

# Primitive Ontology アプローチの GRW 理論と Bohm 力学の問題点

## A significant problem for the Primitive Ontology approach in GRW theory and Bohmian mechanics

森田紘平<sup>1</sup>

Kohei Morita

<sup>1</sup> 京都大学文学研究科

### Abstract

GRW theory and Bohmian mechanics are typical interpretations of quantum mechanics. One of the problems for these interpretations arises from the gap of the space-dimensionality. Quantum mechanics is high dimensional, but its experiences appear in our three dimensional space. Primitive ontology has been proposed, in order to fill the gap, but Ney recently criticized this approach. Admittedly, the primitive ontology approach is not sufficient at all. But her criticism remains ambiguous, or at least not enough. Instead of her criticism, this article reveals that the main drawbacks for primitive ontology lie in the relationships with classical mechanics.

## 1 はじめに

量子力学の哲学の代表的な課題である解釈問題には、これまで様々な解決案が提示されてきた。量子力学の解釈問題とは、量子力学が示す形式的な予測と、経験との間の不一致を指す。典型的には、シュレーディンガーのネコのように、マクロな重ね合わせの状態を我々が観測しないことが挙げられる。マクロな対象のみならず、我々は重ね合わせの状態を観測することはない一方で、量子力学においては重ね合わせの状態は現れており、この事実を説明するために様々な解釈が提案されてきた。現代の有力な解釈の中で実在論的な立場をとるものとしては、自発的崩壊解釈である GRW 理論<sup>1</sup>、隠れた変数理論の一種である Bohm 力学、さらに多世界解釈が挙げられる。特に、GRW 理論と Bohm 力学は、量子力学に新たな時間発展の形式を導入するなど、形式的な修正を通じて観測問題を解決する立場である。これらの解釈は量子力学に対して実在論、特に波動関数の実在性を認める立場であるため、波動関数実在論と呼称される。

GRW 理論や Bohm 力学と言った解釈は伝統的に Bell (1987) による議論をもとに展開されている。Bell は「シュレーディンガー方程式によって与えられる波動関数は全てではないか、あるいは正しくないかのいずれかである」(Bell 1987, p. 201) と述べた。波動関数が全てではないとする立場からは、シュレーディンガー

<sup>1</sup> 後述するとおり、GRW 理論には様々な種類がある。通常、“GRW-type theory”と呼称されることが多いが、今の所、定訳はない。以下では、オリジナルな GRW 理論はそうのように明記することとして、「GRW 理論」によって“GRW type theory”というクラス全体を指すものとする。

方程式に従う時間発展に加えて、崩壊過程と呼ばれるような時間発展を考える立場が導かれる。一方で、正しくないとする立場は、シュレーディンガー方程式が記述するそもそもの時間発展の規則を修正するというものであり、いわゆる隠れた変数解釈が含まれている。それぞれ現代的には、GRW 理論と Bohm 力学が対応している。これらの解釈には経験的整合性についての問題が指摘されている (Albert 1996; 2015; Maudlin 2007; Monton 2006; Lewis 2016)。これは、量子力学の波動関数が高次元の対象である一方で、我々の経験的な空間は 3 次元あるいは時空間に過ぎないにも関わらず、これらの解釈では対応関係を与えることができていないと批判するものである。この問題は、空間の次元と経験的整合性の問題と呼ばれる。確かに、波動関数によって椅子や机のようなマクロな対象を記述することは困難であろう。このことから、波動関数実在論には、Primitive Ontology と呼ばれる付加的な存在論が必要であるとされる。このような解決に対して Ney (2015) は、波動関数実在論にとっての経験的整合性を 3 次元空間に限定するべきではないと主張する。しかし、彼女の批判は波動関数実在論への反論としては十分ではなく、さらに、Primitive Ontology への批判としても曖昧である。そこで、本論では、Ney の議論の不備を指摘することを通じて、GRW 理論と Bohm 力学が古典力学的な性質を導かないことが Primitive Ontology にとって十分に深刻な問題であることを指摘する。

本論文の構成は次のとおりである。まず §2 で本論文で特に着目し、Bell が選択肢として提案した解釈のうち、特に GRW 理論と Bohm 力学について導入する。続けて §3 では、これらの二つの解釈が抱える問題として、経験的整合性と空間の次元の問題について、代表的なものを整理する。さらにその上で解決策として、解釈に導入される local beables と Primitive Ontology という二つのアイデアについて説明し、その上でそれぞれの解釈の修正した形式について説明する。§4 では、この空間の次元の問題に対する解決策である Primitive Ontology を用いた解決案に対する反論を検討する。まずは、Ney (2015) による批判を整理する。その上で、彼女の批判の不備を指摘する形で、解釈のそもそもの目的に則って、より適切な Primitive Ontology への反論を与える。

## 2 解釈の形式的な側面

この節では、本論に関連する限りで、二つの解釈を導入する。前述の通り、量子力学の解釈は観測問題の解決として提案されていると理解できる。量子力学によれば、二つの状態の重ね合わせの状態を考えることができるが、この重ね合わせの状態にある対象を我々は経験していない。そのため、伝統的にはユニタリーなシュレーディンガー方程式に従う時間発展に加えて、複数の状態の重ね合わせの状態が一つの状態に崩壊するという崩壊過程と呼ばれる非連続的な時間変化が導入される (Albert 1992, p. 73)。このような二種類の時間発展に対して、崩壊過程は現実には起きていると主張する崩壊解釈と呼ばれる立場と、我々には知られていない未知の隠れた変数が存在し、崩壊過程を不要とする立場が知られている。前者の現代的な代表例が GRW 理論 (Ghirardi, Rimini and Weber 1986) であり、後者は Bohm 力学と呼ばれている。以下で、これらの解釈について簡単に導入する。

### 2.1 GRW 理論

まずは GRW 理論を導入する<sup>2</sup>。GRW 理論はユニタリーで連続的な時間発展に加えて、非連続的な時間発展を有する。ある  $N$  粒子系の波動関数  $\psi(q_1, \dots, q_N)$  ( $q_i \in \mathbf{R}^3, i = 1, \dots, N$ ) があるとしよう。このとき

<sup>2</sup> ここでの記述は、主に Allori et al. (2008) による。

わゆる崩壊過程を説明する演算子は,

$$\hat{\Lambda}(x) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{3/2}} e^{-\frac{(\hat{Q}_i - x)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

と定義される。ここで、 $\hat{Q}_i$  は  $i$  番目の粒子の位置演算子である。また、 $\sigma$  は  $10^{-7}$  オーダーの時間についての定数である。波動関数の時間発展は次の三つのルールに構成される。(1) ある時間  $T_1 = t_0 + \Delta T_1$  以前では、時間発展はユニタリーである。ある時間  $T_1$  における状態は,

$$\psi_{T_1} = \hat{U}_{\Delta T_1} \psi_{t_0} \quad (2)$$

とかける。 $\hat{U}_t = e^{\frac{i}{\hbar} \hat{H}t}$  はユニタリー演算子である。 $\Delta T_1$  は崩壊が起きる直前の時間であり、母数  $N\lambda$  の指数分布からランダムに選ばれる。ただし、 $\lambda$  は  $10^{-15} s^{-1}$  オーダーの定数である。(2) ある時間  $T_1$  で自発的な崩壊は次のように記述される。あるランダムな位置  $X_1$ 、ランダムなラベル  $I_1$  で崩壊するとして,

$$\psi_{T_1} \mapsto \psi_{T_1+} = \frac{\hat{\Lambda}_{I_1}(X_1)^{1/2} \psi_{T_1}}{\|\hat{\Lambda}_{I_1}(X_1)^{1/2} \psi_{T_1}\|}. \quad (3)$$

ただし、崩壊の中心である  $X_1$  は次のような確率で選ばれる。

$$\text{Prob}(X_1 \in dx_1 | \psi_{T_1}, I_1 = i_1) = \langle \psi_{T_1} | \hat{\Lambda}_{i_1}(x_1) \psi_{T_1} \rangle dx_1 = \|\hat{\Lambda}_{i_1}(x_1)^{1/2} \psi_{T_1}\|^2 dx_1. \quad (4)$$

(3) 最後にこれらの時間発展が繰り返される。

よりシンプルに表現すると、波動関数  $\psi$  は,

$$r(x|\psi) = \lambda \langle \psi | \hat{\Lambda}_i(x) \psi \rangle \quad (5)$$

という確率で  $x$  に崩壊する。結果として現れる状態は式 (3) で与えられる。 $t_0$  から  $t$  (ただし、 $t_0 < T_1 < T_2 < \dots < T_n < t$ ) までの時間発展において、 $n$  回の崩壊が起きたとする。それぞれの崩壊で、崩壊後の波動関数の中心を  $X_1, X_2, \dots, X_n$  とし、対応するラベルを  $I_1, I_2, \dots, I_n$  とする。この時、最終的な波動関数の形は,

$$\psi_t = \frac{\hat{L}_{t,t_0}^{F_n} \psi_{t_0}}{\|\hat{L}_{t,t_0}^{F_n} \psi_{t_0}\|} \quad (6)$$

であり、この時、 $F_n = \{(X_1, T_1, I_1), \dots, (X_n, T_n, I_n)\}$  かつ,

$$\hat{L}_{t,t_0}^{F_n} = \hat{U}_{t-T_n} \hat{\Lambda}_{I_n}(X_n)^{1/2} \hat{U}_{T_n-T_{n-1}} \hat{\Lambda}_{I_{n-1}}(X_{n-1})^{1/2} \hat{U}_{T_{n-1}-T_{n-2}} \dots \hat{\Lambda}_{I_1}(X_1)^{1/2} \hat{U}_{T_1-t_0}. \quad (7)$$

とした。 $X, T, I$  の選ばれ方はランダムであり、波動関数  $\psi_t$  の形もランダムである。以上のように GRW 理論は、崩壊過程に対応する演算子を導入し、シュレーディンガー方程式以外の時間発展を量子力学に導入している。その意味で、単なる解釈ではなく「理論」と呼ばれている。

## 2.2 Bohm 力学

GRW 理論と同様に、Bohm 力学の基本的な形式についても導入しよう<sup>3</sup>。Bohm 力学では、古典力学的な質点 (Bohm 粒子と呼ばれる) を導入する。この質点の挙動は波動関数によって支配されているとすること

<sup>3</sup> 以下の記述は、主に Allori et al. (2008) および Goldstein (2017) の記述に依拠している。

で、時間発展は決定論的であるものの、観測結果としては確率的になる解釈として Bohm 力学は特徴づけられる。

形式的な特徴づけは以下の通りである。  $N$  粒子系の運動は、  $Q_i(t)$  で記述される。  $Q_i(t)$  はある時点  $t$  での粒子  $i$  の  $\mathbf{R}^3$  における位置を表現している<sup>4</sup>。 Bohm 粒子の運動法則は、

$$\frac{dQ_i}{dt} = v_i^\psi(Q_1, \dots, Q_N) = \frac{\hbar}{m_i} \operatorname{Im} \frac{\psi^* \nabla_i \psi}{\psi^* \psi}(Q_1, \dots, Q_N) \quad (8)$$

である。ただし、  $m_i$  は粒子の質量であり、波動関数はシュレーディンガー方程式

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H} \psi \quad (9)$$

に従って変化する。この二つの規則より、配位である  $Q(t) = (Q_1(t), \dots, Q_n(t))$  はある時点  $t$  におけるランダム分布  $|\psi|^2$  となる。このような形式の上では、量子平衡状態仮説が自然に導入される。量子平衡状態仮説は、大数の法則により初期状態の典型性 typicality を要求するものである。この仮説によって観測者にはランダムネスが現れ、かつ観測者にとっての確率的な測定結果の予測は、ボルン・ルールによる量子力学の測定結果の確率と一致することが示されている。

### 3 次元の問題と Primitive Ontology

これら二つの解釈、特に GRW 理論に対して Maudlin (2007) は、経験的一貫性が欠如しており local beables が不可欠であると主張した。さらにこの問題は、Monton (2006) が指摘していたような高次元空間と低次元空間の関係づけの問題として定式化されている。この節では、Maudlin による批判を中心に、上述の解釈がどのようにして空間の次元に関する問題を解決したのかを整理する。

GRW 解釈と Bohm 力学という波動関数の実在性を主張する解釈が直面する問題を Albert (1996) は次のように指摘している。もし波動関数が実在するのであれば、波動関数が存在している高次元の空間も同様に存在しているはずである。  $N$  粒子系の場合であれば  $3N$  次元空間が実在する。一方で、我々の日常的な空間は 3 次元空間であり、我々の経験もまた 3 次元空間上の一点に対応している。しかし波動関数の記述を、我々の 3 次元空間に対応させる普遍的な法則がない。 Albert は波動関数の実在論を採用することで、我々の日常的な世界は、少なくとも本質的には、実在的ではないことになってしまうと主張する。さらに、Monton (2006) が Albert の解決<sup>5</sup>を批判する形で、この問題が「培養液中の脳」よりも深刻な状況であると指摘している。

波動関数の存在論は、培養液中の脳よりも過激である。少なくとも、3次元空間の脳を持っていると考えていることは正しい。波動関数の存在論では、このような信念すら正しくない。実際に存在しているのは、  $3N$  次元空間上で時間発展する対象だけである (Monton 2006, p. 784)。

培養液中の脳ですら 3次元空間上に様々な対象が存在することは認められている。一方で、波動関数実在論では、いかなる 3次元空間上の対象も存在せず、その意味でより過激であると言えるだろう。波動関数が何らかの形で存在すると主張する立場では、高次元空間と低次元空間の関係を考える必要がある。

<sup>4</sup> Bohm 力学は隠れた変数解釈の一つであり、この  $Q_i(t)$  が隠れた変数になっている。

<sup>5</sup> Albert 自身は、量子力学のハミルトニアンと古典力学の軌道の間に対応関係を確立できると主張することで、この問題を解消しようとした。  $3N$  次元空間から 3次元空間へ対応関係を与えることはできるかもしれないが、同様に  $3N$  次元と 2次元、あるいは 11次元空間への対応関係も考えられる。この解決案でも、結局、なぜ 3次元への対応があるのかを説明する必要がある。

Maudlin (2007) はこの問題を受けて、GRW 理論には修正が必要であると指摘する。まず、Maudlin は情報の完全性という概念を「ある記述が情報の完全であるのは、あらゆる物理的な事実がその記述から回復できる時である」と定義する (Maudlin 2007 p. 3151)。GRW 理論は情報的に完全であることが要請されており、Maudlin はその意味で GRW 理論は波動関数一元論と呼ぶ。実際、GRW 理論で存在が要請されているのは波動関数のみであり、適切なラベルづけであろう。GRW 理論は情報的に完全であるにも関わらず、高次元での記述と、低次元での経験を対応づけるすべがなく、Albert によって指摘された問題を回避できない。つまり、波動関数一元論である GRW 理論では、時空間における値や状態を波動関数が持ち得ないため、経験的整合性が保てないとして、GRW 理論にはさらなる要素が必要であると指摘した。Maudlin 自身は、このように要請される付加的な要素を local beables と呼んだ。この local beables とは単に存在するわけではなく、時空間上に存在するものであるとして Bell によって導入された (Bell 1987. p. 53)。量子力学の空間の次元と我々の経験について空間の次元が異なることから誘引される問題に対して、GRW 理論には、local beables として物質密度を導入する GRW matter density と、離散的な flash を導入する GRW flash という二つの選択肢があることが知られている (例えば、Lewis 2016, p. 55)。

local beables は経験的整合性のために導入される一見するとアド・ホックな概念である一方で、基礎的な物理学の存在論には自然に経験との対応を可能にする形而上学的な前提が存在する。基礎的な物理理論には、3次元空間あるいは時空間におけるこの世界の構成要素になるような対象が存在し、これを Primitive Ontology (以下 PO) と呼ぶ。Allori (2013) はこの PO を次のように特徴づける。

- あらゆる基礎的な物理理論は、曖昧さのない性質を持つ 3次元のマクロな対象によって構成されるものとして現れている我々の周囲の世界の説明をしなければならない。
- これを達成するために、理論は PO についてのものとなる。PO とは 3次元空間、ないし、時空間上に存在している実体である。これらはあらゆるものの基礎的な構成要素であり、その時間発展によって世界の描像が与えられている (Allori 2013, p. 60)。

このように、PO はこの世界を記述する最小構成要素であり、マクロな対象も説明することができる。基礎的な物理学には PO にあたるものが存在すると主張される (Allori 2013; 2015)。古典力学においては質点が、電磁気学においては場が PO である。

GRW<sub>m</sub> は、PO として「場」を導入する。これは  $m(x, t)$  と表現され、次のように定義される。

$$m(x, t) = \sum_{i=1}^N m_i \int_{\mathbf{R}^{3N}} dq_1 \cdots dq_N \delta_i(q_i - x) |\psi(q_1, \cdots, q_N, t)|^2. \quad (10)$$

ただし、 $x$  は  $\mathbf{R}^3$  における任意の点である。この場は、物質密度 matter density を表現している。もちろん、場であるので連続的な存在論的描像を示す。波動関数によって表現される場が、物質の密度を示している。さらに、この物質密度は、量子力学によって予想される物質の密度と対応し、マクロな状態はこの密度が高い領域と対応している (Lewis 2016, p. 159)。

一方で、GRW<sub>f</sub> は flash と呼ばれるある種の離散的な性質を前提する。これは、前述の GRW の形式から自然に現れる対象であると仮定される。この flash それ自身は 3次元空間上にある。GRW<sub>f</sub> は、そもそも Bell によって提案されたアイデアであり、より明示的に PO として flash を仮定した理論であると言える。

GRW ジャンプ (波動関数の一部であって、それ以外のものではない) は日常的な空間においてよく局所化されている。実際に、それぞれのジャンプはある時空間上の点  $(x, t)$  において中心がある。そのた

め、我々はこの出来事が理論の「local beables」の基礎であると提案できる。これらの対象は、現実世界の明確な場所と時間における実際の出来事に対して数学的に対応するものである。(Bell 1987, p. 205)

ここで Bell は、波動関数が崩壊した後のピークの部分がこの世界の事象と対応していると主張している。まさしく、このピークにあたる部分を flash と呼ぶ立場が GRWf である。つまり、これらは GRW 理論にある意味で強引に 3 次元的な対象、あるいは 3 次元的な対象との対応を想定することで、前述の波動関数の実在論の経験的整合性の問題を解消する。GRWm や GRWf における、matter density を示す場や離散的な flash が PO であり、このような存在を仮定することで、経験との整合性を保つことができると主張されている<sup>6</sup>。

GRW 理論と同様に、Bohm 力学においても PO は要請されており、いわゆる Bohm 的粒子である (Allori 2015, p. 8)。Bohm 的粒子は、古典的粒子と呼ばれるが、その理由の一つは 3 次元空間に存在する粒子であるためである。さらにこの粒子は、ガイド波によってその軌道が前述の方程式に従って、量子力学的に決定される<sup>7</sup>。

## 4 Primitive Ontology アプローチの問題

このように PO に訴えることで GRW 理論と Bohm 力学は、経験的整合性と空間の次元の問題を解決している。しかし、これらの解釈はあくまで量子力学に動機付けられて提案されたにも関わらず、果たしてこのような形而上学的な対象が不可欠なのであろうか。この節では、PO に訴える方針に対する Ney (2015) の反論を検討することで、PO が必要以上に強い要請であることを示す。

### 4.1 PO への批判

この節では、PO を伴う波動関数実在論に対する批判 (Ney 2015) を検討しよう。まず、Ney は Maudlin の議論を次のように整理している (Ney 2015, p. 311)。

1. 物理理論の形而上学的解釈が十分であるのは、この形而上学的解釈がその理論を経験的に一貫したものにできる時である。
2. 基礎的な物理理論が経験的に一貫したものであるのは、我々のもつ理論の証拠が、その理論の存在論の中に含まれている対象についてのものである時である。
3. 量子論についての証拠は、local beables についてのものであるように見える。
4. それゆえ、十分な量子論は、もし経験的に一貫したものであるならば、その存在論の中に local beables を含んでいるべきである。
5. 波動関数実在論は、量子論が local beables を持たないと主張する立場である。
6. それゆえ、波動関数実在論は十分ではない。

<sup>6</sup> Allori らはこの二つの理論の経験的等価性を示しており、両者の間にヒエラルキーは存在しない (Allori et al. 2008, p. 362)。

<sup>7</sup> Bohm 粒子を PO として前提した際の問題は、波動関数や量子状態の解釈である。例えば Belot (2012) は、Bohm 力学の疑問点として、Bohm 粒子が PO として基礎的な存在であるとした時に波動関数として表現される量子状態をどのように理解すべきかという問題を指摘する。その上で、Bohm 力学における波動関数の可能な形而上学的な地位について大きく三つに分けて分類している (対象・法則・性質)。さらにこれを受けて、Esfeld らは Bohm 力学における形而上学的な分析を展開している (Esfeld et al. 2017)。しかし、この形而上学的な分析は、そもそも Bohm 力学が経験的整合性をどのように保つのかという問題の助けにはならない。結局のところ、波動関数の存在論的地位を探求するだけで、Bohm 力学が抱える高次元空間の記述と低次元空間の記述の間の不連続性の理解の助けにはならず、本稿ではこの点については立ち入らない。

これは波動関数実在論に対する Maudlin の批判を再定式化したものである。Maudlin は、付加的な local beables が波動関数実在論に不可欠であると主張する。Ney はこの議論が、波動関数実在論が誤りであることを主張しているわけではなく、波動関数実在論が真であると認めると、この立場の証拠となりうるものの実在性を否定することになると指摘する。というのも、そもそも波動関数によってマクロな対象の存在論を与えることができないからである。しかし、前述の通り、PO の典型的な特徴づけでは、PO は全ての対象の構成要素であることを要請している (Allori 2013, p. 60)。そのため、マクロな対象の存在論を PO の観点から説明できないということは、PO を用いた議論への反論としては決定的である。実際、量子力学の波動関数によって、机や椅子を説明することは不可能であろう。このようにして、Ney は波動関数実在論が抱える困難を指摘している。そこで、Ney はマクロな存在論を回復することと、経験的に整合性があることは別であると主張する。つまり、経験的な証拠が 3 次元的なものである必要はなく、その意味で、マクロな存在論を波動関数実在論が説明できないことは問題ではない。

量子力学の経験的証拠が、必ずしも 3 次元空間上で記述される必要がないとする Ney の立場は、もちろん原理的には可能である。ただし、この場合でも、量子力学がマクロな経験的予測を与えている状況には変わりはなく、その対応関係を与える必要がある。そもそも量子力学の解釈は、まさしく我々の経験的事実を説明するために導入されたのであった。例えば、GRW 理論は崩壊過程を導入することで、重ね合わせを経験、ないし観測しないことを正当化しようとしている。Ney のように、量子力学の経験的証拠が 3 次元空間上にある必要がないと主張すると、解釈のそもそものモチベーションを放棄することになりうる。さらに、波動関数実在論の経験を 3 次元空間に限定しないという立場は、多世界解釈に帰着する。多世界解釈は、この世界に実在するものは全て量子力学的なものだけであるとする立場である (Wallace 2012)。そのため、空間の次元に関する前述の問題は、多世界解釈にとっては問題ではない。経験を 3 次元に限定できないという指摘は、波動関数実在論への反論ではなく、波動関数実在論の中でも多世界解釈を導くに過ぎない。したがって、Ney の批判は波動関数実在論への反論ではなく、PO を用いる方法論に対するものである。

さらに、マクロな存在論が PO によって記述できないという Ney の指摘は曖昧な主張にとどまる。確かに、波動関数が机や椅子を記述できないだろうということは、説得力のある立場ではあるが、この不可能性を厳密に示すのは困難であろう。また、量子力学の解釈は、あくまで量子力学にある程度の実在論的立場をとった上で、経験（重ね合わせを観測しないことなど）を説明することであり、Ney が要請しているような机や椅子の存在論的な記述を与えることではない。では、Ney の批判、波動関数実在論はマクロな存在論を扱えないという批判が、妥当ではないのだとしたら、PO に問題がないことになるだろうか。

## 4.2 古典的性質と PO

Ney の批判は、机や椅子のようなマクロな存在を波動関数によって説明できないということに依拠している。確かに、波動関数によって机のようなマクロな存在を説明することはできないだろう。しかし、そもそも量子力学の解釈はこのようなマクロな存在論を全てを与えることを目標としていない。ここでは、PO を含む解釈に対するより重大な批判として、古典力学との関係を考える。つまり、PO を前提する解釈は古典力学を導くことができるわけではない点を指摘することで、PO の問題点を明確にしよう。

Bohm 力学は、古典的な粒子 (Bohm 粒子) を PO として導入している。このことから、Bohm 力学を採用すれば量子力学から古典力学的な性質が導けると主張できるように見える。しかし、Goldenstein (2017) が指摘しているように、二つの理論の関係はそう単純ではない。Bohm 力学においても、速度は粒子の位置によって決定され、その意味で古典力学と類似性がある。量子力学においてはガイド方程式である式 (8) に

よって二つの関係が与えられている。一方で、古典力学においては Bohm 力学の確立にとって重要な役割を果たしたハミルトン・ヤコビ方程式によって位置と速度の関係を与えることができる。その意味でも、Bohm 力学と古典力学には対応関係があるように見えるかもしれない。しかし、ハミルトン・ヤコビは他の古典力学の形式化と同値であり、ガイド方程式（式 (8)）が原理的に基礎的であるような Bohm 力学と単純に対応するわけではない。さらに、Bohm 粒子が PO であるとするならば、古典力学的な挙動を量子力学から導くことができなければならないが、Bohm 力学から古典的な運動方程式を導くことができない。Bohm 力学は古典力学から類推しているに過ぎず両者の間に導出関係はない。Bohm 力学から古典力学的な性質を導くことができるように見えるのは、古典力学的な性質を前提しているためであり、Bohm 力学自体の体系から導かれているわけではなく、Bohm 粒子が古典的な挙動を示すとは言えない。このことから、PO として Bohm 粒子を持つ Bohm 力学では古典的な性質を PO によって説明することができないと言える。同様に、GRW 理論と古典力学の関係を考えよう。Bohm 粒子の事例と同様に、GRW 理論が古典力学を導出できるのかを考えると、そもそも GRW 理論は崩壊のプロセスを量子力学に導入したものに過ぎず、古典的な性質を前提せずに量子力学から、古典力学的な挙動全体を導くことはできない。何故ならば、崩壊した後の挙動も結局はシュレーディンガー方程式にしたがうのみであり、崩壊解釈自体も古典力学的な運動方程式と対応するものではない。その意味で、GRWm と GRWf のいずれの理論でも、それら単独で、古典力学的な性質を導くことはできない。したがって、Bohm 粒子と同様に flash、および matter density が古典力学的軌道を示す根拠はどこにもない。PO を伴う解釈は古典的な性質を導出できず、PO の要請である全ての対象の構成要素であるという条件を満たせない。

しかし、このような主張に対しては、量子力学と古典力学の間には導出関係があるのではないかとする反論があるかもしれない。例えば、その典型的な事例として、量子力学における物理量の期待値の関係を表現する Ehrenfest の定理が挙げられるかもしれない。確かに、Ehrenfest の定理により、自由粒子の期待値は古典力学の運動方程式に従い、さらに、GRW 理論においても成立することが知られている (Frigg and Hoefer 2007)。しかし、これは特定の条件下で特定の古典的な性質が導かれることを示しているに過ぎず、一般に全ての古典力学的な対象の記述がなされているというわけではない。実際、Landsman が論じているように「ある特定の状態で、ある特定のオブザーバブルについては古典的な挙動が量子論から生じる」(Landsman 2007, p. 515) だけであり、一般に古典的な性質の全てが量子論から導かれるわけではない。また、デコヒーレンスを用いることで、どの解釈でも古典性を導くことができるように見えるかもしれない (Rosaler 2016)。しかし、この事例でもあくまで開放系の特定の条件下では、近似的に古典力学的な記述が回復できるとどまり、古典力学の軌跡を完全に、つまり近似なく、記述できるわけではない。PO がこの世界の全ての対象の構成要素であるならば、そのような近似も許されるべきではないだろう。

Bohm 理論、や GRWm, GRWf のように PO を前提とする解釈では、古典力学的な性質を導けない<sup>8</sup>。PO はこの世界の全ての対象を説明する構成要素であるはずである。しかし、一般に古典力学の記述を Bohm 力学や GRW 理論の PO によって与えることはできず、PO の要請を満たせない。それゆえ、PO に訴えるアプローチは問題を抱えてしまう。このように議論すれば、Ney のように不必要に存在論の議論を抱えることがなく、簡潔に PO を用いた方法論に対する反論となる。

<sup>8</sup> より正確には、PO を要請したとしても、さらに古典力学的な性質を要請しなければ、古典的な性質は導くことができない。

## 5 結論

波動関数実在論とも呼ばれる量子力学の解釈のうち代表的な二つの立場である GRW 理論と Bohm 力学について検討してきた。これらは、高次元空間の対象である波動関数の実在性を認める一方で、我々の経験的な事実を説明する立場である。そのため、高次元空間における記述と低次元空間における記述を結びつけるための何らかの仮定が不可欠であった。その代表的なアイデアが local beables であり、さらに物理学に動機付けられた形而上学的なアイデアである PO であった。しかし、PO を伴う立場では、そもそも古典力学的な性質を導くことができない。よって、この世界の全てのものの基礎的な構成要素として PO を前提する立場は、不適當である。一方で、空間の次元の違いという問題は依然として、諸解釈の抱える重要な問題の一つである。というのも、解釈は量子力学の観点から我々の日常的な経験を説明するためのものであるためである。そのために、この世界の全ての構成要素となるわけではない local beables を想定するという立場は妥当であるが、PO のような強い形而上学的な対象を前提するのは不適切である。このような主張に対して、次のような反論がありうる。Maudlin が情動的完全性を唱えているように、local beables を支持する立場も、PO と同様に全ての対象を説明する必要があるというものである。しかし、もし、机や椅子のような日常的な対象の記述をも要請するのだとすれば、そもそも情動的に完全な物理理論など存在しない。さらに、解釈の目的は量子力学の経験を説明することであり、空間の次元の問題もあくまで量子力学の領域で議論されていたものである。そのため、Maudlin の提示する情動的完全性は、量子力学の範囲内の対象の説明を要請するものとして理解すべきである。

Primitive Ontology に関する議論は、解釈本来の目的を逸脱し、形而上学的な議論に終始し過ぎてているように見える。確かに、Albert (1996: 2015) や Maudlin (2007) が論じたように、いくつかの解釈は経験との対応を与えるために、ある種の対象を加えなければならないだろう。しかし、これはあくまで量子力学とその経験の関係から与えられるべきであり、それを越えた主張を含むべきではない。PO のように、この世界の全てを説明することは強すぎる仮定である。さらに、Ney が問題視しているマクロな存在論を波動関数実在論が説明できないという点も、多くの形而上学的前提が暗黙に仮定されている。量子力学の示唆する形而上学的描像は、重要な問いであるが、量子力学によってこの世界の全ての対象を説明するという立場は、説得力のある立場ではない。

## 参考文献

- Albert, David. 1992. *Quantum Mechanics and Experience*. Harvard University Press.
- . 1996. Elementary quantum metaphysics. In James Cushing, Arthur Fine, and Sheldon Goldstein (eds.), *Bohmian Mechanics and Quantum Theory*. Kluwer. 277–284.
- . 2015. *After Physics*. Harvard University Press.
- Allori, Valia. 2013. Primitive Ontology and the Structure of Fundamental Physical Theories. In Alyssa Ney and David Albert. (eds.), *The Wave Function*. Oxford University Press. pp. 58–75.
- . 2015. Primitive Ontology in a Nutshell. *International Journal of Quantum Foundations*. 1. 107–122.
- Bell, John. 1987. *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Cambridge University Press.
- Belot, Gordon. 2012. Quantum States for Primitive Ontologist. *European Journal for Philosophy of*

- Science*. **2**. 67–83.
- Esfeld, Michael, Lazarovici, Dustin, Lam, Vincent, and Hubert, Mario. The Physics and Metaphysics of Primitive Stuff. *British Journal for Philosophy of Science*. **68**. 133–161.
- Frigg, Roman and Hoefer, Carl. 2007. Probability in GRW Theory. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*. **38**. 371–389.
- Goldstein, Sheldon. 2017. Bohmian Mechanics. *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2017 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL=<<https://plato.stanford.edu/archives/sum2017/entries/qm-bohm/>>.
- Ghirardi, GianCarlo, Rimini, Albert, and Weber, Tullio. 1986. Unified Dynamics of Microscopic and Macroscopic Systems. *Physical Review D*. **34**. 470–471.
- Landsman, Nicholas. 2007. Between Classical and Quantum. In Jeremy Butterfield and John Earman (eds.), *Philosophy of Physics*. Elsevier. 417–553.
- Lewis, Peter. 2016. *Quantum Ontology*. Oxford University Press.
- Maudlin, Tim. 2007. Completeness, Supervenience and Ontology. *Journal of Physics A*. **40**. 3151–3171.
- Ney, Alyssa. 2015. Fundamental Physical Ontologies and the Constraint of Empirical Coherence. *Synthese*. **192**. 3105–3124.
- Rosaler, Joshua. 2016. Interpretation Neutrality in the Classical Domain of Quantum Theory. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*. **53**. 54–72.
- Wallace, David. 2012. *The Emergent Multiverse*. Oxford University Press.