

物理学IIのクラス分けについて

物理学Iと同じく、基本的にABクラスの好きな方を受講できます。Aクラスは週1回、Bクラスは週1.6回。Bクラスは中間試験があります。

物理学実験について

薬学部は今日から、医学科は明日から物理学実験が始まります。実験の記録を取るための**実験ノート**を持ってきて下さい。

使いかけのノートでもよいので、1冊用意して下さい。実験の記録をレポート用紙やルーズリーフに書くと失くしやすいです。

この授業(物理学IIB)の方針

① 教科書は物理学Iと同じく「第5版物理学基礎」です。
内容は電磁気学です。教科書で予習・復習を行うことができます。

② 授業は主にプロジェクターを使って進めます。
毎回プリントを配ります。スライドは授業のサイト
<http://www3.u-toyama.ac.jp/physics/b2.html> で
ダウンロードできます。練習問題で計算機を使う
ことがあるので持ってきて下さい。



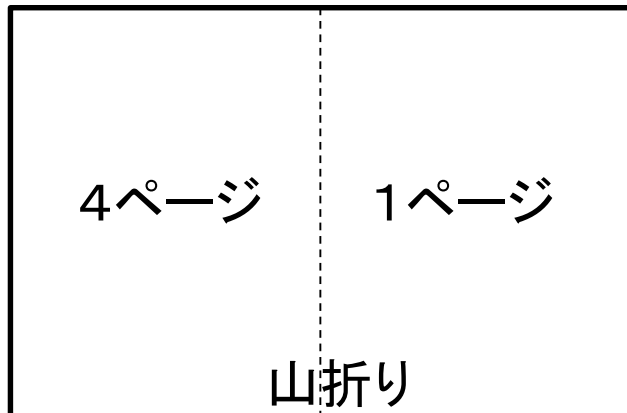
③ この授業の成績は、中間試験(30%)、期末試験(50%)、
出席・レポート等(20%)で決定します。

④ 授業中の質問歓迎します。授業の前後や、居室(杉谷の共同利用
研究棟5階)での質問もOK。居ないこともあるので、メールで予約す
ることを勧めますが予約なしでもOKです。

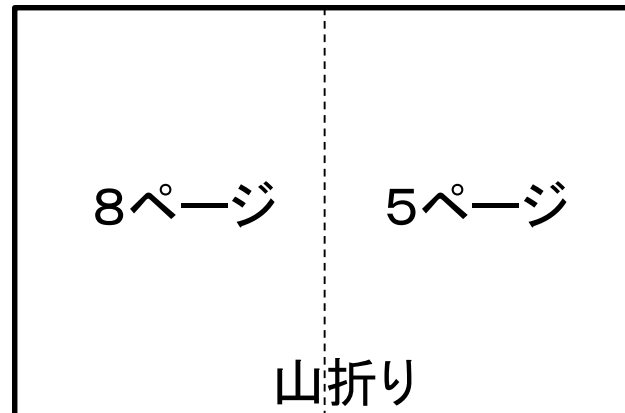
(syoshida@las.u-toyama.ac.jp)

プリントのページ

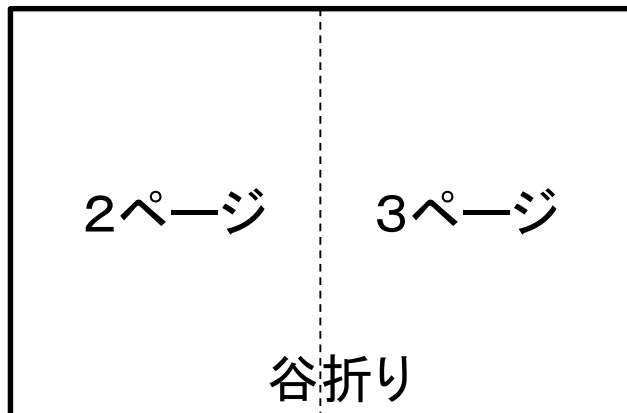
1枚目表



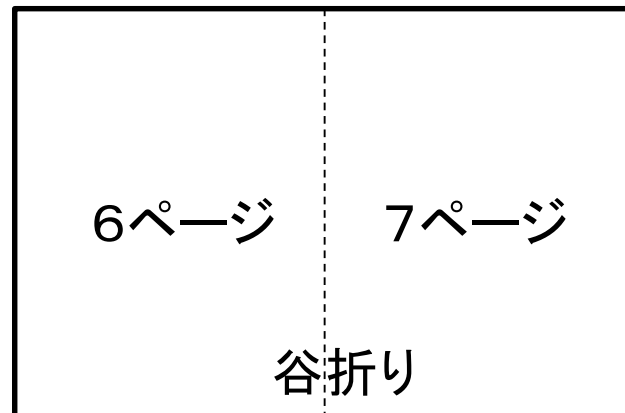
2枚目表



1枚目裏



2枚目裏



点線で折ってホッチキス等とじると冊子状になる。
点線で切ってクリアファイル等に入れても冊子状になる。

静電気（摩擦電気） p195

2種類の物質を接触させて離すことで起こる。摩擦することが本質ではない。

ビニールテープを使った実験

実験①: 机に貼ってあるビニールテープを引きはがし、手を近づけてみる。
セロテープでも良い。

実験②: 静電気測定器（左）でビニールテープの電位を測定
(p206で説明)



−5.0 kV (キロボルト)
(kV = 1000 V)

静電気測定器のしくみも、この授業で理解できるようになる。
医療機器等のしくみ等を理解するためには電磁気学の知識が必要。

電荷

正電荷

負電荷

電荷

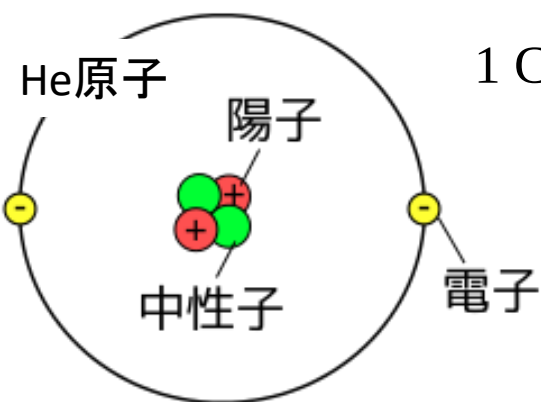
: 物体の帯びている電気, 正(プラス)と負(マイナス)がある。

電荷の正体(電荷を持つ粒子)

陽子

: プラスの電荷 $+e$ を持つ。 $e \doteq 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ (電気素量, 素電荷)

電子

: マイナスの電荷 $-e$ を持つ。 電荷の単位: クーロン(記号は C)

1 C(クーロン): 1 A(アンペア)の電流が流れている導線の断面を
1秒間に流れる電荷 $A = C/s$ (19章で学ぶ)

今はわからなくてよい。

$\doteq$ 陽子 6.2×10^{18} 個分の電荷
($1/e$)

陽子の電荷の絶対値と電子の電荷の絶対値は等しい。

→ 水素原子やヘリウム原子(左上)は中性

全電荷 =

陽子の数

 $\times e +$

電子の数

 $\times (-e)$

(電気素量の整数倍)

電荷保存則

陽子の数や電子の数は変化しない(化学反応が起こっても) → 電荷は保存する
(陽子や電子は何もないところから出てきたり, 消えて無くなったりしない)

例外: β (ベータ)崩壊(教科書 p331)

電荷保存則: 閉じた系の全電荷は一定

$0 \quad +e \quad -e \quad 0$
中性子 → 陽子 + 電子 + 反電子ニュートリノ

β 崩壊の場合も電荷は保存

試験に出ません

正電荷を帯びた物体(プラスに帯電した物体): 電子の数 < 陽子の数

負電荷を帯びた物体(マイナスに帯電した物体): 電子の数 > 陽子の数

(正に帯電: 電子が逃げて少なくなった状態。負に帯電: 電子が過剰の状態)

動き回るのは 電子, 陽子は原子核中にあり, 原子核は物体に固定されていて動けない。
(例外: 陽イオン等)

ちょっと横道にそれで・・・

問題：電荷保存則は厳密に成り立つが、他に厳密に成り立つ保存則を3つ書け。

① エネルギー 保存則, ② 運動量 保存則, ③ 角運動量 保存則

質量は厳密には保存しない

試験に出ません

$$E = mc^2$$

(質量はエネルギーの形態の一つ)

化学反応: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{熱}$ 約5700 t で 1 g 軽くなる(熱の分)

核融合: $4\text{H} \rightarrow \text{He} (+2\text{陽電子} + 2\text{電子ニュートリノ}) + \text{熱}$ 約1%軽くなる

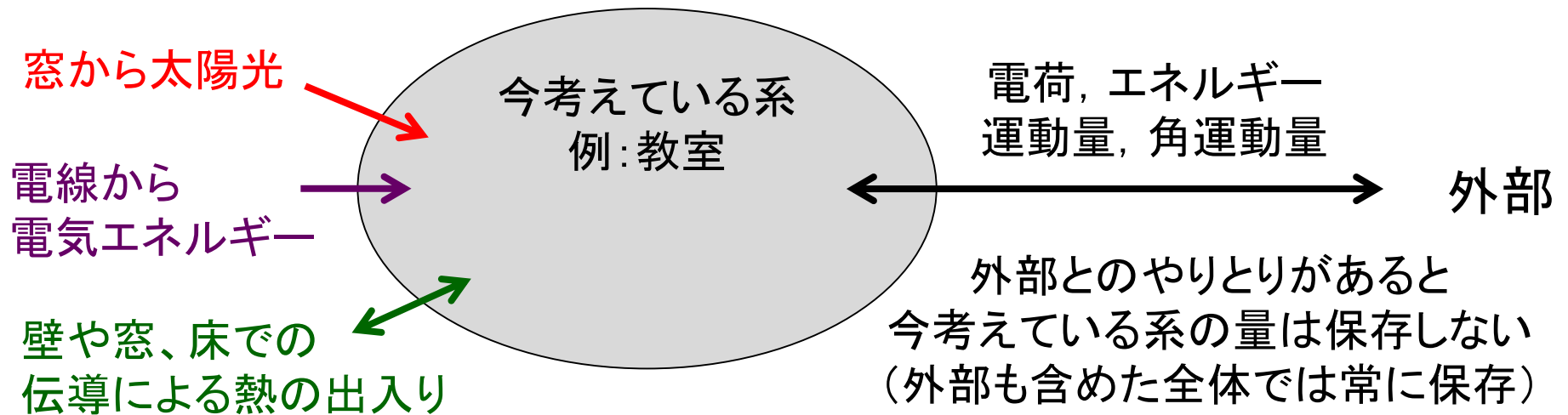
対消滅: 電子+陽電子 $\rightarrow 2\gamma$ (光子) 質量は 0 になる(100%軽くなる)

p329 質量欠損 参照

注：宇宙の膨張を考慮するような時間と空間のスケールでは、エネルギーは保存しない。

保存則を適用する際の注意

例: この教室の全エネルギー



窓無、完全な断熱、電気の流出入無 → 保存則適用

本題に戻って・・・

静電気(摩擦電気)の起こるしくみ

物質によって、電子を物体に結びつける力が異なる。

2つの異なる物質を接触させて引き離すと

電子を結びつける力の弱い物質から

電子を結びつける力の強い物質に電子が移る。

例:セーターを脱ぐ時
羊毛と綿

布等の繊維状の物質で摩擦する＝連続して、接触・引き離しが起こる
(接触して引き離すことが本質)

電子を結びつける力の弱い物質: **プラス** に帯電, 強い物質: **マイナス** に帯電
正 負

帯電列

電子を結びつける力が弱い
プラス(正)に帯電

電子を結びつける力が強い
マイナス(負)に帯電

テフロン	塩化ビニール	セロファン	セルロイド	ポリエチレン	アクリル	ポリエステル	ポリプロピレン	白金	ポリスチレン	ゴム	金	ニッケル	銅	鉄	エポナイト	クロム	紙	アルミニウム	アセテート	亜鉛	ガラス繊維	人などの皮膚	木材	麻	木綿	絹	鉛	レーヨン	ナイロン	羊毛	雲母	ガラス	人毛・毛皮	アスベスト
------	--------	-------	-------	--------	------	--------	---------	----	--------	----	---	------	---	---	-------	-----	---	--------	-------	----	-------	--------	----	---	----	---	---	------	------	----	----	-----	-------	-------

実験: 塩化ビニールの棒を頭の毛で摩擦してみる。

問題: 実験①②で、テープの材質(基材: ビニール)はあまり関係ない。なぜか?

机と接触していたのは粘着剤だから

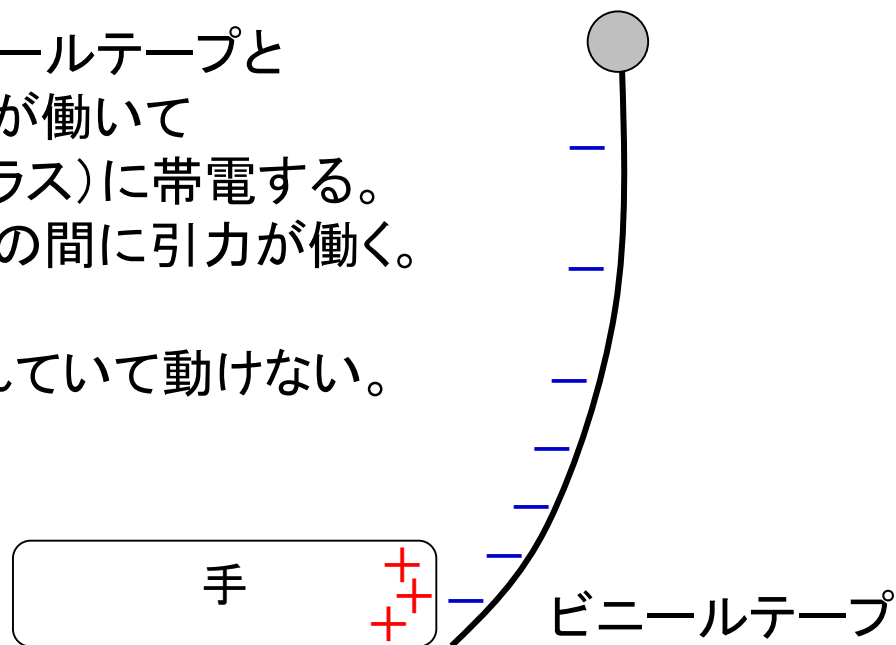
後の実験④参照

帯電した物体に手を近づけると引力が働くしくみ

(実験①の解説)

負(マイナス)に帯電しているビニールテープと
手の中の電子の間に反発力が働いて
電子が手から逃げていき、手が正(プラス)に帯電する。
その結果テープの負電荷と手の正電荷の間に引力が働く。

正の電荷を担う陽子は原子に固定されていて動けない。
移動するのは電子。



正の電荷が引き寄せられる
わけではない。

電気力

(電荷と電荷の間に働く力)

同符号の電荷間には

反発力(斥力)

が働き、異符号の電荷間には

引力

が働く。

例: 正と正、負と負

正と負

ビニールテープを使った実験 のつづき

実験③: 机に貼ってあるビニールテープを2枚引きはがす。

問題: 2枚のテープの間に働く力は引力か反発力か。_____ 反発力

実験④: ビニールテープを2枚、同じ向きに重ねたもの(向かい合わせではない)を空中で引きはがす。

問題: 2枚のテープの間に働く力は引力か反発力か力は働かないか。_____ 引力

実験③, 実験④の解説

実験③: テープはどちらも負に帯電している。同種の電荷に働くのは 反発力

実験④: 同じ物質の間では摩擦電気(静電気)は起らない。

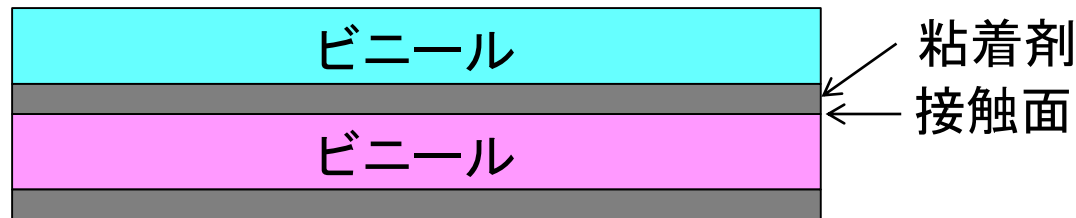
例: 羊毛のセーターも、その下の服の素材が羊毛なら脱いでも静電気は起らない。

しかし、2枚のビニールテープの接触している部分は同じ物質ではない。

上のテープは粘着剤が、下のテープは基材のビニールが接触している。

よってこれらをひきはがすと、静電気が発生する。

一方が正に帯電し、他方が負に帯電するので 引力



実験⑤a: 静電気測定器で上(青)のビニールテープの電位を測定: + kV

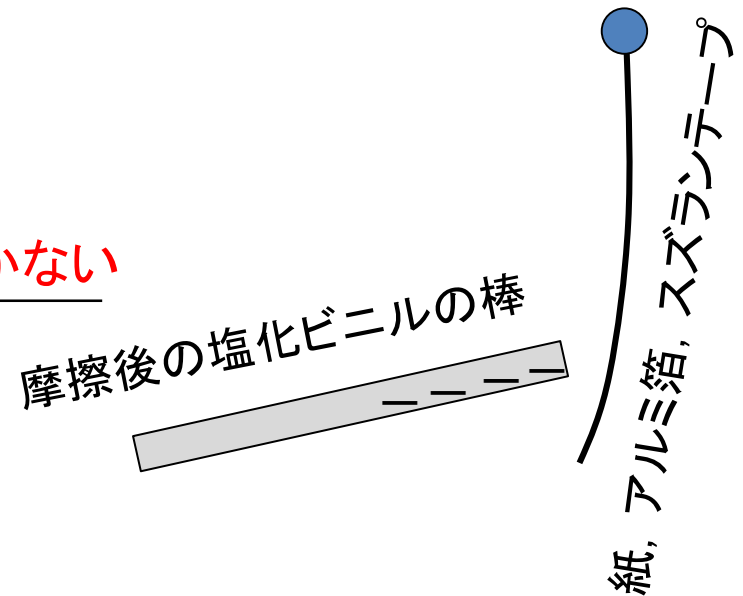
実験⑤b: 静電気測定器で下(赤)のビニールテープの電位を測定: - kV

注: 粘着のしくみは複雑です。

応用問題: 右図のように帯電した物体を帯電していない物体に近づけるとどうなる？

一番くっつくのは？

- ①紙 **よくくっつく**
- ②アルミ箔 **よくくっつく**
- ③スズランテープ(ポリエチレン) **あまりくっつかない**
運動会の応援で使う「ポンポン」に使う



問題: 結果の違いはの原因は何か？

電気(電流)の流れ易さ: アルミニウム > 紙 > ポリエチレン

電子が逃げやすい
(正に帯電しやすい)

電子が逃げにくい
(正に帯電しにくい)

(答付きのスライドはウェブで見れます。)

16.2 クーロンの法則 p196

⑮

帯電した2つの小さな物体(点電荷)間に働く電気力の大きさ F は、2つの物体の電荷 q_1, q_2 の積に比例し、物体間の距離 r の2乗に反比例する。

q : 電荷の記号

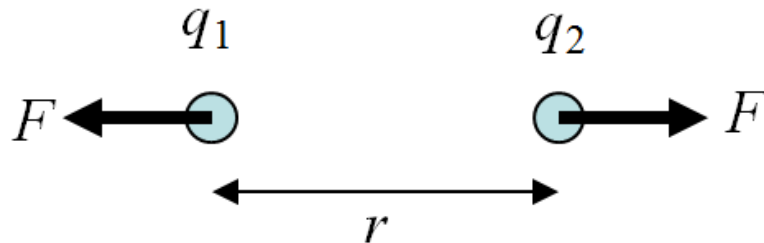
似たもの: 質点

点電荷: 大きさが無視できるほど小さい帯電体 (理想化した帯電体)

クーロンの法則に従う電気力を **クーロン力** という

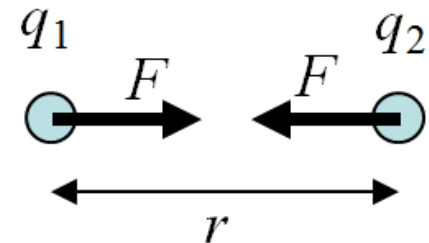
同符号の電荷

$$q_1 q_2 > 0$$



異符号の電荷

$$q_1 q_2 < 0$$



力の大きさ:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

真空中の場合

(空気中でもほとんど同じ)

クーロン力

力の大きさ:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

高校では k_0

真空中の場合
(空気中でもほとんど同じ)

比例定数 $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.988 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 = c^2/10^7$ (理由は22.2節)
 c : 光速 ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

イプシロン・ゼロと読む

ϵ_0 :

電気定数

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$$

(真空の誘電率) 誘電率は18章で

k_0 の方が簡単で良いと思うかもしれないが、 ϵ_0 の方がより本質的で応用がきく。
 後で勉強するガウスの法則等では ϵ_0 の方がより簡単な式となる。
 この授業(教科書)では k_0 でなく ϵ_0 を用いる。

問題：1.0 cm 離れた2つの帯電した物体の間に 1.0 グラム重の引力が働いている。

1 g の物体に働く重力の大きさ $\div 0.01 \text{ N}$

(1) 2つの電荷の符号は同符号かそれとも異符号か。

異符号

(2) 2つの物体の電荷の絶対値が等しいとしたとき、その値を求めよ。
ただし、帯電した物体は点電荷と考えてよい。

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} = 0.01$$

$$q^2 = \frac{0.01 \times (0.01)^2}{9.0 \times 10^9} \div 1.11 \times 10^{-16}$$

$$9.0 \times 10^9 \frac{q^2}{(0.01)^2} = 0.01$$

$$q \div 1.05 \times 10^{-8}$$

答付きのスライドはウェブで見れます。

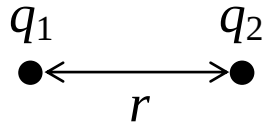
書き写すことに一生懸命にならず、解いてみましょう。

答: $1.1 \times 10^{-8} \text{ C}$

1 C という電荷はとても大きな量
通常帯電している物体の電荷量は 1 C より何桁も小さい。

クーロン力の式に 1 C を入れてみると...

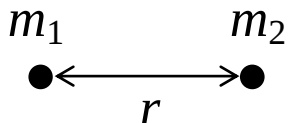
(電気力) クーロン力 と 万有引力



$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

定数
 9×10^9

1.6×10^{-19}



$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

重力
定数
 7×10^{-11}

どちらも、同じ形で表すことができ、**基本的な力**。ただ、重力はクーロン力より弱い。

例：手が黒板を押す力・黒板が手を押す力，摩擦力 → 微視的には電気力

(現象論的な力)

$9 \times 10^{-31} \text{ kg}$ $1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$

電子と電子，陽子と陽子の間に作用する電気力と重力を比べてみよ。 **40桁**
なぜ、普段の生活で強い電気力をあまり感じないのか？

身の回りの物体はほぼ中性だから，電荷には正負があるから
答：_____

ベクトル形でのクーロンの法則

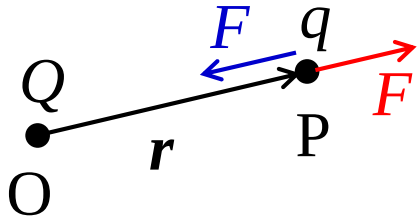
プリント・スライドではベクトルは**太字**，黒板では**二重線**か**上に矢印**

F

$\parallel F$ $\vec{F}$

スカラー： F (力の大きさ)

原点 O に点電荷 Q があるとき，点 P (位置 $\mathbf{r}$) にある点電荷 q が受ける電気力 $\mathbf{F}$ は



$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r}$$

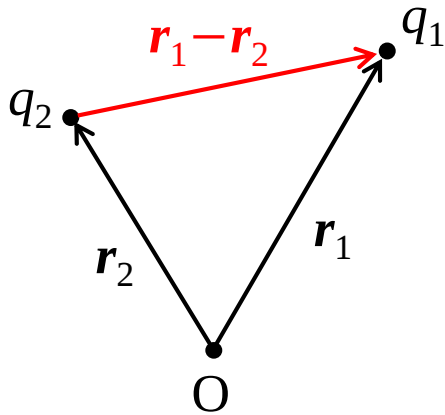
$\frac{\mathbf{r}}{r}$: $\mathbf{r}$ の方向を向いた
長さが 1 のベクトル
(単位ベクトル)

クーロン力の大きさは、
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|qQ|}{r^2}$$

クーロン力の向きは，
 qQ が正 (同符号) のとき $\mathbf{r}$ と同じ向き (反発力)
 qQ が負 (異符号) のとき $\mathbf{r}$ と逆向き (引力)

問題: 点電荷 q_1 の位置ベクトルを $\mathbf{r}_1$, 点電荷 q_2 の位置ベクトルを $\mathbf{r}_2$ としたとき、
点電荷 q_2 が点電荷 q_1 に作用する電気力 $\mathbf{F}_{1\leftarrow 2}$ はいくらか?

答えはイメージできると思う。問題はベクトルでどう表現するか



$$\text{電気力の大きさ: } |\mathbf{F}_{1\leftarrow 2}| = \frac{|q_1 q_2|}{4\pi\epsilon_0 |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|^2}$$

電気力の $\mathbf{F}_{1\leftarrow 2}$ の向き

q_1 と q_2 が同符号の時は反発力 ($\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$ と同じ向き)

q_1 と q_2 が異符号の時は引力 ($\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$ と逆向き)

一つ前のスライド①⑨と同じようにやればよい。

$$\mathbf{F}_{1\leftarrow 2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|^2} \frac{\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}$$

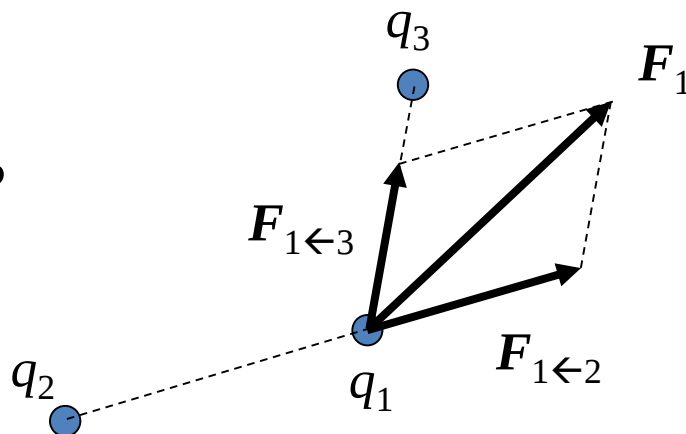
↑
単位ベクトル

紫字の部分は頭の中を整理する意味で書いただけで解答としては赤字のみで十分
答付きのスライドはウェブで見れます。
書き写すことに一生懸命にならず、解いてみましょう。

2つ以上の電荷がある場合の電気力

ベクトルの足し算

- ① 平行四辺形の対角線
- ② 一方の矢印の終点から
他方の矢印を描く



$q_1q_2 > 0$, $q_1q_3 < 0$ の場合

電荷 q_1 に働く電気力 F_1 は,
電荷 q_2 からの電気力 $F_{1\leftarrow 2}$ と電荷 q_3 からの電気力 $F_{1\leftarrow 3}$ のベクトル和

$$F_1 = F_{1\leftarrow 2} + F_{1\leftarrow 3}$$

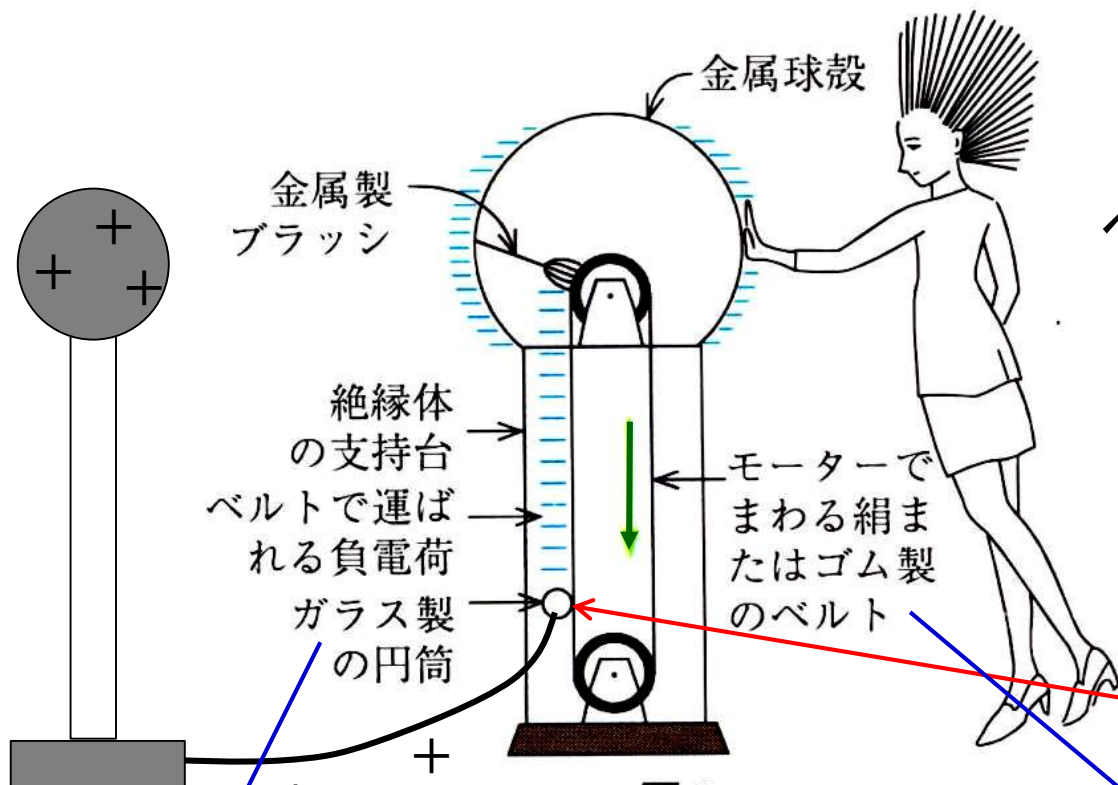
(電気力の 重ね合わせ の原理)

万有引力の重ね合わせも同じ

バン・デ・グラーフ発電機のしくみ

発明者
の名前

摩擦電気(静電気)を利用して高電圧を発生させる装置



コンセントからの電力は
ベルトを回すモーターを動かすだけ
(手で回せば電気は要らない)

純粹に摩擦電気(静電気)で
高電圧を発生している

ここでゴムベルトと
ガラス製の円筒が
こすれ、静電気が発生

図 2

教科書p220

帯電列

アスベスト	人毛・毛皮	ガラス	雲母	羊毛	ナイロン	レーヨン	鉛	絹	木綿	麻	木材	人などの皮膚	ガラス繊維	亜鉛	アルミニウム	紙	クロム	エポナイト	鉄	銅	ニッケル	金	ゴム	ポリスチレン	白金	ポリプロピレン	ポリエチレン	アクリル	セルロイド	セロファン	塩化ビニール	テフロン
-------	-------	-----	----	----	------	------	---	---	----	---	----	--------	-------	----	--------	---	-----	-------	---	---	------	---	----	--------	----	---------	--------	------	-------	-------	--------	------

正に帯電しやすい

負に帯電しやすい

バン・デ・グラーフ発電機を使ってみる

天気: _____, 温度 _____ °C, 湿度 _____ %

(湿度が高いと貯まった電荷が逃げやすい→発生する電圧が低くなる)

実験①: 静電気測定機で金属球殻の電位を測定してみる。 _____
測定範囲 -22 ~ +22 kV

実験②: 放電(火花放電)させてみる。何センチ離すと放電しなくなるか。 _____ cm

空気の絶縁破壊は 1 cm あたり 30000 V 程度で起こる。

金属球間の電位差(電圧)は、実験②の値 × 30000

金属球間の電位差(電圧)は _____ V

電位・電圧は後で勉強します

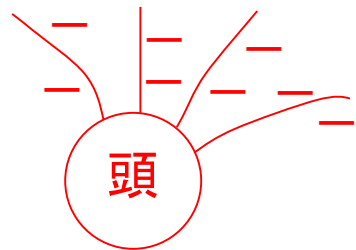
実験③: スライド②②の図のように、実際に髪の毛等逆立てる実験をする。

問題: 実験を成功させるために注意する点や図にない工夫としてどのようなことが考えられるか。

注意点: 実験をする人は、近くの人や物から離れる。人や物に近づいたり触れると火花が飛んだり、ビリッとくる。

工夫する点: 実験する人は床に立っているので、床に触れている。
溜まった電荷が逃げないように、床と靴の間に発泡スチロール等の電気を通さないものを挟む。靴で十分な場合もある。

なぜ逆立つのか説明せよ。



左図のように、髪の毛も負に帯電し、髪の毛と髪の毛の間には互いに反発力が生じ、他の髪の毛から出来るだけ遠ざかるうとして髪の毛が逆立つ。