

【論文】

非決定論と自由

Indeterminism and Freedom

津留 竜馬[†]

「決定論 vs 自由」という対立図式はわかりやすい。物理的決定論が正しいとして、宇宙の初期状態と物理法則によりその後の宇宙全体の時間発展がすべて決まってしまうとしよう。現代の科学的な世界観においては、私たち人間も宇宙の一部であり完全に物理的対象から構成されているとされる。そのため物理的決定論の下では、ある人がどのような行動をとるかということも、その人が生まれるはるか前からすでに決まっていたことになる。「自分がこれから何をするのかが自分が生まれる前からすでに決定済みなのであれば、そのとき自分は自由ではない。」これは非常にわかりやすい、ごく常識的な感覚である。こうして決定論と自由は対立するものとなる。

さてそうであれば、自由を擁護したい者にとって決定論は言わば敵であり、反対に、決定論は成り立たないとする非決定論は味方となるはずである。ところが、非決定論と自由は対立する、非決定論の下では自由は成立しない、とする議論がある¹⁾。これはいったいどういうことであろうか。決定論こそが自由を妨げるものであり、決定論が成り立たない状況は自由が存在するために是非とも必要だったのではないか。それなのになぜ非決定論の下で自由は不可能とされてしまうのか。

本稿ではまず、本来自由にとって歓迎すべきものであるはずの非決定論がなぜ自由の障害ともなるのか、という点を明らかにする。そしてこれに続き、そのような障害を乗り越えて非決定論の下で自由を擁護するにはどうすればよいのかをさぐることにしたい²⁾。

1 自由の不可能性論証

ファン・インワージェンは、彼の論文「The Mystery of Metaphysical Freedom」において、非決定論の下で自由は不可能であるとする議論を与えている³⁾。この議論はしばしば次のような形で提示される⁴⁾。

- 非決定論が正しいと仮定する。すなわち、ある出来事が存在して、その出来事の生起はその時点までの宇宙全体の状態と物理法則によっては決定されていない。
- 自由な行為もまた、その行為がなされる時点までの宇宙全体の状態と物理法則によっては決定されていない。(行為がなされる時点までにすでに宇宙により決定済みなのであれば、その行為は自由

[†]立教大学社会学部兼任講師 rtsuru@mwd.biglobe.ne.jp

な行為ではない。)

3. ところが、人がある行為を実行しようとする「決断」は、その行為がなされる時点までの宇宙全体の状態のなかに含まれる。そのため、その行為は行為者の決断によっても決定されていない。

4. 行為者の決断によっても決定されていない行為は、その人の自由な行為ではない。よって、非決定論の下での自由は不可能である。

議論の内容を詳しく見ていこう。ひとつめのステップにおいては、まず非決定論の主張が述べられる。すなわち、先行状態と物理法則によっては決定されていないような出来事存在が主張される。そしてふたつめのステップにおいて、自由な行為がひとつめのステップで存在が認められたような種類の出来事であることが確認される。そのため、ここまでの議論では、先行状態と物理法則によって決定されるような出来事と、先行状態と物理法則によっては決定されない出来事の二種類があって、自由な行為は後者の出来事に分類される、とされていることになる。要するに、決定論的に生じる出来事と非決定論的に生じる出来事の二種類があって、自由な行為は非決定論的に生じる出来事である、というわけである。

ここですこし立ち止まって、「非決定論」ということでどのような状況を想定しておくべきか、考えておきたい。というのも、物理的決定論の方はある程度内容が定まっていると言えるが、それが成り立たないと主張する非決定論の方はそうではないから。ただ「非決定論的に生じる出来事が少なくともひとつは存在する」とだけ言われても、それでどのような状況になっているかは不明確なままである。例えば、宇宙の一部領域で一度だけ非決定論的に出来事が生じたことがあったが、それ以外はすべての領域と時間で決定論的に出来事は生じているというような場合も、非決定論が成り立つ世界になってしまう⁵⁾。

ここで私は、物理的決定論が間違いであった場合として、「あらゆるものが量子論の非決定論的な(確率的な)法則にしたがって時間発展している」という状況を想定することにしたい⁶⁾。すなわち、非決定論が成り立つ世界として、すべての出来事が非決定論的に生じているような状況を想定したい。もちろんこう考えなくてはならない必然性はないが、これはある程度自然な考え方であると思われる。というのも、物理的決定論は間違いであったと判断されるとすれば、それはやはり量子論の主張が広く認められるようになった結果であろうと思われるから。量子論において物質の非決定論的な挙動があらわれてくるのは、主に素粒子レベルにおいてである。すべての物体が素粒子から構成されている以上、あらゆるものが非決定論的にふるまうと考えるのは自然なことである。これはもちろん、マクロな物理的対象が近似的にほぼ決定論的と言ってよいようなふるまいをする、ということ否定するものではない。そうではなく、一般的にはすべての出来事が非決定論的な法則にしたがって生じていると考えるが、状況によっては、100パーセント確実に生起が予測できる場合⁷⁾やマクロレベルにおいて物体が近似的に決定論的にふるまう場合もある、と考えるのである。このように考えれば「決定論的に生じる出来事」と「非決定論的に生じる出来事」に分けて対応する必要はなくなる。このような非決定論を本稿では「全面的な物理的決定論」と呼ぶことにする。

そこでここからは、議論のひとつめのステップで仮定される非決定論はいま見てきたような全面的な物理的決定論なのだ、と考えることにしたい。すると議論がすこし変わってくる。それは、議論のふ

たつめのステップで仮定されていた「自由な行為は非決定論的に生じる出来事である」との主張が不要になる、という点である。というのも、全面的非決定論が正しいときには、すべての出来事が非決定論的に生じることになるから。すべての出来事が非決定論的に生じるのであれば、当然のこととして自由な行為もその例外ではなくなる。実は「自由な行為は非決定論的に生じる出来事である」との主張は、リバタリアニズムと呼ばれる立場からきている。そのため、議論の仮定を全面的な物理的非決定論とした場合、ここでの議論は自由についての特定の立場を標的としたものではなく、より一般的な射程をもった議論となる。

さてここで、議論後半の検討にもどる。上で議論を提示する際には「決断」という言葉を使ったが、決断という言葉にこだわる必要はない。人が行為をする前におこなうことであれば、何でもよいのである。この議論のポイントは、それが何であれ、行為者が行為前に行うことはすべてその時点までの宇宙の先行状態のなかに含まれる、ということである。いま仮定によりどんな出来事も宇宙の先行状態と物理法則によっては決定されないのであるから、行為者が行為前にするどんなこともその行為を決定づけられない。以上がみつめのステップの内容である。最後のよつめのステップは議論全体の結論にあたる。その結論は、自身で決定づけられないような行為はその人の自由な行為ではない、というものである。

これで議論全体を見たことになる。上で述べたとおり、後半の議論で中心的な役割を果たしているのは、行為者が行為前にすることはすべて宇宙の先行状態のなかに含まれる、との主張である。これはまったくその通りであり、この主張を簡単に覆せるようには思われない。そしてこの主張の正しさゆえに、自由の不可能性論証に反対するのは、ほとんど無理のように思われる。というのも、この議論を回避して全面的な物理的非決定論の下で自由を擁護するにはどうすればよいのかを考えてみるならば、ただちに思いつける方策は、ほとんど実行が不可能と思われるものひとつしかないように思われるから。その方策とはすなわち、宇宙の外側から自分の行為決定に介入する、というものである。

非決定論の主張により、宇宙の先行状態と物理法則によっては次の瞬間におこる出来事は決定されない。議論の後半の主張により、行為者が行為前におこなうことは宇宙の先行状態に含まれる。これでは、自身で自分の行為を決定づけることはできない。繰り返しになるが、行為者および彼女が行為前になすことすべてがこの宇宙に内属している、ということが議論のかなめである。自分が宇宙の一部である限り、自身の行為を決定することはできない。そうであれば、宇宙の外から行為決定のプロセスに介入するしかない。つまり、自由の不可能性論証に反対して自由を擁護しようと試みると、宇宙の外に出るしか方法がないように思ってしまうのである。

たしかにこれは途方もない方策であり、実行が不可能と思われる。しかしこの考えは、非決定論の下での自由を擁護する立場として、実際に提唱されてきたものである。それは「行為者因果説」と呼ばれる⁸⁾。この立場によると、行為者は「行為者因果」と呼ばれる不思議な力をもっている。そしてこれにより行為者は、何か他のものの因果的な結果としてではなく、自らが第一原因となって行為をなすことができる。つまり行為者は、この世界の物理的な因果関係の網の目から離脱して（それに束縛されることなしに）、自らの行為を決定づけることができる。もちろん実際に行行為者因果説を採用する者は、このように極端で短絡的な説明の仕方はしないのかもしれない。しかし行為者因果説という立場の眼目は、「宇宙の外に

出ること」「世界を超越した位置に立つこと」にあったはずである⁹⁾。それは、そうでもしなければ私たちはこの物理的世界の中で自由にふるまうことができない、と思われるからである。「この物理的宇宙の中で進行する物質の時間発展に完全に捉えられたままでは、私たちは自由には行動できない」、このような直観をストレートに救い出すことに行為者因果説の眼目はあったと思われる¹⁰⁾。

さて以上見てきたように、自由の不可能性論証に反対するのはかなり難しそうである。たしかに、全面的な物理的非決定論の下で自由を擁護するには、宇宙の外に出るしか方法がないようにも見える。しかしやはり宇宙の外に出るわけにはいかない。ではどうすればよいだろうか。それにはやはり「自由な行為を難しくしている当のもの」に着目してみるのがよいと思われる。それはすなわち、非決定論的な時間発展のプロセスそのもの、である。宇宙の非決定論的な時間発展自体が十分に謎めいたものであり、そこには自由な行為と共通の困難がすでに含まれている。説明してみよう。ある時点を選んだとして、次の瞬間の宇宙の状態は決まっていないため、宇宙が次にとることのできる物理的に可能な状態は一般的には複数存在する¹¹⁾。そして可能な諸状態のうちどれになるかは決まっていないにもかかわらず、次の瞬間になるとなぜかそのうちのひとつが現実の状態になる。不思議なのはここである。すなわち、宇宙の先行状態と物理法則から次の瞬間の宇宙の状態が決まらないのであれば、いったいどうやって宇宙は自分の次の状態を決めているのか。ファン・インワーゲン自身の言葉を借りるならば、「どのようにして可能な未来のうちからひとつを現実のものとして選ぶことができるのか？」¹²⁾。

自由な行為の問題もこれと同じである。行為者が行為するとき、たしかに「複数の可能な行為のうちひとつだけが現実のものとなる」というプロセスが起こっている。行為が自由なものであるためには、複数の可能な行為の選択肢が存在して、そのうちどれが実現されるかはあらかじめ決定されてはならない¹³⁾。このような条件下でどのようにして自身の行為を決定づけることができるのか。これが私たちの問題であった。しかし、非決定論の下で自身の行為を決定づけられないのは私たちだけではない。たとえ宇宙であっても自分の先行状態から次の状態を決めることはできないのだ。(それなのに次の瞬間は必ず訪れる。)そうであれば、自由な行為について考える前に、「決まっていないのに時がくるとひとつに決まってくる」という物理的な時間発展のプロセスについて、もっとくわしく調べてみたほうがよいのではなかろうか。自由な行為というものがもし可能なのであれば、それはその物質的な時間発展のプロセスに何かを付け加えたものであるはずだから。

2 量子論と観測問題

前節での内容をうけてこの節では、量子論において非決定論的な時間発展がどのように扱われているのかを見ていく。そのために(すこし遠まわりに見えるかもしれないが)「観測問題」と呼ばれる伝統的な難問を取り上げて検討してみたい。観測問題は巨大な問題であり、その定式化の仕方にも無数のやり方がある。ここではその中で比較的シンプルな形での定式化をふたつ挙げてみる。ひとつめ。この定式化によると観測問題とは、次の三つを認めると矛盾が帰結する、という問題である¹⁴⁾。

- (A) 固有値固有状態リンクが成り立つ。
- (B) 孤立系はシュレーディンガー方程式にしたがった状態変化をする。
- (C) 経験的な事実として、測定が行われると測定値がひとつ得られる。

以下では、技術的な詳細には立ち入らない範囲で、この議論を説明してみよう。

いま何らかの物理系 S のある物理量 A を測定するものとする。よく知られているように、量子論では観測の結果どの測定値が得られるかは確率的にしかわからない。そこでいまの場合、「物理系 S の物理量 A を測定すると、確率30パーセントで測定値 a が得られ、確率60パーセントで測定値 b が得られ、確率10パーセントで測定値 c が得られる」となっているとすると、このことを、

$$(\text{系 S の測定前の状態}) = (a : 30\%) + (b : 60\%) + (c : 10\%)$$

とあらわすことにする。ここで実際に測定を行って測定値 b が得られたとする。(ここで前提 (C) が使われている。) それでは測定後の系 S の状態はどうなっているであろうか。ここで前提 (A) を使う。「固有値固有状態リンク」については説明しないが、(A) によると測定後の系 S は「確率100%で測定値 b が得られる状態」になっている。(観測の結果として測定値 b が実際に得られているのだから、これは普通の感覚でも当たり前のことである。)そしてこのことは

$$(\text{系 S の測定後の状態}) = (b : 100\%)$$

とあらわされる。そうすると物理系 S は観測の前後で、

$$(a : 30\%) + (b : 60\%) + (c : 10\%) \longrightarrow (b : 100\%)$$

という状態変化をしたことになる。しかしこの状態変化はシュレーディンガー方程式にしたがった状態変化ではない。このことは前提(B)と矛盾する。証明終了。

このような議論を提示すると、ただちに次のような反論が提起される。物理系 S ははじめは孤立系であったかもしれないが、観測されるときに測定器と相互作用している。だから、観測過程において S は孤立系ではなく、シュレーディンガー方程式にしたがわないのは当然である。観測過程において孤立系としてシュレーディンガー方程式にしたがった時間発展をするのは、物理系 S と測定器 M から成る合成系 S × M の方である。つまり、系 S ではなく合成系 S × M を考えることで矛盾は回避される、というわけである。

だがそうではない。測定器 M の状態は、観測前は [ready] で、観測後は得られた測定値に応じて [a], [b], [c] になるとする。測定前の S × M の状態は「S は a が30%で b が60%で c が10%という状態であり、かつ M は状態 [ready] にある」となっている。これは

$$(\text{系 S } \times \text{ M の測定前の状態}) = ((a : 30\%) + (b : 60\%) + (c : 10\%)) \times ([\text{ready}] : 100\%)$$

とあらわされる。そして観測の結果測定値 b が得られたのであるから、測定後の S × M の状態は「S は

測定値 b が得られる状態にあり、かつ M は状態 $[b]$ にある」となっている。これは

$$(\text{系 } S \times M \text{ の測定後の状態}) = (b \times [b] : 100\%)$$

とあらわされる。したがって合成系 $S \times M$ は観測の前後で

$$((a : 30\%) + (b : 60\%) + (c : 10\%)) \times ([\text{ready}] : 100\%) \longrightarrow (b \times [b] : 100\%)$$

という状態変化をしたことになる。果たしてこれはシュレーディンガー方程式にしたがった状態変化であろうか。残念ながらそうではない。(系 $S \times M$ の測定前の状態) をシュレーディンガー方程式にしたがって状態変化させた結果は

$$(a \times [a] : 30\%) + (b \times [b] : 60\%) + (c \times [c] : 10\%)$$

である。これは「合成系 $S \times M$ の状態が $a \times [a]$ である確率は30%であり、 $b \times [b]$ である確率は60%であり、 $c \times [c]$ である確率は10%である」ということである。だから観測前後の合成系 $S \times M$ の状態変化はシュレーディンガー方程式にしたがった変化ではない。つまり前提 (B) に反するという矛盾は解消されないままである。

この議論に対してもさらに反論を提起することができる。例えば「測定器 M の出力を人間の観測者が読み取っているのであれば、その観測者を含めた合成系を考える必要があるのではないか」など。あるいは、上の議論について厳密性や正確性に欠ける部分をいくつか指摘することもできるだろう。しかし、このまま議論の厳密化精緻化を図ったり、合成系の範囲を拡大していったりしても、同じような議論が繰り返されてしまい、結局のところ矛盾は解消されない。(少なくとも矛盾が解消されてないと論じることは常に可能である。) こうした無限後退にも似た議論展開が、観測問題という難問を形作っているのである¹⁵⁾。

議論を振り返って、観測問題の概要を確認しておこう。明らかにこの問題の根幹を成すのは

$$(a : 30\%) + (b : 60\%) + (c : 10\%) \longrightarrow (b : 100\%)$$

という状態変化である。この変化は「測定値が a, b, c のどれになるか確定していない」という測定前の状態から「測定値が b であると確定した」という測定後の状態への変化である。これはまさに「複数の可能な未来のなかからひとつのものが現実となる」という私たちが考えたいプロセスそのものである。(この状態変化は量子論では「波束の収縮」と呼ばれる。) たしかに私たちは「未確定」から「確定済み」へのこうした変化を経験する¹⁶⁾。それなのにこの変化がシュレーディンガー方程式からは出てこない。シュレーディンガー方程式から出てくるのは $(a : 30\%) + (b : 60\%) + (c : 10\%)$ といった、測定結果が不確定であることを示す確率的な結果だけである。対象とする系を合成系 $S \times M$ に拡張した場合も、出てくる結果はやはり

$$(a \times [a] : 30\%) + (b \times [b] : 60\%) + (c \times [c] : 10\%)$$

といった確率的な結果である。何の前進も得られず、波束の収縮はいつこうに起こらない。つまり、起こって欲しい状態変化がシュレーディンガー方程式からは得られない。これが観測問題の基本的な構図である。

さてそれでは、観測問題に対してどのような対応が成されてきたのだろうか。さまざまな解決策や立場があるが¹⁷⁾、ここでは現在の標準的な量子論の考え方を見ておくだけで十分である。(もちろん何が標準的な考え方なのかは難しいところであるが。)まず波束の収縮についてであるが、これは「射影仮説」と呼ばれる公理を設定する形で現在の量子論で公式的に認められている、と言ってよいと思われる¹⁸⁾。ただ波束の収縮を公理として認めるだけでは問題の解決にはならないと思われるかもしれないが、これ以上の立ち入った説明は特に与えられない場合がほとんどである。そもそも量子論とは、測定値の予測として確率分布を与える理論である¹⁹⁾。先の議論においても、シュレーディンガー方程式は「測定値が a になる確率は30%で b になる確率は60%で c になる確率は10%である」との正しい予測となる確率分布を与えていた。そうであれば、実際問題として何も困ることはないわけで、観測問題という問題にこれ以上関わる必要はないことになる。要するに、射影仮説を公理として採用して²⁰⁾それ以上余計なことは行わない、というのが現在の量子論の標準的な考え方であると思われる²¹⁾。

当然のことながら、観測問題を真剣に受け止めその解決を目指している者たちは、標準的な量子論の行き方には満足していない。そこで最後に、観測問題に取り組む者はどのような点を気にしているのか、ということを確認しておきたい。彼らが、本来量子論によって解明されるべきなのに十分には解明されてない、と感じているのはどこだろうか。そのため予告しておいた観測問題のふたつめの定式化を見る。それは次の三つを認めると矛盾が帰結するという議論である²²⁾。

- (A) 物理系はシュレーディンガー方程式にしたがった状態変化をする。
- (B) 観測の前後で波束の収縮が起こる。
- (C) 量子論はすべての物理現象に適用される。

この定式化は極限までシンプルに問題を提示している。この議論のポイントは、観測装置や観測者である私たち人間もまた物理的対象であり、量子論によって説明されなくてはならない、ということにある。要するに、私たちの観測過程にも量子論は適用されなくてはならないが、観測過程はシュレーディンガー方程式にしたがった状態変化をしていない、ということである。こちらの定式化には、現行の量子論に対する不満の感覚がはっきりとあらわれている。それは、あらゆる物理現象を解明すべき基礎理論としては量子論は物足りない(観測過程の解明が欠けている)、ということである。実はこれと同種の不満は、はじめに見たひとつめの定式化からも見てとれる。ひとつめの定式化の前提(C)には「観測すると測定値がひとつ得られる」という経験的事実が挙げられていた。そこには「測定すれば実際に値がひとつ得られるではないか。それなのにどうして量子論はそのことを説明できないのか」というもどかしさが隠れている。

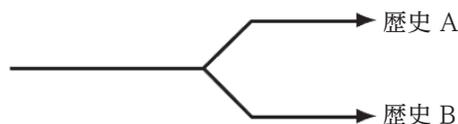
結局のところ観測問題に取り組む者が気にしているのは、波束の収縮のプロセスを含めた測定過程の全体である。どのようにして可能な予測値 a, b, c の中から測定値 b が選ばれたのだろうか。「観測の結

果、測定値がひとつ得られる」とはどういうことなのか。そこには観測者の意識は関係しているのか。現行の量子論はこういったことに何の解明も与えていない。測定装置も観測者もただの物理的対象なのであるから、これらのことが量子論で解明できないのは問題である。すくなくとも物理学で解明できないのは問題であろう。こういった問題意識が観測問題に取り組む者のおもとにあると思われる。

ここで私たちのもともとの話題に戻ろう。私たちは自由な行為の可能性をさぐるために、量子論において非決定論的な時間発展がどのように扱われているかを見てきたのだった。いまやこの点を確認するときである。量子論では「シュレーディンガー方程式にしたがった決定論的な時間発展」と「観測過程の際に生じる非決定論的な時間発展」のふたつが認められている。これを額面通りに受け取ると、非決定論的な時間発展が起こるのは私たちが観測をしたときだけ、ということになる。しかしこれは信じがたい。というのも、通常時の宇宙は決定論的な時間発展をしているが、人類が測定を行うと突然非決定論的な時間発展が起こる、ということになってしまうから。そうではなく、宇宙は観測の有無とは関係なしに常に非決定論的な時間発展をしているのだが²³⁾、こちらがその一部分を取り出してきて近似的に決定論的な方程式にしたがうものとして扱っている、ということであろう。そして非決定論的な時間発展を決定論的なものと見て処理してきたことのツケは、観測過程に回されてくる。(近似的に孤立系と見なして対象を扱っていても、観測するときには測定器との相互作用は避けられない。) その結果として、量子論において非決定論的な(確率的な)プロセスが直接あらわれてくるのは観測過程においてだけ、となる。ところが、観測過程にあらわれてくる非決定論的な状態変化(波束の収縮)については、まったく解明が成されていない。このことを私たちは観測問題の検討で見てきたのだった。要するに、現行の量子論において非決定論的な時間発展のプロセスは完全なブラックボックスとして扱われている、というのがこの節の結論である²⁴⁾。これはなかなかきびしい結果である。次の節では、別の角度からこのブラックボックスに迫ることにしたい。

3 分岐問題と真の偶然性

青山拓央は彼の著作『時間と自由意思』のなかで、彼が「分岐問題」と呼ぶ問題を取り上げて考察している²⁵⁾。それは、時間に沿った歴史の流れを樹形図のような形にあらわした場合、歴史の分岐を引き起こすような行為者の決断は、図中のどこに書き込むべきなのか、という問題である。(下図参照。時間は矢印が示す通りに左から右に向かって流れている。)



説明してみよう。ある行為者がある行為をするか別の行為をするかで歴史 A と歴史 B に分岐が起こるとする。そして実際に歴史 A にいたる行為が実行されたとする。このときこの行為者の決断を図に書き

込むことを考える。一見したところ、下図左のように分岐点にその決断を書き込めばよいように思われる。(決断を黒丸で表示する。)



だがこれはうまくいかない。それは、歴史 A の方を選択するという決断は歴史 A を示すルート上にだけ存在して、歴史 B を示すルート上に存在してはならないからである。この決断が成されたからこそ歴史 A にいたる行為が実行されたのであり、逆に歴史 B の方はその決断が成されなかったルートを表しているはずである。これに対して、上図左の位置に決断点をおいた場合、A, B 双方のルートにこの決断が含まれてしまう。ここでは歴史 A を選択するという決断が歴史 B にも含まれることになり、この決断によって歴史 A が選ばれたとは言えなくなる。この反省を踏まえると、決断点は上図右のような位置に表示されることになる。上図右の位置に決断点をおけば、たしかに決断点は歴史 A ルートには含まれるが歴史 B ルートには含まれないようになる。だがこちらの図示には別の問題がある。それは、上図右の位置に決断点をおいた場合、決断は歴史の分岐が起こったあとに成されたことになってしまう、という点である。この決断が歴史の分岐を引き起こしたと考えたいのであるから、決断点は分岐点と同位置もしくはそれよりも過去に位置すべきである。このように、樹形図の中に行為の決断点を書き込もうとしても、なかなかうまくできない。

話をまとめるとこうなる。(1) 決断点は A ルートと B ルートの共通部分に書き込んではいけない。(決断はどちらか一方のルート上にだけ存在するはずだから。)(2) 決断点は分岐点より未来の位置に書き込んではいけない。(決断が歴史の分岐を発生させたはずだから。)この (1) (2) をともに認めると、図中に決断点を書き込める場所は存在しない。これが分岐問題である。これは明らかに私たちが考えていた自由な行為の問題と同質の問題である²⁶⁾。青山はこの問題を説明したあとすぐに、これが行為者の意思決定の場面に限られたものではないことを指摘している²⁷⁾。それは、「決断」を任意の出来事に置き換えたとしても、その出来事は歴史の分岐を引き起こすことはできないからである。つまり、どんな出来事も可能な歴史のうちひとつを選び取る力を持ってない。このように分岐問題もまた、自由な行為だけに関わる問題ではなく、宇宙の非決定論的な時間発展全般についての問題である。

それでは青山はこの問題にどう答えたのだろうか。彼の答えは「説明不可能な偶然を認める」というものである²⁸⁾。つまり、複数の可能な未来のなかから特定のひとつが選ばれることに理由や根拠はなく、なぜかそのうちのひとつが現実になる、というのである。これは問題に解答を与えるというよりも、この問題は解決不可能であると認めるようなタイプを答え方である²⁹⁾。しかし、非決定論的な時間発展をただの偶然と見なすこの捉え方は、とりたてて特別なものではない。実は、私たちが見てきた自由の不可能性論証自体がそもそも「偶然」という言葉を使って述べられていたのである。もともとの議論は、「行為が行為者の決断によっても決定づけられないのであれば、それはただ偶然起こることになる。しかし偶然起こることは自由な行為ではない」というものであった³⁰⁾。私が議論の提示方法を少し変えていたわけ

であるが、それは、「偶然性」自体が問題含みの概念であり、これをはじめから議論に持ち込むのは得策ではない、と考えたからである³¹⁾。しかしいまは偶然について考えてみるときなのかもしれない。「偶然とはどういうことか」という問題に本格的に取り組むことはもちろんできないが、「何かが偶然である」と言われるとき最低限意味されることには「私たちにはその詳細なメカニズムはわからない」といった内容が含まれていると思われる。(そこには、法則性や規則性が見つけれないとか、ランダムに見えるといったことも含まれる。) また、量子論の文脈で偶然と言われるときには、サイコロの偶然などではない「真の偶然性」が問題となる、といったことが言われる。これは、「詳細が煩雑すぎて現実的には調べにくい」とか「現在の私たちにはその詳細が知られていない」といったことを超えた、本物の偶然が問題になる、ということである。こうした真の偶然性なるものがどのようなものなのかは実のところよくわからない。しかしここでは次のようなものだと考えてみることにしよう。すなわち、真の偶然性とは(何らかの原理や理由により) 私たちにはその細部のメカニズムが決してわからないと判明しているような何かであると。すると問題は、非決定論的な時間発展は私たちがその詳細なメカニズムを決して知りえないようなものなのか、ということになる。前節で見たのはただ、現行の量子論において非決定論的な時間発展がブラックボックスとして扱われている、ということだけである。どうしてもそれを真の偶然性と認めなくてはならない理由が何かあるのだろうか。

ニコラ・ジザンの著作『量子の不可解な偶然』は、このような疑問に対してひとつの答えを与えてくれる³²⁾。この本では、タイトルの通りに、量子論の中にあらわれる偶然性にスポットが当てられている。ここではとくに、偶然性が量子論の中ではたしている役割(量子論の中に偶然性があらわれなくてはならない理由)が強調されている。彼の議論を見てみよう。

二つのボタンとひとつの表示窓がついた箱がある。ボタンを押すと表示窓に数値が表示される仕組みになっている。ボタンは右ボタンと左ボタンの二つであり、表示される数値は+1か-1のいずれかである。このような箱を二つ用意して、ひとつをアリスにもうひとつをボブに渡す。そのあと二人を互いに遠く離れた場所に移動させる。決められた時刻になると、二人は同時にボタンを押して表示された数値を読み取る³³⁾。どちらのボタンを押すかは当人の好きに決めさせる。そして自分が押したボタンの種類と表示された数値を記録してもらう。これを多数回繰り返す。二つの箱は互いに遠く離れているが、それでも、これらのあいだに強い相関関係が見られるようにしたい。具体的には次のようにしたい。

相関の目標：二人がそろって右ボタンを押したときは、表示される数値は常に一致しない。それ以外のボタンの押し方だったときは、表示される数値は常に一致する。

この目標がどれだけ達成されているかを評価するための数値を定義する。アリスが左ボタンを押したときに表示される数値と右ボタンを押したときに表示される数値をそれぞれ、 A_L , A_R とする。同じくボブが左ボタンを押したときの数値と右ボタンを押したときの数値を、 B_L , B_R とする。多数回の試行のうち二人がともに左ボタンを押した場合に表示された数値の積 $A_L B_L$ の平均値を $\langle A_L B_L \rangle$ とする。同じく、アリスが左ボタン、ボブが右ボタンを押した場合の数値の積 $A_L B_R$ の平均値を $\langle A_L B_R \rangle$ とする。 $\langle A_R B_L \rangle$ と $\langle A_R B_R \rangle$ も同様とする。目標の達成度を評価するための数値(スコア)は次のように定義される。

$$\langle A_L B_L \rangle + \langle A_L B_R \rangle + \langle A_R B_L \rangle - \langle A_R B_R \rangle$$

このスコアによって目標達成度が評価できることを確認する。二人とも左ボタンを押した場合は、目標達成のため数値が一致することが望ましい。そして数値が一致したときには $A_L B_L$ は+1で数値が一致しないときには $A_L B_L$ は-1になる。つまり良い結果のとき+1ポイント悪い結果のとき-1ポイント、ということである。したがって $\langle A_L B_L \rangle$ は二人が左ボタンを押した場合の獲得ポイントの平均値をあらわしている。(最大値が+1で最小値は-1。) $\langle A_L B_R \rangle$ と $\langle A_R B_L \rangle$ も同じである。これらの場合も表示される数値が一致することが望ましいからである。異なるのは $\langle A_R B_R \rangle$ の場合である。このときは二人とも右ボタンを押しているため、目標達成のためには数値が一致しないことが望ましい。これまでの反対である。そのためマイナスをつけて符号を逆にする。こうして $-\langle A_R B_R \rangle$ は、二人が右ボタンを押した場合の獲得ポイントの平均値をあらわすことになる。これら四つの合計がスコアである。目標が完全に達成されたときスコアは +4 になる。目標と完全に反対の事象が起こったときにスコアは-4になる。スコア-4を得ることはスコア+4を得ることと同程度に難しいことを指摘しておく。つまり、二つの箱のあいだに強い相関があるほどスコアは+4や-4に近くなり、相関がないときスコアは0に近づく。

それではスコア+4を出せる箱は可能であろうか。これに対しては現実に出せるスコアの最大値は+2だと示す議論が存在する³⁴⁾。この議論によると、先ほど定義したスコアについては

$$-2 \leq \langle A_L B_L \rangle + \langle A_L B_R \rangle + \langle A_R B_L \rangle - \langle A_R B_R \rangle \leq 2$$

という結果が成り立つ。(これはベルの不等式と呼ばれる。)³⁵⁾ この議論はごく常識的な見解にもとづいて組み立てられており、まったく問題なく正しいもののように思われた。しかし現実にはスコア+2を超える箱が存在する。この箱の実現には「量子もつれ」と呼ばれる現象が使われている。量子もつれ状態にある二つの粒子をアリスとボブのもとに発射して、測定器(これが箱である)で二つの物理量のうち一方を左右のボタンで選んでから測定する。すると+1か-1の測定値が表示される。このような仕組みの箱でスコア $2\sqrt{2}$ が出せるのである³⁶⁾。実際、量子論で計算するとスコアの最大最小は

$$-2\sqrt{2} \leq \langle A_L B_L \rangle + \langle A_L B_R \rangle + \langle A_R B_L \rangle - \langle A_R B_R \rangle \leq 2\sqrt{2}$$

となり、この結果は実験でも確かめられている。(こちらの不等式はチレルソン不等式と呼ばれる。)だからスコアの最大値は+2であるとする議論は間違いだったことになる。(そこで仮定されていた「常識的な見解」が間違っていたことになる。)³⁷⁾ これはつまり、常識的には考えられないような非局所相関が現実存在する、ということである。アリスとボブはどれだけ離れていてもよかった。それでも二つの箱のあいだには強い相関関係が見られる。量子論の偶然性が役割をはたすのはここである。上で見たスコアを出せる箱の正体は「粒子の測定器」であった。粒子の測定過程は非決定論的な時間発展となるから、ボタンを押すと数値が表示されるという箱の作動も非決定論的なものになる。これは、いま考察中の箱は量子論にあらわれる偶然性を利用している、ということである。ジザンが主張するのは、スコア2を超えるような箱は必ずこのような偶然性を利用しなくてはならない、ということである。つまり、このような箱は

私たちに完全にランダムに作動しているように見えて、その作動メカニズムが私たちに知られることは決してない、というのである。それは、もしそうでなければ遠隔地に瞬時に情報を送ることが可能になってしまうから、である。このことを確認しておこう。

話を簡単にするためにスコア+4を出せる箱について考える。このような箱がアリスとボブに渡されており、しかもボブはアリスの箱の作動原理を知っていると仮定する。(ボブは自分たちの箱がスコア+4を出すことも知っているとする。) アリスの箱はその作動原理にしたがって、試行の直前には表示する数値 A_L, A_R を準備する。これは $(+1,+1)$, $(+1,-1)$, $(-1,+1)$, $(-1,-1)$ のいずれかである。ボブは試行の直前にはアリスの箱が四つのうちどれを準備したのかわかる。(1) (A_L, A_R) が $(+1,+1)$ のとき。このときボブは右ボタンを押す。すると、「相関の目標」が常に達成されることから、「アリスが左ボタンを押して二人の数値が一致する」か「アリスが右ボタンを押して二人の数値が一致しない」かのいずれかだとわかる。だから、ボブは自分の箱に表示された数値が+1のときは(数値が一致したので)アリスは左ボタンを押したとわかるし、自分の箱に表示された数値が-1のときは(数値が一致しなかったので)アリスは右ボタンを押したとわかる。(2) (A_L, A_R) が $(-1,-1)$ のとき。(1)と同様。(3) (A_L, A_R) が $(+1,-1)$ のとき。このときボブは左ボタンを押す。すると、「相関の目標」が常に達成されることから、「アリスがどちらのボタンを押そうとも、二人の数値は必ず一致する」とわかる。だから、ボブは自分の箱に表示された数値が+1のときは(アリスの数値も+1になるはずなので)、アリスが左ボタンを押したとわかるし、自分の箱に表示された数値が-1のときは(アリスの数値も-1になるはずなので)、アリスは右ボタンを押したとわかる。(4) (A_L, A_R) が $(-1,+1)$ のとき。(3)と同様。よってボブは試行の各回でアリスがどちらのボタンを押したかわかる。これはアリスからボブに情報が送れることを意味する(この議論はスコアが+4として話を進めたが、同様の議論をスコアが2より大きいどの箱に対しても与えることができる。)³⁸⁾

こうして、+2を超えるスコアを出すような箱については、私たちはその作動メカニズムを知ることは決してできない、とわかる。(箱の作動原理がわかると、遠隔地にいるアリスからボブへと瞬時に情報を伝えられることになるが、それは相対論に反するため不可能である。) だからこのような箱は真の偶然性を利用して作動していると見なさざるを得ない。そして粒子の測定機として作った箱は実際に+2を超えるスコアを出す。そうであれば、粒子の測定結果もまた真の偶然性によってもたらされていると考えざるを得ない。これは、量子論の測定過程にあらわれる非決定論的な時間発展が真の偶然性により生じている、ということでもある。(これが私たちにこの節での結論である。) 量子もつれを利用してスコア+2を超える非局所相関が実現されても、それで相対論と矛盾することにならないのは、量子論の中にこのような偶然性が存在しているおかげである。これは偶然性が量子論の中ではたす役割である、というのがジザンの主張である³⁹⁾。

4 むすびにかえて

私たちは、非決定論の下で自由な行為はいかにして可能か、という問題を考えてきた。非決定論の下では、宇宙の先行状態から次の瞬間の宇宙の状態はひとつに決まらない。このとき行為者は次に行う自

分の行為を決定できない。この問題の解決を図るため、宇宙の(物質世界の)非決定論的な時間発展に着目してみた。宇宙はどのようにして複数の可能な未来のなかから特定のひとつを選んでいるのか(素粒子はどのようにして可能な諸状態のなかから次の状態を決めているのか)。私たちが得た暫定的な答えは「それは真の偶然性による」ということだ。すなわち、宇宙が次の瞬間の状態を決めているメカニズムを私たちが知ることは決してない、少なくとも私たちには「何の理由もなくただ単にそうになっている」としか見えない。

どうしてこうになってしまうのだろう。例えば「探求のパラドクス」という話がある。それを知っているのであればそれを探求する必要はないし、それを知らないのであればそれを探求することもできない、という話である。これはつまり、「知らなかったことを知るようになることは不可能である」ということである。知っていることははじめからずっと知っていたのであり、知らないことは永遠に知らないままである。(実は忘れていたことを思い出しているのだという想起説の場合も、結局はじめから知っていたことになる。)決定論と非決定論の問題にはこの話に似たところがある。もし決まっているのであれば、それははじめから決まっていたのである。これは決定論が成り立ち宇宙開闢の瞬間からその後のすべてが決まっているということである。もし決まっていないのであれば、それは永遠に決まらないままである。これは非決定論が成り立ち、決まらないままに時間発展が起こるため、私たちにはただの偶然の進行にしか見えない、ということである。ここに欠けているのは「はじめは決まっていなかったことが次第に決まってくる」という過程である。

どうして「決まっていなかったことが決まってくる」という過程は考えにくいのか。時刻 t_1 から時刻 t_2 への状態変化が起きたのだが、この状態変化は決まっていなかったとする(ただ偶然そう変化したのだ)。ここでもし私たちがこの状態変化を調査して完全にその変化のメカニズムを解明したとする。そうすると私たちは t_1 の状態から t_2 の状態が予測できるようになるだろう。しかしこれは t_1 の状態から t_2 の状態が決まることを含意し、はじめから決まっていたことになってしまう。(はじめの仮定に反する。)問題は「状態変化の予測ができるまでに完全に変化のメカニズムが解明されているか」「まったく何もわからずただの偶然の変化にしかみえない」の二択しかないことである。二つの両極端しかないとき「決まっていなかったことが決まってくる」という過程は扱えない。これを扱うには、両者の中間に位置するような理解の仕方が必要になる。

前節では「スコア2を超える箱の作動メカニズムを知ることはできない」ということを見たが、これもやはり、それによって私たちが箱の動作を予測できるようになってしまうから、である。(ボブは箱の作動を予測できるようになったため、アリスの押したボタンが推定できたのだ。)だから予測が可能にならない程度までならば、非決定論的な時間発展の解明ができるかもしれない。まったく何もわからない(ただの偶然にしか見えない)というところに甘んじなくてはならない理由はない。しかしそれはどのようなものか。私たちはみな、結果が出たあとで出来事全体を振り返ってみてなるほどそういうことであったのかと納得がいく、という経験をしたことがある。非決定論的な時間発展の場合にもこれと似たことが期待できる。たとえ観測の結果を予測することはできなくても、測定結果が出た後でならば、どうしてその値が出たのかについて多少なりとも納得がいく理解を得る方法があるのではないだろうか。このような考え

方に近いものに「弱値」や「弱測定」がある⁴⁰⁾。

弱値を求めるとは「ある物理量の値を測定して値を得たあとで、そこから振り返ってその物理量の過去の値を確率的に推定する」といった作業に相当する。例えば(二重スリットの実験を例にとると)、スクリーンの位置 x に到達した光子が左右のスリットのうち左側を通過していた確率を求める、といったことである。つまり、スクリーンの位置 x に到達したという結果が出たあとで、その光子はどちらのスリットを通過してきたのかという過去の過程を推定しているのだ。普通量子論では、測定される前の物理量の値は考えてはいけないことになっている。弱値はそこを考えようとするわけである。(弱測定はこの弱値を測定するために使用される。)⁴¹⁾ 弱値や弱測定の提唱者であるアハラノフは、過去の状態と未来の状態から現在の状態が決まってくる、と述べている。宇宙の先行状態から次の瞬間の状態が決まらないのは(予測を可能とするような時間発展の解明ができないのは)、宇宙が未来の情報を使って現在の状態を決めているからである。だから素粒子はでたために何の理由もなく現在の自分の状態を決めているわけではない。過去の状態と少し先の未来の状態を鑑みて自分がとるべき最も適切な現在の状態を決めている。もしも、このように現在の状態が決まってくる過程を事後的に振り返る形であっても解明できたならば、もはやそれはただ偶然起こったこととは感じられなくなるだろう。非決定論的な時間発展についてこのような形で理解が可能であるかもしれない。

もちろん弱値や弱測定によってこれほどの解明ができるわけではない。問題はそれだけではない。私たちは、測定前の「複数の可能な状態の重ね合わせ」から測定後の「そのうちのひとつに確定した状態」への変化について考えてきた。それは、この状態変化が「可能な複数の未来から特定のひとつが現実になる」という宇宙の非決定論的な時間発展のプロセスに相当する、と想定してきたからである。だがこの過程は想像を超えて複雑で微妙なものである。私たちが観測をしなくても、自然界では「複数の可能な状態の重ね合わせからひとつの確定した状態への変化」が起こっている。これは一般に「環境によるデコヒーレンス」と呼ばれるもので、ミクロ系と外部環境の相互作用によって可能な状態間の干渉性が失われてくる過程である。(複数の状態間の干渉性が失われると、そのうちのひとつが現実化すると考えられている。)しかし実際にはこの干渉性はかなりしぶとく生き残ることが知られている⁴²⁾。これはつまり、複数の可能な状態の重ね合わせが弱まりながらも長く続き、そう簡単にはひとつの状態が完全には現実化しない、ということである。さらに言うと、たとえ複数の状態のなかからひとつの状態に確定したとしても、そのあとで再び状態間の干渉性を回復させることができる、ということがある。これは量子消去と呼ばれる操作による⁴³⁾。つまり、ひとつの状態に確定したと思っても、それがまた可能な状態のひとつに戻ってしまうかもしれないのである⁴⁴⁾。宇宙はこのように、複数の可能な状態のなかからひとつの状態へと収斂しつつも、再び複数の可能な状態に開かれる、という複雑で微妙なプロセスを経ながら進展する。しかもこの進展は、宇宙全体で一律に起こるのではなく、各地点で局所的にまた確率や程度の差を伴ってすすむ。

このような宇宙の物質的な時間発展についてある程度の理解を得たのちに、私たちは自由な行為の問題に戻ってこなくてはならない。自由の問題に関しては、前節で見たベル不等式やジザンの議論ではアリスとボブの自由意思が認められていた、ということに注意しておかなくてはならない。(彼らは自分の押すボタンを自由に選ぶことができた。これは議論の仮定であり、はずすことはできない。もしアリス

とポブがどのボタンを押すのかがあらかじめ決まっていたのならば、ベル不等式やジザンの議論はすべて成立しなくなる。) 同じくベル不等式とジザンの議論においては「情報伝達速度には上限がある」とするある種の局所性が仮定されていた。つまり前節の議論は、自由意思と局所性を仮定した上で話である。決定論非決定論の議論においては、自由意思と局所性と決定論の三つが分かち難く結びついていて、これらの絡み合いを解きほぐすことができない⁴⁵⁾。この問題は自由な行為を考える上で難しい点になるだろう。そして最後に、宇宙の物質的な時間発展のプロセスに何がつけくわわれれば自由な行為になるのか、を考えなくてはならない。しかし、言うまでもないことだが、マイクロレベルでの量子論の話から私たちの行為というマクロレベルまでの隔たりはあまりに大きい。非決定論の下での自由を擁護するというのは、たいへん険しい道のりである⁴⁶⁾。

注

- 1) 様々な議論があるが、本稿で取り上げるのはファン・インワーゲンの議論である。P.van Inwagen, “The Mystery of Metaphysical Freedom”, in van Inwagen and Zimmerman (eds), *Metaphysics: The Big Questions* (second edition), Blackwell, 2008, pp. 456-465.
- 2) 筆者は、決定論は間違っており非決定論が正しい、と考えている。この点については、拙論「決定論について」、『応用社会学研究』、65号、立教大学社会学部、2023年、を参照されたい。
- 3) van Inwagen, op. cit. ファン・インワーゲンは「決定論と自由は両立しない」という議論と「非決定論と自由は両立しない」という議論の二つを与えており、両者を合わせて「自由の不可能性論証」と呼ぶようである。本稿で扱うのは後者の議論だけである。
- 4) この議論の提示において、次を参考にした。美濃正、「決定論と自由」、『岩波講座 哲学 02』、岩波書店、2008年、p.173および、戸田山和久、『哲学入門』、ちくま新書、2014年、pp.312-313。また、この議論に対して本稿の問題意識に合わせるためこちらで勝手な変更を加えている、という点にも注意されたい。
- 5) 高崎将平、『そうしないことはありえたか』、青土社、2022年、p.168参照。
- 6) 「量子論の非決定論的な物理法則」がどのようなものなのかは、実はそれほど明確ではないかもしれない。ここで言いたいのはただ、「量子論においては非決定論的な時間発展が認められていることを踏まえた上で、すべてのものが量子論が明らかにした物理法則にしたがっていることを受け入れる」ということである。この点については、第2節や第4節の議論(およびそこにつけられた註)も参照されたい。
- 7) 量子論において100%確実に測定結果が予測できる場合もある。観測したい物理系の状態ベクトルがたまたまこれから観測する物理量(演算子)の固有ベクトルになっている場合や、同じ測定を二回続けて行うときの二回目の測定結果など。
- 8) 鈴木生郎、秋葉剛史、谷川卓、倉田剛、『現代形而上学』、新曜社、2014年、pp.75-79。高崎、前掲書、pp.166-171。美濃、前掲書、pp.172-175。戸田山、前掲書、pp.302-305など。
- 9) 行為者因果説の解説文には以下のように書かれている。「私たち行為者が世界のあり方から超越して、この世界で生じる出来事に影響を与えることを認める」、鈴木(他)、前掲書、p.78。「私たちはこの物理世界の秩序から解放され、変化を世界にもたらすことができる。」、高崎、前掲書、p.170。「行為するたびごとに、われわれは(あ

172 非決定論と自由

たかも神のように世界の外側から)世界の過程に介入し、その進行方向を勝手に決めることができる」、美濃、前掲書、p.175。「行為者因果説によれば、われわれが自由に行為するたびごとに、神の創造や宇宙の誕生に類する出来事が起きていることになる。」、戸田山、前掲書、p.305。

- 10) 行為者因果説を途方もない立場として批判することはたやすい。しかし行為者因果説を採用したくなる動機は十分に理解可能なものである。筆者はこの直観を可能な限り擁護したいと考えている
- 11) 相対論により、宇宙全体に適用できるような特権的な同時刻平面は存在しない。(同時刻性は各々の座標ごとに決まり、相対的なものである。)このことが気になるのであれば、ひとつの物理系とそれを記述するひとつの座標系に着目してその系の次の瞬間の状態がひとつには決まらない、という状況を思い浮かべればよい。
- 12) If the laws are indeterministic, then more than one future is indeed consistent with those laws and the actual past and present – but how can anyone have any choice about which of these futures becomes actual? van Inwagen, op. cit., p. 461.
- 13) 決定論と自由をめぐる議論においては「他行為可能性」という概念が重視される。これは、行為が自由であるためには、行為者はその行為以外の他の行為をすること(その行為をしないこともふくめて)が可能でなくてはならない、という条件である。ここで採用している全面的な物理的非決定論の下では、行為者は「物理的に可能である」という意味での他行為可能性を常にもっている。他行為可能性については次を参照のこと。美濃、前掲書、pp.167-170。鈴木(他)、前掲書、pp.59-60。高崎、前掲書、pp.33-62など。
- 14) 白井仁人、東克明、森田邦久、渡部鉄平、『量子という謎』、勁草書房、2012年、p.8。
- 15) 「ハイゼンベルクの切断」、「フォン・ノイマンの鎖」、「ウィグナーの友人」、「シュレーディンガーの猫」といった論点が広く知られている。本稿ではこれらの問題に立ち入ることはできない。
- 16) このような状態変化を認めない立場もある。それは多世界解釈と呼ばれる。いまの例で言えば、観測をすると世界は「測定値 a が得られた世界」と「測定値 b が得られた世界」と「測定値 c が得られた世界」に分岐する。どの世界も現実であるので「三つの可能な未来のうちひとつだけが現実になる」という変化は起こっていない。多世界解釈はこのようにして波束の収縮を認めず、実在論的で決定論的な描像を保持する。そのため物理学者には人気のある立場である。この立場については、和田純夫、『量子力学の解釈問題』、サイエンス社、2020年、および、和田純夫、『量子力学の多世界解釈』、講談社、2022年を参照されたい。
- 17) 例えば、白井仁人、『量子力学の諸解釈』、森北出版、2022年、などを参照。
- 18) 射影仮説は多くの教科書で採用されている。例えば、清水明、『新版 量子論の基礎』、サイエンス社、2004年、pp.101-108、北野正雄、『量子力学の基礎』、共立出版、2010年、pp.67-78、新井朝雄、江沢洋、『量子力学の数学的構造II』、朝倉書店、1999年、pp.252-253など。
- 19) 例えば、清水、前掲書、pp.18-20など。
- 20) 射影仮説はボルンの確率規則から導くことができるという議論もある。この議論は小沢正直によって与えられたが、この解説としては次がわかりやすい。堀田昌寛、『入門 現代の量子力学』、講談社、2021年、pp.100-103。より詳しくは、小沢正直、『量子測定理論入門』、『物性研究』、97(5)、2012年を参照されたい。
- 21) こうした方向に沿って量子論を捉える立場に、現代的な認識論的コペンハーゲン解釈がある。(ここにはいわゆる QBism も含まれる。)これは量子情報理論の発展とあいまって現在非常に有力な立場となっている。この立場

の要点は、状態ベクトルや密度演算子は物理的実体の状態をあらわしているのではなく、情報や知識をあらわしている、と考えることにある。波束の収縮は観測の結果として生じる情報や知識の変化をあらわすことになり、そこに特段不思議なところはないとされる。複数の観測者を考える場合でも、各々の測定者ごとに異なる状態ベクトルが指定され、観測者が測定を行うと各観測者ごとに波束の収縮は別々に起こるが、全体として矛盾のないように計算されずべてうまくいくように説明がつく。(観測者が不在の場合(初期宇宙など)をどう扱うかという問題に対してもうまい解答が用意されている。)現代的な認識論的コペンハーゲン解釈については、堀田昌寛、『量子情報と時空の物理(第2版)』、サイエンス社、2019年、pp.14-24、および、堀田昌寛、遊佐剛、「量子エネルギーテレポーテーション」、『日本物理学会誌』、69-9、2014年、pp.614-615などを参照されたい。

- 22) 中込照明、『唯心論物理学の誕生』、海鳴社、1998年、p.24-26。
- 23) 私たちが観測をしなくても、宇宙の中では「複数の可能な未来のうちひとつが現実となる」という非決定論的なプロセスが生じているはずである。これを扱う理論にデコヒーレンスの理論がある。複数の可能な状態の重ね合わせにあるとき、それらの状態のあいだには「干渉」が発生している。しかし一般的には環境との相互作用が起こり、状態間の干渉性は失われてくる。(環境によっておこるデコヒーレンス。)干渉性が失われるとそれらの状態はそれぞれ別個の独立した状態となり、そのときにはそれらのうちどれかひとつが現実化したと考えられる。こうして私たちが観測をしなくとも「複数の可能な状態のうちひとつが現実化される」というプロセスが宇宙の中で進行していることになる。ただし、複数の可能な状態のうちどれが現実化したのかはデコヒーレンスの理論でもわからない。これを知らうすれば観測が必要になり、観測問題に戻ってくる。デコヒーレンスの理論については次を参照。吉田伸夫、『量子宇宙論入門』、講談社、2013年、pp.227-251。和田純夫、『量子論の解釈問題』、pp.133-146。
- 24) 現在の量子論をめぐる議論においては、多世界解釈と現代的コペンハーゲン解釈がその双璧を成していると思われるが、このどちらにおいても、物理的実体の非決定論的な時間発展は認められていない。多世界解釈は「状態ベクトルは物理的実体の状態をあらわす」という実在論的な観点を採用しているが、時間発展については、そもそも波束の収縮を認めておらず、分岐する各々の世界の中で決定論的な時間発展がおこると考える。他方の現代的コペンハーゲン解釈は、波束の収縮という非決定論的な時間発展は認めるが、状態ベクトルが物理的実体の状態をあらわすとは考えない。これは知識や情報をあらわしており、波束の収縮において変化しているのも知識や情報ある。このようにどちらの立場においても、物理的実体が非決定論的な時間発展をするという観点はない。
- 25) 青山拓央、『時間と自由意思』、筑摩書房、2016年、pp.27-67。
- 26) まず第一に、歴史的分岐を認めるということが非決定論の採用に対応している。歴史的分岐とは、それが起こるまでの歴史を完全に共有しながらも別々の未来が可能である、ということであらわしており、これは、宇宙の先行状態によっては次の宇宙の状態はひとつに決まらない、と認めるに等しい。そのため分岐問題は、非決定論の下で自身の行為を決定づけられない、という私たちの問題に重なってくる。本文中の(2)を認めると、決断点は分岐する歴史の共有部分に置かねばならないが、そうすると決断が行為時点までの宇宙の先行状態に含まれることになり、行為を決定づける力を持たない、というわけである。
- 27) 青山、前掲書、p.34。

- 28) 青山、前掲書、p.66, p.87, p.109, p.114など。
- 29) 青山自身次のように述べている。「偶然の承認は、分岐問題と正面から組み合わせ、分岐問題に完全に組み敷かれることを意味する。ここではいわば、説明しないことが唯一の説明なのである」。青山、前掲書、p.67。実のところ青山自身の解答は偶然性を認めることに対してここで述べたよりもずっと慎重なものなのであるが、ここでは彼の見解にこれ以上立ち入ることはできない。
- 30) 美濃、前掲書、p.173および、戸田山、前掲書、p.313。ファン・インワーゲン自身も次のように述べている。But then, if the world is indeterministic, isn't it just a matter of chance how things did happen in the one, actual course of events? And if what we do is just a matter of chance - well, who would want to call that freedom? in van Inwagen, op. cit., p.461.
- 31) 筆者は、非決定論と自由の問題を論じる際に偶然性という概念を持ち出す必要はない、と考えている。偶然性自体がかなり難しい、はっきりしない概念であることが理由であるが、それだけではない。このような文脈では、「偶然である」と「非決定論的である」とがほぼ同じ意味で使われている場合が多い。そのような場合わざわざ「偶然」という言葉を持ち出す必要はないはずである。それでもこの言葉を使うのは、「たんなる偶然」といった言い回しによって現象を過小評価することが目的のように見えるのである。
- 32) ニコラ・ジザン、『量子の不可解な偶然』、共立出版、2022年。
- 33) 離れた場所での同時刻をどう定めるかという点については、ここでは立ち入らない。この点が問題になるほど詳細な議論は行わないからである
- 34) 目標を達成すべく箱のペアが一組提出されたとする。この箱に対して多数回の試行が行われるが、そのうちひとつの試行が実施される直前に着目する。(いままさにアリスとボブがボタンを押そうとしている。) この箱がどういう仕組みで作動するかはわからないが、実施直前には、アリスがボタンを押したときに表示するための数値 A_L , A_R とボブがボタンを押したときに表示するための数値 B_L , B_R の四つが準備されるはずである。(二人がどちらのボタンを押すかわからないので、どちらを押されてもよいように数値が用意されるはず。) 四つのマス目 (A_L , A_R , B_L , B_R) に+1か-1の数値を割り当てるときの場合の数は16通りで、いまこのどれかが用意されている。例えば (+1,+1,+1,+1) とする。ここで $S = A_L B_L + A_L B_R + A_R B_L - A_R B_R$ として S の値を求めてみると、 $S = +2$ である。残りの15通りの場合も S の値を求めてみると、+2と-2の二つの数値しか出てこない。したがって、試行の各回ごとに決まる S の値は常に+2か-2のいずれかである。よって、試行全体を通じての S の平均値 $\langle S \rangle$ については $-2 \leq \langle S \rangle \leq +2$ という結果が成り立つ。ここから前段落で定義したスコアの現実可能な最大値は+2 (最小値は-2) との結論が得られる。(前段落で定義したスコアとこの註の中で見た $\langle S \rangle$ は同じものではないと気づいた人もいるかもしれない。実際の試行では (A_L , A_R , B_L , B_R) のうち二つの値だけがあらわになる。それは、ボタンが押された側の数値は表示されるが、押されなかった側の数値は表示されないからである。「スコア」は実際に表示された二つの数値だけをもとにして求める値であるが、対して $\langle S \rangle$ のほうは表示されなかった数値まで含めて計算される値である。ここに両者の最も大きな違いがある。だから、ここでの議論は両者を同一視できると仮定していることになる。)
- 35) より正確に言うと、これはベル不等式一種で CHSH 不等式と呼ばれるものである。
- 36) この箱の仕組みの詳細については、ジザン、前掲書、pp.60-61およびpp.83-96を参照されたい。

- 37) ここで常識的な見解とされているのは、多くの場合「局所实在論」とか「隠れた変数の理論」といった言葉で説明されるものである。だがその詳細には立ち入らない。
- 38) スコアが2より大きいということは、相関の目標が達成される可能性が50%を超える、ということである。そしてこれは、アリスがどちらのボタンを押したかについてのボブの推定が当たる可能性が50%を超える、ということである。実はこれだけでアリスからボブに情報を送るには十分なのである。
- 39) この註でもう少し話を続けたい。本文中ではスコア2を超える非局所相関が存在することを見た。スコア $2\sqrt{2}$ を出せる箱は実際に存在するし、量子論が正しければ、これはこの宇宙で実現可能なスコアの最大値である。すると次のような疑問が浮かんでくる。数学的にはスコアの最大値は4なのに、なぜ $2\sqrt{2}$ までのスコアしか出せないのか。 $2\sqrt{2}$ はだいたい2.8くらいである。せっかくスコア2を超えて非局所相関が可能になったのに、どうしてこんな半端なところで止まってしまうのか。この理由も、宇宙が相対論的な因果律を守っているためであろう、と考えられた。因果律の定式化として、「瞬間伝送禁止則 (no-signaling condition)」が考えられた。これは「遠隔地に瞬間的に情報を送ることはできない」とする原理であるが、この制約を課してもスコアを $2\sqrt{2}$ に制限することはできなかった。(この制約を満たしたままでもスコア4が可能であった。)そこでより強い因果律の定式化が与えられた。それは「情報因果律 (information causality)」と呼ばれる原理で、「遠隔地の出来事について知りうる情報量は、そこから伝送された情報量を超えない」というものである。(もう少し具体的に言うと「量子もつれと古典通信の両方を使ったとしても、古典通信だけで送信した情報量以上のことは送れない」という原理である。)この制約を課すとちょうどスコアの最大値が $2\sqrt{2}$ になる。つまり宇宙が情報因果律を守っているため、スコアの最大値は $2\sqrt{2}$ になっているのである。(スコア4を出せる箱と古典通信を使うと、古典通信で送信した情報量を超えた情報量を遠隔地に送れることになる。すなわち、スコア4を出せる箱は情報因果律を破っている。よって、スコア4を出せる箱はこの宇宙では実現不可能である。)これらの点については次を参照されたい。木村元、「情報から生まれる量子力学」、『別冊日経サイエンス 量子の逆説』、199号、日経サイエンス社、2014年、pp.76-83。堀田昌寛、「入門 現代の量子力学」、pp.220-230。
- 40) 弱値や弱測定についての説明は以下を参考している。細谷暁夫、「光子の裁判」再び」、井元信之、「量子テレポーテーションと時間の矢」、Y. アハラノフ、「光子は未来を知っている」。いずれも次に収録されている。『別冊日経サイエンス 量子の逆説』、199号、日経サイエンス社、2014年、pp.40-63。
- 41) 弱測定とは、可能な限り対象の状態を変化させない弱い測定のことである。普通の測定を実施すると波束の収縮が起こり重ね合わせの状態は失われてしまう。たいして弱測定は、あえて精度が非常に低い測定をすることによって、状態間の重ね合わせを壊さないようにする。二重スリットの実験で言うと、左右どちらのスリットを通過したかを確定させるとスクリーンに映る干渉縞は消えてしまうが、結果が不確かな弱測定であれば、確実な結果は得られない代わりに干渉縞は残る。これを使って先ほどの二重スリットの弱値が求められる。より具体的には、例えば左スリットを通過した光子は少しか上方に進行方向が変化するようにしておく。そうすると、水平方向の位置 x に到達した光子の垂直方向の位置 y の値が弱値となる。(正確にはその平均値。)光子がスクリーン上方に到達していればいるほど、これが左スリットを通過していた確率は高いわけである。
- 42) 二重スリットの実験でも、どちらのスリットを通過したのかのかなり精度の高い測定を行っても、スクリーンの干渉縞は鈍くなるだけでなかなか完全には消失しない。測定の精度が100%になったとき干渉縞は完全に消失す

るはずだが、なかなかそこまでの精度の測定はできない。吉田伸夫、『量子宇宙論入門』、pp.231-243。

- 43) 二重スリットの実験で右スリットに0度偏光板を左スリットに90度偏光板をつけると、光子の偏光でどちらのスリットを通過したかがわかるようになるため、スクリーンの干渉縞は消失する。これは「右スリットを通過する」と「左スリットを通過する」という二つの状態間の干渉性が消えてどちらかひとつが現実化した、ということである。しかし、この設定の下でスリットとスクリーンのあいだに45度偏光板を置くと、干渉縞が復活する。これは光子の偏光が45度だけのものになり、どちらのスリットを通過したかが読み取れなくなるからである。光子はスリットを通ったあとで45度偏光板を通過するのだから、これは、いったんは左右どちらかを通過するという状態に確定したあとで、再び二つの状態間の干渉性が復活した、ということである。和田純夫、『量子力学の解釈問題』、pp.36-38。
- 44) このことが意味するところは大きい。量子消去は言わば「いったん起こってしまったことをなかったことにする」操作だからである。(過去を変えていることなる。) 私たちは過去のことは確定しており変えることはできないと感じているが、それはたんに、マクロレベルの状態に対して量子消去を行うことが難しいからに過ぎない。量子消去は「干渉性が失われている状態間に干渉性を回復させる操作(互いにデコヒーレントになっている状態間にコヒーレンスを取り戻す操作)」であるが、マクロな環境系が関わっている場合、系の自由度が大きくまた隣接する広範囲の環境系とのエンタングルメントが連続して生じるため、干渉性を回復させることは現実的にはほぼ不可能となる。一度出た測定結果が覆らないのは、測定装置や観測者などの環境系にまでその影響が拡散してしまっただけで量子消去が難しいからである。だがこれはあくまで程度問題であり、原理的には過去を変えること(起きてしまったことをなかったことにすること)はいつでも可能である。北野正雄、前掲書、pp.165-167。
- 45) これは「自由意思定理」の問題である。この問題については次を参照されたい。拙論、「決定論について」、『応用社会学研究』、65号、立教大学社会学部、2023年。またジザン自身もここで「自由意思定理」に触れている。ニコラ・ジザン、前掲書、pp.160-166。
- 46) この最後の註で、註44に対する補足をくわえておきたい。註44では量子消去が「状態間の失われた干渉性を回復させる操作」であることを見たが、実は何もしなくても干渉性を復活させることは常に可能である。それは「どんな混合状態も、それより大きな系から見ると純粋状態になる」という結果が成り立つからである。これはだいたい、ある系では干渉性が失われているように見えても、それを含むより大きな系で見れば干渉性は失われていない、ということである。通常は互いに異なる二つのマクロ状態のあいだでは干渉性は失われていると考えられているが、そうではない。ただ単にマクロ状態の場合は、干渉効果を実験で観測することが難しい、ということに過ぎない。(これはちょうど、マクロ状態が関係する場合は量子消去が現実的には不可能に近い、ということに相当する。)例えばシュレーディンガーの猫の場合、「猫が生きている状態」と「猫が死んでいる状態」のあいだの干渉効果を測定する実験は、死んだ猫を50%の確率で生き返らせる技術と同程度に現実が難しい。(しかし測定はできなくても干渉は存在する(?))より興味深いのは猫ではなく人間が関わる場合である。アリスが電子のスピンを測定して測定値を読み取ったとする。アリスは測定結果を見たため、波束の収縮がおこる。「スピンの+である」と「スピンの-である」という状態の重ね合わせは失われて(干渉性は失われて)、どちらかひとつの状態が実現化する。しかしこれを遠くから見ているボブにとっては(ボブはまだアリスから測定結果を聞いてない)、「アリスが+の値を読み取った状態」と「アリスが-の値を読み取った状態」の重ね合わせのままである(干渉性は

失われていない)。ここでこの二つの状態間の干渉実験を行うとアリスに何が起こるのか。実験中アリスは測定結果の記憶を失うが、実験終了後は測定結果を答えられるようになる。ただし実験後のアリスの記憶は実験前の記憶と一致している保証はない。つまり、(1) 干渉実験の前にアリスに質問すれば、測定値について正しい情報が得られるが、そのときは波束の収縮が起こり干渉性は失われてしまう、(2) アリスに質問する前に干渉実験を行うと、干渉性が観測される代わりに、アリスから正しい情報は聞き出せない、ということである。後者のとき、アリスが一度は測定結果を正しく認識したという過去の事実は消失してしまう。これは実質的には量子消去と同じである。量子消去の場合も状態の純粋化の場合も、過去を変えることができるという点は同じである。たしかにアリスに対する干渉実験は現実的には不可能であろう。しかし、ミクロレベルとマクロレベルのあいだに明確な境界線は存在しないということを考えるならば、これはやはり真に驚くべきことのように思われる。堀田昌寛、『量子情報と時空の物理』、pp.6-9およびpp.21-24。