

第1章 量子力学の定式化

——とある休日の昼下がり



ココアさんココアさん、「量子力学」ってなんですか？



えっ？ 量子力学っていったら物理学の一分野だけど……



ココアさんは分かりますか？



えーっと…… 初歩的なことだけだけれど一応分かる、かな。



じゃあ教えてほしいです……！



それはもちろん。だけど、突然どうしたの？



それは……いや、なんでもないです。とにかく教えてください……！



うーん……まあいっか。お姉ちゃんにまっかせなさい！

1.1 状態と重ね合わせ



じゃあ、最初は「状態」っていう概念について話そっかな。



状態？



うーんとねえ…… そうだ、例えばこんなかんじかな。

例 1.1.1 箱の中にティッピーがいる状態を $|A\rangle$ 、いない状態を $|B\rangle$ とします。最初は箱は閉じていて、箱の中がどうなっているかは分かりません。箱を開けたとき、ティッピーはいるでしょうか、ないでしょうか。



意味がわからないのですが……



そうだよね…… どうせ私の説明なんかがチノちゃんに届くことなんてないんだよね……しくしく



ココアさん、そんな意味じゃありませんからちゃんと説明してください。



……うん。えっとね、こういう箱を用意したとすると、きっとチノちゃんはこう思うよね。「箱にティッピーがいるかどうかなんて、最初にココアさんが入れたかどうかで決まるだけです。ココアさんがティッピーを箱に閉じ込めていたら開けたときもティッピーはいるし、そうでなかつたらいいだけです」って。



……そうですね。そうなると思います。(私のまねはすこし納得がいきませんが)

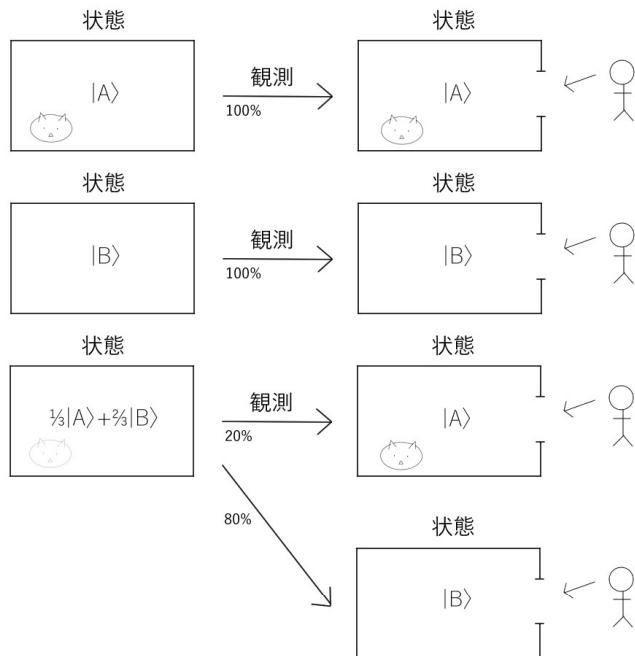


図 1.1 状態の重ね合わせ



ここで、私が最初にどういう状態を用意したかによる、っていうのはまあそうなんだけれど、暗黙の裡にこういう仮定もしているよね：「箱の中の状態は $|A\rangle$ か $|B\rangle$ のどちらかである」。実は量子論ではこれが成り立たないんだよ。



といいますと？



「箱の中の状態は $|A\rangle$ と $|B\rangle$ だけではない。 $\frac{1}{3}|A\rangle + \frac{2}{3}|B\rangle$ のように、これらの状態を適当な割合で混ぜ合わせた状態が存在する」



……ティッピーがいる状態といない状態のあいだの状態があるってことですか？ そんなのあり得ないです。だいいち、そんなところ誰も見たことがないじゃないですか。



じゃあ、こうするとどうかな？ 「閉じた箱の中の状態がどんなものであったとしても、箱が開けられた（観測された）瞬間に箱の中の状態は $|A\rangle$ か $|B\rangle$ のどちらかに“飛び移る”。このときどちらに飛び移るかは、元の状態によって確率的に決まる」。こうすれば、人が見られるのはティッピーがいる状態かいない状態かのどちらかだけになるよね。



ええっと…………そうなる……でしょうか？



絵にしてみるとこんな感じだよ（図 1.1）。



ふむふむ……絵になるとわかりやすいです…！ 確かにこうやって考えてしまえば、人が見られるのはティッピーがいる状態かいない状態かの 2通りになりますね。でも、誰も見ることのできない箱の中の「状

態」がこうなっていて、しかもそれを観測したら確率的に状態が移るなんて、確かめようがないじゃないですか。これが正しいってどうしていえるんですか？

 それはね、「こうやって考えて理論を組み立てたら、それに従って計算した結果が実験結果と合うから」だよ。本当にこうなっているかはわからないけれど、そういう模型を考えたときうまく現実世界の現象を説明できるならそれでいいんだよ。

 そういうものなんですか。

 物理学は数学と違って自然科学だからね。数学や論理学は本当の意味で自由だけれど、物理学は「自然のしくみを記述すること」が目標だから、自然を説明できること、つまり実験と合うことが一番なの。

 じゃあ、いったいどういう実験結果を説明するために、こんな変な考え方をするようにしたんですか…？

 たとえば、「電子の二重スリット実験」とか、「シュテルン・ゲルラッハの実験」とかが分かりやすくていいかなあ。歴史的には黒体輻射についてのプランクの法則の説明なんても大事なんだけれど、統計力学を知らないと分かりづらいかもしれないから。ただ、ここで詳しく説明するよりも、チノちゃんが自分で調べてしてくれたほうがいいかな。そのほうが、歴史の物語もわかつて面白いと思うから。

 わかりました…！

 朝永博士の「光子の裁判」なんかがお勧めだよ。ここでは、量子論で記述される簡単な例として電子のスピニを挙げておくね。

例 1.1.2 電子はスピニとよばれる自由度（属性）をもっています。これは回転（角運動量）のようなもので、いろいろな向きを向いていますが、これを観測すると「上向き」か「下向き」かの 2通りになってしまいます。例えば適当に x, y, z 軸を決めて、 z 方向のスピニ（これを以下 s_z とします）を測定すると、測定結果は $s_z = \frac{1}{2}$ （上向き）か $s_z = -\frac{1}{2}$ （下向き）かの 2通りになります（図 1.2 参照）。

 スピニ……初めて聞きました。

 まあ、スピニは量子論のなかから出てきたものだからね。でも、スピニは磁力の源もあるし、ここではそういうものがあると思って聞いてほしいかな。

 $s_z = \pm \frac{1}{2}$ ということですが、このとき別の、例えば x 軸方向のスピニはどうなるんですか？ この図をみると両方とも $s_x = 0$ になっているみたいですが、そうしてしまうと軸の決め方で結果が変わってしまいますよね。

 ふうふうふう、チノちゃんもいい所に気づいたね。これも量子論の不思議なところなんだけれど、実は s_z と s_x は同時に測定できないんだよ。

 同時に測定できない……？ そんなことがあるんですね……

 これを示すのがさっきの「シュテルン・ゲルラッハの実験」なんだけれど、このあたりはおいおい話していくよ。まずは一般論を先に話していくことにするね。