

ことばの世界と量子の世界

—ウイトゲンシュタインとディラックの比較をとおして—

谷岡 知美*

(令和5年11月24日受付)

Language and Quantum Theory: Comparing the Two Worlds

Tomomi TANIOKA

(Received November 24, 2023)

Abstract

This essay examines the similarities between the characteristics of language proposed by Ludwig Wittgenstein and quantum theory organized by Paul Dirac. Wittgenstein, one of the most influential philosophers in the 20th century, focused on our ordinary language after he recognized the limitations of traditional philosophy. On the other hand, Dirac, the leading figure of quantum theory who successfully combined the theory of relativity and quantum physics, by explaining the particles at the core of quantum theory. It is apparent that these two people and their theory are quite different from each other, however, we can see some similarities in their interpretation and attitude towards academic explorations.

Key Words: Wittgenstein, Dirac, Ordinary Language, Quantum Theory, Interdisciplinary Research

1. はじめに

ことばには「力」がある、と言われることがある。ことばによって、時にひとは幸せを感じ、癒され、時に傷つけられ、怒りを覚えたりもする。文学、特に詩の研究を専門としている筆者にとっては、納得できる一説である。しかし、そのことばの「力」とはいったいなんだろうか。

本稿の目的は、この壮大であり漠然とした問いの解明に、少しでも近づくことである。そのために、「ことば」の解明に関して（著者の専門分野には属しておらず、まだほんの一部しか理解できていないにもかかわらず）、核心に迫る議論を展開している哲学者のウイトゲンシュタイン（Ludwig Josef Johann Wittgenstein, 1889-1951）の、主に「言語ゲーム」の理論を用いる。それに加え、筆者が所属している学科の「理論物理学」、特に「量子力学」の理

論の手をかりて、ことばの世界の一側面を明らかにしてみたい。いわゆる文系科目である「文学」や「言語学」と、理系科目とみなされる「量子物理学」は、一見するとかけ離れている分野のようである。しかし、ことばの世界と量子の世界を重ね合わせてみると、実際は共通点があることがわかる。本稿では、ウイトゲンシュタインによって編み出された言語観と、ディラック（Paul Adrien Maurice Dirac, 1902-1984）によって提唱された量子力学を論じ比較することで、両者に重なる共通点を検討したい。しかし、この発想から始まった本研究は、まだ資料収集の途中であるため、両者の引用文の掲載に留まる段階であることを申し添える。

進める手順としては、両者の比較を強調するために、まず、ウイトゲンシュタインの科学に関する見解を紹介し、次に彼の言語観を提示する。続く項では、ディラックによ

* 広島工業大学工学部電子情報工学科

る哲学に関する言及を紹介し、彼がまとめた量子力学を概観する。最終的に両者の共通点を挙げ、この研究ノートを、ことばの世界と量子の世界を考察する今後の研究の出発点としたい。

2. ウィトゲンシュタイン

20世紀最高の哲学者の一人であるウィトゲンシュタインは、それまでの伝統的な哲学を覆し、今日に学ばれるような、まったく新しい哲学のやり方を編み出した¹と説明される稀有な存在である。彼の哲学は、前期と後期に大きく分けられると言われており、彼の前期の代表作『論理哲学論考』(*Tractatus Logico-philosophicus*, 1921)において、彼が「語りえないことについては人は沈黙せねばならない」と言ったことは有名である²。

本稿では、科学に関する言及は彼の『論理哲学論考』より、彼の言語観に関しては、「言語ゲーム」の理論を中心に『青色本』(*Blue and Brown Books*, 1965)、『哲学探究』(*Philosophical Investigations*, 1965)より引用する。

<2・1> ウィトゲンシュタインと科学

ウィトゲンシュタインは『論考』において、「哲学は科学にはなりえない」と主張し、この信念に対し亡くなるまで忠実であろうとした³。一方で、当時はフレーゲ (Friedrich Ludwig Gottlob Frege, 1848-1925) やラッセル (Bertrand Arthur William Russell, 1872-1970) によって推奨された数理論理学においては、哲学における科学的方法が重要視され、科学を歩かせたのと同じ「精密な思考」によってこそ哲学は進歩する、と主張された。ウィトゲンシュタインは、このようなフレーゲ、ラッセルによる主張を、従来のアリストテレス的伝統論理学よりも圧倒的に優れていると支持したにもかかわらず、最終的には袂を分かつこととなった。

例えば、『論考』の4・111において、ウィトゲンシュタインは、

哲学は自然科学ではない。

（「哲学」という語は、自然科学と同レベルのものを意味するのではなく、自然科学の上にある、あるいは下にあるものを意味するのだからなければならない。）⁴

と、哲学と自然科学をはっきりと分け、両者を「同レベル」で捕らえておらず、別のものとして分類する彼の態度がうかがえる。この彼の態度は、後期の『青色本』においても、多少軟化したように思われるが、「…しかし、心のその側面には我々に関心をもたない。その側面から生じる問題があってもそれは心理学の問題であり、その解決方法は自然科学の方法である」⁵と、「語の意味とは何か」とい

う問いに対して、「自然科学の方法」では解決できない、と述べている。これらの引用から、大学では工学を学んだウィトゲンシュタインにとっては、「哲学」と「自然科学」は別のものであり、両者を明確に分けていると理解できるだろう。

<2・2> ウィトゲンシュタインのことばの世界

『論考』においてははっきりと述べているように、ウィトゲンシュタインにとって哲学は学説ではなく、言語に惑わされることによって生まれる混乱を解消する活動であった⁶。そのため、彼は日常に使われる言語にこそ注目して理解すべきだと主張している。

ウィトゲンシュタインはその主張を「後期ウィトゲンシュタイン」と見なされる『青色本』をきっかけに、彼独自の新しい「言語ゲーム」の理論を『哲学探究』の第一部において展開する。松坂陽一が、「この書（『哲学探究』）の主要なテーマは冒頭付近から展開される「言語ゲーム」の概念やいわゆる「意味の使用説」から構成される言語観ではないか」と述べているように⁷、彼の「言語ゲーム」の理論とは、「私たちが普段使っている言語のある特定の側面――たとえば名前の役割など――を、それが通常埋め込まれている複雑な文脈から切り離すことによって浮き彫りにする、（通常は架空の）原始的な言語形態である。この単純化されたケースと、実生活で使われる言語との『関連性を見ること』ができるようになるということ」⁸である。つまり、ことばは常に対象を指している、というものではない。最も重要なことは、そのことばの「言語における使用」(‘use in language’) なのである⁹。彼は『哲学探究』において、「…だがこれらの言葉の場合、そうした指差しは言葉の使い方を学ぶ場面のみならず、その実際の使用においても現れるのである」¹⁰、「それにしても、文にはどれだけの種類があるのだろうか？…数限りなく多様な種類の使用が存在する」¹¹と続け、そのことばがその時その場面で使われる仕方に注目していることがわかる。

3. ディラック

ディラックは、原子や分子、そしてその構成要素についての新しい理論である量子力学の、最も優れた先駆者の一人であり¹²、シュレーディンガー (Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger, 1887-1961) を中心とした量子力学と、アインシュタイン (Albert Einstein, 1879-1955) による相対性理論を結合させ、素粒子論の基礎を築いた理論物理学者である。一見すると対立する理論である両者を、ディラックは「驚くべき方程式」¹³でもって融和させ、「若き天才」として現れたディラックに対し、アインシュタインは、「ディラックには手こずらされる。天才と狂気の紙一重の綱渡りには参る」とこぼしたほど

だったという¹⁴。

< 3・1 > ディラックと哲学

では、ディラックは、哲学に対してどのような思いを抱いていたのだろうか。以下の引用には、彼の哲学に対する辛辣な態度が示されている。

ディラックは元々哲学者たちには幻滅していたのだが、それが敵意となったのは、何人かの哲学者が量子力学について、理解もしていないくせに発言した内容を読んだときのことだった。それまでにもディラックは、ある書評のなかで、「ハイゼンベルグの不確定性原理が登場してようやく、寝ぼけた哲学者たちも目が覚めて、量子力学が持つ革命的な意味に気づいたようだ」と書いていた。ディラックの気持ちに最もかなう哲学者は、言葉が意味を持つのは、それが観察によって検証される場合だけだと主張する、論理実証主義者たちだった¹⁵。

また、「哲学」に対して、ではないので、補足ではあるが)、ディラックは1963年のインタビューにおいて、「文学」、特に「詩」について以下のように述べている。

“I read some novels. In fact, one was supposed to do it in connection with the English lessons. I was always a slow reader and I didn't like poetry. In fact, I never understood good poetry.”

“... My whole interest was on the scientific side. I was really very ignorant of matters outside my schoolwork¹⁶”.

さらに「哲学」に関しては、「すでになされた発見について話しているだけ」、と、以下のような哲学に対する批判的な態度をはっきりと示している。

“I continued to go ahead with math and I was interested in relativity. You see, just at that time relativity sort of burst on the world. That was 1918 when the war ended and relativity had a tremendous effect on the general public. Newspapers were full of articles on relativity and magazines also. Everyone was talking about relativity. It was a new philosophy and it produced more excitement I think than science has ever produced before or since. Of course, engineering students were also interested in it and talked about it. And during in my later period I worked on it. I told you that I went to Professor Broad's lectures. I remember I was also interested in other things, philosophy and logic. I got a copy of Mill's Logic from the library and read that all through. I found it pretty dull, but still I stuck to it, and tried to understand these things. I thought at that time that maybe philosophy was important. Since then

the field of philosophy has terribly declined. I feel that philosophy will never lead to important discoveries. It's just a way of talking about discoveries which have already made¹⁷”.

したがって、ディラックもウイトゲンシュタインと同様に、「自然科学」に属す「量子力学」と、「哲学」を明確に区別していると解釈できるだろう。

< 3・2 > ディラックの量子の世界

まずはディラックの著書、『量子力学』から、その特徴をよく示す箇所を引用する。

…そして理論の進歩してゆく方向は、方程式をますます広い変換に対して不変なものにすることに向っている。このような事情はある哲学的な立場から見れば非常に満足なものである。なぜならばこういう事情には次のような意味がひそんでいると考えられるからである。それはつまり、観測の際に現われる規則性は観測者自身が一役を演じて生まれるものだという点がしだいに認められてきたこと、および、自然界の営みはけっしてかっに行なわれているものではないこと、この二つである。しかしこういう事情のために、物理学を学ぶ人々にとってはいろいろな事柄がかなりわかりにくいものになる。数学的な道具立ては別として、新しい理論を組み立てている物理的な概念は、いままで人々の知っている事柄を用いては説明できないようなものである。それどころか、どうしてもことばでは適切な説明のできないものである。だれでもこの世に生まれてくると習わなければならない基本的な概念（例えば‘近い’とか‘同じ’とかの概念）があるが、それと同じように、物理学の新しい概念も長い間にそれらの性質や使い方に慣れた上で初めて習得できるものである¹⁸。

さらにディラックは、「光子」を例に、量子の新たな働きを、「…量子力学とよばれる新しい形式を作り上げることができ…新しい理論に含まれる変更がきわめて根本的な性質のものであり、古典理論の大きな魅力となっていた特徴とは衝突しないからである。

古典力学から離れる必要があることは実験の結果から明らかに示されている¹⁹と展開していく。

最も注目すべきは、ディラックは「古典的物理学」から脱却すべきであるといった主張を繰り返している、という点である。

…他方では光電子の放出や、自由電子による光の散乱などの現象があって、これらは光が小さな粒から成り立っているということを示している。…すべての物質粒子は波の性質を持っていて、適当な条件の下でこれを目につ

くようにすることができる。…原子についての現象を書き表すのに古典力学の概念を用いることが適当でないということなのである。…したがって大きさに絶対的な意味を与えるように古典的な考えを改めることが必要である。

…科学は観測できるものだけを問題としていること、またわれわれがあるものを観測するにはそれを何か外からの影響と互いに作用させるほかはないということを思いおこす必要がどうしてもある。…われわれの観測能力の細かさには限りがあり、それに伴ってかき乱される程度の小ささにも限りがある。この限界はものの本性に根ざすものであって、決してその限界を超えることはできない²⁰。

加えて、「光子」に対し「重ね合わせの理論」を、「…新しい一組の正確な自然法則が必要になってくる。これらの法則の中で最も基本的でまた最も思い切ったものの一つは状態の重ね合わせの原理である。…このように光のかたよりの性質には光の粒としての性質とかたく結びついているものであるから、光子にかたよりの性質を持たせてやる必要がある。…光子はそれぞれ一定のかたよりの状態にあるのである。…このようにしてどんな場合にでも光子の個性性は保たれている。しかしこのことは、どんな事柄もはっきりと定められるとした古典論の性質を捨ててしまっ、はじめてできたことである。実験の結果は、古典論の考え方とは異なって、実験する人が支配できる条件によって決定されはしないのである。予言できることは、たかだか、生じうるいくつかの結果とそれぞれのおこる確率とだけである。…実験で調べることができないのであって、科学の領域の外にあるものと見なさなくてはならない。とはいえこの実験の結果と、光子を用いて行われる他の実験の結果との間に互いにつながりをつけ、それらすべてを一般の形式にあてはめるためには、何かもう少し立ち入った述べ方をすることが必要である。そのような立ち入った述べ方をしても、それは科学の領域の外にある問いに答えようと試みているのだなどと思ってはならない。これはむしろ、多くの実験の結果を簡潔にいい表す規則をまとめあげるための手助けと見なさねばならないものである。…ということは、いろいろなかたよりの状態の間に一定の特別な関係があることを意味するわけである。…光子が光軸に平行にかたよっているか垂直にかたよっているかを観測しているのである。…光子が二つの状態のどちらへ飛び移るかは予言できないことで、確率の法則に従っておこなわれるにすぎない²¹と、提唱している。

続けて彼は「光子」のエネルギーについて、今までにない形のものとして、「…進行の状態は波動関数と似たよう

な仕方で重ね合わせができるのである。…このような方針で量子力学は光の波動性と粒子性の調和をもたらすことができる。一番たいせつな点は、光子のいろいろな進行の状態にそれぞれ普通の波動光学の波動関数が一つずつ伴っていることである。進行の状態と波動関数とが相伴うというこの性質は、古典力学を基にした味方ではりかいてきないまったく新しいものである。…すなわち波動関数は、光子がどこにあるか観測をしたときに、それがあある特定の場所に見出される確率についての知識を与えるのである。…あらゆる種類の粒子がこのように波を伴っており、逆にあらゆる波動が粒子を伴っている。こういうわけで全ての粒子に干渉の効果をおこさせることができるし、すべての波動のエネルギーは量子という形をとるのである²²と解説し、「…しかし、「像」ということばの意味をひろげて、基本法則が内部に矛盾を含まないことを明らかにするような見方はどんなものでもこれに含まれるという解釈もできる。…書き表し方がこうして複雑になったことは否定できない。しかしそれは状態の重ね合わせの原理という一般的な原理が事柄を非常に簡単にしてくれるので帳消しになるのである²³と結論付けている。

日本の物理学者である朝永振一郎は、このディラックの著書『量子力学』の一節「We must now describe the photon as going partly into each of two components into which the incident beam is split²⁴」をヒントに、「光子の裁判」というミステリー小説とも呼べる、量子力学を分かりやすく解説したテキストを完成させた。以下の引用にはさらに、ディラックの量子論の特質が凝縮され強調されている。

「しかし、この重要な原則はそれが実際に検証された範囲内でのみ妥当するのであって、これを不当に広範囲に適用することは許されない。…この原則を用いるにあたっては、よほどの注意を払わないと知らず知らずの間に不当な適用を行ないがちである。検察官の議論はまさにこの種の誤用の典型的な例である。…事実、この原則が検証されたのはこの意味においてであり、かつこの意味以上においてではない²⁵。

「ただ状況判断はあくまであらゆる状況を注意深く観察して初めて下されるべきであって、狭い、あるいは不精密な経験によって得られた既成の概念によって無反省に下された独断であってはならない…検察官殿がさきほどからくりかえし主張された状況判断なるものがいかに既成の概念を無反省に用いた独断であるかが明らかになるであります²⁶。

「…既成の概念による判断がいかに誤りに導くか…²⁷

「…普通の判断を無反省に用いることは少々あぶないのかもしれない…²⁸

「…しかし、必ずしも出来ないことが明らかになっても、必ず出来ないということはまだ明らかではない。…一見互いに両立し得ない矛盾を含んだような事柄も必ずしも矛盾ではないということが明らかになったが、実際にそうであるということは、まだいえない」²⁹

「…経路という属性を持たない奇妙なもの…」³⁰

4. ことばの世界と量子の世界の共通点

ウイトゲンシュタインとディラックは、当時の哲学、および物理学を一変させた。彼らは、それまでの伝統的な哲学と物理学を覆すことから始め、ことばも量子も、その時その場面で「使われ」「観測」されたときにはじめて存在する、ということを示唆しているようである。ことばも量子も境界線を明確に引いて区切る「単体」や「粒」とすることはできず、「重なり合う」存在である。両者にとって、「使用」・「観測」・「確率」こそが重要なのである。

光子を例とした量子の特徴を、以下にまとめてみる。

- ・波でもあり粒子でもあるもの
- ・(経路なる) 属性をもっていない
- ・不可分の個体
- ・一定のエネルギーの一つの塊
- ・粒子の状態を観測していないときは「波」として空間全体に広がり、空間を伝播する
- ・測定した瞬間に「重なり合っていた状態」が「ひとつの点に局在した状態」に変化する

つまり、量子は「波動性」と「粒子性」が相補的に融和している実体、測定前は、可能なあらゆる状態（例えば、あらゆる場所にいる状態）が重なり合って、波として空間を伝播している。観測した瞬間に、重なり合っていた状態が解消され、ひとつの確定した状態になる。例えば、あらゆる場所に広がっていた状態が1点に局在した状態として現れ、これが量子の粒子性である。したがって、測定が対象物の状態を変化させるといえる。

一方で、「言語ゲーム」理論を基本としたウイトゲンシュタインのことばとは、ことばの「使い方」、つまり、そのことばが話された状況、その文脈が重要となってくる。すなわち、ひとつの単語にはいくつかの意味が重なって存在し、実際の会話の中でそのことばが使われてはじめて、その文脈の中でことばの「意味」が確立するのである。

5. おわりに

ウイトゲンシュタインとディラックは同時期にケンブリッジ大学の教授として勤めていた。2人が交わる以下のエピソードを挙げる。

…ディラックは倫理哲学にも関心を寄せるようになっていた…ディラックがとりわけ毛嫌いしていた学者の一人が、ケンブリッジで最も賢明な学者の一人と広く認められていた、ルートヴィヒ・ヴィトゲンシュタインだった。何十年ものちになってディラックは、彼は「とんでもない奴だった。絶対に話をやめないんだ」と言っている³¹。

続けて、同じく理論物理学者であるホーキング博士（Stephen William Hawking, 1942-2018）は、ウイトゲンシュタインに関して以下のように述べている。

今日まで、科学者はずっと、宇宙が何であるかを説明する新しい理論の展開に心を奪われていて、なぜと問うことができないでいる。一方、なぜと問うことを商売にしている人たち、つまり哲学者は科学理論の進歩についていけないでいる。十八世紀には、哲学者は科学を含めた人間の知識の全体を自分たちの持ち場と見なし、宇宙にははじまりがあるか、などといった問題を論じたのだった。しかし、十九世紀と二十世紀には、科学は哲学者にとって、いや少数の専門家以外のだれにとっても、あまりに技術的、数学的になりすぎた。哲学者は探求範囲を大幅に縮小し、今世紀のもっとも有名な哲学者であるウイトゲンシュタインが、「哲学に残された唯一の任務は言語の分析である」と言うほどになった。アリストテレスからカントに至る哲学の偉大な伝統からの、これはなんという凋落ぶりだろう！

しかし、もしわれわれが完全な理論を発見すれば、その原理の大筋は少数の科学者だけでなく、あらゆる人にもやがて理解可能となるはずだ。そのときには、われわれはすべて——哲学者も、科学者も、ただの人たちも——が、われわれと宇宙が存在しているのはなぜか、という問題の議論に参加できるようになるだろう。もしそれに対する答えが見いだせれば、それは人間の理性の究極的な勝利となるだろう——なぜならそのとき、神の心をわれわれは知るのだから³²。

ホーキング博士による上記のウイトゲンシュタインの解釈には誤解があったようである。飯田隆が、「ウイトゲンシュタインは、あくまで日常のレベルにとどまって、そこにひそむ罫をひとつずつ見つけては解除することに専念する。そうすることを通じて、かれは、こころとは何かという、誰にとっても切実な問いを問うことがどういうことであるのか、この問いに対処する正しいやり方はどんなものなのかを、われわれに教えてくれている。哲学者としての

ウィトゲンシュタインの偉大さはこの点にある」³³と指摘するように、ウィトゲンシュタインはそれまでの哲学に根付いていた既成概念を覆し、「言語の分析」に注目したのである。それは、現代哲学の道筋を示したとも言われている。物理学において、ディラックが「新しい公式」を編み出し、まったく新しい解釈を生み出したように。まさにウィトゲンシュタインが、言語を対象とし、つぶさに検証することによって、「科学」と「哲学」を近づけ、「あらゆる人にもやがて理解可能な」解釈を編み出そうとしたのではないだろうか。

このように、「哲学」と「自然科学」、ウィトゲンシュタインとディラックは、それぞれ相対立する概念（そのものでもあり）を抱いていたように思われるが、実は、「ことば」と「量子」をそれぞれが論じることで、（まだ漠然とはあるが）、同様の内容を主張しているように思われる。加えて、ウィトゲンシュタインとディラックを併せて検討し、特に共通点に着目することで、いわゆる「文系」、「理系」と学問が分断されている現代、古代ギリシャ文明において哲学がすべての学問を網羅していたように、その根源は同じである、ということに気づかされるのである。

以上のように、本稿ではウィトゲンシュタインの言語観とディラックの量子力学に関する引用文を挙げ、（かなり雑ではあるが）、両者の共通点を検討した。松阪陽一は、論文「進化と安定性」において、「ウィトゲンシュタインをめぐる議論の最中に生物学の哲学を参照した理由は、他でもなく、後期ウィトゲンシュタインの言語観とダーウィンの生物観にはたんなるアナロジー以上の共通性があると私が考えているからである」³⁴と述べ、結論として、「ウィトゲンシュタインは言語という現象を自分で考察し、結果として、生物種に対してダーウィンが到達したのと類似の立場に到達した、というのが現在の私の考えである」³⁵と結んでいる。筆者が、さらにウィトゲンシュタインの言語観、およびディラックの量子力学を理解することができれば、松阪の論文のように共通点を指摘できるかもしれない。この大きな目標を、次回の課題としたい。

このように、ことばの世界と量子の世界のつながりを追求し、「量子力学」を用いて、「ことば」でできている私たちの世界のメカニズム、「ことば」の力の解明に近づくことができれば、われわれは、ホーキング博士の指摘する「神の心」がわかるかもしれない。

謝 辞

本稿を作成するにあたって、広島工業大学／工学部／電子情報工学科教授の鈴木貴先生には、貴重なご助言をいただき深く感謝いたします。

文 献

- ¹ Monk, Ray. *How To Read Wittgenstein*. Granta Books: 2005, p.19.
- ² ウィトゲンシュタイン. 『論理哲学論考』 野矢茂樹訳. 岩波書店: 2022.
- ³ *How To Read Wittgenstein*, p.19.
- ⁴ ウィトゲンシュタイン. 『論理哲学論考』 野矢茂樹訳. 岩波書店: 2003, p.51.
- ⁵ ウィトゲンシュタイン. 『青色本』 大森荘蔵訳. 筑摩書房: 2022, p.19.
- ⁶ ウィトゲンシュタイン. 『論理哲学論考』 野矢茂樹訳. 岩波書店: 2003.
- ⁷ 松阪陽一. 「進化と安定性」『思想』No. 1185, 2023, pp.89-103.
- ⁸ Monk, Ray. *How To Read Wittgenstein*. Granta Books, 2005. chap.8.
- ⁹ ルートウィッヒ・ウィトゲンシュタイン. 『哲学探究』 鬼界 彰夫訳. 講談社: 2020.
- ¹⁰ 『哲学探究』 p.27.
- ¹¹ 『哲学探究』 p.36.
- ¹² グレアム・ファーマロ. 『量子の海、ディラックの深淵』 吉田三知世訳. 早川書房: 2010, p.16.
- ¹³ ルイーザ・ギルダー. 『宇宙は「もつれ」でできている』 山田克哉監訳, 窪田恭子訳. 講談社: 2022, p.218.
- ¹⁴ 『宇宙は「もつれ」でできている』 p.219.
- ¹⁵ 『量子の海、ディラックの深淵』 p.281.
- ¹⁶ AHQP/OHI-2, *DIRAC, P. A. M.* Number 2 of five sessions 6 May 1963, pp.2-3.
- ¹⁷ AHQP/OHI-2, *DIRAC, P. A. M.* Number 2 of five sessions 6 May 1963, p.6.
- ¹⁸ ポール・ディラック. 『ディラック 量子力学 原書第4版 改訂版』 朝永振一郎 他訳. 岩波書店: 2017, pp.xiii-xiv.
- ¹⁹ 『ディラック 量子力学』 p.1.
- ²⁰ 『ディラック 量子力学』 pp.2-4.
- ²¹ 『ディラック 量子力学』 pp.4-7.
- ²² 『ディラック 量子力学』 pp.7-10.
- ²³ 『ディラック 量子力学』 pp.7-10.
- ²⁴ 「その1つの光子は、入射光線から放たれた2つの成分のどちらへも、部分的に入っていく、というふうに「今」
描述しなければならぬ」
- ²⁵ 朝永振一郎. 「光子の裁判」『朝永振一郎著作集11 量子力学と私』 みすず書房: 1983, pp.9-10.
- ²⁶ 「光子の裁判」 p.14.
- ²⁷ 「光子の裁判」 p.16.
- ²⁸ 「光子の裁判」 p.19.

²⁹ 「光子の裁判」 p.27.

³⁰ 「光子の裁判」 p.37 (『量子力学』 p.10) .

³¹ 『量子の海、ディラックの深淵』 p.281.

³² スティーヴン・W・ホーキング. 『ホーキング、宇宙を

語る』 林一訳. 早川書房 : 2022, p.242.

³³ 飯田隆. 「表出と疑問」『思想』 No. 1185, 2023, pp.35-51.

³⁴ 「進化と安定性」 p.96

³⁵ 「進化と安定性」 p.101