

“状態の重ね合わせ(干渉)”の体験実験

那須科学歴史館 館長 田澤勇夫

状態の重ね合わせに関する歴史の概要

1669年にニュートンは光の粒子説を唱えたのに対して、ホイヘンスやフレネルらは光の波動説を唱えました。また、状態の重ね合わせを説明する上で良く用いられる二重スリットによる光の干渉実験は、1805年にヤングが初めて行いました。更に、1864年のマクスウエルの電磁波の予言と1888年のヘルツの電磁波の発見により、光は電磁波と同一の波動であることが証明されました。

しかしながら、1900年のプランクのエネルギーの量子化仮説、そして1905年のアインシュタインの光子量子理論により、光は波動であるとともに粒子(量子)としての性格を持つことになりました。

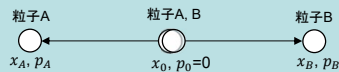
また、電子に関しては、1897年にトムソンは粒子としての電子を発見し、1911年にはラザフォードは原子核の周りに電子が周回する原子模型を提唱しました。

そして1924年にド・ブローイは原子内の電子の状態の安定性を説明するため電子に波動が付随する物質波の概念を提唱し、1926年にはシュレーディンガーが波動方程式を打ち立てました。また、ボアー、ハイゼンベルグ(コペンハーゲン学派)らは波動方程式の波動関数は各確率を持つ状態の重ね合わせであると考えました。しかし、アインシュタインらは状態の確率の考えを受け入れず、量子力学は不完全であると考え、1935年にEPR(Einstein-Podolsky-Rosen)論文を発表しました。結果としてこれは量子力学の不完全性を示すのではなく、相互作用をする2つの粒子の状態が関連する、所謂、量子もつれの存在を示すことになりました。

量子もつれ(EPR状態)に関して、1982年にはアスベの実験が行われ、更に偏光板を用いた二重スリットの干渉実験が2002年にウォルポーンらにより行われ実証されました。また、1個の電子による干渉実験は、1974年にポローニャグループと1989年には日立グループにより行われ1個の電子に波動性があることが実証されました。(電子版の二重スリット実験)

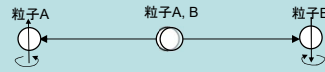
EPR、量子もつれ、電子の量子干渉

EPRパラドクス(1935年)



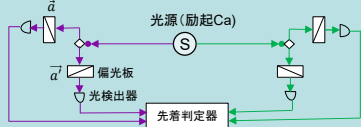
- 最初、粒子A、Bが同じ位置 x_0 にあり、静止状態で相互作用をしている。(2つに崩壊する前の粒子など)
- 相互作用がなくなり、反対方向に飛び去る。
- Aの運動量 p_A とBの運動量 p_B の関係は $p_A = -p_B$ となるので、 p_A が決まれば p_B も決まる。
- 同様にBの位置 x_B が決まればAの位置 x_A が決まる。
- よって、位置と運動量が同時に決まる。
- 即ち、不確定性原理に反する？

ボームのEPR状態(1951年)



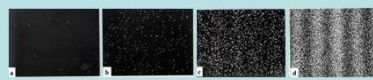
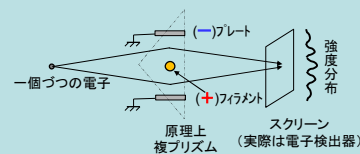
- 相互作用している粒子A、Bの複合系(陽子と反陽子でもよい)のスピンが0であるとする。
- 相互作用がなくなり、反対方向に飛び去る。
- 飛び去った粒子A、Bのスピン状態は上向きと下向きの状態の重ね合わせとなる。
- 粒子Aのスピンを測定すると上向きであったとすると、粒子Bのスピンは下向きに瞬時に決定される。この状態をEPR状態、量子もつれと言う。

アスベの実験(1982年)



- 励起されたCa原子による光源Sから状態がもつれている緑と紫の光子を放出。両方の光子の偏光方向は逆。
- 光の進行方向z軸とは直角のxy平面上のある角 a と直角の a' の偏光角の偏光板に紫の光子を分ける。
- 同様に角 b と直角の b' の偏光角の偏光板に緑の光子を分け、光検出器で各光子を検出する。
- 各光検出器の出力を先着判定器に入力させる。

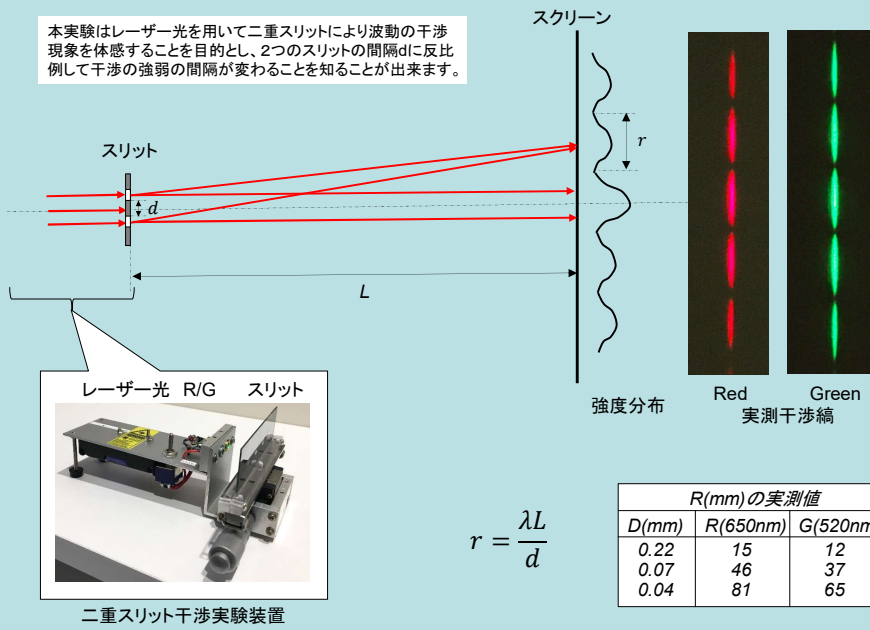
電子の量子干渉実験(1989年 HITACHI)



電子を1個ずつ送出していくと次第に干渉波形(d)が見えてくる

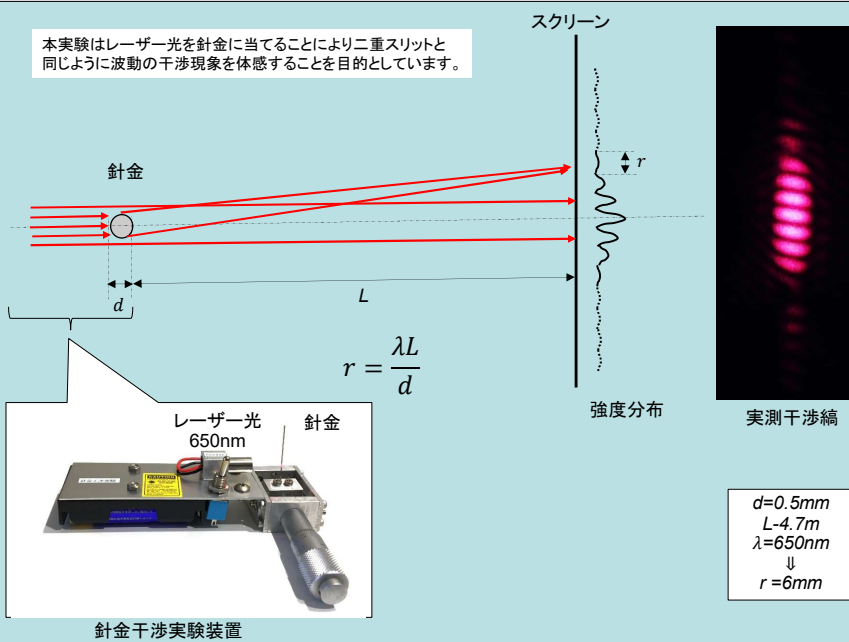
ヤングの二重スリットの干渉縞の実験

本実験はレーザー光を用いて二重スリットにより波動の干渉現象を体感することを目的とし、2つのスリットの間隔 d に反比例して干渉の強弱の間隔が変わることを知る事が出来ます。



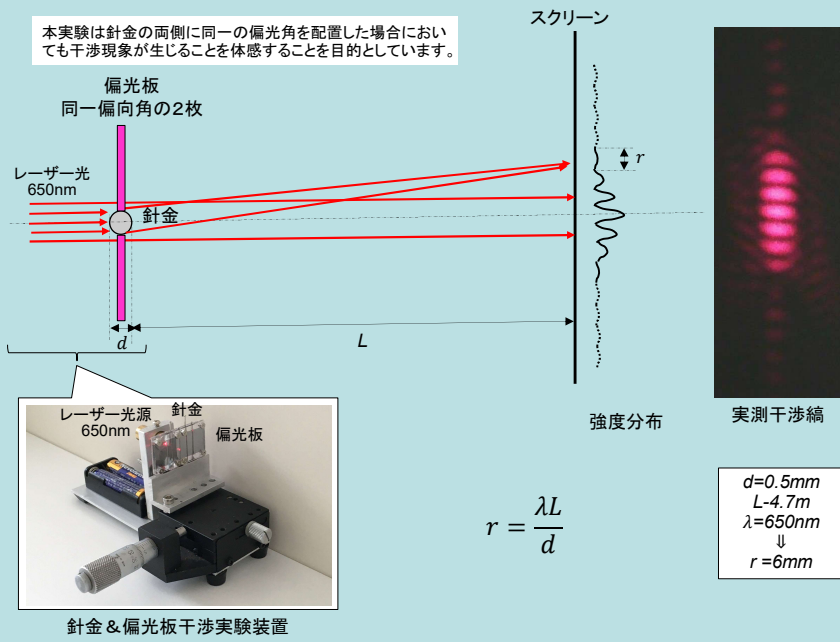
針金による干渉縞の実験

本実験はレーザー光を針金に当てることにより二重スリットと同じように波動の干渉現象を体感することを目的としています。



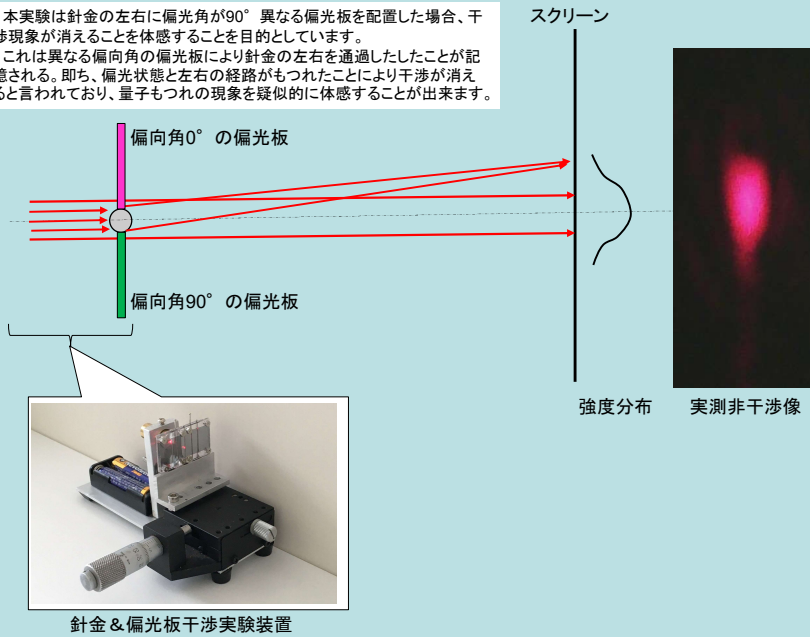
針金と同一偏向角の偏光板による干渉の実験

本実験は針金の両側に同一の偏向角を配置した場合においても干渉現象が生じることを体感することを目的としています。



針金と偏向角90°異なる偏光板による非干渉の実験

本実験は針金の左右に偏向角が90°異なる偏光板を配置した場合、干渉現象が消えることを体感することを目的としています。
これは異なる偏向角の偏光板により針金の左右を通過したことが記憶される。即ち、偏光状態と左右の経路がもつれたことにより干渉が消えると言われており、量子もつれの現象を疑似的に体感することが出来ます。



針金と2段の偏光板による干渉の実験

同一偏向角の偏光板

0° 偏光 0° 偏光

スクリーン

干渉縞出現

偏向角90° が異なる2つの偏光板

0° 偏光 90° 偏光

スクリーン

干渉縞消失

偏向角45° の偏光板を追加

0° 偏光 90° 偏光 45° 偏光

スクリーン

干渉縞再現

2段目の偏光板 (角度可変)

本実験は針金の左右に偏向角が90° 異なる偏光板を配置し、更にスクリーンの間に偏向角45° の偏光板を追加することにより干渉現象が再び干渉縞が生じることを体感することを目的としています。

これは偏向角45° の偏光板を追加することにより再び針金の左右の経路情報が消えることにより干渉縞が再現すると考えられており、量子消しゴムの現象を疑似的に体感することが出来ます。

単一の円形開口(ピンホール)による回折像

本実験はレーザー光をピンホールに照射するより波動の回折現象を体感することを目的とし、ピンホールの大きさ $2a$ に反比例して回折像の強弱の間隔 R_1 が変わることを知る事が出来ます。

ピンホール

$2a$

L

強度分布

スクリーン

R_1

実測の回折像(405nm)

レーザー光源

ピンホール

$$R_1 = \lambda \frac{L}{1.22a}$$

$2a(\mu\text{m})$	$R_1(\text{mm})$
500	2
200	5
100	10
50	20
30	33

$\lambda=405\text{nm}$

実測の回折像(532nm)

電子による回折像の実験

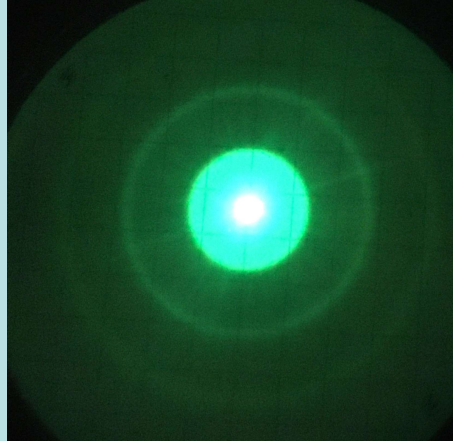
電子は波動の性格を持つため、ピンホールと同じ特性を有する対象に電子を照射することにより回折像を得ることが出来ます。

電子による回折像の実験のためには、本来、電子回折管を用いますが、本実験ではCTRを用いています。

回折現象のためのCRT内部の諸特性に不明な部分があるため、本実験による体験はあくまでも参考程度と考えて下さい。



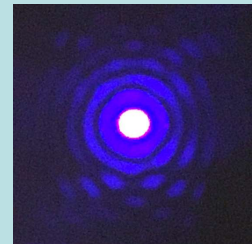
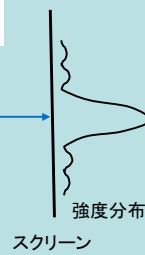
CRTを用いた電子による回折像の実験装置



観測された電子の回折像と思われる映像

光と電子による回折像

本実験はレーザー光をピンホールに照射するより波動の回折現象を体感することを目的とし、ピンホールの大きさに反比例して回折像の強弱の間隔が変わることを知る事が出来ます。

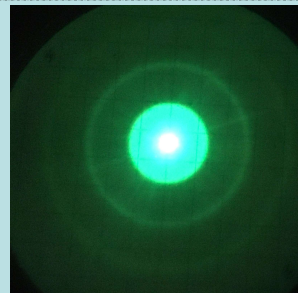


実測の回折像(405nm)

電子は波動の性格を持つため、ピンホールと同じ特性を有する対象に電子を照射することにより回折像を得ることが出来ます。



CRTを用いた電子による回折像の実験装置



観測された電子の回折像と思われる映像

干渉消失実験(1) ウォルボーンの実験(2002年)

The diagram illustrates the Woollam experiment in three stages:

- 干渉縞形成 (Interference Fringe Formation):** A source (S) emits photons A and B. Photon B is vertically polarized and passes through a vertical slit. Photon A is horizontally polarized and passes through a horizontal slit. Both photons are detected by detectors A and B, respectively, resulting in an interference pattern.
- 干渉縞消失 (Interference Fringe Disappearance):** A quarter-wave plate (QWP) is placed in front of the horizontal slit. This converts the horizontal polarization of photon A into vertical polarization. Both photons now have vertical polarization and are detected by detectors A and B, but the interference pattern disappears.
- 干渉縞再現 (Interference Fringe Revival):** A 45-degree polarizer is placed in front of the horizontal slit. This converts the horizontal polarization of photon A into 45-degree polarization. The polarization of photon B is still vertical. The photons are detected by detectors A and B, and the interference pattern is revived.

Legend:

- 垂直から右回り円偏光変換フィルタA (Quarter-wave plate A)
- 水平から左回り円偏光変換フィルタB (Quarter-wave plate B)
- 45° 偏光角のフィルタC (45-degree polarizer C)

- EPR状態を作る光源Sにより光子Aと光子Bが送出される。光子Aの偏光角が垂直なら光子Bは水平で逆も同様。
- 光子Bは直接、検出器Bに当たられ、光子Aはそれよりも遅れて2重スリットを通過し検出器Aに当てられる。
- この場合、検出器Aに干渉縞が出現。

- 片側のスリットにフィルタAを、他方にはフィルタBを装着。
- 検出器Bにより光子Bが水平偏向角で検出されると、光子Aの偏光角は垂直であり、検出器Aで検出される光子Aは右回りである。よって、光子Aは右側のスリットを通過したことが判明。
- 光子Bが垂直の場合、光子Aは左側のスリットを通過。
- よって、**どちらかのスリットを通過したことが判明すると干渉縞が喪失。**

- 検出器Bの前に45° 偏向角のフィルタCを置くくと、検出器Bで検出される光子Bの偏向角が分からなくなる。
- よって、光子Aの偏光角が不明となり、どちら側のスリットを数化するのが不明となり、再び、干渉縞が出現する。

- 同様な実験を光子Aが2重スリットを通過する後に光子Bが検出器Bに検出されるよう後ろに下げても同様な結果。
- ということは、光子Aだけの実験でも同じことが言える。

干渉消失実験(2)

The diagram illustrates the second interference disappearance experiment in three stages:

- 干渉縞形成 (Interference Fringe Formation):** A source (S) emits unpolarized photons. They pass through two slits (A and B) and are detected on a screen, forming an interference pattern.
- 干渉縞消失 (Interference Fringe Disappearance):** A polarizer with a 0-degree angle is placed in front of slit A, and a polarizer with a 90-degree angle is placed in front of slit B. The photons are now polarized in different directions, and the interference pattern disappears.
- 干渉縞再現 (Interference Fringe Revival):** A 45-degree polarizer is placed in front of slit B. This makes the polarization of photons from both slits indistinguishable, and the interference pattern is revived.

- 光源Sにより特定の偏光状態を持たない光子が2重スリットに向けて送出される。
- 光子はスリットAとBを通過する状態を持つため、干渉縞が形成される。

- スリットAに偏向角0° の偏光板を、スリットBに偏向角90° の偏光板を装着。
- よって、偏向角により**どちらかのスリットを通過したことが判明するので干渉縞が喪失。**

- スクリーンの前に45° 偏向角の偏光板を置くくと、光子がどちらのスリットを通過したのが分からなくなる。
- よって、再び、干渉縞が出現する。

干渉消失実験(3)

2重スリット 干渉縞形成

- 光子の代わりに電子が2重スリットに向けて送出される。
- 電子はスリットAとBを通過する状態を持つため、干渉縞が形成される。

干渉縞消失

- 2つのスリットに向けて光子を照射し、電子がスリットを通過する際、光子を散乱させるため、それを光検出器で検出。
- よって、電子が**どちらかのスリットを通過したことが判明する**ので干渉縞が**喪失**。
- 但し、電子の進路が乱れるので、その影響も存在する。

干渉縞再現

- 2つのスリットで散乱した光子をレンズにより集光させ光検出器に入射させる。
- どちらのスリットで散乱されたのかが分からなくなり、再び、干渉縞が出現する。

干渉消失と量子もつれ

従来の波としての描写

1個の光子/電子の状態 Ψ はスリットAを通過する状態 Ψ_A とスリットBを通過する状態 Ψ_B の重ね合わせの状態 $\Psi = a_A\Psi_A + a_B\Psi_B$ であり、その波動的な性格により干渉縞が形成。

波としての描写ではなく粒子として描写すると

1個の光子/電子はスリットAを通過する粒子 Ψ_A とスリットBを通過する粒子 Ψ_B に分けられる。**これらの2つの粒子はもつれの状態にある**。もつれている2つの粒子(準実在)は重ね合わせの状態 $\Psi = a_A\Psi_A + a_B\Psi_B$ が成立するため、干渉縞が形成。

どちらのスリットの通過か不明 → 干渉縞形成

どちらのスリットの通過か判明 → 干渉縞消失

仮説1
どちらかのスリットを通過したかを検出すると重ね合わせの状態が失われ、その粒子的性格により干渉縞が消失。

仮説2
どちらのスリットの通過とそれを検出する状態(偏光など)がもつれていおり、光子/電子などがどちらのスリットを通過したかを記憶しているため、干渉縞が消失。

仮説3
光子/電子をスリットAで検出すると $\Psi_A=1$ 、よって $\Psi_B=0$
逆の場合は、 $\Psi_A=0$ 、よって $\Psi_B=1$ となるため、干渉縞が消失。

粒子A
粒子B

1個の粒子はスリットAを通過する粒子 Ψ_A とスリットBを通過する粒子 Ψ_B に分けられ、この二つは量子もつれの状態にある。