



**PHYSICS
LAB.
2024**

光の正体を探る

Physics Lab. 2024 数理物理班

辻圭汰

目次

1. 波としての光

身の回りの光の性質は光を波と考えることで説明できる。

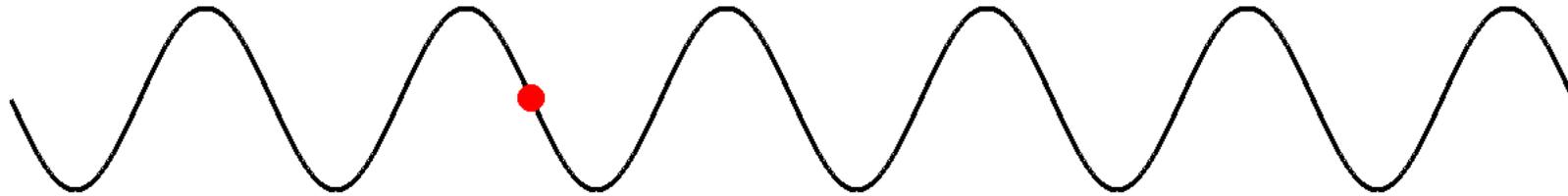
2. 光子

現代では光は光子という量子の一種として説明される。

1. 波としての光

波としての光

身の回りの光の性質は、光を波として考えることで理解できる。

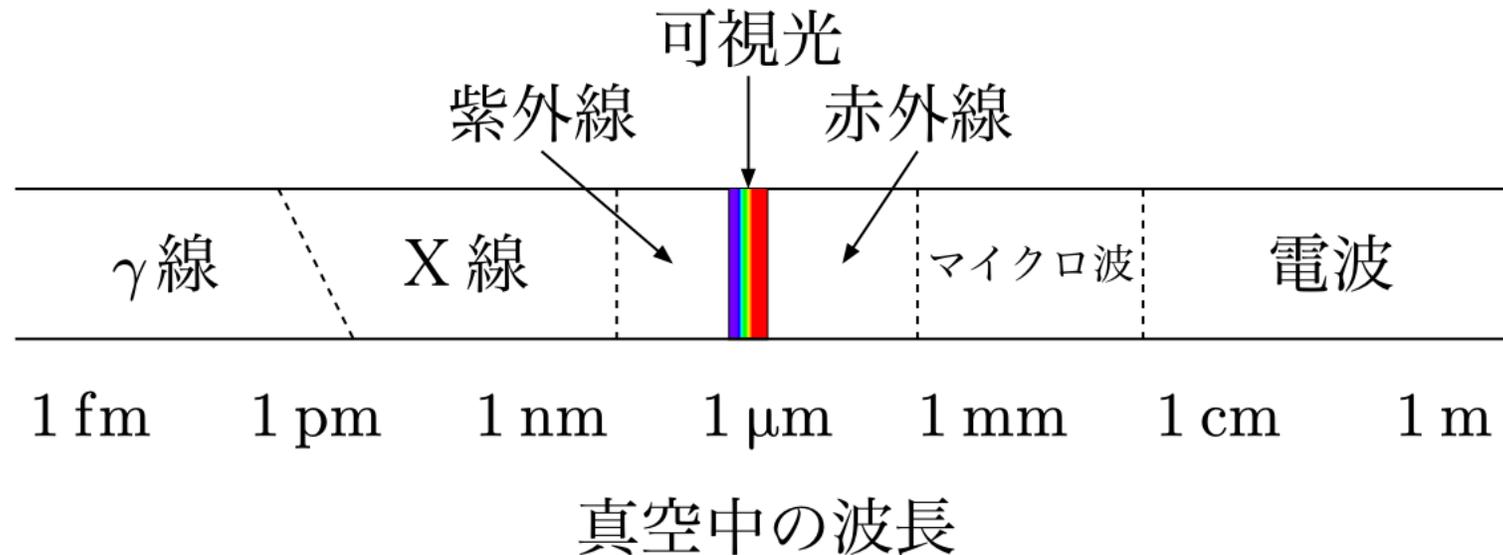


波長 × 振動数 = 光速

- 真空中の光速は一定で $c = 299,792,458 \text{ m/s}$ である。
- 真空中なら振動数を決めれば波長が決まるし、波長を決めれば振動数が決まる。

可視光

人間に見える光はごくわずかな範囲の波長だけ。



理由: ① 空気を透過するのは可視光、赤外線の一部、電波だけ。

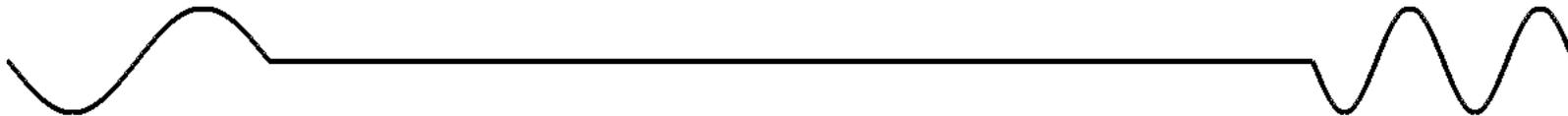
② 太陽光は可視光が最も強い。

他にも生物学的な理由などがあるかもしれない。

重ね合わせの原理

振動数や向きが違う光は同時に伝わることができる。

例: 2つの懐中電灯を向かい合わせにしても光がぶつかったりしない。



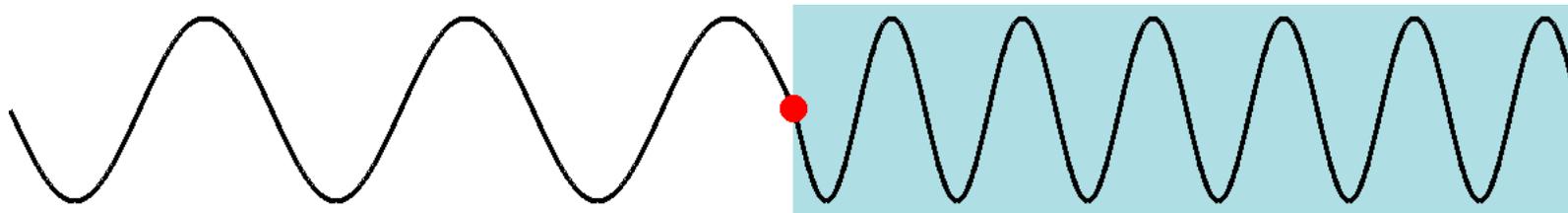
波と波がぶつかることはなく、素通りする(重ね合わせの原理)。

屈折・反射

光が物質に入射すると波長が短くなる。

一方、振動数は変わらない。

→物質中では光の速度が遅くなる。



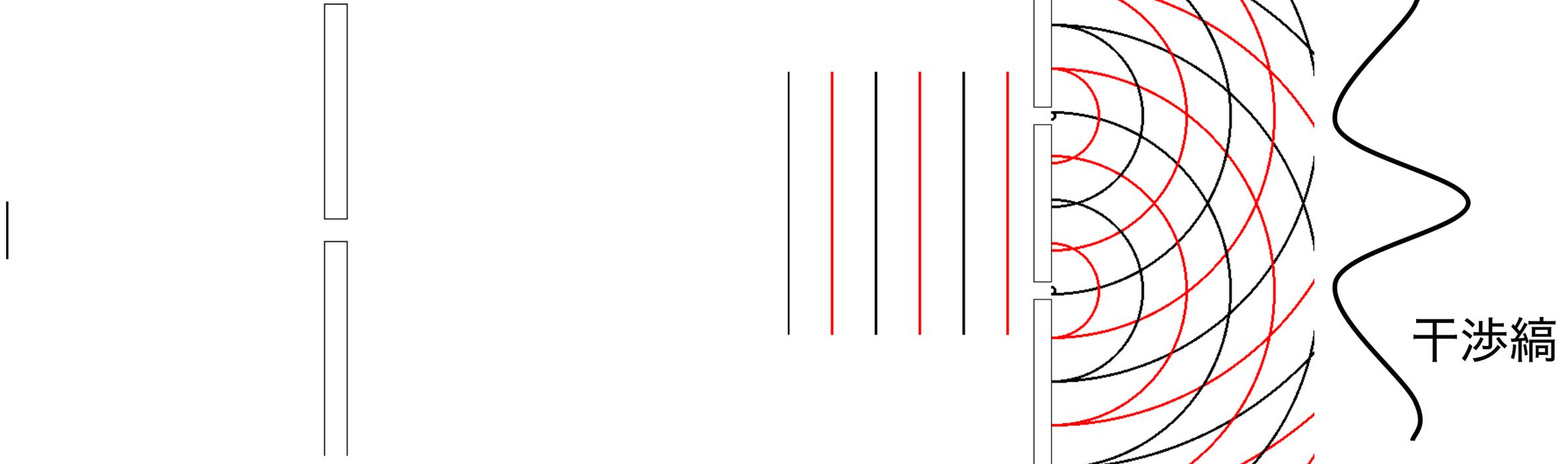
この結果、光は物質との界面で屈折・反射する。

回折・干渉

光の波ならではの性質として回折と干渉がある。

回折: 光が物体の後ろに
回り込む現象。

干渉: 光が強めあったり
弱めあったりする現象。

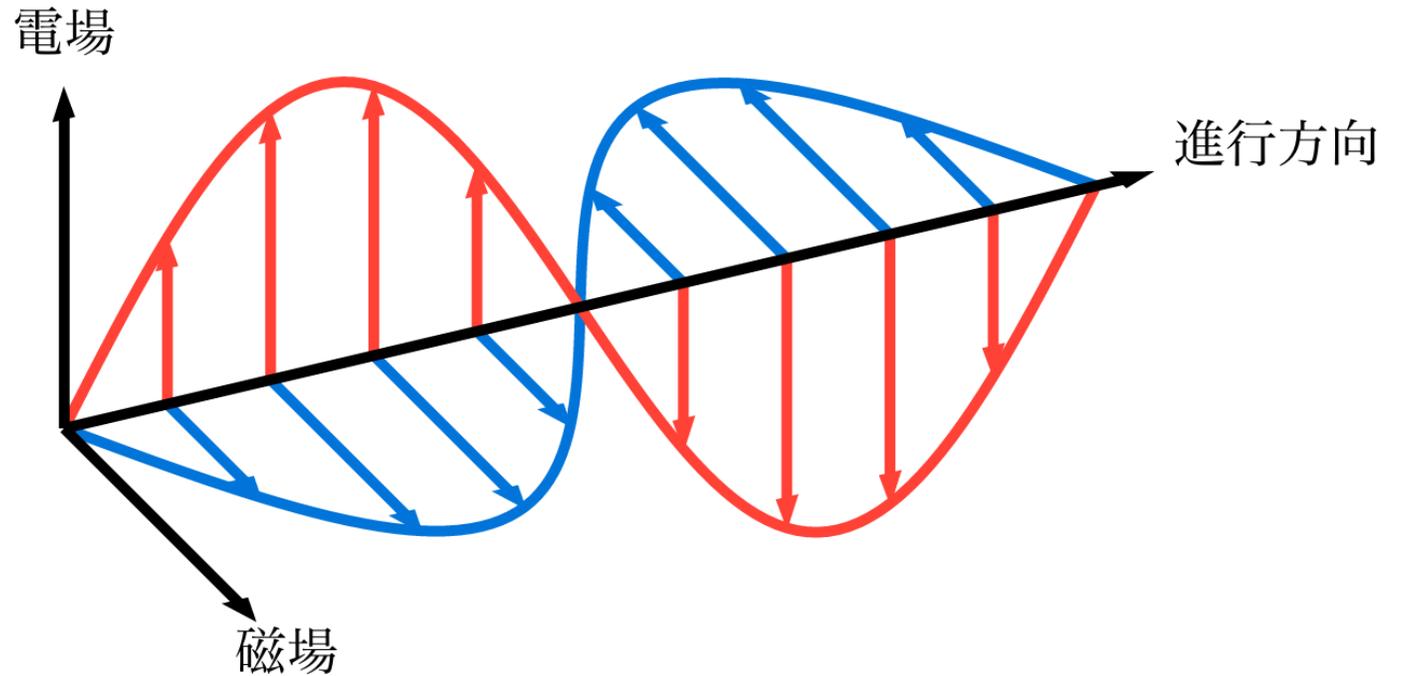


光は電磁波

光は電場と磁場の波。

電場 E : 電荷を動かす。

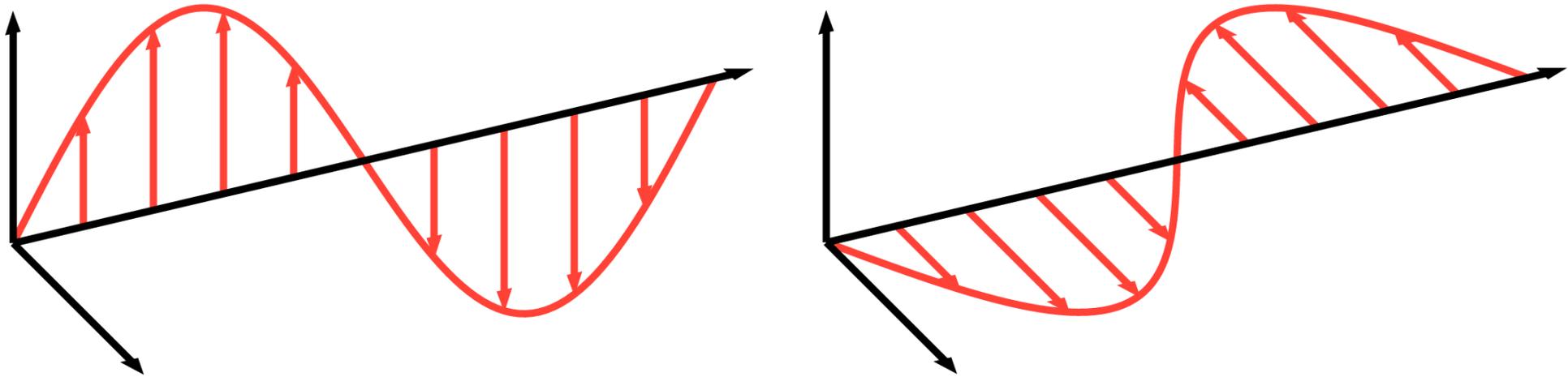
磁場 B : 電流を動かす。



特定の振動数で特定の方向に進む光なら
電場、磁場、進行方向は全て垂直。

偏光

進行方向に対して電場・磁場が垂直なので、2種類の方向の振動が存在する。



これを偏光という。液晶などに使われている。

光のエネルギーと運動量

光を吸収すると、温度が上がる。

→光はエネルギー E を運ぶ。

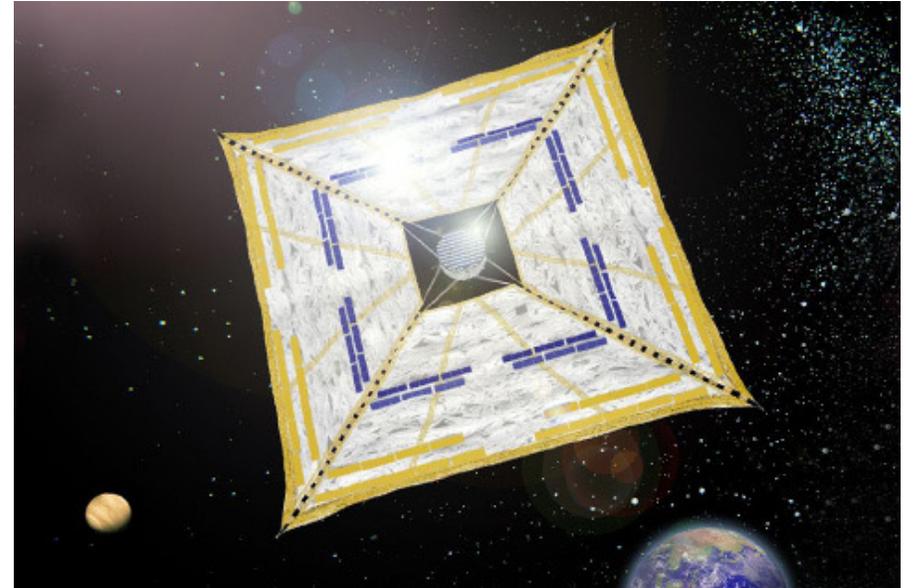
エネルギーは振幅の2乗に比例する。

また、光が当たると圧力が生じる。

→光は運動量 p を運ぶ。

エネルギーと運動量には $E = cp$

という関係がある。



ISAS/JAXA 「IKAROS」

ここまでのまとめ

- 光は電場と磁場の波である。
- 重ね合わせの原理が成り立つ。つまり光どうしは衝突しない。
- 光の色・屈折・反射・回折・干渉・偏光などの性質は波の性質として説明できる。
- 光はエネルギー E と運動量 p を持ち、振幅の2乗に比例する。
また、 $E = cp$ が成り立つ。

2. 光子

光子

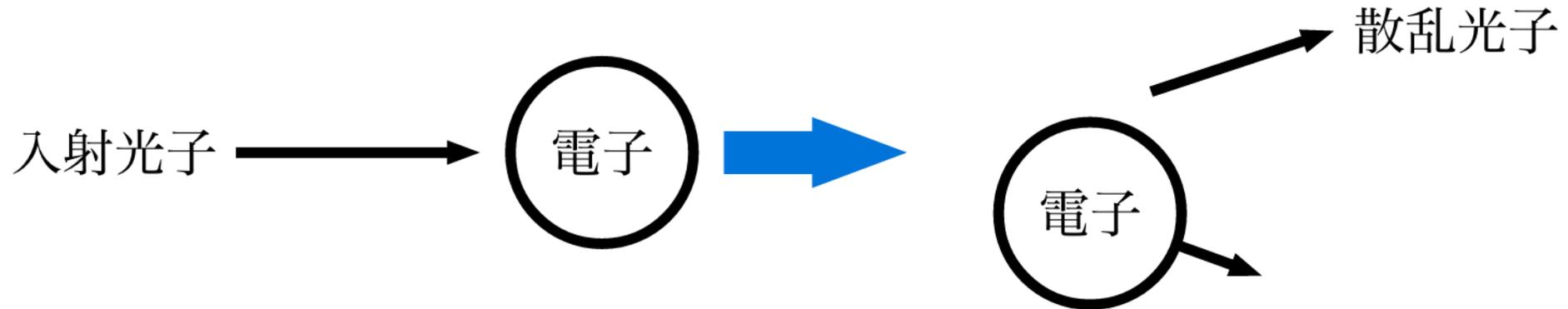
今までの光を波で説明する理論は**古典論**(古典電磁気学)と呼ばれる。

現在では、古典論では説明がつかない現象がたくさん見つかっている。

そのような現象は、**量子論**(量子電磁力学)によって説明される。

コンプトン散乱

物質にX線を当てると、方向と振動数が変わったX線が出てくる。

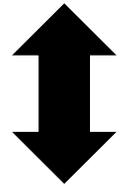


方向と振動数 ν の変化は静止した電子にエネルギーが $E = h\nu$ で、運動量が $p = E/c$ であるような粒子が当たったと考えると説明できる。

→光は振動数に比例するエネルギーと運動量を持つ粒子(光子)である！

光子のエネルギー

光子のエネルギーは振動数に比例する。



矛盾？

古典論の光のエネルギーは振幅の2乗に比例する。

→矛盾はしていない！

光子が非常にたくさん集まることで、光は波のように見えていた。

振動数が大きいor光子数が少ないと光子の性質が重要になる。

対生成

古典論では光と光はぶつからなかった。

電子などの電荷を持った粒子は、その反粒子と呼ばれる粒子と対消滅して2つの光子になる。

逆の反応、つまり2つの光子が粒子と反粒子になる反応も起こりうる(対生成)。

対生成は粒子を作ることができるほどエネルギーの高い光、つまり振動数の高い光でしか起こらないので、普段は光がぶつかったりしない。

光子の質量

アインシュタインの有名な質量とエネルギーの関係式 $E = mc^2$ は静止している粒子に対して成り立つ式。

質量 m 、運動量 p の粒子のエネルギーは

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (cp)^2}$$

である。 $E = cp$ が成り立つので、質量は $m = 0$ となる。

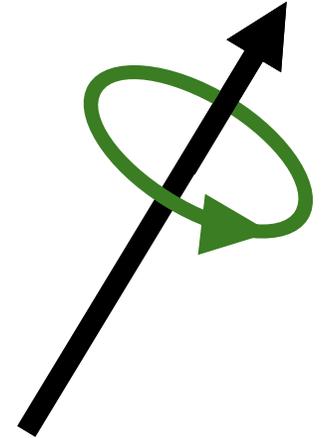
光子の質量は0。

→光子は「光速」 c で進む。

※相対論では c は光の速度ではなく、時間と空間を結びつける比例定数として定義される。

光子のスピン

電磁波は偏光が2種類あったので、光子も2種類ある。
量子論では、偏光はスピンというものに対応する。



質量0粒子の運動方向を軸にした回転で運動量は変わらない。
このとき回転角と同じ角度だけ偏光の向きが回転する。
→360度回すと光子の状態は元に戻る。
→光子はスピン1であるという。

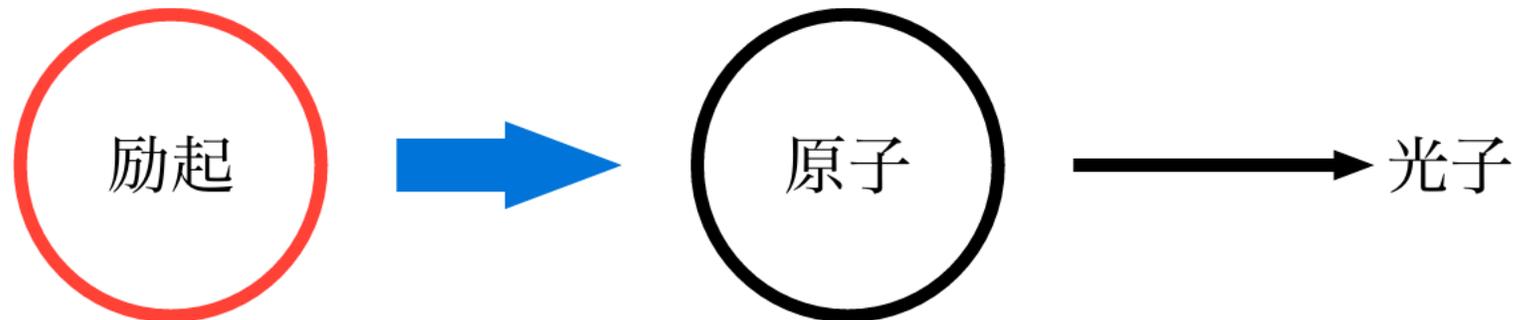
一般には、720度回転すると必ず状態が元に戻るなので、角度 $720^\circ/n$ だけ回転すると元に戻る。この整数 n の半分をスピンという。

吸収・放出

原子に光が当たると**吸収**が起こり、エネルギーが高い**励起状態**になる。

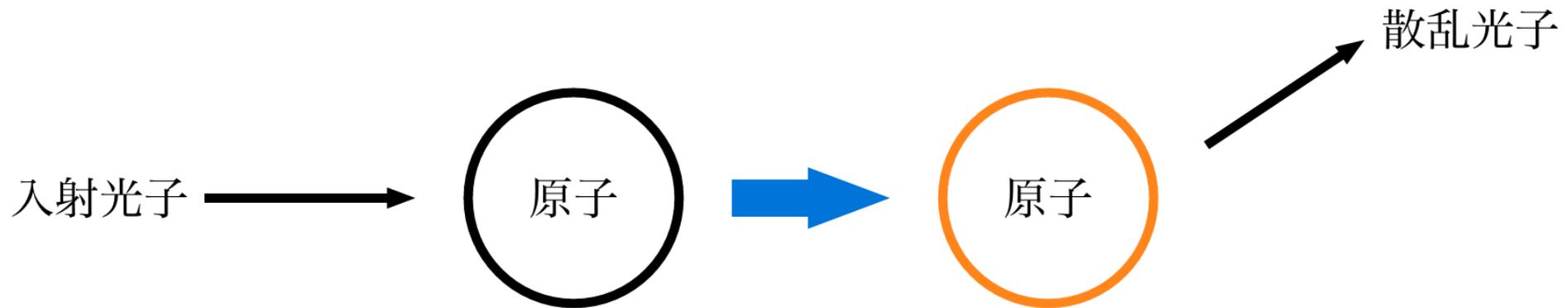


励起状態の原子が光子を出してエネルギーが低い状態になる現象を**放出**と呼ぶ。



散乱

励起状態の寿命が非常に短い場合、光の吸収・放出が瞬間的に行われ、光のエネルギーや運動量、スピンの変化が瞬時的に起こる。これを散乱と呼ぶ。

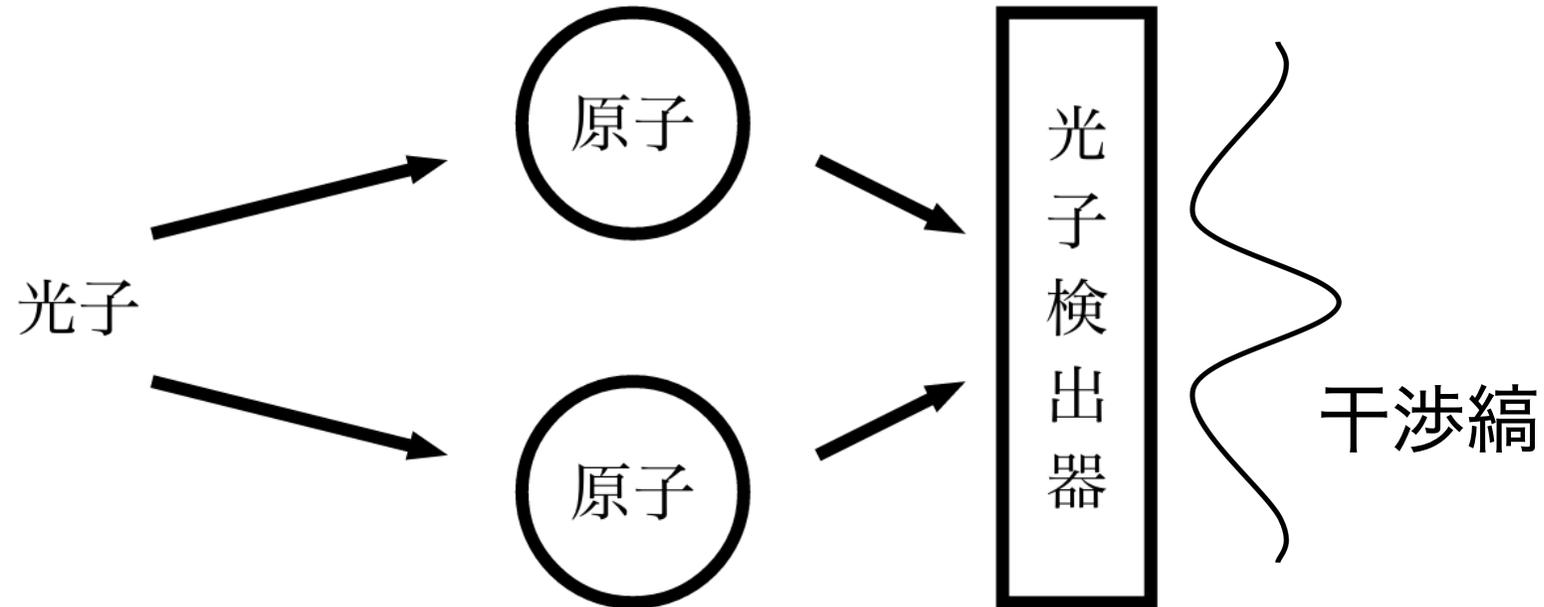


散乱の前後で原子の状態は変化していてもよい。

特に、散乱前後で光子のスピンの変わるなら、原子の状態も必ず変わる。

1光子干渉

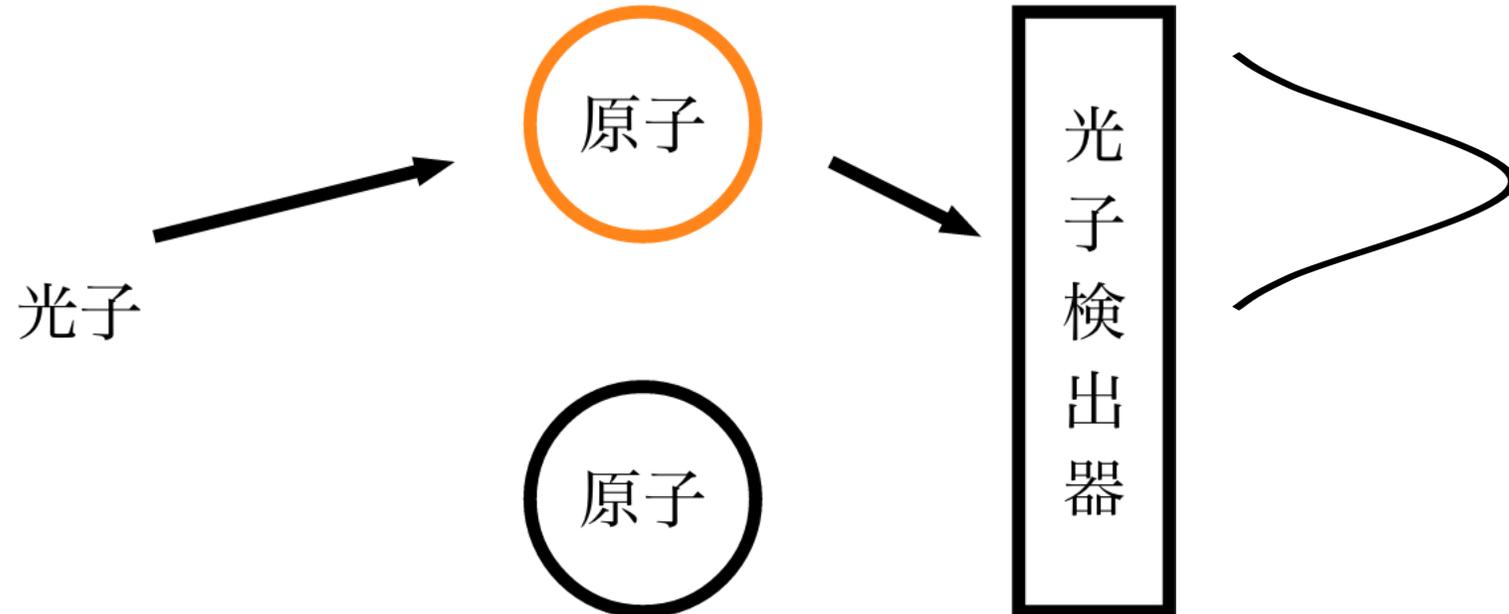
散乱を利用して、1つの光子が自分自身と干渉する実験ができる。
2つの原子を固定して、光子を当てて散乱光子を検出する。



どちらの原子で散乱したか分からなければ、干渉が起こる。

干渉しない場合

どちらの原子で散乱したか分かるなら、干渉は起こらない。
入射光子と散乱光子のスピンの違うなら、原子の状態は必ず変化する。



→どちらの原子で散乱したか分かってしまう。

光子の位置

1光子が自分自身と干渉する。

→光子が飛んでいる位置は分からない。

さらに、光子がある領域に何個あるのかも実は定義できない。

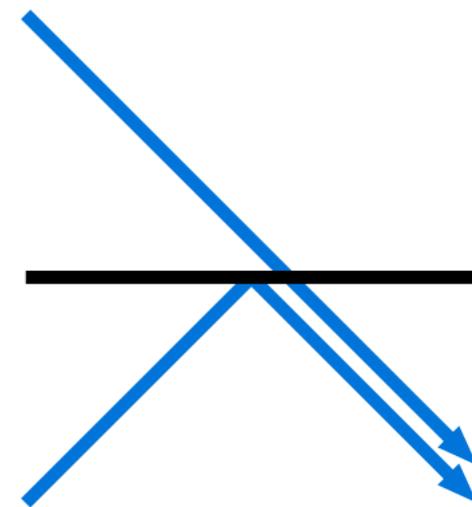
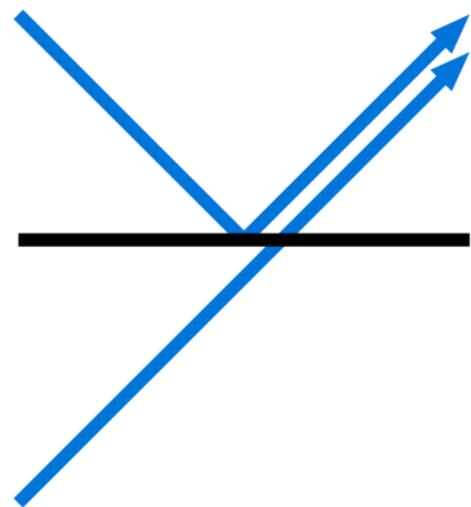
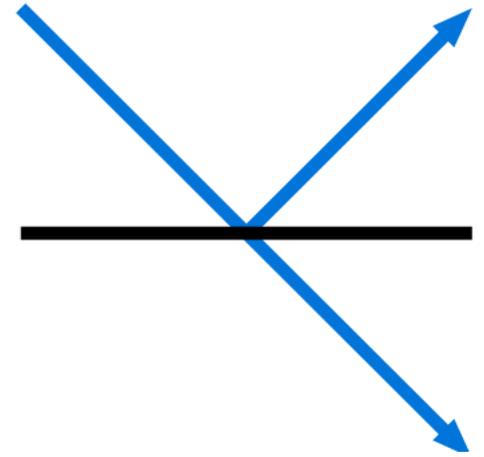
(Reeh-Schlieder の定理の補題「局所時空領域の演算子が真空中に作用して0になるならその演算子は0である」)

→真空中で確実に光子の数が0となるような光子検出器は作れない！

2光子干渉 ホン=オウ=マンデル効果

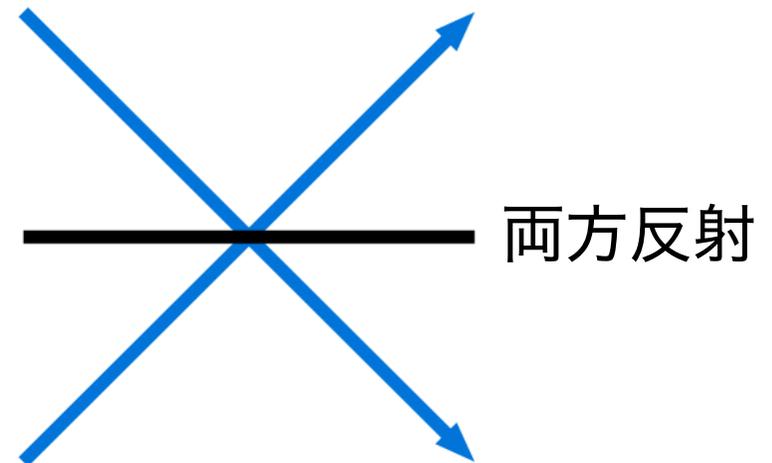
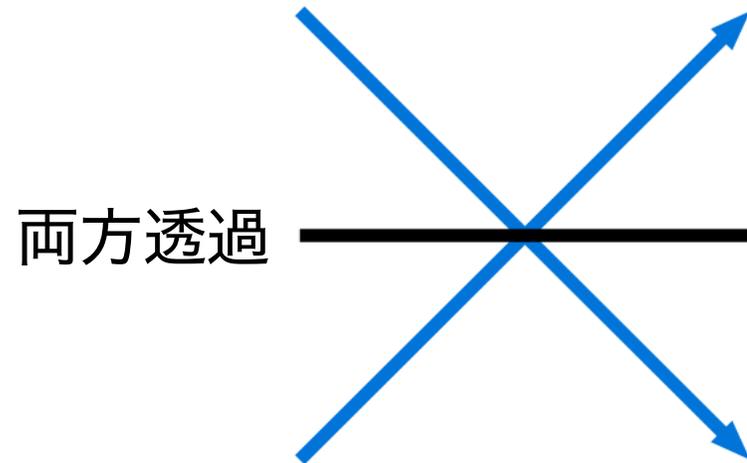
光子の半分を反射、半分を透過させるような
ビームスプリッターの両面から同じエネルギー、
同じスピンの光子を同時に入射させる。

→両方の光子が同じ方に出てくる！



同種粒子の不可弁別性

なぜ両方透過、両方反射しないのか？



同じエネルギー、同じスピンの光子は区別できない(同種粒子の不可弁別性)。

→両方透過・両方反射は同じ大きさを逆の寄与になるので打ち消し合う。

逆に、スピンの違ったりすると両方透過、両方反射が起こりうる。

おまけ：ゲージ対称性

実は光子の質量0、スピン1という性質や、物質との相互作用は理論に $U(1)$ ゲージ対称性があると仮定すると導出できる。



逆に、質量0、スピン1の粒子を含む理論はゲージ対称性を持っていないといけない。

卵が先か、鶏が先か…

まとめ

- 現代では光は光子として説明される。
- 光子は質量0、スピン1の粒子である。
- 光子は量子の一種であり、自分自身と干渉を起こす。
- 同じエネルギー、運動量、スピンを持つ光子は区別できない。
- 光子の性質はゲージ対称性と表裏一体。