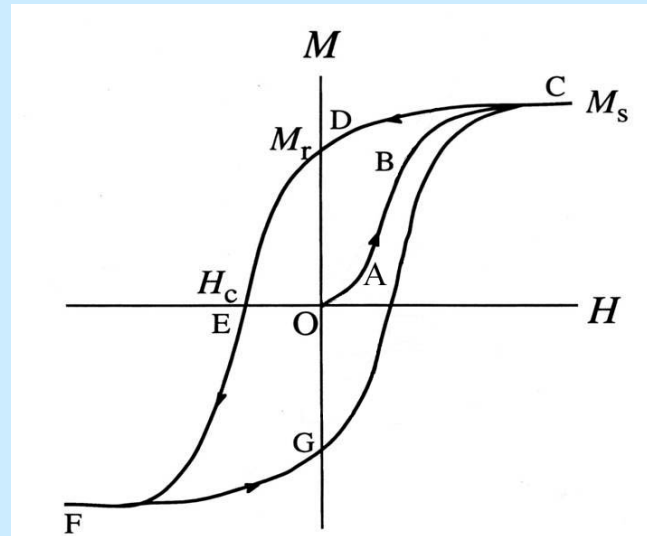


# 物理システム工学科3年次

## 物性工学概論

第火曜1限0031教室

第12回スピネレクトロニクスと材料[1] 磁性に親しむ



副学長(教育担当)

佐藤勝昭

## 復習コーナー

# 第11回で学んだこと

- 有機物は炭素を含む化合物である。
- 有機物にはモノマーとポリマーがある
- 有機物の機能はエレクトロニクスに活かされている
- 有機物を用いたディスプレイとして、液晶ディスプレイ(LCD)と有機EL(OLED)がある。
- LCDは電界による液晶分子の配向が偏光の伝搬に影響を与えることにより表示する
- OLEDは色素層が電子供給層と電子受容層でサンドイッチされ、色素層で電子と正孔が再結合し発光する

# 第11回の問題

## 液晶ディスプレイの原理を述べよ。

- 偏光板/ガラス/透明電極/液晶/透明電極/ガラス/偏光板の構成で、裏表の偏光板の偏光方向を直交しておく。液晶分子の配向は、ガラス面に平行で入射側と出射側で90度ねじれている。
- 対抗する透明電極間に電圧を加えないと、入射偏光は分子の回転に応じて90度回転するので、出射側の偏光板を透過するので白い。
- 電圧を加えると、液晶分子はガラス面に垂直に配向し、入射偏光は回転することなく出射側に到達するので直交した偏光板を透過できず、黒くなる。
- このように、液晶は電界により光をスイッチできる。

## 第11回の問題

液晶ディスプレイの特定の画素を表示するための選択はどのように行われているのか。

- 直交するストライプ状の透明電極の交点の画素を選択するとTFT(薄膜トランジスタ)がonとなり、選択された部分の液晶にのみ電界が加わることで特定画素の表示が行われる。
- このような方式をアクティブマトリックス方式という。

# 第12回に学ぶこと

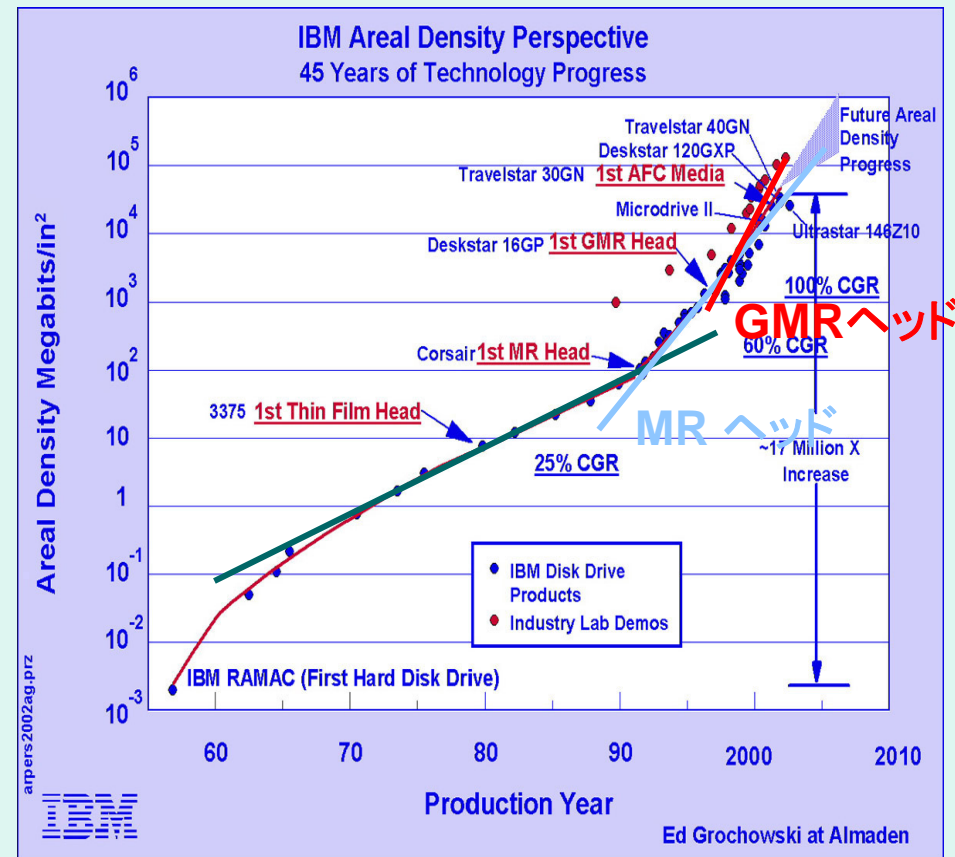
- 磁性に親しもう
  - イントロ
  - 磁性体を特徴づけるもの: 磁気ヒステリシス
  - 磁性体は何に 응용されているか
  - 永久磁石
  - 磁石になる元素たち
- [参考]磁気モーメントと磁化
- [参考: 13回の予告]磁性の起源

# 磁性に親しもう

- イントロ
- 磁性体を特徴づけるもの
- 磁性体は何に 응용されているか
- 永久磁石
- 磁石になる元素たち

# 磁性に親しもう イントロ

- 磁性といえばハードディスク
  - PC,カーナビ,ビデオカメラ,据置型ビデオレコーダ,i-Pod,携帯,薄型TV...
- ハードディスクの高密度・大容量化の速度はめざましい。
- ‘60年から’90年にかけて10年10倍だった高密度化の速度が90年から00年にかけて10年100倍に加速。ここに物理学が生きている。
- 03年以降、高密度化は減速している。なぜか？どうやって解決する？ここにも物理が！









磁性に親しもう

## 磁性体を特徴づけるもの

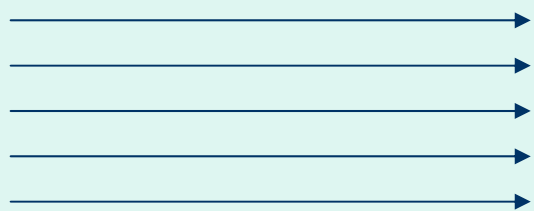
- 磁性体のうち、外から磁界を加えなくても、磁化（磁気分極）をもつものを、強磁性体という。
- 強磁性体を特徴づけるのは、
  - (1) 磁気ヒステリシス
  - (2) 磁気相転移である。



[参考]

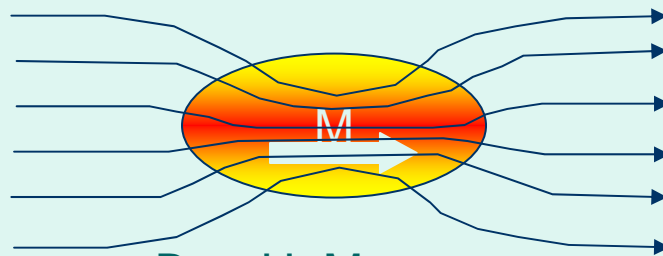
## 磁界(磁場) $H$ 、磁束密度 $B$ 、磁化 $M$

- 磁界 $H$ 中に置かれた磁化 $M$ の磁性体が磁束密度は、真空中の磁束密度に磁化による磁束密度を加えたものである。すなわち、 $B = \mu_0 H + M$



$$B = \mu_0 H$$

真空中での磁束密度



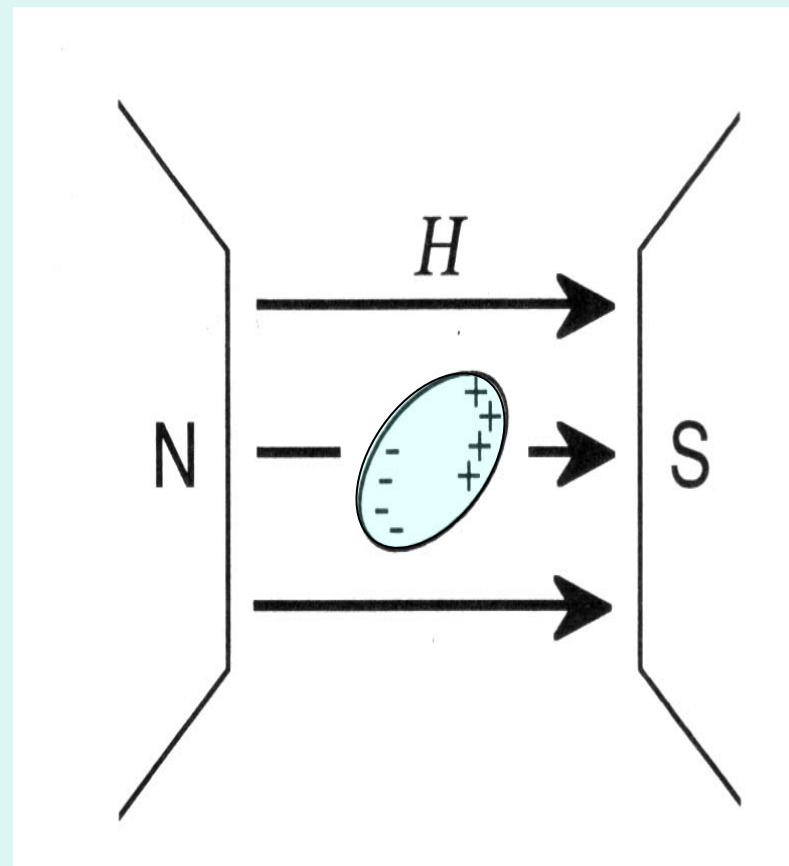
$$B = \mu_0 H + M$$

磁性体があると磁束密度が高くなる。

[参考]

## 磁化(磁気分極)

- 磁性体に磁界を加えたとき、その表面には磁極が生じる。<sup>(a)</sup>
- この磁性体は一時的に磁石のようになるが、そのとき磁性体が磁化されたという。

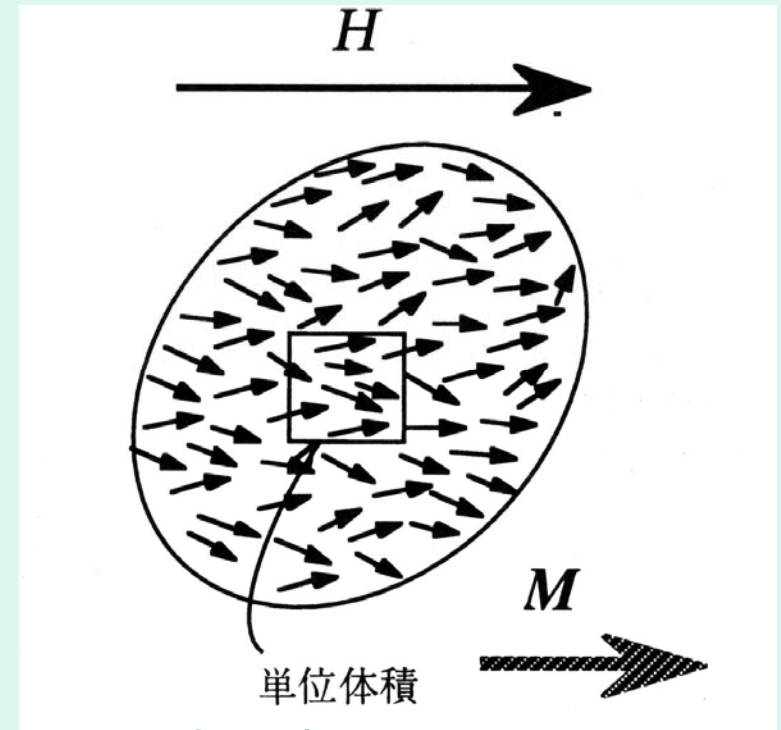


(高梨:初等磁気工学講座)より

## [参考]

# 磁化の定義

- ミクロの磁気モーメントの単位体積あたりの総和を磁化という。
- $K$ 番目の原子の1原子あたりの磁気モーメントを $\mu_k$ とすると、磁化 $M$ は式 $M = \sum \mu_k$ で定義される。
- 磁気モーメントの単位は $\text{Wb}\cdot\text{m}$ であるから磁化の単位は $\text{Wb}/\text{m}^2$ となる。



(高梨:初等磁気工学講座)より

## [参考]

# 磁化曲線

- 磁性体を磁界中に置き、磁界を増加していくと、磁性体の磁化は増加していき、次第に飽和する。
- 磁化曲線は磁力計を使って測定する。



### VSM: 試料振動型磁力計

試料を0.1～0.2mm程度のわずかな振幅で80Hz程度の低周波で振動させ、試料の磁化による磁束の時間変化を、電磁石の磁極付近に置かれたサーチコイルに誘起された誘導起電力として検出する。誘導起電力は試料の磁化に比例するので、磁化を測定することができる。

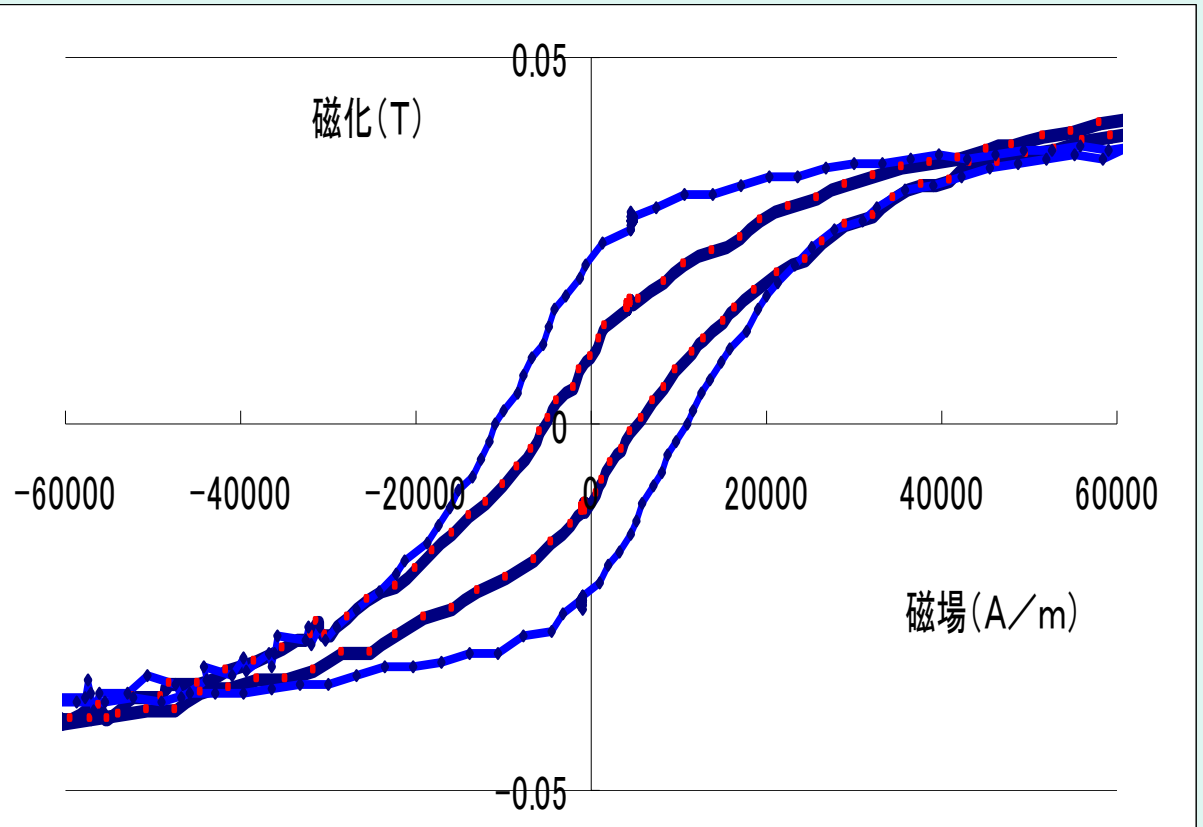
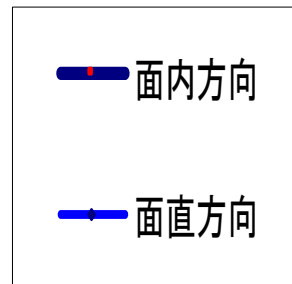
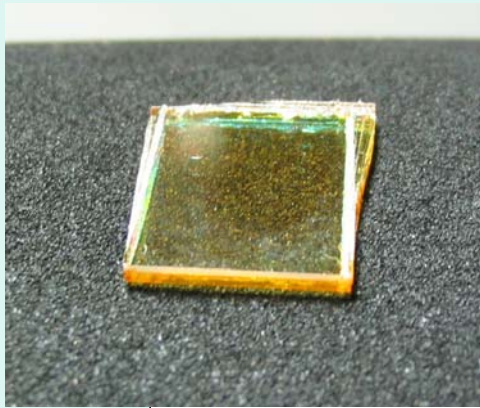
スピーカーと同じ振動機構

磁極付近に置いたサーチコイル

電磁石

[参考: 物理システム工学実験III・IV]

# $Y_2BiFe_4GaO_{12}$ の磁気ヒステリシス

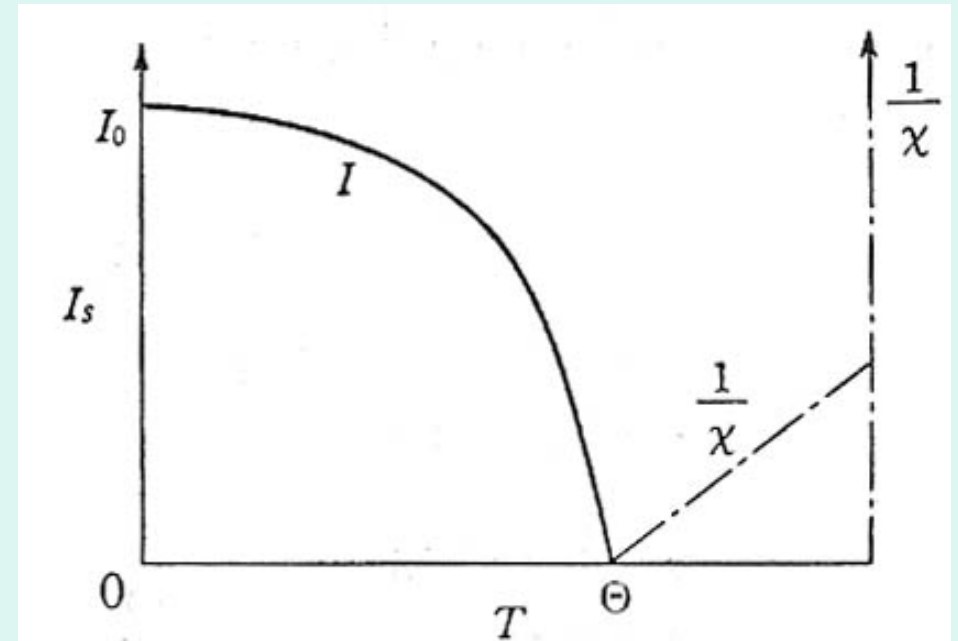




# 磁性体を特徴づけるもの(2)

## 自発磁化の温度変化と磁気相転移

- 強磁性体の自発磁化の大きさは温度上昇とともに減少し、キュリー温度  $T_c$  において消滅する。
- $T_c$  以上では常磁性である。常磁性磁化率の逆数は温度に比例し、ゼロに外挿するとキュリー温度が求まる。



4-3 図 自発磁化の温度変化と Curie 点以上の磁化率

[参考]

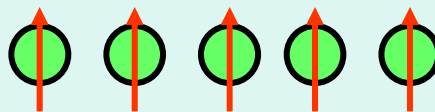
## キュリー温度とネール温度

- 原子磁気モーメントが整列している状態には、強磁性と反強磁性がある
- 温度が高くなると整列させる力に熱的にランダムにしようとする力が勝って常磁性になる
- 強磁性 $\Leftrightarrow$ 常磁性の転移温度をキュリー温度  
反強磁性 $\Leftrightarrow$ 常磁性の転移温度をネール温度  
という。

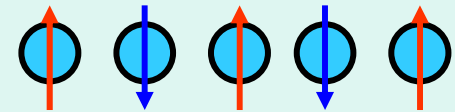
常磁性



強磁性



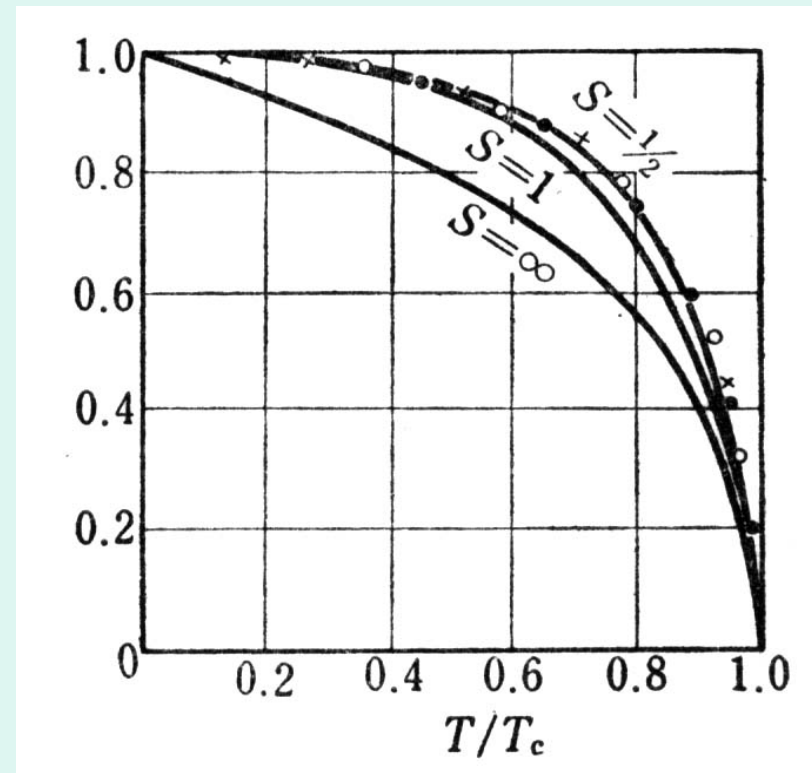
反強磁性



[参考]

## 自発磁化の温度変化

- さまざまなJについて、分子場理論で交点の $M/M_0$ を $T$ に対してプロットすると磁化の温度変化を求めることができる。

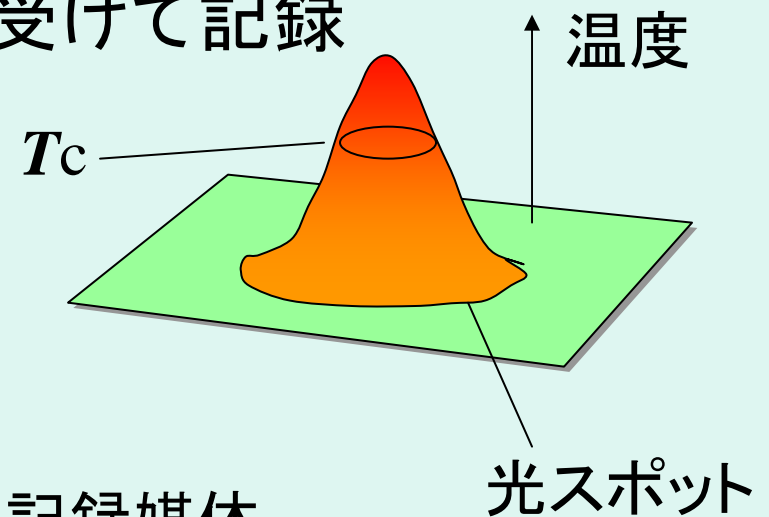
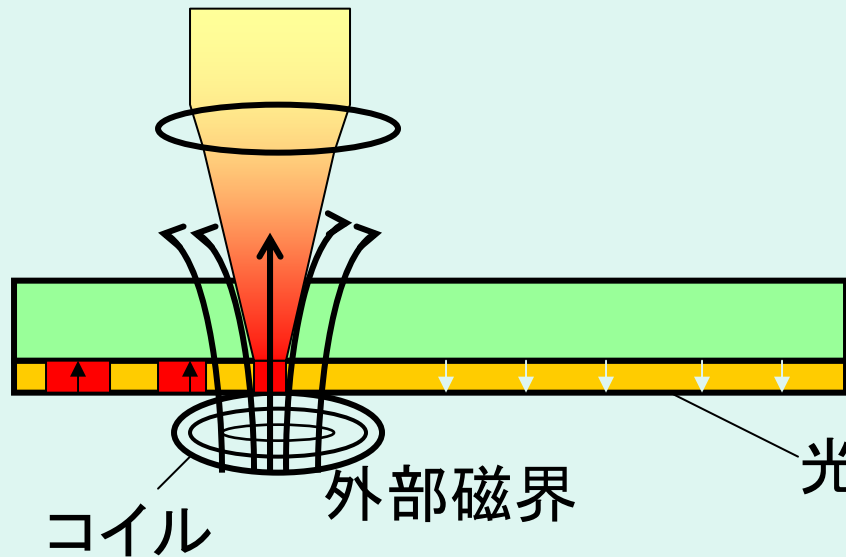
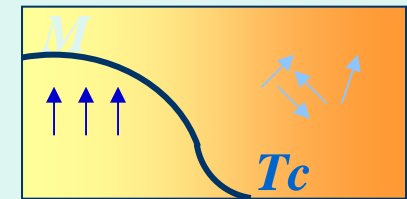


×は鉄、●はニッケル、○はコバルトの実測値、実線はJとしてスピン $S=1/2, 1, \infty$ をとったときの計算値

[参考]

# 光磁気記録 情報の記録

- レーザ光をレンズで集め磁性体を加熱
- キュリー温度以上になると磁化を消失
- 冷却時にコイルからの磁界を受けて記録



光磁気記録媒体

コイル

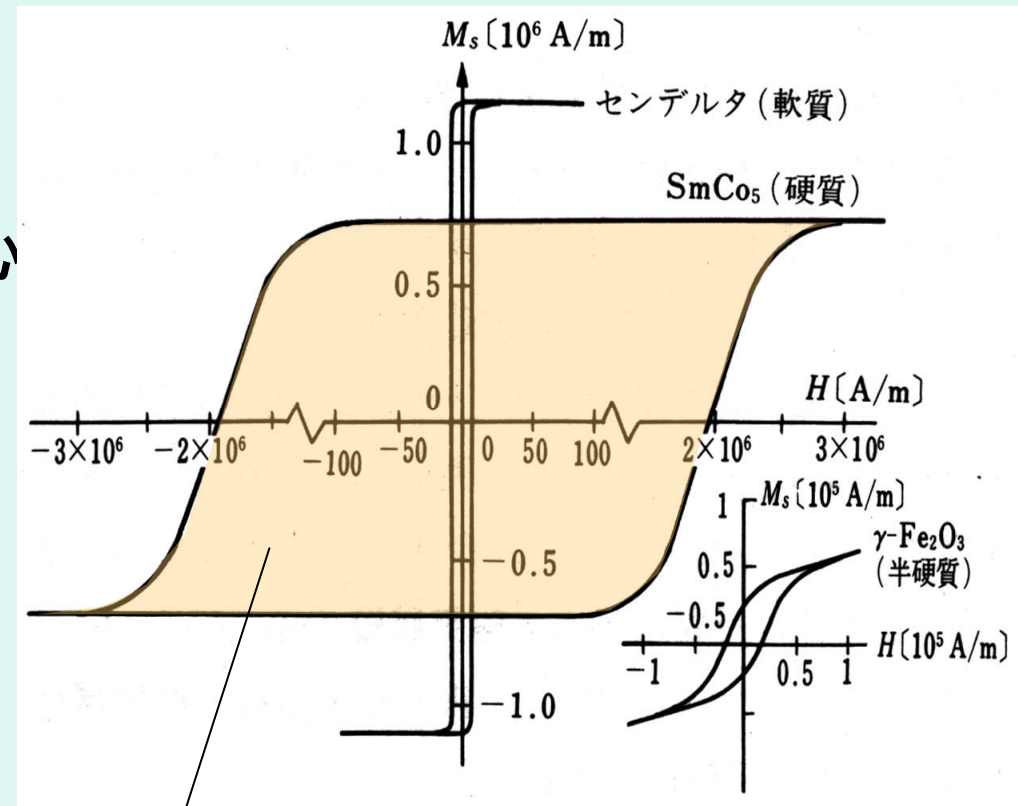
外部磁界

光スポット

# 磁性に親しもう

## 磁気ヒステリシスと応用

- 保磁力のちがいで用途が違ふ
- $H_C$ 小: 軟質磁性体
  - 磁気ヘッド、変圧器鉄心  
磁気シールド
- $H_C$ 中: 半硬質磁性体
  - 磁気記録媒体
- $H_C$ 大: 硬質磁性体
  - 永久磁石

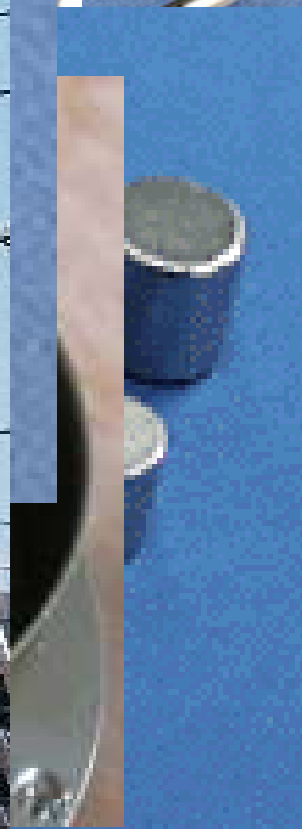
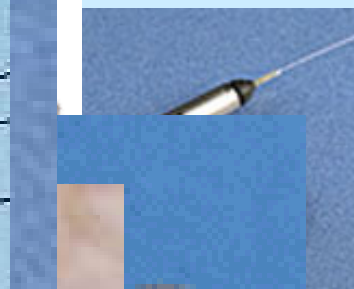
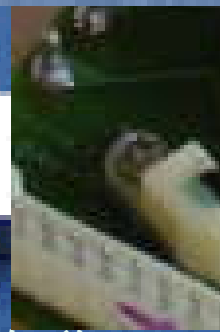


このループの面積が磁石に蓄積される磁気エネルギー  
高周波の場合はヒステリシス損失となる。

# 磁性体

ある？

- 磁気
- 半導



永久磁石のいろいろ

# 磁石(永久磁石)は何で出来ている？

- 鉄？
- いいえ。鉄だけの磁石はありません
  - アルニコ磁石 (AlNiCoFe)
  - フェライト磁石 ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  or  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ )
  - サマコバ磁石  $\text{SmCo}_5$
  - ネオジウム磁石  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$



# 永久磁石

## 磁石のいろいろ

### 磁石応用製品



フェライト磁石  
 $\text{BaFe}_2\text{O}_4$



ネオジウム磁石  
 $\text{NdFe}_2\text{B}_{14}$



サマコバ磁石  
 $\text{SmCo}_5$



アルニコ磁石  
 $\text{FeAlNiCo}$



ラバー磁石

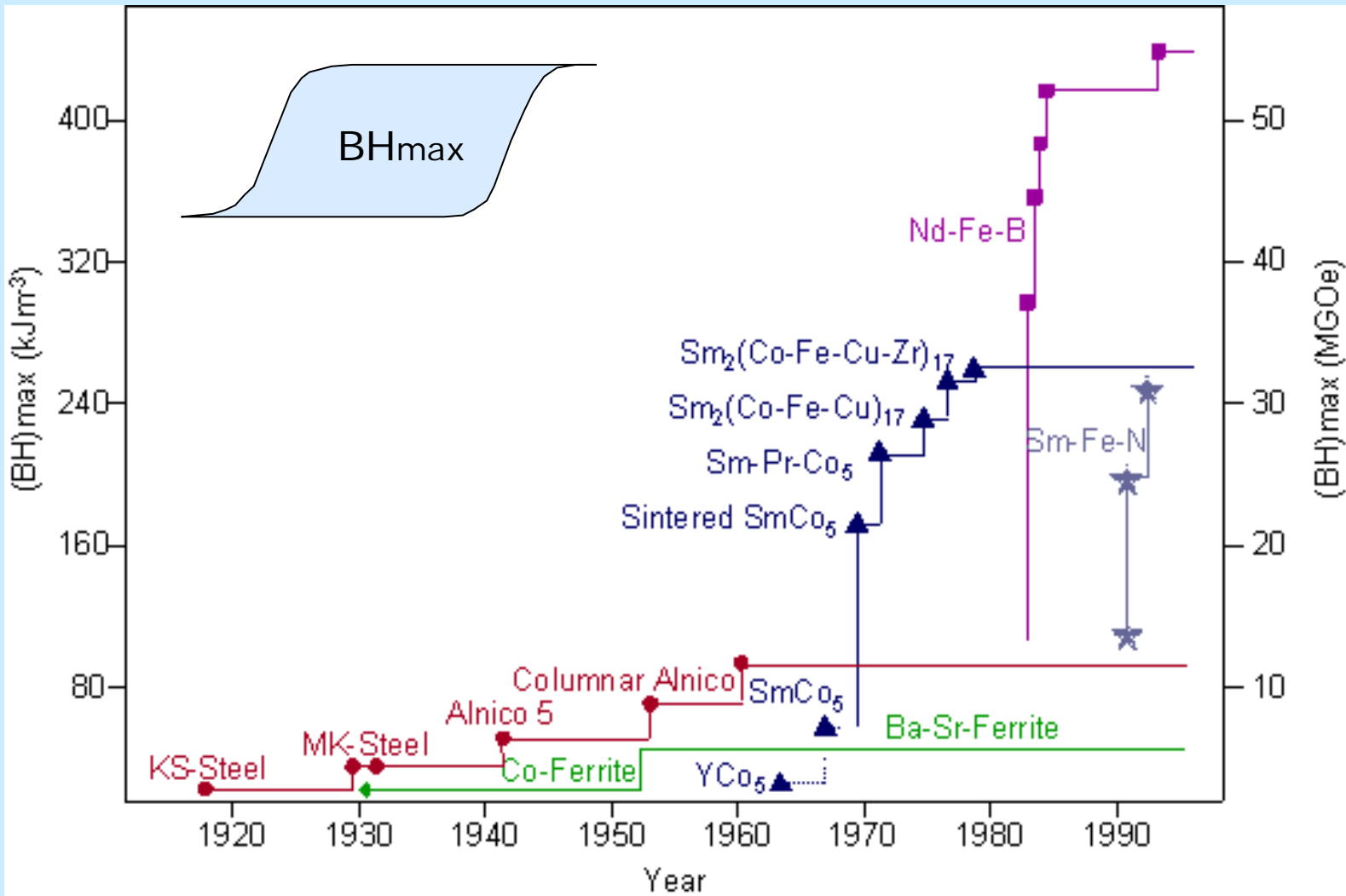


キャップ磁石



# 永久磁石の最大エネルギー積 $(BH)_{\max}$ の変遷

([http://www.aacg.bham.ac.uk/magnetic\\_materials/history.htm](http://www.aacg.bham.ac.uk/magnetic_materials/history.htm))



# どのような物質が磁性体になるのか

- 外部磁界をかけなくても物質が磁化をもっているならば、その磁化を**自発磁化**という。
- 自発磁化をもつ磁性体を広義の**強磁性体**というが、これには、狭義の強磁性体、フェリ磁性体等があるが、ほとんどの(広義の)強磁性体は、**3d遷移金属**および**4f希土類金属**の合金、あるいは、化合物である。

# 磁石をつくる元素たち

- 3d 遷移金属

- 室温で強磁性を示す金属元素: Fe, Co, Niのみ
- 合金や金属間化合物を作ると強磁性になる元素: Mn (MnAs, MnSb, MnBi, MnAl, MnGa, Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub>, PtMnBi等), Cr (CrO<sub>2</sub>, Cr<sub>3</sub>Te<sub>4</sub>, CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>)
- Feの酸化物はフェライトと総称され、フェリ磁性を示す (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, YFeO<sub>3</sub>, Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>)

- 4f希土類金属

- 室温で強磁性を示す希土類はない。
- Gd, Dyは低温で強磁性を示す

# 磁石になる元素たち

## 元素の周期表

Periodic Table of the Elements

3d遷移金属

1A																	0	
1	<b>H</b>	IIA																2
2	<b>Li</b>	<b>Be</b>										5	6	7	8	9	10	
3	<b>Na</b>	<b>Mg</b>	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII	IB	IB		13	14	15	16	17	18	
4	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Sc</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>Cr</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>	<b>Co</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ga</b>	<b>Ge</b>	<b>As</b>	<b>Se</b>	<b>Br</b>	<b>Kr</b>
5	<b>Rb</b>	<b>Sr</b>	<b>Y</b>	<b>Zr</b>	<b>Nb</b>	<b>Mo</b>	<b>Tc</b>	<b>Ru</b>	<b>Rh</b>	<b>Pd</b>	<b>Ag</b>	<b>Cd</b>	<b>In</b>	<b>Sn</b>	<b>Sb</b>	<b>Te</b>	<b>I</b>	<b>Xe</b>
6	<b>Cs</b>	<b>Ba</b>	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	<b>Fr</b>	<b>Ra</b>	+Ac	Rf	Ha	Sg	Ns	Hs	Mt	110	111	112	113					

\* Lanthanide Series

+ Actinide Series

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
<b>Ce</b>	<b>Pr</b>	<b>Nd</b>	<b>Pm</b>	<b>Sm</b>	<b>Eu</b>	<b>Gd</b>	<b>Tb</b>	<b>Dy</b>	<b>Ho</b>	<b>Er</b>	<b>Tm</b>	<b>Yb</b>	<b>Lu</b>
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
<b>Th</b>	<b>Pa</b>	<b>U</b>	<b>Np</b>	<b>Pu</b>	<b>Am</b>	<b>Cm</b>	<b>Bk</b>	<b>Cf</b>	<b>Es</b>	<b>Fm</b>	<b>Md</b>	<b>No</b>	<b>Lr</b>

希土類金属

# 磁石になる元素たち

## 3d遷移金属

- 3d遷移金属: Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni
- Arの閉殻( $1s^2 2p^6 3s^2 3p^6$ )+ $3d^n 4s^2$
- 3d軌道には5個の軌道があり、スピンまで入れて10個の状態がある。
- 遷移金属では3d軌道を部分的にしか満たさずに、4s軌道を占有する。(不完全内殻)
- このため、不対スピンの生じ原子磁気モーメントをもたらす。室温で強磁性を示すのは、Fe, Co, Niの3つのみ。

# 磁石になる元素たち

## 3d遷移金属の磁性

- Ti 常磁性
- V 常磁性
- Cr 反強磁性(スピン密度波)  $T_N=308\text{K}$
- Mn反強磁性(螺旋磁性)  $T_N=100\text{K}$  常磁性@RT
- Fe 強磁性  $m=2.219 \mu_B/\text{atom}$   $T_c=1043\text{K}$
- Co 強磁性  $m=1.715 \mu_B/\text{atom}$   $T_c=1388\text{K}$
- Ni 強磁性  $m=0.604 \mu_B/\text{atom}$   $T_c=631\text{K}$
- Cu 反磁性



# 磁石になる元素たち

## 希土類金属

- La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb
- 不完全4f殻を有している。
- 遷移金属と組み合わせると磁石材料になる
  - 例: SmCo, Nd<sub>2</sub>FeB<sub>14</sub>,
- 希土類遷移金属アモルファス合金はMO媒体材料
  - 例: TbFeCo, GdFeCoなど

# 磁石になる元素たち

## 希土類金属の磁性

- すべての4f希土類金属はGdを除き室温では常磁性

元素	キュリー温度	ネール温度	
Ce		12.5	反強磁性→常磁性
Pr		25	反強磁性→常磁性
Nd		19	反強磁性→常磁性
Sm		14.8	反強磁性→常磁性
Eu		90	反強磁性→常磁性
Gd	293		強磁性→常磁性
Tb	222	229	強磁性→反強磁性→常磁性
Dy	85	179	強磁性→反強磁性→常磁性
Ho	20	131	強磁性→反強磁性→常磁性
Er	20	84	強磁性→反強磁性→常磁性

強磁性の3d金属と合金化することによって、磁気モーメントが配向され、強い強磁性を示す。

NdFe<sub>2</sub>B<sub>14</sub>  
SmCo<sub>5</sub>

GdCo  
TbFe

# 第13回の予告

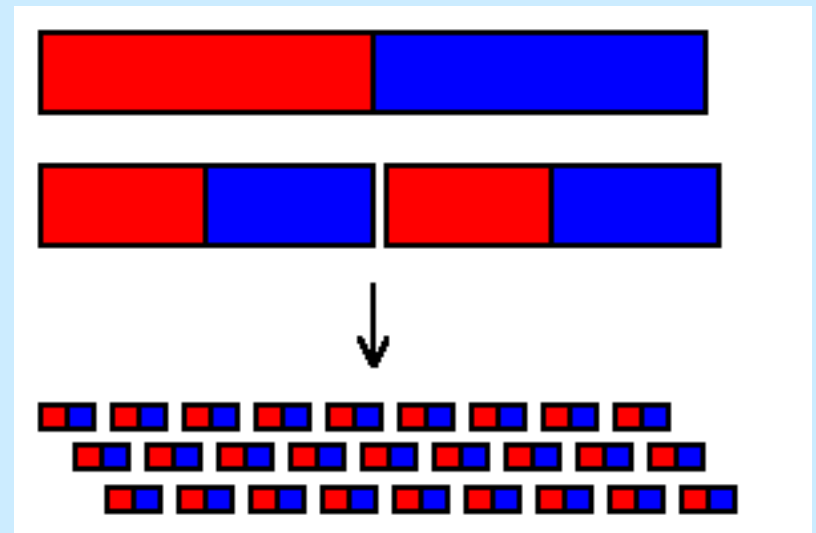
## 磁性の起源

- 磁石をどんどん小さくすると
- 磁極は必ずペアで現れる
- 究極のミニ磁石→原子磁気モーメント
- 磁気モーメントの起源：角運動量
  - 軌道角運動量
  - スピン角運動量
- 磁気をそろえ合う力

# 磁性の起源

## 磁石を切るとどうなる

- 磁石は分割しても小さな磁石ができるだけ。
- 両端に現れる磁極の大きさ(単位Wb/cm<sup>2</sup>)は小さくしても変わらない。
- N極のみ、S極のみを単独で取り出せない。



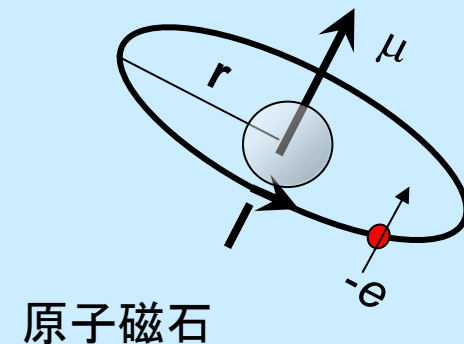
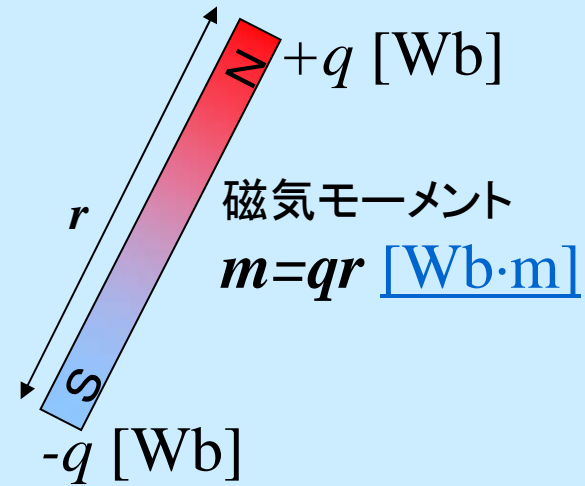
岡山大のHPより

(<http://www.magnet.okayama-u.ac.jp/magword/domain/>)

# 磁性の起源

## 究極の磁石：原子磁気モーメント

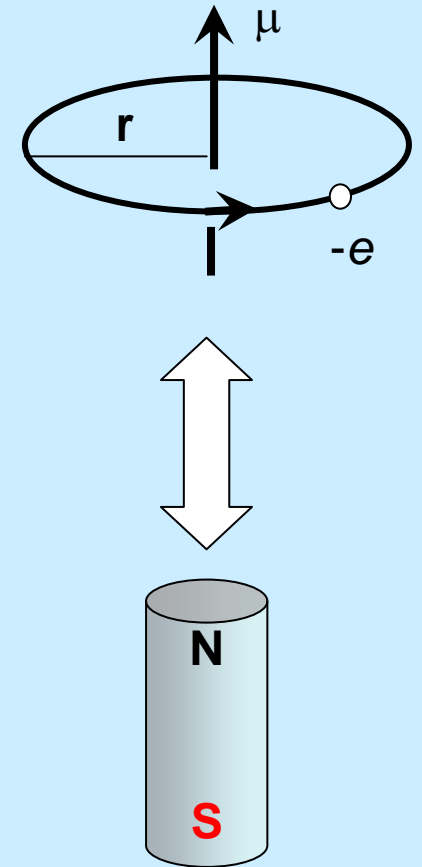
- さらにどんどん分割して  
原子のレベルに達しても  
磁極はペアで現れる
- この究極のペアにおける  
磁極の大きさと間隔の積  
を磁気モーメントとよぶ
- 原子においては、電子の  
軌道運動による電流と  
電子のスピンによって磁気  
モーメントが生じる。



# 磁性の起源

## 環状電流と磁気モーメント

- 電子の周回運動→環状電流  
- $e$ [C]の電荷が半径 $a$ [m]の円周上を  
線速度 $v$ [m/s]で周回  
→1周の時間は $2\pi a/v$ [s]  
→電流は $i=-ev/2\pi a$ [A]。
- 磁気モーメントは、電流値 $i$ に円の面積  
 $S=\pi a^2$ をかけることにより求められ、  
 $\mu=iS=-eav/2$ となる。
- 一方、角運動量は $\Gamma=maav$ であるから、  
これを使うと磁気モーメントは  
 $\mu=-(e/2m)\Gamma$ となる。



# 磁性の起源

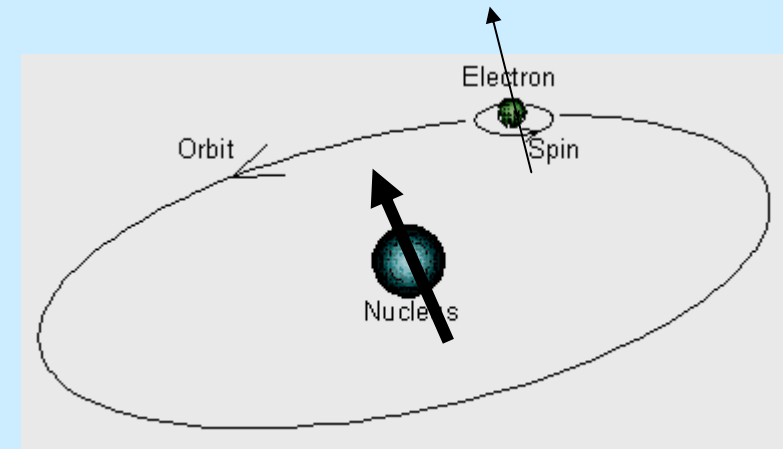
## 軌道角運動量の量子的扱い

- 量子論によると角運動量は  $\hbar$  を単位とするとびとびの値をとり、電子軌道の角運動量は  $\Gamma_l = \hbar L$  である。  $L$  は整数値をとる

- $\mu_l = -(e/2m) \Gamma_l$  に代入すると次式を得る。

軌道磁気モーメント

- $\mu_l = -(e\hbar/2m)L = -\mu_B L$  ボーア磁子  $\mu_B = e\hbar/2m = 9.27 \times 10^{-24} [\text{J/T}]$   
単位:  $[\text{J/T}] = [\text{Wb}^2/\text{m}] / [\text{Wb}/\text{m}^2] = [\text{Wb} \cdot \text{m}]$



# 磁性の起源

## もう一つの角運動量: スピン

- 電子スピン量子数  $s$  の大きさは  $1/2$
- 量子化軸方向の成分  $s_z$  は  $\pm 1/2$  の2値をとる。
- スピン角運動量は  $\hbar$  を単位として  $\Gamma_s = \hbar s$  となる。
- スピン磁気モーメントは  $\mu_s = -(e/m)\Gamma_s$  と表される。
- 従って、 $\mu_s = -(e\hbar/m)s = -2\mu_B s$
- 実際には上式の係数は、2より少し大きな値  $g$  (自由電子の場合  $g=2.0023$ ) をもつので、 $\mu_s = -g\mu_B s$  と表される。



# 磁性の起源

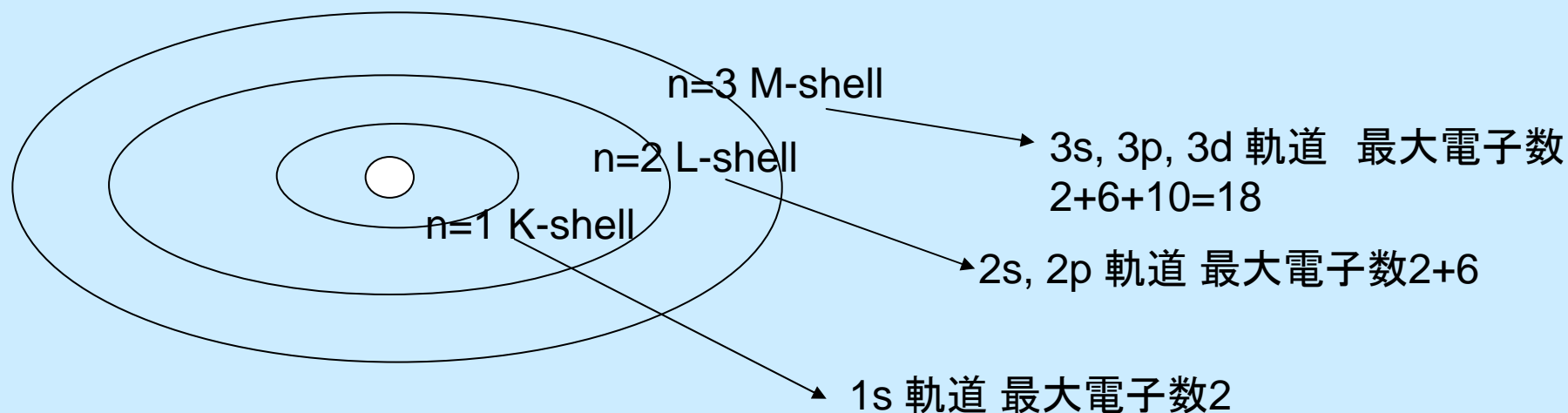
## スピンとは？

- ディラックの相対論的電磁気学から必然的に導かれる。
- スピンはどのように導入されたか
  - Na(ナトリウム)のD線のゼーマン効果(磁界をかけるとスペクトル線が2本に分裂する。)を説明するためには、電子があるモーメントを持っていてそれが磁界に対して平行と反平行とでゼーマンエネルギーが異なると考える必要があったため、導入された量子数である。
- 電子スピン、核スピン

# 磁性の起源

## 電子の軌道占有の規則

1. 各軌道には最大2個の電子が入ることができる
2. 電子はエネルギーの低い軌道から順番に入る
3. エネルギーが等しい軌道があれば、まず電子は1個ずつ入り、その後、2個目が入っていく



# 磁性の起源

## 主量子数と軌道角運動量量子数

- 主量子数  $n$
- 軌道角運動量量子数  $l=n-1, \dots, 0$

$n$	$l$	$m$							軌道	縮重度
1	0				0				1s	2
2	0				0				2s	2
	1			1	0	-1			2p	6
3	0				0				3s	2
	1			1	0	-1			3p	6
	2		2	1	0	-1	-2		3d	10
4	0				0				4s	2
	1			1	0	-1			4p	6
	2		2	1	0	-1	-2		4d	10
	3	3	2	1	0	-1	-2	-3	4f	14

# 磁性の起源

## 元素の周期表

Periodic Table of the Elements

3d遷移金属

1A																	0	
1	<b>H</b>																<b>He</b>	
2	<b>Li</b>	<b>Be</b>										<b>B</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>O</b>	<b>F</b>	<b>Ne</b>	
3	<b>Na</b>	<b>Mg</b>										<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cl</b>	<b>Ar</b>	
4	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Sc</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>Cr</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>	<b>Co</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ga</b>	<b>Ge</b>	<b>As</b>	<b>Se</b>	<b>Br</b>	<b>Kr</b>
5	<b>Rb</b>	<b>Sr</b>	<b>Y</b>	<b>Zr</b>	<b>Nb</b>	<b>Mo</b>	<b>Tc</b>	<b>Ru</b>	<b>Rh</b>	<b>Pd</b>	<b>Ag</b>	<b>Cd</b>	<b>In</b>	<b>Sn</b>	<b>Sb</b>	<b>Te</b>	<b>I</b>	<b>Xe</b>
6	<b>Cs</b>	<b>Ba</b>	* <b>La</b>	<b>Hf</b>	<b>Ta</b>	<b>W</b>	<b>Re</b>	<b>Os</b>	<b>Ir</b>	<b>Pt</b>	<b>Au</b>	<b>Hg</b>	<b>Tl</b>	<b>Pb</b>	<b>Bi</b>	<b>Po</b>	<b>At</b>	<b>Rn</b>
7	<b>Fr</b>	<b>Ra</b>	+ <b>Ac</b>	<b>Rf</b>	<b>Ha</b>	<b>Sg</b>	<b>Ns</b>	<b>Hs</b>	<b>Mt</b>	<b>110</b>	<b>111</b>	<b>112</b>	<b>113</b>					

\* Lanthanide Series

+ Actinide Series

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
<b>Ce</b>	<b>Pr</b>	<b>Nd</b>	<b>Pm</b>	<b>Sm</b>	<b>Eu</b>	<b>Gd</b>	<b>Tb</b>	<b>Dy</b>	<b>Ho</b>	<b>Er</b>	<b>Tm</b>	<b>Yb</b>	<b>Lu</b>
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
<b>Th</b>	<b>Pa</b>	<b>U</b>	<b>Np</b>	<b>Pu</b>	<b>Am</b>	<b>Cm</b>	<b>Bk</b>	<b>Cf</b>	<b>Es</b>	<b>Fm</b>	<b>Md</b>	<b>No</b>	<b>Lr</b>

希土類金属

# 第12回の問題

- 磁性体を特徴づけるものは何か。
- また、それがどのように応用されているか。