

平成17年度電磁気学A

担当: 鳥井 寿夫(とりい よしお) 居室: 16号館224A
tel: 03-5454-6757 (内線46757)
e-mail: ytorii@phys.c.u-tokyo.ac.jp
<http://maildbs.c.u-tokyo.ac.jp/~torii>

授業日: 毎週水曜2限(10:40~12:10)、
10/5~12/21, 1/11~1/18(計13回)

講義資料

<http://maildbs.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lectures/EM/index.htm>

(東京大学教養学部HP > 専攻 > 相関基礎科学系 > 物性物理・一般物理 > 鳥井寿夫)

にて

- ・レジюме(講義で配ったもの)
 - ・スライド資料(講義で使用したもの)
- を公開します

評価

レポート点(50%) + 期末試験(50%)

レポートの提出期限: 次回の授業の開始前。教室にて回収。

注意!

レポートは決して他人のものを写してはならない。
教科書は見てもよいが、自分の言葉で解答を表現すること(教科書の丸写しはカンニングとみなす)。
提出したかどうかのみチェックするので、必ず自力でできるところまでやること。

教科書

特に指定しない。毎回配るレジュメがテキストになる。以下に参考書を挙げる

兵頭俊夫著・電磁気学(裳華房)

電磁気学で使う数学を基礎から丁寧に説明してある。わかり易さを重視し、積分形に徹して電磁気学を論じている。

加藤正昭著・電磁気学(東京大学出版会)

教養で習う電磁気学を要領よくまとめてあるスタンダードな教科書。具体例や補足説明も多い。

ファインマン物理学III「電磁気学」(岩波書店)

ファインマン(1965年ノーベル物理学賞)が実際にカリフォルニア工科大学で行った講義をまとめたもの。「電磁気学」という枠にとらわれず、物理学全体または他の学問分野を常に視野に入れた著者独特の説明は、他の教科書では見られない。不朽の教科書。

この講義の目標

電磁気学の基本法則の理解

時間変化しない電磁場 (静電場、静磁場)

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = q(\mathbf{E}(\mathbf{r}) + \mathbf{v} \times \mathbf{B}(\mathbf{r})) \quad (\text{ローレンツ力})$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2} \mathbf{e}_{\mathbf{r}-\mathbf{r}'} dV' \quad \Leftrightarrow \begin{cases} \epsilon_0 \int_S \mathbf{E}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho(\mathbf{r}) dV & (\text{電場のガウスの法則}) \\ \oint_C \mathbf{E}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} = 0 & (\text{循環ゼロの法則}) \end{cases}$$

(クーロンの法則)

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{j}(\mathbf{r}') \times \mathbf{e}_{\mathbf{r}-\mathbf{r}'}}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2} dV' \quad \Leftrightarrow \begin{cases} \oint_C \mathbf{B}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} = \mu_0 \int_S \mathbf{j}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{S} & (\text{アンペールの法則}) \\ \int_S \mathbf{B}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{S} = 0 & (\text{磁場のガウスの法則}) \end{cases}$$

(ビオ - サバールの法則)

時間変化する電磁場

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = q(\mathbf{E}(\mathbf{r}) + \mathbf{v} \times \mathbf{B}(\mathbf{r}))$$

$$\epsilon_0 \int_S \mathbf{E}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho(\mathbf{r}) dV$$

$$\int_C \mathbf{E}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r})}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$$

$$\oint_C \mathbf{B}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} = \mu_0 \int_S \left(\mathbf{j}(\mathbf{r}) + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r})}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S}$$

$$\int_S \mathbf{B}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{S} = 0$$

しかし、基本方程式を知っていることは、物理を理解したことにならない

この講義の目標

電磁現象の定性的理解

例えば、次のようなことが理解できます

- ・車の中は落雷に対して安全である(静電遮蔽)
- ・ウランが核分裂で放出されるエネルギーは原子核の静電エネルギー(原子力エネルギーはウランの場合、実は電気エネルギー)
- ・磁気力とは、クーロン力の相対論的効果の現れである(磁気力は座標系によってはクーロン力とみなせる)
- ・光は電磁場である

第0章

单位系

物理量の次元と単位

- 物理量 (physical quantity) : 測定によって定量化される量
- 単位 (unit) : 各物理量の基準となる大きさ
- 次元 (dimension) : 物理量の質的違いを表す概念
(足すことに意味がある物理量は同じ次元を持つ)

(例)

エネルギーの次元を持つ物理量



エネルギーの単位



国際単位系 (SI) (基本単位)

	物理量	単位の名称	記号	
基本単位	長さ	メートル	m	MKSA 単位系
	質量	キログラム	kg	
	時間	秒	s	
	電流	アンペア	A	
	温度	ケルビン	K	
	物理量	モル	mol	
	光度	カンデラ	cd	
補助単位	平面角	ラジアン	rad	
	立体角	ステラジアン	sr	

* その他の単位は、上の基本単位の乗除のみで表現できる (組立単位)

国際単位系 (SI) (組立単位)

	物理量	記号	単位の名称	SI基本単位による表現
組	周波数(1/ 時間)	Hz	ヘルツ	s^{-1}
	力(質量×加速度)	N	ニュートン	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
立	圧力(力/ 面積)	Pa	パスカル	$N/m^2 = m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
	エネルギー(力×距離)	J	ジュール	$N \cdot m = m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
単	仕事率(仕事/ 時間)	W	ワット	$J/s = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
	電気(電流×時間)	C	クーロン	$A \cdot s$
位	電圧(エネルギー/ 電気量)	V	ボルト	$J/C = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
	静電容量	F	ファラッド	$C/V = m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$

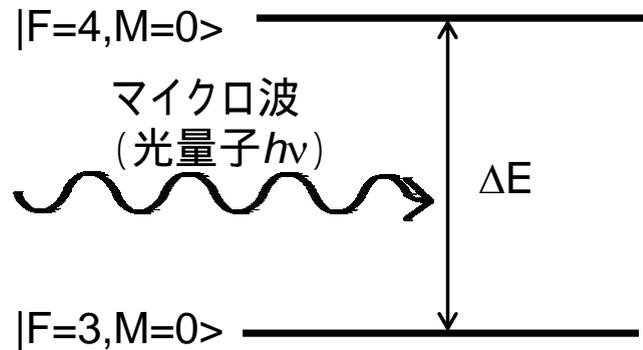
時間の単位（セシウム原子時計）

1sは、 ^{133}Cs の基底状態の二つの超微細構造準位 ($F=4, M=0$ および $F=3, M=0$) の間のマイクロ波遷移に対応する放射の9,192,631,770周期の継続時間



米国立標準技術研究所が開発した超小型原子時計の心臓部 (2004年9月2日朝日新聞より)

< ^{133}Cs , 6S軌道のエネルギー準位 >



マイクロ波がCs原子と共鳴 ($\Delta E = h\nu$) しているときの周波数を9,192,631,770Hzと定義

長さの単位

1mは、光が真空中を $1/299792458$ 秒間に進む距離
(1905年にアインシュタインが提唱した光速度不変の
原理を信じ、光速は 299792458 m/sであると定義)

レーザー



真空中の光速は $299,792,458$ m/s (定義)

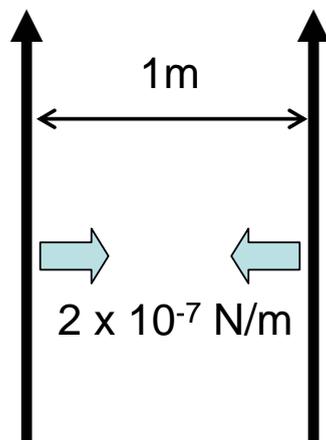
質量の単位

1kgは、キログラム原器(直径、高さとも39mmの円柱形で、白金90%、イリジウム10%の合金)の質量



電流の単位

1Aは、真空中に1 mの間隔で平行に置かれた無限に小さい円形断面積を有する無限に長い2本の直線状導体のそれぞれを流れ、これらの導体に1 mごとに 2×10^{-7} Nの力を及ぼし合う一定の電流



第1章

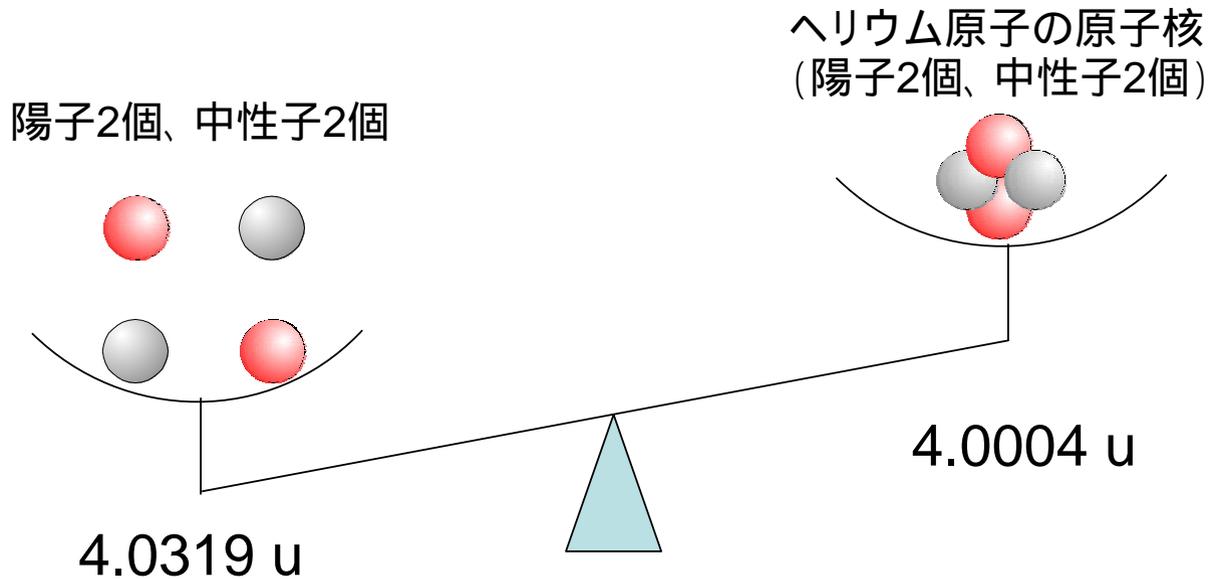
静電場

電荷の基本的性質

1. 電荷にはプラスとマイナスの2種類あり、同種同士は反発し、異種同士は引き合う。
2. 原子核や電子の電荷は、常に電気素量 ($e=1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$) の整数倍である。陽子の電荷は常に e 、電子の電荷は常に $-e$ である。(陽子や中性子を構成しているクォークは $e/2, e/3$ の電荷を持つとされているが、単独では観測されない。)
3. いかなる物理的または化学的変化に際しても、全電荷の和は不変である(電荷の保存則)

電荷と質量の大きな違い

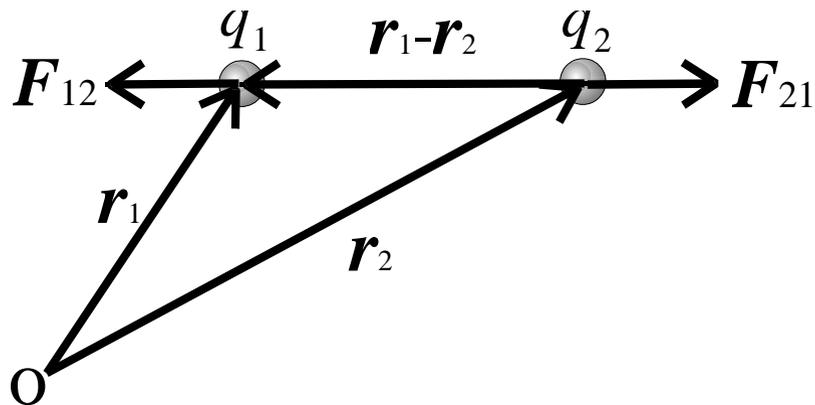
質量は保存しない！（質量素量などない）



($u = {}^{12}\text{C}/12 = 1.66 \times 10^{-27} \text{kg}$) 原子質量単位

$$E = mc^2 \quad (\text{質量はエネルギーの一形態})$$

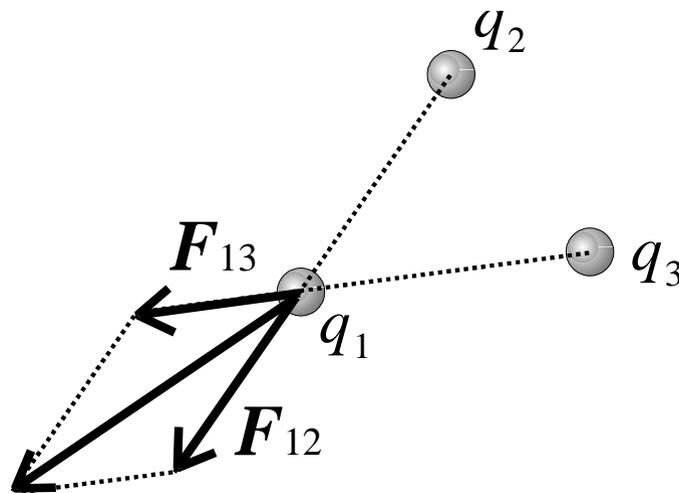
二つの電荷の間に働く力の向き



対称性より $\mathbf{F}_{12} = \alpha(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)$ (中心力)

作用・反作用
の法則より $\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12}$

力の重ね合わせの原理

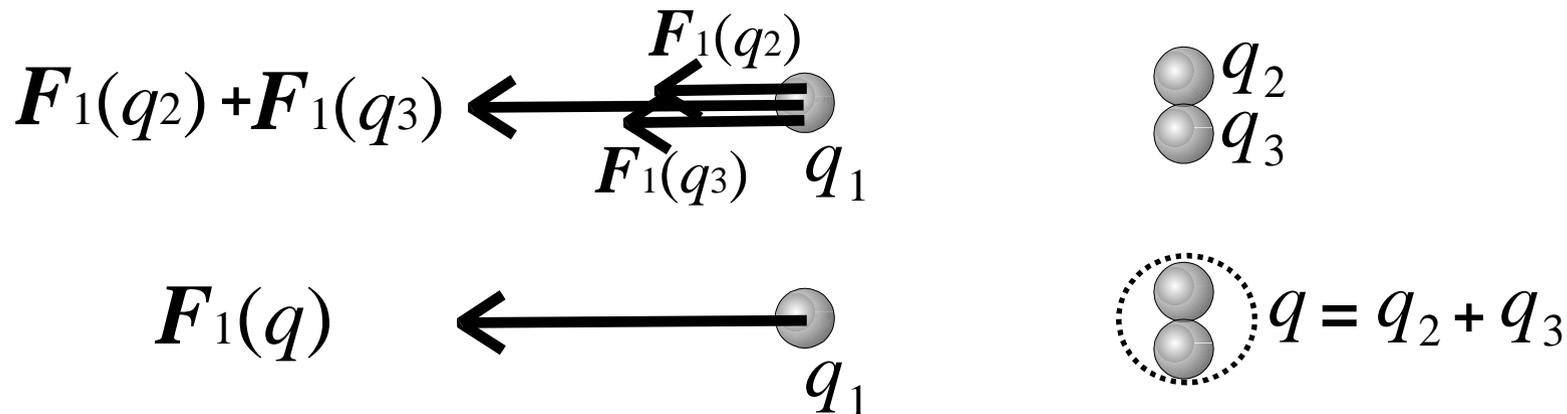


$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13}$$

複数の力が働いている場合

$$\mathbf{F}_1 = \sum_i \mathbf{F}_{1,i}$$

力と電荷の関係



力の重ね合せの原理より

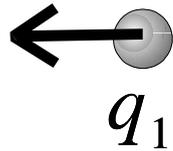
$$F_1(q) = F_1(q_2 + q_3) = F_1(q_2) + F_1(q_3)$$

これを満たすには

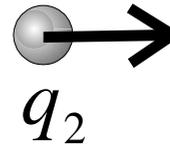
$$F_1(q) \propto q$$

力と電荷の関係

$$F_{12} \propto q_2$$



$$F_{21} \propto q_1$$



作用・反作用の法則より

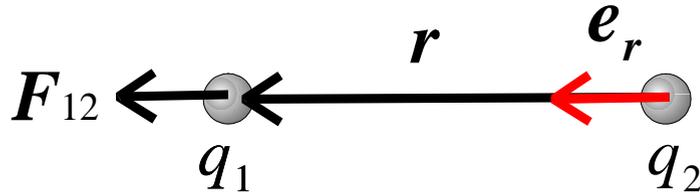
$$F_{12} = -F_{21}$$

したがって

$$F_{12} = -F_{21} \propto q_1 q_2$$

2つの電荷の間に働く力は、お互いの電荷の積に比例する。

クーロンの法則



- 電荷 q_2 が電荷 q_1 に及ぼす力 F_{12} は、 r を電荷 q_2 から電荷 q_1 に向かうベクトルとすると

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} e_r \left(e_r \equiv \frac{r}{r} \right)$$

$$k = 10^{-7} \text{ C}^2 \approx 8.988 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$$

後の便宜のために $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ と定義すると

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{e}_r$$

ϵ_0 : 真空の誘電率

電磁気学における電場・磁場の定義

速度 \mathbf{v} で運動している電荷 q が位置 \mathbf{r} で受ける力は

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = q(\mathbf{E}(\mathbf{r}) + \mathbf{v} \times \mathbf{B}(\mathbf{r}))$$

と表せることが(これまでの経験から)わかっている。この電荷に働く力をローレンツ力と呼び、 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ を電場、 $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ を磁場と定義する。