

# 講義が始まる前に・・・

Gmail等のメールアドレスでZOOM登録しないで下さい。Stnメールアドレスで登録ください。

先月の「ILIAS経由での課題提出す」は、28人が未提出です。提出失敗というのもあったようです。**今週の課題から評価対象**になりますので、ご注意ください。

講義スライドをpdfにしたファイルをILIASに上げておきます。開封パスワードは、講義した年月日です（例；20200511）。各ページの左上にマウスカーソルを持って行くと、私が喋ったセリフのテキストが教示されます。

著作権の問題がありますので、印刷・コピーの譲渡など一切禁止です。一連の講義資料から副次的作品を作って譲渡・販売することも禁止です。

# 第2講 導電体材料

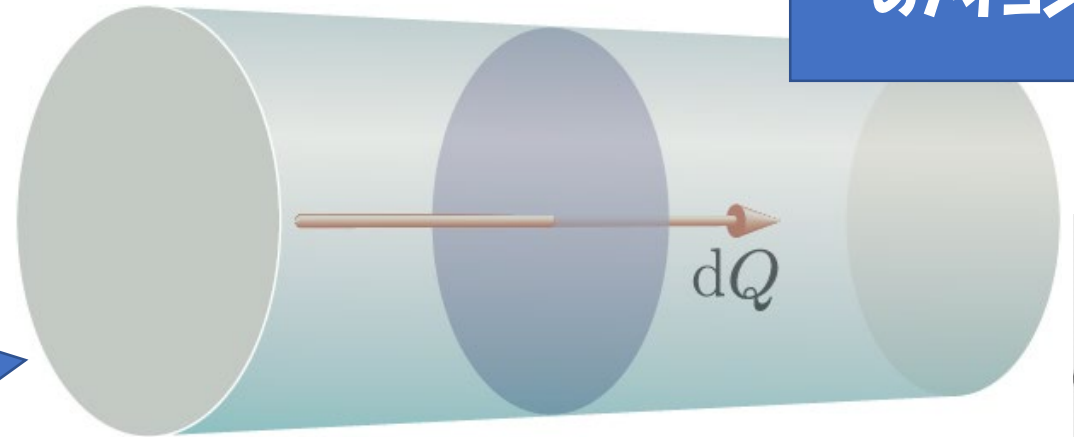
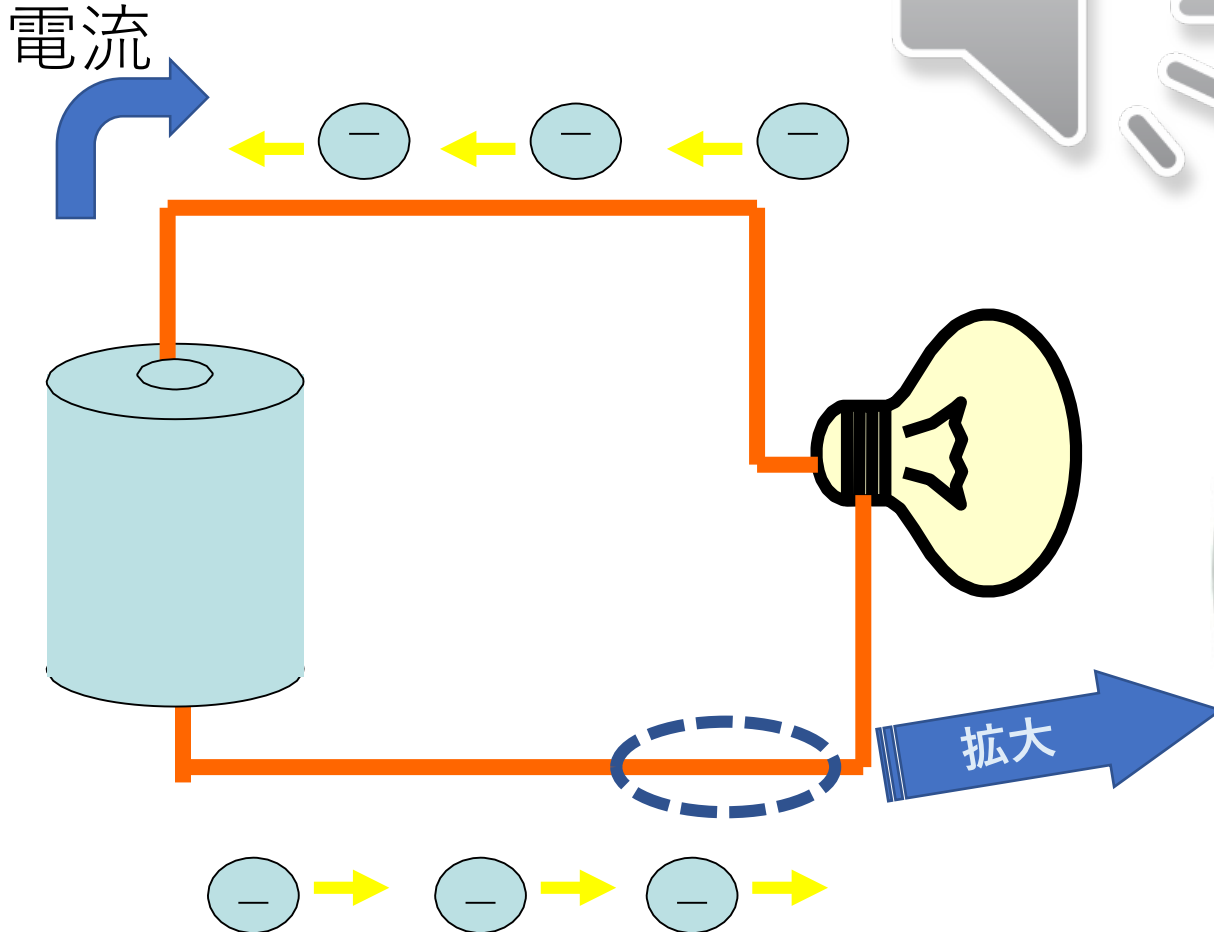
ここをダブルクリック  
すると読み上げ原稿が  
表示されます。



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

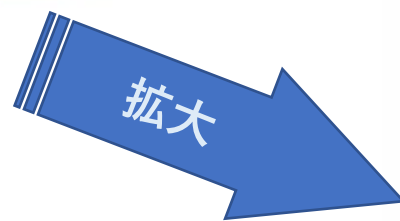
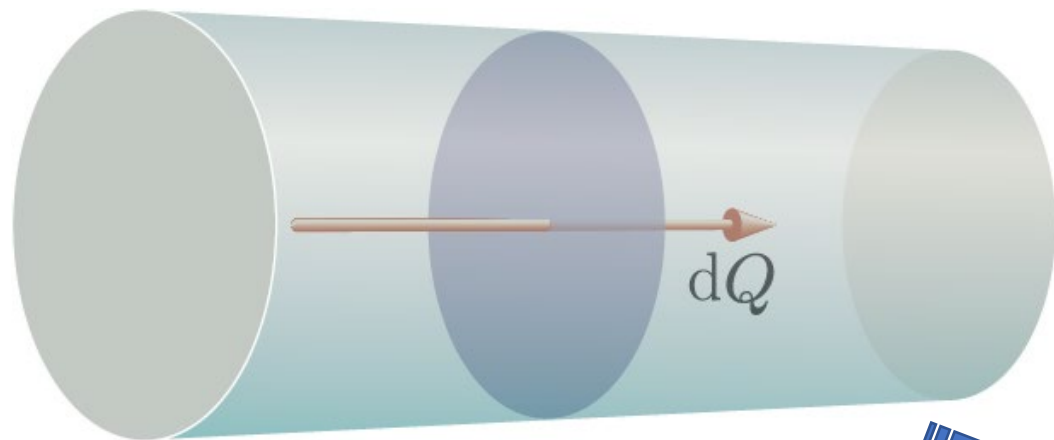
[C/s]    又は [A]

「ノート取ろうね」  
のアイコンです！



電流を導く物質を導電体という。

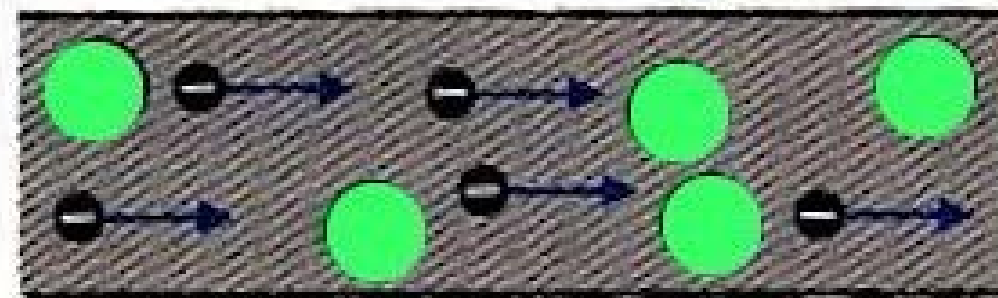
# 導電体材料



導体

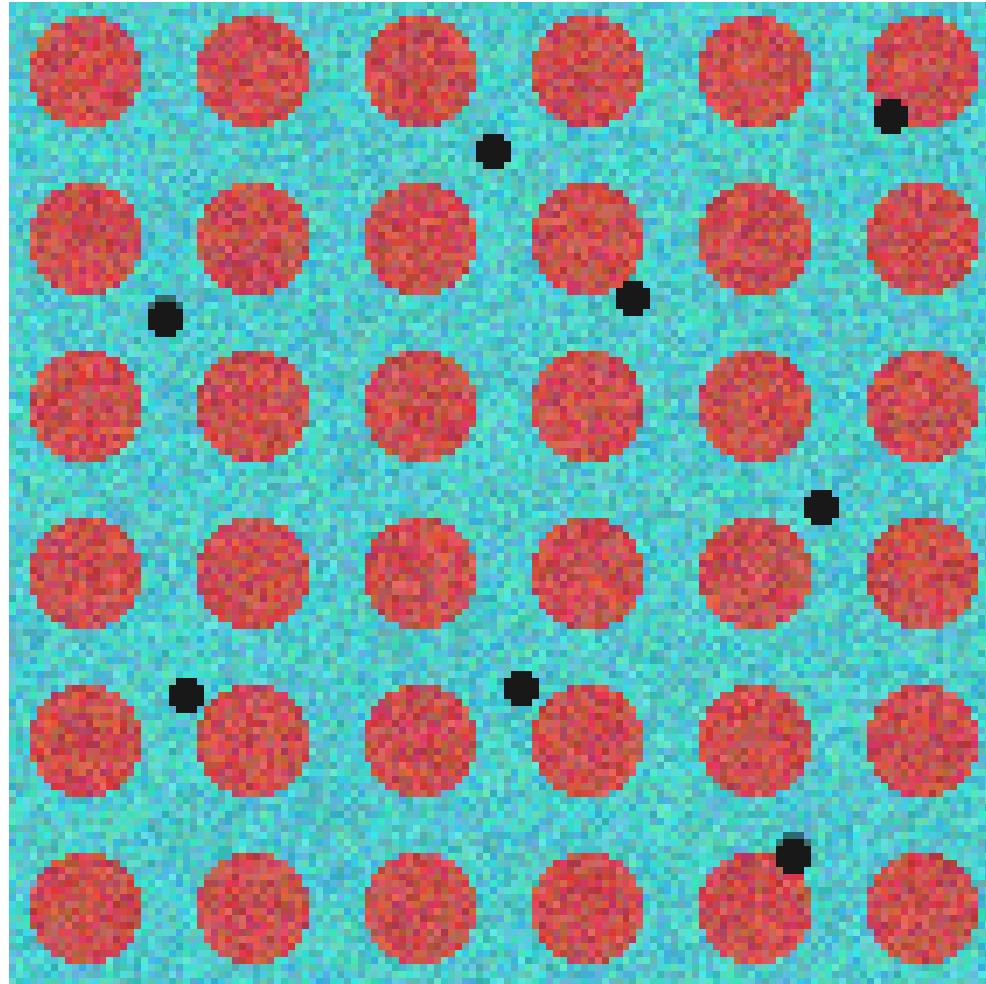


電圧をかけると



# 結晶中の電子の動き

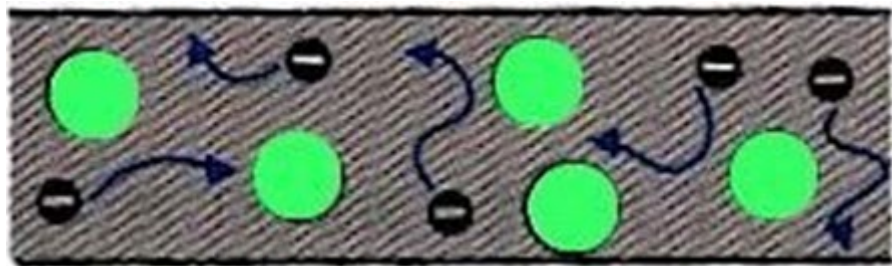
電子の流れ



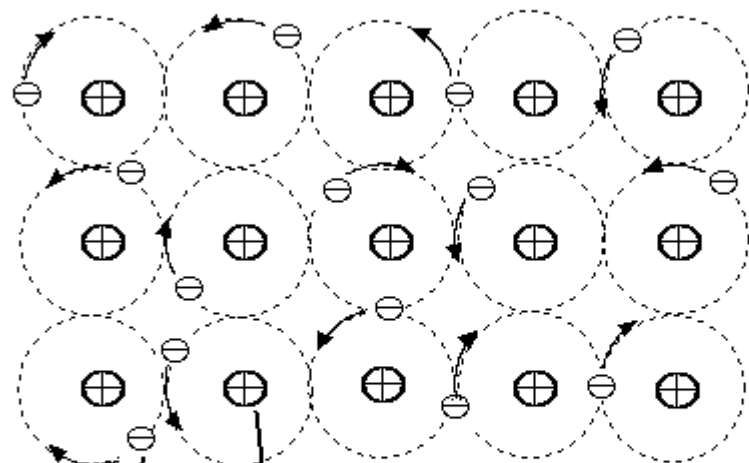
電界

(K・デュリューズによる動画、2001年)

# 導電体材料

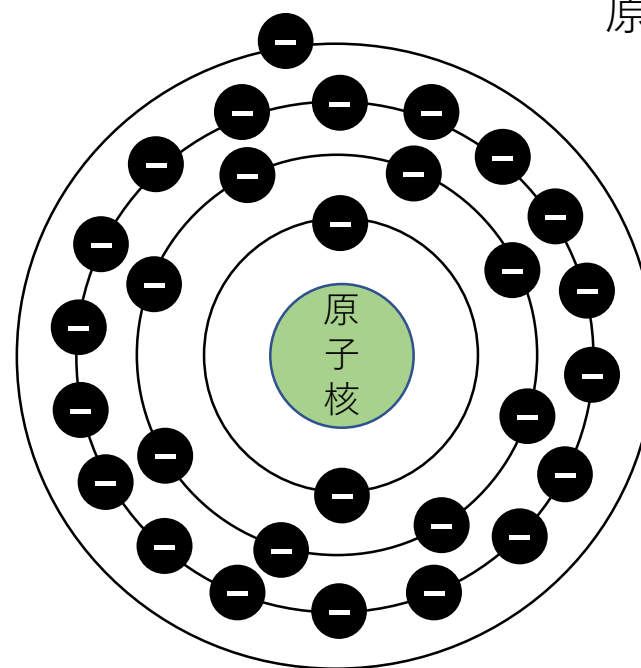


## ボーアの原子モデル



電子を放出して陽イオンになった金属の原子

放出された電子：自由電子（陽イオンどうしを結び付けている）

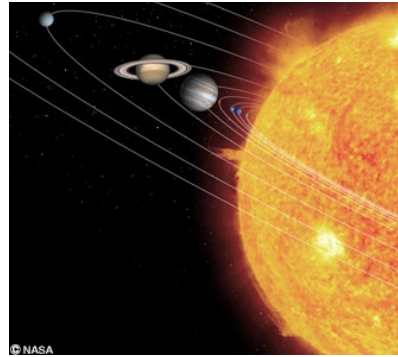
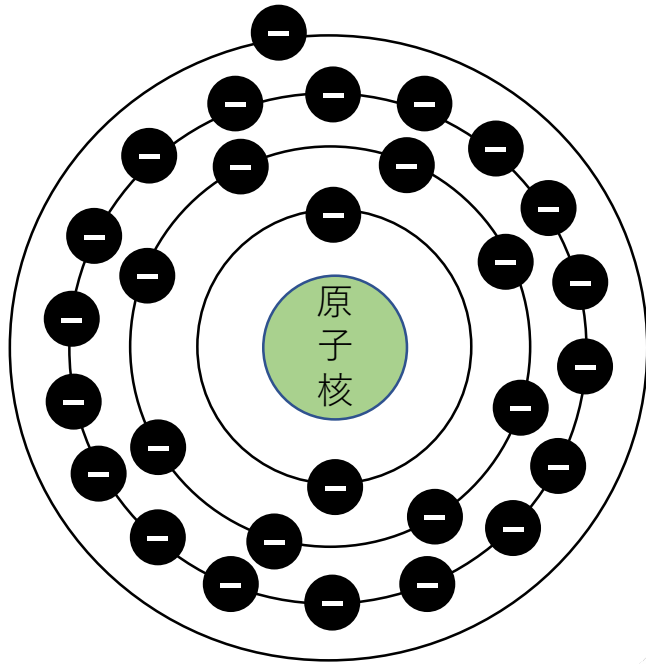


原子核の周りを  
29個の電子が  
回っている。

$^{29}\text{Cu}$

金属結合：結果的に金属の原子が多数結合した状態になる。

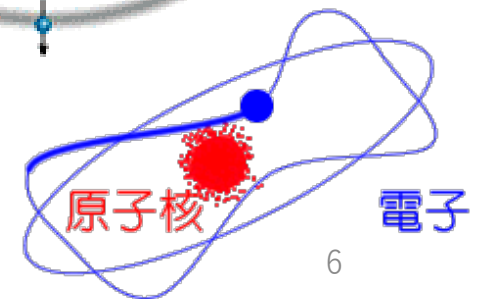
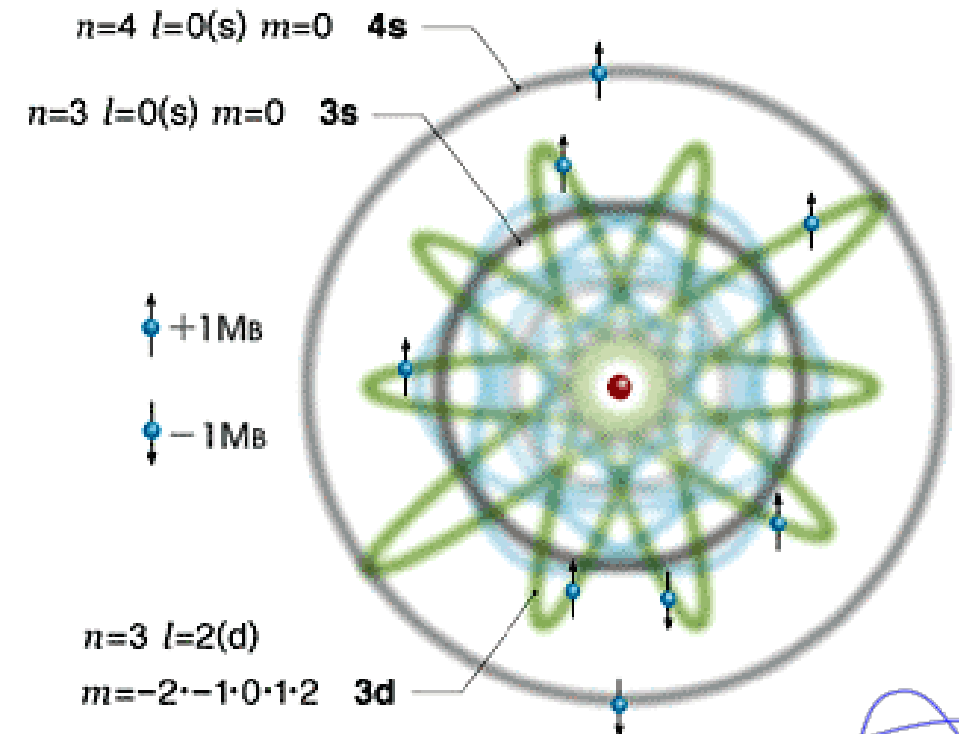
# 導電体材料



電子の周回は  
こうじゃない！

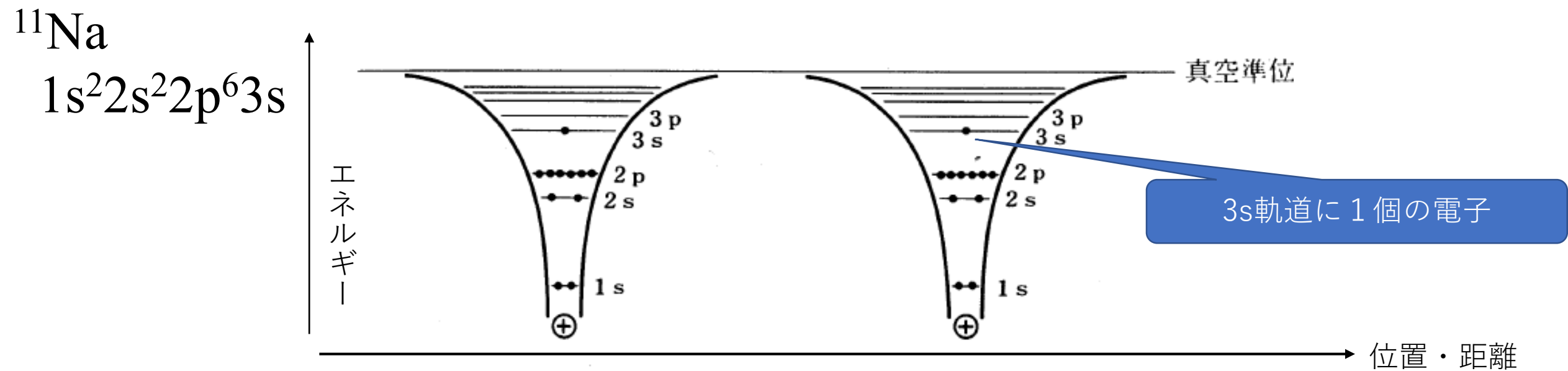


**Fe** <sup>26</sup>  $1s^2 \cdot 2s^2 p^6 \cdot 3s^2 p^6 3d^6 \cdot 4s^2$   
Iron

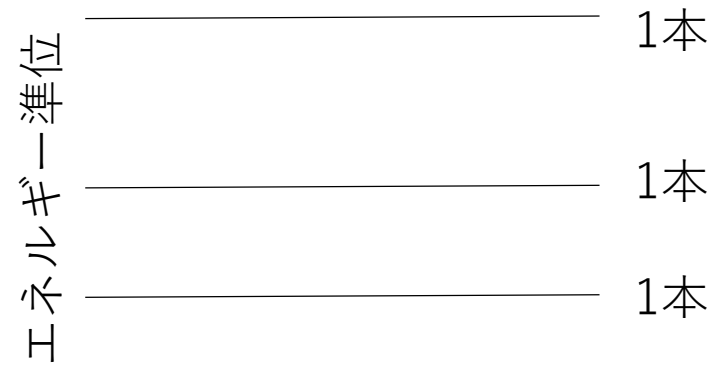


太陽系の図は：<https://www.kids.isas.jaxa.jp/zukan/solarsystem/solarsystem01.html>  
<sup>26</sup>Feの原子モデルは：[https://www.jp.tdk.com/techmag/ferrite/grain\\_3/flame3.htm](https://www.jp.tdk.com/techmag/ferrite/grain_3/flame3.htm)

# Na結晶における静電ポテンシャル1



# スライド問題2-1

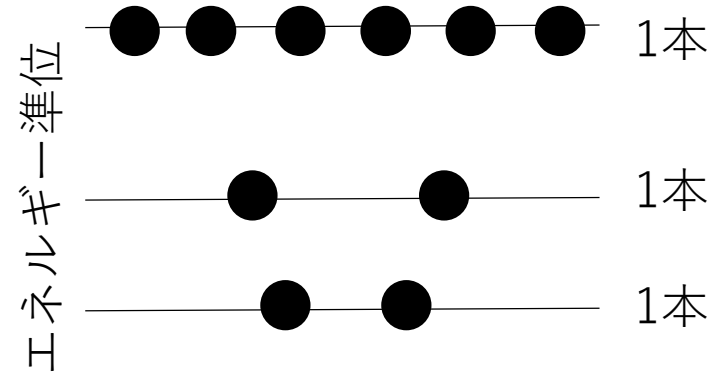


教科書 p.31

図2・1 (a)原子一個の場合



# スライド問題2-1 解答例



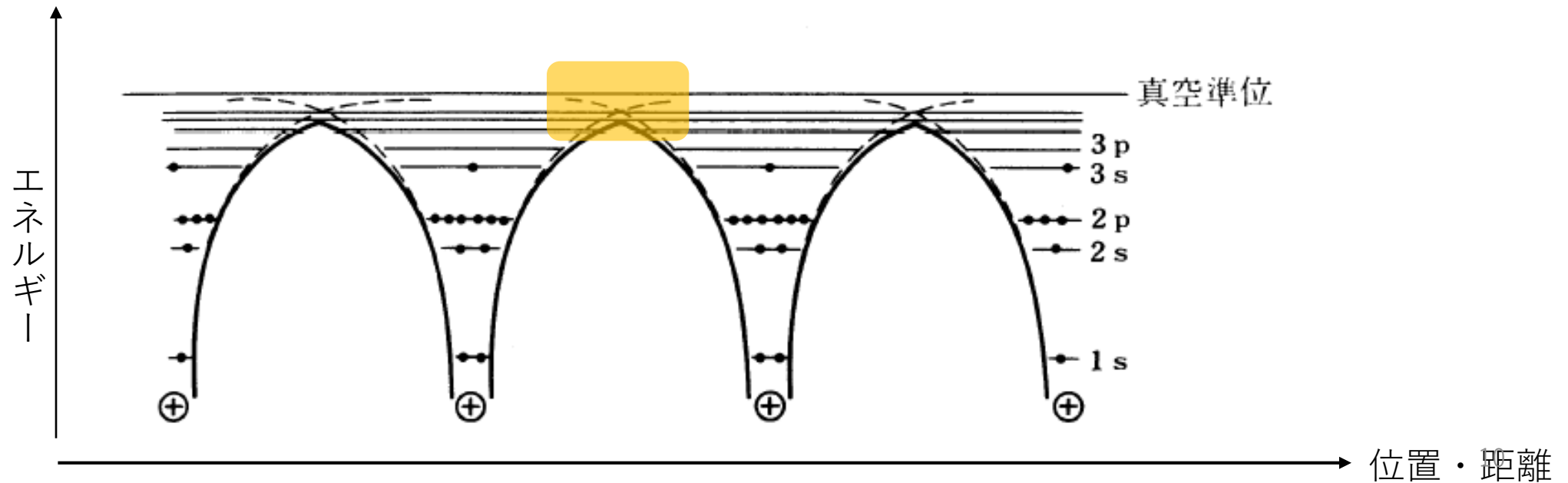
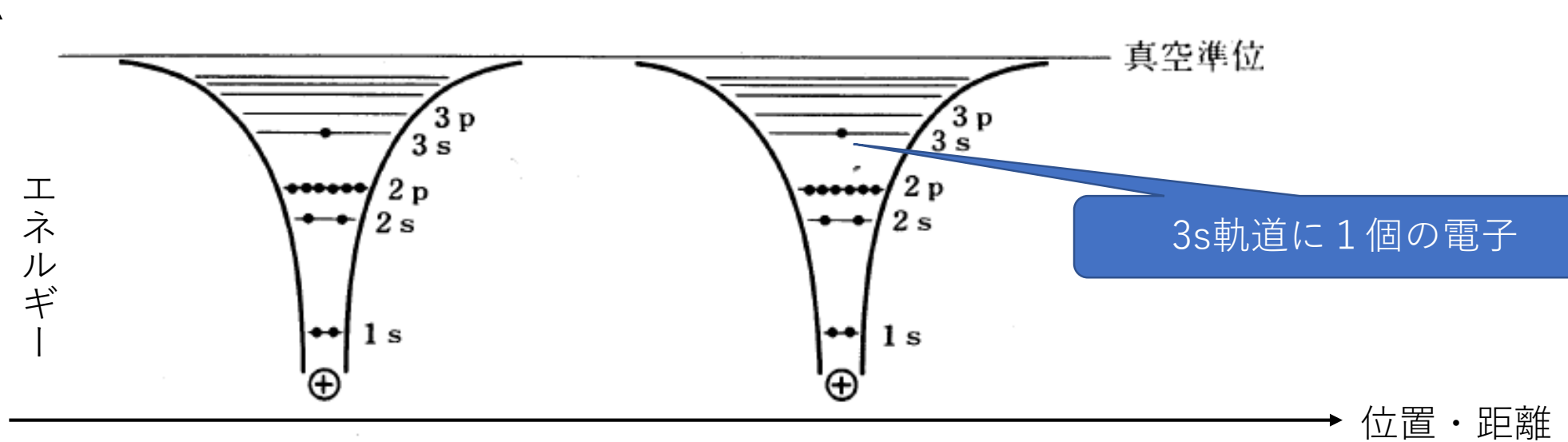
内殻電子は  
伝導に寄与しない

教科書 p.31  
図2・1 (a)原子一個の場合

# Na結晶における静電ポテンシャル2

$^{11}\text{Na}$

$1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$



# Na結晶における静電ポテンシャル3

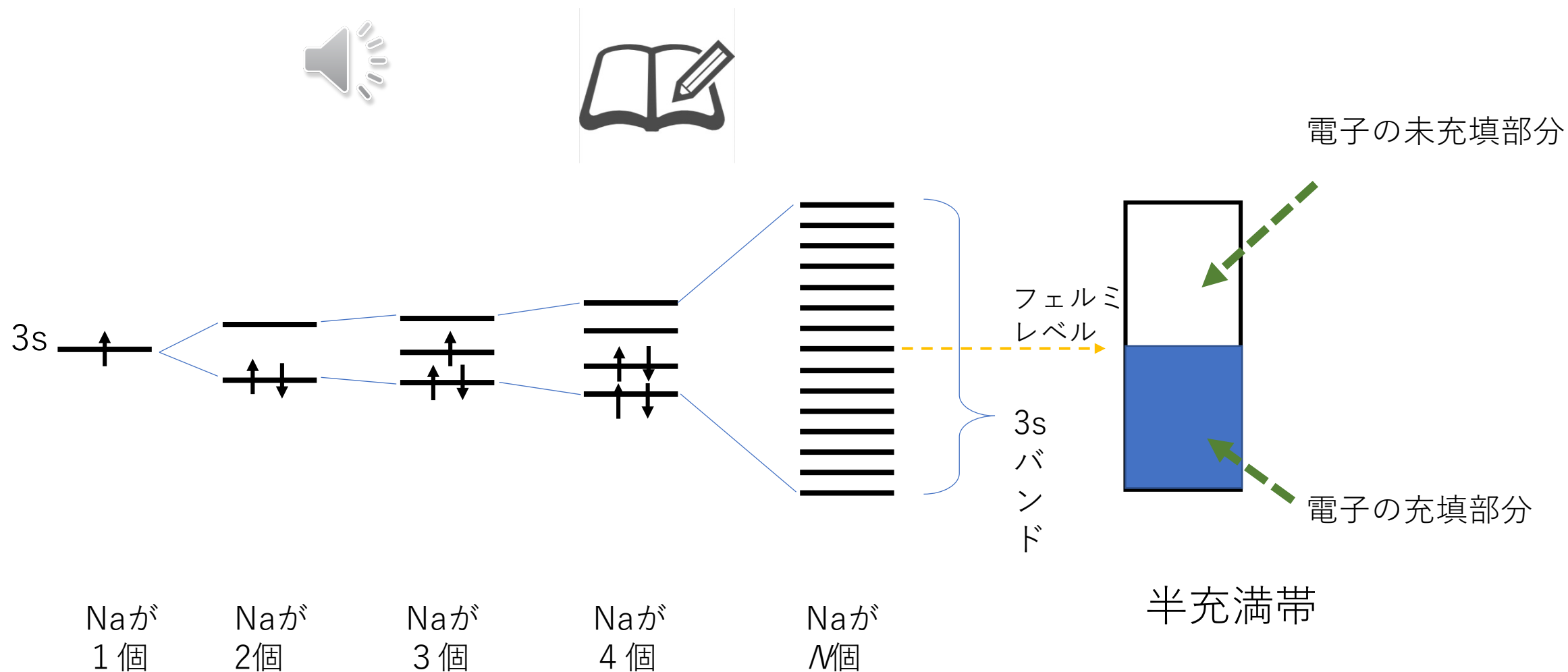
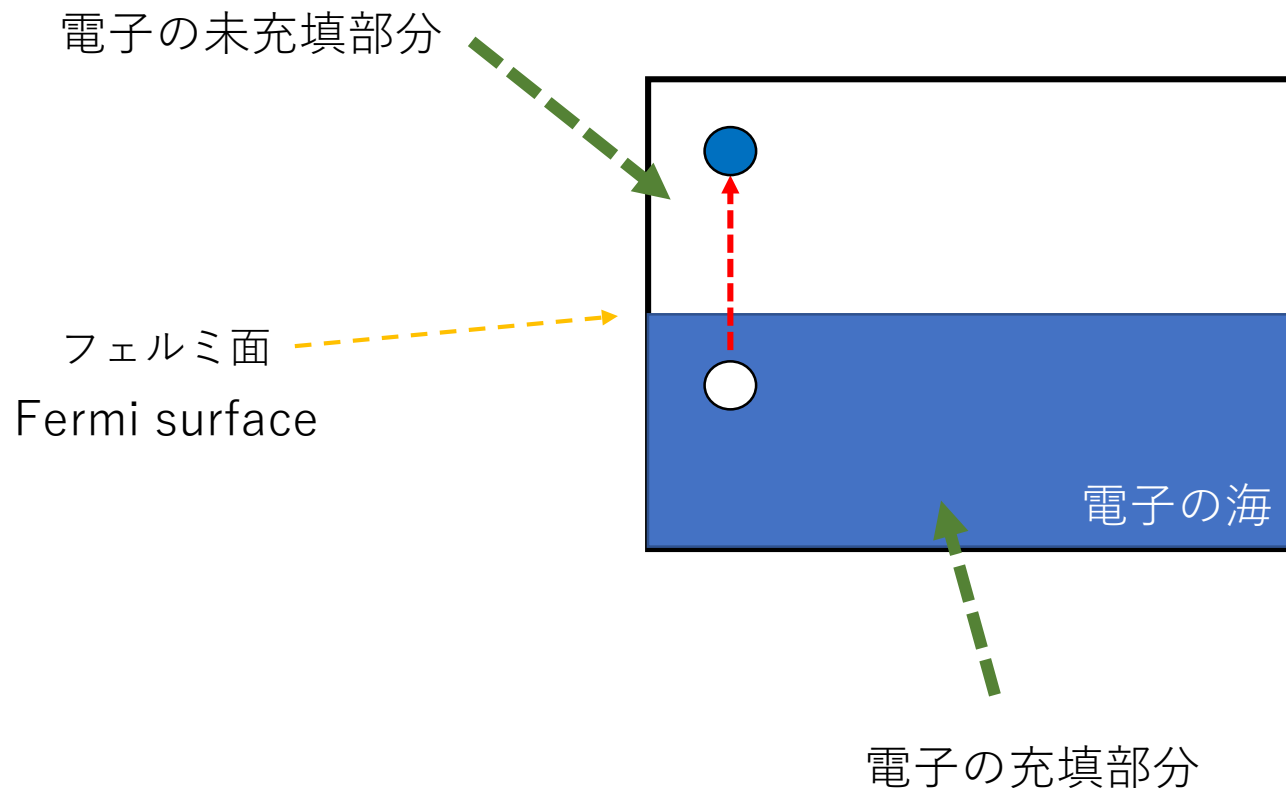
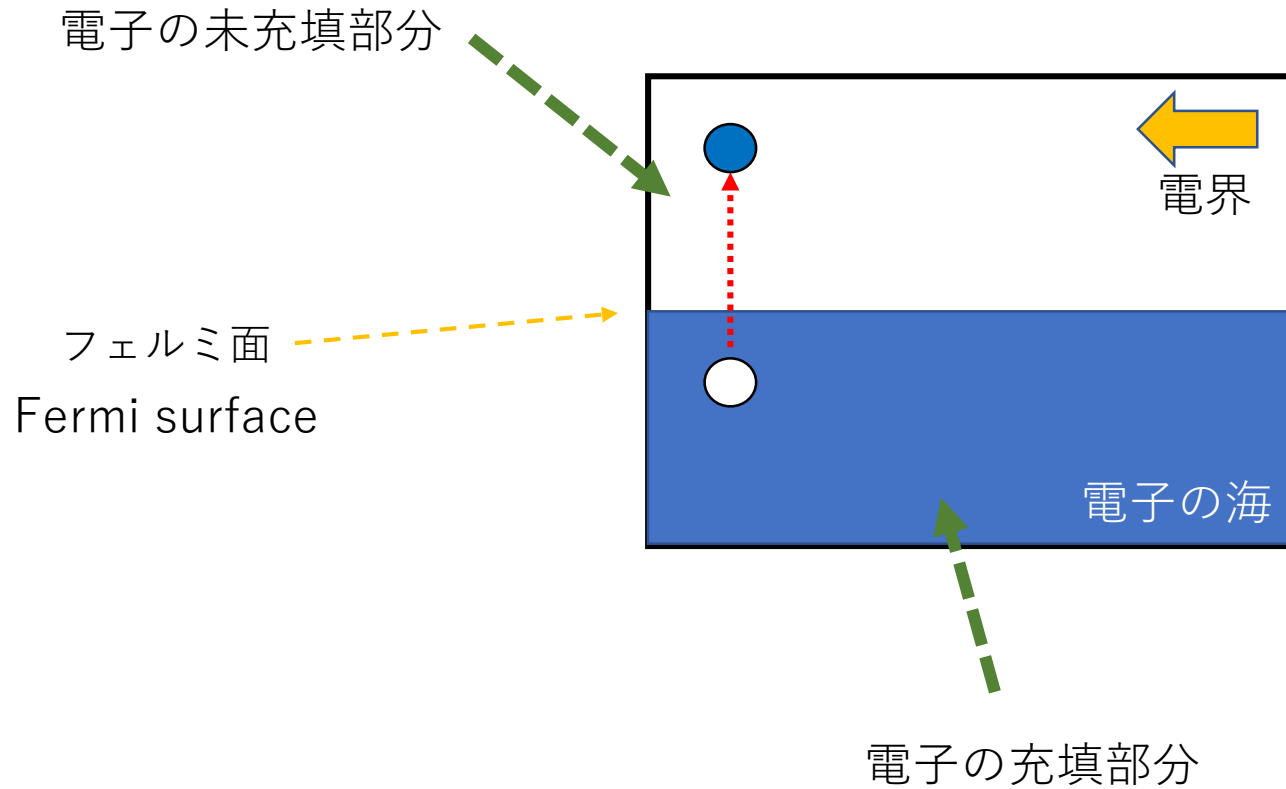


図2・1(b)を少し詳しく書いた図

# 半充満帯(half-filled band)



# 半充満帯(half-filled band)



$$f = eE = m\alpha \quad (2 \cdot 1)$$

$f$ : 電子の受ける力

$e$ : 電子の電荷

$E$ : 電界

$m$ : 電子の質量

$\alpha$ : 電子の受ける加速度

$$v = \frac{e\tau E}{m} \quad (2 \cdot 2)$$

$v$ : 電子の平均速度

$\tau$ : 緩和時間

## スライド問題2-2

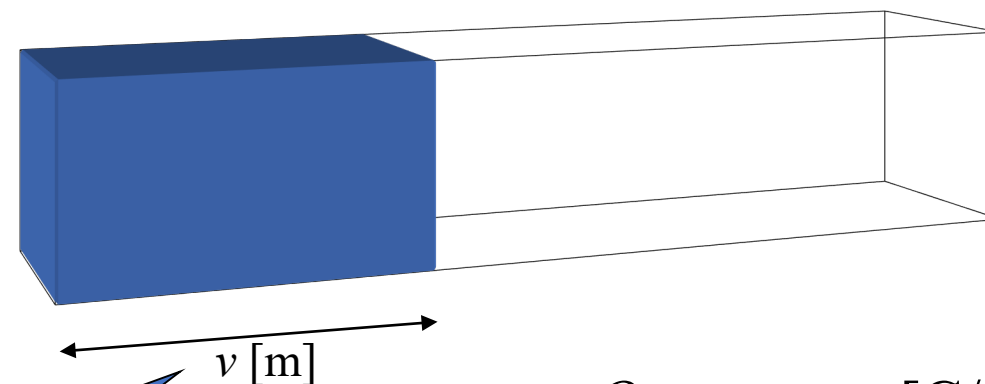


(2・1)式から(2・2)式を導いてください。

ヒント；(2・1)式の両辺を時間について積分  
してみてください。

# 電流密度

ある媒質1 m<sup>3</sup>中に $n$  個の電子があった。電界が印加され左から右に、速度 $v$  [m/s]で移動したとする。1秒間に移動した全電荷量は



移動した電荷量と  
いうことは、正しく  
この体積分ということ

$$Q = nev \quad [\text{C/s}]$$



よって、全電流は  $nev$  [A]

$$\text{導線の断面積が } 1\text{m}^2 \text{ なら } J = nev \text{ [A/m}^2\text{]} \quad (2 \cdot 3)$$

$J$ : 電流密度



$$v = \frac{e\tau E}{m}$$

(2・2) を(2・3)に代入すると、(2・4)式になる。

$$J = \left( \frac{ne^2\tau}{m} \right) E$$



(2・4)

導電率 $\sigma$ は

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$$

(2・6)

よって

$$J = \sigma E$$

(2・5)





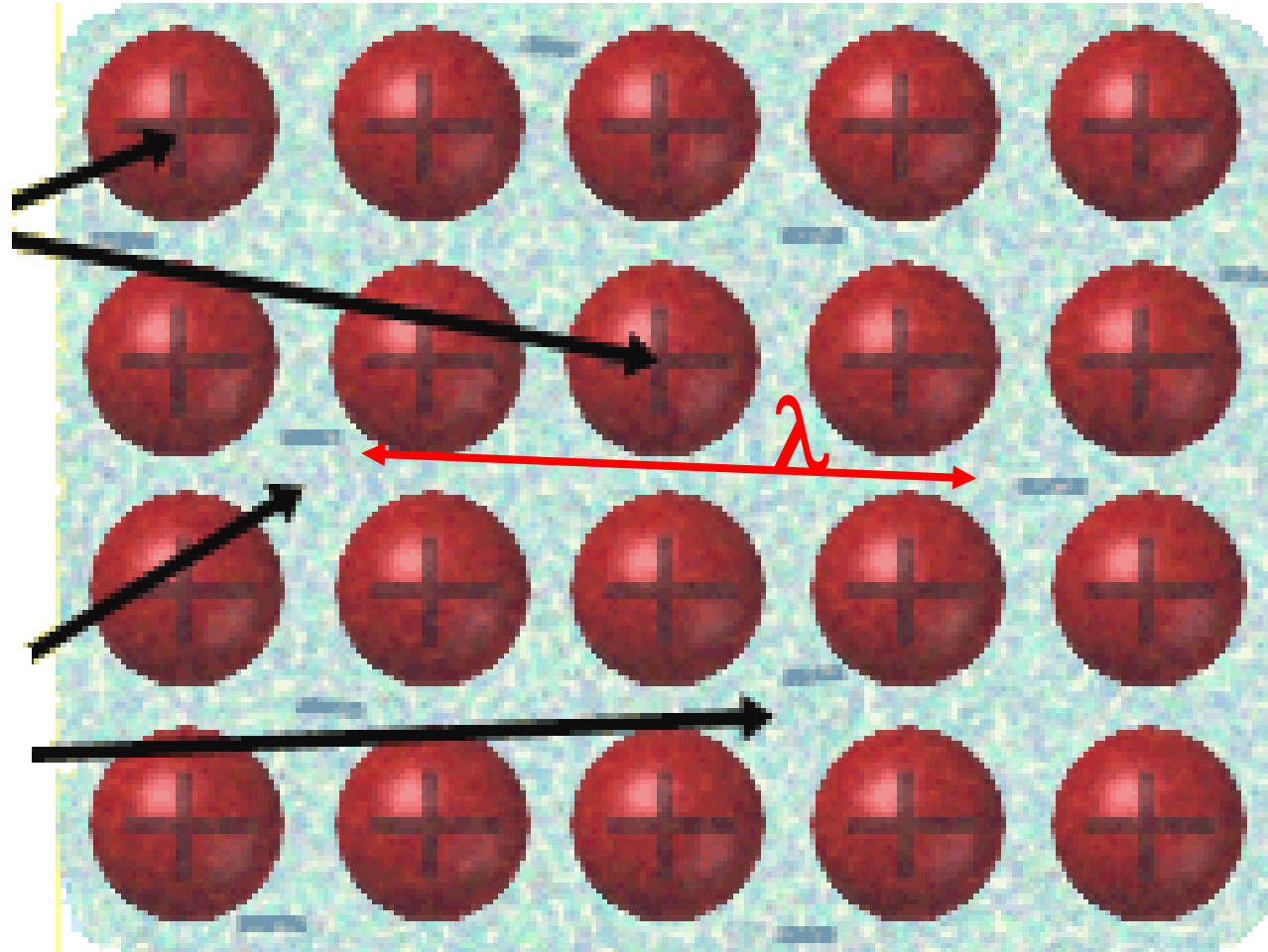
# 不純物や格子欠陥による電子の散乱

電子の平均速度  $v = \frac{\lambda}{\tau}$

平均衝突時間(平均緩和時間)

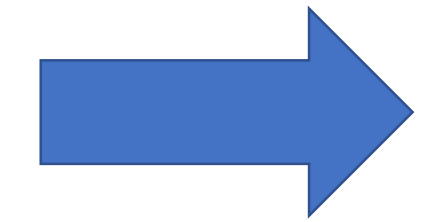
金属中の  
原子核

電子の海

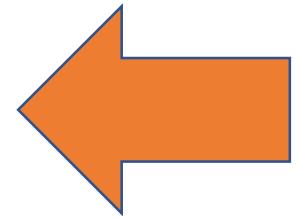
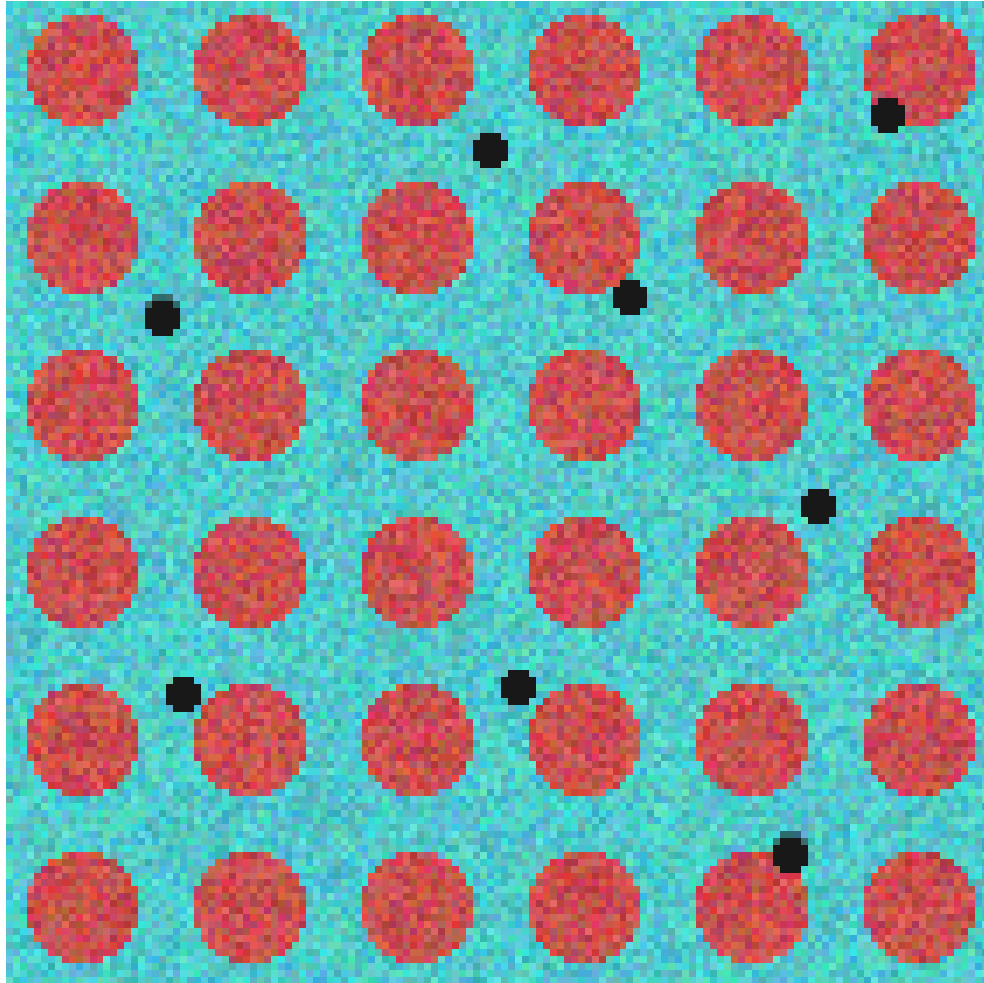


$\lambda$  平均自由行程(衝突と衝突の間に電子が進む平均的距離)

# 結晶格子の熱振動による電子の散乱



電子の流れ



電界

(K・デュリューズによる動画、2001年)



$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_i} + \frac{1}{\tau_T} \quad (2 \cdot 7) \text{式}$$

(2・7)式を(2・6)に代入し、導電率  $\sigma$  は抵抗率  $\rho$  の逆数であることに留意

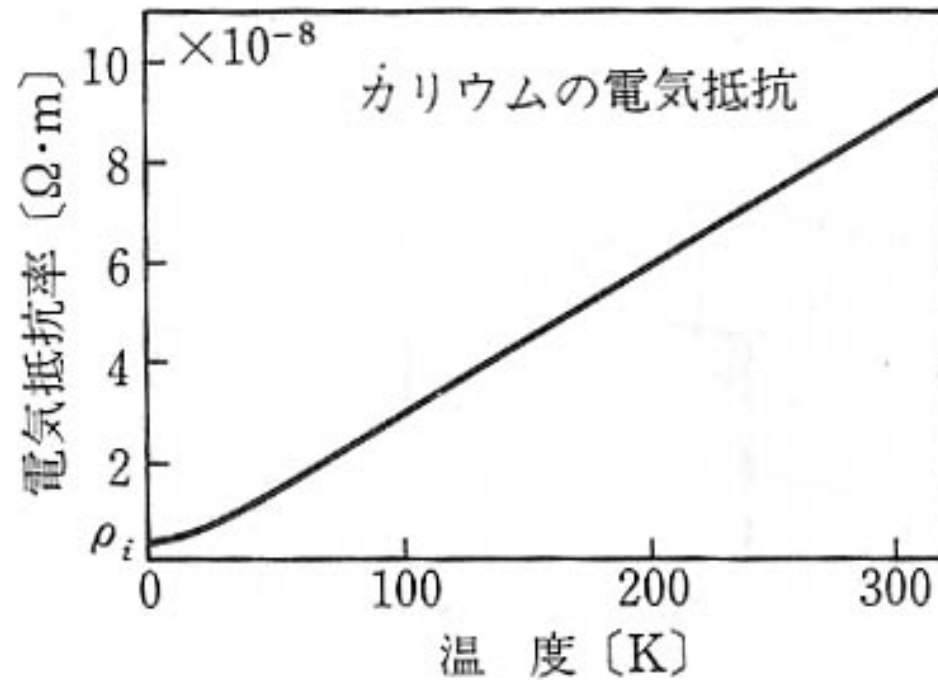
$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m}{ne^2} \cdot \frac{1}{\tau} = \frac{m}{ne^2} \left( \frac{1}{\tau_i} + \frac{1}{\tau_T} \right) = \rho_i + \rho_T \quad (2 \cdot 8) \text{式}$$



温度に依存  
しない

温度に依存  
する

# カリウムの電気抵抗の温度変化

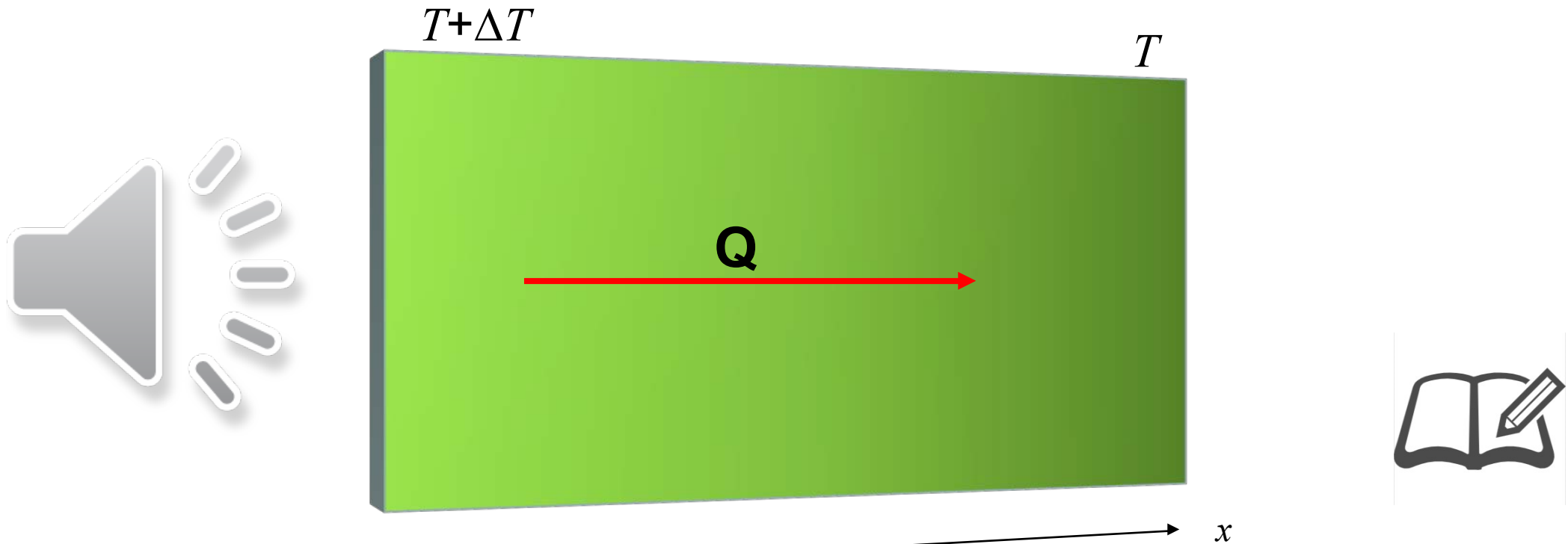


- (a) 典型的な金属の電気抵抗率の温度依存性  
( $\rho = \rho_i + aT$  というマチーセンの法則に従う。ここに、 $\rho_i$  を残留抵抗率と呼ぶ)



(佐藤・越田「応用電子物性工学」(コロナ社) p16) 20

# 熱の拡散・熱の伝導



熱流密度

$$Q = -\kappa \frac{dT}{dx}$$

熱伝導率

ビーデマン・フランツの法則

$$\frac{\kappa}{\sigma T} = L \quad (2 \cdot 9) \text{式}$$

ローレンツ数

# スライド問題2-3



問題 前のスライドで「導電性の高い物質は一般に熱伝導性も高い」という説明があったが、何故そうなのか？

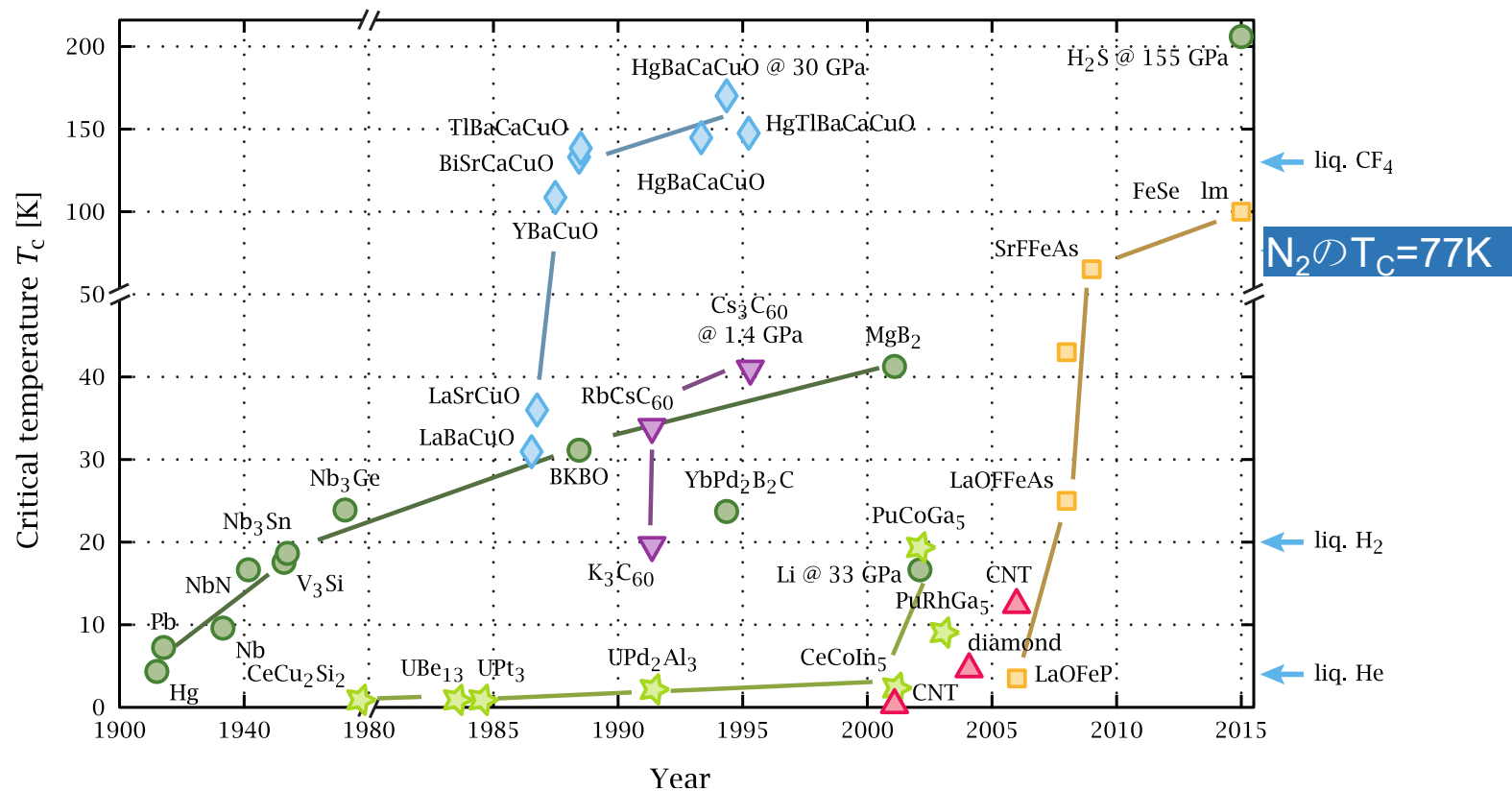
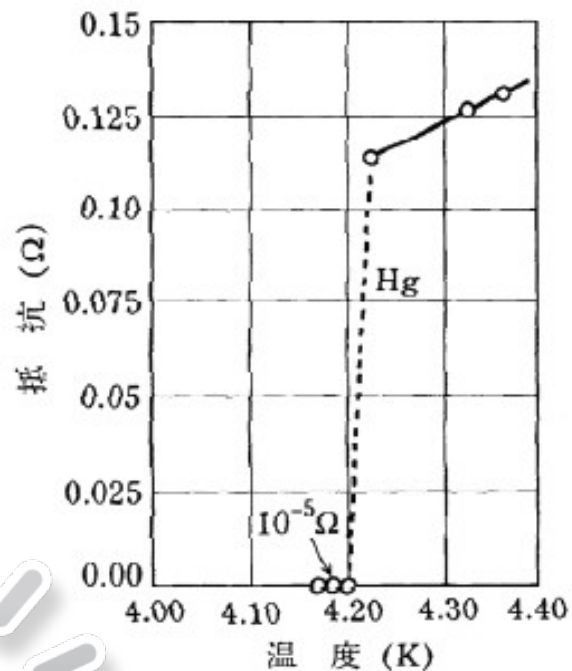
## スライド問題2-3 解答例

金属では、熱は主に電子によって運ばれる．このため、熱伝導度と電気伝導度は関連している。



# カマリン・オンネス（ノーベル賞受賞）

水銀を使って実験をしたところ、**4.153[K]**以下の低温で電気抵抗が0になることを発見（1911 年）。



その後、多くの単体金属や合金で超伝導現象が見つかる。

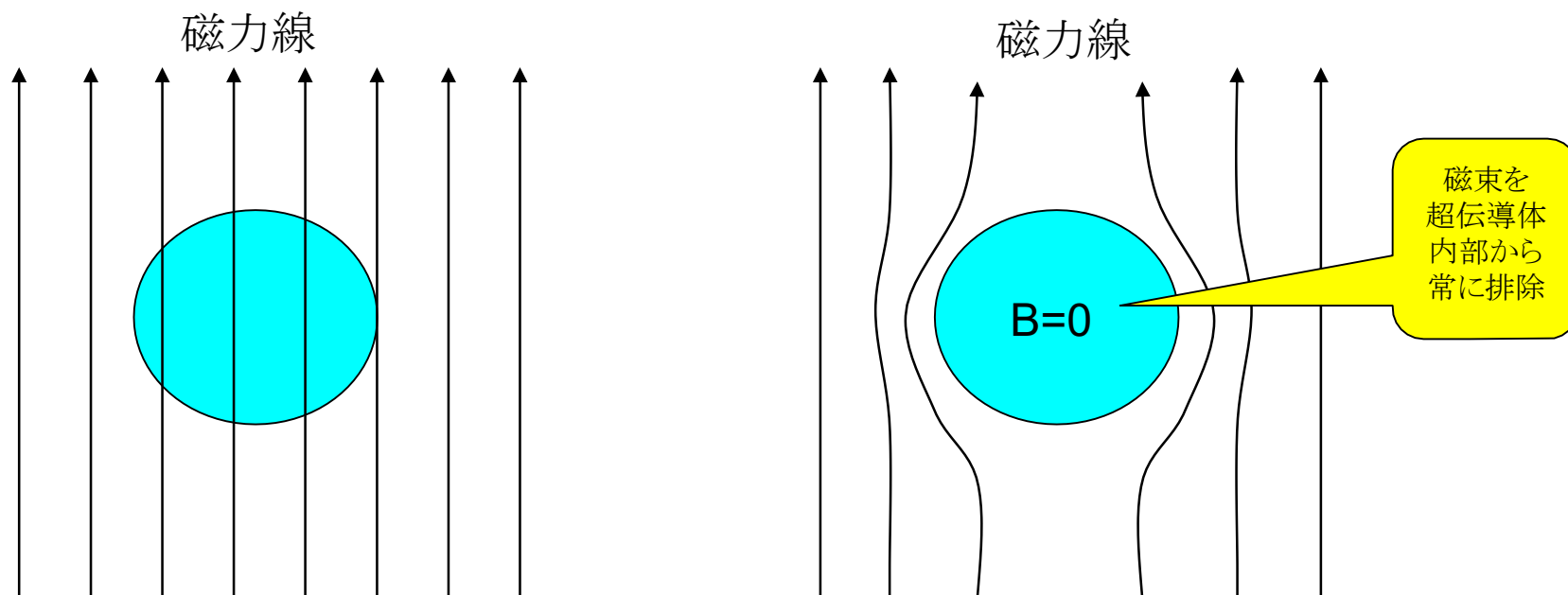
1980年代には酸化物超伝導体(高温超伝導体)が続々見つかる。

高温、っても150 K近くだが

教科書 p.50



# マイスナー効果



常磁性体  $T > T_c$

$T < T_c$  完全反磁性体

内部では

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = 0$$

よって磁化率は

$$\chi_m = \frac{M}{H} = -1$$

教科書 p.46

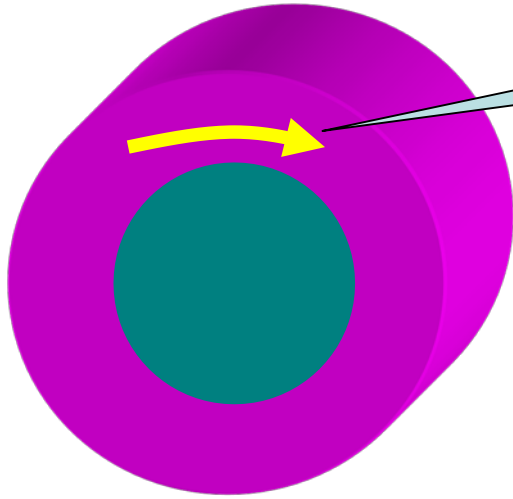


$B=0$  または  $\chi_m = -1$ を示すことが、超伝導状態の直接の証拠に



# 完全導電性と永久電流

電流の減衰時間は10万年  
以上との予測



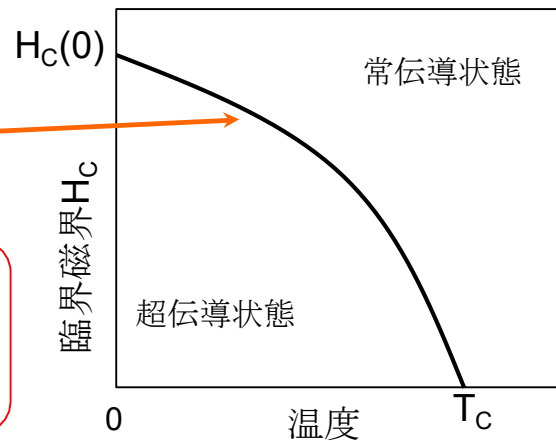
## 完全導電性

超伝導の基本特性の一つ

実用的には最も重要



強い磁界を印加すると超伝導  
状態は常伝導状態に移る



$$H_c = H_0 \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad [\text{A/m}]$$

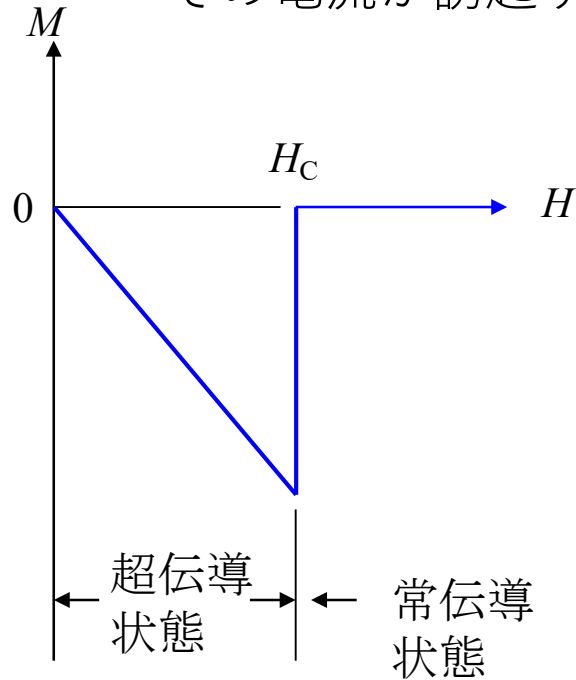
(2・12)

$T_c$ : 磁界ゼロでの臨界温度

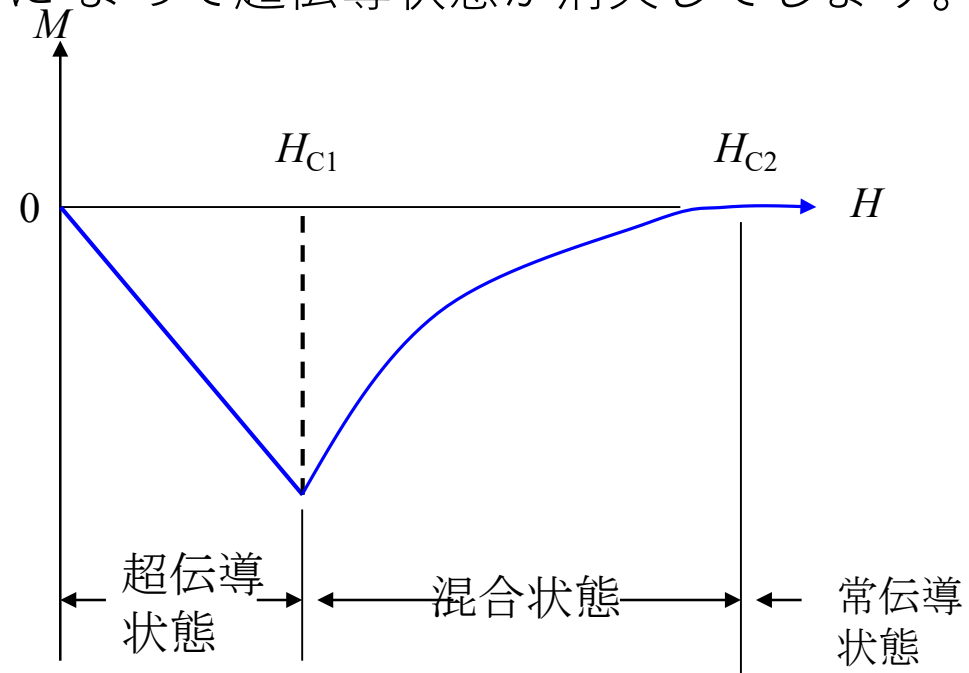
$H_0$ : 0 K での臨界磁界

# 超電導状態には 1 種と 2 種がある

第1種超伝導体では、折角永久電流状態になっても、その電流が誘起する磁界によって超伝導状態が消失してしまう。



(a) 第1種超伝導体



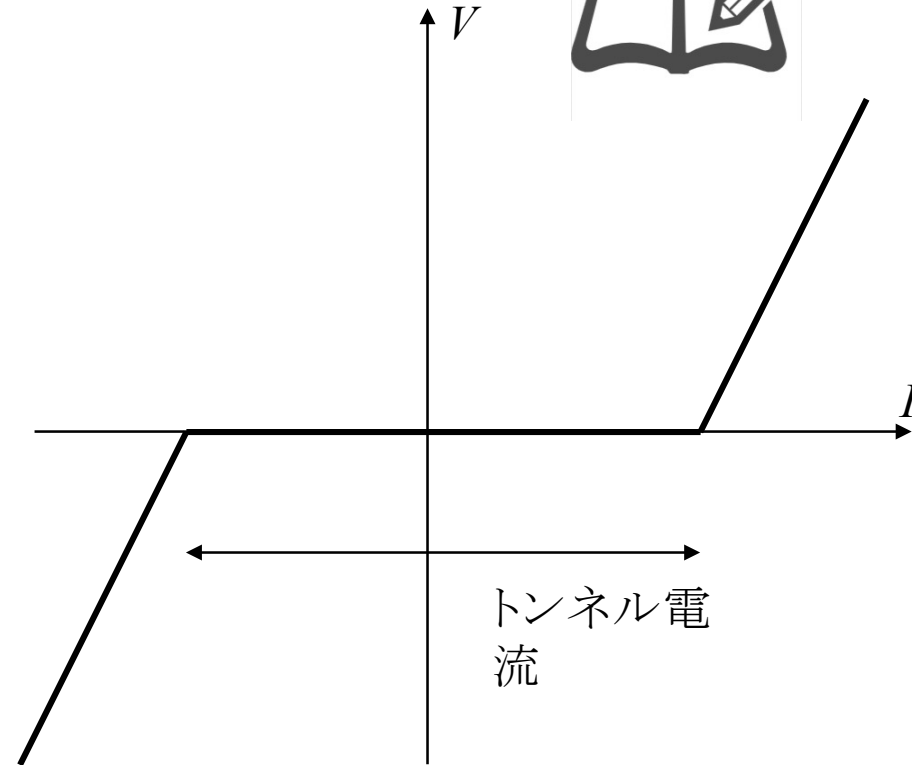
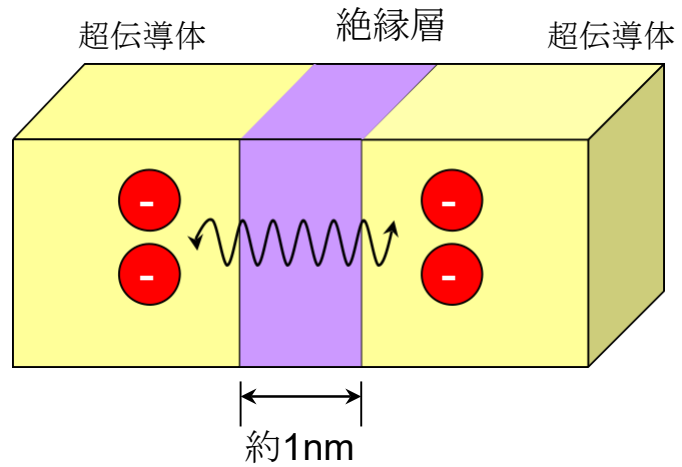
(b) 第2種超伝導体

超伝導体の磁化曲線

教科書 p.48



# ジョセフソン効果



弱い電流では電気抵抗がゼロであるが、  
ある臨界電流を超えると電位差が生じる



# スライド問題2-4



問題 以下の問いに答えよ。

(1)ある物質が超伝導体であると判定するためには、どのような現象を確認 せねばならないか、**2**つ挙げ簡単にその現象を説明せよ。

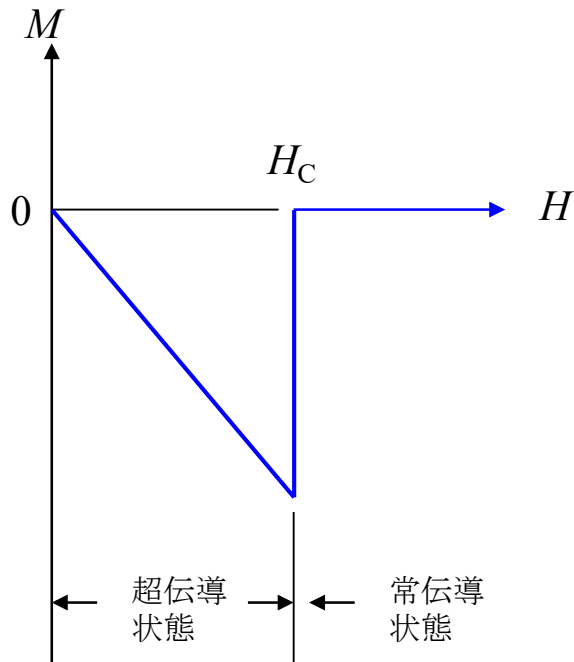
(2)磁化曲線から、超伝導体は2つの種類に分別される。それぞれの超伝導体が用いられる応用例を挙げ、それがふさわしい理由も簡潔に述べよ。

(3)電力伝送に用いられる超電導材料は、第2種超伝導体を用いられる理由を簡潔に説明せよ。

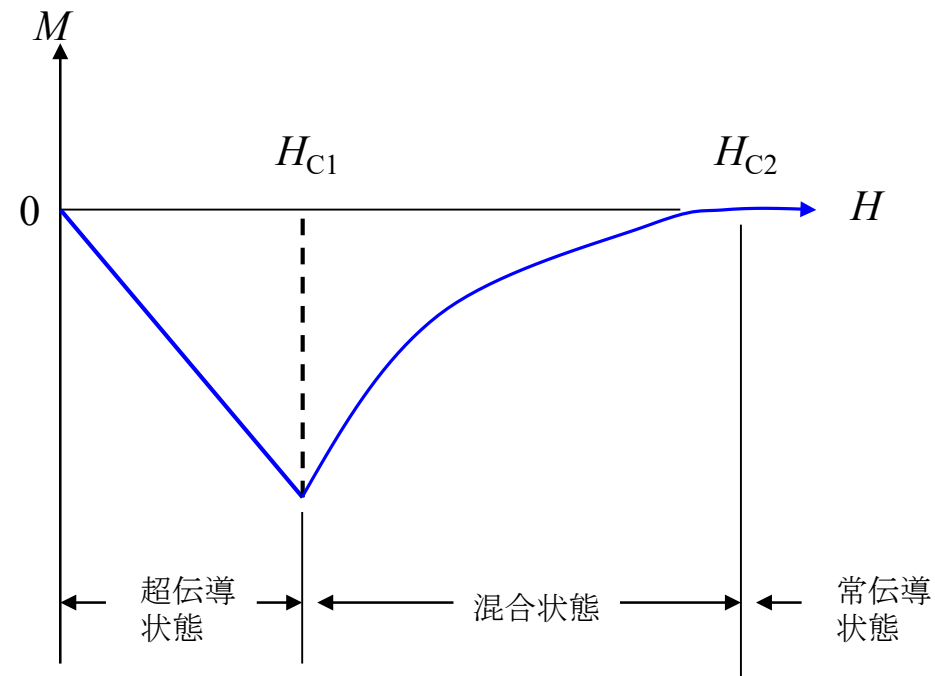
# スライド問題2-4 解答例

- (1) ①電気抵抗がゼロになる（永久電流）  
②物質の磁化率が $-1$ になり、磁束線が浸入できない（マイスナー効果）

第1種超伝導体では、折角永久電流状態になっても、その電流が誘起する磁界によって超伝導状態が消失してしまう。



(a) 第1種超伝導体

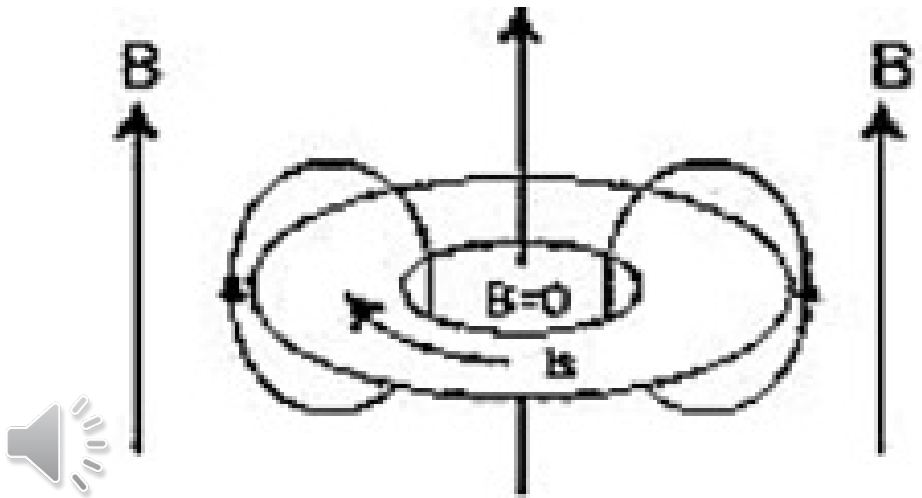


(b) 第2種超伝導体

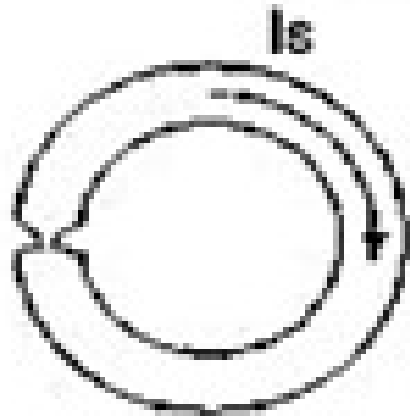
52 : 00

超伝導体の磁化曲線

# 超伝導量子干渉素子(Superconducting Quantum Interference Device: SQUID)



外部から磁界  $B$  が加えられると、超伝導リングの中に磁界  $B$  を通過させないように 磁界を打ち消す超伝導電流が流れる。超伝導リングは抵抗が  $0 \Omega$  であるため、電圧の発生はない。



リング左側に細い部分にジョセフソン構造を作っておくと、わずかな超伝導電流が流れると、その細い部分の超伝導状態が崩れて常伝導となり、電圧が発生する。この電圧を増幅して計測ができるようになる。

## スライド問題2-5



ジョセフソン素子の電圧－電流特性を図に示し、第1種超伝導体が用いられる理由を簡潔に説明せよ。



## スライド問題2-5 解答例

ディジタル回路を構成するスイッチング素子として用いる場合、一定の閾値を超えると1、それ以下では0であるような電気信号が欲しい。そのためには、閾値、すなわち臨界電流以下では電気抵抗が0であることで、電流が流れても電位が生じない、臨界電流以上では電位が生じることで、論理回路の0および1がハッキリと区別出来ることが必要である。このため、臨界電流以上では明確に、超電導状態から常伝導状態に遷移する、第1種超伝導体が用いられるのです。

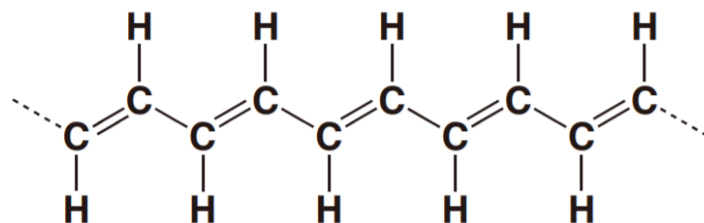


## 「セレンディピティ」とは？

教科書 p.54



2000年に白川英樹博士はノーベル化学賞を授賞。  
“導電性高分子の発見と開発”





ポリアセチレンの分子構造



停電時のバックアップ  
1) xEJ  
2) ディスク安全停止



MLCC	SP-Cap
25V 22μF x 36個	20V 47μF x 3個
	
合計容量 140μF (12V)	合計容量 140μF (12V)
部品点数・実装面積・トータルコストの低減	



2019年に吉野彰博士はノーベル化学賞を授賞。“リチウムイオン電池の開発”



シグマアルドリッチ“材料科学の基礎 第8号、導電性高分子の基礎”

[https://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigma-aldrich/docs/SAJ/Brochure/1/saj1482\\_mmb8.pdf](https://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigma-aldrich/docs/SAJ/Brochure/1/saj1482_mmb8.pdf)

導電性高分子コンデンサ <https://industrial.panasonic.com/jp/products/capacitors/polymer-capacitors>

旭化成ホームページ <https://www.asahi-kasei.co.jp/asahi/jp/yoshino/>

## スライド問題2-6



導電性高分子材料が金属材料よりも優れている点は何か？  
逆に劣っている点は何か？

## スライド問題2-6 解答例

導電性高分子材料が金属材料よりも優れている点は、可塑性・加工性・成形性・量産性などです。負の温度依存性を持つ材料は、熱暴走が起きにくいため、電気カーペットのヒータなどに利用されます。逆に劣っている点は、材料にもよりますが、耐久性や寿命などです。

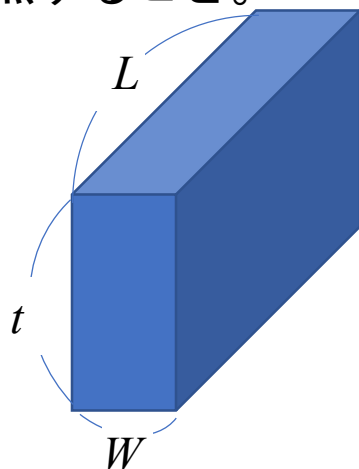


### 体積抵抗率

抵抗を  $R$  [ $\Omega$ ] とすると

$$R = \rho \cdot \frac{L}{W t} \quad (\text{式A})$$

$\rho$  は一辺が 1 m の立方体の抵抗に相当し単位は [ $\Omega \cdot \text{m}$ ] である。単に抵抗率という場合はこの体積抵抗率を意味する。今日の講義の前半のスライドも参照すること。

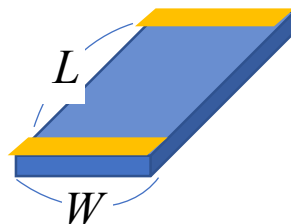


### 表面抵抗率 (Sheet R)

抵抗を  $R$  [ $\Omega$ ] とすると

$$R = \rho' \cdot \frac{L}{W} \quad (\text{式B})$$

$\rho'$  は膜厚の測定が困難な場合に有効である。幅  $W$  と長さ  $L$  が等しい正方形膜の抵抗に相当し、単位は [ $\Omega$ ] である。しかし、電気抵抗との混同を避けるために、慣例的に  $\Omega \square$  (ohms square)、または  $\Omega$  毎  $\square$  (ohms per square) を使用する。これは、この値が任意の大きさの正方形の領域を電流が片方の端から対向する端へ流れる際の抵抗と解釈できるためである。

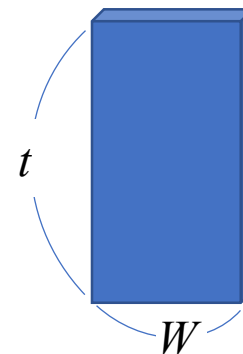


### 横方向抵抗率

抵抗を  $R$  [ $\Omega$ ] とすると

$$R = \rho'' \cdot \frac{1}{W t} \quad (\text{式C})$$

$\rho''$  は導体間に存在する皮膜のように長さ  $L$  の測定が困難な場合に有効である。 $R$  が接触面積に反比例することが明示されているので、この表現は便利である。用途によって膜抵抗率、トンネル抵抗率ともいい、単位は [ $\Omega \cdot \text{m}^2$ ] である。



## スライド問題2-7

アルミニウムの体積抵抗率  $\rho$  を  $3 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$  としたとき、蒸着膜厚300 nmのアルミニウム薄膜のシート抵抗を求めよ（単位も明記しなさい）。



ヒント：前のスライドの式Aと式Bを比較してみよう。

## スライド問題2-7 解答例

前のスライドの式Aと式Bを比較すると、体積抵抗率 $\rho$ と表面抵抗率 $\rho'$ の間には次の関係式が導かれることが容易にわかる。



$$\rho' = \frac{\rho}{t}$$



よって、 $(3 \times 10^{-8}) \div (300 \times 10^{-9}) = 0.1 \quad \Omega / \square$

類題：200  $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ のITOを10 $\Omega$ のシート抵抗にするために必要な膜厚は？

# 課題レポート (Homework)



以下のレポートを作成し、ILIASを使って提出してください。

MSWordで作成すること。テンプレートはILIASに置いてあります。提出期限は5月17日(日)13時JST.

ファイル名は、必ず学籍番号の数字を含めて「例：20310185-HW02.docx」のような名前にして提出すること。

課題1 (字数は1000字程度。適宜、図も入れて下さい)

講義の中で説明したのは**直流**ジョセフソン効果についてでした。一方の超伝導体にだけ電圧をかけた場合、交流電流が流れる**交流ジョセフソン効果**が知られています。交流ジョセフソン効果を利用すると、①**高精度の磁場測定器**や②**高速で動作する電子デバイス**だけでなく、③**基準電圧源**や、④**標準周波数**に用いることが出来るため、研究・開発が行われています。これら①~④について1つ、調査して下さい。調査対象の①~④は、各自の学籍番号により異なるものを指定します。学籍番号の下2桁を除いて下さい(例：20310185の人だったら203101とします)。こうして出来た6桁の番号(すなわち、メールアドレスの"s"と"@stn"で挟まれた数字)を4で割って、その余りの数字を、本課題1の調査対象とします(例； $203101 \div 4 = 50775$  余り 1、となりますので、①についてレポートを書いて下さい)。いずれの課題も、一般機器と比べて「なぜ高精度？」「なぜ高速？」「なぜ精確？」なのかを書かなければ得点としない。

みの虫クリップ

課題2 (字数は1000字~2000字。適宜、図も入れて説明して下さい)

ある人がガラス基板上に製膜した透明導電膜の電気抵抗を図ったと学会報告しましたが、到底信頼出来ません(右図)。

何が問題なのか具体的かつ詳細に指摘しなさい。

さらに、技術者から信頼されるデータを採るためにはどうしなければならないか提案しなさい。

