

Q: 導線を流れる電流は、導線を流れる電子のみを考えればよいですか？電流の定義だと、正イオンや負イオンの流れも考慮するべきだと思いますが、それらは移動せず、電子のみが移動するという考えで合っていますか？

A: はい。合っています。金属の導線を流れる電流を担っているのは、電子（自由電子、伝導電子）のみと考えてよいです。導線を構成する銅などの金属原子は固定されていて動けません。

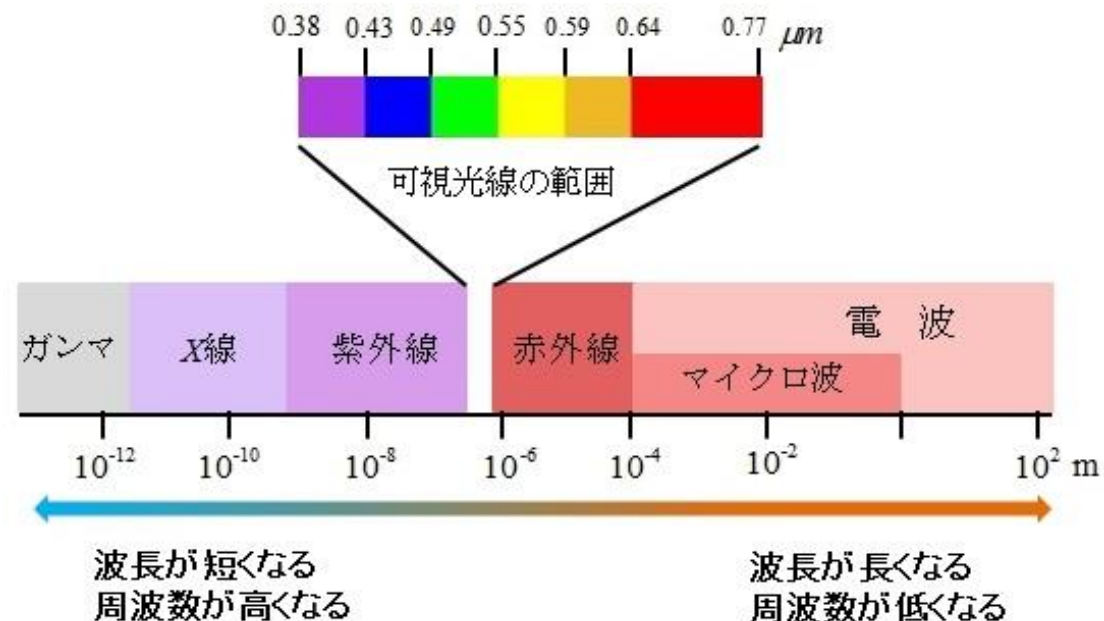
Q: 章末から問題が出るとありましたが、章末問題もやった方がいいのでしょうか。

A: 出るといっても3割程度を考えています。自分がどの程度わかっているのかを確かめる意味でも章末問題をやってみることは良いと思います。

Q: 光子って光子同士でぶつかりあってエネルギーを失ってしまわないのですか？

A: 目に見える光（可視光）は、電磁波の一種で、この授業でも少しだけ触れます。電磁波は波長の違いで右のように名前が変わります。（次のスライドへ）

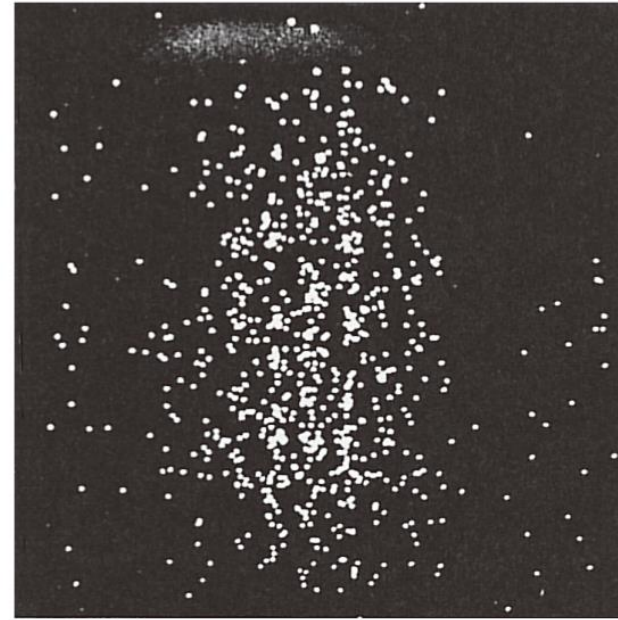
教科書p290表22.1参照



光は波か粒子か？

②

(a)



(b)

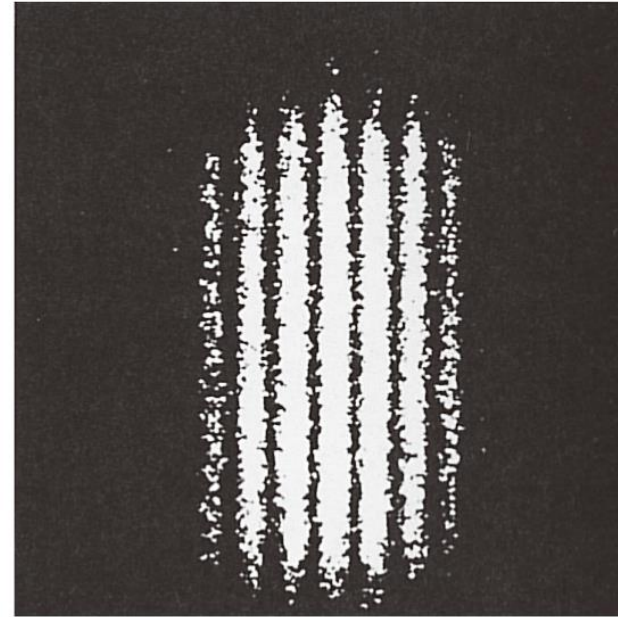
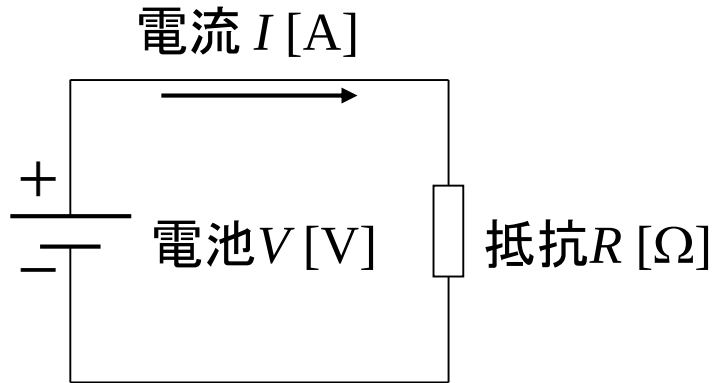


図 24.8

前のスライドを見れば、光は波であると思うでしょうが、粒子の性質もあります。光は粒子(光子)として、1個、2個と数えることもできます。右の図は、二本のスリットを通過した光の干渉の様子です(教科書p331)。スリットを通過した光の干渉は波の性質ですが、光は粒子として、それぞれ、スクリーンのどこに届いたかわかります(右上図)。これは粒子の性質です。上の図では、干渉模様がはっきりしませんが時間が経ってたくさんの粒子を集めれば、干渉模様がはっきりわかります。

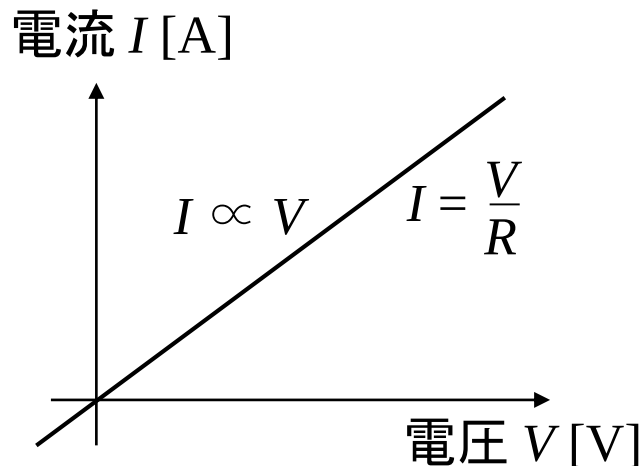
さて、ここからが質問の答えですが、光子同士はぶつからないと考えると問題ありません。理論上は、ほんの少しの確率でぶつかるのですが、これまで実験では、それを検出できませんでした。ごく最近の実験でその兆候がやっと見え始めているような状況です。身の周りの現象等では、光子同士はぶつからないと考えるとよいです。



回路に電流を流そうとする電源の働きを

起電力 という

単位は電位差の単位のボルト(記号 V)

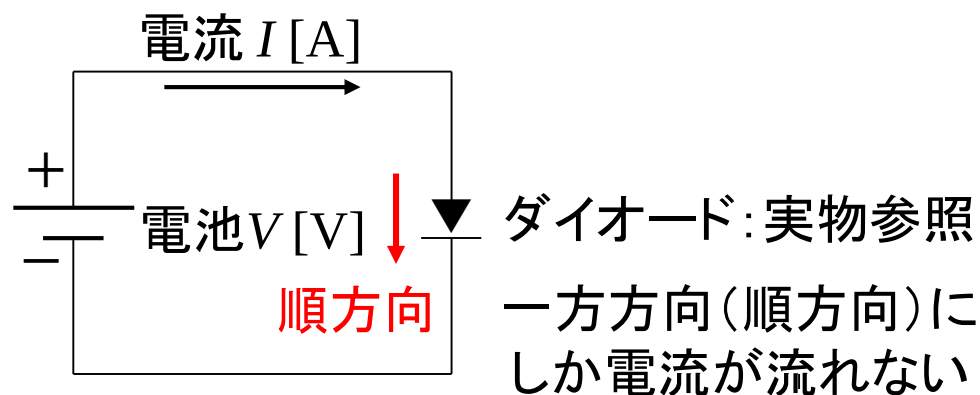


オーム の法則 : $V = RI$

抵抗器の両端の電位差 V は、
抵抗器を流れる電流 I に比例する。
その比例定数 R が電気抵抗(抵抗)である。
抵抗の単位は Ω (オーム) = V/A

オームの法則の適用限界

金属ではよく成り立つが、ダイオード・放電管・電解質溶液等では成り立たない。



交流を直流に変換 (整流)
するときなどに用いる。

LED
発光ダイオード

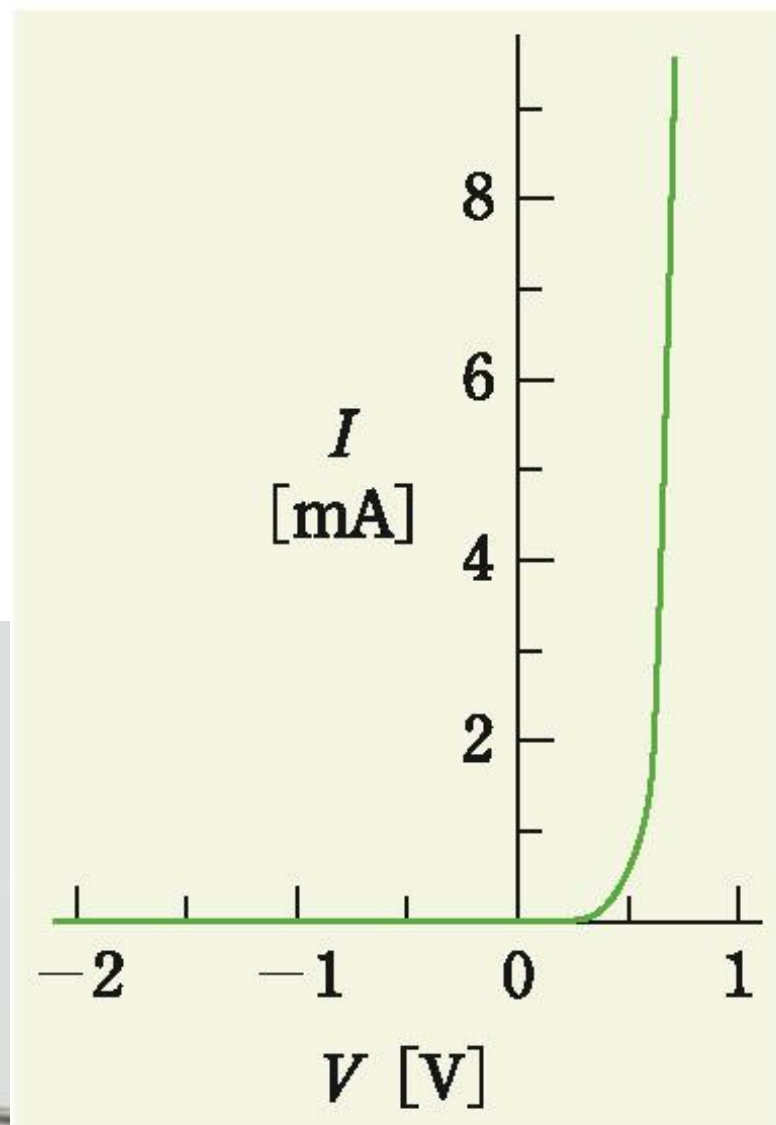
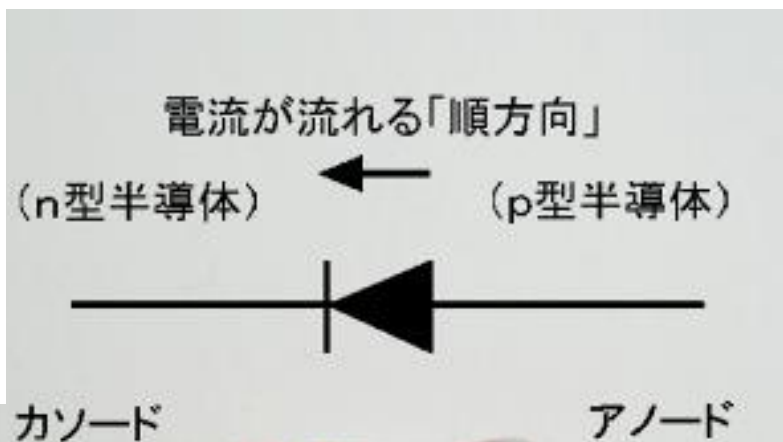
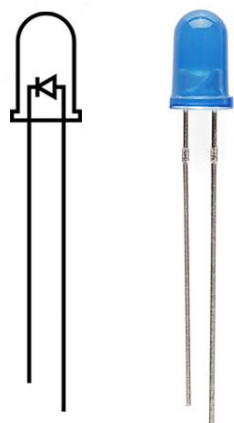
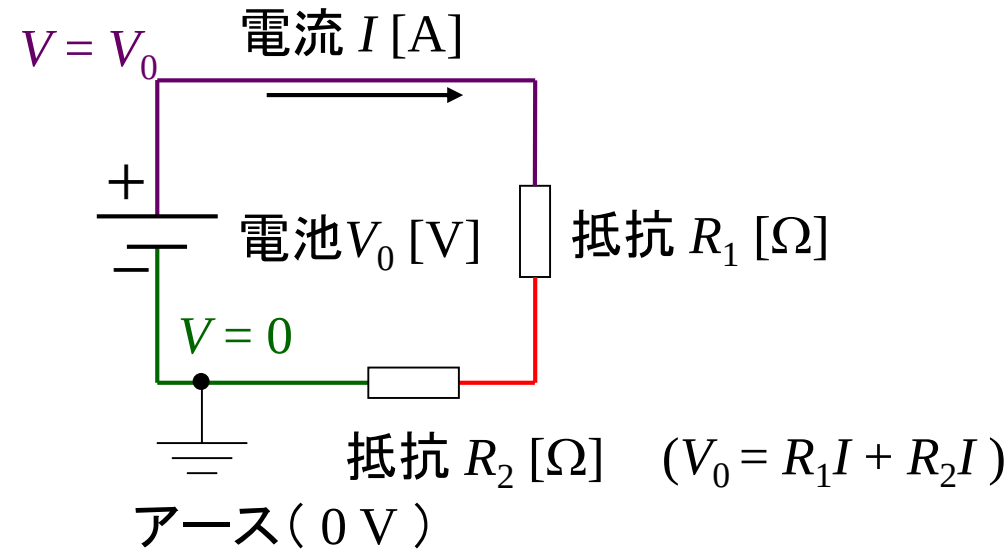


図19.8

電圧降下

電気抵抗 R をもつ物体に電流 I が流れると、電流の向きに電位は RI だけ低くなる。



電気回路の電位の基準点 ($V = 0$) は、アース (接地) がしてあれば、その電位を $V = 0$ とする。

問題: 左の図の赤い導線の電位を求めよ。

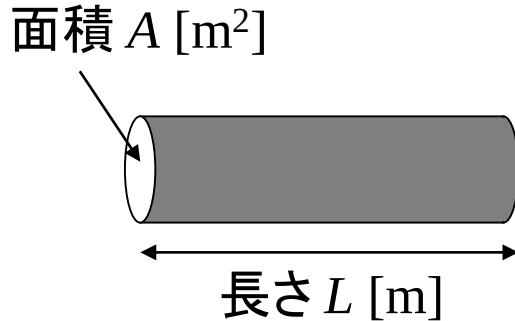
アース (0 V)
地面に電極を埋める
水道管 (金属) 等でも OK

導線の抵抗は無視する

$$V = V_0 - R_1 I = R_2 I$$

電気抵抗率

金属(導線等)の電気抵抗 R は、長さ L に比例し、断面積 A に反比例する。



$$R \propto \frac{L}{A}$$

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

比例定数 ρ が

電気抵抗率

単位
[$\Omega \cdot \text{m}$]

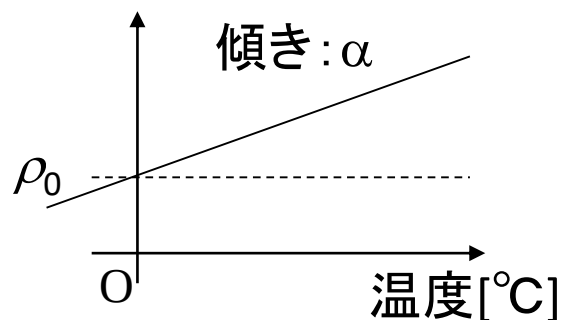
問題: 電気抵抗率の単位が $\Omega \cdot \text{m}$ かを確かめよ。

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$\Omega = \Omega \cdot \text{m} \frac{\text{m}}{\text{m}^2}$$

電気抵抗率 ρ の温度依存性

電気抵抗率 ρ



電気抵抗率 ρ は、材質と温度のみで決まる。
 0°C での電気抵抗率を ρ_0 とすると、
 $t^\circ\text{C}$ での電気抵抗率 ρ は近似的に以下ようになる。

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

α を電気抵抗率の温度係数という。

金属	電気抵抗率 ρ [$\Omega \cdot \text{m}$] (20°C)	温度係数 α	コメント
銀	1.62×10^{-8}	4.1×10^{-3}	最も電気抵抗が小さい
銅	1.72×10^{-8}	4.3×10^{-3}	導線の材料, 8.9 g/cm^3
金	2.4×10^{-8}	4.0×10^{-3}	
アルミニウム	2.75×10^{-8}	4.2×10^{-3}	軽い 2.7 g/cm^3 、高圧送電線
タングステン	10.6×10^{-8}	5.3×10^{-3}	融点 3380°C , フィラメント
鉄(鋼)	$(10 \sim 29) \times 10^{-8}$	$(1.5 \sim 5) \times 10^{-3}$	抵抗率: 大, IHの鍋
ニクロム	$(95 \sim 104) \times 10^{-8}$	$(0.3 \sim 0.5) \times 10^{-3}$	抵抗大きい、 α 小さい

鉄塔の送電線

2.7 g/cm³

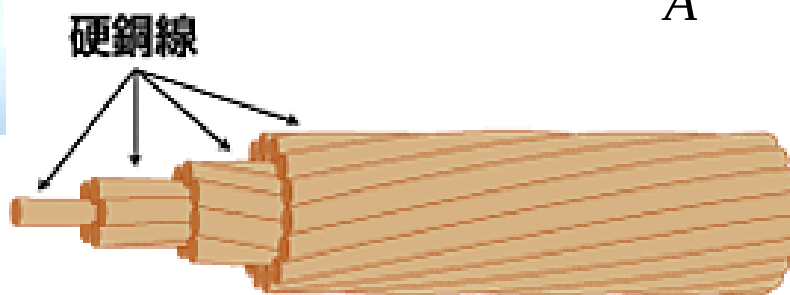
8.9 g/cm³

同じ重さならアルミの電線の断面積は銅の2倍超
電気抵抗率は銅の方が小さいが
断面積が大きい分アルミ線の方が抵抗が小さい

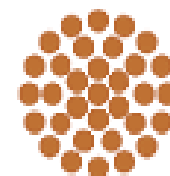
$$R = \rho \frac{L}{A}$$



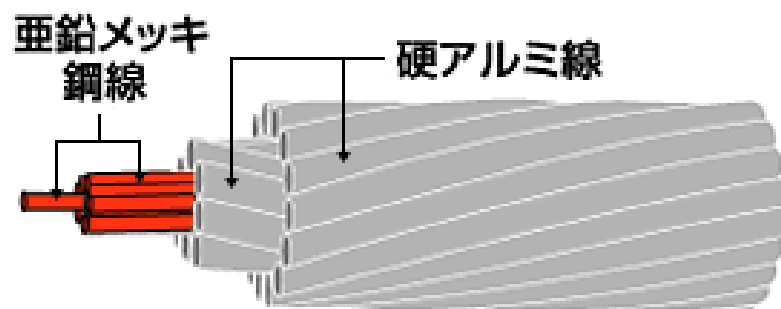
鉄塔の送電線は裸線
(被覆はない)



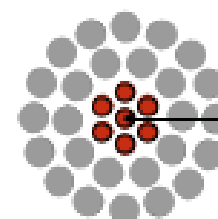
← 18.2 ミリメートル →



電線太さ(断面積) 200平方ミリメートル
1メートルあたりの重さ1.7キログラム



← 28.5ミリメートル →



亜鉛メッキ
鋼線

各層が交互に巻き方向を変える

電線太さ(断面積) 410平方ミリメートル
1メートルあたりの重さ1.7キログラム

問題：断面積が 400 mm^2 のアルミの送電線 100 km の電気抵抗を求めよ。
アルミニウムの電気抵抗率はスライド⑧の値を用いよ。

$$R = \rho \frac{L}{A} = 2.75 \times 10^{-8} \times \frac{10^5}{4 \times 10^{-4}} \doteq 6.9 \text{ } [\Omega]$$

豆電球のフィラメント(タングステンの細い線)の抵抗

⑫

①測定: 豆電球の抵抗をテスターで測定する。 2.4 Ω
(ソケットの抵抗は無視)

②測定: 電池(2本直列)の電圧を測定する。 3.2 V
(新品のアルカリ電池の電圧は 1.5 Vより高い)

③測定: 豆電球と電池を接続し、電流計で流れる電流を測定する。 0.12 A

④問題: 電球の抵抗を②、③の結果より計算せよ。
ただし、電池の内部抵抗等による電圧降下は無視せよ。

$$V = RI$$

$$3.2 = R \times 0.12$$

$$R \div 27$$

$$\underline{\quad 27 \quad} \Omega$$

問題: スライド⑨の内容が適用できるとして、光っている時のフィラメントの温度 t_{on} を求めよ。ただし、前のスライドで電球の抵抗を測定したが、これはフィラメントの抵抗とし、その際のフィラメントの温度は 20°C とする。

温度 $t^{\circ}\text{C}$ におけるフィラメントの抵抗を $R(t)$ とすると

$$R(t) = R(0)(1 + \alpha t)$$

20°C のときの値を上 の式に代入すると

$$2.4 = R(0)(1 + 0.0053 \times 20)$$

$$2.4 = 1.106R(0)$$

$$R(0) \div 2.17$$

光っているときの値を代入すると

$$27 = 2.17(1 + 0.0053t_{\text{on}})$$

$$24.83 = 0.0115t_{\text{on}}$$

$$t_{\text{on}} = 2.2 \times 10^3^{\circ}\text{C}$$

温度の関係式はこのような高温までは成り立っていない。

実際のフィラメントの温度は _____ $^{\circ}\text{C}$ くらいである。

問題: スライド⑨をみると、電気ストーブ等で用いられているニクロム線は温度係数が他の金属より1桁小さい。もし、他の金属と同程度だとしたら、どのような問題があるか？ 1000Wの電気ストーブを例に検討せよ。

後で勉強しますが、消費電力は電流に比例します。
スイッチを入れたとき、ニクロム線は常温なので、
抵抗が小さく、たくさんの電流が流れて、
ブレーカーが落ちる可能性がある。

100Wの電球は点灯した瞬間は1000W以上の消費電力

電気伝導率

電気抵抗率 ρ の逆数を

電気伝導率

という。

記号は σ

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

単位: $[1/\Omega \cdot \text{m}]$

電流密度

導線の単位面積あたりの電流を

電流密度

という。

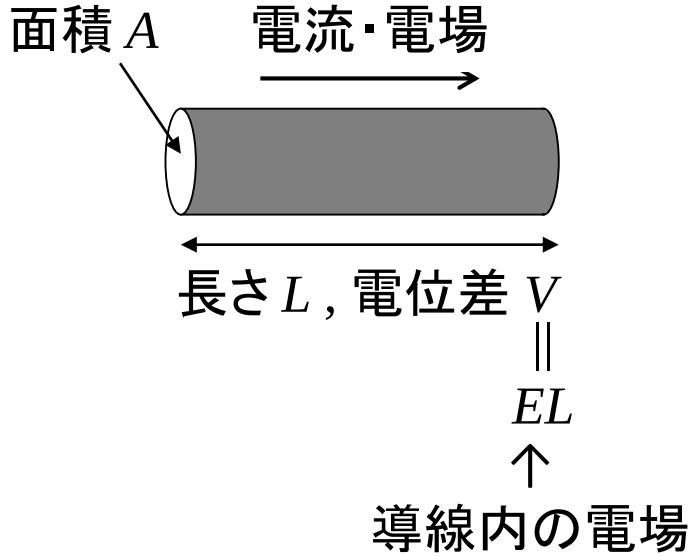
記号は j

$$j = \frac{I}{A} \quad (A \text{ は導線の断面積})$$

単位
[A/m²]

電流密度 j はベクトル。上の式は電流密度の大きさ
電流密度の向きは電流の向き

電流密度 j と電場 E の関係



$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$V = IR$$

$$\frac{V}{I} = \rho \frac{L}{A}$$

$$\cancel{\frac{EL}{I}} = \rho \cancel{\frac{L}{A}}$$

$$j = \frac{1}{\rho} E = \sigma E$$

$$E = \rho \frac{I}{A}$$

電流の強さ $I = jA = nevA$

$$E = \rho j$$

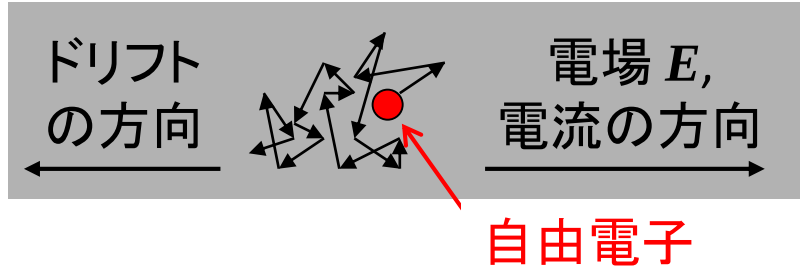
$V = RI$ を
ミクロで

$$j = -nev$$

電場と電流は同じ向き

電流の向きと自由電子のドリフト速度の向きは逆

導線

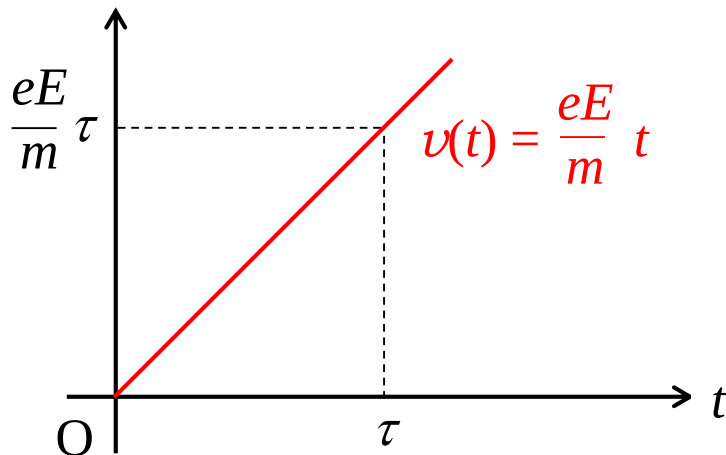
自由電子に働く力： $F = qE = -eE$ 自由電子の運動方程式： $ma = -eE$ 自由電子の加速度： $a = -\frac{eE}{m}$

自由電子は熱運動している正イオンや不純物と衝突し等方的に散乱される。
 (衝突後の初速度は等方的で移動には寄与しないので考えなくてよい。)
 衝突から次の衝突までの平均時間を τ とすると、 $\bar{v}$ (=ドリフト速度) は

ドリフト方向
の速度 v

$$\bar{v} = a\tau = -\frac{e\tau}{m} E$$

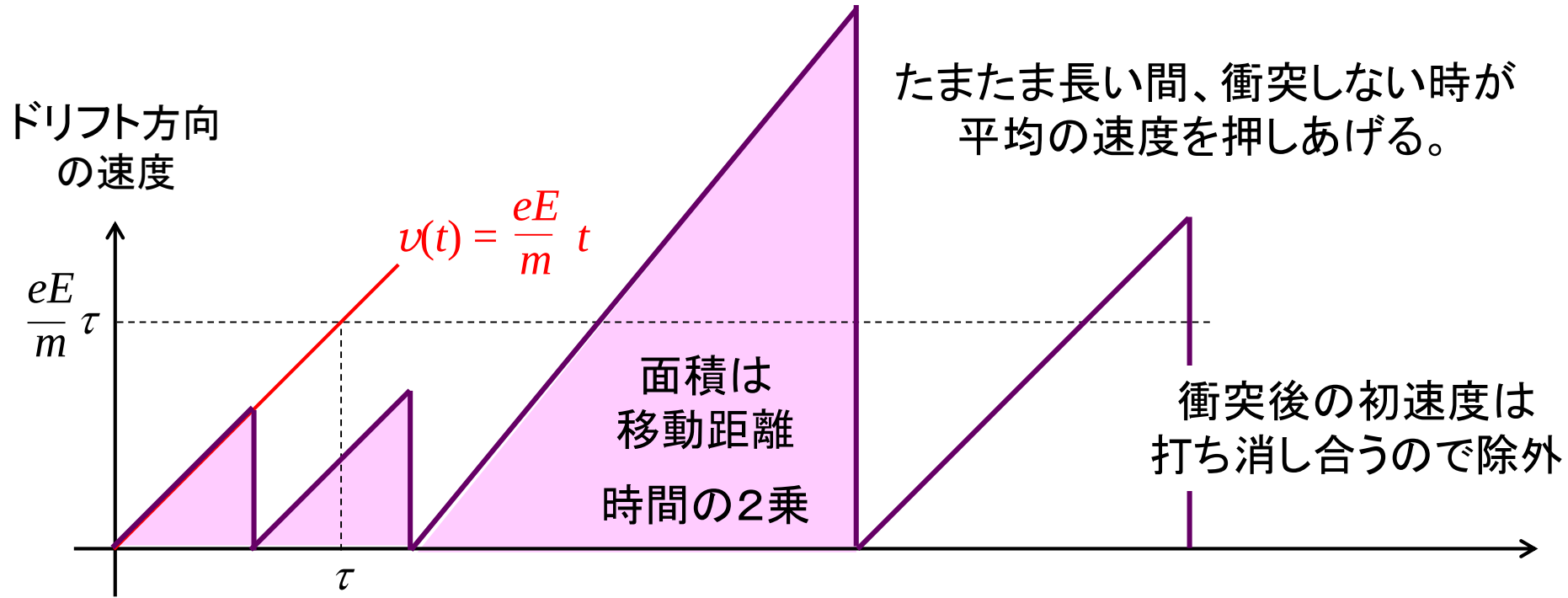
必ず τ だけ時間が経つと衝突する
 なら $\bar{v}$ はこの半分であるが、
 実際の衝突はランダムに起こるので
 左のようになる。



衝突後の初速度はランダムで
 移動には寄与しないので除外

衝突がランダムに起こると・・・

18



平均の2乗 < 2乗の平均
どのような「ランダム」かによるが、この場合
 $2 \times \text{平均の2乗} = 2\text{乗の平均}$

(厳密な説明省略)

参考: p241 演習問題B2参照

どのような「ランダム」か少しでも説明すると・・・

19

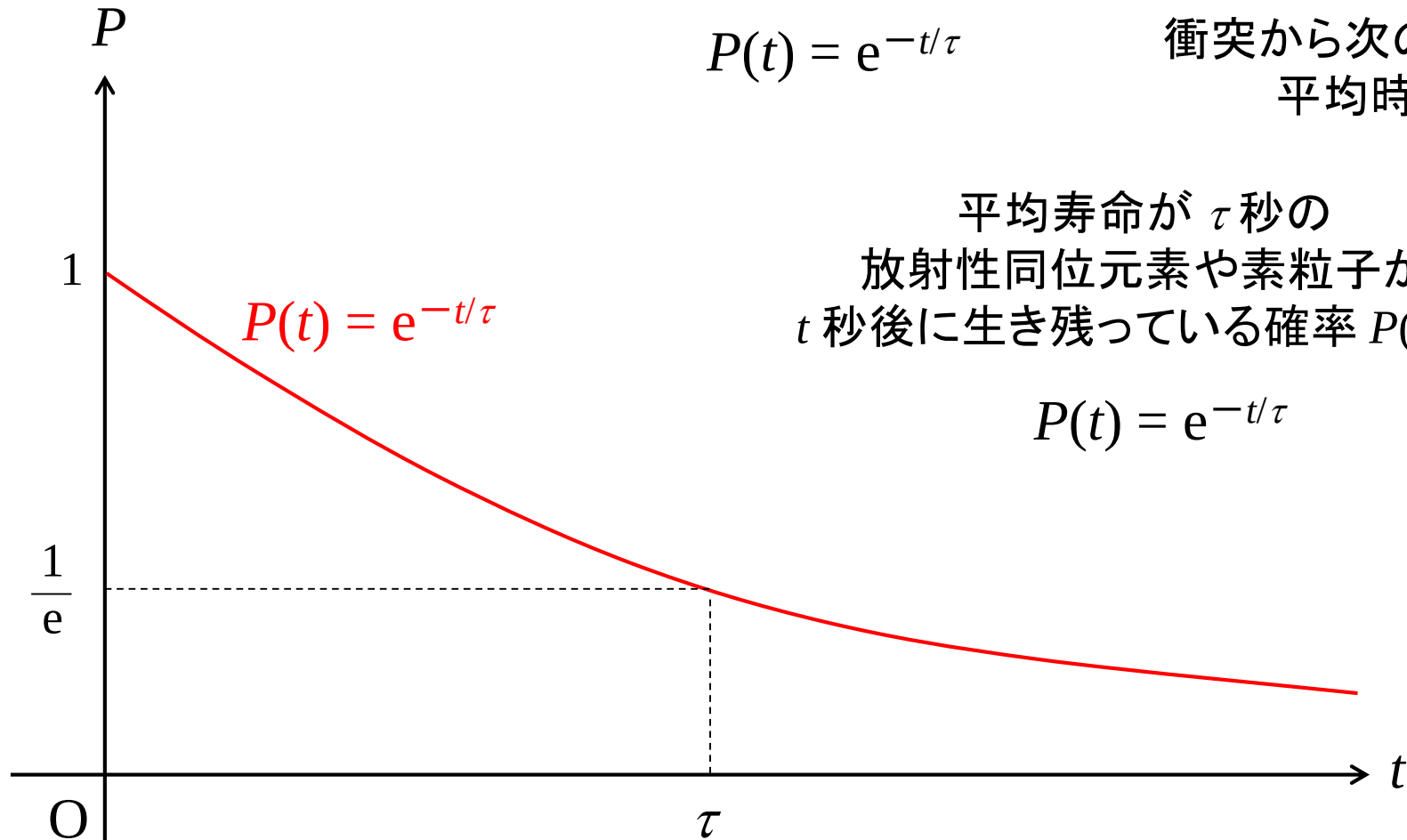
導線中の自由電子が衝突したあと、 t 秒後に次の衝突をしないで走り続けている確率 $P(t)$ は

$$P(t) = e^{-t/\tau}$$

衝突から次の衝突までの平均時間が τ

平均寿命が τ 秒の
放射性同位元素や素粒子が
 t 秒後に生き残っている確率 $P(t)$ も

$$P(t) = e^{-t/\tau}$$

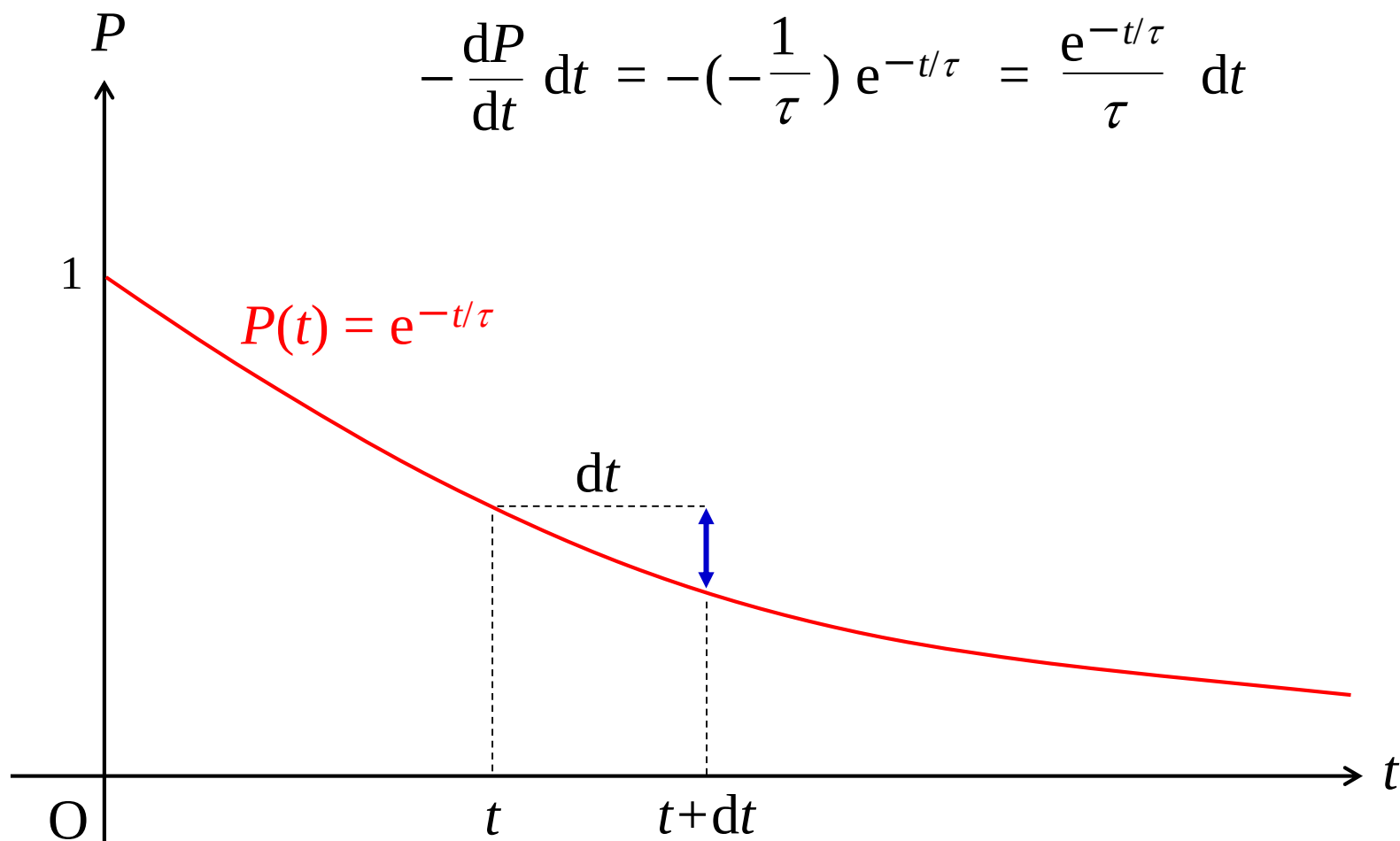


衝突をしないで走り続けている確率 $P(t) = e^{-t/\tau}$

時刻 t と $t+dt$ の間に衝突する確率は

時刻 t と $t+dt$ の間の $P(t)$ の減少量

$$-\frac{dP}{dt} dt = -\left(-\frac{1}{\tau}\right) e^{-t/\tau} = \frac{e^{-t/\tau}}{\tau} dt$$



(参考)
試験には
できません。

(参考)

試験には
できません。時刻 t と $t+dt$ の間に衝突する確率: $\frac{e^{-t/\tau}}{\tau} dt$ 衝突の間の平均時間(τ)は

$$\int_0^{\infty} t \frac{e^{-t/\tau}}{\tau} dt = \frac{1}{\tau} \int_0^{\infty} t e^{-t/\tau} dt = \frac{1}{\tau} \tau^2 = \tau$$

$$n = 1, a = \frac{1}{\tau}$$

衝突の間に飛ぶ平均距離は

$$\text{積分公式: } \int_0^{\infty} x^n e^{-ax} dx = \frac{n!}{a^{n+1}}$$

加速度

移動距離

$$\frac{1}{2} at^2$$

$$\int_0^{\infty} \frac{1}{2} \frac{eE}{m} t^2 \frac{e^{-t/\tau}}{\tau} dt$$

$$= \frac{eE}{2m\tau} \int_0^{\infty} t^2 e^{-t/\tau} dt$$

$$= \frac{eE}{2m\tau} 2\tau^3 = \frac{eE\tau^2}{m}$$

$$n = 2, a = \frac{1}{\tau}$$

平均速度は τ で割って $\frac{eE\tau}{m}$ (ドリフト速度)

本題に戻って...

$$\text{ドリフト速度: } \boldsymbol{v} = \boldsymbol{a}\tau = -\frac{e\tau}{m} \boldsymbol{E}$$

$$\text{電流密度: } \boldsymbol{j} = -ne\boldsymbol{v} = -ne\left(-\frac{e\tau}{m}\right)\boldsymbol{E} = \boxed{\frac{ne^2\tau}{m}} \boldsymbol{E}$$

$$\boldsymbol{j} = \boxed{\frac{1}{\rho}} \boldsymbol{E}$$

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

定数
 m
 ne^2
 τ

ρ (抵抗率)は E (電場)に無関係



電場 E が倍になると電流密度 j も倍になる。
金属ではオームの法則が成り立つ

温度上昇 → τ が減少 → ρ が増大



原子・自由電子の運動が激しいと衝突しやすい
(電場には依存しないが、温度に依存)

自由電子の速さに依存

自由電子の速さは約 10^6 m/s

ドリフト速度はずっと小さい

以前の例題では 5×10^{-5} m/s

よって電場 E があっても
速さはほとんど変わらない。

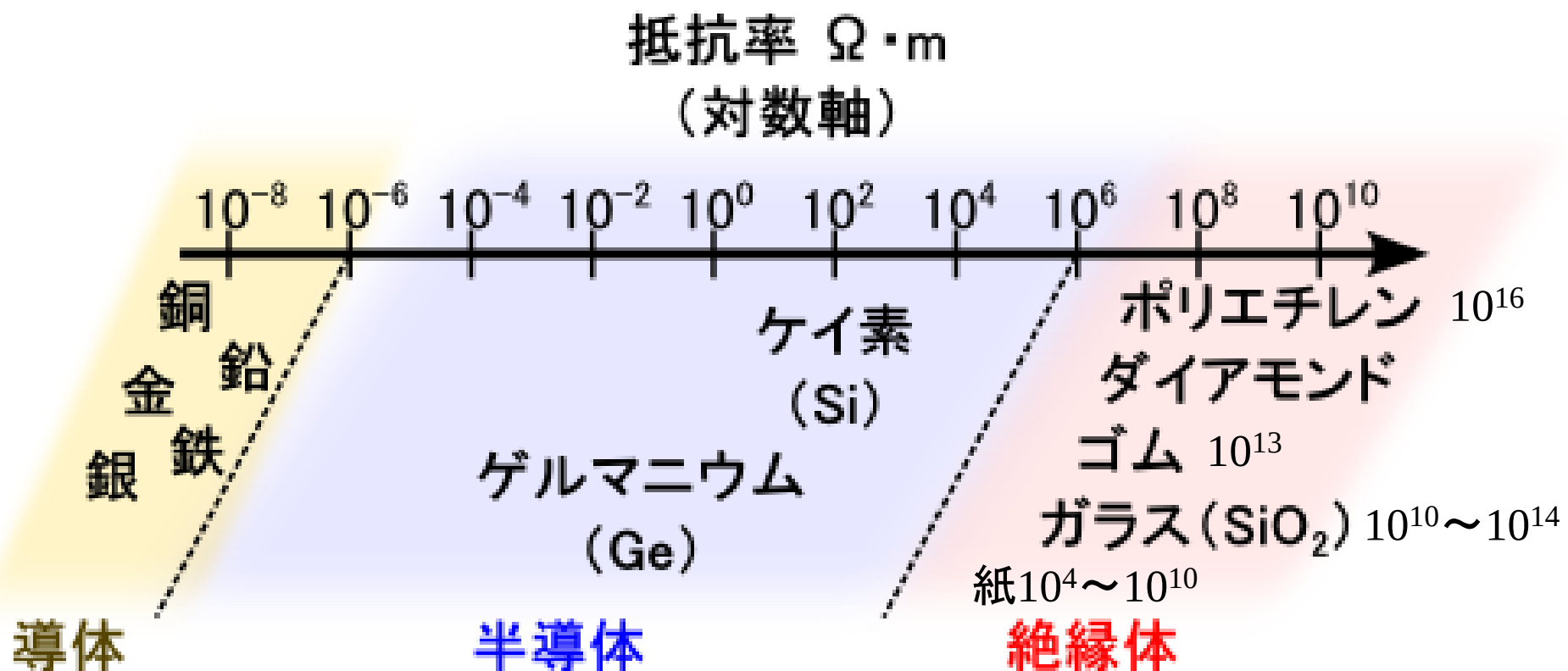
問題:銅の場合の τ を計算せよ。電子の質量 $m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, n は 10^{29} とせよ。③

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

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

$$\tau = \frac{9.1 \times 10^{-31}}{10^{29} \times (1.6 \times 10^{-19})^2 \times 1.62 \times 10^{-8}} \quad \doteq 2.2 \times 10^{-14} [\text{s}]$$

導体・半導体・絶縁体の電気抵抗率

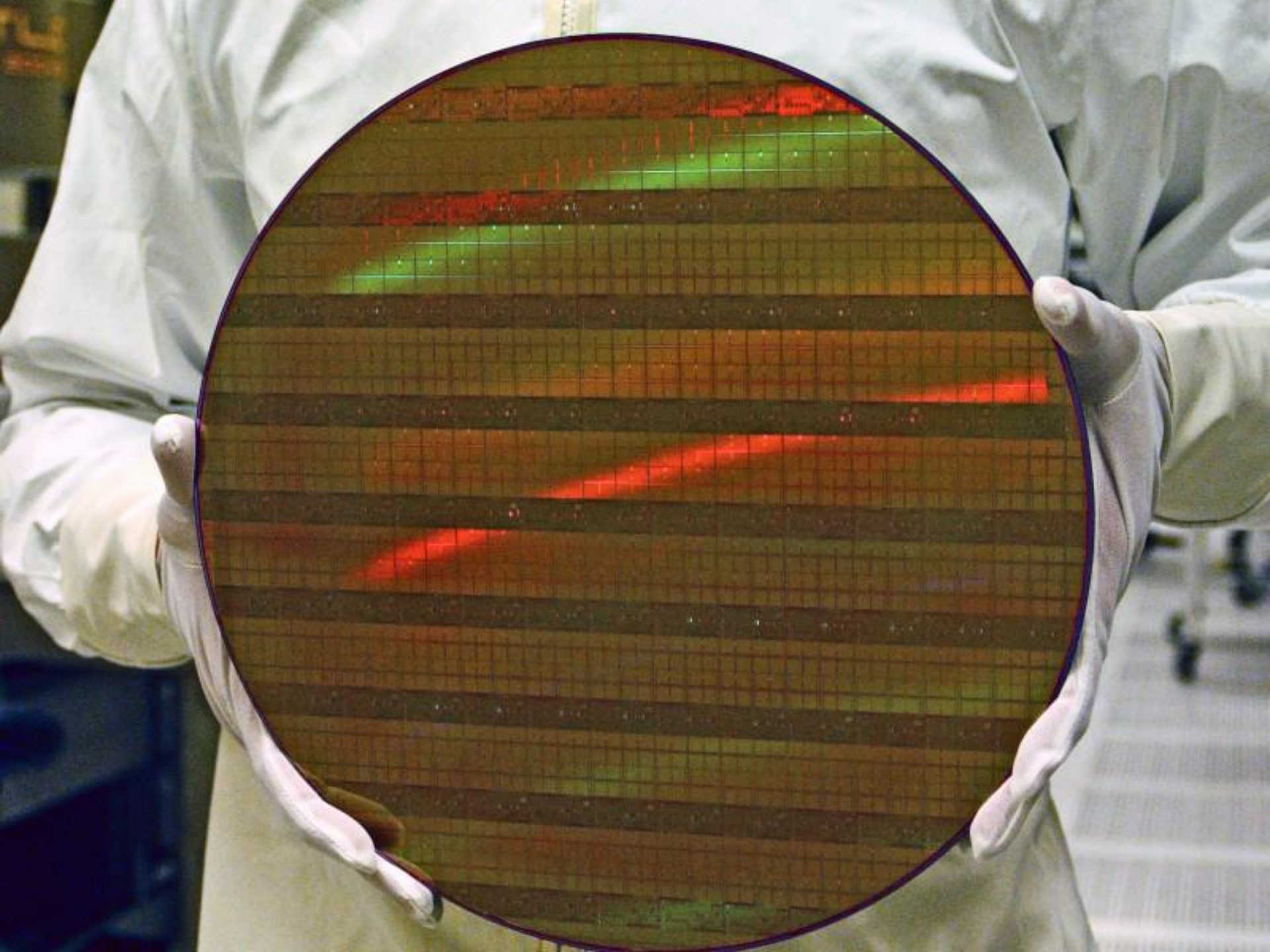


<http://www.maroon.dti.ne.jp/koten-kairo/index.html>

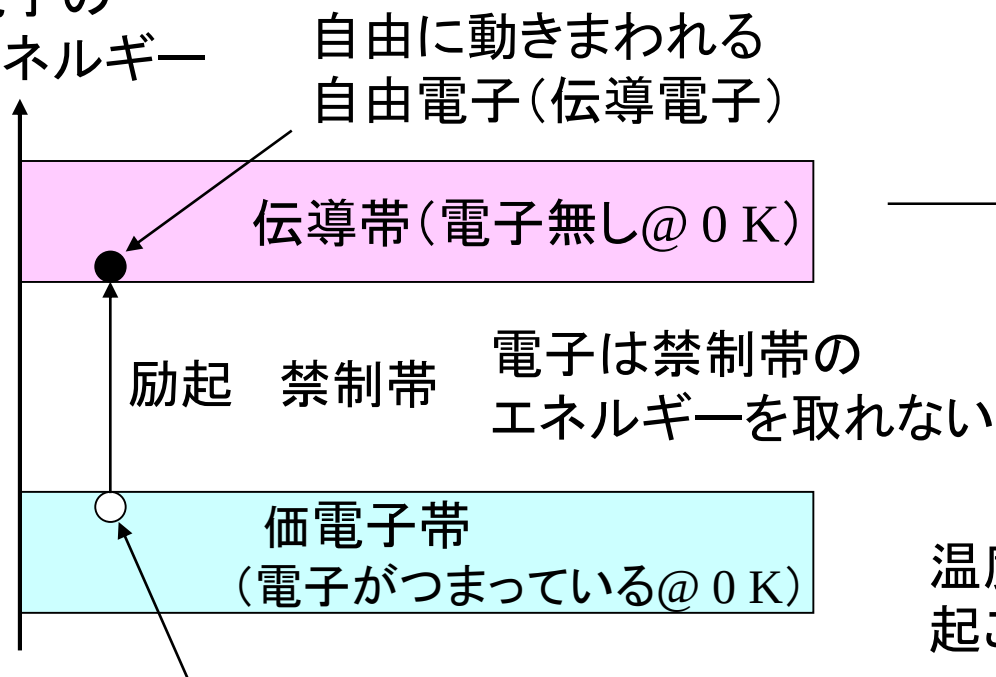
教科書の値 : 導体 (純金属) $\sim 10^{-8} \Omega \cdot m$
 : 半導体 $10^{-4} \sim 10^7 \Omega \cdot m$
 : 絶縁体 $10^7 \sim 10^{17} \Omega \cdot m$

数値は覚えなくてよいが、何桁も違うことを理解して下さい。
 同じ絶縁体でも、紙とポリエチレンでは数桁以上異なり、
 静電気で付く・付かないの違いがある。





半導体中の
電子の
エネルギー



正孔(ホール)電子の空き
隣の価電子が移ることで正孔は
移動できる。プラスの電荷を持つ。

半導体の電流を荷うのは

自由電子
(伝導電子)

と

正孔
(ホール)

温度が高くなると、たくさん励起が
起こるので、自由電子と正孔は

増加する。

n : (自由電子 + 正孔) の密度が増加
単位体積あたりの数 ρ は減少

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

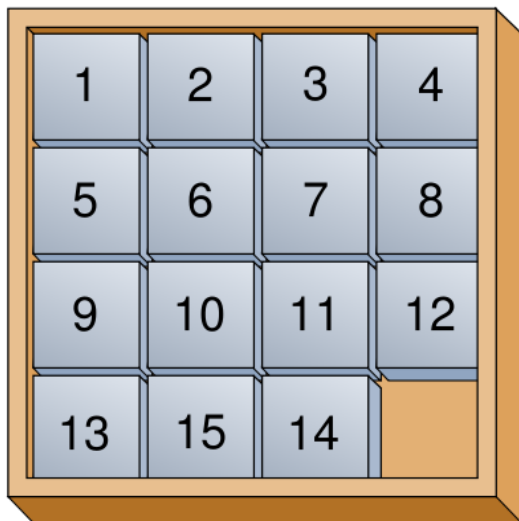
価電子帯の電子は電流に寄与しない？

価電子：原子内の最外殻をまわっている電子

価電子帯：価電子によって満たされたエネルギーバンド

絶対零度(0 K)においては、完全に満たされている。

価電子と正孔は「15パズル」をイメージすると理解しやすい。



ピースが価電子、空きが正孔である。

すべて満たされている(16枚のピースが入っている)と身動きがとれないので電流が流れない。

1枚抜く(価電子1つが励起されて伝導帯にあがる)と空き(正孔)はピース(価電子)が移動することで移動できる(電流が流れる)。

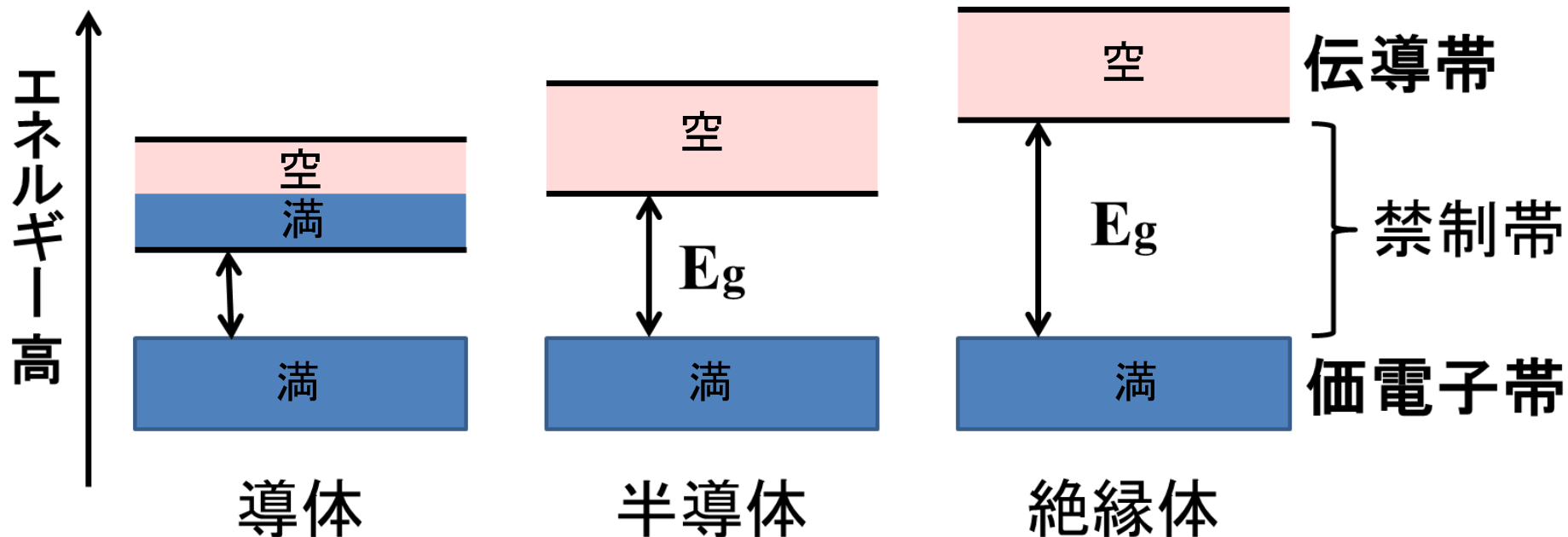
実際に動くのは価電子だが、正孔が正の電荷の粒子としてふるまうと考えてよい。

価電子は、シリコンの結晶(共有結合結晶)の共有結合をする電子

なぜ、価電子や伝導電子のエネルギーが

バンド構造になるかは、量子力学等の知識が必要

絶縁体



絶縁体は、半導体の禁制帯の幅が広すぎて
価電子帯の電子が伝導帯に励起できない物質

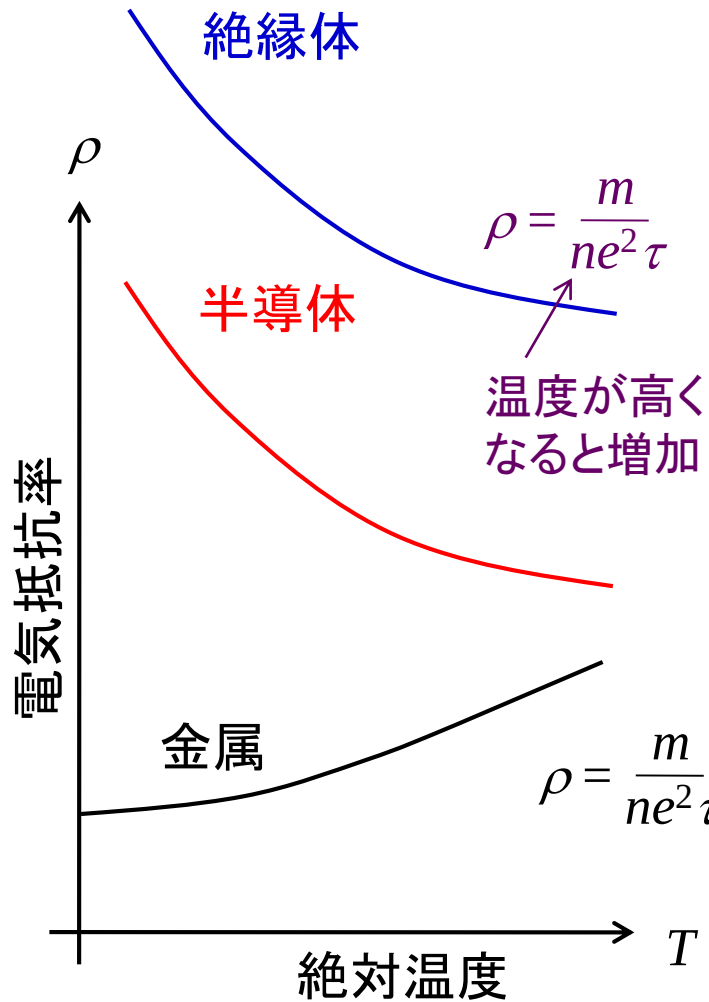
例: ダイヤモンド

ダイヤモンドは炭素からできていますが、炭素は周期表でシリコン(ケイ素)の上で
構造は先ほどのシリコンの結晶と同じです。

ただ、禁制帯の幅がシリコンの約5倍あり、ダイヤモンドは絶縁体に分類されます。

半導体・絶縁体の電気抵抗率の温度依存性

⑧



電気抵抗率は、

絶縁体：温度が高くなると **減少** する。

半導体：温度が高くなると **減少** する。

金属：温度が高くなると **増加** くなる。

温度が高くなると減少

特定の金属や化合物などの物質を非常に低い温度へ冷却したときに電気抵抗が急激にゼロになる現象。量子力学的な効果で起こる。

素材	臨界温度(K)
水銀 Hg	4.2
ニオブ Nb	9.2
液体窒素の沸点	77
YBa ₂ Cu ₃ O ₇ (YBCO)	93
ドライアイスの昇華温度	195
H ₂ S(高圧下)	203

動画参照
解説は第21章で

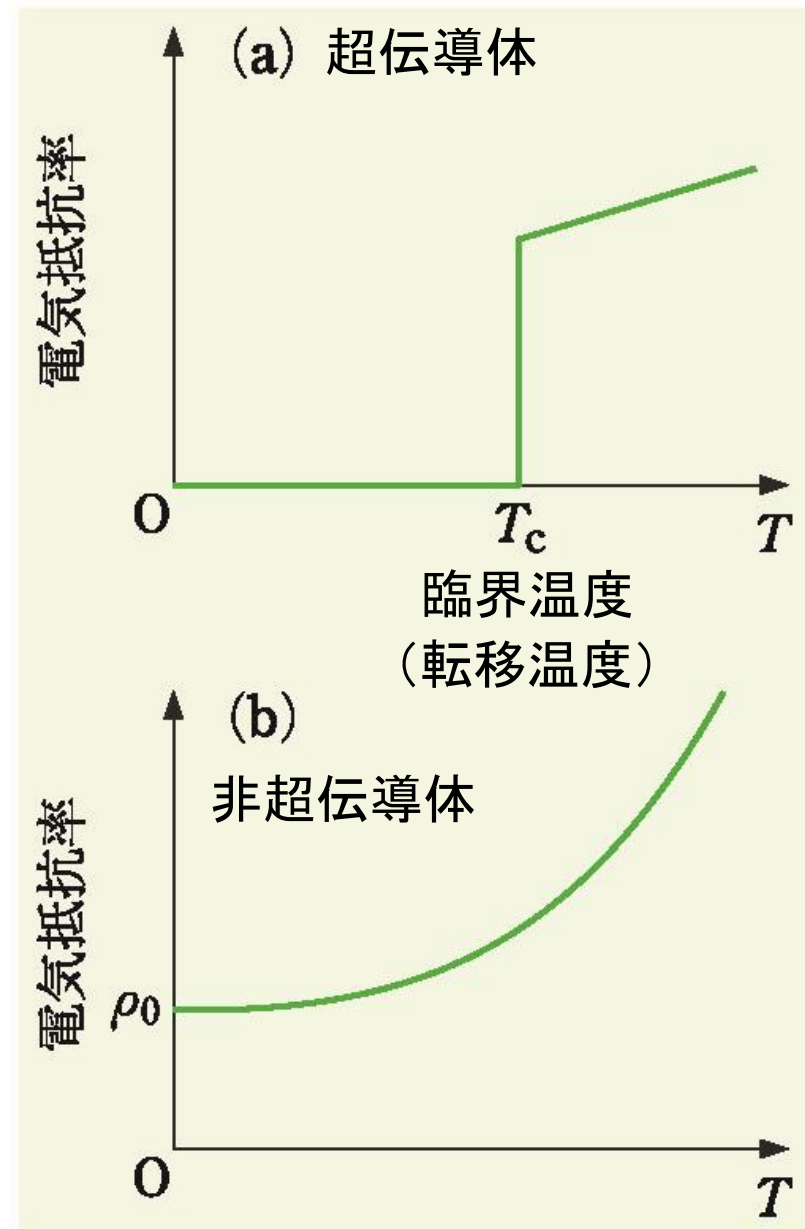


図19.13

ネオジム磁石



米村でんじろう
サイエンスフロタクション



その下に
超電導体(YBCO)

Wikipedia には以下のように記載

目撃例の多くは、赤から黄色の暖色系の光を放つものが多いとされているが、白色や青色、色の変化するものなどもあるとのこと。また、中には灰色や黒色の光が吸収されていると思われ、金属光沢のような色や、黒色のものもある。大きさは10～30cmくらいのものが多いが、中には1mを超えるものも。また、移動中の金属体を追いかける、送電線などの細い金属を蒸発させる、などの特異な性質をもつ。大抵は雷雨の時に現れているが、周辺では、全く風雨の無い状況での目撃例も存在する。その場合、20～30kmほど遠方で落雷が起きていることが多い。正体については諸説あるが、自然発生したプラズマのかたまりという説が有力。知名度の低いまれな現象なので、この現象の存在を疑う見方もある。UFOの目撃証言や、戦闘機を未確認発光体が追いかけたなどと同類の現象である可能性がある。

出席票より： 実家に落雷があったとき、しばらくTVがつかなかった。多分その夜だったと思うけど、隣の家の庭の園芸用の支柱に青白い火の玉が激しく明滅しているのを見たことがある。

(追加)色は青白～紫色で雷電とほぼ同じ色だったと思います、大きさは直径10cm程度でかなり激しく明滅していました。音は聞こえなかったと思います。持続時間ははっきり覚えていませんが、20秒くらいだったと思います。

他、写真、動画参照

私の妻も目撃者です。





大槻義彦著「火の玉を見たか」より: その不幸な出来事は、1753年ペテルスブルク科学アカデミーで起こった。リッチマンとその助手ソコロフという二人の研究者が、部屋から導線(鉄の棒)を出し、雷放電の観測をしていた。そのとき、雷雲から約10センチの薄い青い色をした火の玉が降りてくるのを、ソコロフと路上にいた人が気付いた。火の玉はリッチマンが手に持って外に突き出している鉄棒に沿って動き、彼の顔にあたった。その瞬間、大砲のような音がとどろき、ソコロフは気を失った。気がつくともリッチマンはすでに死んでおり、あたりに刺激的な匂いと煙がただよっていた。





