

観測するだけでエネルギーを生み出す方法

前にも書いたように、量子力学はシュレーディンガー方程式や場の方程式からなる「力学本体」の部分と、対象物を実験装置により観測した時に何が起きるかを規定する「観測の理論」の二段構えになっている。物質中や真空中での電子や陽子の動きはシュレーディンガー方程式の解である波動関数によって記述される。しかしこの波動関数を見た人は一人もいない。なぜなら「波動関数」とそれを「見る」という行為はそもそも矛盾するからである。観測装置によって波動関数を見た瞬間に、それは別のものに不可逆変化してしまう。標語的に言えば「電子は見えていないときは波のように振る舞うが、見た瞬間に粒子として姿を現す」ということになる。このことを「波束の収縮」とよぶこともある。ただし、これらは標語的な表現に過ぎないことは頭に入れておく必要はある。「標語的表現」とは、お互いにそれが本当に意味するところを知っているという前提の上で、話を早くするために交わす省略語法である。

量子の世界の奇妙さを最も強烈に印象づける2重スリットを用いた「単一電子の自分自身との干渉効果」の実験では、二つの経路を波として通過した（これも標語的表現）電子が、スクリーン上にポツポツと点を作るが、多数回の実験値を積算すると干渉による縞模様が浮かび上がってくる。この様子を視覚化した故外村彰博士の有名な実験がある。これを見て思わずゾクとするのは私だけではないだろう。

電子や陽子のような微細な物体を対象とする量子力学の世界では、対象の状態を全くかき乱すことなく、観測により何らかの情報を引き出すことは一般にできない。これは古典力学の世界とも私たちの日常生活の経験とも大きく異なる。陸上選手によって投げられた砲丸投げの砲丸は、時々刻々、目で追っていくことができるし、そのことによって砲丸の軌跡が影響を受けることはない（あったらオカルトだ）。砲丸を「見る」ためには、そこに光を当てて反射される光を網膜でとらえることが必要だ。つまり「観測」という行為は、必ず対象物への働きかけを伴う。古典力学の世界では、観測対象に及ぼす影響を限りなく小さくして、なおかつ限りなく正確な測定が原理的には可能である、という大前提があるのだ。

この「観測による波束の収縮」は、いつどのように起きるのか？フォン・ノイマンの射影公準によれば

[要請 1] 状態 $|\psi\rangle$ にある系に対し、物理量 A を測定し a_i という値を得た後、系の波動関数は $|\psi_i\rangle$ に変わる。ただし $|\psi_i\rangle$ は物理量 A に対応するエルミート演算子 \tilde{A} に対し

$$\tilde{A}|\psi_i\rangle = a_i|\psi_i\rangle \quad (1)$$

を満たす \tilde{A} の固有状態である。

一方、ボルンによれば、

[要請 2] 状態 $|\psi\rangle$ において物理量 A を測定した時、 a_i という値を得る確率は $|\langle\psi|\psi_i\rangle|^2$ で与えられる。

この[要請 1]と[要請 2]を合わせて量子力学の「コペンハーゲン解釈」と呼ぶ。傲慢にも「正統派解釈」と呼ぶ人もいる。

[要請 2]の言っていることの前提には、量子力学では物理量の測定結果は確率的にしか予言できないということがある。これに激しく反発したのがアインシュタインであることはよく知られている。またボルンは、波動関数の意味するものは「ありうべき測定結果の実現確率（の複素振幅）」という甚だ抽象的なものだ、と言ったのだが、波動方程式の生みの親であるシュレーディンガーはこれを認めず、波動関数は実体であって、物質は本当に波なのだと最後まで考えていたようだ。

ここで問題にしたいのは[要請 1]の方である。フォン・ノイマンの射影公準は、数学的にはすっきりしていて、ほとんど無意識に使っていることが多いのだが、よく考えると変なところがある。もし[要請 1]を認めると、自然界の時間発展には波動方程式に従う量子力学的な過程と、これとは独立の「観測による収縮過程」の2種類があることになる。それは本当だろうか？なお「観測」と「測定」とを使い分ける立場もあるようだが、ここでは区別せずに使う。

いま、Fig.1 のような2重の量子井戸の中の電子を考える。右の井戸に局在した最低の状態を $|1\rangle$ 、左側を $|2\rangle$ とする。 $|1\rangle$ と $|2\rangle$ はエネルギーが等しく、トンネル効果で行き来できるとしてその非対角相互作用の大きさを Δ とする。この2準位系のハミルトニアンは

$$H = \Delta(|1\rangle\langle 2| + |2\rangle\langle 1|) \quad (2)$$

と書ける。系の固有状態は二つに分裂して

$$|a\rangle = (|1\rangle + |2\rangle)/\sqrt{2} \quad (3)$$

$$|b\rangle = (|1\rangle - |2\rangle)/\sqrt{2} \quad (4)$$

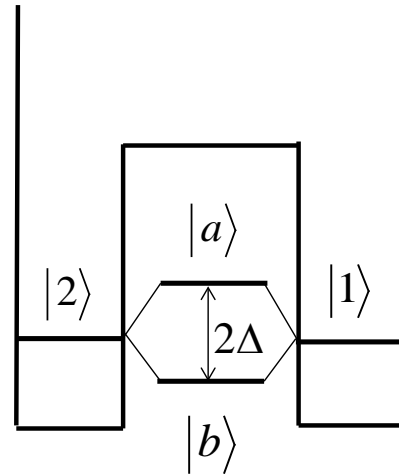


Fig.1

となり、 $|a\rangle$ と $|b\rangle$ の間には 2Δ のエネルギー差が生じる。ただし、 $|1\rangle$ と $|2\rangle$ は互いに直交していると近似した。ここで、最初に電子は最低の固有状態 $|b\rangle$ にいたとする。この状態 $|\psi\rangle = |b\rangle$ は(4)式のように、右の井戸と左の井戸に局在した状態の重ね合わせである。そこで何らかの実験装置を用いて電子が右の井戸にいるかどうかを「観測」してみよう。[要請 2]により、右にいる確率は2分の1であり、射影公準によって測定後に波動関数はその確率で $|1\rangle$ に変化する。この時刻を $t=0$ とする。状態 $|1\rangle$ はハミルトニアン(2)の固有状態ではないので、以後、シュレーディンガー方程式に従って時間発展する。時刻 t では波動関数 $|\psi(t)\rangle$ は

$$|\psi(t)\rangle = \cos \omega t |1\rangle - i \sin \omega t |2\rangle, \quad (\omega = \Delta/\hbar) \quad (5)$$

となるが、これは(3), (4)式によって

$$|\psi(t)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(e^{-i\omega t}|a\rangle + e^{i\omega t}|b\rangle) \quad (6)$$

とも書けるから、任意の時刻に今度は上の準位 $|a\rangle$ にいるかいないかを「観測」すれば2分の1の確率で状態は $|a\rangle$ に変わる。すなわち、最初の状態に対し、2回の「観測」を行うだけで $|b\rangle$ から $|a\rangle$ に状態を変え、一定の確率で 2Δ のエネルギーを得ることができる。このエネルギーを何らかの方法で取り出して再び状態を $|b\rangle$ に戻し、同じ過程 $|b\rangle \rightarrow |1\rangle \rightarrow |a\rangle$ を繰り返せば観測による波束の収縮だけで（つまり「見る」だけで）無尽蔵に仕事を取り出せる！なお、逆量子ゼノン効果とよばれる効果を組み合わせれば、効率は限りなく1に近づけることもできる。

ここまで読んで「それは測定装置との間にエネルギーのやりとりがあるからだ」と考えた人は正しいと私も思うが、その答えは直ちに「コペンハーゲン解釈」すなわち「正統派解釈」に衝突していることを自覚して欲しい。つまり、「観測による波束の収縮」なる特別のイベントがあるわけではなくて、原理的にはすべてが量子力学の枠内で記述できると言っていることになるからだ。簡単のためにこの立場を「量子力学一元論」略して「一元論」とよぶことにしておこう。

「一元論」に立つと観測過程とは、単純な量子系が巨大な自由度を有する測定装置（と観測者）という「環境」と相互作用することで起きる超高速の不可逆過程として理解できるはずだろう。この測定装置と観測過程の具体的なモデル作りは、多分、いや確実にもうたくさんやられていることと思う。そこでは、たとえば測定装置の温度が重要な因子になるはずで、極低温ではボルンの[要請2]も大きく修正を受けるであろうことは上の2準位系のモデルからも予測できる。「観測問題」は量子力学と熱力学の両方が絡んだ「まともな問題」になるはずだ。

「一元論」を実験的に検証することもすでに「まともな問題」の範疇に入りつつあるかも知れない。標語的にいえば「波束の収縮過程を実験で観測する」ことである。これには超高速分光の技術が役に立つだろう。

環境としての測定装置のモデルについて一つ気になることは、null experiment（ヌル実験）の存在である。ヌル実験とは、信号が出ないことをも

って情報とするタイプの実験である。2準位系のモデルで、右にいるかどうかの測定を100%の精度でしたとき、何の信号も出なかったとすると、左にいることが確定する。このとき、量子系は測定装置との相互作用をしたのかしなかったのか？波束の収縮に必要なのは「情報の獲得」であって、必ずしも環境との相互作用ではない、ということも考えられる。この問題には注意深い解析が必要だろう。

Dec. 2014