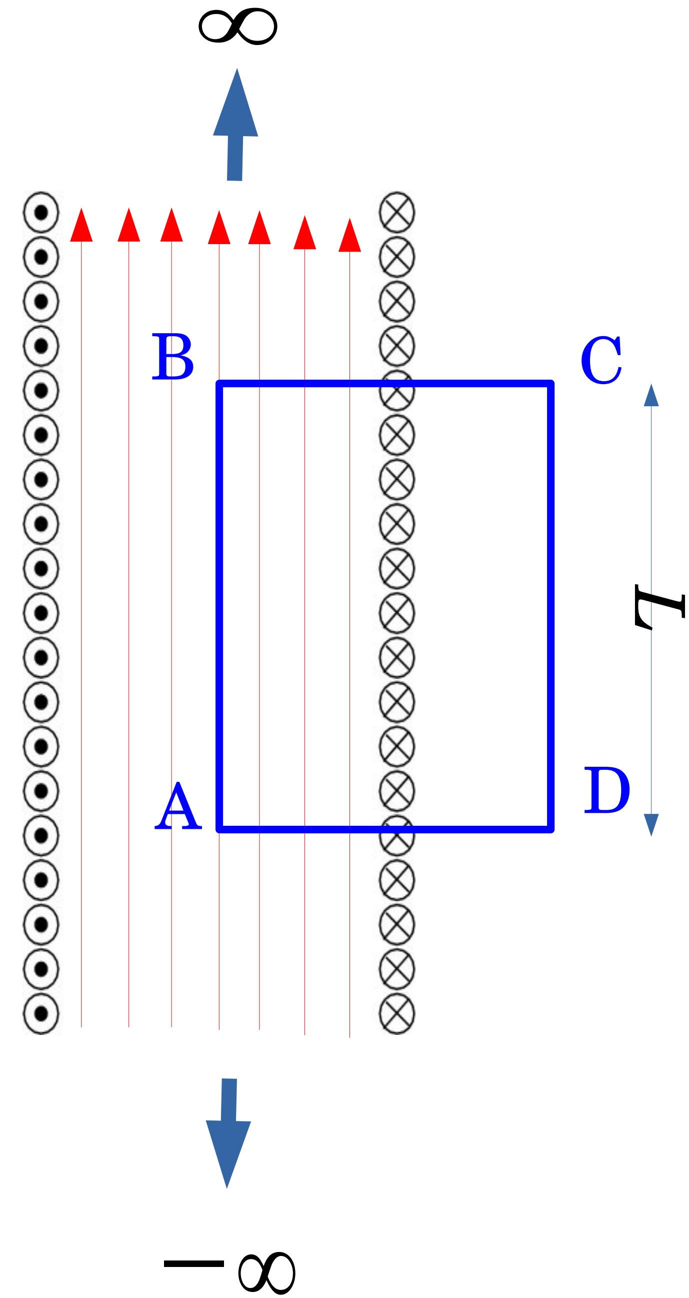
ソレノイド(空芯電磁石)

無限に長いソレノイド



実際のソレノイド

アンペールの法則

$$\oint_{ABCD}\vec{B}\cdot d\vec{s}=\mu_0\sum_{ABCDの中} I$$

$$=\mu_0 n_1 I\cdot L$$

n_1: 巻き線密度＝単位長さに巻かれた線の数

$$\oint_{ABCD}\vec{B}\cdot d\vec{s}=\int_{AB}\vec{B}\cdot d\vec{s}$$

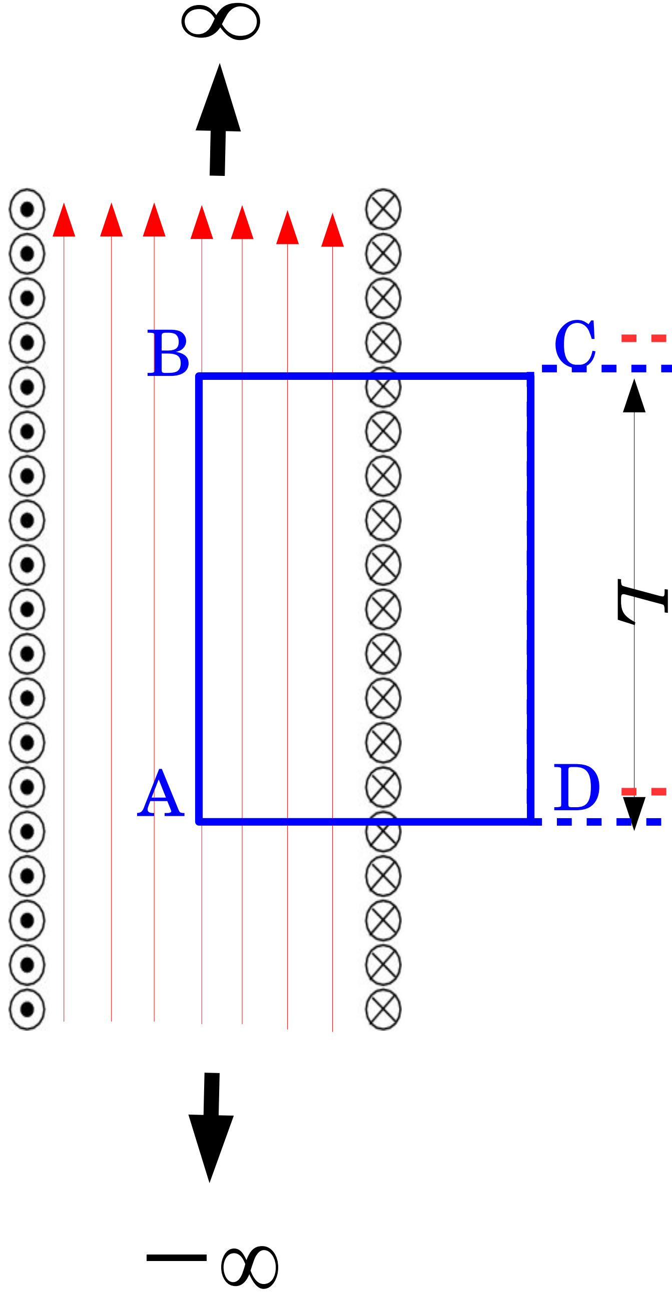
$$+\int_{BC}\vec{B}\cdot d\vec{s}$$

$$+\int_{CD}\vec{B}\cdot d\vec{s}$$

$$+\int_{DA}\vec{B}\cdot d\vec{s}$$

ソレノイド(続き)

無限に長いソレノイド



磁場はソレノイドの中心線と並行と考えて、

$$\int_{AB} \vec{B}\cdot d\vec{s} = B\cdot L$$

$$\int_{BC} \vec{B}\cdot d\vec{s} = \int_{DA} \vec{B}\cdot d\vec{s} = 0$$

C C

CDを無限遠に持っていけば、$B=0$ だろう。従って、

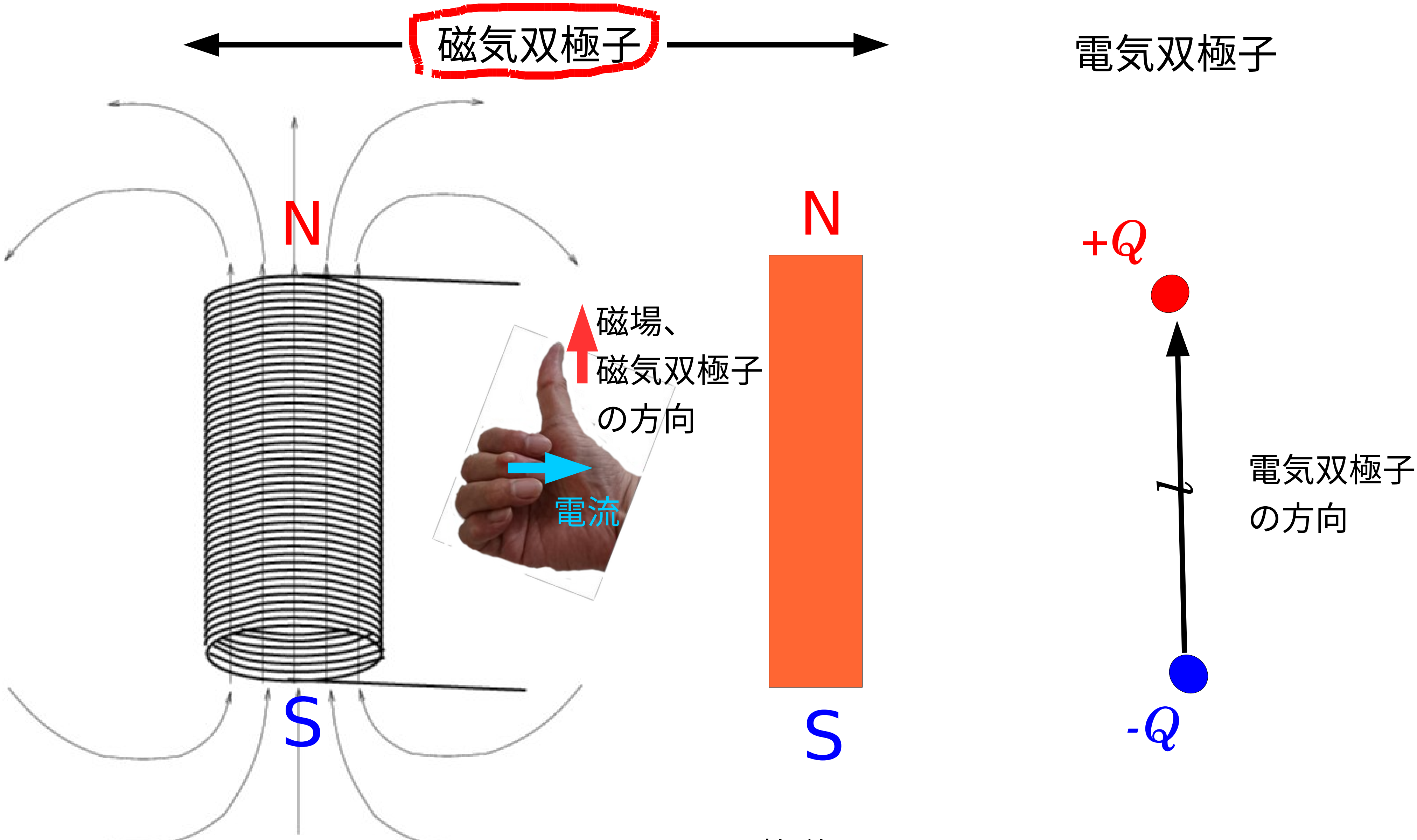
$$\int_{CD} \vec{B}\cdot d\vec{s} = 0$$

D D

つまり、 $B\cdot L = \mu_0 n_1 I\cdot L$

$$\boxed{\text{内部}\quad B = \mu_0 n_1 I \qquad \text{外側}\quad B = 0}$$

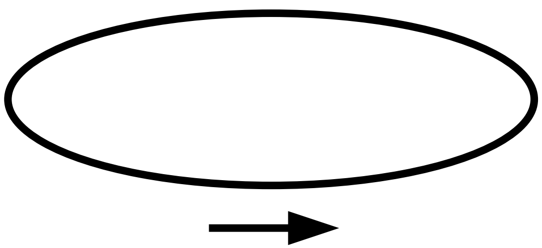
有限の長さのソレノイドは、両端から磁場が漏れ出して、磁石の様に見える。



ソレノイド＝空芯電磁石

棒磁石

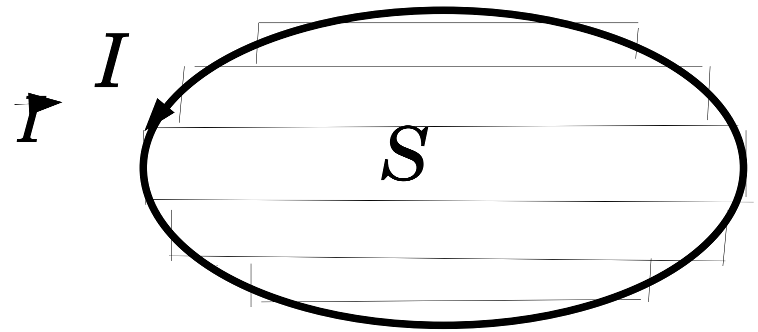
磁気双極子の最小単位



形は円形とは限らない。

磁気双極子モーメントの計算

$$m = I \cdot S$$

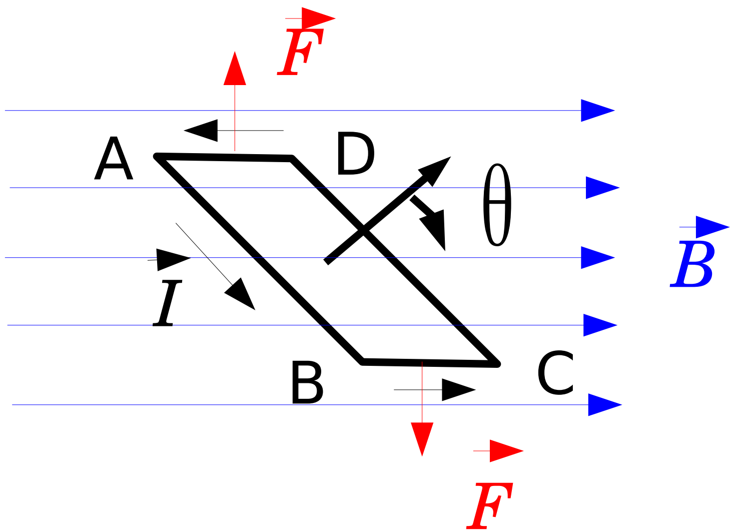


長方形を組み合わせて
任意の一周する電流を
近似する。＝＝＞　面積に比例

ベクトルとしての
方向は面に垂直、
電流と右ネジの関係

双極子モーメントと回転力

磁気双極子に働く力



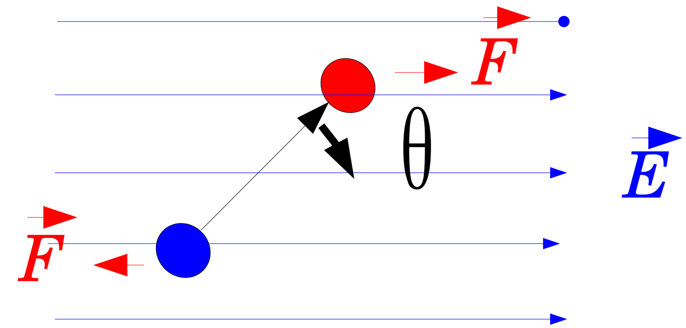
$$N = \sin\theta \cdot \overline{AB} \cdot F$$

$$= B \cdot \boxed{[I \cdot \overline{AB} \cdot \overline{BC}]} \cdot \sin\theta$$

$\boxed{m \equiv I \cdot S}$:磁気双極子モーメント

ただし、$S = \overline{AB} \cdot \overline{BC}$

電気双極子に働く力



$$N = \sin\theta \cdot l \cdot F$$

$$= E \cdot [lQ] \cdot \sin\theta$$

$\boxed{p \equiv l \cdot Q}$:電気双極子モーメント

物質の磁性：磁場中で物質の示す性質。

常磁性体、反磁性体、強磁性体

周期表

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*1	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	*2	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo

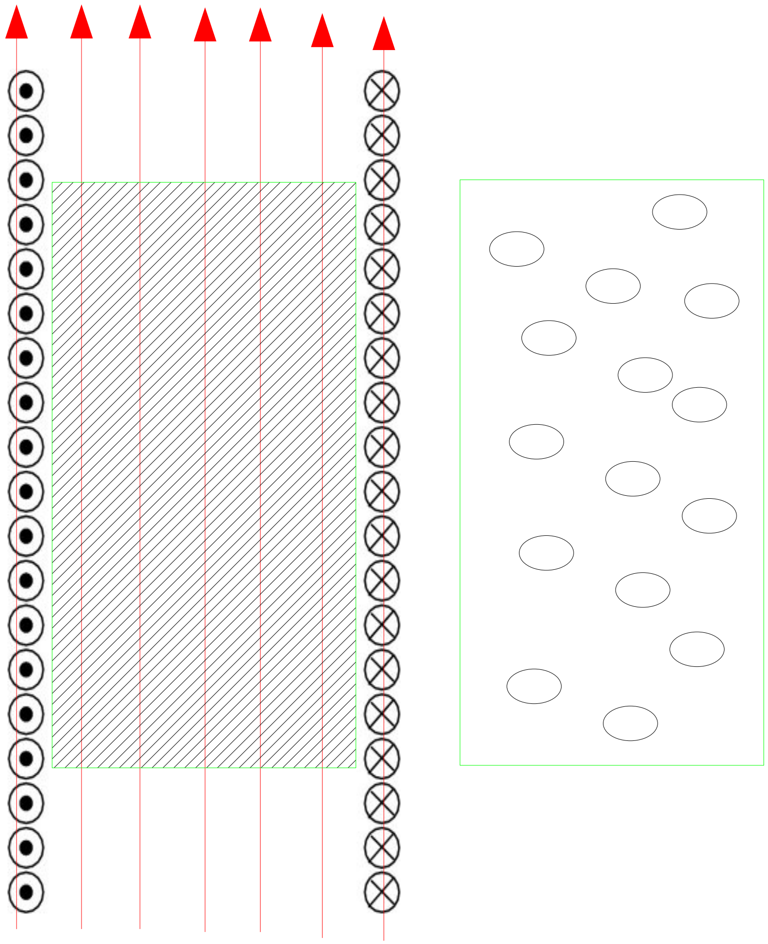
*1 ランタノイド:	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
*2 アクチノイド:	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

1 常温で固体	金属元素	アルカリ金属
1 常温で液体	半金属元素	アルカリ土類金属
1 常温で気体	非金属元素	ハロゲン
	人工元素	希ガス
		遷移元素

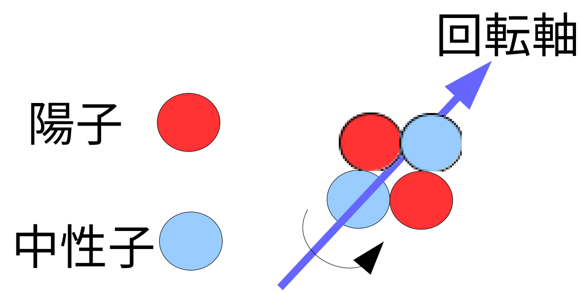
Wikipediaより

物質と磁場

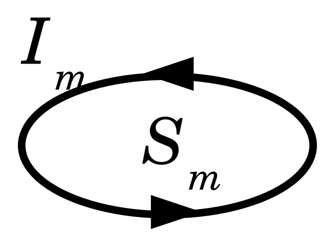
磁性は磁場中の物質のなかで
作られる磁気双極子により決まる。



物質の中の磁気双極子は、原子核のスピン
であると考えられているが、



この授業では磁気双極子のモデルとして、

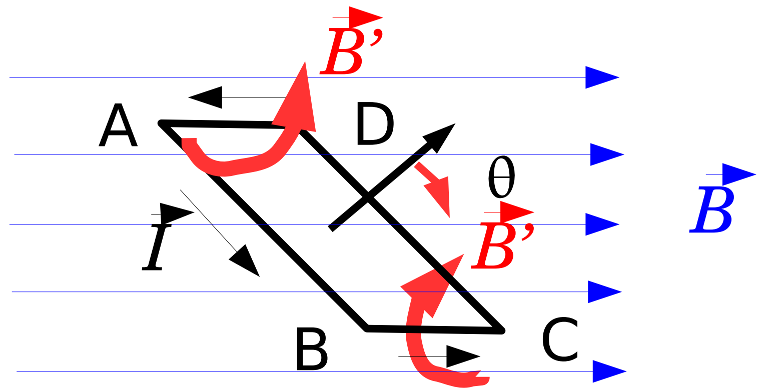


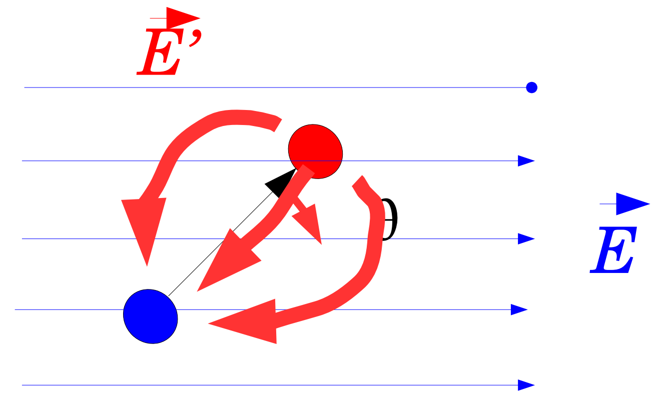
半径 $r(S_m=\pi r^2)$ の円と、その円周を流れる
電流 I_m を考える。

双極子がつくる場

磁気双極子が作る磁場の強いところは双極子ベクトルの方向

電気双極子が作る電場の強いところは双極子ベクトルと反対方向





$$N = \sin\theta \cdot \overline{AB} \cdot F$$

$$= B \cdot [I \cdot \overline{AB} \cdot \overline{BC}] \cdot \sin\theta$$

$m \equiv I \cdot S$:磁気双極子モーメント

ただし、$S = \overline{AB} \cdot \overline{BC}$

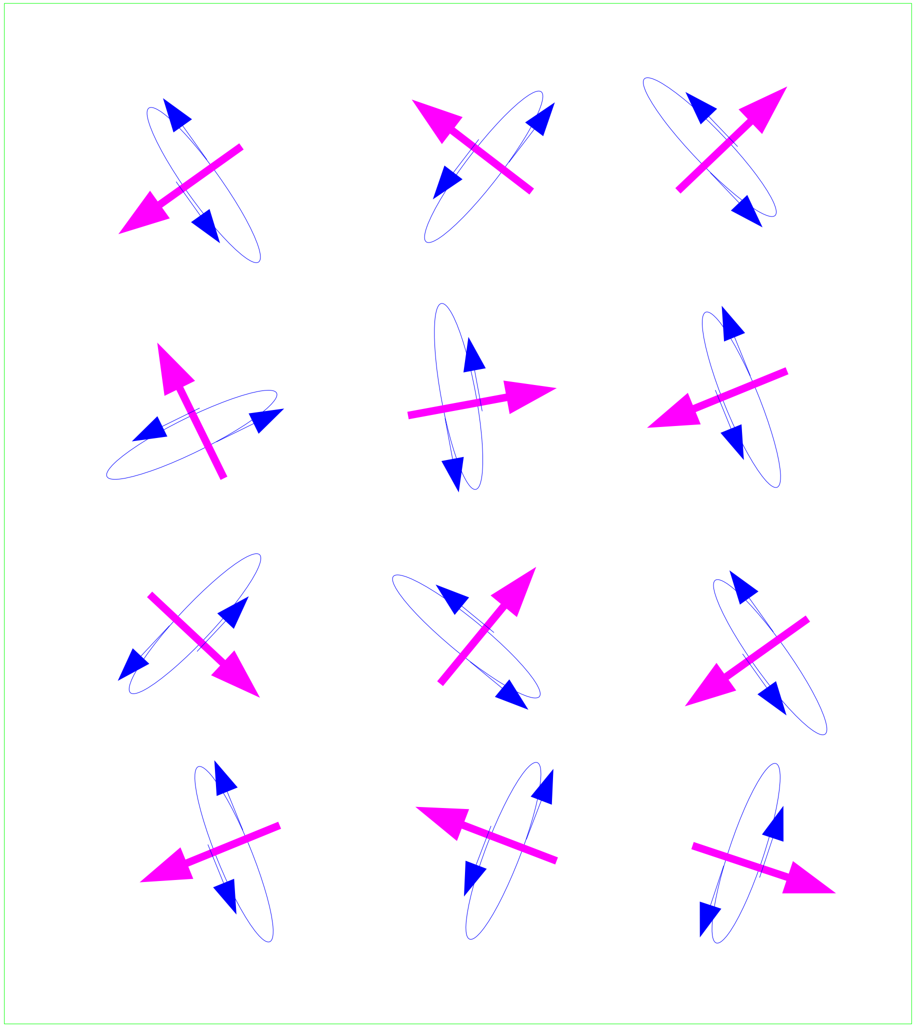
$$N = \sin\theta \cdot l \cdot F$$

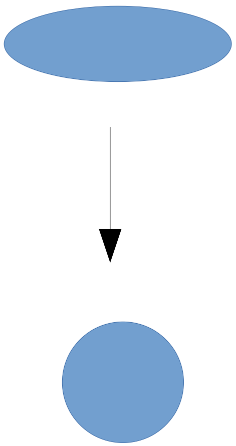
$$= E \cdot [lQ] \cdot \sin\theta$$

$p \equiv l \cdot Q$:電気双極子モーメント

物質と磁場 1、常磁性体の場合

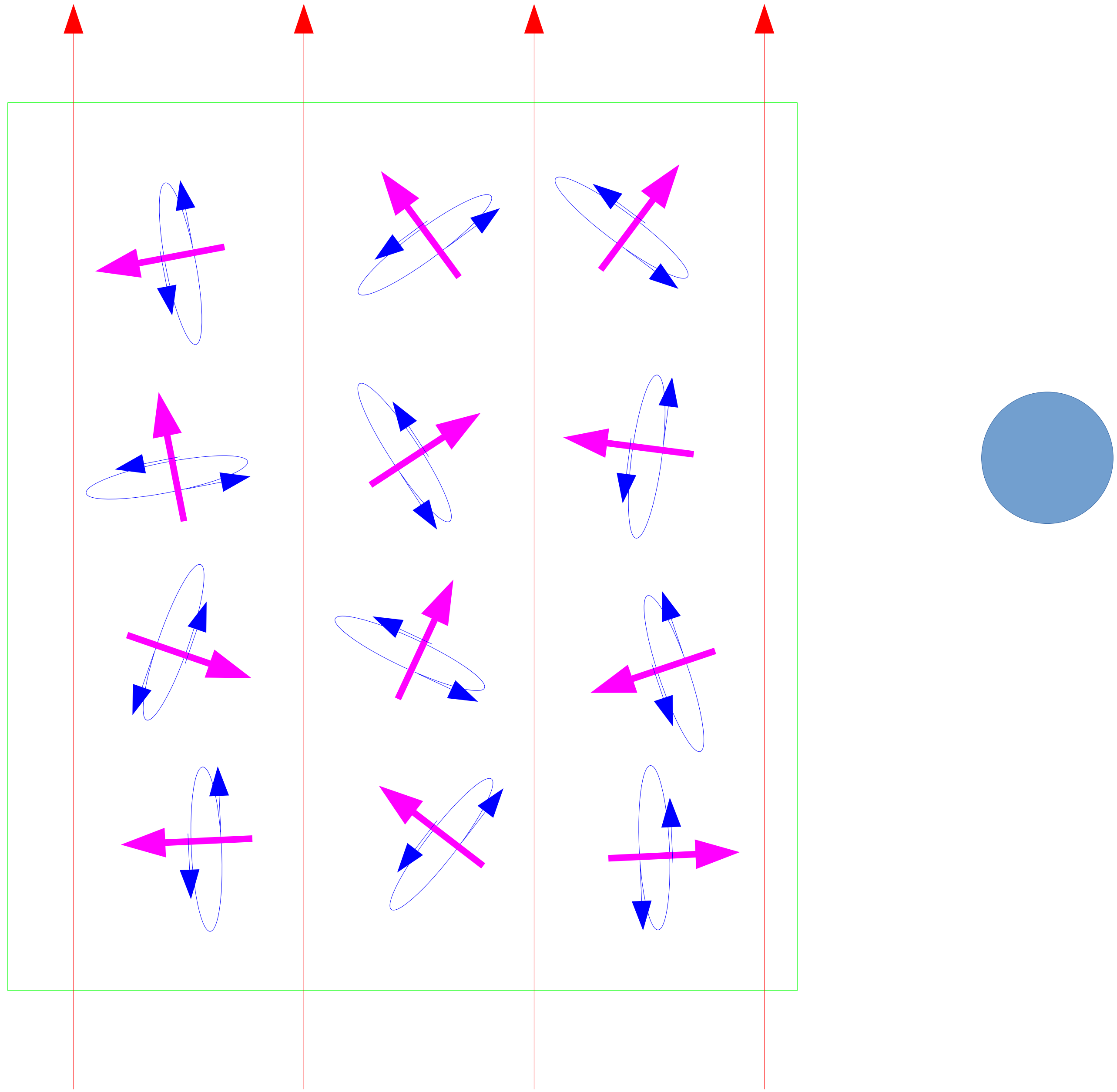
真上から見た
磁気双極子の平均イメージ



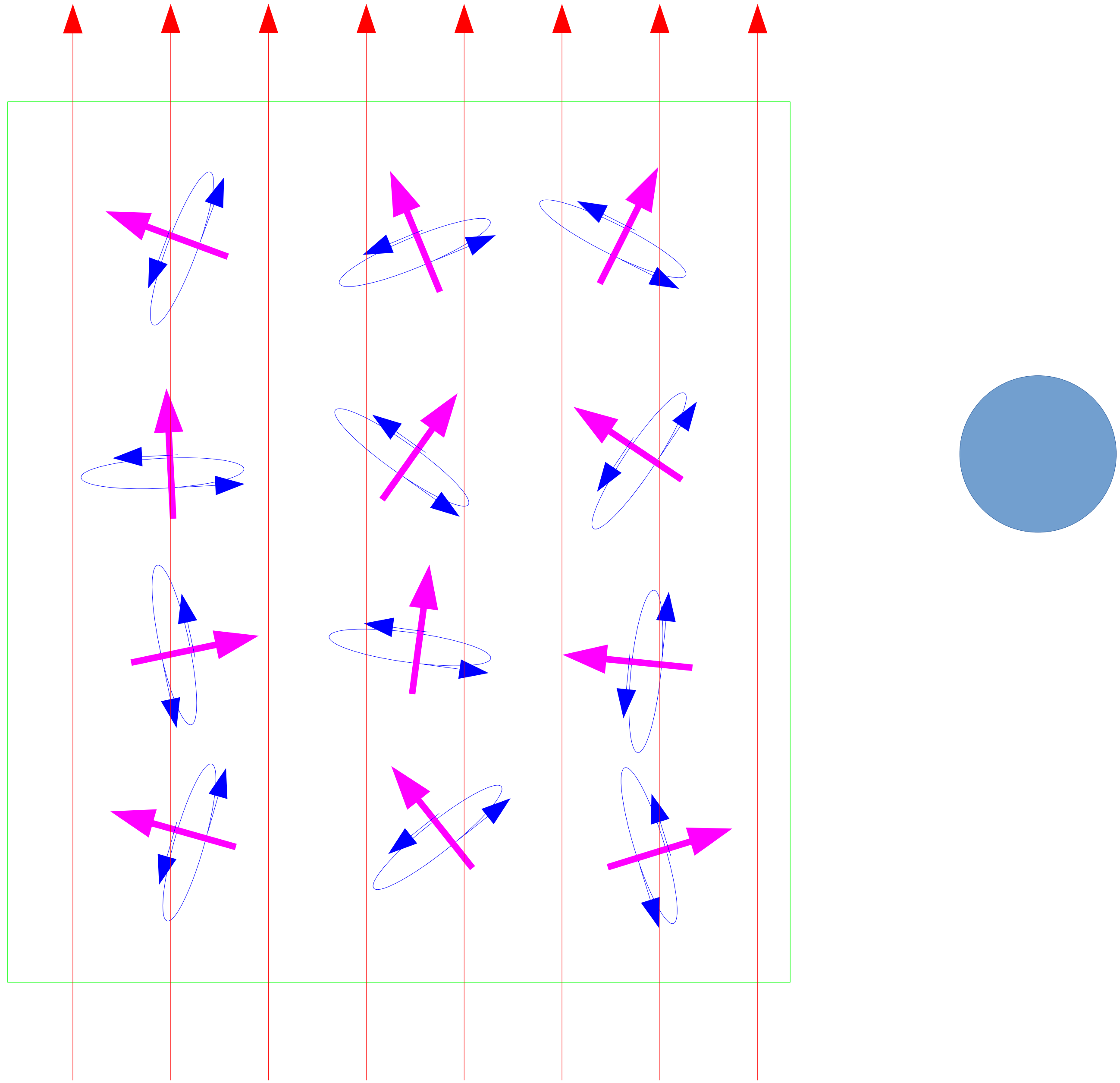


同じ面積の円で考える

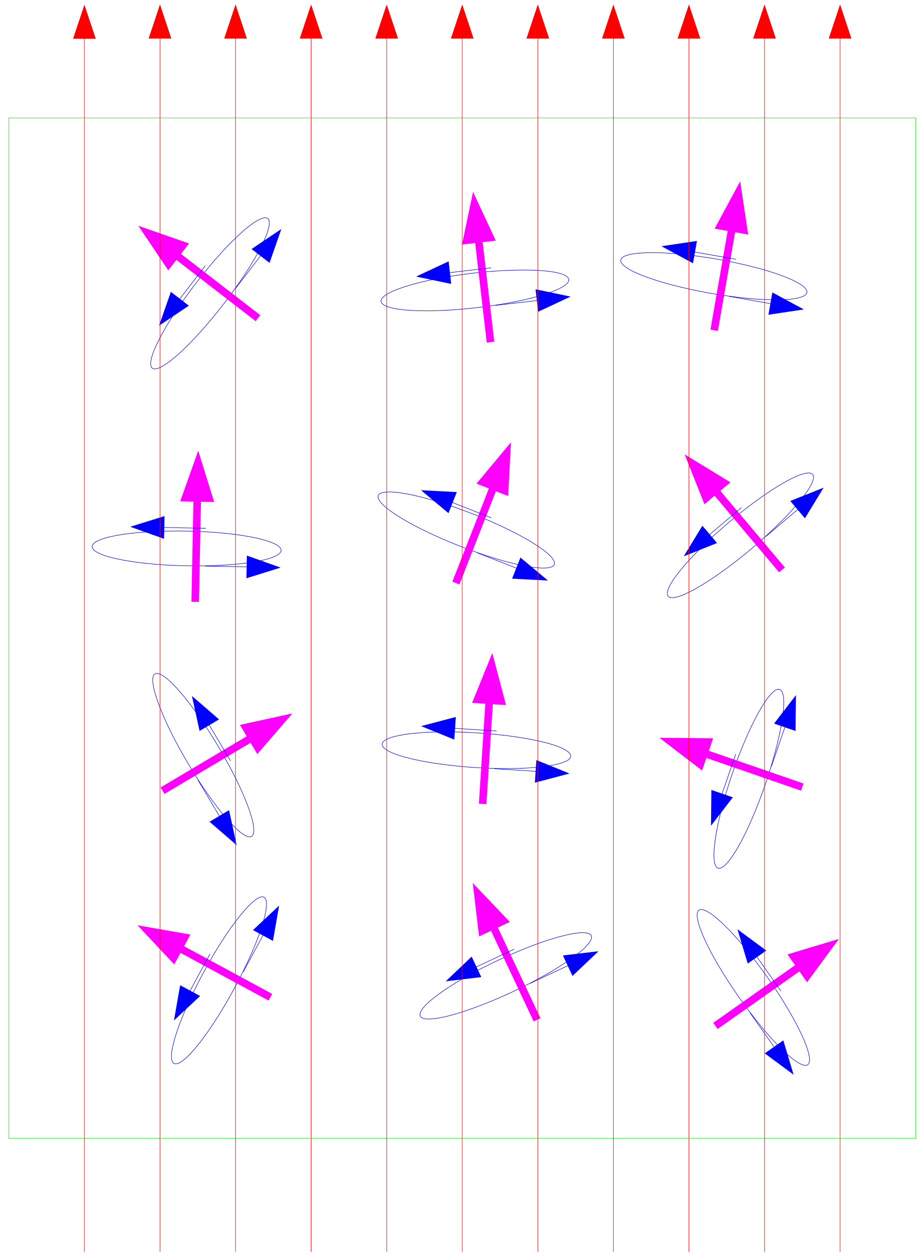
物質と磁場 1、常磁性体の場合



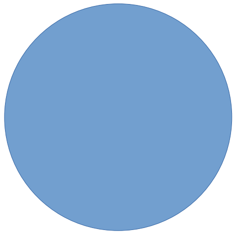
物質と磁場 1、常磁性体の場合



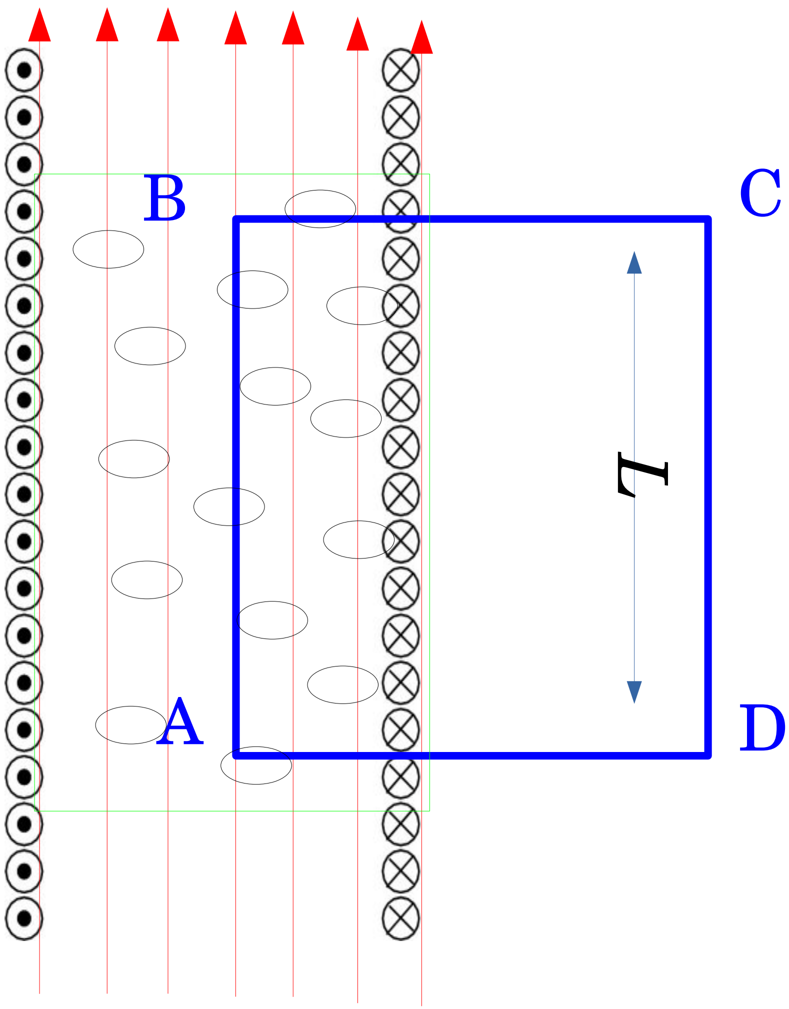
物質と磁場 1、常磁性体の場合



磁気双極子の平均面積は方向が揃うと大きくなる。



物質の磁気双極子を考えた、アンペールの法則は、



$$\oint_{ABCD} \vec{B}\cdot d\vec{s} = \mu_0 \sum_{ABCD\text{の中}} I$$

$$= \mu_0 n_1 I \cdot L +$$ 磁気双極子の寄与

$$\oint_{ABCD} \vec{B}\cdot d\vec{s} = \int_{AB} \vec{B}\cdot d\vec{s}$$

$$+ \int_{BC} \vec{B}\cdot d\vec{s}$$ (=0；BCと磁場は垂直)

$$+ \int_{CD} \vec{B}\cdot d\vec{s}$$ (=0；CDを無限遠へ)

$$+ \int_{DA} \vec{B}\cdot d\vec{s}$$ (=0；DAと磁場は垂直)

したがってアンペールの法則の左辺は

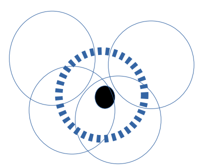
$$\oint_{ABCD} \vec{B}\cdot d\vec{s} = \int_{AB} \vec{B}\cdot d\vec{s}$$

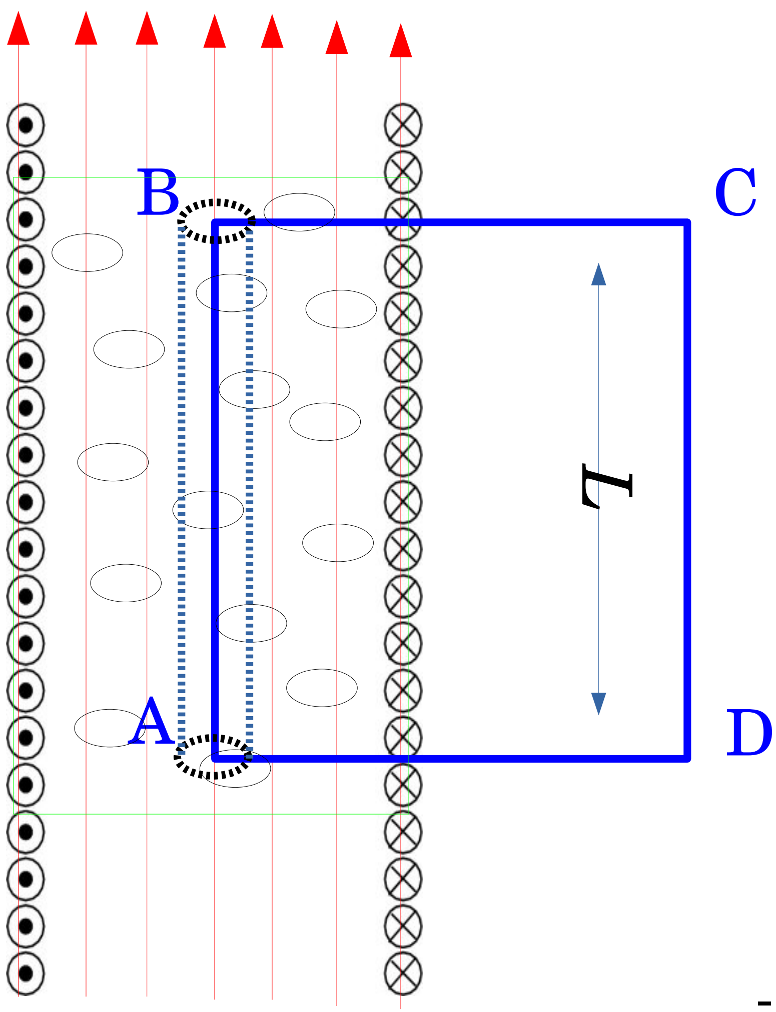
$$= \underline{\langle B \rangle} L$$

物質内部の平均磁場

右辺＝ソレノイドの電流＋磁気双極子の寄与

ABを真上から見た図。





磁気双極子のモデルは半径r、面積$S_m=\pi r_m^2$の円周を流れる電流I_mを用いる。（109ページ）

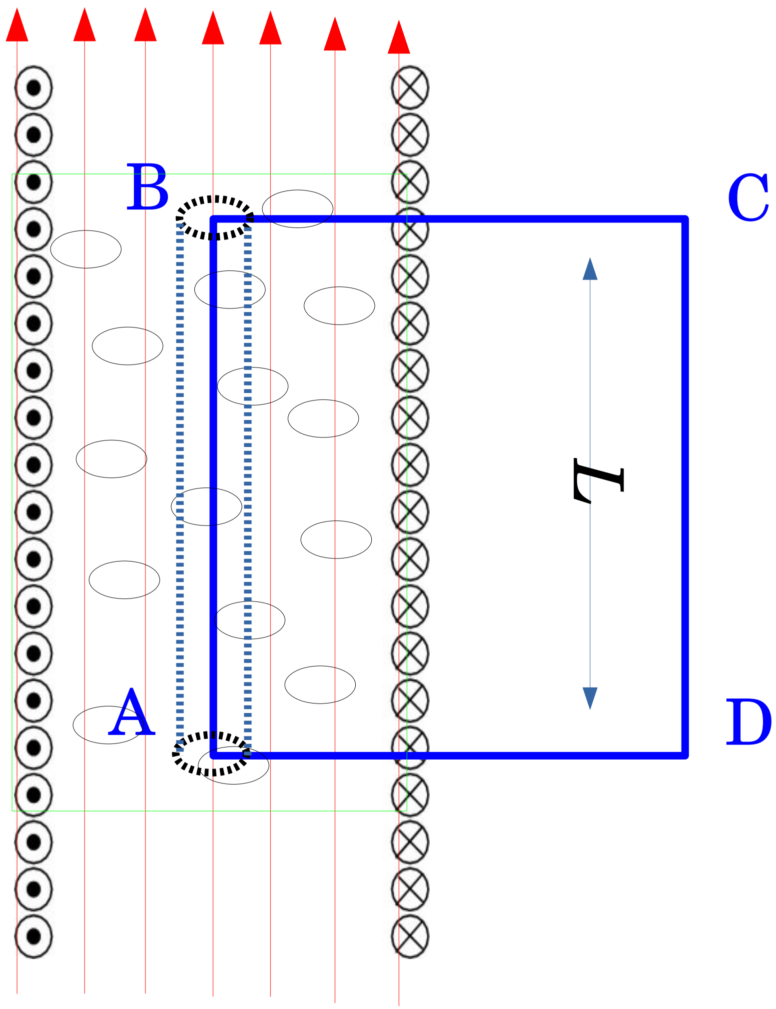
アンペールの法則に寄与するのは、直線ABが、磁気双極子としての円周電流の内側を通る場合。つまり、左図の線で描た、ABを中心とする円柱（断面は半径ｒの円）の中に磁気双極子の中心が入る場合であるが、この円柱の体積は$S_m L$なので、

磁気双極子の(数)密度をρ_mとして、

磁気双極子の寄与 $=\mu_0 \rho_m \cdot S_m L \cdot I_m$

$=\mu_0 \rho_m [I_m S_m] \cdot L$

磁気双極子の寄与(続き)



アンペールの法則は、

$$\langle B\rangle L = \mu_0 n_1 I \cdot L + \mu_0 \rho_m [I_m S_m] \cdot L$$

となるが、まず、Lは全ての項に共通である。

$\mu_0 n_1 I$ は、ソレノイド内が真空(物質が無い)場合の磁場で、電場と同じように真空の場を、少し形を変えて$\mu_0 H$と書く。また、

$$M \equiv \mu_0 \rho_m [I_m S_m]$$

とおくと、Mは磁気双極子モーメント密度に、μ_0を掛けたものと理解できる。

さらに平均磁場$\langle B\rangle$を単にBと書くと、

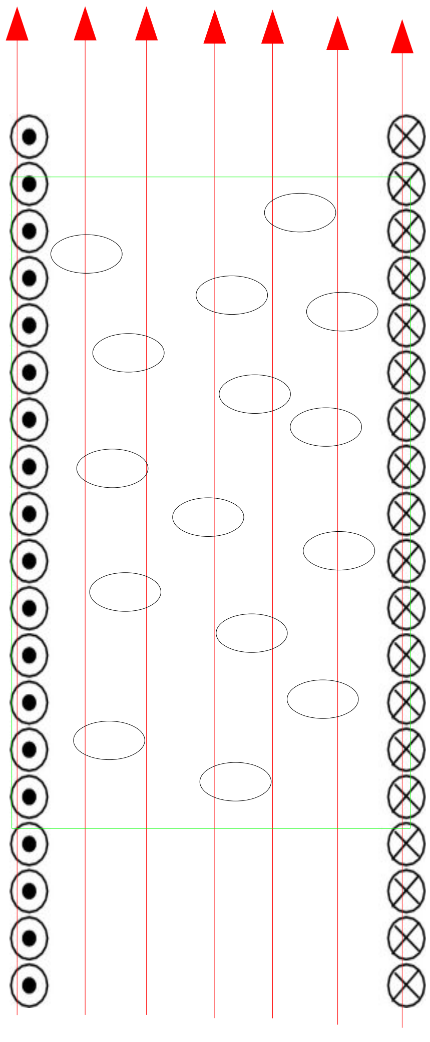
$$B = \mu_0 H + M$$

が得られた。ここで、

さらに、ベクトルの関係としても成り立つ。

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M}$$

物質中の磁気双極子の解釈



磁気双極子モーメント密度Mは一般に磁化と呼ばれる。物理的にはBに比例すると考えられるが、通常は真空中の磁場$\mu_0 H$に比例すると考え、

$$M = \chi_m(\mu_0 H)$$

この比例定数χ_mを磁化率と呼ぶ。結局

$$B = \mu_0 H + M = \mu_0(1+\chi_m)H = \mu H$$

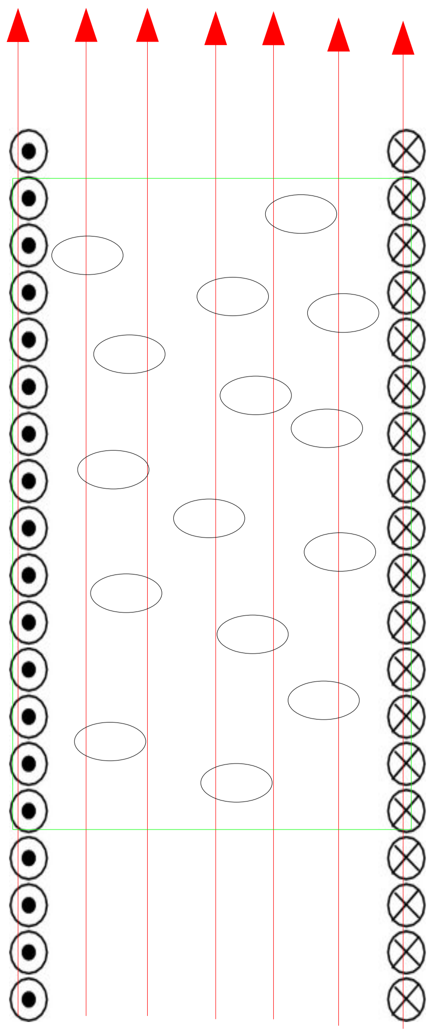
と、書けることになるが、ここで、

$$\mu = \mu_0(1+\chi_m)$$

を（物質の）透磁率と呼ぶ。μ_0を真空の透磁率と呼ぶのも、この定義による。

磁化率χ_mは実験的に求められるが、正の値を持つものを磁性体、負の値を持つものを反磁性体、大きな正の値を持つものを強磁性体と呼ぶ。

結局、物質がある時の磁場の法則は？



真空の透磁率を(物質の)透磁率に置き換える

$$\mu_0 \ \rightarrow \ \mu = \mu_0 (1 + \chi_m)$$

本来真空の磁場を表す、Hでは、物質の中でも、
物質の磁気双極子の補正が不要。
アンペールの法則がそのまま成り立つ。

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = \sum_{\text{積分に囲まれた}} I$$

(磁気双極子の補正は、表面に出て来ない)

注意、H を磁場、B を磁束密度と呼ぶほうが
公式な用語とされる。

「電場と物質」との関係（86ページ）との比較

結局、誘電体があることにより、何が変わるか。

1,公式は真空中のものと同じで、真空の誘電率が、物質の誘電率で、置き換わる。　(物質の誘電率は、実験で求める)

$$\varepsilon_0 \longrightarrow \varepsilon$$

2, ガウスの法則は、電場(E)よりも、電束密度(D)に対して簡単に書ける。(分極電荷を無視して良いため)

$$\int_{[\text{閉曲面}]} \vec{E}\cdot\hat{n}\, d\, S = \frac{\sum_{[\text{内部}]} Q_{\text{極板上}} + \sum_{[\text{内部}]} Q_{\text{分極}}}{\varepsilon_0}$$

$$\rightarrow \int_{[\text{閉曲面}]} \vec{D}\cdot\hat{n}\, dS = \sum_{[\text{内部}]} Q_{\text{極板上}}$$

3, 力、電位差を計算する時は、物質中の(平均)電場 E を用いる。
電束密度(D)は仮想的な場である。

電磁気学で物質を考えるとき、
電場の場合の電場Eと電束密度D、磁場の場合の磁場H、磁束密度Bの定義に、
ε_0, μ_0などの入り方が不自然に思ったかも知れないが、それぞれ電場と電束密度、磁場と磁束密度が同じ形に表現されるように、真空の（物質が無かった時の）場に定数で比例する仮想的な場を導入した結果である。
物理的な理由とは言い難いが、現在の電磁気学がこの定義の上に構成されており、法則の表現もこれを前提にしているので、とりあえず覚えよう。

$$\boxed{\vec{D}} = \varepsilon_0 \boxed{\vec{E}} + \vec{P} = \varepsilon_0 (1+\chi_e) \boxed{\vec{E}} = \varepsilon \boxed{\vec{E}}$$

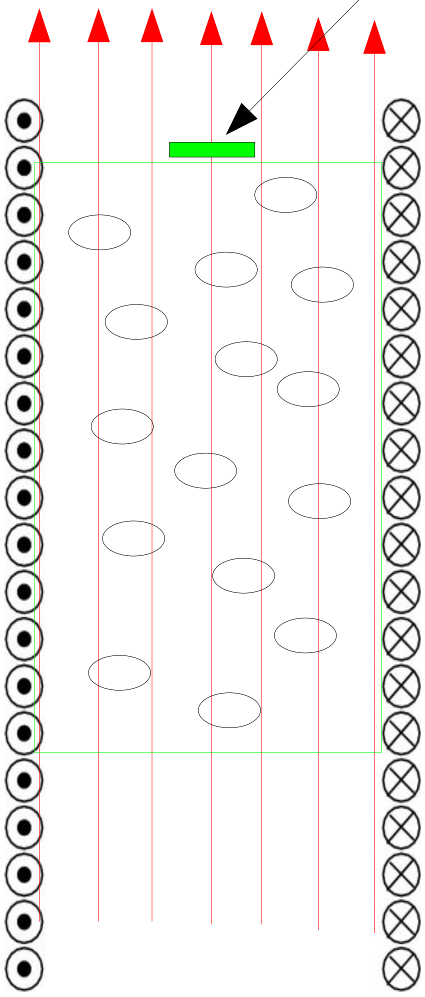
$$\boxed{\vec{B}} = \mu_0 \boxed{\vec{H}} + \vec{M} = \mu_0 (1+\chi_m) \boxed{\vec{H}} = \mu \boxed{\vec{H}}$$

$\vec{P}$: 分極
ε_0:真空の誘電率、
ε :誘電率
χ_e:分極率
$\vec{M}$: 磁化
μ_0:真空の透磁率
μ :透磁率
χ_μ:磁化率

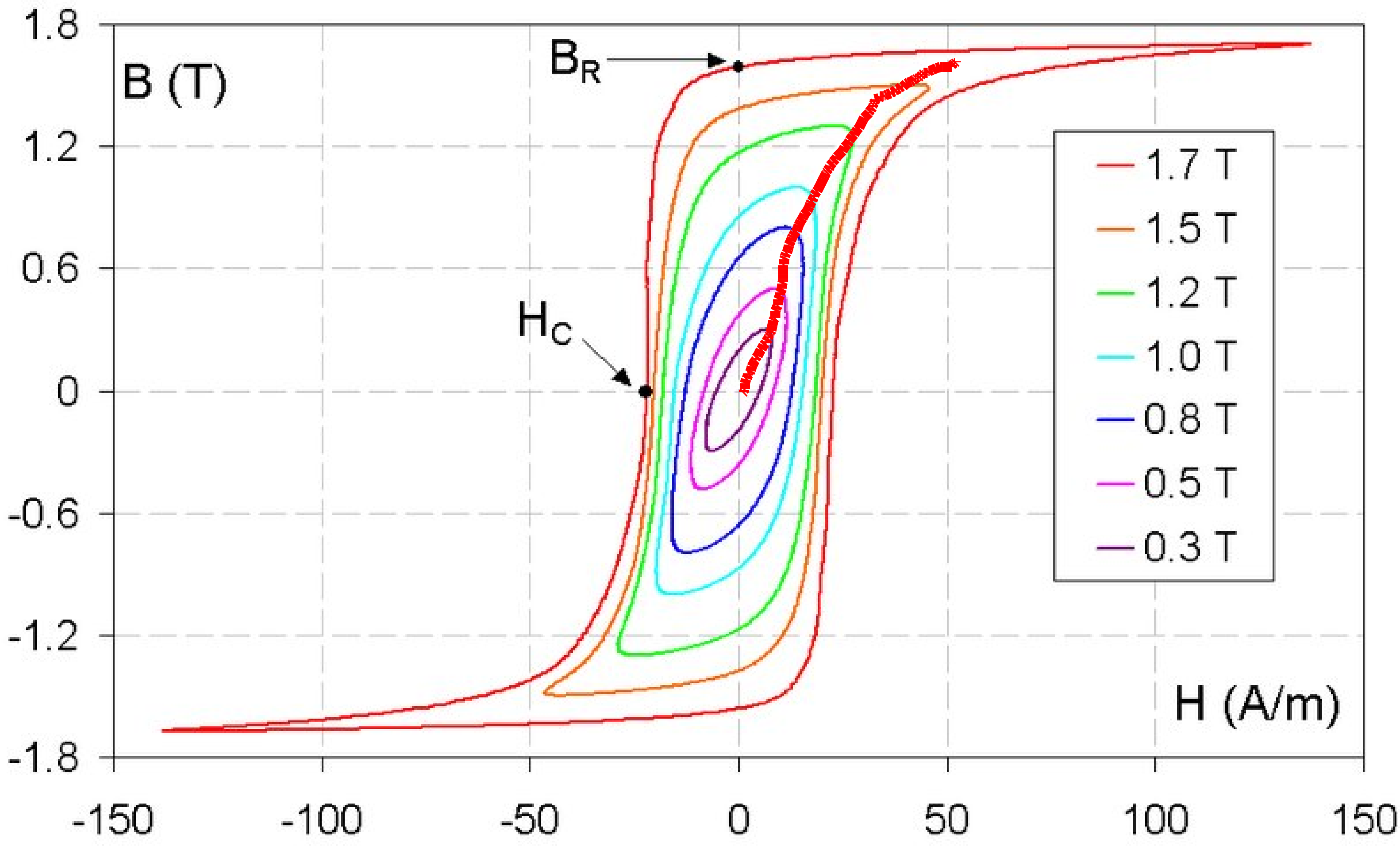
で囲んだのは、物質が在っても、真空の場に決まった物理定数を掛けて作った仮想的な場、

で囲んだのは、他の物理量、例えば、力の計算などに使える、物質の中で物理的な意味を持つ場。

強磁性体のヒステリシス



$H \equiv n_1 I$ を変化させながらBの測定



横軸H はソレノイドに流れる電流で、自由に変えられる！

http://en.wikipedia.org/wiki/Image:B-H_loop.png

今日の問題

下の文章の空白を埋め、完全な文章にして提出せよ。

ある領域に、外側でつくられた電場、または磁場が一様に存在しているとする。
その領域に電場の場合は電気双極子、磁場の場合は磁気双極子を置くと、どちらの場合も双極子モーメントの大きさに比例する回転力を受け、双極子モーメントベクトルは、元から有った電場、または、磁場と［　　］方向を向こうとする。

電気双極子モーメントがつくる電場は、場の強い部分では、双極子モーメントベクトルと［　　］方向に電場が向くので、電気双極子は元から有った電場を［　　］方向に働く。

磁気双極子モーメントがつくる磁場は、場の強い部分では、双極子モーメントベクトルと［　　］方向に磁場が向くので、磁気双極子は元から有った磁場を［　　］方向に働く。

ヒント１、入る言葉は、同じ、反対、強める、弱める、のどれかである。それぞれ一回づつとは限らない。日本語の文章として意味を成すことを確認すること。

ヒント２、双極子の回転力は、107ページ、電気双極子は、78,79ページ、磁気双極子は、110,111～114ページ参照