

比電荷の測定

青木健一郎
日吉物理学教室

2018年度春学期

内容

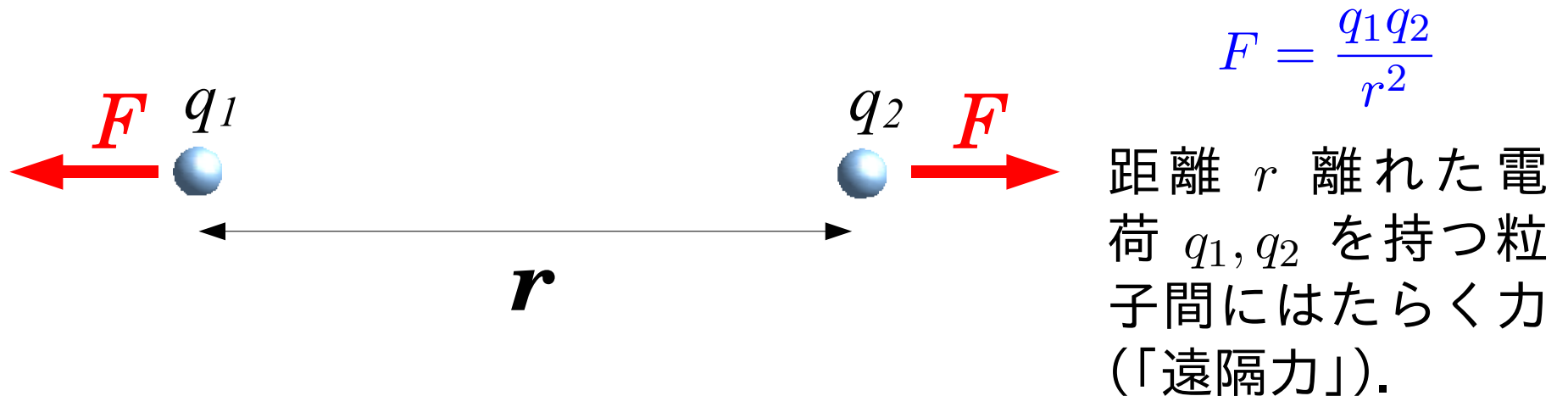
- ① 静電気力
- ② 電場
- ③ 磁場
- ④ 原子と光
- ⑤ 実験の歴史的意味

Keypoints

- 比電荷とは？
- 電磁場中の電荷の運動は？

静電気力

- 電荷：物質（素粒子）の性質．電磁場を感じとる能力． ← cf. 質量も粒子の性質の1つ



- 電子の電荷は $q = -e$ ，素電荷 ← Millikan の実験，後期
- $+$, $-$ 2種の電荷が存在． $+$ 同士， $-$ 同士は反発， $+-$ 間は引力．

- 日常経験のあらゆるものの引力，斥力の根本的原因（重力の引力以外）
 - ▶ 静電気
 - ▶ 原子，分子がくっついている理由（個体，液体， *etc.*)
 - ▶ 分子がある理由
 - ▶ 原子自体が存在する理由
- $+$ と $-$ があるために中性の物質が存在できる（原子など） ← 重力との差
- 重力も引力であるが電磁気力より数十桁（!）弱い.

電場 — 「場」(field)の考え方

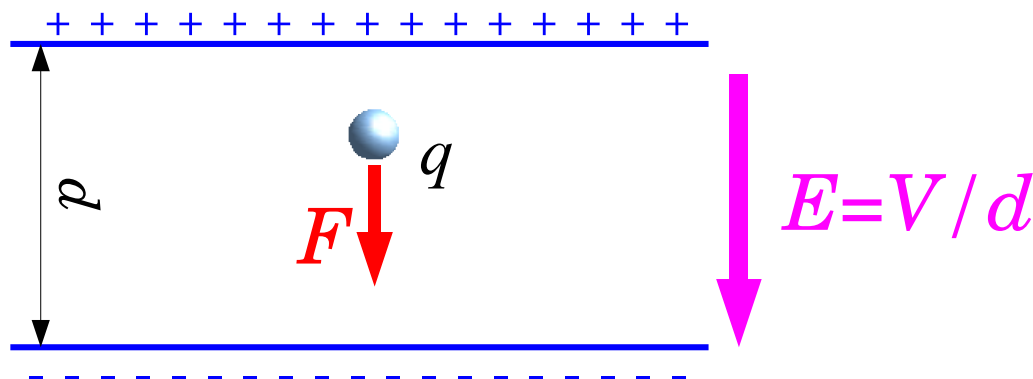


遠隔力の考え方では q_2 の近辺だけ見ると力を理解しにくい.

- 電荷 q_2 は q_2 のある場所の電場 E だけから力を受けると考える (結論はこのレベルでは同じ).

$$F = q_2 E, \quad E = \frac{q_1}{r^2} \Rightarrow F = \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

- q_2 は電場 E だけを感じ, それがどのような由来かには依存しない.
- 遠隔力ではなく, 局所的な考え方



この場合は電位差 V とすると $E = V/d$ で, 力 $F = qE$. 端から端まで動かすと, 仕事は $W = Fd = qV$.

- 電場から電荷 q の受ける力は $F = qE$. ← 当然点電荷同士の場合と同じ
- 電場から電荷 q の得るエネルギーは $E = qV$ (V は電位差, 電圧).
- Newton の法則, $\vec{F} = m\vec{a}$ に従い, 電場は電荷を加速する. (「加速電圧」) $\boxed{q/m}$ に依存.

$$a = \frac{q}{m} E = \frac{q}{m} \cdot \frac{V}{d}$$

よって, 加速電圧 V で加速すると

$$\text{運動エネルギー} = \frac{1}{2}mv^2 = qV = qEd = \text{仕事} \Rightarrow v^2 = \frac{q}{m} 2V$$

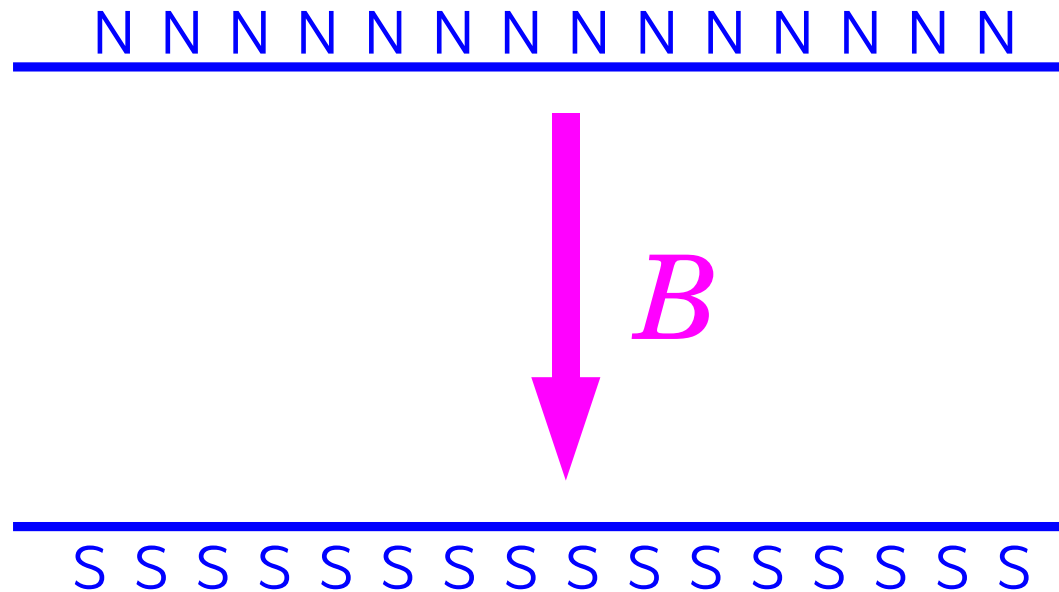
- 静電気の実用
 - ▶ ブラウン管 (CRT = cathode ray tube, 「陰極線管」)
 - ▶ コピー機, レーザープリンタ.
- 重力場も場としての考え方は同じ

物体 (人, 月, 人工衛星...) は

地球に引かれる \longleftrightarrow 物体のある場所の 重力場 から力を受ける

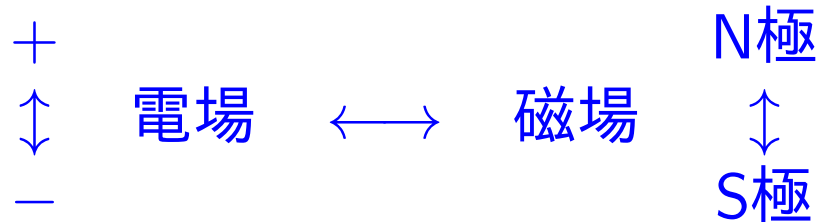
磁場 (magnetic field)

- + と - の電荷同様に磁石の N 極と S 極は引き合う. この力は遠隔力としてではなく, **磁場** としても理解できる. 電場と同様.

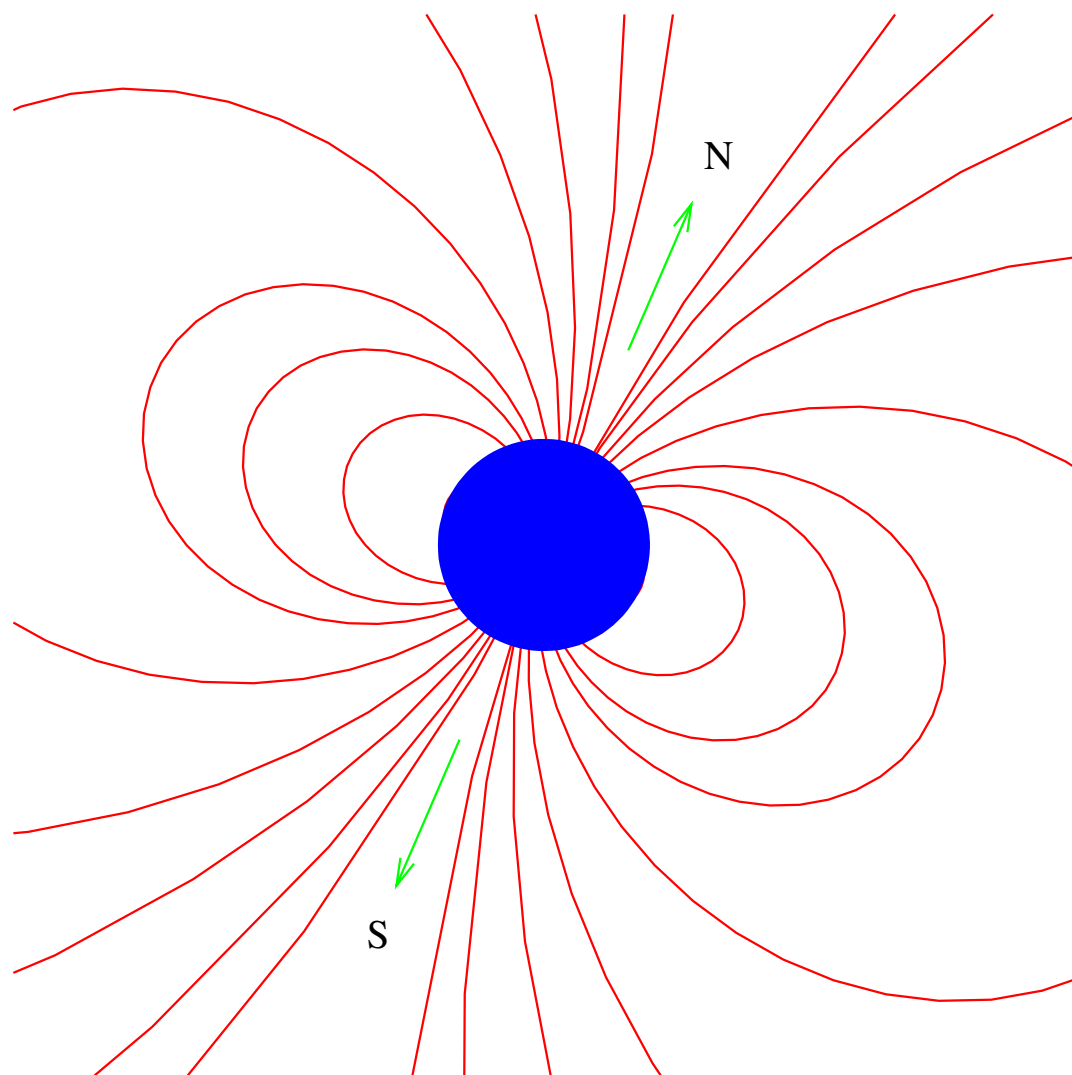


- ▶ 電場同様に磁場は生じる.
- ▶ 磁石がある \Rightarrow 回りに**磁場**を作る
- ▶ 地球の「磁場」

- 電場内の+- と磁場内のNSは対応

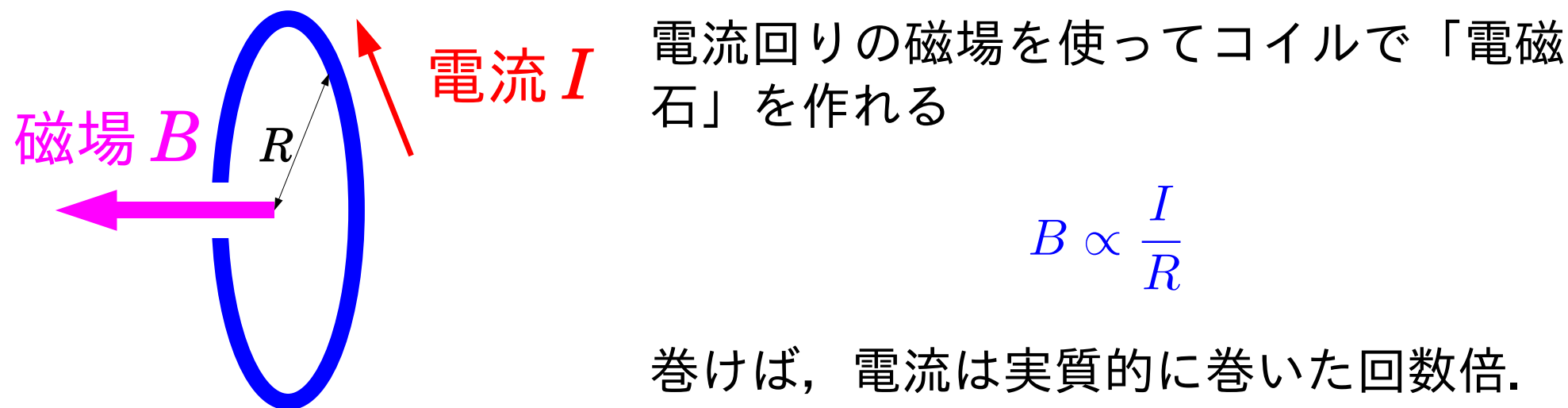
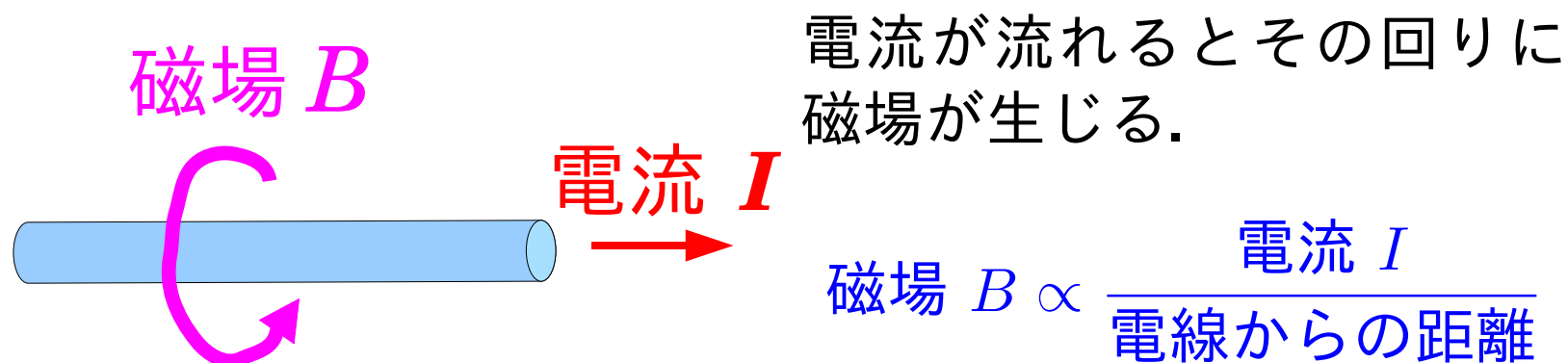


唯一の差 : N,S 単独のもの(magnetic monopole)が存在しないこと

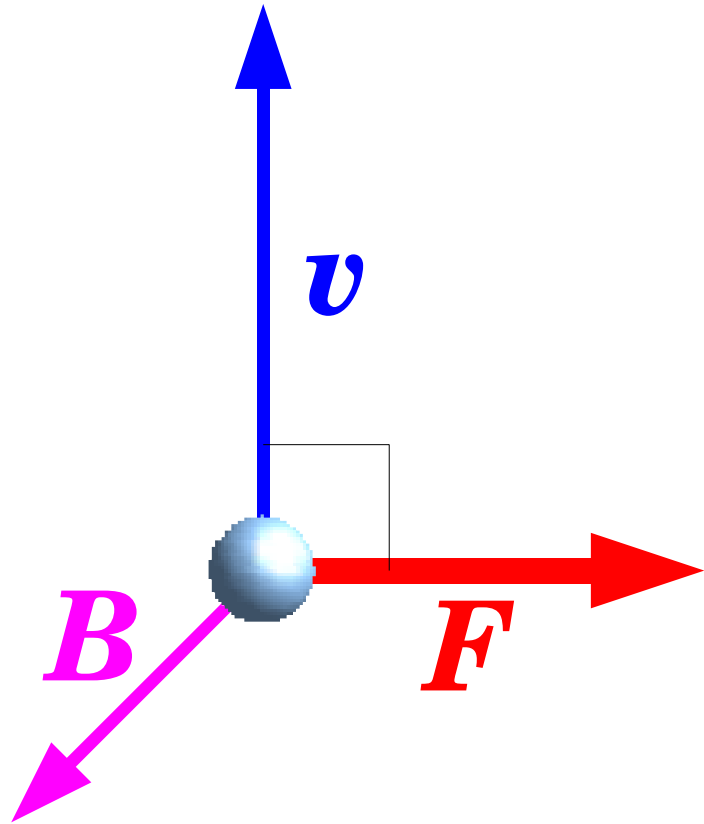


地球の磁場線

電磁石



磁場内の電荷と Lorentz 力



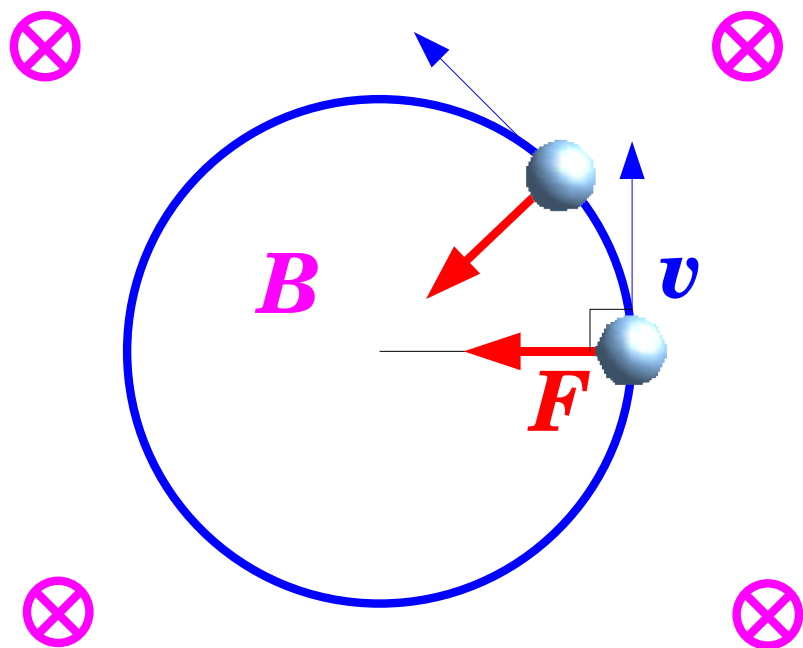
磁場 B 内で電荷 q はどのような力を受けるか？

Lorentz 力 $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$

\vec{v} と \vec{B} の作る平面に垂直な方向に力 \vec{F} が働く．力の大きさは \vec{v} , \vec{B} の作る平行四辺形の面積．（「外積」：ベクトル同士の掛け算）

- 電荷が磁場から受ける力は速さ $|\vec{v}|$ を変えない．

磁場内の電荷の運動



- 磁場 B が表から裏へ突き抜ける方向とする.
- 磁場内の電荷は等速円運動
- 力 $F = qvB$ がちょうど円運動に必要な向心力 mv^2/r

$$qvB = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow r = \frac{1}{(q/m)} \frac{v}{B}$$

r は $\boxed{q/m}$ に依存: $q/m \nearrow \Rightarrow r \searrow$,
 $v \nearrow \Rightarrow r \nearrow$, $B \nearrow \Rightarrow r \searrow$.

- 一般には一様な磁場内で電荷はらせん運動をする. ← 磁場に平行な方向には力を受けない.
- 円形型加速器 (cyclotron, synchrotron) の原理
- オーロラ: 太陽風 (太陽からの荷電粒子の流れ) が磁場により曲げられて, 大気圏内にほとんど入ってこない. 極地方向のみある程度入ってきて大気分子と衝突する (スペクトル) のが見える.

比電荷の測定 磁場が無い火星は大気を衝突で失った

比電荷と実験パラメータの関係

実験における条件

- (1) $\frac{1}{2}m_e v^2 = eV$ 加速電圧 V によって運動エネルギー $\frac{1}{2}m_e v^2$ を得る
- (2) $evB = \frac{m_e v^2}{r}$ 磁場 B からのローレンツ力 evB が向心力
- (3) $B = \alpha i$ 電磁場 B はそれを作る電流 i に比例

- (2)より

$$v = \frac{e}{m_e} Br$$

- これと(1), (3)より

$$v^2 = \frac{e}{m_e} 2V = \left(\frac{e}{m_e} \right)^2 B^2 r^2 \Rightarrow \frac{e}{m_e} = \frac{2V}{B^2 r^2} = \frac{2}{\alpha^2} \cdot \frac{V}{i^2 r^2}$$

実験が比電荷 q/m の測定である一般的理由

- 電場，磁場どちらをどう組み合わせても必ず以下の格好になる.

$$\vec{F} = q\vec{E}, \quad \vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad \vec{F} = m\vec{a} = q \times \text{電場, 磁場の組み合わせ}$$

- 運動のしかたは運動の変化，加速度によって定まる \Rightarrow 運動は比電荷 q/m によって決まる.

$$\vec{a} = \frac{q}{m} \times \text{電場, 磁場の組み合わせ}$$

- q/m が同じであれば電磁場内の運動は全て同じ.
- 一般に粒子によって q/m は異なるので電場，磁場内における運動より q/m を測定し，粒子を同定できる. ← 素粒子実験ではよく使われる方法
- q と m を同定するには電磁場だけでは無理で，さらに他の力が必要. 例えば Millikan の実験では重力の影響も使って電荷を測定できる. ← 後期実験

電磁気力と重力との比較

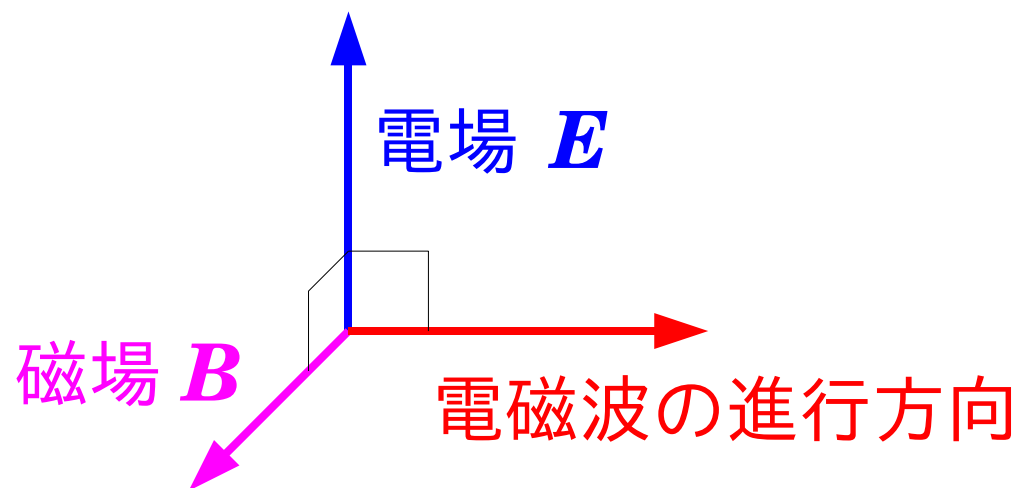
- 重力は（慣性の）質量 m に比例 （電磁気の q に対応するものが m ）
- $q/m \leftrightarrow m/m = 1(!)$
⇒ 重力場内ではあらゆる物体の運動は同じ！ （重力の特殊性）

比電荷測定の歴史的意味

- 原子から「陰極線」(cathode ray) が出ることを見出.
- あらゆる原子から出る陰極線は同じ比電荷 q/m を持つ.
- 全ての電荷は素電荷の整数倍 ← Millikan の実験, 後期
- 陰極線は同じ粒子の流れ → 電子, electron (J.J. Thomson e/m 1897, e 1899)
- 原子はそれ以上分解できない最小単位ではなく, その構成要素の一つが電子である.
- 電子は負の電荷を持つ. しかし原子は中性 \Rightarrow 正の電荷は何? \Rightarrow 原子の構造の見出

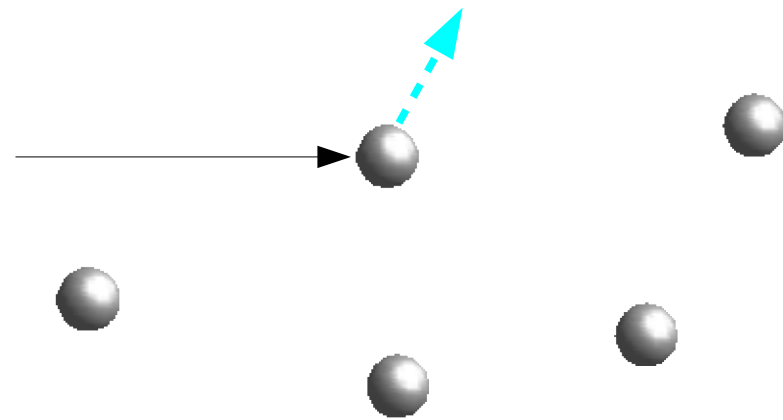
電磁波

- 電磁波：電場と磁場の波（場の時間変化） ← 場の考え方を使わないと理解しにくい
- 電磁波：可視光，赤外，紫外線，ラジオ/TV 電波，X 線， *etc.*
- 量子力学的には光子の流れ.

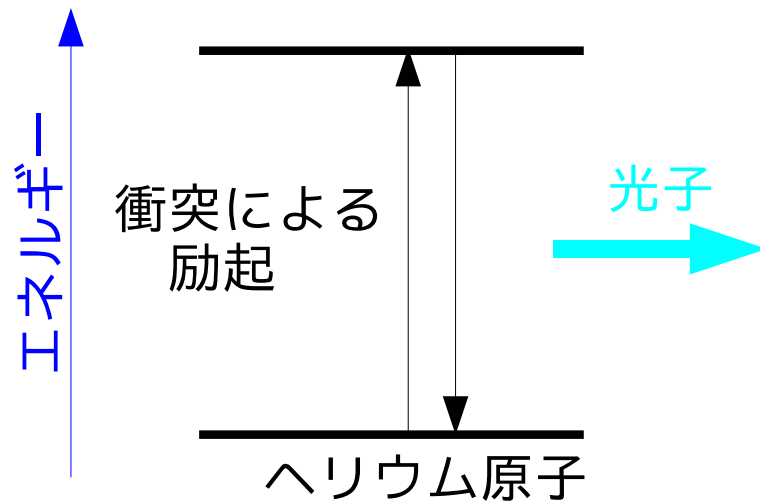


- 電場と磁場が進行方向に垂直，互いに垂直に振動.
- 電場だけの波？磁場だけの波？ → 存在しない
- 電場（磁場）の方向 = 偏光 (polarization)

原子と光



電子は見えないがヘリウムガス内ではヘリウム原子に衝突.



ヘリウム原子は電子からエネルギーを得て励起され，基底状態に戻る際に光子を放出する ← 量子力学的原子像

- ヘリウム原子が放出した光が見える

- ▶ ネオンサイン，水銀灯（蛍光灯）と基本原理は同じ.
- ▶ 色は原子の種類により決まる. いわば原子の「指紋」 ← 原子のスペクトルと量子力学，後期実験

電場と磁場 — 双対性 (duality)

- 電場 \leftrightarrow 磁場は似ている.
- 電場, 電荷 $(+, -)$ \leftrightarrow 磁場, 磁荷 (N, S) を交換しても運動方程式は厳密に同じ = 双対性, duality (P.A.M. Dirac 1931)
- 唯一の違いは電荷は単極子 $+, -$ が存在するのに対し, 磁荷単極子 (magnetic monopole) N, S が単独で存在しないことである.
- ここ 20 年程度はこの双対性の考え方は素粒子物理, 超弦理論に非常に大きな発展をもたらしている.
- 双対性 \Rightarrow 強結合 \leftrightarrow 弱結合