



窮理の部屋 195

## 2022年ノーベル物理学賞(その2)

### 1. 波と粒

19世紀、古典物理学は大成功を収め、全ての自然現象は物理学によって説明が可能なのではないかとさえ思われました。その根底にあるのは、素朴实在論です。物には大きさや色や形、重さなどの属性が備わり決まっていて、それらは測ろうが測るまいがそこにそのように存在する。空間のある位置を占め、動いているならその方向や速度、加速度なども測ろうが測るまいが確定しているという哲学です。そして、物理学がそのあり様を明らかにしていくということでありました。

ところが19世紀末になるとミクロの世界でそのような描像は破綻することがしだいに明らかになってきました。前回解説した原子の構造がまさにそうでした。原子の中心に原子核があり、その周りに電子が存在することは確かなのですが、電子の位置は測定するまではどこにあるのか分からないのです。

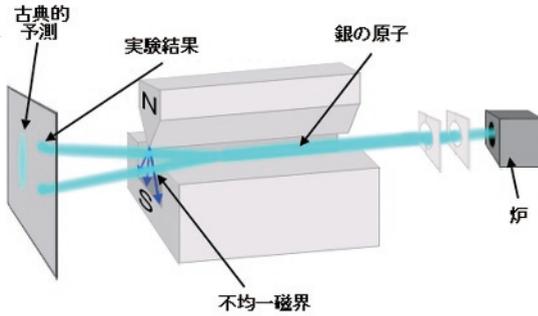
当時光は波だと考えられていました。波の典型例である干渉現象を起こすからでした。ところが、金属に光を当てると電子が叩き出される光電効果という現象は、光を波だと考えただけでは説明不可能でした。光は波長で決まるエネルギーの塊、つまり粒の集まりだとみなすことでこの現象を見事に説明したのはアインシュタインでした。彼はこの光量子仮説でノーベル賞を受賞します。

波であるはずの光が粒の性質があるなら、逆に粒であるはずの電子には波の性質があると唱えたのがド・ブロイでした。光や電子などミクロなものたちは、波と粒の性質を併せ持つ二重性があったのです。

そして、たとえば位置と運動量のように同時に確定できぬ不確定性が存在します。この二重性と不確定性を巧みに取り入れた量子力学が素朴实在論とは相容れぬものであったということを説明するのが本稿の主旨です。

### 2. 磁石とスピン

ミクロの粒子はスピンと呼ばれるベクトルに似た、でもベクトルではない不思議な物理量を持っています。スピンは惑星の自転、コマの回転のようなものを思い浮かべるとイメージしやすいかもしれませんが。電子のスピンはプランク定数を $2\pi$ で割ったものを単位にとると $1/2$ の大きさを持っています。またスピンは磁気に関係していて磁気量子数とも呼ばれるので粒子が小さな棒磁石の性質を持っていると思っていいかもしれませんが。しかし、それらはすぐ後で分かるように似て非なるものです。



シュテルン＝ゲルラッハの実験の模式図(Ykosubによる)。

向きはバラバラのはずです。するとビームは2つに別れず古典的予測のよう上下に伸びる、あるいは左右に伸びるだけです。古典的にはあり得ないことですが、銀原子が磁場に入った瞬間に磁場の向きに、50%は平行に、そして残りの50%は反平行に向きが揃ったとも思わなければなりません。

ここで、上に別れたビームをもう一度装置に通しましょう。するともうビームは別れることがありません。ところが2度目の装置を90度回転させるとビームは50:50で左右に別れます。

これは、次のようなスピンの性質に依るものだと解釈されます。スピンには2成分あって、磁場を掛けられると磁場と平行の向き、あるいは半平行の向きを向く。どの軸の向きでも、向きが揃えればそれはピュアな状態であるが、その軸の向きに関してだけで続いて別の軸について実験を行えば、その別の方向に関する2つの成分は混じっていると云える。

最後の文章にはもう少し説明が要ります。もし、上に向かったビームを今度は45度回転させた装置に通したらどうなるでしょう。結果は右上に70.7%( $1/\sqrt{2}$ )、左下に29.3%( $1-1/\sqrt{2}$ )の割合に別れます。

この結果は、量子力学の教科書にあるパウリ行列というものを使えば簡単に計算ができます。この手の問題でも量子力学では、確率は計算できます。しかし、一つ一つの銀粒子が上に行くのか、下に行くのかは、確率が分かるだけで決定はできません。

また、上の成分だったものが、同時に右だとか左だとか言うことはできません。上にピュアな状態のものは、次に上、あるいは下かどうかを調べれば100%、あるいは0%でこうですとは言えますが、他の方向については確率でしか言えないのです。

左図は、シュテルン＝ゲルラッハの実験と呼ばれる実験です。高温の炉から飛び出した1本の銀のビームを上下2つの磁石の間に通します。するとビームは50:50で上下2つに分かれます。装置を90度回転させればビームは左右に別れます。

これは驚くべきことです。もし、銀原子が小さな棒磁石だとすると、炉から出たときその