

場の量子論における基本的実体の検討：出来事存在論に注目して

今井 慶悟 (Keigo IMAI)

京都大学文学研究科 博士後期課程 (科学哲学科学史専修)

日本学術振興会特別研究員 (DC2)

世界の基本的存在者が何であるかという問題は、古くから形而上学で問われてきた。現代では、とりわけ基本的存在者を物質的対象とするのであれば、素粒子物理学などの基礎物理学がこうした問題の解答の一端を与えることになるだろう。

こうした素粒子物理学をはじめとする現代物理学の根幹をなす最も基礎的にして成功をおさめる理論のひとつが、場の量子論 (quantum field theory: 以下 QFT) である。しかし、QFT における基本的実体がそもそも何かについてはいまなお哲学的議論があり、明確な合意が存在しない。本発表では QFT のこうした存在論的問題を扱う。

QFT における基本的実体の身分をめぐる解釈として、大きく分けて、**粒子解釈** (particle interpretation) と**場の解釈** (field interpretation) という二つの解釈が存在する (cf. Kuhlman 2010, 2023; Bigaj 2018 など)。粒子解釈は、その名の通り、粒子を QFT の基本的実体と考えるものである。これは、「場」の量子論という名称からするとやや意外に思われるかもしれない。だが、たとえば場の量子化の手続きから、(相互作用する) 粒子という形で場の個別化 (particularization) や離散化 (discretization) が実行されることなどから、粒子を基本的実体として捉える動機が生まれる。

しかし、粒子解釈には様々な問題点が指摘されている (cf. Bigaj 2018 など)。たとえば粒子の概念には局在化可能性 (localizability) や可算性 (countability) が要求されるが、Malament の定理や Reeh-Schlieder の定理などのいくつかの数学的結果は、相対論的な枠組における粒子の局在化可能性に困難を与えるものだと考えられている。

他方、場の解釈では、その名の通り場を基本的実体だと考える。場の解釈を支持する根拠のひとつに、古典場と量子場の形式的な類似性がある (cf. Kuhlman 2010, 2023)。古典場 $\varphi(x, t)$ は時空間上の各点 (x, t) に対して場の量 φ を割り当てることで与えられる。このとき、割り当てられる場の量の数学的特徴に応じて、 $\varphi(x, t)$ はスカラー場 (温度など)、ベクトル場 (電磁場など)、テンソル場 (応力など) などを表す。他方、量子場 $\hat{\varphi}(x, t)$ は時空間上の各点 (x, t) に対する作用素値 (operator-valued) の場として与えられる。このように、量子場は古典場とは異なり、作用素 (演算子) で与えられるという重要な違いはあるが、どちらも時空間の各点に対して定義されるという点で、両者の間には (少なくともある程度の) 形式的類似性が存在する。よって、古典場の理論における基本的実体が場であることを (ごく自然に) 認めれば、古典場と量子場との形式的なアナロジーから、量子場の理論においても場を基本的実体として解釈する動機が生まれる。また、これとは別に、粒子解釈に対して指摘されるいくつかの困難から、間接的な形で場の解釈を支持するという動機も存在する (cf. Kuhlman 2010)。

しかし、粒子解釈のみならず、場の解釈にも問題が指摘されている (Baker 2009 など)

ど). とりわけ, 粒子解釈に対して (特に粒子の個数などの観点から) 障害を与えるユニタリ不等価なヒルベルト空間の表現の存在が, 標準的な場の解釈 (波動関数解釈と呼ばれるバージョン) に対しても継承されることで同様に問題が生じうるとされる.

こうした背景から, 粒子と場のどちらも基本的実体と考えず, それ以外の第三の何らかの存在者—たとえば出来事/事象 (event)・トロープ (trope)・構造 (structure) など—をより基本的な実体とする解釈も提唱されている (cf. Kuhlman 2010, 2023 など).

本発表では, 出来事/事象 (event) に注目した QFT の存在論の解釈について概観および検討を行う. 特に検討したいのが, Bartels (1999) によって提唱された, 「系 S が量子状態 Ψ にある」というタイプの event を QFT における基本的実体とする見解である. とりわけ重要なのが, ここで Bartels が挙げる event は, 時空間的な位置関係で特定される点状の事象 (point events) ではなく, Davidson 流の event, つまり, 「出来事はそれらが全く同じ原因と結果をもつとき, かつその時に限り同一である」 (Davidson 1980, 179) とする出来事存在論に基づく, 世界における因果関係内での位置づけから特定される event だということである. Bartels が Davidson 流の event に注目する動機は, Teller (1995) によって QFT の基本的実体の候補として提案された field quanta (場の量子) について, (1) 基底変換による不変性の欠如 (2) 同一性 (識別可能性) の欠如 (3) 時空間における局在化可能性の欠如 といった問題があることに主に由来する. Bartels は, field quanta の代わりに, 上記のようなタイプの event を基本的実体とすることで, こうした困難を解消できるとする.

Bartels のこうした提案は興味深いものだが, 他方で疑問点も生じうる. たとえば, (Davidson の出来事存在論それ自体の問題点はおくとしても) 主に日常的直観に基づく因果性 (およびそれに立脚した event) の概念を, そのまま QFT のような (日常的直観からも乖離した側面をもつであろう) 物理理論に導入しながら基本的実体とすることは適切だろうか? また, QFT において event 同士の同一性を特定することはどれほど重要なことなのだろうか? 本発表ではこうした問題について扱う予定である.

<参考文献>

- Baker, D. (2009). Against field interpretations of quantum field theory. *British Journal for the Philosophy of Science*, 60, 585-609.
- Bartels, A. (1999). Objects or events? Towards an ontology for quantum field theory. *Philosophy of Science*, 66, S170-S184.
- Bigaj, T. (2018). Are field quanta real objects? Some remarks on the ontology of quantum field theory, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 62, 145-157.
- Davidson, D. (1980) *Essays on Actions & Events*. Oxford: Clarendon Press, 163-180.
- Kuhlmann, M. (2010). *The ultimate constituents of the material world*. Frankfurt: Ontos Verlag.
- Kuhlmann, M. (2023). Quantum Field Theory, The Stanford Encyclopedia of Philosophy, in E. N. Zalta and U. Nodelman (ed.), < <https://plato.stanford.edu/archives/sum2023/entries/quantum-field-theory/>> 2024年5月13日アクセス.
- Teller, P. (1995). *An interpretive introduction to quantum field theory*. Princeton: Princeton University Press.