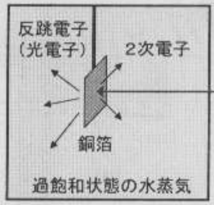
3
10/13(水)

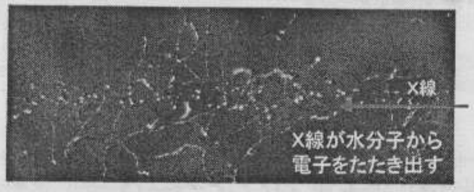
コンプトン効果によって反跳された電子 / 光電効果によって飛び出した光電子 を見るーWilson の霧箱ー

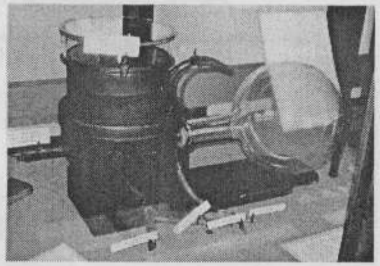
霧箱を発明→ C. T. R. Wilson, Proc. Roy. Soc. A 104, 1 (1923)

1927年のノーベル物理学賞
「霧箱を用いた荷電粒子の飛跡を観察する方法の開発」

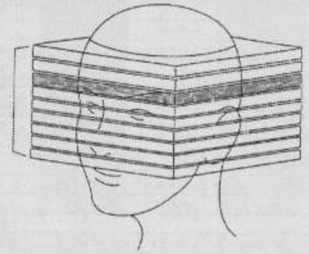
ステレオ写真

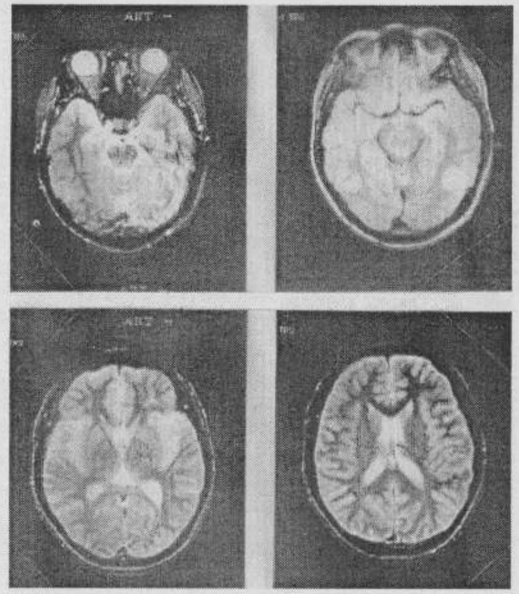






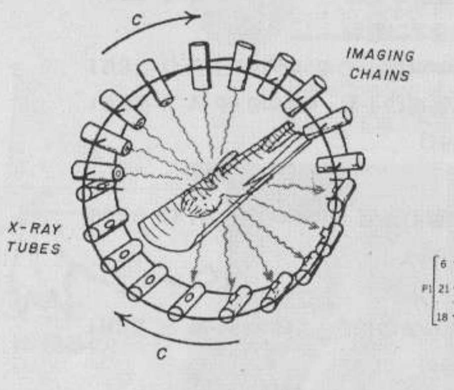
CT Computerized Tomography 電算機断層撮影法

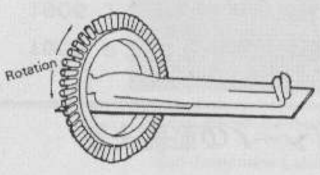




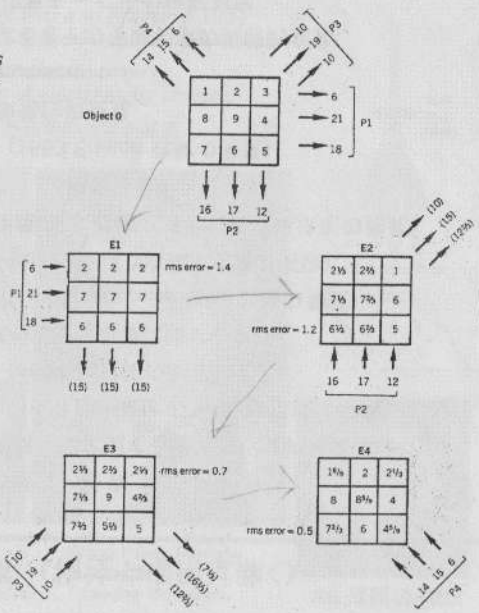
CT スキャナー(→ MRI)

CTの原理





Iterative reconstruction algorithms



期末に出る (2問中1問出る)

問題1:水素原子からの発光の振動数ν(または波長λ)は2つの主量子数n_1とn_2を用いて

$$\frac{1}{\lambda}=\frac{\nu}{c}=R\cdot(\frac{1}{n_1^2}-\frac{1}{n_2^2})$$

と書ける。ここでRはRydberg定数である。

原子番号Zの原子からの発光の振動数が $\frac{1}{\lambda}=\frac{\nu}{c}=z^2\cdot R\cdot(\frac{1}{n_1^2}-\frac{1}{n_2^2})$ と書けることを示せ。(モーズレーの法則)

問題2:

近似なし 運動量,エネルギー保存

(1) Comptonの散乱公式を相対論的に導け。つまり、波長λのX線光子が、静止している電子に衝突し、入射X線方向から測ってθ方向に散乱された。その散乱X線の波長λ'が

$$\lambda'=\lambda+\frac{h}{mc}(1-\cos\theta)$$

と書けることを示せ。ここで、mは電子の静止質量、cは光速度。

エネ保
$h\nu+mc^2=h\nu'+c\sqrt{(mc)^2+p^2}$

(2) (1)で衝突前の電子が入射X線方向に速度 $v_0=\beta_0 c$ で運動している場合のλ'を相対論を使って求めよ。

v_0

The Nobel Prize in Physics 1923

"for his work on the elementary charge of electricity and on the photoelectric effect"

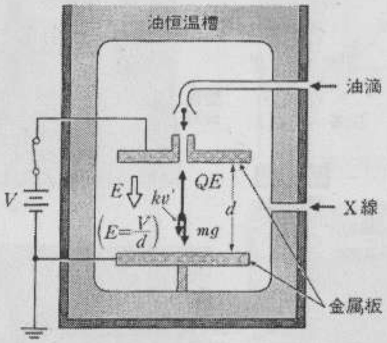
電荷の単位と光電効果に関する業績に対して

Physical Review **32**, 349-396 (1911).

Robert Andrews Millikan

California Institute of Technology (Caltech) , Pasadena, CA, USA

b. 1868 d. 1953



測定された油滴の電荷
($\times 10^{-19}$ C)

29.87
36.86
28.25
29.91
34.91
36.59
28.28
34.95
39.97
26.65
41.74
30.00
33.55

Millikan の $e=(1.592\pm0.003)\times10^{-19}$ C

現在の値 $e=1.60219\times10^{-19}$ C より0.6%小さい

H.A. Wilson 1903 水滴で上と同じことを実験した
→ 蒸発

課題3—ミリカンの実験のデータ解析—

ミリカンは、有名な油滴の実験によって電気素量の値を決定した。噴霧器で作った小さな油滴にX線を照射し、光電効果によって油滴から電子を放出させる。そうすると、油滴は正に帯電する。このとき、電場を鉛直方向に印加すると油滴に静電気力が働き、重力と空気抵抗の釣り合いから、その電荷量を測定できる。

しかし、このとき、油滴から複数個の電子が飛び出してしまい、しかも何個の電子が飛び出したのかわからない。さらに、異なる油滴で多数回実験すると、必ずしも同じ数の電子が光電効果で放出されるわけではない。しかし、測定された個々の油滴の電荷は、電気素量の整数倍になっているはずである。ミリカンは、たくさんの油滴を作って測定し、多数の測定データを得て、電気素量の値を推定した。

下記の１３個の測定データは、ミリカンが実際に得たもので、１３個の異なる油滴の電荷量である（10^{-19}C単位で書かれている）。このデータから、電気素量の推定値、および、その誤差を求めよ。もちろん、ミリカンは、電気素量がおよそ1.6×10^{-19} Cであることは知らなかったので、初めからこの値を頼りに見当をつけた解析をしてはいけない。また、それぞれの測定値は、$\pm0.01\times10^{-19}$ Cの誤差を持つとする。

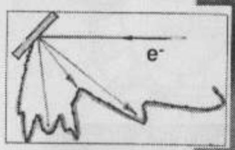
（ヒント：電荷量の差も電気素量の整数倍であり，差の差も整数倍，差の差の差も...）

29.87	36.86	28.25	29.91	34.91	36.59	28.28	34.95	39.97
26.65	41.74	30.00	33.55	($\times10^{-19}$C)				

The Nobel Prize in Physics 1937

"for their experimental discovery of the diffraction of electrons by crystals"

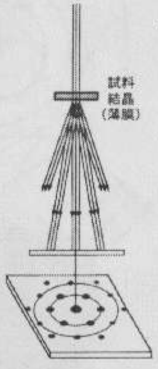
結晶による電子の回折の実験的発見

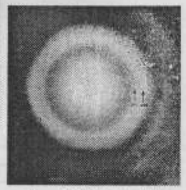


Ni 結晶のLEED

Clinton Joseph Davisson
USA
Bell Telephone Laboratories

George Paget Thomson
Great Britain
London University





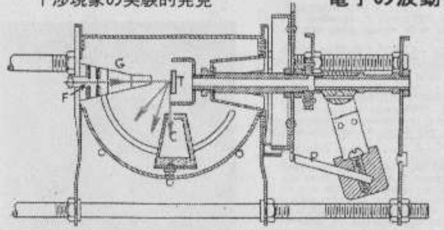
Au 薄膜のTED

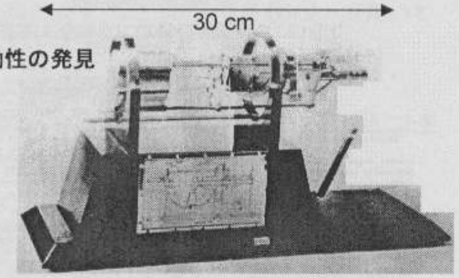
Davisson と Germer の実験 — 最初の電子回折 — (LEED 75 eV)

C. Davisson and L. H. Germer, Phys. Rev. **30**, 705-740 (1927)

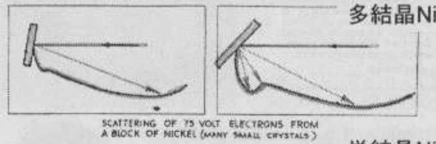
1937 ノーベル物理学賞　結晶による電子の干渉現象の実験的発見

電子の波動性の発見

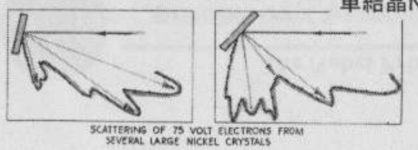


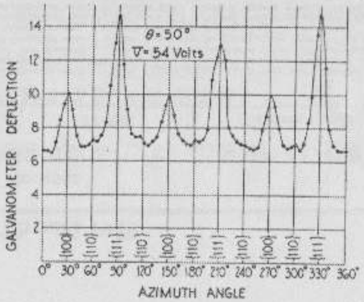


多結晶Ni

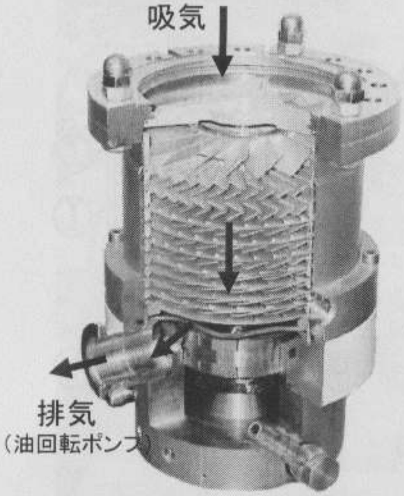


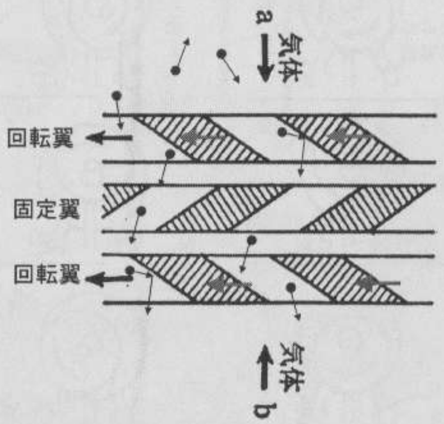
単結晶Ni





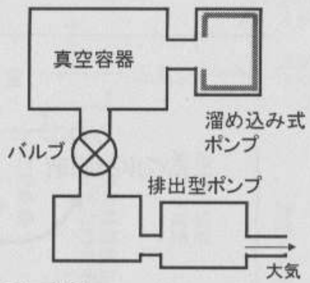
ターボ分子ポンプ（Turbo Molecular Pump）





斜めに配置されたタービン翼を高速回転（数万rpm）させて、気体分子を弾き飛ばすことにより、a から b への通過確率と b から a への通過確率に差をつけて排気。

溜め込み式ポンプ



・排出型ポンプ:
真空容器の外に気体分子を排気する
ピストン型ポンプ、油回転ポンプ、
油拡散ポンプ、ターボ分子ポンプ

・溜め込み式ポンプ:
気体分子を真空容器の壁に付着させてしまう。

イオンポンプ
ゲッターポンプ
チタン（非常に活性な金属）と気体分子を化学結合（化学吸着）
新しいチタン面を出す工夫

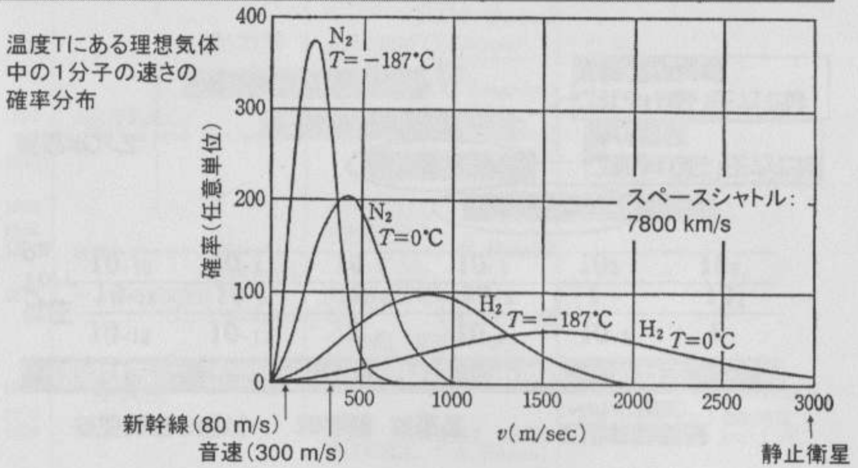
ソープションポンプ
クライオポンプ
低温にした粉末や板に気体分子を吸着（物理吸着）
（温度があがると気体分子が離れて圧力があがる）

Maxwell-Boltzmann の速度分布則　多数回の衝突 ⇒ 熱的な平衡状態 (Bose分布)

1つの分子が速度 (v_x, v_y, v_z) と $(v_x + dv_x, v_y + dv_y, v_z + dv_z)$ の間にある確率

$$f(v_x, v_y, v_z)dv_x dv_y dv_z = \left(\frac{m}{2\pi k_B T}\right)^{3/2} exp\left\{-\frac{m\left(v_x^{\ 2} + v_y^{\ 2} + v_z^{\ 2}\right)}{2k_B T}\right\} dv_x dv_y dv_z$$

温度Tにある理想気体中の1分子の速さの確率分布



問題4　極座標で角度で積分

（1）速さの分布則（速さがvと$v+dv$の間にある確率）が下記で表されることを示せ。

$$g(v)dv = \frac{4}{\sqrt{\pi}}\left(\frac{m}{2k_B T}\right)^{3/2} \cdot v^2 \cdot exp\left\{-\frac{mv^2}{2k_B T}\right\} dv$$

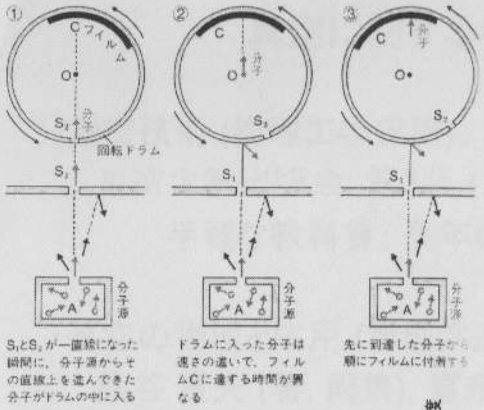
（2）平均の速さ　$\overline{v} = \int_0^\infty v \cdot g(v) dv$　を求めよ。

（3）二乗平均速さ　$v_R^2 = \int_0^\infty v^2 \cdot g(v) dv$　を求め、

それから平均エネルギー　$E = \frac{1}{2} m v_R^2$　を求めよ。　$E = \frac{3}{2} k_B T$

Maxwell-Boltzmannの速度分布則の実験的検証

I. F. Zartman,
Phys. Rev. **37**, 383 (1931).



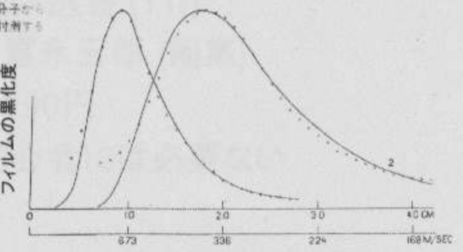
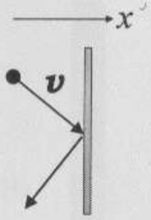


Fig. 4. Theoretical and experimental intensity distributions assuming a vapor composition of 40 percent Bi and 60 percent Bi_2. T equals 851°C. Curve 1, n = 120.7 r.p.s., curve 2, n = 241.4 r.p.s. Bottom line gives the molecular velocity corresponding to several displacements at a cylinder speed of 241.4 r.p.s.

平成20年度 大学院修士課程
(物理学専攻)入試問題参照

気体分子の衝突と圧力 p



気体分子が壁に完全弾性衝突する

$v_x \longrightarrow -v_x$

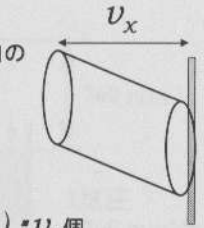
壁に与える力積

$2m\,v_x$

n: 数密度

単位体積あたり、x方向の速度v_xを持つ分子の数は $n \cdot f(v_x, v_y, v_z)$

1秒間に壁の単位面積当たりに$n \cdot f(v_x) \cdot v_x$個の分子が衝突



よってx方向の速度v_xを持つ分子によって、1秒間に単位面積の壁が受ける力積(=力)は、$2m\,v_x \cdot n \cdot f \cdot v_x$

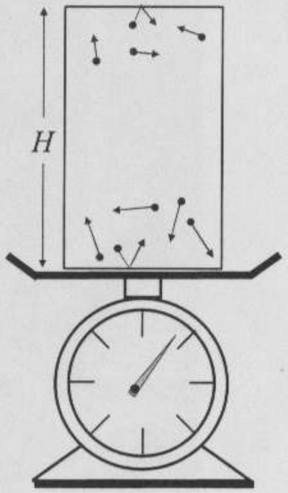
よって、圧力pは $$p = \int_{-\infty}^{\infty} dv_y \int_{-\infty}^{\infty} dv_z \int_{-\infty}^{\infty} dv_x\, 2mnv_x^{\,2} f(v_x, v_y, v_z)$$

$$= nm \cdot \frac{k_B T}{m} = nk_B T$$

数密度 $n = \dfrac{N}{V}$ だから $pV = Nk_B T$

気体分子の衝突と気体の重さ

分子が飛び回っている気体の重さって何?



問5

質量mの気体分子が数密度nで高さHの容器(底面積S)に閉じ込められている。容器の上の内壁と下の内壁に衝突する気体分子による力を考えて、この容器に閉じ込められた気体の重さを求めよ。 HSnmg

ヒント:重力によって、速度のz成分が高さによって異なることに注意。

問6

同じ考え方で、空気中で物体にはたらく浮力を求めよ。

極限環境(圧力と温度)