nghiệm – E1

Nhiều xạ quang học do phản xạ từ các cấu trúc một chiều

(Tổng điểm: 12)

Mở đầu

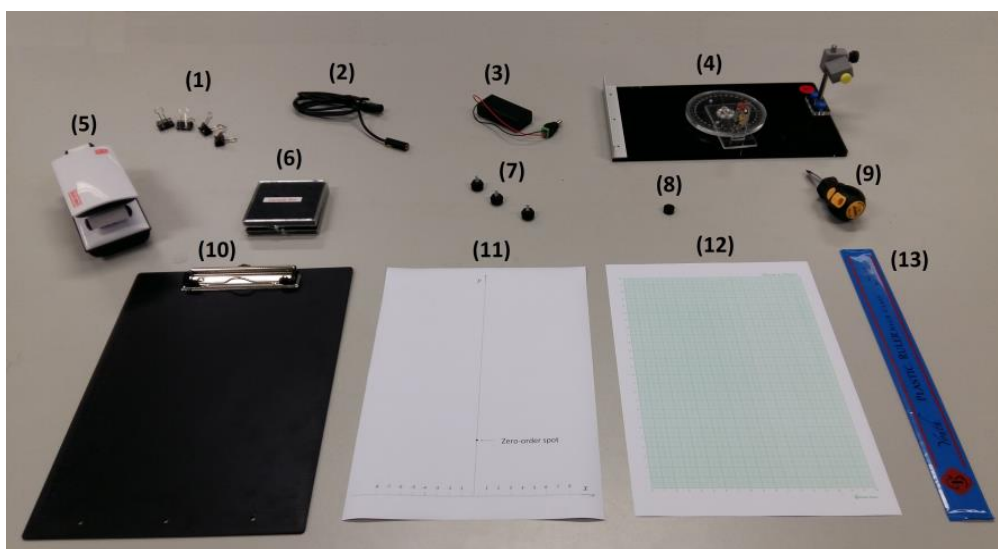
Thí nghiệm này dựa trên một phát hiện gần đây về hiện tượng nhiễu xạ electron năng lượng cao phản xạ tại bề mặt mẫu kẽm selenua (ZnSe) có cấu trúc nano, được chế tạo để không chỉ có những mấp mô không đều theo một chiều (1D) với kích thước nano, mà còn có cấu trúc tuần hoàn của các lớp nguyên tử trong tinh thể theo phương của cấu trúc nano 1D. (*Nanotechnology*, 20 (21), 215607 (2009)). Hình 1 cho thấy ảnh cắt ngang của bề mặt cấu trúc nano ZnSe phủ một lớp Au, hình chèn là ảnh bề mặt khi không có lớp Au.



Hình 1: Mặt cắt ngang của bề mặt cấu trúc nano ZnSe phủ một lớp Au, hình chèn là ảnh bề mặt khi không có lớp Au.

Mục đích

Trong thí nghiệm này, ta sẽ khám phá sự tương tự quang học của hiện tượng trên ở các mẫu có cấu trúc 1D với kích thước micromet.



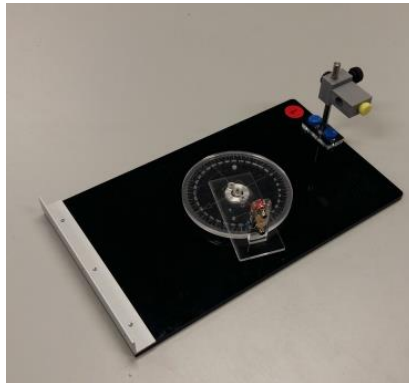
Thiết bị và dụng cụ thí nghiệm

[1]	Kẹp giấy
[2]	Điốt laze
[3]	Hộp pin có công tắc (On/Off)
[4]	Bệ quang học với đĩa quay có thước đo góc và giá để gắn điốt laze
[5]	Đèn LED
[6]	Hộp chứa 5 mẫu đo (đánh số từ 1 đến 5)
[7]	3 vít dùng cho bảng quan sát
[8]	Nắp có lỗ (Pinhole)
[9]	Tuốc nơ vít
[10]	Bảng quan sát
[11]	Giấy tọa độ
[12]	Giấy vẽ đồ thị
[13]	Thước 30 cm

Ảnh các thiết bị và dụng cụ chủ yếu



Hình 3: Bảng quan sát



Hình 4: Bệ quang học với đĩa quay có thước đo góc và giá để gắn điốt laze



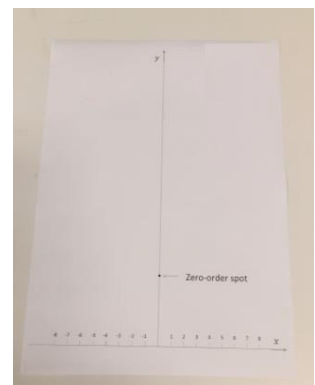
Hình 5: Nắp có lỗ (Pinhole)



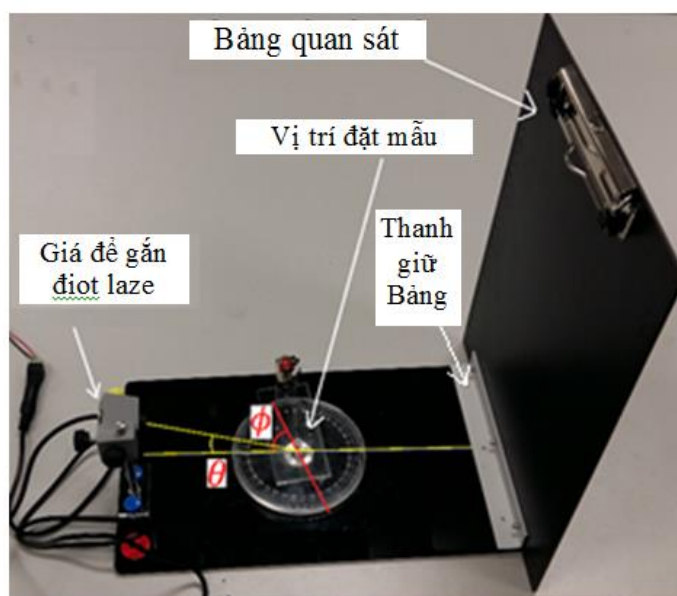
Hình 6: Điốt laze 0.5 mW, bước sóng 650 nm (Loại II).



Hình 7: Hộp chứa 5 mẫu đo (đánh số từ 1 đến 5)



Hình 8: Giấy tọa độ



Hình 9: Bố trí thí nghiệm: bảng quan sát, mẫu được khảo sát, bộ quang học với đĩa quay và diot laze được bố trí như trên hình. Góc ϕ là góc quay mẫu. Góc θ là góc tới của tia laze tạo với bề mặt của mẫu.

Ghi chú thêm cho các linh kiện trong hộp mẫu

- Tất cả các mẫu được sử dụng trong thí nghiệm này đều là hình vuông với kích thước 1,5 cm $\times$ 1,5 cm, và được đánh số từ 1 đến 5 ở mặt bên.
- Tất cả các đế mẫu có kích thước 2,0 cm $\times$ 2,0 cm, trên mỗi đế có một điểm mốc được đánh dấu bằng hình tam giác khắc ở gần giữa của một cạnh.
- Trước khi đặt mẫu vào tâm của đĩa quay, em cần đặt đầu nhọn của mũi tên trên đĩa quay trùng với vạch 0° trên thước đo góc. Khi đặt mẫu, cần đặt vào đúng hình vuông ở trên mặt đĩa quay. Vị trí mẫu với $\phi = 0^\circ$ (chỉ áp dụng cho mẫu 2 đến 5) là vị trí mà điểm mốc quay về vạch 0° ở thước đo góc.

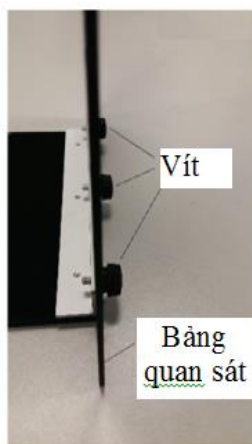
Mẫu	Mô tả các mẫu
1	Gương phẳng.
2	Một tấm bằng thép có khắc các rãnh thẳng song song với hai cạnh và khoảng cách giữa các rãnh không đồng đều.
3	Một cách tử đều với khoảng cách giữa hai rãnh cạnh nhau bằng a , với a là hằng số cách tử.
4	Giống mẫu 2, nhưng các rãnh không cách đều nhau nằm dọc theo phương lập góc ϕ^* với đường nối vạch 0° và vạch 180° trên thước đo góc của đĩa quay.
5	Một tấm bằng thép trên đó có hai hệ rãnh vuông góc với nhau. Một hệ gồm các rãnh thẳng cách đều nhau một khoảng b . Một hệ gồm các rãnh thẳng song song không cách đều nhau.

Chú ý an toàn và lời khuyên chung

1. **Cảnh báo: Không được nhìn trực tiếp vào chùm laze!!**
2. Tắt diot laze khi không sử dụng để không làm cạn pin.
3. Luôn giữ mẫu hướng lên trên. Tránh chạm vào bề mặt của mẫu.
4. Khi di chuyển mẫu, hãy cầm vào các cạnh của mẫu.

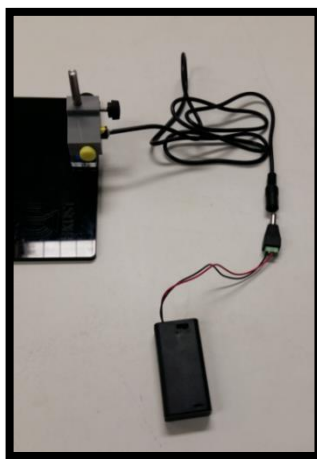
Điều chỉnh ban đầu

1. Lắp đặt thí nghiệm như ở Hình 9. Bảng quan sát được cố định vào bộ quang học bằng ba cái vít, như thấy ở Hình 10.



Hình 10: Bảng quan sát được cố định vào bộ quang học nhờ ba cái vít.

2. Lắp diot laze vào giá đỡ. [*chú ý: đừng vặn quá chặt cái vít màu vàng, vì có thể làm hỏng diot laze*].
3. Mắc diot laze với hộp pin như trên Hình 11.



Hình 11: Diot laze được mắc với hộp pin

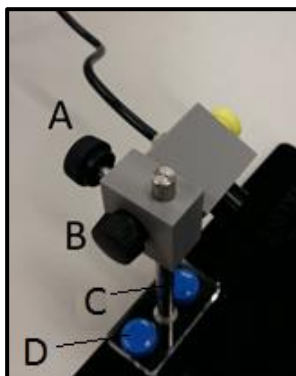
4. Đính một mảnh giấy vào bảng để quan sát chùm sáng phát ra bởi diot laze, sau đó điều chỉnh độ mở của diot laze bằng cách dùng tuốc nơ vít xoay rãnh ở đầu laze, để có được một chùm có đường kính khoảng 1 mm.
5. Lắp diot laze vào giá đỡ sao cho đầu của nó thò ra khoảng 5 đến 10 mm.

6. Lắp nắp có lỗ (pinhole) vào đầu điốt laser như trên Hình 12, để thu nhỏ hơn nữa kích thước của chùm tia.



Hình 12: Điốt laser đã lắp nắp có lỗ.

7. Thí nghiệm này đòi hỏi phương chiếu ngang của chùm tia laser phải trùng với đường thẳng nối vạch 0° và vạch 180° trên thước đo góc, và chùm laser phải chiếu vào giữa bề mặt mẫu. Có thể thực hiện điều này bằng cách điều chỉnh vị trí và góc nghiêng của giá đỡ điốt laser bằng các vít như thấy trên Hình 13.



Hình 13: Vị trí và góc nghiêng của giá đỡ điốt laser có thể được điều chỉnh nhờ các vít có dán nhãn. Vít 'A' cho phép thay đổi chiều cao của chùm tia laser. Vít 'B' cho phép thay đổi độ nghiêng của chùm tia laser. Vít 'C' và 'D' cho phép điều chỉnh giá đỡ điốt laser theo chiều ngang.

Thí nghiệm

Phần A: Lắp đặt và điều chỉnh bộ thí nghiệm

Lắp bộ thí nghiệm như ở Hình 9. Chú ý rằng màn quan sát cách tâm đĩa quay một khoảng D cố định là 15 cm. Đặt Mẫu 1 tại tâm của đĩa quay như mô tả trong mục *Ghi chú thêm cho các linh kiện trong hộp mẫu* (xem trang 3). Gắn tờ Giấy tọa độ vào bảng quan sát, sao cho trục x trùng đúng với mép trên cùng của thanh giữ bảng quan sát. (Muốn vậy, em có thể gấp phần giấy ở dưới trục x về phía sau). Trục x được xác định như vậy vì bộ thí nghiệm được thiết kế sao cho bề mặt của các mẫu khi đặt trên đĩa quay đồng phẳng với mép trên của thanh giữ bảng. Ngoài ra, góc của trục x phải được đặt thẳng với vạch 180° trên thước đo góc. Trong thí nghiệm này, góc tới θ của chùm tia laser được giữ cố định ở một giá trị xác định. Điều chỉnh chiều cao và góc

ngiêng của diot laze để chùm laze chiếu vào điểm giữa của Mẫu 1, lúc này vệt sáng của chùm laze phản xạ trùng với điểm bậc không (zero-order spot) được ghi trên Giấy tọa độ.

Nhiệm vụ		Điểm
A1	Hãy đo độ cao của “zero-order spot” h , tính từ gốc trục x . Hãy xác định góc tới θ của chùm tia laze theo D và h . Hãy viết vào phiếu làm bài giá trị h tính bằng cm và θ tính bằng độ, lấy đến ba chữ số có nghĩa.	0.6

Phần B: Hình ảnh nhiễu xạ của mẫu 2

Thay Mẫu 1 bằng Mẫu 2. Đặt mẫu sao cho điểm mốc quay về đúng phía vạch 0° , lúc này phương của các rãnh không cách đều nhau trên Mẫu 2 song song với phương hình chiếu ngang của chùm laze. Góc quay ϕ của mẫu có thể được thay đổi bằng việc xoay đĩa quay và đọc trên thước đo góc.

Gắn tờ giấy vẽ đồ thị vào bảng quan sát. Hãy chắc chắn là trục dưới của tờ giấy vẽ trùng với mép trên của thanh giữ bảng quan sát. (Điều này có thể thực hiện bằng cách gấp phần giấy dưới trục này ra phía sau). Ngoài ra, gốc của trục x phải được đặt thẳng với vạch 180° trên thước đo góc.

Nhiệm vụ		Điểm
B1	Vẽ lại hình ảnh nhiễu xạ trên hiện giấy vẽ đồ thị ứng với các góc $\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ và 90° trên đĩa quay, và viết góc quay ϕ tương ứng vào bên cạnh mỗi đường. Viết kí hiệu “# 2” tại đỉnh trên của giấy vẽ.	0.8

Phần C: Hình ảnh nhiễu xạ của Mẫu 3

Các thí nghiệm trong nhiệm vụ này và các nhiệm vụ sau sẽ giúp em hiểu vật lí của những hình ảnh nhiễu xạ quan sát được ở Nhiệm vụ (B1). Lấy Mẫu 2 ra khỏi đĩa quay và thay nó bằng Mẫu 3 sao cho điểm mốc quay về đúng phía vạch 0° . Với vị trí ban đầu của Mẫu 3 (ứng với $\phi = 0^\circ$), thì hướng của các vạch cách tử song song với hình chiếu theo phương ngang của chùm laze.

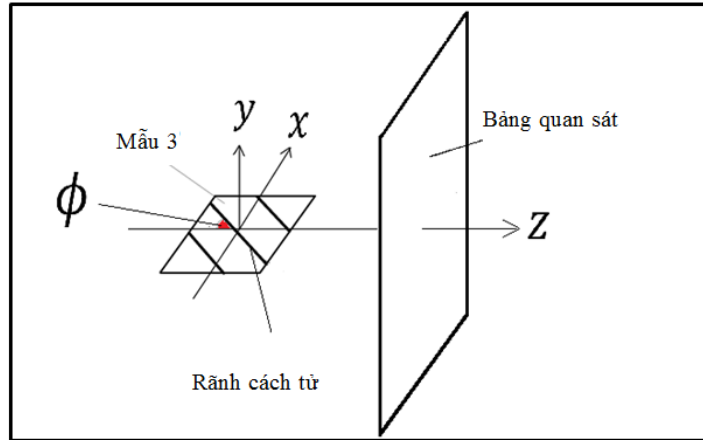
Gắn tờ giấy vẽ đồ thị vào bảng quan sát. Hãy chắc chắn là trục dưới của tờ giấy vẽ trùng với mép trên của thanh giữ bảng quan sát, như được mô tả trong phần (B). Ngoài ra, gốc của trục x phải được đặt thẳng với vạch 180° trên thước đo góc.

Nhiệm vụ		Điểm
C1	Đánh dấu tâm của các điểm nhiễu xạ của Mẫu 3 ứng với $\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ và 90° trên giấy vẽ và viết các góc quay ϕ tương ứng vào bên cạnh mỗi hình. Viết kí hiệu “# 3” tại đầu phía trên tờ giấy vẽ.	0.8

Sau khi kết thúc các Nhiệm vụ (B1) và (C1), em có thể nhận thấy rằng hình ảnh nhiễu xạ do phản xạ thu được với Mẫu 2 là liên tục, còn với Mẫu 3 thì rời rạc. Điều này là do khoảng cách giữa các rãnh của Mẫu 2 là không đều. Nó giống như một cách tử mà hằng số cách tử có nhiều giá trị khác nhau. Do đó, hình ảnh nhiễu xạ có dáng điệu giống như hình ảnh thu được từ cách tử đều đặn thông thường (giống mẫu 3), tuy nhiên các điểm nhiễu xạ bị mở rộng và tạo nên hình ảnh nhiễu xạ liên tục.

Part D: Lí thuyết của hình ảnh nhiễu xạ do phản xạ của Mẫu 3

Nguồn gốc của hình ảnh nhiễu xạ do phản xạ thu được với cách tử thông thường như Mẫu 3 có thể hiểu được bằng quang hình học. Trong thí nghiệm này, ta dùng hệ tọa độ x - y - z với gốc đặt tại điểm giữa của mẫu như thấy trên Hình 14.



Hình 14: Hệ tọa độ x - y - z được dùng trong nhiệm vụ này, với ϕ là góc quay của mẫu, và bảng quan sát vuông góc với trục z .

Dùng quang hình học, ta có thể tìm được phương trình cho hình ảnh nhiễu xạ do phản xạ của Mẫu 3,

$$y^2 = \frac{(D \cos \phi + x \sin \phi)^2}{\cos^2 \theta \cos^2 \phi} - x^2 - D^2 \quad (1)$$

$$x = \frac{Dm\lambda \cos \phi}{a \cos \theta - m\lambda \sin \phi} \quad (2)$$

ở đây λ là bước sóng của chùm laze tới và m là bậc nhiễu xạ. Ta có thể dự đoán được rằng tọa độ x và y của các điểm nhiễu xạ là hàm của góc ϕ bằng cách dùng các phương trình (1) và (2) (người ta có thể chứng minh được rằng các phương trình này phù hợp với hình ảnh nhiễu xạ thu được ở Nhiệm vụ (C1)).

Dựa trên các phương trình (1) và (2), các điểm nhiễu xạ $\phi = 90^\circ$ phải nằm trên trục y tại $x = 0$ với các giá trị của tọa độ y được cho bởi phương trình sau:

$$y = D \sqrt{\frac{a^2}{(a \cos \theta - m\lambda)^2} - 1} \quad (3)$$

Nhiệm vụ		Điểm
D1	Phương trình (3) có thể sắp xếp lại để thu được phương trình bậc hai cho hằng số cách tử a của Mẫu 3 như sau $Aa^2 + Ba + C = 0. \quad (4)$ Hãy tìm biểu thức cho A, B và C. Viết kết quả vào bảng tương ứng trong phiếu trả lời.	0.9
D2	Giải phương trình bậc hai và sử dụng các giá trị y của các điểm nhiễu xạ với Mẫu 3 khi $\phi = 90^\circ$ (xem Nhiệm vụ (C1)), cùng với các giá trị đã biết D, θ và λ, hãy xác định hằng số cách tử a của Mẫu 3 tính ra mét với ba chữ số có nghĩa, cho từng bậc nhiễu xạ từ bậc một ($m = 1$) đến bậc sáu ($m = 6$) [Gợi ý: Các bậc này ứng với 6 điểm ở phía trên điểm bậc không]. Viết kết quả vào bảng tương ứng trong phiếu trả lời.	1.8

D3	Tính giá trị trung bình và sai số chuẩn của giá trị trung bình của hằng số cách từ a ra mét với ba chữ số có nghĩa. Viết kết quả vào bảng tương ứng trong phiếu trả lời.	0.8
-----------	--	------------

Part E: Xác định góc chưa biết ϕ^* cho Mẫu 4

Thay Mẫu 3 bằng Mẫu 4. Đặt mẫu sao cho điểm mốc trên bề đồ mẫu quay về đúng phía vạch 0° . Khi đặt Mẫu 4 trên đĩa quay, cạnh của đế mẫu có chứa điểm mốc phải vuông góc với chùm laze.

Gắn tờ giấy vẽ đồ thị vào bảng quan sát. Hãy chắc chắn là trục dưới của tờ giấy vẽ trùng với mép trên của thanh giữ bảng quan sát. (Điều này có thể thực hiện bằng cách gấp phần giấy ở phía dưới trục này ra đằng sau). Ngoài ra, gốc của trục x phải được đặt thẳng với vạch 180° trên thước đo góc.

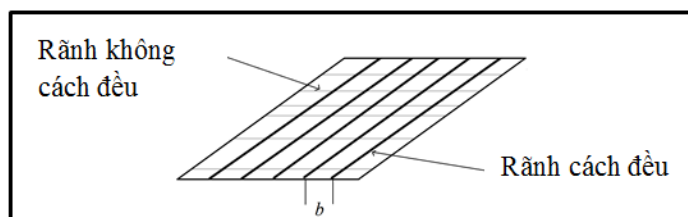
Nhiệm vụ		Điểm
E1	Đọc theo đường cong nhiễu xạ liên tục của Mẫu 4 ghi được trên giấy vẽ đồ thị, hãy đo tọa độ y tính theo cm của mười điểm, bắt đầu từ $x = -1.0$ cm đến 3.5 cm, với bước thay đổi 0.5 cm. Ghi kết quả vào bảng tương ứng trong phiếu trả lời.	0.6
E2	Dựa trên phương trình (1) đã cho ở Nhiệm vụ (D), hãy xây dựng một phương trình tuyến tính có dạng $M(y, x, D, \theta) = I(D) + S(\phi^*)x. \quad (5)$ Hãy xác định biểu thức của $M(y, x, D, \theta)$, $I(D)$ và $S(\phi^*)$. Vẽ đồ thị của M theo x , dựa trên số liệu có được ở E1. Từ đồ thị, hãy xác định góc ϕ^* chưa biết, tính ra độ. Viết tất cả biểu thức và giá trị của ϕ^* vào bảng tương ứng trong phiếu trả lời.	1.6

Part F: Hình ảnh nhiễu xạ của Mẫu 5

Thay Mẫu 4 bằng Mẫu 5. Đặt mẫu sao cho điểm mốc trên bề đồ mẫu quay về đúng phía vạch 0° . Dạng hình học bề mặt Mẫu 5 được cho trên Hình 15. Với vị trí ban đầu của Mẫu 5, các rãnh không cách đều nhau thì có phương song song với hình chiếu trên mặt phẳng ngang của chùm laze.

Gắn tờ giấy vẽ đồ thị vào bảng quan sát. Hãy chắc chắn là trục dưới của tờ giấy vẽ trùng với mép trên của thanh giữ bảng quan sát. (Điều này có thể thực hiện bằng cách gấp phần giấy ở phía dưới trục này ra đằng sau). Ngoài ra, gốc của trục x phải được đặt thẳng với vạch 180° trên thước đo góc.

Hãy chắc chắn là trục bên dưới của tờ giấy vẽ là trùng khớp với mép trên của thanh gá ngang của bảng quan sát (Điều này có thể thực hiện bởi việc gấp mép dưới một phần tờ giấy vẽ về phía sau). Ngoài ra gốc của trục x phải được căn theo vị trí đánh dấu 180° trên thước đo góc



Hình 15: Cấu trúc của Mẫu 5, trong đó có các rãnh không cách đều và các rãnh cách đều nhau. Khoảng cách giữa các rãnh cách đều nhau là b .

Nhiệm vụ		Điểm
F1	Vẽ lại các hình ảnh nhiễu xạ mà em thấy, ứng với $\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ và 90° trên các tờ giấy vẽ đồ thị khác nhau, mỗi tờ ứng với một giá trị ϕ . Đỉnh trên cùng mỗi tờ giấy ghi kí hiệu ‘#5’ và giá trị ϕ tương ứng. Em có thể thấy nhiều hơn 10 bậc nhiễu xạ. Tuy nhiên, chỉ cần vẽ ba bậc sáng nhất trên mỗi tờ giấy.	0.8

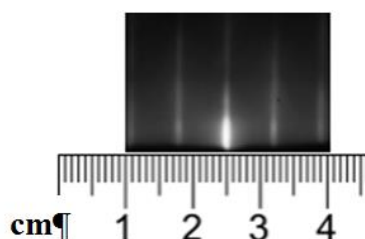
Cấu trúc của mẫu 5 có thể coi như là tổ hợp của Mẫu 2 và Mẫu 3, với các rãnh cách đều vuông góc với các rãnh không cách đều. Đây là sự tương tự về mặt quang học với cách tử nano đã được mô tả trong phần mở đầu.

Nhiệm vụ		Điểm
F2	Với hiểu biết đó, hãy xác định khoảng cách b của rãnh cách đều của Mẫu 5 tính ra mét, bằng cách dùng hình ảnh nhiễu xạ ứng với $\phi = 0^\circ$ có được từ Nhiệm vụ (F1). Ghi giá trị của b vào phiếu trả lời. [Chú ý rằng khi tính giá trị của b , em chỉ cần thực hiện tính bằng số liệu ứng với bậc nhiễu xạ đầu tiên và giá trị ước tính của b cần được làm tròn đến ba chữ số có nghĩa.]	1.6

Part G: Xác định khoảng cách giữa các mặt phẳng mạng của ZnSe

Như đã nêu ra trong phần mở đầu, hiện tượng nêu trên được phát hiện đầu tiên thông qua hình ảnh nhiễu xạ điện tử năng lượng cao do phản xạ (RHEED) ở bề mặt ZnSe cấu trúc nano. Bề mặt này có các rãnh kích thước nanomet với khoảng cách không đều giữa các rãnh. Đồng thời, trong hệ này, còn có cấu trúc tuần hoàn của các lớp nguyên tử trong tinh thể, xếp theo phương vuông góc với các rãnh không đều. Hình 16 mô tả hình ảnh RHEED của bề mặt ZnSe cấu trúc nano khi chùm electron chiếu đến vuông góc với các rãnh nano không cách đều (Gợi ý: với các mặt phẳng mạng tuần hoàn, điều kiện trên ứng với $\phi = 0^\circ$)

Lưu ý rằng khoảng cách giữa các vạch trên hình này, mà ta có thể đo được nhờ thước đặt ngay bên dưới hình ảnh RHEED, thì phù hợp với hình ảnh nhiễu xạ thực quan sát được trên màn huỳnh quang (có vai trò như bảng quan sát mà ta dùng trong thí nghiệm này).



Hình 16: Hình ảnh nhiễu xạ electron năng lượng cao do phản xạ (RHEED) ở bề mặt ZnSe cấu trúc nano khi chùm electron vuông góc với các rãnh nano không cách đều.

Để nhận được hình ảnh nhiễu xạ như trên Hình 16, điện áp gia tốc cấp cho súng electron là $V = 13000$ vôn. Bước sóng λ của electron năng lượng cao chiếu tới điểm giữa bề mặt mẫu là

$$\lambda = \frac{12.247 \times 10^{-10}}{\sqrt{V(1+10^{-6}V)}} \text{ [m]}, \quad (6)$$

trong đó đã xét đến hiệu ứng tương đối tính.

Góc tới của chùm electron đến bề mặt mẫu ZnSe là $\theta \approx 0^\circ$ và khoảng cách giữa màn huỳnh quang với điểm tới của electron ở trên bề mặt vật liệu ZnSe cấu trúc nano là $D = 26$ cm.

Nhiệm vụ		Điểm
G1	Với mẫu ZnSe, dựa vào Hình 16 và các điều kiện thực nghiệm đã ghi ở trên, hãy xác định khoảng cách a^* giữa các mặt phẳng mạng của tinh thể tuần hoàn, các mặt phẳng này vuông góc với các rãnh nano không cách đều nhau. Kết quả được tính ra mét và lấy đến ba chữ số có nghĩa. Viết kết quả vào bảng tương ứng trong phiếu trả lời.	1.7

Bài thí nghiệm – E2

Dịch pha do phản xạ của kim loại

(Tổng số điểm: 8.0)

Mở đầu

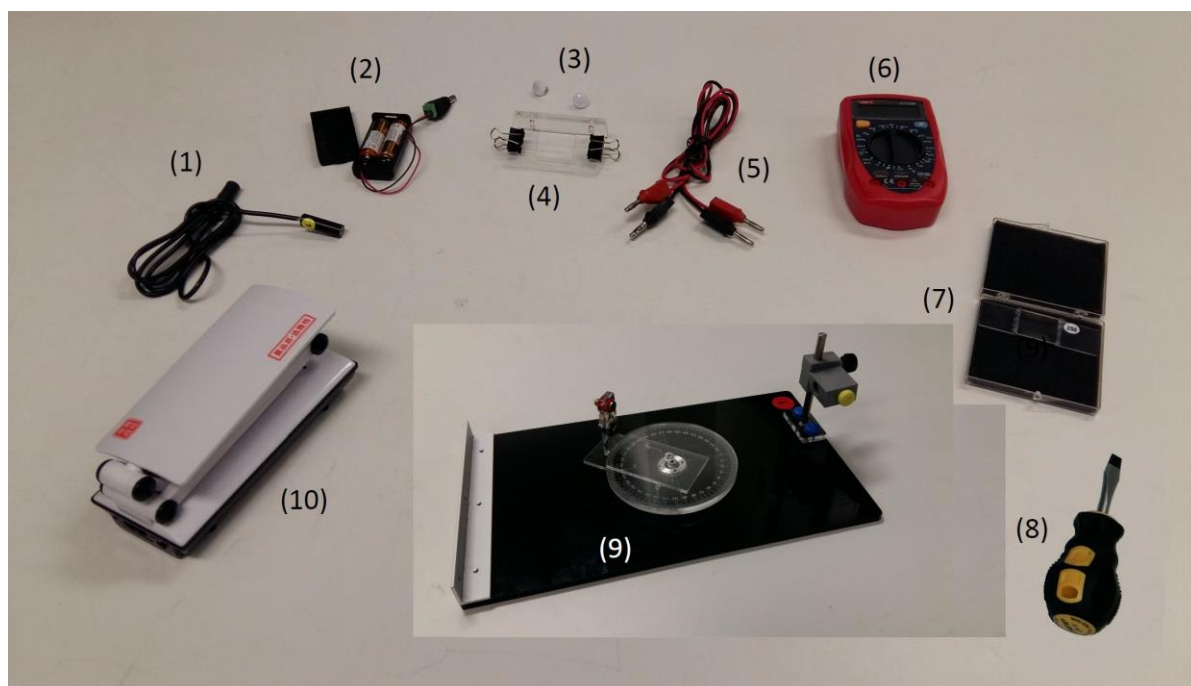
Như đã biết, các vật liệu tự nhiên có chiết suất (n) lớn hơn chiết suất của chân không ($n > n_0 = 1$). Tuy nhiên, siêu vật liệu (meta-materials) (vật liệu nhân tạo với cấu trúc nano) thể hiện những hiện tượng kì lạ, ví dụ như hiện tượng khúc xạ âm; điều này có thể giải thích bằng cách tính đến chiết suất hiệu dụng có giá trị âm. Trong trường hợp tổng quát, chiết suất của một vật liệu, ví dụ như kim loại, có thể là một số phức khi có sự hấp thụ ánh sáng.

Một phương pháp đơn giản để nghiên cứu chiết suất phức là đo độ dịch pha ϕ khi một chùm sáng bị phản xạ từ bề mặt của vật liệu. Trong quang học, độ dịch pha do phản xạ từ bề mặt rất quan trọng trong nhiều ứng dụng, đặc biệt là trong các phép đo ảnh toàn kí.

Với thủy tinh thông thường, độ dịch pha do phản xạ ϕ với chùm tới vuông góc là 180° (hay π radian). Tuy nhiên, ϕ có thể có các giá trị khác nhau đối với kim loại, tùy thuộc vào mức độ hấp thụ của kim loại. Đo pha trong quang học là một thách thức và cần tới độ chính xác cao. Nhiều phương pháp, kĩ thuật phức tạp đã được sử dụng để đo pha trong quang học. Tuy nhiên, chúng rất phức tạp đối với học sinh phổ thông. Ở đây, chúng tôi giới thiệu một phương pháp thực hiện đơn giản và rẻ tiền.

Mục tiêu

Nghiên cứu độ dịch pha của ánh sáng phản xạ ở bởi bề mặt Titan (Ti) bằng giao thoa kế laze Fabry-Perot.



Hình 1: Dụng cụ thí nghiệm

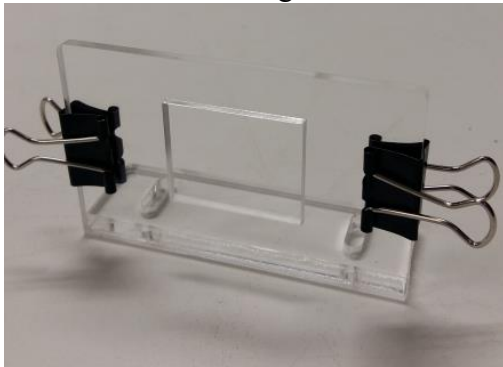
Danh sách dụng cụ

[1]	Điot laze
[2]	Bộ pin cho diot laze
[3]	Các vít màu trắng dùng cho giá giữ mẫu
[4]	Giá giữ mẫu với 2 kẹp giấy
[5]	Các dây nối điện
[6]	Đồng hồ đo điện đa năng hiện số
[7]	Hộp mẫu với một mẫu chuẩn Fabry – Perot phủ Titan (Ti) được đánh số cụ thể
[8]	Tuốc nơ vít
[9]	Bệ quang học với đĩa quay, giá giữ đầu thu (detector) có thể quay được, thước chia góc được giữ cố định, giá lắp diot laze
[10]	Đèn bàn LED

Mô tả dụng cụ



Hình 2: Điot lazer công suất 0.5 mW với bước sóng 650 nm



Hình 4: Giá giữ mẫu với hai kẹp giấy

Hình 3: Bộ pin 2×1.5V AA và dây nối với điot lazer



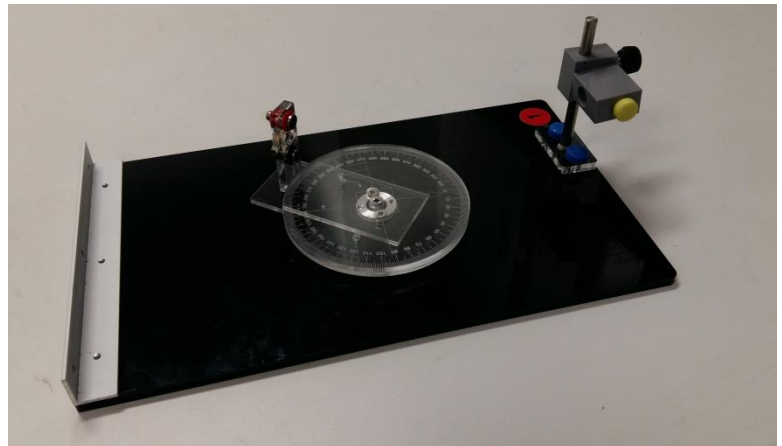
Hình 5: Đồng hồ đo điện đa năng hiện số và dây nối



Hình 6: Hộp chứa mẫu và một mẫu chuẩn Fabry-Perot (FP) phủ Titan (Ti) (số của mẫu trong hình vẽ là 250 chỉ để minh họa).



Hình 7: Tuốc nơ vít dùng để điều chỉnh kích thước của chùm lazer



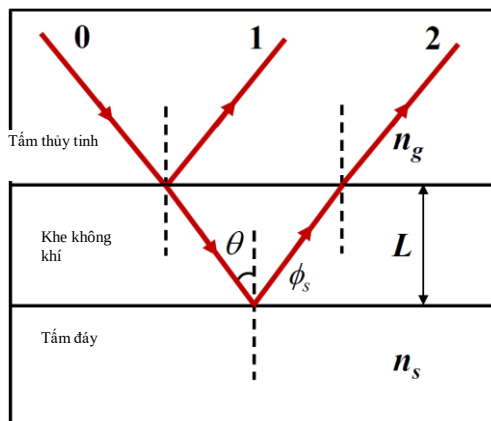
Hình 8: Bộ quang học với đĩa quay, giá giữ đầu thu (detector) có thể quay được, thước chia góc gá cố định, giá giữ lade điốt.



Hình 9: đèn LED dùng khi đọc tài liệu và viết.

Lí thuyết

Xét một mẫu chuẩn Fabry-Perot (FP) lí tưởng có khe không khí như trong Hình 10. Mẫu chuẩn gồm một tấm thủy tinh dày (với chiết suất n_g) ở phía trên, và một tấm đáy (với chiết suất n_s); giữa hai tấm này là một lớp không khí mỏng ($L \sim 5$ micromet).



Hình 10: Ánh sáng phản xạ từ mẫu chuẩn Fabry-Perot lí tưởng có khe không khí với một thủy tinh phía trên và một tấm đáy.

Ta dùng phép gần đúng giao thoa hai chùm tia để mô hình hóa mẫu chuẩn khe không khí. Một chùm ánh sáng (chùm 0) tới tấm thủy tinh phía trên, bỏ qua sự phản xạ tại mặt phân cách không khí – thủy tinh của tấm thủy tinh phía trên, một phần bị phản xạ (chùm 1) và một phần truyền qua (khúc xạ) ở mặt phân cách thủy tinh – không khí. Chùm truyền qua (khúc xạ) bị phản xạ tại mặt phân cách không khí – mẫu, sau đó truyền (khúc xạ) qua tấm thủy tinh phía trên; nó được ký hiệu là chùm số 2 trong Hình 10. Với chùm 2, sự phản xạ tại mặt phân cách không khí – mẫu sẽ có thêm độ dịch pha ϕ_s , trong khi không có bất cứ sự dịch pha nào ở các mặt phân cách

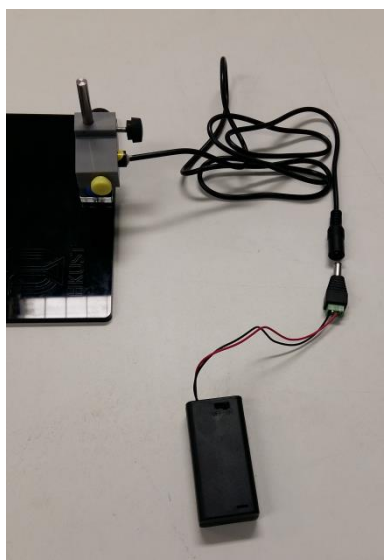
khác. Kết quả là, cường độ của ánh sáng phản xạ $I(\theta)$ ứng với góc tới θ là chồng chất của chùm 1 và chùm 2 được xác định như sau:

$$I(\theta) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(2kL \cos \theta + \phi_s), \quad (1)$$

với I_1 và I_2 , tương ứng là cường độ của chùm 1 và 2, còn $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ là số sóng và λ là bước sóng của ánh sáng tới. Phương trình (1) biểu diễn cường độ ánh sáng ở các cực đại và cực tiểu giao thoa, như là một hàm của góc tới khi bước sóng λ và độ rộng L của khe không khí là không đổi. Trong thí nghiệm này, chúng ta sẽ cố định hướng phân cực của ánh sáng tới và bỏ qua ảnh hưởng của sự phân cực khi chùm sáng phản xạ/khúc xạ tại các mặt phân cách. Thêm nữa, chúng ta dùng tấm thủy tinh có phủ lớp Titan (Ti) làm mẫu (sample) ở đáy của mẫu chuẩn FP.

Các bước chuẩn bị/căn chỉnh

1. Nếu em chọn làm thí nghiệm E1 trước, nhớ tháo bản quan sát và nắp có lỗ (pinhole) trước khi lắp ráp các dụng cụ cho thí nghiệm E2.
2. **CHÚ Ý: KHÔNG NHÌN TRỰC TIẾP VÀO ÁNH SÁNG LAZE CỦA DIOT LAZE!!**
3. Lắp diot laze vào lỗ tròn của giá giữ laze như thấy trên Hình 11. Vặn chặt laze bằng cách dùng vít màu vàng. Hãy chắc chắn rằng thân laze nằm ngang, với nhãn dán màu vàng (xem Hình 2: diot laze với nhãn màu vàng) hướng lên phía trên (để cho chùm sáng laze phân cực theo hướng thẳng đứng). [*Lưu ý: Không vặn vít màu vàng quá chặt vì sẽ làm hỏng laze!*]

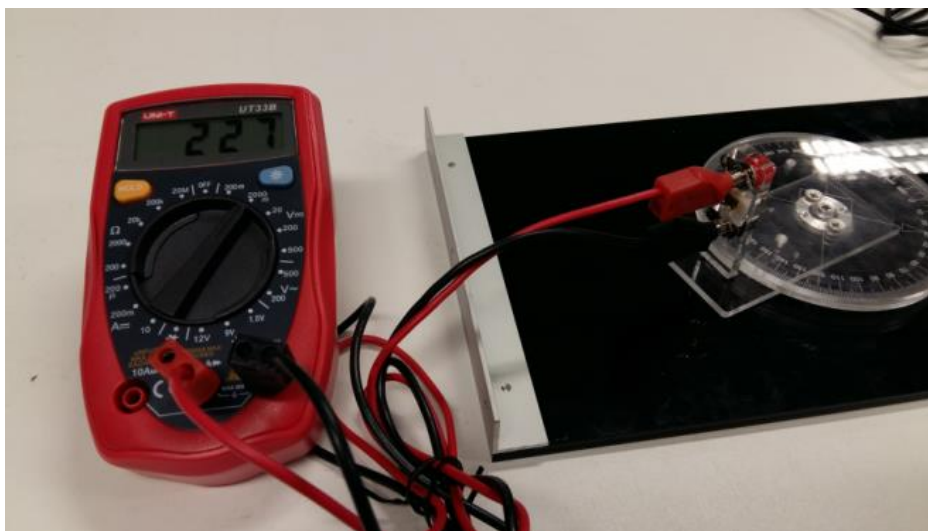


Hình 11: Diot laze gắn trên giá đỡ

4. Nối bộ pin với diot laze như ở Hình 11 và bật nguồn cho laze.
5. Kích thước tối ưu cho chùm laze là 1 mm trên màn cách laze 20 cm. Để kiểm tra kích

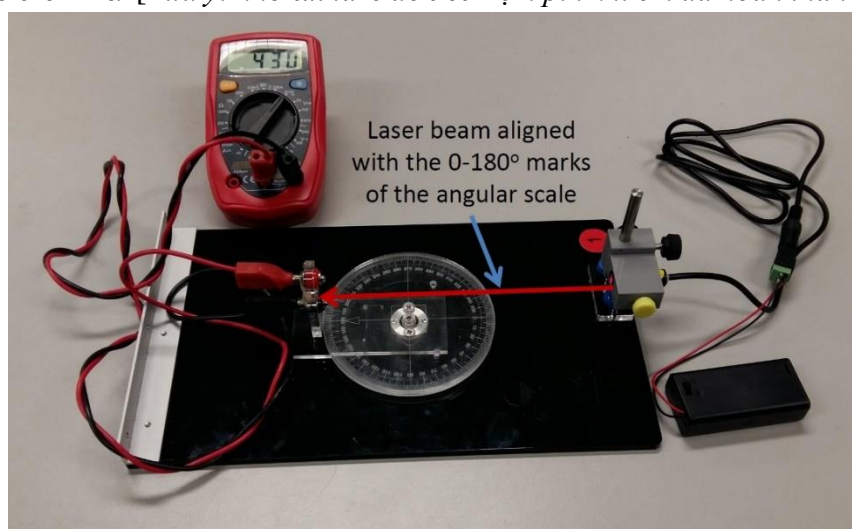
thước của chùm sáng, đặt một tờ giấy cách laser 20 cm và quan sát kích thước của chùm sáng phát ra từ laser. Nếu cần, điều chỉnh khẩu độ của diot laser bằng cách dùng tuốc nơ vít xoay rãnh ở đầu laser để thu được kích thước vết sáng 1 mm.

6. Nối đầu ra của đầu thu quang (photo-detector) đã được gắn sẵn trên giá đỡ với đồng hồ đo điện đa năng bằng các dây nối như trong Hình 12 MỘT CÁCH CẦN THẬN. Đầu thu quang là một photodiode được nối song song với một điện trở, sao cho dòng điện sinh ra bởi photodiode khi được chiếu sáng có thể được ghi lại bằng cách đo điện áp giữa hai đầu điện trở.



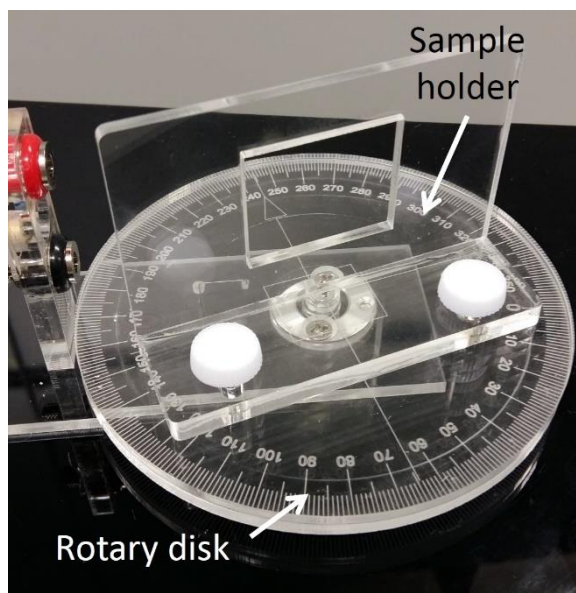
Hình 12: Đầu thu quang nối với đồng hồ đo điện đa năng

7. Điều chỉnh vị trí của diot laser sao cho chùm laser chiếu ngang phía trên vạch 0° của thước đo góc, đi ngang qua tâm của đĩa quay và đi vào đầu thu ở vị trí vạch 180° của thước đo góc (như trên Hình 13). Em có thể bật đồng hồ đo điện đa năng trong khi chỉnh, để nhận biết giá trị cường độ của chùm laser rơi vào đầu thu (thông qua điện áp), từ đó tìm điều kiện chiếu tốt nhất. [Lưu ý: nhớ tắt laser để tiết kiệm pin khi em đã hoàn thành bước này!]



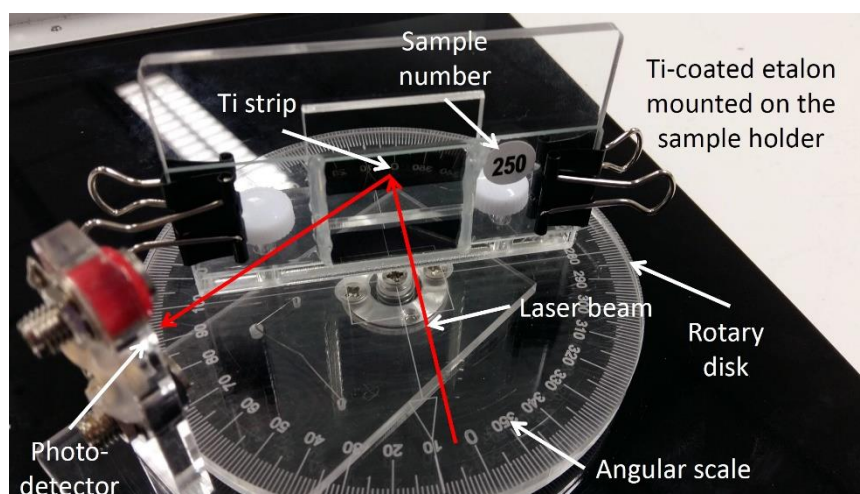
Hình 13: Chỉnh chùm laser

8. Lắp giá giữ mẫu vào đĩa quay trên bộ quang học bằng các vít màu trắng như trên Hình 14.



Hình 14: Giá giữ mẫu được gắn trên đĩa quay

9. Lắp mẫu chuẩn được phủ Ti (ví dụ # 250) thẳng đứng trên giá giữ mẫu, bằng cách dùng các kẹp giấy, sao cho tâm thủy tinh đáy của mẫu chuẩn tiếp xúc với mặt của giá giữ mẫu như thấy trên Hình 15.



Hình 15: Mẫu được lắp trên giá giữ mẫu

Ti trip: Dải Titan	Sample number: số ký hiệu mẫu	Rotary disk: Đĩa quay	Angular scale: Thước đo góc
Photodetector: Đầu thu quang	Laser beam: Chùm laze	Ti-Coated etalon mounted on the sample holder: Mẫu phủ Ti được gắn trên giá đỡ mẫu	

10. Bật diot laze và dịch chuyển mẫu chuẩn theo phương thẳng đứng sao cho chùm laze chiếu vào vùng giữa dải Ti trên hoặc dải Ti dưới của mẫu chuẩn và phản xạ vào đầu thu quang như thấy trên Hình 15. Tiếp đó, thay đổi vị trí của đầu thu quang để thu được tín hiệu lớn

nhất (ứng với điện áp đo được bởi đồng hồ đo điện đa năng). Hơn nữa, em bắt buộc phải điều chỉnh vị trí của giá giữ mẫu bằng cách dùng hai vít màu trắng, sao cho trục quay của đĩa quay nằm đúng trong mặt phẳng của tấm Ti.

11. Bây giờ, quay giá giữ mẫu đã gắn mẫu chuẩn phủ Ti sao cho chùm laze tạo một góc θ với pháp tuyến của mặt mẫu, theo thước đo góc. Sau đó, di chuyển đầu thu quang một góc 2θ và điều chỉnh vị trí góc của đầu thu quang để thu được tín hiệu lớn nhất từ đồng hồ điện đa năng. Khi hoàn thành tất cả các bước trên, hệ đã sẵn sàng để làm thí nghiệm.

Lưu ý: tất cả các giá trị bằng số và đáp án đều phải có ba chữ số có nghĩa.

Thí nghiệm

Nhiệm vụ	Mô tả	Điểm
1	Đo cường độ phản xạ với mẫu chuẩn phủ Ti, dưới dạng giá trị của điện áp ứng với góc tới θ , với các bước thay đổi đủ nhỏ, bắt đầu từ góc $\theta \sim 4^\circ$, sao cho thu được nhiều nhất các cực đại cường độ.. Ghi dữ liệu đo được vào Bảng E2_1.	1.0
2	Để giảm sai số do sự lệch hướng của chùm laze đối với giá giữ mẫu, và với thước đo góc trên bề quang học, hãy thực hiện phép đo tương tự với các góc tới ở phía bên kia điểm vạch 0° trên thước đo góc như sau: quay giá giữ mẫu sao cho mẫu đối diện với vạch 0° của thước đo góc; sau đó di chuyển đầu thu quang một cách thích hợp để đo được cường độ của chùm laze phản xạ. Ghi dữ liệu đo được vào Bảng E2_2.	0.6
3	Vẽ đồ thị cường độ phản xạ theo góc tới θ trên giấy vẽ đồ thị từ dữ liệu ghi được trong Bảng E2_1 và gọi đồ thị này là ‘Graph E2_1’. Vẽ đồ thị tương tự cho dữ liệu trong Bảng E2_2 trên một tờ giấy vẽ đồ thị khác, và gọi đồ thị này là ‘Graph E2_2’. Hãy chỉ ra sự thay đổi của cường độ bằng cách vẽ một đường tròn qua các điểm trên đồ thị Graph E2_1, cũng như trên Graph E2_2.	0.9
4	Hãy xác định vị trí các đỉnh cường độ phản xạ trên đồ thị và đánh số các đỉnh này một cách liên tục trên Graph E2_1 và Graph E2_2, bắt đầu từ đỉnh có góc tới lớn nhất.	0.2
5	Dùng Phương trình (1), hãy rút ra điều kiện đối với các đỉnh phản xạ theo L , θ , ϕ_s , λ . Gọi điều kiện này là Phương trình (2).	0.2
6	Chọn một hàm thích hợp của θ , gọi là $X(\theta)$ và dùng nó như một biến độc lập mới sao cho các đỉnh cường độ phản xạ trong Graph E2_1 và Graph E2_2 sẽ cách đều nhau trong đồ thị của cường độ phản xạ theo $X(\theta)$. Sau đó, tính các giá trị tương ứng của $X(\theta)$ và viết chúng vào một cột mới trong các Bảng E2_1 và E2_2.	0.3
7	Xây dựng Bảng E2_3 gồm cột số thứ tự của đỉnh và góc tới tương ứng từ dữ liệu trong Bảng E2_1 và E2_2. Em có thể đánh dấu các góc bằng kí hiệu LHS (left-hand side, phía tay trái) và RHS (right-hand side, phía tay phải), tức là θ_{LHS} và θ_{RHS} . Sau đó, với mỗi cặp đỉnh phản xạ tương ứng, tính độ lớn trung bình của	0.6

	θ_{LHS} và θ_{RHS} , kí hiệu là $ \theta _{avg}$, rồi tính $X(\theta _{avg})$. Viết kết quả vào các cột mới trong Bảng E2_3. [Lưu ý: Số thứ tự của các đỉnh trong Bảng E2_1 và E2_2 có thể khác nhau. Hãy nhớ là em phải tính độ lớn góc trung bình của từng cặp đỉnh tương ứng, thu được từ Graph E2_1 và Graph E2_2.]	
8	Vẽ đồ thị trên một tờ giấy vẽ đồ thị riêng để biểu diễn mối liên hệ giữa số thứ tự đỉnh và $X(\theta _{avg})$. Gọi đồ thị này là ‘Graph E2_3’.	0.6
9	Kẻ một đường thẳng qua tất cả các điểm trên đồ thị trên đồ thị Graph E2_3, rồi xác định độ dốc và giao điểm của đường thẳng này với trục y. [Lưu ý: Kết quả nhận trực tiếp từ đồ thị cũng được chấp nhận. Không cần phân tích sai số.]	0.4
10	Viết lại Phương trình (2) thu được từ Nhiệm vụ 5 để đưa ra hệ thức giữa bậc giao thoa m và hàm $X(\theta _{avg})$ thu được ở Nhiệm vụ 6. Gọi phương trình này là Phương trình (3a). Từ Phương trình (3a), viết biểu thức của m theo L , λ , và $ \theta _{avg}$ rồi gọi là Phương trình (3b). Tiếp theo, viết biểu thức pha phản xạ chuẩn hóa $\phi_{s,n} = \phi_s/2\pi$ theo L , λ , và $ \theta _{avg}$ và gọi là Phương trình (3c). Hãy chỉ ra giá trị của $\phi_{s,n}$ nằm trong khoảng nào. Tiếp theo, hãy xác định giá trị của m cho các đỉnh từ kết quả thu được ở Nhiệm vụ 7 và viết vào một cột mới trong Bảng E2_3.	1.2
11	Hãy vẽ đồ thị của m theo $X(\theta _{avg})$ vào Graph E2_3 (là đồ thị số thứ tự của đỉnh theo $X(\theta _{avg})$). Kẻ một đường thẳng qua tất cả các điểm trên đồ thị này. Từ đó, xác định độ rộng L của khe không khí của mẫu chuẩn và giá trị pha phản xạ ϕ_s của Ti. [Lưu ý: Kết quả nhận trực tiếp từ đồ thị cũng được chấp nhận và không cần phân tích sai số.]	1.4

Bài lý thuyết 1

Xoáy trong chất siêu chảy

Mở đầu

Siêu chảy là một tính chất của sự chảy không có ma sát. Kinh nghiệm thường ngày cho ta thấy rằng chuyển động của chất lưu thông thường (nước ở nhiệt độ phòng, chẳng hạn) luôn kèm theo sự tiêu tán năng lượng do sự nhớt, khiến cho dòng chảy dần dần chậm lại, trừ khi nó được duy trì bằng những ngoại lực. Trái lại, chất siêu chảy không bị mất động năng: một khi đã được kích thích cho chuyển động, chất siêu chảy có thể chuyển động liên tục mãi mãi. Tính siêu chảy được thấy đầu tiên ở hêli lỏng.

Ta khảo sát các tính chất của hêli siêu chảy ở nhiệt độ không tuyệt đối. Nó được coi như một chất lỏng không nén được, với khối lượng riêng ρ . Tính liên tục của dòng chảy (khối lượng đi vào và khối lượng đi ra khỏi một thể tích vô cùng bé thì bằng nhau) dẫn đến thông lượng của vận tốc hêli $\vec{v}$ qua một mặt kín thì luôn bằng không. Xét về tính chất này, vận tốc siêu chảy giống với vectơ cường độ từ trường. Tương tự với các đường sức từ, các "đường dòng" tiếp tuyến với vận tốc chất lưu tại mỗi điểm, và mật độ đường dòng tỉ lệ với độ lớn của vận tốc.

Dòng siêu chảy thực sự có một tính chất quan trọng, là nó không xoáy: lưu số của vận tốc chất siêu chảy $\vec{v}$ dọc theo một đường kín bất kì bên trong hêli thì bằng không

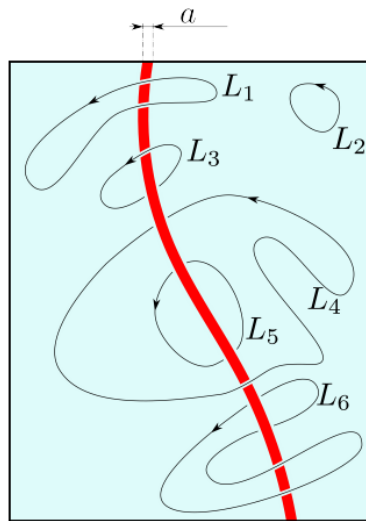
$$\int_L \vec{v} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (1)$$

Điều này không đúng nữa, nếu tính siêu chảy vắng mặt dọc theo một "sợi xoáy" mảnh. Độ dày của một sợi xoáy xấp xỉ kích thước nguyên tử a , nhưng xoáy gây nên một trường vận tốc tầm xa trong chất siêu chảy bao quanh xoáy: lưu số của vận tốc quanh sợi xoáy là lượng tử lưu số¹

$$\left| \int_L \vec{v} \cdot d\vec{l} \right| = 2\pi\kappa, \quad (2)$$

và bằng không nếu đường tính lưu số có thể co về thành một điểm mà không cắt ngang xoáy đó, xem Hình 1. Điều này củng cố sự tương tự giữa sự siêu chảy và từ trường: sự chồng chất của hai phân bố vận tốc hợp lý cũng là một phân bố vận tốc hợp lý, và vận tốc tại mỗi điểm thì bằng (với một thừa số về thứ nguyên) từ trường gây bởi các dòng điện có cường độ bằng đơn vị chạy trong hệ các dây dẫn biểu diễn các sợi xoáy.

¹Sự lượng tử hóa lưu số là một hiệu ứng lượng tử vĩ mô và ứng với sự lượng tử hóa momen động lượng trong mô hình Bohr. Lượng tử lưu số là $\kappa = \hbar/m_{\text{He}}$, với m_{He} là khối lượng của nguyên tử hêli.

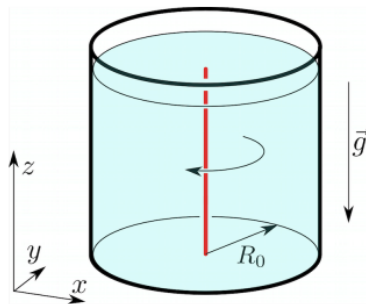


Hình 1: Sợi xoáy (màu đỏ) trong chất siêu chảy (màu xanh lam nhạt). Lưu số của vận tốc dọc theo các đường L_1 , L_2 , L_5 , và L_6 đều bằng không, nhưng lưu số dọc theo các đường L_3 và L_4 bằng $\pm 2\pi\kappa$. Chú ý rằng lưu số dọc theo L_3 và L_4 có dấu ngược nhau.

Phần A. Sợi xoáy dừng (0.75 điểm)

Xét một bình hình trụ (bán kính $R_0 \gg a$) đựng heli siêu chảy, và một sợi xoáy thẳng theo phương thẳng đứng, ở giữa bình, xem Hình 2.

A.1	Hãy vẽ các đường dòng. Hãy tìm vận tốc v ở điểm $\vec{r}$.	0.25pt
A.2	Hãy xác định dạng của mặt thoáng (độ cao phụ thuộc vào tọa độ $z(\vec{r})$) xung quanh xoáy. Gia tốc rơi tự do là g , bỏ qua sức căng bề mặt.	0.5pt



Hình 2: Xoáy thẳng nằm dọc trục của bình.

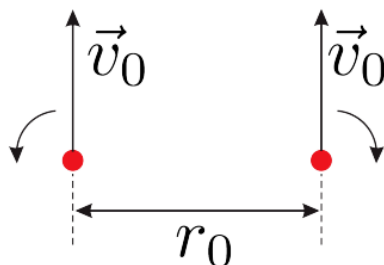
Phần B. Chuyển động của xoáy (1.25 điểm)

Các xoáy tự do chuyển động trong không gian cùng với dòng chảy². Nói khác đi, mỗi phần tử của sợi

²Đây là hệ quả của sự bảo toàn động lượng, xem mục sau.

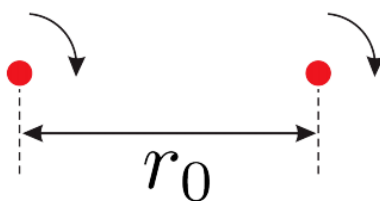
xoáy chuyển động với vận tốc $\vec{v}$ của chất lưu tại vị trí của phần tử đó.

Để làm thí dụ, ta xét hai xoáy thẳng quay ngược chiều nhau, ban đầu đặt cách nhau một khoảng r_0 , xem Hình 3. Mỗi xoáy gây ra vận tốc $v_0 = \kappa/r_0$ tại trục của xoáy kia. Kết quả là hai xoáy chuyển động theo đường thẳng với tốc độ không đổi $v_0 = \kappa/r_0$ sao cho khoảng cách giữa chúng không đổi.



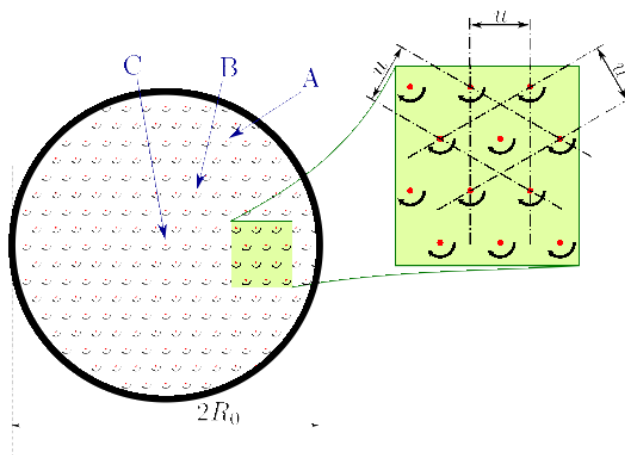
Hình 3: Các sợi xoáy song song, với chiều quay ngược nhau.

B.1 Xét hai xoáy thẳng giống hệt nhau, ban đầu đặt cách nhau r_0 như thấy trên Hình 4. Hãy tìm vận tốc ban đầu của các xoáy và vẽ các quỹ đạo của chúng. 0.25pt



Hình 4: Hai sợi xoáy song song có cùng chiều quay.

Một bình hêli (xem Phần A) chứa đầy các xoáy thẳng đứng giống hệt nhau, lập thành mạng hình tam giác ($u \ll R_0$), xem Hình 5.



Hình 5: Mạng tam giác của các xoáy trong bình. Nhìn từ trên xuống.

B.2	Hãy vẽ quỹ đạo của các xoáy A, B, và C (nằm ở tâm).	0.15pt
B.3	Hãy tìm vận tốc $v(\vec{r})$ của một xoáy nằm ở vị trí $\vec{r}$.	0.4pt
B.4	Hãy tìm khoảng cách $AB(t)$ giữa các xoáy A và B ở thời điểm t . Coi như đã biết $AB(0)$.	0.35pt
B.5	Hãy xác định dạng của mặt thoáng heli $z(\vec{r})$ "đã được làm trơn" (bỏ qua cấu trúc mạng).	0.25pt

Phần C. Động lượng và năng lượng (1.75 điểm)

Trường vận tốc tầm xa là đóng góp chủ yếu vào năng lượng của một hệ các xoáy, nó không phụ thuộc vào cấu trúc cụ thể của sợi. Bản thân sợi xoáy không thể được mô tả đúng bởi lý thuyết vĩ mô, và các kỳ dị biểu kiến (các đại lượng vô hạn) là không quan trọng. Các đại lượng vật lý thực, như năng lượng, của vùng bên trong một cái ống mảnh có bán kính a quanh sợi xoáy được bỏ qua. Bên ngoài ống này, mật độ động năng của dòng siêu chảy $\rho v^2/2$ (với $\rho = \text{const}$) thì tương tự như mật độ năng lượng của từ trường $B^2/(2\mu_0)$ — cả hai đại lượng này đều phụ thuộc vào bình phương của biến tương ứng. Sự tương tự này, cùng với sự tương ứng giữa từ trường và vận tốc chất siêu chảy do các xoáy gây nên, làm cho việc tính năng lượng dòng chảy của một hệ trở nên dễ dàng. Chẳng hạn, biết rằng độ tự cảm của một vòng dây tròn là $L \approx \mu_0 R \log(R/a)$, với R là bán kính vòng và a là bán kính dây, ta thu được năng lượng của sợi xoáy siêu chảy có dạng vòng tròn³

$$U \approx 2R\rho\pi^2\kappa^2 \log(R/a) \quad (3)$$

Động lượng toàn phần của chất lưu cũng được xác định bởi phân bố vận tốc tầm xa. Ta thu được nó bằng cách lấy tích phân mật độ động lượng $\rho\vec{v}$. Ta lại xét dòng chảy được gây bởi các vòng xoáy tròn đặt trong mặt phẳng xy . Từ tính chất đối xứng, ta thấy hiển nhiên là động lượng toàn phần chỉ có thành phần theo trục z :

$$P = \int \rho v_z dV = \rho \int \int \underbrace{\left(\int v_z dz \right)}_{q(x,y)} dx dy \quad (4)$$

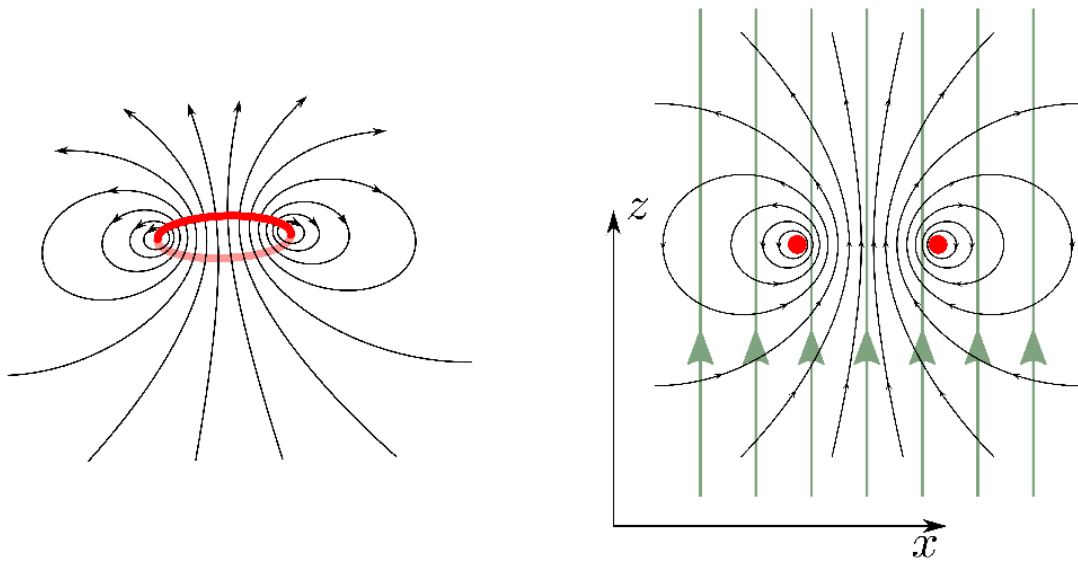
Tích phân trong ngoặc thực tế là tích phân dọc theo các đường thích hợp song song với trục z , xem Hình 6. Từ biểu thức cho lưu số (2), ta suy ra rằng

$$q(x,y) = \int_{L(x,y)} \vec{v} \cdot d\vec{l} \quad (5)$$

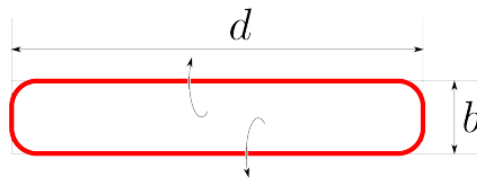
là hằng số trong từng khoảng. Cụ thể, nó bằng không với các đường đi bên ngoài vòng, và bằng $2\pi\kappa$ cho các đường đi bên trong vòng. Do đó, động lượng toàn phần là

$$P = \rho \cdot \pi R^2 \cdot 2\pi\kappa = 2\pi^2 \rho R^2 \kappa \quad (6)$$

³Biểu thức này cũng chỉ đúng khi $\log R/a \gg 1$.

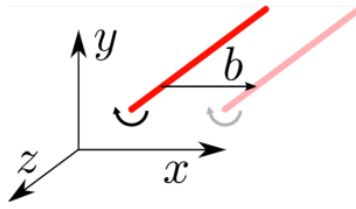


Hình 6: Trường vận tốc của một vòng xoáy hình tròn và đường lấy tích phân (màu xanh lục) để tính $q(x, y)$.



Hình 7: Vòng xoáy gần giống hình chữ nhật, $b \ll d$.

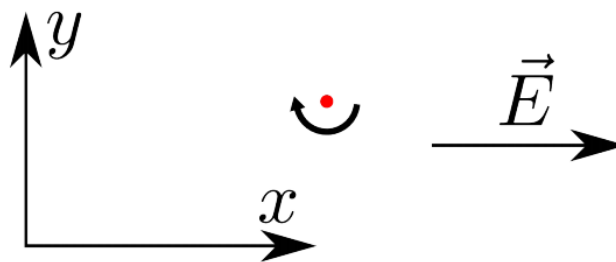
C.1	Xét một vòng xoáy gần giống hình chữ nhật $b \times d$, $b \ll d$, Hình 7. Hãy chỉ ra hướng của động lượng $\vec{P}$ của vòng xoáy. Hãy tìm độ lớn của động lượng.	0.3pt
C.2	Hãy tính năng lượng U của nó.	0.7pt
C.3	Giả sử ta dịch một sợi xoáy thẳng, dài, đi một khoảng b theo phương x , xem Hình 8. Động lượng của chất lỏng thay đổi bao nhiêu? Hãy chỉ ra hướng của biến thiên động lượng. Độ dài của sợi xoáy (do thành bình quyết định) là d .	0.75pt



Hình 8: Biến thiên của động lượng khi xoáy dịch chuyển đối với chất lưu.

Phần D. Các điện tích bị bắt (2.85 điểm)

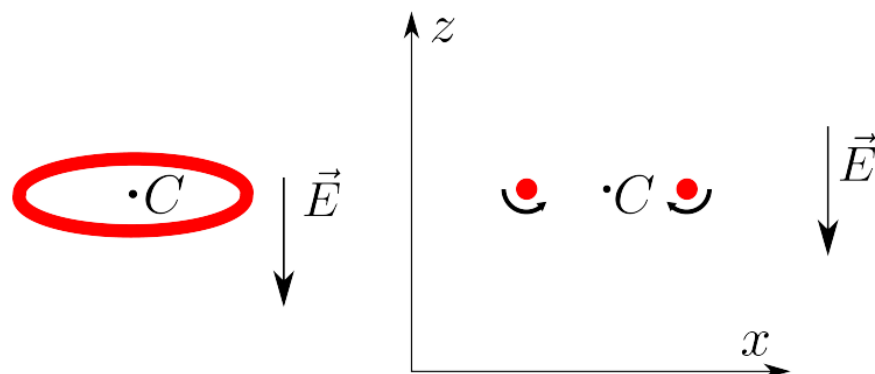
Nếu các electron được phun vào heli, chúng bị bắt trong các sợi xoáy. Từ đây trở đi, sự phân cực của heli được bỏ qua ($\epsilon = 1$).



Hình 9: Xoáy thẳng trong điện trường đều.

D.1 Xét một xoáy thẳng được tích điện đều với mật độ dài $\lambda < 0$ trong điện trường đều $\vec{E}$. Hãy vẽ quỹ đạo của xoáy. Hãy tìm vận tốc của nó theo thời gian. 0.5pt

Một vòng xoáy tròn có bán kính R_0 , lúc đầu được tích điện đều với mật độ dài $\lambda < 0$, được đặt vào một điện trường đều $\vec{E}$ vuông góc với mặt phẳng của vòng, ngược chiều với động lượng $\vec{P}_0$ của vòng.

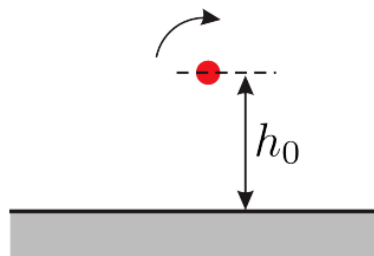


Hình 10: (trái) Vòng xoáy trong điện trường đều. (phải) Mặt cắt của vòng.

D.2	Hãy vẽ quỹ đạo của tâm vòng C . Hãy tìm bán kính của vòng theo thời gian.	0.6pt
D.3	Hãy tìm vận tốc $v(t)$ của vòng theo thời gian.	1.5pt
D.4	Điện trường bị ngắt ở thời điểm t^* khi vận tốc đạt giá trị $v^* = v(t^*)$. Hãy tìm vận tốc $v(t)$ của vòng ở thời điểm $t > t^*$ sau đó.	0.25pt

Phần E. Ảnh hưởng của các mặt biên (3.25 điểm)

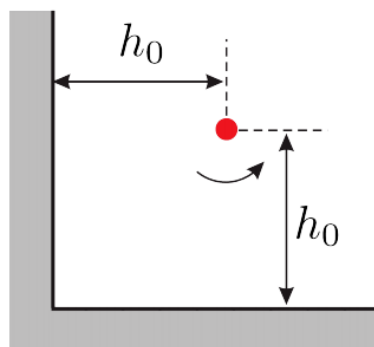
Các thành bình cứng làm thay đổi trường vận tốc tạo bởi một sợi xoáy, vì rằng chất lưu không chảy qua được thành bình. Về mặt toán học, điều đó có nghĩa là thành phần vận tốc vuông góc với thành bình là bằng không ở bề mặt của thành bình.



Hình 11: Sợi xoáy thẳng gần một thành bình phẳng.

E.1	Hãy vẽ quỹ đạo của một xoáy thẳng, lúc đầu đặt cách thành bình phẳng một khoảng h_0 . Hãy tìm vận tốc của nó theo thời gian.	0.5pt
------------	--	-------

Xét một xoáy thẳng đặt ở góc, cách đều hai thành bình một khoảng h_0 .



Hình 12: Sợi xoáy thẳng đặt ở góc.

E.2	Vận tốc ban đầu của v_0 của xoáy bằng bao nhiêu?	0.75pt
E.3	Hãy vẽ quỹ đạo của xoáy.	0.5pt
E.4	Hãy xác định vận tốc v_∞ của xoáy sau khoảng thời gian rất dài.	1.5pt

Bài lý thuyết 2

Sự tiến hóa của cặp lỗ đen siêu khối lượng

Giới thiệu

Khái niệm sóng hấp dẫn là một trong những tiên đoán ấn tượng nhất của Thuyết tương đối rộng của Einstein. Các sóng hấp dẫn là các gợn không gian - thời gian lan truyền đi với tốc độ ánh sáng giống như sóng điện từ. Việc phát hiện trực tiếp các sóng hấp dẫn là vô cùng khó khăn, tuy nhiên, các tín hiệu đầu tiên đã được phát hiện vào ngày 14 tháng 9 năm 2015, tại các phòng thí nghiệm LIGO và VIRGO.

Các sóng hấp dẫn được phát ra trong quá trình chuyển động nhanh của các vật thể có khối lượng lớn. Nguồn tạo ra sóng hấp dẫn mạnh nhất là sự nhập vào nhau của hai Lỗ đen Siêu khối lượng (SBH - Supermassive Black Hole). Các lỗ đen được tiên đoán bởi Lý thuyết tương đối rộng, đó là các vật thể siêu nén và các vật này có thể có khối lượng rất lớn. Những tính chất đặc biệt khác của các lỗ đen sẽ không cần dùng trong bài toán này.

Trong lý thuyết phổ biến được chấp nhận rộng rãi nhất về sự tiến hóa của thiên hà, người ta cho rằng rằng có các SBH với khối lượng nằm trong dải $10^5 - 10^9$ lần khối lượng Mặt Trời ở giữa thiên hà. Các thiên hà là các hệ sao khổng lồ chứa $10^{10} - 10^{11}$ ngôi sao. Trong quá trình tiến hóa của chúng, hai thiên hà có thể va chạm và nhập thành một. Điều gì sẽ xảy ra khi hai SBH ban đầu nằm ở tâm của các thiên hà? Sự tiến hóa của cặp SBH có thể được chia thành *ba* giai đoạn chính. Ở mỗi giai đoạn, các SBH đều di chuyển đến gần nhau, dù rằng hiện tượng vật lý trong mỗi giai đoạn là khác nhau. Ta sẽ xem xét các hiện tượng này một cách riêng biệt trong ba phần đầu của bài toán. Trong phần thứ tư, ta dùng các mối quan hệ thu được để tính tổng thời gian tiến hóa hệ cặp SBH.

Ở cuối quá trình tiến hóa của chúng, hai SBH sẽ dần dần tiếp cận nhau và nhập thành một lỗ đen. Quá trình hợp nhất kéo dài khoảng một giờ và kèm theo là một đợt bùng nổ mạnh bức xạ hấp dẫn. Các đài quan sát tương lai như LISA có thể phát hiện ra bức xạ hấp dẫn này. Tuy nhiên, các nghiên cứu về tiến hóa SBH vẫn đang được tiến hành và hiện ở giai đoạn đầu của ngành thiên văn về sóng hấp dẫn.

Thông tin chung

1. Viết tất cả các đáp án bằng số cho các khoảng cách theo đơn vị parsecs (pc) và các khoảng thời gian theo đơn vị tỉ năm (Gy, giga-years). Ta sẽ sử dụng khối lượng Mặt Trời (M_S) làm khối lượng tham chiếu. Em có thể cần các giá trị sau:

$$1 \text{ pc} = 3.1 \times 10^{16} \text{ m},$$

$$M_S = 2.0 \times 10^{30} \text{ kg},$$

$$t_H = 13.7 \text{ Gy}, \text{ tuổi của vũ trụ},$$

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \times \text{m}^2/\text{kg}^2,$$

$$c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}.$$

2. Khi em gặp từ **“ước tính”**, em không cần trả lời chính xác. Kết quả chỉ cần sai khác không quá 10 lần giá trị đúng. Ngược lại, khi em gặp từ **“tìm”**, em phải đưa ra câu trả lời chính xác. Từ **“tính”** yêu cầu em trả lời kết quả bằng số.

3. Trong toàn bộ bài toán, giả thiết tất cả các ngôi sao trong các thiên hà có cùng khối lượng bằng khối lượng Mặt trời $m = M_S$.

4. Trong toàn bộ bài toán, ta không tính đến các hiệu ứng của Thuyết tương đối rộng, trừ việc phát xạ các sóng hấp dẫn. Tất cả các ngôi sao và các lỗ đen được xem như là chất điểm và tuân theo định luật hấp dẫn của Newton.

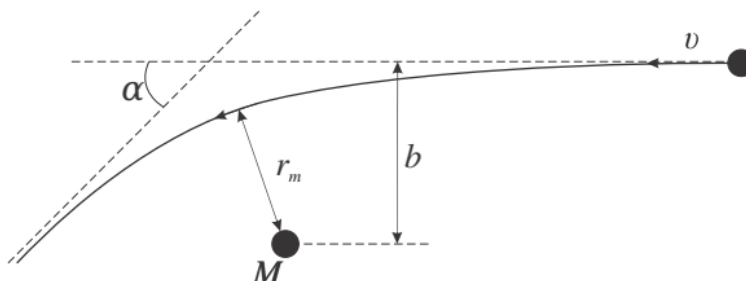
Phần A. Ma sát động (1.6 điểm)

Trong phần này, ta nghiên cứu mô hình đơn giản của thiên hà. Em có thể bỏ qua tốc độ của các ngôi sao trong thiên hà và giả thiết mật độ sao là n không đổi. Kích thước đặc trưng của thiên hà là R . Mật độ sao là đủ nhỏ, do đó va chạm giữa các ngôi sao là rất hiếm và được bỏ qua. Ta xét một SBH có khối lượng $M \gg m$, đang chuyển động với vận tốc v xuyên qua thiên hà. Đáng lưu ý, SBH này chịu tác dụng bởi lực trung bình khác không từ các ngôi sao. Lực này làm chậm chuyển động của SBH, và do đó, được gọi là lực ma sát động. Phần này dành cho việc xác định lực trên.

- A.1** Xét hệ quy chiếu gắn với SBH và xét quá trình di chuyển của một ngôi sao với tham số va chạm b (Hình 1). Giả thiết rằng 0.75pt

$$b \gg b_1 = \frac{GM}{v^2}. \quad (1)$$

Độ lệch góc của ngôi sao là $\alpha = kb_1/b$, với k là hệ số chưa biết. Hãy tìm giá trị của k . Nếu em không tìm được k , lấy $k = 1$ cho các phần dưới.



Hình 1: Sự lệch của một ngôi sao bởi SBH có khối lượng M trong hệ quy chiếu đang xét. Tham số va chạm là b , khoảng cách nhỏ nhất giữa sao và SBH là r_m .

- A.2** Chọn hướng trục Ox là hướng vận tốc của SBH. Hãy tìm thành phần động lượng Δp_x được chuyển từ sao sang SBH. 0.25pt

- A.3** Hãy ước tính lực trung bình F_{DF} tác dụng lên SBH bằng cách lấy trung bình theo tham số va chạm b . Bỏ qua sự đóng góp của các ngôi sao có tham số va chạm $b < b_1$. Giả thiết SBH nằm ở phần giữa thiên hà. Biểu thị F_{DF} theo các đại lượng M, v, R, G và mật độ khối lượng của hệ sao $\rho = mn$. 0.4pt

- A.4** Với kết quả nhận được từ phần trên, biểu thức F_{DF} bao gồm thừa số $\log R/b_1$, mà từ nay về sau, ta kí hiệu là $\log \Lambda$. Tính giá trị của $\log \Lambda$ với $M = 10^8 M_\odot$, $R = 20 \text{ kpc} = 20 \times 10^3 \text{ pc}$ và vận tốc $v = 200 \text{ km/s}$. 0.2pt

Phần B. Bật ra trong trường hấp dẫn (3.0 điểm)

Trong phần này, ta xét hệ gồm hai SBH có cùng khối lượng $M \gg m$ nằm giữa thiên hà. Ta gọi hệ này là **cặp SBH (cặp lỗ đen)**. Ta cũng giả thiết rằng không có ngôi sao nào gần cặp SBH, mỗi SBH chuyển động trên quỹ đạo tròn, bán kính a trong trường hấp dẫn của SBH kia.

- | | | |
|------------|---|--------|
| B.1 | Tìm vận tốc trên quỹ đạo v_{bin} của mỗi SBH. Tìm tổng năng lượng E của cặp SBH. Viết biểu thức theo a , G và M . | 0.25pt |
|------------|---|--------|

Có nhiều ngôi sao ở cách cặp SBH những khoảng lớn hơn a rất nhiều. Các ngôi sao di chuyển theo các quỹ đạo phức tạp và đa dạng trong trường hấp dẫn của cả thiên hà. Chuyển động của các ngôi sao có thể coi là hỗn loạn, giống chuyển động của các phân tử trong khí lí tưởng. Ta giả thiết vận tốc các ngôi sao có cùng độ lớn $\sigma \ll v_{bin}$ và mật độ khối lượng trung bình của chúng là ρ . Trong trường hợp này, ma sát động không ảnh hưởng đến cặp SBH và sự mất mát năng lượng là do các hiện tượng khác.

- | | | |
|------------|--|-------|
| B.2 | Ta giải bài toán liên quan. Cho một ngôi sao khối lượng m di chuyển ngang qua một chất điểm khối lượng $M_2 \gg m$ đang đứng yên. Khoảng cách tối thiểu giữa ngôi sao và chất điểm trong khi nó đi qua là r_m . Vận tốc của sao khi ở xa là σ . Tìm giá trị chính xác của tham số va chạm b . | 0.5pt |
|------------|--|-------|

Nếu một ngôi sao đến gần cặp SBH một khoảng cách gần bằng a , nó sẽ tham gia vào tương tác phức tạp 3 vật với cặp SBH và kết quả là ngôi sao bị bật ra với vận tốc gần bằng v_{bin} (vận tốc của sao ở khoảng cách lớn sau khi chịu tương tác). Ta gọi tương tác mạnh trên là sự va chạm của ngôi sao với cặp SBH. Sự tăng tốc và bắn ra của ngôi sao sau va chạm được gọi là **"Bật ra trong trường hấp dẫn"**.

- | | | |
|------------|--|-------|
| B.3 | Ước tính thời gian đặc trưng Δt giữa hai va chạm liên tiếp của cặp SBH với các ngôi sao $\sigma \ll v_{bin}$. | 1.0pt |
|------------|--|-------|

- | | | |
|------------|--|--------|
| B.4 | Hãy ước tính tốc độ mất mát năng lượng của cặp SBH dE/dt . Ước tính tốc độ thay đổi bán kính da/dt . Viết biểu thức theo a , ρ , σ , G . | 0.25pt |
|------------|--|--------|

- | | | |
|------------|--|-------|
| B.5 | Kí hiệu bán kính ban đầu của hệ là a_1 . Ước tính thời gian T_{SS} để bán kính giảm 2 lần do "bật ra trong trường hấp dẫn". Tính T_{SS} với $\sigma = 200$ km/s, $a_1 = 1$ pc, $\rho = 10^4 M_S/\text{pc}^3$. | 1.0pt |
|------------|--|-------|

Phần C. Bức xạ sóng hấp dẫn (1.0 điểm)

Trong phần này, ta khảo sát một cặp gồm hai SBH có cùng khối lượng, và cặp này không tương tác với các ngôi sao. Ngay cả trong trường hợp này, hệ vẫn mất năng lượng là do phát ra sóng hấp dẫn. Tốc độ mất năng lượng do sóng hấp dẫn là

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{1024}{5} \frac{G}{c^5} (\omega^3 I)^2, \quad (2)$$

với ω là tốc độ góc của cặp, và $I = 2Ma^2$ là mômen tứ cực của cặp.

C.1 Tìm tốc độ biến thiên bán kính của cặp SBH da/dt do sự bức xạ sóng hấp dẫn. 0.2pt
--

Khi các bán kính quỹ đạo của cặp SBH a gần với bán kính hấp dẫn của lỗ đen:

$$r_g = \frac{2GM}{c^2}, \quad (3)$$

hai SBH nhanh chóng nhập vào nhau.

C.2 Gọi bán kính ban đầu của hệ là $a_2 \gg r_g$. Ước tính thời gian T_{GW} để cặp SBH co lại tới bán kính gần bằng r_g do sự bức xạ sóng hấp dẫn. Biểu thị T_{GW} theo a_2 , M , c và G . 0.7pt
--

C.3 Tính bán kính ban đầu a_H của cặp gồm hai SBH có cùng khối lượng $M = 10^8 M_S$ nếu cần tuổi vũ trụ để để chúng nhập vào nhau: $T_{GW} = t_H$. 0.1pt
--

Phần D. Tiến hóa trọn vẹn (4.4 điểm)

Trong phần này ta sẽ sử dụng các kết quả đã có được ở trên. Xét tình huống hệ thiên văn **thực**. Hai thiên hà, mỗi thiên hà có SBH với khối lượng $M = 10^8 M_S$ nằm ở tâm, nhập lại thành một hệ các sao mới. Coi thiên hà mới là đối xứng cầu với bán kính $R = 20 \text{ kpc} = 20 \times 10^3 \text{ pc}$. Ta giả thiết mật độ sao biến thiên theo bán kính r tính từ tâm thiên hà là

$$\rho(r) = \frac{\sigma^2}{4\pi G r^2}, \quad (4)$$

với $\sigma = 200 \text{ km/s}$.

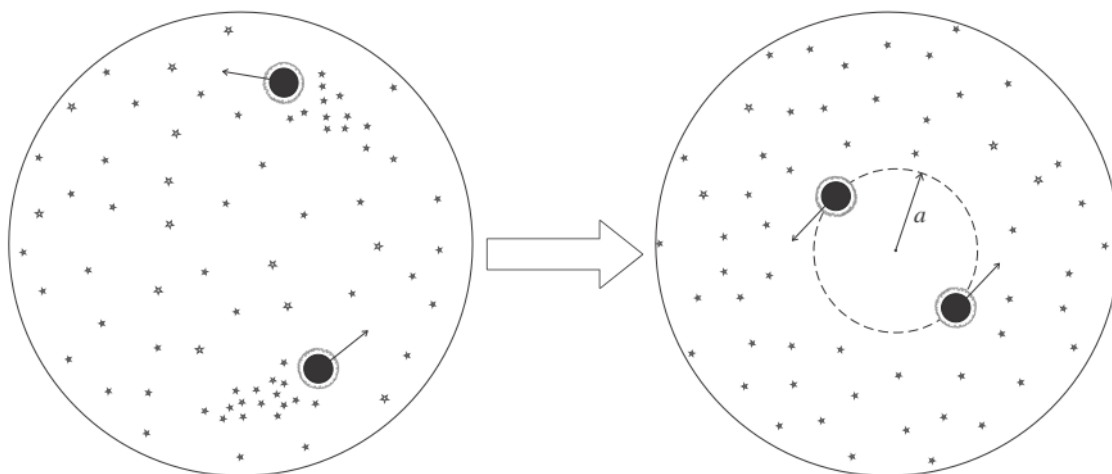
- D.1** Xét một vật chuyển động trên quỹ đạo tròn bán kính $a < R$ trong trường hấp dẫn của các ngôi sao. Bỏ qua lực ma sát động, hãy tìm vận tốc v của vật. 0.25pt

Ngay sau khi hai thiên hà nhập vào nhau, hai SBH có vị trí nào đó bên trong thiên hà mới và không tác động đến nhau. Xét một SBH. Ta giả thiết nó chuyển động trên quỹ đạo tròn bán kính $a < R$ quanh tâm thiên hà và mất dần dần năng lượng do ma sát động.

- D.2** Ước tính tốc độ biến thiên bán kính quỹ đạo da/dt . Trong phần A, ta bỏ qua vận tốc của các ngôi sao. Mặc dù các ngôi sao đang chuyển động trong hệ thiên hà thực, không phải tất cả chúng đều có cùng tốc độ σ . Thay vào đó, tốc độ của các ngôi sao chỉ là cùng bậc với σ , và đó cũng là tốc độ tương đối của SBH đối với các ngôi sao, vì vậy em có thể dùng kết quả thu được ở A.3 để ước tính. Em nên dùng mật độ khối lượng $\rho(r)$ từ phương trình (4). Coi $\log \Lambda$ là không đổi đã được tính trong A.4. 0.75pt

Sau một khoảng thời gian nào đó, hai SBH sẽ tiến lại gần tâm của thiên hà. Coi hai SBH di chuyển trên quỹ đạo tròn bán kính a quanh tâm thiên hà trong trường hấp dẫn của các ngôi sao.

- D.3** Ước tính bán kính tới hạn a_1 mà kể từ giá trị đó tương tác hấp dẫn giữa hai SBH không thể bỏ qua. Tính giá trị đó. Ta sẽ nói rằng ở thời điểm này hai SBH tạo thành tạo cặp (Hình 2). 0.3pt



Hình 2: Sự tiến hóa của các SBH trước và sau khi thành cặp

- D.4** Ta giả thiết rằng sau khi hai thiên hà nhập vào nhau, hai SBH ở cách tâm thiên hà một khoảng $a_0 = 2 \text{ kpc} = 2 \times 10^3 \text{ pc}$. Tính thời gian T_1 để hai SBH tạo thành cặp do ma sát động. 0.75pt

Sau khi tạo thành cặp, hai SBH đẩy bật tất cả các ngôi sao ở tâm thiên hà ra xa và ở đó một mình. Kể từ thời điểm này, lực ma sát động không còn tác dụng, và cặp bắt đầu mất năng lượng do hiệu ứng đẩy bật ra. Em có thể coi tốc độ của các ngôi sao quanh cặp là σ và mật độ khối lượng sao $\rho_1 = \rho(a_1)$ từ phương trình (4). Hiệu ứng đẩy bật ra làm giảm dần bán kính của cặp và sau một thời gian, cặp bắt đầu mất năng lượng chủ yếu do phát ra sóng hấp dẫn.

- D.5** Khi bán kính của cặp nhỏ hơn giá trị nào đó $a < a_2$, năng lượng bị mất là do bức xạ sóng hấp dẫn. ước tính giá trị của a_2 và tính giá trị đó. 0.3pt

- D.6** Ước tính thời gian T_2 của sự giảm bán kính cặp từ a_1 đến a_2 (giai đoạn đẩy bật ra). Ước tính thời gian T_3 của sự giảm bán kính cặp từ a_2 tới gần bằng không (giai đoạn bức xạ sóng hấp dẫn). 1.75pt

- D.7** Với các tham số đã cho ở trên, tính tổng thời gian T_{ev} của việc tiến hóa hai SBH từ khi nhập hai thiên hà đến khi nhập thành một SBH. 0.3pt

Nhận xét lịch sử. Trong thời gian dài, các nhà vật lý thiên văn đã nghĩ sự tiến hóa cặp SBH dừng lại ở giai đoạn bật ra, vì cặp đẩy bật tất cả các ngôi sao với các tham số va chạm nhỏ đến mức có thể va chạm với nó. Dường như hai SBH không bao giờ nhập vào nhau. Điều này được gọi là **vấn đề parsec cuối cùng**.

Các thiên hà thực có các hình dạng bất đối xứng phức tạp. Vài năm trước, người ta phát hiện ra các thiên hà có hình dạng phức tạp, các ngôi sao có tham số va chạm nhỏ xuất hiện nhiều lần. Cặp SBH tiếp tục mất năng lượng, nhưng chậm hơn so với các giá trị ước tính. Vấn đề parsec cuối cùng đã được giải quyết một cách trọn vẹn.

Bài lý thuyết 3

Rác thải vũ trụ

Mở đầu

Trong hơn nửa thế kỷ hoạt động không gian, có khá nhiều vật thể nhân tạo đã được tích tụ gần Trái Đất. Các vật thể không phục vụ bất kỳ mục đích cụ thể nào được gọi là các **rác thải vũ trụ**. Ta thường chú ý nhiều đến những mảnh rác lớn, đó là các vệ tinh đã chết hoặc các tầng trên của tên lửa đẩy đang chuyển động trên quỹ đạo sau khi hoàn thành nhiệm vụ vận chuyển. Sự va chạm của các vật thể đó với nhau có thể dẫn đến hàng ngàn mảnh vỡ gây nguy hiểm cho tất cả các nhiệm vụ không gian hiện tại.

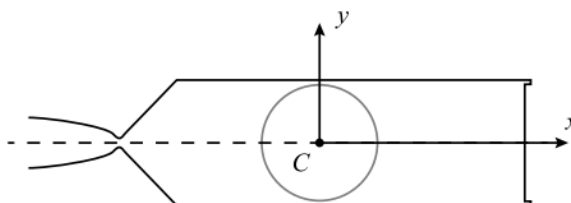
Có một kịch bản giả tưởng quen biết, theo đó một số va chạm nhất định có thể gây ra một thác lũ các va chạm tiếp theo, tạo ra nhiều rác thải vũ trụ hơn, làm tăng khả năng va chạm mới. Phản ứng dây chuyền như vậy làm mất tất cả các vệ tinh gần Trái Đất và làm cho các chương trình không gian không thể tiếp tục, gọi là **hội chứng Kessler**.

Để ngăn chặn các kết quả không mong muốn như vậy, người ta đã xây dựng các chương trình đặc biệt để loại bỏ các mảnh rác lớn khỏi quỹ đạo hiện tại của chúng bằng cách kéo chúng vào khí quyển Trái đất hoặc đưa lên các quỹ đạo nghĩa địa. Để đạt được mục đích này, một tàu vũ trụ được thiết kế đặc biệt - một tàu kéo - phải thu gom được mảnh rác thải. Tuy nhiên, trước khi thu gom một vật thể không được kiểm soát, điều quan trọng là ta phải hiểu động lực học về sự quay của nó.

Xin mời bạn tham gia vào việc lên kế hoạch cho một nhiệm vụ như vậy và tìm hiểu xem sự quay của các vật thể rác thay đổi như thế nào dưới ảnh hưởng của các yếu tố khác nhau.

Sơ đồ của rocket stage

Mảnh rác được xem xét ở đây gọi là **rocket stage**, nó là tầng trên của tên lửa "Kerbodyne 42". Nó có sơ đồ như trong Hình 1. Vòng tròn trong hình 1 thể hiện bồn chứa nhiên liệu hình cầu.

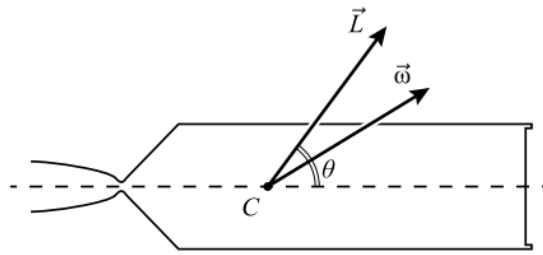


Hình 1: Rocket stage - tầng trên của "Kerbodyne 42"

Ta dùng hệ quy chiếu Cxy gắn cố định với vật, có gốc tọa độ nằm tại khối tâm C , trục x là trục đối xứng của rocket stage và trục y vuông góc với trục x . Các mômen quán tính đối với trục x và y là J_x và J_y ($J_x < J_y$).

Phần A. Sự quay (3.8 điểm)

Xét sự quay ban đầu tùy ý của rocket stage với mômen động lượng L (Hình 2), trong đó θ là góc giữa trục đối xứng và hướng của mômen động lượng. Bể chứa nhiên liệu tại thời điểm này được cho là rỗng. Không có lực hoặc mômen lực nào tác động lên rocket stage này.



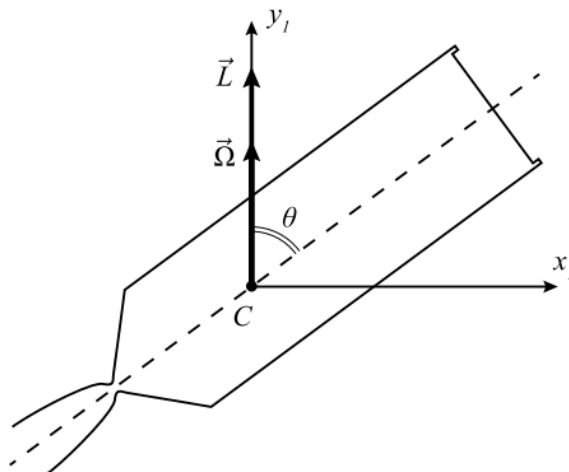
Hình 2: Sự quay rocket stage

- A.1** Tìm hình chiếu của vận tốc góc $\vec{\omega}$ trên trục x và trục y , cho rằng $\vec{L} = J_x \omega_x \vec{e}_x + J_y \omega_y \vec{e}_y$ đối với trục đối xứng x và y , với các véc tơ đơn vị $\vec{e}_x$ và $\vec{e}_y$. Viết đáp án theo $L = |\vec{L}|$, góc θ , và các mômen quán tính J_x, J_y . 0.2pt

- A.2** Tìm năng lượng quay E_x gắn với chuyển động quay có tốc độ góc ω_x và E_y gắn với chuyển động quay có tốc độ góc ω_y . Tìm tổng động năng quay E của rocket stage theo L và $\cos \theta$. 0.4pt

Trong những câu hỏi tiếp theo của phần A, ta xét chuyển động quay tự do của rocket stage với mômen động lượng ban đầu L và $\theta(0) = \theta_0$.

- A.3** Ký hiệu x_0 là phương ban đầu của trục đối xứng Cx của rocket stage đối với hệ quy chiếu quán tính. Sử dụng các định luật bảo toàn hãy tìm góc lệch cực đại ψ giữa trục đối xứng Cx và x_0 được tạo ra trong quá trình quay tự do của rocket stage. 1.2pt
Lưu ý: Do không có mômen ngoại lực tác dụng vào rocket stage, nên vector mômen động lượng không đổi.



Hình 3: Sự tiến động

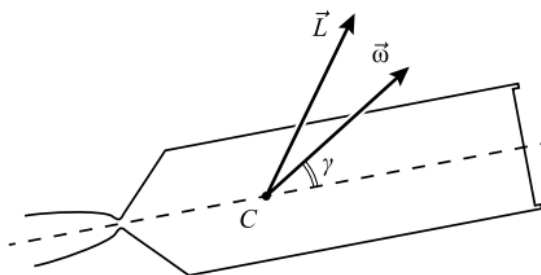
Bây giờ ta sử dụng hệ quy chiếu $Cx_1y_1z_1$ với y_1 hướng theo vectơ mômen động lượng không đổi $\vec{L}$ (Hình 3). Hệ quy chiếu này quay xung quanh trục y_1 sao cho trục đối xứng của rocket stage luôn nằm trong mặt phẳng Cx_1y_1 .

- A.4** Cho $L, \theta(0) = \theta_0$, và các mômen quán tính J_x, J_y , tìm vận tốc góc $\Omega(t)$ của hệ quy chiếu Cx_1y_1 quay quanh y_1 , hướng và độ lớn của vận tốc góc $\vec{\omega}_s(t)$ của rocket stage đối với hệ quy chiếu Cx_1y_1 theo thời gian. Viết câu trả lời về hướng của $\vec{\omega}_s(t)$ theo góc $\gamma_s(t)$ mà nó tạo với trục đối xứng Cx .
Lưu ý: vectơ vận tốc góc có tính chất cộng được: $\vec{\omega} = \vec{\omega}_x + \vec{\omega}_y = \vec{\Omega} + \vec{\omega}_s$. 2.0pt

Phần B. Quá trình chuyển tiếp (1.2 điểm).

Hầu hết nhiên liệu được sử dụng trong quá trình phóng lên, tuy nhiên, sau khi tải trọng đã được tách ra khỏi rocket stage, vẫn còn lại một ít nhiên liệu trong bình chứa. Khối lượng m của nhiên liệu còn sót lại không đáng kể so với khối lượng M của rocket stage. Sự lắc lắc của nhiên liệu lỏng và lực ma sát nhớt trong thùng nhiên liệu dẫn đến mất mát năng lượng, và sau quá trình chuyển tiếp, năng lượng giảm đến mức tối thiểu.

- B.1** Tìm giá trị θ_2 của góc θ sau quá trình chuyển tiếp với giá trị ban đầu bất kỳ của L và $\theta(0) = \theta_1 \in (0, \pi/2)$. 0.6pt



Góc giữa vận tốc góc và trục đối xứng của rocket stage

- B.2** Tính giá trị ω_2 của vận tốc góc ω sau quá trình chuyển tiếp, biết rằng vận tốc góc ban đầu $\omega(0) = \omega_1 = 1 \text{ rad/s}$ lập với trục đối xứng của rocket stage một góc $\gamma(0) = \gamma_1 = 30^\circ$. Các mômen quán tính là $J_x = 4200 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ và $J_y = 15\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. 0.6pt

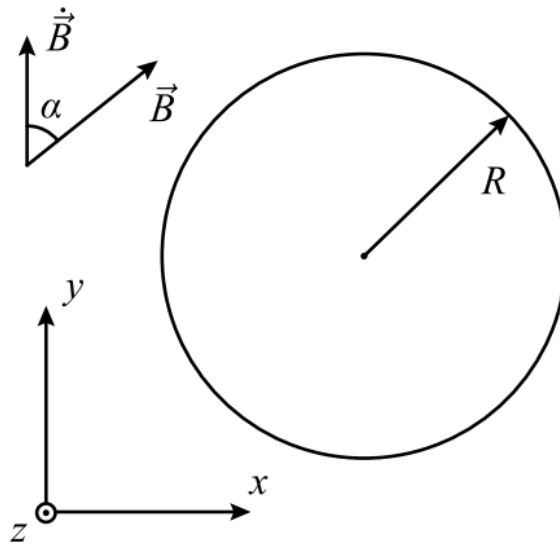
Phần C. Từ trường (5.0 điểm).

Một yếu tố quan trọng khác trong động lực học quay của rác rocket stage đang quay quanh Trái Đất là sự tương tác của nó với từ trường Trái Đất. Đầu tiên ta xem xét một bài toán bổ trợ.

Mômen do dòng xoáy (dòng Fucô)

Đặt một vỏ hình cầu không có từ tính, thành mỏng, có độ dày D và bán kính R trong một trường từ đều $\vec{B}$. Từ trường này thay đổi chậm sao cho đạo hàm $\dot{\vec{B}}$ của nó là một véc tơ không đổi tạo với hướng của $\vec{B}$

một góc α (Hình 4). Điện trở suất của vật liệu vỏ là ρ .

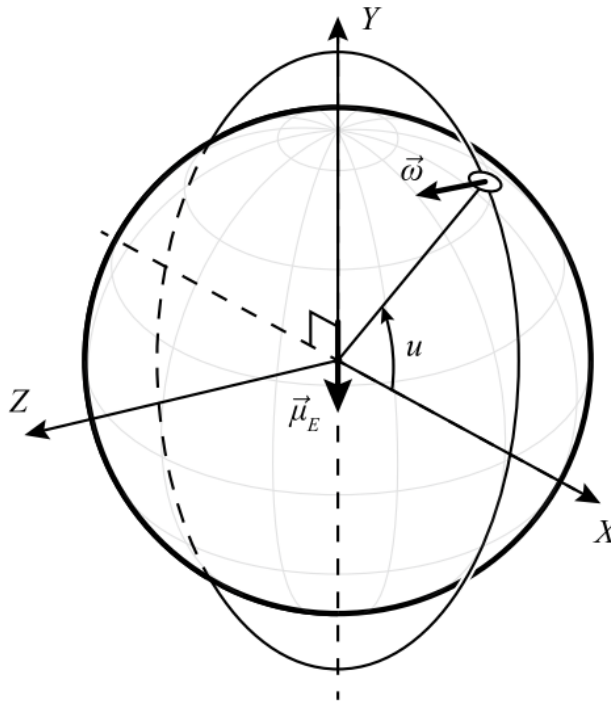


Hình 4: Vỏ cầu trong từ trường

- | | | |
|------------|---|-------|
| C.1 | Tìm mômen từ cảm ứng $\vec{\mu}$ của vỏ, bỏ qua tự cảm. Viết đáp án cho $\vec{\mu}$ dưới dạng các thành phần của nó trên các trục xyz (xem Hình 4). | 1.0pt |
| C.2 | Tìm mômen lực $\vec{M}$ tác dụng lên vỏ cầu. Đáp án cho $\vec{M}$ được viết dưới dạng các thành phần trên trục xyz (xem Hình 4). | 0.3pt |

Sự tiến triển của chuyển động trong từ trường Trái đất

Chúng ta hãy tìm hiểu xem sự thay đổi chuyển động quay của rocket stage với chuyển động quay tròn qua các cực với chu kỳ $T = 100 \text{ min}$ (Hình 5). Điều này cho thấy thời gian đặc trưng của quá trình tương tác với từ trường Trái đất dài hơn nhiều so với thời gian của quá trình chuyển tiếp. Ta sẽ nghiên cứu những gì xảy ra với rocket stage sau khi quá trình chuyển tiếp đã hoàn tất. Để bắt đầu phân tích, ta xét rocket stage quay với vận tốc góc ω_2 quanh trục vuông góc với mặt phẳng quỹ đạo.



Hình 5: Quỹ đạo

- C.3** Từ trường của trái đất $\vec{B}_E$ có thể được mô hình hóa như là từ trường của một lưỡng cực điểm đặt tại tâm Trái đất. Mômen lưỡng cực $\vec{\mu}_E$ ngược hướng với trục Y . Độ lớn của từ trường trái đất B tại điểm mà quỹ đạo cắt mặt phẳng xích đạo XZ là $B_0 = 20 \mu T$. Tìm $\vec{B}_E(u)$ tại vị trí hiện tại của rocket stage trên quỹ đạo, được xác định bởi góc u chỉ ra trên Hình 5. Chiều dương của u lấy theo chiều chuyển động trên quỹ đạo. Hãy viết đáp án dưới dạng các thành phần của $\vec{B}_E(u)$ trên các trục XYZ .

0.4pt

Lưu ý: Có thể thuận tiện cho các tính toán tiếp theo nếu các thành phần của $\vec{B}_E(u)$ được viết như các hàm số của $2u$ thay vì u .

Lưu ý: Từ trường của một lưỡng cực tại điểm $\vec{r}$ được cho bởi công thức:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{3(\vec{\mu} \cdot \vec{r})\vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{\mu}}{r^3} \right). \quad (1)$$

Rocket stage "Kerbodyne 42" chủ yếu được làm bằng gỗ, và phần vật liệu dẫn điện duy nhất là bình chứa nhiên liệu lỏng. Do đó, chúng ta coi sự tương tác của rocket stage với từ trường trái đất là tương tác của vỏ hình cầu với độ dày của thành là $D = 2 \text{ mm}$, bán kính $R = 4 \text{ m}$ và điện trở suất $\rho = 2.7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$.

- C.4** Tìm mômen lực $\vec{M}(u)$ tác dụng lên rocket stage khi nó quay quanh trục vuông góc với mặt phẳng quỹ đạo với vận tốc góc ω cùng phương với trục Z . Viết kết quả dưới dạng các thành phần của $\vec{M}(u)$ trên các trục XYZ .

1.3pt

- C.5** Tìm độ lớn của vận tốc góc $\omega(t)$ theo thời gian, biết rằng sự thay đổi vận tốc góc của rocket stage trong một chu kỳ quay trên quỹ đạo là không đáng kể.

1.0pt

C.6 Tìm tỉ số giữa chu kỳ quay T trên quỹ đạo và chu kỳ quay T_s của rocket stage 1.0pt
trong trạng thái ổn định đã được thiết lập sau một thời gian dài.

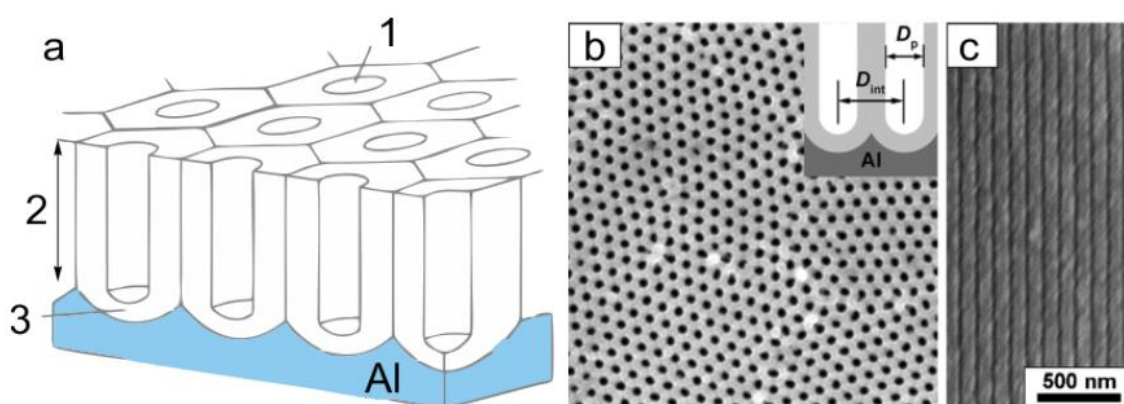
Thực nghiệm

Tinh thể photonic (20 điểm)

Mở đầu

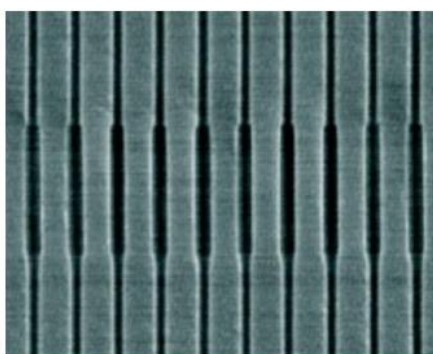
Tinh thể photonic là vật liệu có sự thay đổi tuần hoàn của chiết suất ở những khoảng cách so sánh được với bước sóng của ánh sáng. Trong phổ quang học của tinh thể photonic, có những khoảng bước sóng hẹp, mà ở đó sự truyền ánh sáng bị cấm. Những tính chất quang học đặc biệt đó được dùng để phát triển những linh kiện quang học (bộ lọc quang học, bộ phản xạ quang học) trên cơ sở tinh thể photonic.

Trong công trình nghiên cứu này, chúng ta được mời khảo sát các tính chất của các tinh thể photonic trên cơ sở màng xốp ôxit nhôm anot (anodic aluminum oxide- AAO). Cấu trúc của màng xốp AAO, được chế tạo bằng cách ôxi hóa điện hóa học (anot hóa) nhôm, có thể được coi như là một hệ các kênh hình trụ tách rời nhau, nằm vuông góc với bề mặt của màng (Hình 1).



Hình 1: (a) Sơ đồ cấu trúc của màng xốp AAO: (1) lỗ xốp, (2) lớp xốp, (3) lớp ngăn. Ảnh hiển vi điện tử của màng: (b) nhìn từ trên xuống, (c) mặt cắt [Electrochim. Acta, 2011, 56, 2378].

Bán kính lỗ xốp và khoảng cách giữa các lỗ xốp phụ thuộc vào điều kiện xử lý điện hóa, và cho phép ta thu được các cấu trúc có độ xốp thay đổi dọc theo phương vuông góc với bề mặt màng ôxit bằng cách thay đổi điện áp trong quá trình anot hóa (Hình 2).



Hình 2: Ảnh hiển vi điện tử của mặt cắt của ôxit nhôm anot với đường kính lỗ xốp thay đổi [Nat.Mater., 2006, 5, 741].

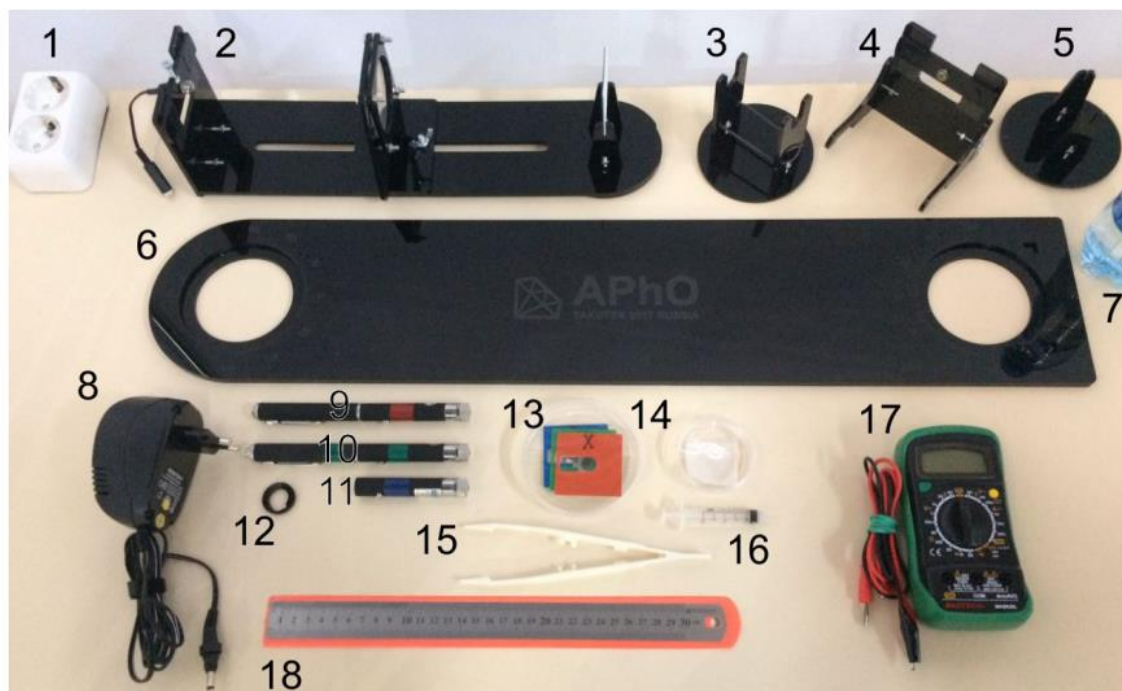
Đường kính lỗ xốp của các mẫu được nghiên cứu trong công trình này nhỏ hơn 30 nm. Môi trường xốp với các lỗ xốp có đường kính nhỏ như vậy trở nên liên tục với các sóng điện từ trong dải quang học, và do đó, nó có thể được đặc trưng bởi chiết suất hiệu dụng (lấy trung bình theo thể tích).

Sự thay đổi độ xốp của lớp oxit dẫn đến sự thay đổi về chiết suất. Cần nhớ rằng chiết suất của các mẫu được nghiên cứu thay đổi tuần hoàn chỉ theo một phương, đó là phương của pháp tuyến với bề mặt màng. Vì vậy, các mẫu được nghiên cứu là các *tinh thể photonic một chiều*.

Cần phải chỉ ra rằng các màng mỏng bằng AAO với đường kính lỗ xốp đồng đều thì trong suốt về quang học, còn các tinh thể photonic trở nên có màu là do sự giao thoa ánh sáng bên trong cấu trúc lớp.

Trong quá trình nghiên cứu này, em sẽ thực hiện các khảo sát quang học với ba mẫu tinh thể photonic trên cơ sở AAO có các cấu trúc với độ phức tạp khác nhau.

Dụng cụ



Hình 3. Dụng cụ bày trên mặt bàn.

1. Ổ lấy điện
2. Cánh tay nhiều xạ dùng cho các phép đo phổ
3. Giá đỡ laze với dây chun
4. Photodiốt với giá đỡ
5. Giá đỡ mẫu
6. Bàn quang học chính gắn các thước đo góc.
7. Nước đựng trong chai
8. Nguồn điện một chiều (bộ đổi điện DC)
9. Laze đỏ (red) (bước sóng 659 nm)
10. Laze xanh lục (green) (bước sóng 530 nm)
11. Laze xanh lam (blue) (bước sóng 400 nm)

Laze là nguy hiểm! Không được chiếu laze vào mắt hoặc nhìn vào chùm tia laze trong bất kì tình huống nào. Cần thận với các chùm tia laze phản xạ!

12. Khóa nút bật tắt laze

13. Hộp đựng ba mẫu tinh thể photonic đặt trên các khung hình vuông có màu khác nhau

**Tinh thể photonic rất dễ vỡ! Không được chạm vào tinh thể photonic!
Chỉ cầm tay vào khung mẫu! Mẫu không được cấp lại!**

14. Hộp đựng tấm kính phủ

Thủy tinh rất dễ vỡ! Hãy dùng kẹp để giữ tấm kính phủ.

15. Kẹp để gắp tấm kính phủ

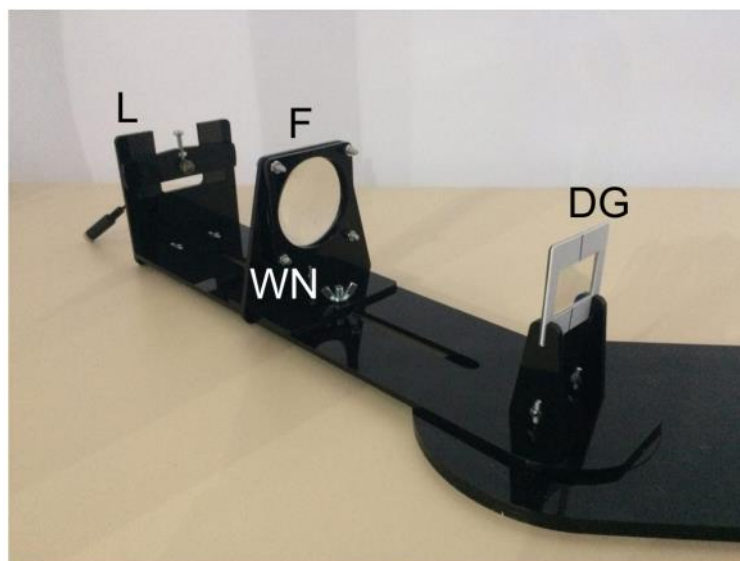
16. Bơm tiêm

17. Đồng hồ đo điện đa năng với các dây nối

18. Thước đo

Cánh tay nhiều xạ

Với các phép đo phổ, em sẽ cần dùng cánh tay nhiều xạ (Hình 4) để thu được các bước sóng khác nhau. Cánh tay nhiều xạ gồm một đèn dây tóc (L), một cách tử nhiễu xạ (DG) trong giá đỡ, và một thấu kính (F) có thể dịch chuyển được giữa chúng. Để lắp cánh tay nhiều xạ, hãy đặt cái đĩa vào lỗ bên trái của bàn quang học chính.



Hình 4: Cánh tay nhiều xạ

Lúc đầu đèn đã đặt ở giữa, nhưng em có thể dịch chuyển nó nếu cần. Hãy chắc chắn là sợi dây tóc nằm thẳng đứng để thu được vạch phổ mảnh trên cách tử nhiễu xạ.

Em có thể thay đổi góc hội tụ cho chùm sáng bằng cách dịch chuyển thấu kính. Nới lỏng vít có tai (WN), trượt giá đỡ thấu kính và vặn chặt vít lại (đừng vặn chặt quá, chỉ cần vặn nhẹ là đủ để giữ cho thấu kính không dịch chuyển).

Cấp điện cho đèn và các laze

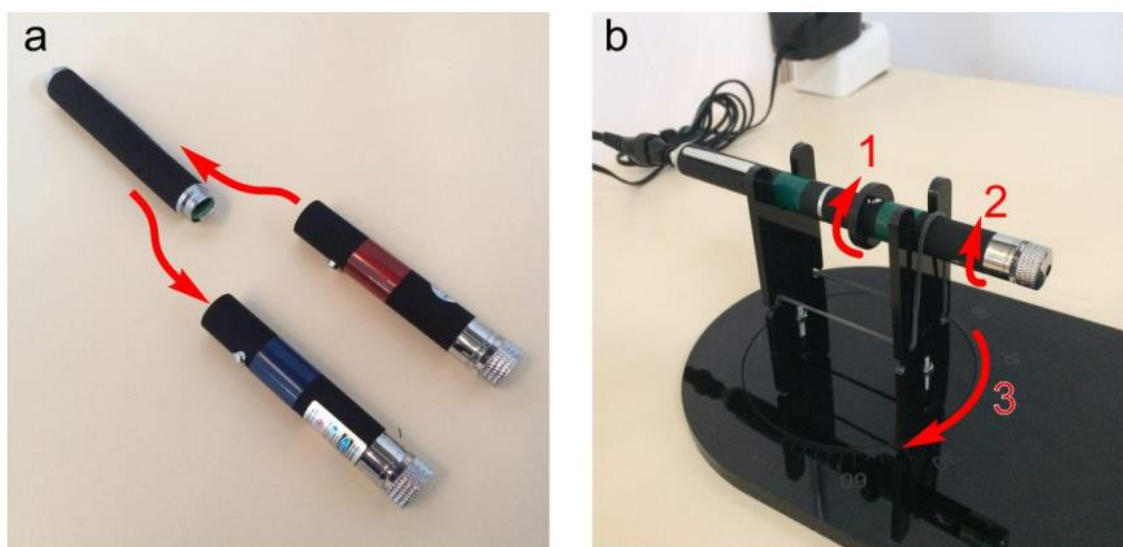
Để cấp điện cho đèn, hãy cắm nguồn điện một chiều (bộ đổi điện DC) vào ổ cắm ở trên bàn. Nối nguồn một chiều vào đuôi lấy điện của đèn hay laze. Cách mắc cực điện là quan trọng đối với laze và đã được lắp đặt sẵn.

Laze

Em được cấp ba laze: đỏ (red) ($\lambda = 659 \text{ nm}$), xanh lục (green) ($\lambda = 530 \text{ nm}$) và xanh lam (blue) ($\lambda = 400 \text{ nm}$), được đánh dấu bằng băng dính màu.

Laze là nguy hiểm. Không được chiếu laze vào mắt hoặc nhìn vào chùm tia laze trong bất kì tình huống nào! Hãy cẩn thận với các chùm tia laze phản xạ!

Laze đỏ và laze xanh lam dùng chung đuôi lấy điện. Khi đổi từ laze đỏ sang laze xanh lam, hãy tháo đuôi ra khỏi laze đỏ và vặn nó vào laze xanh lam (Hình 5a).



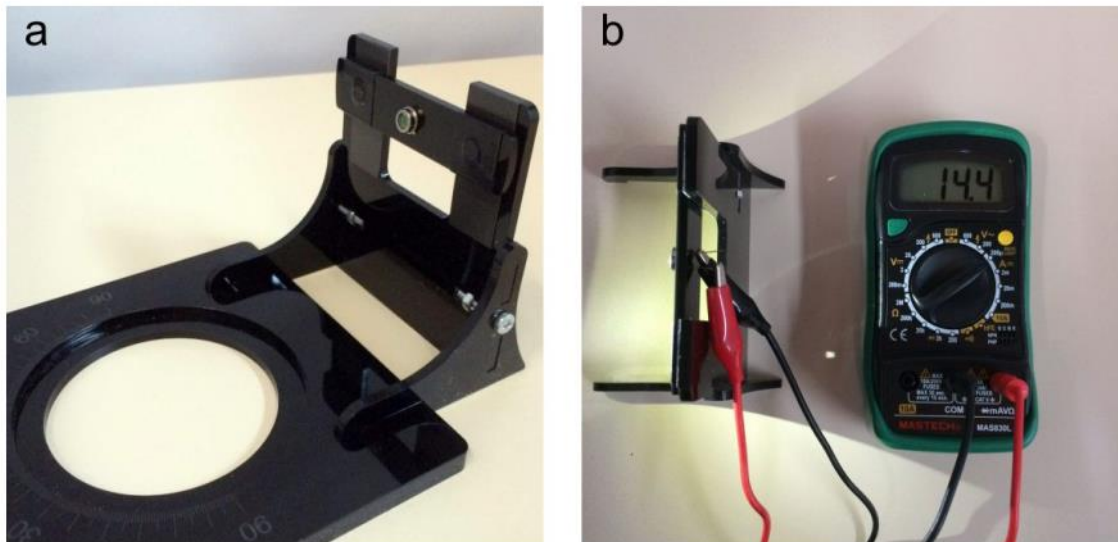
Hình 5: (a) Chuyển đổi laze vào đuôi lấy điện. (b) Chỉnh chùm tia laze.

Trong các thí nghiệm đo quang học, lắp khóa nút bật tắt vào laze, đặt laze lên giá đỡ và cố định laze bằng sợi dây chun (Hình 5b). Đặt đĩa của giá đỡ vào lỗ bên trái của bàn quang học chính. Xoay khóa nút bật tắt để bật laze (1).

Em có thể cần chỉnh chùm tia laze. Hãy bắt đầu bằng cách quay laze quanh trục của nó cho đến khi chùm tia nằm trong mặt phẳng nằm ngang (2). Sau đó, quay đĩa của giá đỡ để chỉnh chùm tia vào bàn quang học (3).

Photodiốt

Với các thí nghiệm đo quang học, em sẽ cần dùng laze và photodiốt để đo cường độ ánh sáng truyền qua. Giá đỡ photodiốt có các chân mà em có thể cắm vào các khe trên bàn quang học chính (Hình 6a).



Hình 6: (a) Lắp đặt photodiốt. (b) Mắc đồng hồ đo điện đa năng.

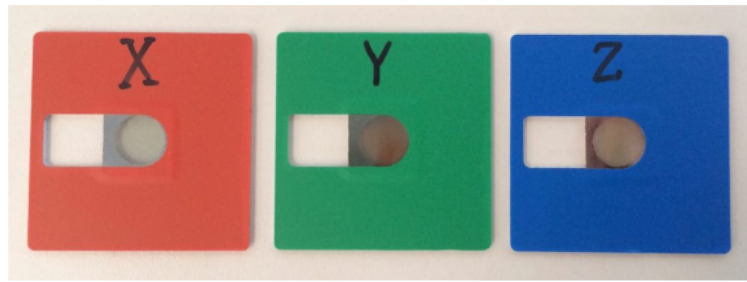
Photodiốt được gắn vào giá đỡ nhờ nam châm và có thể chỉnh phù hợp với chùm tia laze.

Để tiến hành thí nghiệm với photodiốt, hãy nối nó vào đồng hồ đo điện đa năng ở chế độ đo dòng một chiều (μA) (Hình 6b). Dòng của photodiốt tỉ lệ với cường độ ánh sáng tới, do đó, ta đo cường độ sáng theo đơn vị μA .

Các mẫu tinh thể photonic

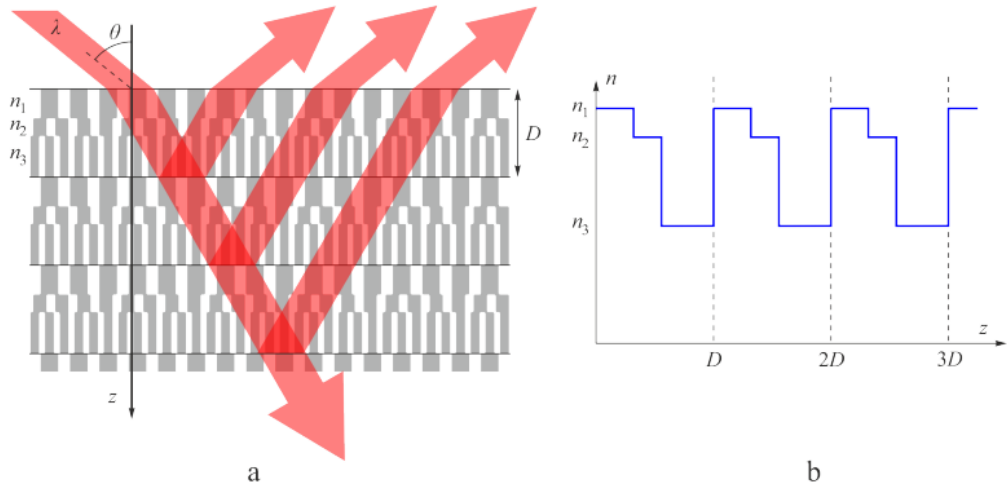
**Tinh thể photonic rất dễ vỡ! Không được chạm vào tinh thể photonic!
Chỉ cầm vào khung của mẫu!**

Em được cấp ba mẫu tinh thể photonic khác nhau. Mặt trước của chúng có màu khác nhau và có một kí tự là tên của mẫu (X, Y or Z) ở trên mặt. Khi mẫu vào giá đỡ, chú ý sao cho chùm sáng chiếu vào mặt trước của mẫu, và kí tự nằm ở phía trên. Khi tiến hành phép đo, hãy đặt đĩa của giá đỡ vào lỗ bên phải của bàn quang học chính. Hãy chắc chắn rằng em quay đĩa giá đỡ theo chiều kim đồng hồ, để cho chùm tia phản xạ chuyển hướng.



Hình 8: Các mẫu tinh thể photonic

Định luật Bragg-Snell



Hình 8. (a) Cấu trúc của tinh thể photonic. (b) Sự phụ thuộc vào z của chiết suất $n(z)$.

Các mẫu tinh thể photonic được khảo sát trong bài này gồm các lớp có chiết suất n_i khác nhau. Chiết suất thay đổi một cách tuần hoàn dọc theo trục z với chu kỳ D và không phụ thuộc vào bước sóng λ . Ta gọi n là chiết suất trung bình chung và hiệu chiết suất là $\Delta n = n_{\max} - n_{\min}$. Trong tinh thể AAO

$$\Delta n \ll n. \quad (1)$$

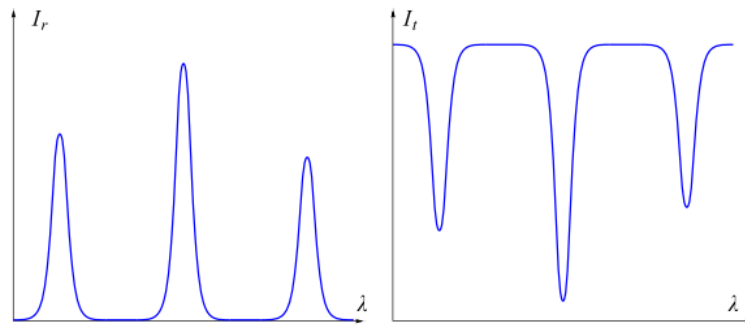
Ta xét chùm tia tới song song, đơn sắc, có bước sóng λ và cường độ sáng không đổi chiếu vào tinh thể photonic. Góc tới là θ . Các chùm tia phản xạ từ các lớp khác nhau giao thoa với nhau. Kết quả là phản xạ gương có các cực đại ở các góc θ thỏa mãn phương trình:

$$2D\sqrt{n^2 - \sin^2\theta} = m\lambda, \quad (2)$$

trong đó $m = 1, 2, \dots$ là một số nguyên biểu thị bậc giao thoa.

Phương trình (2) được gọi là **định luật Bragg-Snell**. Các cực tiểu truyền qua được quan sát ở cùng các góc θ_i đó. Nếu góc θ không đổi, và bước sóng λ biến thiên, thì định luật Bragg-Snell có thể được coi như

một phương trình để tìm λ . Hình 9 cho thấy phác thảo phổ phản xạ và phổ truyền qua. Mỗi cực tiểu truyền qua ứng với một giá trị nguyên m nào đó, theo định luật Bragg-Snell.



Hình 9: Phổ phản xạ và phổ truyền qua.

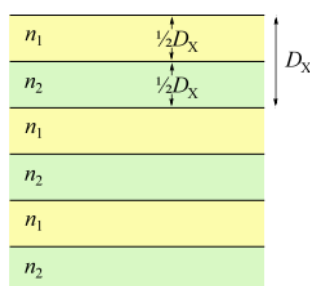
Các bước sóng thỏa mãn định luật Bragg-Snell (2) sẽ được gọi là **các bước sóng của cực tiểu truyền qua**. Các bước sóng của cực tiểu truyền qua phụ thuộc vào góc tới θ . Các bước sóng của cực tiểu truyền qua với $\theta = 0$ sẽ được gọi là các **bước sóng vuông góc của cực tiểu truyền qua** của một tinh thể photonic cụ thể.

Em không cần phải đánh giá sai số trong bài này.

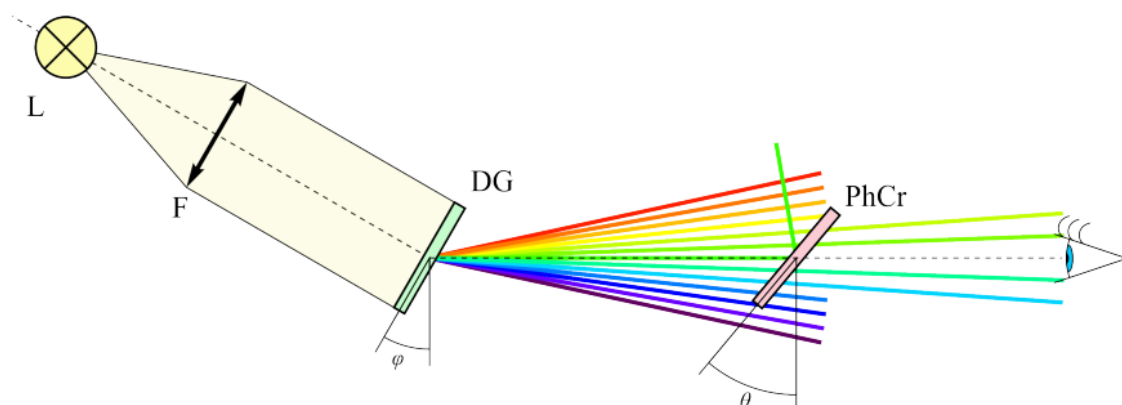
Phần A. Mẫu X. Các phép đo phổ (3.5 điểm)

Mẫu X có cấu trúc đơn giản (Hình 10). Chu kỳ của nó gồm hai lớp có cùng độ dày $D_X/2$ và có chiết suất n_1 và n_2 gần bằng nhau:

$$n_1 - n_2 = \Delta n \ll n_X = \frac{n_1 + n_2}{2} \quad (3)$$



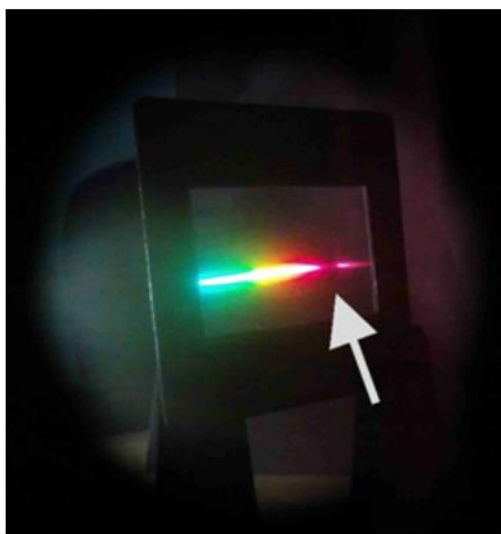
Hình 10: Cấu trúc của Mẫu X.



Hình 11. Bố trí thí nghiệm cho các phép đo phổ: (F) thấu kính, (L) đèn, đặt tại tiêu điểm của thấu kính, (DG) cách tử nhiễu xạ, (PhCr) tinh thể photonic.

1. Lắp đặt **thí nghiệm cho phép đo phổ**. Đặt cánh tay nhiễu xạ vào lỗ bên trái của bàn quang học chính;
2. Bật đèn. Quan sát cách tử nhiễu xạ từ đầu kia của bàn quang học chính. Quay cánh tay nhiễu xạ đến khi em nhìn thấy bậc nhiễu xạ đầu tiên (dải màu cầu vồng).
3. Lắp giá đỡ mẫu vào lỗ bên phải của bàn quang học chính (đặt dấu tam giác vào điểm không). Đặt mẫu X vào giá đỡ (ánh sáng phải chiếu vào mặt trước màu đỏ). Quan sát dải màu cầu vồng của cách tử nhiễu xạ qua mẫu.

4. Nếu em quay dần mẫu theo chiều kim đồng hồ, em sẽ nhìn thấy một vùng tối trong phổ truyền qua (Hình 12). Đó là **cực tiểu truyền qua** ứng với $m = 1$ trong định luật Bragg-Snell. Khi em quay mẫu, bước sóng của cực tiểu truyền qua thay đổi.



Hình 12. Ảnh của phổ truyền qua của mẫu X. Mũi tên màu trắng chỉ ra cực tiểu truyền qua (vùng tối trong dải cầu vồng).

5. Bằng cách di chuyển thấu kính, em có thể thấy phần rộng hơn hoặc hẹp hơn của phổ. Để đo được chính xác, hãy đặt thấu kính sao cho đèn nằm ở tiêu điểm của thấu kính.

A.1	Ánh sáng chiếu vuông góc với bề mặt của cách tử nhiễu xạ. Viết phương trình về mối liên quan giữa góc nhiễu xạ φ và bước sóng λ khi có cực đại nhiễu xạ. Chu kỳ cách tử là $h = 1000 \text{ nm}$. Em có thể viết câu trả lời mà không cần phải chứng minh.	0.1pt
------------	---	-------

A.2	Với mỗi góc nhiễu xạ φ , em hãy xác định góc tới θ tương ứng mà tại đó em quan sát thấy cực tiểu truyền qua. Ghi lại giá trị góc θ khi cực tiểu truyền qua (vùng tối) được quan sát thấy ở giữa của cửa sổ cách tử.	1.0pt
------------	---	-------

A.3	Tìm các biến mới thay cho θ và φ để có được đồ thị liên quan đến hai góc đó dưới dạng tuyến tính. Vẽ đồ thị theo các biến mới này.	1.5pt
------------	---	-------

A.4	Hãy xác định chu kỳ D_X và chiết suất trung bình n_X của mẫu.	0.9pt
------------	---	-------

Phần B. Mẫu X. Các phép đo với lazer (5.0 điểm)

Độ xốp của tinh thể p là tỉ phần thể tích bị chiếm bởi không khí (trong các kênh). Chiết suất hiệu dụng của tinh thể có thể biểu thị theo chiết suất của không khí $n_a = 1$ và chiết suất của ôxít nhôm n_{AAO} :

$$n_{dry} = \sqrt{pn_a^2 + (1-p)n_{AAO}^2}. \quad (4)$$

Nếu các kênh chứa đầy nước, chiết suất của tinh thể sẽ là:

$$n_{wet} = \sqrt{pn_w^2 + (1-p)n_{AAO}^2}, \quad (5)$$

với $n_w = 1.33$ là chiết suất của nước.

Trong phần này, ta xác định độ xốp p của tinh thể photonic bằng việc so sánh số liệu thực nghiệm thu được với mẫu khô (kênh chứa không khí) và mẫu ướt (kênh chứa nước). Chúng ta sẽ bố trí thí nghiệm thực hiện các phép đo với lazer.

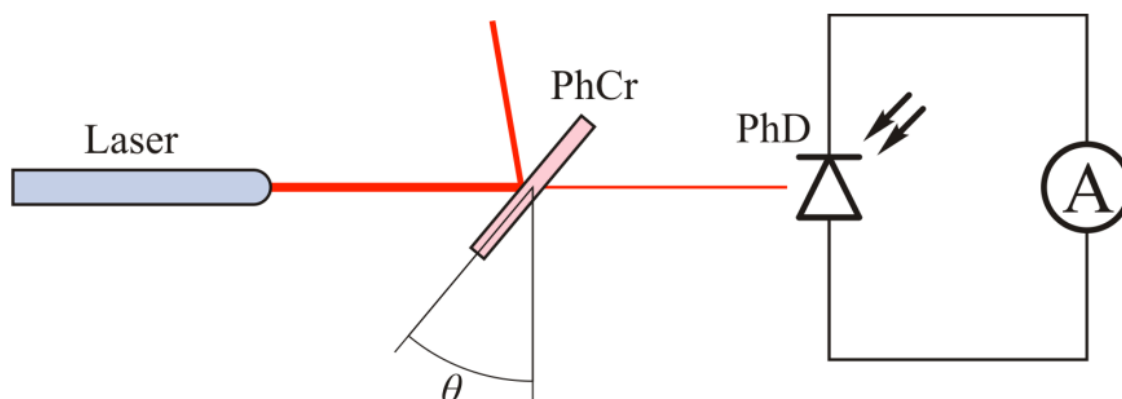
B.1 Chọn đèn lazer sao cho cực tiểu truyền qua có thể quan sát được ở bước sóng λ của lazer đó với một vài góc quay mẫu θ . Viết giá trị bước sóng lazer mà em đã chọn. 0.1 pt

Dùng lazer đã chọn cho tất cả các thí nghiệm ở phần B.

Lắp đặt **hệ thí nghiệm đo với lazer** (Hình. 13).

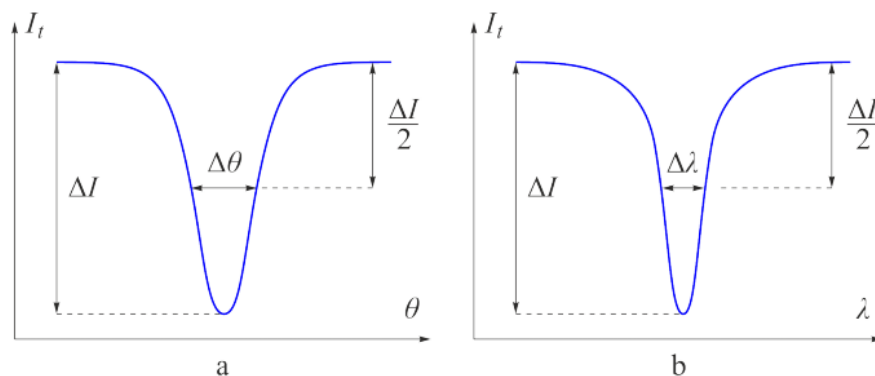
Không được nhìn trực tiếp vào chùm lazer! Cẩn thận với các chùm phản xạ, chúng không được chiếu vào mắt của em. Thậm chí cả việc nhìn trong thời gian ngắn cũng làm hại mắt. Không được để đầu của em ngang với chùm lazer khi em tiến hành các phép đo.

Trước khi lấy bất kì số liệu nào trong phần thí nghiệm với lazer, hãy chắc chắn là cường độ sáng lazer không đổi. Nếu không, hãy đợi 3-5 phút.



Hình 13. Lắp đặt phép đo với lazer: (Laser) lazer, (PhCr) tinh thể photonic, (PhD) photodiốt, được mắc với ampe kế. Dòng đo bằng ampe kế tỉ lệ với cường độ sáng chiếu vào photodiốt.

B.2	Đo cường độ ánh sáng I_t (đơn vị là μA) của laze sau khi truyền qua tinh thể photonic khi thay đổi góc θ .	1.0pt
B.3	Vẽ đồ thị $I_t(\theta)$.	1.0pt
B.4	Hãy xác định góc tới θ_1 , ứng với cực tiểu truyền qua tại bước sóng laze. Xác định độ rộng của vùng lõm $\Delta\theta_1$ trong đồ thị $I_t(\theta)$ tại mức ứng với nửa độ sâu (Hình. 14a).	0.2pt



Hình 14. Độ rộng của vùng lõm độ truyền qua tại nửa độ sâu theo (a) góc tới, (b) bước sóng.

B.5	Dùng định luật Bragg-Snell (2), hãy xác định bước sóng vuông góc của cực tiểu truyền qua λ_X cho mẫu X. Sử dụng giá trị n_X từ phần A, θ_1 từ B.4 và bước sóng laze λ .	0.2pt
------------	--	-------

Khi ánh sáng chiếu vuông góc với tinh thể ($\theta = 0$), độ rộng phổ $\Delta\lambda$ (Hình. 14b) của cực tiểu truyền qua, ứng với $m = 1$, có thể biểu thị theo n và Δn dưới dạng:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{2}{\pi} \frac{\Delta n}{n}. \quad (6)$$

Tính Δn_X cho mẫu X, giả thiết rằng độ rộng phổ tỉ đối của cực tiểu truyền qua $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ không thay đổi khi quay.

B.6	Tính hiệu chiết suất Δn_X của mẫu X.	0.6pt
------------	--	-------

Nhỏ một ít nước lên mặt của mẫu X. Cần thận đặt tấm kính phủ lên mặt mẫu để ngăn nước bay hơi trong quá trình làm thí nghiệm. Có một lớp ôxít dày 15 nm ở mặt sau của mẫu để ngăn không cho nước chảy ra ngoài.

Hãy cẩn thận! Các mẫu rất dễ vỡ. Độ dày của mẫu là một phần tư đường kính sợi tóc. Cầm mẫu vào khung. Tấm kính phủ cũng rất dễ vỡ! Hãy lấy nó bằng kẹp.

B.7 Hãy xác định góc tới θ_2 ứng với cực tiểu truyền qua của mẫu ướt ở bước sóng laze. 0.3pt

B.8 Xác định độ xoắn trung bình p_X của mẫu X và chiết suất của ôxít nhôm n_{AOO} . 1.0pt

B.9 Hãy xác định độ xoắn trung bình p_1 và p_2 của các lớp trong mẫu X. 0.6pt

Phần C. Mẫu Y. Một vài cực tiểu truyền qua (4.5 điểm)

Cấu trúc mẫu Y phức tạp hơn cấu trúc mẫu X. Mẫu Y có 4 cực tiểu truyền qua trong vùng phổ ánh sáng nhìn thấy (400–800 nm) ứng với 4 giá trị nguyên liên tiếp m trong định luật Bragg-Snell (2). Chiết suất của mẫu Y và X là như nhau $n_Y = n_X$.

C.1 Mặc dù có 4 cực tiểu truyền qua của mẫu Y, em chỉ quan sát thấy 3 khi thí nghiệm với phép đo phổ. Sử dụng các phép đo phổ (xem phần A), hãy xác định các bước sóng vuông góc của ba cực tiểu truyền qua này $\lambda_1^{sp}, \lambda_2^{sp}, \lambda_3^{sp}$. 0.6pt

Bây giờ tiến hành phép đo với laze cho mẫu Y (xem phần B). Thí nghiệm với laze cho phép em xác định bước sóng vuông góc của các cực tiểu truyền qua với độ chính xác cao hơn. Hơn nữa, em cũng có thể xác định các giá trị của độ truyền qua mà em cần dùng trong phần E.

C.2 Với laze đỏ, đo cường độ sáng truyền qua I_{red} theo góc quay mẫu θ . 0.5pt

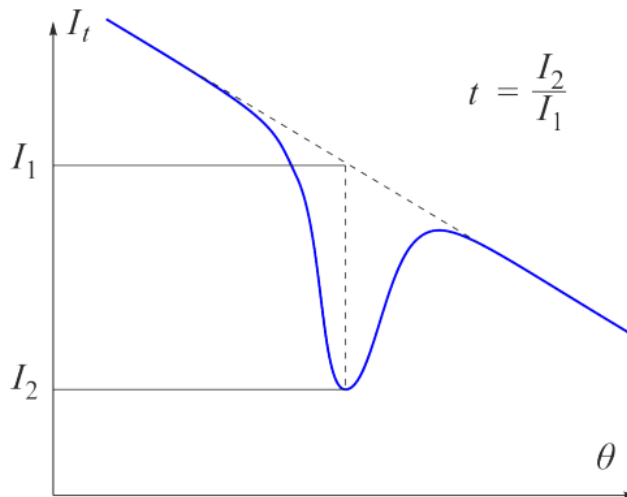
C.3 Với laze xanh lục (green), đo cường độ sáng truyền qua I_{green} theo góc quay mẫu θ . 0.5pt

C.4 Với laze xanh lam (blue), đo cường độ sáng truyền qua I_{blue} theo góc quay mẫu θ . 0.5pt

C.5 Sử dụng các số liệu thu được từ C.2–C.4, hãy xác định các bước sóng vuông góc của 4 cực tiểu truyền qua. 0.6pt

C.6 Hãy xác định các giá trị nguyên m ứng với 4 bước sóng vuông góc thu được trong phần C.5. Em có thể vẽ đồ thị nếu cần. 1.0pt

C.7 Hãy xác định chu kì D_Y của mẫu Y theo đơn vị nanomet. 0.2pt



Hình 15. Xác định độ truyền qua t từ đồ thị $I(\theta)$

- C.8** Xác định độ truyền qua t của 4 cực tiểu truyền qua của mẫu Y (Hình 15). Các giá trị này sẽ được sử dụng trong phần E để xác định cấu trúc của mẫu Y. Em có thể vẽ các đồ thị nếu cần, mặc dù không bắt buộc. 0.6pt

Phần D. Mẫu Z. Các cực tiểu truyền qua bị thiếu (4.5 điểm)

Định luật Bragg-Snell (2) xác định các góc và các bước sóng mà tại đó cực tiểu truyền qua có thể quan sát được. Độ truyền qua t phụ thuộc vào cấu trúc bên trong của mỗi chu kỳ. Ở một mẫu nào đó có cấu trúc đặc biệt, có thể xảy ra tình huống trong đó một số cực tiểu truyền qua được dự đoán từ định luật Bragg-Snell nhưng lại có $t = 1$ và do đó không thể quan sát được. Ta gọi những cực tiểu truyền qua này là **các cực tiểu truyền qua bị thiếu**. Ta gọi là cực tiểu không bị thiếu là cực tiểu **thấy được**.

Ta coi cực tiểu truyền qua là bị thiếu nếu nó không thấy được trong các thí nghiệm đo phổ hoặc với laze tại vị trí được dự đoán từ định luật Bragg-Snell. Mẫu Y không có cực tiểu bị thiếu. Ngược lại, mẫu Z có 2 cực tiểu bị thiếu trong phổ ánh sáng nhìn thấy. Điều này có nghĩa không phải tất cả các cực tiểu truyền qua thấy được ứng với các giá trị m kế tiếp nhau.

Chiết suất trung bình của các mẫu X and Z là như nhau: $n_Z = n_X$.

- | | | |
|------------|---|-------|
| D.1 | Xác định các bước sóng vuông góc λ_Z của các cực tiểu truyền qua thấy được của mẫu Z. Dùng các thí nghiệm đo phổ và đo với laze. Mô tả thí nghiệm của em bằng các hình vẽ và các phương trình . | 1.2pt |
| D.2 | Hãy xác định các giá trị nguyên m ứng với các cực tiểu truyền qua thấy được. Em có thể vẽ đồ thị nếu cần. | 2.0pt |
| D.3 | Hãy xác định chu kỳ D_Z của mẫu Z với đơn vị nanomet. | 0.3pt |
| D.4 | Hãy xác định các cực tiểu truyền qua bị thiếu. Tìm ra giá trị m' của chúng từ định luật Bragg-Snell và tìm bước sóng vuông góc λ'_Z . | 1.0pt |

Phần E. Các mẫu Y và Z. Cấu trúc bên trong của chu kì tuần hoàn. (2.5 điểm)

Định luật Bragg-Snell (2) mô tả quan hệ giữa các góc và các bước sóng, mà ở đó có thể quan sát thấy cực đại phản xạ và cực tiểu truyền qua (Hình 9). Độ truyền qua phụ thuộc vào cấu trúc bên trong của chu kì tuần hoàn.

Lí thuyết đơn giản về các độ phản xạ được thảo luận trong phần này. Xét ánh sáng tới theo phương vuông góc ($\theta = 0$). Trong trường hợp này, định luật Bragg-Snell có dạng:

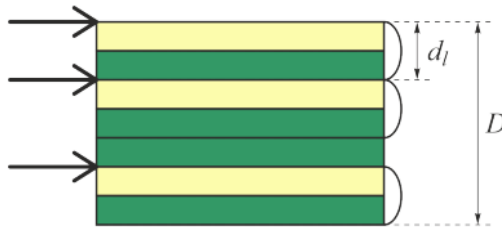
$$2Dn = m\lambda \quad (7)$$

với D là chu kì tuần hoàn của tinh thể.

Trong mô hình này, ta giả thiết ánh sáng chỉ phản xạ tại các mặt phân cách nơi ánh sáng đi từ lớp có chiết suất cao sang lớp có chiết suất thấp. Các mặt phân cách mà ở đó xảy ra phản xạ trong mô hình này được kí hiệu trong Hình 16 bằng các mũi tên.

Các mẫu X, Y, và Z gồm các lớp có cùng độ dày và 2 giá trị chiết suất khác nhau, do đó, ta sẽ chỉ xét trường hợp riêng này.

Gọi d_l là độ dày của lớp kép, D là chu kỳ tinh thể, δ_j là khoảng cách từ điểm bắt đầu của chu kì tuần hoàn đến mặt phân cách thứ j mà ở đó xảy ra phản xạ.



Hình 16. Cấu trúc minh họa chu kì lặp lại D của tinh thể. Các lớp màu xanh lục đậm có chiết suất cao, các lớp màu xanh lục nhạt có chiết suất thấp hơn. Tất cả các lớp có cùng độ dày $d_l/2$. Các mặt phân cách phản xạ trong mô hình được đánh dấu bằng các mũi tên.

Ví dụ, cấu trúc trên Hình 16 có chu kì tinh thể $D = 3.5d_l$, khoảng cách tới các mặt phân cách phản xạ là $\delta_1 = 0, \delta_2 = d_l, \delta_3 = 2.5d_l$

Với chùm tia phản xạ từ lớp j độ sớm pha là

$$\varphi_{j_m} = 2\pi \frac{2\delta_j n}{\lambda} = 2\pi m \frac{\delta_j}{D} \quad (8)$$

Xét giao thoa giữa các chùm tia phản xạ từ một chu kì, ta suy ra rằng cường độ phản xạ của cực đại phản xạ m của định luật Bragg-Snell là:

$$I_{refl,m} \sim \left| \sum_j \exp(i\varphi_{j_m}) \right|^2 \quad (9)$$

ở đây i – đơn vị ảo.

Mô hình đang xét ở trên là không đúng về mặt định lượng. Nhưng nó giữ đúng thứ tự của các cực đại phản xạ: em có thể so sánh độ lớn của các cực đại và nói cường độ của cực đại nào lớn hơn. Nếu cực đại

phản xạ là lớn, thì độ truyền qua t của cực tiểu truyền qua là nhỏ. Nếu cực tiểu phản xạ là đủ nhỏ, thì ta coi nó như là cực tiểu truyền qua bị thiếu.

Trong phụ lục có một bảng các giá trị I_m/I_0 được tính theo phương trình (9) với giá trị nguyên m từ 1 đến 20. Cường độ I_0 được tính theo (9) khi $m = 0$. Trong trường hợp này, tất cả các chùm phản xạ giao thoa không dịch pha và gây ra cực đại. Các giá trị I_m/I_0 được biểu thị ra %.

Các cấu trúc của mẫu Y và Z có mặt trong bảng này.

E.1	Đối chiếu các độ truyền qua của mẫu Y nhận được trong C.8 với bảng phụ lục. Hãy xác định cấu trúc của mẫu Y. Viết tên của cấu trúc trong phiếu trả lời.	1.2pt
E.2	Hãy xác định cấu trúc của mẫu Z. Viết tên của cấu trúc trong phiếu trả lời.	1.3pt

Phụ lục

Các phương án cấu trúc có thể có của mẫu Y và Z. Tên của cấu trúc được chỉ ra dưới các hình vẽ. Các số trong bảng là I_m/I_0 .

m	i5-5	i3-3	i2-1	n-3	n-6	n-9	hi5-5	h5-5
1	1	3	11	3	1	0	1	0
2	0	0	33	7	1	0	0	0
3	1	6	11	56	1	0	1	0
4	0	0	33	56	2	0	0	0
5	2	41	11	7	6	1	2	0
6	0	0	100	3	48	1	1	0
7	5	41	11	100	48	2	3	0
8	0	0	33	3	6	5	6	0
9	41	6	11	7	2	45	36	11
10	0	0	33	56	1	45	1	72
11	41	3	11	56	1	5	32	15
12	0	100	100	7	1	2	10	2
13	5	3	11	3	100	1	1	0
14	0	0	33	100	1	1	2	0
15	2	6	11	3	1	0	0	0
16	0	0	33	7	1	0	1	0
17	1	41	11	56	2	0	0	0
18	0	0	100	56	6	0	6	7
19	1	41	11	7	48	100	28	27
20	100	0	33	3	48	0	25	23

Bài lý thuyết 1

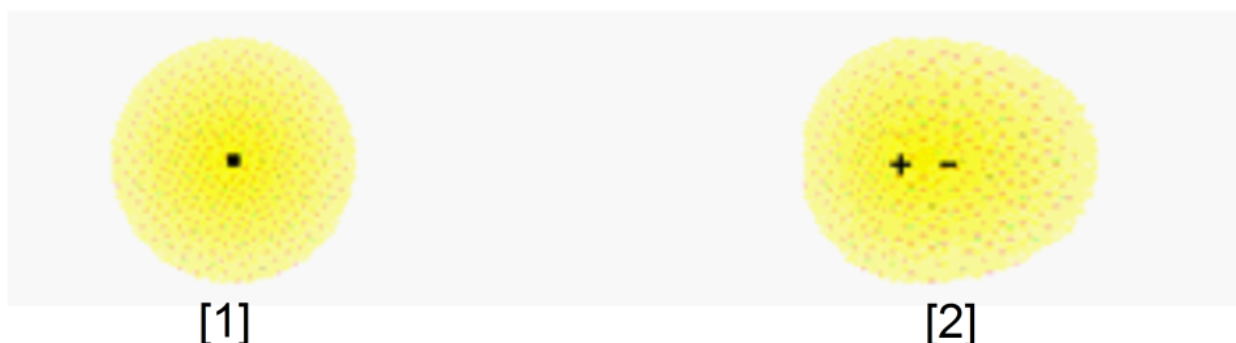
Bẫy quang học các nguyên tử trung hòa (12 điểm)

Các bẫy quang học là những công cụ rất linh hoạt để tạo ra các hệ nguyên tử siêu lạnh mà ngày nay chúng đóng vai trò rất quan trọng trong vật lý lượng tử và chúng được kỳ vọng sẽ có những ứng dụng nổi bật trong công nghệ cũng như trong các phép đo lượng tử. Bằng cách chiếu chùm tia sáng laser vào một nhóm các nguyên tử trung hòa, chúng ta có thể bắt giữ và làm lạnh các nguyên tử này. Khi các nguyên tử bị làm lạnh đến gần nhiệt độ không tuyệt đối (0 K), chúng sẽ biểu hiện như một hệ vĩ mô lượng tử và hệ này được gọi là hệ ngưng tụ Bose-Einstein (BEC).

Trong bài toán này em sẽ nghiên cứu những khái niệm cơ bản của bẫy quang học các nguyên tử trung hòa và một trong những dấu hiệu nhận biết hệ BEC trong các thực nghiệm với các nguyên tử natri.

Một nguyên tử natri trung hòa có thể được mô tả như một nguyên tử gồm một lõi mang điện tích dương e được bao quanh bởi đám mây electron đồng nhất mang điện tích âm $-e$. Khối lượng của phần lõi lớn hơn rất nhiều so với khối lượng của đám mây electron. Khi không có điện trường ngoài, tâm của lõi và tâm của đám mây electron trùng nhau. Điện trường của chùm laser tương tác với lõi mang điện dương và đám mây electron của nguyên tử và do đó chúng tạo thành một lưỡng cực điện. Khi đó lưỡng cực điện này sẽ tương tác với điện trường của chùm laser và vì thế hình thành một thế năng lưỡng cực điện của nguyên tử. Chúng ta nói rằng nguyên tử nhận thấy một thế năng quang học. Kết quả của tương tác này phụ thuộc vào cường độ $I(\vec{r})$ cũng như tần số của chùm tia laser mà chúng ta sử dụng. Bằng cách chọn chùm laser có cường độ và tần số thích hợp, chúng ta có thể tạo ra một bẫy theo kiểu hố thế năng để giam giữ các nguyên tử trung hòa.

Chúng ta bắt đầu bằng việc khảo sát sự phân cực của một nguyên tử trung hòa được đặt trong một điện trường đều $\vec{E}_0 = E_0 \hat{u}$ ở đó $\hat{u}$ là vectơ đơn vị và E_0 là cường độ điện trường. Lúc này một *mômen lưỡng cực* $\vec{p}_0 = e\ell\hat{u} = \alpha E_0 \hat{u}$ được hình thành. Ở đây, ℓ là khoảng cách từ tâm của phần mang điện tích dương đến tâm của phần mang điện tích âm, và α được gọi là *độ phân cực*.



Hình 1. Sự phân bố đám mây electron. [1] Phân bố dạng hình cầu của đám mây electron xung quanh lõi nguyên tử; [2] Đám mây electron dịch chuyển (phân tách của + và - trong nguyên tử) trong điện trường.

1 (1.5 điểm)

Ban đầu điện trường ngoài bằng không. Sau đó cường độ điện trường được tăng từ 0 đến E_0 một cách rất chậm để điện trường có thể được coi như không phụ thuộc vào thời gian trong câu hỏi này. Giá trị tức thời của cường độ điện trường ngoài được kí hiệu là $\vec{E} = E\hat{u}$.

1.1 Tìm công suất hấp thụ trường ngoài tức thời của nguyên tử theo các đại lượng $\vec{E}$ và $\vec{p}$, trong đó $\vec{p}$ là tốc độ thay đổi của mô men lưỡng cực. 0.75pt

1.2 Tính công toàn phần do trường ngoài thực hiện lên nguyên tử khi điện trường tăng từ 0 đến $E = E_0$, từ đó tìm ra biểu thức của thể năng lưỡng cực $U_{induced}$ theo các đại lượng $\vec{E}_0$ và $\vec{p}_0$. 0.75pt

Chú ý rằng khi điện trường ngoài bằng 0, đám mây điện tử dao động với tần số dao động tự nhiên ω_0 do quán tính và lực hồi phục Coulomb.

2 (1.0 điểm)

Trong phần này chúng ta sẽ nghiên cứu trường hợp các nguyên tử trung hòa được đặt vào trường ngoài của chùm laser thay đổi theo tọa độ và thời gian theo quy luật $\vec{E}(\vec{r}, t) = \hat{u}.E_0(\vec{r}) \cos \omega t$. Mômen lưỡng cực $\vec{p}$ sẽ dao động với tần số dao động cưỡng bức ω . Chúng ta biết rằng một mômen lưỡng cực dao động sẽ phát xạ ra bức xạ điện từ. Bằng cách đó, electron nhận được động lượng giạt lùi nó tạo ra một sức cản điện từ và dẫn đến một độ lệch pha giữa điện trường ngoài và mô men lưỡng cực. Vì vậy mô men lưỡng cực có dạng $\vec{p}(\vec{r}, t) = \hat{u}E_0(\vec{r})\alpha(\omega) \cos[\omega t + \varphi(\omega)]$. Ở đây, cả độ phân cực α và độ lệch pha φ đều phụ thuộc vào tần số cưỡng bức ω . Do có dao động tự nhiên, tất cả các đại lượng vật lý mà chúng ta quan tâm đều biểu thị qua giá trị trung bình theo thời gian của chính nó trong một chu kỳ $2\pi/\omega$ của trường laser. Giá trị trung bình theo thời gian của một đại lượng tính trong một chu kỳ của nó được định nghĩa theo công

thức $\langle f(t) \rangle = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} f(t) dt$. Từ đây về sau ta dùng ký hiệu $\langle \dots \rangle$ để ám chỉ lấy trung bình theo thời gian của đại lượng ở bên trong dấu ngoặc.

Cường độ chùm laser $I(\vec{r})$ được liên hệ với biên độ của cường độ điện trường E_0 của chùm laser theo công thức $I(\vec{r}) = \frac{\epsilon_0 c E_0^2(\vec{r})}{2}$, ở đây ϵ_0 là hằng số điện môi của chân không và c là tốc độ ánh sáng.

2.1 Tìm biểu thức của thể năng lưỡng cực điện $U_{dip}(\vec{r}) = \langle U_{dipole}(\vec{r}, t) \rangle$ theo các đại lượng α , φ , ϵ_0 , c , và $I(\vec{r})$. 1.0pt

3 (1.0 điểm)

Bên cạnh việc bắt giữ các nguyên tử trung hòa trong bẫy thông qua thể năng lưỡng cực, điện trường dao động có thể gây ra lực tán xạ lên các nguyên tử do sự hấp thụ và phát xạ ánh sáng. Quá trình tán xạ ánh sáng dẫn đến hoặc làm nóng hoặc mất nguyên tử trong bẫy và điều này có thể được đặc trưng bằng tốc độ tán xạ, nó liên hệ với số photon bị tán xạ bởi một nguyên tử trong một đơn vị thời gian và được định nghĩa bởi $\Gamma_{sc}(\vec{r}) = \frac{\langle P_{abs}(\vec{r}) \rangle}{\hbar\omega}$. Ở đây, $\langle P_{abs}(\vec{r}) \rangle$ là trung bình theo thời gian của công suất hấp thụ từ trường laser, và $\hbar\omega$ là năng lượng photon ($\hbar = h/2\pi$).

3.1 Tìm tốc độ tán xạ $\Gamma_{sc}(\vec{r})$ theo các đại lượng α , φ , ϵ_0 , c , $I(\vec{r})$, $\hbar$ và ω . 1.0pt

4 (2.0 điểm)

Cả hai đại lượng U_{dip} và $\Gamma_{sc}(\vec{r})$ đều phụ thuộc vào độ phân cực α . Để tính độ phân cực α , chúng ta sẽ sử dụng mô hình dao động một chiều dưới sự có mặt của một điện trường $\vec{E}(t) = \hat{u}E_0 \cos \omega t$. Gọi Ox là trục song song với vectơ đơn vị $\hat{u}$. Trong mô hình này chuyển động của electron bị chi phối bởi 3 lực:

i) Lực hồi phục $-m_e \omega_0^2 x \cdot \hat{u}$ mô tả dao động tự do với tần số tự nhiên ω_0 tương ứng với tần số dịch chuyển quang nguyên tử. Chúng ta sử dụng x để ký hiệu độ dịch chuyển của tâm phần mang điện tích âm so với tâm phần mang điện tích dương, phần mang điện tích dương này được giả thiết là đứng yên.

ii) Lực cưỡng bức của trường laser $-eE_0 \cos \omega t \cdot \hat{u}$.

iii) Lực hãm $-m_e \gamma_\omega \dot{x} \cdot \hat{u}$ bắt nguồn từ sự bức xạ của điện tích có gia tốc, và được đặc trưng bởi tốc độ hãm γ_ω phụ thuộc vào tần số.

Vì vậy phương trình chuyển động của electron có dạng $\ddot{x} + \gamma_\omega \dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{-eE_0 \cos \omega t}{m_e}$. Nghiệm của phương trình này là $x = x_0 \cos(\omega t + \varphi)$. Ở đây x_0 và φ đều được xác định.

4.1 Tìm độ phân cực α theo các đại lượng γ_ω , e , m_e , ω_0 , và ω .

2.0pt

5 (1.0 điểm)

Trên thực tế tốc độ hãm năng lượng γ_ω không phụ thuộc vào các quỹ đạo của electron. Vì thế chúng ta sẽ sử dụng một mô hình đơn giản khác mà ở đó tâm của đám mây electron chuyển động tròn khi không có trường laser nhưng với tần số ω và tốc độ v . Khi bị gia tốc, electron phát xạ một sóng điện từ với công suất được tính theo công thức Larmor $P_L = \frac{1}{6\pi\epsilon_0} \frac{e^2 a^2}{c^3}$ với a là gia tốc. Lực hãm liên hệ với tốc độ hãm γ_ω theo công thức $F_d = -m_e \gamma_\omega v$. Chúng ta cũng giả thiết rằng năng lượng toàn phần của electron lớn hơn năng lượng bị mất mát sau mỗi chu kỳ.

5.1 Tìm tốc độ hãm năng lượng γ_ω theo các đại lượng e , ϵ_0 , c , m_e , và ω .

1.0pt

6 (0.5 điểm)

Khi tần số cưỡng bức ω tiến dần đến tần số tự nhiên ω_0 , độ phân cực sẽ có giá trị lớn hơn, dẫn đến thế năng lưỡng cực sẽ lớn hơn và tốc độ tán xạ tăng lên. Do đó, bằng cách khảo sát tỉ số $U_{dip}(\vec{r})/\hbar\Gamma_{sc}(\vec{r})$, chúng ta có thể tìm được tần số laser thích hợp để giảm tốc độ tán xạ trong khi độ sâu của hố thế năng bẫy vẫn còn có giá trị hợp lý.

6.1 Gọi tốc độ hãm tại $\omega = \omega_0$, là $\gamma \equiv \gamma_{\omega_0}$, tìm tỉ số $U_{dip}(\vec{r})/\hbar\Gamma_{sc}(\vec{r})$ theo các đại lượng ω , ω_0 , và γ .

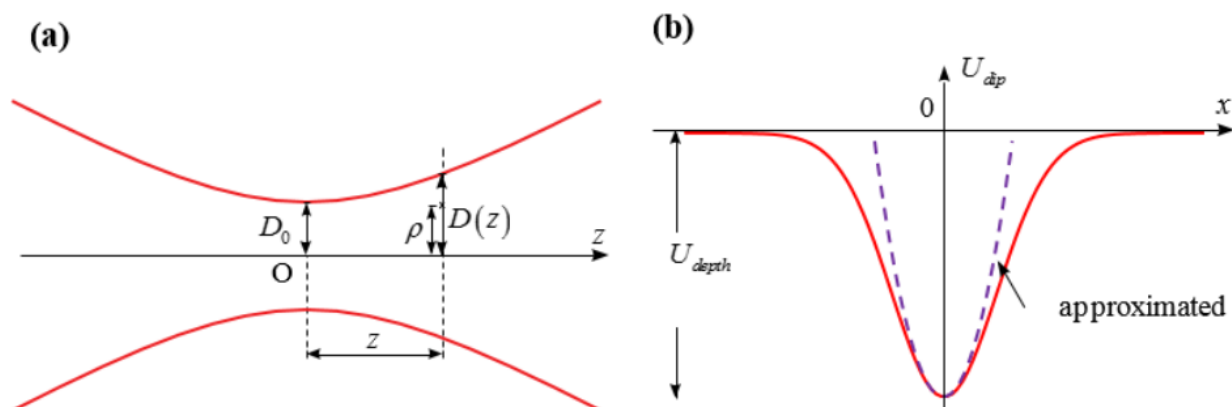
0.5pt

7 (1.5 điểm)

Từ kết quả trên chúng ta có thể thấy rằng có thể đồng thời đạt được một thế năng bẫy sâu và tốc độ làm nóng chậm bằng cách chọn tần số laser ω không quá gần với tần số dịch chuyển quang học ω_0 của nguyên tử cũng như cường độ laser cao. Bởi vì tốc độ tán xạ $\Gamma_{sc}(\vec{r})$ là dương, và từ tỉ số $U_{dip}(\vec{r})/\hbar\Gamma_{sc}(\vec{r})$ thu được ở trên, ta có thể thấy nếu $\omega < \omega_0$, thế năng của lưỡng cực là âm và các nguyên tử bị bắt vào trong vùng hội tụ của chùm laser với cường độ cực đại. Khi các nguyên tử bị bắt giữ trong bẫy, bằng cách giảm độ sâu của hố thế bẫy để loại bỏ các nguyên tử có năng lượng cao, ta có thể làm nguội khí nguyên tử bị nhốt tới nhiệt độ cực lạnh, tạo điều kiện cho sự hình thành BEC. Một tiến bộ đột phá trong vật lý BEC đã đạt được với các nguyên tử natri vào cuối những năm chín mươi (D. M. Stamper-Kurn và cộng sự, Phys.Rev.Lett. 80, 2027 (1998)).

Về mặt vật lý, BEC có thể được hiểu như sau. Trong tự nhiên, có hai loại hạt: boson với spin nguyên và fermion với spin bán nguyên. Hai fermion giống nhau không thể tồn tại trong cùng trạng thái lượng tử. Trái lại, nhiều boson có thể chiếm cùng một trạng thái lượng tử mà không bị cấm: ở nhiệt độ cực thấp, một lượng lớn boson có thể cùng ngưng tụ vào trạng thái với năng lượng thấp nhất có thể và tạo thành một đám mây ngưng tụ (boson ngưng tụ), trong khi các boson còn lại ở trạng thái kích thích với năng

lượng cao hơn (boson không ngưng tụ hoặc boson nhiệt). Chúng ta hãy phân tích một ví dụ thực tế về đám khí loãng của các nguyên tử natri, đó là các boson, bị nhốt trong bẫy quang được tạo ra bởi một chùm laser Gauss (Hình 2a). Chùm laser có bước sóng λ tương ứng với tần số ω ($\omega < \omega_0$). Chùm lan truyền dọc theo trục z với cường độ $I(\rho, z) = \frac{2P}{\pi D(z)^2} \exp\left(-\frac{2\rho^2}{D(z)^2}\right)$, ở đây $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ và kích thước vòng eo là $D(z) = D_0 \sqrt{1 + z^2/z_R^2}$, với $z_R = \pi D_0^2/\lambda$ là độ dài Rayleigh. Tổng công suất laser P và tham số eo D_0 của chùm xác định các thông số của thế của bẫy quang, một trong số đó là độ sâu của thế U_{depth} . Kết quả được xác định bởi giá trị tuyệt đối của cực tiểu địa phương của thế năng, lấy mốc thế năng ở vô cực (Hình 2b).



Hình 2. (a) chùm Gauss. Đường bao cho biết bán kính chùm trung bình tại mặt phẳng cố định $z = \text{const.}$ (nguồn: wikipedia); (b) Minh họa bẫy quang dọc theo trục x được tạo ra bởi một chùm Gauss với $\omega < \omega_0$. Đường nét đứt tương ứng với gần đúng điều hòa ở gần đáy bẫy.

7.1 Tìm biểu thức cho độ sâu thế năng lượng cực U_{depth} theo các đại lượng $c, \omega, \omega_0, \gamma, P$, và D_0 . 0.5pt

7.2 Cho công suất laser $P = 4 \text{ mW}$, bước sóng laser $\lambda = 985 \text{ nm}$, $D_0 = 6 \mu\text{m}$, bước sóng tự nhiên của natri $\lambda_0 = 589 \text{ nm}$. Đánh giá độ sâu thế năng U_{depth} , thể hiện câu trả lời của bạn dưới dạng nhiệt độ tương đương T_0 mà tại đó năng lượng nhiệt của nguyên tử có thể so sánh được với độ sâu bẫy. 1.0pt

8 (0.5 điểm)

Khi nhiệt độ T của đám mây nhỏ hơn nhiều so với nhiệt độ tương đương T_0 , thế năng quang học có thể được xấp xỉ bằng một thế điều hòa đối xứng trụ $U_{dip}(\rho, z) = -U_{depth} + \frac{1}{2}m\Omega_\rho^2\rho^2 + \frac{1}{2}m\Omega_z^2z^2$, trong đó m là khối lượng nguyên tử natri và Ω_ρ, Ω_z là các tần số dao động theo các hướng tương ứng.

8.1 Tìm các biểu thức của Ω_ρ, Ω_z theo T_0, m, D_0, z_R và k_B . Ở đây k_B là hằng số Boltzmann. 0.5pt

Như đã nói ở trên, ở nhiệt độ cực thấp, đám mây nguyên tử natri bao gồm các nguyên tử ngưng tụ và các nguyên tử nhiệt. Các boson ngưng tụ hoạt động theo nguyên lý bất định có thể được sử dụng để

ước tính kích thước không gian hoặc sự phân bố động lượng của đám mây. Mặt khác, các boson nhiệt được mô tả bằng vật lý cổ điển, tức là, chúng tuân theo luật phân bố Maxwell-Boltzmann.

Chúng ta ước tính kích thước của đám mây ngưng tụ, đó là khoảng cách trung bình của các nguyên tử natri ngưng tụ tính từ tâm của bẫy. Khi di chuyển bên trong đám mây này, mỗi nguyên tử ngưng tụ có cả thế năng và động năng. Thế năng là một hàm tăng đơn điệu theo kích thước đám mây, hạt cố gắng giảm thế năng để đạt mức năng lượng thấp nhất. Mặt khác, khi kích thước đám mây giảm, nguyên lý bất định đòi hỏi sự gia tăng động lượng hạt, dẫn đến tăng động năng. Do đó, hạt tìm ra một kích thước đám mây tối ưu để cân bằng hai khuynh hướng ngược nhau của hai đóng góp năng lượng khác nhau.

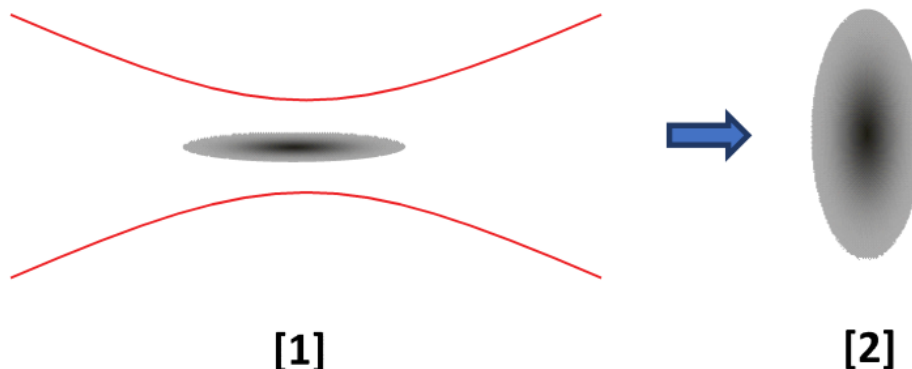
9 (1.0 điểm)

Để cho dễ, chúng ta hãy xem xét trường hợp đơn giản nhất với thế năng bẫy một chiều $U(z) = \text{const} + \frac{1}{2}m\Omega_z^2 z^2$.

9.1	Ước tính kích thước z_0 của phần ngưng tụ theo $m, \hbar, \Omega_z$.	0.5pt
9.2	Tìm biểu thức cho mức năng lượng thấp nhất $E_{\min}$ theo $\hbar, \Omega_z$.	0.25pt
9.3	Tìm tốc độ trung bình v_0 của hạt theo $m, \hbar, \Omega_z$.	0.25pt

Trong phần sau đây, chúng ta sẽ tìm ra cách phân biệt đám mây ngưng tụ với đám mây nhiệt bằng cách tắt bẫy giam giữ. Việc nắm bắt hình ảnh về mật độ đám mây là cần thiết.

Đám khí nhiệt sẽ thể hiện phân bố tốc độ Maxwell đẳng hướng ngay cả khi bẫy không đẳng hướng. Ngược lại, sự phân bố vận tốc của BEC là dị hướng. Chính xác hơn, BEC mở rộng dọc theo trục giam giữ mạnh hơn nhanh hơn so với trục giam giữ yếu hơn. Sự giãn nở chủ yếu xảy ra theo hướng xuyên tâm, và chất ngưng tụ hình xì gà ban đầu trở thành hình bánh kếp. Do đó, hình ảnh về mật độ sau khi mở rộng một thời gian dài sẽ không đẳng hướng và bị đảo ngược so với hình dạng của đám mây trong bẫy.



Hình 3. Hình dạng đám mây. [1] Trước khi tắt bẫy; [2] Một thời gian dài sau khi tắt bẫy

10 (2.0 điểm)

Bây giờ chúng ta mở rộng các kết quả trước đối với thể năng ba chiều trong trường hợp bẫy quang học trong một chùm laser Gaussian.

10.1	Xác định tỉ số $\frac{z_0}{\rho_0}$ theo Ω_ρ , Ω_z , trong đó z_0 và ρ_0 là các kích thước ban đầu của đám ngưng tụ.	0.5pt
10.2	Khi tắt bẫy, chất ngưng tụ sẽ được giải phóng theo các hướng khác nhau với vận tốc ban đầu khác nhau ν_ρ và ν_z . Xác định tỷ lệ $\frac{\nu_\rho}{\nu_z}$ theo Ω_ρ , Ω_z .	0.5pt
10.3	Giả sử rằng các vận tốc giải phóng của đám mây không thay đổi trong suốt quá trình mở rộng, hãy tìm tỷ lệ ngưng tụ của đám mây $\frac{z_L}{\rho_L}$ sau một khoảng thời gian dài khi kích thước đám lớn hơn nhiều kích thước ban đầu của nó, nghĩa là $z_L \gg z_0$ và $\rho_L \gg \rho_0$.	0.5pt
10.4	Tương tự như câu hỏi 10.3., tìm tỷ lệ của đám nhiệt $\frac{z_{T,L}}{\rho_{T,L}}$ sau một khoảng thời gian dài khi kích thước đám lớn hơn nhiều kích thước ban đầu của nó, nghĩa là $z_{T,L} \gg z_0$ và $\rho_{T,L} \gg \rho_0$.	0.5pt

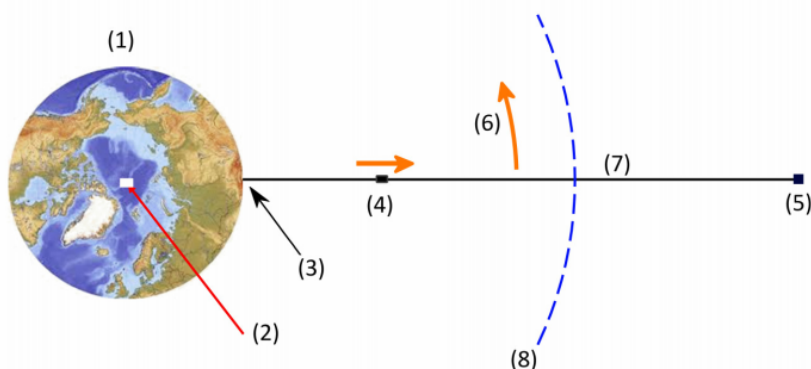
Bài lý thuyết 2

Thang máy không gian (8.0 điểm)

Công thức toán học hữu ích:

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

Hiện nay, sử dụng tên lửa là công nghệ duy nhất cho phép con người vận tải và truyền tin từ Trái đất tới Mặt trăng, sao Hỏa hoặc xa hơn. Tuy nhiên cách di chuyển này trong không gian không hiệu quả. Nếu chế tạo được thang máy không gian thì sẽ có một công nghệ hoàn toàn mới để di chuyển trong không gian (Hình 1). Đây là một kết cấu dài được đặt cố định ở đường xích đạo và độ cao của nó lớn hơn bán kính quỹ đạo vệ tinh địa tĩnh (GEO). Quỹ đạo của vệ tinh địa tĩnh là một đường tròn có bán kính khoảng 42300 km tính từ tâm Trái đất và vệ tinh địa tĩnh có chu kỳ cũng như chiều quay giống như Trái đất. Một vật ở trên quỹ đạo này sẽ đứng yên tương đối so với Trái đất. Ý tưởng hiện đại về thang không gian được đưa ra lần đầu tiên bởi Artsutanov (Artsutanov, Y. et al., Science, 158, 946, 1967). Tuy nhiên ý tưởng này không thu hút được sự chú ý cho đến khi Pearson xuất bản bài báo đầy cảm hứng "Tháp quỹ đạo: một phi thuyền sử dụng năng lượng quay của Trái đất" (Pearson J., *Acta Astronautica*. Vol. 2, p. 785, 1975). Trong bài báo của Pearson, nhiều tính chất hữu ích của thang máy không gian đã được chỉ ra, nó cũng cho thấy rõ là để thang máy không gian có thể trở thành hiện thực thì phải sử dụng một loại vật liệu khỏe hơn nhưng cũng nhẹ hơn nhiều so với thép. Do không tồn tại vật liệu có tính chất như vậy nên trong nhiều năm sau chỉ có ít các nghiên cứu về vấn đề này. Đến thập niên 1990 khi một loại vật liệu mới, ống nano Carbon, mạng hình lục giác tạo bởi các nguyên tử Carbon được phát hiện. Vào năm 2003, dự án Port (<http://port.com/>) đã khởi động để xây dựng và vận hành một thang máy không gian sử dụng công nghệ hiện có.



Hình 1. Thang máy không gian (nguồn: wikipedia). (1) Trái đất; (2) cực Bắc; (3) Gắn cố định ở đường xích đạo; (4) Vật leo lên; (5) Đối trọng; (6) Chuyển động quay cùng Trái đất; (7) Cáp; (8) Độ cao vệ tinh địa tĩnh.

Trong bài toán này chúng ta sẽ nghiên cứu 2 thiết kế khác nhau của thang máy không gian, các tính chất cơ học của ống nano Carbon, và khám phá một số ứng dụng của thang máy không gian. Cho biết khối lượng của Trái đất $M = 5.98 \times 10^{24}$ kg, bán kính Trái đất $R = 6370$ km, bán kính quỹ đạo địa tĩnh $R_G = 42300$ km, khối lượng Mặt trời $M_S = 2 \times 10^{30}$ kg, bán kính quỹ đạo của Trái đất quanh Mặt trời $R_E = 1.5 \times 10^8$ km = 1AU (AU là đơn vị thiên văn), tốc độ của Trái đất trên quỹ đạo 30.9 km/s, tốc độ quay của Trái đất xung quanh trục của nó $\omega = 7.27 \times 10^{-5}$ rad/s.

1. Thang máy không gian hình trụ có tiết diện ngang đồng đều (1.5 điểm)

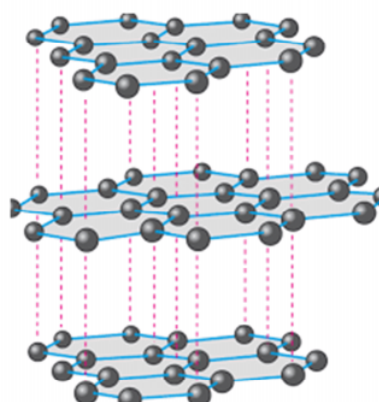
Trước tiên chúng ta hãy khảo sát một thang máy không gian hình trụ có tiết diện ngang đồng đều A và khối

lượng riêng đồng nhất ρ . Nó là một hình trụ đặt theo phương thẳng đứng tại đường xích đạo. Chiều cao của nó lớn hơn chiều cao của vệ tinh địa tĩnh, vì vậy ứng suất (lực tác dụng lên một đơn vị diện tích) ở đáy của hình trụ bằng 0. Hình trụ bị căng dọc theo toàn bộ chiều dài của nó với ứng suất khác nhau vì thế mỗi phần tử của hình trụ nằm cân bằng dưới tác dụng của trọng lực, lực li tâm, và lực căng.

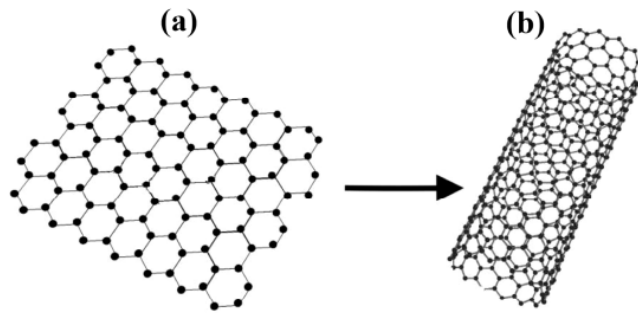
1.1	Tính độ cao đỉnh của hình trụ tính từ bề mặt Trái đất.	0.5pt
1.2	Tìm khoảng cách từ tâm Trái đất đến điểm mà ở đó ứng suất trong hình trụ cực đại.	0.5pt
1.3	Tìm biểu thức của ứng suất cực đại của hình trụ theo ρ , R_G , R và gia tốc trọng trường g . Nếu hình trụ được làm bằng thép với khối lượng riêng là 7900 kg/m^3 , độ bền là 5.0 GPa , xác định tỉ số giữa ứng suất cực đại và độ bền của thép. Độ bền là ứng suất cực đại mà vật liệu có thể chịu được.	0.5pt

2. Ống nano Carbon (2.5 điểm)

Tính toán trong phần trước cho thấy để xây được thang máy không gian thì cần có vật liệu nhẹ với độ bền rất lớn. Ống nano Carbon đáp ứng các yêu cầu như vậy do vật liệu này hình thành từ các nguyên tử rất nhẹ liên kết với nhau bởi liên kết hóa học mạnh. Trong tự nhiên, Carbon có hai dạng thù hình là kim cương và graphite. Đối với kim cương, xung quanh mỗi nguyên tử Cacbon có bốn nguyên tử lân cận (NN- nearest neighbor) tạo thành tứ diện. Graphite có cấu trúc lớp. Trên mỗi lớp, các nguyên tử Carbon sắp xếp thành mạng lục giác với ba nguyên tử lân cận NN. Mặc dù kim cương được biết đến là vật liệu cứng nhất, tuy nhiên liên kết cộng hóa trị giữa các nguyên tử Carbon trong mạng lục giác của graphite lại mạnh hơn so với liên kết giữa các nguyên tử Carbon trong mạng tứ diện của kim cương. Graphite mềm hơn nhiều so với kim cương bởi vì liên kết Van Der Waals giữa các nguyên tử Carbon giữa các lớp khác nhau yếu hơn nhiều so với liên kết cộng hóa trị.



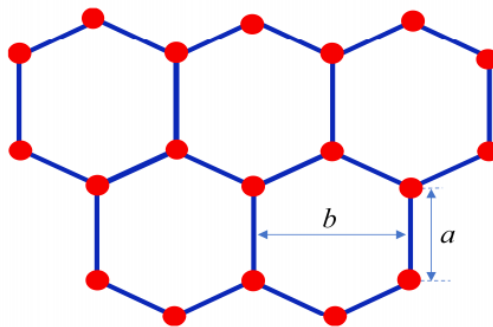
Hình 2. Cấu trúc của Graphite



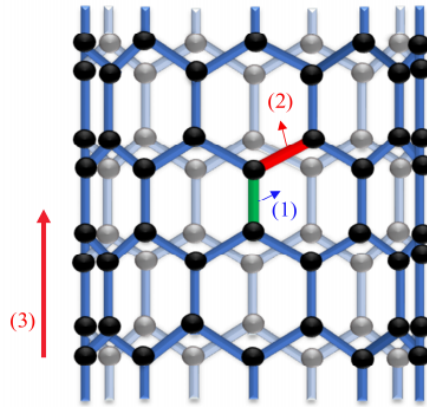
Hình 3. Graphene (a) và ống nano Carbon (b).

Một đơn lớp nguyên tử trong graphite được gọi là graphene và có độ dày đơn lớp nguyên tử. Tấm graphene cô lập không ổn định và có xu hướng cuộn lại để tạo thành quả cầu Carbon hoặc ống nano Carbon.

Mạng tinh thể lục giác của graphene được mô tả trong hình 4. Khoảng cách giữa hai nguyên tử Carbon lân cận NN là $a = 0.142 \text{ nm}$ và khoảng cách ngắn nhất giữa hai liên kết song song là $b = 0.246 \text{ nm}$. Do liên kết cộng hóa trị giữa các nguyên tử Carbon trong graphene rất mạnh nên các tính chất cơ học của ống nano Carbon rất đặc biệt như suất Young và độ bền rất lớn trong khi khối lượng riêng rất nhỏ. Suất Young được định nghĩa là tỷ số giữa ứng suất dọc theo một trục và độ biến dạng tỷ đối (tỷ lệ giữa biến dạng theo chiều dài ban đầu) dọc theo trục đó trong phạm vi ứng suất thỏa mãn điều kiện của định luật Hooke.



Hình 4. Graphene.



Hình 5. Minh họa một ống nano Carbon với 9 liên kết song song Carbon-Carbon. Chú ý: trong bài toán này, có 27 liên kết song song Carbon-Carbon. (1) liên kết song song; (2) liên kết chéo; (3) trục của ống.

Bây giờ chúng ta nghiên cứu một số tính chất cơ học của ống nano Carbon có 27 liên kết song song Carbon-Carbon so với trục ống (minh họa trên Hình 5). Liên kết giữa hai nguyên tử Carbon có thể được mô tả bởi thế Morse $V(x) = V_0(e^{-4\frac{x}{a}} - 2e^{-2\frac{x}{a}})$. Trong đó, $a = 0.142 \text{ nm}$ là khoảng cách giữa hai nguyên tử Carbon lân cận NN nằm ở vị trí cân bằng, $V_0 = 4.93 \text{ eV}$ là năng lượng liên kết và x là độ dời của nguyên tử so với vị trí cân bằng. Sau đây, chúng ta lấy gần đúng thế Morse là hàm thế bậc bậc hai $V(x) = P + Qx^2$. Tất cả các tương tác không phải với nguyên tử lân cận NN đều được bỏ qua. Trong phép tính gần đúng này, ta có thể giả sử các nguyên tử Carbon liên kết với nhau thông qua “lò xo” có độ cứng k . Bỏ qua những thay đổi về góc giữa các liên kết.

2.1	Xác định các hệ số P, Q theo a và V_0	0.25pt
2.2	Tính độ cứng k của lò xo.	0.25pt
2.3	Tính giá trị suất Young của ống nano Carbon.	0.5pt

Để ước tính độ bền, chúng ta giả định rằng khi “lò xo” liên kết các nguyên tử Carbon giãn cực đại $x_{\max}$ thì thế năng điều hòa bằng năng lượng liên kết.

2.4	Tính độ giãn cực đại $x_{\max}$ của lò xo.	0.5pt
2.5	Tính độ bền σ_0 của ống nano Carbon.	0.5pt
2.6	Cho khối lượng mol của Carbon là 12 g, hãy tính khối lượng riêng của ống nano Carbon.	0.5pt

3. Thang máy không gian thon dần có ứng suất đồng nhất (2.5 điểm)

Trong phần trước, khối lượng riêng và độ bền của ống nano Carbon đã được đánh giá về mặt lý thuyết. Những giá trị này phụ thuộc vào cấu trúc đặc biệt của ống nano Carbon. Tuy nhiên, ý tưởng xây dựng

thang máy không gian thực sự khả thi. Bây giờ chúng ta sẽ nghiên cứu một thiết kế thang máy không gian mới có ứng suất σ và khối lượng riêng ρ như nhau trên toàn bộ chiều dài của tháp trong khi đó tiết diện ngang thay đổi theo chiều cao gọi là tháp thon dần. Tháp đối xứng trục và được đặt thẳng đứng tại xích đạo; chiều cao của nó lớn hơn chiều cao của quỹ đạo vệ tinh địa tĩnh. Gọi tiết diện ngang của tháp hình nón ở mặt đất là A_S và ở độ cao của vệ tinh địa tĩnh là A_G .

3.1	Xác định tiết diện ngang $A(h)$ theo độ cao h của tháp tính từ mặt đất.	0.5pt
3.2	Tháp được thiết kế đối xứng sao cho mặt cắt ngang ở hai đầu bằng nhau, tìm khoảng cách từ tâm Trái đất đến đỉnh của tháp.	0.5pt
3.3	Độ nhọn được định nghĩa là A_G/A_S . Tính độ nhọn của tháp được làm từ ống nano Carbon có độ bền 130 GPa và khối lượng riêng 1300 kg/m^3 .	0.5pt
3.4	Chúng ta có thể giảm chiều dài thang máy một lượng đáng kể bằng cách gắn ở phía trên của nó bằng một đối trọng khối lượng thích hợp. Ta ký hiệu h_C là độ cao của tháp so với vệ tinh địa tĩnh, hãy xác định biểu thức của khối lượng của đối trọng m_C theo h_C .	1.0pt

4. Các ứng dụng: đưa khối hàng lên quỹ đạo và phóng tàu vũ trụ tới hành tinh khác (1.5 điểm)

Ứng dụng chính của thang máy không gian là sử dụng năng lượng quay của tháp để đưa khối hàng lên quỹ đạo hoặc phóng tàu vũ trụ đến các hành tinh khác. Đưa khối hàng vào không gian rất dễ dàng: chúng ta chỉ cần dùng thang máy đưa khối hàng đến một độ cao r và tách nó ra từ trạng thái nghỉ. Để đơn giản hóa trong các tính toán, chúng ta hãy giả định rằng tháp chuyển động trong mặt phẳng quỹ đạo của Trái Đất.

4.1	Xác định độ cao tối hạn của tháp r_C , tính từ tâm Trái đất, tại đó vật sẽ tách ra từ trạng thái nghỉ để thoát khỏi lực hấp dẫn của Trái đất.	0.5pt
------------	---	-------

Nếu chúng ta muốn sử dụng tháp với mục đích phóng tàu vũ trụ để du hành tới các hành tinh khác thì cần xây tháp có độ cao lớn hơn r_C . Cho rằng chiều cao tháp là 107000 km từ tâm của Trái đất.

4.2	Tìm khoảng cách nhỏ nhất và khoảng cách lớn nhất từ Mặt trời tới tàu vũ trụ được tách ra từ trạng thái nghỉ ở đỉnh tháp? Đưa ra câu trả lời của em theo đơn vị thiên văn. Chúng ta bỏ lực hấp dẫn hấp dẫn của Trái Đất ở độ cao này.	1.0pt
------------	--	-------

Bài lý thuyết 3

Hiệu ứng nhiệt điện và các ứng dụng vào máy phát và máy làm lạnh nhiệt điện (10 điểm)

Giới thiệu: Hiệu ứng nhiệt điện

Hiệu ứng nhiệt điện trong vật dẫn là do sự tương tác giữa dòng nhiệt và dòng điện. Trong bài toán này, chúng ta chỉ xem xét ba hiệu ứng nhiệt điện chủ yếu, đó là các hiệu ứng Joule, Seebeck và Peltier, bỏ qua những ảnh hưởng khác.

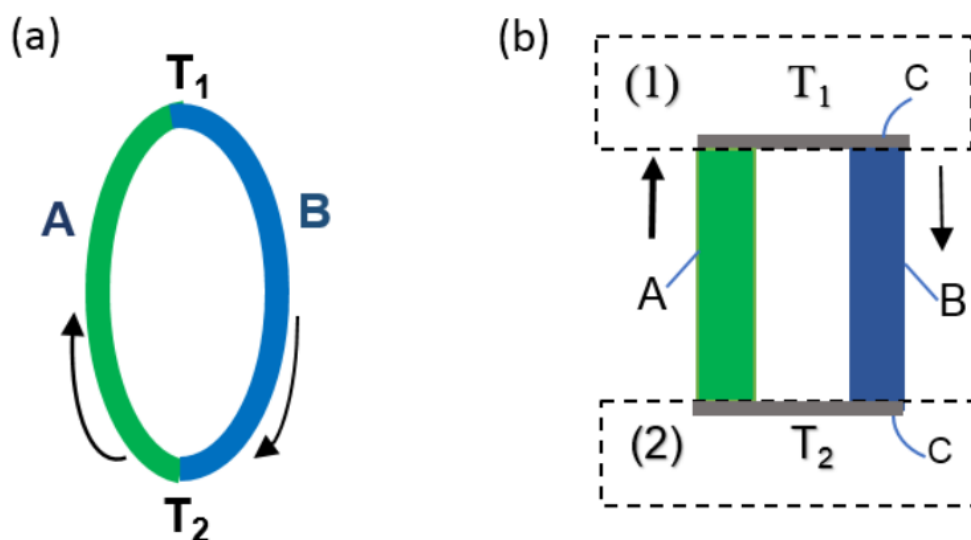
Hiệu ứng Joule là kết quả của sự tương tác giữa các hạt tải điện và mạng tinh thể. Khi các hạt tải dịch chuyển có hướng để tạo ra dòng điện, chúng chuyển một phần năng lượng cho dao động của mạng tinh thể, và kết quả là tinh thể được làm nóng. Hiệu ứng Joule là hiệu ứng không thuận nghịch.

Hiệu ứng Seebeck có thể quan sát thấy trong một cặp nhiệt điện gồm hai thanh dẫn A và B khác nhau được nối trực tiếp với nhau (Hình 1a) hoặc kết nối với nhau qua vật liệu trung gian C (Hình 1b). Vật liệu C là vật dẫn điện tốt với nhiệt dung riêng rất nhỏ. Khi hai mối nối của cặp nhiệt điện được duy trì ở các nhiệt độ T_1 và T_2 khác nhau (Hình 1a, b) thì sẽ tạo ra một suất điện động Seebeck.

$$\epsilon = \alpha(T_1 - T_2) \quad (1)$$

ở đây, α là hệ số Seebeck của cặp nhiệt điện. α được coi là không phụ thuộc nhiệt độ.

Hiệu ứng Seebeck được áp dụng trong máy phát nhiệt điện để chuyển đổi năng lượng nhiệt thành năng lượng điện.



Hình 1. (a) các mối nối trực tiếp. (b) các kết nối thông qua vật liệu trung gian C. (1) Nguồn nhiệt nóng (nhiệt độ T_1); (2) phần tản nhiệt (nhiệt độ T_2).

Hiệu ứng Peltier

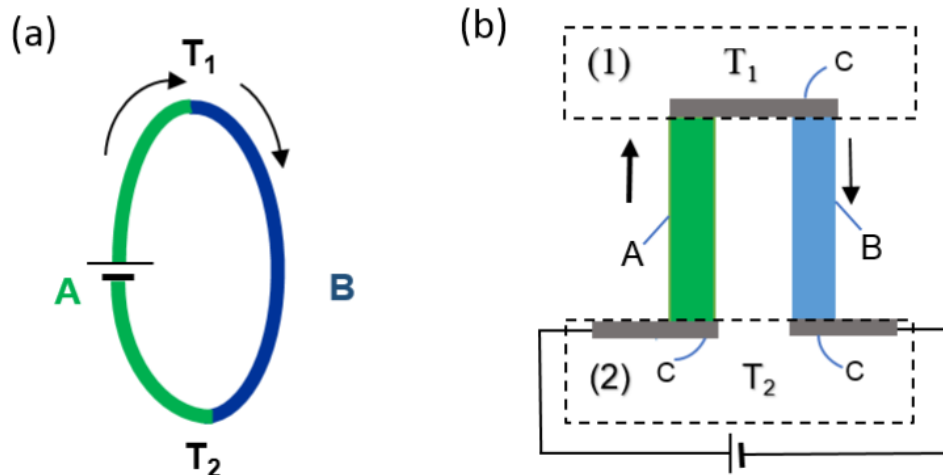
Khi có dòng điện chạy qua mạch một cặp nhiệt điện bao gồm hai dây dẫn A và B khác nhau nối với nhau bởi các mối nối trực tiếp (Hình 2a) hoặc nối qua vật dẫn trung gian C (Hình 2b), tùy thuộc vào chiều dòng

điện, nhiệt lượng có thể bị hấp thụ hoặc được sinh ra từ lớp tiếp giáp giữa hai dây dẫn. Đây là hiệu ứng Peltier. Công suất nhiệt Peltier q xuất hiện ở lớp tiếp giáp là:

$$q = \pi I \quad (2)$$

π là hệ số Peltier của lớp tiếp giáp này. Các hiệu ứng Seebeck và Peltier là các hiệu ứng thuận nghịch, khác với hiệu ứng Joule là hiệu ứng không thuận nghịch. Mặc dù các hiệu ứng Seebeck và Peltier cần các mối nối giữa các phần tử nhiệt nhưng chủ yếu chúng là các hiệu ứng khối. Một mạch điện khép kín trong một cặp nhiệt điện có hiệu ứng Peltier (Hình 2b) có thể được sử dụng như một tủ lạnh khi nhiệt được lấy ra khỏi một mối nối cô lập và được tản ra ở đầu kia.

Để đơn giản, sự bức xạ nhiệt, sự truyền nhiệt, sự dẫn nhiệt ra môi trường xung quanh được coi là không đáng kể. Dòng nhiệt được cho là chỉ chuyển bên trong cặp nhiệt điện giữa nguồn nhiệt và tản nhiệt.



Hình 2. (a) Các nút nối trực tiếp; (b) các mối nối thông qua vật liệu trung gian C.

Dữ liệu về tính chất nhiệt và điện của các vật liệu và cặp nhiệt điện được nghiên cứu trong bài toán này được cho trong Bảng 1 và 2 phục vụ cho việc tính số.

Tên	Vật liệu	Điện trở suất ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)	Độ dẫn nhiệt k ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
A	$\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$	1.0×10^{-5}	1.4
B	$\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$	1.0×10^{-5}	1.4

Bảng 1: Các thông số của các vật liệu sử dụng cho cặp nhiệt điện (ở nhiệt độ phòng)

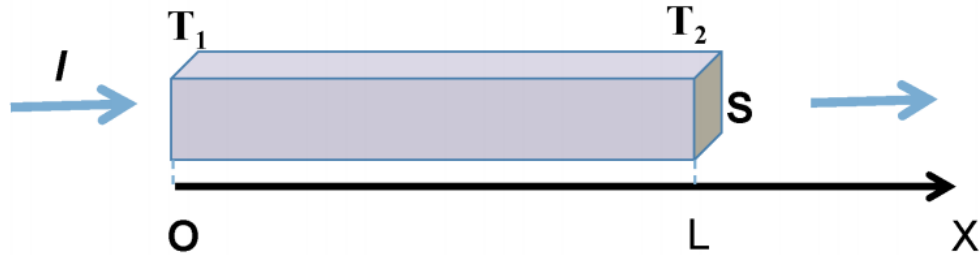
Cặp nhiệt điện AB	Chiều dài (m)	Hệ số Seebeck α ($\mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$)
	0.02	420

Bảng 2: Các thông số của cặp nhiệt điện.

Phần A: Truyền tải nhiệt và máy phát nhiệt điện

A1. Truyền nhiệt trong một thanh dẫn đồng nhất

Một dòng điện I (Hình 3) chạy dọc theo một thanh dẫn đồng nhất với chiều dài L , điện trở suất ρ , độ dẫn nhiệt k . Hai đầu của thanh được đặt tại tọa độ $x = 0$ và $x = L$ trên trục OX . Nhiệt độ tại $x = 0$ là T_1 , tại $x = L$ là T_2 ($T_1 > T_2$), cả hai nhiệt độ được giữ không đổi.



Hình 3

Dòng nhiệt $q(x)$ (lượng nhiệt truyền qua một tiết diện thẳng trên mỗi đơn vị thời gian) chảy trong thanh được mô tả theo định luật Fourier:

$$q(x) = -kS \frac{dT(x)}{dx} \quad (3)$$

ở đó, k là độ dẫn nhiệt, và S là tiết diện của thanh.

A1.1 Tìm phân bố nhiệt độ $T(x)$ khi x thay đổi dọc theo thanh trong trạng thái ổn định với giả thiết không có sự mất nhiệt ra xung quanh. 0.75pt
Gợi ý: phương trình $\frac{d^2T(x)}{dx^2} = a$ có nghiệm là $T(x) = \frac{1}{2}ax^2 + C_1x + C_2$, với C_1 và C_2 được tìm ra từ các điều kiện biên.

A1.2 Tìm dòng nhiệt $q(x)$ tại x và $q(0)$, $q(L)$ tương ứng tại các đầu thanh. 1.0pt

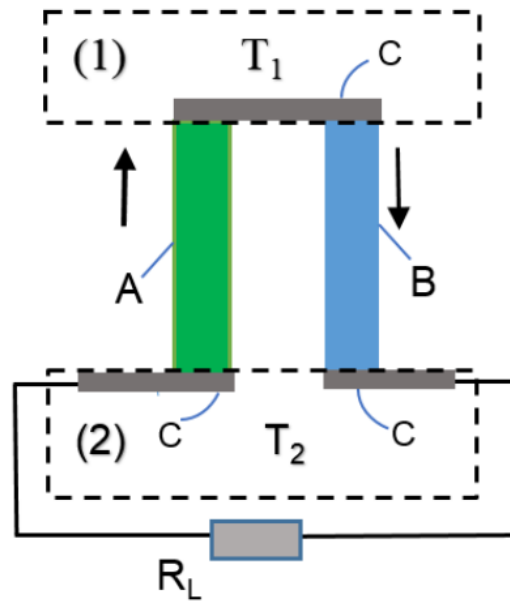
A2. Mối quan hệ giữa các hệ số Peltier và Seebeck

Mối quan hệ giữa hệ số Peltier và hệ số Seebeck cho tất cả các dải nhiệt độ được chứng minh một cách tổng quát ở nhiệt động lực học. Ở đây, mối quan hệ này được dẫn ra cho trường hợp đặc biệt khi cặp nhiệt điện được làm từ vật liệu dẫn A và B (Hình 1b) với hệ số Seebeck α và điện trở suất đủ nhỏ sao cho hiệu ứng Joule có thể bị bỏ qua. Các hệ số Peltier ở các mối nối nóng (nhiệt độ T_1) và lạnh (nhiệt độ T_2) tương ứng là π_1 và π_2 . Trong quá trình điện, khí điện tử trong cặp nhiệt điện thực hiện một chu trình nhiệt động lực lý tưởng.

A2.1 Tìm biểu thức cho dòng nhiệt nhận được bởi khí điện tử từ nguồn nhiệt ở nhiệt độ T_1 . 0.25pt

A2.2	Tìm biểu thức cho dòng nhiệt được chuyển tải bởi khí điện tử sang bộ tản nhiệt có nhiệt độ T_2 .	0.25pt
A2.3	Tìm tổng công suất được tạo ra bởi khí điện tử nếu hệ số Seebeck là α .	0.5pt
A2.4	Biểu thị hệ số Peltier tại mỗi nối theo hệ số Seebeck α và nhiệt độ T của mỗi nối.	0.5pt

A3. Máy phát điện nhiệt



Hình 4. Máy phát điện nhiệt. (1) Nguồn nhiệt (nhiệt độ T_1); (2) Tản nhiệt (nhiệt độ T_2).

Sau đây hệ số Peltier π được lấy bằng αT cho tất cả nhiệt độ và nhiệt Joule phải được tính đến.

Cặp nhiệt điện gồm hai thanh dẫn A và B có cùng chiều dài L được dùng làm máy phát điện nhiệt (Hình 4). Các thông số của A và B là: tiết diện S_A, S_B ; điện trở suất ρ_A, ρ_B ; độ dẫn nhiệt k_A, k_B . Đầu lạnh hơn của A và B được nối với một tải có điện trở R_L . Các thông số của cặp nhiệt điện là: α là hệ số Seebeck, $R = \frac{\rho_A L}{S_A} + \frac{\rho_B L}{S_B}$ là điện trở nội, $K = \frac{k_A S_A}{L} + \frac{k_B S_B}{L}$ là độ dẫn nhiệt. Đầu nóng (đầu lạnh) của cặp nhiệt điện được duy trì ở nhiệt độ $T_1 (T_2)$, với $T_1 > T_2$. Ký hiệu q_1 là công suất nhiệt được lấy từ đầu nóng có nhiệt độ T_1 , q_2 là công suất chuyển tải nhiệt sang bộ phận tản nhiệt ở nhiệt độ T_2 của cặp nhiệt điện.

A3.1	Tìm các biểu thức của q_1, q_2 theo α, K, R , các nhiệt độ T_1, T_2 và dòng I .	0.5pt
-------------	--	-------

Hiệu suất của máy phát điện nhiệt được định nghĩa là $\eta = \frac{P_L}{q_1}$, với P_L là công suất của điện trở tải. Tỷ số giữa tải trọng và điện trở bên trong của cặp nhiệt điện được biểu thị là $m = \frac{R_L}{R}$.

A3.2 Tìm biểu thức cho hiệu suất η theo các thông số của cặp nhiệt điện α, K, R , các nhiệt độ T_1, T_2 và tỷ số điện trở m . 0.75pt

Để tăng hiệu suất cho máy phát nhiệt điện, cần có các đặc tính sau của cặp nhiệt điện: điện trở thấp để giảm thiểu nhiệt Joule, độ dẫn nhiệt thấp để giữ nhiệt ở các điểm nối và đảm bảo duy trì một gradient nhiệt độ lớn. Ba thuộc tính này được đặt cùng nhau trong một đại lượng $Z = \frac{\alpha^2}{KR}$, được gọi là hệ số phẩm chất của cặp nhiệt điện.

A3.3 Tìm biểu thức tính hiệu suất theo Z , hiệu suất của chu trình Carnot lý tưởng $\eta_c = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$, T_1 và m . 0.25pt

A4. Hiệu suất tối đa

Hiệu suất của cặp nhiệt điện bằng η_P khi công suất điện của trở tải có giá trị lớn nhất, $P_L = P_{\max}$.

A4.1 Tìm biểu thức tính η_P theo Z, T_1, T_2 . 0.25pt

Hiệu suất là lớn nhất $\eta = \eta_{\max}$ khi tỉ số m nhận giá trị nào đó được ký hiệu là M .

A4.2 Tìm biểu thức cho M theo T_1, T_2 và Z . 0.75pt

A4.3 Biểu diễn hiệu suất cực đại $\eta_{\max}$ qua T_1, T_2, Z và M . 0.25pt

A5. Hệ số phẩm chất cực đại

Tăng hệ số phẩm chất của cặp nhiệt điện dẫn đến sự gia tăng hiệu suất của máy phát nhiệt điện. Trong thực tế, các tiết diện S_A, S_B của các thanh của cặp nhiệt điện được chọn để hệ số phẩm chất của cặp nhiệt điện có giá trị cực đại $Z = Z_m$.

A5.1 Dẫn ra biểu thức cho tỉ số $\frac{S_A}{S_B}$ của các tiết diện các thanh theo ρ_A, ρ_B, k_A, k_B khi hệ số phẩm chất của cặp nhiệt điện là cực đại. 0.5pt

A5.2 Biểu thị hệ số phẩm chất cực đại Z_m theo $\alpha, \rho_A, \rho_B, k_A, k_B$. 0.25pt

A6. Hiệu suất tối ưu

Hiệu suất tối ưu η_{opt} của máy phát nhiệt điện được xác định là hiệu suất khi công suất trên điện trở tải và hệ số phẩm chất đều có giá trị cực đại. Nguồn nhiệt nóng và tản nhiệt lạnh được duy trì ở các nhiệt độ tương ứng là $T_1 = 423K, T_2 = 303K$.

A6.1 Tìm kết quả bằng số của η_{opt} của máy phát nhiệt điện được làm từ vật liệu có các thông số được đưa ra trong Bảng 1 và so sánh nó với hiệu suất lý tưởng η_c . 0.5pt

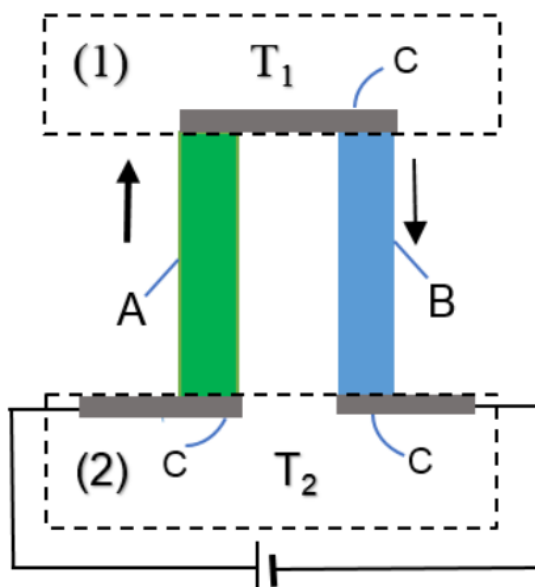
A6.2 Tìm giá trị bằng số của hiệu suất tối đa $\eta_{\max}$ của máy phát nhiệt điện được làm từ các vật liệu đã cho. 0.25pt

B. Tủ lạnh nhiệt điện

Cặp nhiệt điện với các thông số α , K , R đưa ra trong câu hỏi A3 được sử dụng như một tủ lạnh nhiệt điện và được mô tả trong Hình 5.

B1. Công suất làm mát và chênh lệch nhiệt độ tối đa

Đầu nóng của cặp nhiệt điện là nguồn nhiệt với nhiệt độ ban đầu T_1 . Nó được cô lập về nhiệt với môi trường xung quanh, và cần phải được làm mát. Đầu lạnh của cặp nhiệt điện, các thanh A và B được nối với pin và ở nhiệt độ T_2 của tấm tản nhiệt. Độ nhạy của dòng điện được lựa chọn sao cho nhiệt Peltier được hấp thụ ở điểm nối phía đầu nóng và được giải phóng tới tản nhiệt ở đầu lạnh.



Hình 5. Tủ lạnh nhiệt điện. (1) Nguồn nhiệt cô lập (nhiệt độ T_1); (2) tản nhiệt (nhiệt độ T_2)

B1.1 Tìm biểu thức cho công suất làm mát q_C (dòng nhiệt chảy từ nguồn nhiệt đến các thanh của cặp nhiệt điện) theo các tham số của cặp nhiệt điện α , K , R và T_1 , T_2 , I . 0.25pt

B1.2 Tìm biểu thức cho chênh lệch nhiệt độ tối đa $\Delta T_{\max} = T_2 - T_{1\min}$ theo hệ số phẩm chất Z của cặp nhiệt điện và nhiệt độ thấp nhất của nguồn nhiệt cô lập $T_{1\min}$. 0.5pt

B2. Dòng hoạt động

Cặp nhiệt điện được làm từ vật liệu A và B có giá trị tốt nhất của hệ số phẩm chất Z_m tìm được trong phần A được sử dụng cho tủ lạnh.

B2.1 Tính giá trị bằng số của nhiệt độ tối thiểu của nguồn nhiệt cô lập $T_{1\min}$ nếu nhiệt độ của tản nhiệt là $T_2 = 300K$. 0.25pt

- B2.2** Tính toán cường độ dòng điện làm việc I_w của tủ lạnh nhiệt điện khi nhiệt độ của nguồn nhiệt ở mức nhỏ nhất $T_{1\min}$ và nhiệt độ của bộ tản nhiệt $T_2 = 300K$. Để đơn giản ta lấy tiết diện của các thanh bằng nhau, $S_A = S_B = 10^{-4}m^2$. 0.5pt

B3. Hệ số hiệu năng

Khi chênh lệch nhiệt độ nhỏ hơn giá trị tối đa của nó ΔT_{max} , hệ số hiệu năng β thường được sử dụng để đánh giá hiệu năng của tủ lạnh nhiệt điện. $\beta = \frac{q_c}{P}$, trong đó P là công suất điện cung cấp cho tủ lạnh.

- B3.1** Tìm biểu thức của hệ số hiệu năng β theo các tham số α , K , R của cặp nhiệt điện và T_1 , T_2 , I . 0.5pt

Khi hệ số hiệu năng có giá trị tối đa β_{max} , cường độ dòng điện là I_β .

- B3.2** Tìm biểu thức của I_β theo các tham số α , Z , R của cặp nhiệt điện và các nhiệt độ T_1 , T_2 . 0.25pt

- B3.3** Tìm biểu thức của hệ số hiệu năng cực đại β_{max} . 0.25pt

Thực nghiệm

HƯỚNG DẪN CHUNG

Ngày 7/5/2018

Bài thi thực hành có thời gian là 5 tiếng và có tổng điểm là 20.

Trước khi thi

- Em không được mở các phong bì đề thi cũng như không được chạm vào các dụng cụ thí nghiệm trước khi có hiệu lệnh bắt đầu thi.
- Hiệu lệnh bắt đầu tính giờ làm bài là một hồi chuông dài. Sau mỗi một tiếng trôi qua và 15 phút cuối trước khi hết giờ làm bài đều có một hồi chuông ngắn báo hiệu. Hiệu lệnh báo hết giờ làm bài là một loạt hồi chuông liên tiếp. Sau khi đã hoàn tất việc thu bài sẽ có một hồi chuông dài để báo hiệu cho phép các em được rời khỏi khu vực thi.

Trong lúc làm bài

- Chỉ sử dụng bút viết được phát.
- Phiếu trả lời (Answer Sheets) dành riêng được phát cho để em điền câu trả lời cuối cùng. Viết các số liệu đo vào bảng và ô thích hợp tương ứng trong answer sheet. Có thêm các tờ giấy trắng (Working Sheets) để diễn giải chi tiết thêm. Viết vào Working Sheets những gì em cho là cần thiết cho lời giải và em muốn được chấm điểm.
- Em **bắt buộc** phải điền Mã Học Sinh (**Student Code**) vào các ô ở đầu mỗi tờ giấy mà em sử dụng. Tất cả các tờ Working Sheets phải được điền số của bài toán (**Problem No.**), số thứ tự của tờ Working Sheets đó (**Page No.**) và tổng số tờ Working Sheets mà em đã sử dụng để trình bày bài làm (**Total Pages**).
- Em nên dùng các phương trình, các con số, các biểu tượng, các ký hiệu logic, đồ thị, bảng biểu, hình vẽ để biểu đạt lời giải của mình và hạn chế tối đa việc diễn đạt bằng lời.
- Nếu em viết vào bất cứ tờ giấy nào mà không muốn chấm điểm tờ đó thì bỏ tờ giấy đó đi. Nếu em dùng tờ Working Sheets nào nhưng lại muốn bỏ tờ đó thì gạch chéo một chữ 'X' lớn trên toàn bộ tờ Working Sheets đó và không tính tờ đó trong tổng số trang làm bài. Chỉ viết vào mặt trước của các tờ giấy và chỉ viết bên trong phần được đóng khung.
- Không cần tính sai số, trừ khi có yêu cầu rõ ràng. Tuy nhiên, em cần làm tròn đến số chữ số có nghĩa thích hợp mỗi khi có kết quả số. Ngoài ra, em cũng nên tự quyết định số lượng điểm lấy dữ liệu hoặc số lần thí nghiệm lặp lại thích hợp trừ khi có hướng dẫn cụ thể.
- Em không được rời khỏi chỗ ngồi khi chưa được phép. Khi em cần sự hỗ trợ, xin vui lòng thu hút sự chú ý của giám thị bằng cách đặt một trong những lá cờ vào chiếc giỏ treo ở ô của em (Cờ xanh: Cho tôi xin nước uống; Cờ vàng: Tôi cần phải đi vệ sinh; Cờ tím: Tôi cần thêm tờ working sheets; Lá cờ đỏ: Tôi cần sự giúp đỡ).

Vào cuối buổi thi

- Em phải ngừng viết bài ngay khi có tín hiệu hết giờ làm bài được thể hiện bằng một loạt các hồi chuông liên tiếp.
- Sắp xếp các giấy tờ theo thứ tự sau:
 1. answer sheets,
 2. đồ thị (graph papers) theo thứ tự.
 3. working sheets theo thứ tự,

4. working sheets bỏ đi,
5. graph papers bỏ đi,
6. các tờ giấy vẽ đồ thị và các tờ working sheets không dùng đến,
7. Tờ hướng dẫn chung,
8. Tờ đề.

- Cho tất cả các tờ phiếu vào trong túi nhỏ. Đưa túi nhỏ vào trong túi lớn.
- Cho các dụng cụ làm bài và máy tính vào trong cặp.
- Một giám thị sẽ đến thu bài của em.
- Chờ tại bàn cho tới khi có chuông báo được rời khỏi phòng thi. Cầm theo chiếc cặp đựng dụng cụ làm bài.

Em không được phép mang bất cứ tờ giấy nào cũng như các dụng cụ thí nghiệm ra khỏi phòng thi.

Bảng các hằng số vật lý

Gia tốc trọng trường	g	$=$	$9.807 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
Áp suất khí quyển	P_{atm}	$=$	$1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$
Số Avogadro	N_A	$=$	$6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Hằng số Boltzmann	k_B	$=$	$1.381 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
Năng lượng liên kết của nguyên tử Hydro		$=$	-13.606 eV
Điện tích nguyên tố	e	$=$	$1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
Khối lượng của electron	m_e	$=$	$9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Khối lượng của proton	m_p	$=$	$1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Khối lượng của nơtron	m_n	$=$	$1.675 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Độ từ thẩm trong chân không	μ_0	$=$	$1.257 \times 10^{-6} \text{ Hm}^{-1}$
Hằng số khí	R	$=$	$8.315 \text{ Jmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Độ điện thẩm trong chân không (hằng số điện)	ϵ_0	$=$	$8.854 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$
Hằng số Planck	h	$=$	$6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Tốc độ truyền âm trong không khí (ở nhiệt độ phòng)	c_s	$=$	$3.403 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Tốc độ ánh sáng trong chân không	c	$=$	$2.998 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Hằng số Stefan-Boltzmann	σ	$=$	$5.670 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
Hằng số hấp dẫn	G	$=$	$6.674 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$

Từ điện trở khổng lồ (Giant Magnetoresistance - GMR)

I. GIỚI THIỆU

Từ điện trở là sự phụ thuộc của điện trở của mẫu vật vào từ trường ngoài. Nó được đặc trưng bởi công thức:

$$\delta(B) = \frac{R(B) - R(0)}{R(0)} \quad (1)$$

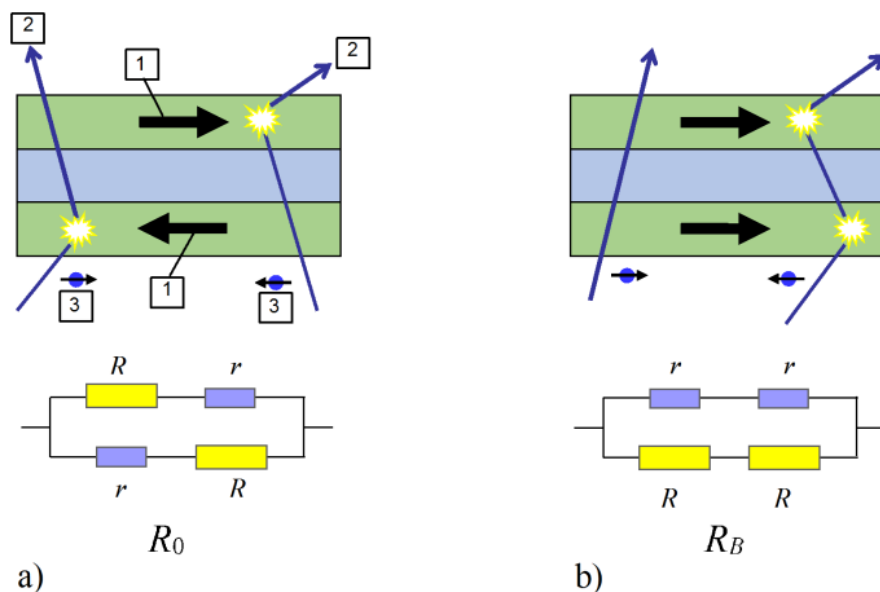
trong đó $R(B)$ là điện trở của mẫu vật đặt trong từ trường có cảm ứng từ B , và $R(0)$ tương ứng với $B = 0$; $\delta(B)$ được gọi là độ biến thiên tỉ đối của điện trở.

Có một số hiệu ứng từ điện trở "thông thường", tức là độ biến thiên điện trở tỉ đối nhỏ khi từ trường yếu, điển hình với độ biến thiên điện trở tỉ đối vào khoảng vài phần trăm. Ví dụ, một trong số các hiệu ứng từ điện trở xuất hiện do tác dụng trực tiếp của từ trường lên dòng điện. Do có lực Lorentz, dòng hạt mang điện sẽ bị lệch hướng chuyển động, điều này dẫn đến sự giảm độ linh động của các hạt mang điện. Vì vậy, khi tăng độ lớn từ trường thì độ dẫn điện giảm làm cho điện trở của vật tăng. Hiện tượng này xảy ra khi độ lớn từ trường thay đổi trong một khoảng tương đối rộng.

Từ điện trở khổng lồ xuất hiện là do tương tác của spin của các electron dẫn với các mô men từ trong vật rắn. Hiệu ứng này là sự giảm điện trở của cấu trúc đa lớp tạo thành bởi các lớp sắt từ và các lớp không sắt từ xen kẽ nhau với độ dày vào cỡ vài nano-mét khi cấu trúc đa lớp này được đặt trong từ trường ngoài. Điện trở thay đổi nhiều trong từ trường tương đối yếu; chính vì lí do này mà nó được gọi là hiệu ứng từ điện trở khổng lồ (GMR). Do hiệu ứng GMR có ý nghĩa thực tế rất lớn nên những người phát hiện ra hiện tượng này, là Albert Fert và Peter Grünberg, đã được trao giải thưởng Nobel Vật lí vào năm 2007.

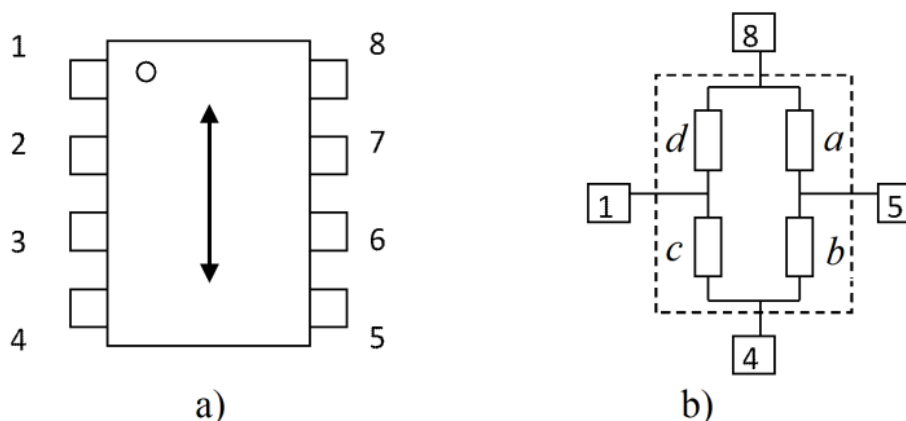
Trong một cấu trúc đa lớp như ở trên, hai lớp sắt từ liền kề có vectơ từ hóa ngẫu nhiên định hướng ngược chiều nhau khi không có từ trường ngoài. Chúng ta hãy giả sử rằng sự tán xạ của các electron dẫn với các mô men từ trong vật rắn là yếu khi các electron có spin định hướng cùng chiều với vectơ từ hóa, và là mạnh khi các electron có spin định hướng ngược chiều với vectơ từ hóa. Do đó cả các electron có spin cùng chiều và các electron có spin ngược chiều đều bị tán xạ mạnh với một trong số các lớp vật liệu sắt từ. Vì thế, trong trường hợp này, điện trở suất toàn phần của cấu trúc đa lớp này là lớn (xem Hình 1a).

Nếu một từ trường đủ mạnh được đặt song song với mặt phẳng của các lớp thì tất cả các lớp sắt từ bị từ hóa và vectơ từ hóa sẽ cùng chiều với từ trường ngoài. Kết quả là, các electron có spin cùng chiều với vectơ từ hóa sẽ đi qua cấu trúc này hầu như không tán xạ với các mô men từ. Ngược lại, các electron có spin ngược chiều với vectơ từ hóa bị tán xạ mạnh với các lớp sắt từ. Do sự dẫn điện xảy ra song song với hai kênh spin nên điện trở toàn phần của cấu trúc đa lớp này được xác định chủ yếu bởi các electron có spin cùng chiều với độ dẫn điện cao và điện trở toàn phần lúc này có giá trị nhỏ (xem hình 1b). Trên Hình 1, R ký hiệu điện trở lớn ứng với lớp có tán xạ mạnh, và r ký hiệu điện trở nhỏ ứng với lớp tán xạ yếu. R_0 là điện trở của cấu trúc khi từ trường ngoài bằng 0, và R_B là điện trở của cấu trúc khi từ trường đủ mạnh để làm cho hai lớp sắt từ liền kề bị từ hóa theo cùng một chiều. Mô hình mạch điện tương đương (còn gọi là mô hình "hai điện trở") của hiệu ứng GMR được vẽ ở phần dưới của Hình 1. Mạch điện của mô hình này biểu diễn một phần tử GMR.



Hình 1: Mô hình hiệu ứng GMR. (1) vectơ độ từ hóa; (2) đường đi của electron; (2) spin của electron

Một trong các ứng dụng của GMR là *cảm biến từ*, còn được gọi là *từ kế*, nó có thể được sử dụng để đo độ lớn của từ trường. Cảm biến từ được sử dụng phổ biến gồm 4 phần tử GMR được nối với nhau thành một mạch cầu Wheatstone như trên Hình 2b. Mỗi phần tử GMR gồm một cấu trúc đa lớp như đã mô tả ở trên. Hai trong số các phần tử này được che chắn để chống lại sự thâm nhập của từ trường và vì thế chúng không nhạy với từ trường ngoài. Cảm biến từ được đóng thành một thiết bị 8 chốt như trên Hình 2a. Nguồn cấp điện được nối với các chốt 4 và 8. Tín hiệu ra được lấy từ các chốt 1 và 5. Đây là một cách dùng bình thường. Tuy nhiên trong quá trình làm bài, em có thể nối nguồn với cặp chốt bất kỳ khác mà không làm hỏng cảm biến. Mũi tên trên Hình 2a chỉ trục độ nhạy của cảm biến. Cảm biến từ không nhạy đối với từ trường được đặt theo phương vuông góc với trục này.



Hình 2

Gọi điện trở của các phần tử là a, b, c, d như trên hình 2b.

Chú ý rằng có thể coi như điện trở của các phần tử không phụ thuộc vào cường độ dòng điện.

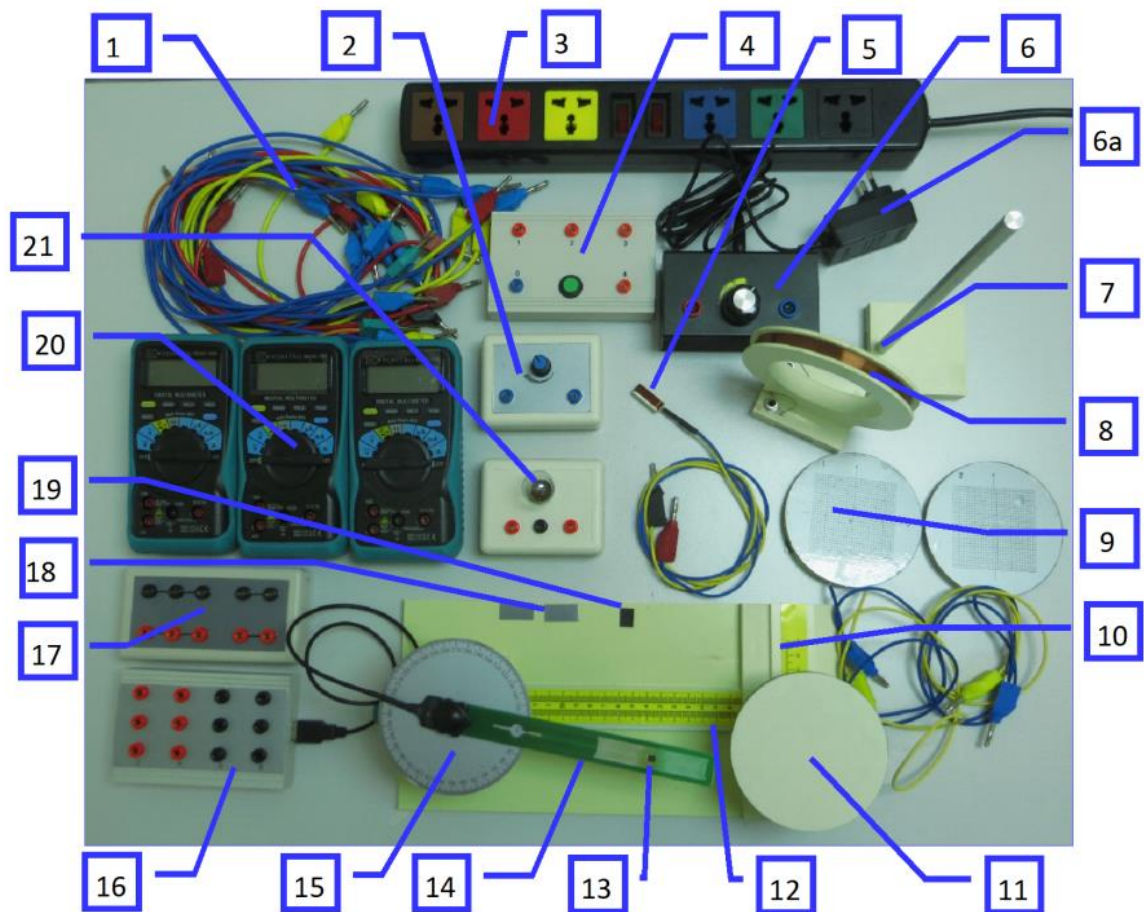
Để chế tạo các cảm biến với độ nhạy khác nhau người ta sử dụng bộ tập trung từ thông. Nhờ nó mà từ trường hiệu dụng tác dụng lên các phần tử bên trong cảm biến mạnh hơn từ trường ngoài.

Do sự có mặt của các vật liệu sắt từ bên trong bộ tập trung từ thông và bên trong các lớp từ tính của cấu trúc đa lớp mà sẽ xảy ra hiện tượng trễ trong các đặc trưng điện của cảm biến.

Mục đích thí nghiệm:

1. Nghiên cứu hiệu ứng GMR.
2. Nghiên cứu cảm biến từ GMR
3. Nghiên cứu một số ứng dụng của cảm biến từ GMR.

II. DỤNG CỤ



Hình 3

1	Dây dẫn	12	Giá đỡ có đường ray dọc
2	Biến trở	13	Cảm biến từ
3	Ổ cắm điện xoay chiều 220 V	14	Bộ phận giữ cảm biến
4	Bộ pin *)	15	Bàn tròn chia độ trên giá cố định bằng một cọc ngắn (không nhìn thấy trên hình)
5	Cuộn dây dẹt	16	Hộp kết nối cảm biến *)
6	Nguồn dòng DC điều chỉnh được (cùng với bộ đổi nguồn [6a])	17	Hộp kết nối
7	Giá đỡ với cọc cao	18	Tấm sắt từ
8	Cuộn dây tròn	19	Tấm nam châm vĩnh cửu
9	Bảng mạch in có mạch điện bị ẩn giấu	20	Đồng hồ đa năng *) (3 chiếc)
10	Ray ngang	21	Bóng đèn 2 dây tóc
11	Bàn xoay		

*) Xem thêm trong phần phụ lục

Cảnh báo: Nguồn xoay chiều 220 V chỉ dùng cho đèn bàn (không có mặt trong Hình 3) và bộ đổi nguồn (6a) của bộ nguồn dòng DC. Nghiêm cấm cắm bất kỳ thiết bị nào khác vào nguồn này.

III. THÍ NGHIỆM

A. Hiểu biết về từ trường (1.0 điểm)

Trong bài thí nghiệm này, từ trường có thể là:

- từ trường được tạo bởi:
 - một cuộn dây tròn có dòng điện;
 - một cuộn dây dẹt có dòng điện;
 - một tấm nam châm vĩnh cửu.
- từ trường của trái đất.

1. Từ trường được tạo bởi cuộn dây tròn

Cuộn dây tròn [8] có đường kính trung bình $d = 10.0$ cm với số vòng dây $N = 500$. Từ trường tại tâm của cuộn dây này khi có dòng điện cường độ I chạy qua có thể lấy xấp xỉ bằng từ trường sinh ra bởi một vòng dây tròn với đường kính bằng đường kính trung bình của cuộn dây và với dòng điện cường độ $500I$.

A.1 Độ lớn của từ trường tại tâm vòng dây có thể viết dưới dạng $B = kI$. Tính giá trị của k nếu B được đo theo đơn vị mT còn I đo theo đơn vị mA. 0.5pt

2. Từ trường của trái đất

Từ trường của trái đất tồn tại khắp nơi. Ta có thể coi như đó là từ trường đều trong vùng không gian rộng quanh mỗi điểm nhất định. Độ lớn của thành phần nằm ngang của từ trường trái đất được ký hiệu là B_h .

- | | | |
|------------|---|-------|
| A.2 | Ký hiệu B_β là độ lớn của từ trường trái đất được đo trong mặt phẳng nằm ngang, theo hướng hợp với thành phần nằm ngang của từ trường trái đất một góc β .
Viết biểu thức xác định B_β theo β và B_h . | 0.5pt |
|------------|---|-------|

Chú ý: Luôn tính đến ảnh hưởng của từ trường Trái đất lên các phép đo từ.

B. Khảo sát hiệu ứng GMR trên một cảm biến từ GMR (7 điểm)

Lưu ý: Phần này tương đối độc lập với các phần còn lại. Em có thể làm phần C và D trước mà không cần kết quả của phần B.

Trong phần này, chúng ta khảo sát sự phụ thuộc vào từ trường bên ngoài của điện trở của từng phần tử bên trong cảm biến từ. Cuộn dây tròn [8] được đặt trên đường ray dọc. Khay giữ cảm biến [14] được gắn trên tấm tròn [15] ở vị trí nằm ngang, với cảm biến từ [13] ở giữa cuộn tròn, và trục cảm biến vuông góc với mặt phẳng của cuộn dây. Bằng cách thay đổi dòng điện trong cuộn dây, chúng ta thay đổi từ trường tác động lên cảm biến. Đảm bảo rằng trục độ nhạy của cảm biến từ được định hướng dọc theo hướng Đông -Tây (được đánh dấu trên bàn thí nghiệm) sao cho từ trường Trái đất không ảnh hưởng đến các phép đo của bạn. Lưu ý rằng hướng Đông - Tây được xác định cục bộ bằng la bàn từ tính.

Cảm biến từ được cấp nguồn bởi bộ pin [4]. Cuộn dây tròn được cấp nguồn bằng dòng điện từ nguồn dòng DC có thể điều chỉnh [6].

1. Xác định điện trở của phần tử GMR.

a. Điện trở của các phần tử khi $B = 0$.

Đặt dòng điện chạy qua cuộn dây tròn là $I = 0$

- | | | |
|------------|---|--------|
| B.1 | Phác thảo sơ đồ thí nghiệm và tìm các biểu thức để tính toán điện trở của từng phần tử theo các dữ liệu đo lường. | 1.25pt |
|------------|---|--------|

- | | | |
|------------|--|--------|
| B.2 | Thực hiện các phép đo và tính giá trị điện trở của các yếu tố a , b , c và d khi $B = 0$. | 1.25pt |
|------------|--|--------|

b. Điện trở của các phần tử khi từ trường ngoài cực đại.

Đặt cường độ dòng điện I chạy qua cuộn dây với giá trị lớn nhất có thể.

- | | | |
|------------|--|-------|
| B.3 | Thực hiện các phép đo và tính điện trở của các phần tử a , b , c và d khi từ trường ngoài cực đại. | 0.5pt |
|------------|--|-------|

c. Đặc điểm của các phần tử.

- | | | |
|------------|--|--------|
| B.4 | Hãy chỉ ra các phần tử nhạy với từ trường. | 0.25pt |
|------------|--|--------|

2. Các đặc trưng của một phần tử GMR

Trong phần này, em hãy nghiên cứu các thuộc tính của một trong hai phần tử GMR không được che chắn. Chọn một trong những phần tử GMR như vậy và xác định sự phụ thuộc của độ biến thiên tỷ đối $\delta(B)$ của điện trở vào từ trường ngoài.

B.5	Nêu tên của phần tử GMR mà em chọn. Vẽ sơ đồ thí nghiệm và tìm biểu thức tính $\delta(B)$ theo các dữ liệu đo đạc.	0.75pt
B.6	Thực hiện các phép đo và các phép tính để xác định $\delta(B)$ theo từ trường ngoài B , trong khoảng từ 0 đến giá trị tối đa có thể. Điền vào bảng các giá trị của các đại lượng được đo và xác định $\delta(B)$ tương ứng với các giá trị của cường độ dòng điện I và từ trường bên ngoài B .	1.25pt
B.7	Vẽ đồ thị $\delta(B)$ theo từ trường ngoài B (Đồ thị 1).	0.5pt
B.8	Xác định độ dốc trung bình $\alpha = \frac{\Delta\delta(B)}{\Delta B}$ của đường cong $\delta(B)$ trong vùng mà $\delta(B)$ phụ thuộc mạnh vào B .	0.25pt
B.9	Xác định hệ số GMR $\delta = \frac{\Delta R_{max}}{R(0)}$ của phần tử. Ở đây ΔR_{max} là độ biến thiên cực đại của điện trở theo từ trường.	0.25pt
B.10	Tìm giá trị của các điện trở R và r của phần tử GMR theo mô hình được đưa ra trong Hình 1 và tỷ số $\gamma = \frac{r}{R}$.	0.75pt

C. Nghiên cứu cảm biến từ GMR (6 điểm)

Trong phần này, chúng ta nghiên cứu các đặc tính quan trọng nhất của cảm biến từ [13]. Cuộn dây tròn [8] đặt trên đường ray dọc [12]. Bộ phận giữ cảm biến [14] được vận trên tấm tròn [15] ở vị trí nằm ngang, sao cho cảm biến nằm ở giữa cuộn dây tròn, và trục cảm biến vuông góc với mặt phẳng của cuộn dây. Bằng cách thay đổi dòng điện trong cuộn dây, chúng ta thay đổi từ trường tác động lên cảm biến. Hãy chắc chắn rằng trục độ nhạy của cảm biến từ được định hướng theo hướng Đông-Tây sao cho từ trường Trái đất không ảnh hưởng đến các phép đo của bạn.

1. Các đặc trưng của tín hiệu đầu ra cảm biến

Cảm biến từ được cấp điện bởi bộ pin [4] ở điện áp tối đa. Điện áp được lấy vào qua chốt 4 và chốt 8. Cuộn dây tròn được cấp điện bởi nguồn dòng DC có thể điều chỉnh [6].

- Đầu tiên, đặt dòng điện I trong cuộn dây đến giá trị cao nhất có thể. Điện áp giữa chốt 1 và 5 là tín hiệu đầu ra S của cảm biến.
- Trong khi giảm dần cường độ dòng điện I trong cuộn dây về giá trị $I = 0$, đọc giá trị của S tương ứng với từng giá trị của I .
- Thay đổi chiều của dòng điện I trong cuộn dây. Trong khi tăng dần giá trị cường độ dòng điện đến giá trị cực đại, hãy đọc giá trị của S tương ứng với từng giá trị của I .
- Trong khi giảm dần cường độ dòng điện xuống $I = 0$, hãy đọc giá trị của S tương ứng với từng giá trị của I .
- Thay đổi cường độ dòng điện trong cuộn dây. Trong khi tăng dần giá trị của I tới giá trị cực đại, hãy đọc giá trị của S tương ứng với từng giá trị của I .

C.1	Điền vào bảng với các giá trị của S tương ứng với các giá trị của I trong cuộn dây và từ trường ngoài B trong quá trình đo ở trên.	1.0pt
C.2	Vẽ đồ thị $S(B)$ của tín hiệu đầu ra S theo từ trường ngoài B (Đồ thị 2).	1.0pt
C.3	1. Hãy khoanh vùng khu vực bão hòa của đường cong $S(B)$ và viết nhãn cho nó là "S". 2. Hãy khoanh vùng phần tuyến tính trên đường cong $S(B)$ và ghi nhãn cho nó là "L". Đối với khu vực này, hãy tìm giá trị trung bình của độ dốc $m = \frac{\Delta S}{\Delta B}$.	0.5pt
C.4	Từ đồ thị $S(B)$, xác định từ trường B_C của trường kháng từ, là từ trường ngoài cần thiết để tạo ra S nhỏ nhất sau khi bị từ hóa theo hướng ngược lại với trường bão hòa.	0.5pt

Lưu ý: Trong trường hợp em muốn sử dụng vùng tuyến tính của đường cong $S(B)$, em được dùng một tấm nam châm vĩnh cửu [19]. Chỉ cần đặt nam châm vĩnh cửu trên giá đỡ cảm biến [14], gần cảm biến [13] và thay đổi vị trí tương đối của nam châm so với cảm biến để chọn điểm làm việc trên đường cong. Sau khi tìm thấy điểm làm việc phù hợp, em có thể cố định nam châm trên giá đỡ bằng băng dính. Quá trình này được gọi là **biasing**.

2. Sự phụ thuộc của tín hiệu đầu ra theo điện áp cung cấp

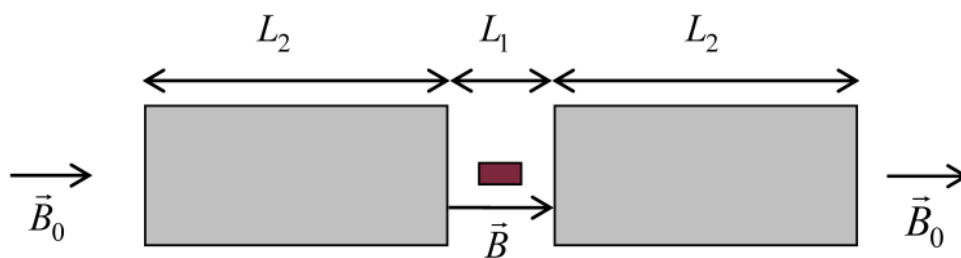
Cảm biến từ được cấp điện bởi bộ pin [4]. Bằng cách kết nối cảm biến với các chốt cắm khác nhau trên hộp pin, bạn có thể thay đổi điện áp nguồn E . Dòng điện I trong cuộn tròn được đặt ở giá trị tương ứng với vùng tuyến tính trên đường cong $S(B)$.

C.5	Điền vào bảng các giá trị S tương ứng với các giá trị của E .	0.25pt
C.6	Vẽ đồ thị của S theo E	0.25pt
C.7	Dẫn ra một biểu thức giải tích cho tín hiệu đầu ra S của cảm biến theo độ dốc α của phần tử GMR được tìm ra trong B.8, điện áp cung cấp E và đặt trong từ trường B . Ở đây, ta giả thiết rằng α là như nhau với hai phần tử này và không có tính từ trễ trong các phần tử. Bên cạnh đó, chúng ta giả sử rằng trong trường hợp không có từ trường, giá trị của điện trở của cả 4 phần tử đều giống nhau.	0.5pt

3. Nghiên cứu các hiệu ứng của bộ tập trung từ thông

Bộ tập trung từ thông tích hợp bên trong cảm biến từ bao gồm hai cấu trúc sắt từ màng mỏng với độ dày cỡ micromet, với chiều dài vào khoảng hàng trăm micromet. Mục đích của bộ tập trung từ thông là khuếch đại từ trường trong khoảng giữa các cấu trúc.

Để nghiên cứu ảnh hưởng của bộ tập trung từ thông đến bộ cảm biến từ, chúng ta sử dụng bộ tập trung từ thông ngoài làm từ hai tấm sắt từ (như trong hình 4) đặt gần hai đầu của cảm biến, với chiều dài L_2 , và khoảng cách L_1 .



Hình 4. Biểu đồ bộ tập trung từ thông

Một khi bộ cảm biến với bộ tập trung từ thông được đặt trong một từ trường đều có độ lớn B_0 , từ trường hiệu dụng tác động lên cảm biến là B . Trong một phạm vi không thay đổi quá lớn của L_1 , B có thể được tìm thấy bằng cách sử dụng công thức thực nghiệm:

$$\frac{B}{B_0} = n \frac{L_2}{L_1} + 1 \quad (2)$$

Em hãy thực hiện một thí nghiệm với cảm biến từ và hai tấm sắt từ [18] để xác định giá trị n trong công thức (2).

C.8		1.0pt
	Trong thí nghiệm này, em sẽ sử dụng từ trường nào sau đây? a. Từ trường của cuộn dây tròn có dòng điện b. Từ trường của cuộn dây dẹt mang dòng điện c. Từ trường của tấm nam châm vĩnh cửu d. Từ trường của Trái đất	0.25pt
	Vẽ sơ đồ thí nghiệm và tìm biểu thức để xác định giá trị của n theo dữ liệu đo lường.	0.75pt
C.9	Thực hiện thí nghiệm để tìm B/B_0 với các giá trị L_1 khác nhau và điền vào bảng số liệu đo được.	0.5pt
C.10	Vẽ đồ thị sự phụ thuộc của B/B_0 theo một biến thích hợp để xác định giá trị của n (Đồ thị 4). Cho biết giá trị n .	0.5pt

D. Các ứng dụng của cảm biến từ GMR (6 điểm)

Trong phần này, chúng ta xem xét một số ứng dụng của cảm biến từ.

1. Đo từ trường Trái đất

Em hãy sử dụng cảm biến từ để xác định một số thông số của từ trường Trái Đất. Em được cung cấp thêm một số tờ giấy vẽ đồ thị. Em có thể cần chúng để giải quyết câu hỏi này.

a. Độ lớn thành phần nằm ngang của từ trường Trái đất

Cố định tấm tròn [15] trên mặt phẳng nằm ngang. Bộ phận giữ cảm biến [14] bị vặn trên tấm tròn. Bằng cách xoay bộ phận giữ cảm biến trên tấm tròn, em có thể xác định thành phần trong mặt phẳng nằm ngang của từ trường Trái đất theo các hướng khác nhau của trục cảm biến.

D.1	Hãy vẽ sơ đồ thí nghiệm và tìm các biểu thức để tính toán độ lớn của thành phần nằm ngang B_h của từ trường Trái đất theo các dữ liệu đo lường.	0.5pt
------------	---	-------

D.2	Thực hiện các phép đo và các phép tính toán để tìm B_h .	0.25pt
------------	--	--------

b. Độ lớn của từ trường Trái đất và độ từ khuynh.

Độ từ khuynh θ là góc hợp giữa véc tơ từ trường trái đất $\vec{B}_{Earth}$ với phương ngang.

Cố định tấm tròn [15] trên cọc cao [7], với tấm tròn trong mặt phẳng thẳng đứng chứa hướng Nam-Bắc. Bộ phận giữ cảm biến [14] được xiết trên tấm tròn. Bằng cách xoay bộ phận giữ cảm biến trên tấm tròn, em có thể xác định thành phần của từ trường Trái đất theo các hướng khác nhau của trục cảm biến.

D.3	Vẽ sơ đồ thí nghiệm và tìm các biểu thức để tính toán từ trường Trái đất B_{Earth} và độ từ khuynh θ theo các dữ kiện đo.	0.75pt
------------	--	--------

D.4	Thực hiện các phép đo và các phép tính toán để tìm B_{Earth} và θ .	0.5pt
------------	--	-------

2. Oát kế một chiều.

Trong phần này, em sử dụng cảm biến từ để tạo thành mạch của một oát kế. Cuộn dây dẹt [5] quấn quanh cảm biến. Cuộn dây dẹt này được mắc nối tiếp với tải, do đó dòng điện trong cuộn dây dẹt bằng dòng điện qua tải. Dòng điện I trong cuộn dây dẹt tạo ra từ trường hoạt động trên cảm biến và điện áp U trên tải được sử dụng để cung cấp cho cảm biến.

Tín hiệu đầu ra S của cảm biến được sử dụng để xác định công suất P bị tiêu tán trong tải.

Bóng đèn điện hai dây tóc [21] được sử dụng làm tải. Bằng cách sử dụng ba chốt của bóng đèn theo những cách khác nhau, bạn có thể nhận được một vài giá trị của điện trở tải R_L .

Trong nhiều trường hợp, cầu Wheatstone của cảm biến từ không cân bằng ngay cả khi không có từ trường bên ngoài tác động lên nó. Điều này là do sự khác biệt nhỏ về điện trở của các phần tử và sự từ trễ của các lớp sắt từ. Trong trường hợp này, trước khi sử dụng trong mạch của oát kế, em cần một mạch cầu cân bằng. Bộ phận giữ cảm biến [14] được vặn trên tấm tròn [15] ở vị trí nằm ngang. Cảm biến được cấp điện bởi bộ pin [4] với điện áp cao nhất. Định hướng cảm biến vuông góc với từ trường Trái đất. Quan sát tín hiệu đầu ra S trên một đồng hồ đa năng. Nếu cầu được cân bằng thì em không cần phải làm gì khác. Nếu cầu không cân bằng thì em cần cân bằng nó. Kết nối bộ biến trở [2] song song với một trong các phần tử a , b , c và d , mà khi biến trở được kết nối với nó, S giảm độ lớn của nó. Điều chỉnh biến trở để giảm S về 0. Bây giờ cầu được cân bằng. Quá trình này được gọi là cân bằng hóa.

Trong một số trường hợp, việc sử dụng bộ biến trở không thể giúp cân bằng cầu. Trong trường hợp này, xoay bộ phận giữ cảm biến đi một góc nhỏ sao cho tín hiệu đầu ra S được giảm xuống $S = 0$.

- | | | |
|------------|---|-------|
| D.5 | Phác thảo sơ đồ mạch oát kế cùng với các tải và các đồng hồ đa năng được sử dụng trong các phép đo. | 0.5pt |
|------------|---|-------|

Sử dụng Hộp kết nối [17] để xây dựng mạch của oát kế theo sơ đồ của em. Thay đổi điện trở của tải R_L và điều chỉnh đầu ra của nguồn dòng DC [6] để thay đổi điện áp U trên tải.

- | | | |
|------------|--|--------|
| D.6 | Điền vào bảng với các giá trị của tín hiệu đầu ra cảm biến S tương ứng với các giá trị của I và U , và của $P = U.I$ | 0.75pt |
|------------|--|--------|

- | | | |
|------------|--|-------|
| D.7 | Vẽ đồ thị của P theo S (Đồ thị 5) | 0.5pt |
|------------|--|-------|

Đường cong $P = f(S)$ được gọi là đường chuẩn của oát kế.

- | | | |
|------------|---|--------|
| D.8 | Tìm dạng hàm của đường chuẩn $P = f(S)$ và xác định giá trị của các hệ số của nó. | 0.25pt |
|------------|---|--------|

3. Xác định mạch điện bị ẩn giấu

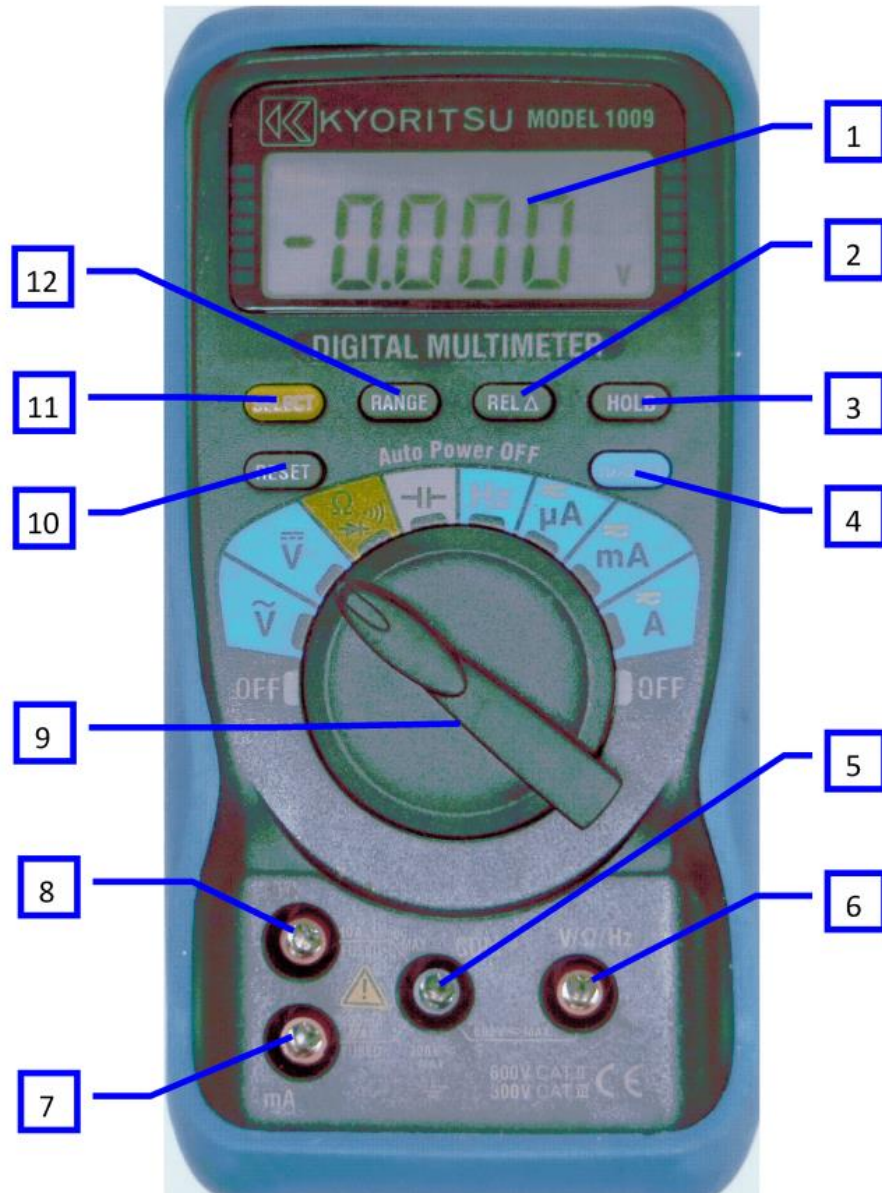
Trong phần này, em hãy sử dụng cảm biến từ để tạo thành một thiết bị tìm hình dạng của hai mạch điện bị ẩn giấu. Mạch điện được tạo trên bề mặt được che khuất của bảng mạch in. Một tấm lưới được gắn trên bề mặt đảo ngược của bảng mạch in đóng vai trò như một hệ tọa độ.

Em có thể thực hiện thí nghiệm này theo cách sau. Đặt tấm tròn [15] ở vị trí nằm ngang và cố định vào cột ngắn. Bộ phận giữ cảm biến [14] bị vặn trên tấm tròn. Bảng mạch in với mạch điện bị ẩn giấu [9] đặt phẳng trên bàn xoay [11]. Bàn xoay được tự do xoay trong mặt phẳng nằm ngang, và cũng có thể di chuyển theo hai hướng vuông góc, dọc theo đường ray [10] và [12]. Kết nối dây dẫn của bảng mạch in với nguồn dòng DC có thể điều chỉnh [6], với dây dẫn màu đỏ ở cực dương. Điều chỉnh dòng điện của nguồn dòng DC để chọn giá trị dòng điện trong mạch. Bằng cách di chuyển bảng mạch in tương đối so với cảm biến từ [13], và nhìn vào sự thay đổi trong tín hiệu đầu ra S của cảm biến, bạn có thể phát hiện vị trí và hình dạng của mạch được giấu và cả chiều của dòng điện trong mạch được ẩn giấu. Em được cung cấp thêm một số Bảng Lưới có khoảng chia lớn, em có thể cần chúng trong việc giải quyết câu hỏi này.

- | | | |
|------------|--|-------|
| D.9 | Vẽ sơ đồ của các mạch điện được giấu cùng với chiều dòng điện trong chúng trên các tấm lưới trong phiếu trả lời. | 2.0pt |
|------------|--|-------|

PHỤ LỤC

1. Hướng dẫn sử dụng đồng hồ đa năng



Hình A1

1	Màn hiển thị	7	Cổng đo (mA)
2	Phím REL	8	Cổng đo (A)
3	Phím HOLD	9	Núm lựa chọn chức năng/thang đo
4	Phím Hz/DUTY	10	Núm RESET
5	Cổng (COM)	11	Phím SELECT
6	Cổng đo (V/ Ω /Hz)	12	Phím RANGE

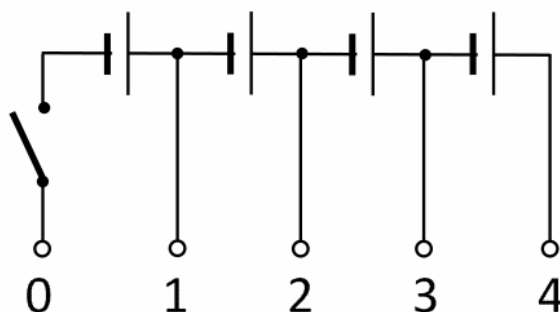
- Để tránh phức tạp, không sử dụng các phím sau: REL [2], HOLD [3], Hz, DUTY [4], RESET [10].
- Để bật đồng hồ đa năng và bắt đầu một phép đo, hãy xoay núm lựa chọn chức năng [9] đến chức năng cần chọn.
- Sử dụng cổng (V/ Ω /Hz) [6] và cổng (COM) [5] để đo hiệu điện thế và điện trở.
- Sử dụng cổng (A) [8] và cổng (COM) [5] và Chức năng A để đo cường độ dòng điện.
- Đồng hồ đa năng sẽ tự động tắt sau khi bật khoảng 30 phút. Xoay núm lựa chọn chức năng đến OFF rồi sau đó xoay trở lại chức năng đang sử dụng để tiếp tục đo.

Để đồng hồ không tự động tắt, hãy bấm vào phím SELECT trong khi quay núm lựa chọn chức năng đến chức năng cần sử dụng.

2. Bộ pin

Nguồn điện được mắc theo sơ đồ mạch trên Hình A2.

Nguồn sẽ bật khi bấm vào khóa và sẽ tắt nếu khóa mở.



Hình A2

3. Hộp kết nối cảm biến

Trước khi sử dụng cảm biến, cáp nối của nó cần được cắm vào hộp kết nối cảm biến, các con số ghi trên hộp tương ứng với số chốt trên Hình 2.

Bài lý thuyết 1

Phép đo phản xạ vô tuyến (RF) cho việc đọc spin trong tính toán lượng tử silic

Giới thiệu

Phát triển ý tưởng tính toán lượng tử thành một công nghệ trong thực tế là một trong những thách thức lớn nhất trong khoa học và công nghệ. Một con đường đầy hứa hẹn là điều khiển các electron riêng lẻ trong các tranzito silic bằng các trường điện từ phụ thuộc thời gian.

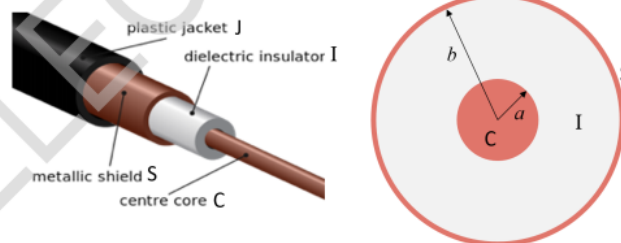
Trong bài toán này, chúng ta tìm hiểu cách sử dụng phép đo phản xạ tần số vô tuyến (RF - radio frequency) và tranzito đơn electron để đọc trạng thái của các bit lượng tử trong một máy tính lượng tử trên cơ sở silic.

Phần A và Phần B thảo luận về truyền sóng vô tuyến qua cáp và đường truyền, phần C dành cho các điều kiện phản xạ sóng, phần D giới thiệu tranzito đơn electron, và phần E và F giới thiệu và yêu cầu em tối ưu hóa phương pháp đo phản xạ.

Phần A: Mô hình phần tử tập trung của đường truyền đồng trục (2.0 điểm)

Khi mô hình hóa tín hiệu một chiều (DC) hoặc tần số thấp, người ta thường coi rằng một xung điện áp truyền đi tức thời trong toàn mạch. Giả thiết này là đúng khi bước sóng của các tín hiệu đó dài hơn nhiều so với kích thước của mạch, tuy nhiên khi làm việc với tín hiệu tần số vô tuyến, quá trình động học trở nên phức tạp hơn và chúng ta cần tính đến điện dung và độ tự cảm của cáp trong mô hình của chúng ta. Ta mô hình hóa một đường truyền đồng trục hoạt động như một ống dẫn sóng, như được mô tả dưới đây, bỏ qua điện trở nhỏ của đồng và độ dẫn điện nhỏ của vật liệu điện môi.

Trong suốt bài toán, ta xem xét giới hạn bước sóng lớn của sóng điện từ trong cáp đồng trục sao cho điện trường và từ trường vuông góc với trục của cáp ở mọi nơi (được gọi là kiểu sóng điện từ ngang).



Sơ đồ của một cáp đồng trục, trong đó, C là lõi trung tâm, I là chất điện môi, S là lớp chắn kim loại và J là lớp vỏ bọc bằng nhựa.

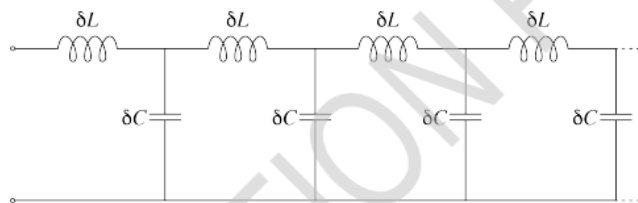
Xét một sợi cáp đồng trục được cấu tạo bởi một lõi bằng đồng có điện trở và độ từ thẩm không đáng kể, có bán kính a , được bao phủ bên ngoài bởi một màn chắn bằng đồng đồng trục, với bán kính trong là b . Một lớp điện môi có độ điện thẩm tương đối không thứ nguyên ϵ_r và độ từ thẩm tương đối không thứ nguyên μ_r được đặt ngăn cách giữa lõi và màn chắn. Khi tín hiệu điện từ truyền đi trong cáp đồng trục, chúng bị giới hạn giữa lõi ở trong và màn chắn ở ngoài.

A.1 Sóng điện từ truyền đi với tốc độ nào trong cáp đồng trục ?

0.2pt

A.2	Nếu có một điện tích Δq trên đoạn dài Δx của lõi trong của cáp đồng trục, và nếu màn chắn được nối đất, hãy tìm điện trường trong vùng giữa lõi và màn chắn.	0.2pt
A.3	Hãy tìm điện dung trên mỗi đơn vị chiều dài, C_x , của cáp đồng trục. Em có thể xét trên đoạn dài Δx của cáp.	0.3pt
A.4	Hãy tìm độ tự cảm trên mỗi đơn vị chiều dài, L_x , của cáp đồng trục.	0.3pt

Một mô hình *phần tử tập trung* của cáp được xây dựng bằng cách xét độ tự cảm và điện dung của các đoạn ngắn của cáp. Độ tự cảm được coi là tính chất của lõi bên trong, và điện dung liên kết giữa lõi với màn chắn. Một sơ đồ của mô hình phần tử tập trung được hiển thị dưới đây.

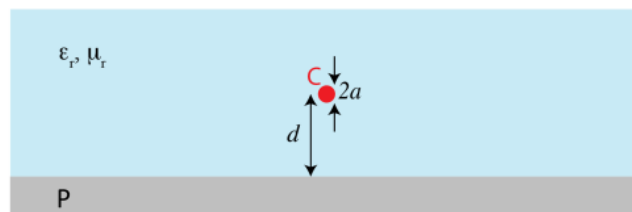


Sơ đồ mạch điện của mô hình phần tử tập trung của cáp đồng trục.

A.5	i. Hãy chứng tỏ rằng trở kháng Z_0 của dây cáp nửa vô hạn là $Z_0 = \sqrt{L_x/C_x}$. ii. Hãy tìm b/a nếu sợi cáp có trở kháng $Z_0 = 50 \Omega$ và nó được làm từ vật liệu điện môi có $\epsilon_r = 4.0$ và $\mu_r = 1.0$.	1.0pt
------------	---	-------

Phần B: Đường truyền giả định với đường quay trở lại dọc theo mặt phẳng nối đất (1 điểm)

Một đường truyền giả định thay thế được hiển thị trong sơ đồ dưới đây. Tín hiệu đầu vào được gửi vào qua một dây dẫn rất mảnh có bán kính a , đặt cách một khoảng $d \gg a$ tới một mặt phẳng có độ dẫn điện cao được nối đất. Vật liệu xung quanh dây dẫn có độ điện thẩm tương đối không thứ nguyên ϵ_r và độ từ thẩm tương đối không thứ nguyên μ_r . Dòng điện chạy quay trở lại dọc theo mặt phẳng nối đất.



Sơ đồ đường truyền giả định, trong đó, C là dây dẫn có bán kính a , đặt ở khoảng cách $d \gg a$ tới P là mặt phẳng dẫn điện tốt, nối đất. Dây dẫn được nhúng trong một vật liệu có độ điện thẩm tương đối không thứ nguyên ϵ_r và từ thẩm tương đối không thứ nguyên μ_r .

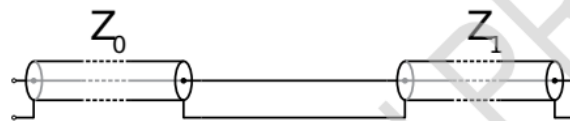
B.1 Hãy tìm biểu thức cho trở kháng đặc trưng của đường truyền giả định này.

1.0pt

Phần C: Cơ sở của phép đo phản xạ RF (1.2 điểm)

Một sóng điện từ có thể lan truyền trong một đường truyền theo hai hướng ngược nhau. Đối với mỗi hướng truyền, trở kháng đặc trưng Z_0 có thể được dùng để liên hệ điện áp V_0 và cường độ dòng điện I_0 theo định luật Ohm's, $Z_0 = V_0/I_0$.

Xét một chỗ nối giữa hai đường truyền, với các trở kháng đặc trưng Z_0 và Z_1 . Một sơ đồ mạch được hiển thị dưới đây.



Sơ đồ mạch của một đường truyền có trở kháng Z_0 được nối với một đường truyền có trở kháng Z_1 . Kích thước vật lý của chỗ nối là nhỏ hơn nhiều bước sóng.

Khi một tín hiệu V_i được gửi vào đường truyền có trở kháng Z_0 đi đến chỗ nối, nó được truyền một phần vào đường truyền thứ hai, tạo ra một tín hiệu V_t trong đường truyền đó, và truyền về phía trước. Một phần tín hiệu cũng có thể bị phản xạ, gây nên tín hiệu V_r lan truyền ngược trong đường truyền ban đầu.

C.1 Hãy tìm hệ số phản xạ của chỗ nối $\Gamma = V_r/V_i$.

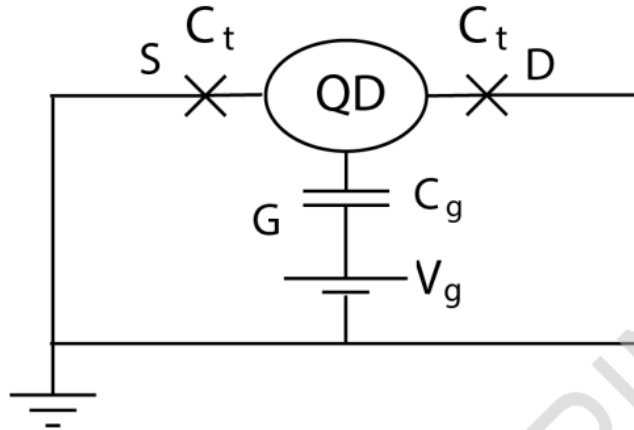
1.0pt

C.2 Hãy nêu (các) điều kiện để tín hiệu V_i đạt được sự thay đổi pha π khi phản xạ.

0.2pt

Phần D: Tranzito đơn electron (3.3 điểm)

Một tranzito đơn electron (SET - single electron transistor) bao gồm một chấm lượng tử, là một vật dẫn nhỏ được cách điện, mà trong đó có các electron, và một số điện cực ở vùng lân cận. Điện cực cửa liên kết điện dung với chấm lượng tử, còn hai điện cực kia — điện cực nguồn và điện cực máng — được mắc vào chấm lượng tử thông qua các lớp chuyển tiếp xuyên ngầm, qua đó các electron có thể xuyên ngầm theo cơ chế lượng tử. Một sơ đồ mạch đơn giản hóa cho một SET được thấy trong hình sau.



Sơ đồ đơn giản hóa của một SET, trong đó, QD là chấm lượng tử (quantum dot), S là điện cực nguồn (source), D là điện cực máng (drain) và G là điện cực cửa (gate).

Điện dung của điện cực cửa là C_g và điện dung các lớp chuyển tiếp xuyên ngầm là $C_t \ll C_g$. Coi C_g là điện dung toàn phần của chấm lượng tử. Trong phần này của bài toán, điện cực nguồn và điện cực máng được giữ ở điện thế bằng không, và điện áp trên điện cực cửa được cố định ở V_g .

- D.1** Xét trạng thái của SET mà trong đó, chấm lượng tử chứa n electrons. 1.5pt
- Hãy tìm điện thế φ_n trên QD.
 - Hãy tìm lượng năng lượng cần thiết ΔE_n để đưa thêm một electron từ điện cực nguồn hoặc điện cực máng vào QD.

Nếu $\Delta E_n < 0$ thì các electron sẽ xuyên ngầm một cách tự phát vào chấm lượng tử cho đến khi số $N > n$ đạt được, làm cho $\Delta E_N \geq 0$. Số lượng cân bằng của các electrons N và năng lượng bổ sung tương ứng ΔE_N có thể được điều khiển bằng cách chọn điện áp phù hợp V_g .

- D.2** Hãy tìm biểu thức cho giá trị cực đại có thể có $E_c = \max \Delta E_N(V_g)$ của năng lượng bổ sung cân bằng mà ta có thể đạt được bằng cách điều chỉnh điện áp cực cửa của SET. 0.5pt

Nếu $\Delta E_N = 0$ thì sự xuyên ngầm của các electron không đòi hỏi thêm năng lượng và SET ở trạng thái dẫn điện tốt ON. Nếu $\Delta E_N > 0$, thì độ dẫn của SET bị giảm đi (trạng thái điện trở cao OFF).

Để số lượng electron trên chấm lượng tử vẫn được giữ ở một giá trị xác định, một số điều kiện cần phải được thỏa mãn. Trước tiên, nếu các electron trong điện cực nguồn hoặc điện cực cửa có năng lượng nhiệt đủ để dịch chuyển tự phát vào chấm lượng tử, thì độ tương phản giữa trạng thái ON và OFF sẽ biến mất.

- D.3** Hãy tìm một điều kiện về nhiệt độ của các electron để electron không thể dịch chuyển vào chấm lượng tử nhờ kích thích nhiệt. 0.5pt

Thứ hai, sự xuyên ngầm của các electron vào hoặc ra khỏi chấm lượng tử làm giới hạn thời gian sống của các trạng thái năng lượng của chúng. Sự xuyên ngầm này có thể được mô hình hóa bằng cách dùng một điện trở hiệu dụng của lớp chuyển tiếp xuyên ngầm, với thời gian xuyên ngầm đặc trưng bằng với thời gian đặc trưng để tích hoặc phóng điện của chấm lượng tử qua lớp chuyển tiếp.

- D.4** i. Hãy ước tính thời gian xuyên ngầm cho một chấm lượng tử theo điện dung C_t và điện trở hiệu dụng R_t của lớp chuyển tiếp xuyên ngầm. 0.8pt
 ii. Hãy tìm điều kiện của điện trở hiệu dụng R_t sao cho các electron trong chấm lượng tử giữ lại năng lượng đủ để có sự phân biệt giữa trạng thái ON và OFF.

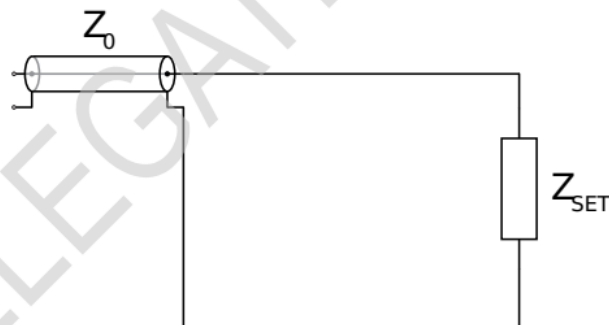
Phần E: Phép đo phản xạ RF để đọc trạng thái của SET (1,0 điểm)

Trạng thái của SET rất nhạy với các điện thế được gây nên bởi các phần tử lân cận của mạch lượng tử (như các bit lượng tử), và việc phân biệt giữa các trạng thái ON và OFF cung cấp một cách đọc thông tin do máy tính lượng tử tạo ra. SET ở trạng thái ON có thể được mô hình hóa bằng điện trở $R_{ON} = 100 \text{ k}\Omega$, trong khi ở trạng thái OFF, ta có thể coi SET là một vật cách điện hoàn toàn (bỏ qua mọi kết nối điện dung giữa điện cực nguồn và điện cực máng qua SET). Mặc dù có thể xác định trạng thái của SET bằng cách đo đáp ứng với tín hiệu đầu vào thông qua điện cực nguồn, nhưng sẽ nhanh hơn nếu dùng phép đo phản xạ RF để đo cả biên độ và pha của tín hiệu phản xạ, tức là xác định độ phản xạ Γ .

Sự thay đổi độ phản xạ do chuyển đổi SET giữa trạng thái ON và OFF là

$$\Delta\Gamma = |\Gamma_{ON} - \Gamma_{OFF}|, \quad (1)$$

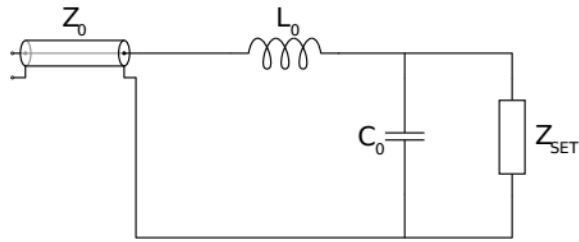
trong đó, Γ_{ON} và Γ_{OFF} là độ phản xạ của hai trạng thái khác nhau.



Sơ đồ mạch của cáp truyền có trở kháng Z_0 được kết nối với SET.

- E.1** Hãy tìm sự thay đổi độ phản xạ $\Delta\Gamma$ giữa trạng thái dẫn điện và cách điện cho một SET điển hình được kết nối với cáp đồng trục có trở kháng 50Ω . 0.2pt

Để tăng sự thay đổi độ phản xạ, và do đó tăng độ nhạy của phép đo phản xạ RF, mạch được sửa đổi bằng cách đưa vào một cuộn cảm. Điện dung nội tại của dụng cụ $C_0 \approx 0.4 \text{ pF}$ cũng cần được tính đến. Phép đo phản xạ RF được tiến hành bằng cách sử dụng tín hiệu có tần số góc ω_{rf} .



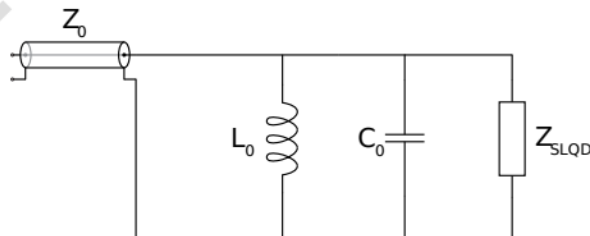
Mạch SET được sửa đổi.

- E.2** Hãy ước tính giá trị của độ tự cảm L_0 có thể dẫn đến sự thay đổi độ phản xạ khoảng một đơn vị. Hãy tính giá trị số cho kết quả ước tính L_0 cho $\omega_{rf}/(2\pi) = 100$ MHz và tính toán $\Delta\Gamma$. 0.8pt

Phần F: Cảm biến điện tích với một chấm lượng tử đơn dây (1,5 điểm)

Đối với kiến trúc tính toán lượng tử có thể mở rộng, số lượng dây đi tới từng bit lượng tử riêng lẻ cần phải được giảm thiểu. Một giải pháp thay thế cho SET đầy hứa hẹn cho một bộ cảm biến điện tích trong tính toán lượng tử silic là chấm lượng tử đơn dây (SLQD - single lead quantum dot). Theo nhiều cách, nó tương tự như một SET, nhưng không có dây nối vào điện cực nguồn và điện cực máng. Điện cực cửa là điện cực duy nhất, qua đó, các trạng thái năng lượng electron của chấm lượng tử được điều khiển, và cũng thông qua đó phép đo phản xạ RF được tiến hành.

Tương tự như SET, SLQD có trạng thái OFF, trong đó SLQD hoạt động như một chất cách điện hoàn toàn. Trái ngược với SET, trạng thái ON của SLQD có tính điện dung, có điện dung là C_q . Để tối đa hóa sự khác biệt về độ phản xạ $\Delta\Gamma$ của SLQD, mạch sau đây được thiết kế. Điện dung kí sinh $C_0 \approx 0.4$ pF được cố định bởi hình dạng mạch, tuy nhiên, giá trị L_0 và tần số hoạt động có thể được thay đổi để tối ưu hóa hiệu quả. Trở kháng đặc trưng của đường truyền là $Z_0 = 50 \Omega$.



Sơ đồ mạch của mạch đọc SLQD kết nối với đường truyền.

- F.1** Hãy đề xuất ω_{rf} và $Z_C = \sqrt{L_0/C_0}$ để có được $\Delta\Gamma \sim 1$ với C_0 và C_q đã cho. 1.0pt

Các giá trị tối ưu của L_0 là tương đối lớn và không phải lúc nào cũng khả thi về mặt kĩ thuật. Do đó, các loại phần tử mạch khác có thể là cần thiết để cải thiện độ nhạy của mạch đọc phản xạ.

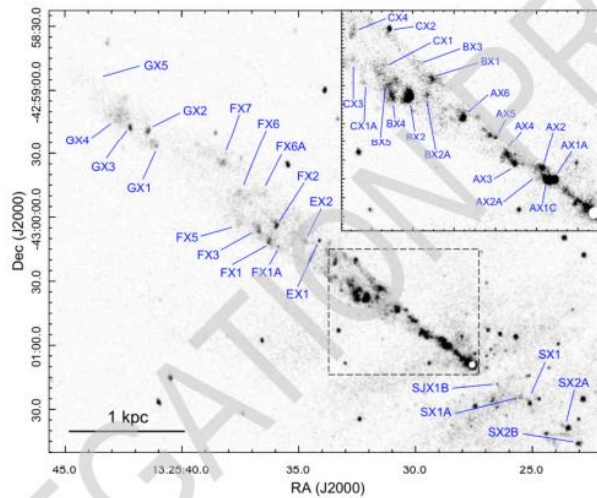
- F.2** Giả sử rằng L_0 (và do vậy Z_C) là cố định. Vẽ sơ đồ mạch cho biết nơi đặt một phần tử bổ sung trong mạch đọc SLQD, và tìm (các) tham số của phần tử này để $\Delta\Gamma \sim 1$ vẫn có thể đạt được mà không cần độ tự cảm lớn. 0.5pt

Bài lý thuyết 2

Luồng phóng tia X từ các hạt nhân thiên hà hoạt động

Giới thiệu

Các hạt nhân thiên hà hoạt động (AGN - Active Galactic Nuclei) là các lỗ đen siêu lớn tạo thành trung tâm của các thiên hà và phát ra một lượng lớn năng lượng trong các dòng bức xạ và dòng hạt. Một đặc điểm của nhiều AGN là các luồng phóng ra ngoài, có thể được quan sát thông qua phát xạ sóng vô tuyến và đôi khi cũng ở các phần khác của phổ sóng điện từ, bao gồm cả tia X. Những luồng phóng này (dưới đây gọi là: **jet**) là những dòng plasma lớn với tốc độ tương đối tính, có chiều dài cỡ độ lớn 10^{20} m, tức là hàng chục ngàn năm ánh sáng. Sự phát xạ tia X từ jet thường bị chi phối bởi sự phát xạ synchrotron từ các electron tương đối tính chuyển động xoắn trong từ trường của jet.



Hình 1: Hình ảnh tia X của jet từ AGN Centaurus A. Các vùng tối hơn diễn tả vùng tia X có cường độ cao hơn. Các vùng sáng hơn trong jet mờ hơn được gọi là các nút thắt. (Snios *et al.*, 2019)

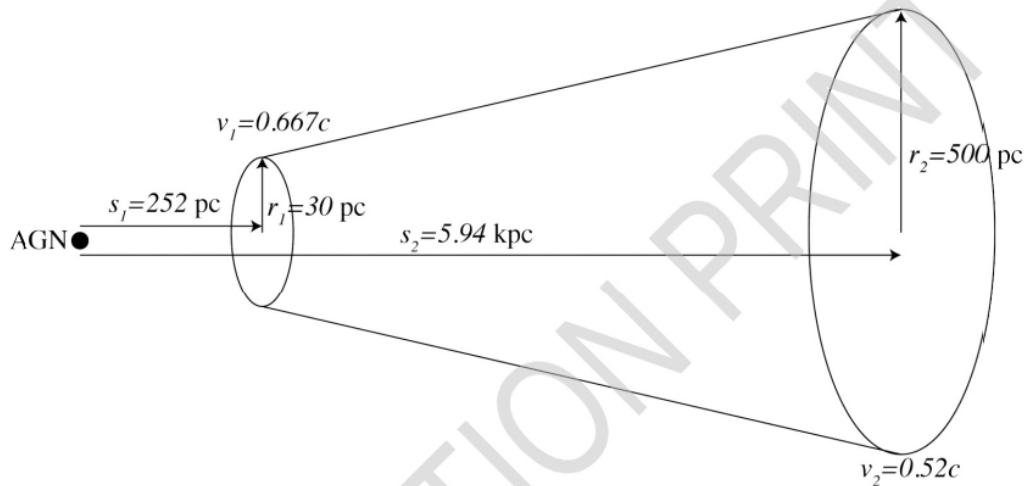
Phần A: Mô hình chất lỏng một chiều của jet

Một mô hình đơn giản của dòng chảy của các jet giả thiết là những dòng chảy ổn định và đi từ AGN trung tâm hướng thẳng ra ngoài, tức là gần như chuyển động một chiều, và plasma trong jet ở trạng thái cân bằng áp suất với môi trường xung quanh. Giả thiết rằng, khối lượng trên mỗi đơn vị thể tích được bơm vào jet với tốc độ không đổi từ các ngôi sao bị mất lớp ngoài khi chúng chuyển động trong suốt vòng đời của chúng.

Jet được mô tả theo tọa độ s , là khoảng cách từ AGN và bán kính mở r của jet hình nón. Các khoảng cách này được đo bằng parsec (pc), trong đó, $1 \text{ pc} = 3.086 \times 10^{16} \text{ m}$. Vận tốc của dòng jet được giả thiết là hướng hoàn toàn theo phương bán kính, đi ra khỏi AGN trung tâm, và là một hàm chỉ của s . Plasma trong jet bao gồm các electron, proton và một số hạt nhân nặng hơn bị ion hóa. Năng lượng trung bình của mỗi hạt trong jet trong hệ quy chiếu gần với dòng của jet (mà ta gọi là hệ quy chiếu jet) là $\epsilon_{av} = \mu_{pp}c^2 + h$, trong đó số hạng $h = \frac{13}{4}P/n$ bao gồm tất cả động năng chuyển động nhiệt và các thế năng tính theo áp suất P và n là mật độ số hạt của plasma.

Khi các ngôi sao, mà jet chảy qua, chuyển động trong suốt vòng đời của chúng, chúng có thể mất một phần của bầu khí quyển. Điều này dẫn đến tốc độ bơm α của khối lượng trên mỗi đơn vị thể tích vào jet là đồng nhất và các hạt bơm vào được cho là ở trạng thái nghỉ so với AGN.

Mô hình này có thể được áp dụng cho jet Centaurus A. Centaurus A là một trong những AGN gần nhất, vì vậy có thể quan sát được jet của nó ở độ phân giải không gian tương đối cao. Tổng công suất được mang bởi jet được ước tính là $P_j = 1 \times 10^{36} \text{ J.s}^{-1}$. Xem hình bên dưới để biết sơ đồ mô tả hình học đơn giản của jet Centaurus A, bao gồm các phép đo của một số thông số của jet. s_1 là tọa độ của điểm đầu của jet, và s_2 là tọa độ của điểm cuối của nó. Ở Centuarus A, khối lượng trung bình của một hạt là $\mu_{pp} = 0.59m_p$ và $h = \frac{13}{4}P/n$. Áp suất của plasma xung quanh jet là $P(s) = 5.7 \times 10^{-12} \left(\frac{s}{s_0}\right)^{-1.5} \text{ Pa}$, với $s_0 = 1 \text{ kpc}$.



Hình 2: Jet Centaurus A: so sánh hình dạng của jet với hạt nhân thiên hà hoạt động (AGN).

Một Jet được mô tả bởi các tham số sau, tất cả đều phụ thuộc vào khoảng cách s từ AGN:

- bán kính mở của jet: $r(s)$, trong hệ quy chiếu AGN
- tiết diện ngang của jet: $A(s)$, trong hệ quy chiếu AGN
- tốc độ của jet: $v(s)$, trong hệ quy chiếu AGN
- thừa số gamma lorentz của jet: $\gamma(s)$, trong hệ quy chiếu AGN
- mật độ số hạt $n(s)$, trong hệ quy chiếu Jet

Tất cả các thông số này đều có thể sử dụng để trả lời các câu hỏi từ A1-4.

A.1	Hãy tìm mật độ số hạt, $n'(s)$, trong hệ quy chiếu gần với AGN, theo mật độ số hạt $n(s)$ thích hợp và các thông số khác của jet. Mật độ số hạt thích hợp là mật độ số hạt trong hệ quy chiếu cùng chuyển động một cách cục bộ với dòng plasma phóng ra của jet, mà ta gọi là hệ quy chiếu jet.	0.3pt
A.2	Hãy tìm thông lượng hạt $F_p(s)$ đi qua một tiết diện ngang có diện tích A của jet ở khoảng cách s từ AGN.	0.2pt
A.3	Hãy viết hệ thức liên tục giữa thông lượng của dòng hạt đi vào và đi ra khỏi jet theo các thông số của jet tại s_1 , và s_2 , và thể tích toàn phần V của jet Centaurus A cùng với các tham số cần thiết khác.	0.5pt

A.4	Hãy viết hệ thức giữa thông lượng năng lượng đi vào và đi ra khỏi jet theo tốc độ, tiết diện, mật độ số hạt thích hợp tại s_1 và s_2 , và thể tích V của jet cùng với các thông số cần thiết khác của jet Centaurus A.	0.6pt
------------	--	-------

Năng lượng của một jet được định nghĩa như là tổng của thông lượng động năng toàn phần và thông lượng nhiệt năng toàn phần, tức là:

$$P_j(s) = F_E(s) - \dot{M}c^2 \quad (1)$$

trong đó, $F_E(s)$ là thông lượng năng lượng qua tiết diện ngang của jet tại s , và $\dot{M}$ là thông lượng khối lượng qua tiết diện ngang của jet tại cùng một khoảng cách s từ AGN.

A.5	Hãy sử dụng các kết quả của em từ các phần trước để tìm $\frac{dP_j}{ds}$.	0.6pt
A.6	Hãy tính giá trị bằng số cho thông lượng khối lượng $\dot{M}_1$ đi vào trong jet Centaurus A ở s_1 , và $\dot{M}_2$ đi ra khỏi jet Centaurus A ở s_2 .	0.4pt
A.7	Hãy tìm một biểu thức cho thông lượng động năng toàn phần, Π , đi vào jet Centaurus A và ước lượng giá trị bằng số của biểu thức này.	0.5pt
A.8	Hãy tìm giá trị bằng số của lực toàn phần F_{Pr} gây nên bởi áp suất bên ngoài tác dụng lên jet Centaurus A.	0.5pt
A.9	Hãy viết hệ thức mong đợi giữa Π và F_{Pr} . Hãy tính phần trăm sai lệch giữa giá trị của Π tìm được trong A7 và giá trị mong đợi.	0.2pt

Phần B: Khí electron siêu tương đối tính

Xét một loại khí của các electron siêu tương đối tính ($\gamma \gg 1$), với sự phân bố đẳng hướng của vận tốc (không phụ thuộc vào hướng). Mật độ số hạt thích hợp của những hạt có năng lượng nằm giữa ϵ và $\epsilon + d\epsilon$ được cho bởi $f(\epsilon)d\epsilon$, trong đó, ϵ là năng lượng trên mỗi hạt. Cũng xét một bức tường có diện tích ΔA tiếp xúc với khí.

B.1	Hãy viết một biểu thức tích phân cho năng lượng toàn phần trên mỗi đơn vị thể tích của khí điện tử.	0.2pt
B.2	Hãy tìm một biểu thức cho $\Delta p_z / \Delta t$, là tốc độ biến đổi toàn phần của động lượng khí theo phương z vuông góc với tường, do các va chạm với tường.	0.8pt
B.3	Hãy thiết lập một phương trình trạng thái cho khí electron siêu tương đối tính, liên hệ áp suất, thể tích và nội năng toàn phần với nhau.	0.6pt

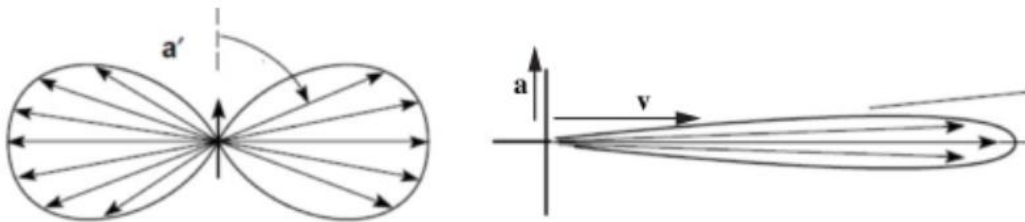
B.4 Hãy thiết lập hệ thức giữa áp suất và thể tích của một khí electron siêu tương đối tính khi trải qua quá trình giãn nở đoạn nhiệt. 0.6pt

Phần C: Phát xạ Synchrotron

Trong các jet từ AGN, ta có các quần thể electron có năng lượng cao ở những vùng có từ trường mạnh. Điều này tạo ra các điều kiện để phát ra các dòng bức xạ synchrotron với thông lượng lớn. Các electron thường có năng lượng năng đến mức chúng có thể được coi là siêu tương đối tính, với $\gamma \gg 1$.

C.1 Hãy tìm hệ thức cho tần số góc Ω của chuyển động xoáy của electron có hệ số lorentz γ và di chuyển chệch một góc ϕ so với từ trường B. 0.7pt

Khi electron được gia tốc do từ trường, nó phát ra bức xạ điện từ. Trong hệ quy chiếu mà tại đó electron trong thái nghỉ tức thời, không có hướng ưu tiên nào cho sự phát ra bức xạ. Một nửa được phát về phía trước, và một nửa về phía sau. Tuy nhiên, trong hệ quy chiếu của người quan sát, đối với một electron chuyển động với tốc độ siêu tương đối tính, với $\gamma \gg 1$, bức xạ được tập trung trong một hình nón phía trước với $\theta \lesssim 1/\gamma$ (nghĩa là góc toàn phần của hình nón là $2/\gamma$). Vì electron chuyển động xoáy quanh từ trường, mỗi người quan sát chỉ nhìn thấy các xung bức xạ khi hình nón phía trước quét qua đường ngắm



Hình 3: Sơ đồ bên trái cho thấy sự phân bố công suất trong bức xạ từ một electron được gia tốc hướng lên phía trên trong hệ quy chiếu mà tại đó electron trong trạng thái nghỉ tức thời.

Sơ đồ bên phải cho thấy sự phân bố công suất bức xạ của cùng electron đó trong hệ quy chiếu của người quan sát, trong đó, phần lớn bức xạ được phát ra trong hình nón phía trước. Trong hệ quy chiếu của người quan sát, hướng của gia tốc của electron được biểu thị bằng vectơ ký hiệu là $\mathbf{a}$ và hướng của vận tốc của nó được biểu thị bằng vectơ ký hiệu là $\mathbf{v}$.

C.2 Hãy tìm độ dài Δt của xung bức xạ synchrotron mà ta quan sát được từ một electron với hệ số lorentz γ , chuyển động theo hướng chệch một góc ϕ đối với từ trường. 0.5pt

C.3 Từ đó, hãy ước tính tần số đặc trưng ν_{chr} của bức xạ synchrotron. 0.3pt

Tổng công suất synchrotron phát ra là

$$P_s = \frac{1}{6\pi\epsilon_0} \left(\frac{q^4 B^2 \sin^2 \phi}{m^4 c^5} \right) E^2 \quad (2)$$

C.4 Hãy ước tính thời gian τ để một electron có năng lượng E mất năng lượng của nó qua quá trình làm lạnh synchrotron. 0.2pt

Phần D: Phát xạ synchrotron từ một jet AGN

Hàm phân bố năng lượng electron trong jet từ một AGN thường là một hàm lũy thừa có dạng $f(\epsilon) = \kappa \epsilon^{-p}$, trong đó $f(\epsilon)d\epsilon$ là mật độ của các hạt có năng lượng giữa ϵ và $\epsilon + d\epsilon$. Phổ phát xạ synchrotron tương ứng phụ thuộc vào hàm phân bố năng lượng electron, thay vì phổ cho một electron riêng lẻ. Phổ này là

$$j(\nu)d\nu \propto B^{(1+p)/2} \nu^{(1-p)/2} d\nu \quad (3)$$

Ở đây, $j(\nu)d\nu$ là năng lượng trên mỗi đơn vị thể tích phát ra dưới dạng photon có tần số nằm giữa ν và $\nu + d\nu$

Các quan sát về jet Centaurus A và các jet khác cho thấy một cấu trúc có nút, với các vùng phát xạ sáng hơn được gọi là nút thắt. Quan sát các nút thắt này tại các thời điểm khác nhau đã cho thấy cả sự thay đổi chuyển động và độ sáng của một số nút thắt. Hai cơ chế khả dĩ cho việc giảm độ sáng là sự giãn nở đoạn nhiệt của khí trong nút thắt và sự làm lạnh synchrotron của các electron của khí ở nút thắt.

Từ trường trong plasma trong các jet được cho là *bị đóng băng*. Xét một thể tích plasma tùy ý, từ thông qua bề mặt giới hạn nó phải không đổi, ngay cả khi thể tích chứa plasma thay đổi hình dạng và kích thước.

D.1	Đối với nút hình cầu giãn nở đồng đều theo mọi hướng từ thể tích V_0 đến thể tích V , với từ trường đều B_0 ban đầu. Hãy tìm từ trường B trong nút thắt bị giãn nở.	0.4pt
D.2	Tìm hàm phân bố $f(\epsilon)$ của năng lượng electron sau khi giãn nở đoạn nhiệt của nút thắt hình cầu tới thể tích V theo hàm phân bố mật độ năng lượng electron, với điều kiện là nút ban đầu có thể tích V_0 và có hàm phân bố là $f_0(\epsilon) = \kappa_0 \epsilon^{-p}$, trong đó $f_0(\epsilon)d\epsilon$ là mật độ số hạt của các hạt có năng lượng nằm giữa ϵ và $\epsilon + d\epsilon$.	1.0pt
D.3	Sự làm lạnh synchrotron sẽ ảnh hưởng đến sự phân bố của các electron như thế nào? Sau một khoảng thời gian trong đó các electron đã được làm lạnh synchrotron thì hàm phân bố năng lượng của electron theo ϵ sẽ trở nên dốc hơn, thoải hơn hay là không thay đổi. Biện luận cho câu trả lời của em nhờ các phương trình, bằng cách xét hai năng lượng electron $\epsilon_1 < \epsilon_2$.	0.3pt

Bảng dưới đây tóm lược một số kết quả quan sát về các nút thắt (vùng sáng hơn) trong các jet từ hai AGN, là Centaurus A (Cen A) và M87.

AGN	Thời gian giữa hai quan sát	Nút thắt	Thay đổi độ sáng của chùm tia X	Độ thay đổi phổ của chùm tia X	Thay đổi độ sáng ở các dải khác (ví dụ: UV, vùng quang)
Cen A	15 năm	AX1C	-23%	Không đổi	Không có số liệu
Cen A	15 năm	BX2	-15%	Không đổi	Không có số liệu
M87	5 năm	HST-1	-73%	Không có số liệu	Không đổi
M87	5 năm	Nút thắt A	-12%	Không có số liệu	Không đổi

(Dữ liệu từ Snios et *al.*, 2019a; 2019b.)

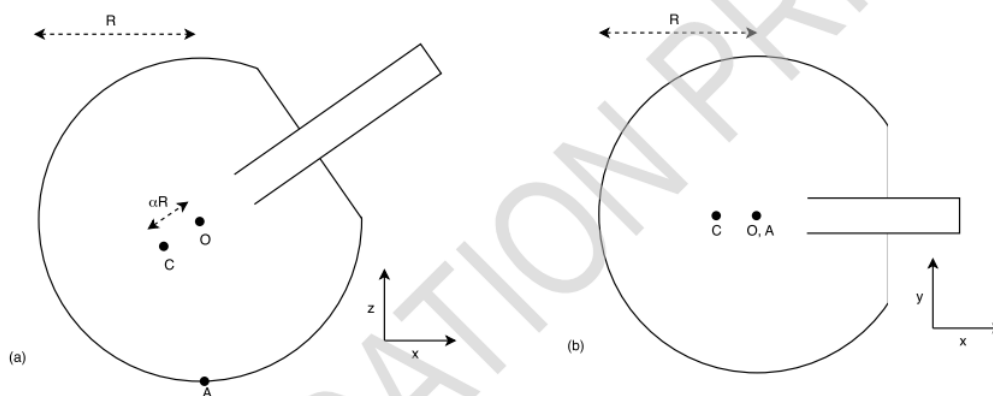
- | | | |
|------------|---|-------|
| D.4 | Trong bảng ở phiếu trả lời, hãy xác định nguyên nhân có nhiều khả năng làm giảm độ sáng cho mỗi nút và xác định xem phần nào hoặc những phần nào ở trên ủng hộ cho kết luận của em. | 0.6pt |
|------------|---|-------|

Bài lý thuyết 3

Con quay lật ngược

Phần A (10.0 điểm)

Con quay lật ngược là một loại con quay đặc biệt, có thể tự lật ngược sau khi được người ta xoay để làm cho nó quay. Ta có thể mô hình hóa con quay lật ngược như một quả cầu bán kính R bị cắt chỏm, có gắn một chân hình trụ. Con quay này có trục đối xứng tròn xoay quanh trục đi dọc chân hình trụ, chân lập một góc θ với phương thẳng đứng; khối tâm C của nó lệch khỏi tâm hình học O của quả cầu một khoảng αR dọc theo trục đối xứng. Con quay lật ngược tiếp xúc với bề mặt mà nó nằm trên ở điểm A ; ta giả thiết bề mặt này là phẳng, và gọi nó là sàn. Với một số điều kiện về hình học, và nếu lúc đầu được xoay đủ nhanh, thì Con quay lật ngược sẽ nghiêng dần, làm cho chân của nó hướng dần xuống phía dưới, đến một lúc, nó sẽ bắt đầu quay trên chân, rồi sau đó sẽ dừng lại.

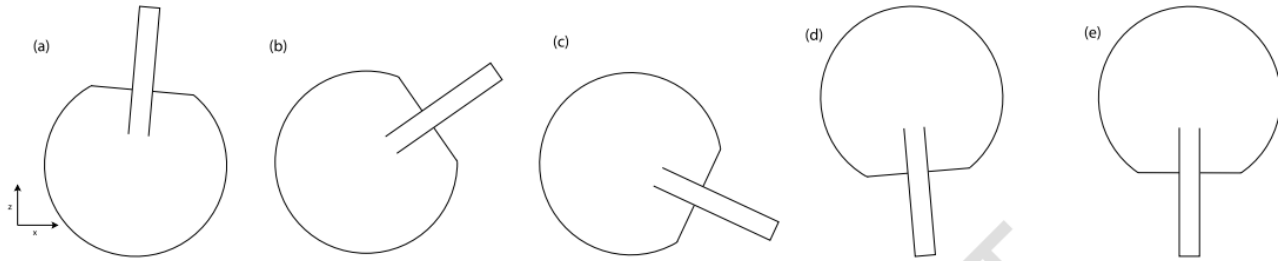


Hình 1. Con quay lật ngược nhìn ngang (a) và nhìn từ phía trên (b)

Gọi xyz là hệ tọa độ quay được định nghĩa sao cho trục $\hat{z}$ là không đổi và hướng lên trên, còn trục đối xứng của con quay nằm trong mặt phẳng xz . Hình 1 cho thấy con quay lật ngược nhìn ngang và nhìn từ phía trên xuống. Như thấy trên Hình 1(b), trục đối xứng của con quay hướng theo trục x khi nhìn từ trên xuống.

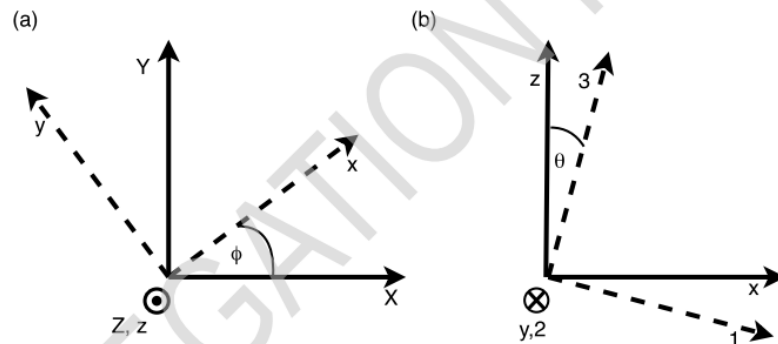
Hình 2 cho thấy chuyển động của con quay ở một số giai đoạn khác nhau kể từ khi nó bắt đầu quay:

- (a) **giai đoạn I:** ngay khi nó bắt đầu quay, $\theta \sim 0$
- (b) **giai đoạn II:** sau đó một chút, nghiêng một góc $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$
- (c) **giai đoạn III:** khi chân chạm vào sàn, với $\theta > \frac{\pi}{2}$
- (d) **giai đoạn IV:** sau khi lật ngược, con quay quay trên chân, với $\theta \sim \pi$
- (e) **giai đoạn V:** ở giai đoạn cuối cùng, đứng yên trên chân $\theta = \pi$.



Hình 2. Các giai đoạn từ I đến V trong chuyển động của Con quay lật ngược, được thể hiện trong mặt phẳng xz

Gọi XYZ là hệ tọa độ quán tính, mà ở đó, mặt của con quay hoàn toàn nằm trong mặt phẳng XY . Hệ tọa độ xyz đã được định nghĩa như trên, và có thể đạt được từ hệ XYZ nhờ phép quay quanh trục Z một góc ϕ . Phép biến đổi từ hệ XYZ sang hệ xyz được thấy trên Hình 3(a). Nói riêng, $\hat{z} = \hat{Z}$.



Hình 3. Biến đổi giữa các hệ tọa độ: (a) từ XYZ sang xyz , và (b) từ xyz sang 123

Mọi chuyển động quay trong không gian 3 chiều đều có thể được mô tả bởi ba góc Euler (θ, ϕ, ψ) . Các phép biến đổi giữa hệ tọa độ quán tính XYZ , hệ tọa độ trung gian xyz , và hệ tọa độ 123 của con quay có thể hiểu được nếu dùng các góc Euler này.

Trong cách mô tả của chúng ta về chuyển động của Con quay lật ngược, các góc θ và ϕ lần lượt là các góc thiên đỉnh và góc phương vị trong hệ tọa độ cực cầu. Trong hệ XYZ , các góc này được định nghĩa như sau: θ là góc giữa trục đối xứng của con quay và trục thẳng đứng Z ; nó cho biết chân của con quay lệch khỏi trục thẳng đứng như thế nào; ϕ cho biết vị trí góc của con quay quanh trục Z , và được định nghĩa là góc giữa mặt phẳng XZ , và mặt phẳng đi qua các điểm O, A, C (tức là hình chiếu thẳng đứng của trục đối xứng của con quay).

Góc Euler thứ ba ψ mô tả sự quay của con quay quanh trục đối xứng riêng của nó, với vận tốc góc $\dot{\psi}$.

Hệ tọa độ của con quay đang quay được định nghĩa như là một hệ tọa độ quay mới 123, đạt được bằng cách quay xyz một góc θ quanh $\hat{y}$: 'nghiêng' trục $\hat{z}$ xuống phía dưới một góc θ để gặp trục đối xứng của con quay $\hat{3}$. Phép biến đổi từ hệ xyz sang hệ 123 được thấy trên Hình 3(b). Nói riêng, $\hat{2} = \hat{y}$.

GHI CHÚ: Với hệ tọa độ $\tilde{\mathbf{K}}$ quay trong hệ quán tính $\mathbf{K}$ với vận tốc góc ω , đạo hàm theo thời gian của vectơ $\mathbf{A}$ trong hai hệ $\mathbf{K}$ và $\tilde{\mathbf{K}}$ liên hệ với nhau theo:

$$\left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}\right)_{\mathbf{K}} = \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}\right)_{\tilde{\mathbf{K}}} + \omega \times \mathbf{A} \quad (1)$$

Chuyển động của Con quay lật ngược là phức tạp, vì nó liên quan đến sự tiến triển theo thời gian của ba góc Euler, cùng với các vận tốc tịnh tiến (hoặc các vị trí) và chuyển động của trục đối xứng của con quay. Tất cả các tham số này liên kết với nhau. Để giải bài toán về chuyển động của Con quay lật ngược, ta cần dùng các công cụ tiêu chuẩn bao gồm các định luật Newton để chuẩn bị hệ phương trình, rồi lập trình cho máy tính để giải chúng bằng phương pháp số, thông qua mô phỏng.

Trong bài toán, em sẽ tiến hành phần đầu tiên của quá trình này, bằng cách khảo sát vật lí của Con quay lật ngược để lập nên hệ phương trình.

Ma sát giữa Con quay lật ngược và bề mặt mà trên đó nó chuyển động quyết định chuyển động của Con quay lật ngược.

Giả thiết rằng con quay tiếp xúc với sàn ở điểm A , cho đến khi chân của nó chạm vào mặt sàn. Con quay chuyển động ở điểm A với vận tốc $\mathbf{v}_A$ đối với sàn. Hệ số ma sát μ_k giữa con quay và sàn là hệ số ma sát động, với $|\mathbf{F}_f| = \mu_k N$, trong đó $\mathbf{F}_f = F_{f,x}\hat{\mathbf{x}} + F_{f,y}\hat{\mathbf{y}}$ là lực ma sát, và N là độ lớn của lực pháp tuyến. Giả sử rằng ban đầu, con quay chỉ được xoay để làm cho nó quay, tức là không có xung lực tịnh tiến đặt vào con quay.

Gọi khối lượng của Con quay lật ngược là m . Các momen quán tính là: I_3 đối với trục đối xứng, và $I_1 = I_2$ đối với các trục chính vuông góc với nhau. Gọi $\mathbf{s}$ là vectơ vị trí của khối tâm, và $\mathbf{a} = \overline{CA}$ là vectơ nối khối tâm với điểm tiếp xúc.

Trừ khi có chỉ dẫn khác, hãy cho kết quả của em trong hệ quy chiếu xyz để được đủ điểm. Các momen lực và momen động lượng được tính với khối tâm C , trừ khi có chỉ dẫn khác. Em có thể cho đáp án theo N . Ngoại trừ với phần **A.8**, em cần xét con quay khi $\theta < \frac{\pi}{2}$, và chân của nó không tiếp xúc với sàn.

A.1 Hãy tìm ngoại lực toàn phần $\mathbf{F}_{\text{ext}}$ tác dụng lên Con quay lật ngược. Hãy vẽ giản đồ các lực tác dụng lên con quay, được chiếu lên các mặt phẳng xz và xy . Hãy chỉ ra chiều của $\mathbf{v}_A$ ở vùng được dành riêng, trên sơ đồ trong mặt phẳng xy . 1pt

A.2 Hãy tìm momen ngoại lực toàn phần τ_{ext} tác dụng lên Con quay lật ngược đối với khối tâm. 0.8pt

A.3 Cho điều kiện tiếp xúc, tức là $(\mathbf{s} + \mathbf{a}) \cdot \hat{\mathbf{z}} = 0$, hãy chứng tỏ rằng vận tốc ở điểm A không có thành phần theo phương z , nghĩa là ta có thể viết $\mathbf{v}_A = v_x\hat{\mathbf{x}} + v_y\hat{\mathbf{y}}$. 0.4pt

A.4 Hãy tìm vận tốc góc toàn phần ω của con quay đối với khối tâm C của nó, theo các đạo hàm theo thời gian của các góc Euler: $\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$, $\dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt}$, và $\dot{\psi} = \frac{d\psi}{dt}$. Hãy dùng Hình 3 nếu cần. Hãy cho kết quả trong hệ xyz , và trong hệ 123. 0.8pt

A.5	Hãy tìm năng lượng toàn phần của Con quay lật ngược đang quay, theo đạo hàm theo thời gian của các góc Euler, của v_x , và của v_y . Em sẽ được một phần điểm, nếu em viết đáp án theo $\dot{\mathbf{s}} = \frac{d\mathbf{s}}{dt}$.	1pt
A.6	Hãy tìm tốc độ biến đổi của momen động lượng đối với trục z .	0.4pt
A.7	(Những) lực nào thực hiện công chống lại lực hấp dẫn? Hãy tìm biểu thức cho tốc độ biến thiên tức thời của năng lượng con quay - em có thể viết đáp án theo $\mathbf{v}_A$. Hãy xác định các thành phần nào của lực và momen lực gây nên (những) thay đổi về năng lượng trong phần A.5 .	1.4pt
A.8	Hãy phác họa một cách định tính các số hạng năng lượng sau đây vào Phiếu trả lời xem chúng thay đổi thế nào theo thời gian, trong chuyển động của con quay, qua năm giai đoạn từ I đến V nêu ở Hình 2: năng lượng toàn phần E_T , thế năng hấp dẫn U_G , năng lượng chuyển động tịnh tiến K_T , và động năng chuyển động quay K_R . Các trục năng lượng trên các hình phác họa không cần vẽ theo đúng tỉ lệ.	2pt
A.9	Hãy chứng tỏ rằng các thành phần của momen động lượng $\mathbf{L}$ và của vận tốc góc $\boldsymbol{\omega}$ vuông góc với phương $\hat{\mathbf{z}}$ thì tỉ lệ với nhau, tức là $\mathbf{L} \times \hat{\mathbf{z}} = k(\boldsymbol{\omega} \times \hat{\mathbf{z}}), \quad (2)$ và tìm hằng số tỉ lệ k .	0.5pt
Kết hợp các đáp án của em cho A.1 và A.2 với những kết quả tiếp sau đó, em sẽ thu được độ lớn N của lực pháp tuyến cùng với một hệ phương trình liên hệ các góc Euler, các thành phần v_x và v_y của vận tốc ở A, vectơ đơn vị cho trục đối xứng $\hat{\mathbf{z}}$, và các đạo hàm theo thời gian của chúng. Hệ phương trình này không giải được bằng giải tích, nhưng có thể giải được bằng phương pháp số. Các tích phân chuyển động là các đại lượng luôn không đổi, và có thể làm giảm bậc của một hệ phương trình (tức là số phương trình cần giải đồng thời, bằng giải tích hoặc bằng số). Điển hình là các đại lượng như năng lượng, động lượng và momen động lượng được bảo toàn trong các hệ kín, và chúng làm đơn giản hóa đáng kể bài toán.		
A.10	Như em đã thấy, cả năng lượng và momen động lượng đều không được bảo toàn đối với Con quay lật ngược, do có lực tiêu tán và momen ngoại lực. Tuy nhiên, có một đại lượng liên quan là tích phân Jellett λ , biểu diễn một thành phần của momen động lượng được bảo toàn, tức là một vectơ $\mathbf{v}$ nào đó mà $\lambda = \mathbf{L} \cdot \mathbf{v}$ là hằng số theo thời gian. Hãy dùng những hiểu biết của em về Con quay lật ngược và các kết quả tìm được cho đến nay, để tìm ra biểu thức của vectơ $\mathbf{v}$ như vậy. Hãy chứng tỏ rằng đạo hàm theo thời gian của λ bằng không.	1.7pt

Thực nghiệm

Hướng dẫn chung: Bài thi Thực hành (20 điểm)

Ngày 09 tháng 5, 2019

Bài thi thực hành được diễn ra trong 5 giờ với điểm tổng là 20 điểm.

Trước giờ thi

- Em không được phép mở phong bì chứa đề thi trước khi tín hiệu báo giờ làm bài thi bắt đầu
- Sẽ có tín hiệu âm thanh ở các thời điểm bắt đầu và kết thúc giờ thi. Sẽ có thông báo sau mỗi giờ thi trôi qua, cũng như mười lăm phút trước khi kết thúc giờ thi (trước tín hiệu âm thanh cuối cùng).

Trong giờ thi

- Phiếu trả lời được cung cấp để viết câu trả lời của em. Viết câu trả lời của em vào các bảng, ô hoặc biểu đồ thích hợp trên phiếu trả lời tương ứng (được đánh dấu A). Đối với mỗi bài thi, có thêm các giấy làm bài để em viết lời giải chi tiết (được đánh dấu W). Hãy chắc chắn là luôn luôn sử dụng các giấy làm bài đúng với bài thi (kiểm tra số thứ tự bài thi trong tiêu đề của các giấy làm bài). Hãy gạch bỏ những chỗ em đã viết ra mà không muốn được chấm điểm. Chỉ sử dụng mặt trước của mỗi tờ giấy.
- Trong các câu trả lời, em cố gắng viết ngắn gọn nhất có thể: sử dụng các phương trình, kí hiệu logic và hình vẽ để minh họa suy nghĩ của em mỗi khi có thể. Tránh sử dụng các câu dài.

- Việc ước tính sai số kết quả **là bắt buộc** cho tất cả các phép đo, trừ khi có quy định cụ thể khác trong câu hỏi. Em cũng nên quyết định số lượng điểm dữ liệu hoặc số lần đo lặp lại thích hợp, trừ khi có hướng dẫn cụ thể.

Hãy viết với số các chữ số có nghĩa thích hợp khi trình bày các kết quả bằng số.

- Thường thì em có thể làm phần sau trước, mà không nhất thiết phải làm xong các phần trước đó.
- Danh sách các hằng số vật lí được cho ở trang sau.
- Em không được rời khỏi bàn thi của em mà không được phép. Nếu em cần bất kì sự trợ giúp nào, vui lòng giơ một trong những lá cờ trên bàn của em ("I need water" nếu em cần uống nước, "toilet break" nếu em cần đi vệ sinh, "Extra paper, please!" nếu em cần xin thêm giấy làm bài, "equipment/materials" nếu em gặp trục trặc gì với thiết bị hoặc vật dụng của mình, hoặc "I need help" trong tất cả các trường hợp khác).

Cuối giờ thi

- Hãy dừng bút ngay khi có tín hiệu báo hết giờ.
- Đối với mỗi bài thi, hãy sắp xếp các tờ tương ứng theo thứ tự sau: trang bìa (C), câu hỏi (Q), phiếu trả lời (A), giấy làm bài (W) và những tờ giấy làm bài khác (Z) nếu em có.
- Xếp tất cả các tờ thuộc về một bài vào phong bì cho bài đó. Cho các tờ hướng dẫn chung (G) vào phong bì riêng biệt còn lại cùng các tờ giấy trắng khác. Em không được phép mang bất kì tờ giấy nào ra khỏi khu vực thi.
- Để lại các vật dụng viết bài trên bàn thi.
- Giữ im lặng và chờ tại bàn của em cho đến khi giám thị thu phong bì của em. Khi tất cả các phong bì được thu, hướng dẫn viên sẽ hộ tống em ra khỏi khu vực thi.

Bảng số liệu chung

Tốc độ của ánh sáng trong chân không	c	$=$	$299\,792\,458\,\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Độ từ thẩm chân không	μ_0	$=$	$4\pi \times 10^{-7}\,\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$
Hằng số điện môi của chân không	ε_0	$=$	$8.854\,187\,817 \dots \times 10^{-12}\,\text{A}^2 \cdot \text{s}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$
Điện tích nguyên tố	e	$=$	$1.602\,176\,620\,8(98) \times 10^{-19}\,\text{A} \cdot \text{s}$
Khối lượng của electron	m_e	$=$	$9.109\,383\,56(11) \times 10^{-31}\,\text{kg}$
Khối lượng của proton	m_p	$=$	$1.672\,621\,898(21) \times 10^{-27}\,\text{kg}$
Khối lượng của nơtron	m_n	$=$	$1.674\,927\,471(21) \times 10^{-27}\,\text{kg}$
Hằng số khối lượng nguyên tử	m_u	$=$	$1.660\,539\,040(20) \times 10^{-27}\,\text{kg}$
Hằng số Rydberg	R_∞	$=$	$10\,973\,731.568\,508(65)\,\text{m}^{-1}$
Hằng số vận vận hấp dẫn	G	$=$	$6.674\,08(31) \times 10^{-11}\,\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
Gia tốc trọng trường ở Adelaide	g	$=$	$9.797\,\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
Hằng số Planck	h	$=$	$6.626\,070\,040\,(81) \times 10^{-34}\,\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Số Avogadro	N_A	$=$	$6.022\,140\,857\,(74) \times 10^{23}\,\text{mol}^{-1}$
Hằng số khí mol	R	$=$	$8.314\,4598(48)\,\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Hằng số khối lượng mol	M_u	$=$	$1 \times 10^{-3}\,\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$
Hằng số Boltzmann	k_B	$=$	$1.380\,648\,52(79) \times 10^{-23}\,\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Hằng số Stefan-Boltzmann	σ	$=$	$5.670\,367\,(13) \times 10^{-8}\,\text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-4}$

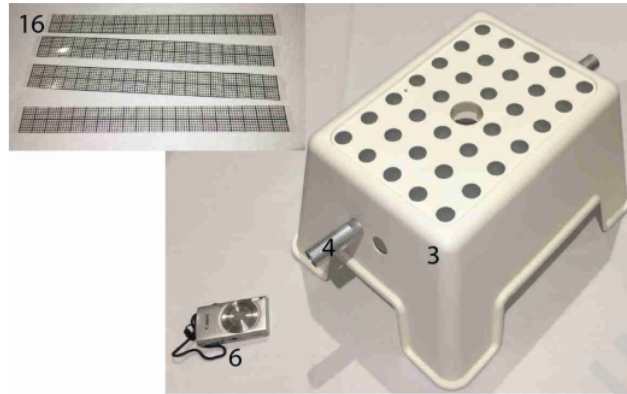
Đáp ứng tính của chất lỏng từ (10 điểm)

Giới thiệu

Chất lỏng từ gồm các hạt manhetit (Fe_3O_4) nano trong một môi trường lỏng. Chúng thể hiện một loạt các tính chất thú vị, và đặc biệt là sự đáp ứng mạnh mẽ với từ trường đặt vào - đôi khi chúng được mô tả như là chất siêu thuận từ. Trong thí nghiệm này, em sẽ nghiên cứu thực nghiệm một số tính chất của chất lỏng sắt từ bằng cả phương pháp tĩnh và phương pháp động, và sử dụng một loạt các kĩ thuật đo thực nghiệm và ước tính. Bài thi thực hành được chia làm hai phần lớn, tuy nhiên nên làm bài thi theo đúng thứ tự của đề bài.

Danh sách các dụng cụ





1. Chai thủy tinh nhỏ chứa chất lỏng từ nằm trong một chất lỏng trong suốt. **Em KHÔNG được phép mở chai vì bất kì lí do nào!**
2. Hộp thủy tinh có nắp kín chứa chất lỏng từ. **Em KHÔNG được phép mở nắp hộp vì bất kì lí do nào!**
3. Ghế nhựa dùng làm vật che ánh sáng và làm bệ đỡ. Sau đây gọi là bệ đỡ.
4. Ống cùng với thanh có ren mang nam châm có thể điều chỉnh được (ban đầu ống được lồng qua bệ đỡ)
5. Đế gỗ có thể điều chỉnh được nhờ các bulông nhựa
6. Máy ảnh có thể nhử
7. $2 \times$ nam châm N52 , $14.2 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$
8. $1 \times$ nam châm N42, $20.0 \text{ mm} \times 5.0 \text{ mm}$ (không có trong hình)
9. Thanh ren dài 500 nm dùng làm cột đèn
10. Vòng đệm và đai ốc vặn có tai hồng để gắn cột vào bệ đỡ
11. Đèn dùng pin có lỗ ren để gắn
12. Lá nhôm để chặn hoặc lái ánh sáng
13. Nhựa dính để gắn các dụng cụ khi cần thiết
14. Nêm màu xanh
15. Thước 30 cm trong suốt
16. $4 \times$ tấm lưới trong suốt
17. $2 \times$ đệm gỗ
18. Thước dây bằng giấy

An toàn và các lưu ý quan trọng khác

Trong thí nghiệm này, em sẽ sử dụng những nam châm mạnh. Nếu em để các nam châm hút lẫn nhau, chúng có thể kẹp ngón tay của em, hoặc va chạm vào nhau và vỡ. Hãy kiểm soát các nam châm cẩn thận mọi lúc và không để chúng gần nhau mà không giám sát. **Sẽ không có nam châm thay thế nếu bị vỡ.**

Trong thí nghiệm này có hai bình chứa chất lỏng được đậy kín. Em không được phép mở chai thủy tinh nhỏ hoặc hộp thủy tinh có nắp kín bất cứ lúc nào trong quá trình thí nghiệm. **Nếu các mặt của hộp bị phủ chất lỏng sắt từ, thì sẽ rất khó nhìn qua, vì vậy, em cần cẩn thận, không làm nghiêng hộp nếu không cần thiết.**

Đèn được nuôi bằng pin. Nếu thấy cần thiết, thì em có thể yêu cầu thêm một bộ pin dùng cho đèn trong quá trình thí nghiệm.

Cần lưu ý là không nên để nam châm gần với chất lỏng từ quá 10 giây, bởi nó sẽ khiến chất lỏng từ thay đổi tính chất do sự từ hóa dư và tương tác với chất lỏng xung quanh. Khi hiện tượng này xảy ra, mặc dù thí nghiệm của em vẫn có thể được tiến hành, nhưng sẽ khó để quan sát được các hiệu ứng một cách chính xác.



Các nam châm cần được đặt cách nhau đủ xa để chúng không bị dính vào nhau. Chúng cần được đặt cách nhau với khoảng cách ít nhất là như được thấy trong sơ đồ trên.

Phần A: Kiểm tra tính (1.6 điểm)

Trong phần thí nghiệm này, em sẽ nghiên cứu các tính chất của chất lỏng sắt từ thông qua các phép đo đáp ứng tĩnh của nó với từ trường.

Tương tác từ: Lực tác dụng lên chất lỏng sắt từ

Chai thủy tinh nhỏ chứa một lượng chất lỏng sắt từ được bao quanh bởi một chất lỏng chưa biết, mà chất lỏng sắt từ không tan vào. Chất lỏng từ có khối lượng riêng $1.21 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$, và độ cảm từ $\chi = 2.64$.

Chất lỏng từ đáp ứng với sự có mặt của từ trường $\mathbf{B}$ và có momen lưỡng cực cảm ứng trên một đơn vị thể tích với độ lớn là $m = \frac{\chi B}{\mu_0}$.

Từ trường trên trục của nam châm hình trụ được coi gần đúng bằng

$$B_z = \frac{B_r}{2} \left(\frac{z+l}{\sqrt{(z+l)^2 + a^2}} - \frac{z}{\sqrt{z^2 + a^2}} \right), \quad (1)$$

trong đó, z là khoảng cách từ bề mặt của nam châm, l là độ dày của nam châm, a là bán kính và B_r là độ cường độ từ dư đặc trưng cho vật liệu dùng để chế tạo nam châm. Với nam châm to (làm bằng vật liệu N42) $B_r = 1.3 \text{ T}$ và với các nam châm nhỏ (làm bằng vật liệu N52) $B_r = 1.4 \text{ T}$.

Lực theo phương z (dọc theo phương từ hóa của nam châm) tác dụng lên mỗi đơn vị thể tích của chất lỏng từ có thể được tính bằng:

$$\frac{f}{V} = \frac{\chi B_z \frac{dB_z}{dz}}{2\mu_0} \quad (2)$$

Vì việc tính toán với trường đầy đủ là dài dòng nên trong phần này, em có thể sử dụng phép gần đúng lưỡng cực cho lực tác dụng lên chất lỏng sắt từ. Sử dụng phép gần đúng này, lực trên mỗi đơn vị thể tích theo phương z là

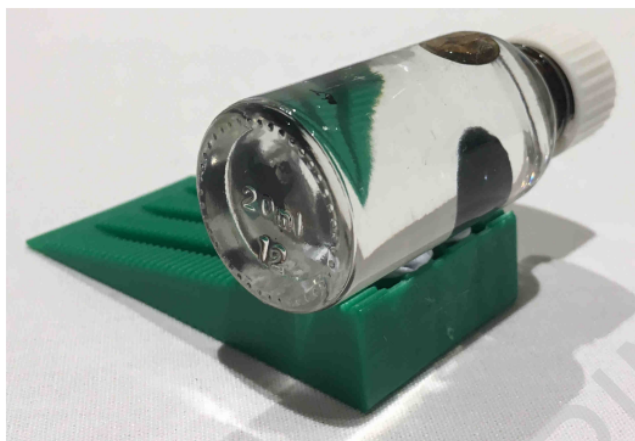
$$\frac{f}{V} = -\frac{3\chi B_r^2 a^4 l^2}{8\mu_0 z^7} \quad (3)$$

Hãy bố trí bộ đỡ sao cho thanh ren mang nam châm xuyên qua ống nhôm và có đầu phẳng hướng xuống dưới. Em có thể xoay ống nhôm để đạt được điều này - đảm bảo rằng thanh ren mang nam châm không chạm vào bề mặt khi em xoay ống.

Dán chai nhỏ theo chiều dọc của chai vào đỉnh của cạnh dày của nệm bằng cách dùng nhựa dính.



Giá mang nam châm ở vị trí cho phần A



Bố trí chai cho phần A

- | | | |
|------------|---|-------|
| A.1 | <p>Tìm vị trí của nam châm lớn để cho chất lỏng sắt từ lơ lửng trong chất lỏng trong suốt chưa biết và ghi lại khoảng cách z cùng sai số trên phiếu trả lời. Có thể khó để đạt được sự cân bằng hoàn hảo, vì vậy, nếu em không thể giữ chất lỏng sắt từ lơ lửng một cách ổn định, hãy ước tính tốt nhất khoảng cách và sai số của nó. Hãy vẽ sơ đồ cho biết cách em đo khoảng cách vào ô trống trong phiếu trả lời. Lưu ý rằng đôi khi chất lỏng từ dường như 'tách' thành giọt từ tính, và một giọt từ khác tách rời và nổi lên. Điều này thường là do sự có mặt của một lượng nhỏ không khí trong chai. Em có thể dùng nam châm để điều chỉnh vị trí của giọt từ đến một khoảng trống trong chai để nâng nó lên.</p> | 0.8pt |
| A.2 | <p>Hãy sử dụng kết quả khoảng cách thu được ở trên và bất kì phép đo cần thiết nào khác để tính sự chênh lệch giữa khối lượng riêng của chất lỏng từ và chất lỏng trong suốt xung quanh, bao gồm cả sai số.</p> | 0.8pt |

Phần B: Tương tác từ: sức căng bề mặt của chất lỏng sắt từ (1.2 điểm)

Chất lỏng sắt từ chuyển động dưới ảnh hưởng của ba năng lượng: thế năng hấp dẫn, năng lượng bề mặt liên quan đến sức căng bề mặt, và năng lượng từ.

Hãy sử dụng một trong các nam châm, quan sát những gì xảy ra khi em đưa nam châm lại rất gần với lọ. Các gai xuất hiện trong chất lỏng sắt từ do sự mất ổn định của thành phần pháp tuyến của từ trường, xảy ra khi tần số hiệu dụng của các sóng từ trường - mao dẫn - hấp dẫn trong chất lỏng trở thành ảo.

Hệ thức tán sắc là

$$\omega^2 = \frac{gk\Delta\rho}{\rho_1 + \rho_2} + \frac{\sigma k^3}{\rho_1 + \rho_2} - \frac{k^2\mu_0 M_0^2}{1 + (1 + \chi)^{-1}}, \quad (4)$$

trong đó, σ là sức căng bề mặt của chất lỏng sắt từ ở mặt tiếp xúc giữa chất lỏng từ và chất lỏng trong suốt, ρ_1 là khối lượng riêng của chất lỏng sắt từ, ρ_2 là khối lượng riêng của chất lỏng trong suốt, $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$, $\mu = \mu_0\chi$, M_0 là độ từ hóa của chất lỏng sắt từ, và k là số sóng.

Áp dụng các điều kiện $\omega^2 = 0$ và $\frac{\partial\omega^2}{\partial k} = 0$, sức căng bề mặt có thể được tìm thấy theo độ chênh lệch khối lượng riêng và bước sóng hiệu dụng của các nhiễu loạn tác dụng lên bề mặt chất lỏng **tại điểm bắt đầu**

sự mất ổn định. Hệ thức là:

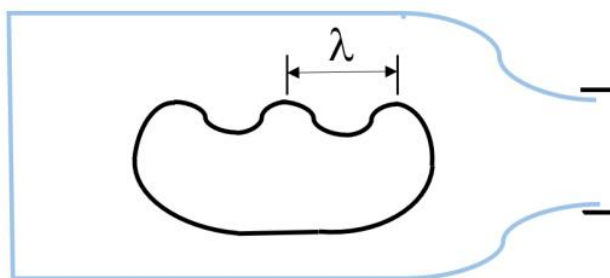
$$\sigma = \frac{g\Delta\rho\lambda^2}{4\pi^2} \quad (5)$$

trong đó, λ là khoảng cách giữa tâm của các gai lân cận gần nhất khi cường độ từ hóa ở ngưỡng không ổn định.



Nam châm và thanh ren mang nam châm ở vị trí cho phần B (Ảnh chụp từ phía dưới bộ đỡ, đầu phẳng của thanh ren mang nam châm hướng lên trên)

Hãy thay đổi định hướng của thanh ren mang nam châm (cách dễ nhất là xoay ống và điều chỉnh thanh ren) để em có thể nâng và hạ nam châm ngay bên dưới và qua lỗ trên mặt của bộ đỡ.



B.1	Sử dụng chai thủy tinh, lấy số đo khoảng cách z_{crit} ngay khi sự mất ổn định bắt đầu xảy ra (đỉnh bắt đầu hình thành). Hãy dùng tấm lưới hoặc cách khác để đo khoảng cách λ giữa các đỉnh trong chất lỏng từ tại vị trí này, và ghi lại nó. Ước tính sai số của cả hai phép đo. Gợi ý quan trọng: nếu em giữ chặt chất lỏng vào thành thủy tinh của chai bằng nam châm, nó sẽ dính nhẹ vào thủy tinh, điều này sẽ khiến cho việc đo trở nên khó khăn hơn. Nếu việc này xảy ra, em có thể dùng nam châm để kéo chất lỏng ra khỏi khu vực bị dính, và dùng một chỗ khác của chai cho phép đo này.	0.6pt
B.2	Từ đó, hãy tìm sức căng bề mặt của chất lỏng sắt từ ở phía dưới chất lỏng trong suốt, và sai số của nó.	0.6pt

Phần C: Xác định đặc trưng của bề mặt quang học: chế độ không có gai (4.1 điểm)

Khi từ trường đặt vào thấp hơn trường tới hạn, bề mặt của chất lỏng biến dạng, trong phép gần đúng bậc một, có thể coi đó là sự cân bằng giữa thể từ trường và thể hấp dẫn. Trong phần tiếp theo của bài toán, chúng ta đặt nam châm đủ xa chất lỏng sao cho nó được coi gần đúng như một trường lưỡng cực.

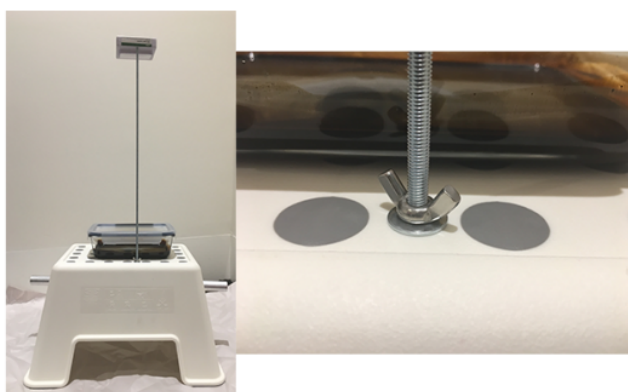
Sự biến dạng bề mặt có thể thăm dò được bằng phương pháp quang học, coi gần đúng bề mặt của chất lỏng là một gương cầu. Bán kính cong hiệu dụng của tâm biến dạng tuân theo quy luật $R = \alpha z^n$, trong đó, α là hằng số phụ thuộc vào vật liệu và z là khoảng cách của nam châm từ bề mặt không nhiễu loạn của chất lỏng.

Trước tiên ta cần hiệu chỉnh thanh ren từ

C.1	Hãy sử dụng các dụng cụ của em để tìm một cách chính xác nhất có thể sự thay đổi của z trong một vòng quay của thanh ren mang nam châm, bao gồm cả sai số. Ghi lại các phép đo em sử dụng và vẽ sơ đồ thí nghiệm.	0.6pt
------------	---	-------

Bây giờ lấy hộp thủy tinh chứa chất lỏng sắt từ và đặt nó lên bệ đỡ, sao cho lỗ ở giữa của bệ đỡ nằm dưới giữa đĩa. *KHÔNG được phép mở nắp kín trên đĩa ở bất cứ lúc nào trong quá trình thí nghiệm.* Lắp một nam châm nhỏ lên thanh.

Vặn đều vào thanh, sử dụng vòng đệm và đai ốc có tai hồng để cố định thanh ren vào lỗ trên bệ đỡ (xem hình vẽ).

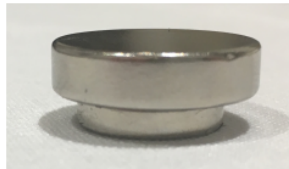


C.2	Sử dụng mối quan hệ giữa bán kính cong R và độ phóng đại hình ảnh M cho gương cầu, $R = \frac{2lM}{1-M}$, ở đây, l là khoảng cách đến vật, hãy tiến hành các phép đo và sau đó vẽ đồ thị thích hợp để xác định hằng số n trong mối quan hệ trên. Ước tính sai số trong câu trả lời của em.	3.5pt
------------	---	-------

Phần D: Xác định đặc trưng của bề mặt có gai: sự hình thành và biến mất của gai (3.1 điểm)

Đối với các từ trường mạnh hơn, bề mặt sẽ trải qua sự không ổn định và hình thành các gai như được quan sát thấy đối với chai thủy tinh.

- D.1** Hãy dùng một nam châm nhỏ và một nam châm lớn xếp chồng lên nhau, và dùng lý thuyết không ổn định $\sigma = \frac{g\rho\lambda^2}{4\pi^2}$ để xác định sức căng bề mặt của chất lỏng sắt từ tại mặt tiếp xúc của chất lỏng từ và không khí. 0.5pt



- D.2** Bắt đầu với nam châm ở đủ xa bề mặt để không có gai xuất hiện. Đưa nam châm lại gần chất lỏng và đọc khoảng cách ứng với sự xuất hiện của mỗi gai khi nó hình thành. Lấy một bộ dữ liệu khác khi em đưa nam châm ra xa, ghi lại vị trí ứng với sự biến mất của mỗi gai. Ước tính sai số trong các phép đo của em. 1.0pt

- D.3** Vẽ đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của số gai có thể nhìn thấy vào khoảng cách nam châm z . Tìm đường khớp phù hợp với đồ thị của em và chỉ rõ nam châm đang chuyển động theo hướng nào. 1.0pt

- D.4** Khi khoảng cách của nam châm đến bề mặt chất lỏng thay đổi, năng lượng hấp dẫn, năng lượng từ và năng lượng bề mặt của chất lỏng thay đổi. Hãy phác họa định tính, dưới dạng một hàm phụ thuộc của khoảng cách của nam châm tới bề mặt chất lỏng, năng lượng được tích trữ trong năng lượng bề mặt và trong thế năng từ. Đánh dấu tất cả các điểm tới hạn từ đồ thị trên và làm rõ xu hướng chung. Em không cần sử dụng toàn bộ các dữ liệu của mình, mà chỉ cần đủ để hiển thị ý tưởng. 0.6pt

Xung sóng trong chất lỏng từ (10 điểm)

Mở đầu

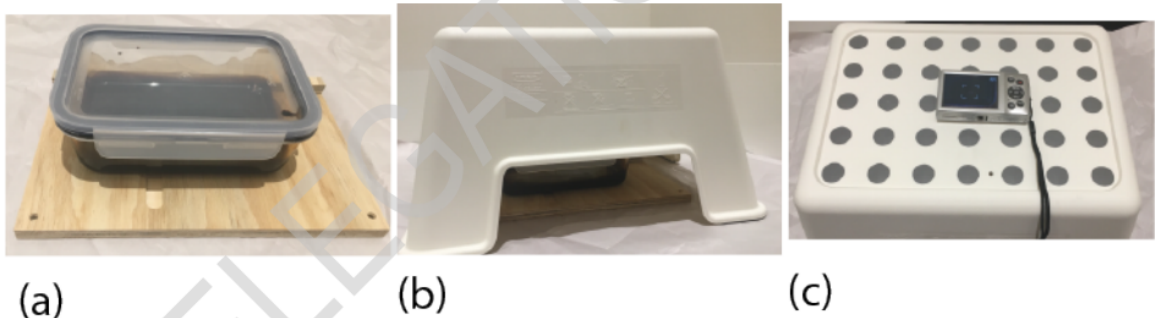
Trong bài này, ta sẽ khảo sát các tính chất của các xung sóng trong chất lỏng sắt từ. Các xung sóng bề mặt có thể được tạo ra trong chất lỏng là do tương tác giữa các hiệu ứng của trọng trường, lực căng bề mặt và các lực từ.

Đối với các xung sóng, không có bước sóng hoặc tần số của xung, mà ta chỉ biết được tốc độ lan truyền của xung khi không có từ trường là

$$v(d) = \kappa\sqrt{d}, \quad (1)$$

trong đó d là độ sâu của chất lỏng và κ là một hệ số tỉ lệ. Hệ thức này chỉ áp dụng cho các biên độ nhỏ của sóng. Khi biên độ của sóng là lớn, sự thay đổi độ sâu của chất lỏng do tác dụng của xung, sẽ gây ra những thay đổi của tốc độ lan truyền, dẫn đến các hiệu ứng phi tuyến. Khi các hiệu ứng phi tuyến là không đáng kể, các xung sóng gần như giữ nguyên hình dạng của chúng khi lan truyền. Tuy nhiên, khi các hiệu ứng phi tuyến là đáng kể, các xung có thể thay đổi hình dạng của chúng khi lan truyền, và thường tạo ra những gợn sóng cả ở phía sau và phía trước của xung chính.

Phần A: Xung phẳng (1.3 điểm)



Ảnh chụp của thiết bị, (a) hộp thủy tinh chứa chất lỏng sắt từ trên đế gỗ, (b) hộp thủy tinh trên đế gỗ, đặt dưới cái ghế nhựa dùng làm vật che ánh sáng và làm bệ đỡ (gọi là bệ đỡ), và (c) máy ảnh đặt trên bệ đỡ.

Để tạo ra sóng phẳng trong chất lỏng sắt từ, hãy đặt bình chứa chất lỏng sắt từ lên đế gỗ, với cạnh dài của bình chứa dọc theo gờ ở cạnh của đế gỗ. Gờ này được dùng để giữ cho hộp thủy tinh chỉ dịch chuyển theo một phương khi bị đẩy. Chú ý đặt đế gỗ nằm ngang. Để tạo xung, hãy dùng tay đẩy nhanh hộp thủy tinh một đoạn khoảng 2 cm. Để cho việc tạo xung được nhất quán, em có thể dùng nhựa dính hoặc đệm gỗ đặt trên đế gỗ để đánh dấu vị trí đầu và cuối của bình chứa chất lỏng sắt từ. Em nên tập cách tạo xung một vài lần để có thể tạo ra các xung một cách nhất quán.

Bây giờ đặt bệ đỡ lên trên hộp thủy tinh. Cần dùng đèn để chiếu sáng một cách thích hợp, sao cho có thể quan sát được các xung trong chất lỏng. Em hãy chắc chắn rằng có thể tạo được các xung sóng phẳng và quan sát chúng bằng mắt qua bệ đỡ. Khi em đã chắc chắn biết làm điều đó, em hãy đặt máy ảnh lên bệ đỡ và ghi hình video của một xung. Lưu ý rằng cần điều chỉnh ánh sáng và biên độ xung để thu được video tốt. Để điều chỉnh việc chiếu sáng, em có thể dùng nhựa dính để đặt đèn ở vị trí thích hợp, và có thể dùng lá nhôm để chắn hoặc lái ánh sáng.

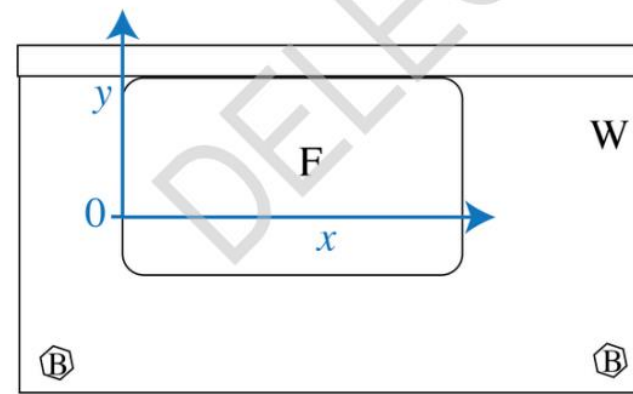
Khi điều chỉnh ánh sáng, cần lưu ý hạn chế ánh sáng từ nguồn chiếu thẳng vào máy ảnh, và cũng hạn chế ánh sáng phản xạ từ nắp của bình chứa. Ghi nhớ: vì lý do an toàn, em KHÔNG được bỏ nắp của bình chứa ra. Hai cách lựa chọn có ích trong các tình huống khác nhau là: có được ánh sáng khuếch tán từ mọi hướng bên trong bể đỡ, hoặc chiếu thẳng ánh sáng vào chất lỏng qua mặt bên của hộp thủy tinh.

Xem mô tả máy ảnh trong Phụ lục A để biết cách phát lại video. Chú ý rằng các cài đặt tự động mặc định của máy ảnh là thích hợp để quay video theo yêu cầu của thí nghiệm. Nếu em có khó khăn trong việc ghi lại các hiện tượng quan sát được một cách rõ ràng, hãy điều chỉnh ánh sáng để có thể quan sát rõ các xung sóng.

A.1	Hãy vẽ sơ đồ bố trí thí nghiệm của em, đặc biệt cần chỉ rõ cách định vị của đèn và cách hướng ánh sáng.	0.3pt
A.2	Hãy tiến hành các phép đo và tính toán từ video để tìm ra tốc độ của sóng trong chất lỏng sắt từ. Khi tiến hành các phép đo, em cũng cần vẽ phác hình ảnh của những khung hình mẫu chốt của video, chỉ ra các đặc tính quan trọng, và đánh dấu các phép đo đã được thực hiện.	0.8pt
A.3	Hãy ước tính sai số của phép đo, nêu các công thức em dùng để ước tính.	0.2pt

Phần B: Xung sóng trong chất lỏng có độ sâu thay đổi (3.4 điểm)

Lắp các bulông bằng nhựa vào các lỗ ở góc của đế gỗ. Bằng cách chỉnh các bulông này, em có thể bố trí đế gỗ sao cho độ sâu của chất lỏng trong bình biến thiên tuyến tính theo khoảng cách từ cạnh thấp (phương y), và không biến thiên theo phương vuông góc (phương x). Ta lấy $y = 0$ là nơi mà độ sâu của chất lỏng $d = 0$, do vậy, mặt phẳng xy sẽ là mặt phẳng bề mặt của chất lỏng.



Cách bố trí hộp thủy tinh chứa chất lỏng sắt từ F trên đế gỗ W sao cho độ sâu thay đổi theo phương y .

Vì rằng tốc độ sóng trong chất lỏng thay đổi theo độ sâu, nên nếu một xung phẳng được tạo ra ở một đầu của bình chứa, thì nó sẽ bị cong đi khi lan truyền.

Bố trí hộp thủy tinh chứa chất lỏng sắt từ trên đế gỗ sao cho em có thể dễ dàng xác định sự thay đổi của tốc độ xung theo độ sâu trong chất lỏng sắt từ.

B.1	i. Hãy vẽ sơ đồ của bình chứa chất lỏng sắt từ như em đã bố trí. Đánh dấu các phép đo, cùng với sai số, của tất cả các khoảng cách quan trọng để em biết độ sâu như là hàm của y bên trong bình. ii. Hãy viết biểu thức của $d(y)$.	0.3pt
B.2	Hãy tạo ra xung sóng phẳng trong bình chứa của em, và vẽ phác định tính một xung mà em quan sát được. Trên hình vẽ phác, hãy đánh dấu vùng mà xung truyền nhanh nhất bằng chữ A, và vùng mà xung truyền chậm nhất bằng chữ B. Ghi chú: Em sẽ cần chỉnh vị trí của đèn để quan sát rõ được các xung. Để chính sự chiếu sáng, em có thể dùng nhựa dính để đặt đèn ở vị trí thích hợp, và cũng có thể dùng lá nhôm để chắn ánh sáng hoặc phản xạ ánh sáng theo hướng mong muốn.	0.3pt
B.3	i. Với một xung phẳng ở $x = 0$ khi $t = 0$, hãy tìm hệ thức giữa x, y và t. ii. Hãy đánh dấu trên sơ đồ của em ở B2, bằng chữ V, chỗ trong hộp thủy tinh chứa chất lỏng sắt từ đã được em bố trí, mà ở đó phép gần đúng này hợp lí hơn cả.	0.3pt
B.4	i. Hãy vẽ sơ đồ bố trí thí nghiệm của em, đặc biệt chỉ ra vị trí của đèn và phương truyền của ánh sáng. Hãy thu thập dữ liệu để tìm κ và ghi vào bảng trong phiếu trả lời. Ghi ước tính sai số của tất cả các dữ liệu. Khi tiến hành các phép đo, em cũng cần vẽ phác hình ảnh của các khung hình mẫu chốt của video, chỉ ra những đặc tính quan trọng, và đánh dấu mọi phép đo đã thực hiện.	1.2pt
B.5	i. Hãy dùng phương pháp đồ thị để tính trị số của κ. Ghi các vạch sai số trong mỗi phép đo. Hãy cung cấp các chi tiết của mọi công thức mà em dùng để tính v, sai số ước tính Δv của nó, d và sai số ước tính Δd của nó. Hãy ghi mọi giá trị khác mà em tính toán được cho đồ thị của em vào các bảng cho B4. ii. Từ các dữ liệu của em, hãy nêu điều kiện cho x, y và t trong hệ thức mà em tìm được ở B3 để mô tả các xung sóng quan sát được.	1.3pt

Phần C: Sóng và các hiệu ứng từ (1.8 điểm)

Như em đã quan sát ở Câu hỏi 1, khi có từ trường, chất lỏng sắt từ chuyển động vào khu vực có từ trường mạnh nhất. Mục tiêu của em trong phần này là khảo sát tương tác của sóng và các hiệu ứng từ một cách định tính.

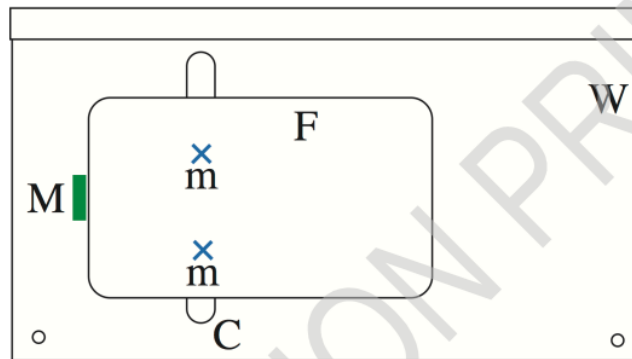
Bố trí hộp đựng chất lỏng sắt từ sao cho chất lỏng sắt từ có độ sâu như nhau, như khi em tạo ra xung phẳng. Sau đó, đặt hai nam châm nhỏ ở phía dưới, như thấy dưới đây. Hai nam châm có các cực sắp xếp sao cho chúng đẩy nhau khi chúng được đưa ngang lại gần nhau trong rãnh của đế gỗ. Em cần đặt chúng sao cho khi có chất lỏng sắt từ đặt vào, chúng ở gần nhau nhất có thể được mà không đẩy nhau.

Một cách an toàn để đặt các nam châm vào chỗ là đặt **một** nam châm vào rãnh, rồi đặt hộp thủy tinh

chứa chất lỏng sắt từ lên trên rãnh. Em có thể dùng một cái đệm gỗ trong rãnh để chọn vị trí cho nam châm. Nam châm thứ hai được trượt vào vị trí, bắt đầu từ chỗ gần hộp, rồi dùng đệm gỗ đẩy nó dọc theo rãnh phía dưới chất lỏng sắt từ.

Tạo ra xung sóng bằng cách dùng ba phương pháp sau:

- phương pháp từ: kéo nhanh nam châm to N42 đang ở gần chất lỏng sắt từ ra xa,
- phương pháp cơ học: trượt bình chứa trên đế gỗ, và
- phương pháp cơ học: trượt đế gỗ với bình chứa được hãm chặt trên mặt đế.

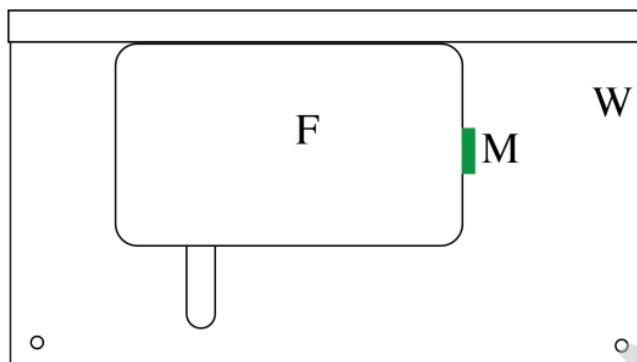


Sơ đồ chỉ ra chỗ đặt nam châm to M, trước khi kéo nhanh nó ra xa để tạo ra xung truyền trong chất lỏng sắt từ. Trong đó, F là hộp thủy tinh chứa chất lỏng sắt từ, m là các nam châm nhỏ, W là đế gỗ và C là rãnh.

- C.1** Hãy phân tích các quan sát định tính của các xung sóng cho cả ba cách tạo xung đã nêu. Em cần bảo đảm rằng các hình vẽ chỉ ra một cách rõ ràng sự có mặt của các nam châm phía dưới chất lỏng sắt từ ảnh hưởng thế nào lên mặt đầu sóng của các xung. Hãy nhận biết tất cả các hiện tượng sóng mà em quan sát được. Đánh dấu bằng các chữ số tương ứng hiệu ứng nào gây nên đặc tính nào của sự truyền xung quan sát được. 1.8pt
1. phản xạ
 2. khúc xạ
 3. hiệu ứng Doppler
 4. phách
 5. nhiễu xạ
 6. giao thoa
 - (a) sóng dừng
 - (b) từ hai khe hoặc hai nguồn
 - (c) từ cách tử nhiễu xạ
 - (d) khác

Phần D: Các tính chất nội tại của chất lỏng sắt từ trong một từ trường mạnh (3.5 điểm)

Trong phần này, mục tiêu của em là định lượng hóa tác dụng của một nam châm lên sự truyền của xung trong chất lỏng sắt từ.



Sơ đồ cho thấy cách đặt nam châm để tạo nên xung sóng ở D1.

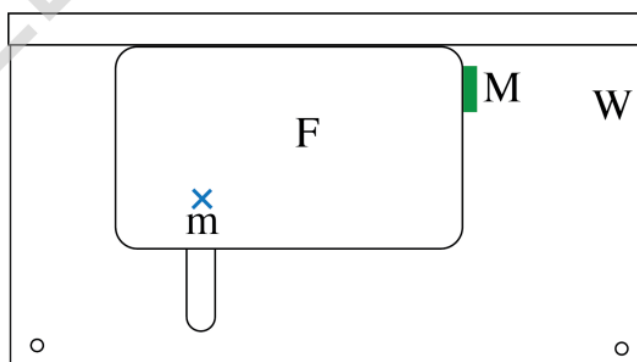
Bố trí bình chứa chất lỏng sao cho chất lỏng từ có độ sâu không đổi, như khi em tạo ra xung phẳng.

Hãy tạo ra các xung bằng phương pháp từ, dùng nam châm **to N42**, như được nêu ở C1, và điều chỉnh ánh sáng để quan sát rõ các xung được tạo ra bằng phương pháp từ.

D.1 Phác họa định tính một xung được tạo ra bằng phương pháp từ trong chất lỏng 0.2pt
sắt từ.

D.2 Hãy xác định tốc độ của xung cùng với sai số của nó. Hãy phác họa sơ đồ bố trí thí nghiệm, bao gồm vị trí của đèn và phương truyền của ánh sáng, và ghi lại tất cả các dữ liệu và công thức mà em dùng. Khi tiến hành các phép đo, em cũng vẽ phác hình ảnh của các khung hình video mẫu chốt, chỉ ra các đặc tính quan trọng, và đánh dấu tất cả các phép đo đã thực hiện. 0.8pt

Bây giờ, đặt một nam châm nhỏ vào rãnh trên để gõ, và đặt hộp chứa chất lỏng sắt từ lên trên nam châm. Có thể điều chỉnh vị trí của nam châm nhờ hai tấm gỗ đặt trong rãnh, bằng cách dùng chúng để đẩy nam châm qua lại, ở phía dưới hộp thủy tinh.



Vị trí của nam châm nhỏ dưới hộp thủy tinh chứa chất lỏng sắt từ được đánh dấu bằng chữ x, còn vị trí của nam châm lớn, mà ta giữ ở bên ngoài hộp, rồi nhanh chóng kéo ra xa để tạo nên xung sóng, được ghi bằng chữ M.

Hãy tạo ra xung sóng bằng phương pháp từ, bắt đầu bằng cách dùng nam châm lớn ở vị trí đánh dấu ở sơ đồ nêu trên, và quan sát xung sóng lan truyền qua chất lỏng từ, bao gồm cả khu vực có từ trường

mạnh.

D.3	Hãy phác họa định tính các quan sát xung sóng. Em cần đảm bảo rằng các sơ đồ chỉ rõ ra được sự có mặt của nam châm bên dưới chất lỏng ảnh hưởng thế nào lên mặt đầu sóng.	0.4pt
D.4	Hãy vẽ sơ đồ bố trí thí nghiệm của em để xác định hiệu ứng của sự xuất hiện nam châm bên dưới chất lỏng lên thời gian truyền đối với một xung sóng. Ghi rõ các vị trí của các nam châm và cả của đèn.	0.3pt
D.5	Tiến hành và ghi lại các phép đo cùng với các ước tính sai số để xác định thời gian truyền của một xung qua khu vực của nam châm. Khi thực hiện các phép đo, em hãy vẽ phác hình ảnh của những khung hình mẫu chốt, chỉ ra các đặc tính quan trọng, và đánh dấu mọi phép đo được thực hiện.	1.0pt
D.6	Hãy cho biết độ sâu thêm vào của chất lỏng sắt từ ở phía trên của nam châm có thể giải thích được sự khác nhau về tốc độ của các xung sóng hay không? Hãy nêu các tính toán để hỗ trợ cho đáp án của em.	0.8pt

Phụ lục A: Dùng máy ảnh Canon IXUS-185 như thế nào

Để bật hay tắt máy ảnh, ấn nút (O) có ghi "ON/OFF" ở phía trên của máy. Lưu ý rằng máy ảnh tự động tắt sau một khoảng thời gian.

Để lấy nét cho máy ảnh, ấn nửa chừng nút (S) ở phía trên của máy.

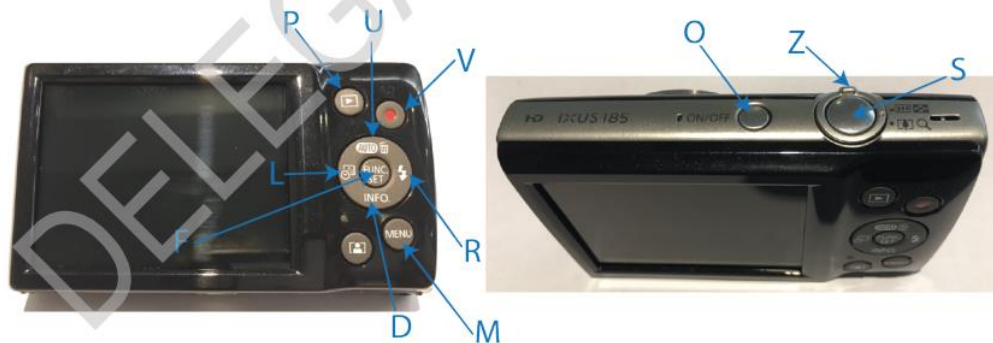
Để chụp ảnh, ấn nút (S) ở phía trên máy.

Để ghi video, ấn nút có chấm đỏ (V) để bắt đầu ghi. Ấn nút này một lần nữa để dừng ghi. Chú ý rằng, ở chế độ cài đặt sẵn, HD videos sẽ ghi 25 khung hình trong 1 giây.

Để xem lại ảnh hoặc video mà em đã ghi, ấn nút xem lại (P). Dùng nút phải (R) hay trái (L) trên nút hình vòng tròn ở phía sau của máy ảnh để lướt qua các ảnh và các video.

- Em có thể phóng to hay thu nhỏ ảnh bằng cách dùng vòng (Z) ở phía trên máy ảnh. Chú ý: em không thể phóng to hoặc thu nhỏ với video.
- Để phát lại video, ấn hai lần vào "FUNC. SET" nút (F) ở giữa của nút hình vòng tròn ở phía sau của máy ảnh.
- Để tạm dừng phát video, ấn "FUNC. SET" nút (F) ở giữa của nút hình vòng tròn ở phía sau của máy ảnh, khi video đang phát.
- Khi video được tạm dừng, em có các lựa chọn ở phía dưới của màn hình. Từ trái sang phải, các lựa chọn là: Thoát (Exit), Phát (Play), Chạy chậm (Slow Motion), Bỏ qua chạy ngược (Skip Backwards), Khung hình trước (Previous Frame), Khung hình sau (Next Frame), Bỏ qua chạy phía trước (Skip Forward). Dùng nút phải (R) và trái (L) nút hình vòng tròn ở phía sau của nút (F) ở giữa của nút hình vòng tròn ở phía sau của máy ảnh để thay đổi âm lượng phát lại video.

Để phóng to hay thu nhỏ (zoom), đẩy vòng (Z) về phía trái để thu nhỏ và về phía phải để phóng to.



Để đi vào cài đặt máy ảnh, ấn nút (M) có ghi "MENU", rồi dùng nút vòng tròn bên phải (R) ở phía sau máy ảnh để vào menu cài đặt máy ảnh. Nhớ rằng lựa chọn đầu tiên là tắt âm thanh của máy ảnh.

- Dùng nút phải (R), trái (L), trên (U) và dưới (D) ở nút hình vòng tròn ở phía sau của máy ảnh để lướt qua menu.
- Dùng "FUNC. SET" nút (F) ở giữa của nút hình vòng tròn ở phía sau của máy ảnh để chọn các lựa chọn.
- Dùng "MENU" nút (M) để thoát khỏi menu hoặc di chuyển ngược trở lại qua các menu.

Để thay đổi ngôn ngữ trong máy ảnh, trước hết vào menu cài đặt của máy (xem ở trên). Ấn nút dưới phải (D), có ghi "INFO." ở phía sau máy ảnh để cuộn xuống danh mục, và tìm "Language". Tiếp theo, ấn nút hình vòng tròn phía bên phải (R) ở phía sau của máy ảnh để vào danh sách các lựa chọn ngôn ngữ.

Dùng các nút phải (R), trái (L), trên (U) và dưới (D) ở nút hình vòng tròn ở phía sau của máy ảnh để lướt đến ngôn ngữ mà em chọn. Dùng "FUNC. SET" nút (F) ở giữa của nút hình vòng tròn ở phía sau của máy ảnh để chọn ngôn ngữ.

Chú ý: Em không nên thay đổi bất kì sự cài đặt nào của máy ảnh, ngoài việc thay đổi ngôn ngữ nếu cần, vì các cài đặt tự động mặc định là phù hợp cho các video mà em cần làm. Em sẽ thuận lợi hơn trong thí nghiệm nếu điều chỉnh thật tốt ánh sáng cho thí nghiệm của em.