2022年ノーベル物理学賞（その9、最終回）

装置をθ傾けたときの相関関数S（その2）

お互いに平行な偏光面を持つエンタングルメント（量子もつれ）した2つの光子がOsakaとTokyoに向かったとします。OsakaとTokyoにはそれぞれ検出器（偏光板）があり、偏光板を通過できたかどうかで光子の状態を測定するとします。そして、Tokyoの偏光板tはOsakaの変更板oに対してθ傾いているとします。Osakaに向かった光子が偏光板oを通り抜けたとき、Tokyoへ向かった光子がtを通り抜ける確率は$\cos^2\theta$【6月号では$\cos2\theta$と書かれていましたが$\cos^2\theta$が正しいです】で、＜ot＞は$\cos2\theta$になります。

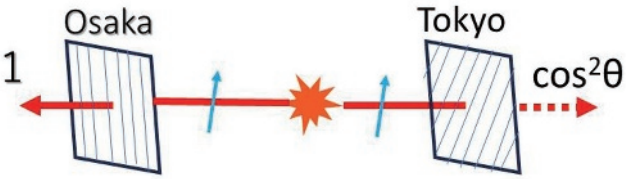
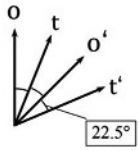


図1：エンタングルメントした光子がOsakaとTokyoに向かい検出される。確率の詳細は、6月号のその8に。

もしCHSH流にOsakaに2枚（oとo'）、Tokyoにも2枚（tとt'）の偏光板を置かれていて、ot、to'、o't'、t'oのなす角をそれぞれθ_1、θ_2、θ_3、θ_4とするとSはS＝$\cos2\theta_1+\cos2\theta_2+\cos2\theta_3-\cos2\theta_4$と表されます。



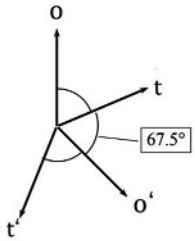


図2：$\theta_1=\theta_2=\theta_3=22.5°$に選ぶとSは最大値$2\sqrt{2}$となり、$\theta_1=\theta_2=\theta_3=67.5°$に選ぶと最小値は$-2\sqrt{2}$となる。

θ_1、θ_2、θ_3は独立に選べますが、θ_4は$\theta_4=\theta1+\theta2+\theta3$なので、$\theta_1$、$\theta_2$、$\theta_3$を選べば自動的に決まります。もし$\theta_1=\theta_2=\theta_3=22.5°$に選べばS＝$\cos45°+\cos45°+\cos45°-\cos135°=2\sqrt{2}$とSは最大になります。つまり量子力学の理論値は、ベルの不等式$|S|\leqq2$を満たさ

ないことがあるのです。

実験は量子力学を支持

ベルの不等式は数学的には常に|S|≦2です。量子力学の予言するように|S|＞2になるかどうかは、実験的に確かめるべきことです。1969年、受賞者のひとりのクラウザーらはこの光子の偏光を用いた実験で|S|＞2になることを示しました。

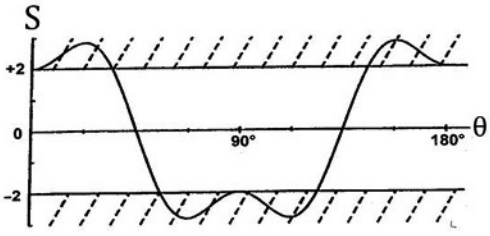


図3：$\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta$として、$\theta$を変えていったときのSの変化。量子力学の計算では広い範囲で|S|は2を超えてしまう。

この実験は繊細で当時では難しいものでした。重要な実験なので、何人もが追試し、ある人は|S|＞2の結果を得、ある人は|S|≦2の結果を得ました。|S|＞2の結果に対し、OsakaサイトとTokyoサイトの距離が不十分ではないか？と疑義が出されました。片方の測定がもう片方に影響を与える可能性があるのではないか？ということでした。

実際、FAX実験では、Osakaサイトの印字とTokyoサイトとでは実は時間差があり、おばちゃんたちは連絡を取り、先に印字された結果とどのFAXを使ったかを相手に伝えていたのでした。そしてその情報を利用して、驚くような結果が出るようカチャカチャ不正操作していたのでした。

1982年のアスペらの実験は、光子を短パルス化し、検出を高速化してこのような抜け穴を塞ぎました。そして測定されたSは量子力学の予想（理論値）をよく再現していることを示し、決着をつけました。

アインシュタインが亡くなったのは1955年で、ベルが不等式を提出したのが1964年ですから、アインシュタインは不等式の存在も実験結果も知りませんでした。もし、アインシュタインが生きていたら、彼はどう言ったでしょう。

結語

長い連載も終わりに近づいてます。結論はあっけないものだったかもしれません。あるいは、それがどうしたの？と思う人もいるかもしれません。なんだかよくわからない不等式が成り立たないことにどんな意味があるのか？それだけでノーベル賞なのか？と訝しんだ方もいらっしゃったかもしれません。

アインシュタインは、観測とは独立に存在し、測定しようがしまいが確定した値を持つ物理的実在があると考えました。ベルの不等式はそのような存在を暗に（というより

顕わにでしょう）仮定しています。24年2月号（その6）の記事でSを計算するとき、o、o’、t、t’のそれぞれに−1か1が割り当てられた表を用いて説明しました。でも、それは事実ではないのです。oを測定したときo’は測定していません。t’を測定したときはtは測定されていません。表にはot、ot’、o’t、o’t’の4つの値があたかも存在したかのように記されていますが、測定して確定したのはこのうちの1つだけなのです。

観測しようがしまいが、物理的実在が存在することを前提とするベルの不等式が、破れたということは、観測するまで物理量は確定しないという奇妙な量子力学の言を信じるしかないということです。現在のところ量子力学の理論と矛盾するような観測はありません。量子力学は、観測と何か、物理的実在とは何かに対して深い問いを我々に突き付けています。

量子力学の「状態」は我々が日常使う状態とはかけ離れているので、ここでは「量子状態」と呼びましょう。量子状態はいくつもの量子状態の重ね合わせで表され、測定されるとひとつの量子状態に収束します。驚くべきことに量子状態は実数で表すことは不可能で虚数成分を持つ複素数です。現実世界に複素数の物理量など存在しません。量子状態は観測できる量ではないのです。量子力学は、量子状態から物理量（＝測定値）を計算する処方箋を与えますし、量子状態が時間的にどう変化するのかも記述する理論です。

23年7月号（その3）で奇妙な入れ替えの話をしました。今、そっくりな白いボールが左右に2つ置かれていたとします。2つを入れ替えても区別はつかないというのは嘘で、わずかな傷とか質量の変化から入れ替えられたことに気づきます。ところが、電子2つ、あるいは光子2つを入れ替えたらどうでしょう？量子力学の世界では、原理的に入れ替えに気づけないのです。我々は、2つの電子、2つの光子の量子状態にエンタングルメント（量子相関）というものがあることを見ました。入れ替え識別が不可能であるからこそエンタングルメントが起こります。ベルの不等式の破れは、まさにエンタングルメントした光子で確定しました。最近、量子技術として量子コンピュータや量子通信というワードがニュースに登場します。その技術の核になるのがエンタングルメントです。エンタングルメントした状態は壊れやすい状態だと言われています。ところが2019年に中国が打ち上げた墨子衛星を使ってツァイリンガーらが量子通信に成功したという報道があり、世界中の科学者が驚きました。

このような状況をアインシュタインやシュレーディンガーはどう考えるか、それは無理というものではありますが、聞いてみたいものです。

大倉　宏（科学館学芸員）