

---

## 物理学法則と自由意志

湯川哲之

---

本論文は、2001年4月28日花園大学「禅と生命科学」講演会（世話人。佐々木閑助教授）における講演に加筆訂正したものである。講演の本来のタイトルは「物理世界の意味を問う」であったが、あまりにも一般的過ぎるので、もう少し具体的なタイトルをつけ、また、2回に分けて行うこととなった。第1回目は「物理学法則と自由意志」で、量子力学の解釈に関する話題を中心に話した。第2回は「時間と空間の始まり」というタイトルで、究極の理論とも呼ばれる素粒子の超弦模型（スーパー・ストリング）について話す予定である。

これらの物理学研究が現代人にとって何を意味するのかを平易に説明する、というのが私に与えられた課題であるが、それを完璧に行うことは研究そのものと同じくらい困難な事である。以前、私は「文系のためのスーパー・ストリング」という話をして理系の人からも分からなかったと酷評を受けた苦い経験があり、これが再挑戦となる。文系と理系の乖離が語られて久しいが同じ理系ですら相互の理解が困難となってきていることをひしひしと感じる。一体理解するとはどのようなことかその意味も考えながら解説を試みる。

自由意志はありえるかという問題を物理学研究者の視点で言い換えれば、‘この世界が自然法則にしたがって運動しているならば、その中で活動する人間の意志の自由はどうありえるのか?’ということであろう。私達は、自分が自分の行動の決定者であり、その結果は自分の責任であり、物理法則などによりあらかじめ定められているようなものではないと経験的に感じています。では、路傍の石や、川の流れ、秋の台風はどうでしょうか？転がったり、渦を巻いたり、吹き飛ばしたりするのは石や水や風の自由意志でしょうか？多分、自然の法則がそうさせていると誰もが考えます。

私達の目に映る物体の運動は、原理的にはニュートン力学により記述できると物理学は教えています。この力学の際立った特長は、因果性と決定論にあります。

すなわち、いま現在のこの状態はすべて過去の状態にその原因があるということ、同じ原因は同じ結果を生むということです。一寸先は闇ではなく、今の状態で一意的に決められています。物理学理論的には、運動が時間に関する1次微分方程式で書かれているということです。原理的には、過去のある時刻での運動状態が定まれば、その後の振る舞いはこの運動方程式によりすべて決まってしまうということになります。これを極端に考えれば、宇宙の始まりでの物の運動状態がわかったなら、その後の宇宙の歴史は、すべて運動方程式により決まるということになります。人間の心の動きや意識はひとまず横に置けば、この決定論はニュートン以後の力学的世界観の自然な帰結のように思えます。

なお、古典力学でもカオスのように、運動の予測が限定される場合があります。これは因果律や決定論が破れているからではなく予測に必要な初期条件の決定に対する限界に起因することです。カオスでは初期条件の不確定性は時間とともに指数的に増大します。

それでは、人間に関係したことは、物理法則に従わなくて良いのでしょうか？石や水のような無生物と、植物や動物などの生物を比べると、外見上はずいぶん違うと感じるのは今も昔も同じです。しかし、生物の構造や運動の仕組みなどについての最近の科学的な知識の蓄積により、その差異はますます小さくなっています。例えば、生物はどれも細胞を単位として作られています。その材料にはこの地球上ではありふれた原子や分子が使われています。また、細胞の活動は、そのほとんどがよく知られた化学反応のネットワークにより進められます。生物の体作りの設計図は、4種類の核酸分子が連なったDNAと呼ばれる鎖状の分子上に核酸の並び方として書きとめられています。この設計図に従い体を形作るたんぱく質が作られることや、たんぱく質によりDNAが複製されることも一連の化学反応として理解されています。もちろん人間の行動を予測することは現実的に不可能ですが、これは人間の体の複雑性が原因と考えられます。

体のつくりや動きは物理法則に従っているとしても、人の心や意識についてはどうでしょうか？意識や精神を物質の組み立て方やその動きを基本にして理解する試みは最近やっと始まったばかりですが、基本的には体の他の部分と同じく、細胞、この場合は神経細胞とそのネットワークの働きで理解できるだろうと多くの研究者は考えています。

生命とは何か？意識とは何か？との問いに対して、私達すべてが納得する解答を持つまでには到っていませんが、生命も物理法則を基本として運動していると考えて誤りはないといえるのでないでしょうか。「生命とは何か」(岩波新書、1951)を書いた有名な理論物理学者のシュレーディンガーは、考え行動する「私」は自然法則に従って制御する「人間」である、と言っています。もしそうだとすれば、ニュートン力学が示すように宇宙の始まりがその後のすべてを決定したと考えて良いのでしょうか？それとも、自由意志の存在は、決定論的な力学法則以外に私達の行動をつかさどる未知の法則の存在を示しているのでしょうか？

私は、物理学者として自然法則以外の超法則を持ち込むことは極力避けたいと思っています。不遜かもしれませんが、ここで神や仏の力を借りることもひとまず避けたいと思っています。自由意志の問題は、ニュートン力学を基礎とする古典力学的世界観を離れ、現在多くの物理学者が基本的と考えている量子力学を正しく取り込んだ世界観により解決できるというのがこの論文の主眼点です。

この考えを理解していただくためには、量子力学とは一体どのようなものであるかを知らなければなりません。量子力学という言葉聞いた方は少ないかもしれませんが、私達の身の回りにある多くのものは量子力学を動作原理としています。例えば、ほとんどの家電製品には半導体のチップが使われていますが、半導体の性質こそ量子力学なしには理解できません。レーザーや原子力発電なども量子力学の基本的な性質を応用しています。しかし、量子力学は物理学を専門とする研究者にとってもなかなかとつき難い物理法則なのです。量子力学が取り扱う現象は、あまりにも日常の経験とはかけ離れているため、量子力学をはじめて学ぶ多くの学生が迷路に落ち込むことはよく知られています。量子力学を理解することがいかに困難かは、それが発見されてから100年経つ今もその解釈をめぐる専門家の間で議論が絶えないことからもうかがい知れます。

ここでは量子力学の説明は必要最小限にとどめるだけでなく、学校では決して教えない順序で量子力学を紹介します。それは、失礼かもしれませんが、皆さんはニュートン力学すら知らないと仮定して、先ず量子力学ありきとして出発することです。量子力学の説明に入る前に強調しておきたいことは、量子力学もシュレーディンガー方程式と呼ばれる微分方程式で書かれた決定論的な運動方程式にしたがっていることです。量子力学は確率を記述する力学であり決定論的ではな

いと言う人もいますが、それは観測に対する解釈の問題であり力学としての因果性と決定論は失われていません。

それではこれより量子力学の説明に入ります。量子力学が扱う最も典型的な対象は、電子とか原子と呼ばれる大きさが1ナノメートル以下の物体と、分子とか結晶と呼ばれるそれらの集合です。1メートルの十億分の1が1ナノメートルですから、この世界は日常生活と9桁もかけ離れています。これら電子や原子を一般に重さはあるが大きさのない‘粒子’と呼びます。量子力学の著しい特徴として、粒子の状態はその位置を指定することにより決められることです。古典力学では、粒子の状態は位置と速度を同時に指定することにより決められるとしていますからこれは大きな違いです。それでは量子力学では完全に状態を指定できないのでしょうか？

この不完全性を補うのが量子力学の際立った性質である、重ね合わせの原理です。例えば、ある速度で走る粒子は、あらゆる位置に存在する粒子を適当に重みをつけて重ね合わせて作ります。こうしておく、逆にある位置に存在する粒子をあらゆる方向に運動する状態を重ね合わせて作ることも出来ます。位置が定められた状態では運動量が定まらないし、逆に運動量の決まった状態では位置が定まらないようになっています。これが、皆さんも聞いたことがあるかもしれませんが、ハイゼンベルグの‘不確定性原理’です。不確定性原理からは、古典力学で指定されるような位置と速度が同時に決められた状態は許されません。しかし、日常生活で扱うような重くて大きい物体なら、状態の重ね合わせによって、位置と速度の値に不確定性原理を満たす範囲で幅を持たせて指定した状態で十分に正確なため、実用上はニュートン力学で運動を記述することが出来るわけです。

このような量子力学の特徴を端的に示す題材としてスリット実験が挙げられます。平行にあけた2本のスリットに、ブラウン管を使い電子を通します(図1)。ブラウン管の後ろの突き出た部分には、電子銃があり、そこから電子が電氣的に加速され打ち出されます。その電子がブラウン管の前面ガラスの裏に塗られた蛍光物質にぶつかり光を発するわけです。この電子銃と蛍光板の間にスリットを置き、ブラウン管の電源を入れるとスクリーンには図1のような縞模様が現れます。古典力学では、電子の位置と方向が同時に指定されますから、電子銃から出た電子は、銃口とスリットをつなぐ直線上にあるスクリーンに塗られた蛍光物質を光ら

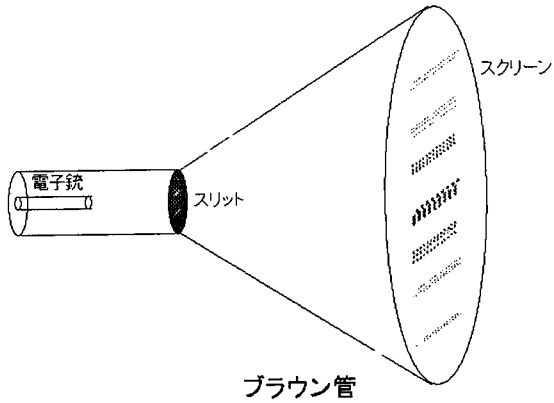


図 1.

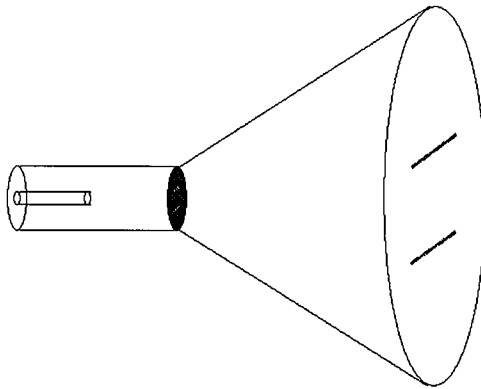


図 2.

せませす。したがって図 2 のように上のスリットを通った電子は上に、下のスリットを通った電子は下に線を描くことが期待されます。

しかし、現実にはこの実験のようにスクリーンに何本もの線が現れます。これは電子が上に述べたような性質を持っているからだと解釈できます。図 3 のように、2 つのスリットを通り抜けてきた 2 つの波は、強めあうところで明るくなり、打ち消しあうところは暗くなる干渉縞を作ります。量子力学の特異な点は、1 つの電子がこのような波の性質を持つことです。電子を 1 つ 1 つ別々にスリットを通して、はじめはスクリーン上にランダムに散らばって光っていたように見えた点々が、実験を重ねていくうちに縞模様のはっきりしてくることが確かめられて

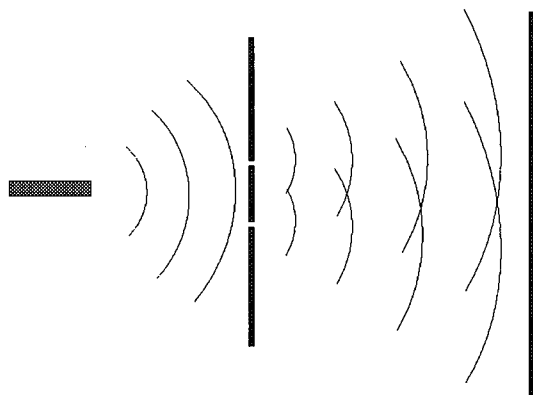


図 3.

います。これは1つの電子でも干渉できることを表しています。

電子が干渉縞を作るこの現象は、状態の重ね合わせで理解できます。電子銃から発射された電子は不確定性原理の範囲で適当に重ねあわされた電子が広がりながら前方に伝わっていきます。広がりをもって重ねあわされた電子がスリットを通過すれば、その状態は図3のような上のスリットを通る電子と下のスリットを通る電子の重ね合わせの状態になっています。この電子が蛍光版とぶつかって光を出すとき2つのスリットを通過した電子の波が干渉しあうわけです。ここで注意していただきたいことは、電子が2つのスリットを通るということを日常の感覚で捉えてはいけません。電子は、決して半分づつ2つに分裂したり、はたまた2個出来たりはしてはいません。これが量子力学で言う状態の重ね合わせなのです。

さて、電子銃から飛び出すとき電子は垂直方向の位置が決まっていたため垂直方向の速度が不定でした。だから、電子がスリットを通過するときもどちらを通過したかは不確定でした。それがなぜスクリーン上の1点の蛍光物質を光らせたのでしょうか？この実験では、電子はスリットを通るときは波の性質を持ち、スクリーン上では粒子の性質を見せています。

電子が粒子の性質を持つことはスクリーン上の1点を光らせたことから推測されますが、実は、わたくしたちが光ったと観測した点は電子が光ったわけではありません。先ず、電子が蛍光物質、すなわち光を出しやすい原子におつかり、その原子の周りを回っている電子がたたき出され、その電子が近くにいる別の蛍光

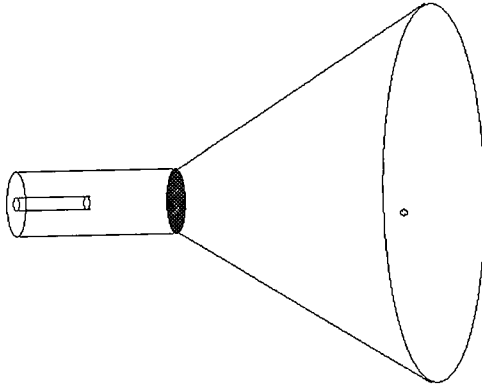


図 4.

物質にぶつかり、次々と雪崩のように多くの電子がたたき出されると同時に、電子を剥ぎ取られた原子に再び電子が引き戻される時光を発するのです。一般に私達が実験で直接観測出来るのは電子1つ1つではなく非常にたくさんの光の集団です。

電子は波のように広がった状態で伝わっているのだから、スリットを通過した電子に電子が剥ぎ取られる原子はスクリーン上のどの蛍光物質原子でも良いはずです。実際、電子がスクリーンにぶつかったときの電子とスクリーンの状態は原子から電子が剥ぎ取られたありとあらゆる状態の重ねあわせになっているはずです。例えば図4のように、原子Aが電子をなくした状態でも、図5のように原子Bが電子をなくした状態でも、図6のように原子Cが電子をなくした状態でもいいわけです。もちろんどの原子も変化しない状態も重ね合わさっているでしょう。ここでは簡単のため3つの原子しか考えていませんが一般には無限個の状態の重ねあわせになっています。これらの状態の重なり具合は、スリットを通過してきた電子の状態を反映していなければならないことはもちろんです。これに続く出来事はすでに話したように原子A付近で電子雪崩が起こりその付近の蛍光物質を光らせる状態、原子B付近が光る状態、原子C付近が光る状態、……、どこも光らない状態などが重ね合わさっていると考えるのが自然です。

この実験を、ブラウン管を見ている実験者、さらにその周りの環境をすべて含めて考えることを提案したのがプリンストン大学のエヴァレット III で 1957 年の

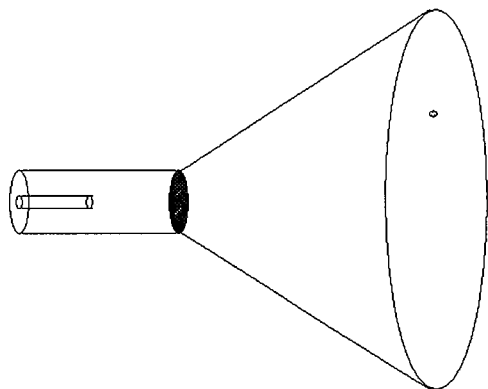


図 5.

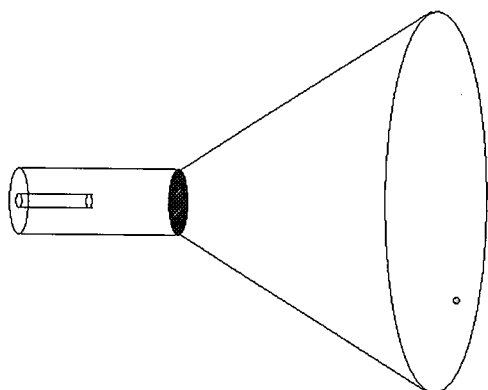


図 6.

ことでした。あたりまえのように思えますが、これは大変なことを意味します。原子 A の近傍が光ったことを観察している観測者（図 7）、原子 B の近傍が光ったのを見ている観測者（図 8）、原子 C……（図 9）、真っ黒なスクリーンを見ている観測者などの重ね合わさった状態が出来ることになるからです。観測者はスクリーンが示す可能な状態を必ず見ることになります。しかし、先ほども注意しましたが、観測者が増えたわけではないのですから、観測者が原子 A 近傍の光ったことを知った世界と原子 B 近傍が光ったのを見た観測者のいる世界等々の世界が同時に存在しているわけではありません。この実験により世界はスクリーンがとり得る状態の数だけ重ね合わさったことになります。これを量子力学の‘多世界



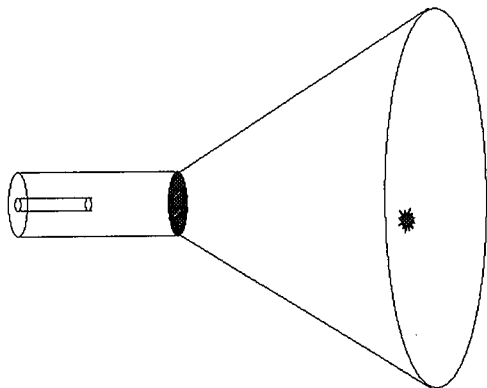


図 7.

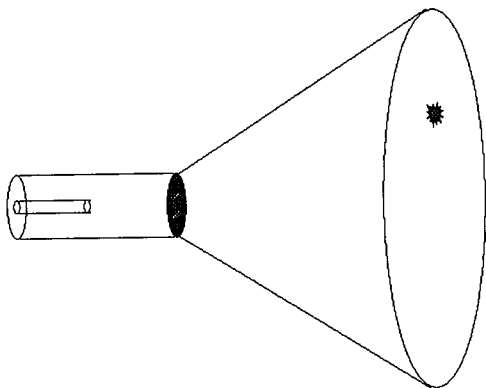


図 8.

解釈' といいます。多世界といっても SF に出てくるように観測者やそれが住む世界が幾つにも分岐したのではありません。残念なことにこの名前の付け方も誤解を招く原因となっているようです。

量子力学の多世界解釈が提案された時は、量子力学の確率解釈（デンマークのニールス・ボーアを中心に研究が進められたことよりコペンハーゲン解釈とも呼ばれる）が一般的でした。スリット実験で言えば、観測によりある確率でひとつの原子 A が光る状態が選ばれると考えることです。これは、シュレーディンガー

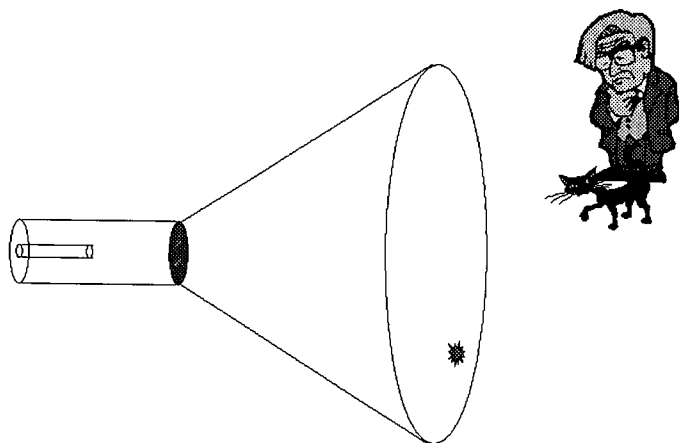


図 9.

方程式に従って決定論的に進んでいた運動が、観測行為のときに限って確率論で進行するという不自然な理論です。アインシュタインは、‘神はさいころを振らない’と言ってコペンハーゲン解釈に基づく量子力学を認めることは一生なかったと言われていますが、今になってみるとさすがだと感心させられます。一方、多世界解釈は理論的には何の不都合もないのですが、世界が重なり合っていると言う非常識さや、それを検証することが出来ないという非現実性から、これを受け入れがたいとして拒否する物理学者もいます。アインシュタインが生きていたら、多世界解釈でも量子力学は認められないかぜひ聞きたいところです。

ところが、最近、NHKBOOKS「可能世界の哲学」(三浦俊彦著)を読んでびっくりしました。この本は、様相論理学と呼ばれる哲学についてかかれています。ここでその内容を詳しくは話せませんが、仮想的な世界が現実中存在すると考えることの意味を考える哲学とってください。中でも、デビット・ルイスが主張する様相実在論は、もしもで考えられるいかなる世界も実在しているとするもので、その実在の仕方を量子力学的重ねあわせと考えればとりまなおさず多世界理論に他なりません。様相実在論は、この本の著者から見ても論理的に最も無矛盾であると思えるにもかかわらず、これを真面目にとる学者は本人以外ほとんどいない、と書かれていたのが印象的でした。‘理屈は正しいのだが、しかしあまりにも非常識な…’という話はどこにでもあるものです。様相実在論も多世界解釈と同時期の1950年代後半に提案されたというのは歴史の偶然でしょうか？

多世界解釈が、決して特異な物理学者の創造ではなく、量子力学から出てくる自然な考えであることを示す直接的な理論として、1948年にリチャード・ファイマンにより提案された経路積分法があります。ファイマンの経路積分法では、量子力学を微分方程式としてではなく積分で表します。大雑把に言えばある時刻の状態から出発し、別の時刻の状態に行き着くには、その途中で可能なすべての状態を重ね合わせることにあります。ただ足し合わせているだけなら力学法則にはなりません、状態に依存する重みをつけて足し合わせることで微分方程式の解になるようにしてあります。

エヴァレットの多世界解釈は、注目する対象だけでなく観測者とその観測者が住む世界すべてを考えるとこが本質です。従って、ファイマン積分の積分変数と積分領域を世界の存在全体にとればエヴァレットの波動関数がえられることとなります。またファイマンの経路積分法は物理学者にとって最も標準的な量子力学の理論的基礎付けとして定評があります。この方法によると、全ての巨視的な状態はファイマン積分の古典力学に従う経路に沿った積分から近似的に求められることを示しています。全ての可能世界は近似的に古典力学の解ですから、エヴァレットの多世界解釈もこの立場に立てば自然に受け入れられると考えたいのですが、当のファイマンは重力を量子化することの困難性から、宇宙のように非常に大きい系に量子力学は成り立たないかもしれないと考えていたふしがあり、多世界解釈を認めなかったようです。

最後に、もう一度「自由意志」はあるかと言う疑問について考えましょう。力学法則は決定論であることは古典力学でも量子力学でも正しいのですが、古典力学は1つの世界に限っているのに対し、量子力学はすべての可能な世界を対象とします。従って、私達がいる世界だけに注目すれば、これは単に宇宙の初期条件から到達可能な無限に存在する世界の中の1つであるに過ぎません。今住んでいる世界が完全にわかったとしても、量子力学は可能な世界の重ね合わせ具合を決定するに過ぎません。人はそのうちのどれかを、そしてどれでも、体現することになります。これを自由意志の存在と言って良いかどうかは考え次第だと思います。人間の感覚には時々誤って原因と結果を逆転して解釈する場合もあることです。

さて、皆さんは自由意志があると思いますか？