

今月の学科ニュース

- 「波束の収縮」の謎への実験的アプローチ 豊島耕一（量子干渉グループ）
- 研究生活あれこれ 鈴木史郎（高エネルギー研究室）
- 研究室紹介 鄭 旭光（凝縮系グループ）

「波束の収縮」の謎への実験的アプローチ —それとも風車への突進？—

豊島耕一（量子干渉グループ）

はじめに

広く興味を持っていただけるかも知れない話題なので、学部1年生から同僚諸兄姉まで、何とか最後まで読んでもらえるような文章にしたつもりです。でもうまく行ったかどうか・・・

量子力学の「波束の収縮」の問題は、通常の物理学の難しさとは相当違ったレベルの難問である。量子力学の誕生以来、多くの碩学たちがこの問題に頭を悩ませ、またいろんなアイデアを出してきた。ここでは、この問題に実験で答えを出す可能性について述べる。ただし、誇大宣伝にならないためにあらかじめ断っておくが、「ある特定の答え」に対しての是非が決められる、ということである。しかし、もし「イエス」の判定が出せたとすれば、この問題が解決することになってしまうのではあるが・・・

「波束の収縮」とは

まず「波束の収縮」について簡単に説明しよう。原子や素粒子などミクロな存在を扱う量子力学においても、対象の時間的な変化は、ニュートン力学と同じように、ある方程式（シュレーディンガー方程式と呼ばれる）にしたがって連続的に起こって行くものである。ところが、量子力学では「観測」という事象が特別な意味を持っていて、何かの物理量を「観測」、つまり測定すると、その量が特定の値を持つような状態に、対象の状態が一瞬にして「収縮」するのである。ということは、測定の前には、その量が「決まっていない」状態にあったということも同時に意味する。

たとえば、高校の教科書にもある有名な「ヤングの二重スリット」の実験で言えば、光源から出てきた1個の光子は（電子でもよい）、スリットの直前までやってきている時は、どちらのスリット

を通るか「決まっていない」, 言い換えれば両方のスリットを通りうる「重ね合わせ状態」にあるのだが, スリットの場所に二つの光検出器を置くと, 一つの検出器しか鳴らず, 「その検出器が置かれたスリットのところに来ていた」と決まるのである。

シュレーディンガーの猫

この「波束の収縮」のパラドクス性についての最もポピュラーな寓話は, いわゆる「シュレーディンガーの猫」の話である。これはとても残虐な動物実験だ。箱の中に一匹の猫と, 放射性的原子が1個入っている。原子が崩壊し放射線を出すとガイガー検出器に入り, それで作る電気パルスでハンマーが動き, 毒薬のピンを壊す。そうすると箱の中に閉じこめられた猫は死ぬ。ふたを閉めた後の任意の時刻では, 「観測」が行われないうち, この原子は $|\text{元の原子}\rangle$ という状態と, $|\text{崩壊原子} + \text{放射線}\rangle$ という状態の重ね合わせになっている。(ここで, " $|\rangle$ " という変わったカッコは "ケット" と読み, 量子力学的な状態を表すのに使われる。)

しかし人がある瞬間にふたを開けて「観測」したとすると, その瞬間, 猫の生死によって原子の状態が $|\text{元の原子}\rangle$ か, それとも $|\text{崩壊原子} + \text{放射線}\rangle$ かに収縮したことが分かる。つまりふたを開けない限り, それぞれの状態の確率は時間的に変化するものの, 原子は崩壊前と崩壊後の「重ね合わせ状態」のままであり, それはつまり猫も $|\text{生}\rangle$ の状態と $|\text{死}\rangle$ の状態の重ね合わせということになる。これはいかにも変だ, というのがパラドクスである所以だ。

猫はいかにもマクロな存在なので, 「重ね合わせ」などありえないと思うだろう。他方, 先に挙げた電子や光子では, あまりにも微小な対象であり, ピンセットでつまめるわけでもないので, 「重ね合わせ」ぐらいは許せる, と思われるかも知れない。ところが, オーストリアのツァイリinger という人が, 60個の炭素原子がサッカーボールの縫い目の各頂点に位置するような, 球状の巨大分子 C_{60} に対して, 二重スリットの実験を行った[1]。そして, この, ピンセットでつまめそうな分子の一個が, 二つのスリットを, もちろん分裂することもなく

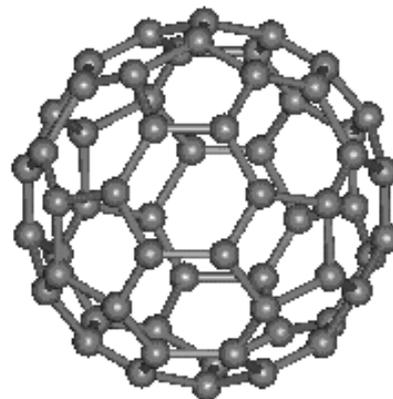


図1: サッカーボール分子 C_{60}

確かに「同時に通る」ことを確認したのである。となると, タンパク質分子でも, 鉛筆でも (さらには猫でも??), 二つのスリットを同時に通ってもおかしくないではないか?

いろいろな解釈

さて, この「波束の収縮」の問題への答えの主なものを列挙すると, 次のようになるだろう。

- (1) 収縮が確率的に起きるとするのは量子力学そのものの不完全さのためで, 完全な理論が作られればすべて因果的に説明できるはずだ。(アインシュタイン)
- (2) 検出装置などマクロな系と作用するとき収縮が起きる
- (3) 観測者の脳による認識が収縮を引き起こす。(ウィグナー)
- (4) 状態が収縮するのではなく, それぞれの状態が実現しているような世界に宇宙全体が分岐する。(エヴェレット)
- (5) ミクロなレベルで収縮が起きる
- (6) 収縮は起きない

この他に, 哲学の問題と絡める立場もある。すなわち「波束の収縮」は観測者の「実存」に関わる問題なので, 物理学の枠組みの中で解決することは困難であるとする [2]。

問題は, これらについて決着を付ける実験ができない, あるいは非常に難しいということだ。3や, 特に4について, いったいどんな実験をしたらいいのか, 途方に暮れる。(4の, 分岐して行った世界をどう調べたらいいのか? !)

ところがところが、なんと1に関しては、J. S.ベルという人が実験のアイデアを出し、80年代初めにはこれが実行され、実験によって否定された[3].つまり観測される時までミクロな対象が「重ね合わせ状態」にあること、つまり「どちらかに決まっていな、未定である」というのは本来的なもので、決して理論や認識、実験の不完全さのためではないということが分かった。

「波束の収縮」はミクロなレベルで起きるか

さてようやく本題に入る。20年以上前に私が遭遇した論文 [4]は、5の是非を検証する思考実験を提案していた。次のようなものだ。

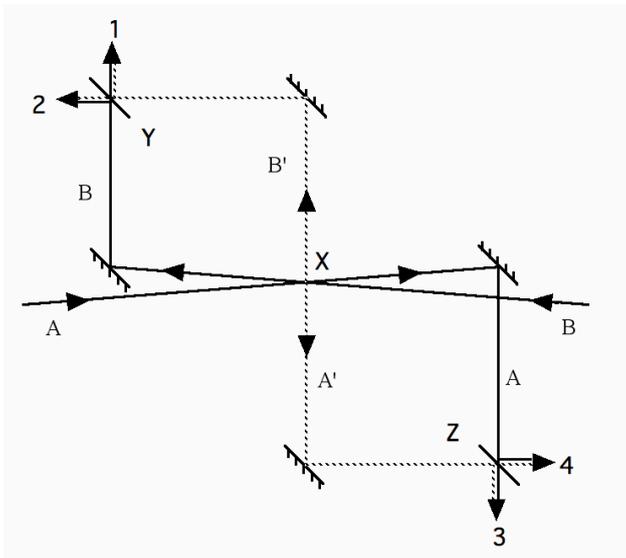


図2:Busseyの思考実験.

X点で衝突が起こったかどうかの「波束の収縮」が、1から4までのカウンターへの粒子の入り方で判定できる。

二つの粒子AとBをXで交差させ、互いに散乱した場合のA'とB' (点線) , そして散乱しなかった場合の直進するAとBとを、鏡で反射させてAとA', BとB'の組にして図のようにハーフミラーZとYに通し、波動として互いに干渉させる。ハーフミラーの4つの出口には1から4の番号を振った4つの粒子検出器が置いてある。この論文によると、Xの点での「散乱するか直進するか」の波束の収縮が、散乱が起きる時点で、つまりミクロなレベルで起きるか起きないかで、4つの粒子検出器への入り方が違ってくるというのである。どう違うかという、もし収縮が起きなければ、1と3の検出器の組が同時に鳴る頻度 $P(1.and.3)$ と、1と4が同時に鳴る頻度 $P(1.and.4)$ に差が出る。逆に収縮が起きればこの二つの頻度の

間に差が出ない。(2-4と2-3の組み合わせでも同様)

思考実験からリアルの実験へ

あくまでも思考実験で、現実の実験をどうするかは全く触れていなかったし、これを読んだ当時は、具体化の方法も思いつかなかった。互いに衝突するものとしては電子など荷電粒子が考えられるが、電子に対するハーフミラーは難しい。他方、光(光子)に対するハーフミラーはどこにでもころがっているが、光子どうしでは互いに衝突(散乱)することがない。また、電子などの物質波を使う場合、波長が極めて短いため干渉させることが難しい。提案が「思考実験」とされた所以である。

しかし筆者らは数年前にこれを現実化する方法を考え、発表した。詳細は論文[5]を見てもらうとして、その方法をできるだけ分かりやすく紹介しよう。非常に小さな領域で電子どうしを衝突させ、わずかに角度の異なる二方向の散乱波の組をハーフミラーに通し、また反対方向の散乱波の組も同様にハーフミラーに通し、Busseyの提案のように4つの「出口」で電子の同時計数をするのである。

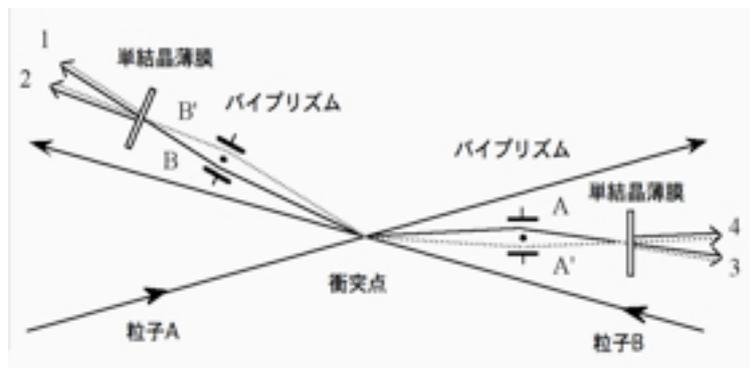


図3:リアルな実験の配置図.

バイプリズムと単結晶薄膜が、図2の4枚の反射鏡とハーフミラーにそれぞれ対応する

思考実験を現実の実験にするための技術的なポイントは2つある。「電界放出」というエネルギーが揃った微小な電子源を使うことで、衝突領域を数ナノメートルの程度まで小さく出来ること、電子ビームで使えるハーフミラーが存在することだ。前者は、波長の短い物質波で干渉を起こさせるために不可欠である。

奇妙な粒子源

ハーフミラーとしては、薄膜単結晶のブラッグ反射を使うことができる。単結晶に、X線や物質波などの波面のそろった波動が入射すると、直進するだけでなく干渉効果でいくつかの方向に強いビームが出てくる。これは逆に、二つの波を入射させて、その互いの角度を適切に選べば、直進波ともう一つの波の回折波とが出口で重ね合わせられることを意味する。波の位相も変化するので、ハーフミラーと同じような役割を持たせることができるのだ。

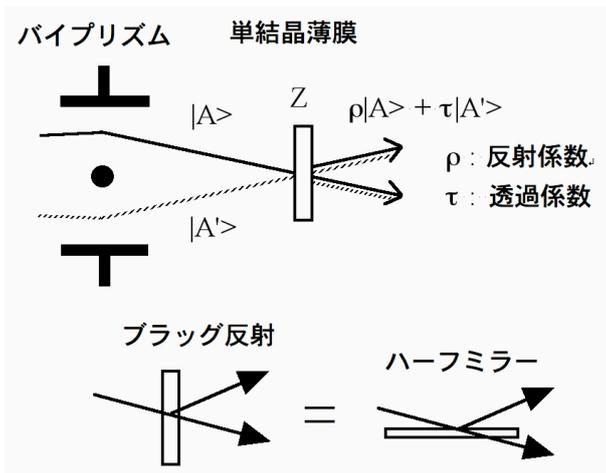


図4:単結晶薄膜による電子線ハーフミラー

Busseyの提案と同様、検出器の異なる組み合わせについて「同時に鳴る」確率を比較することで、波束が収縮するかどうか判定できる。つまり $P(1.\text{and}.3)$ と $P(1.\text{and}.4)$ とを比較する。違いは、Busseyの思考実験では散乱波と直進波とを干渉させたのに対し、リアルの実験では、角度のわずかに異なる散乱波どうしを干渉させる。また、Busseyの4つの全反射鏡は、平行ビームをわずかに角度の異なる二つの平行ビームに変換する装置である「電子線パイプリーム」で置き換えられている。

さて、物理の業界人のほとんどは、この条件では「収縮なし」と推測するだろう。つまり $|AB\rangle$ という散乱波の組と、 $|A'B'\rangle$ という散乱波の組とは、いわゆる「互いにエンタングルした粒子対」であり、それらが重ね合わせの状態にある、つまり $|AB\rangle + |A'B'\rangle$ という状態と考えるのが常識だからである。実験結果としては、 $P(1.\text{and}.3) = P(1.\text{and}.4)$ となるだろうということだ。しかし実験が可能である以上確かめる価値があると思うし、それを目指すのが実験家の「本能」だと信じる。

実は、これらがエンタングル（量子的絡み合い）した粒子対であることから、もう一つの興味ある実験も可能だ。この粒子対の一方だけ、たとえばA-A'の側（図の右側）の散乱波だけについて、始めに紹介したヤングの二重スリットの実験を想定してみる。ここでは電子線パイプリームが二重スリットの役割をしている。そうすると、B-B'の側を「観測しない」という効果のため、干渉縞が消えることが予想されるのである（干渉縞は単結晶薄膜の場所で観測する）。これもまたたいへん奇妙な状況である。たとえ衝突点、つまり粒子の源（みなもと、source）がいかにか小さくても、そしてエネルギーがいかにかそろっていても、干渉性を示さないという奇妙な粒子源が実現することになる[6]。散乱した粒子はあたかも、「誰も見ていないときは波として広がるべし」という量子力学によって課せられた義務を忘れ、はじめから散乱後の進路を決めてしまっているように見える。つまり波束の収縮が起きているかのように振る舞うのだが、しかしこれはエンタングルしているための効果として説明できる。

この配置、つまり干渉縞の観測によっても、ここでの本題である波束の収縮の検証ができる。つまり干渉縞の同時計数、言い換えると2粒子の位置相関の測定により、収縮/非収縮の判定が可能なのだ。つまり「収縮せず」なら位置相関のデータに干渉パターンが出るが、「収縮」なら出ない。

ここで提案したいいずれの実験も既存のテクノロジーによって可能ではあるが、しかし極めてチャレンジングである。

参考文献：

- [1] Anton Zeilinger et al., Nature 401, 680-682, 14.October (1999).
- [2] 遠藤隆, 「量子測定の偶然性と観測者の実存」, 佐賀大学教養部研究紀要29巻(1996)5-30.
- [3] Aspect, A. et al. Phys. Rev. Lett. 1981, Vol.47, 460; 1982, Vol.49, 91; 1982, Vol.49, 1804.
- [4] Bussey, P. J., Phys. Lett. A 106 (1984) 407
- [5] K. Toyoshima, T. Endo and Y. Hirayoshi, Journal of Physics: Conference Series 174 (2009) 012028 (ネットで無料で読めます。)
- [6] Toyoshima K, Endo T and Hirayoshi Y, Czech. J. Phys. 56 (2006) 1361.