



窮理の部屋 197

## 2022年ノーベル物理学賞(その3)

前回シュテルン・ゲルラッハ(SG)の実験を紹介しました。銀は、47番目の元素ですので47個の電子を持っていますが、ビームが2本に分かれるのは、47番目の電子のスピンの起因していて、電子に2つの成分(状態)があったからです。天下り的ですが、2つの成分を持つ粒子をスピン1/2の粒子と呼びます。

2つの成分を持つとは、測定をすれば、↑か↓のどちらかの状態しかとらないという意味です。磁場をかけるとスピンは磁場に対して平行、あるいは反平行のどちらかの向きを向くのですが、もともと自然界には上下と左右の違いなどなく、ここでは(習慣に従って)磁場の方向を上下としたまです。

強調したいのは、SG実験でビームが2つに分かれるのは、①古典的に全く説明がつかず、量子力学で初めて説明がつく。②スピンに2つの成分があることに起因している。③方向についてややこしい話がある。の3点です。以下③について解説します。

### 入れ替えれない操作と両立しない測定

テーブルの上に本があります。この本をx軸まわりに90度回転させてからz軸まわりに90度回転すると背表紙が上を向きます。ところが、先にz軸まわりに回転させてからx軸まわりに回転させると背表紙は向うを向きます。このように回転操作は順序を入れ替えることができません。

量子力学では、この順序が入れ替えれないことと、同時に測定できないということの関連は、「数学」という道具を使えばエレガントに説明可能なのですが、ここではその結果だけを認めることにしましょう。たとえば、物差しで長さを測り、秤で重さを測るのはどちらを先にしてもかまいません。しかし、スピンとは、まさに同時測定不可能な量なのです。

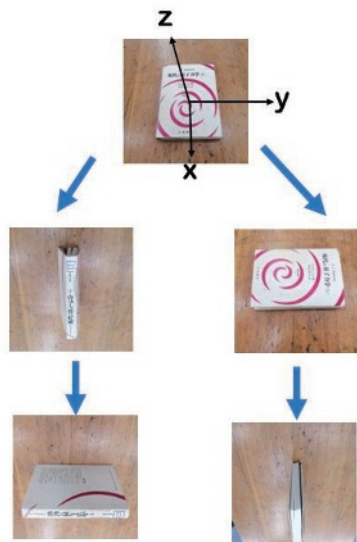


図1. 同じ角度だけ回転させても、回転させる軸の方向を入れ替えると全く違う結果になる。

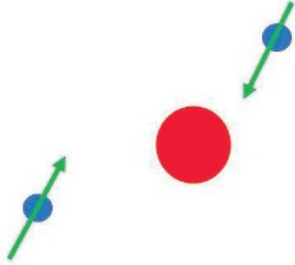


図2. ヘリウム(基底状態)の2個の電子はスピン0を組み、それぞれの向きは反平行となる。

### ヘリウムの基底状態

原子番号2のヘリウムは2個の電子を持ち、一見、 $\uparrow\uparrow$ 、 $\uparrow\downarrow$ 、 $\downarrow\uparrow$ 、 $\downarrow\downarrow$ の4つのスピン状態が実現しそうに思えます。しかし $\uparrow\downarrow$ と $\downarrow\uparrow$ は電子の入れ替えについて対称になっていません。実現するのは、 $\uparrow\uparrow$ 、 $(\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow)/\sqrt{2}$ 、 $\downarrow\downarrow$ そして $(\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow)/\sqrt{2}$ の4つの状態で、最初の3つの状態をスピン三重項、4番目をスピン一重項と呼びます。三重項というのは、それぞれ状態は違うけれど、ヘリウムのエネルギーが同一だという意味で、縮退した状態と呼びます。三重項はスピン $1/2$ と $1/2$ とで1を組んだ状態で、一重項はスピン0を組んだ状態でもあります。ヘリウムのエネルギーの一番低い基底状態は、スピン0の状態になります。

電子のような粒子が多数あるとき、2個の粒子がペアになってスピン0に組むことが多くあります。銀の原子がまさにそうで、ペアになれなかった最後の47番目の電子が銀の原子のスピンを決めていたのです。

電子のような粒子が多数あるとき、2個の粒子がペアになってスピン0に組むことが多くあります。銀の原子がまさにそうで、ペアになれなかった最後の47番目の電子が銀の原子のスピンを決めていたのです。

### 量子もつれ

スピン0の状態は、 $\uparrow\downarrow$ と $\downarrow\uparrow$ が重ね合わされた状態です。その意味するところは、測定するまでスピンの成分は決まっていなくても、片方を測定しても $\uparrow$ であれば、もう片方は測定すれば必ず $\downarrow$ であり、片方を測定して $\downarrow$ であれば必ずもう片方は $\uparrow$ になっているということです。

座標軸を図のように取り、スピン0であった2つの電子が分裂してサイトIとサイトIIに向かったとしましょう。そしてIとIIでスピンを測定するとしましょう。両サイトともz軸を選んでスピンを測定すれば、先述したとおりです。2つのサイトの距離が何キロ離れていても、何光年離れていても、結果は変わりません。どんなに離れていても片方のサイトの結果がもう片方のサイトの結果に影響を与えているかのようです。シュレーディンガーは、この奇妙な関係を量子もつれと呼びました。

では、Iではz軸、IIではx軸を選んで測定したら、その結果はどう解釈できるのでしょうか？

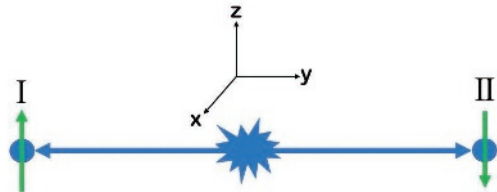


図3. もしIでスピンを測定して $\uparrow$ なら、IIでは必ず $\downarrow$ 。もしIで $\downarrow$ ならIIでは必ず $\uparrow$ 。

大倉 宏(科学館学芸員)