

電子工学02

津山工業高等専門学校情報工学科 講師
電気通信大学先進理工学科 協力研究員
藤田一寿

真空の中の電子

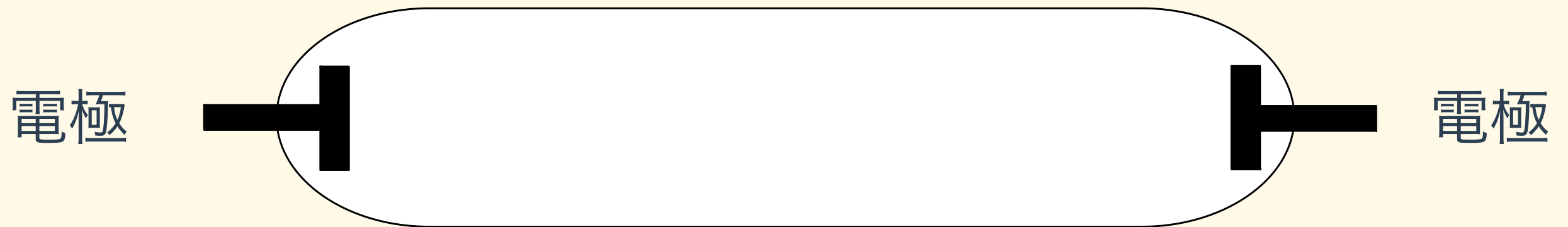
電子ってなんだ

- ▶ 負に帯電した粒子
- ▶ 粒でもあり，波でもある？
- ▶ 常識では考えられない振る舞いをする
 - ▶ 壁をすり抜ける

これから電子とは”なに”かを
追求していく

真空放電（低圧気体放電）

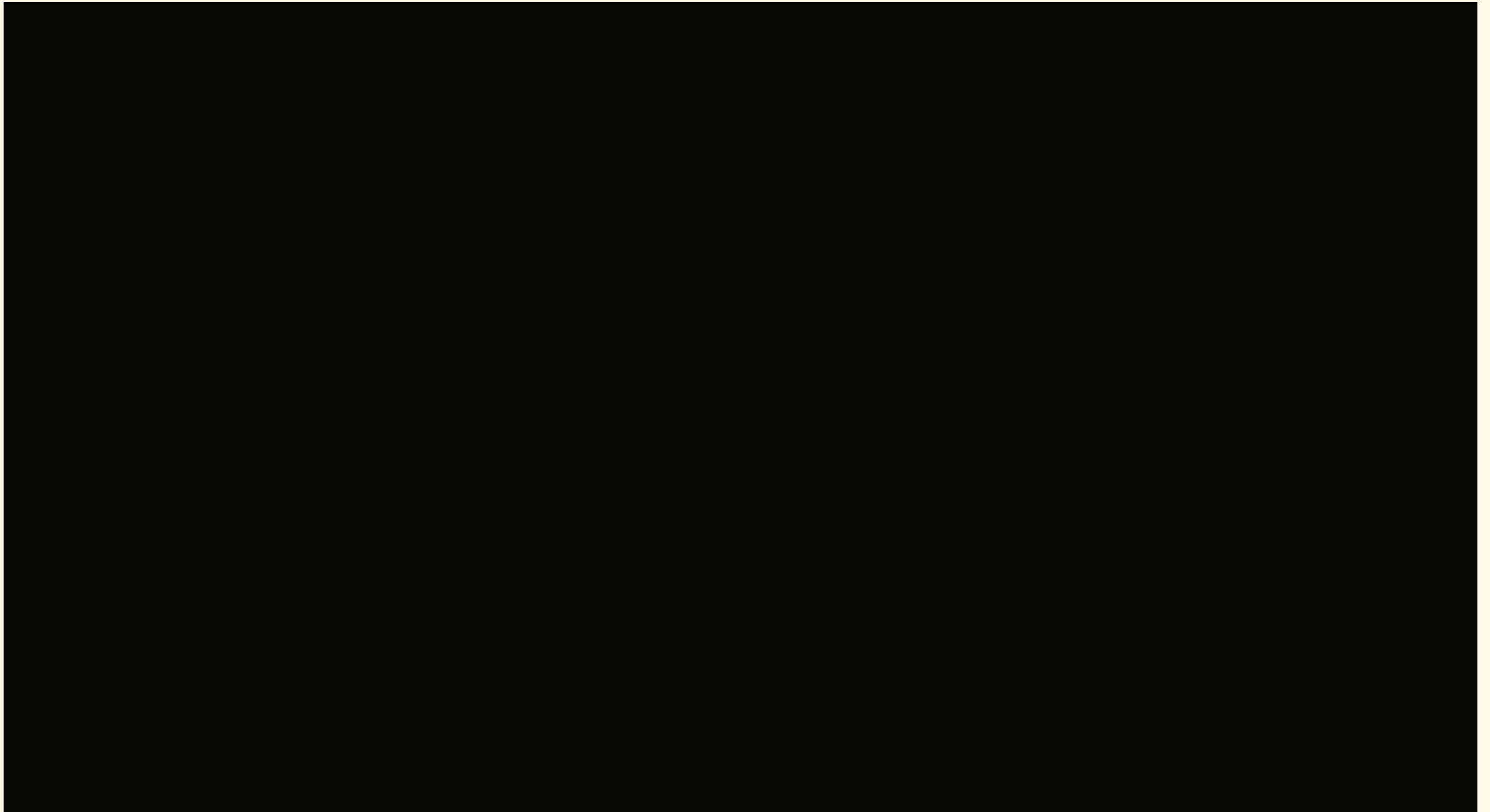
ガラス管内の空気を抜いていき、電極に高電圧をかけると、光を発する



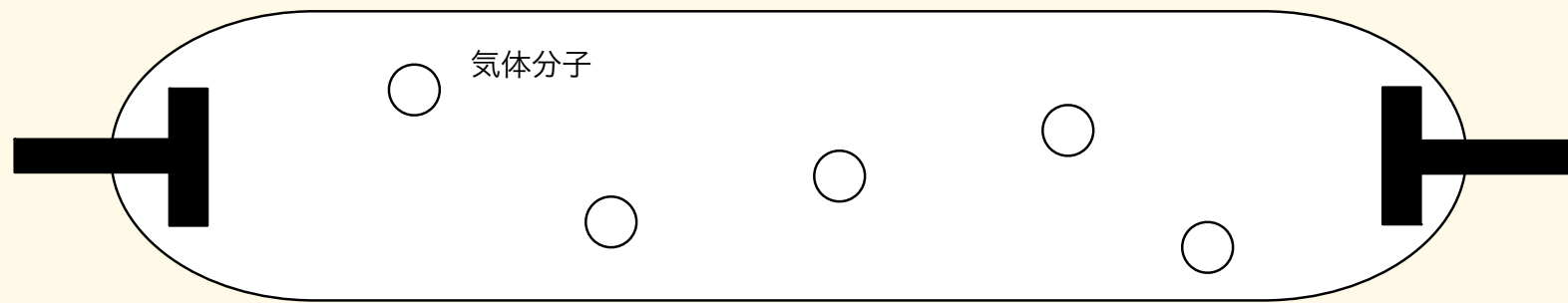
真空とは

- 周りより気圧を低いこと
- 気圧がより低いことを真空度が高いともいう

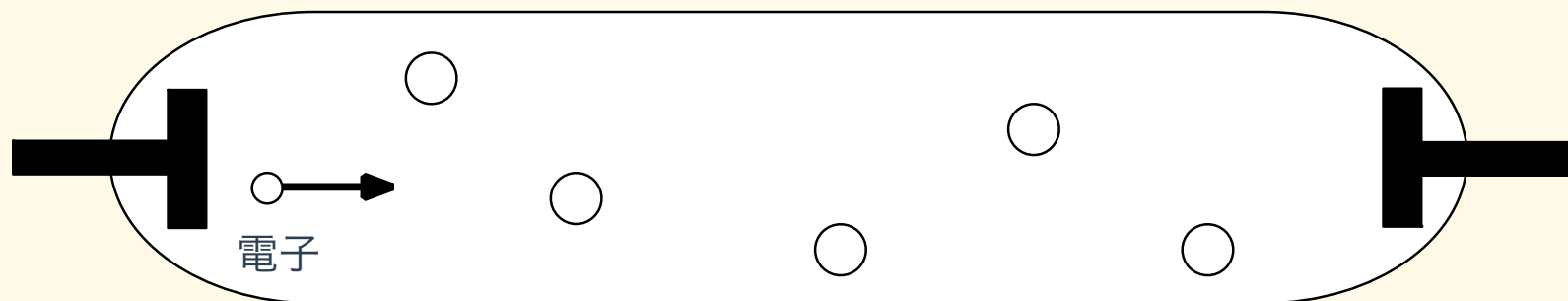
真空放電



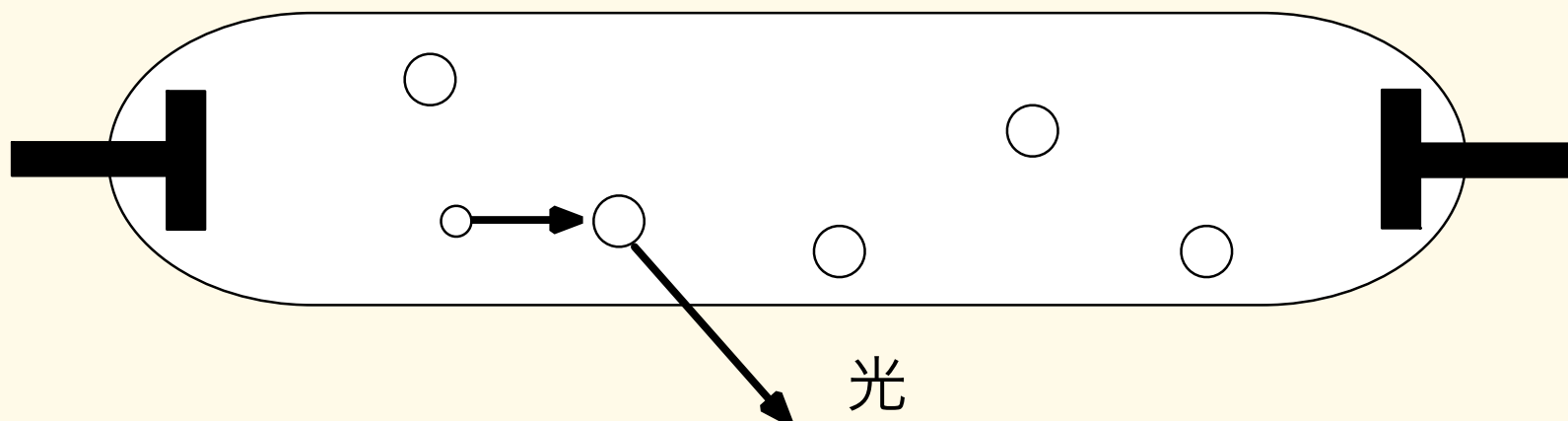




ガラス管内には気体分子がある



電極間に電圧をかけると、電極から電子が出てくる



電子が気体分子とぶつкаると光を発する

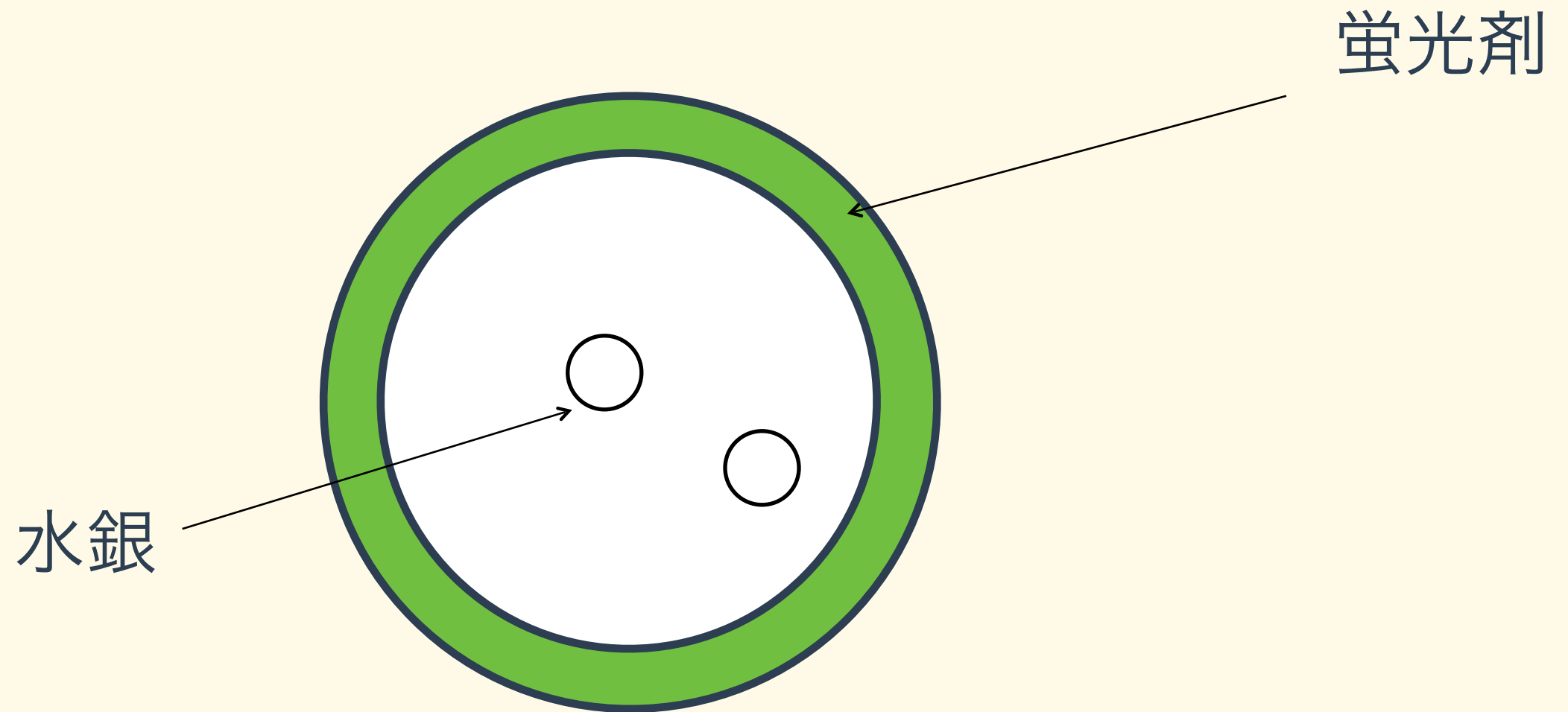
蛍光灯

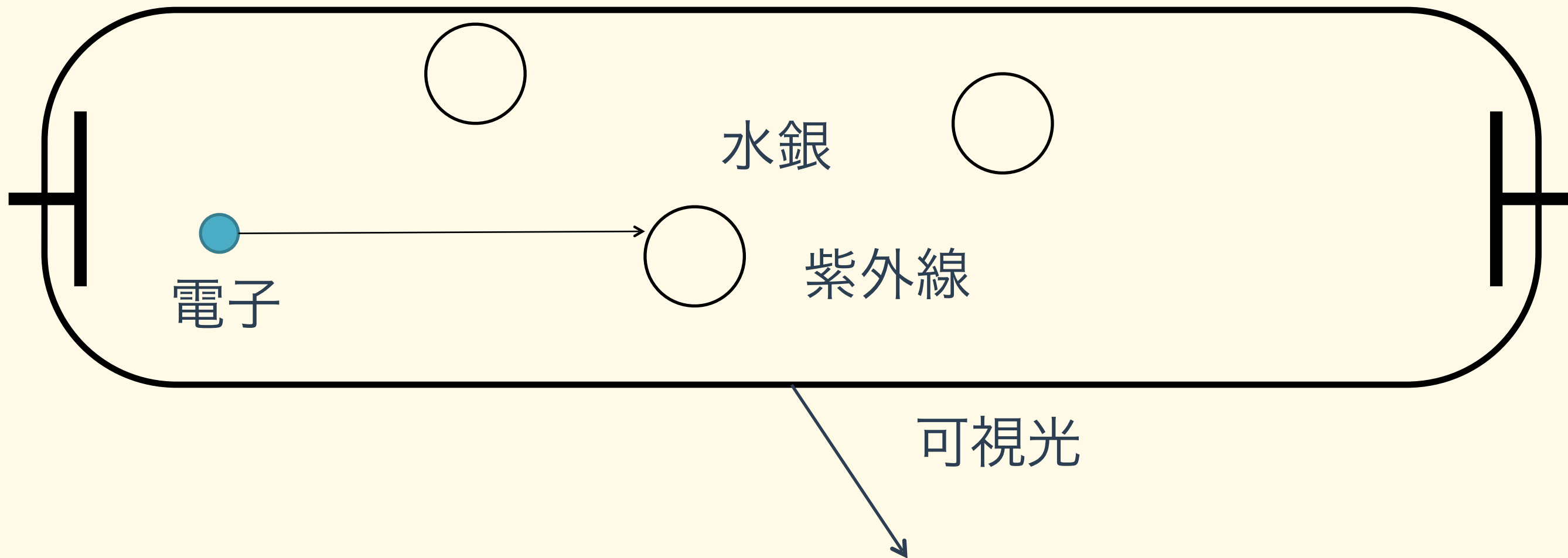
- ▶ 真空放電の応用例
- ▶ 電子が水銀の気体にあたり発光することで光る



蛍光灯の構造

- ▶ ガラス管の内側に蛍光剤を塗っておく
- ▶ ガラス管の中に低圧の水銀の気体を入れる





- ▶ 真空放電で紫外線が出る
- ▶ 紫外線がガラスに塗ってある蛍光剤にあたり、
蛍光剤から可視光が出る

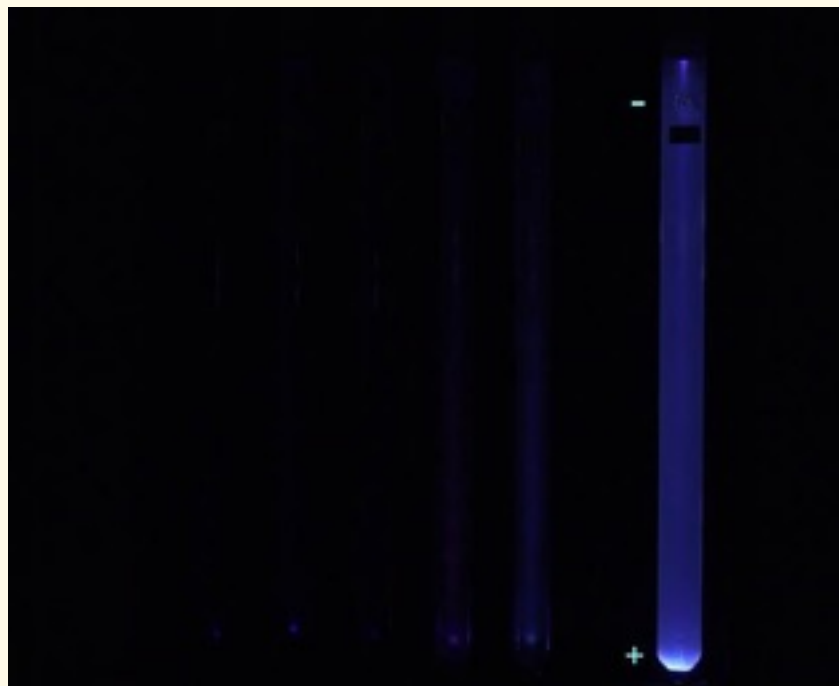
ネオン管

ガラス管の中に低圧のネオンを入れ真空放電させる

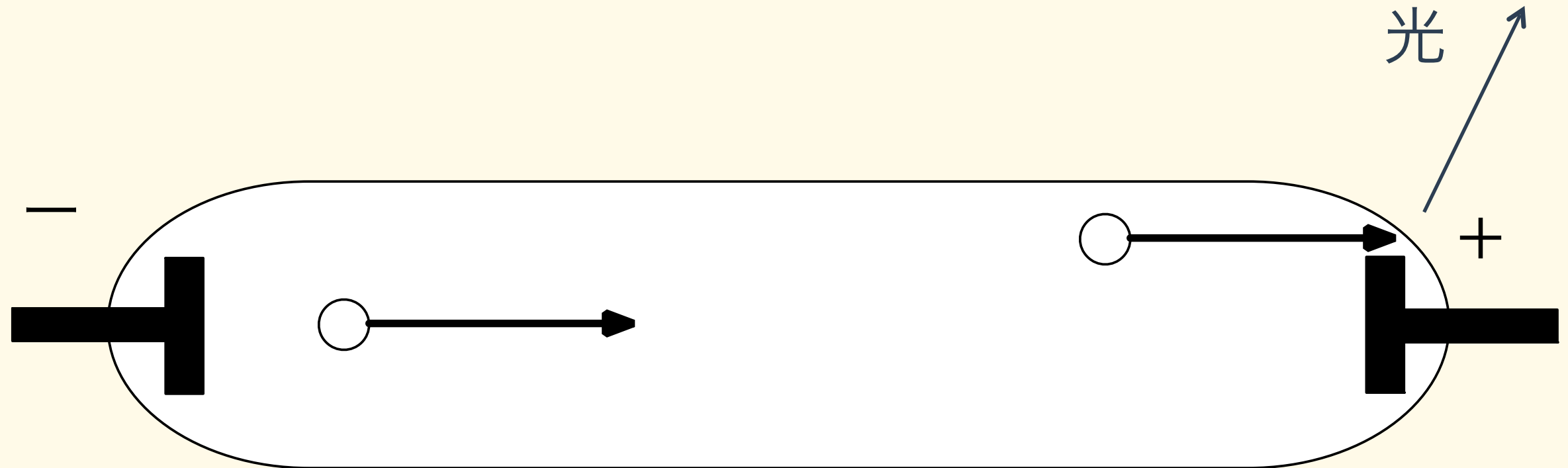


陰極線

- ▶ 真空度が高いと、ガラス管全体の発光が治まってくる
- ▶ しかし、正極側のガラス壁が発光する
- ▶ このような、放電管での負極からでて正極への電子の流れを陰極線という

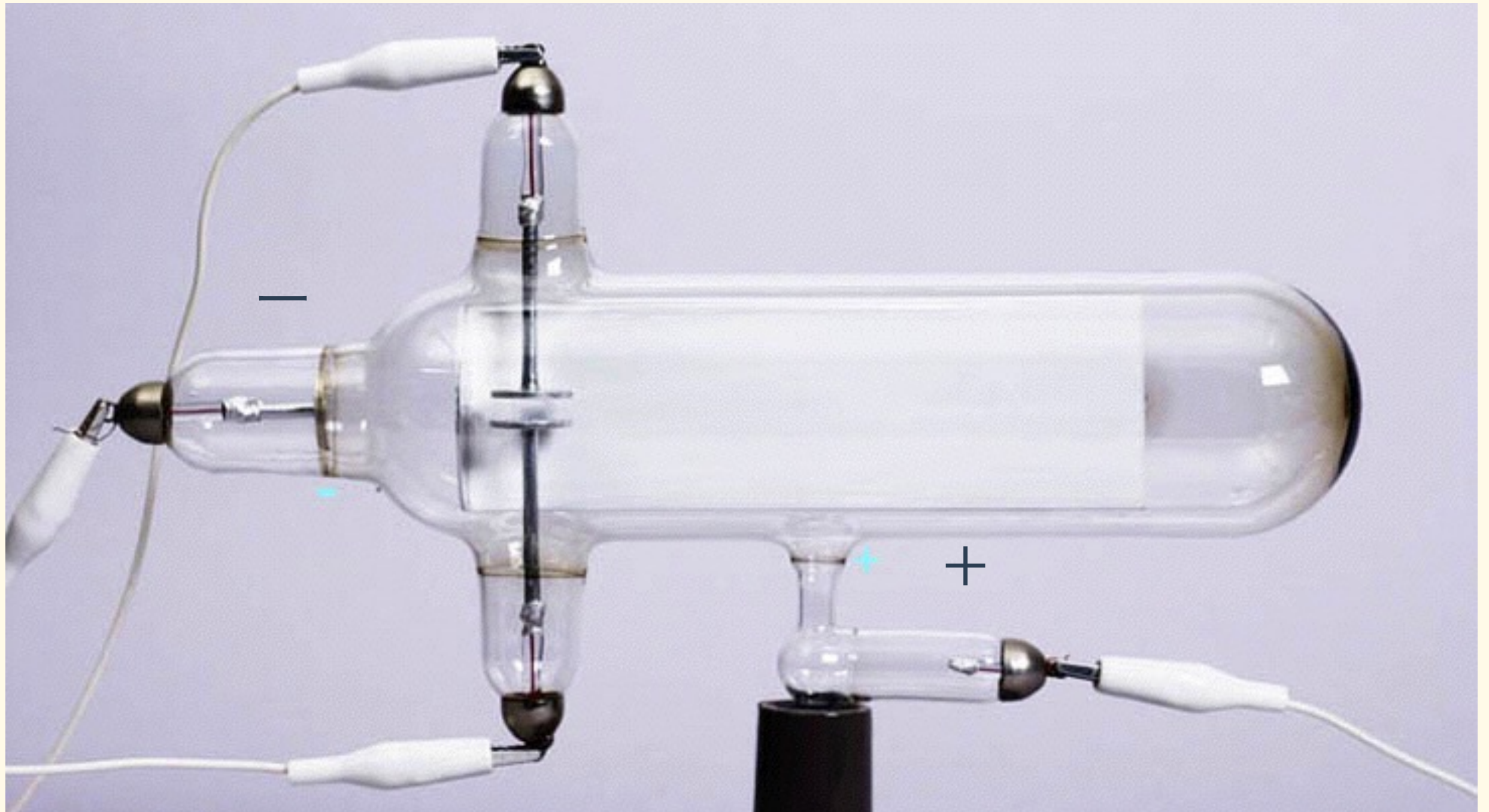


なぜ光るのか

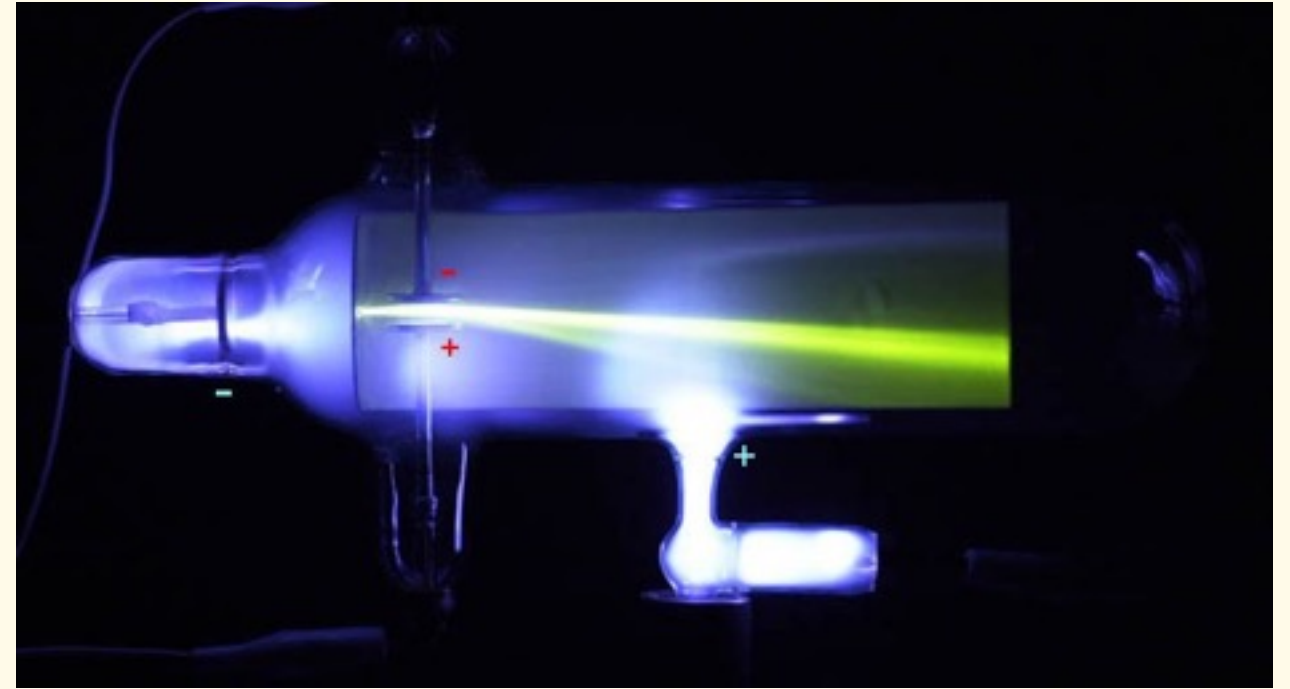
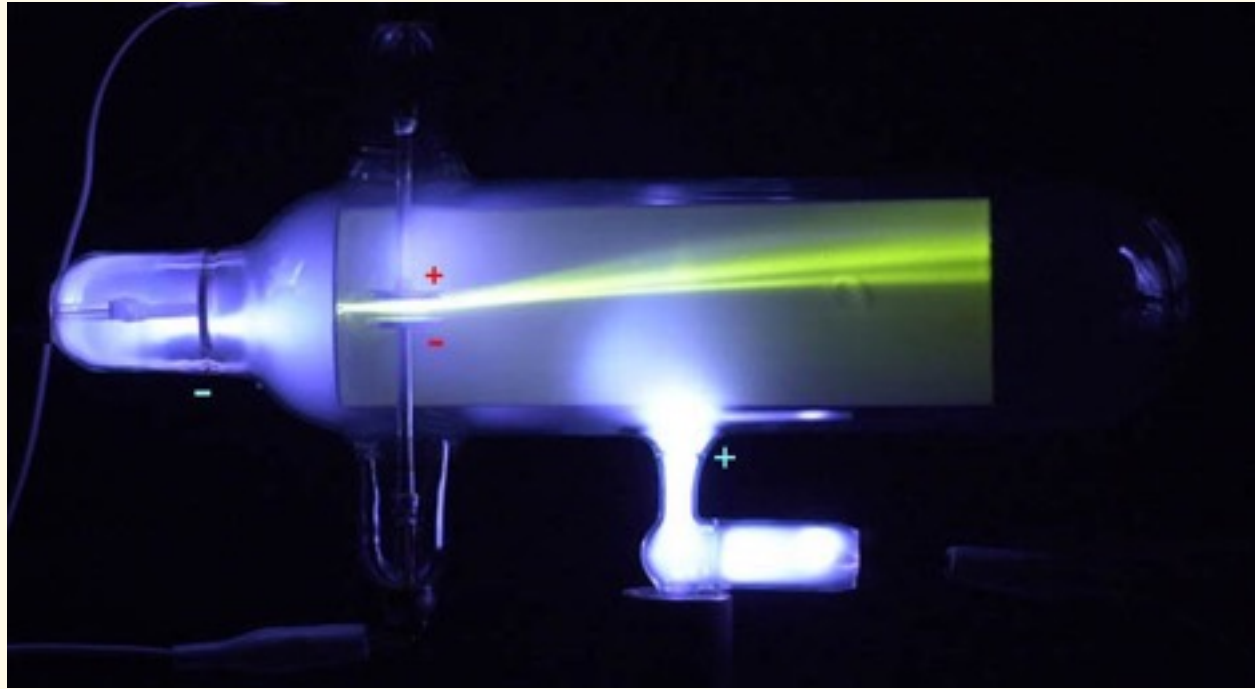


負極（一極）から出た電子は、直進しガラス管にぶつかり光が出る

陰極線は電場で曲がる

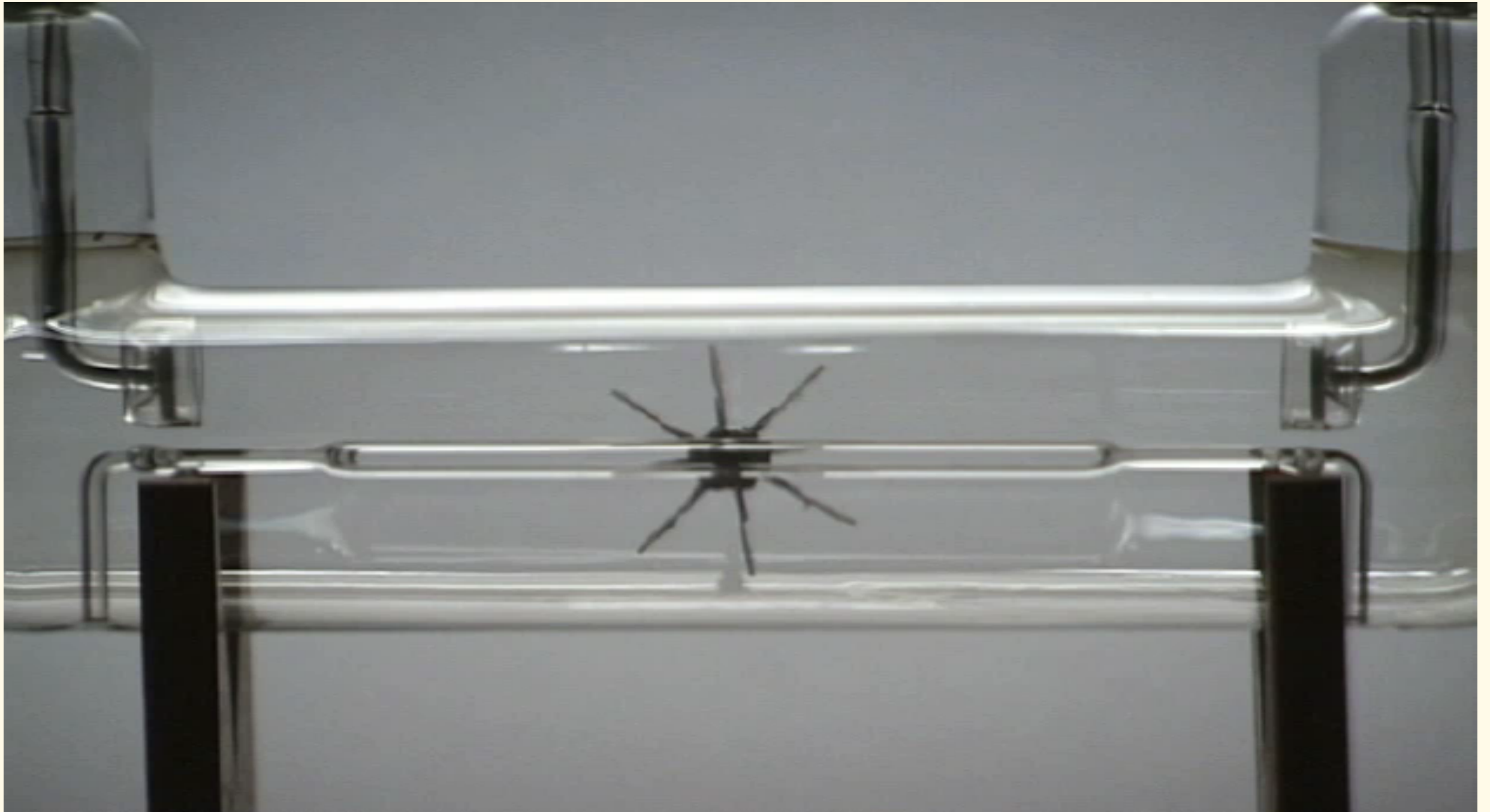


電場の影響



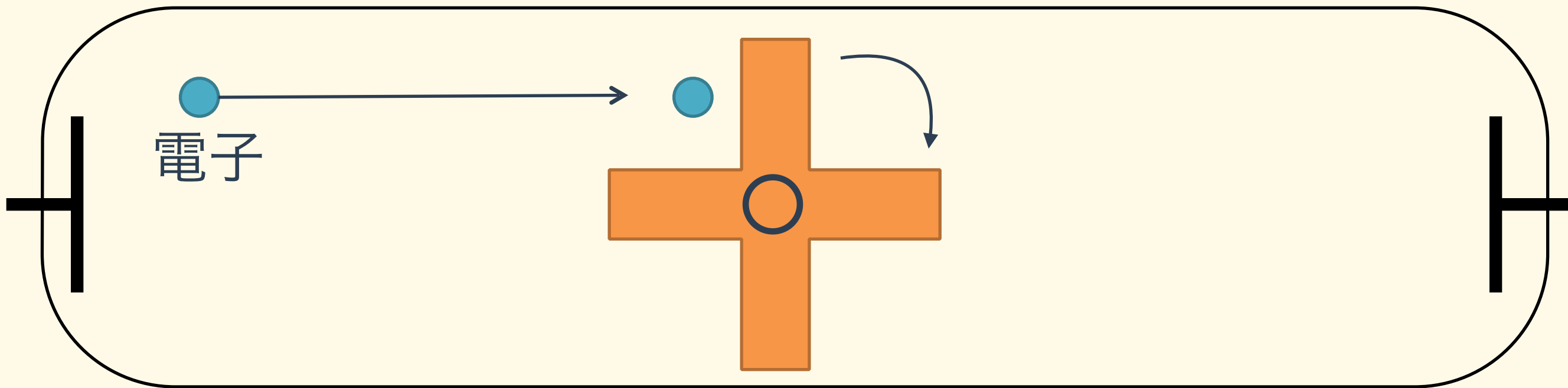
＋に引き寄せられて曲がる。つまり、陰極線はマイナスの電気的な性質を持っている。

陰極線に重さはあるのか



なぜ羽が回るのか

電極から出た電子が羽を押す

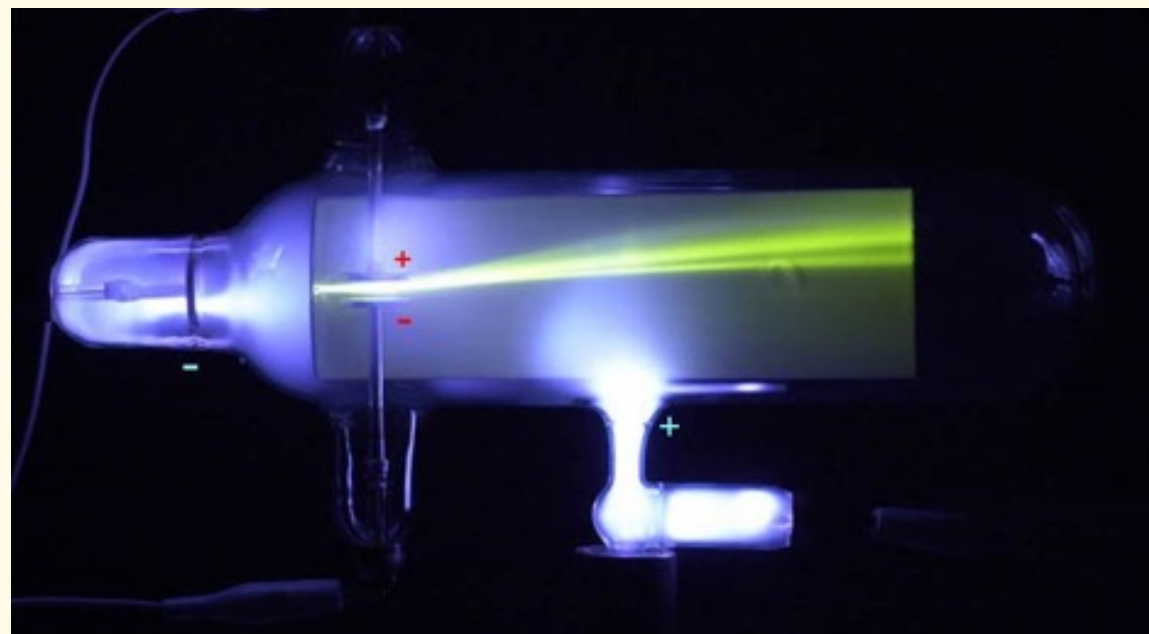


羽を押すことができる電子は、質量を持っているのではないか。

注意: 力を与えられるからといって質量があるとは限りません。光は質量0です。

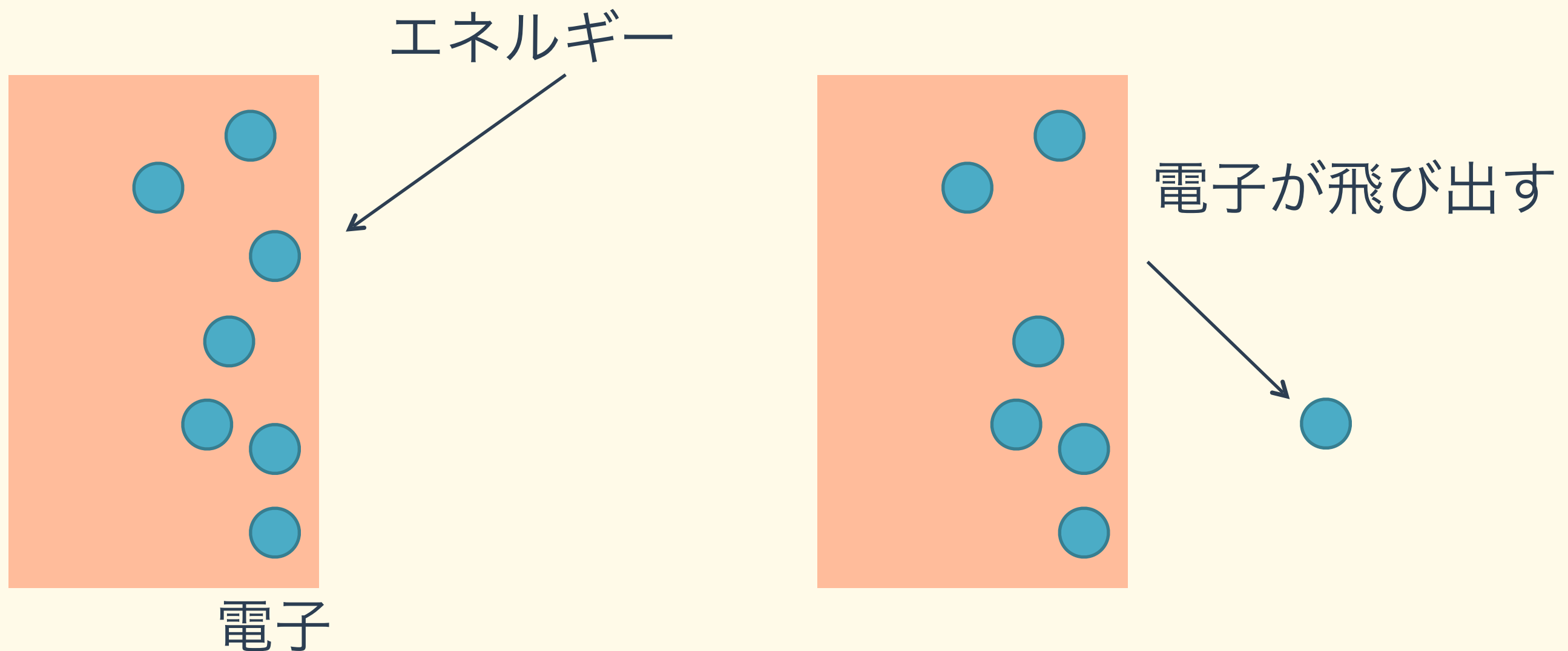
陰極線の性質

- ▶ 負極から出る
- ▶ 重さがある
- ▶ 電場や磁場によって曲がる
 - ▶ 負の電荷



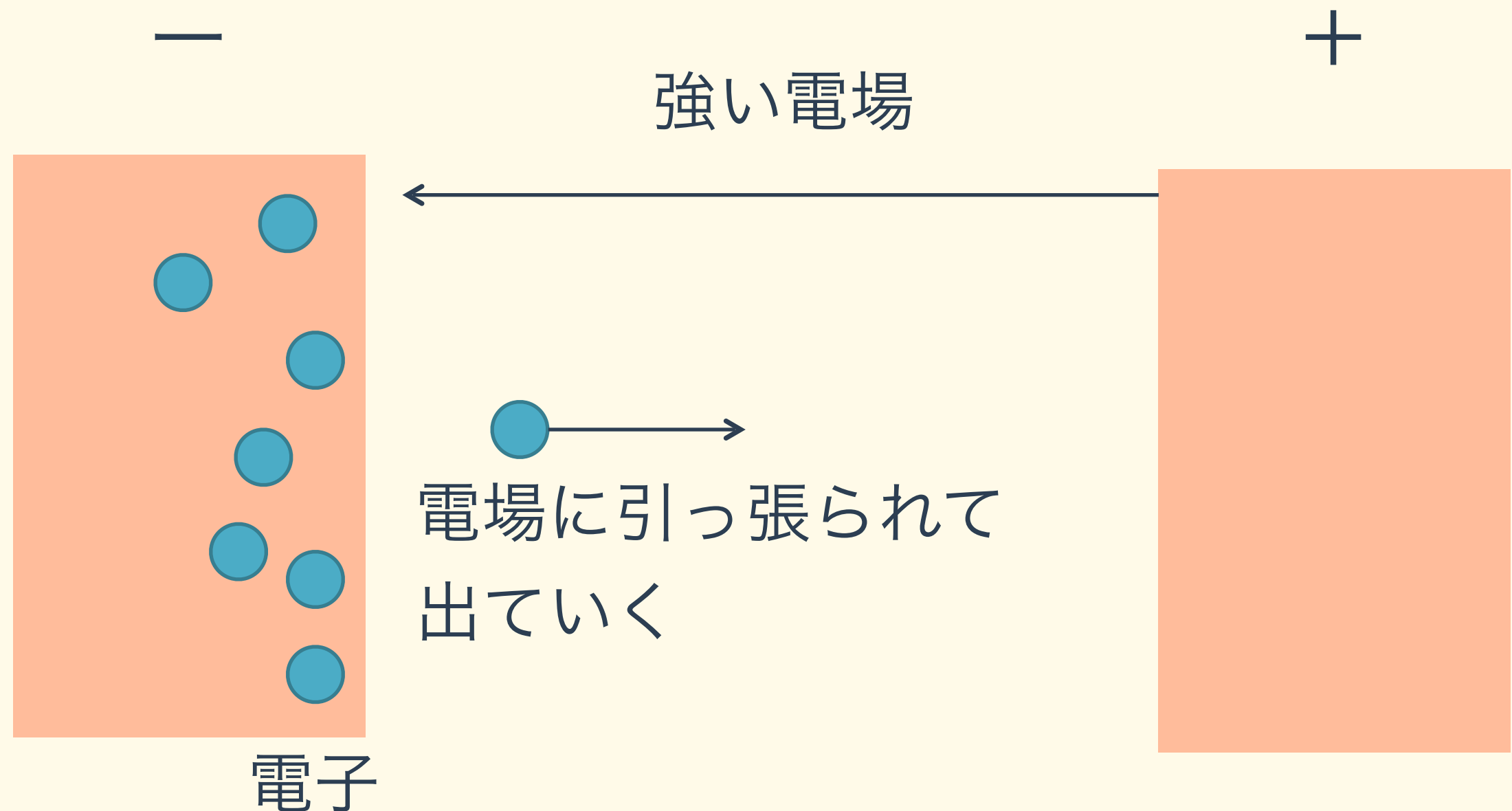
物質内からの電子の放出

- ▶ 物質内から電子を外に出すためにはエネルギーを与える必要がある。



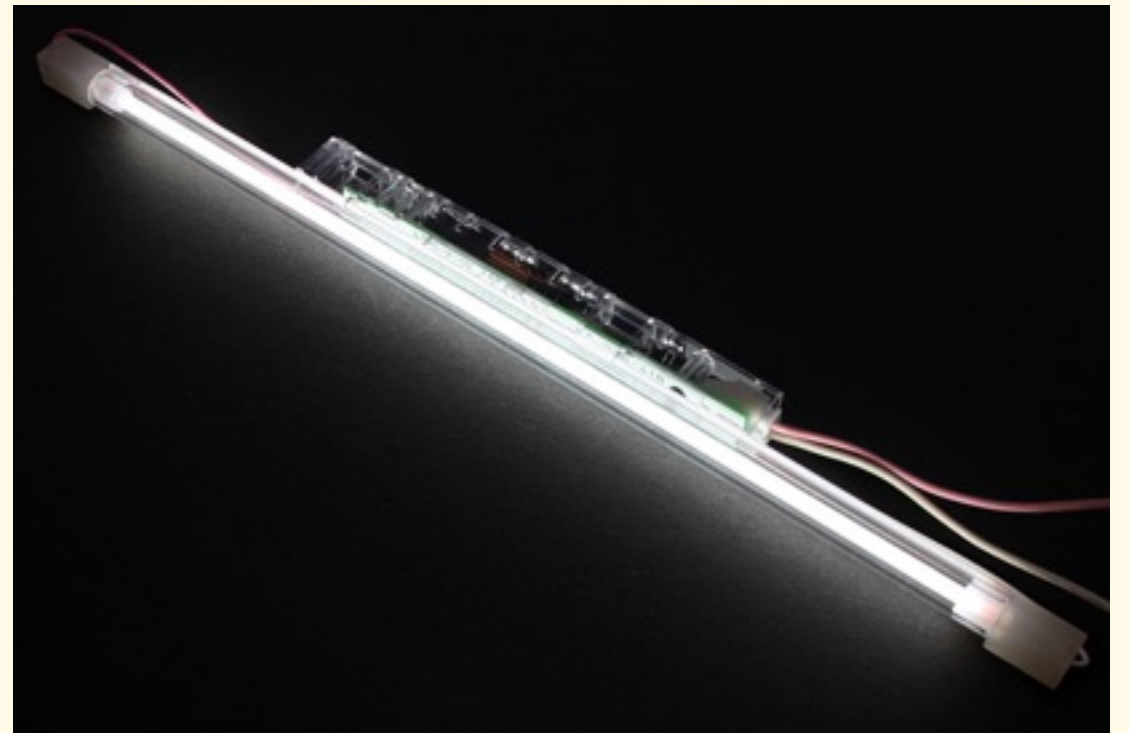
電界電子放出(冷陰極放出)

強力な電場を作ることにより負極から電子が放出される



応用事例

- ▶ 液晶ディスプレイのバックライト用蛍光灯（冷陰極管）
 - ▶ 細い
 - ▶ 高電圧
 - ▶ 今はLEDが主流



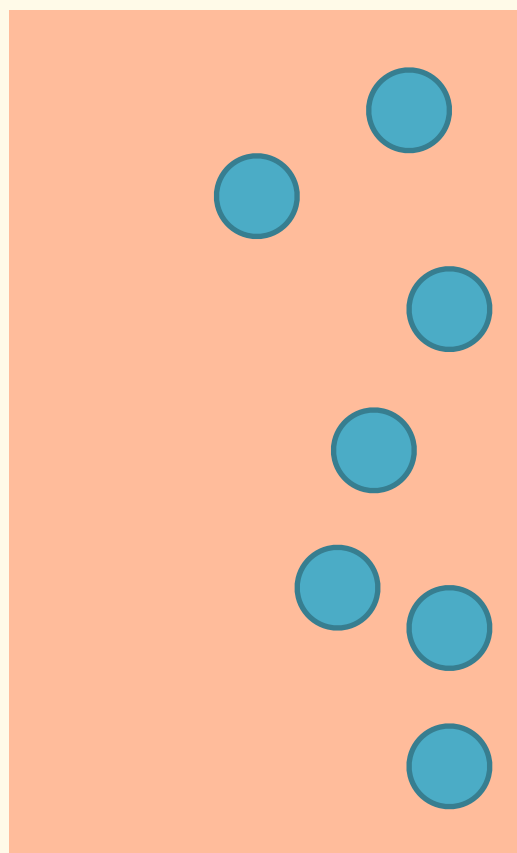
©ASCII

蛍光灯のように熱を与えて電子を出してないので”冷”
陰極という

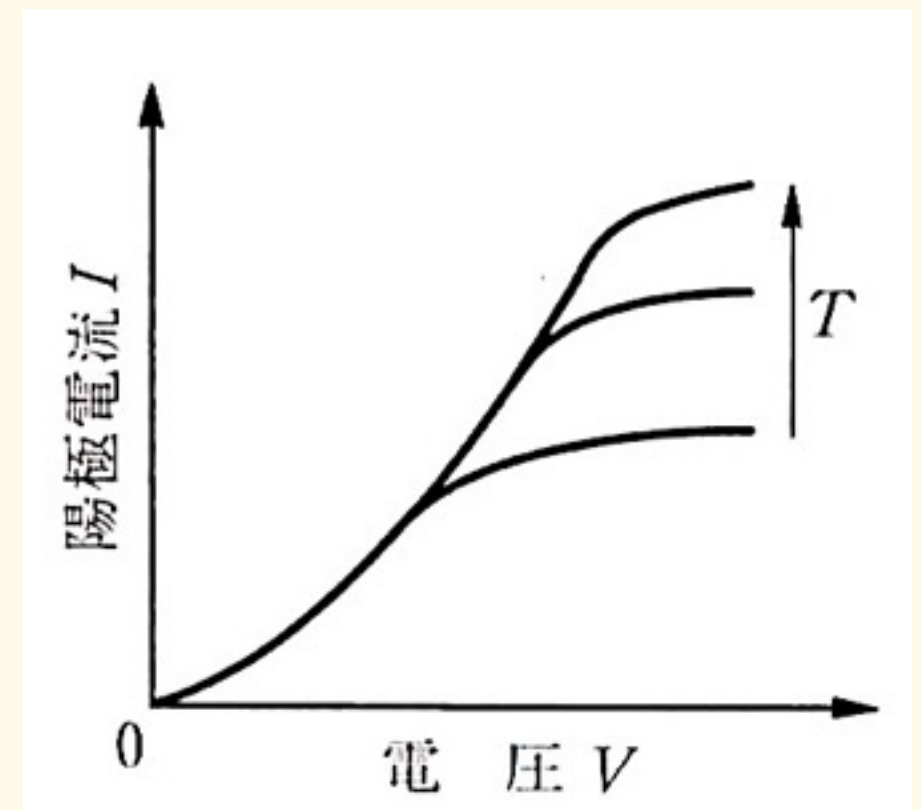
熱電子放出

電極を加熱することでエネルギーを与え、電子を放出させる

熱を与える



熱からエネルギーを得た電子が飛び出す



応用例

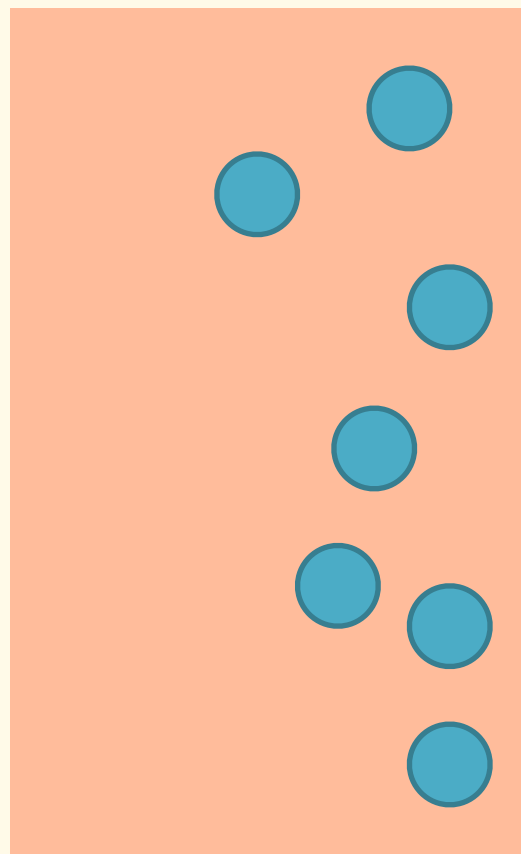
- ▶ 蛍光灯
 - ▶ 太い
 - ▶ 低電圧



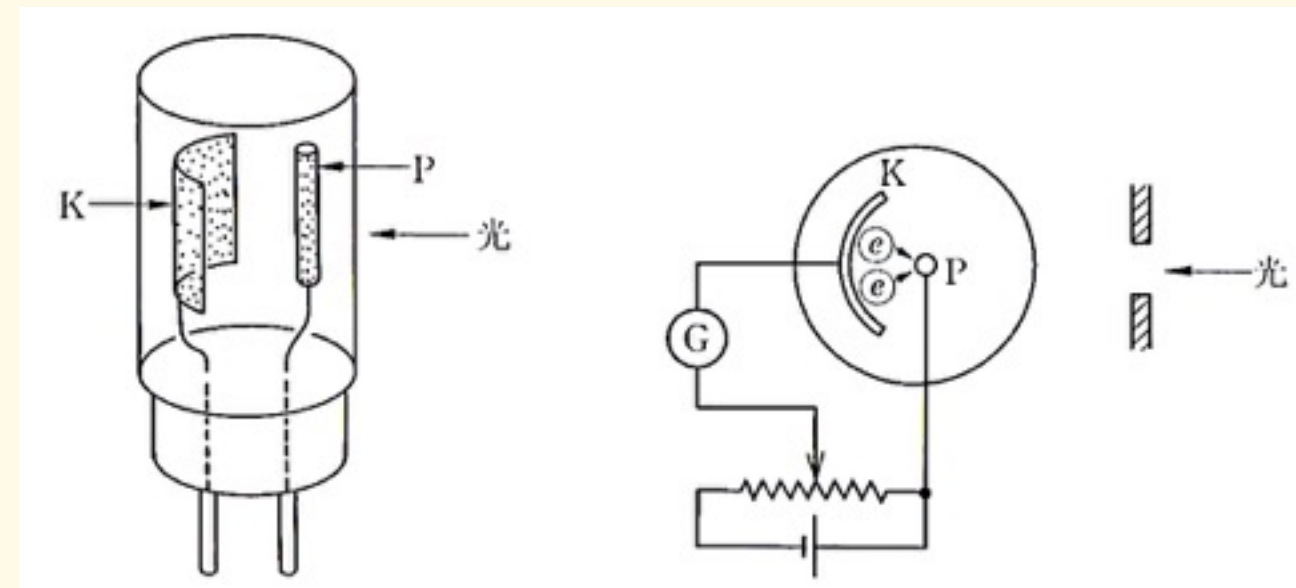
光電効果

- ▶ 物質に光を当てることによって電子が放出される

光を当てる

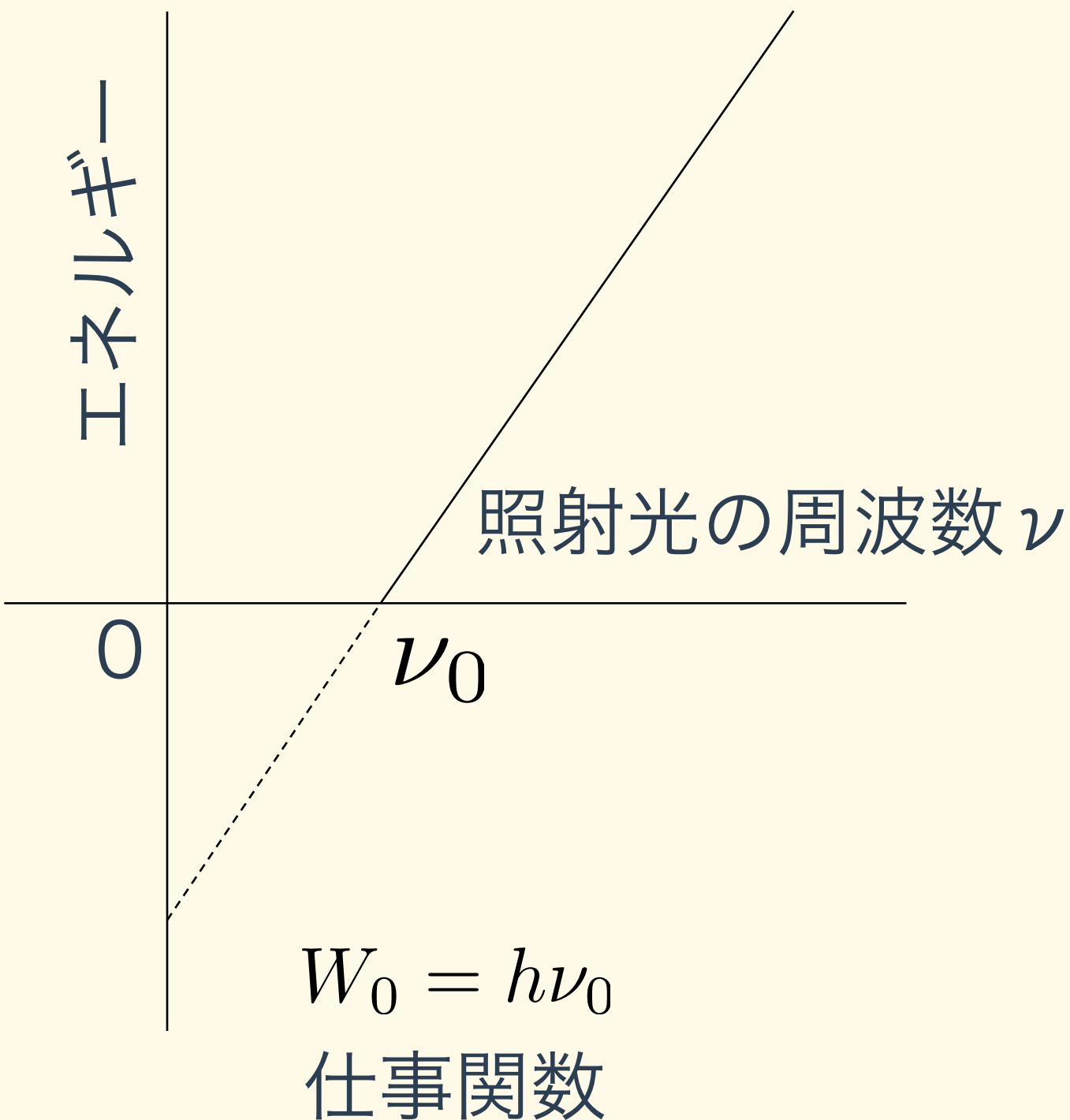


光から得たエネルギーにより電子が飛び出す。



中澤、藤原: 電子工学基礎

ある周波数以上の光を与えないと
電子は放出されない。



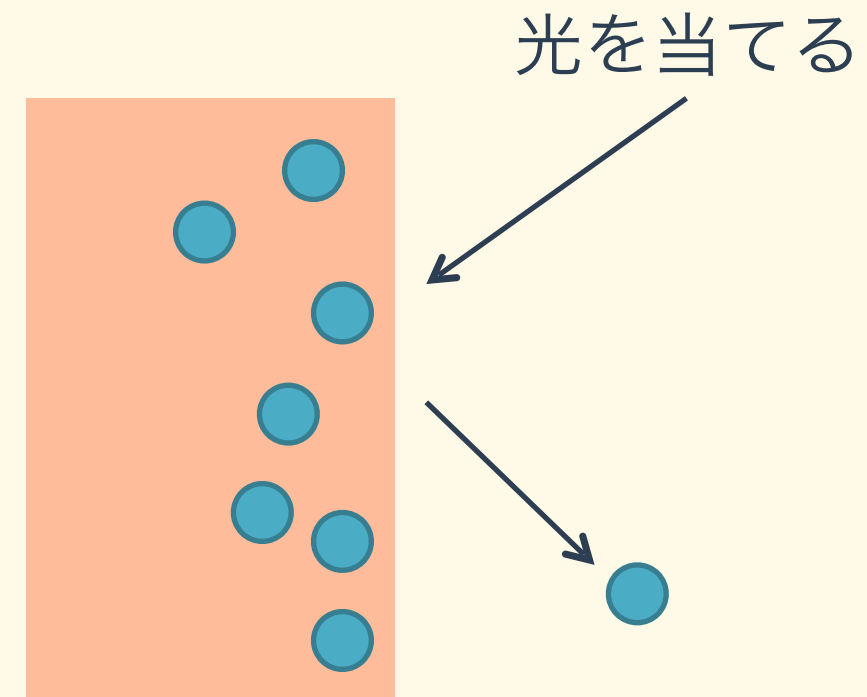
照射光の光子 1 つ
のエネルギー

$$E = h\nu - W_0$$

放出される電
子のエネルギー

仕事関数

$h=6.626 \times 10^{-34}$ Js プランク定数



応用例

- ▶ 光センサーに応用
 - ▶ 光電管
 - ▶ 光電子増倍管
 - ▶ カミオカンデ
 - ▶ IEEEマイルストーンに認定

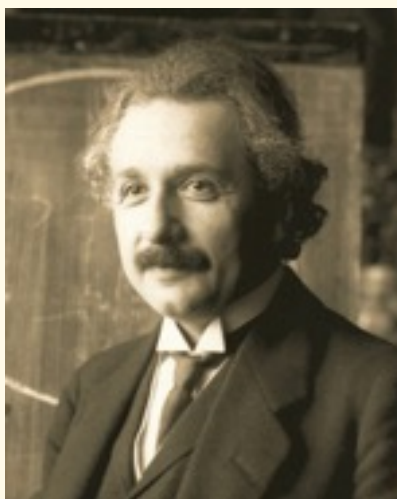


電磁気学基礎

理論的に考えるには電磁気の知識が必要

電磁気学の歴史

- ▶ 静電気（タレス 紀元前6世紀）
 - ▶ 琥珀をこすると引力が発生する
- ▶ 磁石（タレス 紀元前6世紀）
- ▶ クーロンの法則（1785）
- ▶ 電磁誘導の発見（ファラデー、1821）
- ▶ マックスウェル方程式（1865）
- ▶ 特殊相対性理論（アインシュタイン、1905）



キャベンディッシュ



- ▶ 1731年生まれイギリス人
- ▶ ビオ曰く「歴史上最も金持ちの科学者で金持ちの中で最も優れた科学者」
- ▶ デービー曰く「ニュートンの死以来、キャベンディッシュの死ほど英国が大きな損失をこうむったことはない」
- ▶ 人間嫌いで研究内容に関して対外的にあまり発表していない
 - ▶ クーロンの法則、オームの法則、シャルルの法則を独自に誰よりも早く発見している。ちゃんと発表していたらキャベンディッシュの法則になっていたでしょう。
 - ▶ 希ガスの抽出に人類で初めて成功した。
 - ▶ 100年間誰も知らなかった。
 - ▶ キャベンディッシュの方法を使って100年後の人々が希ガスの抽出に成功した。
 - ▶ キャベンディッシュがちゃんと成果を発表していれば、科学は数十年は前進していたかも知れない。
- ▶ キャベンディッシュの業績はマックスウェルにより死後約70年後にまとめられら。

ファラデー

- ▶ 1791年生まれのイギリス人
- ▶ 教育を受けていないので数学が苦手
- ▶ デービーの最大の発見はファラデーである
 - ▶ ちなみにデービーは6つの元素(B, Na, Mg, K, Ca, Ba)を発見した化学者
- ▶ 実験とプレゼンの達人
- ▶ アインシュタインはファラデーの肖像画を飾っていた



マックスウェル

- ▶ 1831年生まれのスコットランド人
- ▶ 電磁気学の基礎方程式を確立
- ▶ 統計力学の基礎を築いた人物の一人
- ▶ 史上初のカラー写真
- ▶ アインシュタインはマックスウェルの肖像画も飾っている



電荷

- ▶ 電荷には正(+)の電荷と負(-)がある
- ▶ 同じ電荷同士は反発する
- ▶ 異なる電荷同士は引き合う
- ▶ 電荷には大きさがある(単位はCクーロン)



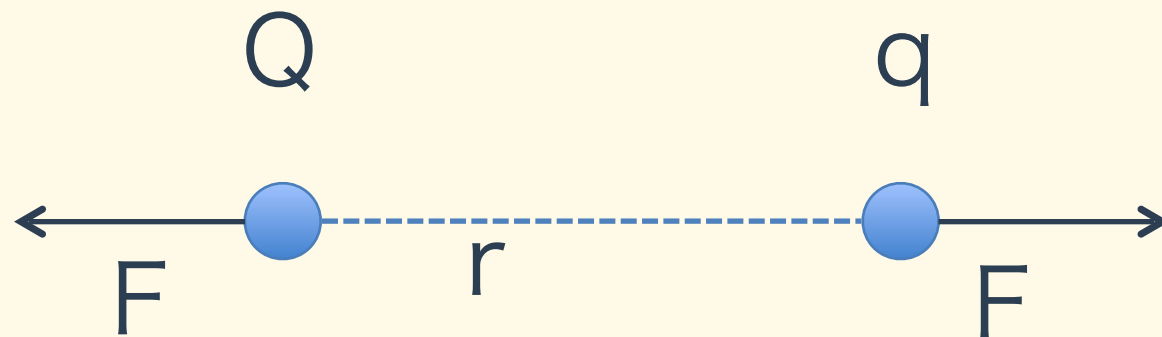
静電気力(クーロン力)

- ▶ 電荷が複数ある場合、お互いに力を与え合う
- ▶ 力は距離の2乗に反比例する (逆自乗則)

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Qq}{r^2}$$

クーロンの法則

力	F [N]
距離	r [m]
電荷	Q, q [C]
真空の誘電率	ϵ_0

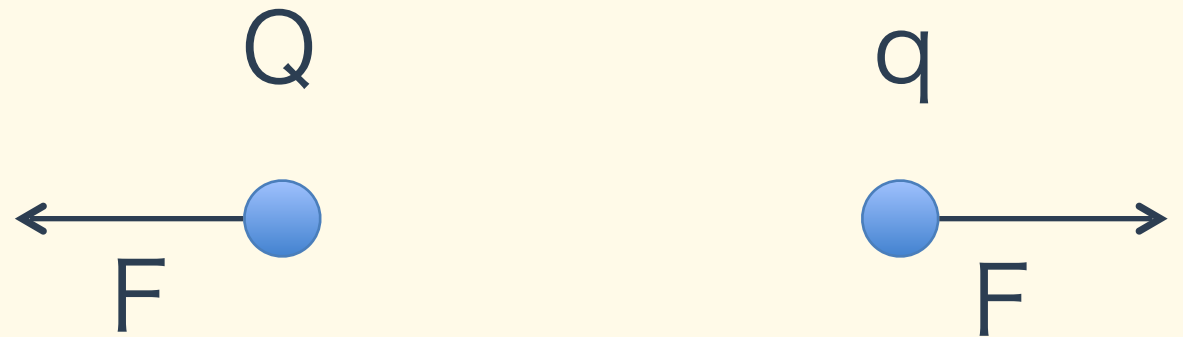


$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

なぜ見えない力が働くのか？

- ▶ よくわからないが、直接相手に伝わる

- ▶ 遠隔作用説



- ▶ 何か力を伝える媒質があって、それを伝わって相手に伝わる

- ▶ 近接作用説

- ▶ なにを伝わって力が届くのか

- ▶ エーテル

- ▶ 電場



電場

- ▶ 電場は荷電粒子が作り出すということにしておく。
- ▶ 本当はそれだけではないけれど。
- ▶ 電場の単位はV/mもしくはN/C
- ▶ 電場がクーロン力を伝える？

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

電場

距離

電荷

真空の誘電率

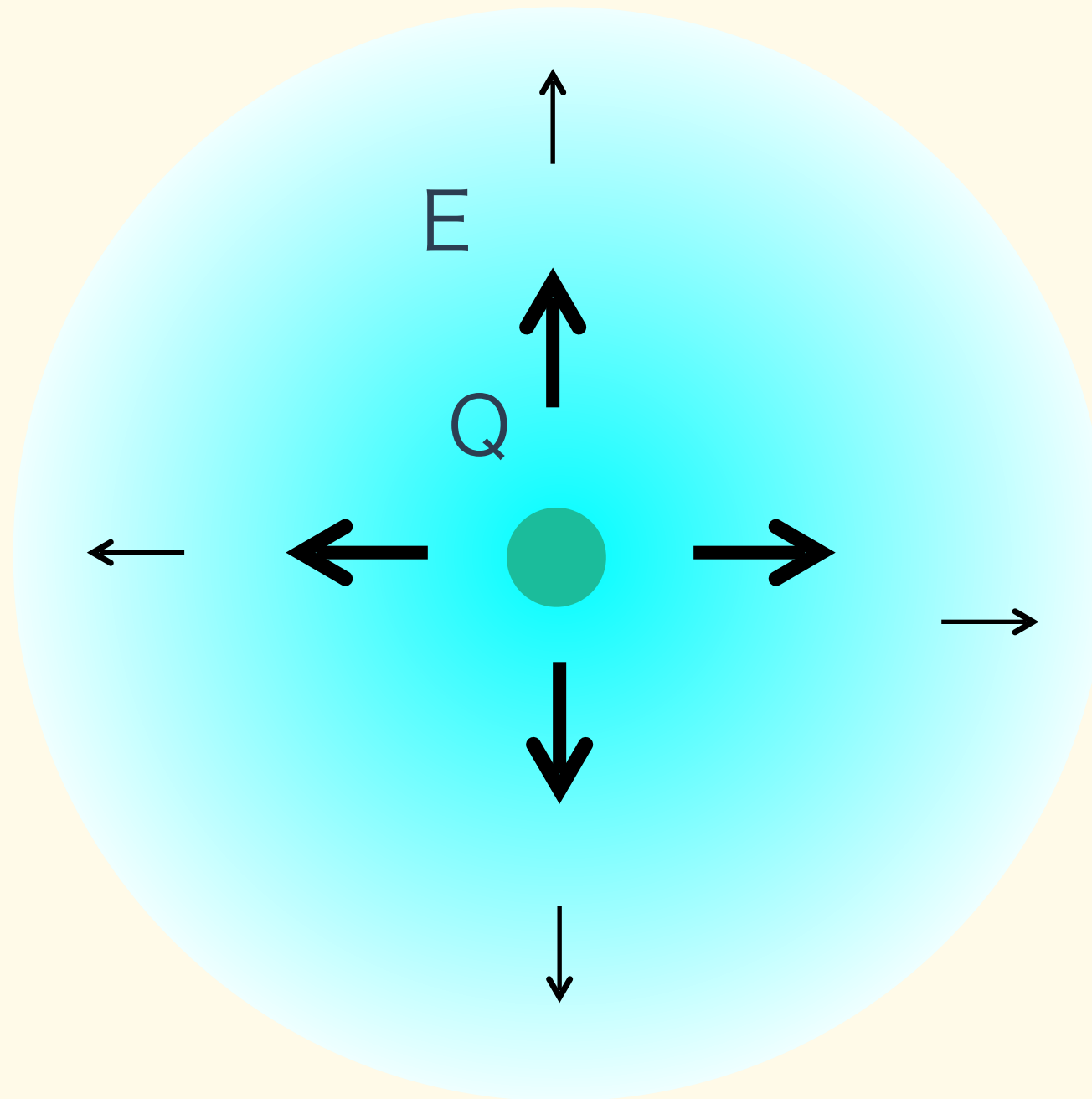
E

r

Q

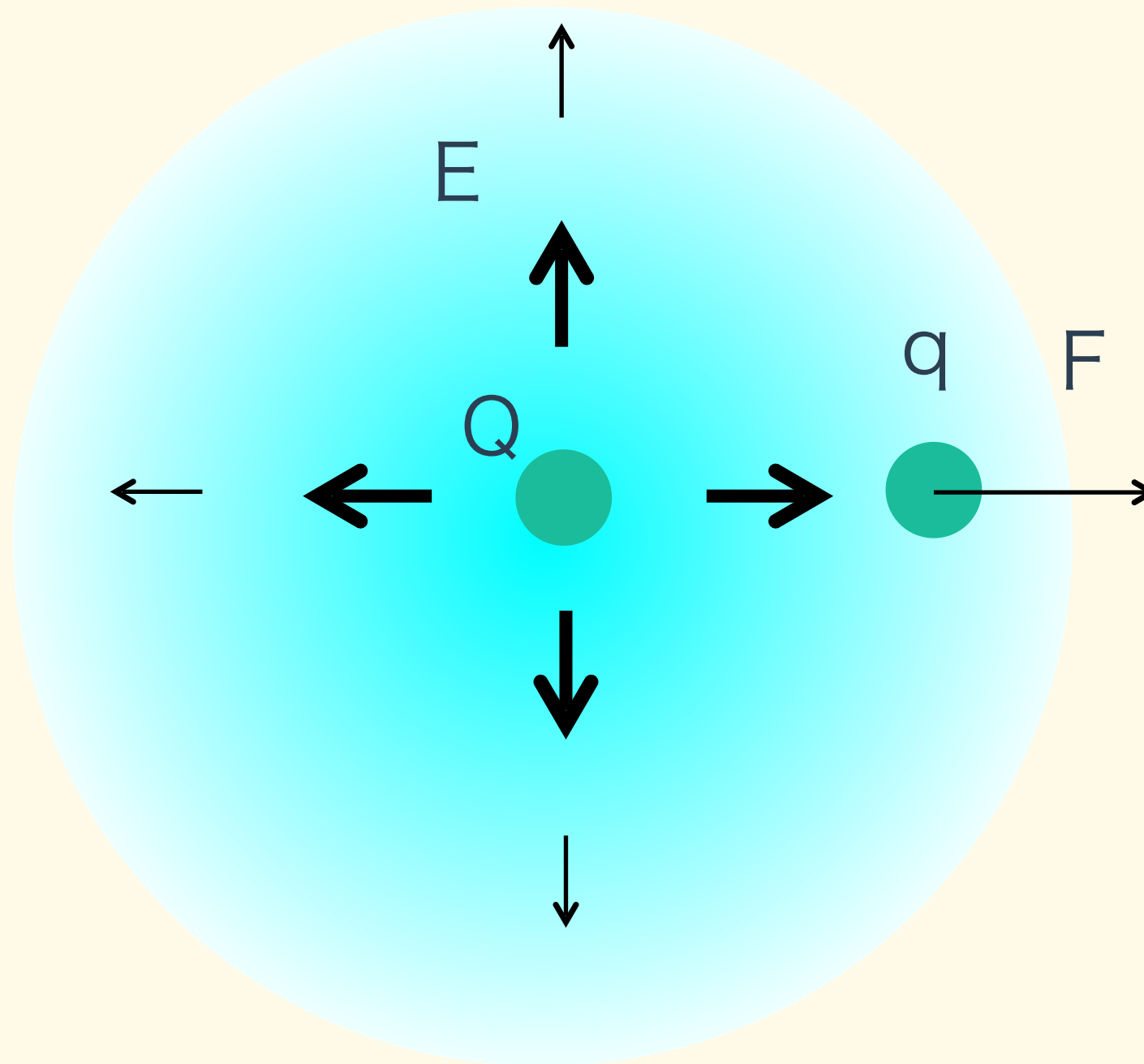
ϵ_0

電場



電荷の周囲に電場という場が生じる

電場



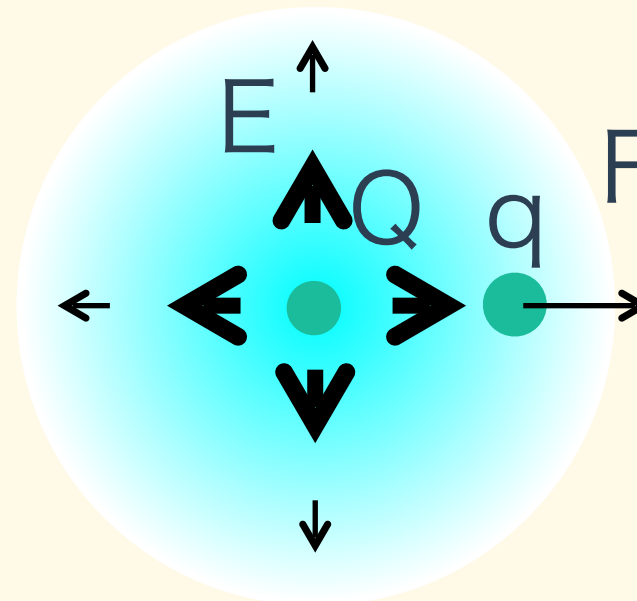
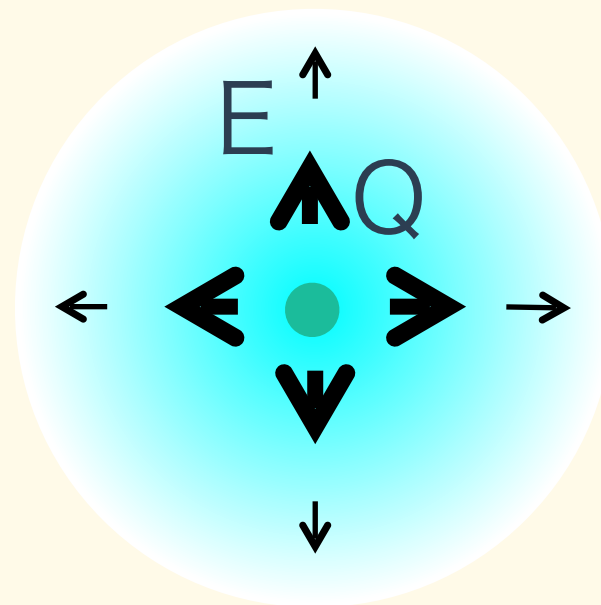
電場という電荷が存在するとその電荷には力が働く

電場

電場は、1Cの電荷が
場から受ける力

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r^2}$$
$$= qE$$



電位

単位電荷あたりのポテンシャルエネルギー

力学では

$$\text{移動する } x = h \times \frac{1}{\sin(\theta)}$$

坂をx登るのに必要な仕事

$$F = mg \sin(\theta)$$

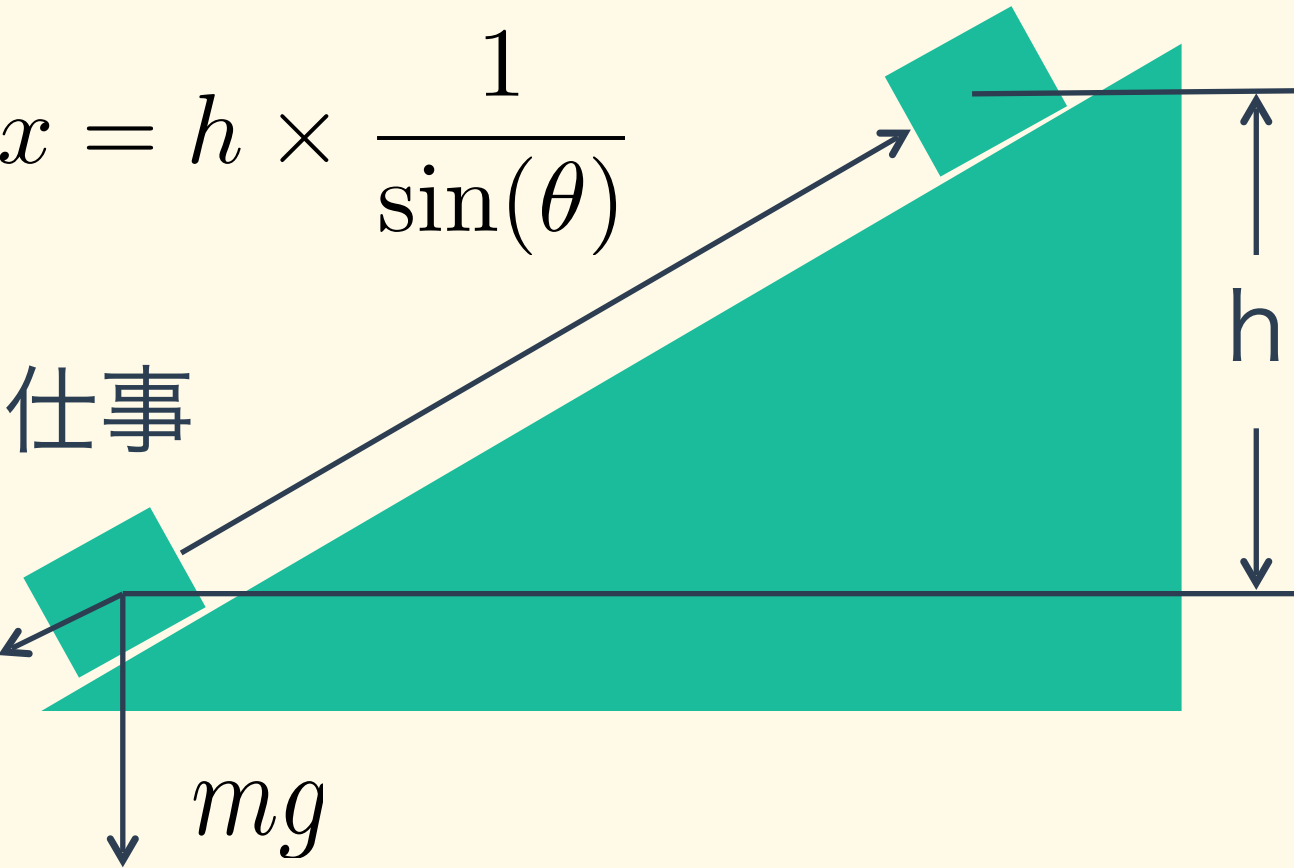
$$mg$$

$$w = Fx$$

$$= mg \sin(\theta) \times h \times \frac{1}{\sin(\theta)}$$

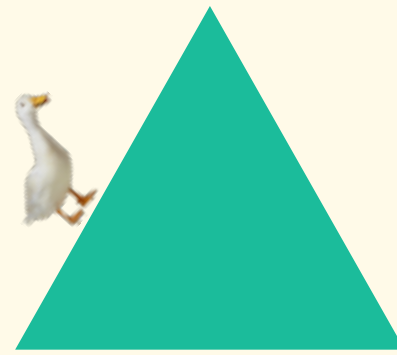
$$= mgh \text{ 位置エネルギーの式になる}$$

仕事をした分はポテンシャルエネルギーとして貯まる。

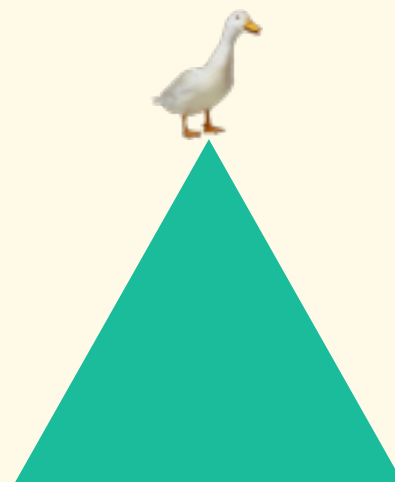


もうすこし簡単に言えば

- ▶ 山登りするためには、仕事をしなければならない。



- ▶ 山にのぼるために使った仕事は、山の高さ分のポテンシャルエネルギーに変換される。

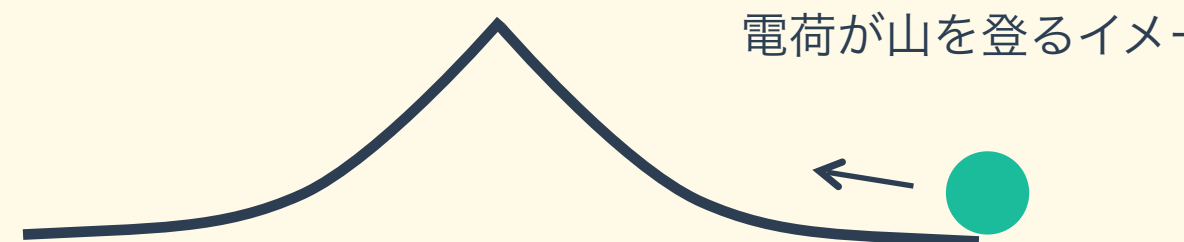
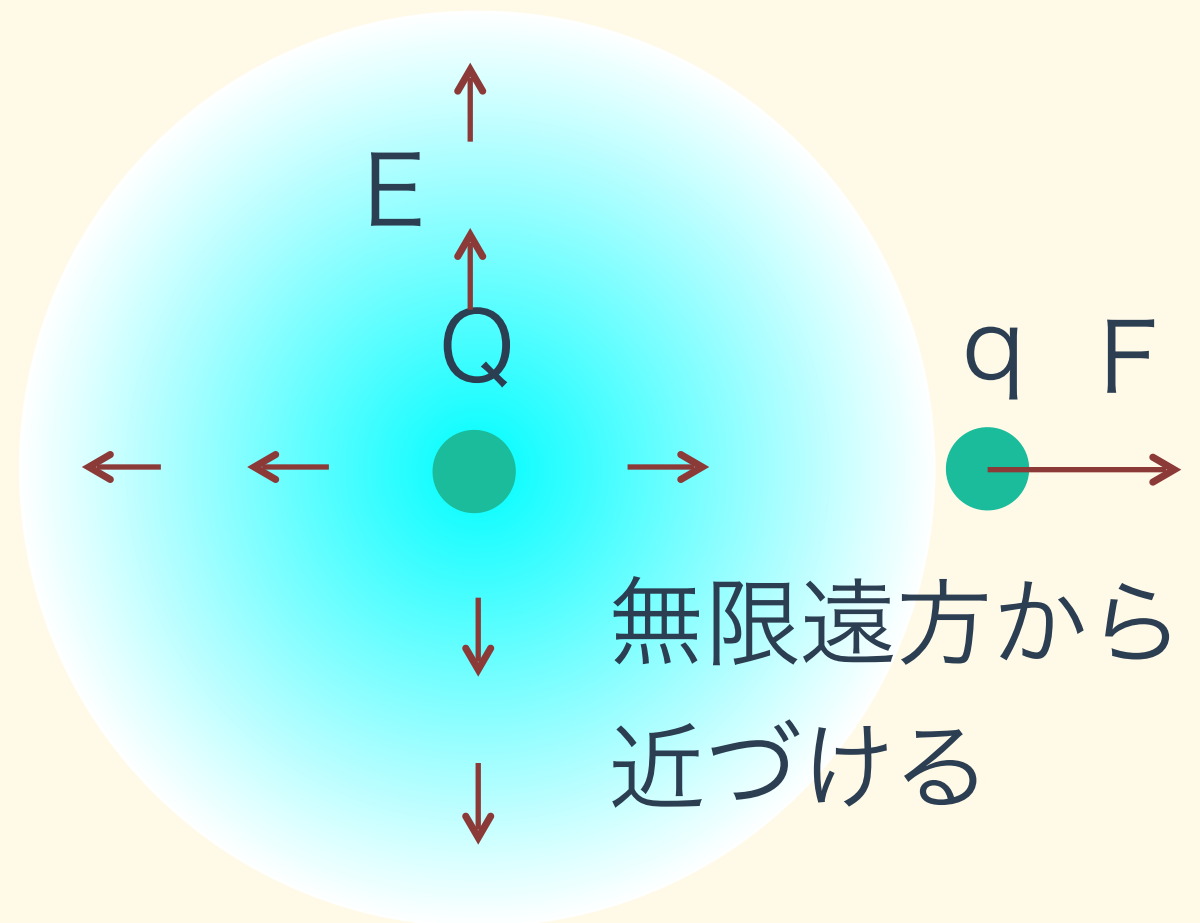


電磁気では

- ▶ 無限遠方から仕事をしてきたと考えると

$$\begin{aligned} W &= - \int_{\infty}^x F dr \\ &= - \int_{\infty}^x q E dr \\ &= - \int_{\infty}^x \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r^2} dr \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{x} \end{aligned}$$

点電荷の場合



電位

qを1と考えると

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{x} \quad (\text{点電荷の電位})$$

点電荷Qが電場を作り、1 Cの電荷を無限遠方からQからxの距離のところまで移動させるのに必要な仕事

電場中の電荷が持つポテンシャルエネルギー

- ▶ 静電ポテンシャルという
 - ▶ 力学で言うところの位置エネルギー

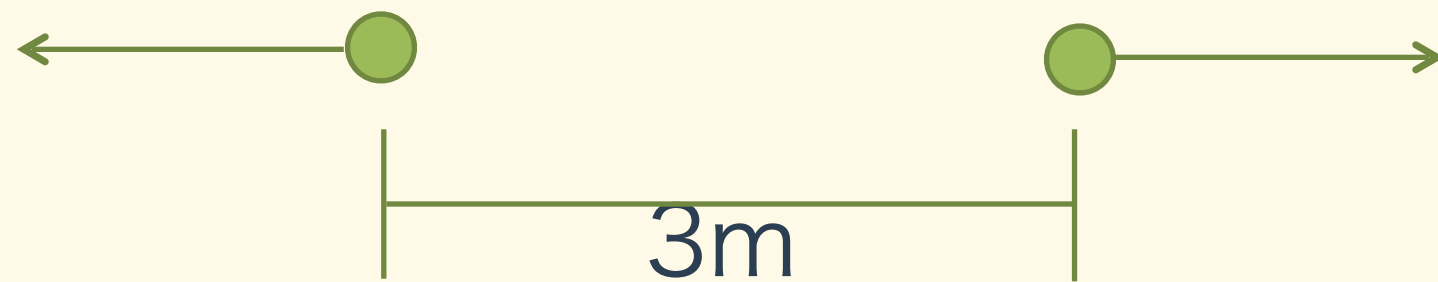
$$U = qV$$

電位差

- ▶ 先ほどまでは電位は無限遠方を0と任意の点での積分として考えてきた。
- ▶ 任意の点と任意の点での電位を計算し、その差を電位差という。
- ▶ 任意の点と任意の点の間で積分したものになっている。

クーロン力の計算

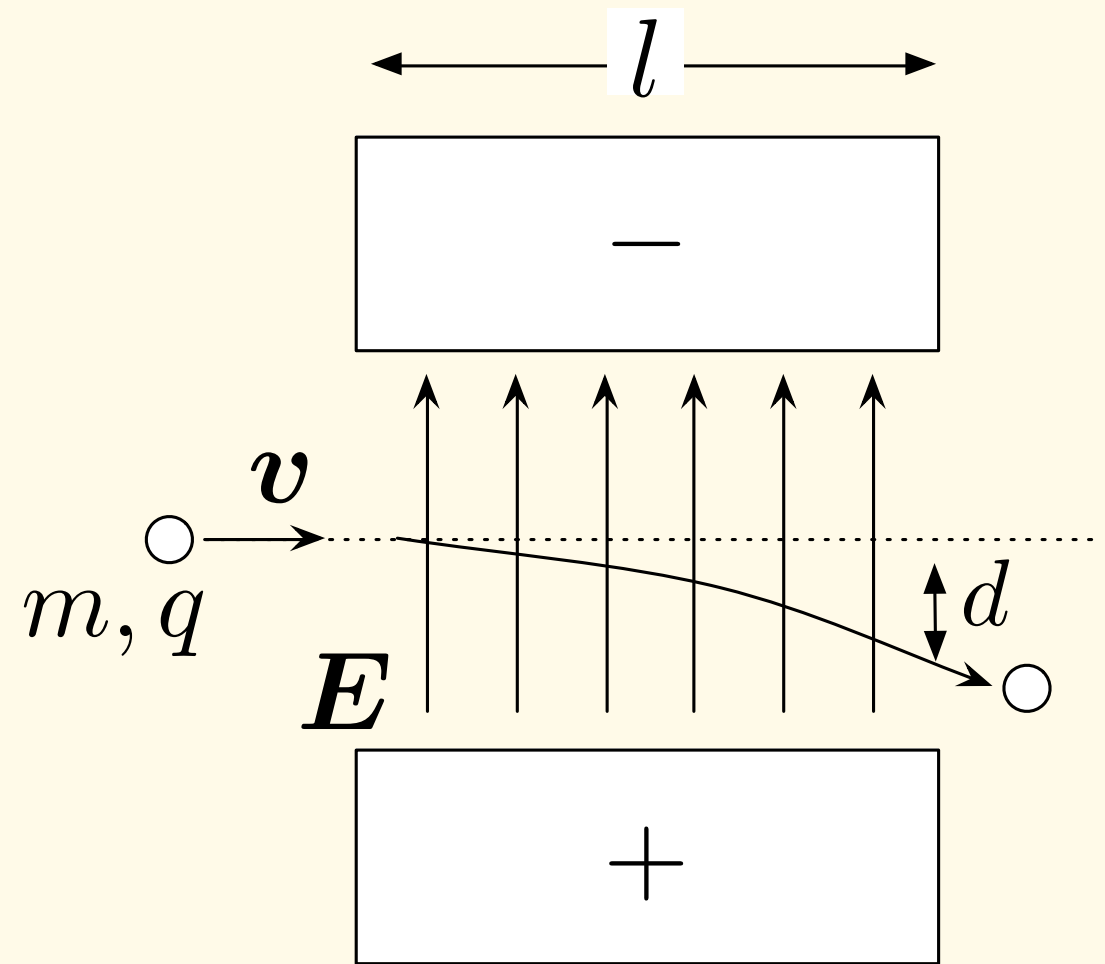
点電荷A、Bが3m隔てた場所に置かれている。点電荷A、Bがそれぞれ $1.0 \times 10^{-3}\text{C}$ 、 $2.0 \times 10^{-4}\text{C}$ で帯電しているとき、電荷にかかる力の大きさを求めよ。ただし、 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.0 \times 10^9$ とする。



電場中の電荷の運動

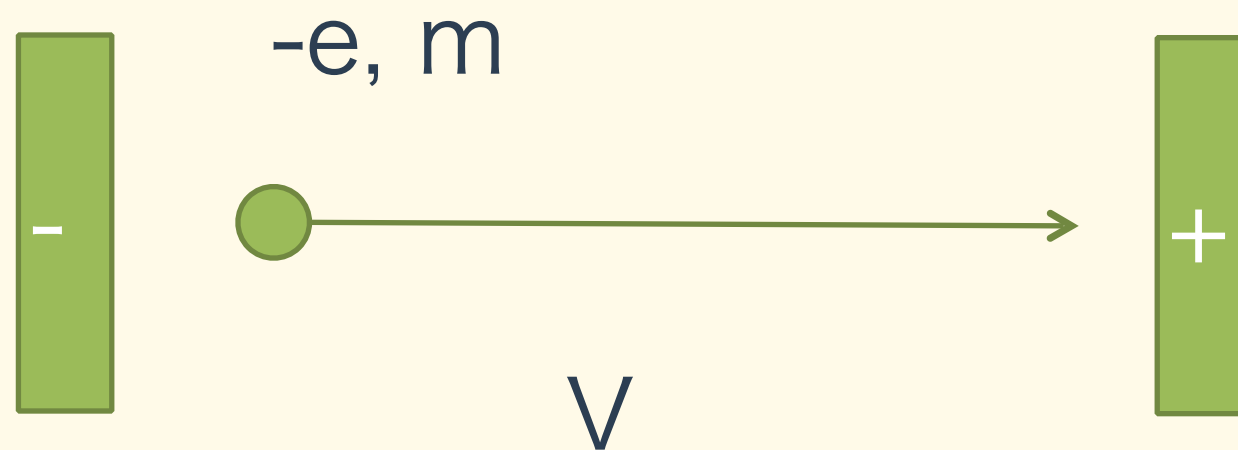
図のように、幅 l の電場 E に対し垂直に電荷 q を入射させた。入射された電荷は電場により曲がり、電場を出た直後では元の高さから d ずれていた。各問に答えよ。

- (1) 電荷は正(+)か負(-)か
- (2) 電荷が電場に入り出ていくまでの時間を求めよ。
- (3) ずれ d を求めよ。
- (4) 電場から出た時の速度ベクトルを求めよ。



電場による電子の加速

電極間に電位 V がかかっている。電極から射出された電子 $-e$ が、電極間の電場により加速された。電子の速度を求めよ。ただし電子の質量を m とする。



微小世界のエネルギー単位

電圧1Vで加速された電子が持つエネルギーを1eVという。

$$1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

演習問題

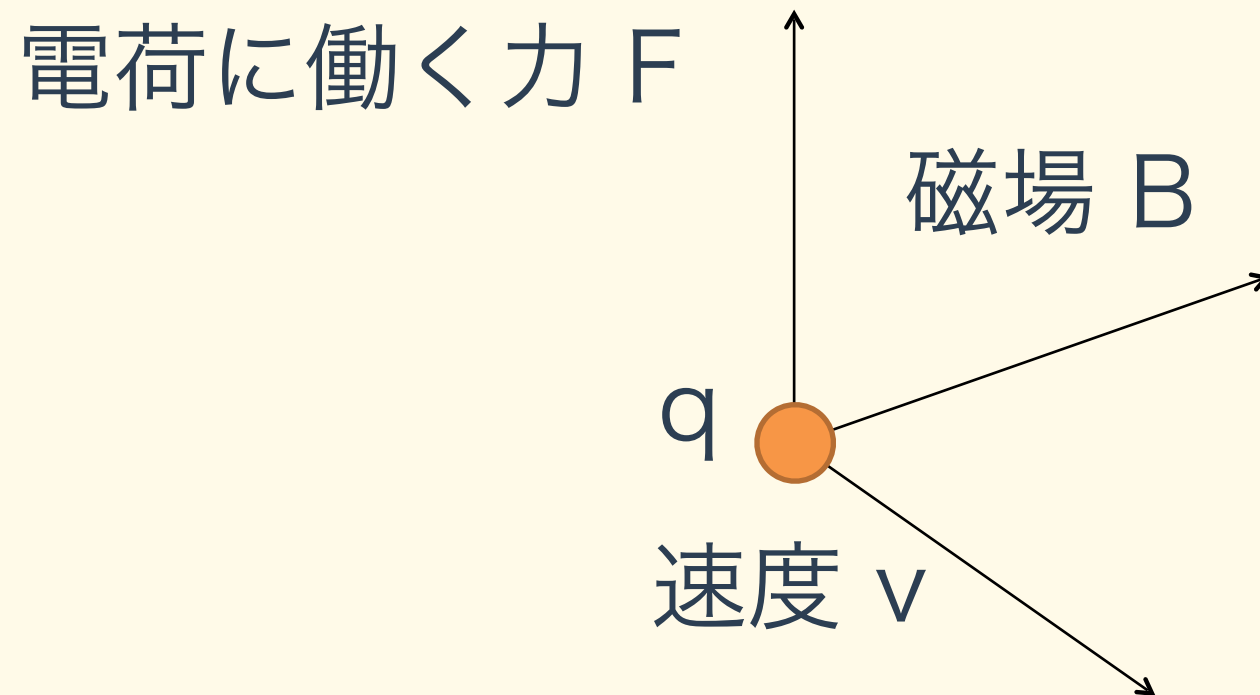
- ▶ 教科書 19 ページの問題 4 を解く

磁場

- ▶ 電場が電子の周りにできたのに対し、磁場は磁石の周りにできる
- ▶ 磁場は電流により発生
- ▶ 電荷に対応した磁荷は存在しない。
- ▶ 磁場の強さを表す物理量の一つが磁束密度 B

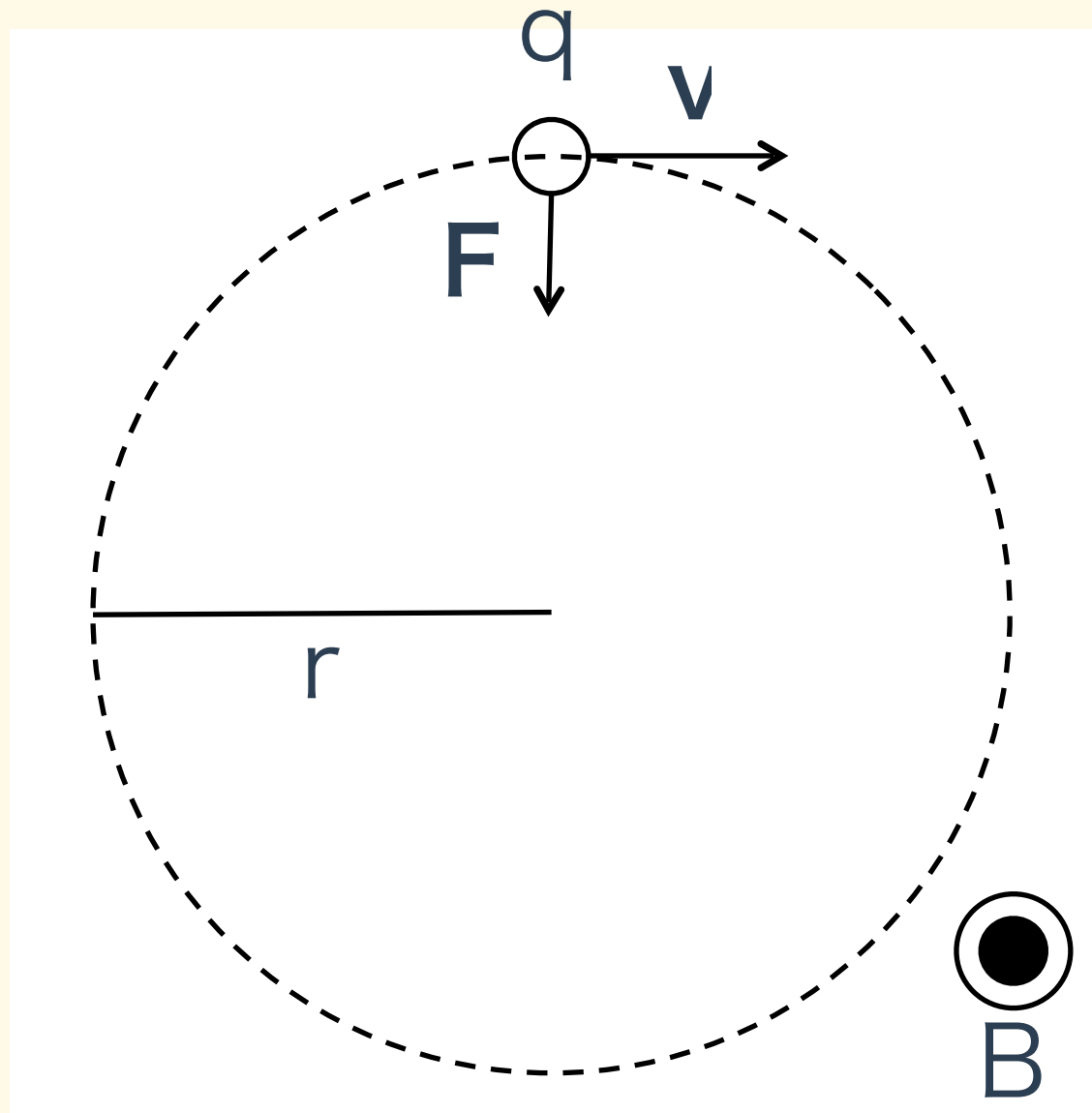
磁場の影響を受ける電荷

運動する電荷は磁場の影響を受ける。

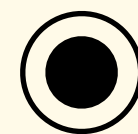


$$\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$$

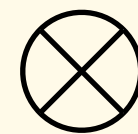
磁場中の電荷の動き



- 磁場中を移動する電荷は進行方向に対し垂直な力を受ける
- 進行方向に対し垂直な力は向心力となり円運動をする

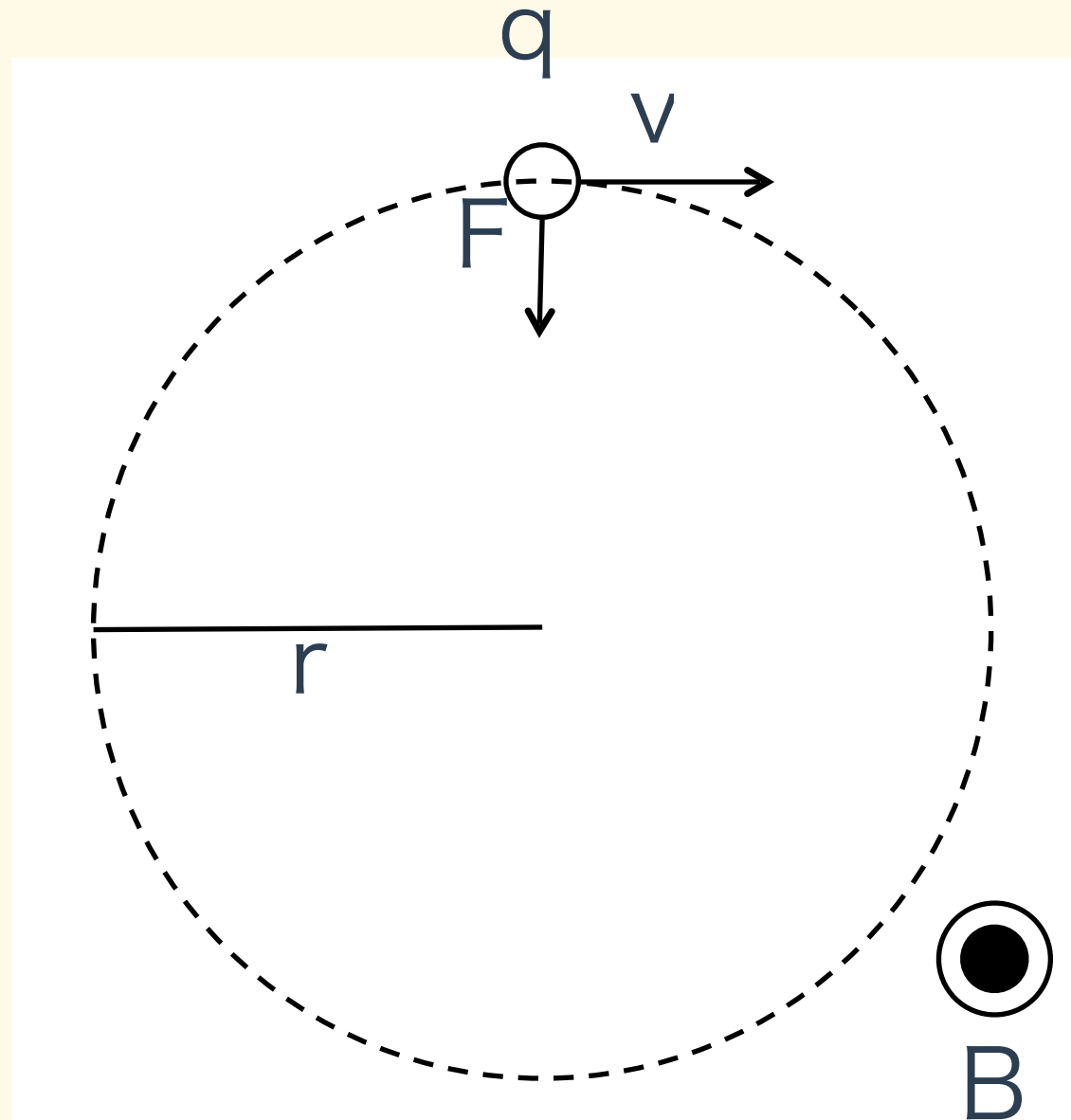


画面から垂直に出ている



画面に向かって垂直に入っている

磁場中の電荷の動き



磁場から受ける力が向心力となるので

磁場による力

$$F = qvB = m \frac{v^2}{r}$$

$r = \frac{mv}{qB}$ 向心力

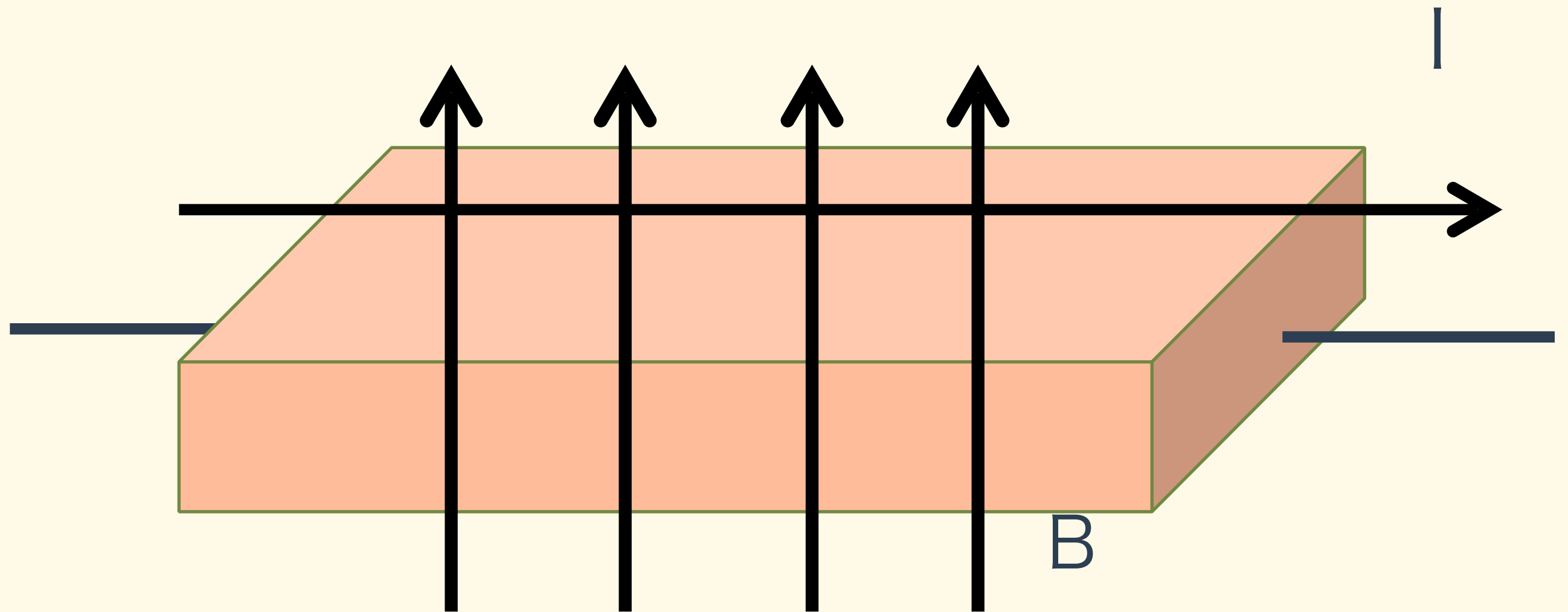
ローレンツ力

- ▶ 電荷が受ける力は電場からのものと、磁場からのものがある。
- ▶ それをローレンツ力という。

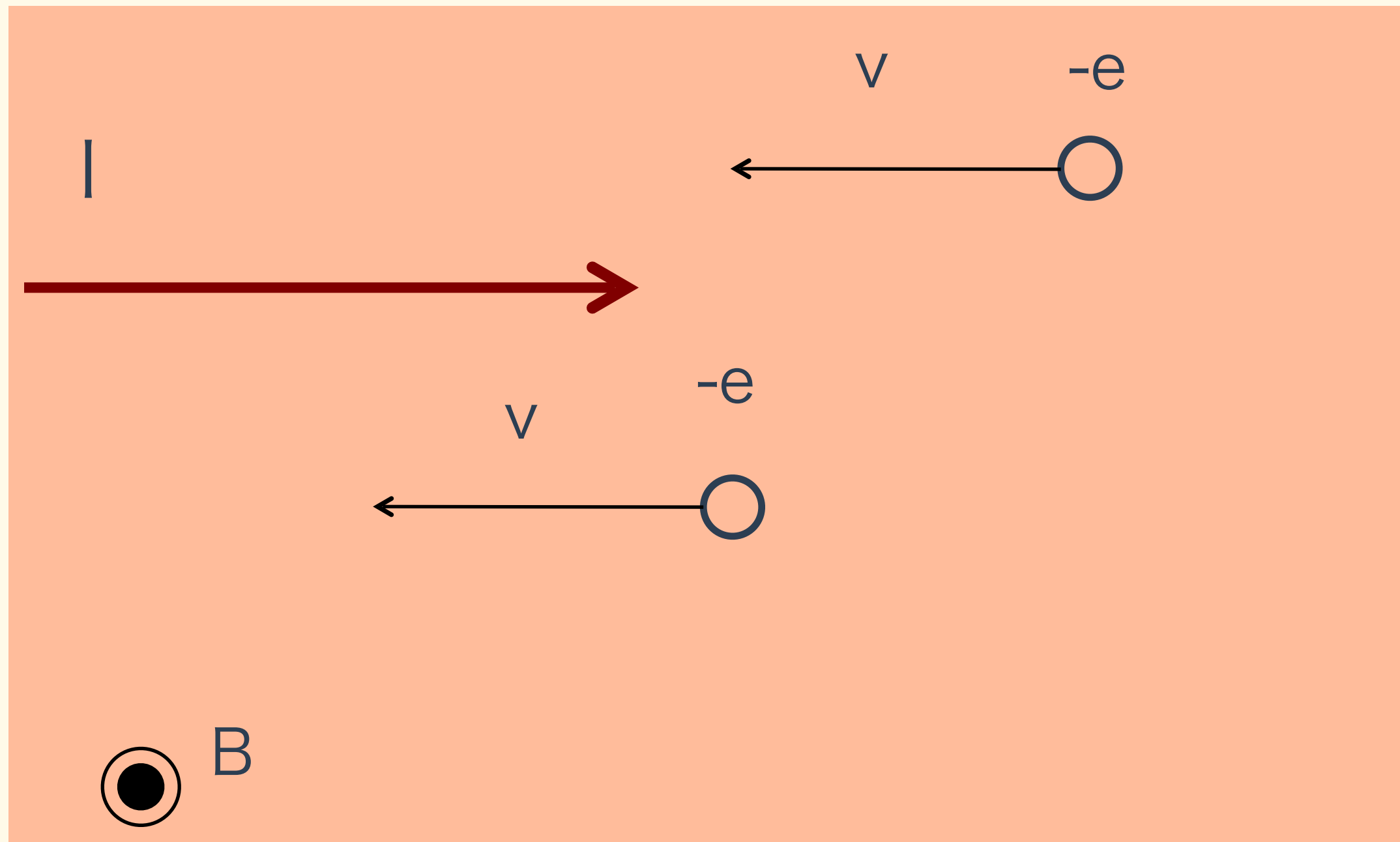
$$\mathbf{F} = \underbrace{q\mathbf{E}}_{\text{電場から受ける力}} + \underbrace{q\mathbf{v} \times \mathbf{B}}_{\text{磁場から受ける力}}$$

ホール効果

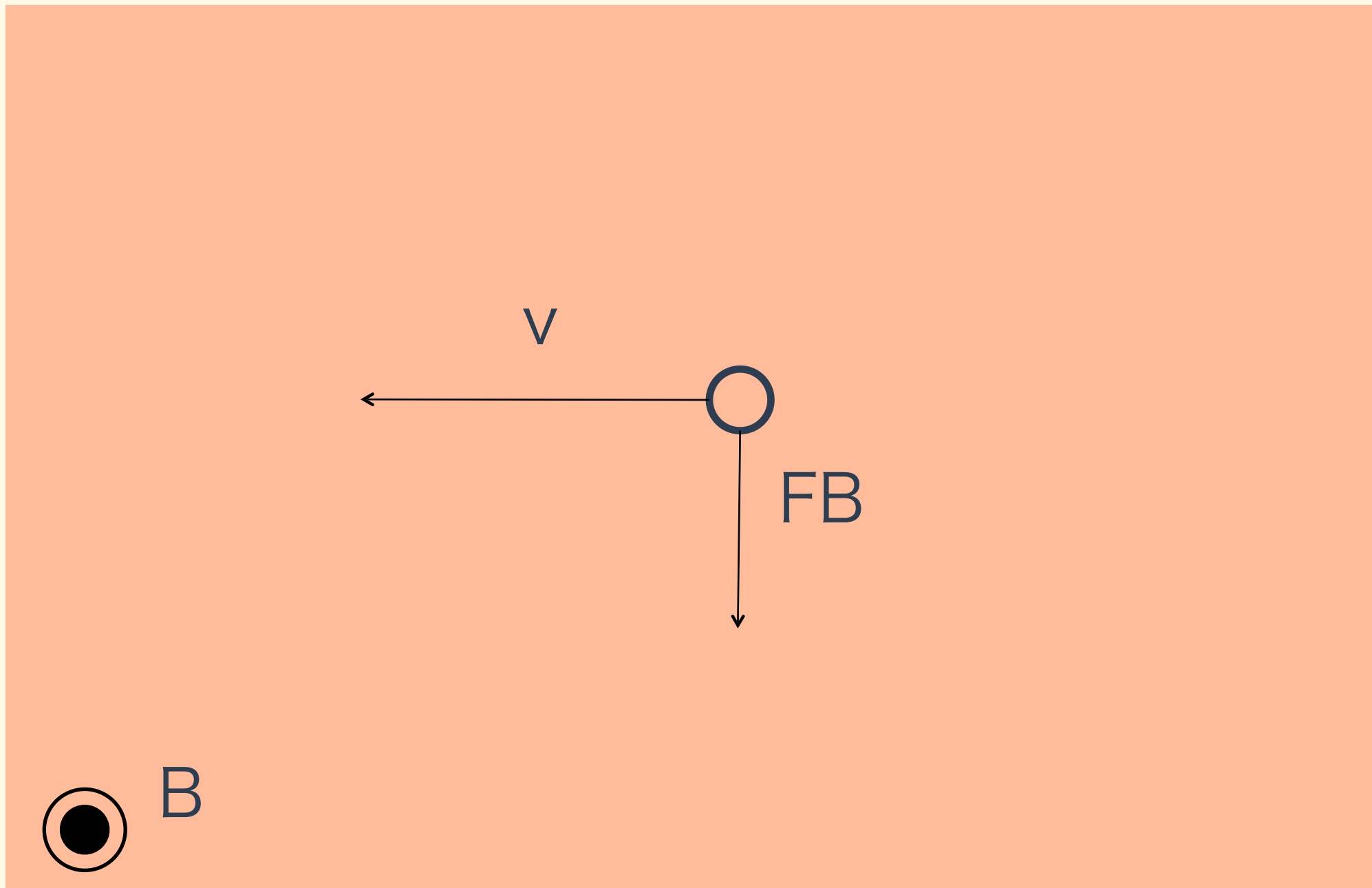
電流に対し垂直に磁場をかけると、電流が曲がる。
曲がることで、電荷の偏りが生じ起電力が発生する。



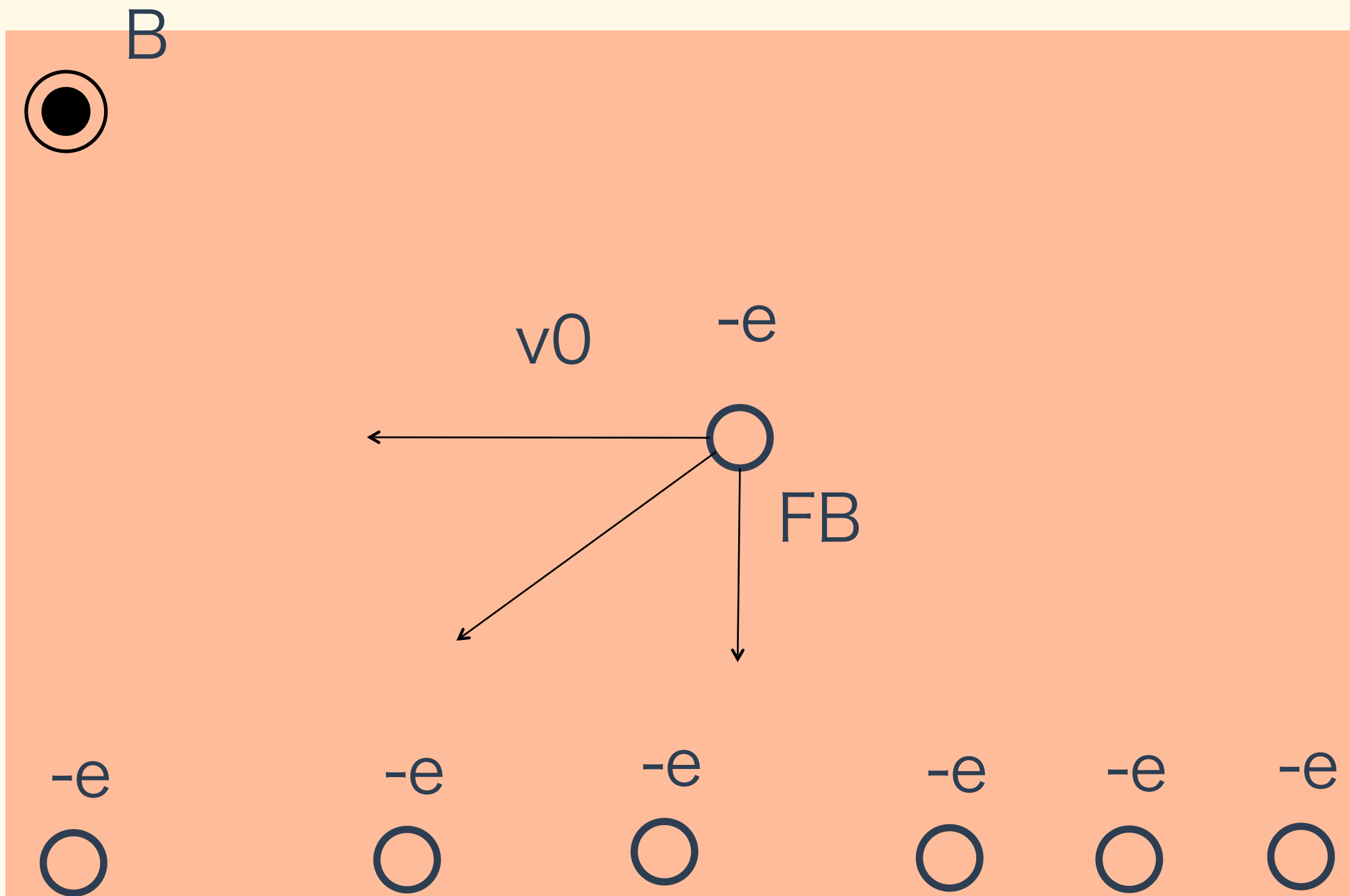
原理



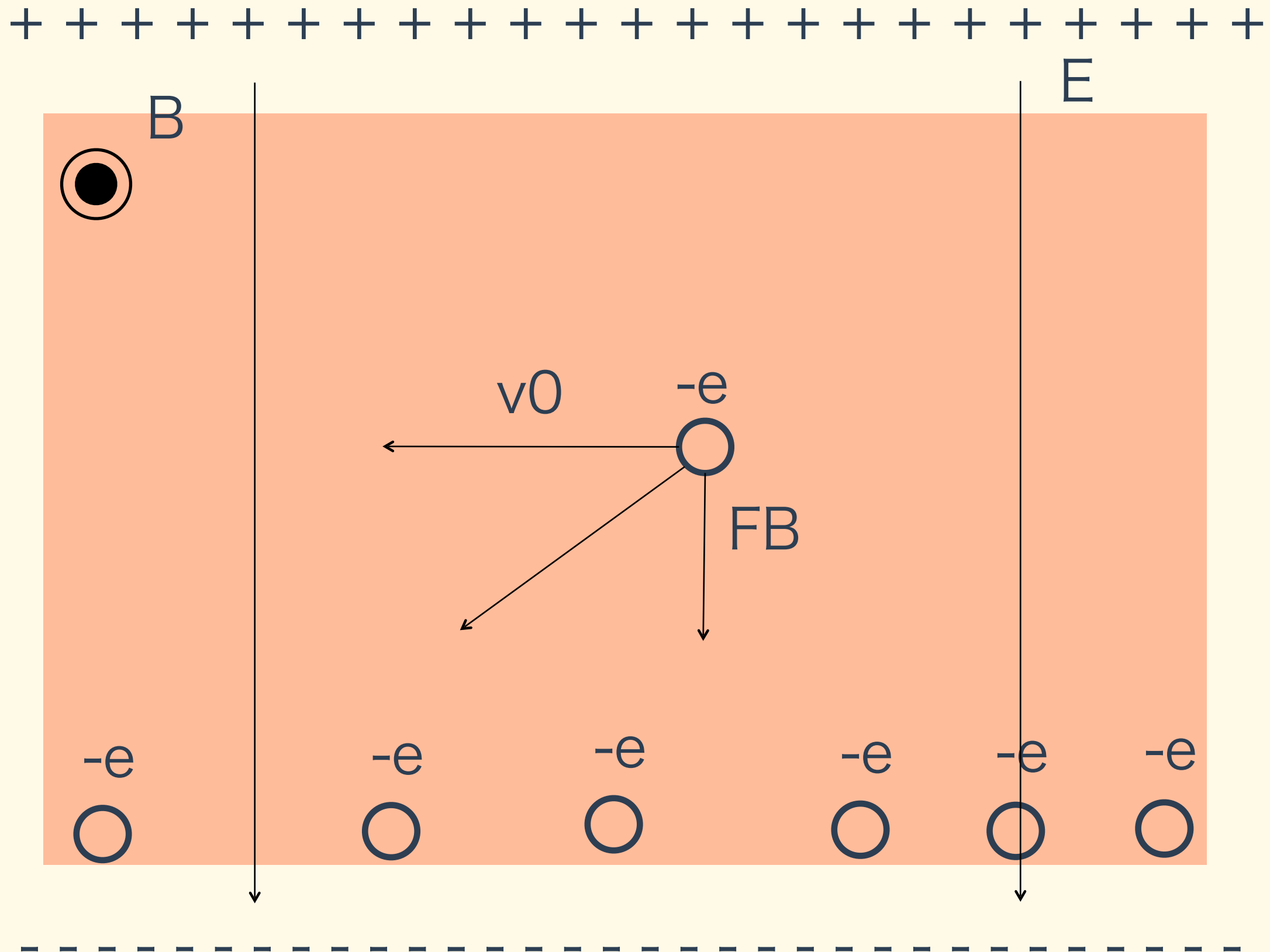
動いている電子は磁場から力を受ける



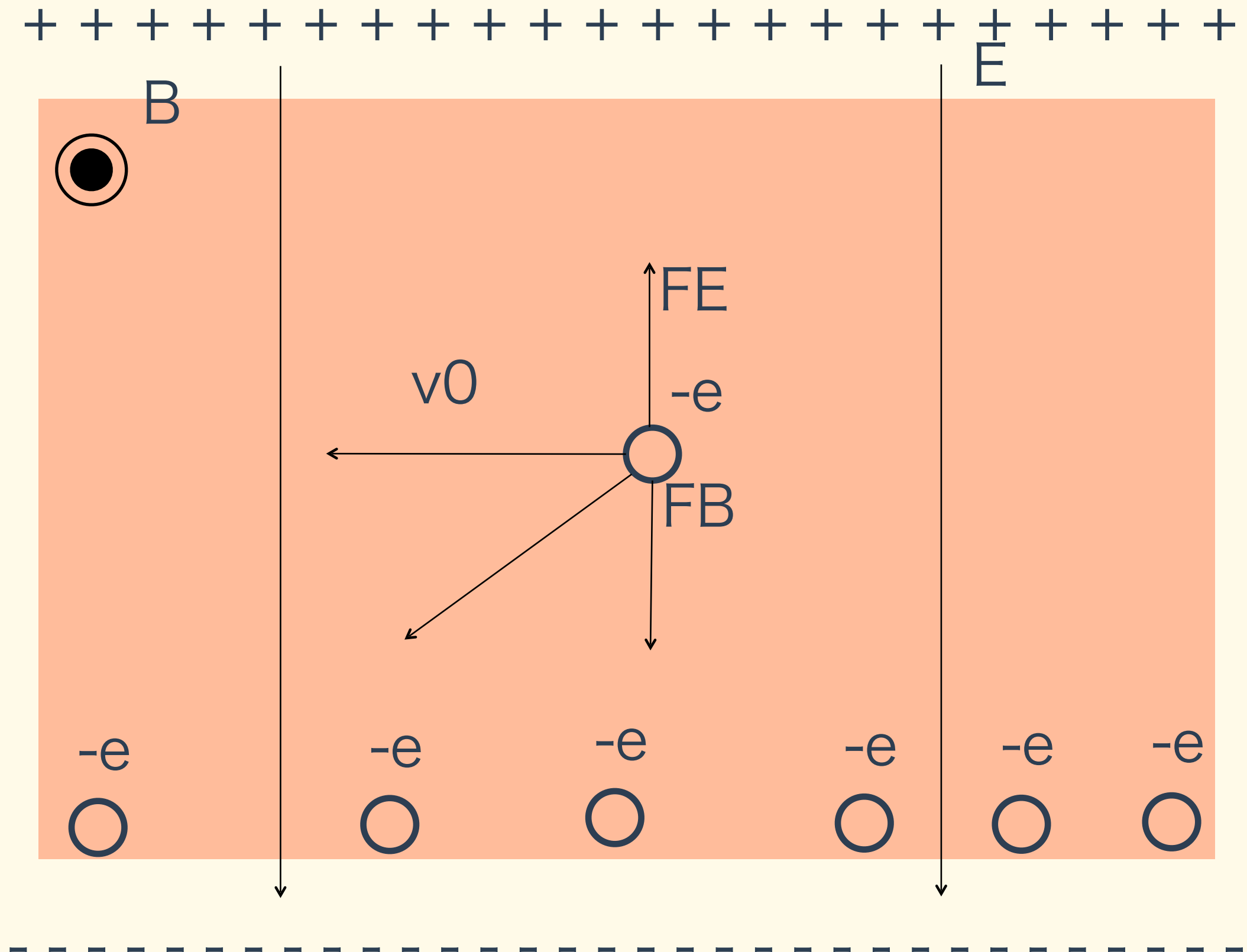
電子は曲がり、端に溜まってくる



端に溜まった電子により電場Eが生じる



磁場から受ける力と電場から受ける力が釣り合い電子は直進する。



数式で表すと

- ▶ 電流密度は

$$\dot{i} = qnv$$

i: 電流密度

q: 電荷

n: 電荷密度

v: 速度

- ▶ 電場と磁場による力は釣り合うので

$$F_B = F_E$$

$$qvB = qE$$

$$v = \frac{E}{B}$$

$$i = qn \frac{E}{B}$$

$$E = R_H i B$$

$$R_H = \frac{1}{nq} \quad \text{ホール定数}$$

ホール効果を用いることで、電流に寄与する電荷(キャリア)の密度を知ることができる。

計算のコツ

- ▶ 文字式で解く
- ▶ 数値は最後に入れる