

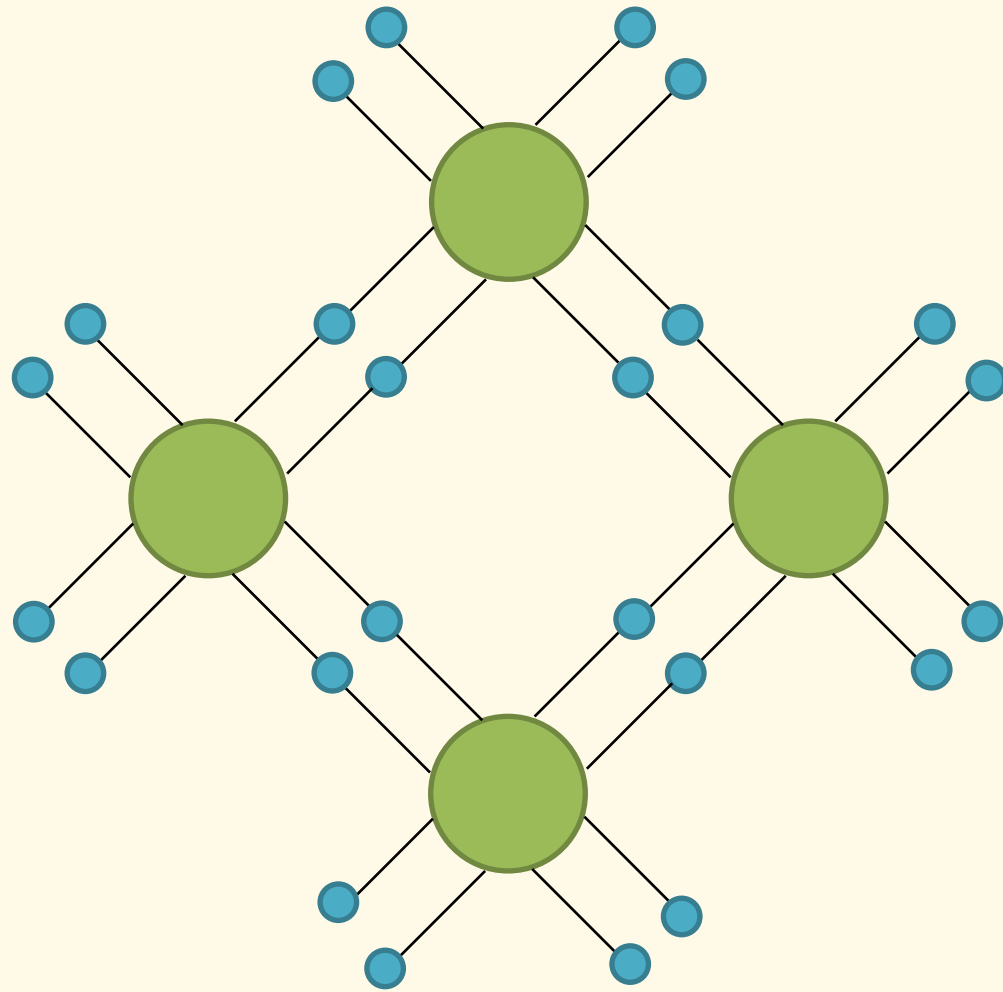
# 電子工学08

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

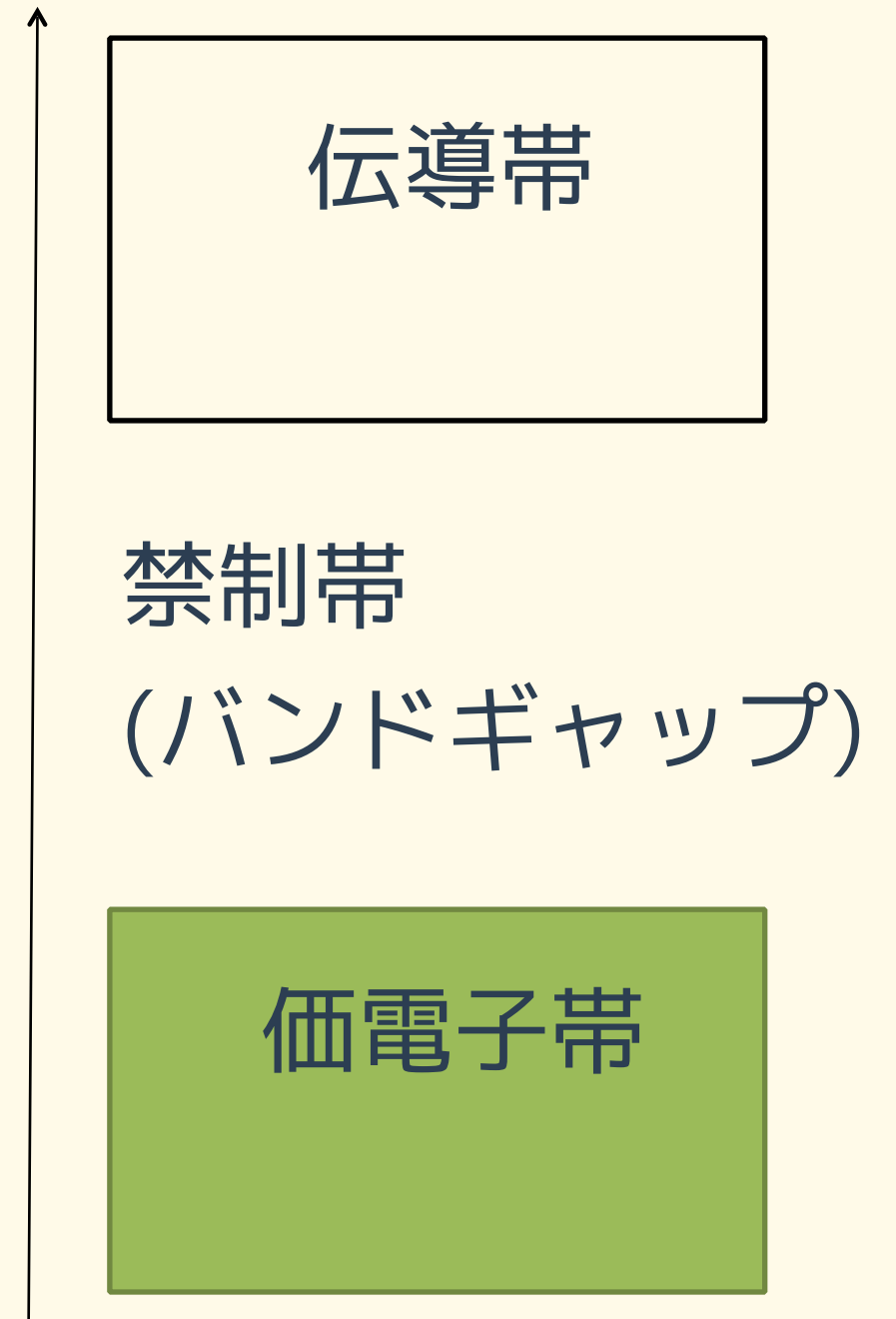
# 真性半導体

- ・ 不純物や結晶格子の欠陥が全くない単結晶半導体
- ・ Siの場合半導体用途で11N(純度99.9999999999999%イレブンナイン)で製造される.

# 絶対零度するとき

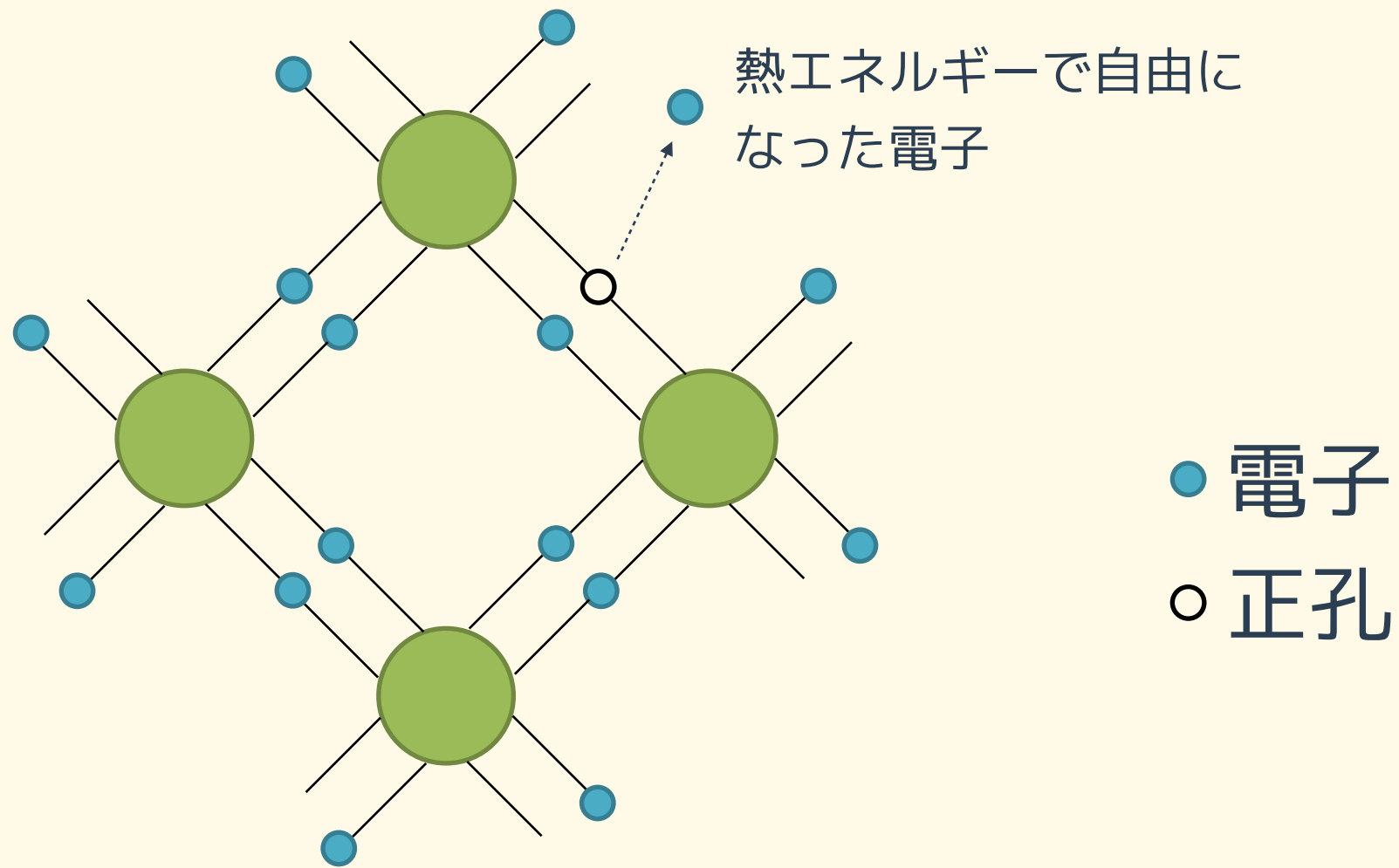


電子はすべて結合に寄与する

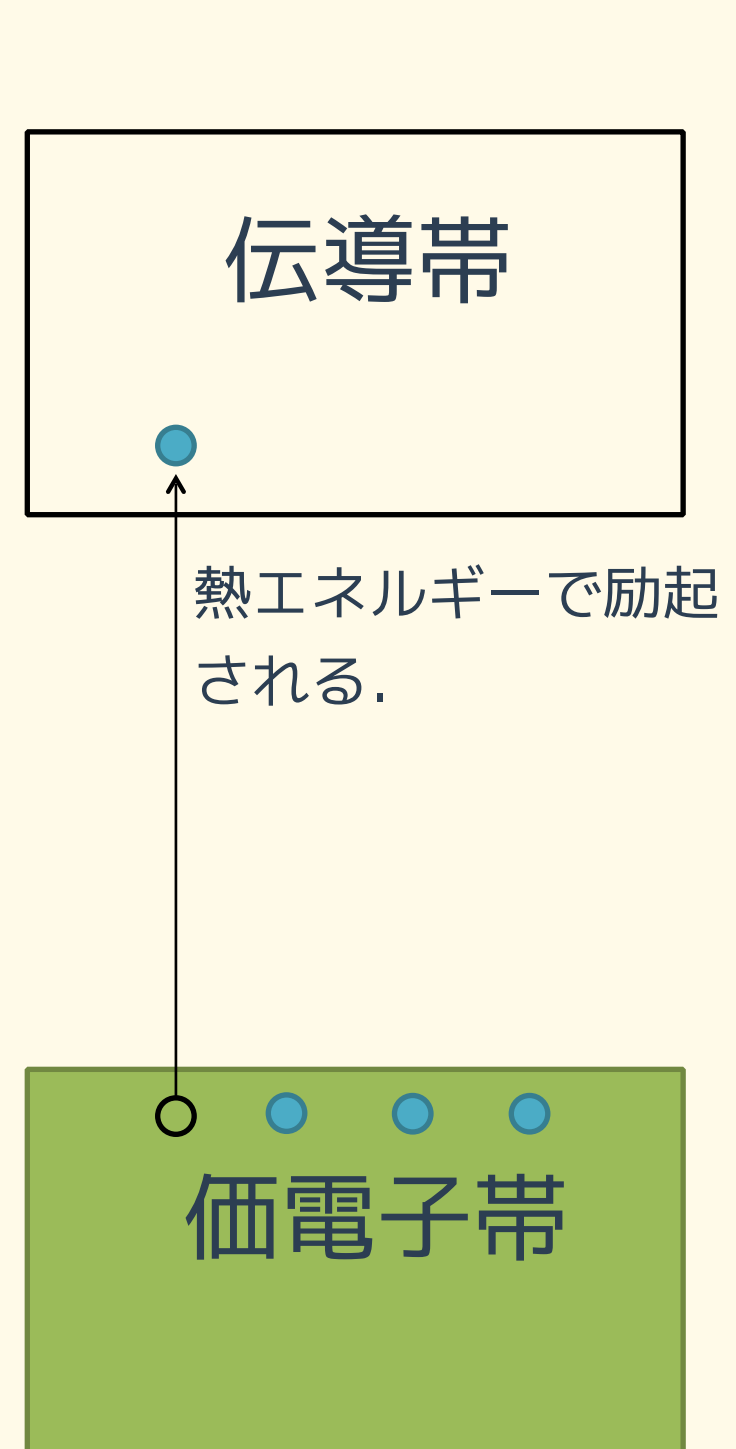


伝導帯に電子はなく  
電気は流れにくい

# $T > 0$ の場合



熱エネルギーで一部の電子が自由になる。  
電子がもともといた場所には+の電気的性質を持ったあな（孔）があく。これを正孔と呼ぶ。

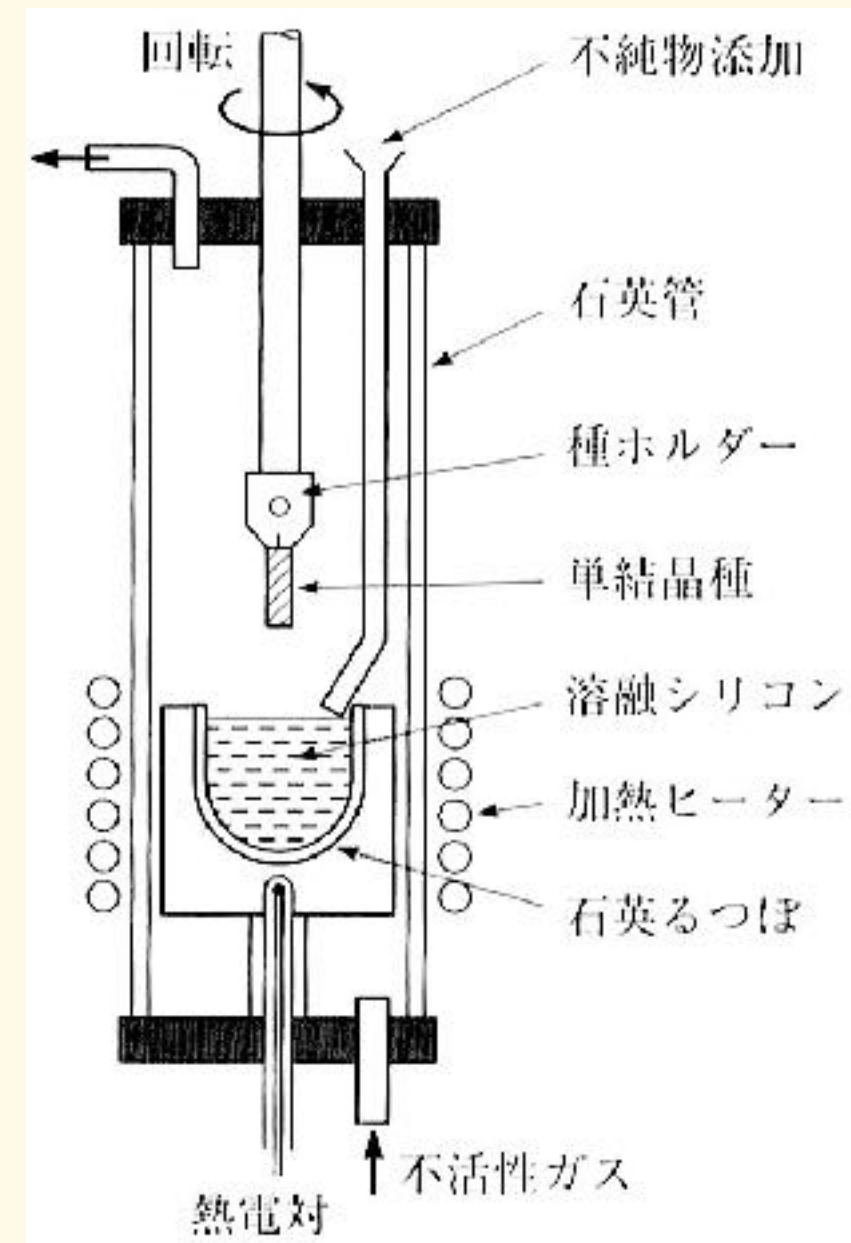


# 真性半導体

- ・ 熱エネルギーにより自由になった電子は、価電子帯から伝導帯に励起されている。
- ・ 電子が抜けた場所は、 $+$ の電気的性質を持つ正孔(ホール)ができる。
- ・ 伝導帯にいる電子は電気を流す役割をする。
  - ・ 電気を流す役割をするものをキャリアと呼ぶ
- ・ 真性半導体の場合、電子と対となり正孔が電気を流す役割をするので、電子と正孔がキャリアとなる。

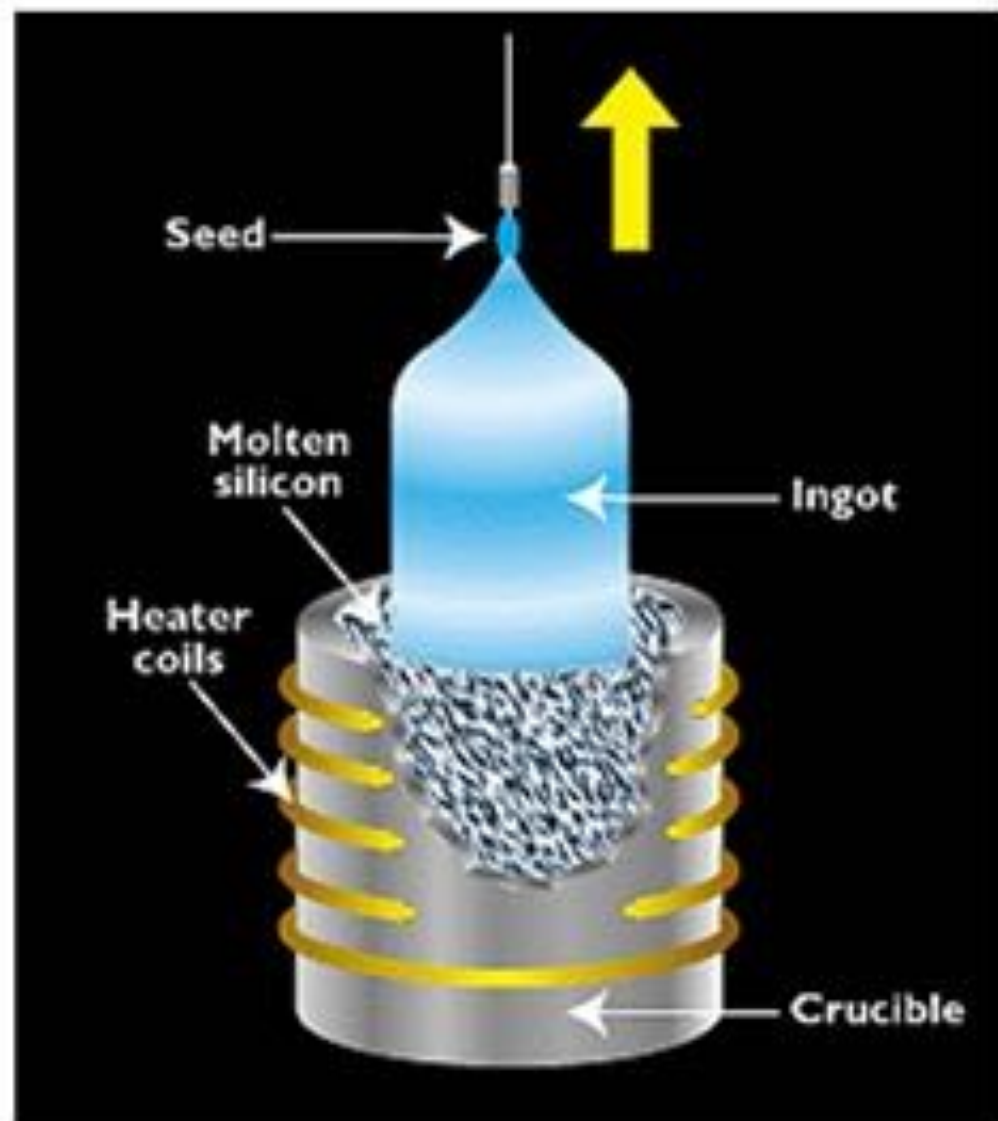
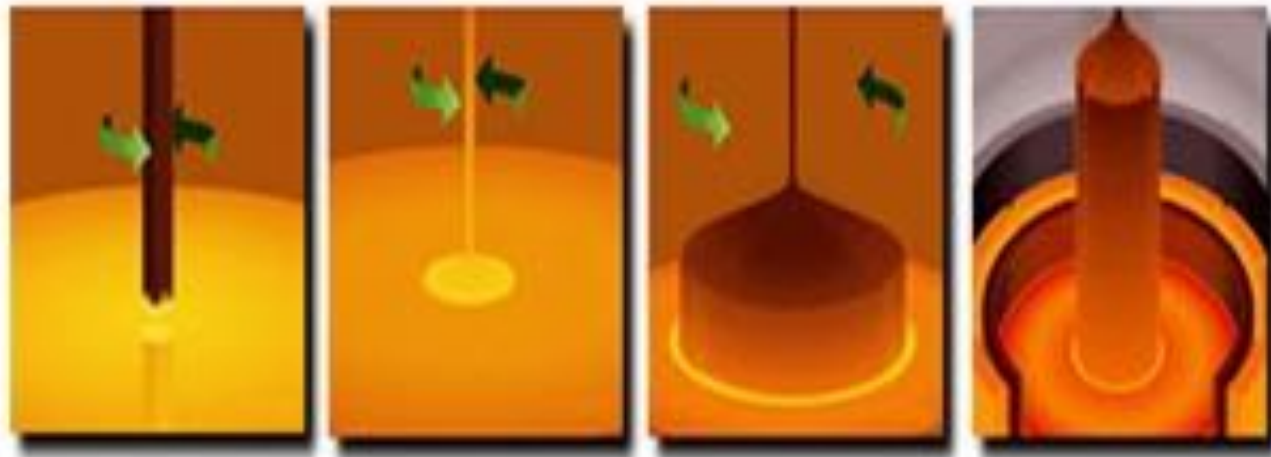
# 製造方法

- ▶ チョクラルスキー法（引き上げ法）
- ▶ るつぼの中にシリコン原料を入れ加熱溶融する．
- ▶ 上から種結晶を下ろし，その先端を液状態のシリコンにつける．
- ▶ 種結晶を回転させ引き上げる．（毎分1mm，10回転）



（豊田，半導体の科学とその応用）

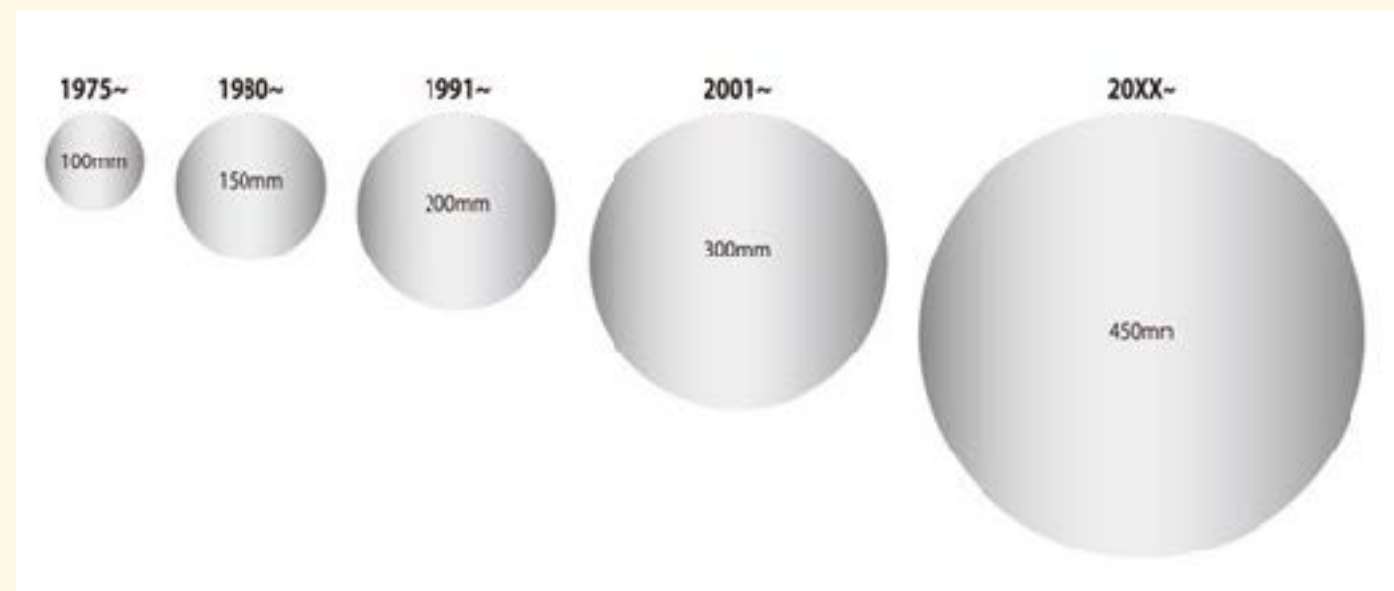








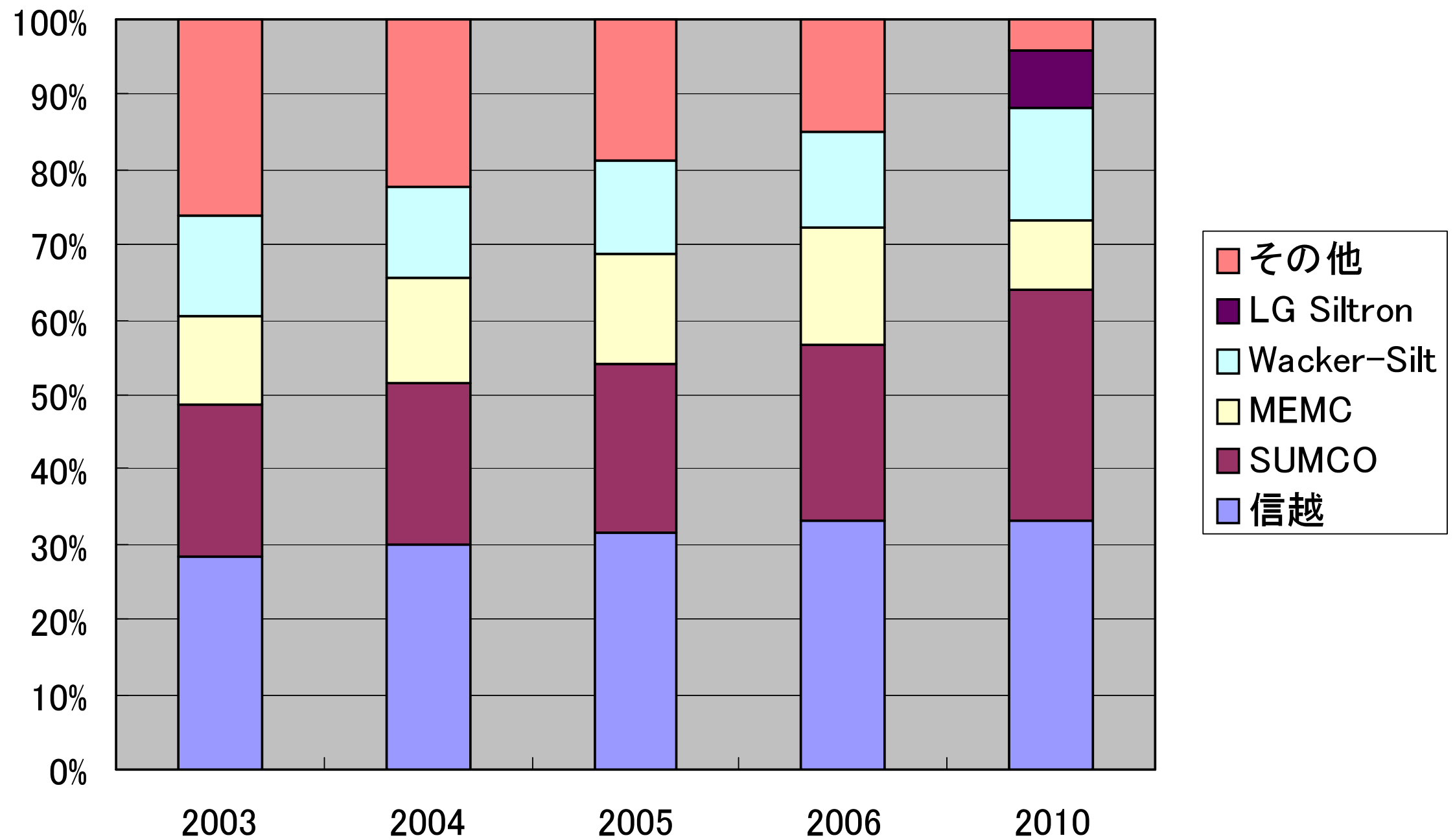
# シリコンウェハのサイズ



(SUMCO)

# シリコンウェーハのシェア

ウェハー市場マーケットシェア



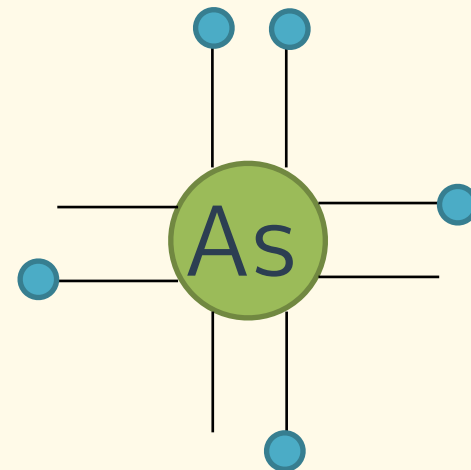
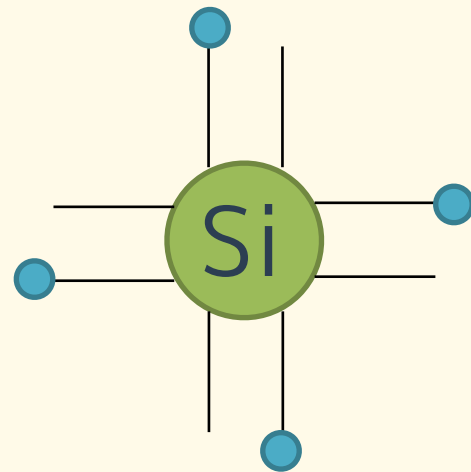
(国際半導体製造装置材料協会)

# 不純物半導体

- ・ 真性半導体に微量の不純物を入れ（ドーブ）キャリアを作ることができる（ドーピング）。このようにして作った半導体を不純物半導体（外因性半導体）という。

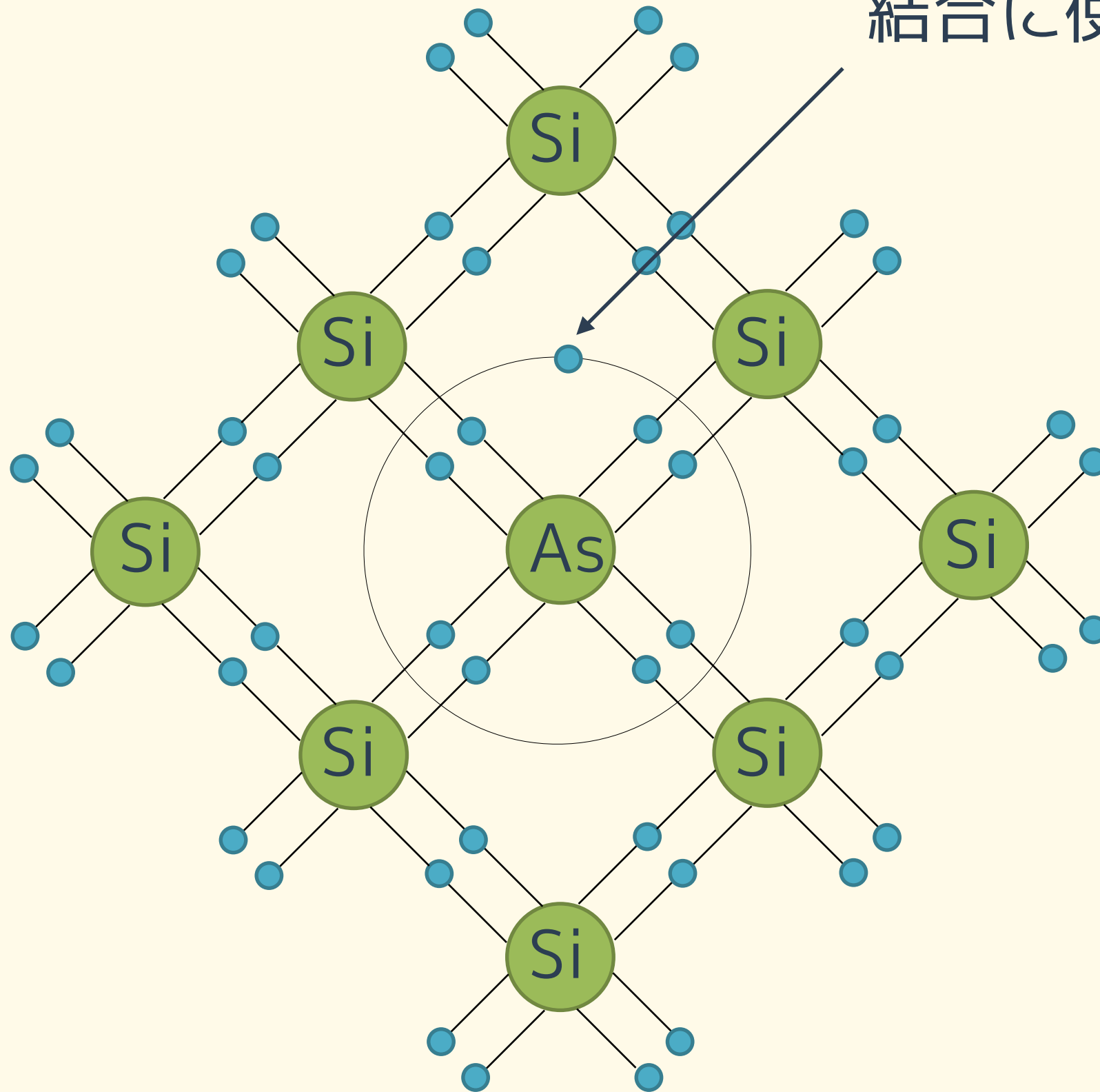
# n型半導体

- ・ 真性半導体に5価の不純物（最外殻電子が5個）をドーピングする.
- ・ 不純物をドナー不純物という.



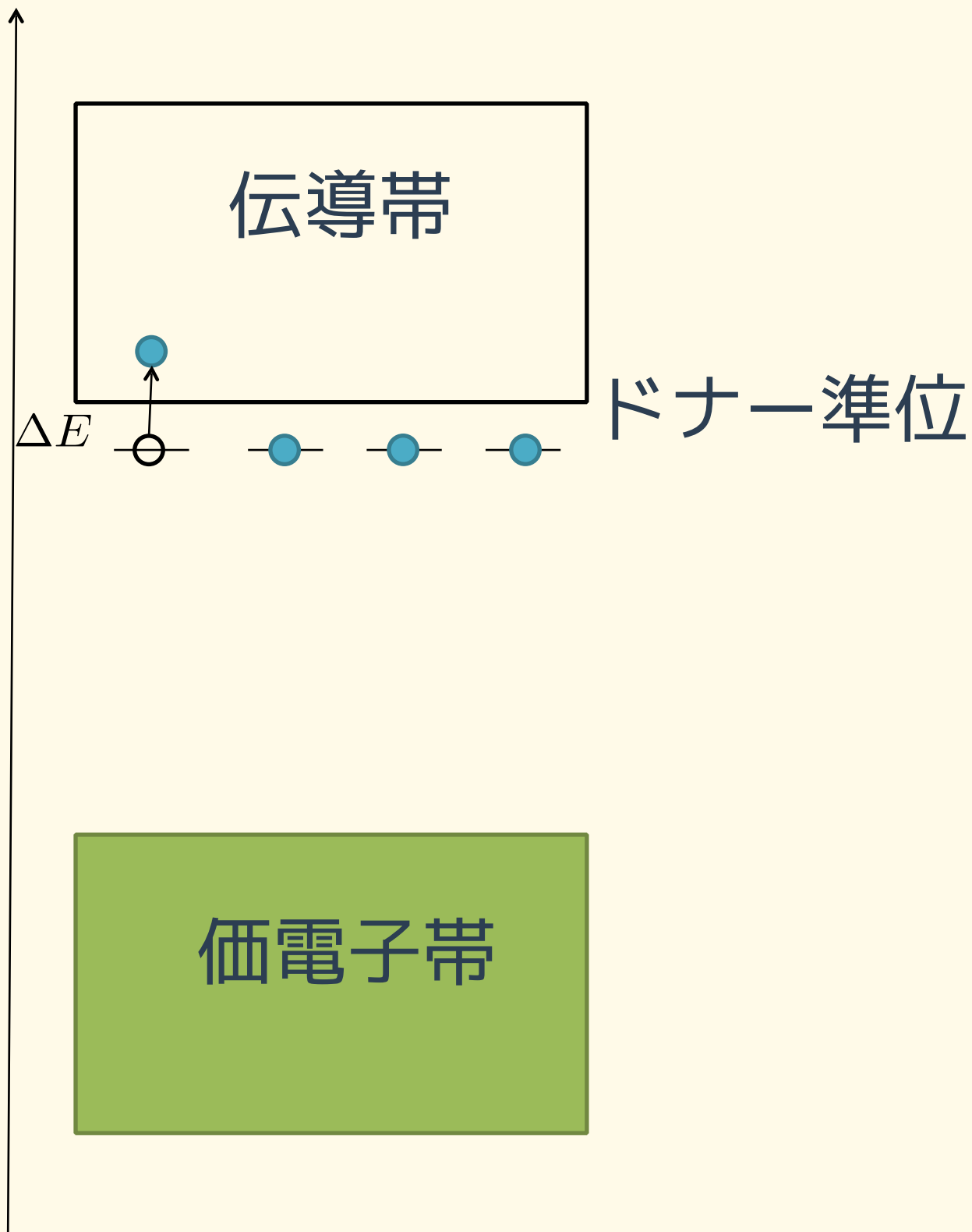
シリコンは最外殻電子が4つ      ヒ素は最外殻電子が5つ

結合に使われない電子



結合には4つの電子があれば良いので、電子はひとつ  
余る。結合に使われない余った電子がキャリアとな  
る



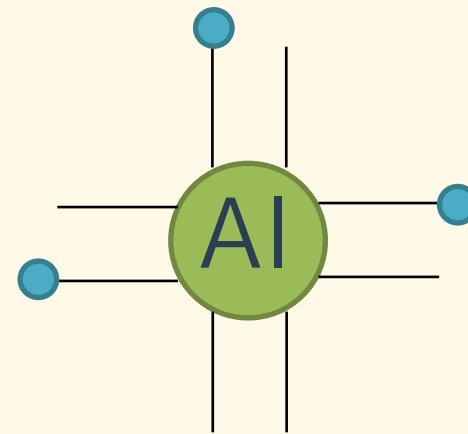
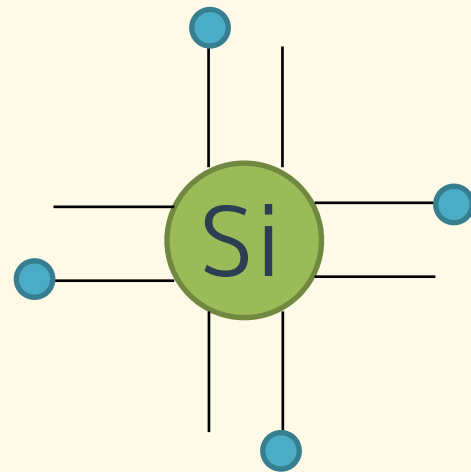


結合に使われな  
い余った電子  
は、ドナー準位  
とよばれるエネ  
ルギー準位を形  
成する。

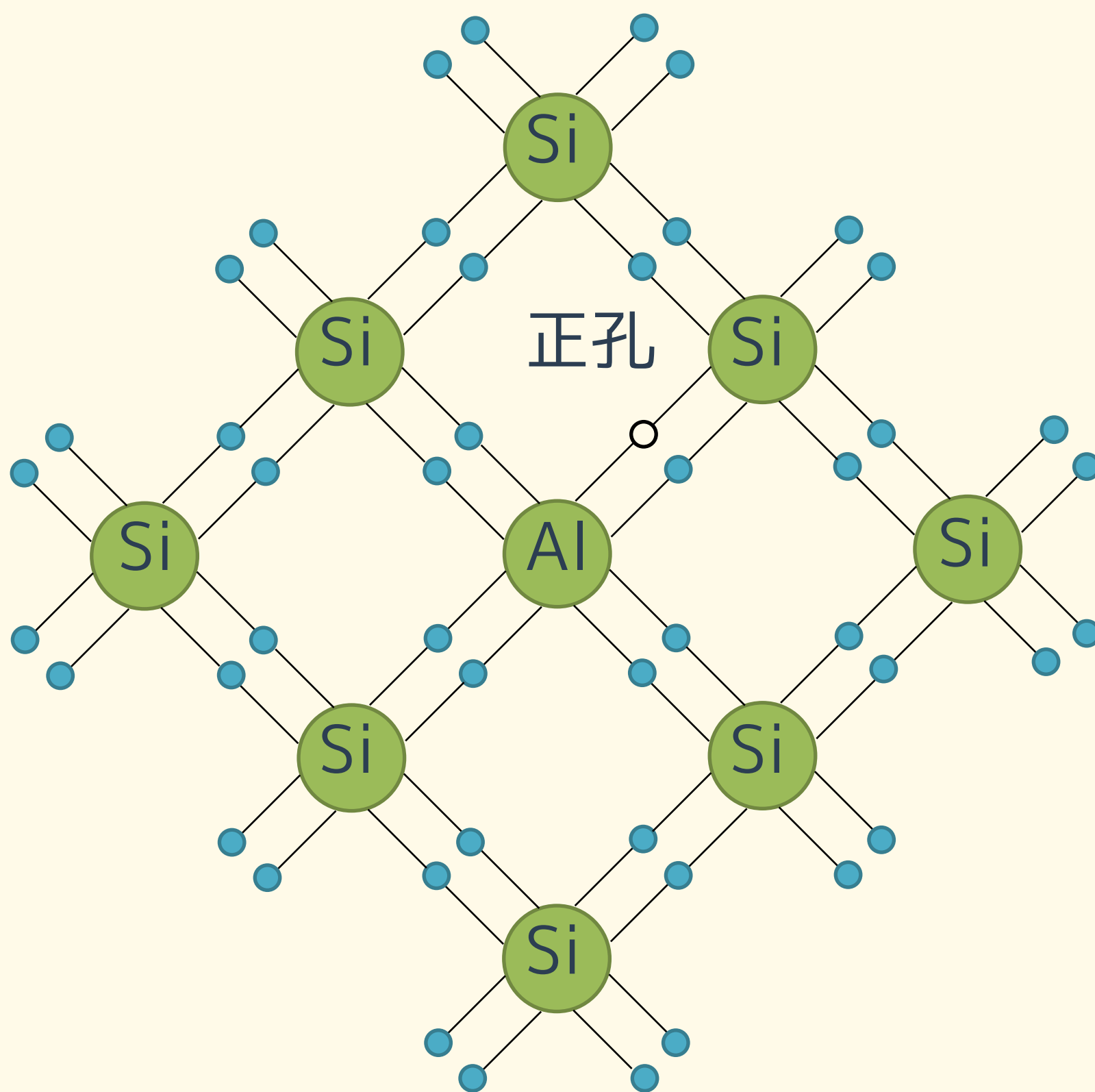
ドナー準位にあ  
る電子は僅かな  
熱エネルギーで  
励起され、伝導  
電子になる。

# p型半導体

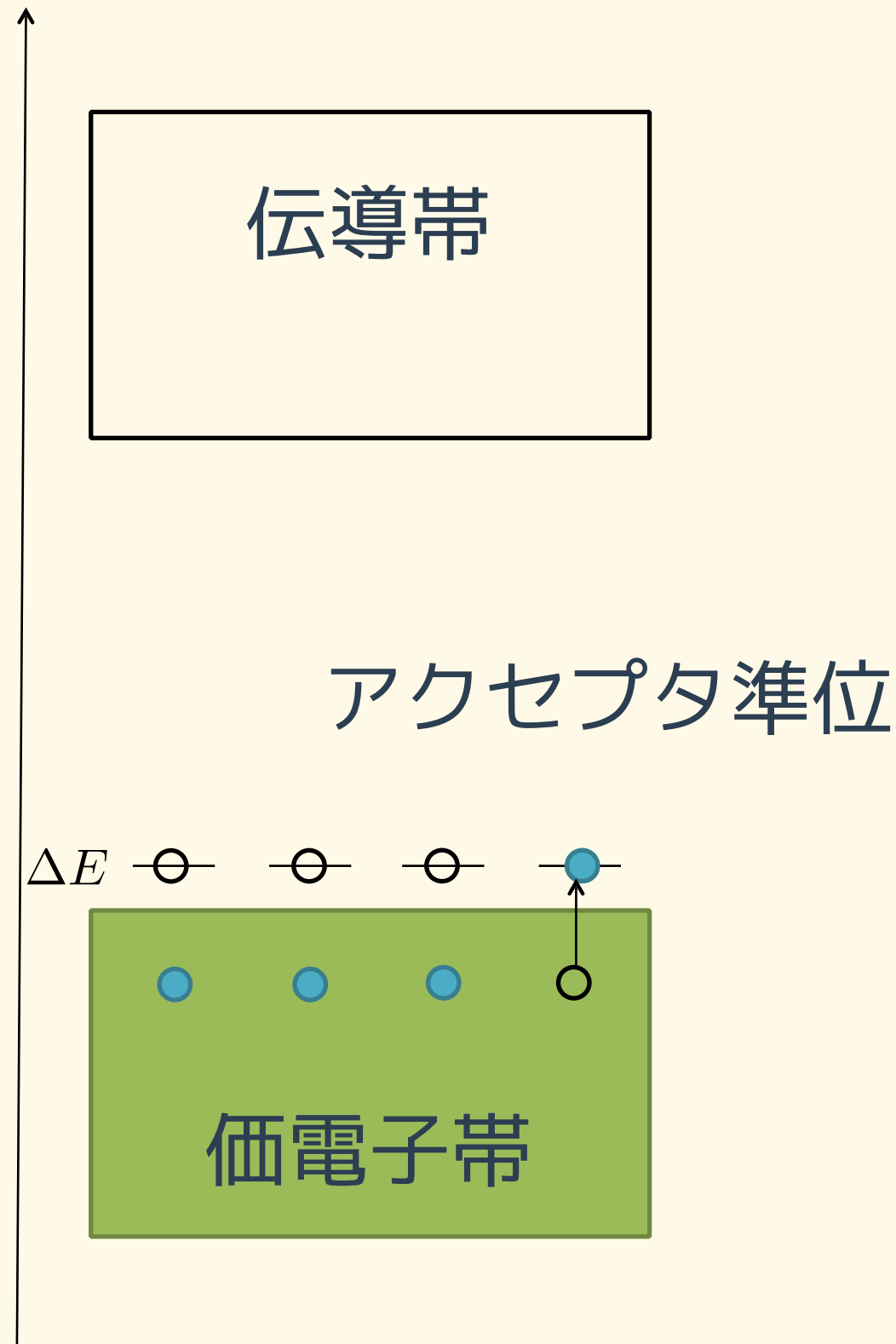
- ・ 真性半導体に3価の不純物（最外殻電子が3個）をドーピングする.
- ・ 不純物をアクセプタ不純物という.



シリコンは最外殻電子が4つ    アルミニウムは最外殻電子が3つ



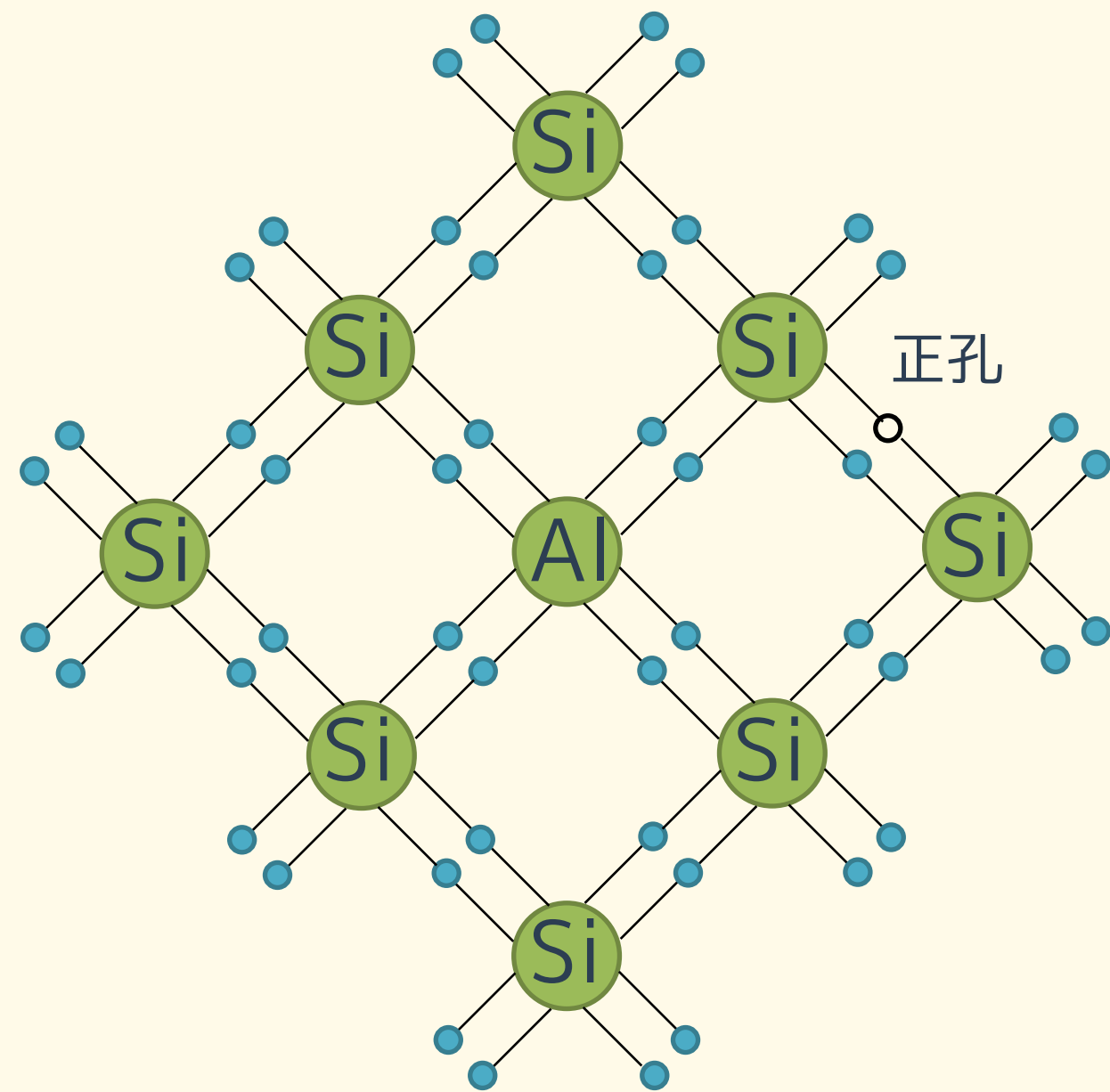
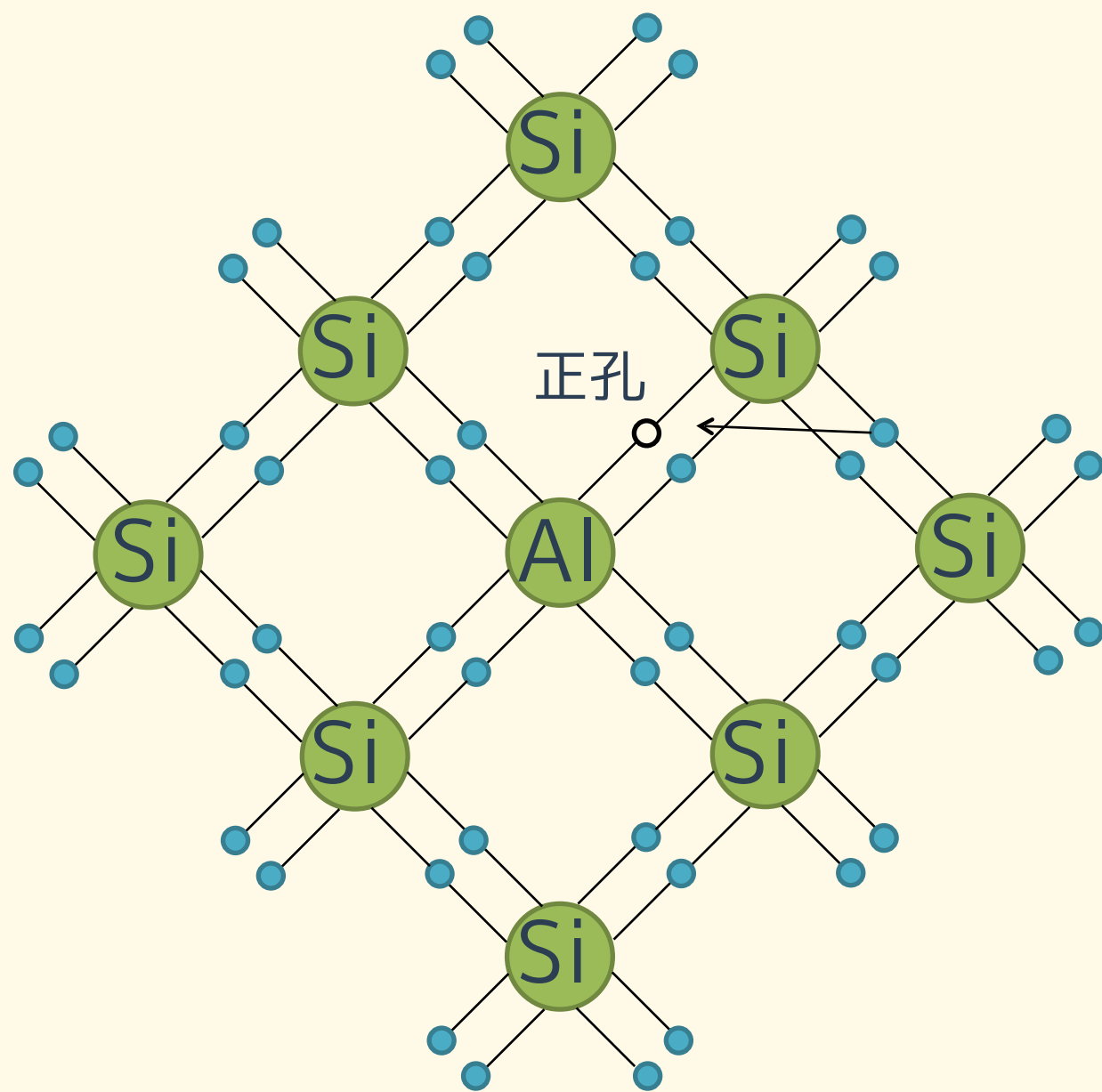
3価の原子を使ったため、電子が足りない状況になる。足りない場所は+の電氣的性質を持ったあな（正孔、ホール）となる。この正孔が電気を流すキャリアとなる。



アクセプタ不純物が作るエネルギー準位をアクセプタ準位という。

電子は熱によりアクセプタ準位励起される。その結果価電子帯に正孔が形成される。

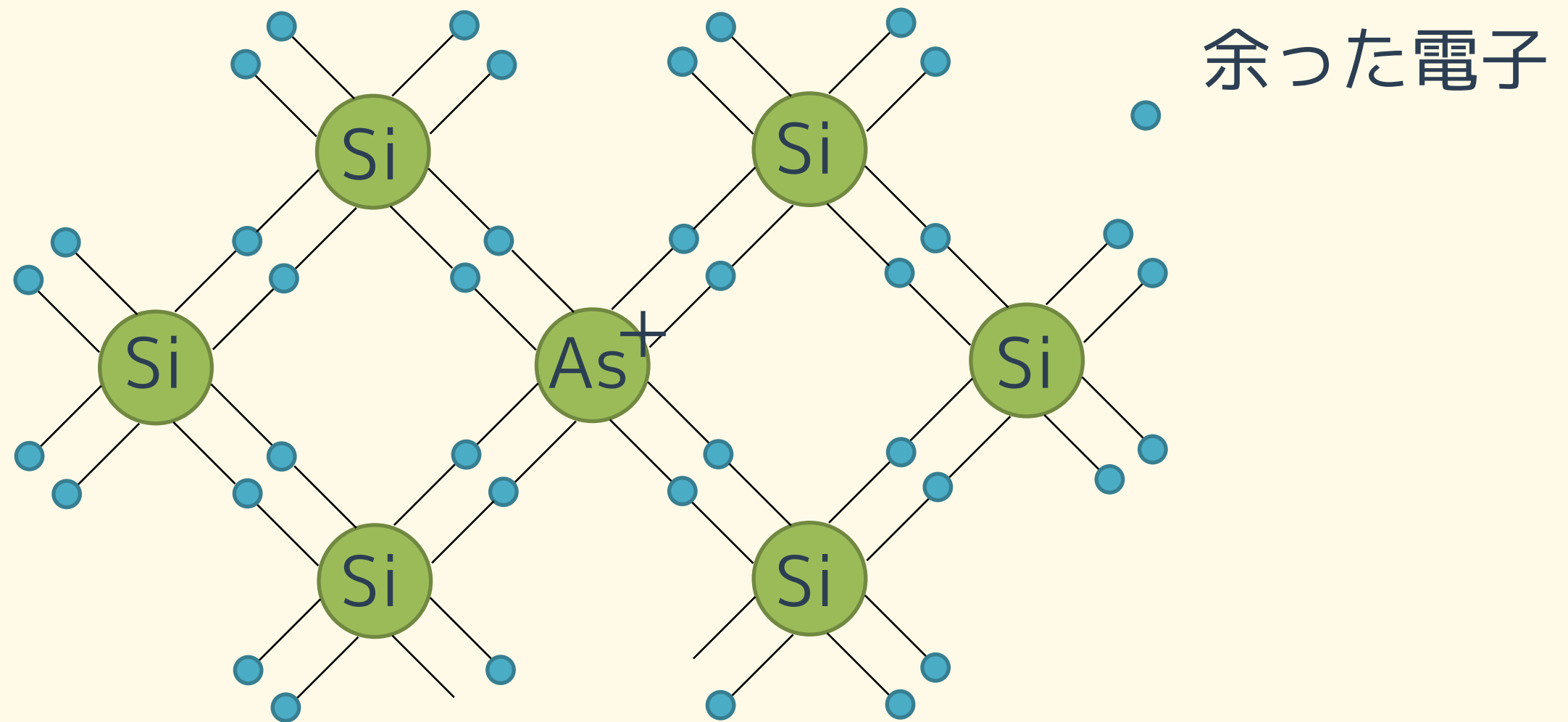
これは、結晶の結合手から電子が次々と正孔を埋めていくことに対応する。



椅子取りゲームのように正孔に電子が移動する。結果として正孔は結晶内を移動することになる。

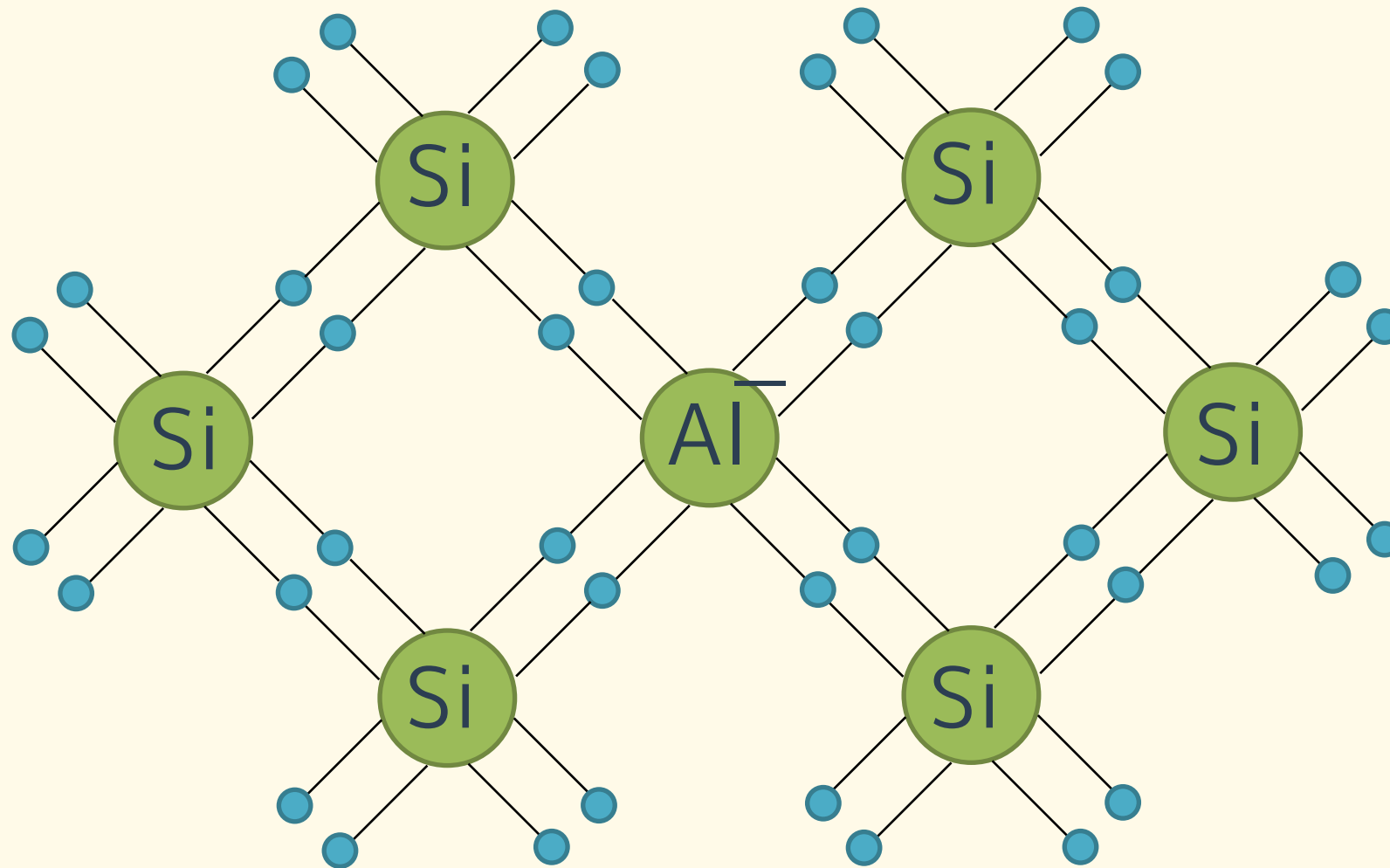


# ドナーイオン



ドナーから余った電子が遠くへ行ってしまうと、ドナーは電氣的には+となる（イオン化される）。イオン化されたドナーをドナーイオンと呼ぶ。

# アクセプタイオン



正孔に電子が入ってしまうと，アクセプタ不純物は電氣的に $-$ になる．イオン化されたアクセプタ不純物をアクセプタイオンと呼ぶ．

# 多数キャリア

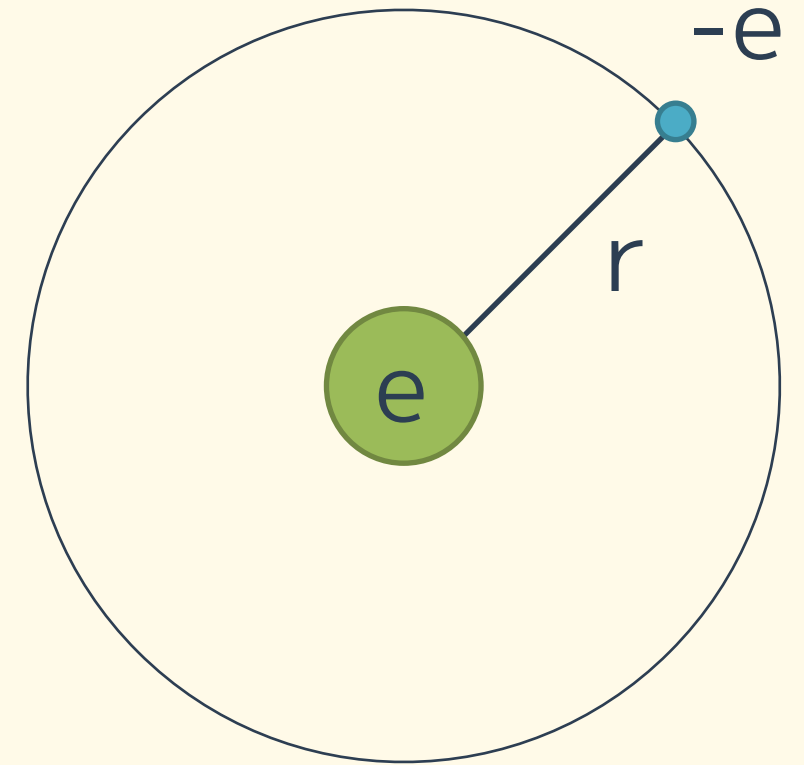
- ・ 実際には, n型半導体, p型半導体にも電子とホールの両方のキャリアが存在している.
- ・ 半導体の中のキャリアとして, 圧倒的に多い方を多数キャリア, 少ない方を少数キャリアと言う.
- ・ n型半導体の場合, 電子が多数キャリア
- ・ p型半導体の場合, ホールが多数キャリア

# ドナーのイオン化エネルギー

ドナーイオンがイオン化するためのエネルギーを求めてみる．ドナーの周りに電子が回っていると考える．その電子が，ドナーから離れることで，ドナーはイオン化する．よって，イオン化エネルギーはボーアの水素モデルから

$$E_n = -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \right)^2 \frac{e^4 m^*}{\hbar^2}$$

と求められる．しかし，電子は結晶内にあるため，誘電率や質量を水素と同じものが使えない．誘電率は比誘電率 $\epsilon_r$ を掛ける必要があり，質量は有効質量 $m^*$ を使う必要がある．



# 問題

- ▶ GaAsでは誘電率 $\epsilon=13.2$ , 電子の有効質量 $m^*=0.067m_0$ ( $m_0$ は電子の静止質量)である.
- ▶ ドナーイオンのイオン化エネルギーを求めよ.
  - ▶ 答え 5.2meV
- ▶ 基底状態の軌道半径を求めよ.
  - ▶ 答え 46.6nm



# フェルミ-ディラック統計

- ・ 固体中の電子は莫大に存在する
- ・ 統計と使って電子の状態を考える
- ・ 固体中の電子の状態は、フェルミ-ディラック統計に従う
  - ・ エネルギー準位は量子化されている.
  - ・ あるエネルギーの範囲にある電子の数は制限される
  - ・ 電子がエネルギー $E$ の状態を占有する個数(割合)を決められる.

# フェルミ-ディラック分布

- 電子があるエネルギー準位を占める割合

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E-E_F}{k_B T}\right) + 1}$$

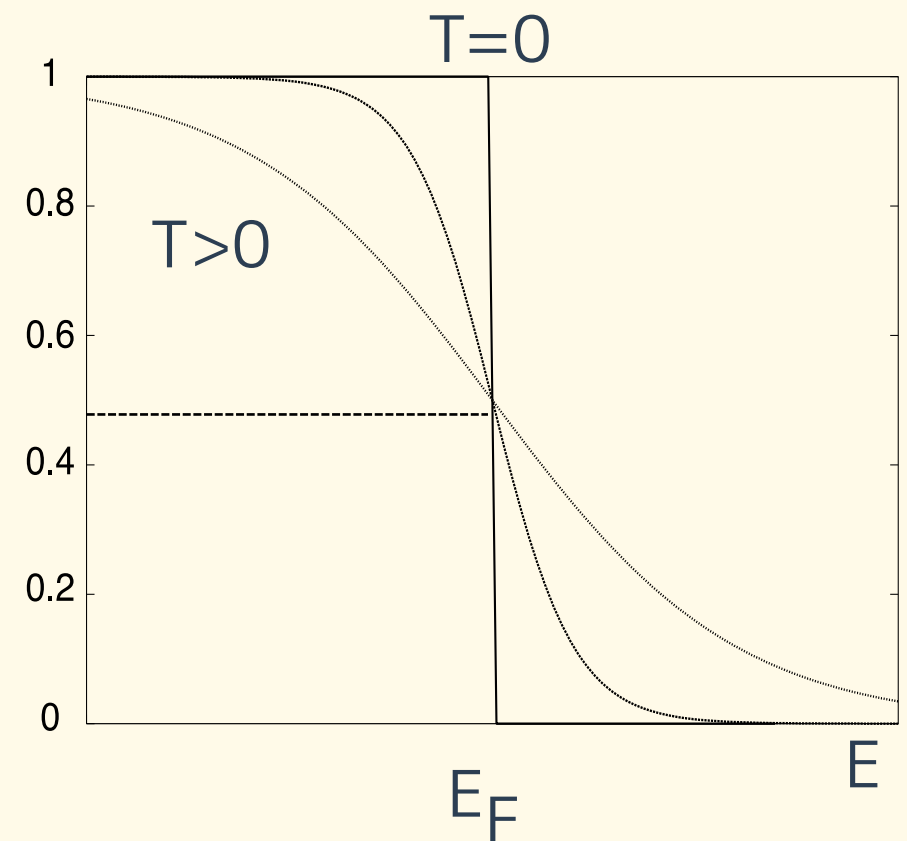
$E$  : エネルギー

$E_F$  : フェルミ準位

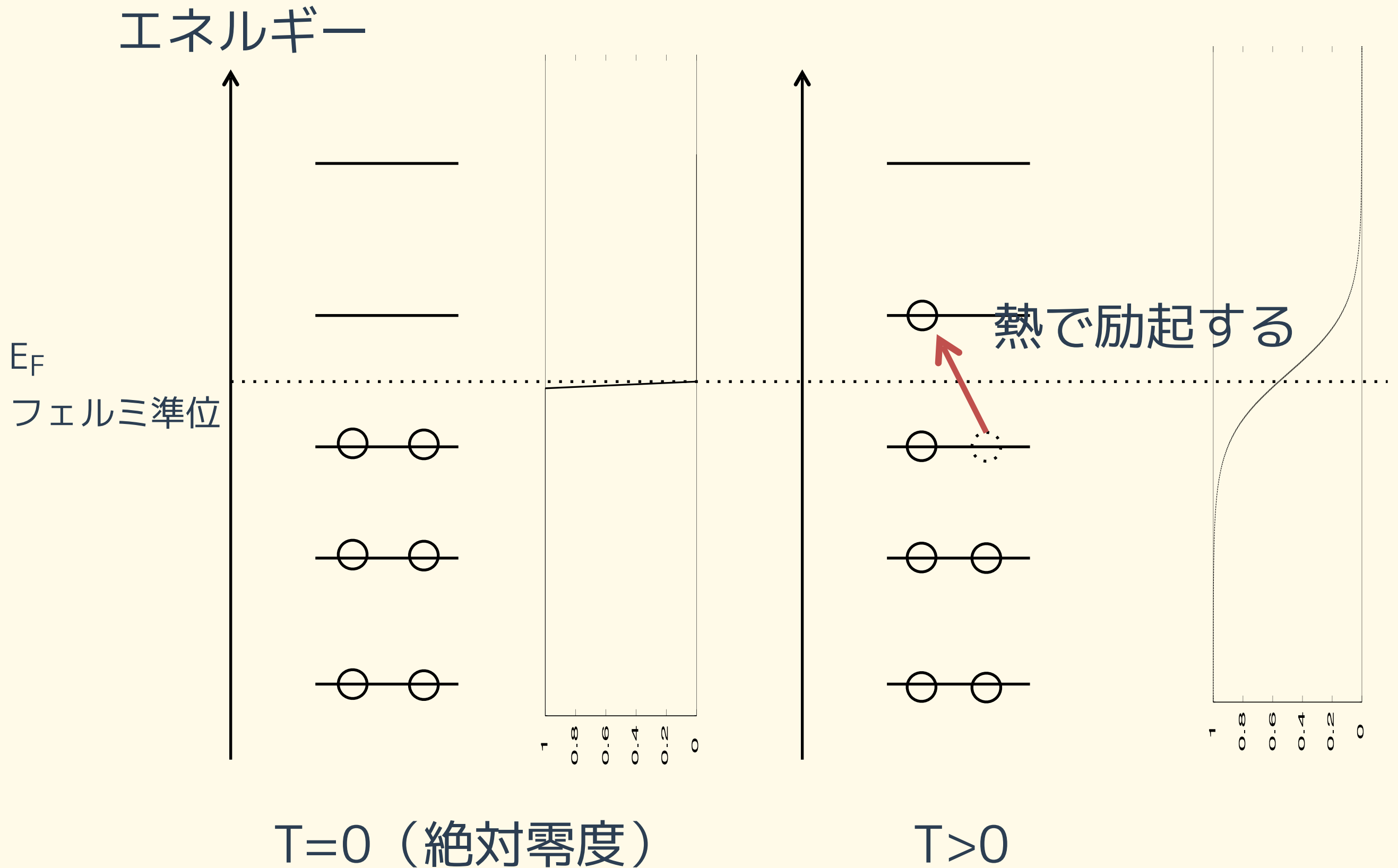
$k_B$  : ボルツマン定数

$T$  : 絶対温度

$$f(E)=0.5$$



# フェルミ分布



# 問題

フェルミ-ディラック分布関数において $E=E_F+\delta$ とすれば  
 $f(E)=f(E_F+\delta)$ と表される。このとき,

$$f(E_F + \delta) = 1 - f(E_F - \delta)$$

となることを示せ。そして、その意味を考えよ。

# ホール効果

- ・ キャリアの密度を測るために用いられる物理現象
- ・ まずはホール効果を理解するために電子が磁場から受ける影響について学ぶ.

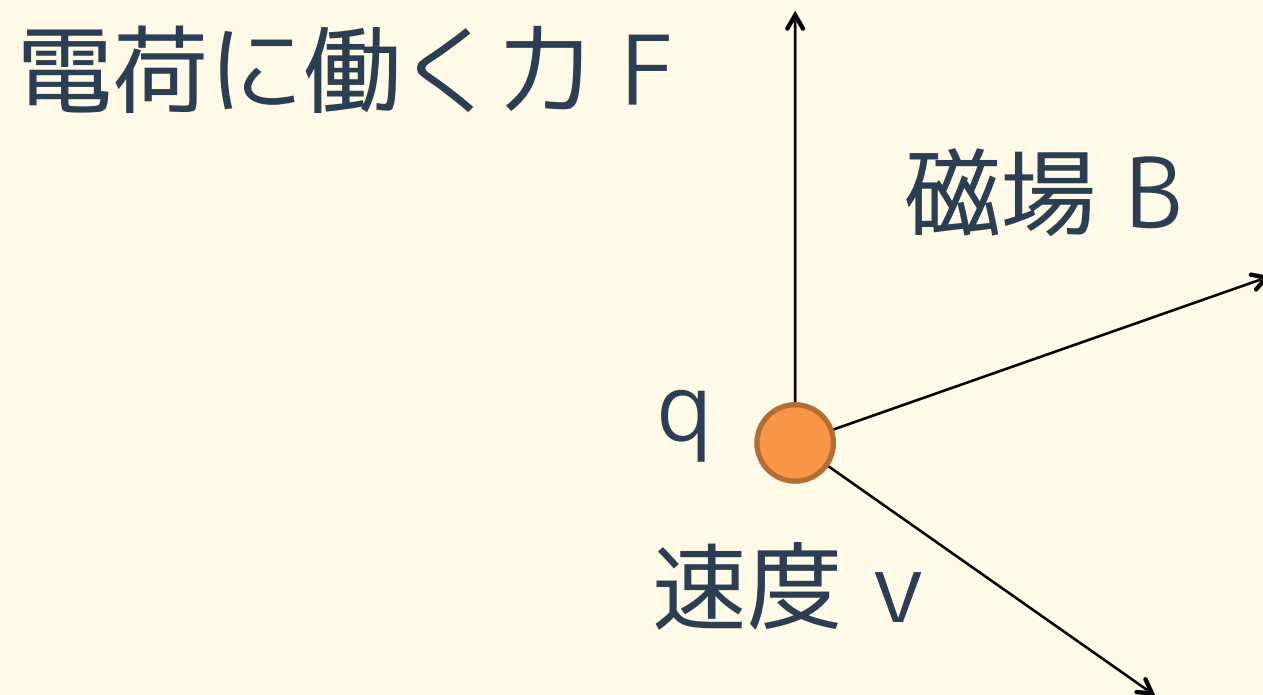


# 磁場

- ・ 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する．
- ・ 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 $B$

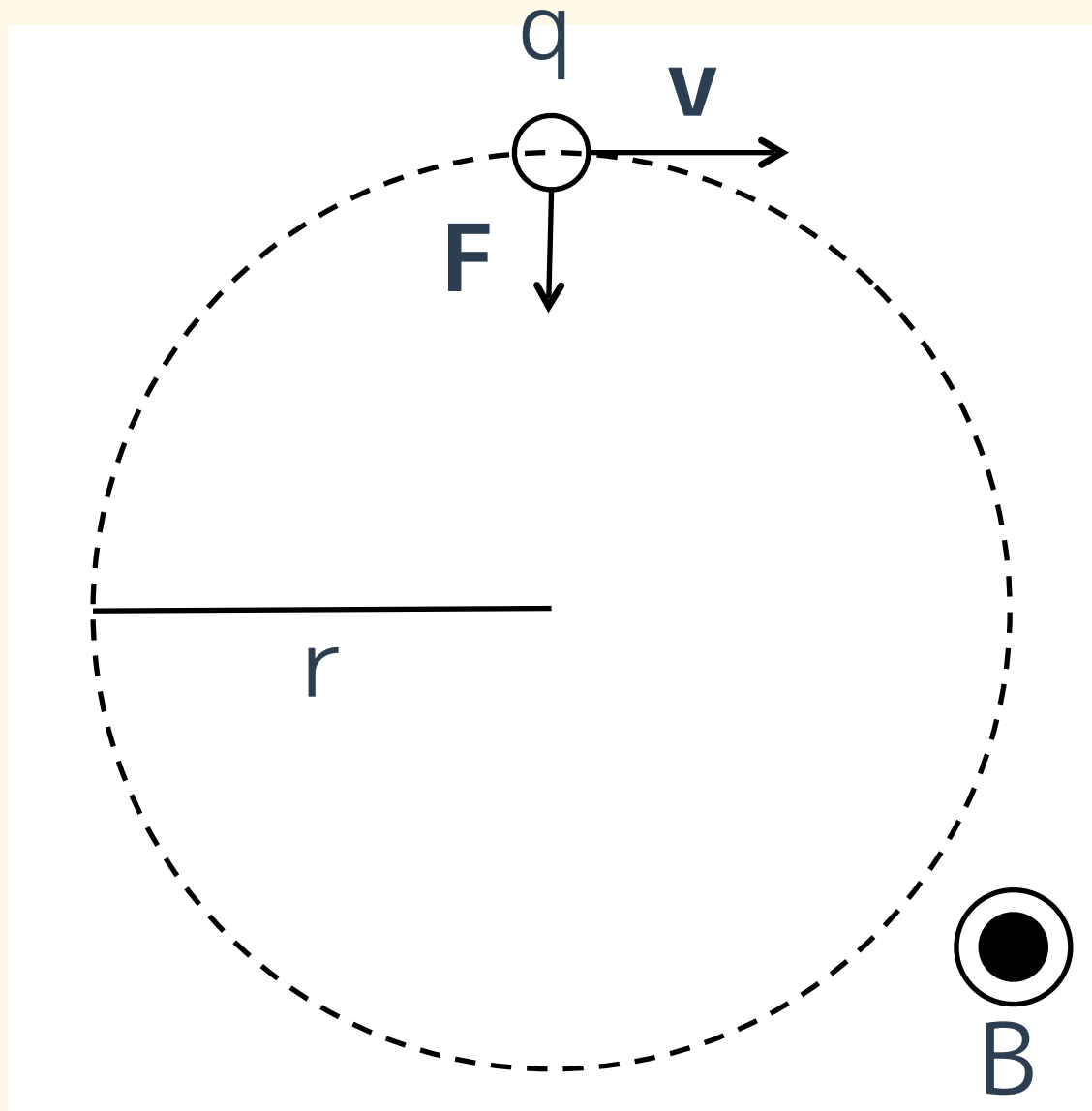
# 磁場の影響を受ける電荷

運動する電荷は磁場の影響を受ける。

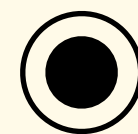


$$\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$$

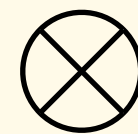
# 磁場中の電荷の動き



- 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

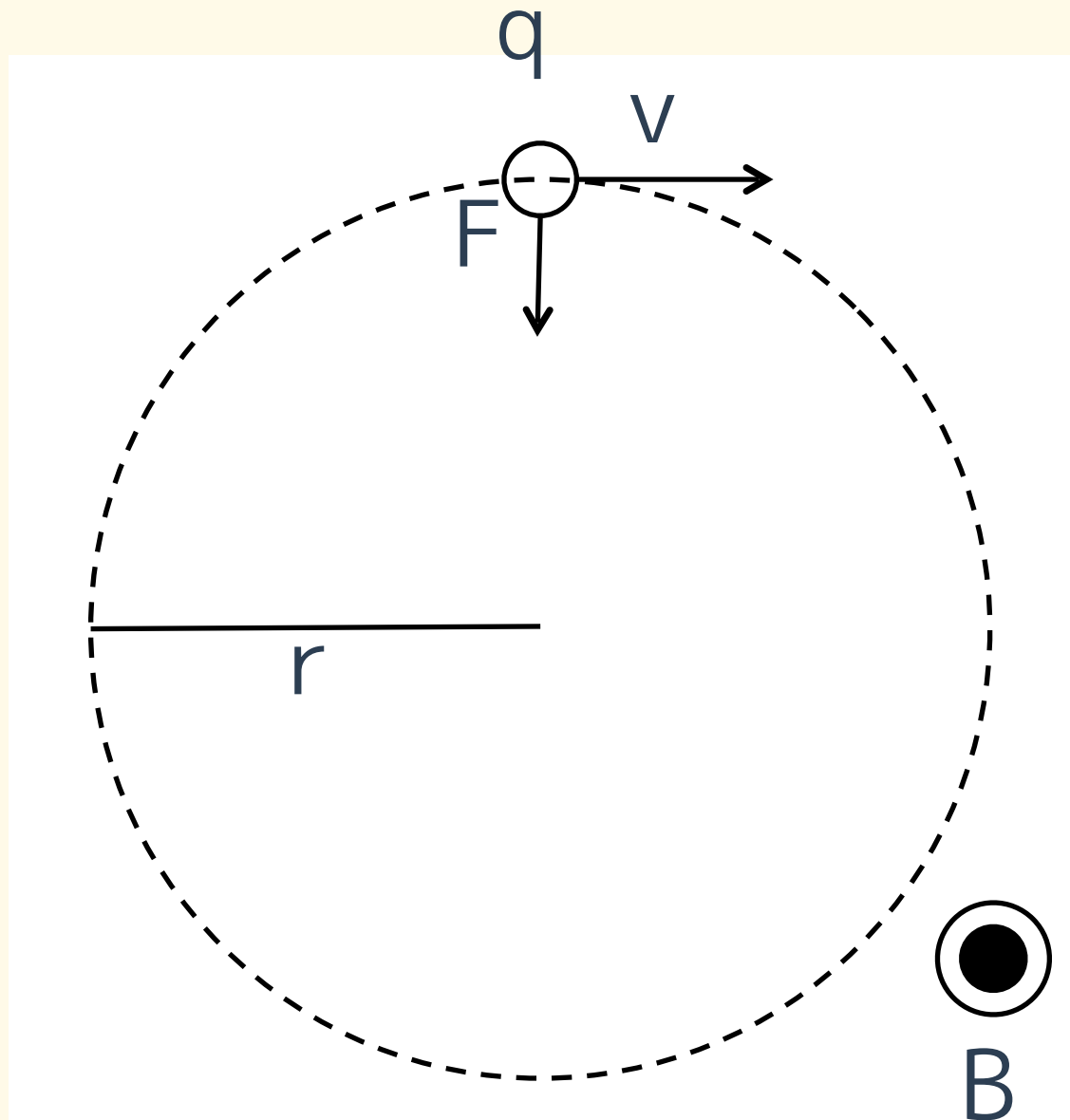


画面から垂直に出ている



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

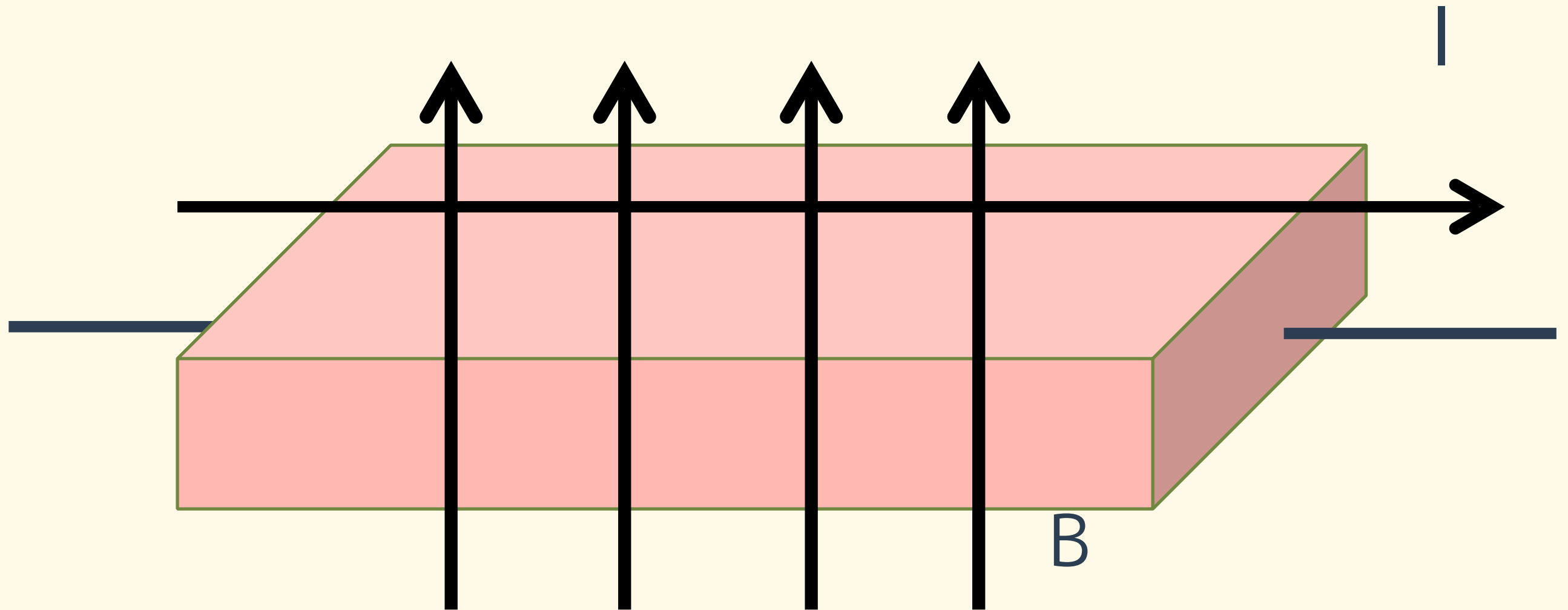
# ローレンツ力

- ・ 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。

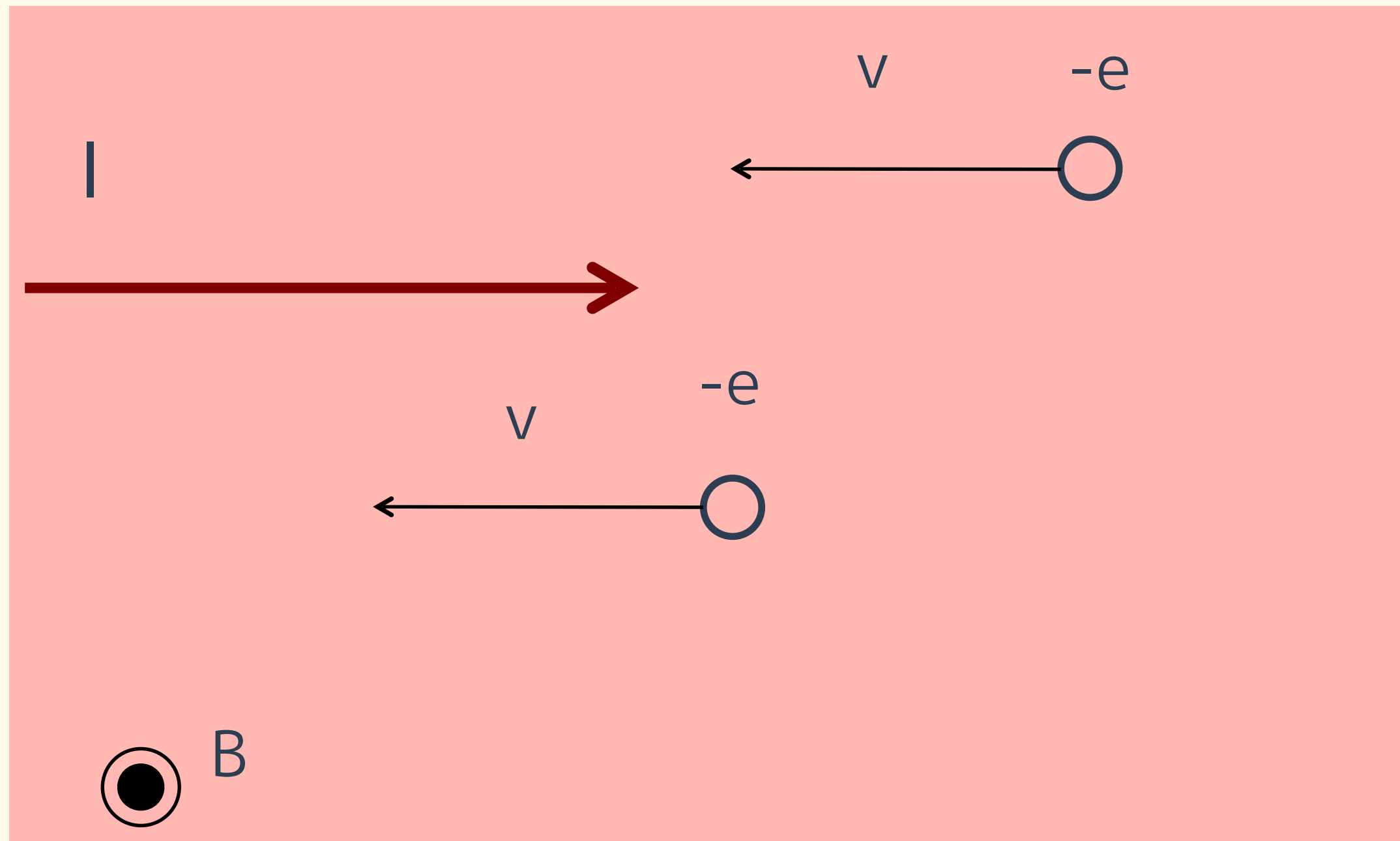
$$\mathbf{F} = \underbrace{q\mathbf{E}}_{\text{電場から受ける力}} + \underbrace{q\mathbf{v} \times \mathbf{B}}_{\text{磁場から受ける力}}$$

# ホール効果

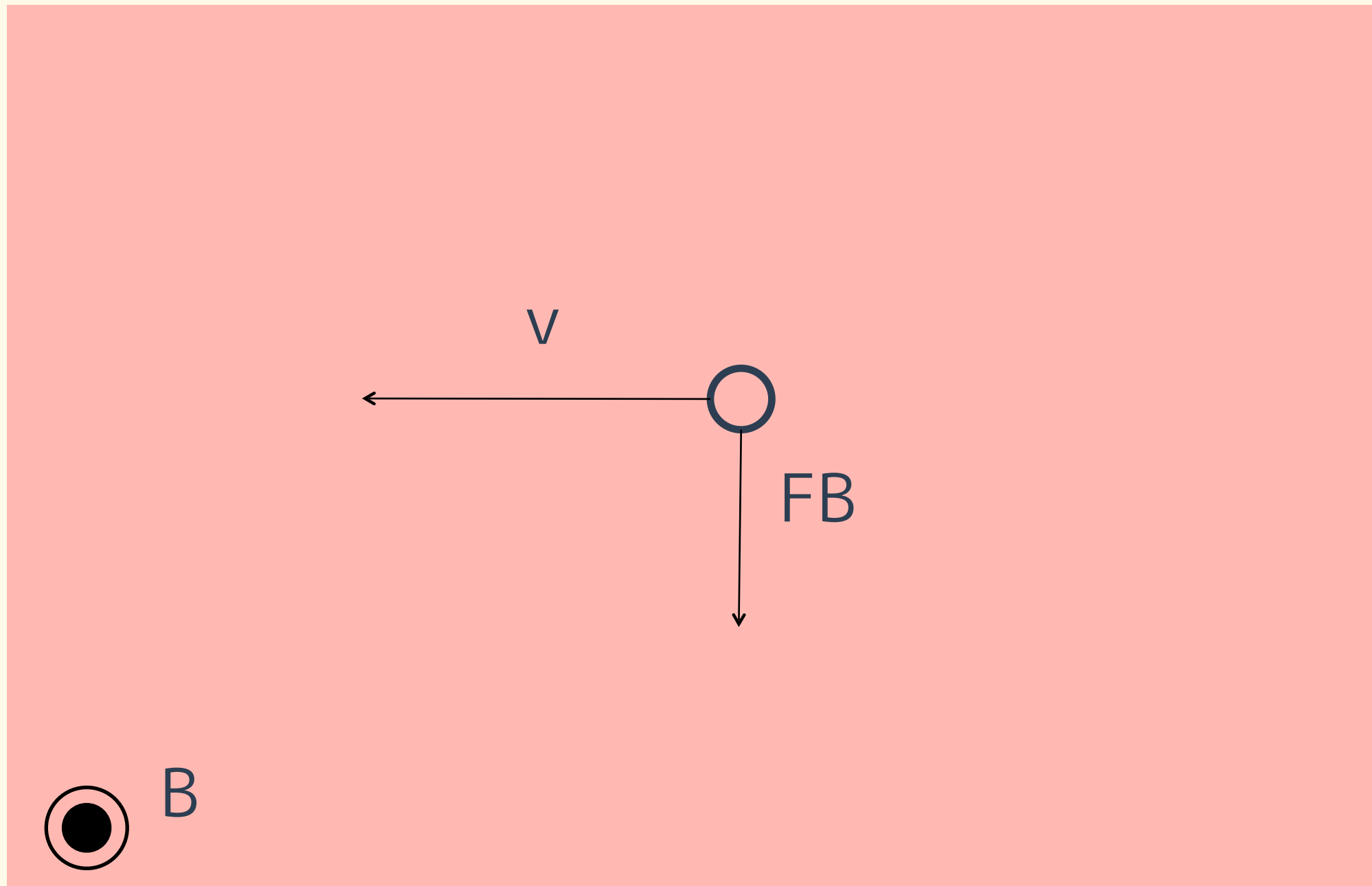
電流に対し垂直に磁場をかけると、電流が曲がる。曲がることで、電荷の偏りが生じ起電力が発生する。



# 原理

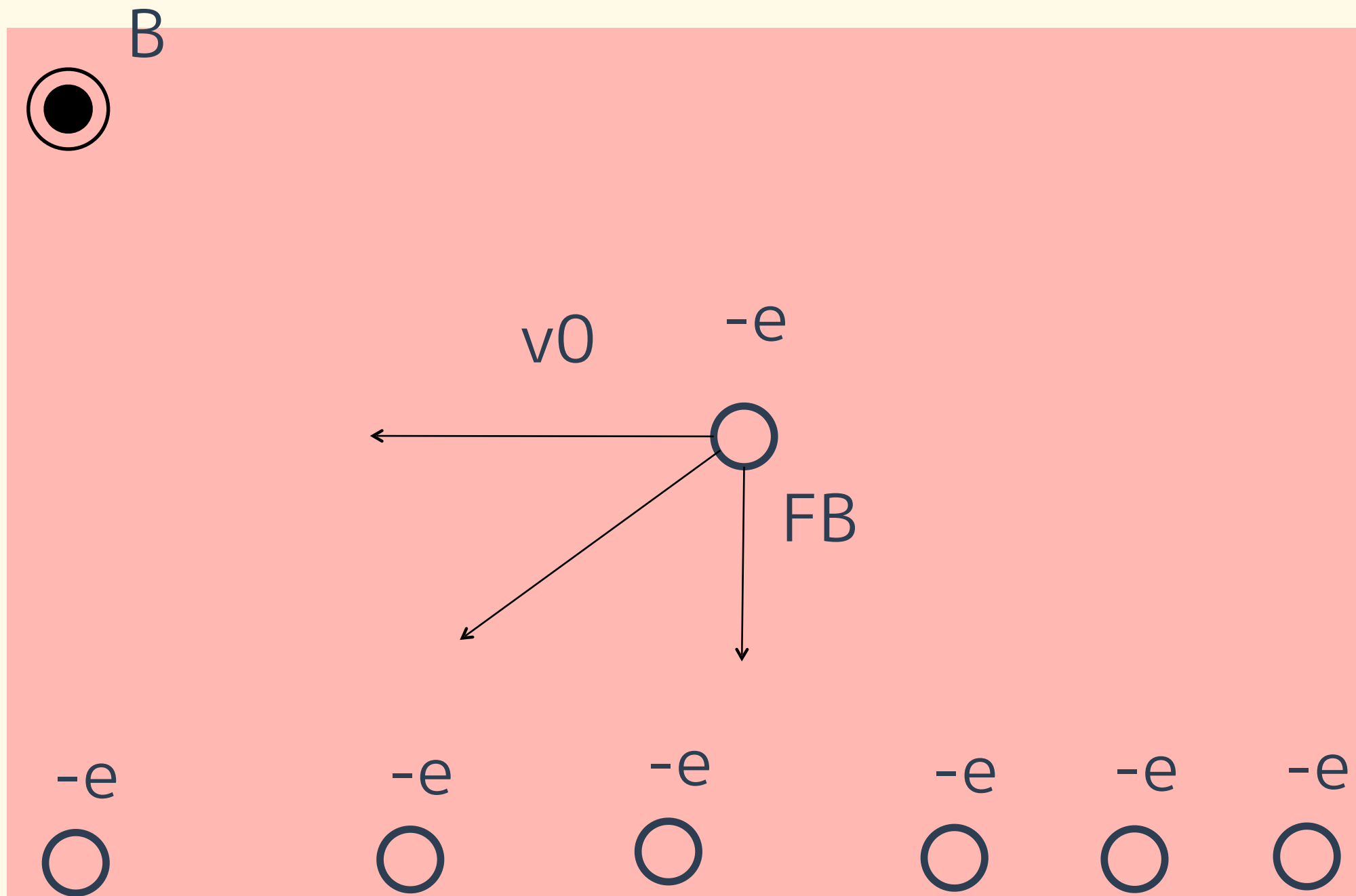


# 動いている電子は磁場から力を受ける

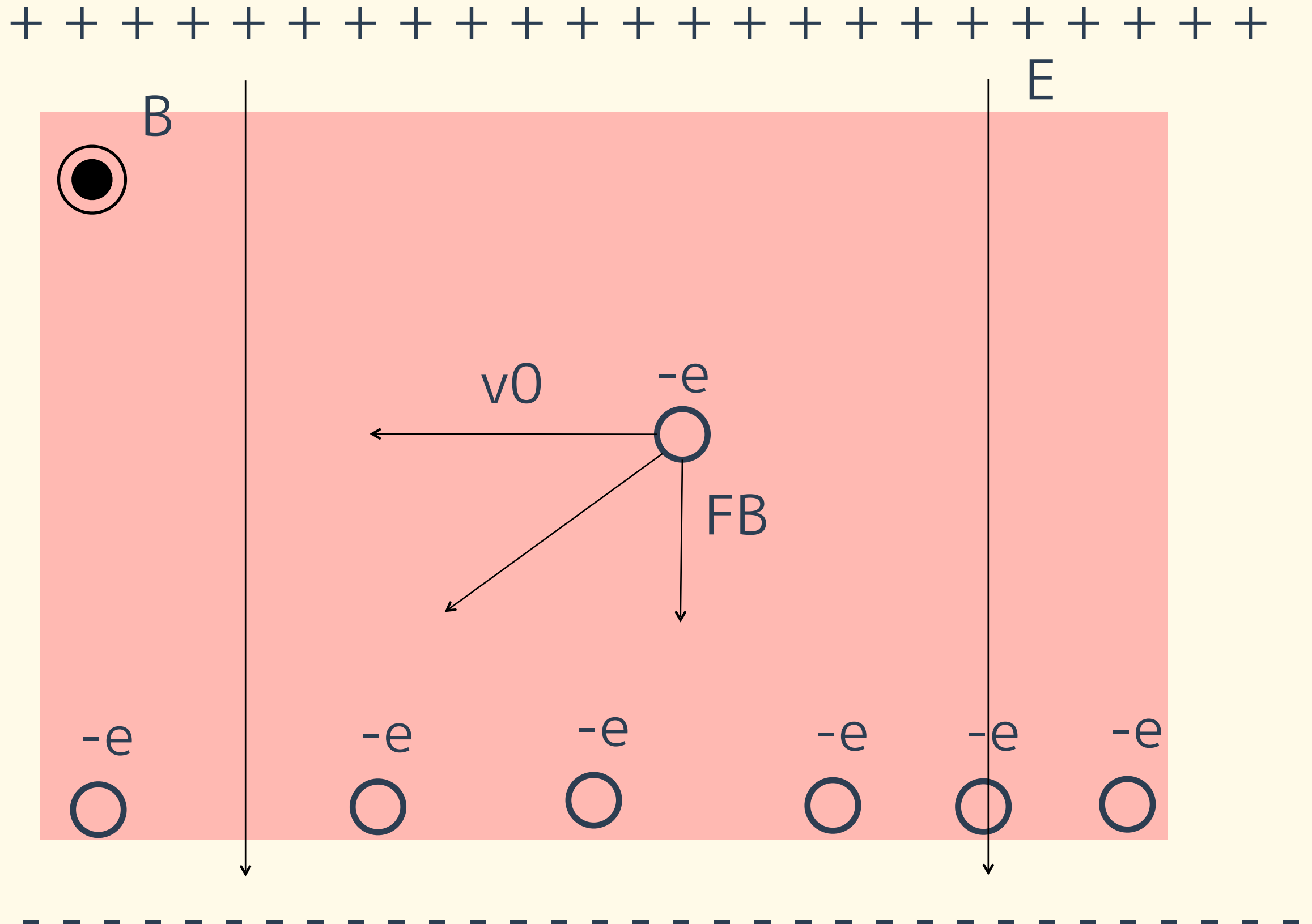




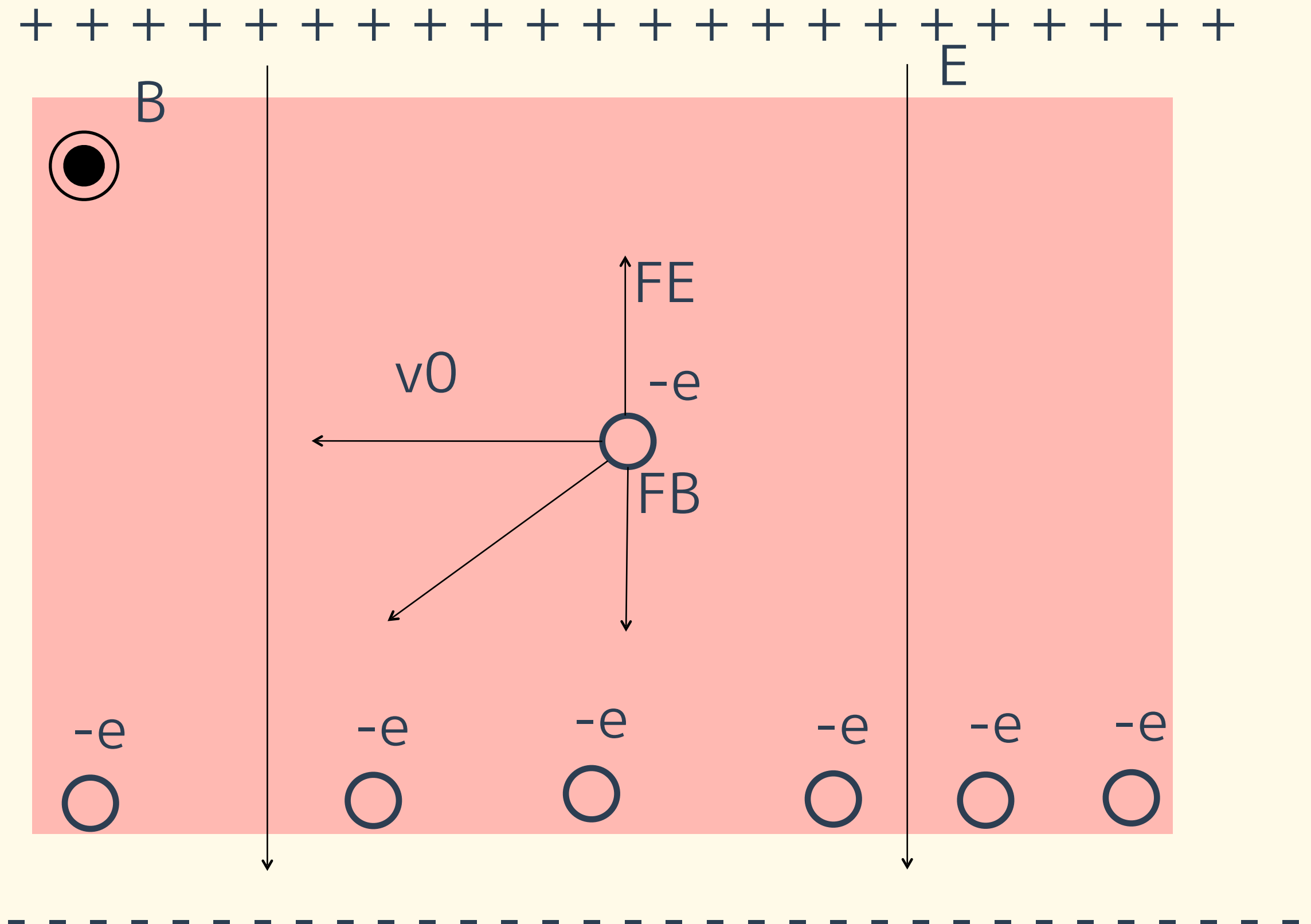
# 電子は曲がり，端に溜まってくる



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

$$i = qnv$$

- ・ 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: 電流密度

q: 電荷

n: 電荷(キャリア)密度

v: 速度

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

$$E = R_H i B$$

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

ホール定数を実験により求めることで、電流に寄与する電荷(キャリア)の密度 $n$ を知ることができる。