

博士学位請求論文審査要旨及び担当者
 報告番号 甲 乙 第 号
 論文題目 物理学の認識論的転回

氏名 杉尾 一

論文審査担当者

主査 慶應義塾大学文学部教授
 文学研究科委員

岡田 光弘

副査 慶應義塾大学名誉教授

西脇 与作

副査 高エネルギー加速器研究機構

素粒子原子核研究所・理論センター准教授 筒井 泉

論文概要

本論文で杉尾君は客観的学としての物理学の批判的再検討を通じて、物理学の認識論的転回の必要性を主張する。例えば、物理量は対象の側の客観的量であるという古典物理学の見方に対して、物理量は私たちが行う測定の系の選択に依存して決まることが指摘される。このような考察を出発点として、認識論的観点から物理学全体を統一的に捉える立場が提案される。その提案は、量子力学だけでなく古典物理学も含めて、物理学の理論全体を認識論的に理解すべきだという科学哲学的立場の表明につながる。ただし、杉尾君は同時に、認識論的な測定の系を成立させるために最小限の存在論的枠組みが必要であることに注意を促す。さらに、ここで彼が提案する認識論的物理学が科学哲学上の論争にどのような解決を与えるかについても議論されている。

本論文の構成は以下の通りである。

第1章 序

第2章 科学的真理とは何か

2.1 科学的実在論・反実在論

2.2 3つの真理

2.3 宇宙を俯瞰する観測者

2.4 認識論的転回を目指して

第3章 巨視的世界についての記述

3.1 古典物理学が描く世界像

- 3.2 物理量と値
- 3.3 素朴な測定理論
- 3.4 値についての概念分析
- 3.5 普遍的法則から間主観的法則へ

- 第4章 微視的世界についての記述
 - 4.1 古典的概念の限界
 - 4.2 概念の調整
 - 4.3 ヒルベルト空間を用いた記述
 - 4.4 混合状態と純粋状態

- 第5章 量子力学の解釈
 - 5.1 コペンハーゲン解釈
 - 5.2 様々な多世界解釈
 - 5.3 ホイラー解釈

- 第6章 記述の哲学
 - 6.1 世界についての記述
 - 6.2 物理学的経験
 - 6.3 つくり出される構成的対象
 - 6.4 古典的对象についての記述
 - 6.5 量子的対象についての記述

- 第7章 最小の存在論的要請
 - 7.1 物理量概念の再考
 - 7.2 応答可能性質

- 第8章 認識論的物理量概念の形成
 - 8.1 経験に先立つ認識の枠組み
 - 8.2 確率の導入
 - 8.3 認識論的古典性質の形成
 - 8.4 認識論的量子性質の形成

- 第9章 記述の階層に依存する諸概念
 - 9.1 決定論・非決定論・自由意思
 - 9.2 ベルの不等式と局所性
 - 9.3 弱測定と系概念
 - 9.4 異なる系によって現れる異なる世界

第10章 結論

付録 A 量子力学の要請

付録 B 同値関係と同値類

付録 C 代数的量子論

付録 D 弱測定・弱値

各章の概要

本論文はホイーラーの標語 “It from Bit (情報から存在へ)” から始まり、情報から構成される存在が物理学の研究対象だという彼の考えに同意し、その考えにもとづいて量子力学を中心とする非古典的物理学を認識論的に捉え直そうとするものである。これがまず第1章で述べられる。客観的な物理世界に対して普遍的な物理学の法則を適用して、実在する規則的な変化を統一的に記述・説明するという古典的な物理学観を批判し、認識論的な側面を考慮した再考が不可欠であるというのが杉尾君の主張で、第2章以下にその内容が展開される。

杉尾君は第2章でニュートンの古典力学が経験的な情報や知識のみからなるのではないと述べる。例えば、経験的世界で想定される絶対時間や絶対空間が存在論的な要請として導入されていることが挙げられる。古典物理学は決定論的、実在論的に世界を記述し説明すると言われてきたが、そこには実験や観測が明示的に含まれず、無視されてきた。というのも、実験や観測によって対象が影響を受けないと想定され、対象の実在性は私たちの経験から独立していると考えられていたからである。そこから素朴（直接）実在論が古典的世界観形成の基本的な要素の一つとなったのである。杉尾君は科学的真理の特徴として非経験的な真理の重要性を論じ、それを認識論的転回の足がかりとしている。

第3章では古典物理学が実在を記述する理論とみなされた理由の一つが物理量概念にあると見定め、それを取り上げ、物理世界の量と値の関係の見直しが行われる。物理的对象がもつ物理量はいつでもどこでも実在し、確定した値をもつというのが古典物理学の常識である。確定した物理量をもつ確定した対象とその確定した運動変化が古典的物理像として定着してきた。杉尾君はこの巨視的世界の定着した記述が概念的な混同の産物に過ぎないことを指摘する。

第4章では非古典的な量子力学の認識論的側面が論じられる。ヒルベルト空間を用いた標準的な記述とそこからの特徴が述べられ、第3章の巨視的世界とは対照的な微視的世界が描かれる。4.4の混合状態と純粋状態に関する議論では「非古典的」なカミ（紙）を使って古典論とは異なる量子力学での確率計算が印象的に説明される。

第5章では量子力学のコペンハーゲン解釈を特徴づける「状態の収縮」が議論され、いわゆる解釈問題がボーアの解釈の見直しを通じて考察される。ボーアの本来の解釈がいわゆるコペンハーゲン解釈とは違っていたことがまず確認される。次に、

コペンハーゲン解釈とは異なる多世界解釈、ドイチュ解釈、ホイーラー解釈が取り上げられ、それらが比較検討される。

第6章では対象についての量子力学的な記述が客観的なものでありながら、対象の实在論的記述ではなく、記述主体に相対的なものに過ぎず、实在を記述することが原理的に不可能であることが構成的対象という概念を軸に（カント哲学を踏襲するかのように）論じられる。

第7章では（カント哲学とは異なり）物理学に必要な最小の存在論が問題とされる。「反応可能性質」という存在論的性質が認識論的な観測を成立させる要請であると指摘される。

この最小の存在論的要請にもとづき、認識論的な物理量概念が定義され、議論されるのが第8章である。物理量概念はそれが使われる物理理論に相対的なもので、古典物理学における物理量と量子力学における物理量（＝オブザーバブル）は大きく異なっていることが説明される。外界の实在論的性質が物理量なのではなく、物理量は理論に依存する認識論的性質であることが論じられる。

第9章では新たに定義し直した認識論的な物理量概念を使って、決定論と自由意志が両立すること、ベルの不等式の破れと非局所性が無関係なこと、さらに近年注目されている弱測定（weak measurement）と系概念の変更が議論されている。これらは非古典的な物理量概念にもとづく再考察が従来の説明とは異なる説明を与え得ることを示す具体例になっている。これらの新しい説明を通じて、物理的实在と呼ばれてきたものが私たちの認識と不可分に結びついたものであることが明らかにされる。

最後の10章はこれまでの議論の総括で、本論の理解に必要な物理学や数学の知識が付録としてまとめられている。

審査要旨

私たちが生活する世界では古典的世界観、古典力学的世界像が当たり前のものとして前提されている。物理的な対象や出来事は私たちが気づかなくても实在し、その変化は軌跡として描けるような連続的で、確定的なものだと信じられている。実際それらを生活する場で否定するのは難しい。そのため、生活世界は原理的に決定論的だと信じて構わないことになっている。だから、確率・統計的な言明はいずれも頻度的に解釈されるべきだということになる。しかし、これが実は問題で非古典的な物理理論に従えば、物理学の理論は实在論的に解釈されるべきではなく、認識論的に解釈されるべきだというのが杉尾君の本論文での主張である。

このように彼の主張をまとめると、その主張自体は彼の独自の主張ではなく、量子力学の哲学においてこれまで盛んに議論されてきた主張の一つに過ぎなく、量子力学の哲学に関心をもつ人たちの間ではむしろ多数派の主張であることがわかる。確かにその主張は目新しいものでない。だが、生半可な量子力学の知識にもとづいて主張だけが繰り返される場合がほとんどで、その主張内容が丁寧に述べられることはむしろ稀なことである。単なる哲学的主張としてではなく実際の物理理論を取

り上げて、そこに認識論的要素が必要であることを具体的に示さなければ一向に説得的にはならない。杉尾君のねらいは正にそこにあり、非古典的物理学の代表である量子力学が認識論的な物理理論であることを量子力学の基本的な事実を使って具体的に論じようとしている。

まずは量子力学がどのような物理理論であるかが非古典的な特徴を中心に説明される。ヒルベルト空間、コペンハーゲン解釈、多世界解釈、ボーア、アインシュタイン、ホイーラーらの考えをうまく組み合わせて使うことによって、量子力学の主張とその解釈が「構成的」という観点から説明される。物理学科出身の杉尾君のこれらについての議論は正確で信頼できるものである。古典的物理量概念からスタートし、その再考が行われ、量子力学的な物理量概念が「認識論的」概念として導入され、この認識論的物理量概念を使って量子力学の問題が捉え直される。この議論の立て方には杉尾君独自のアイデアが認められる。ベルの不等式と局所性、弱測定と弱値、決定論と自由意志が認識論的観点から考察されている。特に、ここで検討されているアハラーノフらによる弱測定の問題はこれからの量子力学とその哲学の双方にとって重要な課題になると思われる。測定値が実数で表されることは当たり前のことであると私たちは考えているが、過去においては（例えばギリシア・ピタゴラス学派）それが誤りであり、想像し難いものだった。それに似て、測定値が実数値をもつことには疑念をもたなくても、測定の弱値が実数値ではなく、複素数値であったならば、私たちはかつてのギリシャ人と同じように困惑してしまうのではないか。これは困惑を引き起こすだけでなく、測定結果が実数で表現されることを前提にした諸定理や諸命題から形成されている現在の物理学全体に対して再考を迫ることとなろう。この点の追求はこれからの課題であり、杉尾君にはこの課題に果敢に挑戦してほしいと思っている。

状態概念を系と測定器からなる系の状態というように拡張すべきであるという考えを採用するならば、系という認識枠組みの違いが異なる結果をもたらすことになり、その違いを使うことによって遅延選択実験や弱測定を理解することができる。私たちの認識の枠組みが変わることによって世界はその姿を変える。私たちはその姿を通して実在像を描くが、それは私たちによって作り出された構成的対象であって、実在そのものではない。これがタイトルにある物理学の認識論的転回の理由であり、それが物理学の哲学の正しい立場であるというのが本論文の主張である。杉尾君のこの主張はカントの哲学、新カント派の物理学に対する認識論的な立場とよく似ている。量子力学は古典物理学と違ってカントの認識論に近いことがこれまでも指摘され、それを確証する研究も相当に存在する。このカント哲学との親近性は杉尾君の論文にも顕著に見られる。ただ、古典的世界観とは相いれない量子力学の解釈には当然カント哲学とは根本的に異なる部分がある筈である。二つの類似点より相違点の方が気になるが、その点が分散的に扱われ、まとめて扱われていないことが心残りである。

本論文が認識論的観点から量子力学の解釈や測定問題に新しい光を当てることのできたかどうかであるが、問題を完全に解いたというより、問題へのアプローチ

が設定され、解明の道筋が垣間見えたというのが適切であろう。個々の事柄に対して杉尾君独自の考察が量子力学的な文脈で形式化されていて、物理学者の関心を引く部分が多々ある。また、哲学的な考察もわかりやすく、量子力学に不慣れな哲学者にも読むことができるものになっている。だが、扱われる問題が厄介な難問ばかりのため、簡単に解答して、一件落着とはなかなかいかない。その理由の一つは、実証科学の哲学問題の多くが実証的でない解答を求めることにもある。

量子力学の数学的な表現には既に認識論的な要素が組み込まれ、それが実証的な観測を理論的にコントロールしている。観測についての数学的な扱いは古典、非古典の双方について厳密に述べられている。但し、ミクロレベルの観測・測定が20世紀後半から急速に進歩し、その結果、認識論的な見方を実験状況に合わせて詳細に表現し、展開できるようになってきたことを指摘しておく。この点の検討を通じて、本論文の主張に対して実証的な側面からさらなる証拠が提供できたと思われる。

このような残された研究課題はあるものの、本論文の成果は高く評価できる。審査員一同は杉尾一君の本論文が博士（哲学）の学位授与にふさわしいものであると判断する。