

# 第7回 金属の磁性・・・電荷と磁化，両方使える→スピントロニクス



・ 遍歴電子 → metal

今日の主役

・ 局在電子 → insulator  
(第5回-第6回)



How?



**本日のゴール** “電子状態” (spin) で磁気モーメントを理解する。

実験デモ

## ・ 金属・・・自由電子モデル

Schrödinger equation

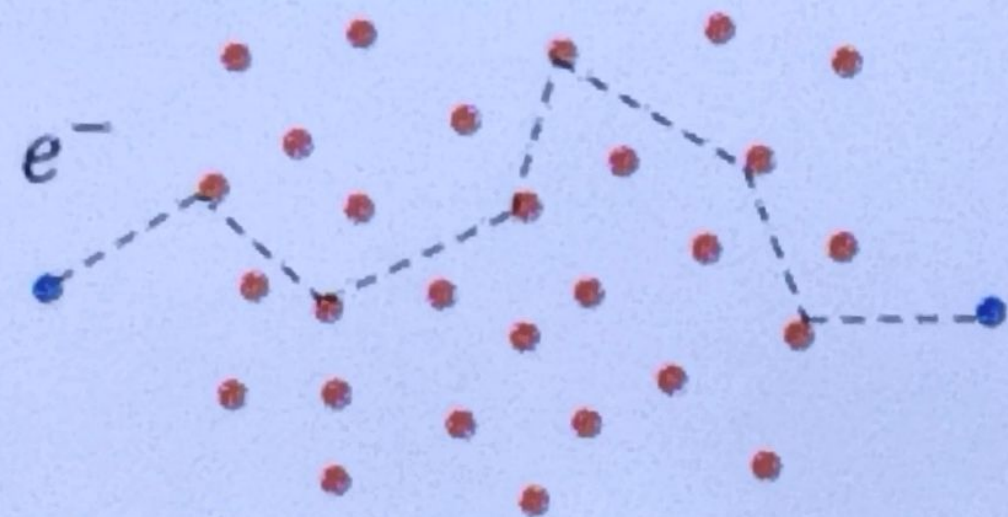
量子論

古典論

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \cdot \psi(r) = \varepsilon \psi(r)$$

固有値 波動関数

解くと





解くと

エネルギー固有値

$$\varepsilon = \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{2\pi}{L} \right)^2 (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2) \quad L: \text{周期長}$$

波動関数

$$\Phi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = A \cdot e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}}$$

$\varepsilon, \mathbf{k}$  はとびとびの値

“量子化” (離散的)

波数

$$k_{\alpha} = \frac{2\pi}{L} n_{\alpha} \quad (\alpha = x, y, z)$$

$n_{\alpha} = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

スピンの自由度を入れると

$\sigma = \pm 1 \dots 1$ つの状態に上下のスピンの収容

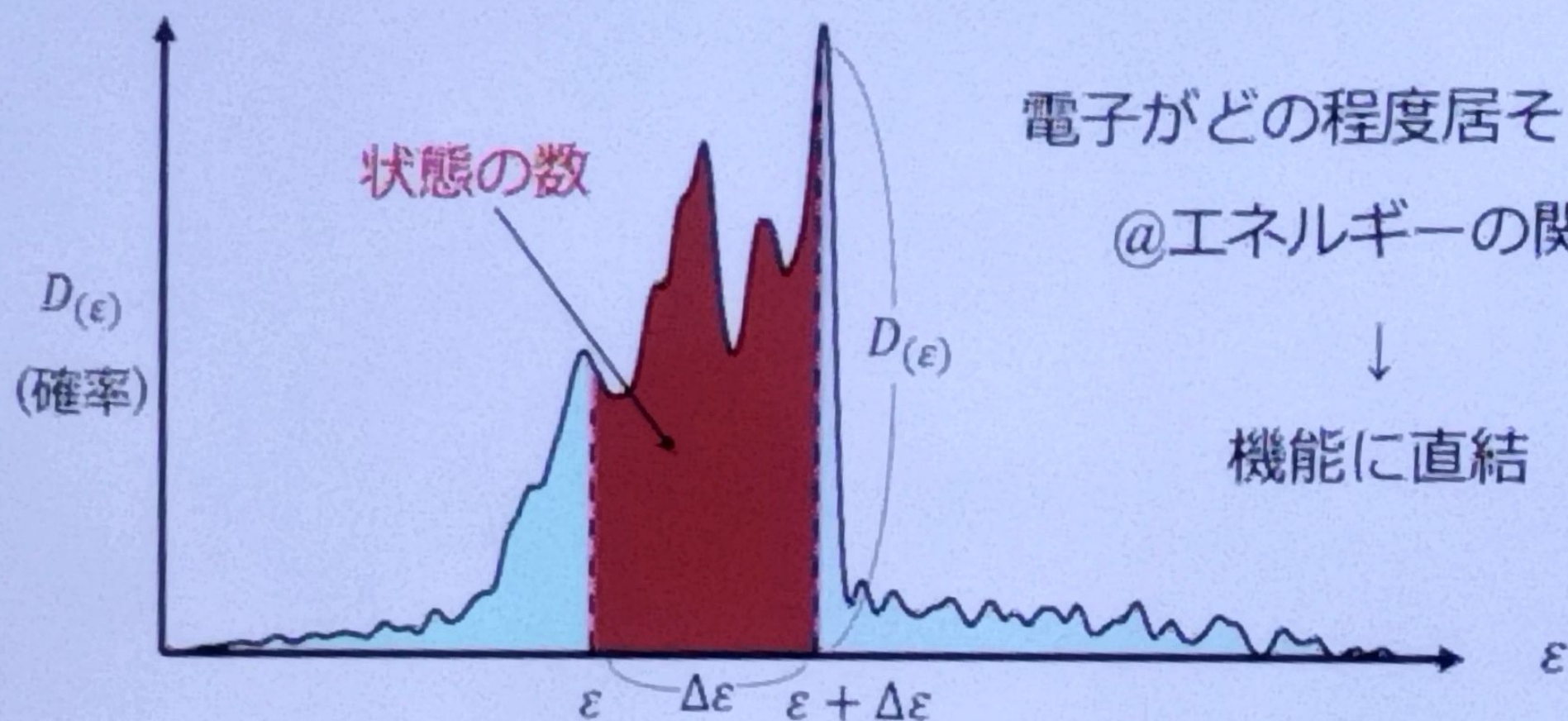


電子状態, どう表現?

確率を使う

“状態密度”で記述 (Density of states)  $= D(\epsilon)$

[定義]  $\epsilon \sim \epsilon + \Delta\epsilon$ 間の状態の数  $= D(\epsilon) \cdot \Delta\epsilon$



電子がどの程度居そうか?

@エネルギーの関数

機能に直結



状態の数・・・ $k$ に対して等間隔 (離散的)

- ・一次元 $(\frac{2\pi}{L})$ 毎に1コ
- ・三次元 $(\frac{2\pi}{L})^3$ 毎に1コ

(スピンを含めると2倍)

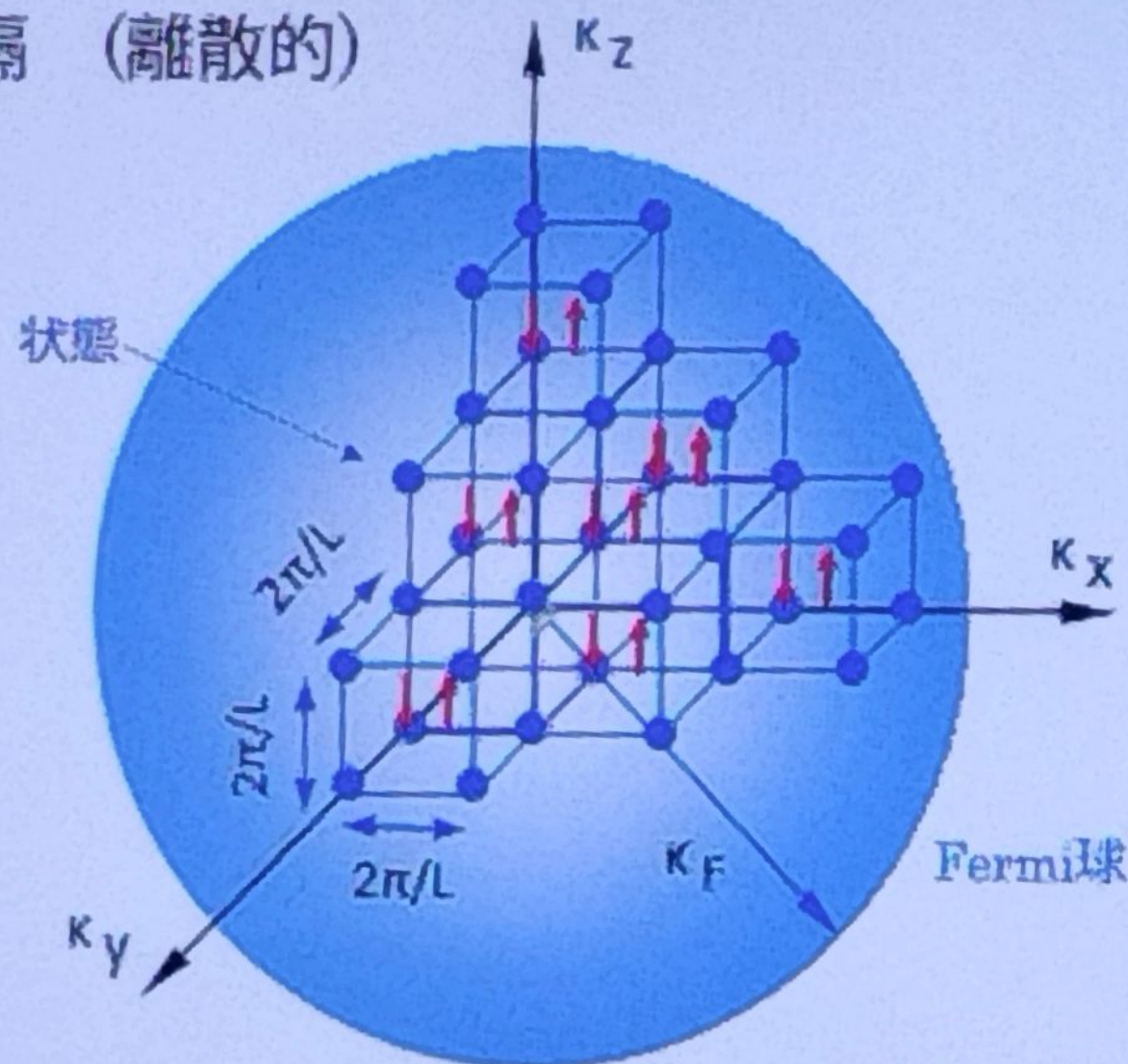
半径 $k$ の球内の状態の数 $N$

$$N = \frac{4}{3}\pi k^3 \underbrace{\left(\frac{L}{2\pi}\right)^3}_{\text{球の体積}} \cdot \underbrace{2}_{\text{状態数 スピン}}$$

↓ エネルギー $\varepsilon$ の関数に変換

$$= \frac{L^3}{3\pi^2} \left( \frac{2m\varepsilon}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

$$\because \varepsilon = \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{2\pi}{L} \right)^2 (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)$$





状態の数

$$N = \frac{L^3}{3\pi^2} \left( \frac{2m\varepsilon}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$



Nをεで微分

状態密度

$$D(\varepsilon) = \frac{dN}{d\varepsilon} = \frac{V}{2\pi^2} \left( \frac{2m}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \varepsilon^{\frac{1}{2}}$$

$$D(\varepsilon) \propto \sqrt{\varepsilon} \quad \text{"parabolic curve"}$$

また電子はFermionなので

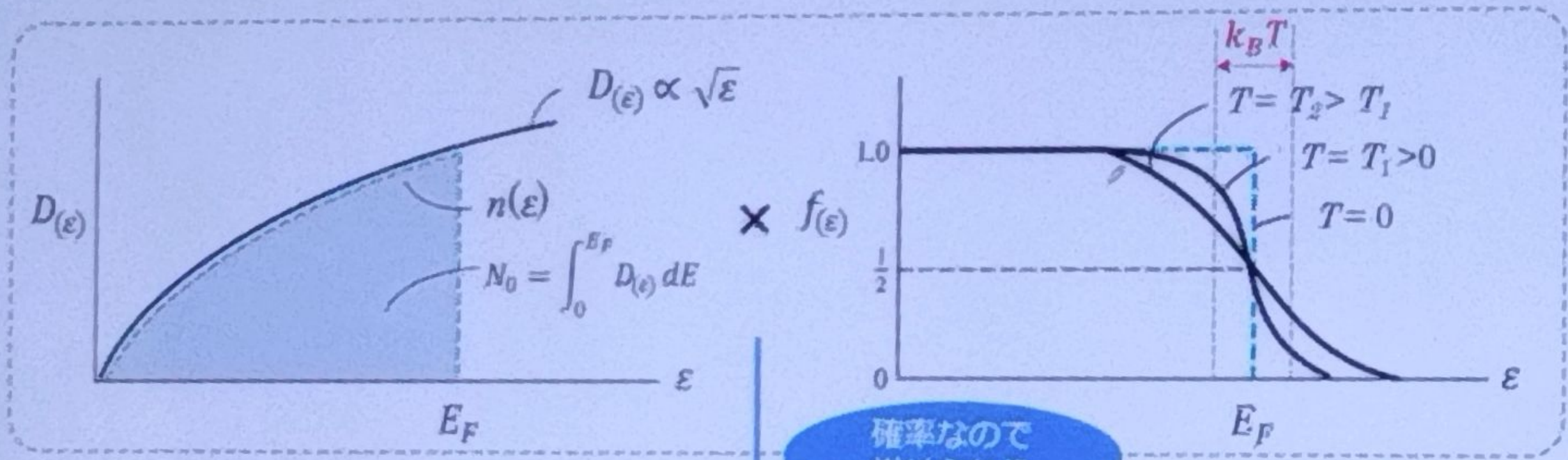
$$f(\varepsilon) = \frac{1}{e^{\frac{(\varepsilon - \varepsilon_F)}{k_B T}} + 1}$$

フェルミ・ディラック分布関数に従う

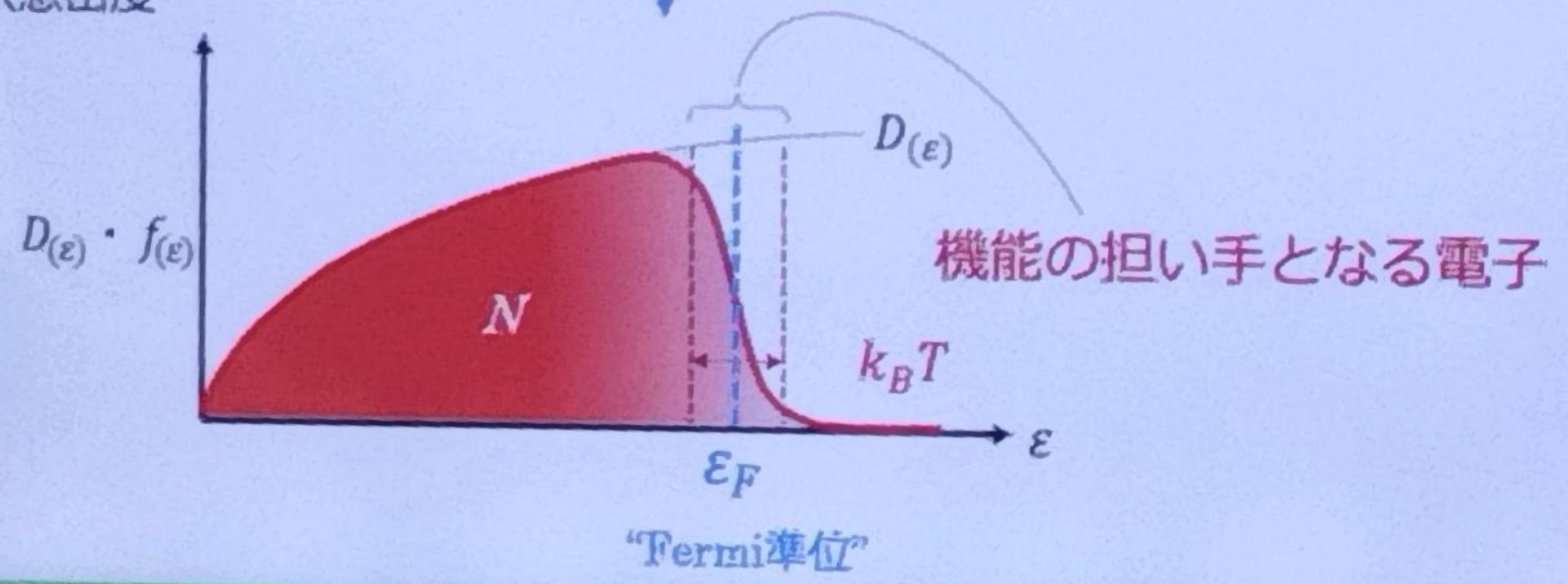


$$D(\epsilon) \propto \sqrt{\epsilon}$$

$$f(\epsilon) = \frac{1}{e^{(\epsilon - \epsilon_F)/k_B T} + 1}$$



金属の状態密度



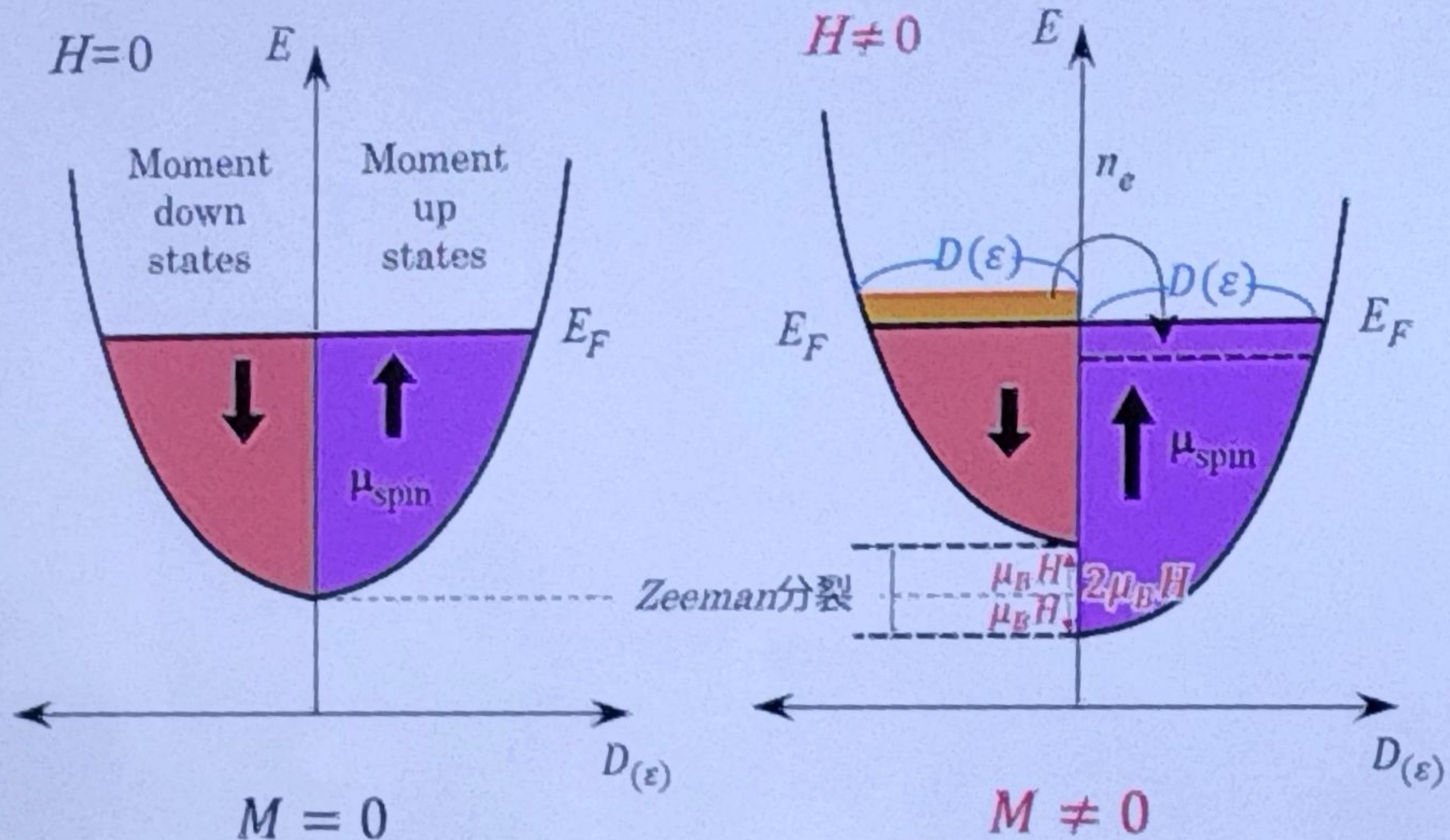


※ 電子間相互作用を無視

## パウリの常磁性 (磁化とエネルギーバンド)

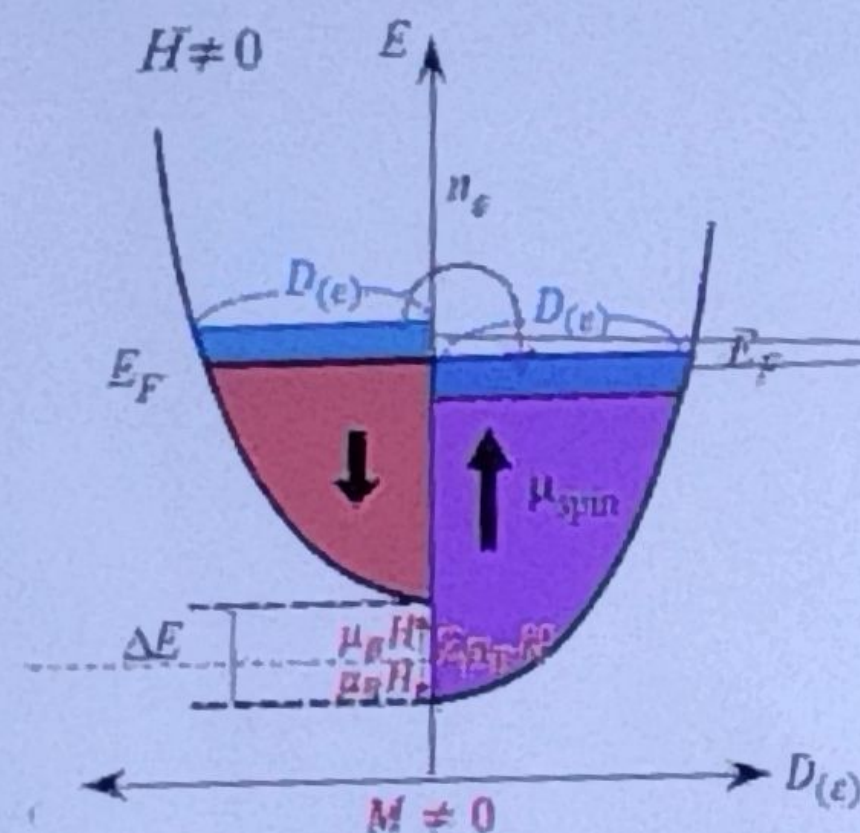
遍歴電子 ▶ バンドを形成 ▶  $+$  と  $-$  で各々のバンドを持つ

(↑) (↓)

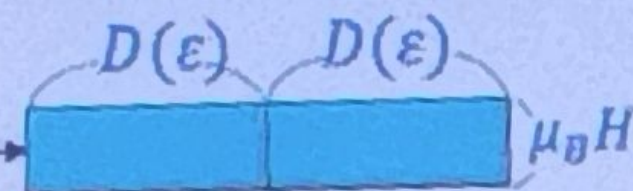


磁気モーメントの発現！





磁気モーメント  $\propto$  状態密度の差  
(青色部分の面積)



ボーア磁子をかけて  
電子数  $\rightarrow$  磁気モーメントに

$$M \approx 2D(\epsilon_F) \cdot \mu_B H \cdot \mu_B$$

$$= 2\mu_B^2 H \cdot D(\epsilon_F)$$

Fermi準位近傍の電子が  
磁気モーメント=機能を  
決めている！

これより帯磁率

$$\chi = 2\mu_B^2 \cdot D(\epsilon_F)$$

Fermi準位の状態密度に比例！



## 課題

- ① 金属の磁気モーメントの起源を電子状態の観点から説明せよ。
- ② 金属磁性材料の具体例を挙げて、  
磁気モーメントの値と電子状態を関連付けて説明せよ。  
( $\mu_B$ 単位だと議論がしやすい)