

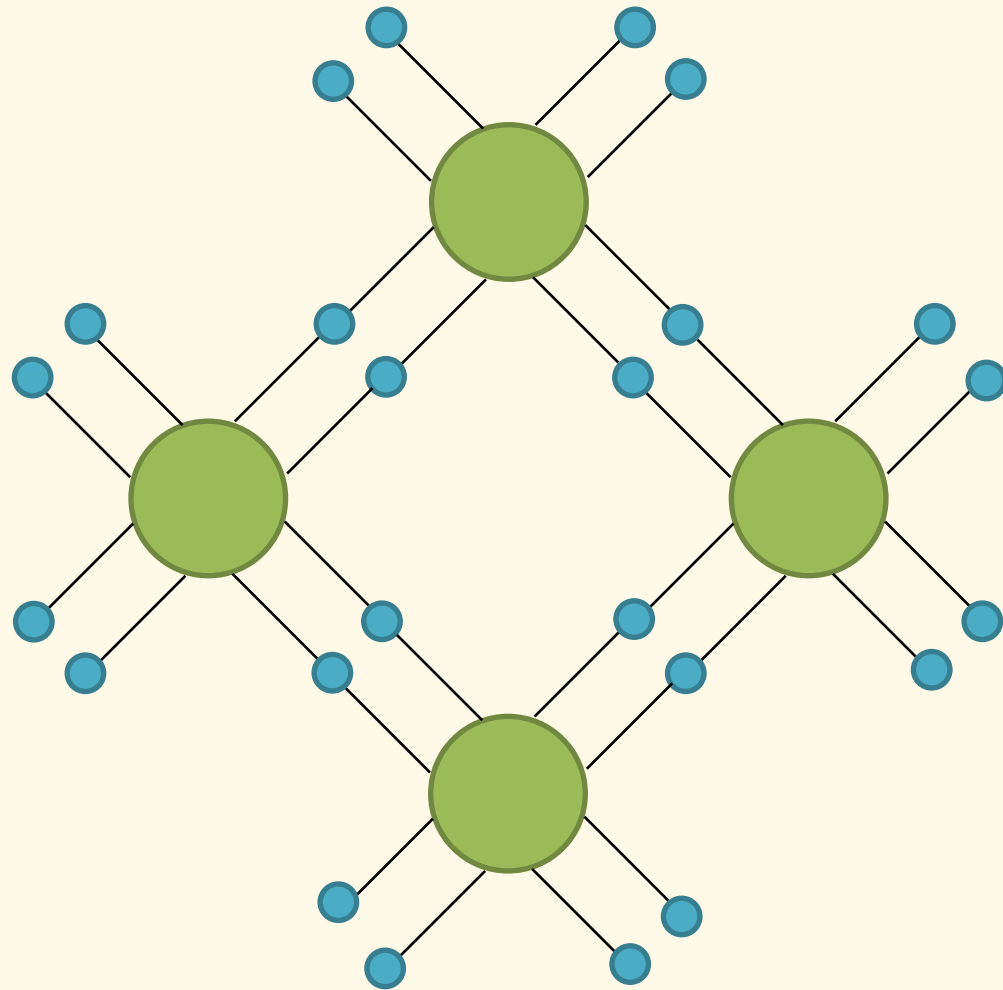
電子工学08

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

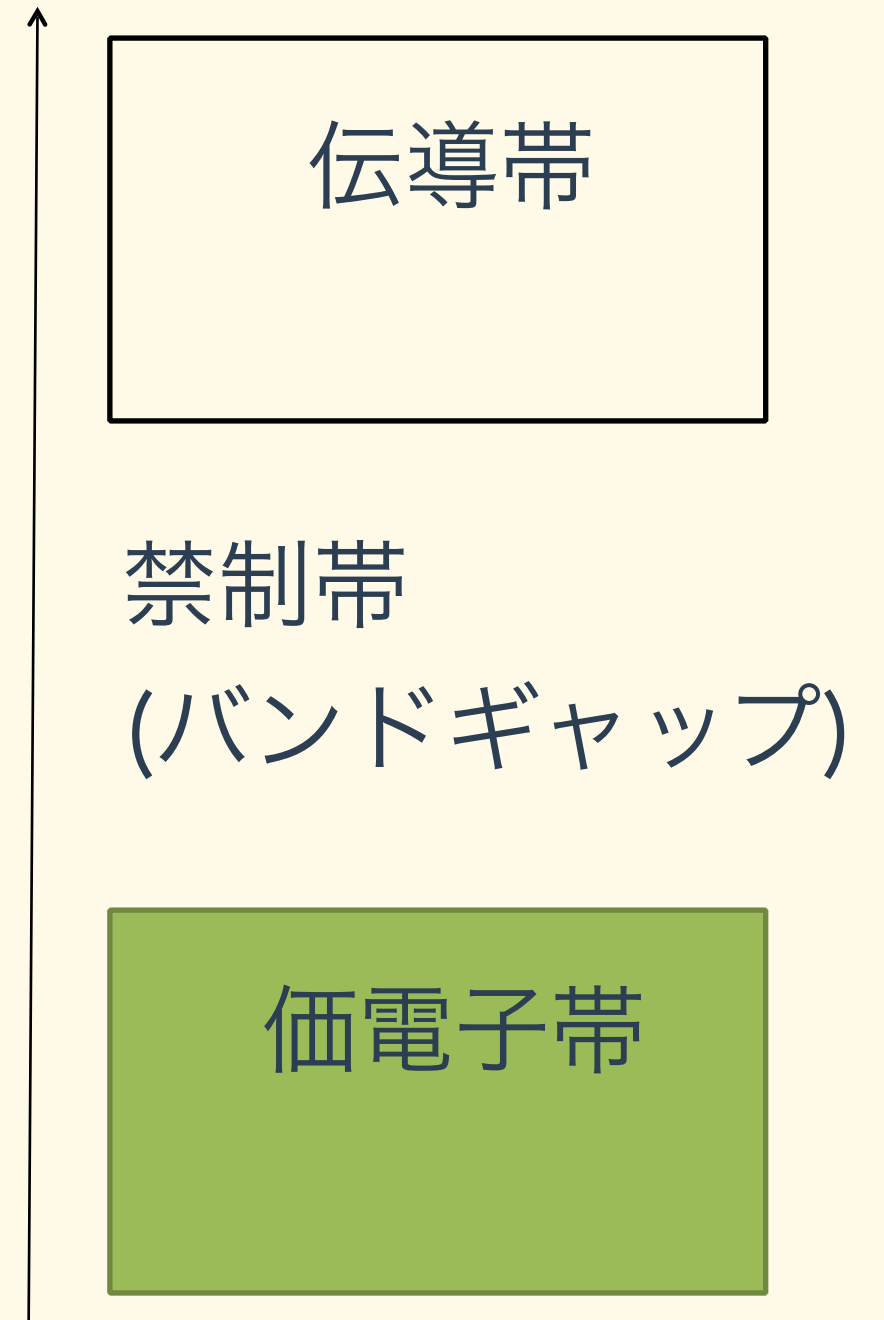
真性半導体

- ▶ 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99.9999999999%イレブンナイン)で製造される。

絶対零度するとき

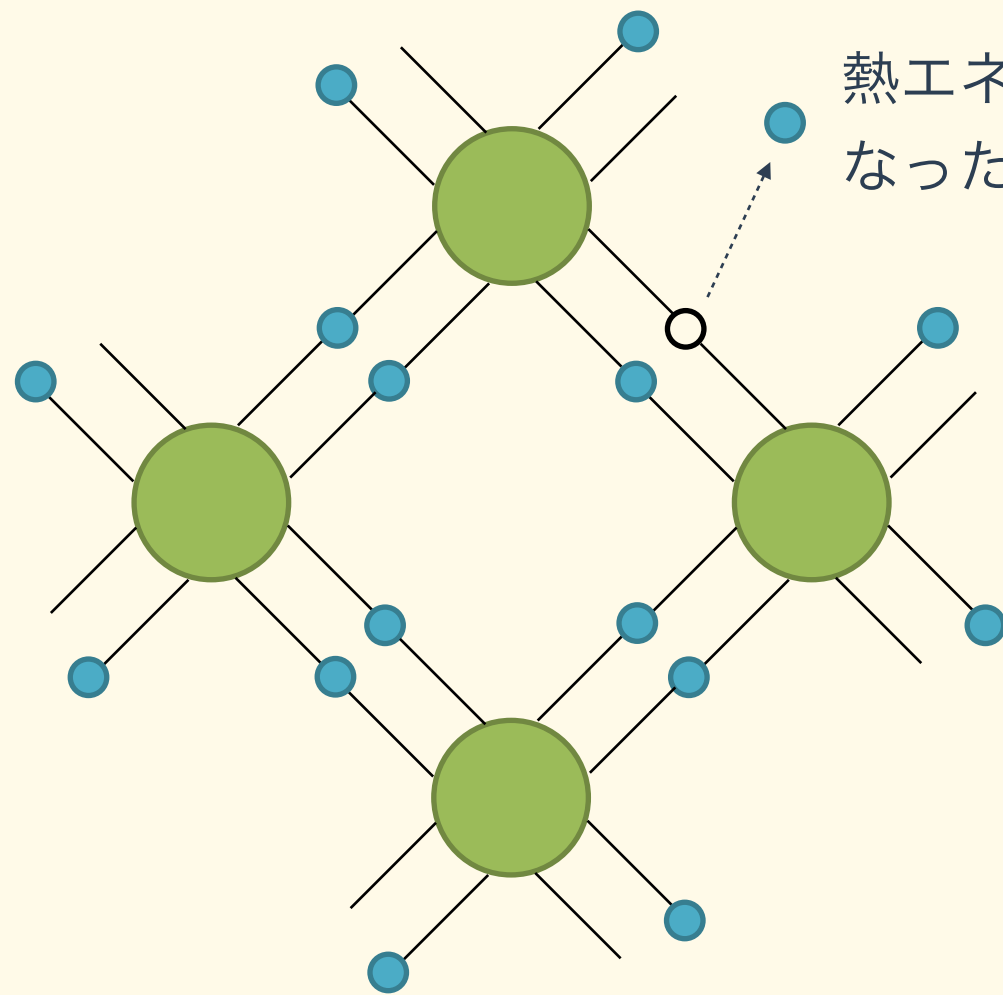


電子はすべて結合に寄与する



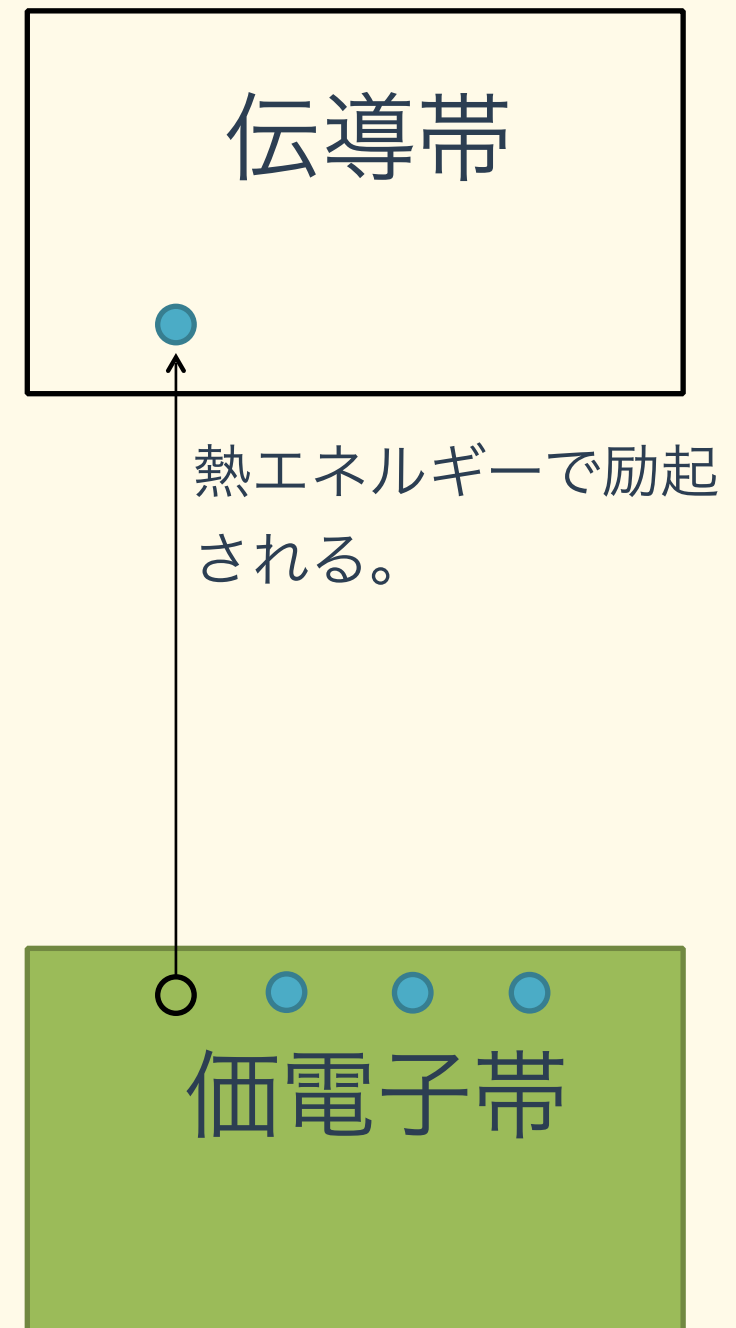
伝導帯に電子はなく
電気は流れにくい

$T > 0$ の場合



● 電子
○ 正孔

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。

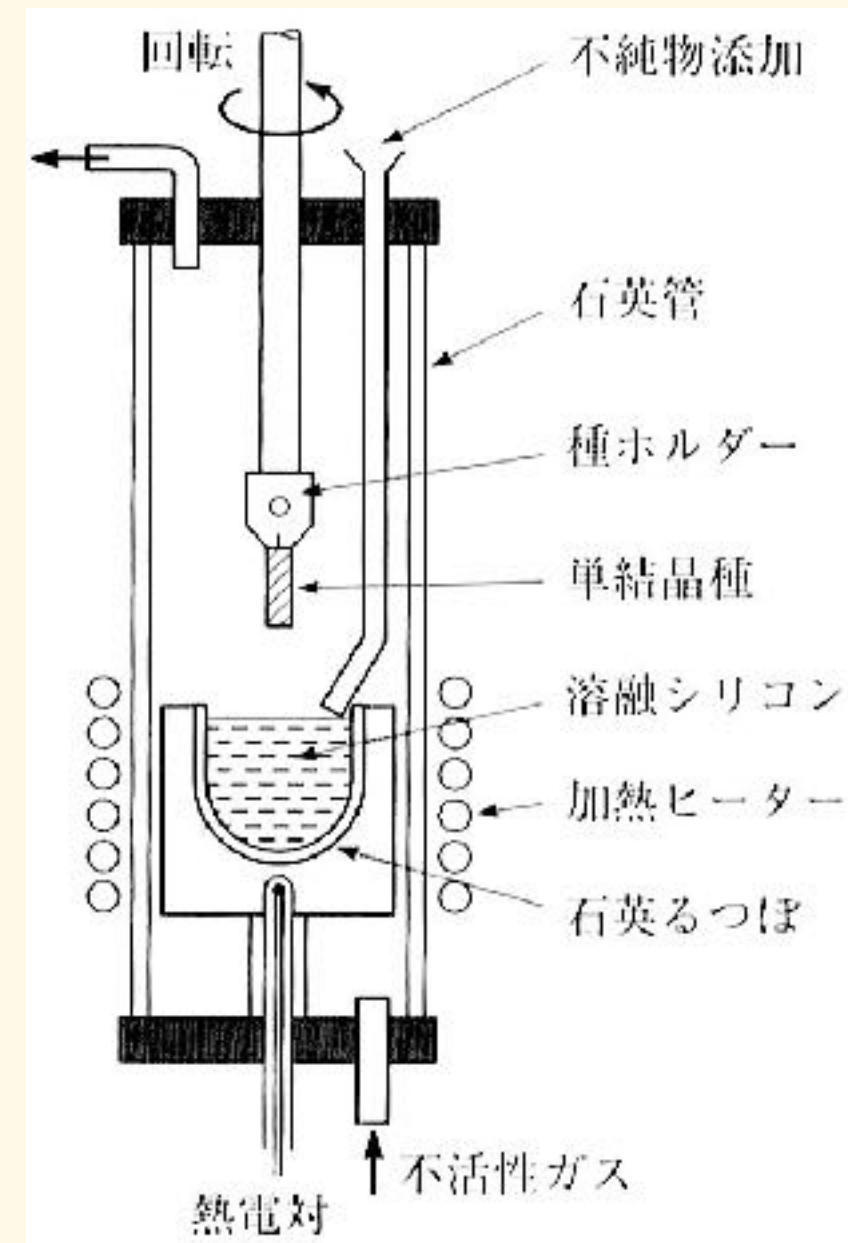


真性半導体

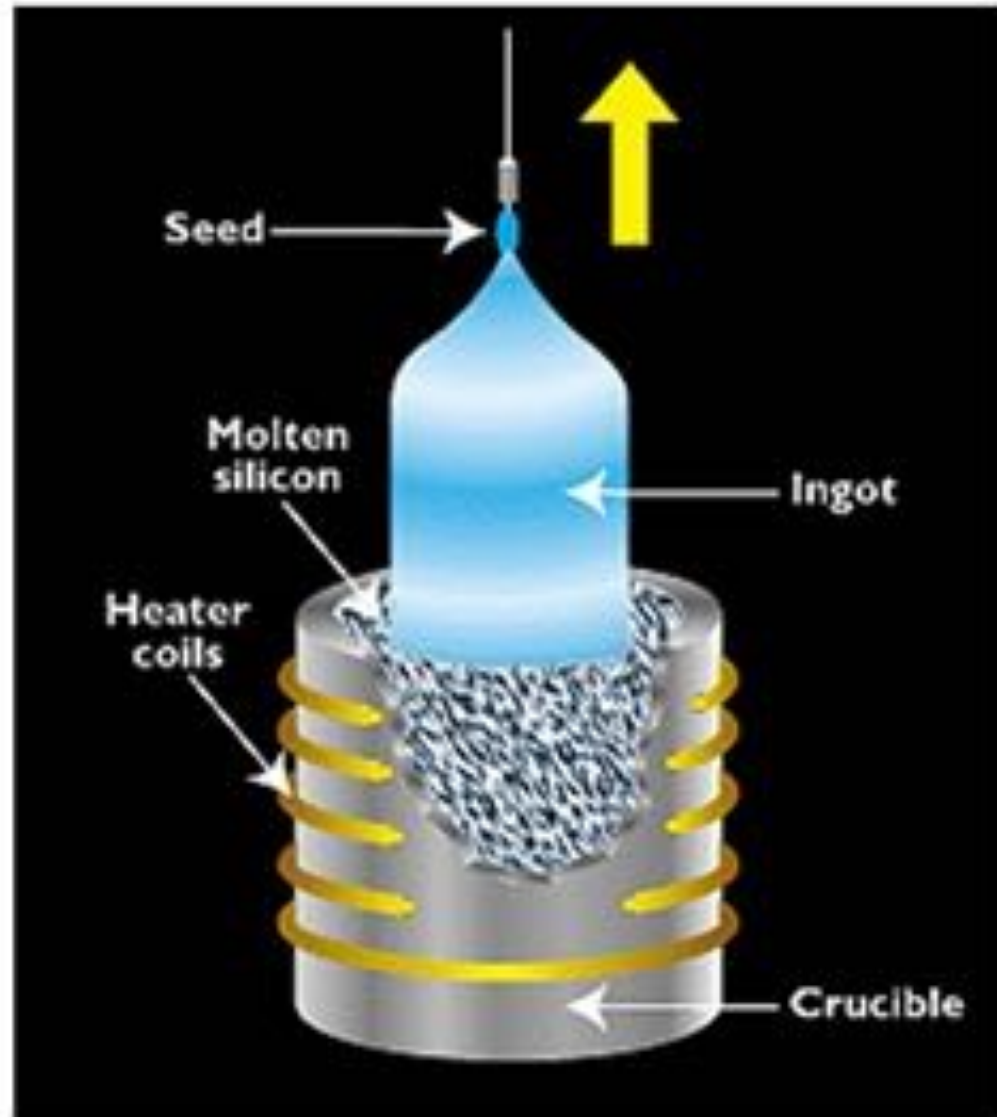
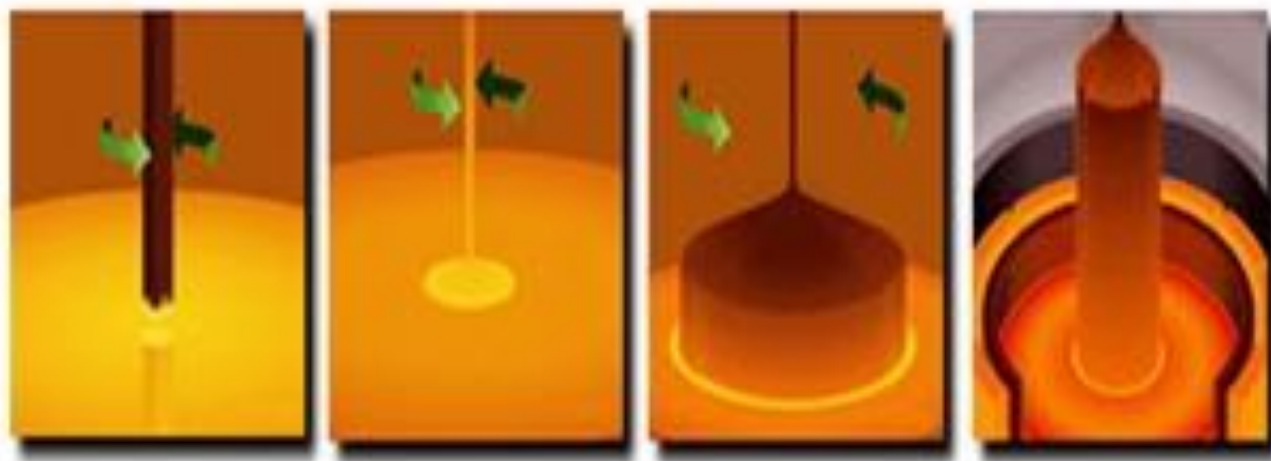
- ▶ 熱エネルギーにより自由になった電子は、価電子帯から伝導帯に励起されている。
- ▶ 電子が抜けた場所は、 $+$ の電気的性質を持つ正孔(ホール)ができる。
- ▶ 伝導帯にいる電子は電気を流す役割をする。
 - ▶ 電気を流す役割をするものをキャリアと呼ぶ
- ▶ 真性半導体の場合、電子と対となり正孔が電気を流す役割をするので、電子と正孔がキャリアとなる。

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材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)



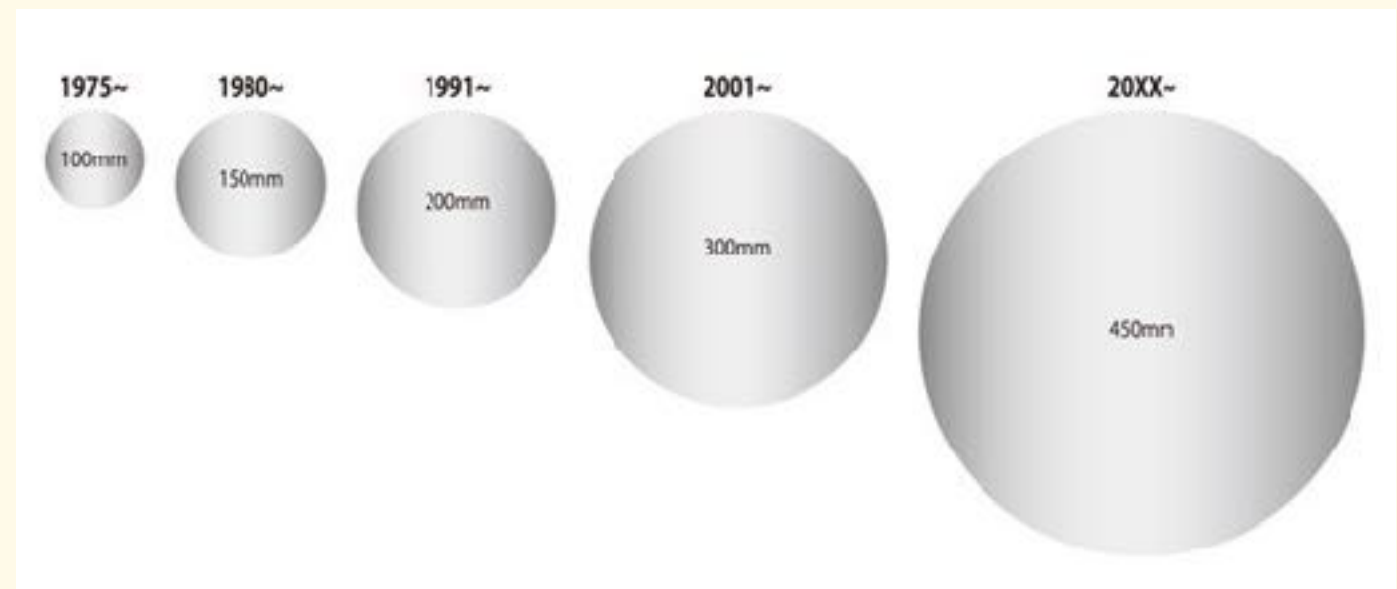
(豊田, 半導体の科学とその応用)



(<http://cnfolio.com/>)



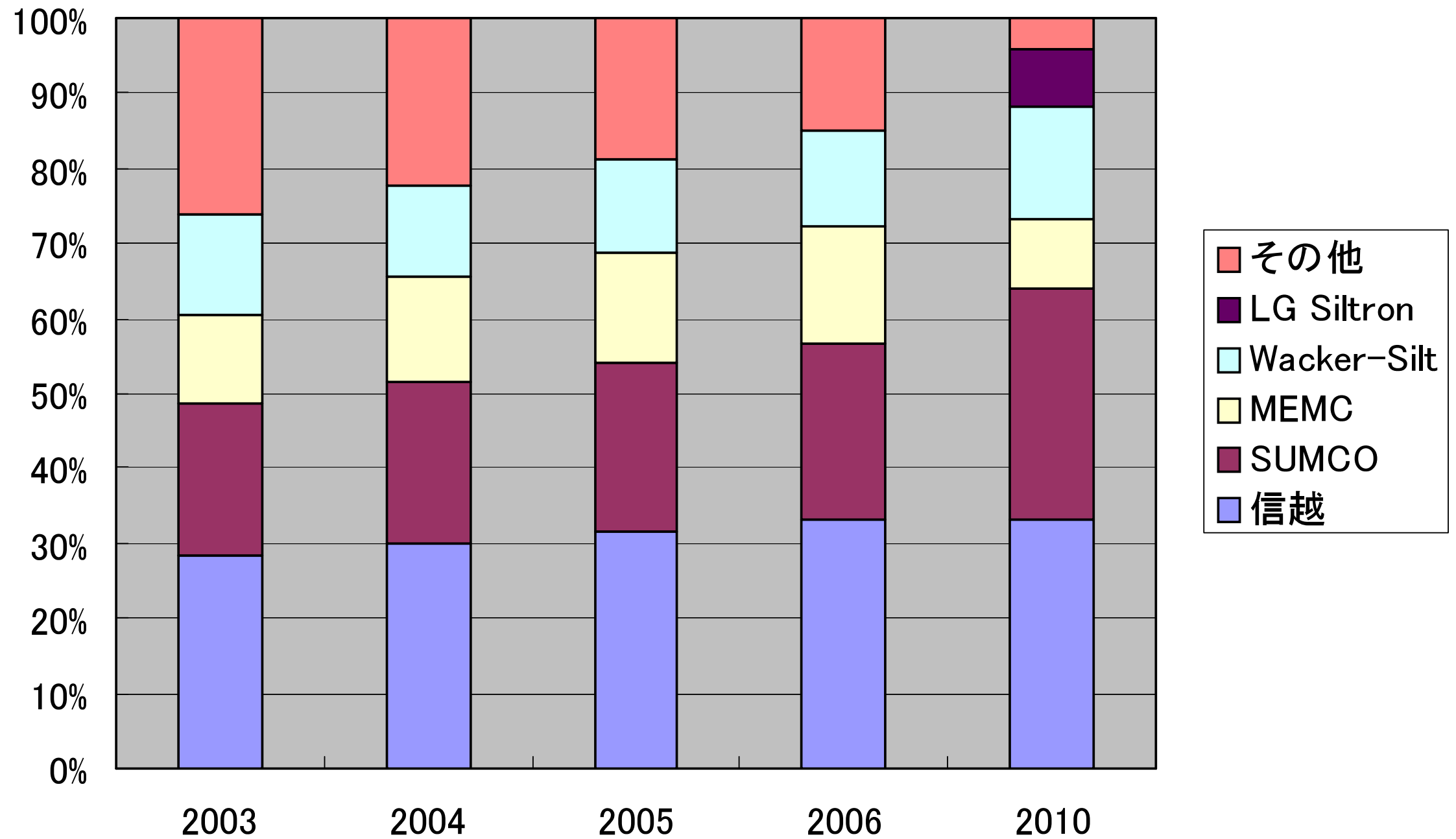
シリコンウェハのサイズ



(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



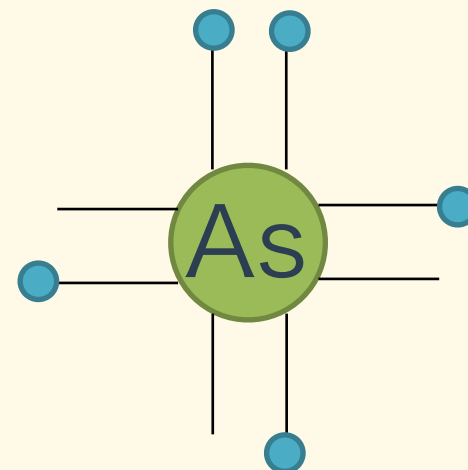
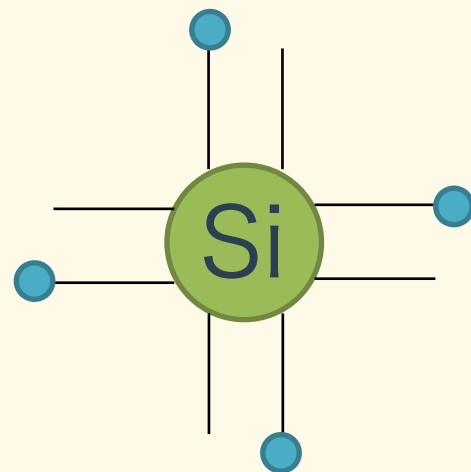
(国際半導体製造装置材料協会)

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。

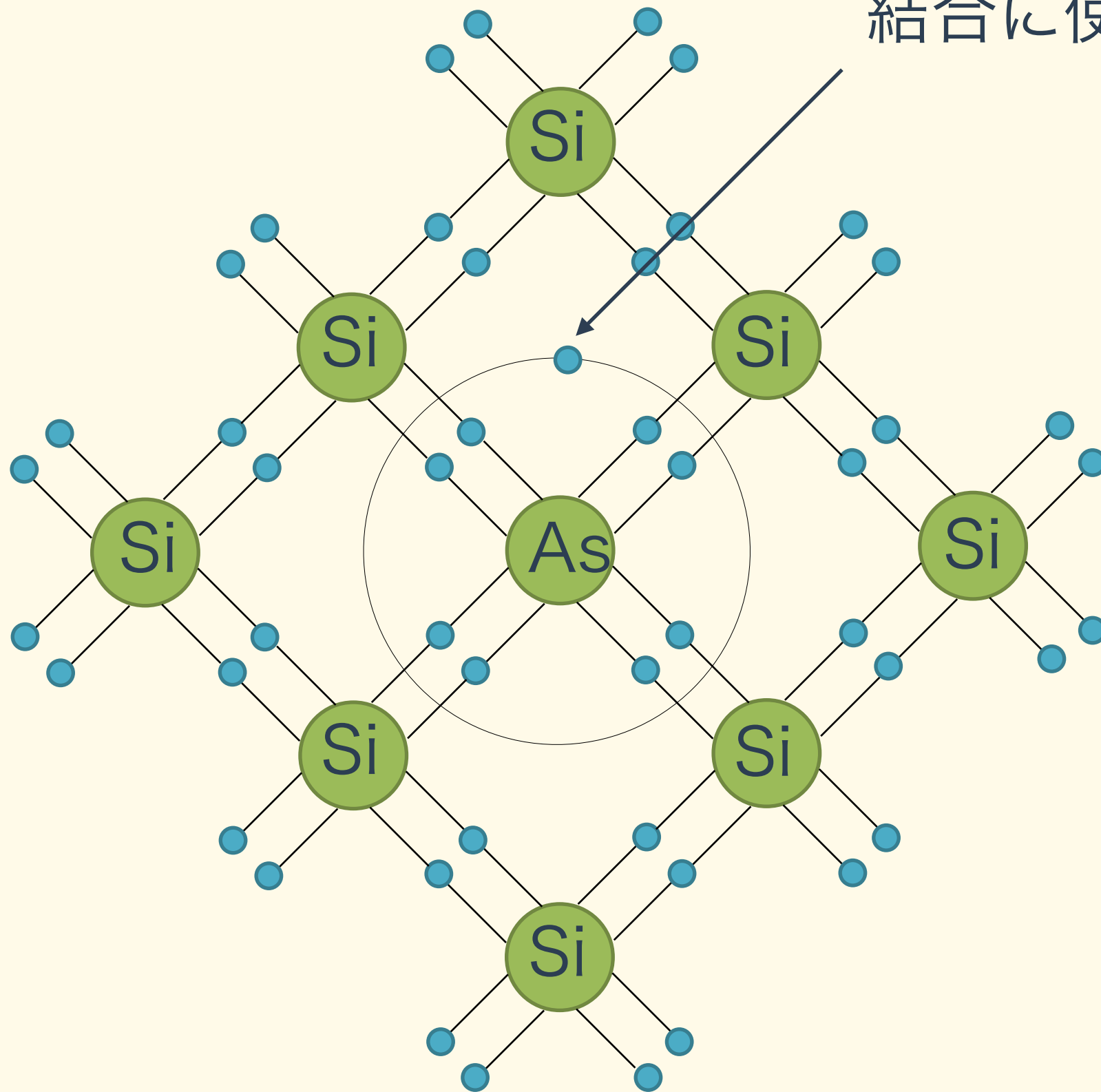
n型半導体

- ▶ 真性半導体に5価の不純物（最外殻電子が5個）をドープする。
- ▶ 不純物をドナー不純物という。

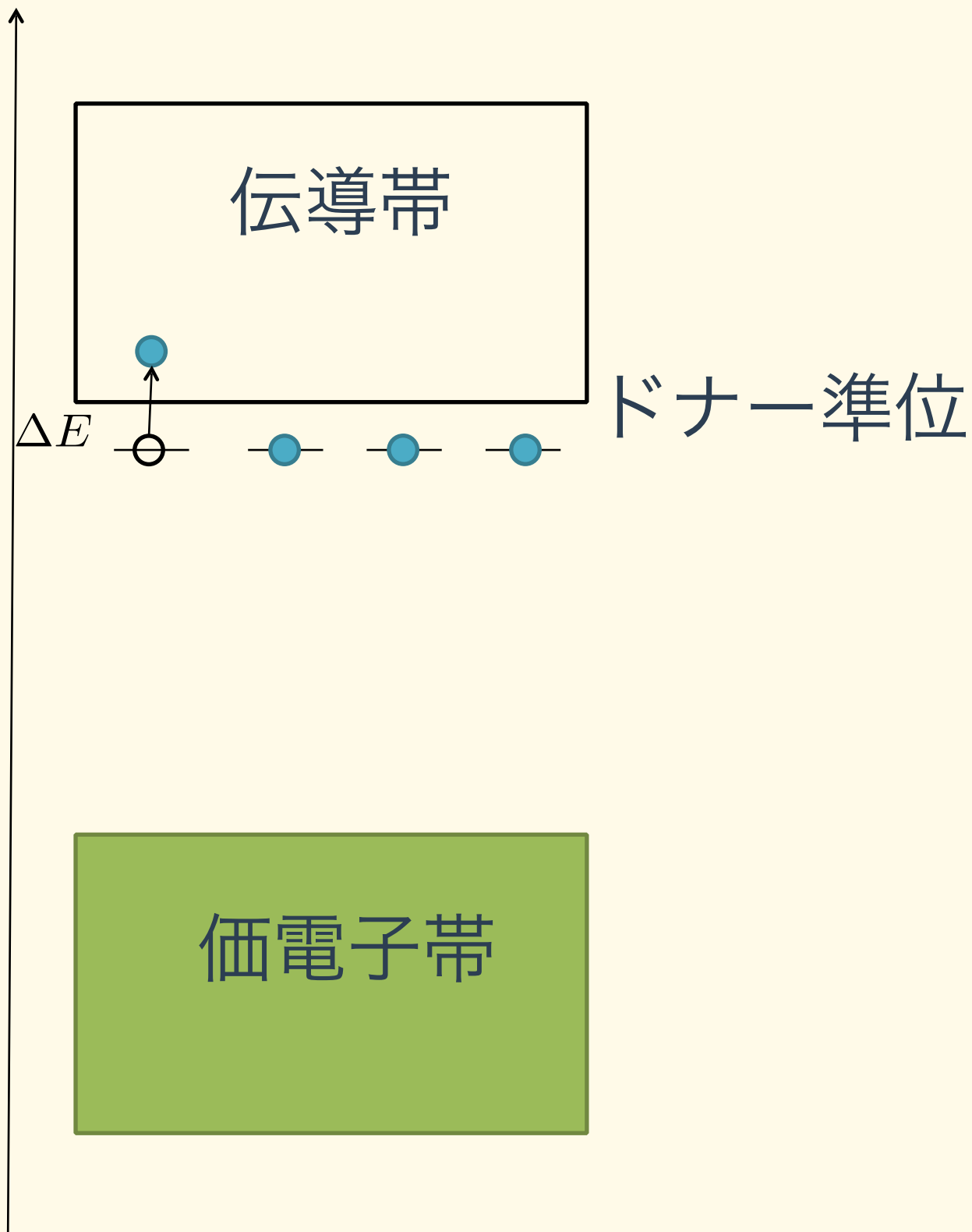


シリコンは最外殻電子が4つ ヒ素は最外殻電子が5つ

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。

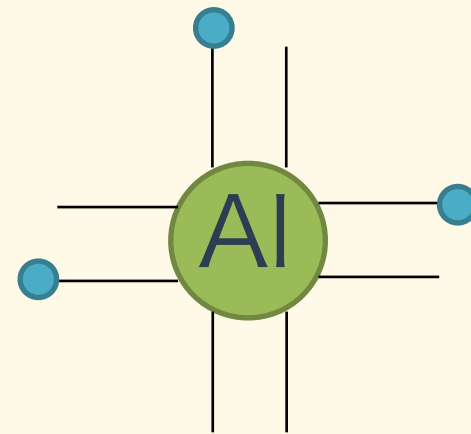
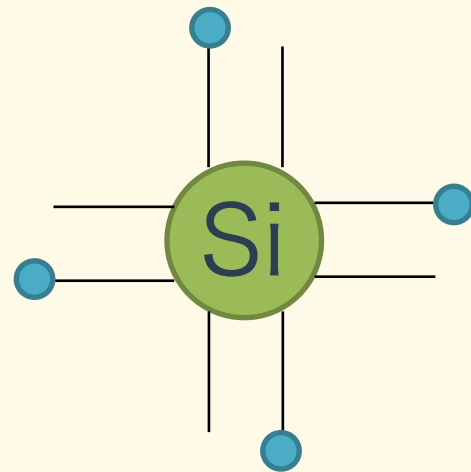


結合に使われな
い余った電子は、
ドナー準位とよ
ばれるエネルギー
準位を形成する。

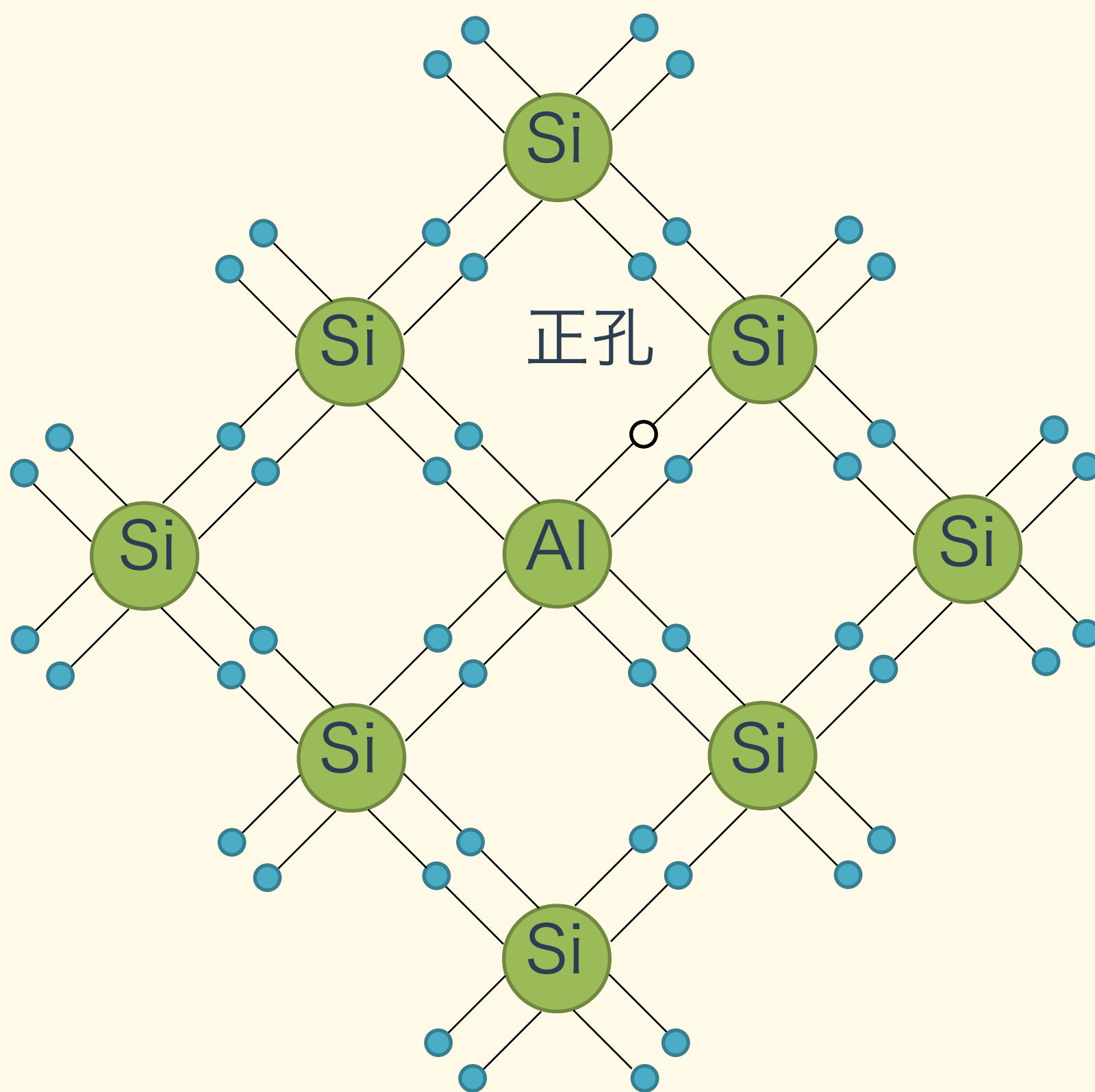
ドナー準位にあ
る電子は僅かな
熱エネルギーで
励起され、伝導
電子になる。

p型半導体

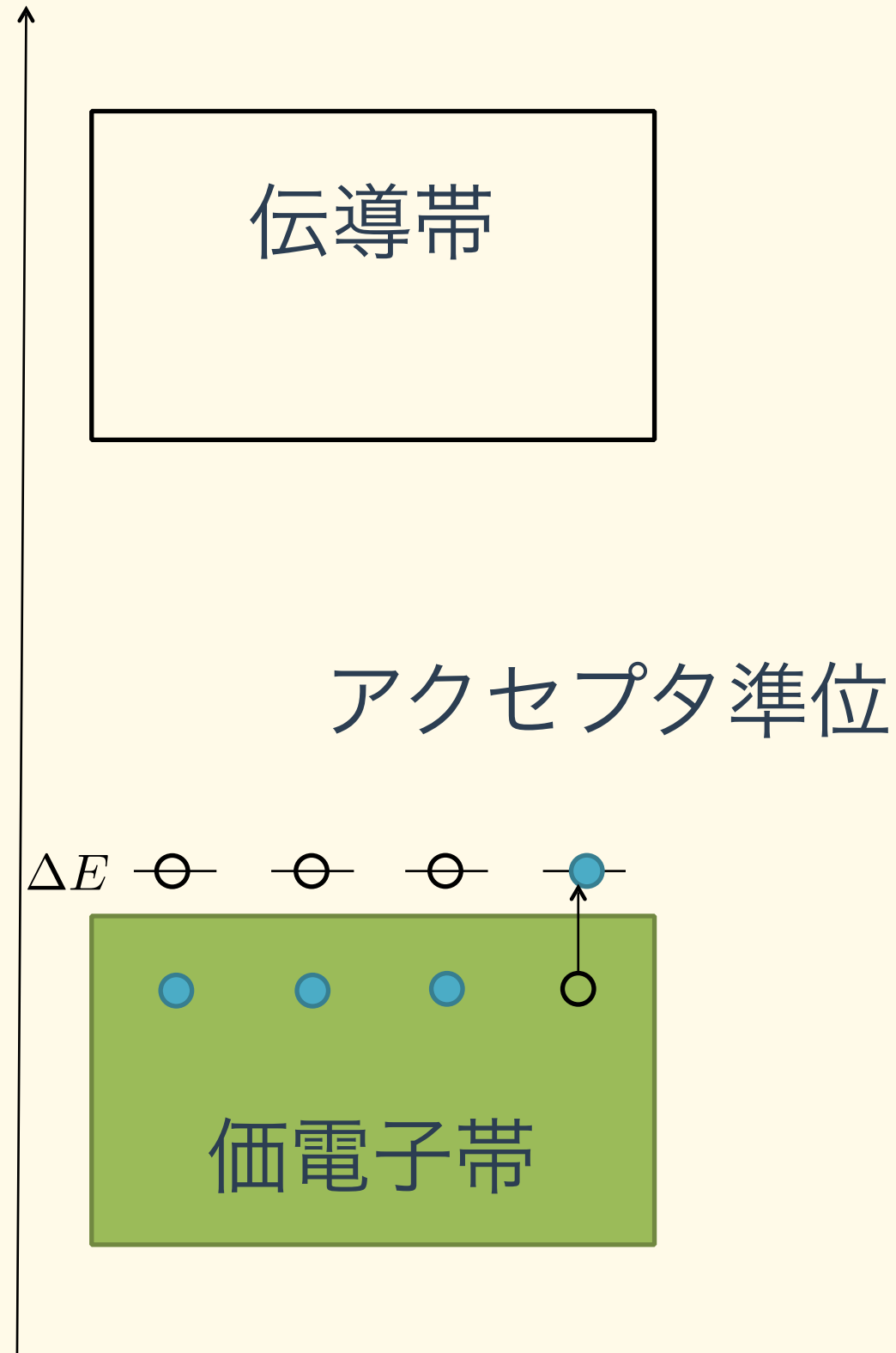
- ▶ 真性半導体に3価の不純物（最外殻電子が3個）をドープする。
- ▶ 不純物をアクセプタ不純物という。



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



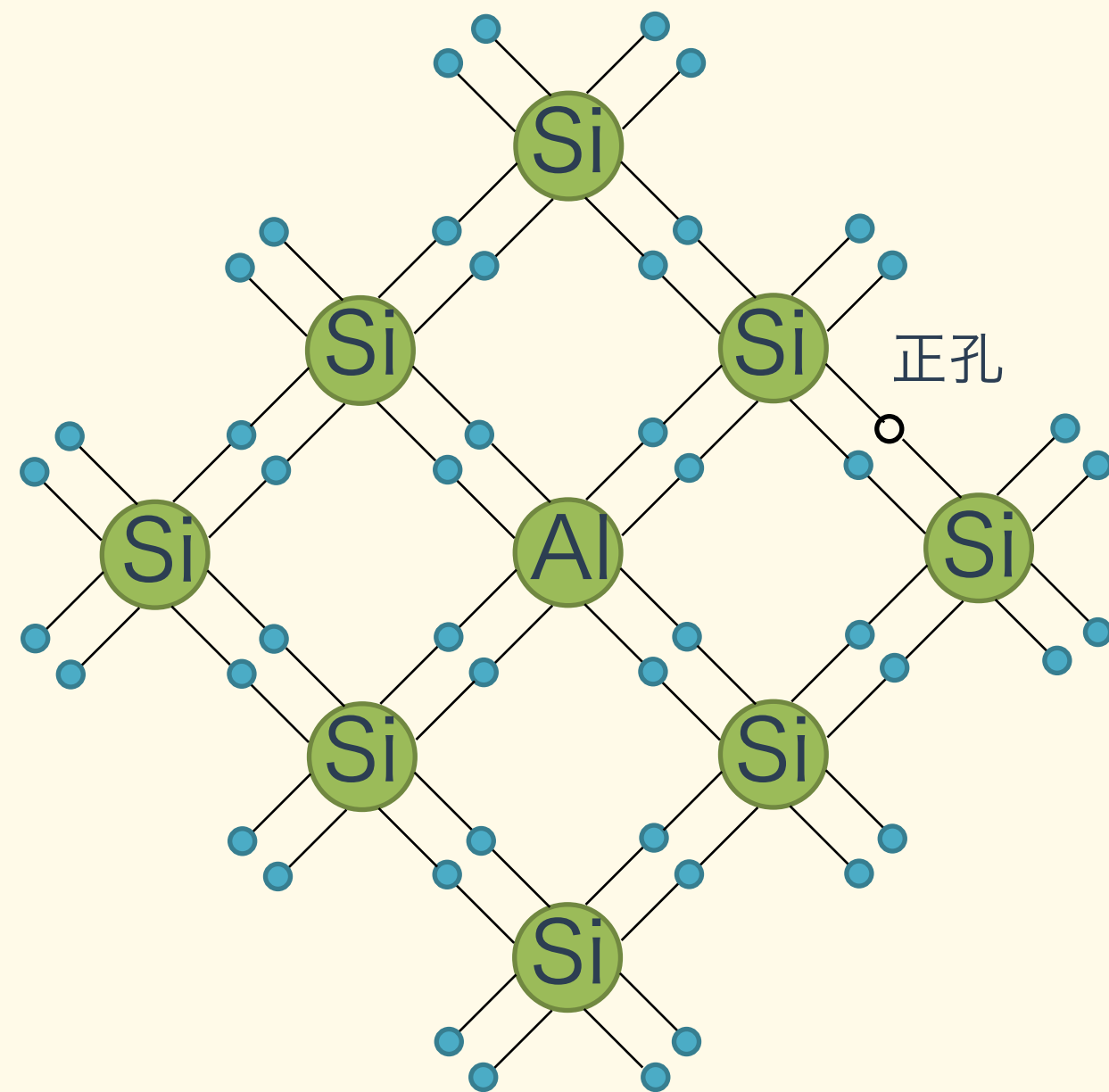
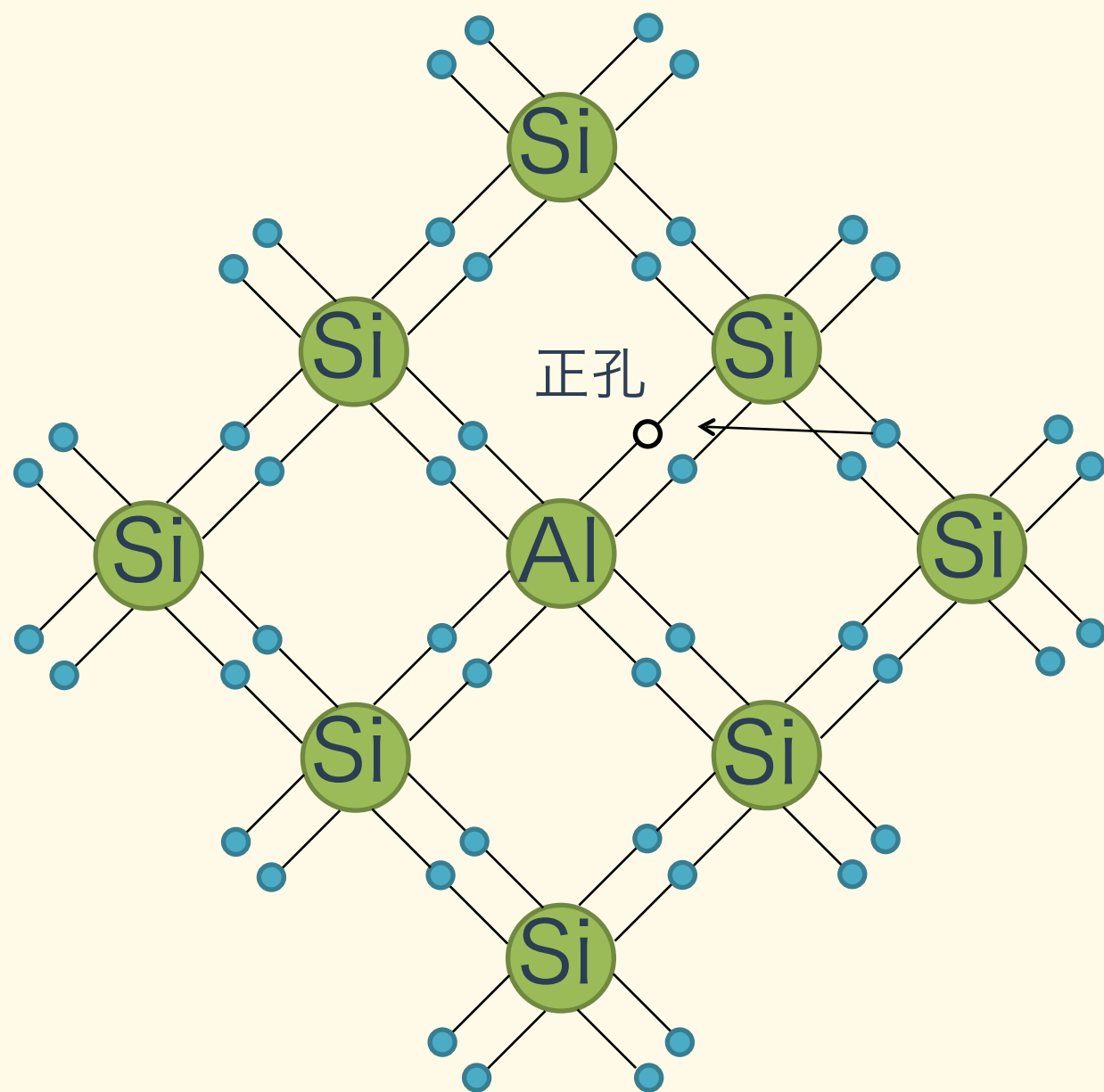
3価の原子を使ったため、電子が足りない状況になる。足りない場所は+の電氣的性質を持ったあな（正孔、ホール）となる。この正孔が電気を流すキャリアとなる。



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。

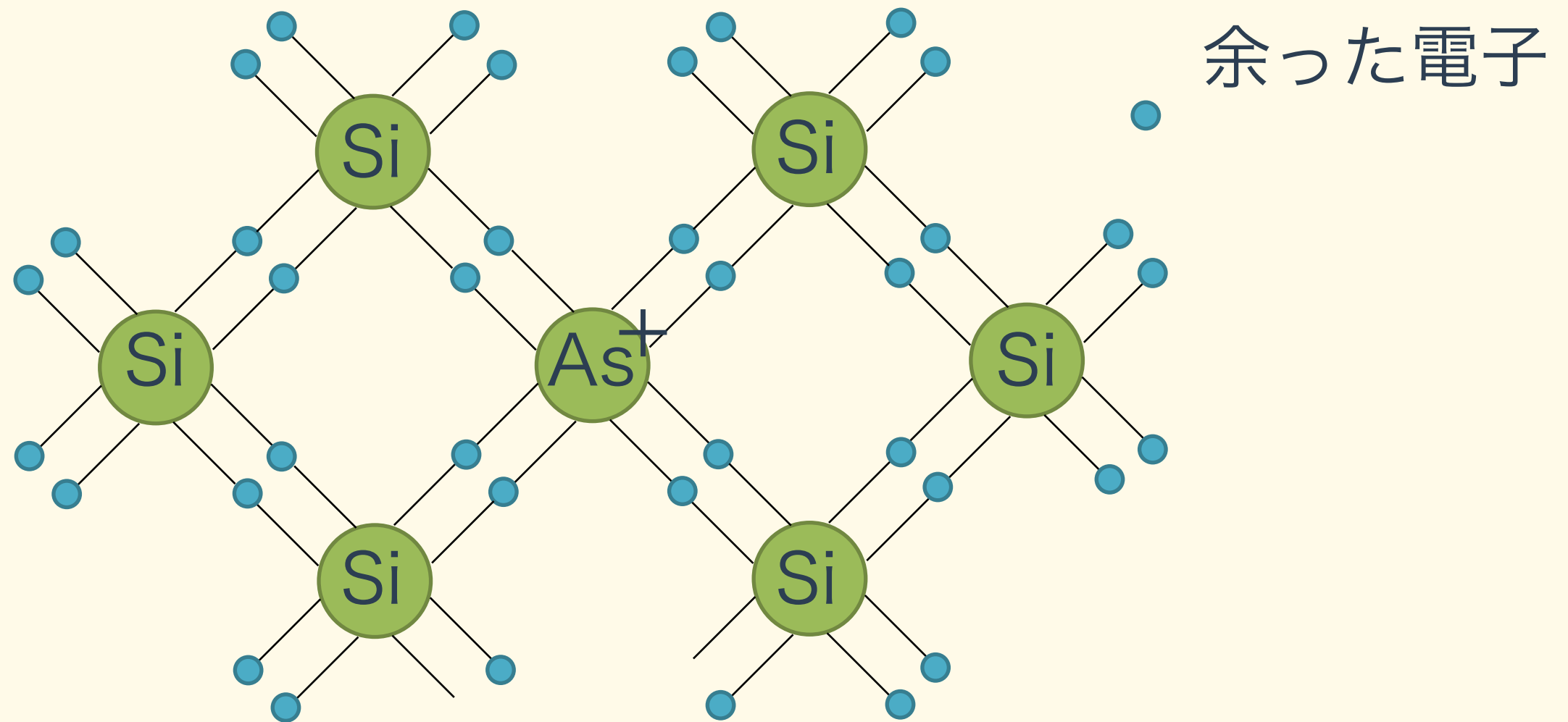
電子は熱によりアクセプタ準位励起される。その結果価電子帯に正孔が形成される。

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。



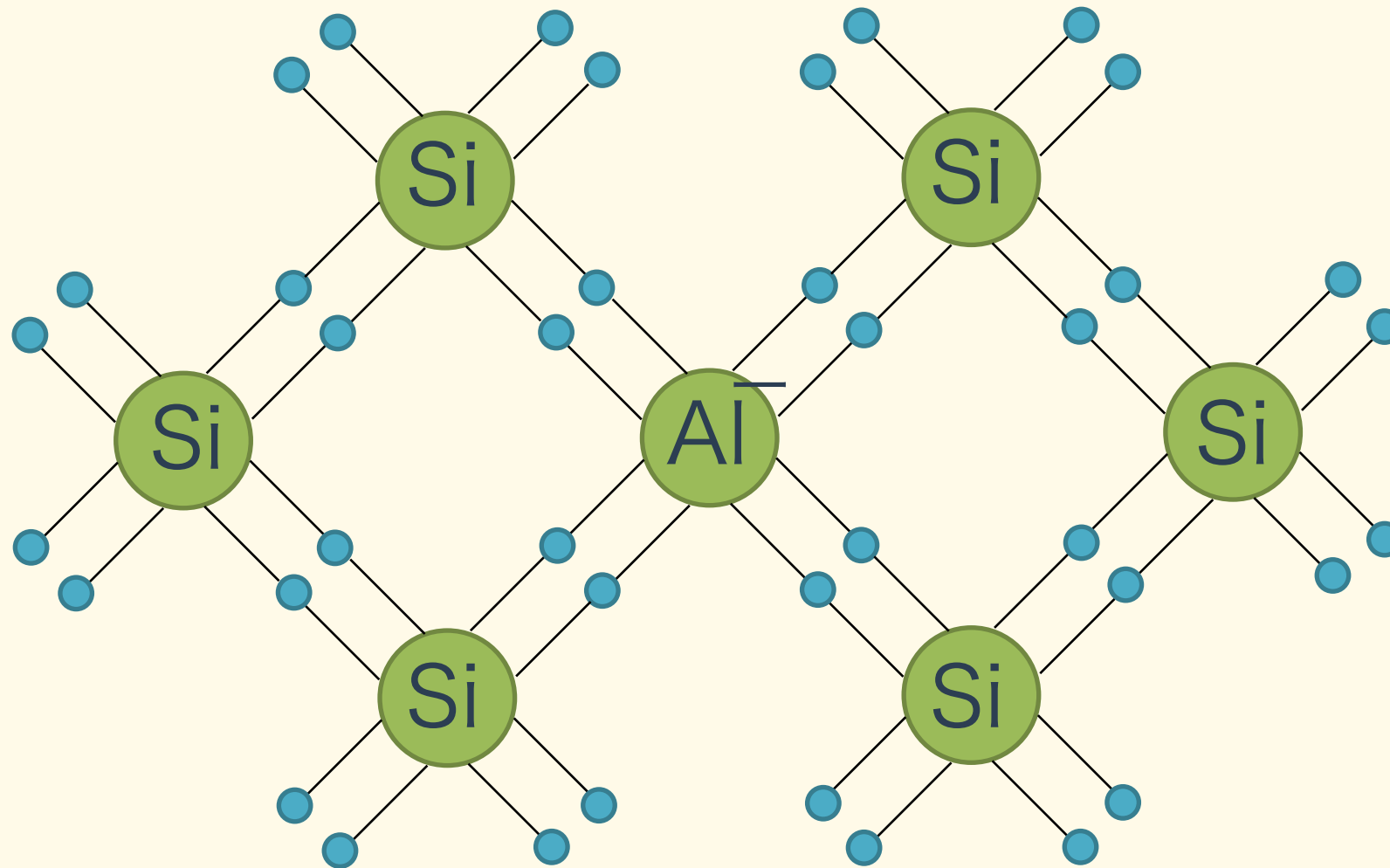
椅子取りゲームのように正孔に電子が移動する。結果として正孔は結晶内を移動することになる。

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、ドナーは電気的には+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



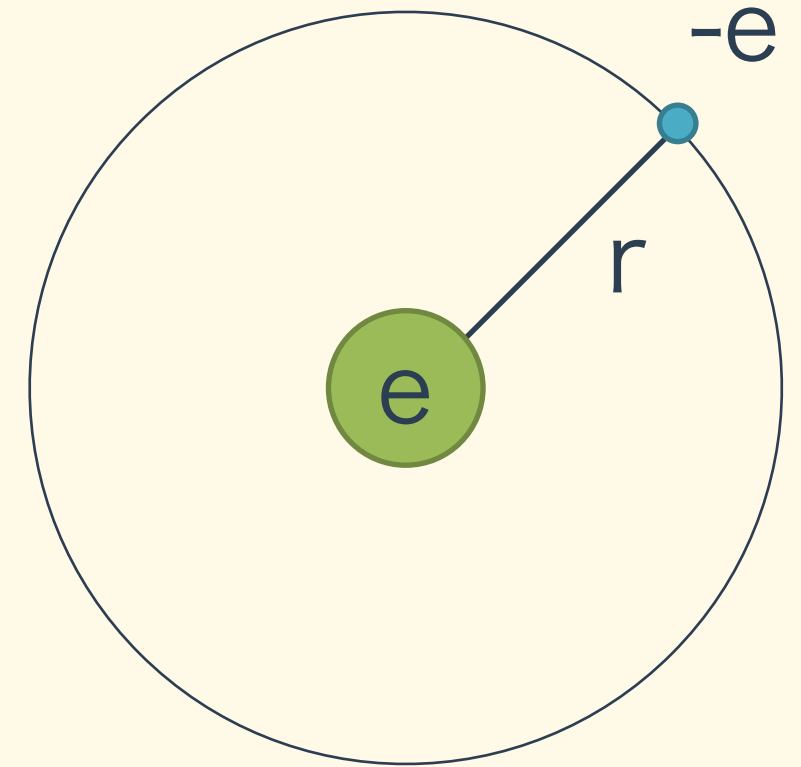
正孔に電子が入ってしまうと、アクセプタ不純物は電氣的に一になる。イオン化されたアクセプタ不純物をアクセプタイオンと呼ぶ。

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 ϵ_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

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

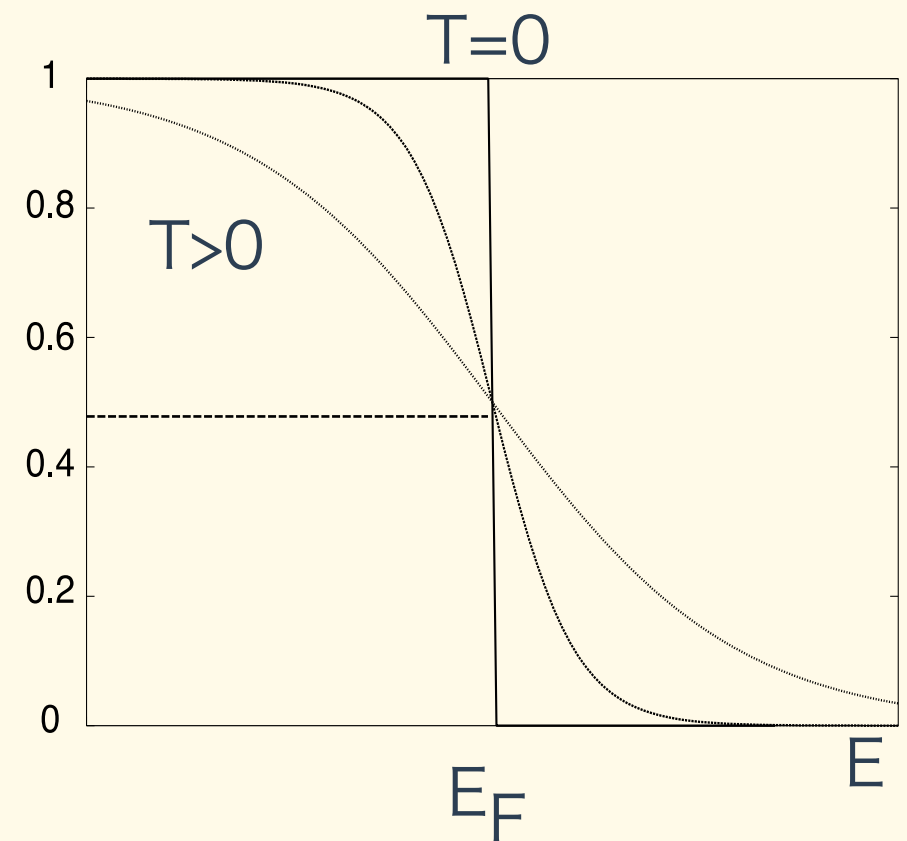
E : エネルギー

E_F : フェルミ準位

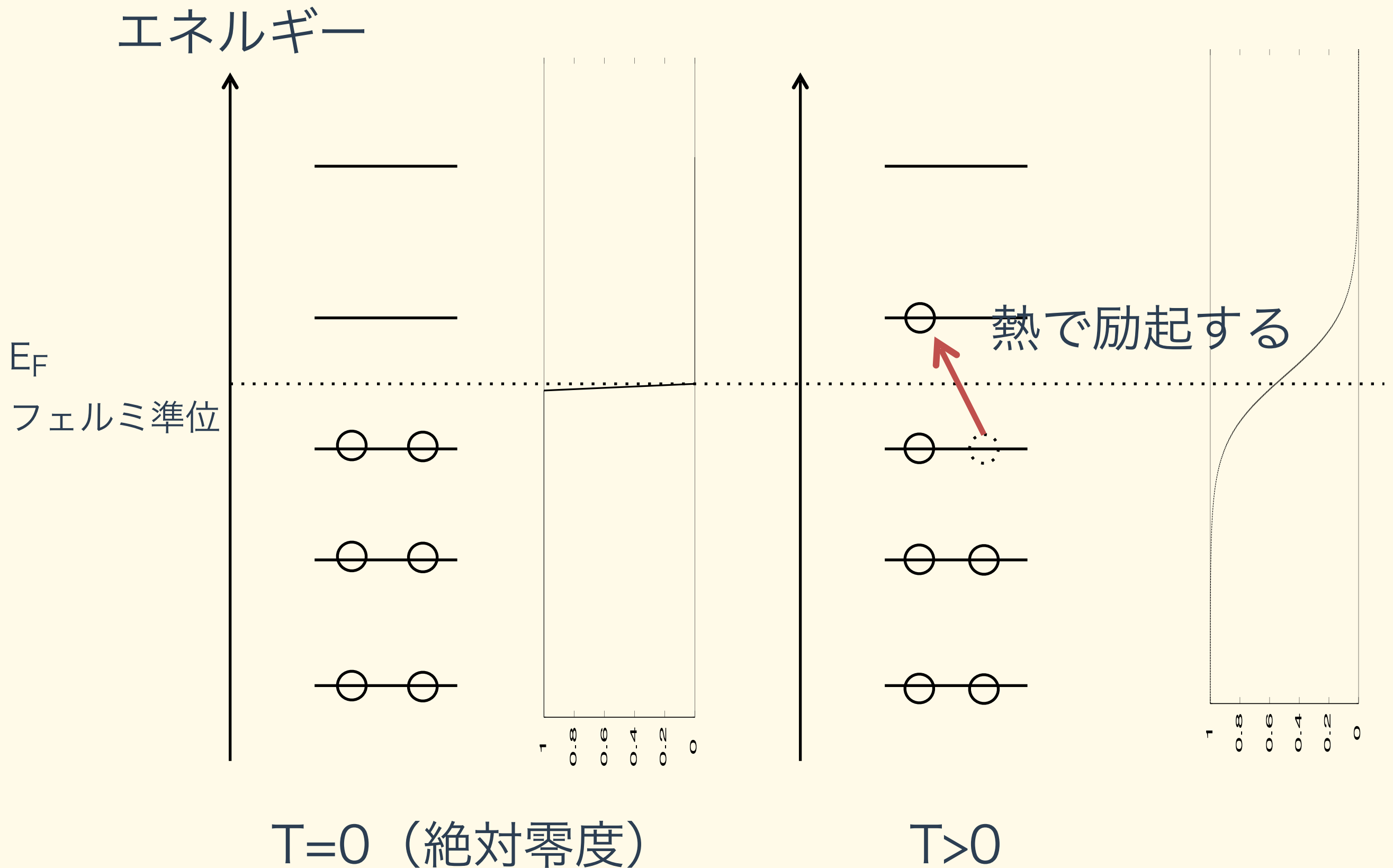
k_B : ボルツマン定数

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

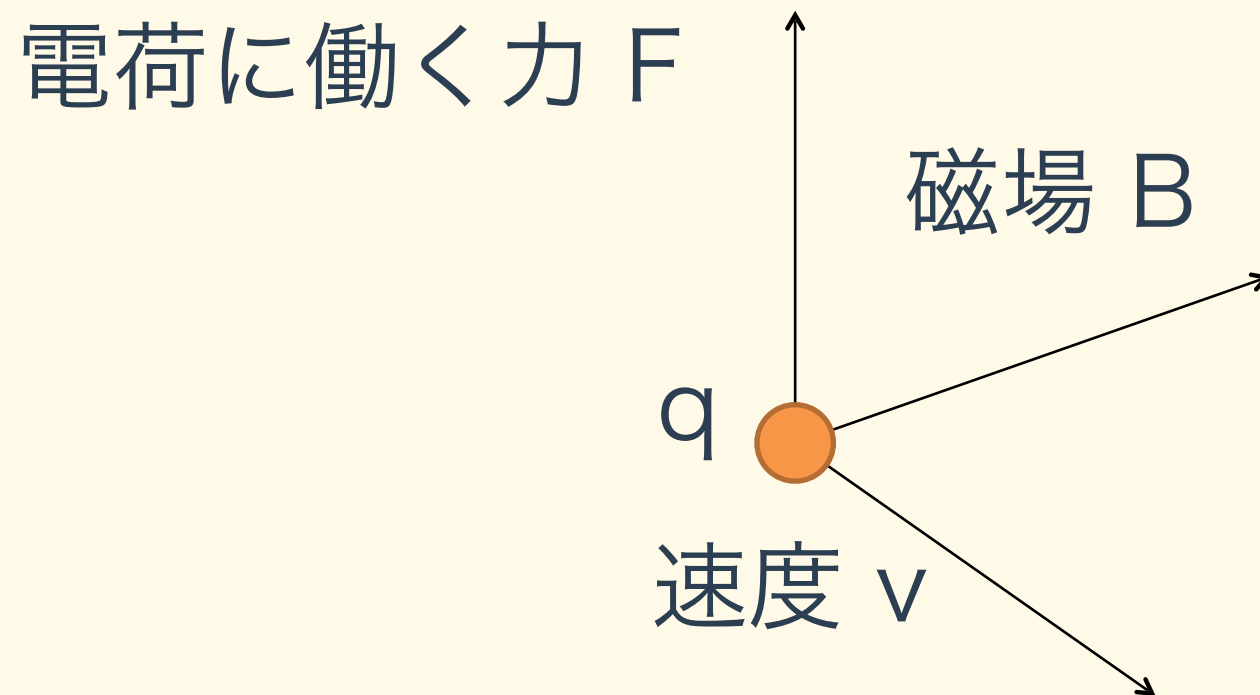
- ▶ キャリアの密度を測るために用いられる物理現象
- ▶ まずはホール効果を理解するために電子が磁場から受ける影響について学ぶ.

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

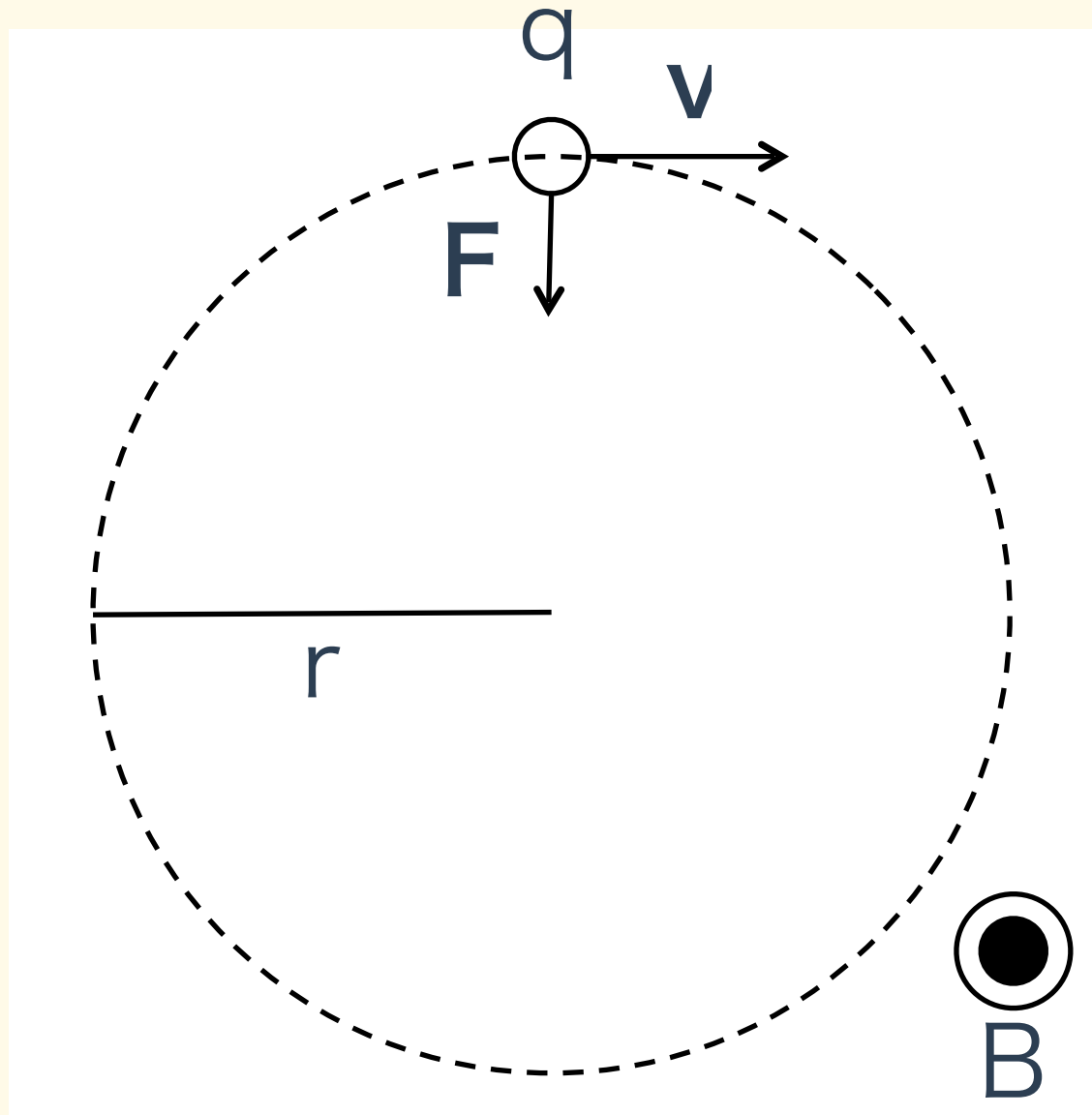
磁場の影響を受ける電荷

運動する電荷は磁場の影響を受ける。

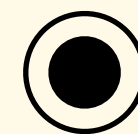


$$\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$$

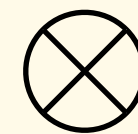
磁場中の電荷の動き



- 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

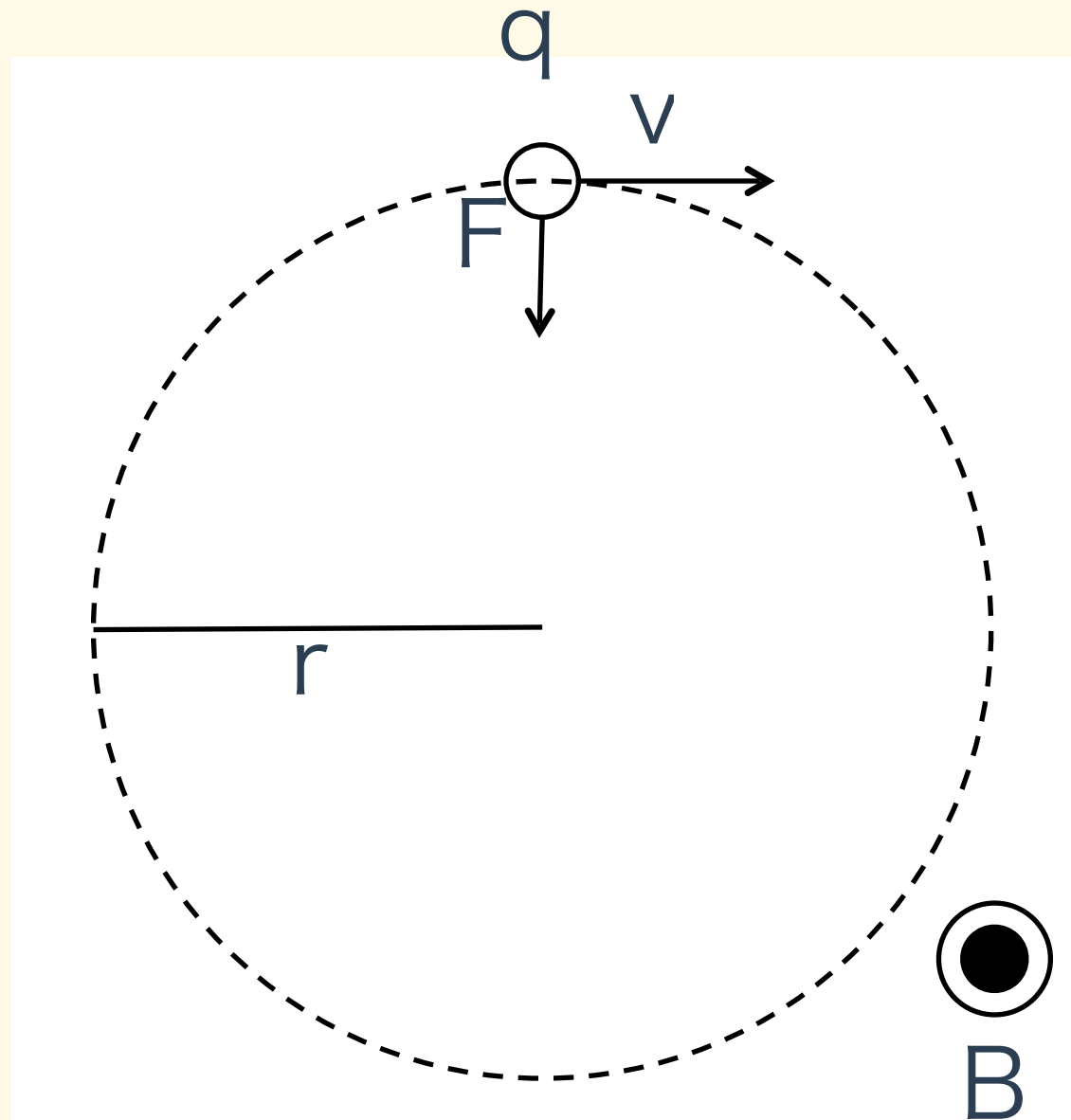


画面から垂直に出ている



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

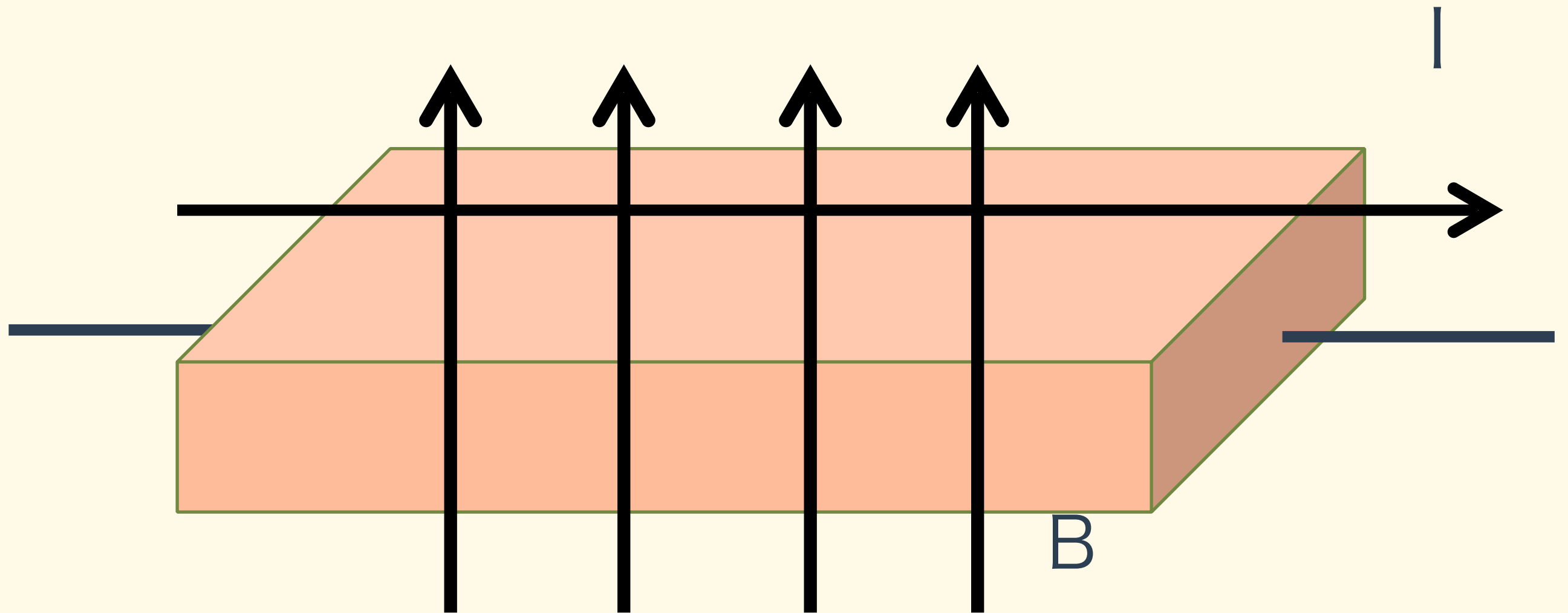
ローレンツ力

- ▶ 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。

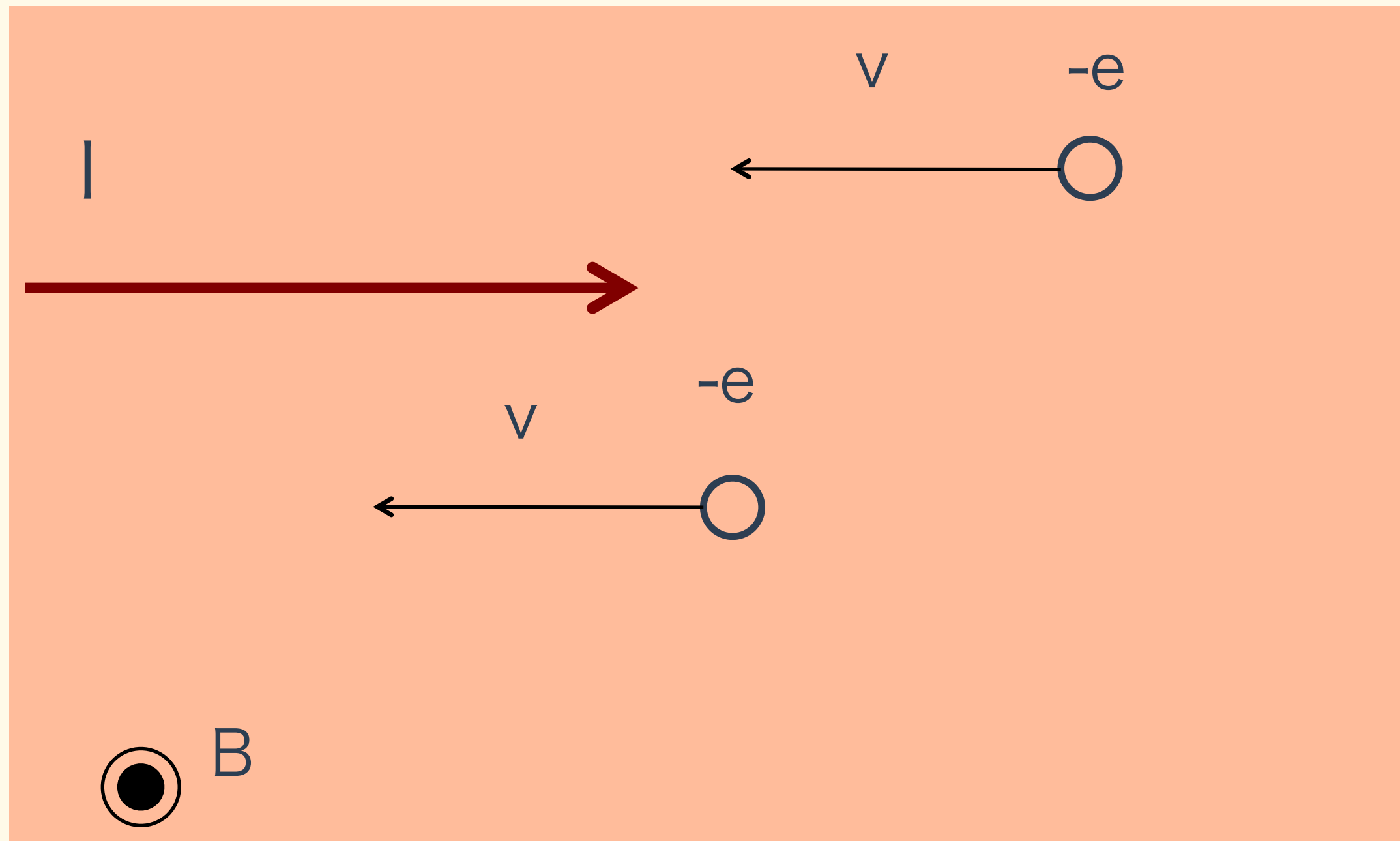
$$\mathbf{F} = \underbrace{q\mathbf{E}}_{\text{電場から受ける力}} + \underbrace{q\mathbf{v} \times \mathbf{B}}_{\text{磁場から受ける力}}$$

ホール効果

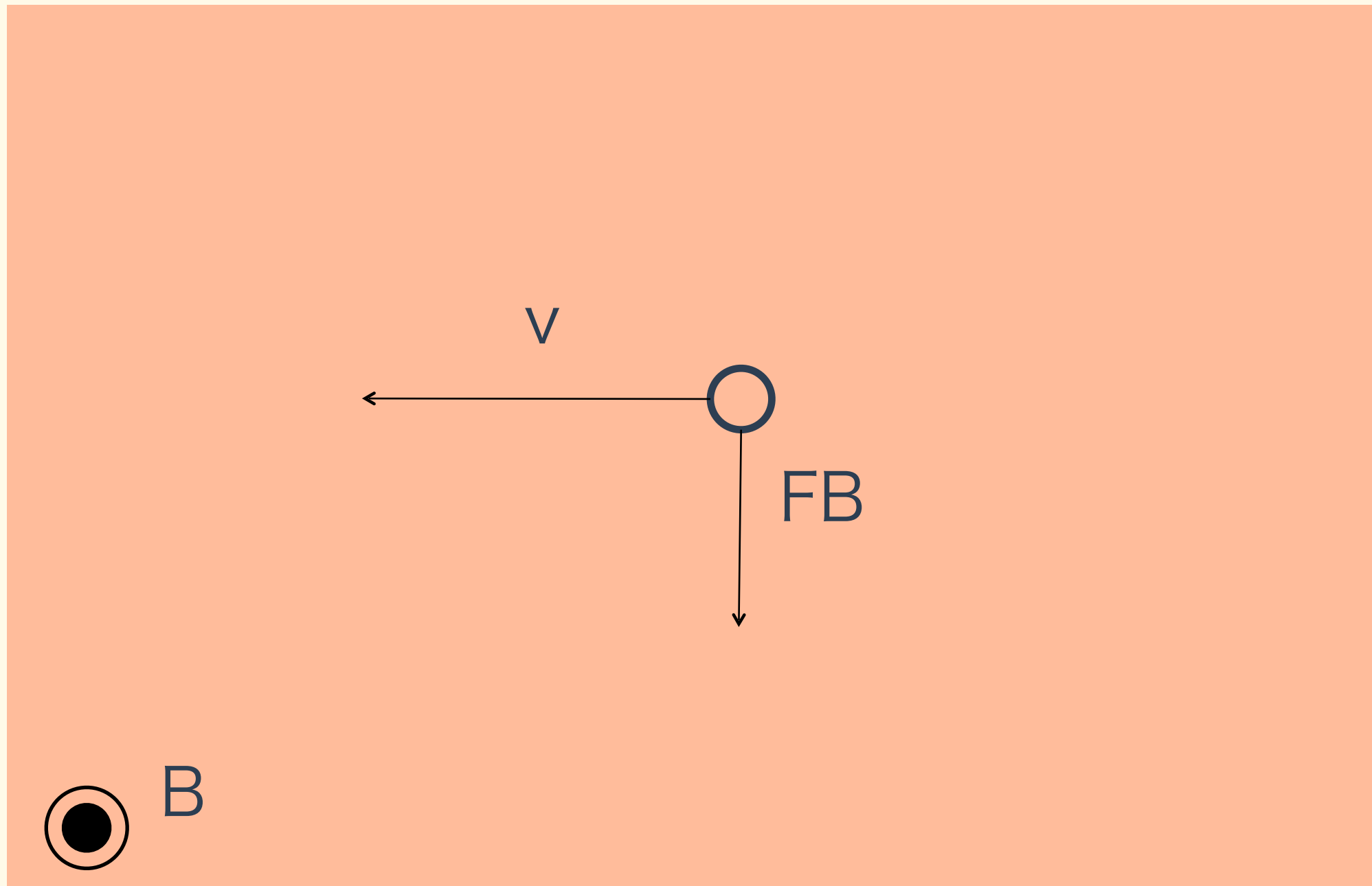
電流に対し垂直に磁場をかけると、電流が曲がる。
曲がることで、電荷の偏りが生じ起電力が発生する。



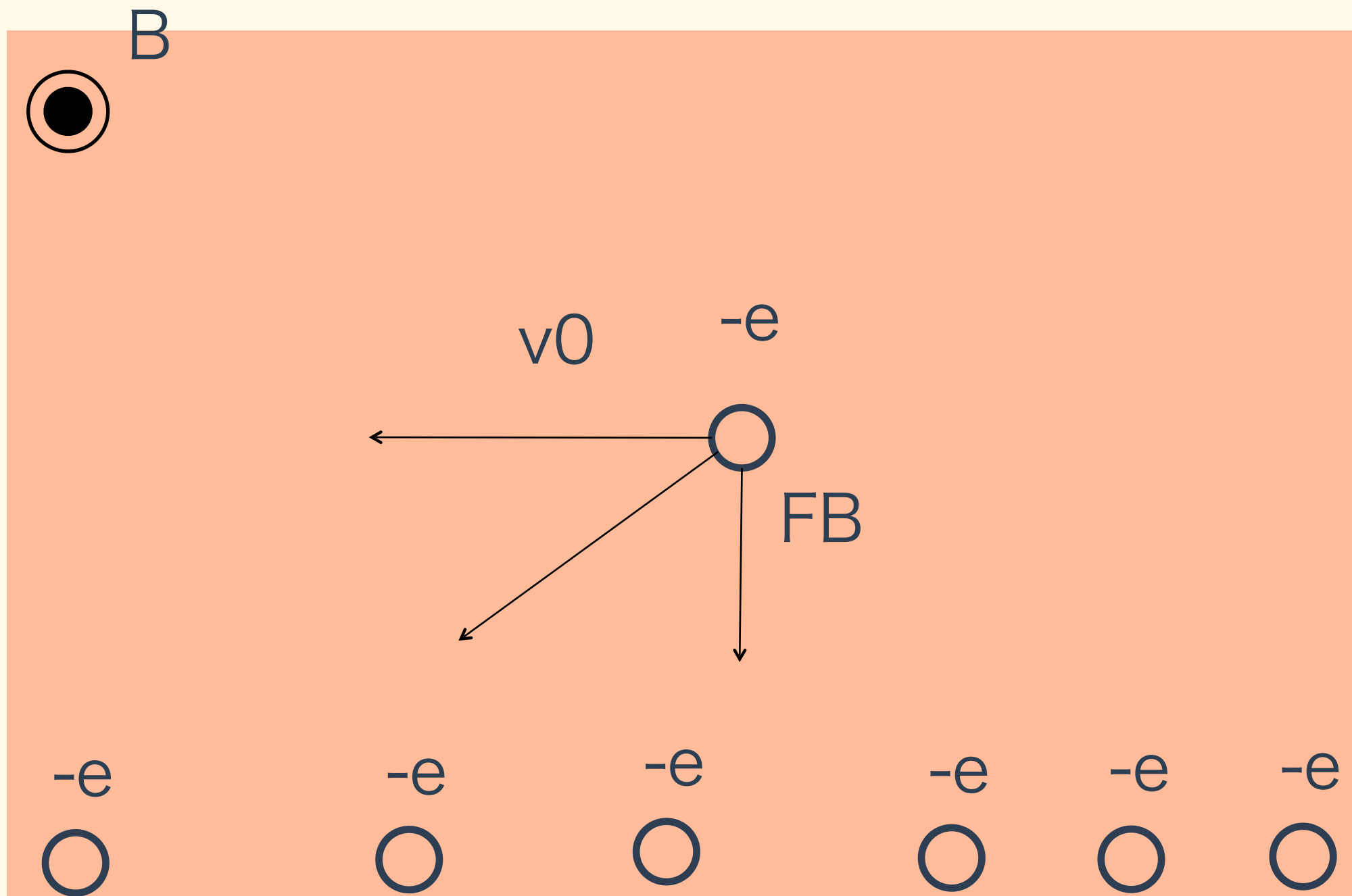
原理



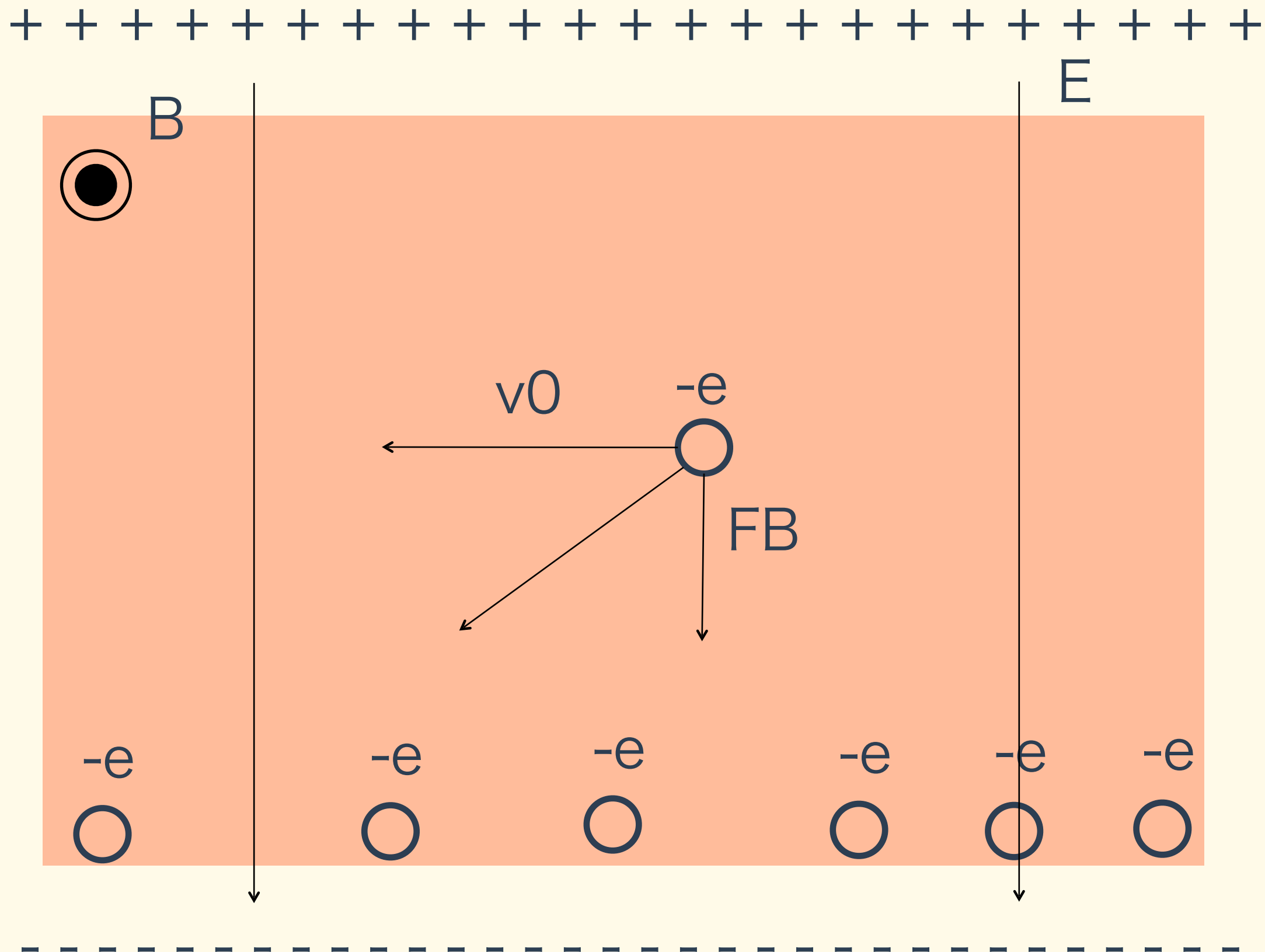
動いている電子は磁場から力を受ける



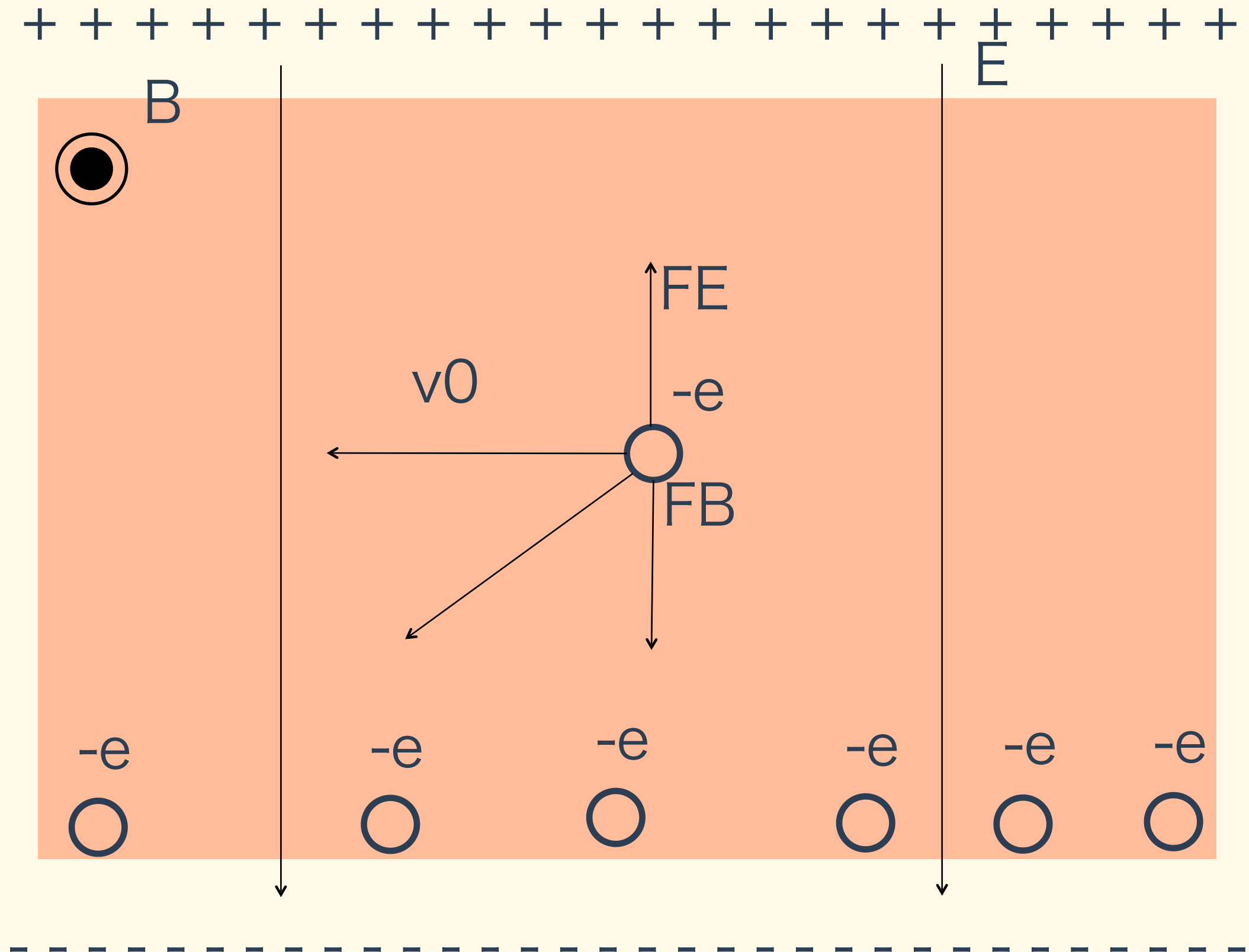
電子は曲がり、端に溜まってくる



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。