

固体物理学1

第11講

半導体

~~ 古典への回帰 ~~

広島大学 井野明洋

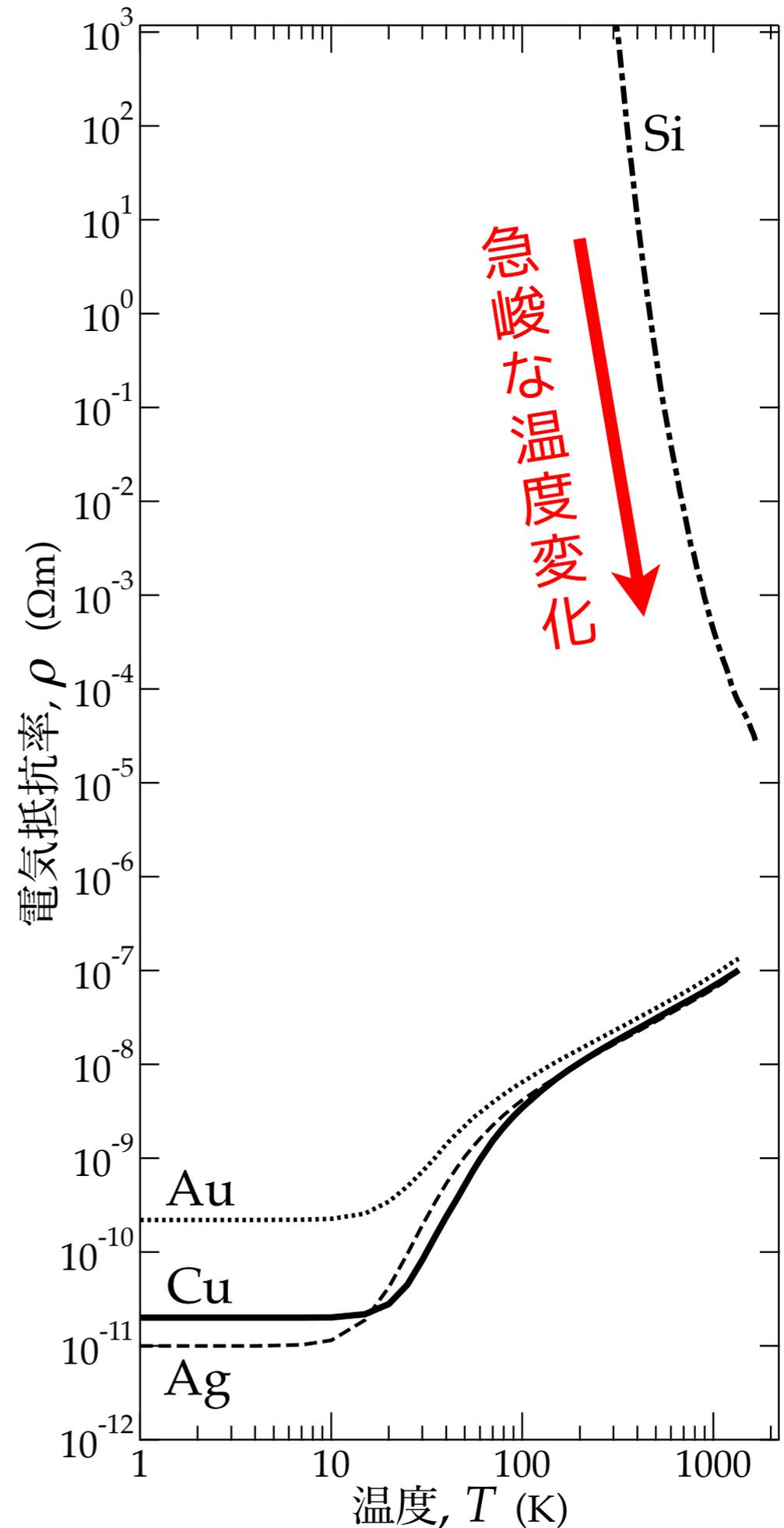
居室：理D205、放射光セ408

実 験 事 実

半導体の電気抵抗

- 抵抗値の温度変化が、金属と真逆。
 - ▶ 低温で、完全な **絶縁体**。
 - ▶ 高温で、抵抗値が **急激に低下**。
- フェルミ面が無くても、電気を通す。
 - ▶ 誰が、電流を運ぶのか??

低温側は、バンド理論の予想通り。
問題は、おそらく高温側。



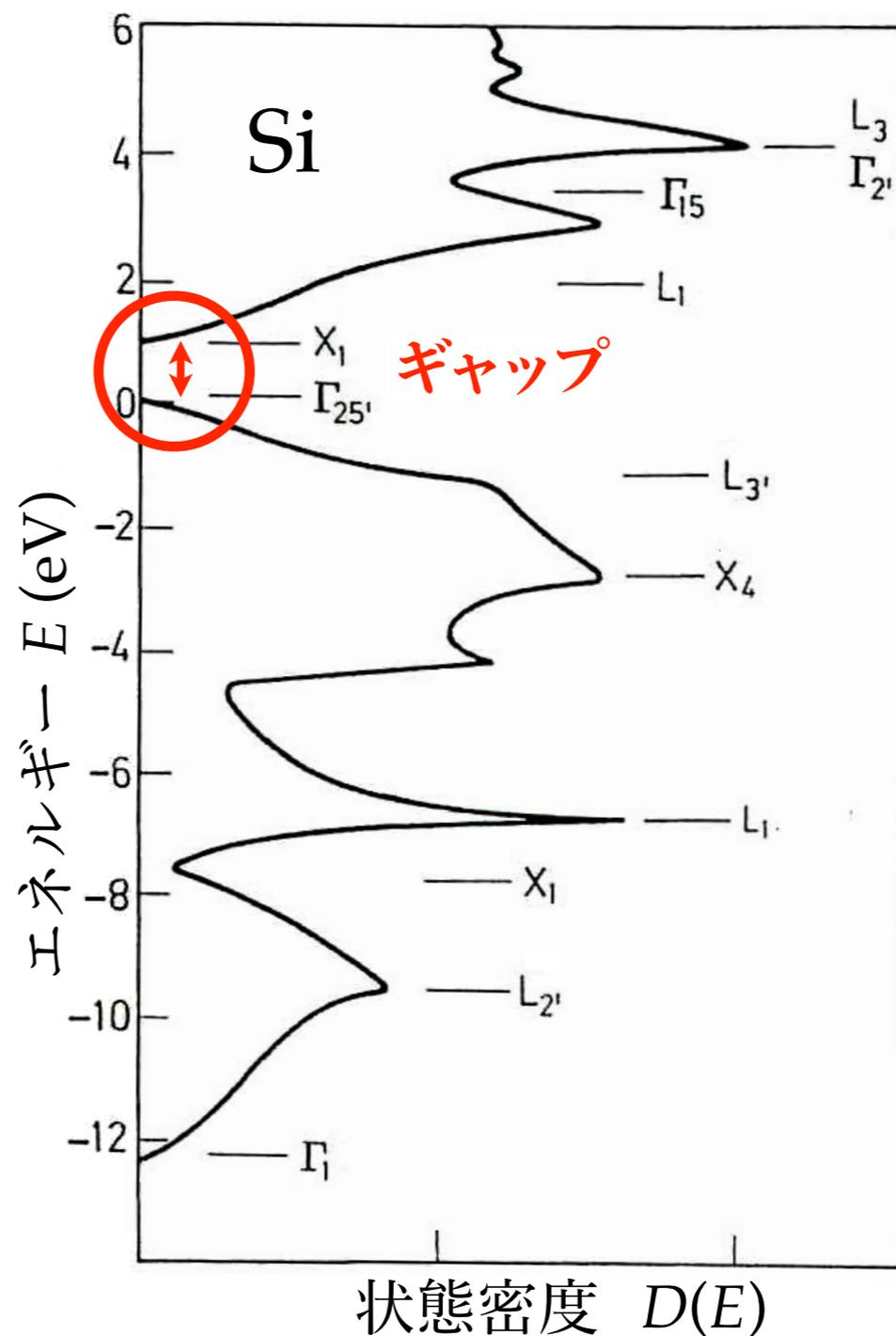
何が違うのか？

金属

E_F の近傍で
 $D(E)$ が一定。

半導体

バンド・ギャップにより
 E_F の近傍で
 $D(E)$ が **立ち上がる**。



半導体は、熱に対して、敏感に反応する。

課題

半導体における

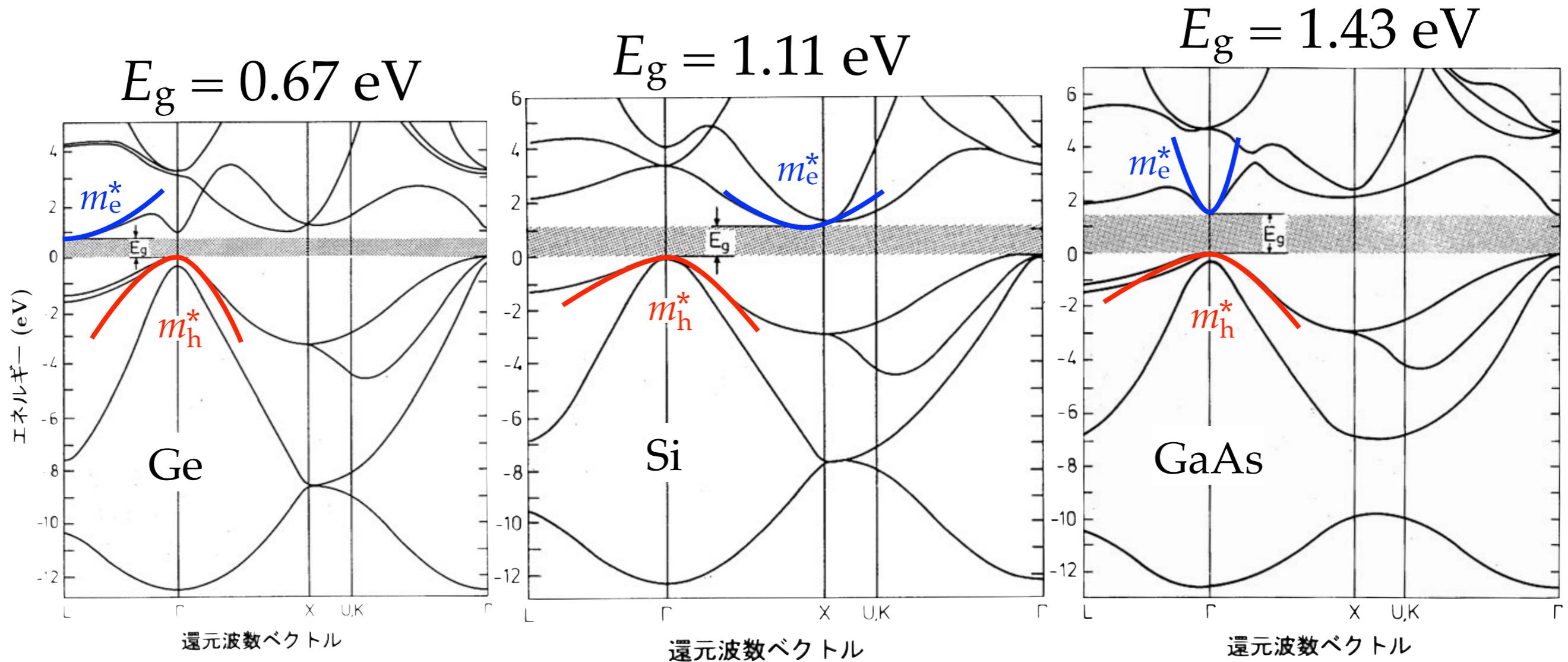
温度の効果

方針

バンド理論に
熱・統計力学を
組み合わせる

- ボルツマン方程式
- 有効状態密度

半導体のバンド分散



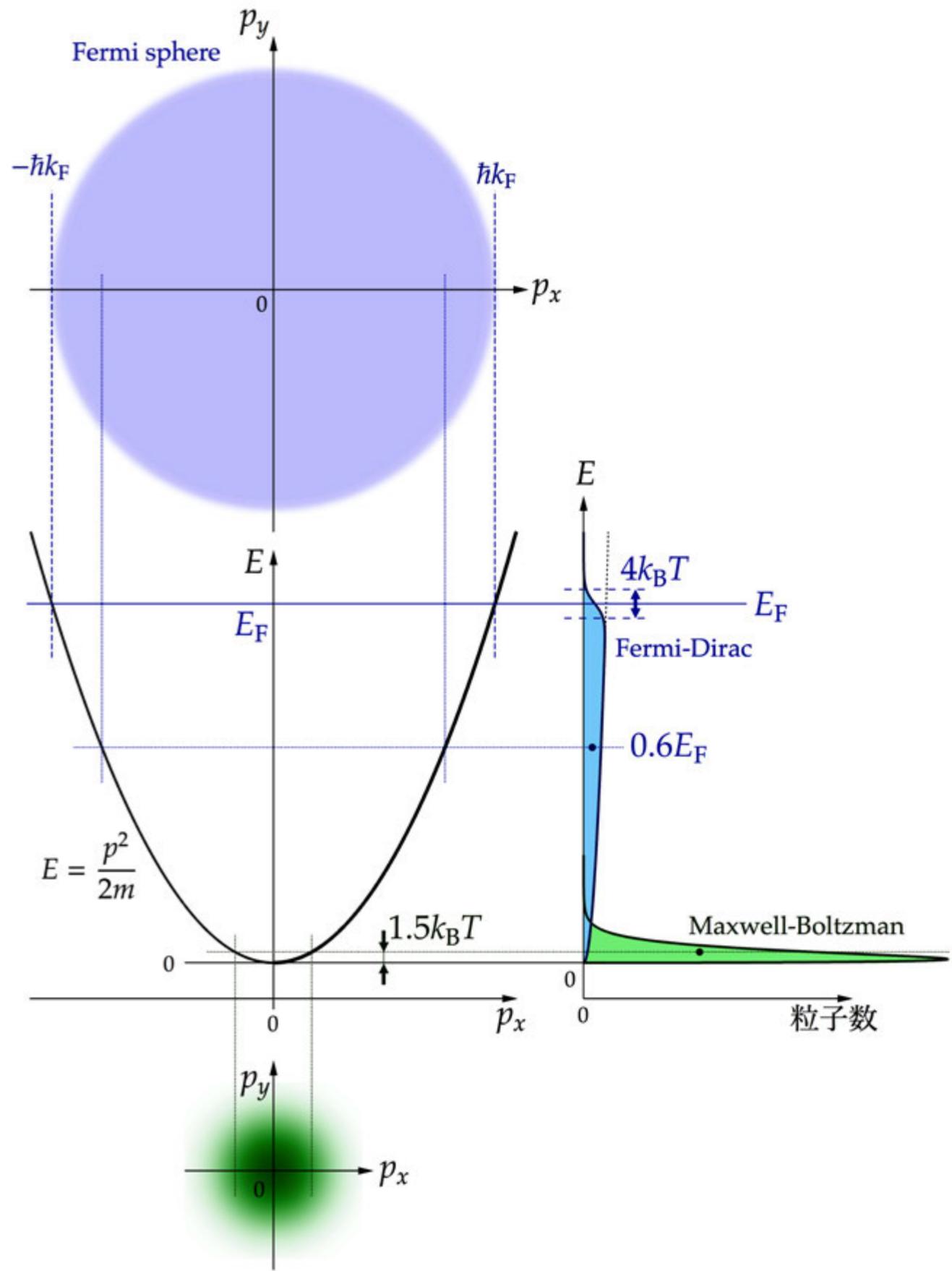
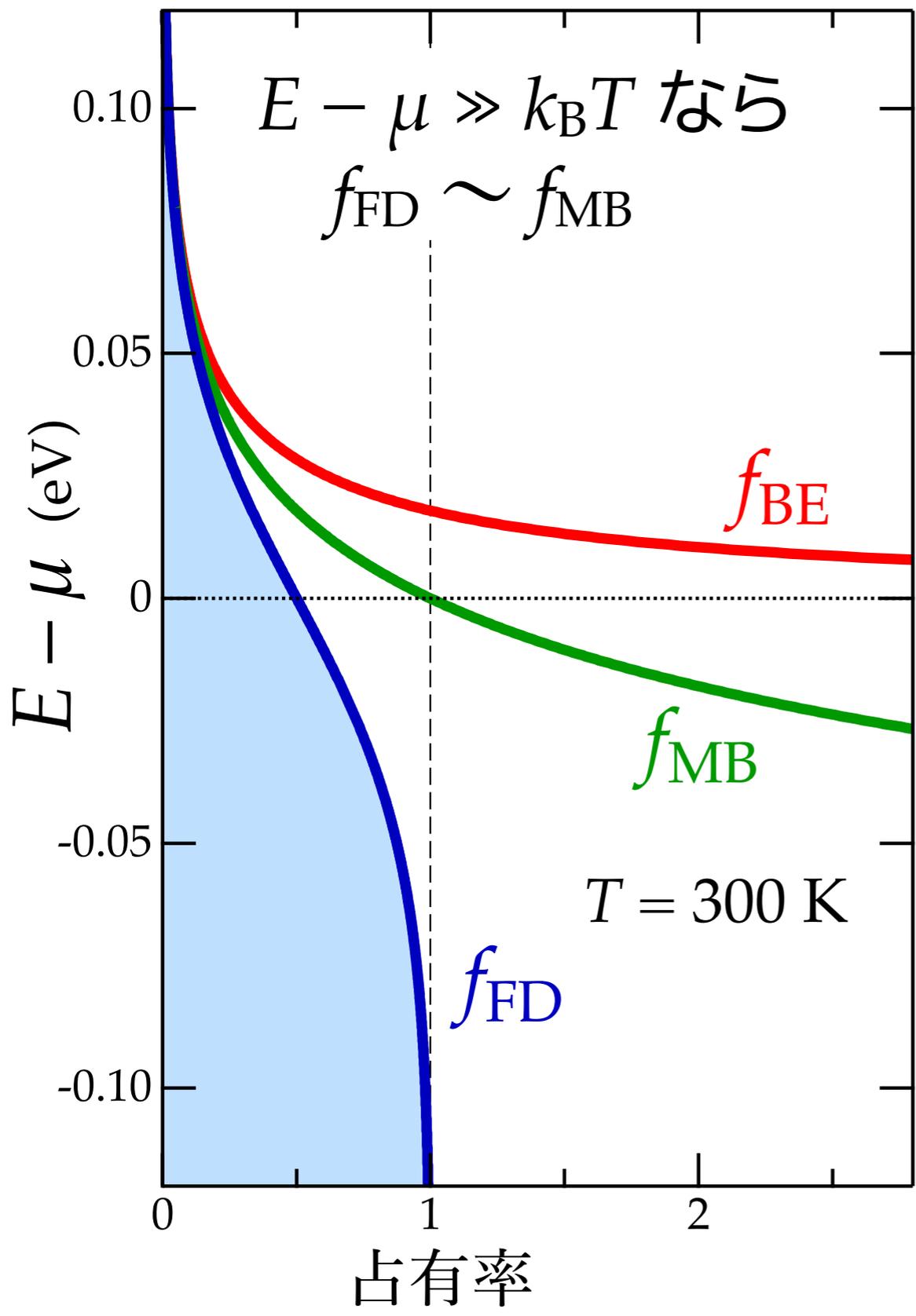
- ギャップ近傍の分散 $E(\mathbf{k})$ を、放物線で近似する。
- ギャップ近傍の状態密度 $D(E)$ は、曲率だけで決まる。

$$E = \frac{\hbar^2}{2m_e^*} |\mathbf{k} - \mathbf{k}_C|^2 - E_C; \quad D_C(E) = \frac{L^3}{2\pi^2} \left(\frac{\sqrt{2m_e^*}}{\hbar} \right)^3 \sqrt{E - E_C}$$

板書

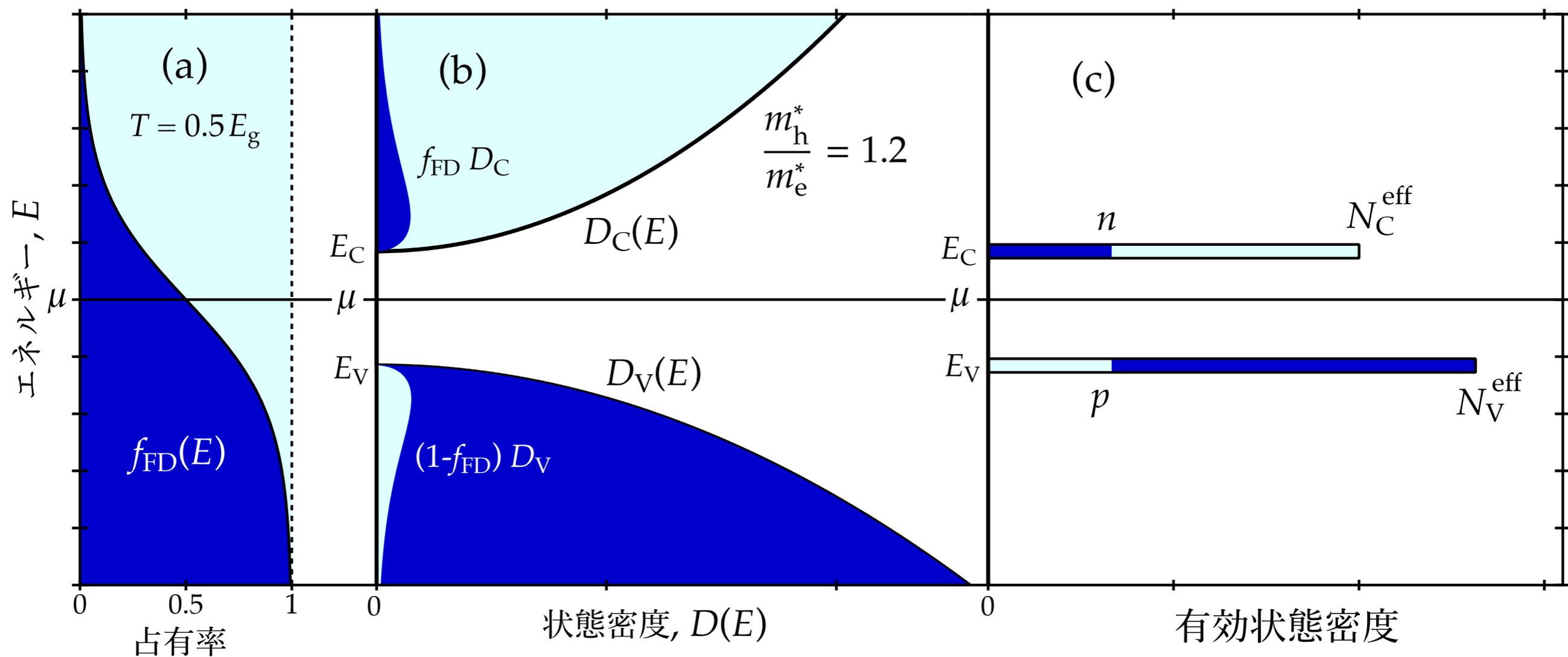
半導體方程式

古典気体への回帰



有効状態密度とキャリア密度

$$n = N_{\text{eff}}^{\text{C}} \exp\left(-\frac{E_{\text{C}} - \mu}{k_{\text{B}}T}\right) \quad N_{\text{eff}}^{\text{C}} = 2 \left(\frac{m_{\text{e}}^* k_{\text{B}}T}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2}$$



$$p = N_{\text{eff}}^{\text{V}} \exp\left(-\frac{\mu - E_{\text{V}}}{k_{\text{B}}T}\right) \quad N_{\text{eff}}^{\text{V}} = 2 \left(\frac{m_{\text{h}}^* k_{\text{B}}T}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2}$$

半導体方程式

$$np = n_i^2$$

化学ポテンシャル μ の位置に依存しない。

真性キャリア密度

$$n_i \stackrel{\text{def.}}{=} \sqrt{N_C^{\text{eff}} N_V^{\text{eff}}} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right)$$

相似形

ツボQ3,Q4

$$K_w(25\text{ C}^\circ) \simeq 1 \times 10^{-14} \text{ mol}^2/\ell^2$$

水のイオン積

$$[\text{H}^+][\text{OH}^-] = K_w \propto \exp\left(-\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right)$$

標準ギブズ
自由エネルギー

相似形

化学平衡の法則
質量作用の法則
law of mass action

活性化エネルギー
アレニウスの式

$$np = n_i^2 = N_C^{\text{eff}} N_V^{\text{eff}} \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right)$$

バンド・ギャップ

半導体方程式

法則の起源

ギブス自由エネルギーの最小化

$$\min G(p, T)$$

f_{FD} と f_{MB}

化学平衡の法則

半導体方程式

$$np = n_i^2 = N_C^{\text{eff}} N_V^{\text{eff}} \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right)$$

$$E_g = 1.1 \text{ eV (Si)}$$

水のイオン積

$$[\text{H}^+][\text{OH}^-] = K_w \propto \exp\left(-\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right)$$

$$\frac{\Delta G^\circ}{N_{\text{avd}}} = 0.83 \text{ eV (H}_2\text{O)}$$

室温での キャリヤ密度

電子密度 ホール密度 真性キャリア密度

$$n = p = n_i(T)$$

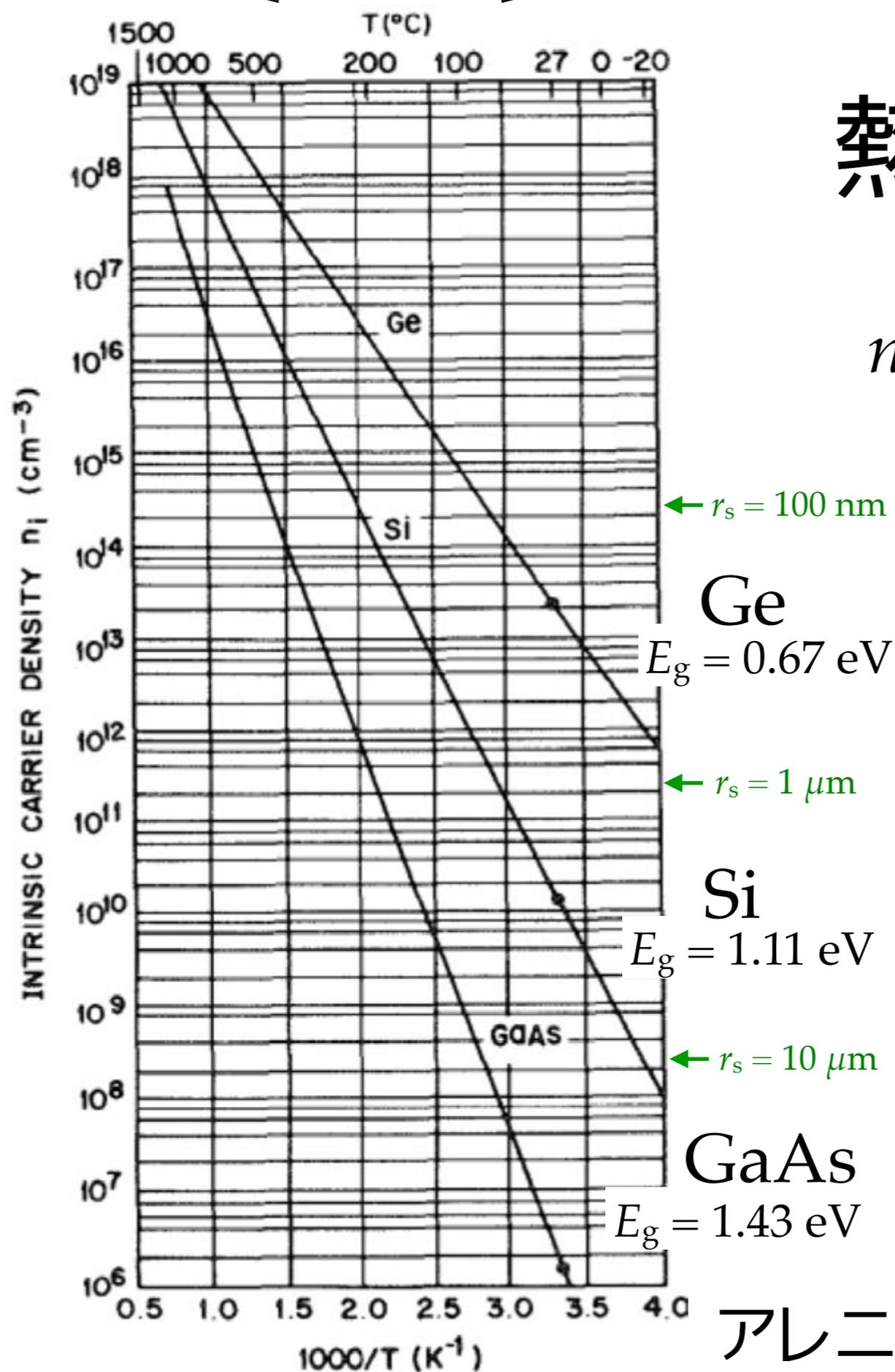
$$T = 300 \text{ K}$$

$$r_s = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi n_i}}$$

物質	E_g (eV)	n_i (/m ³)	r_s (μm)
Ge	0.67	2.5×10^{19}	0.2
Si	1.11	1.5×10^{16}	2.5
GaAs	1.43	1.8×10^{12}	51

cf. 金属 Cu の電子は、 $r_s = 1.4 \text{ \AA}$

高温側 ← → 低温側



熱励起キャリア密度

$$n_i \stackrel{\text{def.}}{=} \sqrt{N_C^{\text{eff}} N_V^{\text{eff}}} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right)$$

純粋な半導体では、

$$n = p = n_i$$

真性半導体

intrinsic semiconductor

アレニウス・プロット

ドルーデの式 (半導体)

$$\sigma = e^2 \left(n \frac{\tau_e}{m_e^*} + p \frac{\tau_h}{m_h^*} \right)$$

キャリア密度
(真性半導体)

$$n = p = n_i = \sqrt{N_V^{\text{eff}} N_C^{\text{eff}}} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right)$$

有効質量

$$m^* = \hbar^2 \left(\frac{d^2 E}{dk^2} \right)^{-1}$$

散乱確率

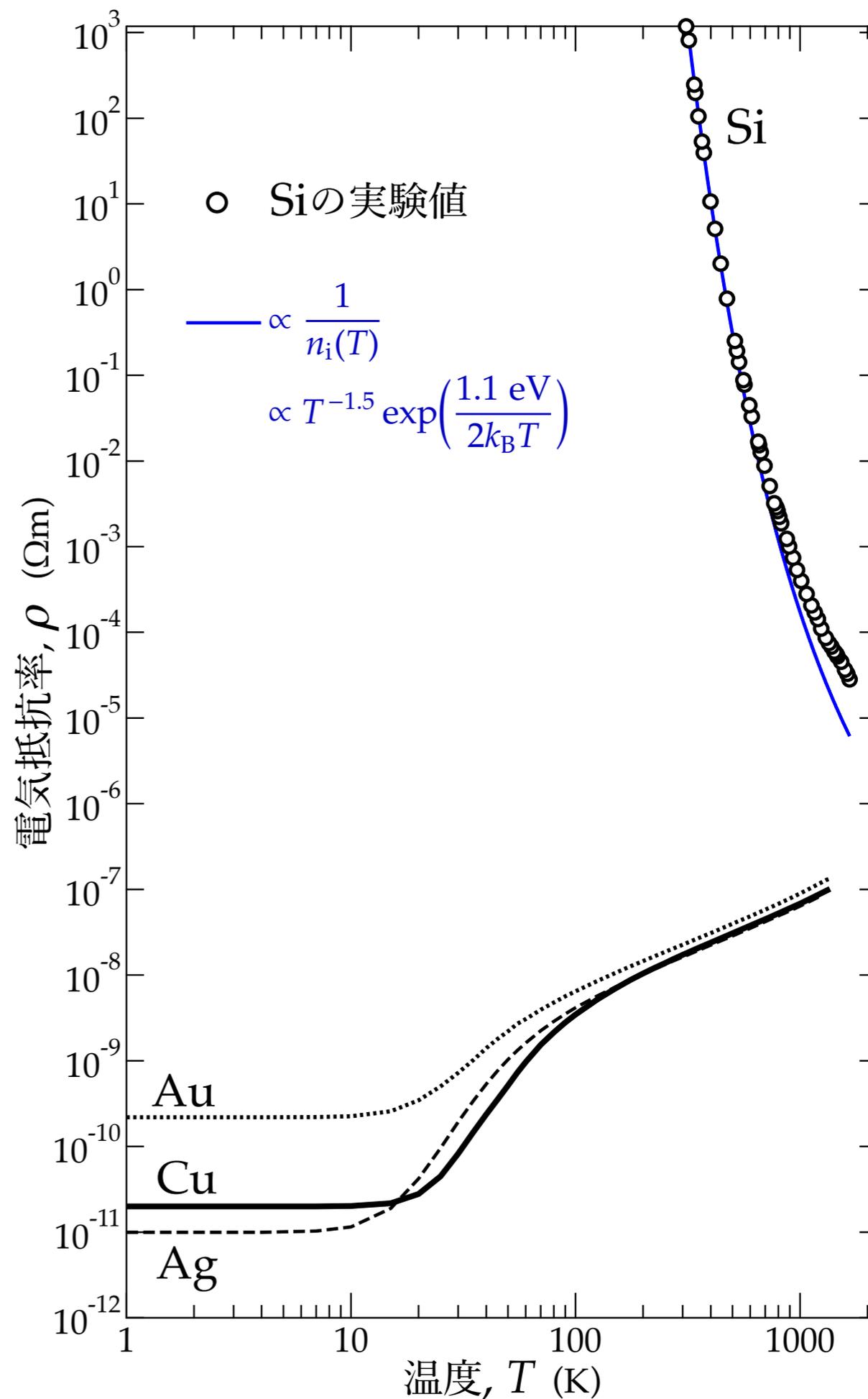
$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{imp}}} + \frac{1}{\tau_{\text{ph}}} + \frac{1}{\tau_{\text{el}}}$$

真性半導体の 電気抵抗

$$\rho = e^{-2} \left(n \frac{\tau_e}{m_e^*} + p \frac{\tau_h}{m_h^*} \right)^{-1}$$

$$n = p = n_i$$

$$= \sqrt{N_C^{\text{eff}} N_V^{\text{eff}}} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right)$$

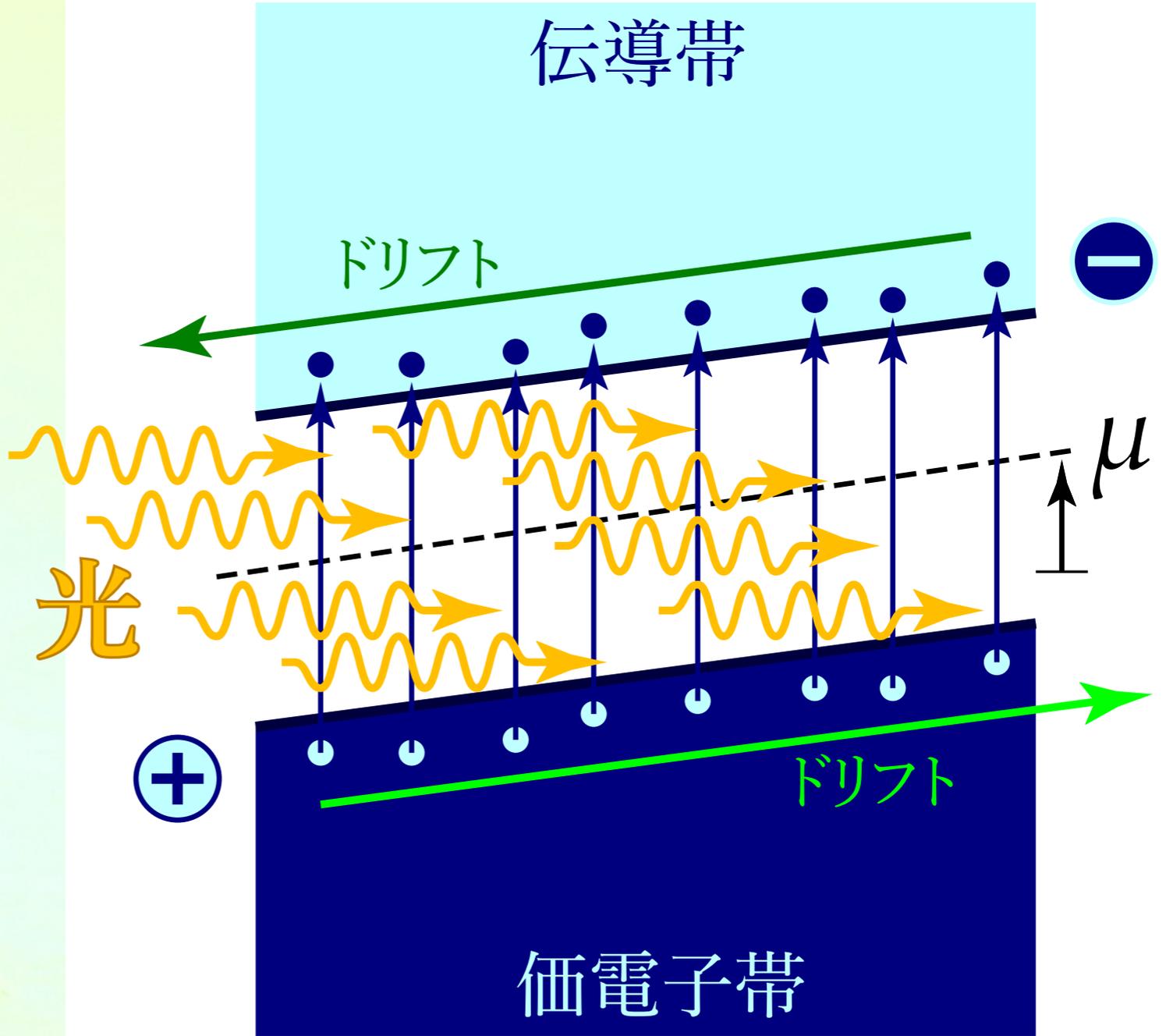


光励起キャリア

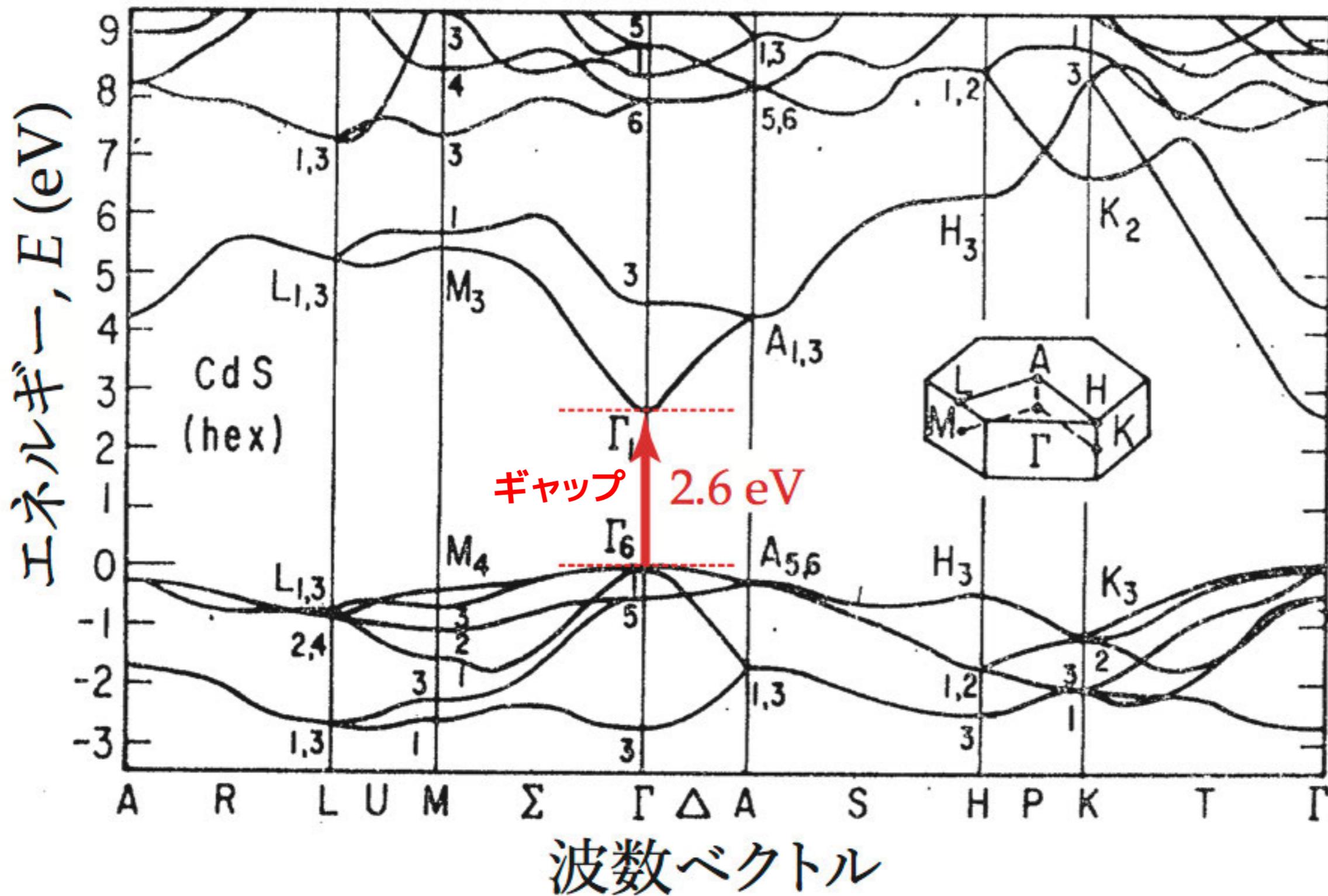
CdS 光導電素子



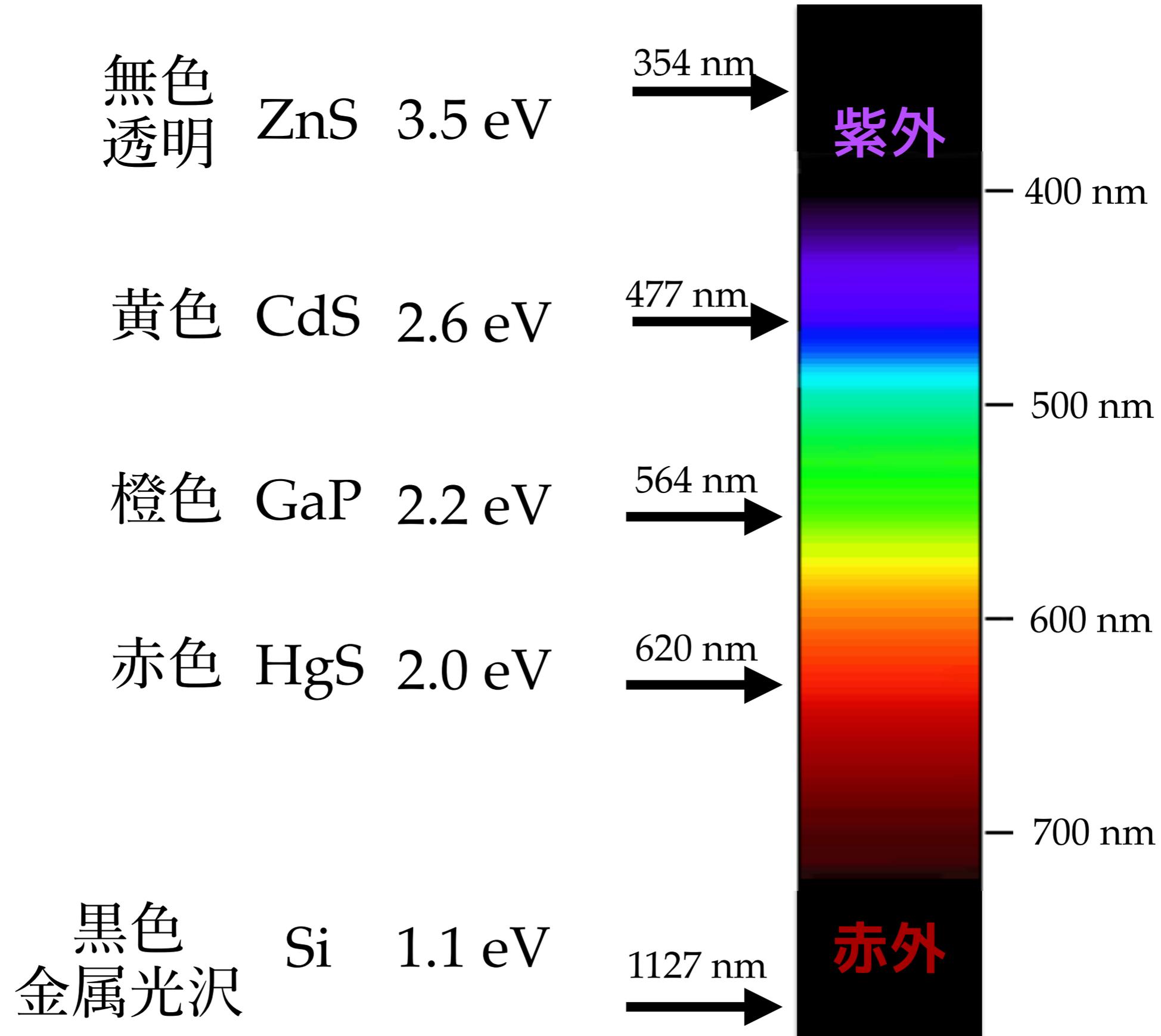
光導電素子



CdS のバンド構造

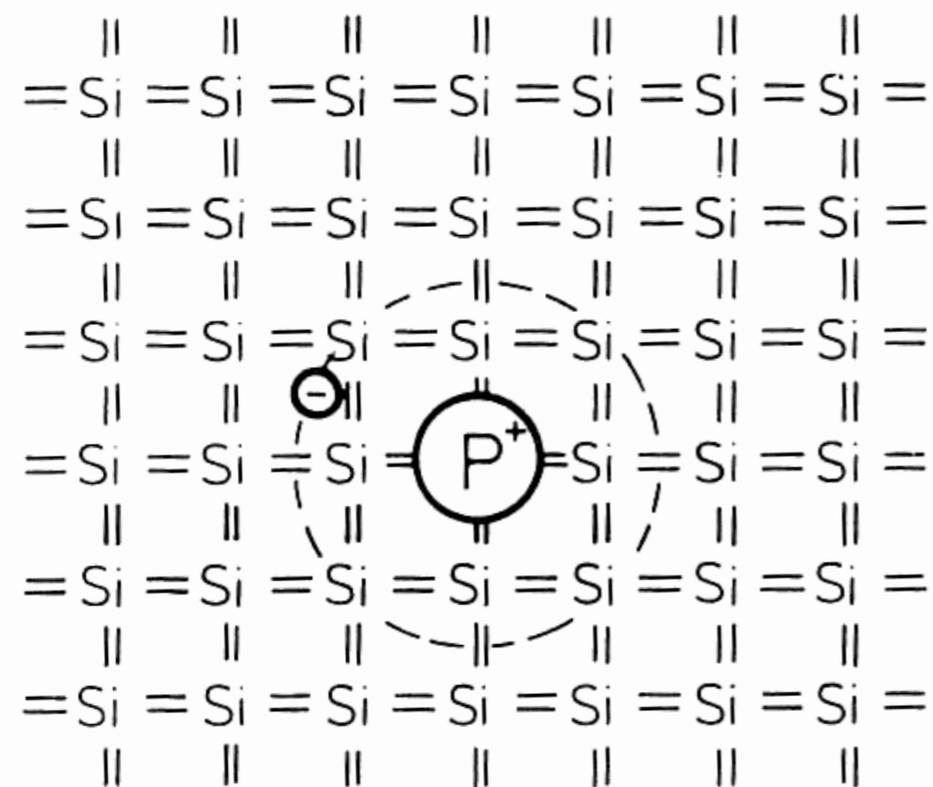


バンド・ギャップと光学的性質



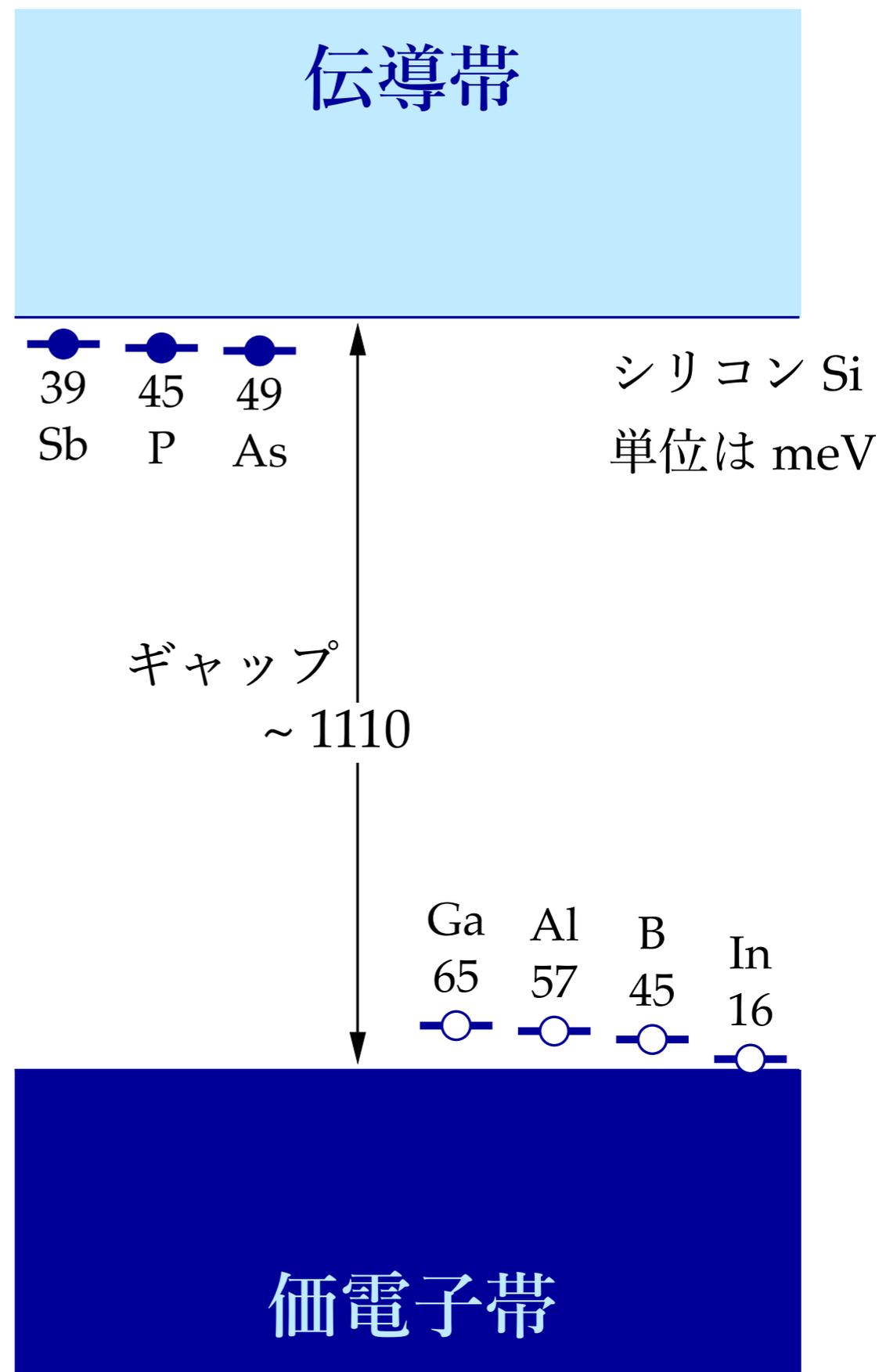
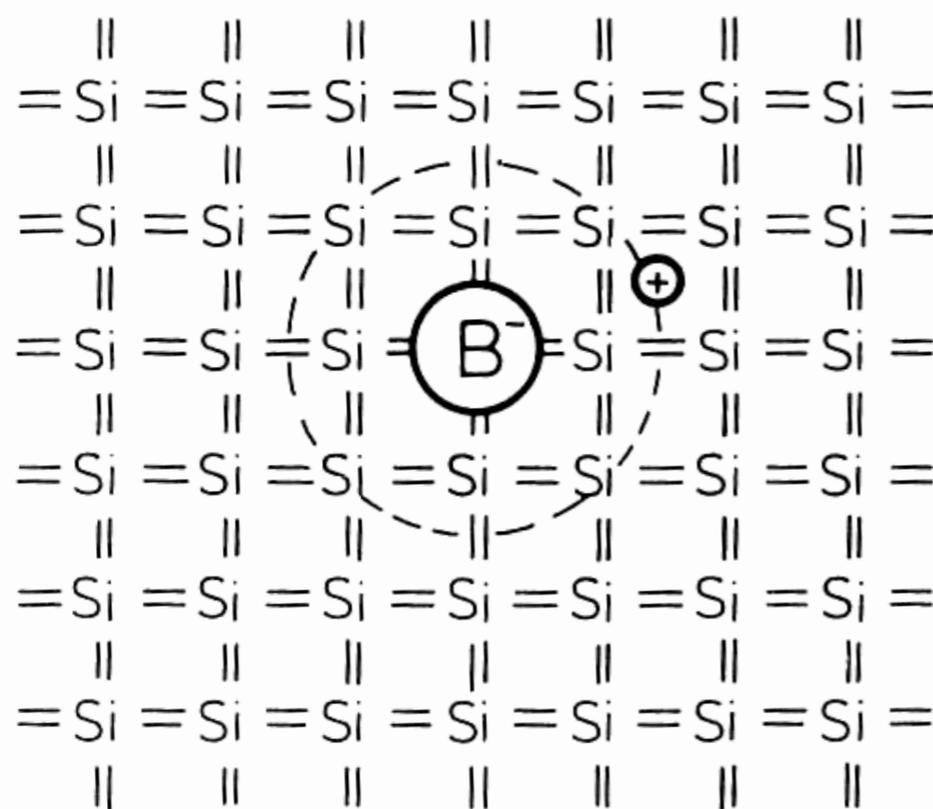
不純物添加

n型



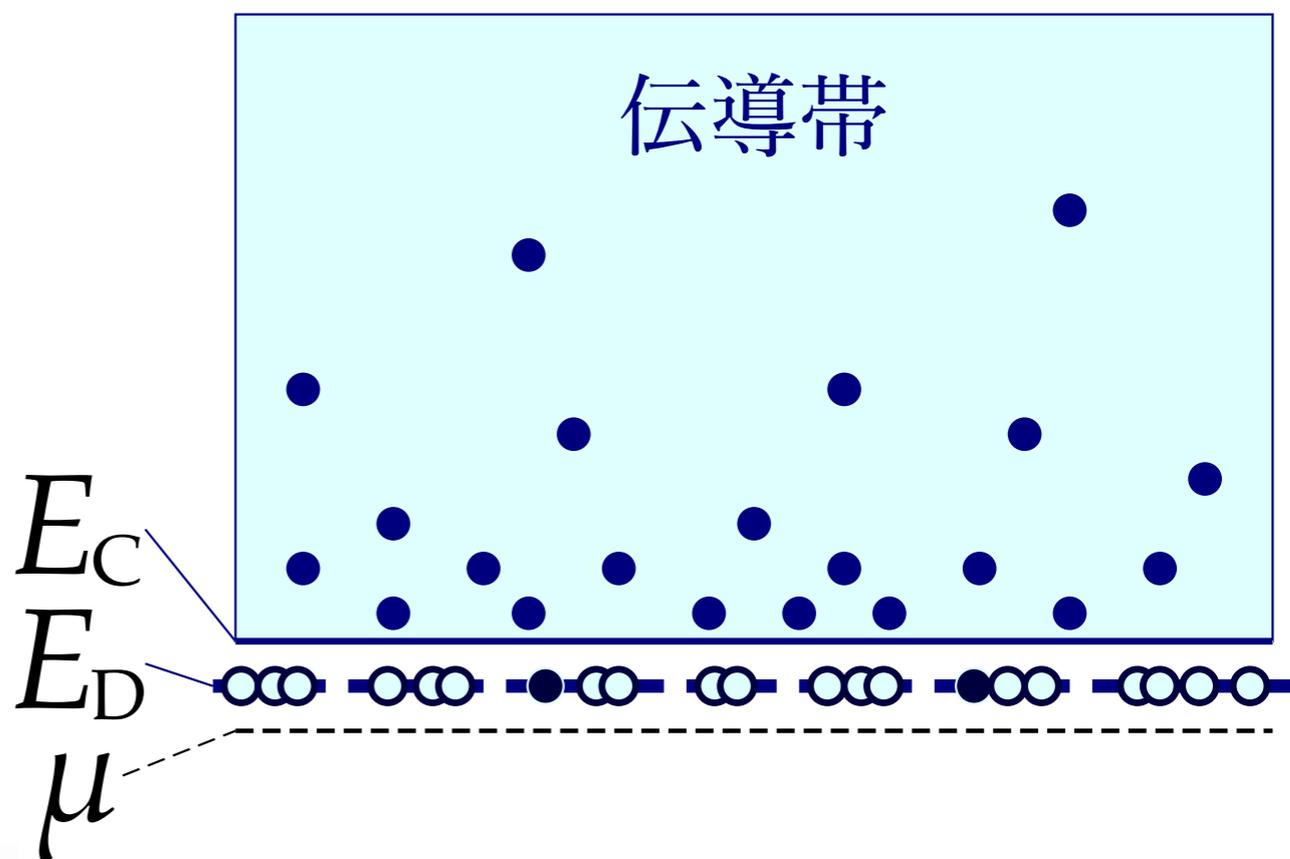
$T = 0$ で、キャリアは不純物に束縛

p型

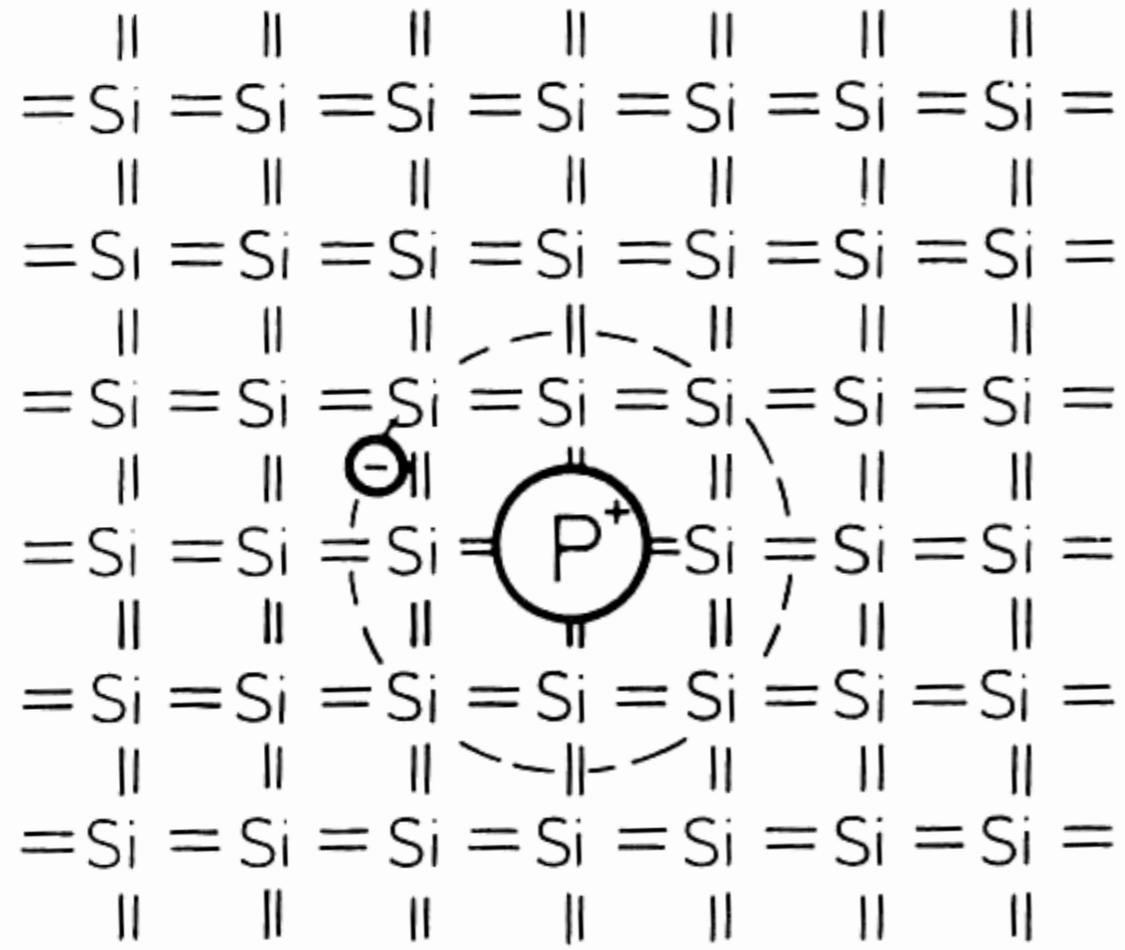


n型半導体

電子ドープ



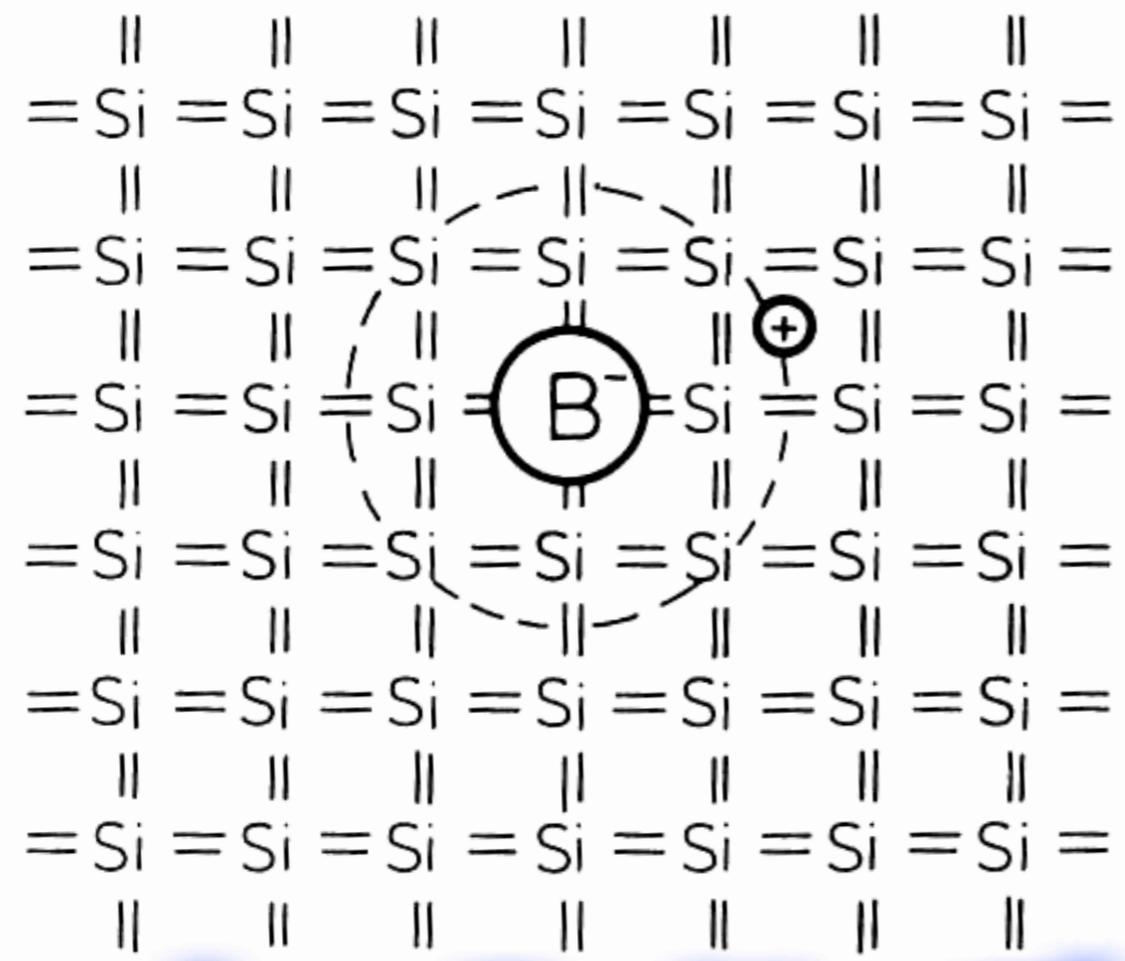
バンド・ギャップ



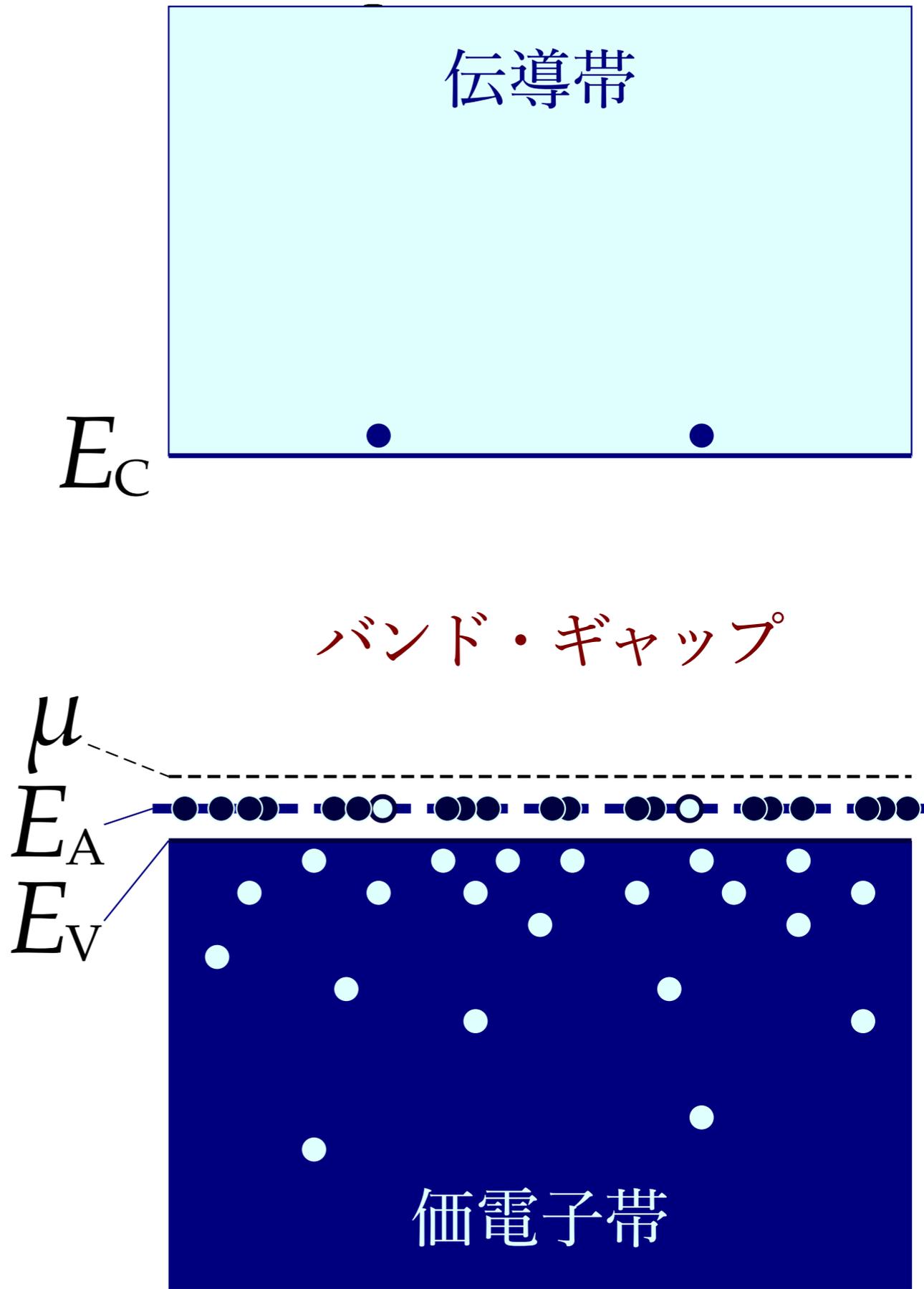
E_V

価電子帯

p型半導体



ホール・ドープ



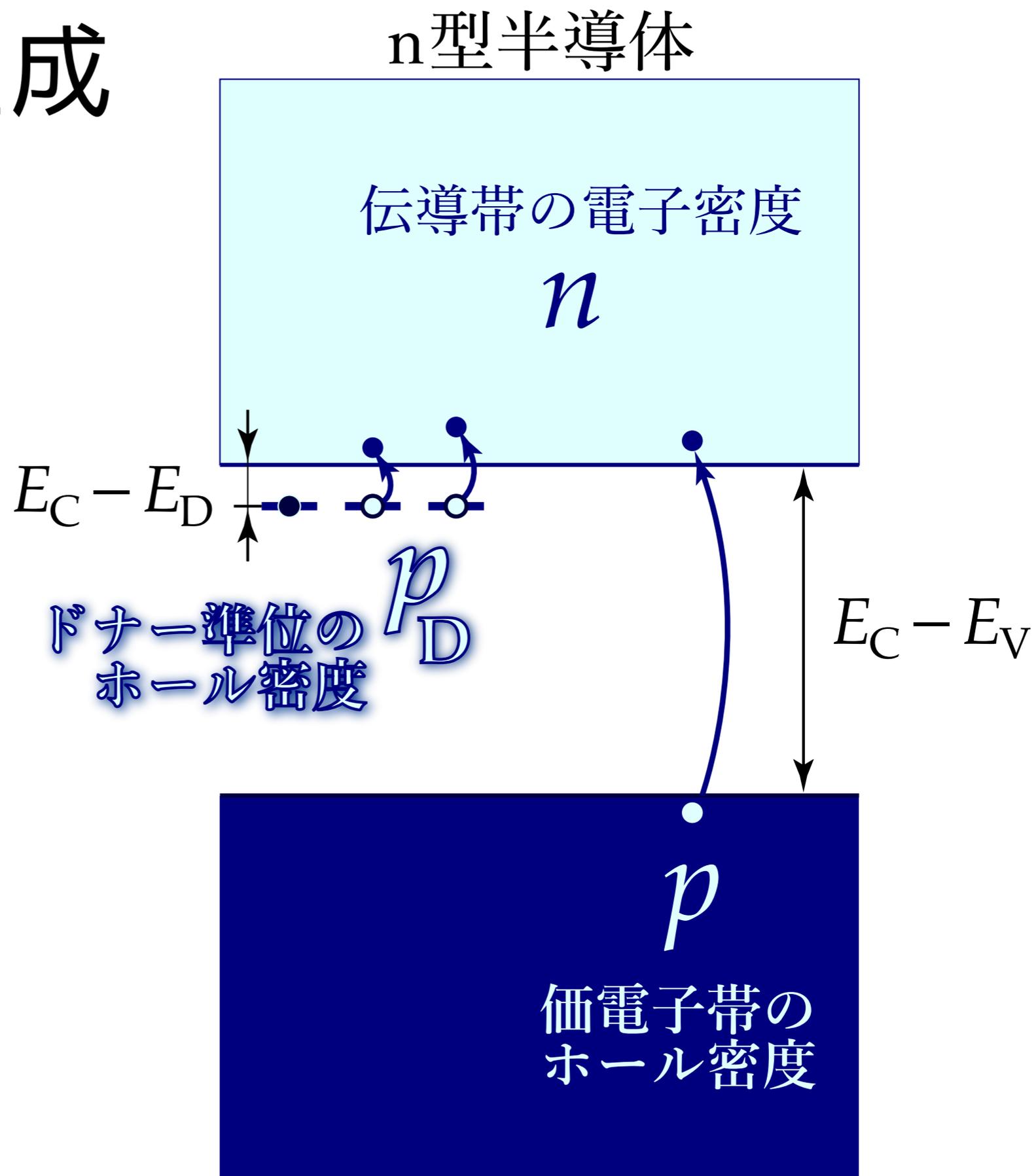
板書

外因性半導体の温度変化

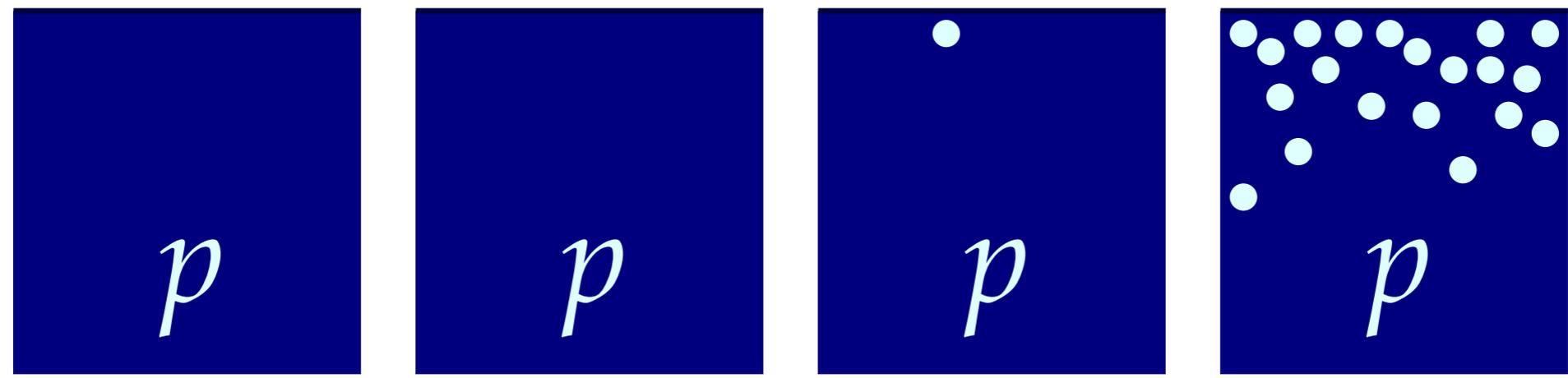
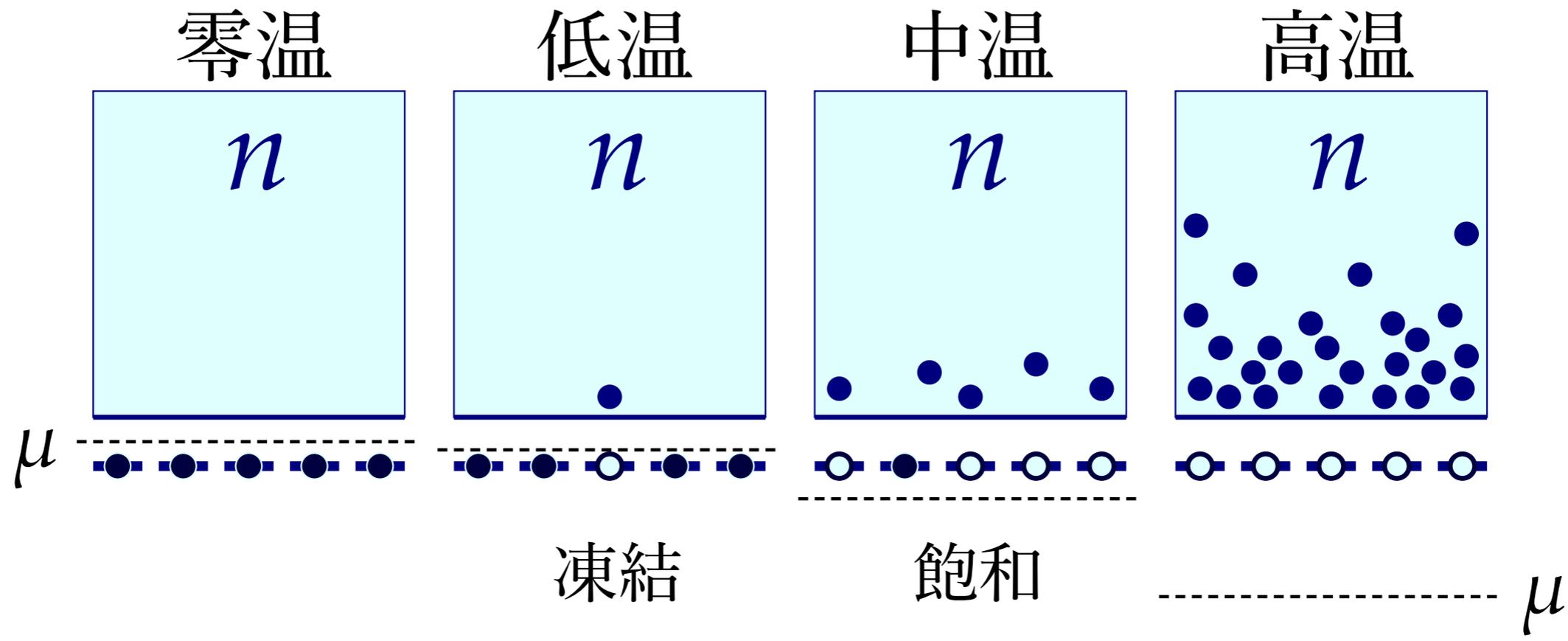
二通りの対生成

$$n = p_D + p$$

電荷の保存



温度依存性 (n型)



外因性

眞性

n型半導体の電子密度

真性領域 $2n_i(T) \gg N_D$

$$n \simeq n_i = \sqrt{N_V^{\text{eff}} N_C^{\text{eff}}} \exp\left(-\frac{E_C - E_V}{2k_B T}\right)$$

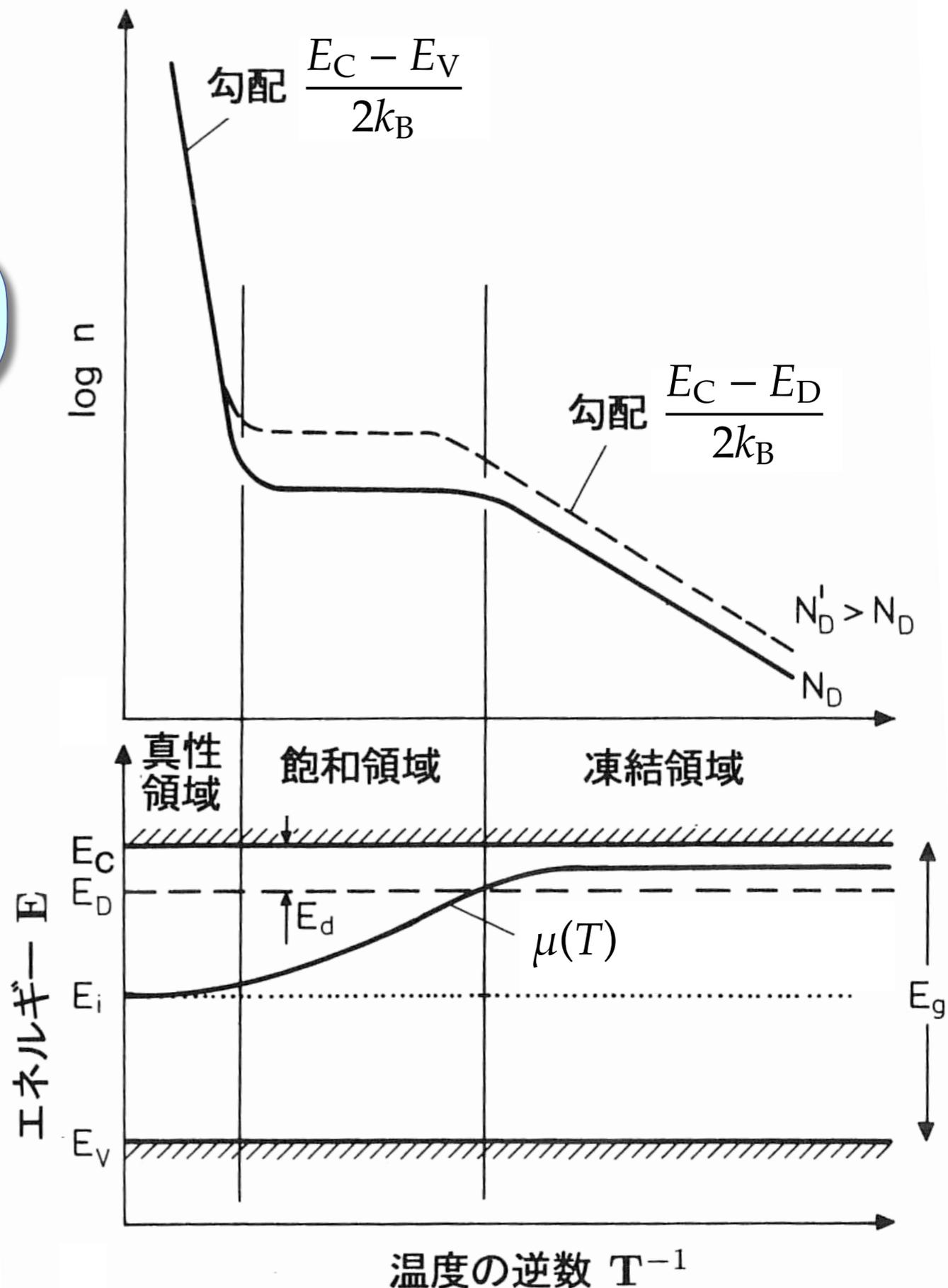
外因性領域 $2n_i(T) \ll N_D$

飽和領域 $N_C^{\text{eff}} \exp\left(-\frac{E_C - E_D}{2k_B T}\right) \gg 4N_D$

$$n \simeq N_D$$

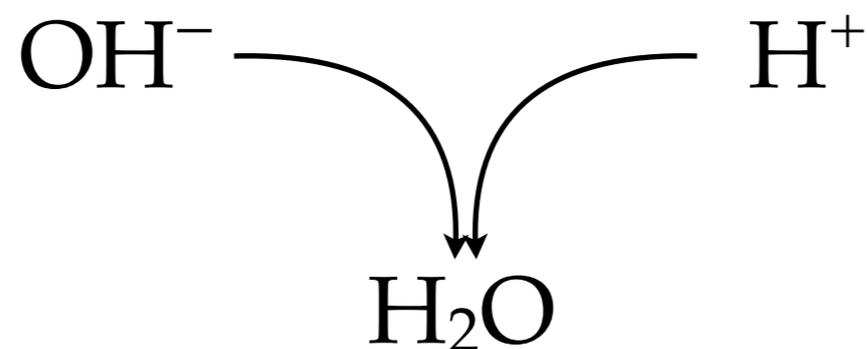
凍結領域 $N_C^{\text{eff}} \exp\left(-\frac{E_C - E_D}{2k_B T}\right) \ll 4N_D$

$$n \simeq \sqrt{N_D N_C^{\text{eff}}} \exp\left(-\frac{E_C - E_D}{2k_B T}\right)$$



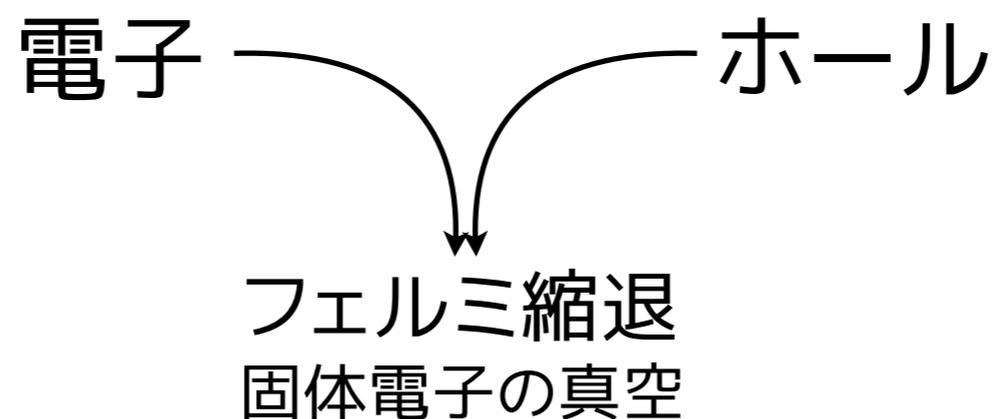
対生成・対消滅

化学



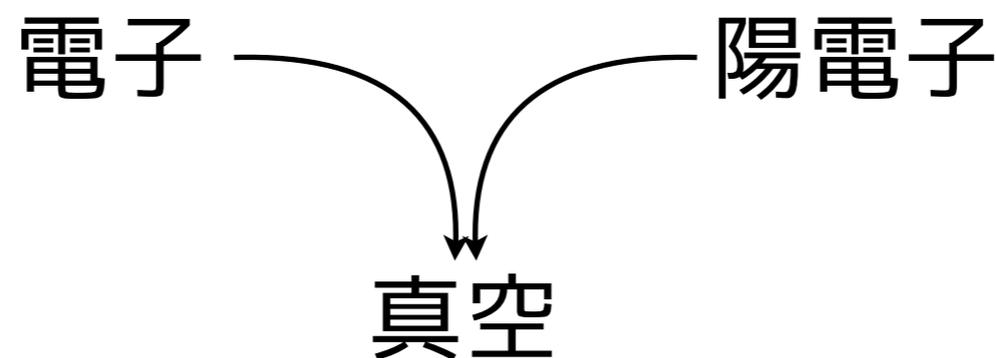
0.83 eV

固体物理



1.11 eV (Si)

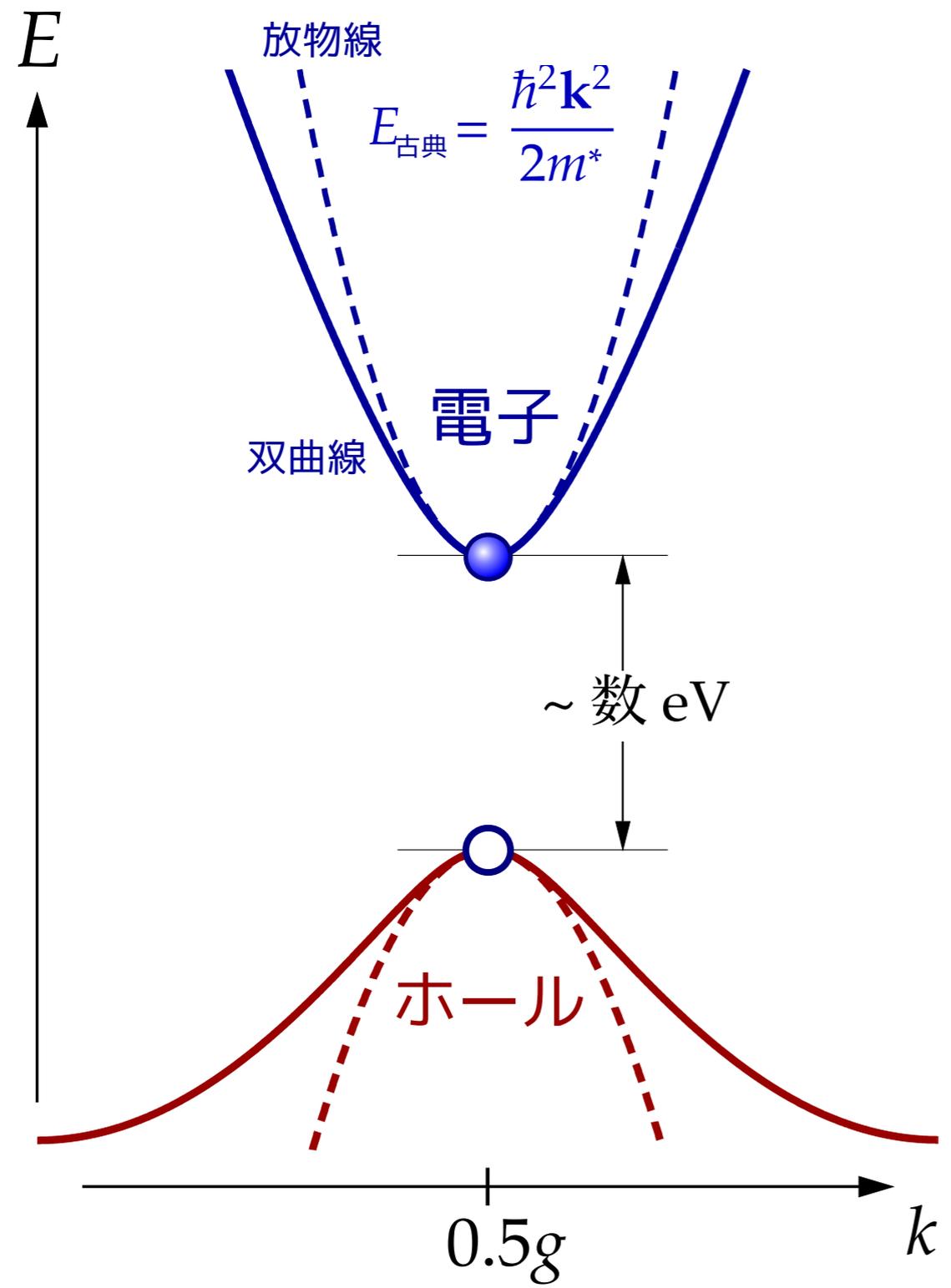
素粒子物理



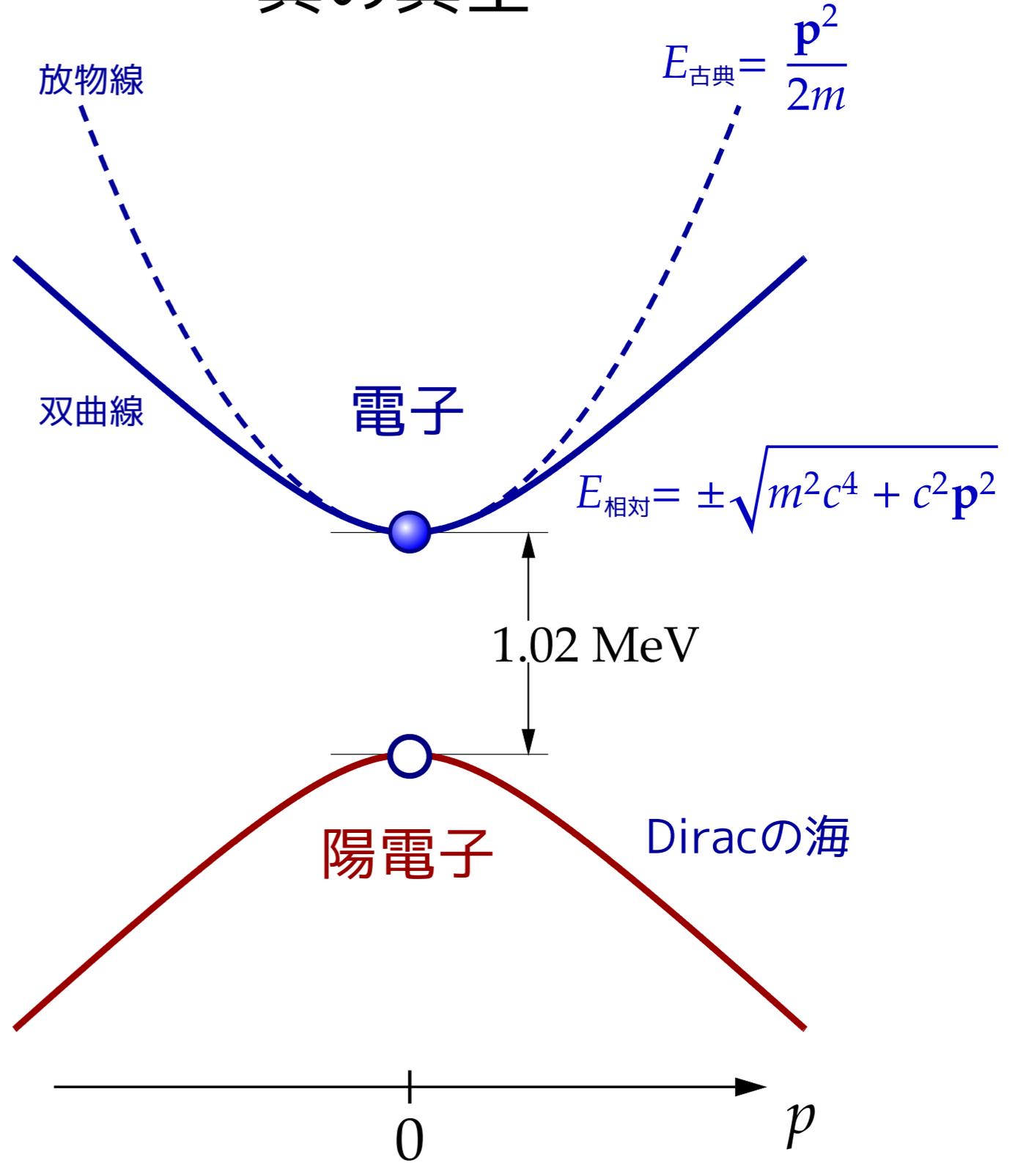
1.02 MeV

古典力学への回帰

固体電子の真空



真の真空



まとめ

~~ 半導体 ~~

もうちょっとで金属 → 刺激に対して敏感に反応。

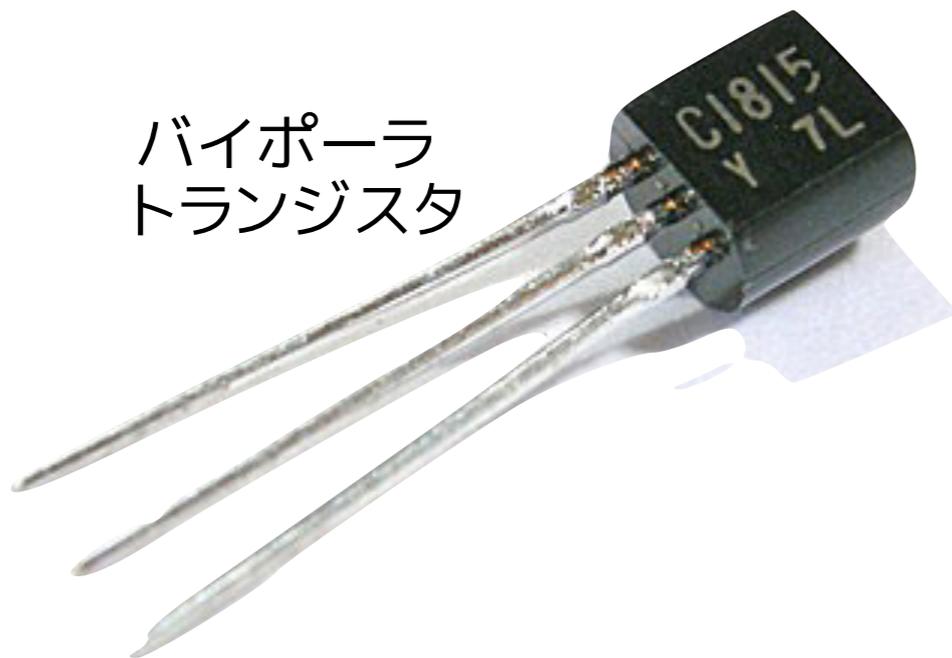
- 熱によるキャリア励起
- 光によるキャリア励起
- 不純物によるキャリア注入

$$np = n_i^2$$

電子を **人為的に制御** する固体素子の材料として、有望株。

残された謎

バイポーラ
トランジスタ



発光ダイオード (LED)

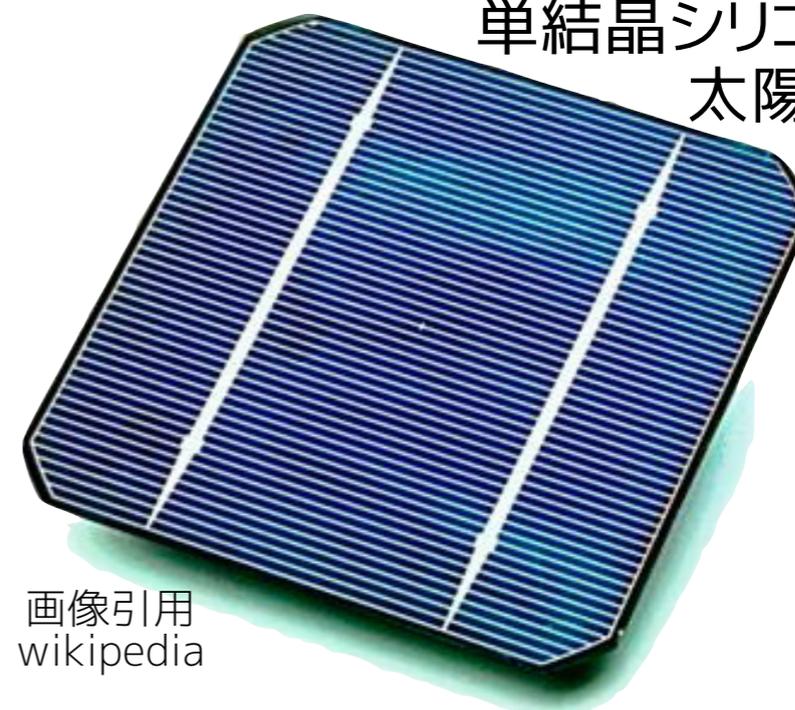


画像引用 wikipedia

スパコン「京」



単結晶シリコン型
太陽電池



画像引用
wikipedia

で、どうやって、半導体を活用するのか？

次回

実空間への回帰

第12講 非線形素子

次回

電子くんと
ホールちゃんの
出会いの場

第12講 非線形素子

次回

固体の電子を操る技

第12講 非線形素子