窮理の部屋205

2022年ノーベル物理学賞(その8)

Hasegawa商会の謎のFAXとアインシュタインの問題提起

Hasegawa商会の謎のFAXは、どの向きにしても必ず1か-1とだけ印字されました。後はタイムスタンプだけです。2つの値のどちらかしかとらない、いわゆる2値であることは、スピンが上か下、あるいは右か下というのと一緒でした。前回登場したS(ここでは相関関数と呼びましょう)という量は、①遠く離れた場所での測定はお互いに影響を与えず(局所性)、②測定の前から状態は定まっている(実在性)、という古典的な存在様式(=局所実在性)を仮定すれば2を超えないのでした。|S|≦2はCHSH不等式あるいは改良されたベルの不等式と呼ばれます。

ところがオーソドックスな量子力学のコペンハーゲン解釈では、測定するまで状態は確定しません。②と真っ向対立しています。本当に測定するまで確定しないのでしょうか?この話の発端のアインシュタインは、物理的な実在は、各瞬間各瞬間定まった物理量を持っていて、それは原理的に測定可能なはずだと考えました。確率でしか物理量を言えず、確定でない量子力学は、不完全な理論なのではないか、という問題提起です。

アスペの実験

アスペらは量子力学の綻びを見つけるため次のような実験を行いました。FAX器ならぬ偏光を測定する4つ装置はお互いに角度をずらして設置されます。図中の細長い四角に斜め線を引いた装置はx-yスプリッターと呼ばれる素子ですが、ここでは偏光板だと思ってください。1個の光子が来ると通るか、通らないか、すなわち2値です。片方に1、もう片方に-1を割り振れば、先回の議論から光子が局所性と実在性を持てばSは2を超

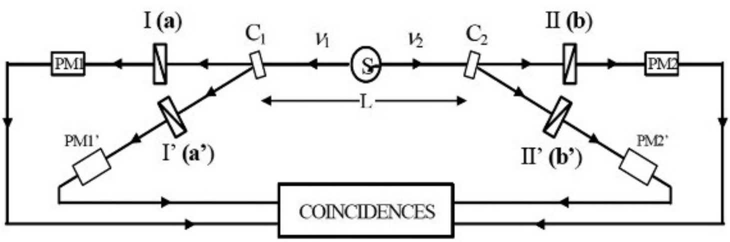

図1:アスペの実験のスケッチ的レイアウト。Sは光源。左がOsaka、右がTokyoだとしてください。C1、C2はちゃかちゃ。I(a)、I'(a')、II(b)、II'(b')とそれらに続くPMはFAX器ならぬ偏光を測定する装置。
Alain Aspect,' BELL'S THEOREM : THE NAIVE VIEW OF AN EXPERIMENTALIST'より

えません。アスペも2を超えることがないことを期待していたようです。さて、実際はどうだったのでしょう？

エンタングル（量子もつれ）した光

アスペらは、エンタングルした光を使いました。カルシウムの$4p^2\ {}^1S_0$という励起状態は光（波長551.3nm）を放出して$4s4p\ {}^1P_1$という状態になります。この状態は寿命が短く（5ナノ秒程度）さらに光（波長442.7nm）を放出して基底状態$4s^2\ {}^1S_0$になります。SとかPは原子の状態を表す記号なのですが、ここではあまり気にしなくともいいです。ともかく短い時間間隔で2つの光子が飛び出すのですが、この2つの光子は強い相関を持っています。

スピン0の2電子系が崩壊して飛び出す2つの電子は、お互いのスピンが反平行でしたが、この2つの光子は、偏光の向きが同一なのです。Osaka（図ではサイトⅠ）とTokyo（図ではサイトⅡ）に同じ向きに偏光板を置くと、Osakaで光子が偏光板を通り抜ければ、必ずTokyoでも通り抜け、Osakaで光子が偏光板を通り抜けれなければ、必ずTokyoでも通り抜けれません。このような光をエンタングル状態の光と呼びます。

装置をθ傾けたときの相関関数S

アスペの実験でOsakaに対してTokyoの偏光板をθだけ傾けたらどうなるでしょう？複雑な量子力学の計算をしなくとも、射影（コサイン成分を拾う）と波の強度は振幅の2乗に比例するという高校で習った？ことを思い出せば十分です。最初の偏光板を通り抜けた光の振幅はθ傾けた2枚枚目の偏光板を通り向けるとcosθ倍になるのですから、Osakaで光子が偏光板を通り抜ければ、Tokyoでは、cos2θの確率で通り抜けるはずです。

もし、Osakaで通り抜けなければ、Tokyoでも、$\cos^2\theta$の確率で通り抜ません。Osakaで通り抜けるか通り抜けないかは半々なので$P_{++}+P_{--}$は$\cos^2\theta$となります（記号は右表）。1−$\cos^2\theta$は$\sin^2\theta$ですから、$P_{+-}+P_{-+}$は$\sin^2\theta$となります。通ったときは1、通らなかったとき−1ですから、opは両方とも通り抜けるか通り抜けない時は1、片方を取り抜け、もう片方を通り抜けない時は−1なので＜ot＞を計算すると＜ot＞＝$P_{++}+P_{--}-P_{+-}-P^{-+}=\cos^2\theta-\sin^2\theta=\cos^2\theta$となります。たしかに＜ot＞は−1と1の間の値です。

表1. 通り抜けるか通り抜けないかの確率の記号

		Tokyo	
		通過	不通過
Osaka	通過	P_{++}	P_{+-}
	不通過	P_{-+}	P_{--}

大倉　宏（科学館学芸員）