

認識論的構造実在主義と存在論的構造実在主義

北島雄一郎

1. はじめに

科学哲学における科学的実在主義(scientific realism)に関する議論は大きく二つに分けられる。一つは、科学的実在主義は妥当な立場なのかどうかという議論、もう一つは科学理論が記述している実在とはどのようなものなのかという議論である。もちろん、両者は密接に関係している。科学的実在主義が妥当でないとしたら、科学理論が記述する実在を考えることは意味がない。一方、科学的実在主義の立場において何を実在と考えているかを明確にしなければ、科学的実在主義の妥当性を論じることは難しい。本稿では、後者に関する最近の議論のひとつである構造実在主義(structural realism)に関する議論を、特に物理理論に焦点をあてて、とりあげる。

科学的実在主義は、科学理論は我々の認識とは独立で我々が観測できないような実在を記述していると考えた立場である。通常科学的実在主義は、科学理論が記述している実在は物理的対象の性質や物理的対象間の数学的関係や数学的構造であると考えた。構造実在主義は Worall(1996)によって主張された科学的実在主義の中の一つの立場で、科学理論が記述している実在は物理的対象の性質ではなく、物理的対象間の数学的構造であると考えた。さらに、Ladyman(1998)によると、構造実在主義は、物理的対象の性質を我々は知ることができないと考える認識論的構造実在主義(epistemic structural realism)と物理的対象はそもそも存在しないと考える存在論的構造実在主義(ontological structural realism)の二つに分かれる。上でも述べたように、通常科学的実在主義の立場では、科学理論が記述している実在は、電子や中性子といった物理的対象の性質や物理的対象間の数学的構造であると考えていたが、認識論的構造実在主義は物理的対象の性質に関して不可知論の立場をとる。つまり、認識論的構造実在主義は、科学理論が記述している実在を従来の科学的実在主義に比べて制限しているという意味で、通常科学的実在主義より反実在主義の立場に近づいた立場とすることができるだろう。しかし、科学理論は実在を全く記述していないとは考えていないので、反実在主義ではない。認識論的構造実在主義は物理的対象が存在しないという主張はしなかったのに対して、存在論的構造実在主義は物理的対象は存在せず構造のみが存在すると主張する。つまり、認識論的構造実在主義より積極的に科学理論が描く実在像について語り、従来の実在像からの転回を主張しているといえるだろう。

構造実在主義が妥当な立場であるかどうかは検討すべき重要な課題である。しかし、本稿ではこの問題は検討せず、構造実在主義が妥当な立場であることを前提する。その上で、現代物理学のもとで、認識論的構造実在主義と存在論的構造実在主義のどちらの立場が妥当であるかを検討する。そして、存在論的構造実在主義より認識論的構造実在主義の方が妥当な立場であると結論したい。

本稿の構成を述べる。2 節では、なぜ構造実在主義という立場が主張されたのかを述べる。3 節では、存在論的構造実在主義の立場に立つ人たちが、物理的対象が存在しないと考える根拠である量子力学的粒子における過小決定の問題を概観する。これは、量子力学的粒子は個性をもつと解釈もできるし、個性をもたないと解釈もできるという問題である。4.1 節では、古典統計力学に従う粒子も量子力学的粒子と同様に過小決定の問題が生じるにもかかわらず物理的対象が存在しないという結論は導かれていないということ指摘する。4.2 節では、相対論的量子力学において個数を数えられるような粒子を考えることができないという定理(Halvorson & Clifton, 2002, Theorem 3)から、粒子は個性をもたないと解釈するべきであるということ述べる。このことから、量子力学的粒子における過小決定の議論から物理的対象が存在しないと主張することは妥当でないということ述べてたい。5 節では、物理的対象の性質を我々は知ることができないと考える認識論的構造実在主義を裏付けるような事実が代数的場の量子論にあるということ述べる。最後に、6 節では、存在論的構造実在主義の立場より認識論的構造実在主義の立場の方が妥当であるということ述べる。

2. Wora II による構造実在主義

科学的実在主義を支持する議論として奇跡論法、科学的実在主義に反対する議論として悲観的な帰納法という議論がある。

奇跡論法は、最善の説明への推論(inference to the best explanation)の一種であるといわれる。最善の説明への推論とは、なにかこれまで分かっていることでは説明のつかない新規な事柄があり、これを説明する有力な仮説があって、それ以外にライバルの仮説がないとき、その仮説がたぶん正しいだろうという推論である。奇跡論法とは次のようなものである。観測結果と科学理論の予測がほぼ一致するという説明のつかない新規な事柄があり、科学理論は実在を記述しているというこれを説明する有力な仮説がある。もし、科学理論が実在を記述していないにもかかわらず観測結果と科学理論の予測がほぼ一致するならば、奇跡が起こっていると考えざるを得ないが、観測と予測の一致を奇跡によって説明するような仮説は妥当でないと思われる。つまり、科学理論が実在を記述しているという仮説以外

には、ライバルの仮説がないだろう¹。したがって、最善の説明への推論より、科学理論は実在を記述しているという仮説は正しい。このようにして奇跡論法は科学的実在主義を支持する。

一方、悲観的な帰納法は次のような議論である。現在までのほぼ正しい経験的予測をしていた科学理論において実在していると考えられていた対象、例えば熱素やエーテルなどは現在の科学理論においては実在しないと考えられている。このことから帰納的に現在受け入れられている科学理論が扱う対象、例えば電子なども将来の科学理論においては実在しないと考えられるだろう。このようにして悲観的な帰納法は科学的実在主義に反対する。

Worall(1996)は、この二つの議論をふまえた上で科学的実在主義の立場に立とうとした。そして、科学理論は物理的対象の性質を記述しているのではなく、科学理論における数学的構造が実在を記述していて、古い科学理論から新しい科学理論に移行するときは、数学的構造が保存されると主張した。つまり、古い理論から新しい理論に移行して熱素やエーテルといった物理的対象が存在していなかったということになっても、理論における数学的構造は保存されるので悲観的な帰納法の議論はあてはまらず、また理論における数学的構造が実在を記述しているので奇跡論法とも整合的である。この立場は、構造実在主義とよばれる²。

3. 存在論的構造実在主義を支持する議論

Ladyman(1998)は構造実在主義に関して、次のような問題提起をした。構造実在主義のもとで、物理的対象の性質は知ることができないだけなのか、それとも物理的対象はそもそも存在しないのか？そして、物理的対象の性質を知ることができないという立場を認識論的構造実在主義とよび、物理的対象はそもそも存在しないという立場を存在論的構造実在主義とよんだ。

Ladyman(1998)は存在論的構造実在主義を主張する動機を次のように述べる³。

個性性に関しては、French と Redhead の仕事において示されたように、電子は個性性があるとも解釈されるし個性性がないとも解釈される。我々の最善の理論において指定された実体の最も根本的な存在論的特徴ですら、その理論によって決定できないということを認める必要がある。(Ladyman, 1998, pp. 419-420)

こうした状況をふまえた上で、Ladyman(1998)は次のように続ける。

従って、我々は理論の変化と過小決定に関して伝統的な実在主義の問題を解消できるように、構造実在主義をつくるようにするべきである。これは構造が根本的かつ存在論的に固有なものであるとみなすということを意味している。(Ladyman, 1998, p. 420)

つまり、認識論的構造実在主義は、悲観的な帰納法を考慮に入れて、物理的対象の性質を知ることができないと主張したのに対して、存在論的構造実在主義は、悲観的な帰納法に加えて量子力学における過小決定の問題も考慮に入れて、物理的対象は存在しないと主張した。そこで、上の引用で言及されていた French & Redhead(1988)で述べられている過小決定の問題を詳しく見てみよう(French, 1989 も参照)。

ここでは、量子力学的粒子として2つの光子を考え、それぞれを粒子1, 粒子2と名付ける。状態aと状態bを考えると、4つの場合が考えられる。

1. 粒子1と粒子2が状態aにある。
2. 粒子1と粒子2が状態bにある。
3. 粒子1が状態aにあり、粒子2が状態bにある。
4. 粒子1が状態bにあり、粒子2が状態aにある。

まず、量子力学的粒子は個性性をもたないという議論をみる。古典統計力学の場合、3.と4.の場合は異なる場合として数えられて等しい確率を与えられるので、状態aに粒子が2つある確率と状態bに粒子が2つある確率はそれぞれ1/4で、状態aに粒子が1つ状態bに粒子が1つある確率は $1/4+1/4=1/2$ となる。一方、量子統計力学におけるボース・アインシュタイン統計の場合(例えば、光子)は3.と4.は全く同じとみなされるので、状態aに粒子が2つある確率と状態bに粒子が2つある確率はそれぞれ1/3で、状態aに粒子が1つ状態bに粒子が1つある確率は1/3となる。これは古典統計力学のときは粒子にラベル付けができた、つまり粒子1や粒子2のような呼び方ができたのに対して、量子統計力学のときは粒子にラベル付けができないということを示していると考えられる。つまり、古典統計力学のときは粒子は個性性をもっていたが、量子統計力学の時は粒子は個性性をもたないと解釈される。

次に、量子力学的粒子は個性性をもつという議論をみる。量子力学的粒子は個性性をもたないという解釈では、量子統計力学においては状態aにある粒子と状態bにある粒子を交換することができないと考えていた。つまり、粒子の操作に関して制限があると考えてい

た。しかし、粒子1と粒子2が取りうる状態に制限があるとも考えることもできる。その制限とは、粒子1と粒子2を交換しても状態が変わらないという制限である。このとき、1.の場合($|a\rangle|a\rangle$)と2.の場合($|b\rangle|b\rangle$)は許されるが、3.と4.の場合は許されない。1.と2.以外に許されるのは、 $2^{-1/2}(|a\rangle|b\rangle+|b\rangle|a\rangle)$ というエンタングルド状態である。このように考えれば、上で述べた解釈とは異なり、粒子は個性をもつと考えられる。

このように、量子力学のもとで、粒子は個性をもたないと解釈することもできるし、個性をもつと解釈することもできると French & Redhead(1988)は主張する。

4. 存在論的構造実在主義への批判

科学的実在主義に立って科学理論を解釈したとき、通常は、物理的对象が存在してそれらが構成する構造があると考えられる。例えば、原子核の構造について述べるときは、陽子と中性子が存在してそれらが原子核をどのように構成しているかを述べる。つまり、存在論的に物理的对象が構造に先立っていた。しかし、存在論的構造実在主義によると、科学理論における数学的構造は実在を記述しているが、物理的对象は存在しないと主張する。つまり、従来の実在に関する理解とは、大きく異なる。一方、認識論的構造実在主義は物理的对象の存在を否定しているわけではないので、従来の実在に関する理解と全く異なる主張をしているわけではない。したがって、存在論的構造実在主義は通常の実在に関する理解を拒否するために、十分に説得的な論拠を示さなければならないだろう。

French & Ladyman(2003)や Ladyman(1998)は、このような従来とは異なる物理的描像を受け入れる理由として、上で述べた量子力学的粒子の個性に関する過小決定の問題をあげた。しかし、量子力学的粒子が個性をもつという解釈と個性をもたないと解釈が経験的に同値であるということは、両者のうちどちらが妥当であるかを決定することができないということは含意しない。経験を越えた要素、例えば単純性、説明能力、科学理論の他の部分との整合性、といった、二つの解釈を選択する基準があるからである(Ladyman, 2002, pp. 181-183)。

古典統計力学においても量子力学的粒子と同様に、粒子の個性に関する過小決定の問題が生じるが、単純性の観点から粒子は個性をもつと解釈されているということを4.1節で指摘する。次に、4.2節で科学理論の他の部分との整合性から量子力学的粒子は個性をもたないと解釈すべきであるということを述べたい。このとき、存在論的構造実在主義が根拠としていた、量子力学的粒子は個性をもつと解釈もできるし個性をもたないと解釈できるという議論は、成り立たないことになる。つまり、存在論的構造実在主義の主張は妥当でないということになる。

4.1. 古典統計力学における粒子においても過小決定の問題があるという議論

上で述べたように、存在論的構造実在主義は従来の実在像とは異なる実在像を提示している。Chakravartty(2003)は、そのような実在像を提示するとき、「確立された存在論的枠組みを拒否するための説得力のある理由がある」(Chakravartty, 2003, p. 871)必要があると述べている。そして、量子力学的粒子において過小決定の問題があるという理由だけから従来の物理的描像を捨てるのは不十分であると主張している⁴。

[量子力学的]粒子における[個性性に関する過小決定という]状況は、日常生活での観察可能なものに関する状況と類似している。整合性から、日常生活における観察可能なものの存在論と個性性においても、存在論的構造実在主義を主張する人は過小決定の問題が生じるとみなさなければならない。しかし、日常生活における過小決定の問題によって、我々が対象を存在論的なカテゴリーから放棄するように強いられているようにはみえない。(Chakravartty, 2003, p. 871。[...]内は筆者が補った。)

ここで、整合性とは何かを Chakravartty(2003)は説明していない。おそらく、これは日常生活における本や鉛筆などの対象も電子や中性子から構成されており電子や中性子は量子力学に従うわけだから、量子力学における議論は日常生活においても成り立つということだと思われる。つまり、日常生活においても過小決定の問題が生じるにもかかわらず対象が存在しないという結論を出さないのだから、量子力学的粒子における過小決定の問題から対象が存在しないという結論を出すのは妥当でないという議論である。しかし、この議論には飛躍があるように思える。それは、整合性から日常生活における観察可能なものにおいても過小決定の問題が生じるという点である。量子力学では日常生活における直観に反するように見える現象（例えばベルの不等式の破れやシュレディンガーの猫という思考実験）が存在し、それを我々の直観と整合的に解釈できるかどうかについては多くの議論がある(Bub, 1999)。整合性から日常生活における観察可能なものにおいても過小決定の問題が生じると主張するならば、量子力学をどのように日常的な直観と整合的に解釈するのかについても言及する必要があるだろう。

ここでは量子力学の解釈に言及せず、古典統計力学の枠組みの中でも過小決定の問題が生じるということを論じたい。3節で古典統計力学においては粒子は個性性をもつという解釈を述べた。ここでは、古典統計力学のもとで粒子は個性性をもたないと考えよう。そして、状態 a に粒子が 2 つある状態、状態 b に粒子が 2 つある状態、状態 a に粒子が 1 つ

状態 b に粒子が1つある状態の確率をそれぞれ $1/4$ 、 $1/4$ 、 $1/2$ とする。つまり、どの状態になるかについての確率は等確率ではなく、何らかの理由で確率がばらつくと考える。この確率の計算は、粒子は個性をもっていないけれども、粒子は個性をもっていると仮定した上で、通常行われている計算と同じように、計算すればよい。このように考えれば実際に観測される確率とも一致した上で粒子は個性をもっていないという解釈もできる。つまり、古典統計力学においても粒子は個性をもつと考えることもできるし、個性をもたないとも考えることもできるので、過小決定の問題が生じる。もちろん、このような状態に関する条件を加えることの妥当性が問われることになるだろうが、それならば French & Redhead(1988)が量子力学的粒子が個性をもつと論じた際に状態に対して制限をしたことの妥当性も問われなければならないだろう。よって French & Redhead(1988)の量子力学的粒子における過小決定の議論を認めるならば、古典統計力学においても過小決定の問題が生じると考えてもいいだろう。しかし、古典統計力学においては物理的対象は存在しないとは考えられていない。その理由として、粒子が個性をもたないと考えたときの状態に対する確率の割り当て方があまりにアド・ホックであり不自然であるから、粒子が個性をもつと考える方が妥当であるということと、粒子が個性をもつという描像の方が我々が通常もっている描像に近いからといったことが挙げられるだろう。Chakravartty(2003)が述べたように、粒子が個性をもっていないという我々が通常もっていない描像をとるならば、従来の描像を捨てなければならないという説得的な理由を挙げなければならないが、古典統計力学においてはそのような理由はないのである。

従って、古典統計力学においても過小決定の問題は生じるが物理的対象は存在しないという結論を出していないのだから、量子統計力学においても過小決定の問題が生じていても物理的対象は存在しないという結論を出す必要はないだろう。しかし、この議論に対しては、次のような反論が考えられる。量子統計力学では、粒子が個性をもつという解釈ももたないという解釈も無理なくできた。しかし、古典統計力学では、粒子が個性をもたないという解釈は、かなり不自然であった。したがって、古典統計力学において物理的対象が存在しないという結論を出していないから、量子統計力学においてもそのような結論は出ないと主張するのは妥当でない。

次の節では、この反論が正しいとしても、粒子が個性をもつかどうかを決定する他の要因があるということを指摘する。

4.2. 量子力学において個数を数えられる粒子が存在しないという議論

この節では、量子力学的粒子は個性をもっていないと解釈するべきであるということ

を、相対論的量子力学において粒子の概念が存在しないという定理(Halvorson & Clifton, 2002, Theorem 3)に基づいて述べたい⁵。まず、定理を述べるために必要な条件を述べる。 Σ をミンコフスキー空間の空間的な超平面全体の集合、 $\underline{S} := \{S \mid \Sigma \supseteq S \supseteq \Sigma\}$ とする。 \underline{N} をヒルベルト空間 H 上のスペクトルが $[0, \infty)$ に含まれるような自己共役作用素全体の集合とする。 \underline{S} から \underline{N} への写像を $N: S \rightarrow N(S)$ とする。 $N(S)$ を S における個数を数える観測と考える。ミンコフスキー空間の並進群の強連続表現を $a \rightarrow U(a)$ とする。 a が時間的であれば $U(a)$ は時間発展を、 a が空間的であれば $U(a)$ は空間並進を表すことになる。 $(H, S \rightarrow N(S), a \rightarrow U(a))$ をミンコフスキー空間上の局所的個数作用素の系とよぶことにする。これに以下の条件を課する。

条件 1 (加法性): S と S' を同一の空間的な超平面の互いに排反な部分集合とする。このとき、

$$N(S \cup S') = N(S) + N(S')$$

である。

この条件は、 $S \cup S'$ 中にある粒子の個数の期待値は、 S 中にある粒子の個数の期待値と S' 中にある粒子の個数の期待値の和に等しいということを要請している。

条件 2 (並進共変性): 任意の $S \in \underline{S}$ 、任意の並進 a に対して

$$U(a)N(S)U(a)^* = N(S+a)$$

となる。ただし、 $S+a$ は S を a だけ並進させた空間的な超平面である。

この条件は、粒子の個数の期待値は座標系に依存しないということを要請している⁶。

条件 3 (エネルギーが下に有界であること): 時間的な並進 a に対して 1 パラメータユニタリ群 $\{U(ta) \mid t \in \mathbb{R}\}$ の生成子 $H(a)$ ⁷ は下に有界なスペクトルをもっている。

この条件は、粒子は最低エネルギーをもっているということを要請している。そうでないとしたら、粒子がより低いエネルギー状態に落ちていくことにより、任意のエネルギーを粒子から取り出せることになる。

条件 4 (粒子の個数の保存): Σ を \underline{S} の任意の要素とし $\{S_n \mid n=1, 2, \dots\}$ を Σ を覆う互いに排反な集合とすると、 $N(S_1) + N(S_2) + N(S_3) + \dots$ は H 上の自己共役作用素 N に収束する。そし

てそれは Σ の覆い方によらない。また、任意の時間的な並進 \mathbf{a} に対して

$$U(\mathbf{a})NU(\mathbf{a})^* = N$$

となる⁸。

この条件は、空間全体にある粒子の個数を数えることができるといふことと、その個数は時間とともに変化することはないといふことを要請している。

条件5 (微視的因果律): S と S' を互いに空間的な関係にある \underline{S} の任意の集合とする。

このとき、

$$N(S)N(S') = N(S')N(S)$$

となる。

この条件は、空間的な関係にある領域における事象は互いに影響を及ぼさないといふことを要請している。

これらの条件をもとに以下の定理が成立する。

定理 (Halvorson & Clifton, 2002, Theorem 3) ($H, S \rightarrow N(S), \mathbf{a} \rightarrow U(\mathbf{a})$)をミンコフスキー空間上の局所的個数作用素の系とし、これは条件 1,2,3,4,5 を満足するとする。このとき、任意の \underline{S} の要素 S に対して $N(S)=0$ となる。

粒子が個性をもつならば、粒子にラベルをつけることによって、粒子の個数を数えることができるであろう。しかし、この定理によれば相対論的量子力学において粒子の個数を数えることはできないのだから⁹、粒子は個性をもたないことになる。

French & Ladyman(2003)やLadyman(1998)は、存在論的構造実在主義を主張する根拠として量子力学的粒子における過小決定の問題をあげていた。しかし、上で見たように理論の他の部分を検討することによって、過小決定の問題は解消できる。したがって、存在論的構造実在主義を主張する根拠が妥当でないことになるので、存在論的構造実在主義は妥当でないだろう。

5. 認識論的構造実在主義を支持する議論

これまでの議論は、主に存在論的構造実在主義を扱ってきた。そして、存在論的構造実在主義が述べるような、物理的対象は存在しないという主張は妥当でない述べた。一方、

認識論的構造実在主義は、物理的対象の性質は知ることができないと主張する。2節で述べたように、その根拠は様々な科学史における事例に基づいた悲観的な帰納法によるものであった。この節では、代数的場の量子論を科学的実在主義の立場から解釈したとき、物理的対象の性質を知ることができないということを支持するような事実があるということを示す。

代数的場の量子論は、状態と「物理量 A を観測したら、物理量 A の値は a である」という形の観測命題から構成され、観測命題はミンコフスキー空間上の有界な時空領域に対応させられる。そして、ある状態のもとで、有界な時空領域において物理量 A を観測したとき、物理量 A の値が a である確率が計算できる。科学的実在主義の立場に立つならば、観測命題を「物理量 A の値は、観測とは独立に a である」という命題に解釈できるかどうか考える必要がある。そのためには、観測とは独立に、観測命題の真偽が定まっているとみなすことができる必要がある。「物理量 A を観測したら、物理量 A の値は a である」という観測命題が真であれば、この命題は「物理量 A は観測とは独立にある値をもって、その値は a である」と解釈できる。しかし、一般に有界な時空領域に対応させられた観測命題すべての真偽が確定しているとみなすことはできないと考えられている（例えば、Kitajima, 2006, Theorem 5.2 を参照）。そこで、どの観測命題の真偽が確定しているとみなすことができるのかを調べる必要がある。

真偽の確定した命題は状態のみから決まるという条件の下で、そうした真偽の確定した命題がどのような集合になるかを考察したのがKitajima(2004, Theorem 11)である。ある時空領域における真偽の確定した命題が、その時空領域に存在する物理的対象の性質と考えられる。しかし、こうした真偽の確定した命題は、多くの状態のもとで、存在しないということがClifton(2000, Proposition 3)で示されている。これは、代数的場の量子論において、多くの状態のもとで物理的対象の性質を知ることができないと解釈できるだろう。もちろん、真偽の確定した命題がみたさなければならないと考えた条件が妥当でなかった可能性も残っており、それに関する考察もなされている(Halvorson, 2006, Section 5 を参照¹⁰)。しかし、現段階では、真偽の確定した命題が存在しないという状況を回避はできていない。

6.まとめ

本稿では、構造実在主義に関する議論を概観してきた。3節において、存在論的構造実在主義者が、物理的対象の存在を否定する根拠である量子力学的粒子における過小決定の議論をみた。そして4.1節において、量子力学的粒子と同様、古典統計力学に従う粒子も過小決定の問題が生じるにもかかわらず、物理的対象が存在しないという結論は下されて

いないということを指摘した。さらに、4.2 節において、量子力学的粒子は相対論的量子力学においては個数を数えることができないという定理に基づくと、量子力学的粒子は個体性をもたないということを示すことができるということを示した。したがって、存在論的構造実在主義の根拠である量子力学的粒子における過小決定の問題は存在しないことになる。5 節では、代数的場の量子論を科学的実在主義の立場にたって解釈したとき、物理的対象の性質を知ることができないということを示すような事実があるということを示した。

以上のことから、私は存在論的構造実在主義の立場より認識論的構造実在主義の方が妥当な立場であると考えている。

註

- (1) もちろん、本当に科学理論が実在を記述しているという仮説のライバルになりうるような、観測結果と科学理論の予測がほぼ一致するということを説明する仮説が他にないのかという問題はあがあるが、本稿では議論しない。
- (2) 理論が移行したときに数学的構造が保存されるのではなく、他の部分が保存されると考える立場（例えば、実体実在主義(entity realism)）もある。そのような立場と構造実在主義との比較検討については、Chakravartty(1998)や伊勢田(2005)を参照。
- (3) 存在論的構造実在主義を主張する動機は French & Ladyman(2003, p.33)にも述べられている。
- (4) 存在論的構造実在主義を批判し認識論的構造実在主義を擁護する議論は Morganti(2004)においても、なされている。
- (5) Halvorson & Clifton(2002)は、構造実在主義には言及していない。
- (6) 具体的に述べると次のようになる。 ψ を任意の波動関数とすると、座標軸を-aだけ並進させると波動関数は $U(a)\psi$ となる。粒子の個数の期待値がどの座標系でも等しいということは、 $(\psi, N(S)\psi) = (U(a)\psi, N(S+a)U(a)\psi)$ ということである。この式から偏極恒等式（新井(1997)のp. 105を参照）を用いることにより、 $U(a)N(S)U(a)^* = N(S+a)$ が導かれる。
- (7) ストーンの定理（新井, 1997, 定理 4.5）より、ただ一つの自己共役作用素 $H(a)$ が存在して、 $U(ta) = \exp(itH(a))$ とかける。 $H(a)$ は強連続パラメータユニタリ群 $\{U(ta)|t \in \mathbb{R}\}$ の生成子とよばれる。
- (8) 相互作用のないときは粒子の個数が保存されるので、この条件は妥当な条件である。しかし、相互作用のある場合は、例えば電子対生成などによって粒子の個数が変化することがある。従って、この条件は相互作用のない場合に限り妥当である。相互作用がある場合も同様の結論が得られるかどうかは今後の課題であろう。
- (9) 物理の実験においては、検出器において電子や中性子などの“粒子”が何個検出されたかを測定する。このような実際の実験をどのように考えるかは、Halvorson & Clifton (2000, Section 7)において議論されている。
- (10) この論文は、<http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00002633/> もしくは <http://arxiv.org/abs/math-ph/0602036> からダウンロードできる。

文献

- 新井朝雄 (1997). 『ヒルベルト空間と量子力学』, 共立出版.
- Bub, J. (1999). *Interpreting the Quantum World*, Cambridge University Press.
- Chakravartty, A. (1998). 'Semirealism', *Studies in History and Philosophy of Science*, 29, 391-408.
- Chakravartty, A. (2003). 'The Structuralist Conception of Objects', *Philosophy of Science*, 70, 867-878.
- Clifton, R. (2000). 'The Modal Interpretation of Algebraic Quantum Field Theory', *Physics Letters A*, 271, 167-177.

- French, S. (1989). 'Identity and Individuality in Classical and Quantum Physics', *Australasian Journal of Philosophy*, 67, 432-446.
- French, S., & Ladyman, J. (2003). 'Remodelling Structural Realism: Quantum Physics and the Metaphysics of Structure', *Synthese*, 136, 31-56.
- French, S., & Redhead, M. (1988). 'Quantum Physics and the Identity of Indiscernibles', *British Journal for the Philosophy of Science*, 39, 233-246.
- Halvorson, H., & Clifton, R. (2002) 'No Place for Particles in Relativistic Quantum Theories?', *Philosophy of Science*, 69, 1-28.
- Halvorson, H. (2006). 'Algebraic Quantum Field Theory', in J. Butterfield and J. Earman (Eds.), *Handbook of the Philosophy of Science*, to be appeared.
- 伊勢田哲治 (2005). 「科学的事実論はどこへ向かうのか」, *Nagoya Journal of Philosophy*, 4, 35-50.
- Kitajima, Y. (2004). 'A Remark on the Modal Interpretation of Algebraic Quantum Field Theory', *Physics Letters A*, 331, 181-186.
- Kitajima, Y. (2006). 'On the Problem of Hidden Variables in Algebraic Quantum Field Theory', *Annals of the Japan Association for the Philosophy of Science*, to be appeared.
- Ladyman, J. (1998). 'What is Structural Realism?', *Studies in History and Philosophy of Science*, 29, 409-424.
- Ladyman, J. (2002). *Understanding Philosophy of Science*, Routledge.
- Morganti, M. (2004). 'On the Preferability of Epistemic Structural Realism', *Synthese*, 142, 81-107.
- Worall, J. (1996). 'Structural Realism: The Best of Both Worlds?', in D. Papineau (Ed.), *The Philosophy of Science* (pp. 139-165), Oxford University Press.