

爆弾を見ないで発見する方法

私たちが古典的世界から見て量子力学に「奇妙さ」を感じる理由の一つに「量子力学の非局所性」ともいえる性格があると思う。非局所性というのは、簡単にいうと「量子系は全体がひとつながりの世界をなしていて、“現象”を部分ごとに分解して考えることはできない」という性質のことである。これは空間に関しても時間に関しても言える。部分系が全体と相互作用によって繋がっているのは、古典的世界でも同じことなので、その違いを理解するのはやや微妙なところもある。具体例で考えてみよう。

1993年に、A. C. Elitzur と L. Vaidman は “Quantum Mechanical Interaction-Free Measurement” と題する論文を書いている[1]。これはほとんど数式もない簡単な話であるが、2015年4月現在、230回以上引用されている。まず図1のようなMach-Zehnder干渉計を考える。

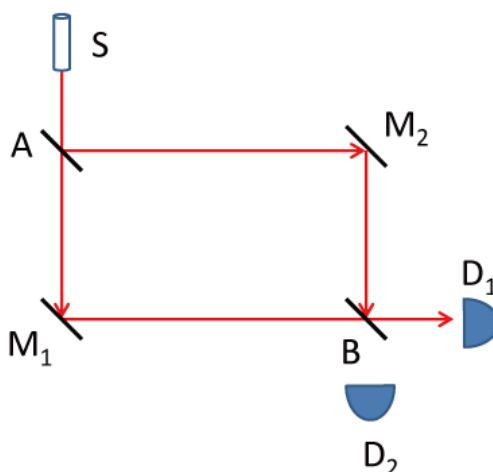


図1

光源 S を出た光は、ビームスプリッター A により分岐され、二つの経路を通ってビームスプリッター B に到達する。ビームスプリッター A, B の透過率と反射率はそれぞれ 50% としておこう。この二つの経路の光路差を調節して、光は 100% 検出器 D₁ に達するようにしておく。したがってこの配置では検出器 D₂ では光は検知されない。

これは古典的な普通の「光」を使った実験の話だが、光子を 1 個ずつ放出する量子力学の極限に行っても変わらない。D₁ は常に光子を観測し、D₂ には 1 個も到達しない。無論、理想的な実験を考えている。

ここで、図2のように A とミラー M₁ の間に、光を遮る物体—たとえば爆弾—があるかないかを調べることを考える。遮蔽物があれば、当然のことながら光の干渉効果は消

えるので、検知器 D_1 と D_2 はそれぞれ 25%の強度で光を検知するようになるだろう。ここまでは何の不思議もない。

ここで同じ実験を1個のフォトンを使って行うことを考えてみよう。この爆弾には非常に鋭敏な光センサーが付いていて、1個のフォトンでも当たれば爆発してしまうとする。

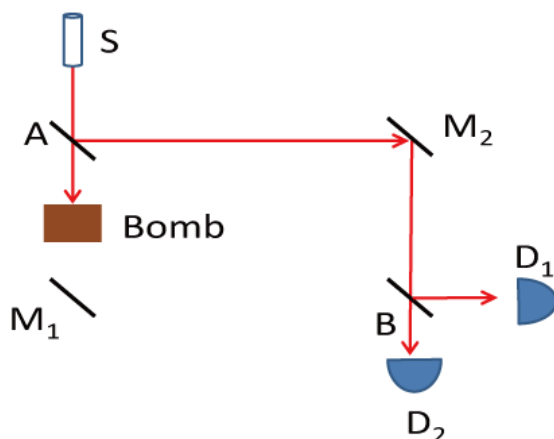


図 2

1個のフォトンを送り出した時に起きるであろう出来事の出現確率とその結果判明する事実は、以下のとおりである。

爆弾が爆発	50%	⇒ 爆弾はあった (オイオイ)
D_1 がフォトンを検知	25%	⇒ 爆弾の有無は判定不能
D_2 がフォトンを検知	25%	⇒ 爆弾はある

つまり 25%の確率で爆弾を爆発させることなく、それがそこにあると判定できるのだ。もっとも 50%の確率で悲惨な結果にはなるのだが……。もし検知器 D_2 がフォトンを検知したとすると、そのフォトンには爆弾と相互作用することなくその存在を感知したことになる (と考えるとくなりますね)。ここが奇妙なところだ。図 2 では量子系は局所的に (つまり $A \rightarrow M_1$ の経路上でフォトンが) 爆弾と相互作用しているのではなく、システム全体として相互作用していると考えないといけないようだ。

この話だけでは、まだ何となく奇妙さが伝わらないかもしれない。それに 50%の確率で爆弾が爆発してしまうのでは怖くて仕方がない。そこで Kwiat, Zeilinger らが、もうひとひねり加えたアイデアを提案した[2]。このアイデアによれば、爆弾を爆発させることなく、いくらでも 1 に近い効率でその存在を検出できるのだ。

Kwiat らの提案は Interaction-Free Measurement に量子ゼノン効果を組み合わせることである。そのために N 個の Mach-Zehnder 干渉計を直列に並べる。図 3 はその概念図。それぞれのビームスプリッターの反射率 R を $R = \cos^2(\pi/2N)$ と設定すると、ビームスプリッターでの転送行列 T は

$$T = \begin{pmatrix} \sqrt{R} & \sqrt{1-R} \\ -\sqrt{1-R} & \sqrt{R} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\pi/2N) & \sin(\pi/2N) \\ -\sin(\pi/2N) & \cos(\pi/2N) \end{pmatrix}$$

ととれる。ただし、行列表示の基底には下側のポートと上側のポートの状態をとる。完全にコヒーレントな場合（つまり爆弾が無い場合）、

$$T^N = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$$

であることに注意すれば、 N 個目の分岐で完全に上向きのポートに光子が出ていくことがわかる。これを模式的に描いたのが図 3 (a) である。

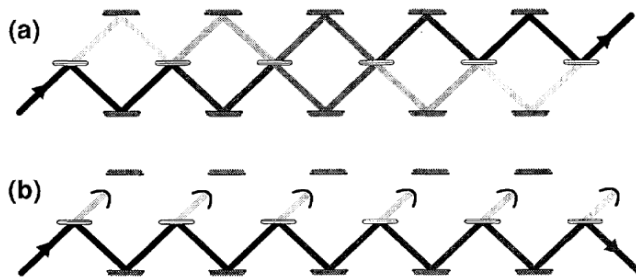


図 3 文献[2]より転載

一方、図 3 (b) のように、もし経路の途中に吸収体（爆弾）があったらどうなるだろうか？この時は、爆弾によって光子が「観測」されてしまうのだが、その確率は $1-R$ である。一方、下向きのポートに反射される確率は R である。これはインコヒーレントな過程なので、多重回の反射では確率の積をとる。したがって N 回目の分岐後に下の

ポートにいる確率（そのとき爆弾は爆発していない）は $P = [\cos^2(\pi/2N)]^N$ になるが、

$N \gg 1$ とすると、 $P = 1 - \pi^2/4N + O(N^{-2})$ となり、いくらでも 1 に近い確率で下向きのポートから光子が観測されることになる（図 3 (b)）。つまり十分に大きな N に対して、光子が上向きに出てくるか、下向きに出てくるかの測定をすれば、上向きのときは「爆弾無し」、下向きのときは「爆弾あり」と判定できる。こうして爆弾とフ

光子を相互作用させることなく、効率 1 で爆弾の有無を測定することが出来る！

爆弾が経路上に存在することでコヒーレンスが破れることを逆手にとって、安全な爆弾の検知を行えるという話である。これは相当奇妙なことだろう。

[1] A. C. Elitzur and L. Vaidman, *Foundation of Physics*, 23, 987 (1993).

[2] P. Kwiat *et al.* *Phys. Rev. Lett.* 75, 4763 (1995).

(April 2015)