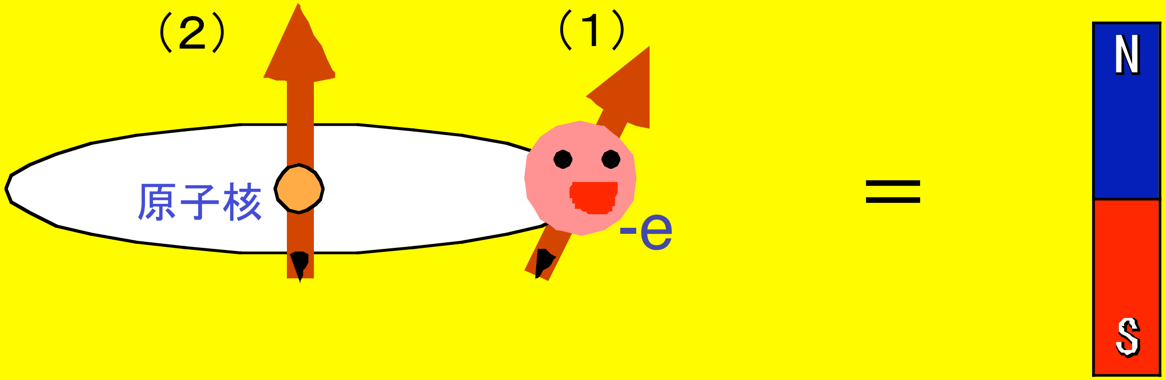
第12回　磁性

磁性とは、物質の磁気的性質のこと

磁性の起源（電子編）



原子核の周りを回る電子は、2つの磁石的性質をもつ

（1）自転しているために作られる磁石
＝＞電子スピン

（2）原子核の周りを回るために作られる磁石
＝＞軌道モーメント

＝＞多くの場合、電子磁石が系の磁性を決める
cf.　核磁性

12.1　磁性の基礎

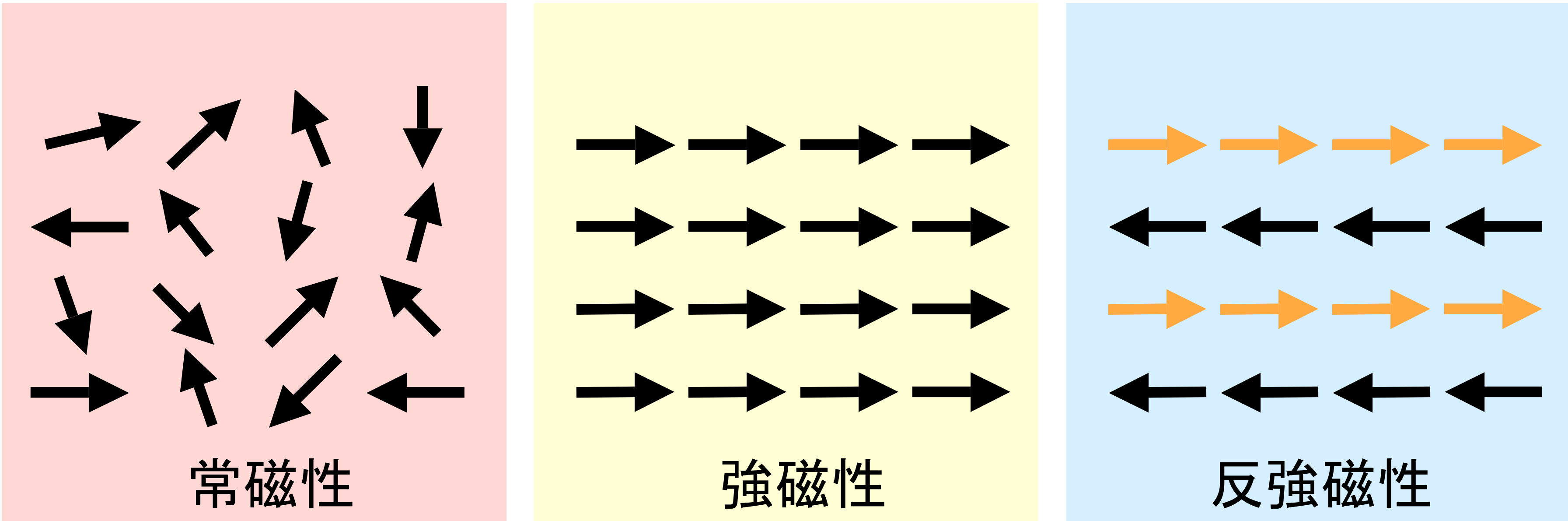
局在電子系　vs.　金属電子系

電子が止まっている系　　　　電子が動いている系

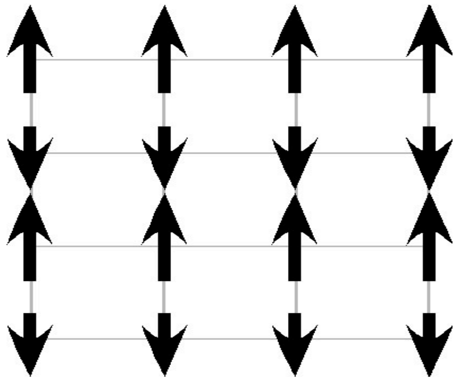
電子スピン＋軌道モーメント　　　　電子スピン

いろいろな磁気秩序状態

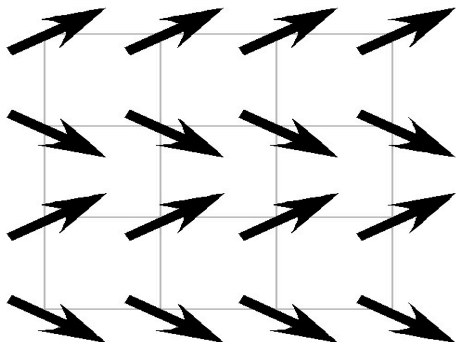
代表的な磁気秩序



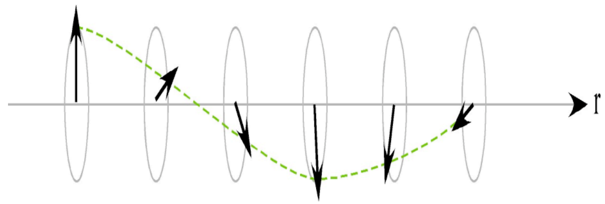
その他



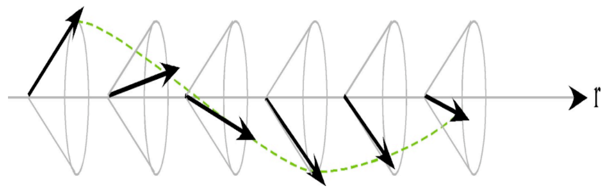
フェリ磁性



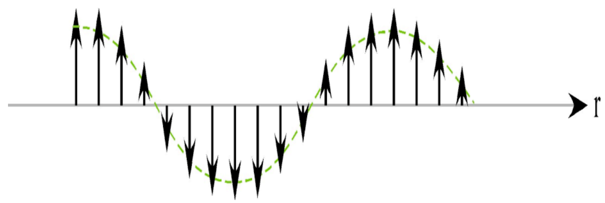
キャント強磁性
＝キャント反強磁性



らせん構造



コーン構造



正弦波構造

これらの磁性を司る代表的な相互作用。

A:　双極子相互作用　：電磁気的相互作用

B:（直接）交換相互作用　：Fe-Fe

C:　超交換相互作用　：Fe-O-Fe　（電子が伝搬しない）

D:　2重交換相互作用　：Mn^{3+}-O-Mn^{4+}

伝導電子がスピンを揃えながら（強磁性）伝搬する

E:　RKKY相互作用　：伝導電子が作る場を局在電子が感じて作られる

F:　DM相互作用　：ベクトル積の大きさが$DS_1S_2\sin\theta$なので、

スピンの角度が$\pi/2$の時最大。

⇒　スピンを互いに垂直に向けようとする。

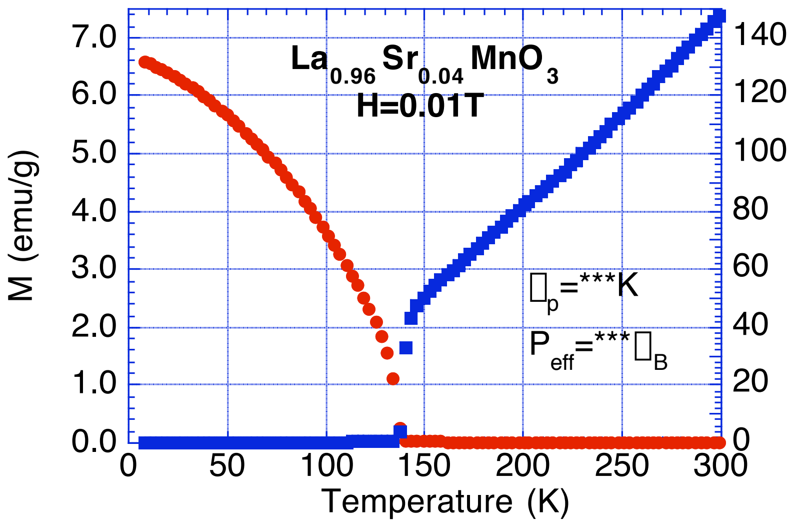
⇒　αFe_2O_3の弱強磁性の原因

12.2 磁性・磁気構造等の測定手段

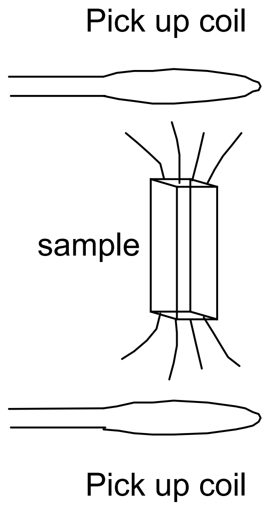
磁化測定・中性子回折・NMR・μSR・比熱・・・・・etc.

A: 磁化測定：マクロな測定の代表選手。

物質の持つ磁化の磁場に対する応答（磁化率）を測定する。



図：磁化測定例。
キュリー温度を求める

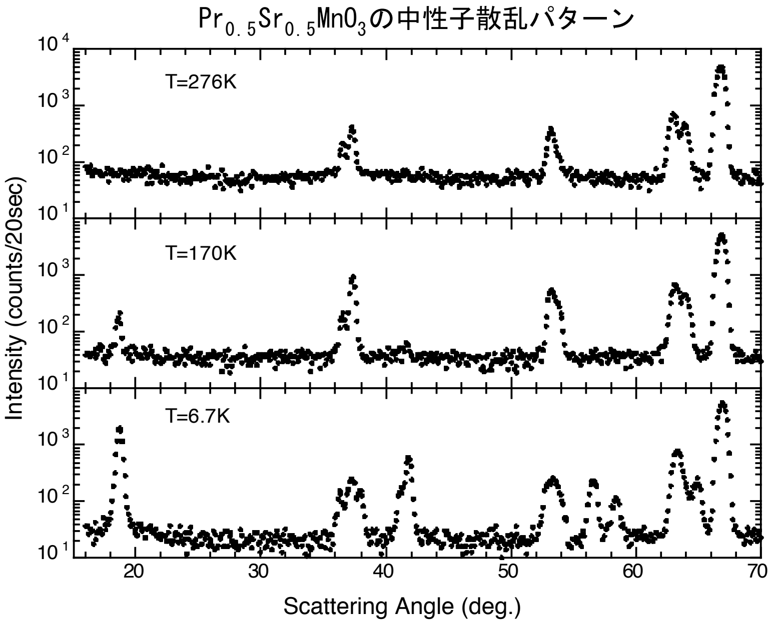


１０１号室のSQUIDとその原理

B:　中性子回折：ミクロな測定の代表選手

中性子はスピン1/2で、電荷ゼロの粒子＆波

物質の持つ磁性により散乱される。（“磁気散乱”）



反強磁性散乱例

測定装置　４G　原研JRR-3M

12.3 局在電子系の磁性

キュリーの法則（常磁性状態）VS. キュリーワイスの法則

(強磁性体)

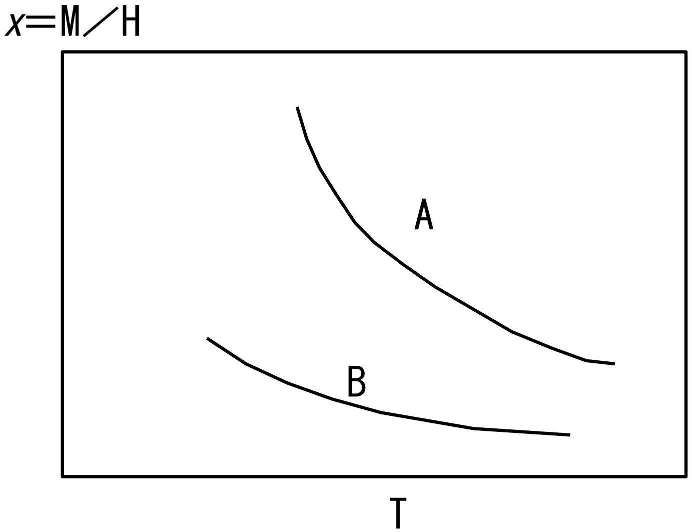
$$x = \frac{M}{H} = \frac{C}{T + T_C}$$

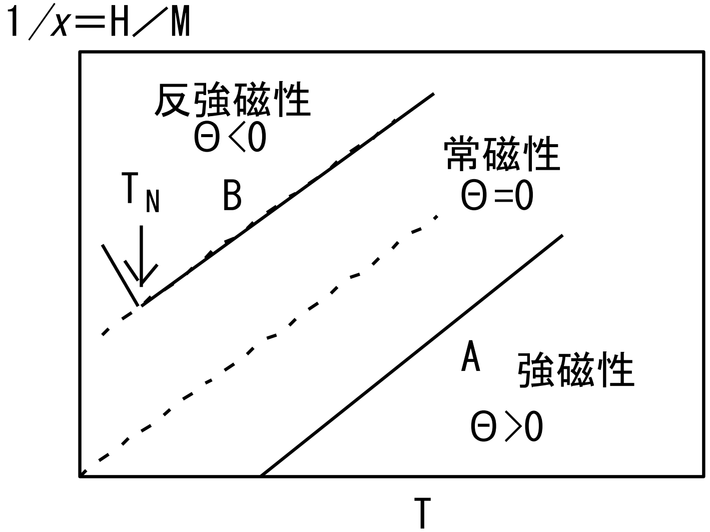
(反強磁性体)

$$x = \frac{M}{H} = \frac{C}{T + T_N}$$

M：磁化　χ：磁化率

通常、磁化測定でT_N, T_Cを求め、転移温度と秩序状態の予測を行う。





12.4 金属の常磁性（パウリ常磁性）

一定の秩序を持たずに揺らいでいる状態

・電子はスピンを持っている。

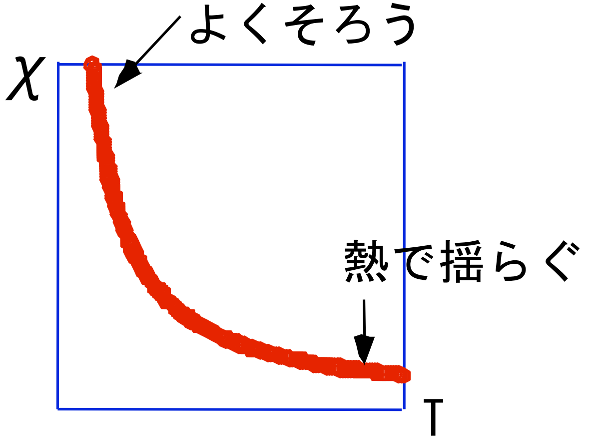
1個あたり、 1μ_Bの磁気モーメント

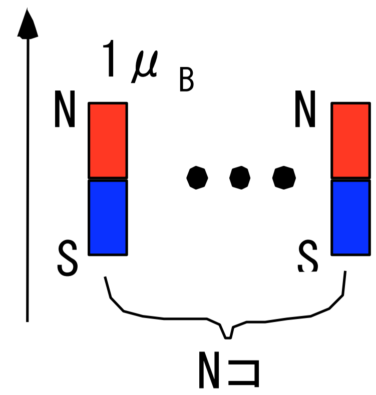
・古典的な独立した磁気モーメントの示す磁化率χ

χ ：外部磁場 H に対する、磁化Mの変化率

$$\chi = \frac{dM}{dH} = \frac{N\mu_B^2}{k_B T} \propto \frac{1}{T}$$

(キュリーの法則)





しかし、実際の金属の磁化率は、ほとんどTに依らず一定

⇒ 解決しましょう。　パウリ常磁性

・自由電子模型での磁化率

磁気モーメント M の磁石に磁場 H をかけるとエネルギーが MHだけ下がる。

$\Rightarrow$ ↑ と ↓ の電子のエネルギーが MH だけ下がる。

$$\varepsilon_k = \frac{\hbar^2}{2m}|\mathbf{k}^2|$$

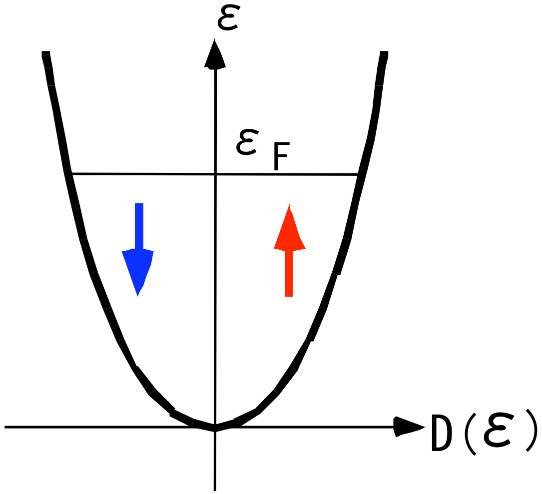
$$\varepsilon_{k\uparrow} = \frac{\hbar^2}{2m}|\mathbf{k}|^2 - \mu_B H$$

$$\varepsilon_{k\downarrow} = \frac{\hbar^2}{2m}|\mathbf{k}|^2 + \mu_B H$$

運動エネルギー　ゼーマンエネルギー

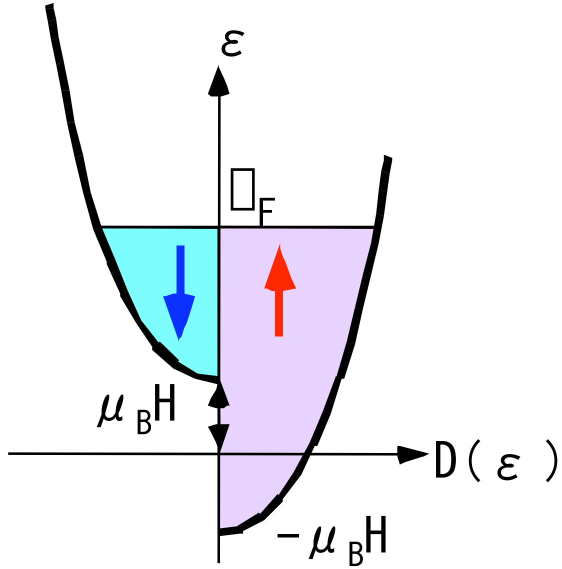
$\Rightarrow$ 同じ波数 **k** を持った電子に、エネルギー差がでてくる。

これを状態密度で書くと、



$H = 0$ のときは

↑ と ↓ が同数だけ詰まる。



$H \neq 0$ のとき

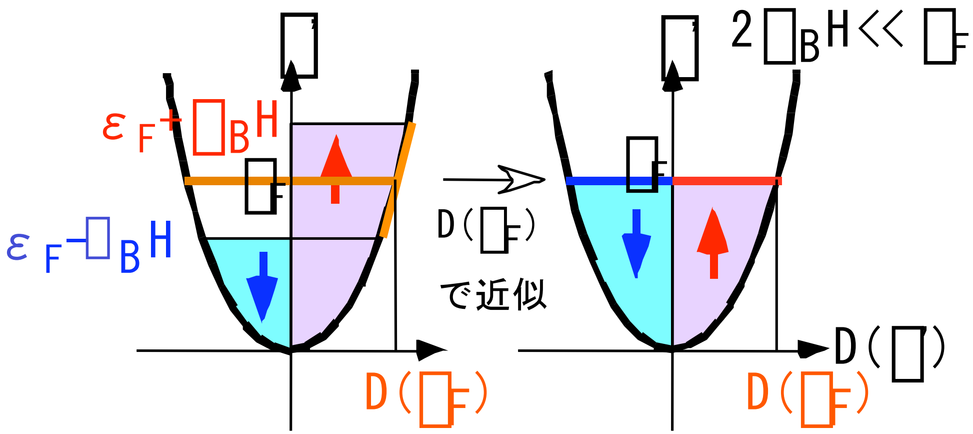
ε_F まで電子を下から詰めると

$$N_\uparrow = \int d\varepsilon \frac{1}{2} D(\varepsilon + \mu_B H) f(\varepsilon) = \int d\varepsilon \frac{1}{2} D(\varepsilon) f(\varepsilon - \mu_B H)$$

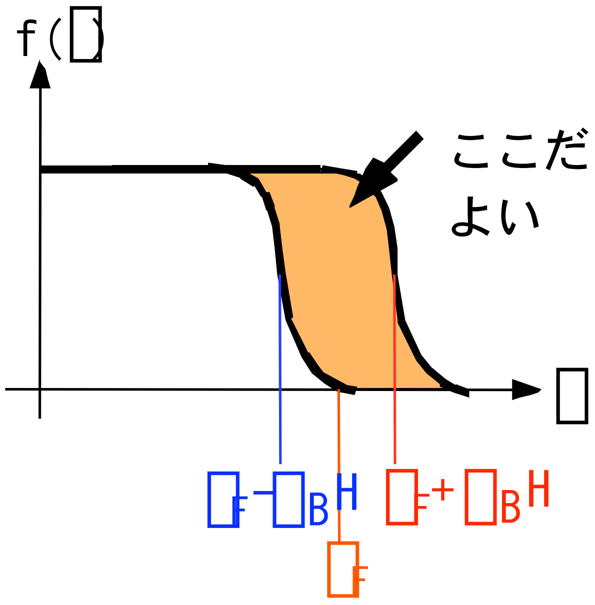
$$N_\downarrow = \int d\varepsilon \frac{1}{2} D(\varepsilon - \mu_B H) f(\varepsilon) = \int d\varepsilon \frac{1}{2} D(\varepsilon) f(\varepsilon + \mu_B H)$$

N↑ ＞ N↓となる。

磁化　$M = \mu_B (N_\uparrow - N_\downarrow)$



$$M = \frac{1}{2}\int d\varepsilon\, D(\varepsilon)\{f(\varepsilon - \mu_B H) - f(\varepsilon + \mu_B H)\}$$



仮に、<u>Hは小さいとする。</u>

$$H << \varepsilon_F$$

•$D(\varepsilon) = D(\varepsilon_F)$

•$f(\varepsilon - \mu_B H) - f(\varepsilon + \mu_B H) = -2\frac{df(\varepsilon)}{d\varepsilon}\mu_B H$

テイラー展開

$$M = \frac{1}{2}\mu_B D(\varepsilon_F)\int d\varepsilon\left(-2\frac{df(\varepsilon)}{d\varepsilon}\mu_B H\right)$$

$$= -\mu_B^2 D(\varepsilon_F) H\int df(\varepsilon)$$

$$= -\mu_B^2 D(\varepsilon_F) H\left[f(\varepsilon)\right]_0^\infty \qquad \Longleftarrow \quad f(\infty) - f(0) = 0 - 1$$

$$= \mu_B^2 D(\varepsilon_F) H$$

∴磁化率 $\chi = \dfrac{dM}{dH} = \underbrace{\mu_B^2}_{\text{定数}} \underbrace{D(\varepsilon_F)}_{\text{我々の世界では一定とみなせる。}} = const$

∴金属電子のχは、温度Tに依らず一定

χは、状態密度$D(\varepsilon_F)$に比例する。

パウリ常磁性