

構造化学 2回目

中田 真秀 13:20¹

光の波動性と粒子性

2-1: 波の復習 周期、振幅、波長、振動数、定在波、節、腹

2-2: 光の波動性と粒子性

2-3: 光の波動性: 光の干渉

2-4: 光の粒子性: 光電効果とコンプトン散乱

2-5: 光の観測: 波動性と粒子性は観測者が決める?

13:20

13:27

2-1 波の復習

① 波とは何か? Wikipedia によると、「同じようなパターンが空間を伝播する現象」と定義されている...

わかりづらい... 結局、色々な現象を数式で表し、判断する。これなる。

② 最も基本的な波: 正弦波

正弦波の一般的な表式

$$y = A \sin(kx - \omega t - \phi)$$

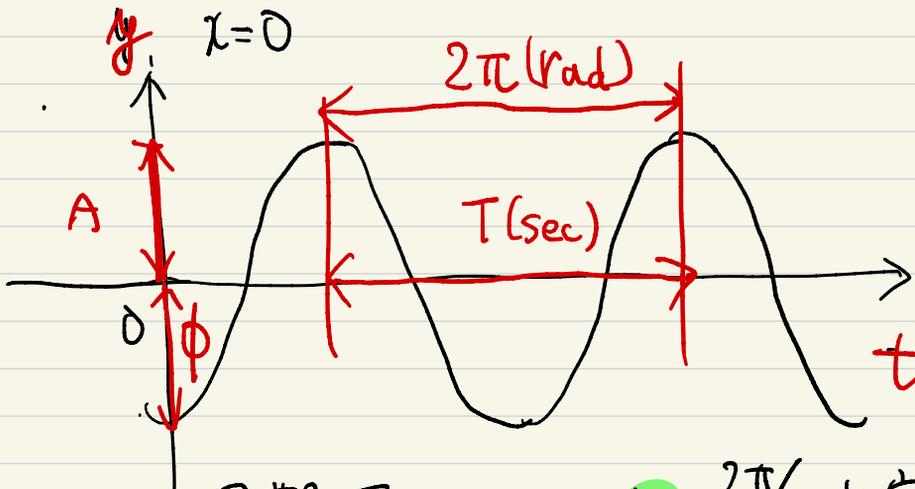
A : 振幅 (m)

ω : 角周波数 (rad/s) t : 時間 (s)

k : 波数 (rad/m) x : 原点からの距離 (m)

ϕ : 初期位相 (rad)

(t, y) から正弦波を見つると...

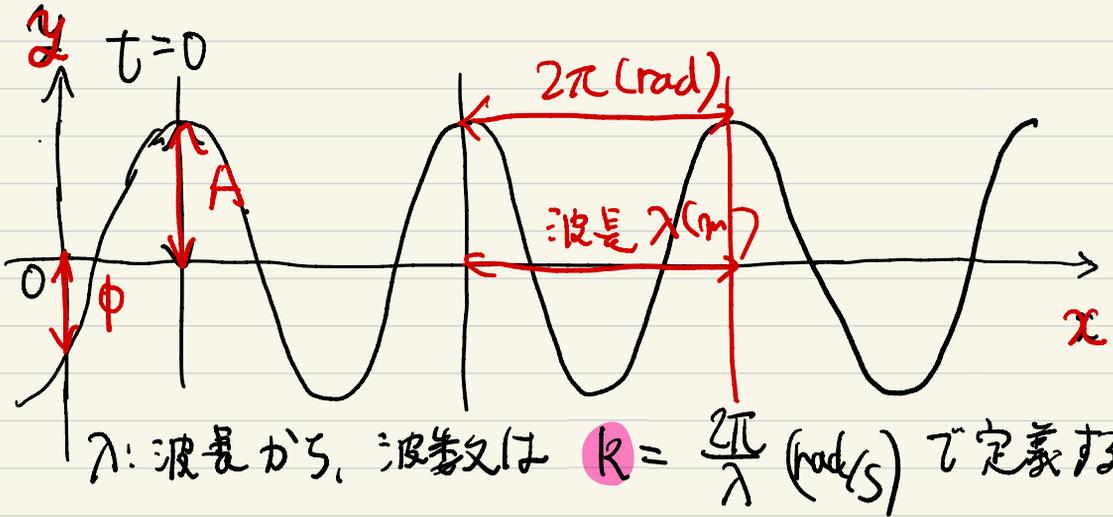


周期 T (sec) から、 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ と定めます。

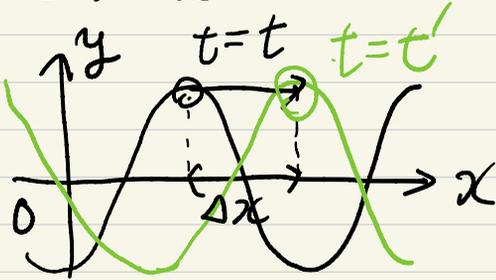
13:29

13:34

(x, y) から正弦波をたがめると...



① 波の速度



$$v = \frac{\Delta x}{t' - t}$$

 v : 波の位相速度

$$= \frac{\lambda}{T} = \frac{2\pi}{k} \cdot \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\omega}{k} \text{ (m/s)}$$

2-2. 光は波か粒子か? 光とはどんなもの? どうなる?

波動

ホイヘンス
1690 *Traite de la lumiere*
(光についての論考)

回折. 干渉

光を伝える媒体「エーテル」
の振動として表現

粒子

ニュートン
1704 *Opticks*

(光学: すなわち光の反射. 屈折)

回折. 色についての論考

直進性 (影)

反射. 屈折

プリズムによる分光. 色

1805 ヤング

二重スリット実験 (干渉)

(1900 プランク. 量子)

1905 アインシュタイン
光電効果.

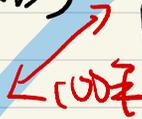
1864

マクスウェル
電場と磁場を統一

1923. コンプトン効果

粒子 + 波動 = 量子

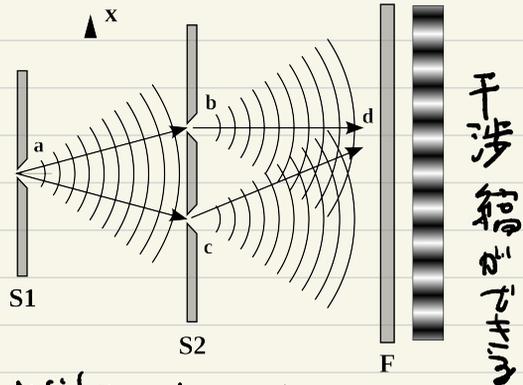
両方の性質をもつ.



13:41
13:48

2-3. 光の波動性 : ヤングの干渉実験.

二重スリットを通して光源からの光をスクリーンに投影すると、スクリーンに縞模様が表示される。これが、光の波動性を示したヤングの干渉実験である。



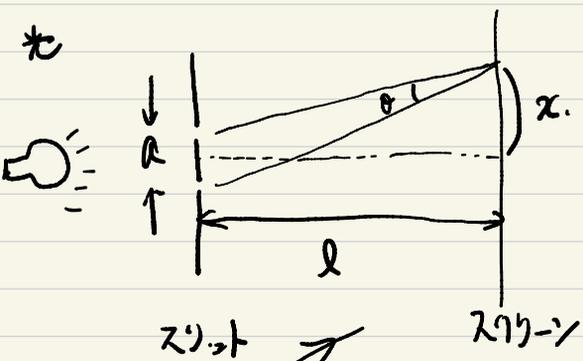
干渉縞の干渉

左下図のように設定する

光の行路差は、

Wikipediaより

$$a \sin \theta \doteq a \tan \theta = \frac{ax}{l}$$



明線の間隔は、

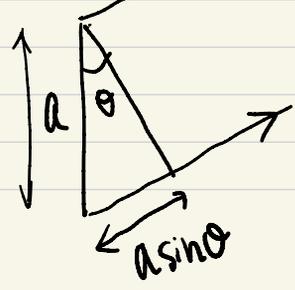
$$\frac{ax}{l} = n\lambda \quad (n=0,1,2,\dots)$$

暗線の間隔は

$$\frac{ax}{l} = (n + \frac{1}{2})\lambda$$

$(n=0,1,2,\dots)$

λ : 光の波長.



13:48

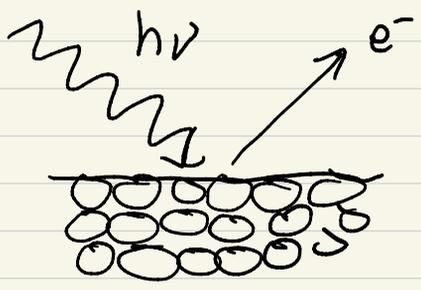
13:55

2-4. 光の粒子性: 光電効果とコンプトン散乱.

ニュートンの粒子説が200年、一度は波動説に負けたが、
粒子説がアインシュタインにより再びおびおびした。

実験事実.

物質に光をあけると、電子が放出され、以下のことがわかった。



- ① 光子振動数 ν_0 より低い振動数 ν の光があっても光電効果はない。
 ν_0 は、物質に固有の値である。
- ② 照射する光の振動数 ν が ν_0 より大きくなると放出される光電子のエネルギー E_p は $\nu - \nu_0$ に比例する。
放出される
- ③ 光の強度を強くしても、あたりの電子のエネルギーには変化はない。電子の個数は増える。
放出される

13:55

14:00

波動説との矛盾

●もし、光が波動とすると、エネルギーは電磁場の2乗に比例するはずなので、放出される電子も入射光の強みに依存するはず。

①との矛盾 光の強度をあげれば振動数が低くても光電効果はあきはず。

②との矛盾 光電子のエネルギーは、電磁場の強度の2乗に比例するはずだが、振動数のみに比例している。

③との矛盾 光電子のエネルギーは変化しはず。

アインシュタインの光子仮説 1905年

○光はエネルギーの粒であり、最小の粒が存在する。
光のエネルギーは、振動数で表す。

$$E = h\nu$$

14:00

14:04

① コンプトン散乱

光はボールのようにふるまふ。電子に照射すると非弾性散乱する。



入射光の波長 λ と 散乱光の λ' の関係式は、

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\phi)$$

どう考えるべきか?

光量子仮説 + 特殊相対論 をくみあわせる。

$$E = h\nu \quad E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2$$

光では $m_0 = 0$, より, 代入してゆくと。

$$p = \frac{h\nu}{c}, \quad p = \frac{h}{\lambda} \quad \text{となる!}$$

光の粒子性と波動性がかすむついで!

14:04

14:08

① 運動量の考え方をかえよう。

今まで、 $p = mv$ と物質の質量と速度をもとに運動量を定義していた。しかし、本質は違うと考えられる。運動量は質量がりの粒子でも互いにやりとりできる。自然は、先に粒子性と波動性を与えたわけだ。そしてより**基本的な**

物理的な変数は、運動量である

① 粒子性、波動性におお意味はない。

本質的な議論は、現象がどんな方程式に従うか? であり、粒子性などの性質おきではない。粒子性をどう定義するかは、多分に**遊びの**範囲であり、実験事実の前には無力である。
言葉

① 古典的な人間の意識に喝!

かといふこの世界観 **光は、粒子性と波動性をあわせもつ**。

というのは人間の**直観に反する**。次にこの不自然を**明確に**しめよう。

14:08
|
14:15

ホイラーの遅延選択実験 (1978)

光子は光の最小単位であり、これ以上分割できない。従って光源の出力を絞れば、1つづつ光子を飛ばすことができるはずだ。

011-フミラー

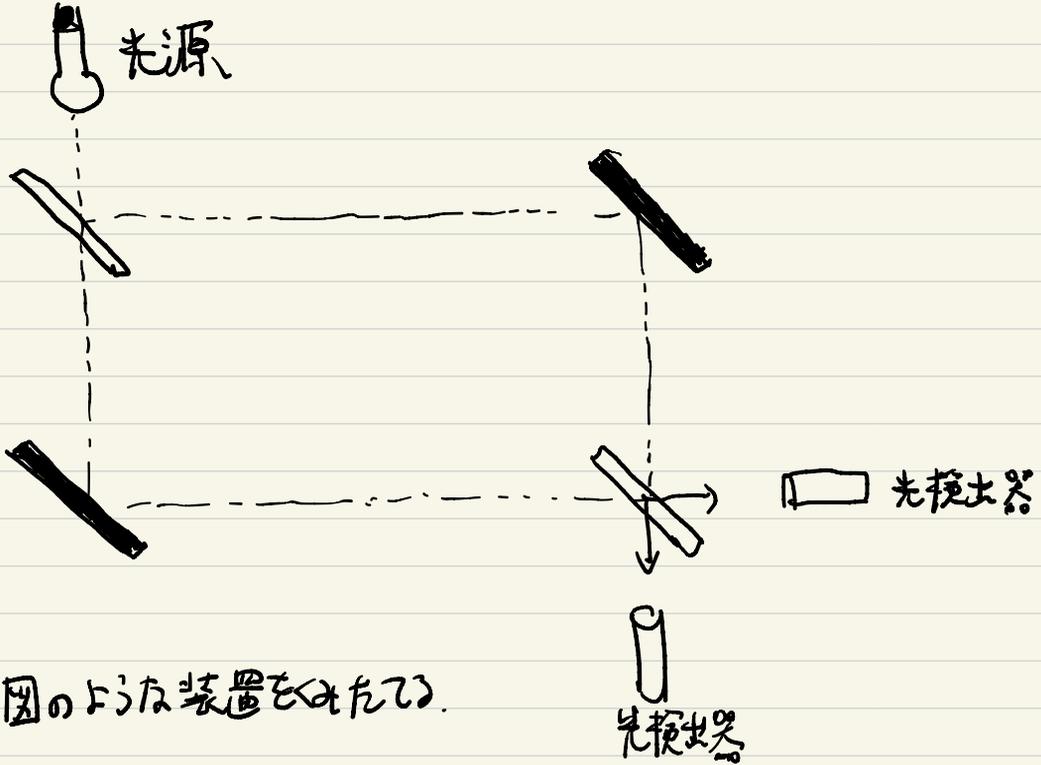
光を50%反射、50%透過する特殊な鏡がある。ガラスに金属をうすく蒸着させ、半透明にするように作れる。(金属を十分厚くすれば普通の鏡となる)

3つの実験を行う

- ① 光の波動性を確認する
- ② 光の粒子性を確認する
- ③ 光の粒子性と波動性はいっしょに選択されるかを調べる

14:15
1
14:22

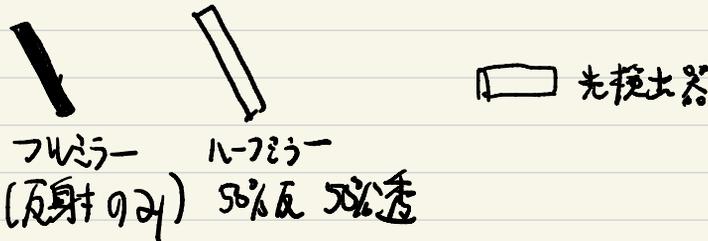
① 光の波動性を確認する。



② 上図のような装置を組み立てる。

③ 上経路, 下経路で
光の行路差は半波長ずれている

④ 光源をつけ、下の検出器のみ光を検出するように調整できる。

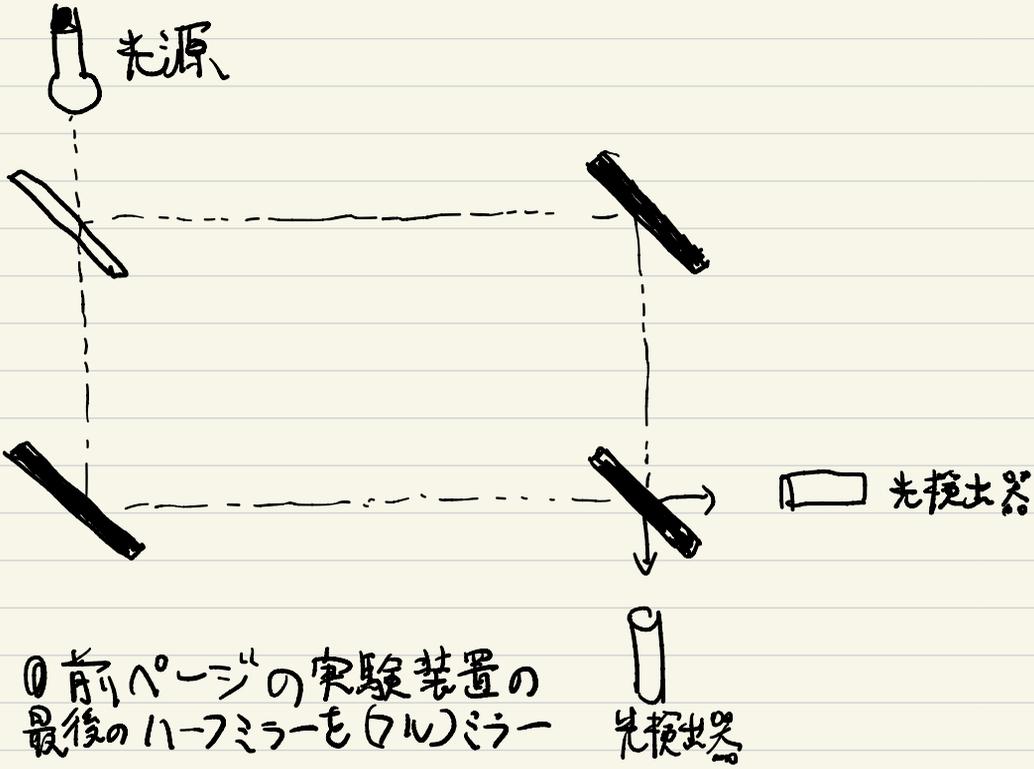


シュタインハルツェンダール干涉計 (1891, 1892) という有名な装置である

14:22

14:29

① 光の粒子性を確認する。



① 前ページの実験装置の最後の1/2ミラーをフルミラーにおきかえる。

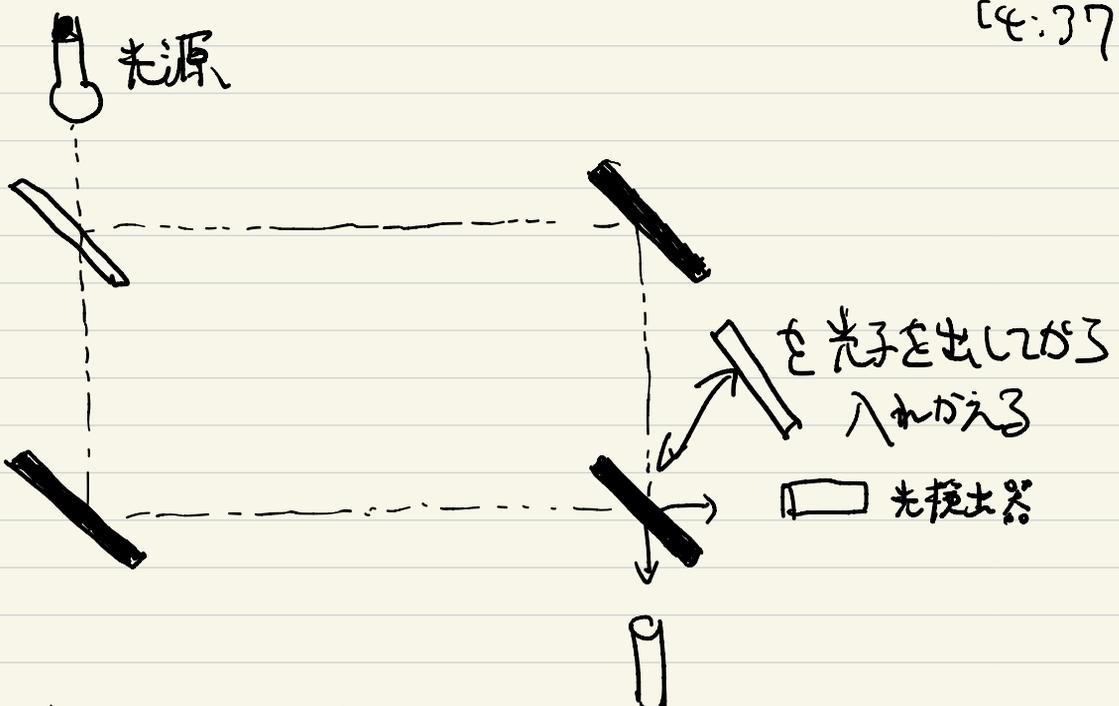
② 光源からの光をしばらく、光子を1つと仮す。

③ 光子は粒子なので、上の経路、下の経路どちらを通るかは50% 50%。

④ 光の検出器は50% 50%で、上、下の光検出器で検出する。

14:30
1
[4:37]

① 光の粒子性、波動性はいつ選択されるのか?



② 光子の粒子性、波動性はいつ選択されるのか?

- ハーフミラーだと波動性
- フルミラーだと粒子性

いづれ光子はハーフミラー-フルミラーを「認識」するのか? を問はず。

③ まずはフルミラーを置く。

④ 光源から光子を出した瞬間、フルミラーをハーフミラーに入れ替える。

結果はどうなるか?

入れがえすると、波動性を示すようになる。

14:37

14:45

考えよう

① 光子は何かの方法で自分の性質を決めるとする。

② 粒子性を選択する。としよう。

ならば、経路に鏡があることを知っている等。

ルーフミラーになってもその粒子性より、^{両方の}光の検出器
で 50% 50% で検出するはず。

③ 実験事実から、光子は途中でルーフミラーが存在することに
気づき、波動性も選択しなおす(ように見える)

観測結果が、過去の光子が自ら選んだ粒子性と波動性を
決めていように見える。これが遅延選択という意味である。