

## บทที่ 8

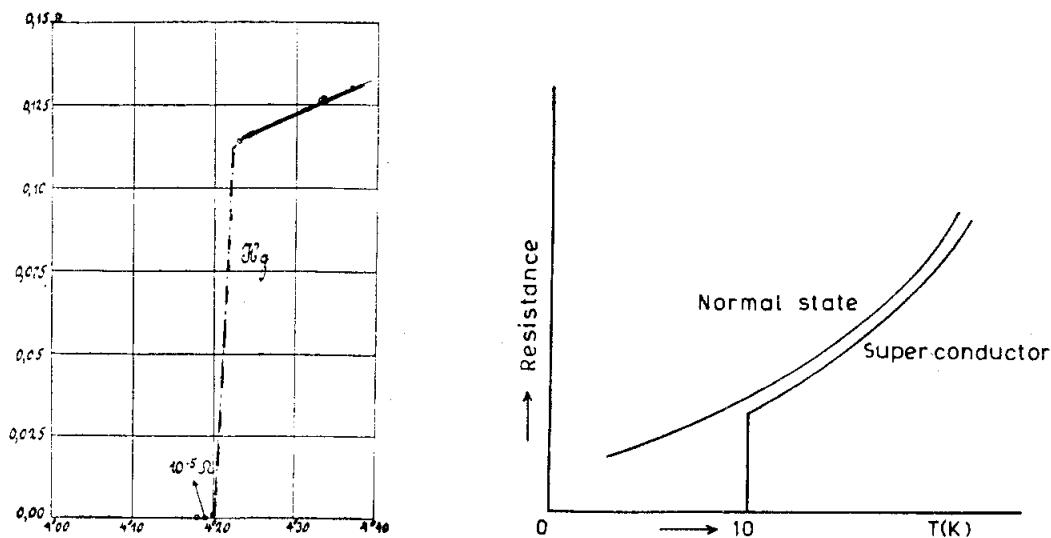
### สภาพนำร่องดึง

#### วัตถุประสงค์

1. ศึกษาความบังคับต่างๆ ของสารตัวนำร่องดึง
2. ศึกษาการແแท้ชี้มีน
3. ศึกษาปรากฏการณ์ไม้สเนอร์
4. ศึกษาตัวนำร่องดึงภายใต้สถานะแม่เหล็ก
5. ศึกษารูปแบบของตัวนำร่องดึง
6. ศึกษาผลการทดลองเกี่ยวกับตัวนำร่องดึง
7. ศึกษาทฤษฎีของตัวนำร่องดึง
8. ศึกษาการทดสอบอ่อนนุကติเดียว

ในปี พ.ศ. 2361 นายแคมอลิงห์ อ่อนเนส ค้นพบวิธีการทำให้氫เลียมเป็นของเหลวได้สำเร็จเป็นคนแรก หลังจากนั้นสามปี เขากล่องพบร่วมกับ เมื่อปี 1911 ได้รับความเห็นชอบมีอุณหภูมิต่ำมากในช่วงของ氫เลียมเหลว ความต้านทานทางไฟฟ้าของปีรอก จะมีค่าลดลงจนเกือบจะเป็นศูนย์

จากการทดลองต่อมา พบร่วมกับ สารหลาบชนิด เมื่ออุณหภูมิลงมาจนถึงขีดอุณหภูมิซึ่งเรียกว่า อุณหภูมิวิกฤต (critical temperature,  $T_c$ ) สารจะเปลี่ยนสภาพจากที่มีความต้านทานไฟฟ้าปกติ (normal state) เป็นสภาพที่มีความต้านทานไฟฟ้าเกือบจะเป็นศูนย์ (superconducting state)



รูปที่ 8.1 ความต้านทานกับอุณหภูมิในปรอท

### 8.1 กระแสสัมภ์ยืน

ไฟล์ และมิลล์ (File and Mills) ใช้เทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (NMR) วัดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสภายในวงแหวนตัวนำயวดยิ่ง พบร่วมกับการลดลงของกระแสเมื่อไม่ต่ำกว่า 100,000 ปี กระแสภายในตัวนำယวดยิ่งนี้มีชื่อเรียกว่า กระแสสัมภ์ยืน (super current)

**ตัวอย่างที่ 8.1** จงหากระแสภายในวงแหวนตัวนำယวดยิ่งซึ่งทำจากไนโอลิบิม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ถ้าสนามแม่เหล็กที่ผ่านวงแหวนขนาด 0.025 เทสลา ลดลงเป็นศูนย์ทันที (หนึ่งนาทีให้เกิดกระแสภายในวงแหวนตัวนำယวดยิ่ง) กำหนดให้อินดักเตนซ์ของวงแหวน ( $L$ ) เท่ากับ  $3 \times 10^{-8}$  เอ็นรี

**วิธีทำ** จากกฎของฟาราเดย์

$$-\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = L \frac{\Delta I}{\Delta t} = A \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

$$\begin{aligned} \Delta I &= A \frac{\Delta B}{L} = \frac{\pi (0.01 \text{ m})^2 (0.025 \text{ T})}{3 \times 10^{-8} \text{ H}} \\ &= 260 \text{ A} \end{aligned}$$

**ตัวอย่างที่ 8.2** สารตัวนำขวดยิ่งที่เป็นโลหะผสมบางชนิดสามารถมีกระแสไฟฟ้าผ่านมากเมื่อ อุณหภูมิต่ำ ตัวอย่างเช่น  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  ที่อุณหภูมิ  $10^\circ\text{K}$  สามารถรับกระแสได้ถึง 1000 แอมเปอร์ และบังคับสภาพเป็นสารตัวนำขวดยิ่ง จนหาความเข้มสนามแม่เหล็กมาก ที่สุดในขดลวดโซลินอยด์ยาว 50 เซนติเมตร ถ้าขดลวด  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  พันอยู่รอบนอก 2000 รอบ

$$\begin{aligned} \text{วิธีทำ} \quad B &= \mu_0 n I \\ &= (4\pi \times 10^{-7})(4000)(10^3) \\ &= 5 \text{ เทสลา} \end{aligned}$$

ความเข้มสนามแม่เหล็กมากที่สุด 5 เทสลา

**ตัวอย่างที่ 8.3** จงคำนวณกระแสยั่งยืน ความต้านทานของวงจรตัวนำขวดยิ่ง และกำลังที่สูญเสียมากที่ในวงจรตัวนำขวดยิ่งในการทดลองของไฟล์และมิลเดอร์

**วิธีทำ** กระแสภายในขดลวดโซลินอยด์ และสนามแม่เหล็กมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$B = n\mu_0 I$$

เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนรอบต่อความยาวของ coils  
ค่าของกระแสยั่งยืน คือ

$$\begin{aligned} I &= \frac{B}{n\mu_0} = \frac{0.21 T}{\left(\frac{984}{0.25m}\right)(4\pi \times 10^{-7} N/A^2)} \\ &= 42.5 A \end{aligned}$$

ความต้านทาน ( $R$ ) ของ coils ตัวนำขวดยิ่ง คือ

$$R = \frac{L}{\tau} = \frac{N\phi_m}{I_0\tau}$$

ผลักมีค่าดังนี้

$$\phi_m = \pi r^2 B$$

เมื่อ  $r$  เป็นรัศมีของโซลินอยด์ ( $0.05 \text{ m}$ )

ดังนั้น

$$R = \frac{N\pi r^2 B}{I_0\tau}$$

$$= \frac{(984)(\pi)(0.05 \text{ m})^2(0.21 \text{ T})}{(42.5 \text{ A})(1.2 \times 10^5 \text{ y})}$$

ใน 1 ปี มี  $3.15 \times 10^7$  วินาที  $= \pi \times 10^{-7}$  วินาที

ดังนั้น

$$R = \frac{(984)(\pi)(0.05 \text{ m})^2(0.21 \text{ T})}{(42.5 \text{ A})(1.2 \times 10^5 \text{ y})(\pi \times 10^7 \text{ s/y})}$$

$$= 10^{-14} \Omega$$

หมายเหตุ

$$\frac{T \cdot m^2}{A \cdot s} = \frac{\left(\frac{s \cdot V}{m^2}\right) m^2}{A \cdot s} = \frac{V}{A} = \Omega$$

กำลังที่สูญเสียในวงจร คือ

$$P = I^2 R = (42.5 A)^2 (10^{-14} \Omega)$$

$$= 2 \times 10^{-11} W$$

ตัวอย่างที่ 8.4 จากการทดลองของนายเอส คออลินส์ ระหว่างปี พ.ศ. 2498 ถึง พ.ศ. 2501

พบว่า กระแสที่ไหลอยู่ในวงแหวนตัวนำယดยิ่งต่อไปเป็นเวลา 3 ปี โดยไม่มีการลดลงเลย ถ้าอินดักแทนซ์ของวงแหวนเท่ากับ  $3.14 \times 10^{-8}$  เชนรี และความไวของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ  $1/10^9$  จงหาความต้านทานสูงสุดของวงแหวนตัวนำယดยิ่ง ( ข้อแนะนำ : ทำให้มีอนกับการลดลงของกระแสในวงจร อาร์เรล ( RL ) และใช้การประมาณค่า  $e^{-x} \approx 1 - x$  เมื่อ  $x$  มีค่าอน )

วิธีทำ จากวงจรอาร์เรล

$$i(t) = i(0)e^{-\frac{R}{L}t}$$

เมื่อ  $i(t)$  เป็นกระแสที่เวลา  $t$  โดย ๆ

$i(0)$  เป็นกระแสที่เวลา  $t = 0$

$R$  เป็นความต้านทานภายในวงจร

$L$  เป็นอินดักแทนซ์ภายในวงจร

$$\frac{i(t)}{i(0)} = 1 - 10^9 = e^{-\frac{R}{L}t} \approx 1 - \frac{R}{L}t$$

$$\frac{R}{L}t = 10^{-9}$$

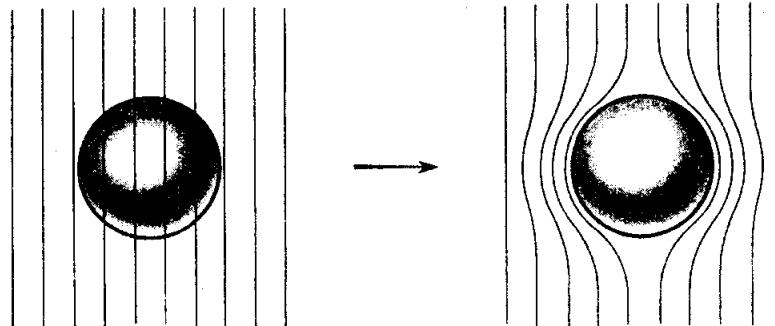
$$R_{\max} = \frac{(3.14 \times 10^{-8} H)(10^{-9})}{3 \times 3.14 \times 10^7 (s)}$$

$$= 3.3 \times 10^{-25} \text{ โอห์ม}$$

( หมายเหตุ : ถ้าวงแหวนทำจากทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร และพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางมิลลิเมตร ความต้านทานของวงแหวนจะมีค่าอย่างน้อย  $10^{-6}$  โอห์ม )

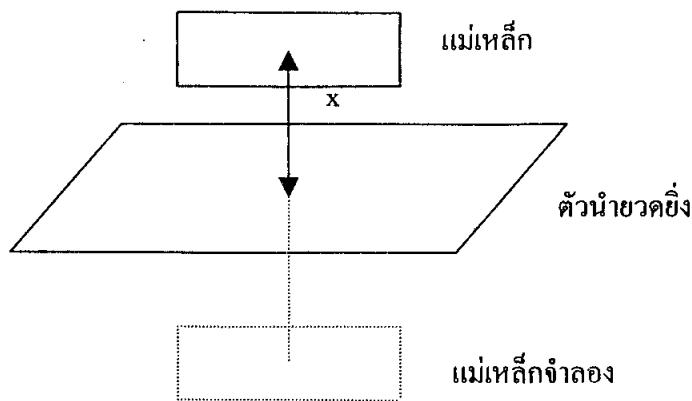
## 8.2 ปรากฏการณ์ไม้สเนอร์ (Meissner effect)

เป็นปรากฏการณ์ซึ่งสนามแม่เหล็กไม่สามารถทะลุผ่านเข้าไปภายในผิวสารตัวนำขวด  
ขึ้นได้ ทำให้ความเข้มสนามแม่เหล็กภายในออกตัวนำขวดยิ่งมีค่ามาก



รูปที่ 8.2 ปรากฏการณ์ไม้สเนอร์ ของตัวนำขวดยิ่งรูปทรงกลม ซึ่งเมื่อผลดุณภูมิถึงจุด ๆ หนึ่ง  
สนามแม่เหล็กจะไม่สามารถผ่านเข้าไปในทรงกลมได้

ตัวอย่างที่ 8.5 ถ้าวางแม่เหล็กขนาดเล็ก แต่มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากลงบนแผ่นตัวนำขวดยิ่ง  
แม่เหล็กจะลอดอยเหนือตัวนำขวดยิ่งเป็น ไดอะแมกนิกอย่างสมบูรณ์ และจะผลัก  
ฟลักแม่เหล็ก ดังนั้น ตัวนำขวดยิ่งจะประพฤติตัวเหมือนกับเป็นแม่เหล็กอีกแห่ง  
หนึ่งที่มีคุณสมบัติเหมือนกันwangอยู่ด้านล่างของแผ่นตัวนำขวดยิ่ง ตามรูป



- จะหาความสูงที่แม่เหล็กลอยอยู่ ถ้าหากว่า มวลของแม่เหล็กเท่ากับ 5 กรัม และ โนเมนต์แม่เหล็ก ( $m$ ) เท่ากับ  $0.3 A \cdot m^2$  (ข้อแนะนำ: พลังงานศักย์ระหว่างแม่เหล็กไดโอด 2 อันที่อยู่ห่างกัน  $r$  เท่ากับ  $\mu_0 m^2 / 4\pi r^3$ )

วิธีทำ ถ้าหากแม่เหล็กลอยอยู่เหนือสารตัวนำயวดยิ่งเป็นระบบทาง  $x$  พลังงานรวมของแม่เหล็กคือ

$$E = mgx + \frac{\mu_0 m^2}{4\pi(2x)^3}$$

หากำพลังงานต่ำสุดได้ โดยการดิฟเฟอเรนเชียล  $E$  เทียบกับ  $x$

$$\frac{dE}{dx} = 0$$

จะได้

$$\begin{aligned} x &= \left[ \frac{6\mu_0 m^2}{64\pi mg} \right]^{1/4} \\ &= 0.016 \quad \text{เมตร} \\ &= 1.6 \quad \text{เซ็นติเมตร} \end{aligned}$$

แม่เหล็กจะลอยเหนือแผ่นตัวนำယวดยิ่งเป็นระบบทาง 1.6 เซนติเมตร

### 8.3 สารตัวนำယวดยิ่ง

สารที่เป็นตัวนำယวดยิ่งได้มีอุดอุณหภูมิลงมา ประกอบด้วย

1. ธาตุบริสุทธิ์ที่เป็นโลหะ คือจากตารางธาตุ
2. สารประกอบระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ คือจากตารางที่ 8.2
3. เซรามิก (ceramics) เช่น  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$

ตารางที่ 8.1 ธาตุที่เป็นสารตัวนำยวดยิ่ง

Li	Be	B	C	N	O	F	Ne										
	0.026*	Al	Si*	P*	S*	Cl	Ar										
Na	Mg																
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr*	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge*	As*	Se*	Br	Kr
Rb	Sr	Y*	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn (w)	Sb*	Te*	I	Xe
Cs*	Ba*	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg (n)	Tl	Pb	Bi*	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac															
			Ce*	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
			Th	Pa	U*(w)	No	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	
			1.368	1.4													
			1.62														

An asterisk denotes an element superconducting only in thin films or under high pressure in a crystal modification not normally stable. Data courtesy of B. T. Matthias, revised by T. Geballe.

ตารางที่ 8.2 สารประกอบที่เป็นตัวนำயางยิ่ง

Compound	$T_c$ , in K	Compound	$T_c$ , in K
$Nb_3Sn$	18.05	$V_3Ga$	16.5 <sup>f</sup>
$Nb_3Ge$	23.2	$V_3Si$	17.1
$Nb_3Al$	17.3	$YBa_2Cu_3O_{6.9}$	90.0
$NbN$	16.0	$Rb_2CsC_{60}$	31.3 <sup>b</sup>
$K_3C_6O$	19.2	$La_3In$	10.4 <sup>f</sup>

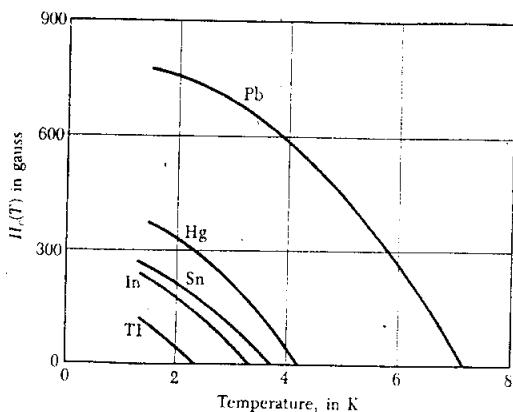
ตารางที่ 8.3 อุณหภูมิวิกฤตของสารบางชนิดที่มีค่าสูง

สาร	$T_c(K)$
$La_{2-x}Ba_xCuO_4$	30
$La_{2-x}Sr_xCuO_4$	38
$La_{2-x}Sr_xCaCuO_4$	60
$YBa_2Cu_3O_7$	92
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_2O_{10}$	110
$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$	125

#### 8.4 การทำลายความเป็นตัวนำယางยิ่งด้วยสนามแม่เหล็ก

ถ้าสนามแม่เหล็กที่ให้แก่ตัวนำယางยิ่งมีค่ามากพอ จะสามารถทำลายการเป็นตัวนำယางยิ่งได้ สนามแม่เหล็กวิกฤต ( critical field ) แทนด้วย  $H_c(T)$  จะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ที่ อุณหภูมิวิกฤตสนามวิกฤตจะเป็นศูนย์  $H_c(T_c) = 0$  เสมอ การเปลี่ยนแปลงของสนามวิกฤตเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปสำหรับตัวนำယางยิ่งชนิดต่าง ๆ แสดงใน รูปที่ 8.3 กราฟจะแบ่งระหว่างสเกลตัวนำယางยิ่งทางด้านล่างซ้ายของรูป กับสเกลปกติทางด้านบนขวาของรูป

$$H_c(T) = H_c(0) \left| 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right|$$



รูปที่ 8.3 กราฟระหว่างสนามวิกฤต  $H_c(T)$  กับอุณหภูมิ

ตัวอย่างที่ 8.6 อุณหภูมิวิกฤตของไนโอลีบีมเท่ากับ 9.3 K สนามวิกฤตที่สูงยังคงเคลื่อนคือ 0.2 เทสลา จงคำนวณสนามแม่เหล็กวิกฤตและพลังงานควบแน่น (condensation energy) ต่อหน่วยปริมาตรของทรงกระบอกที่ทำจากไนโอลีบีม ที่อุณหภูมิที่เดียวกันแล้ว

วิธีทำ ที่อุณหภูมิที่เดียวกัน ( $4.2 \text{ K}$ ) สนามวิกฤต คือ

$$\begin{aligned}
 B_c &= B_c(0) \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \\
 &= (0.2 \text{ เทสลา}) \left[ 1 - \left( \frac{4.2 \text{ K}}{9.3 \text{ K}} \right)^2 \right] \\
 &= 0.16 \text{ เทสลา}
 \end{aligned}$$

พลังงานควบแน่นต่อปริมาตร คือ

$$U_c = \frac{B_c^2}{2\mu_0} = \frac{(0.16 \text{ tesla})^2}{(2)(4\pi \times 10^{-7} N/A^2)}$$

$$= 1.0 \times 10^4 \text{ J/m}^3$$

ตัวอย่างที่ 8.7 จงหาค่าพลังงานจากสนามแม่เหล็กที่สามารถทำลายความเป็นสภาพตัวนำขั้วซึ่งในตะกั่ว ที่ไกล์สูนย์องศาเคลวิน สนามวิกฤตที่สูนย์องศาเคลวิน  $B_c(0)$  สำหรับตะกั่ว เท่ากับ 0.08 เทสลา

วิธีทำ

$$E_{\text{แม่เหล็ก}} = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

$$= \frac{(0.08 \text{ T})^2}{8\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2}$$

$$= 2,546 \text{ J/m}^3$$

$$= 2.54 \text{ mJ/cm}^3$$

ซึ่งเป็นค่าที่ตรงกับการทดลอง

ตัวอย่างที่ 8.8 สนามแม่เหล็กวิกฤตในตะกั่วที่สูนย์องศาเคลวินมีค่าเท่ากับ 0.080 เทสลา จงประมาณค่าซึ่งของแรงพลังงานของตะกั่วที่สูนย์องศาเคลวิน ความหนาเน้นของอิเล็กตรอนในແບນนาเท่ากับ  $1.3 \times 10^{29} \text{ m}^{-3}$  และพลังงานเฟอร์เมิลเท่ากับ 9.4 eV

วิธีทำ พลังงานรวมตัว คือ

$$U_c = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{(0.080 \text{ T})^2}{(2)(4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2)}$$

$$= 2.5 \times 10^3 \text{ J/m}^3$$

เศษส่วนของอิเล็กตรอน ( $f$ ) ซึ่งเกลื่อนที่ออกจากบริเวณซ่องว่าง คือ

$$f = \frac{(E_g / 2)}{E_F} = \frac{E_g}{2E_F}$$

ค่าพลังงานที่เปลี่ยนไปโดยประมาณ คือ

$$\Delta E = -E_g / 2$$

จากหลักการคงตัวของอิเล็กตรอน

$$U_c + nf\Delta E = 0$$

เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนอิเล็กตรอนในແຄນนำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad E_g &= \sqrt{\frac{2U_c E_F}{n}} \\ &= \sqrt{\frac{(2)(2.5 \times 10^3 \text{ J/m}^3)(9.4 \text{ eV}) \text{ eV}}{(1.3 \times 10^{29} \text{ m}^{-3})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J})}} \\ &= 2 \text{ meV} \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 8.9 จงเปรียบเทียบฟลักก์แม่เหล็กที่ถูกดักจับ โดยสูตรตัวนำข่าวดึงกับสูตรปกติที่สอน  
แม่เหล็กต่ำ เมื่อ  $n = 1$

วิธีทำ การเปลี่ยนแปลงของฟลักก์แม่เหล็กเกิดขึ้น เมื่อ

$$B = 7 \times 10^{-6} \text{ T}$$

สำหรับทรงกระบอกที่มีพื้นที่ภายใน

$$A = 1.7 \times 10^{-10} \text{ m}^2$$

ผลักของสเตทปกติ คือ

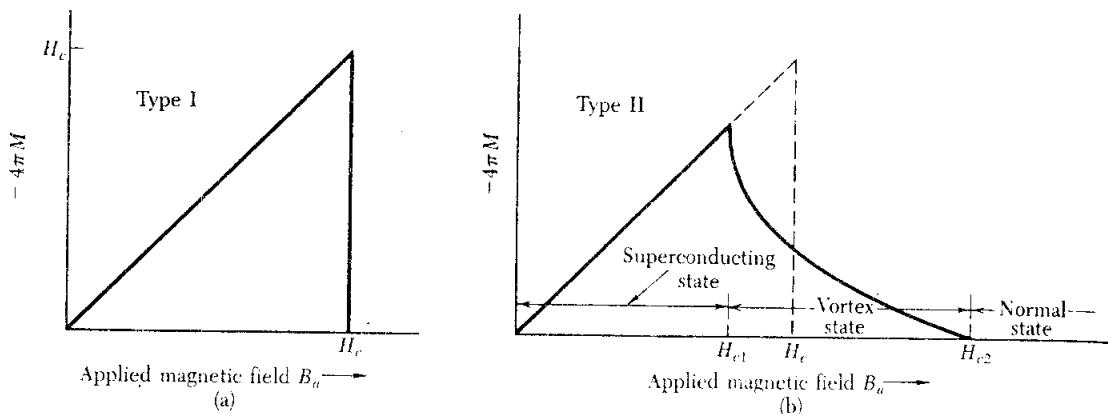
$$\begin{aligned}\phi_N &= BA &= (7 \times 10^{-6} T)(1.7 \times 10^{-10} \text{ m}^2) \\ &= 1.2 \times 10^{-15} \text{ T} \cdot \text{m}^2\end{aligned}$$

ผลักในสเตทตัวนำขวดยิง คือ

$$\begin{aligned}\phi_s &= \frac{nh}{2e} &= (1)\left(\frac{h}{2e}\right) &= \phi_0 \\ &= 2.07 \times 10^{-15} \text{ T} \cdot \text{m}^2\end{aligned}$$

### 8.5 ชนิดของสารตัวนำขวดยิง

แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ type I และ type II โดยที่ตัวนำขวดยิงชนิด type I จะแสดงปรากฏการณ์ไม่เนอร์อย่างสมบูรณ์ (perfect diamagnetism) เมื่อสนามแม่เหล็กต่ำกว่าสนามวิกฤต สารจะเป็นตัวนำขวดยิงแต่เมื่อสนามแม่เหล็กสูงกว่าสนามวิกฤตสารจะเป็นปกติ ทันที ดังแสดงในรูปที่ 8.4 (a)



รูปที่ 8.4 สารตัวนำขวดยิงชนิด type I และ type II

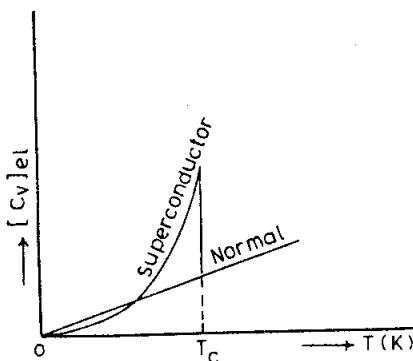
สารตัวนำยิ่งวัดชนิด type II แสดงรูป 8.4 (b) ฟลักแม่เหล็กจะเริ่มทะลุผ่านสารตัวอย่างเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ  $H_{c2}$  ต่ำกว่าสนามวิกฤต  $H_c$  สารตัวอย่างจะอยู่ในสเตทอร์เกกระหว่าง  $H_{c1}$  และ  $H_{c2}$  และสารตัวอย่างจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นตัวนำยิ่งถึง  $H_{c2}$  หนึ่งอีก  $H_{c2}$ . สารตัวอย่างจะเป็นตัวนำปกติ ยกเว้น อาจจะมีปรากฏการณ์พิเศษที่ผิด สำหรับค่า  $H_c$  ได้ ๆ พื้นที่ได้กราฟจะมีค่าเท่ากันทั้ง type I และ type II

สรุปได้ว่า

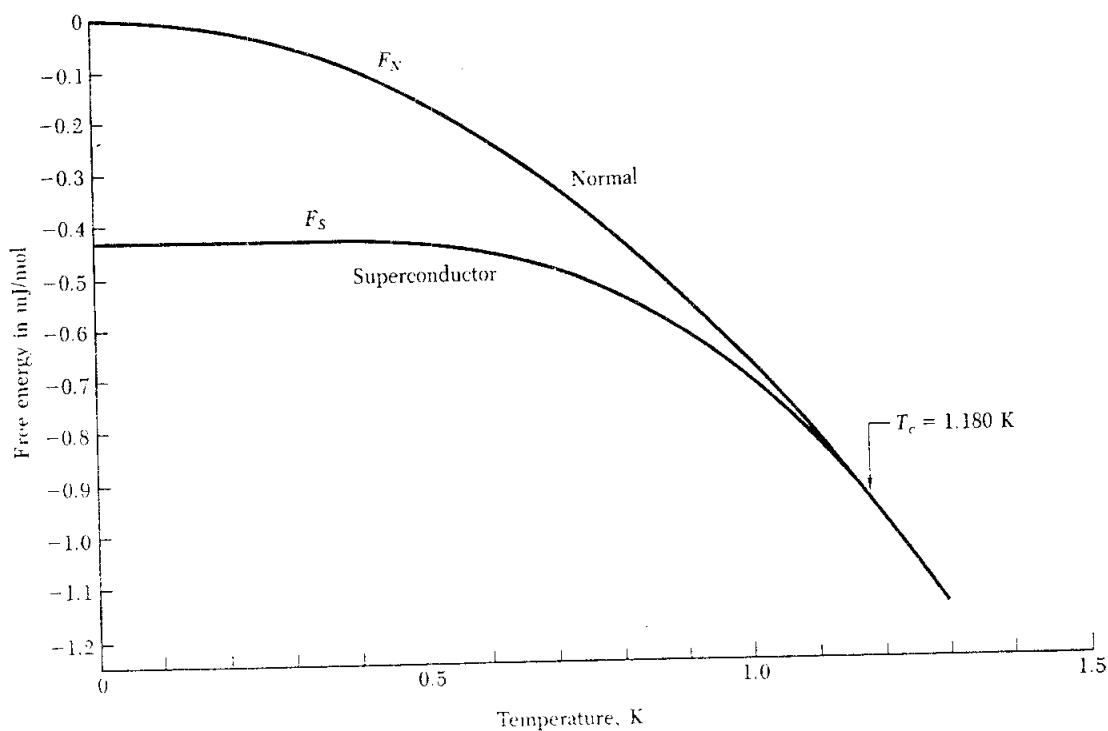
type I	$B_\alpha > H_c$	ตัวนำปกติ
type II	$B_\alpha < H_{c1}$	ตัวนำยิ่ง
	$H_{c1} < B_\alpha < H_{c2}$	สเตทอร์เกก
	$B_\alpha > H_{c2}$	ตัวนำปกติ

## 8.6 ความฉุกเฉินร้อน

สารตัวนำยิ่งทุกชนิด ค่าอึนโทปีจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต  $T_c$  การวัดค่าจากอุณหภูมิเนียม แสดงในรูปที่ 7a การลดลงของอึนโทปีระหว่างสเตทปกติกับสเตทตัวนำยิ่ง แสดงว่า สเตทตัวนำยิ่งมีความเป็นระเบียบมากกว่าสเตทปกติ เพราะว่า ค่าอึนโทปีแสดงถึงความไม่เป็นระเบียบของระบบ

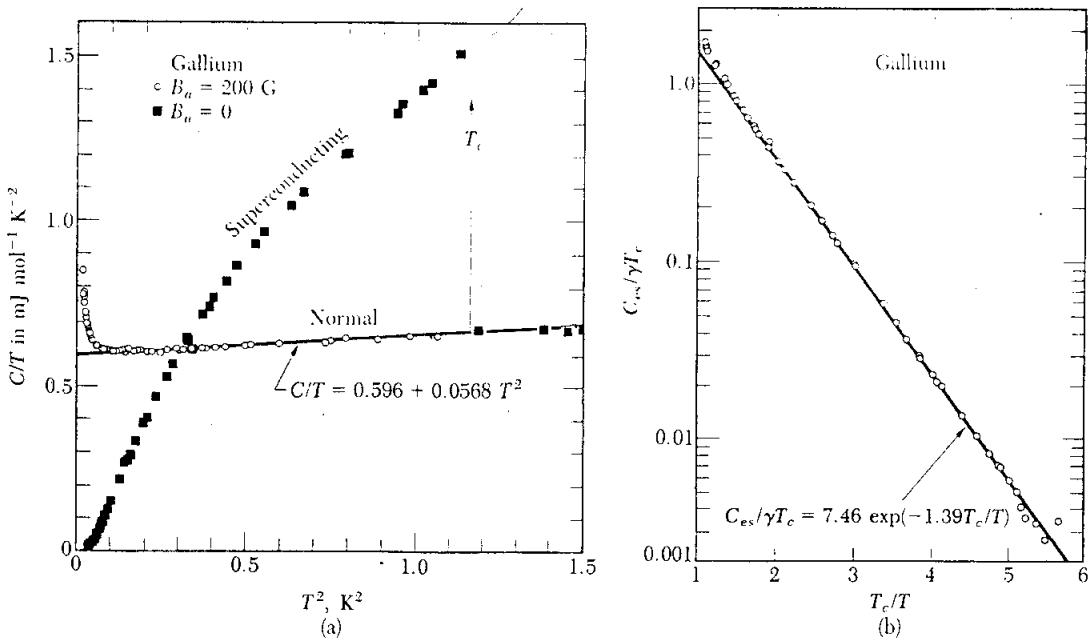


รูปที่ 8.5 อึนโทปี S ของอุณหภูมิเนียมในสเตทปกติและสเตทตัวนำยิ่ง เป็นพังก์ชันของอุณหภูมิ



รูปที่ 8.6 ค่าพลังงานอิสระจากการทดลองเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิสำหรับอลูминีียมในสเตทตัวนำယวคยิ่ง และในสเตทปกติเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต  $T_c = 1.180^\circ\text{K}$  พลังงานอิสระในสเตทตัวนำယวคยิ่งจะมีค่าต่ำกว่าในสเตทปกติ

ความจุความร้อนของเกลเดียม แสดงในรูปที่ 8.5(ก) เปรียบเทียบระหว่างสเตทปกติ และสเตทตัวนำယวคยิ่ง (ๆ) แสดงว่า ผลจากอิเล็กตรอนที่มีต่อความจุความร้อนจะแปรตามสมการ เอ็กโนเนียนเชิงลด โดยมีอาร์กิวเม้นต์เป็นสัดส่วนกับ  $-1/T$  แสดงว่ามีการกระโดดของอิเล็กตรอน ผ่านช่องว่างระหว่างพลังงาน โดยที่ช่องว่างระหว่างพลังงานเป็นคุณสมบัติหนึ่งของตัวนำယวคยิ่ง บางชนิด



รูปที่ 8.7 ความจุความร้อนของเกลเลียมในสภาวะปกติและในสภาวะตัวนำยวดยิ่ง

ตัวอย่างที่ 8.10 สารตัวนำยวดยิ่งชนิด 2 มีกระแสไฟฟ้าผ่าน กำหนดให้สามารถรับกระแสได้ถึง  $10^5$  แอมเปอร์ ถ้าพื้นที่หน้าตัดของสารตัวนำยวดยิ่ง เท่ากับ 2 ตารางมิลลิเมตร จงหาความเร็วของอิเล็กตรอนภายในตัวนำยวดยิ่งนี้ สมมุติว่า ความหนาแน่นของ อิเล็กตรอน ( $n_s$ ) เท่ากับ  $5 \times 10^{27}$  ตัวต่อลูกบาศก์เมตร

วิธีทำ ความหนาแน่นกระแส คือ

$$J_s = n_s e V_s$$

$$J_s = \frac{10^5 \text{ A}}{2 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = 5 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$$

แต่  $n_s = 5 \times 10^{27} \text{ ตัว/m}^3$   
และ  $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ คูลอมบ์}$

$$V_s = \frac{J_s}{e n_s}$$

$$= \frac{5 \times 10^{10}}{1.6 \times 10^{-19} \times 5 \times 10^{27}}$$

$$= 60 \text{ เมตร/วินาที}$$

ความเร็วของอิเล็กตรอนในสารตัวนำยวดยิ่งเท่ากับ 60 เมตร/วินาที ซึ่งมีความเร็วมาก กว่าของอิเล็กตรอนในลวดทองแดงมาก

ตัวอย่างที่ 8.11 พิจารณาเส้นลวดทำจากดีบุก ซึ่งมีรัศมีประมาณเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $40 \mu m$ ) กระแสมากที่สุดในเส้นลวดมีค่าเท่าไร จึงจะทำให้บังคับมีคุณสมบัติเป็นสารตัวนำของแม่เหล็ก

วิธีทำ สนามแม่เหล็กวิกฤตในดีบุก คือ  $0.03$  เทสลา กระแสมากที่สุด คือ

$$\begin{aligned} I &= \frac{2\pi r_0 B_C}{\mu_0} \\ &= \frac{(2)(\pi)(4 \times 10^{-5} m)(0.03 T)}{4\pi \times 10^{-7} N/A^2} \\ &= 6 A \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 8.12 คำนวณค่าต่ำสุดของประจุแม่เหล็กของโนโนโพลที่เป็นไปตามความต้องการ ให้

วิธีทำ จากกฎของเกาส์ สนามแม่เหล็กที่ระยะ  $r$  จากโนโนโพลแม่เหล็ก ประจุ  $q$  คือ

$$B = \frac{q}{4\pi r^2}$$

ฟลักแม่เหล็กที่ระยะทาง  $r$  จากโนโนโพล คือ

$$\phi = (4\pi r^2) \left( \frac{q}{4\pi r^2} \right) = q$$

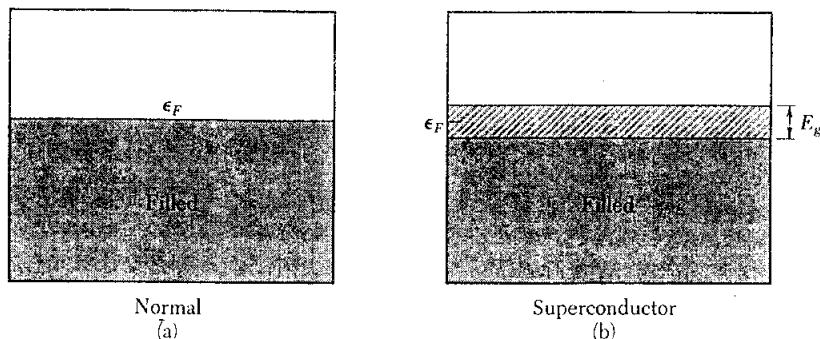
เนื่องจากขนาดของความต้องการฟลัก คือ  $h/2e$

ดังนั้น

$$q = \frac{h}{2e}$$

## 8.7 ช่องว่างระหว่างระดับพลังงาน

ช่องว่างระหว่างระดับพลังงานในตัวนำวัสดุยิ่งจะแตกต่างจากช่องว่าง ระหว่างระดับพลังงานของอนุวน ในการนวน ช่องว่างระหว่างระดับพลังงานจะติดกับแหลบทิช แต่ในตัวนำวัสดุยิ่งจะติดกับแก๊สเฟอร์มี ค่าของระดับพลังงานของสารตัวนำวัสดุยิ่งชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 8.3 เป็นค่าที่ได้จากการทดลองโดยใช้วิธีการหลักผ่านของอิเล็กตรอน



รูปที่ 8.8 (a) แทนนำในสภาพปกติ (b) ช่องว่างระหว่างระดับพลังงานที่ระดับเฟอร์มิในสเตทตัวนำวัสดุยิ่ง อิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาพกระตุ้นจะประพฤติตัวคล้ายกับอิเล็กตรอนปกติที่อยู่ภายใต้สนามคลื่นวิทยุ ทำให้เกิดความต้านทาน ที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์จะไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เหนือช่องว่าง

ตารางที่ 8.4 ช่องว่างระหว่างระดับพลังงานในตัวนำวัสดุยิ่ง ที่  $T = 0$

$$E_g(0) \text{ in } 10^{-4} \text{ eV.}$$

$$E_g(0)/k_B T_c.$$

										Al	Si
Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	3.4 3.3	
		16. 3.4							2.4 3.2	3.3 3.5	
Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	1.5 3.2	10.5 3.6
		30.5 3.80	2.7 3.4						In	11.5 3.5	Sn (w)
La fcc	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg (a)	Tl	Pb
19. 3.7		14. 3.60							16.5 4.6	7.35 3.57	27.3 4.38

ตัวอย่างที่ 8.13 จงหาซ่องว่างແດບພลังงานของคีบุก

วิธีทำ อุณหภูมิวิกฤตของคีบุก คือ

$$T_c = 3.7 \text{ K}$$

ซ่องว่างພลังงานจากทฤษฎี BCS คือ

$$E_g = 3.5 kT_c$$

$$\begin{aligned} &= (3.5)(0.026 \text{ eV}) \left( \frac{3.7 \text{ K}}{300 \text{ K}} \right) \\ &= 1.1 \text{ meV} \end{aligned}$$

## 8.8 คุณสมบัติไมโครเวฟและอินฟารेड

การที่มีซ่องว่างระหว่างระดับพลังงานในตัวนำขวดยิ่ง แสดงว่า ไฟต่อนที่มีพลังงานน้อยกว่าพลังงานของซ่องว่างจะไม่ถูกคุกคักลืน ไฟต่อนทั้งหมดที่ตัดกระแสจะสะท้อนกลับเข้าเดิมกับไฟ เพราะว่า อิมพีแคนซ์จะไม่เท่ากันที่ขอบระหว่างสูญญากาศและโลหะ แต่สำหรับแผ่นฟิล์มนาง ( $\approx 20\text{ }\mu\text{m}$ ) ไฟต่อนจะหล่อผ่านในสภาวะตัวนำขวดยิ่งได้มากกว่าในสภาวะปกติ สำหรับไฟต่อนที่มีพลังงานน้อยกว่าซ่องว่างระหว่างระดับพลังงานความต้านทานของตัวนำขวดยิ่งจะเป็นศูนย์องศาสามัญร้อน ที่  $T \ll T_c$  ความต้านทานในสเตทตัวนำขวดยิ่ง จะเปลี่ยนแปลงมากในช่วงพลังงานระหว่างซ่องว่างพลังงานไฟต่อนที่มีพลังงานต่ำ จะไม่มีความต้านทานที่ต่ำ ไฟต่อนที่มีพลังงานสูง จะมีความต้านทานเกือบท่าเต็มปกติ เพราะว่า ไฟต่อนนี้ ทำให้มีการเคลื่อนที่เข้าสู่ระดับพลังงานที่ซึ่งว่างเห็นได้ช่องว่างพลังงาน

## 8.9 ปรากฏการณ์ไอโซโทป

จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิวิกฤตของตัวนำယวดยิ่งเปลี่ยนแปลงตามมวลของไอโซโทปในปรอท  $T_c$  จะมีค่าจาก 4.184 K ถึง 4.146 K เพราะว่ามวลอะตอมเปลี่ยนจาก 199.5 ถึง 203.4 amu. จากการสังเกต ได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$M^\alpha T_c = \text{ค่าคงที่}$$

ค่า  $\alpha$  จากการทดลองแสดงในตารางที่ 8.5 การที่  $T_c$  ขึ้นกับมวลของไอโซโทปทำให้สรุปได้ว่า การสั้นของແລທິສ ແລະປຸງກີຣີຍາຮ່ວງອີເລີກຕອນກັບແລທິສຈະມີຜລຕ່ອສກາພນໍາယວດຍິ່ງ

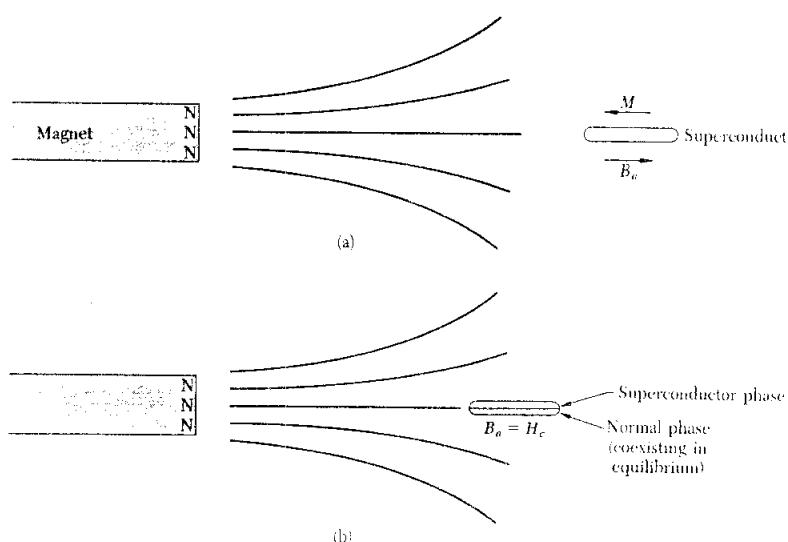
ตารางที่ 8.5 ปรากฏการณ์ไอโซโทปในตัวนำယวดยิ่ง

Experimental values of $\alpha$ in $M^\alpha T_c = \text{constant}$ , where $M$ is the isotopic mass.			
Substance	$\alpha$	Substance	$\alpha$
Zn	$0.45 \pm 0.05$	Ru	$0.00 \pm 0.05$
Cd	$0.32 \pm 0.07$	Os	$0.15 \pm 0.05$
Sn	$0.47 \pm 0.02$	Mo	0.33
Hg	$0.50 \pm 0.03$	$Nb_3Sn$	$0.08 \pm 0.02$
Pb	$0.49 \pm 0.02$	Zr	$0.00 \pm 0.05$

## 8.10 ทฤษฎีของสารตัวนำความยิง

ในระบบแรกอาศัยทฤษฎีต่าง ๆ ทางด้านอุณหพลศาสตร์ เช่น การหาความจุความร้อน การคำนวณงาน การวัดเงินโภปีหลังจากนั้น อาศัยสมการของตอนตอนและสมการของแทนคาวกินเซเบริก ในปัจจุบันนี้ใช้ทฤษฎีความอนตัม ซึ่งเสนอโดยบาร์เดิน คูเปอร์และชิฟเพอ จะกล่าวถึงแต่ละทฤษฎีต่อไป

### 8.10.1 อุณหพลศาสตร์ของสารตัวนำความยิง



รูปที่ 8.9 สารตัวนำความยิงในสถานะแม่เหล็ก

งานในการนำสารตัวนำความยิงจากระยะอนันต์ ซึ่งสามารถแม่เหล็กเป็นศูนย์ ไปยังตำแหน่งที่ ซึ่งอยู่ภายในสถานะแม่เหล็กมีค่าดังนี้

$$W = - \int_0^{B_n} \vec{M} \cdot d\vec{B}_n$$

ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

จากอุณหพลศาสตร์

$$dU = Tds - \vec{M} \cdot d\vec{B}_\alpha$$

เมื่อ  $du$  เป็นพลังงานภายใน

สำหรับสารตัวนำขวดยิ่ง

$$dU_s = Tds + \frac{1}{4\pi} B_\alpha dB_\alpha \quad (\text{CGS})$$

$$dU_s = Tds + \frac{1}{\mu_0} B_\alpha dB_\alpha \quad (\text{SI})$$

ที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ ซึ่ง  $Tds = 0$  การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นพลังงานของสารตัวนำขวดยิ่ง ก็อ

$$U_s(B_\alpha) - U_s(0) = \frac{B_\alpha^2}{8\pi} \quad (\text{CGS})$$

$$U_s(B_\alpha) - U_s(0) = \frac{B_\alpha^2}{2\mu_0} \quad (\text{SI})$$

ในการนำสารตัวนำขวดยิ่ง จากตำแหน่งที่สนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ไปยังตำแหน่งที่สนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ  $B_\alpha$

ต่อไปพิจารณาโลหะที่ไม่เป็นแม่เหล็ก ซึ่งสภาพชื้นชับได้มีค่าน้อย เราจึงคิดว่า  $M = 0$  ได้ และพลังงานของโลหะจะไม่ขึ้นกับสนามแม่เหล็ก ที่สนามแม่เหล็กวิกฤตเรานี้

$$U_N(B_{\alpha C}) = U_N(0)$$

ที่ค่าวิกฤต  $B_{\alpha C}$  พลังงานในสภาวะปกติจะมีค่าเท่ากับพลังงานในสภาวะตัวนำขวดยิ่ง

$$\begin{aligned} U_N(B_{\alpha C}) &= U_s(B_{\alpha C}) \\ &= U_s(0) + B_{\alpha C}^2 / 8\pi \end{aligned} \quad (\text{CGS})$$

$$\begin{aligned} U_N(B_{\alpha C}) &= U_s(B_{\alpha C}) \\ &= U_s(0) + B_{\alpha C}^2 / 2\mu_0 \end{aligned} \quad (\text{SI})$$

$$H_C = \frac{B_{\alpha C}}{\mu_0} \quad (\text{SI})$$

$$H_C = B_{\alpha C} \quad (\text{CGS})$$

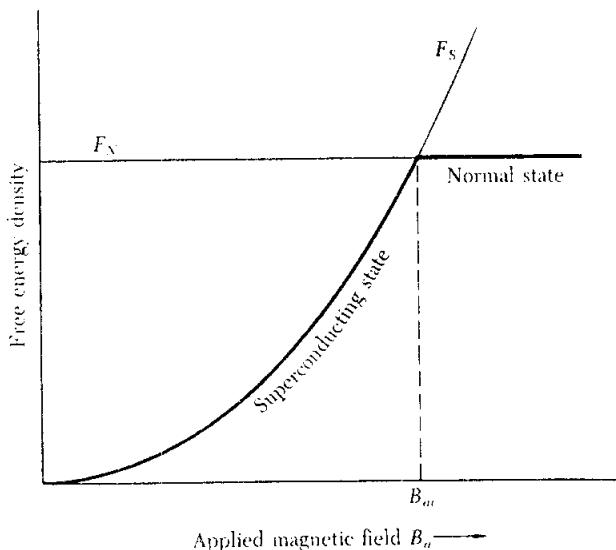
ซึ่งจะทำให้ได้

$$\begin{aligned}\Delta U &= U_N(0) - U_s(0) \\ &= \frac{B_{\alpha C}^2}{2\pi}\end{aligned}\quad (\text{CGS})$$

เมื่อ  $\Delta U$  = ความหนาแน่นพลังงานอยู่ตัว ของสภาวะตัวนำนำด้วยที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์ ตัวอย่างเช่น อะลูминีียมที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์

$$\begin{aligned}B_{\alpha C} &= 105 \text{ เกาส์} \\ \text{ตั้งนี้} \\ \Delta U &= \frac{(105)^2}{8\pi} = 439 \text{ เอริก ซม}^{-3}\end{aligned}$$

ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลอง โดยการวัดทางความร้อน คือ 430 เอริก ซม<sup>-3</sup> ได้ค่าใกล้เคียงกันมาก ที่อุณหภูมิค่าๆ เพื่อของสเตทปกติและเพื่อของสเตทสภาพนำนำด้วย จะอยู่ในสภาวะสมดุลย์ เมื่อพลังงานอิสระ ( $F = U - Ts$ ) มีค่าเท่ากัน



รูปที่ 8.10 ความหนาแน่นพลังงานอิสระของสารนำนำด้วย กับความเข้มสนามแม่เหล็ก

### 8.10.2 สมการลอนดอน

จากประการณ์ไม่แน่นอน จะได้ว่าสภาพรับไว้ได้เมื่อเหล็กของตั้งนำယักซิ่ง ( $\chi$ ) มีค่าเท่ากับ -1 เริ่มต้น ตั้งสมมุติฐานว่า ในสเตทคัวนำယักซิ่งความหนาแน่นกระแสเป็นสัดส่วนกับศักย์เวกเตอร์ ( $A$ )

$$\vec{j} \propto \vec{A}$$

หรือ

$$\vec{j} = -\frac{1}{\mu_0 \lambda_L^2} \vec{A}$$

เมื่อ  $\lambda_L$  เป็นค่าคงที่

สมการข้างบนนี้มีชื่อเรียกว่า สมการลอนดอน

$$\operatorname{curl} \vec{j} = -\frac{1}{\mu_0 \lambda_L^2} \vec{B}$$

จากสมการของแมกเลลล์

$$\begin{aligned}\operatorname{curl} \vec{B} &= \mu_0 \vec{j}_0 \\ \operatorname{curl} \operatorname{curl} \vec{B} &= -\nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \operatorname{curl} \vec{j} \\ \nabla^2 \vec{B} &= \frac{\vec{B}}{\lambda_L^2}\end{aligned}$$

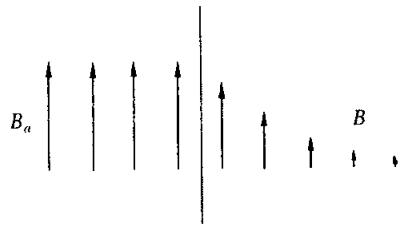
ผล集合ของสมการนี้ จะได้เมื่อ  $\vec{B}(\vec{r}) = \vec{B}_0 = 0$

$$\nabla^2 \vec{B}_0 = 0 \quad \text{เสมอ}$$

แต่  $\frac{\vec{B}_0}{\lambda_L^2}$  ไม่เท่ากับศูนย์ ยกเว้น  $\vec{B}_0 = 0$

สถานภาพในตัวนำယักซิ่งบริสุทธิ์

$$B(x) = B_0 e^{-x/\lambda_L}$$



รูปที่ 8.11 การหักผ่านของสันนามแม่เหล็กเข้าไปในสารตัวนำယวดยิ่ง ค่าความลึกทะลุทะลวง  $\lambda$  คือ ระยะทางที่สานามแม่เหล็กคลองด้วยเฟกเตอร์  $e^{-1}$  โดยทั่วไป  $\lambda = 500 \text{ } \text{\AA}$  ในตัวนำယวดยิ่งบริสุทธิ์

ตัวอย่างที่ 8.14 จงหาความลึกทะลุทะลวงในตะกั่วที่ศูนย์องศาเคลวิน สมมุติว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารตัวนำယวดยิ่ง เท่ากับ  $2 \times 10^{28} / \text{m}^3$ .

วิธีทำ ความลึกทะลุทะลวง คือ

$$\begin{aligned}
 \lambda_l &= \sqrt{\frac{m}{\mu_0 n e^2}} \\
 &= \sqrt{\frac{mc^2}{4\pi n k e^2}} \\
 &= \sqrt{\frac{0.511 \times 10^6 \text{ eV}}{(4)(\pi)(2 \times 10^{28} \text{ m}^{-3})(1.44 \text{ eV} \cdot \text{m})}} \\
 &= 40 \text{ nm}
 \end{aligned}$$

### 8.10.3 ความยาวพร้อมเพรียง

ความลึกทะลุทะลวงของลอนดอน ( $\lambda_L$ ) เป็นความยาวมูลฐานที่แสดงคุณสมบัติของตัวนำข่าวคือ ความยาวอิกซ์นิคหนึ่งที่มีความสำคัญเท่ากัน คือ ความยาวพร้อมเพรียง (coherence length  $\xi_0$ ) ความยาวพร้อมเพรียงเป็นการวัดระยะทางภายในบริเวณช่องพารามิเตอร์ของช่องว่าง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก สมการลอนดอน แสดง ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสที่จุด  $\vec{r}$  กับศักย์เวกเตอร์ที่จุดเดียวกัน ทราบได้ที่  $\vec{j}(\vec{r})$  มีค่าเท่ากับค่าคงที่คูณกับ  $A(\vec{r})$  กระแสจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าศักย์เวกเตอร์ แต่ความยาวพร้อมเพรียง ( $\xi_0$ ) เป็นการวัดในช่วงที่เราต้องหาค่าเฉลี่ย  $A$  เพื่อให้ได้  $\vec{j}$

ตารางที่ 8.6 ค่าความยาวพร้อมเพรียงกับความลึกทะลุทะลวงลอนดอนที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์

Metal	Intrinsic Pippard coherence length $\xi_0$ , in $10^{-6}$ cm	London penetration-depth $\lambda_L$ , in $10^{-6}$ cm	$\lambda_L/\xi_0$
Sn	23.	3.4	0.16
Al	160.	1.6	0.010
Pb	8.3	3.7	0.45
Cd	76.	11.0	0.14
Nb	3.8	3.9	1.02

ตัวอย่างที่ 8.15 จงหาความยาวพร้อมเพรียงของตะกั่วถ้าความเร็วของอิเล็กตรอนที่ผิวเฟอร์เมี่ยเท่ากับ  $2 \times 10^6$  เมตร / วินาที

วิธีทำ ความเร็วเฟอร์เมี่ยของตะกั่ว คือ

$$V_F = 2 \times 10^6 \text{ m/s}$$

หรือ

$$\frac{V_F}{c} = \frac{2 \times 10^6 \text{ m/s}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 0.67 \times 10^{-2}$$

อุณหภูมิทรานซิชัน คือ 7.2 K

$$kT_c = \left( \frac{1}{40} eV \right) \left( \frac{7.2 \text{ K}}{300 \text{ K}} \right)$$

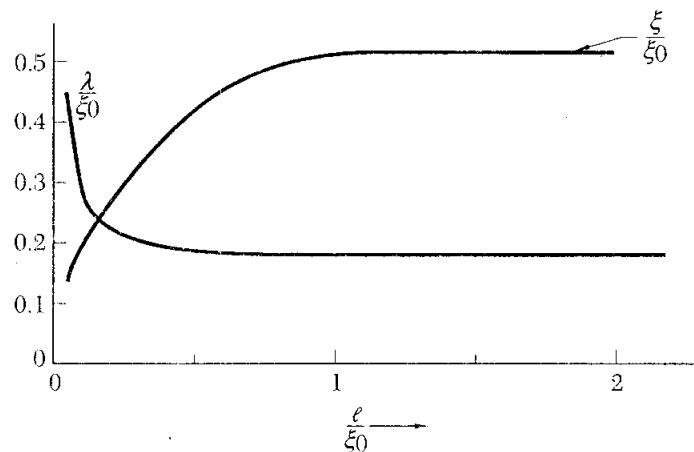
$$= 6 \times 10^{-4} \text{ eV}$$

ช่วงความยาวพร้อมเพรียง คือ

$$\xi_0 = \frac{\hbar V_F}{7kT_c} = \frac{hc \left( \frac{V_F}{c} \right)}{7kT_c}$$

$$= \frac{(200eV \cdot nm)(0.67 \times 10^{-2})}{(7)(6 \times 10^{-4} \text{ eV})}$$

$$= 300 \text{ nm}$$



รูปที่ 8.12 ความถี่ทางลูทอลว (λ) และความยาวพร้อมเพรียง (ξ) เป็นฟังก์ชันของทางเดิน อิสระเฉลี่ย (ℓ) ของอิเล็กตรอนในสภาพะปกติ

#### 8.10.4 ຖញ្ជីបីចិែខេត្តសាកលវិទ្យាល័យ

ทฤษฎีความตั้มของสภาพน้ำยังขาดเสนอโดยบาร์ดีน คูเปอร์ และชีฟเฟอร์ มีใจความสำคัญ ดังนี้

1. ปฏิกริยาระหว่างอิเล็กตรอนจะทำให้สเก็ตพื้นฐานแยกจากสเก็ตกระดับเดียวกัน เกิดขึ้นเมื่อว่า พลังงานขึ้น ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของสารตัวนำวัสดุ เช่น คุณสมบัติทางความร้อน คุณสมบัติคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น
  2. ปฏิกริยาอิเล็กตรอน – แอลทิช – อิเล็กตรอน ทำให้เกิดขึ้นเมื่อว่าระดับพลังงานที่สังเกตได้ปฏิกริยา โดยอ้อมเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนตัวหนึ่งเกิดปฏิกริยากับแอลทิช ทำให้รูปร่างของแอลทิชเปลี่ยนไป อิเล็กตรอนตัวที่สอง สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของแอลทิช จึงพยายามปรับตัวเพื่อที่จะทำให้พลังงานมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้น อิเล็กตรอนตัวที่สองเกิดปฏิกริยากับอิเล็กตรอนตัวที่หนึ่งโดยทางอ้อมผ่านการเปลี่ยนแปลงของแอลทิช
  3. ความลึกทะลุทะลวงและความยาวพร้อมเพรียงเป็นผลเนื่องมาจากการทฤษฎีบีซีเอส สามารถลดลงได้มาจากการสำนึกแม่เหล็กซึ่งเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ
  4. อุณหภูมิวิกฤตจะขึ้นกับความหนาแน่นอิเล็กตรอนของออร์บิทัล  $D(\varepsilon_F)$  ที่ระดับเพื่อมี และปฏิกริยาอิเล็กตรอน – แอลทิช  $U$  ซึ่งสามารถประมาณค่าได้จากความด้านท่านไฟฟ้า เมื่อ  $D(\varepsilon_F) \ll 1$  จากทฤษฎีบีซีเอสจะได้

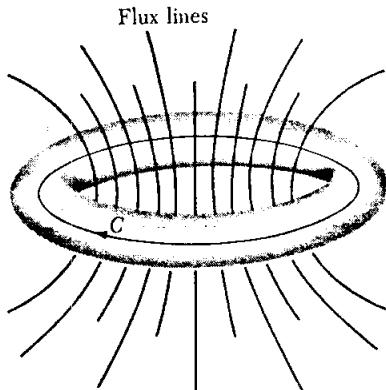
$$T_C = 1.14\theta \exp[-1/UD(\varepsilon_F)]$$

เมื่อ  $\theta$  เป็นอุณหภูมิเดอบาย และ  $U$  เป็นปฏิกิริยาดึงดูด ที่  $T_c$  มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ

5. พลักแม่เหล็กผ่านวงแหวนตัวนำ磁คิวท์จะมีค่าความไหซ์ และหน่วยยังผลของประจุมีค่า  $2e$  ไม่ใช่  $e$  สเตทพื้นฐานบีซีอสจะเก็บไวขึ้นกับคุณลักษณะของฟลักก์ในวงแหวน ดังนั้น ความไหซ์ของฟลักก์ในเทอมของคุณลักษณะ  $2e$  เป็นผลมาจากการที่

### 8.11 พลักควอนไทช์ในวงแหวนตัวนำယวดยิ่ง

พลักแม่เหล็กที่ผ่านวงแหวนตัวนำယวดยิ่งจะมีค่าควอนไทช์ เป็นจำนวนเท่าของ  $2\pi\hbar e / q$  เมื่อ จากการทดลอง  $q = 2e$  ซึ่งเป็นประจุของคู่อิเล็กตรอน

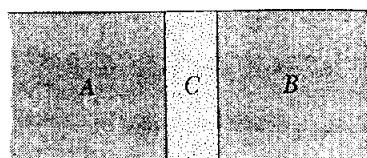


รูปที่ 8.13 พลักที่ผ่านวงแหวนจะมีค่าเท่ากับผลรวมของพลักจากภายนอก ( $\Phi_{ext}$ ) และพลักจากกระแสภายในวงแหวนตัวนำယวดยิ่ง ( $\Phi_{ac}$ )

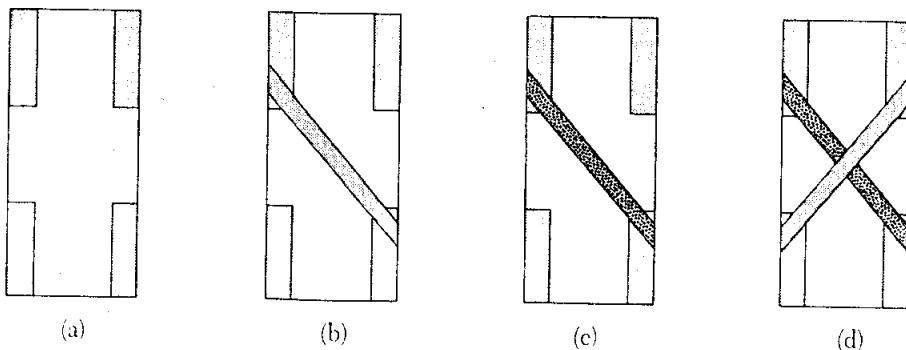
$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad \Phi &= \Phi_{ext} + \Phi_{ac} \\ \text{จะเขียนพลักได้เป็น} \quad \Phi &= (2\pi\hbar e / q)s \\ \text{เมื่อ } s &\text{ เป็นเลขจำนวนเต็ม} \end{aligned}$$

### 8.12 การทะลุผ่านอนุภาคเดี่ยว

พิจารณาโลหะสองชิ้นอยู่ติดกัน โดยมีขนาดกว้างกันอยู่ตรงกลาง ดังรูปที่ 8.14 ขนาดจะเป็นตัวสัดส่วนกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากโลหะชิ้นหนึ่งไปยังโลหะอีกชิ้นหนึ่ง แต่ถ้าขนาดมีขนาดความบางมาก ( น้อยกว่า 10 หรือ  $20 \text{ A}^\circ$  ) โอกาสที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านขนาดจะมีมากขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ทันเนลลิ่ง ( tunneling ) ในการทดลองขนาดที่ใช้ เป็นแผ่นอิออกไซด์ มีโลหะติดหนึ่งด้าน หรือทั้งสองด้าน ดังรูปที่ 8.15

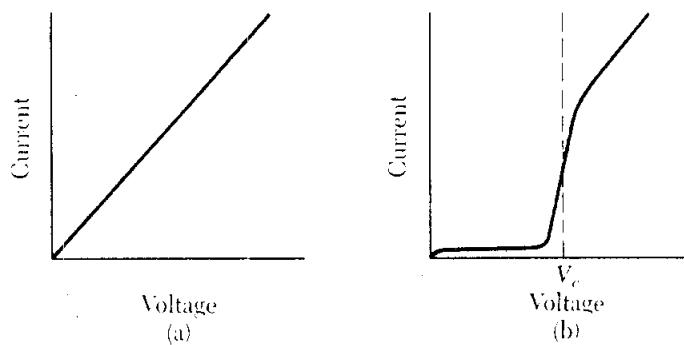


รูปที่ 8.14 โลหะสองชนิด A และ B มีชั้น C อยู่ตรงกลาง

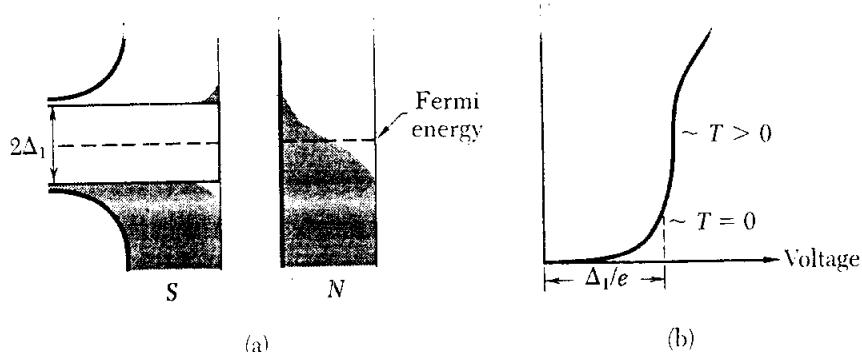


รูปที่ 8.15 การเตรียมแผ่น Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Sn

ถ้าโลหะทั้งสองชนิดเป็นตัวนำปกติที่ความดันต่ำ กระแสระหว่างกระแสและความดันจะเป็นไปตามกฎของโอล์ม คือ กระแสเปรียบเท่าความดัน "ไกเวอร์" (Giaever) พบว่า ถ้าโลหะชนิดหนึ่งเป็นสารตัวนำขั่วคึ่ง กราฟที่ได้จะเปลี่ยนจากเส้นตรงรูป 8.13 เป็นกราฟรูป 8.14 รูปที่ 8.15 แสดงความแตกต่างของความหนาแน่นอิเล็กตรอนในตัวนำขั่วคึ่งกับโลหะปกติ ในตัวนำขั่วคึ่งจะมีช่องว่างพลังงานในระดับเฟอร์เม ที่ศูนย์องค์คามบูรรณ์ จะไม่มีกระแสไฟ流จนกว่าศักย  $V = E_g / 2e = \Delta / e$



รูปที่ 8.16 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อโลหะสองชนิดที่มีแผ่นอิเล็กตรองกลาง (b) เมื่อโลหะชนิดหนึ่งเป็นตัวนำขั้วบวก



รูปที่ 8.17 (a) ความหนาแน่นของออร์บิทัลและ (b) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน

ซึ่งว่า  $E_g$  แสดงถึงการแตกตัวของคู่อิเล็กตรอนในสภาวะตัวนำขั้วบวกทำให้ได้ อิเล็กตรอนสองตัว หรืออิเล็กตรอนหนึ่งตัวและโอลหนึ่งตัว กระแสเริ่มต้นเมื่อ  $eV = \Delta$  ที่ อุณหภูมิใด ๆ แม้ว่าความดันต่างจะมีกระแสไหล เพราะว่าอิเล็กตรอนในตัวนำขั้วบวกได้รับความร้อนจนสามารถกระโดดข้ามช่องว่างໄດ້

### 8.13 การทดสอบตัวนำယวดยิงโจเซฟสัน

ภายใต้ภาวะที่เหมือนกัน เราจะสังเกตพบการทดสอบของตัวนำယวดยิงผ่านฉนวน แบ่งเป็น

- ก. ผลจากดีซีโจเซฟสัน กระแสตรงไฟล์ผ่านรอยต่อโดยที่ไม่มีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
- ข. ผลจากอะซีโจเซฟสัน แรงดันตรงที่ให้กับรอยต่อ ทำให้เกิดกระแสออกสัจลิเตตผ่านรอยต่อ ผลจากปรากฏการณ์นี้สามารถนำไปใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่า  $\hbar/e$
- ค. ผลจากการสอดแทรกความตั้มระยะยาว สนามแม่เหล็กดีซีที่ให้กับวงจรตัวนำယวดยิงที่ประกอบด้วยชารอยต่อสองอัน ทำให้เกิดกระแสมากที่สุดแสดงถึงการสอดแทรกเป็นพังก์ชั่น ของความเข้มสนามแม่เหล็กผลนี้จะต้องอาศัยเครื่องแมกนีโトイเดอร์ที่มีความไวมาก

ตัวอย่างที่ 8.16 จงคำนวณความถี่ของการออสซิลเลทในรอยต่อโจเซฟสัน ซึ่งมีศักย์  $1,000 \mu V$  วิธีทำ ความถี่ของการสั่น คือ

$$f = \frac{2eV}{h} = \frac{(2)(e)(10^{-6}V)}{4.136 \times 10^{-15} eV \cdot s}$$

$$= 483.6 \text{ MHz.}$$

## สรุป (หน่วย CGS)

1. ตัวนำขวดซึ่งเป็นตัวนำที่สมบูรณ์
2. ตัวนำขวดซึ่งเป็นไดอะแมกเนติก ไม่ยอมให้สารแม่เหล็กทะลุผ่านเข้าไปได้ เรียกว่า ปราภูมิไมล์เนอร์
3. สารตัวนำขวดซึ่งแบ่งเป็นสองชนิด ชนิด type I และชนิด type II
4. ในส�테ทตัวนำขวดซึ่ง ช่องว่างพลังงาน  $E_g = 4k_B T_C$  แยกอิเล็กตรอนในระดับล่างจาก อิเล็กตรอนเหนือช่องว่าง การทดลองเกี่ยวกับช่องว่าง ได้มาจากการ ความจุความร้อนการดูดกลืน อินฟารेड และการทะลุทะลวง
5. สมการลดอนค่อน

$$j = -\frac{C}{4\pi\lambda_L^2} A \quad \text{หรือ} \quad eurl \ j = -\frac{C}{4\pi\lambda_L^2} B$$

อธิบายปราภูมิไมล์เนอร์ตามสมการ

$$\nabla^2 B = B / \lambda_L^2 \quad \text{เมื่อ} \quad \lambda_L = (mc^2 / 4\pi ne^2)^{1/2}$$

เป็นความลึกทะลุทะลวงของลดอนค่อน

6. ความยาวพร้อมเพรียง

$$\xi_0 = 2\hbar\nu_F / \pi E_g$$

7. ทฤษฎีบีซีเอส อธิบายถึงคู่อิเล็กตรอน  $\vec{k}\uparrow$  และ  $-\vec{k}\downarrow$
8. ความยาวที่สำคัญของตัวนำขวดซึ่ง คือ ความลึกทะลุทะลวงลดอนค่อน  $\lambda_L$  , ความยาวพร้อมเพรียง  $\xi_0$  และทางเดินอิสระเฉลี่ย  $\ell$