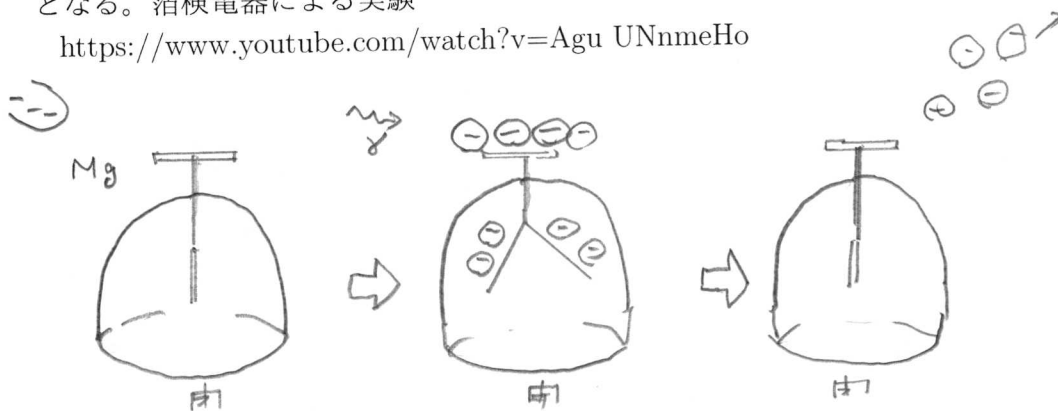


- (1) 電子の放出は、ある一定以上大きな振動数の光でなければ起こらない。
- (2) 振動数の大きい光を当てると光電子の運動エネルギーは変わるが飛び出す電子の数に変化はない
- (3) 強い光を当てるとたくさんの電子が飛び出すが、電子1個あたりの運動エネルギーに変化はない

となる。箔検電器による実験

<https://www.youtube.com/watch?v=Agu UNnmeHo>



1905年にアインシュタインは、これらのことは光が粒子であり、そのエネルギー  $E$  と運動量  $p$  が光の角振動数  $\omega$  と波数  $k$  と

$$E = \hbar\omega$$

$$p = \hbar k$$

のように関係していれな説明できるとした。左辺が  $(E, p)$  という粒子の属性で、右辺が  $(\omega, k)$  なる波動の属性であることに注意しよう。

それでは、光は波なのであろうかそれとも粒子なのであろうか？それを理解する手がかりとして実験を見よう。

### 2.3 単1光子によるヤングの2重スリットの実験

まず光源を弱くして1回の実験では光子が1こあるいは0この状況にしておく。当然ながら、1回の実験でスクリーンに映る輝点はせいぜい1こである。その場所はその度ごとに異なり、一見でたらめである。しかし、多数回繰り返して、データを重ね合わせると干渉縞のパターンが出てくる。

<https://www.youtube.com/watch?v=ImknFucHSc>

以上が事実である。1 回ごとの実験で光は粒子として観測されるが、統計をとると「あたかも光が波動であったような」結果が得られる。縮めて言うと、「光は粒子として測定され、測定する前は波動として振る舞う」

全く同様の現象が、電子、陽子、中性子、ヘリウム はては  $C_{60}$  のような大きな分子についても確認された。一般に上記の意味の粒子と波動の二重性があると思われている [3]。

解説：<https://www.univie.ac.at/qfp/research/matterwave/c60/>

ただし、運動量  $\mathbf{p}$  を持つ粒子の場合の波動はシュレーディンガー方程式：

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi$$

にしたがう。ただし、ラプラシアンは  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  と定義される。

平面波の解は

$$\psi_{in}(\mathbf{x}, t) = e^{i(-\omega t + \mathbf{k} \cdot \mathbf{x})}$$

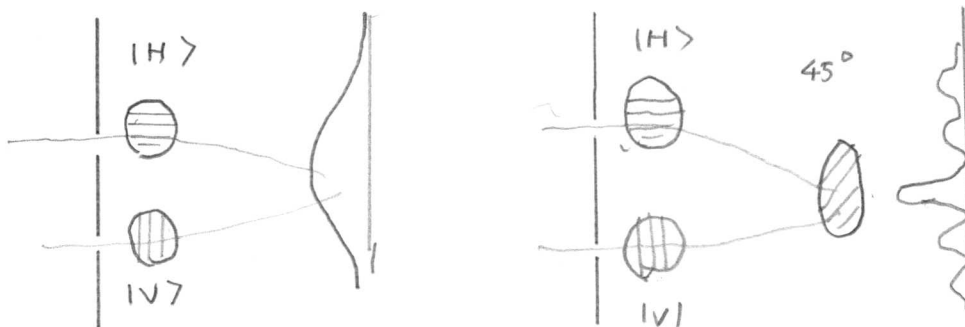
である。ただし、アインシュタイン・ドブロイの関係  $\hbar\omega = E = \frac{p^2}{2m}$  ,  $\hbar\mathbf{k} = \mathbf{p}$  は了解済みとする。

## 2.4 Which Way?

スクリーン上にできた輝点は、そこに光子が来たこと示す。その光子は、どちらのスリットを通ったのだろうか？それが分かるような実験装置を多くの人が考案したが、ここではアインシュタインの思考実験とファインマンによる実験の提案を紹介しよう。

まずアインシュタインの工夫から述べよう。光子が上のスリットを通過し方向を変えるときにその反作用として衝立全体を上方に押すだろう。同様に、下のスリットを通過し方向を変えるときにその反作用として衝立全体を下方に押すだろう。アインシュタインはスリットの動きを検知すれば光子がどちらのスリットを通ったか分かると考えた。面白いことにスリットの動きを検知できるようなデバイスのときには干渉縞は生じない。which-way と干渉縞は両立せず相補的であることが計算すると分かる。

ファインマンは、光子ではなく電子の2重スリット実験を考え、衝突のすぐ後ろに光源を置くことを考えた。電子が上のスリットを通過する場合には光源からの光子を衝突して光子が上方に叩き出され、下のスリットを通ったら下方に叩き出される。これはその後実験されて、電子に跳ね飛ばされた光子が検出されるようだと、干渉縞は消える。



## 2.5 波動性と which-way の相補性

スクリーンに生じた輝点の属性を調べて、その原因となった光子がどちらのスリットを通ったかを推定する実験を考案しよう。

思考実験ではなくて、実験の各ステップが実行できデータが得られら、しかもそれを数式で曖昧さなく表現できる例を紹介しよう。まず、ハマホトによる映像でも紹介されている片方のスリットを閉じる場合には、光子がどちらのスリットを通ったかは自明であり、干渉縞は生じない。

光子が偏光を持っていることを利用しよう。上のスリットの後方に縦偏光の光だけを通す偏光板を置き、下のスリットの後方に横偏光の光だけを通す偏光板を置こう。こうしておけば、検出された光子の偏光を調べれば、光子がどちらから来たか分かるだろう。その場合には、干渉縞は生じない。

### 2.5.1 波動性と which-way の相補性の数式的説明

上記のように偏光板を設定した場合に、スリットを出た光子の状態は

$$A_{out}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{\sqrt{2}} [e^{i(-\omega t + k_x(x-d/2) + k_y y + k_z z)} |H\rangle + e^{i(-\omega t + k_x(x+d/2) + k_y y + k_z z)} |V\rangle].$$

ただし、ここに  $|H\rangle$  は水平偏光の状態、 $|V\rangle$  は垂直偏光の状態である。光の強度は  $|A_{out}(\mathbf{x}, t)|^2$  で与えられるが、 $|H\rangle$  と  $|V\rangle$  が直交することに注