

## 観測しないで見る方法

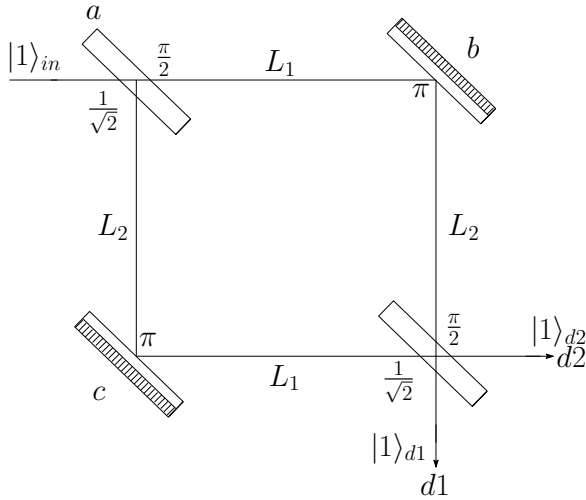


図 1: 爆弾なし

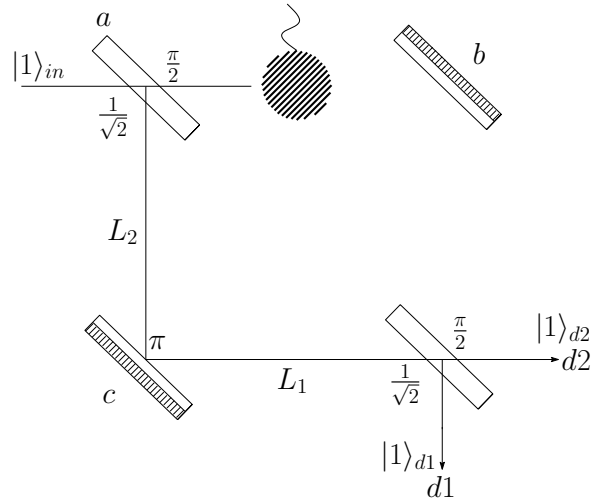


図 2: 爆弾あり

よく、量子力学では、不確定性によって、観測したものの位置と運動量を両方正確に測定することはできない、などといわれる。これは事実であるが、これをもってして、測定には不確定性が伴う、どのように測定しても不確定性は排除できない、などといってしまうと、すこし語弊があるような気がする。ここではそのような不確定性を完全に回避したわけではないが、量子力学を用いることによって、観測行為を伴わずに、障害物のあるなしを判断する方法を紹介する。ここで述べることは、古典論ではなく、むしろ量子論の効果によってこのようなことができるということを表すことになる。

ここでの議論では、取り敢えず簡単に垂直偏光した光子を  $|1\rangle_{in}$  として考え、途中の経路で、鏡やハーフミラーで反射・透過後、偏光方向は変化しないものと仮定する。また、入射光の状態  $|1\rangle_{in}$  や、出口  $d1$ ,  $d2$  での光子の出力状態  $|1\rangle_{d1}$ ,  $|1\rangle_{d2}$  は全て規格化されているものとしよう。

各ルートの計算に入る前に次のことをおさえておこう。まず鏡は、必ず光子を反射し、位相は2分の1波長増える。これは伝播係数  $k$  を掛けると、 $e^{i\pi}$  掛けることに等しい。一方、ハーフミラーは、透過する光子に対しては、位相はそのまま確率は2分の1になる。従ってこれは  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  を掛けることに等しい。また、反射する光子に対しては、位相は  $\frac{\pi}{2}$  増え、確率は2分の1になる。従ってこれは  $\frac{1}{\sqrt{2}}e^{i\frac{\pi}{2}} = \frac{i}{\sqrt{2}}$  を掛けることに等しい。さらに、経路  $L_1$  を通ると、位相は伝播係数  $k$  を用いて、 $kL_1$  進む。従ってこれは  $e^{ikL_1}$  を掛けることに等しい。  $L_2$  についても同様である。以上により、初期状態  $|1\rangle_{in}$  の垂直偏光状態の光子は、次の状態の重ね合わせ状態に変化する：

$$\textcircled{1} a \rightarrow b \rightarrow d1: \frac{1}{\sqrt{2}}e^{ikL_1}e^{i\pi}e^{ikL_2}\frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle_{d1} = \frac{1}{2}e^{ik(L_1+L_2)+i\pi}|1\rangle_{d1} = -\frac{1}{2}e^{ik(L_1+L_2)}|1\rangle_{d1}$$

$$\textcircled{2} a \rightarrow b \rightarrow d2: \frac{1}{\sqrt{2}}e^{ikL_1}e^{i\pi}e^{ikL_2}\frac{1}{\sqrt{2}}e^{i\frac{\pi}{2}}|1\rangle_{d2} = \frac{1}{2}e^{ik(L_1+L_2)+i(\pi+\frac{\pi}{2})}|1\rangle_{d2} = -\frac{i}{2}e^{ik(L_1+L_2)}|1\rangle_{d2}$$

$$\textcircled{3} a \rightarrow c \rightarrow d1: \frac{1}{\sqrt{2}}e^{i\frac{\pi}{2}}e^{ikL_2}e^{i\pi}e^{ikL_1}\frac{1}{\sqrt{2}}e^{i\frac{\pi}{2}}|1\rangle_{d1} = \frac{1}{2}e^{ik(L_1+L_2)+2\pi i}|1\rangle_{d1} = \frac{1}{2}e^{ik(L_1+L_2)}|1\rangle_{d1}$$

$$\textcircled{4} a \rightarrow c \rightarrow d2: \frac{1}{\sqrt{2}}e^{i\frac{\pi}{2}}e^{ikL_2}e^{i\pi}e^{ikL_1}\frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle_{d2} = \frac{1}{2}e^{ik(L_1+L_2)+i(\pi+\frac{\pi}{2})}|1\rangle_{d2} = -\frac{i}{2}e^{ik(L_1+L_2)}|1\rangle_{d2}$$

## 2

この計算により、出口  $d1$  方向の出力は、

$$-\frac{1}{2}e^{ik(L_1+L_2)}|1\rangle_{d1} + \frac{1}{2}e^{ik(L_1+L_2)}|1\rangle_{d1} = 0 \quad (1)$$

より、経路長  $L_1, L_2$  によらず必ず、出力がない、つまり光子を観測することは無いことが分かる。一方、出口  $d2$  方向の出力は、

$$-\frac{i}{2}e^{ik(L_1+L_2)}|1\rangle_{d2} - \frac{i}{2}e^{ik(L_1+L_2)}|1\rangle_{d2} = -ie^{ik(L_1+L_2)}|1\rangle_{d2} \quad (2)$$

ここで、 $|-ie^{ik(L_1+L_2)}|^2 = 1$  より、こちらは当然、100% の確率で光子を検出する。

ここで、図 2 のように経路  $a \rightarrow b$  に”光子が一個当たっただけで爆発する爆弾”を置いたとしよう。このとき、経路  $a \rightarrow b$  で光子の確率はデコヒーレンスを起こしてしまい、今度は重ね合わせ状態にならない。実際に計算すると、上の計算の①、②の経路は光子が透過できないから存在しないことになるので、出口  $d1$  方向の出力は、

$$\frac{1}{2}e^{ik(L_1+L_2)}|1\rangle_{d1} \quad (3)$$

のみとなるので、こちらから光子が出力される確率は  $\left|\frac{1}{2}e^{ik(L_1+L_2)}\right|^2 = \frac{1}{4}$  となる。爆弾が無かった場合と比較すると、こちらの出口では、もともと光子が絶対に観測されなかったのに、爆弾を置いたことによって、25% の確率で光子を観測することになる。もちろんこの方法では、最初のハーフミラーを 50% の確率で透過するから、50% の確率で爆弾は爆発してしまう。しかし、たとえ 25% とはいえ、出口  $d1$  方向で光子を観測できたとすれば、爆弾のある経路を透過しなかったことになるから、これは光子を当てずに爆弾のあるなしを判定できたことになる。

この例が示すのは、量子力学的性質を用いることによって、ハイゼンベルグのガンマ線顕微鏡の限界を超えられる可能性があることを示唆していると筆者は個人的に考えている。