

Q & A

Q: テストは電卓持ち込みありですか。

A: 持ち込み不可です。電卓が必要なくらい複雑な計算問題は出しません。

Q: レポート提出の期限はいつぐらいか教えて下さい。

A: 期末試験の始まる2週間くらい前にする予定です。

Q: 高校では、電流の強さを $I = nevA$ ではなく $I = envS$ (エンブス) と習いました。なぜ断面積を S でなく A で表すようになったのでしょうか？

A: 面積の記号は教科書によっていろいろで S や A が多いですが特に決まりはありません。

Q: $I = nevA$ だとすると、原子の範囲だと $h\nu = \frac{1}{2} m\nu^2 + e\phi$ の ν は電流ということですか？

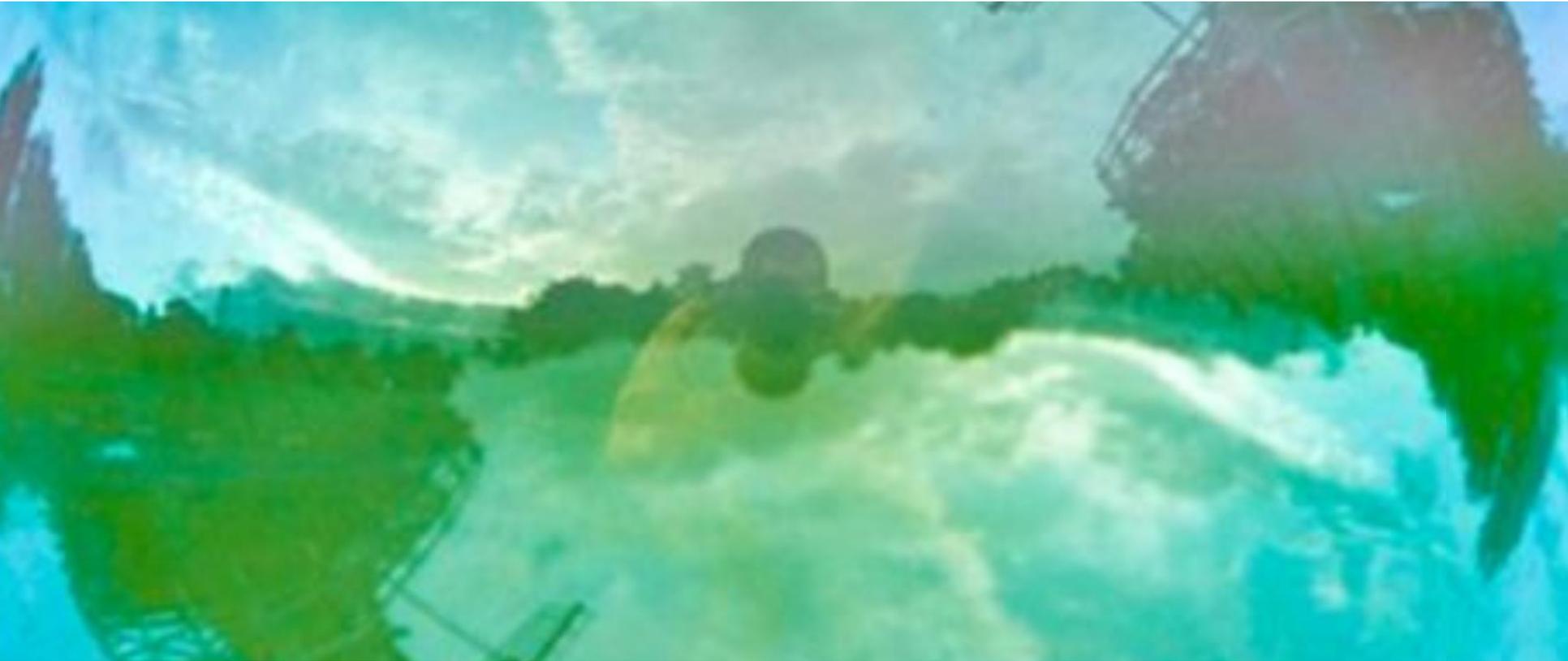
A: $h\nu = \frac{1}{2} m\nu^2 + e\phi$ は光電効果の式ですね。物理実験でやった人もいますかと思いますが。光電効果は教科書の309ページに載っています。質問の ν は、光電効果で飛び出してくる電子の速度であり、単位も m/s で電流ではありません。その意味では、 $I = nevA$ の中の ν と同じものです。

Q: 正イオンと陽イオンは同じですか？

A: 物理学、化学物理学の分野では、気相のイオンに対して陽イオンの代わりに正イオン、陰イオンのかわりに負イオンが多く用いられるようです。

Q: シャボン玉にはカメラマンは写らないのですか？

A: 写っています。きれいなシャボン玉を撮ることを目的にしているので、目立たないようにしています(遠くから望遠で撮る等)。後から画像を加工してカメラマンを消しているものもあるようです。

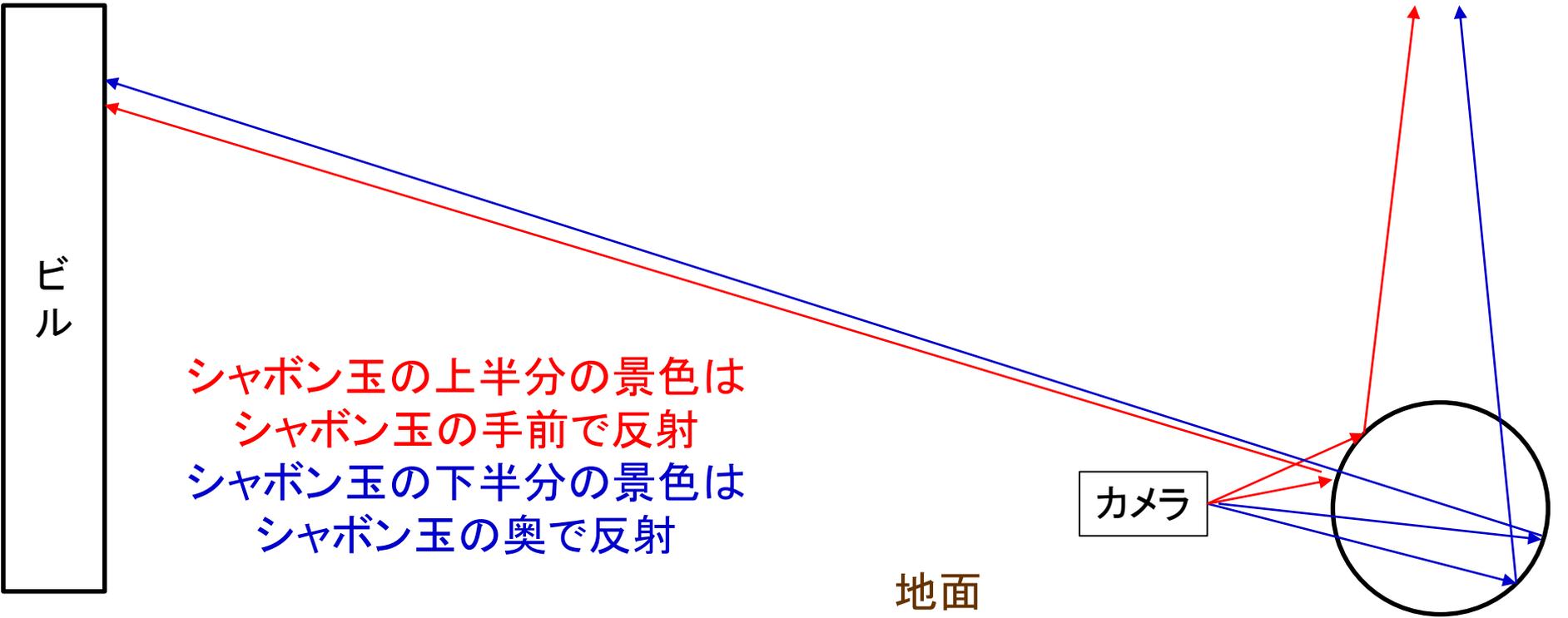


Q: シャボン玉の話について、なぜ上が手前、下が奥で反射するのでしょうか。逆の組み合わせではだめなのですか？

A: 手前でも奥でも、上(空側)も下(地面)も反射しています。地面は上(空側)に対して暗いので、目立たないだけです。風車の写真の例では、風車の部分は暗いので、地面が写っています。



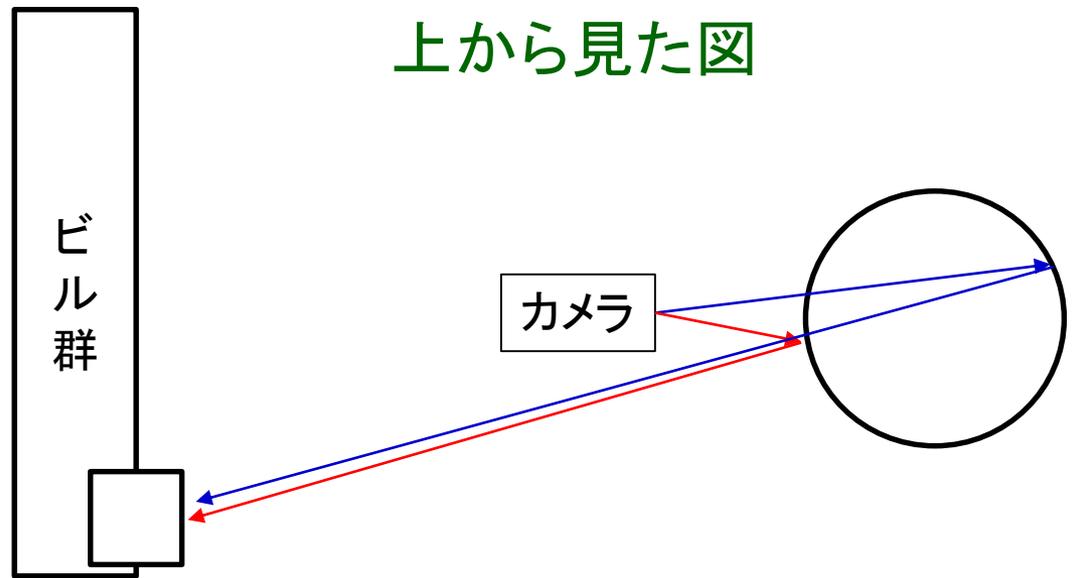
横(水平方向)から見た図



シャボン玉の上半分の景色は
シャボン玉の手前で反射
シャボン玉の下半分の景色は
シャボン玉の奥で反射

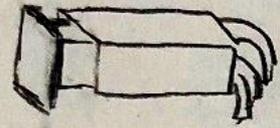
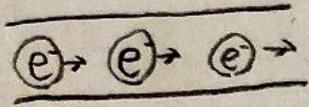
上から見た図

シャボン玉の上半分の景色は
右にあるものは右に映る
シャボン玉の下半分の景色は
右にあるものは左に映る



分けて考える必要があつたので混乱した。

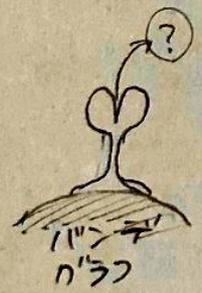
電子の流れは遅いが、回路をつなぐと光速で電流が流れることについて、
どこかで電子の流れは ところてんのようなものだ と聞いたことを思い出しました。



A: 電子の速さは遅く、信号の伝わる速さは速いということをうまく説明していますが、
細かい話をすると、ところてんを押したときにその動作が伝わる速さは、ところてん中
の音速です。電子の場合は電場の変化が伝わる速さで光速です。

今さらな質問ですが、凹部がとがったアンテナを置いてもコロナ放電は

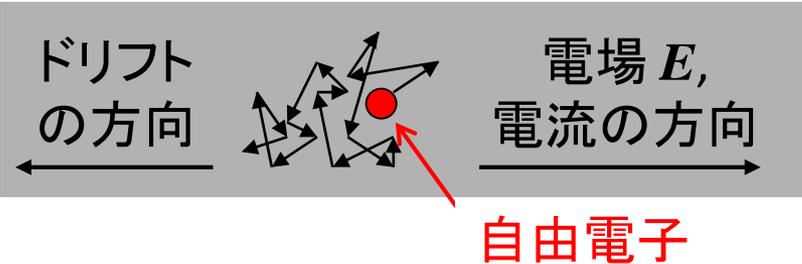
起こりませんか？



A: おもしろい質問ですね。凹部がとがったと表現されていますが、とがっているのは
空気のほうです。?の部分の電場や電位を考えてみると、図のハート型の物体は導
体なので、その表面は等電位です。ですので?の周囲の凹んだ部分の空間
は、ほぼ等電位で大きな電場はありません。よってコロナ放電は起こりません。

抵抗を微視的なレベルで考察してみると...

導線



自由電子に働く力： $F = qE = -eE$
 自由電子の運動方程式： $ma = -eE$

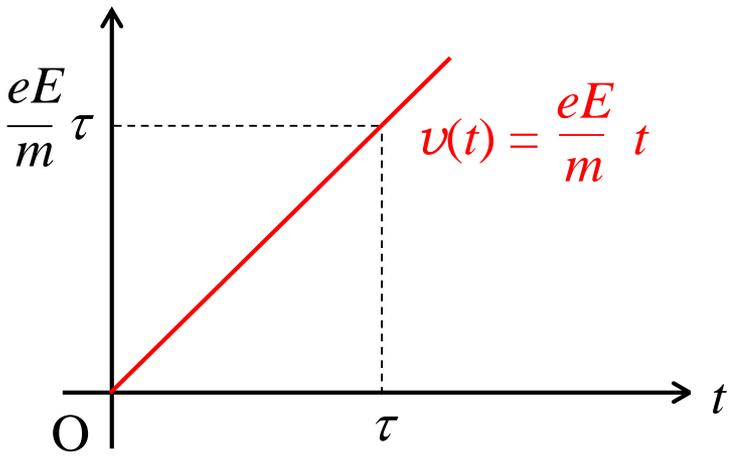
自由電子の加速度： $a = -\frac{eE}{m}$

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

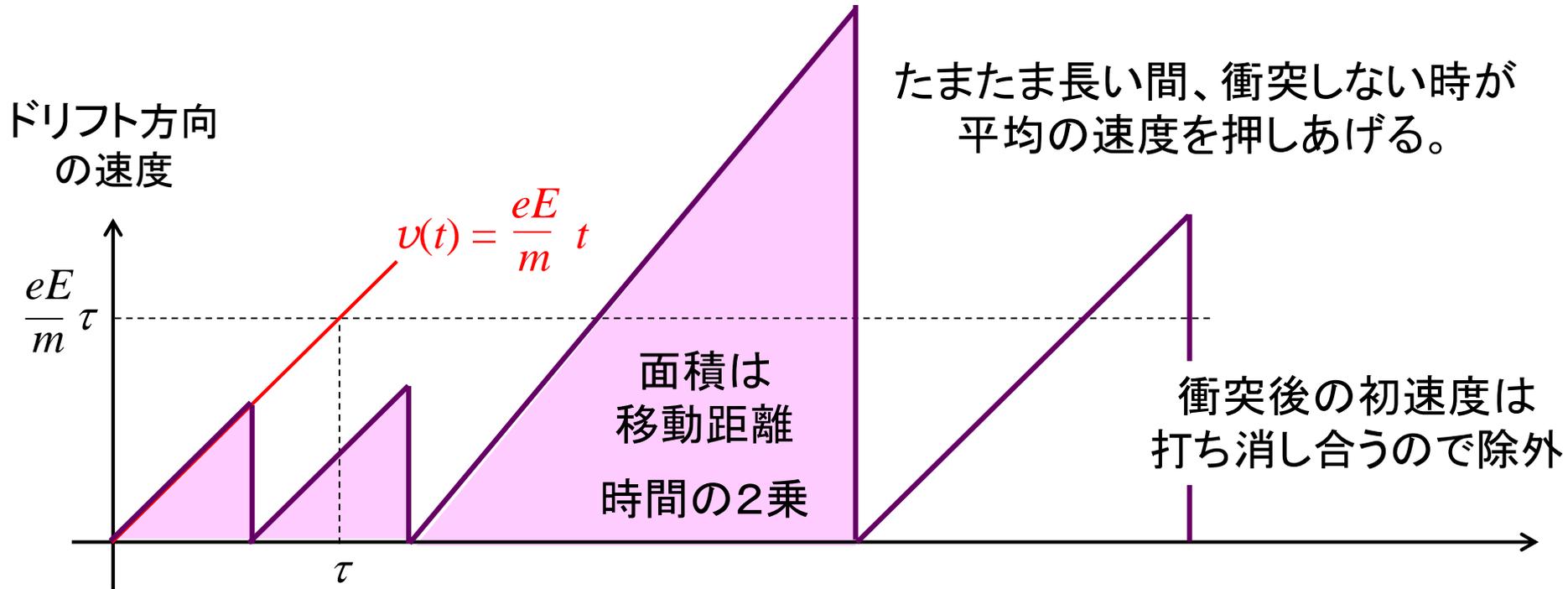
$$\bar{v} = a\tau = -\frac{e\tau}{m} E$$

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...



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
 $2 \times$ 平均の2乗 = 2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...

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

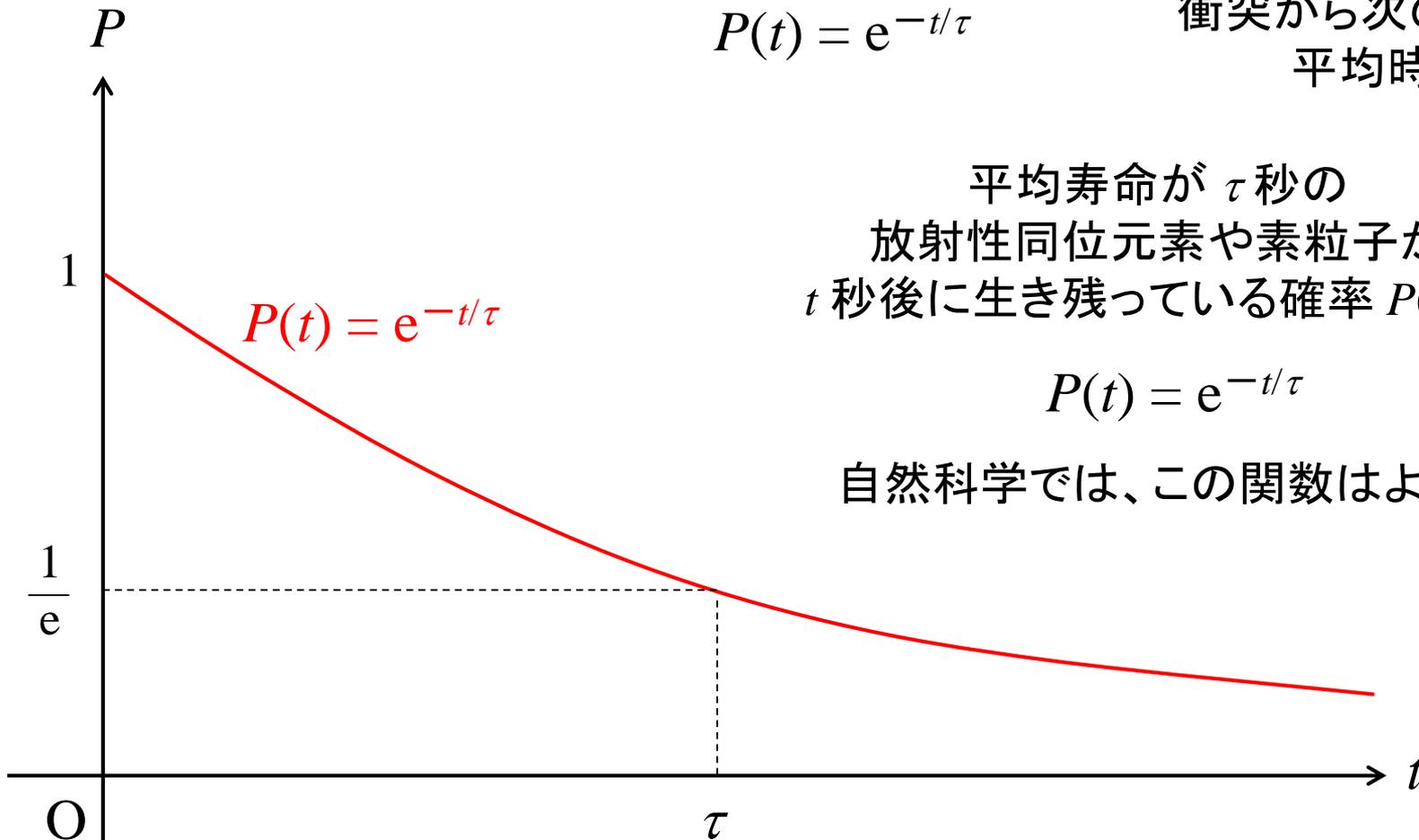
$$P(t) = e^{-t/\tau}$$

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

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

自然科学では、この関数はよくでてきます。



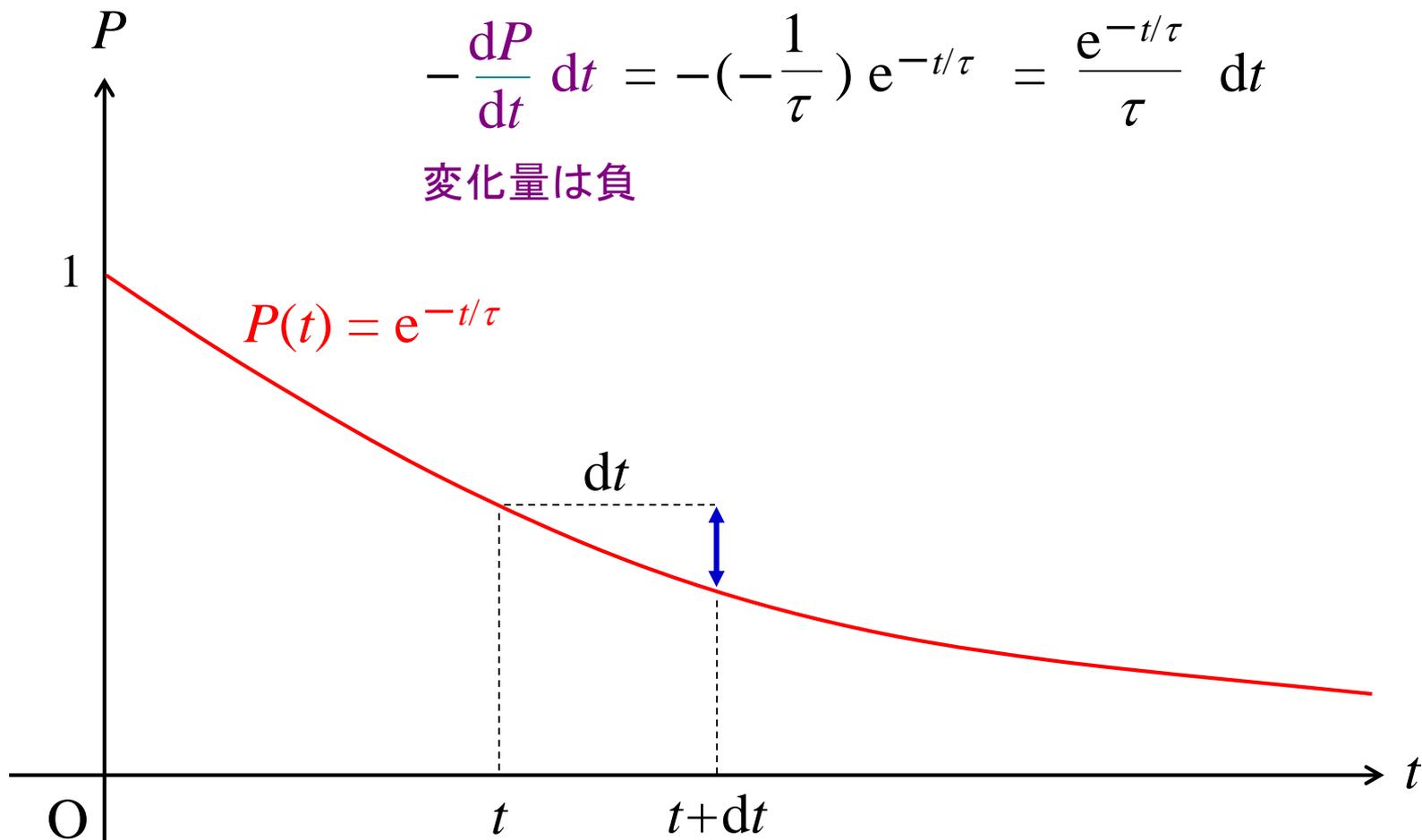
衝突をしないで走り続けている確率 $P(t) = e^{-t/\tau}$

時刻 t と $t+dt$ の間に衝突する確率(正の値)は

時刻 t と $t+dt$ の間の $P(t)$ の減少量(正)は、

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

変化量は負



(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) は確かに τ になっている。

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

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

加速度

衝突の間に飛ぶ平均距離は

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

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) = 加速度 $\times \tau$

本題に戻って...

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

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

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

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

定数

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。

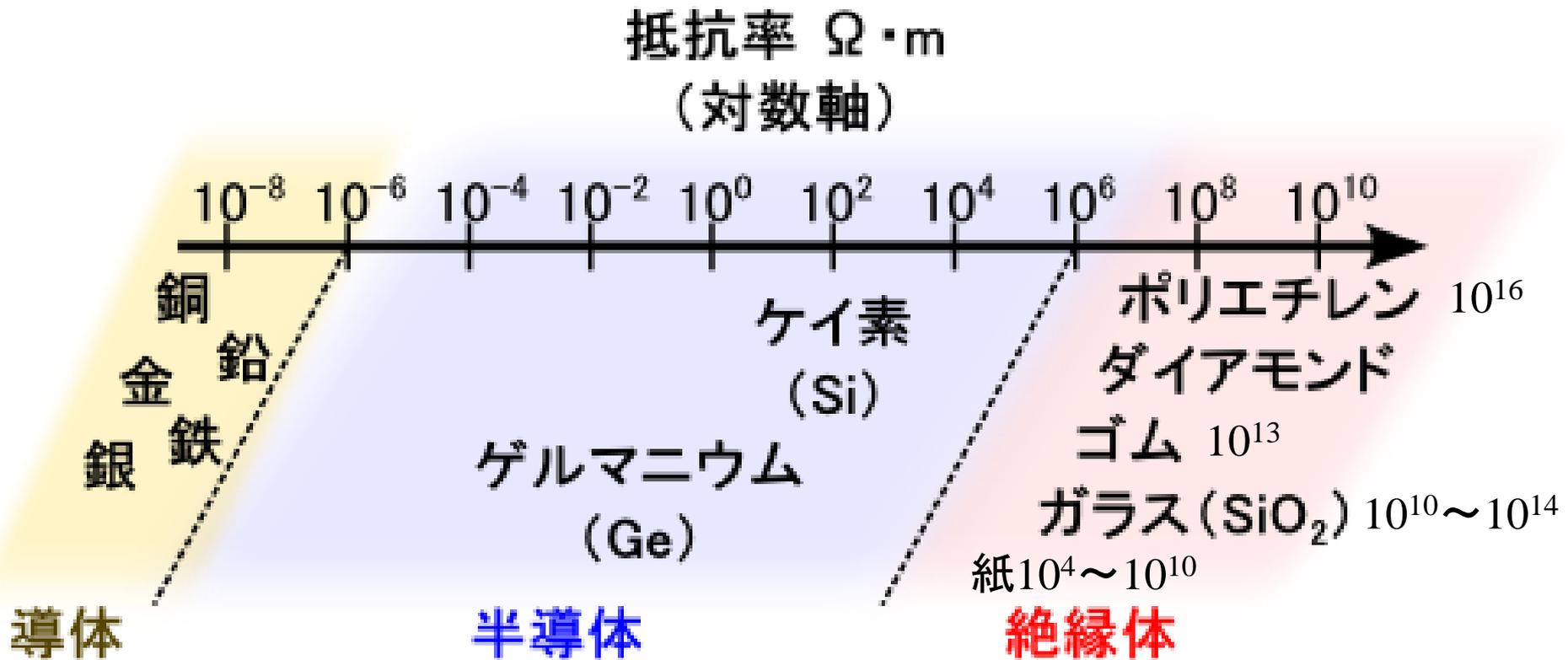
問題：銅の場合の τ を計算せよ。電子の質量 $m = 9.1 \times 10^{-31}$ kg, n は 10^{29} とせよ。⑦

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

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

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

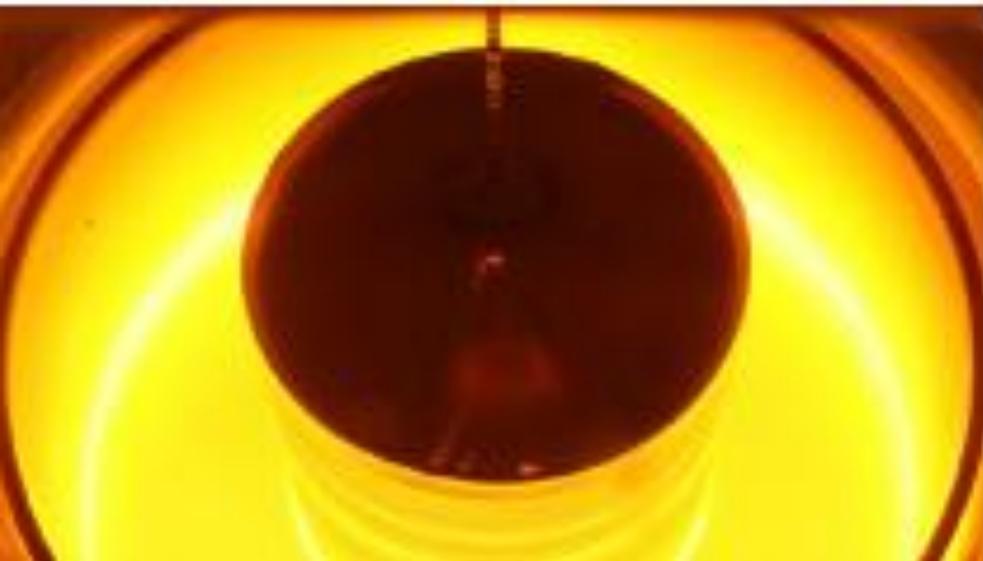
導体・半導体・絶縁体の電気抵抗率

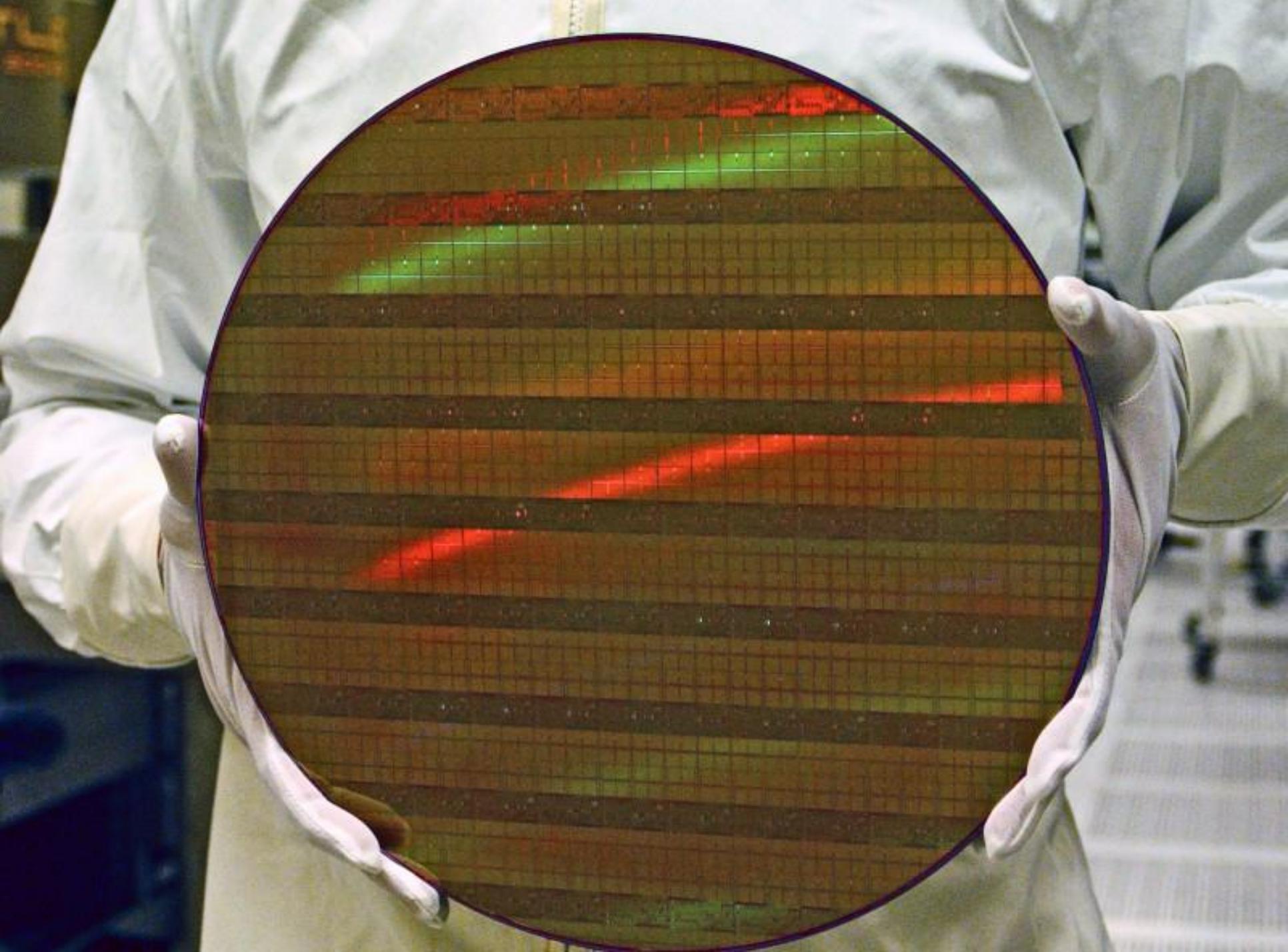


<http://www.maroon.dti.ne.jp/koten-kairo/index.html>

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



自由に動きまわれる
自由電子(伝導電子)

伝導帯(電子無し@ 0 K)

励起

禁制帯

電子は禁制帯の
エネルギーを取れない

価電子帯
(電子がつまっている@ 0 K)

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
→ ρ は減少

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

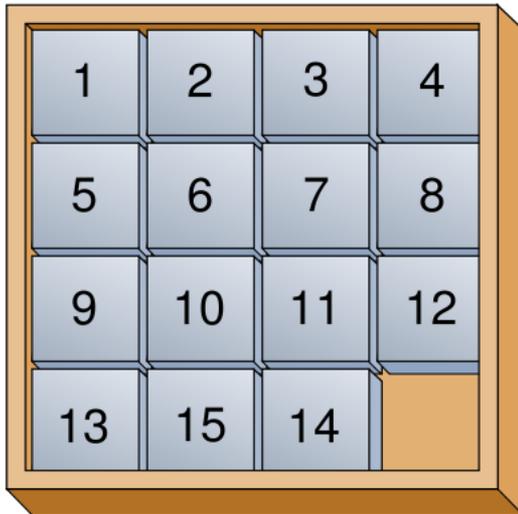
価電子帯の電子は電流に寄与しない？

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、価電子帯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。

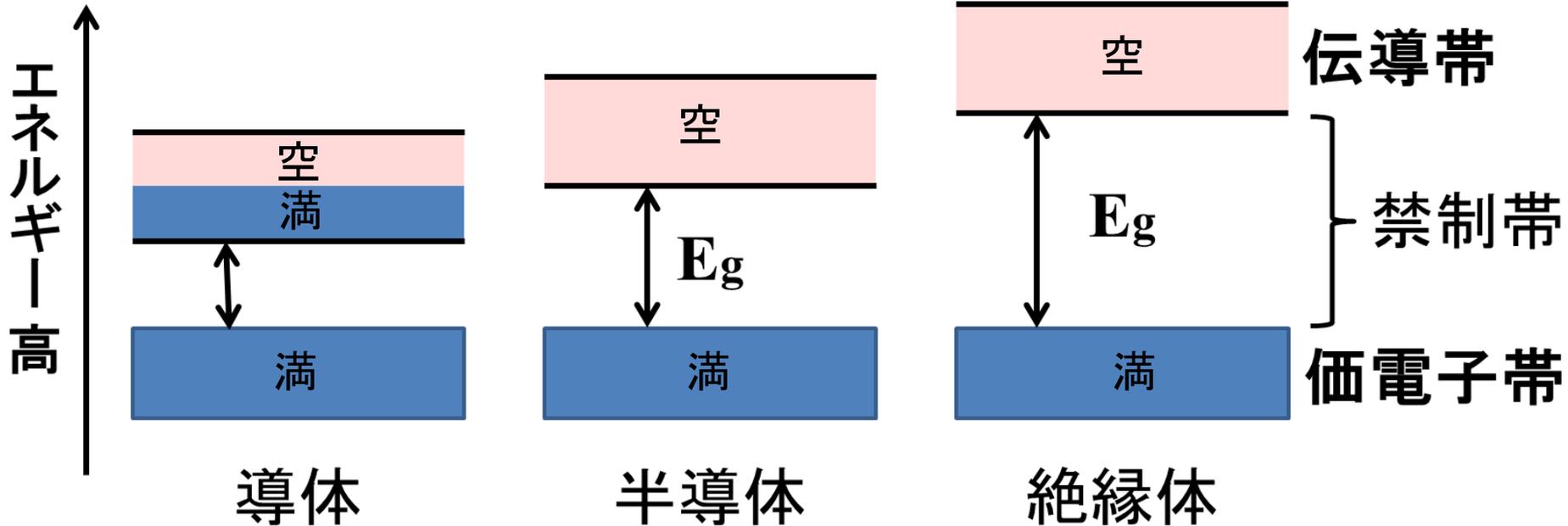
すべて満たされている(16枚のピースが入っている)と身動きがとれないので電流が流れない。

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



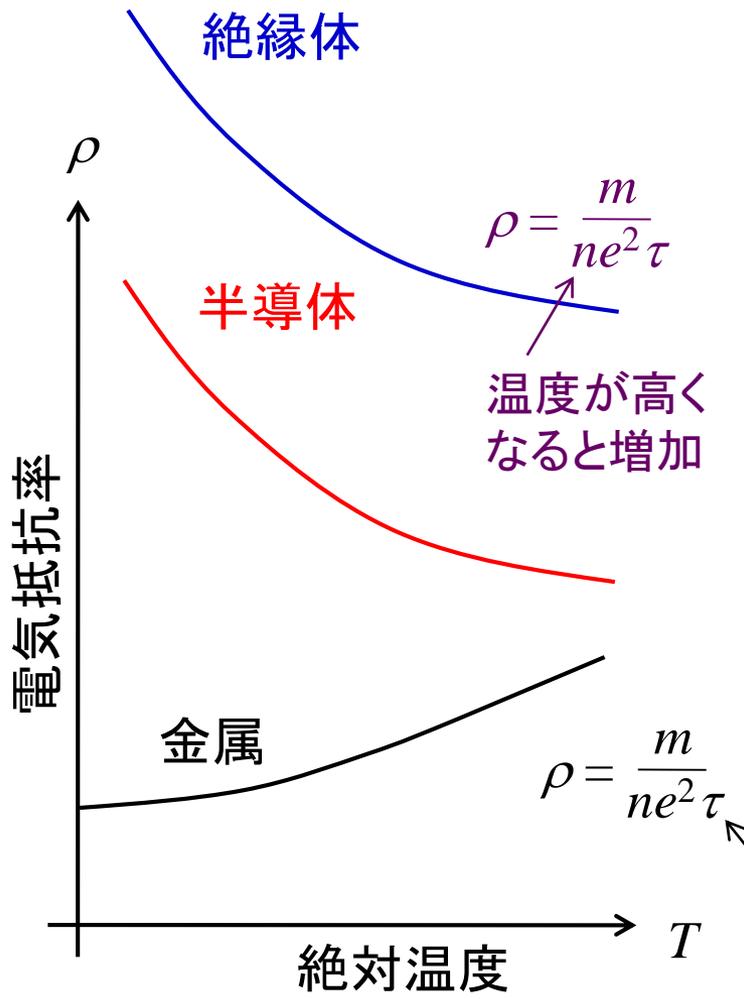
絶縁体は、半導体の禁制帯の幅が広すぎて
価電子帯の電子が伝導帯に励起できない物質

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



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

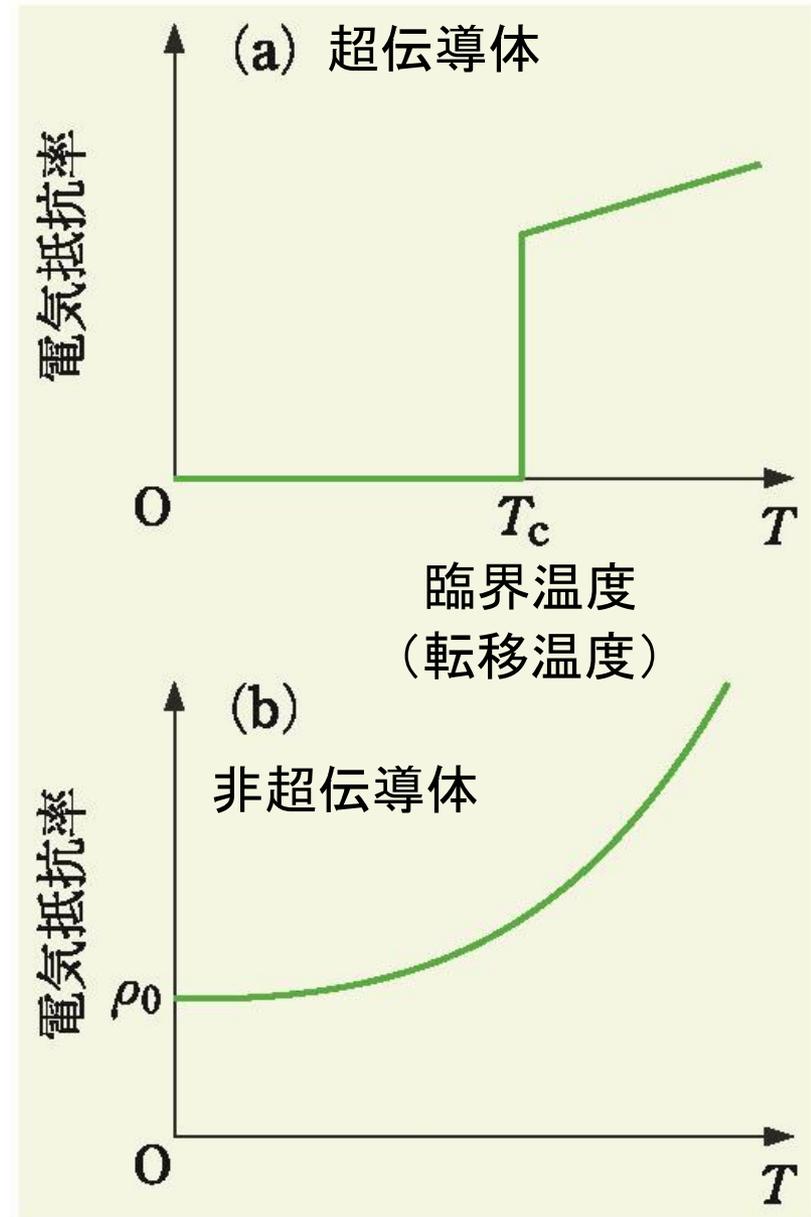


図19.13

ネオジム磁石



宋村でんじろう
サイエンスフロダクション



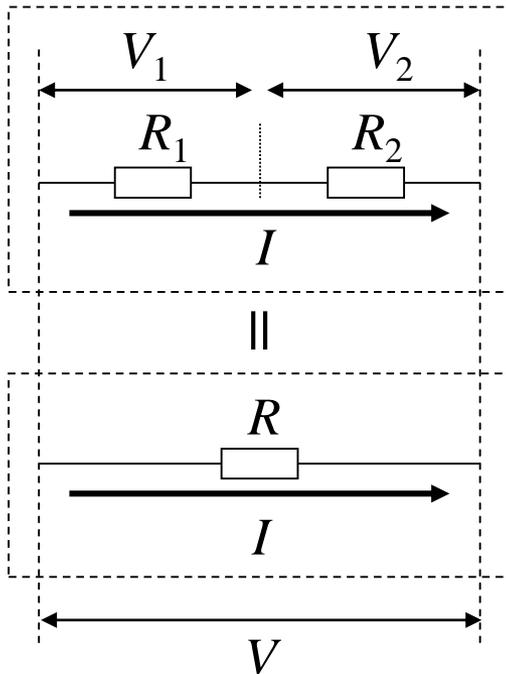
その下に
超伝導体 (YBCO)

回路

: 電流の流れる通り路

抵抗の接続(合成抵抗)

直列接続



上の2つの抵抗を
大きさ R の一つの
抵抗と考える

$$\text{上: } V = V_1 + V_2 = R_1 I + R_2 I = (R_1 + R_2) I$$

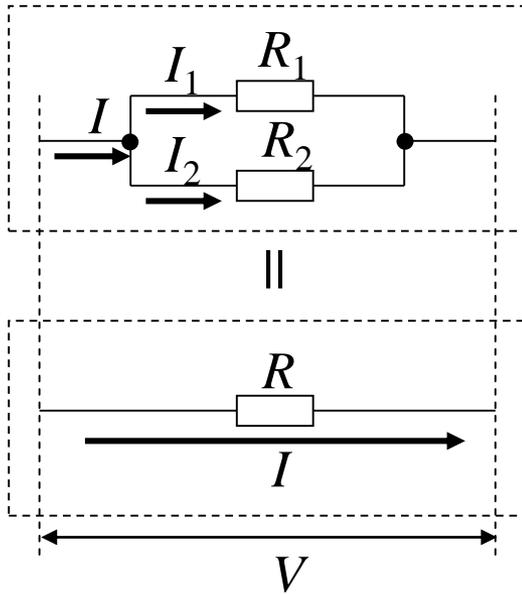
$$\text{下: } V = R I$$

上下比較すると...

$$R = R_1 + R_2$$

3つ以上の直列の場合

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$



上の2つの抵抗を
大きさ R の一つの
抵抗と考える

$$\text{上: } I = I_1 + I_2 = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) V$$

$$\text{下: } I = \frac{1}{R} V$$

上下比較すると...

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

3つ以上の並列の場合

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \dots$$

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。





