

トラップされた量子的な単粒子の同一性について —ブエノの議論の批判的検討—

今井 慶悟*

On the identity of single trapped quantum particles:
A critical examination of Bueno's argument

Keigo IMAI

§1 序論

1989年にノーベル物理学賞を受賞した実験物理学者ハンス・デーメルト (Hans Dehmelt, 1922-2017) は、陽電子を磁場の中に3か月間閉じ込め、それに「プリシラ」(Priscilla) と名付けて、その期間における陽電子の同一性¹ (identity) を主張した (Dehmelt 1990). 同様のトラッピング実験は、別の研究者によって、イオン (Schenkel et al. 1999) および原子 (Eigler and Schweizer 1990) などに対しても行われている。しかし、デーメルトのプリシラを含め、単一の量子的対象の同一性・個性性を認める立場に対しては、主に量子力学の存在論に関する理論的観点から批判的な議論が存在する (Krause 2011; Bueno 2018).

本稿の内容は、こうした背景を踏まえ、孤立してトラップされた量子的な単粒子が同一性・個性性をもちうるかという問題に関連するものである。ただし、本稿では、トラップされた単粒子の同一性の成否について直接回答を与えることはしない。こうした問題に答えるためには、本稿で扱う話題を超えて、より綿密な検討を行う必要があるためである。代わりに、本稿の目的は、デーメルトのように単粒子の同一性を認める立場に対する批判のうち、哲学者オタヴィオ・ブエノ (Otávio Bueno 2018) の議論を紹介するとともに、これを検討することで、量子的対象の存在論に関するより豊かで多角的な

* 京都大学文学研究科 博士後期課程 (科学哲学科学史専修) E-mail: imai.keigo7@gmail.com

¹ ここでは identity を同一性と訳したが、ここでいう identity は、ひとつの対象の個別的な自己同一性 (アイデンティティ) を指し、しばしば時間を通した意味合いも含む。本稿で同一性というときはこの意味で用いる。そこで、本稿では差し当たって同一性と個性性を表裏一体の概念として扱う。こうした扱いには微妙な問題があるかもしれないが、本稿では取り上げない。

考察を行うための足掛かりを与えることである。

本稿の構成は以下の通りである。まず、第 2 節で、本稿の議論の前提となる、トラッピング実験やそこでの量子的な単粒子の同一性などに関する背景について簡潔に確認する。続く第 3 節で、決定不全性から単粒子に関する实在論を批判するブエノの議論内容をみたうえで、こうした反实在論的な議論が、単粒子に関する同一性・個性性といった存在論を考えるうえで支障となりうることを確認する。そして、第 4 節で、理論（あるいは解釈）選択可能性の文脈相対化という本稿独自のアイデアにもとづき、ブエノの实在論批判を回避する余地があることを示す。最後に第 5 節で本稿の内容をまとめる。

§2 トラッピング実験と単粒子の存在論的身分

本節では、まず、研究の前提に関連する基礎的・補足的な事項を簡潔に確認する²。トラッピング実験は、主に荷電粒子を電場もしくは磁場中に閉じ込めることで、単一の粒子からなる量子系を実現する技法である。デーメルトは 1950 年代にペニング・トラップと呼ばれるイオントラップ法を開発し、電子とイオンの分離を実現した。また、1970 年代には彼は初めてトラップ内の単一電子や単一イオンの観察に成功するなど、華々しい成果を挙げた。こうした功績により、彼は 1989 年に、同じく（現在パウル・トラップと呼ばれる）イオントラップ法の開発者である実験物理学者ヴォルフガング・パウル（Wolfgang Paul, 1913-1993）とともにノーベル物理学賞を受賞した。

こうした実験の主な目的のひとつは、電子の磁気モーメント（もしくはそれと角運動量の比を適切な単位で測った g 因子と呼ばれる無次元量）の値を高精度で測定することである。相対論的量子力学におけるディラック方程式の予測からは正確に $g = 2$ となるが、実験的測定からは 2 からわずかな差（約 0.1 % の偏差）があることが 1940 年代に発見された。この差はその後、量子電磁力学（QED）から説明された。こうした事情から、磁気モーメント値の精密測定は、原子の超微細構造の解明や、QED・一般相対論などの基礎物理学における仮説のテストなどに寄与しうる。また、同実験は、超精密原子時計や宇宙通信、大陸移動測定などの実現にもかかわる幅広い応用可能性をもつ。これらの背景により、トラッピング実験は現代物理学において重要な技法となっている。

他方で、トラッピング実験は、単一の量子的対象についての同一性・個性性の成否と

² 本節の内容のうちトラッピング実験の背景に関連する部分は、Dehmelt (1990)、Heppeneheimer (1994)、およびノーベル財団ホームページのプレスリリース (NobelPrize.org 2023) <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1989/press-release/> に主に依拠した。

いった哲学的問題を考えるうえで示唆的である。ただし、こうした哲学的問題は、同実験それ自体の背景・目的とはある程度独立して取り扱うことが可能である。こうした事情から、本稿では、トラッピング実験の技術的詳細や背景についてはこれ以上深くは立ち入らない。

デーメルトは、こうした技法によって実験的にトラップされた粒子（たとえば陽電子）の存在論的身分について、次のように述べる。

この期間中 [トラップされていた 3 か月間] のプリシラの同一性について疑わしいところはほとんど存在しえない。というのも、超真空状態では彼女 [プリシラ] が、通りすがりの対となる反物質と場所を交換する可能性は決してないためである。こうした素粒子の明確に定義された (well-defined) 同一性は根本的に新しいものであり、ペットに人の名前が与えられるのと同様に、名前を与えられることで認識されるに値するものである。³ (Dehmelt 1990, p. 539 [] 内は引用者による。)

デーメルトは上記箇所で、トラップされた単一の陽電子であるプリシラの同一性を認める。しかし、こうした彼の同一性の主張こそ、一部の哲学者が批判するところである。

こうした批判の背景にある前提のひとつが、(同種粒子の) 不可識別性である。多粒子系の量子力学において、同じ種類の粒子（電子同士、光子同士など）は、内的属性から原理的に区別することができない。これは同種粒子の不可識別性と呼ばれ、このことから、しばしば、量子的対象は個性性を欠くと考えられてきた⁴。不可識別性自体は理論的な仮定だが、同種粒子が互いに区別できないと仮定したとき、それらを入れ替えたとしても系の状態が不変であり（置換不変性）、このことが経験事実と整合的であることから、不可識別性（および置換不変性）は量子力学の基本原理として確立されている（今井 2022）。

ただし、重要なのは、不可識別性（置換不変性）は多粒子系の量子力学ではじめて問題となる事柄だという点である。他方、今回問題にしているようなトラッピング実験は単

³ “There can be little doubt about the identity of Priscilla during this period, since in ultrahigh vacuum she never had a chance to trade places with a passing antimatter twin. The well-defined identity of this elementary particles is something fundamentally new, which deserves to be recognized by being given a name, as pets are give names of persons.” (Dehmelt 1990, p. 539)

⁴ ただし、2000 年以降、同種粒子も「弱く識別可能」(weakly discernible) であるとして、部分的にその個性性を認めるアプローチも提唱されてきたことから、この点については諸見解がある (Saunders 2006 ; Muller and Saunders 2008 ; Muller and Seevinck 2009) 。

一粒子の量子系を扱うものである。そのため、単粒子の実験的文脈に関しては、一見、その同一性・個性性は問題なく維持されるようにも見える (Bueno 2018, pp. 243-244)。しかし他方で、すでに一粒子系において、置換不変性とは独立に不確定性が成立するため、(少なくとも標準解釈では) 量子の対象は時空間的に連続的な軌跡をもたない。そのため、量子の対象の (特に時間を通した) 同一性・個性性はさほど自明ともいえず、その存在論の背後にはより微妙な問題がある (今井 2022)。

§3 ブエノの議論：決定不全性による単粒子の実在論批判

すでに述べたように、トラップされた単粒子の同一性を認めるデーメルトのような立場には批判が存在する (Krause 2011; Bueno 2018)。本節では、こうした批判のうち、ブエノ (Bueno 2018) の議論内容をみる。

ブエノは、陽電子のペニング・トラップ (Dehmelt 1990)、(いくつかの種類の) イオントラッピング (Schenkel et al. 1999)、そして走査型トンネル顕微鏡による Xe 原子の配置 (positioning) 実験 (Eigler and Schweizer 1990) という 3 つの実験を題材とする。陽電子の実験とは異なり、残りの 2 実験は、扱う対象の大きさが原子レベルのナノスケール ($10^{-7} \sim 10^{-9} \text{m}$) であり、(陽電子などの亜原子粒子よりも) 相対的に大きく安定である点が特徴となる (Bueno 2018, p. 240)。こうした 3 実験においては単粒子を直接的に捕捉・分離・操作していることから、一見すると、これらは量子の対象に関する経験主義的 (反実在論的) な立場に対して困難を与えるため、実在論が適切な選択肢となる事例のように思われる。しかし、このような先端的な実験物理学の事例においてさえ、依然として経験主義的な応答が可能であるとブエノは主張する。このように、ブエノの議論は、本稿での争点である、トラップされた単粒子の同一性の問題に密接に関連する。ただし、彼の議論自体は、量子の対象に関して実在論か反実在論 (経験主義) のどちらを支持することが妥当であるか、という科学的実在論論争の土俵で展開されていることに注意を要する。本稿での主たる関心はあくまでも単一の量子の対象の同一性・個性性についてであり、量子の対象に関して実在論・反実在論のどちらをとるべきか、という問題ではないが、両者の議論には密接な関係がある⁵。なぜなら

⁵ なお、ここでいう実在論/反実在論は、一般科学哲学における科学的実在論論争の文脈での用語法を念頭においており、量子力学の哲学における実在論/反実在論の定式化とは必ずしも一致しない可能性があることに注意されたい。量子力学の哲学における実在論とは、(ひとつの定式化では) 任意の物理状態においてすべての物理量の値が観測前に確定している、とする立場である。したがって、(このように実在論を定式化したときは) これを拒否する立場が量子力学の哲学における反実在論となる。

ば、もし単一の量子的対象に関して（科学的实在論論争一般の意味での）实在論を支持できないのであれば、（少なくとも通常の枠組みでは）そもそも単粒子が同一性・個性をもつかどうかを問題にすること自体が困難となる可能性があるためである⁶。

ブエノの議論の展開はおおよそ次のようにまとめられる。（I）彼はまず、上記の3実験の事例においては、量子力学の解釈自体の決定不全から量子的対象に関する实在論を批判するタイプの通常の決定不全論法は、3実験の事例との関連では不適であるとする。（II）そのうえで、ブエノは、3実験の共通要素として研究対象の追跡（tracking）を試みている点に注目し、追跡の概念を反事実的追跡（counterfactual tracking）と時空間的追跡（spatiotemporal tracking）に分析して両者の内実や関係を整理することで、単粒子の追跡可能性の成否を考える材料を与える。（III）さらに、（I）の論法を3実験の事例にあてはめつつ述べたおした「刷新された決定不全論法」（the underdetermination argument revamped：以下、UDRとする）を提示し、実験における単粒子の实在論をあらためて批判する。ただし、本節では、ブエノの实在論批判に議論の焦点を絞るため、（I）、（II）の論点は割愛し、（III）についてみる。ここで、証拠による理論の決定不全性（underdetermination of theory by evidence）とは、大まかには、理論が経験事実、つまり実験や観察による証拠・データだけから一意に決まらない、とするテーゼである（戸田山 2015, p. 149）。ただし、以下では量子力学の解釈も問題となることから、理論だけでなく解釈が経験事実から一意に決まらないこともこの決定不全性に含める。こうした決定不全性から反实在論的主張を導く議論は、決定不全論法（underdetermination argument）と呼ばれる。

（UDR）は以下のように提示される。

刷新された決定不全論法（UDR）：（Bueno 2018, pp. 250-251）

- i 実験から得られた粒子の質量や電荷のデータから、それが（ほかの種類の粒子で

⁶ つまり、単一の量子的対象について（科学的实在論論争一般の意味での）实在論を支持することが、単粒子の同一性・個性を問題にするための前提だとはここでは想定している。ただし、こうした前提をとらずに、単粒子の同一性・個性を問題にできるとする立場もありうる。たとえば、ある理論やモデルを単に採用することと存在論的コミットメントをもつことの区別を導入する立場では、単粒子に対して存在論的にコミットせずに、単粒子が個性をもつことを認める理論やモデルを構成することが可能だろう。ファン・フラースェンはある理論に没入すること（immersion）と、その理論が真だと認めることを区別するが（van Fraassen 1980, pp. 80-83）、こうした態度はこの立場に通じるかもしれない。ただし、こうした立場を一種の反实在論として整合的に維持できるかどうか自体、議論を要する問題である。本稿ではこうした立場の可能性については脇に置き、単粒子について实在論を支持することが、単粒子の同一性・個性を議論する前提だとする。

はなく)陽電子(あるいは特定のイオン)だというためには、実験結果の解釈を必要とする。

- ii こうした実験結果の解釈には、量子力学が必要となる。
- iii ただし、(ii)で粒子の種類を量子力学から同定しても、それらの存在論的な本質は依然として決まらない。それを決めるためには、粒子は個性をもつか(個体アプローチ individual approach)、あるいは粒子は非個体(non-individual)か(非個体アプローチ non-individual approach)、などの量子力学の解釈をも決める必要がある⁷。
- iv しかし、経験的に等価なこれらの解釈のどれを選択すべきかは、実験結果だけでは決まらない(解釈に関する決定不全)。
- v したがって、特定の解釈を優先的に支持する経験的理由がない以上、粒子の存在論に関して実在論を採用することは不適である。

このように、粒子の種類にくわえて、その存在論にかかわる本質を明確にする上では、量子力学の解釈問題にまで踏み込んだ実験結果の解釈の必要があるとされる⁸。だが、それらの諸解釈を実験結果だけから一意に選択できないことから、量子的対象の本質にかかわる特定の存在論にコミットできない以上、実在論を確立できないというのが、(UDR)の要点である。もし(UDR)による反実在論を拒否できないとすると、先にも述べたように、単粒子の同一性・個性を問題とする余地が閉ざされう。

もちろん、一般に、量子力学の解釈に関する議論では、経験事実以外の要素から、特定

⁷ 量子的対象の存在論に関して、個体アプローチ(individual approach)とは、量子的対象を個体(individual)、つまり(ひとつの定式化では)時空間の中に数的同一性をもって単一のものとして存在し、他の状況でも同一のものとして名指して特定できるような実体だと考えるようなアプローチである。これに対して非個体アプローチ(non-individual approach)とは、量子的対象を非個体(non-individual)、つまり数的同一性をもたず、ラベルや名前を用いて再同定できないようなものとするアプローチである。個体アプローチは量子的対象に関する通説(the Received View)では批判されてきたが、注4でも述べたような近年の展開も含めて依然として支持されており、個体・非個体の双方のアプローチの存在から、量子的対象の存在論に関して決定不全性が生じている(French and Bigaj 2024)。非個体アプローチでは、実験装置にトラップされた単粒子は、特定の実験の配置のもとで同じ実験結果を生み出すような、識別できない対象の同値類の元だと解される(Bueno 2018 p. 251)。(well-defined な同一性条件を一般にはもたないはずの)非個体としての単粒子が実験の文脈で well-defined な同一性条件をもつようにみえるのは、「互いに識別できない」という同値関係が単粒子について成立するためである。非個体アプローチでは、こうした同一性条件(同値関係)はあくまで特定の実験状況のもとでのみ成立するものであり、その状況の外部では同一性は前提とされない。

⁸ なお、ここでいわれる量子力学の「解釈」は多義的であり、ここでは量子的対象の存在論に関する解釈(個体アプローチ/非個体アプローチなど)を例に挙げたが、標準解釈や多世界解釈、ボームの理論、様相解釈などの諸解釈も依然として念頭におかれているだろう。

の解釈を優先的に支持することが行われる。しかし、そのように非経験的要素にもとづく特定の解釈選択が許されたとしても、ここではトラッピング実験の文脈における単粒子の存在論が問題となる以上、同実験の文脈に関連させて解釈選択が可能だという論拠を示さない限り、(UDR)における反实在論への対抗はできないだろう。次節では、こうした問題点にも対処する仕方、(UDR)に抗する解釈選択の可能性を与える。

§4 批判的検討：理論（解釈）選択可能性を文脈相対化する

前節でブエノの議論内容を確認した。彼の議論について検討すべき論点の候補としては、前節の内容に直接関連する部分だけでも、たとえば、ブエノが提示する決定不全性概念が、量子の対象に関する反实在論を帰結するのに十分限定されたものかといった点⁹や、構成的経験主義を念頭におきながら決定不全論法に訴えることの問題点¹⁰などが挙げられるだろう。ただし、本稿ではこれらの点については扱わず、以下の論点にしばって検討したい。

ブエノが(UDR)で指摘するような、実験結果の解釈に際して原理的に絡むとされる量子力学の基礎の文脈における解釈の決定不全性は、単粒子のトラッピング実験の文脈においても依然として特定の解釈選択を阻むと考えるべきか？

本節では上記の問いに否定的に答えることで、量子力学の基礎の文脈で解釈について決定不全が生じていたとしても、トラッピング実験の文脈においても解釈選択が不可

⁹ この論点は、決定不全性から反实在論を導くことそれ自体への批判に関係する。決定不全性概念の内実は多義的であり、そこから反实在論を常に導けるかどうかは必ずしも明らかではない。実際、考えられる決定不全性概念のうち、そこから反实在論を帰結するものは一部の限定されたタイプのみであるとの指摘がなされている（戸田山 2015, pp. 157-164; Laudan 1990 など）。そこで、ブエノが(UDR)で提示する決定不全性概念が、果たして、量子の対象に関する反实在論を帰結する程度に十分に限定され明確化されたタイプのものであるかどうかが問題となる。

¹⁰ ブエノはファン・フラセンの構成的経験主義を念頭におきながら、(UDR)を提示しているようにみえる（Bueno 2018, p. 241 など）。だが、構成的経験主義者が決定不全論法に訴えることについては問題点が指摘されている（Rosen 1994; van Dyke 2007）。たとえばファン・ダイクは次のように指摘する。彼によれば、構成的経験主義者は、認識論に関する主意主義者（voluntarist）であるべきである（van Dyke 2007, pp. 19-22; Monton 2021, § 2.1）。認識論に関する主意主義者とは、「合理性とは不合理性の抑制されたものにすぎない（rationality is only bridled irrationality）」（van Fraassen 1989, p. 172）というテーゼで端的に表されるように、整合性（coherence）をもつ振舞いである限り、合理性の範囲を超え出ることにはないと考える立場である。それゆえ、彼らにとって、整合性にさえ反しない限り、得られた証拠を超えた範囲での理論の正しさを信じることも、合理的でありうる。だが、これは、証拠による理論の決定不全性概念に反する。よって、構成的経験主義者が決定不全論法を用いることは問題となりうる。

能とは限らない、と論じる。ここでの論点の本質となるアイデアを一言で表せば、「ある理論（あるいは解釈）について証拠による決定不全性がある場合に、証拠以外の非経験的な基準を援用することでその理論や解釈を一意に選択可能かどうかは、そこで考察対象となる文脈と相対的に判断すべきである」ということになる。

ブエノは (UDR) を提示する箇所ですべてのように述べている。

だが、問題となる対象が、ほかの対象ではなく、陽電子（あるいはイオン）だと決定することは、量子力学 (quantum mechanics) に導かれるということである。¹¹
(Bueno 2018, p. 251)

彼がここでいいたいのは、すでに前節でも確認したように、単粒子のトラッピング実験の結果の解釈を行うためには、量子力学の理論に訴える必要があるということである。しかし、ここで問題となる実験結果の解釈とより密接に関係するのは、量子力学の理論というよりむしろ、物性物理学・素粒子物理学などといった、物理学各論における理論であろう。もちろん、量子力学がこうした物理学各論の立脚する理論的基盤である以上、量子力学の理論（の解釈）も根底のレベルにおいては決して無関係ではない。しかし、量子力学の解釈のような文脈で、個体アプローチ/非個体アプローチ（注 7 参照）などといった解釈間の決定不全性が仮に問題となるにしても、トラッピング実験の結果の解釈のように、量子力学とは（独立ではないにしても）離れた文脈においてもその決定不全性から同様に解釈選択ができないままでは限らない。物性物理学などをより直接的な理論的基盤とするトラッピング実験と、その根底にある量子力学のような理論では、考察している（物理理論の中での位置づけとしての）文脈が大きく異なるためである。

では、なぜ考察対象となる文脈が異なると、解釈選択ができないままでは限らないのか？ それは、たとえばトラッピング実験のような文脈では、量子力学の解釈に関する決定不全が問題となる文脈にはなかったような別の非経験的要素（特に、理論選択の合理的基準）が重要な位置を占める可能性があるためである。ここでいう合理的基準の例としては、単純性、実り豊かさ、他の理論との整合性、統合性、新奇な予言を出せるかどうか、応用可能性、理解しやすさなどが挙げられる（戸田山 2015, p. 159）。トラッピング実験の文脈においては、類似のタイプの実験結果の整合的・統一的な理解可能性や、技術的応用可能性などといった観点での基準が重視される。こうした場合、たとえば、

¹¹ "But to identify the object in question as a positron (or an ion) rather than some other object, is to be guided by quantum mechanics." (Bueno 2018, p. 251)

あたかも通常のマクロな個体と似たように微粒子の捕捉・分離・操作ができるため、単粒子を個体として解釈することが直観と整合的であったり、技術的応用にもつながる示唆が認められたりするなどという観点から、量子的対象の存在論に関する解釈（個体アプローチ/非個体アプローチなど）のうち、個体アプローチをより支持すべきである、という立場がありうる。（もっとも、これとは反対に、別の観点到に注目して、非個体アプローチをより支持すべきという立場の可能性も否定はできない。）いずれにせよ、このとき、実験の文脈ではもはや、特定の解釈を一意に選択できなくなるわけではない。

このように、重要な点は、たとえ量子力学の理論の解釈が根底にかかわるにしても、そこでの証拠による決定不全性のために、トラッピング実験の文脈でもそのまま解釈選択の余地が閉ざされるとは限らない、ということである。考察対象となる文脈次第で、その文脈特有の状況から重視すべき非経験的要素も変容しうる。それに応じて、（ここでの例では）量子力学の基礎に関する文脈では解釈の決定不全性が生じたとしても、別の文脈では特定の解釈を選択する新たな基準が得られる可能性を考慮すべきである。したがって、こうした文脈の違いによる理論・解釈の選択可能性の変化を考慮せず、量子力学の基礎の文脈で生じる決定不全性のために、トラッピング実験の文脈でも同様に解釈選択が阻害されるとする想定に立脚するブエノの議論は適切ではない。

§5 結論および今後の展望

本稿では、トラップされた単粒子が同一性・個性をもつとする立場に対する決定不全性からの批判であるブエノの議論を確認した。そのうえで、理論・解釈の選択可能性を、考察対象となる文脈に相対化させるというアイデアを適用することで、量子力学の基礎における文脈での解釈の決定不全性から、トラッピング実験の文脈でも同様に特定の解釈選択が不可能となるとするブエノの暗黙の想定が必ずしも適切でないことを示した。それゆえ、トラッピング実験の文脈では、そこで新たに得られる非経験的要素に応じて、単粒子の存在論に関する特定の解釈にコミットする余地が残される。これにより、特定の状況・文脈の下では、トラップされた量子的な単粒子の存在論について、個体アプローチや非個体アプローチを認める可能性が開かれる。もっとも、理論（解釈）選択可能性を文脈相対化するというこうしたアイデアは独創的だと思われるが、特定の文脈をどのように特徴づけたり分節化したりするかについてはこれまでの議論からは必ずしも明らかではない。この点については稿を改めて検討することとしたい。

なお、本稿で扱ったトラッピング実験の事例とは独立した議論ではあるが、理論的・

形而上学的な観点にもとづく個性・同一性概念の定式化とは異なり、科学の実験的实践にもとづく新たな個性概念が近年提唱されている (Chen 2016, 2018) . こうした新奇な個性概念の基準が、トラッピング実験における単粒子の事例にも適用可能かどうかをみたうえで、あらためて関連する既存の議論との関係を再検討していくことが、今後のひとつの展望となるだろう¹².

参考文献

- Bueno, O. 2018. “Can quantum objects be tracked?”, in O. Bueno, R. L. Chen, and M. B. Fagan (eds.), *Individuation, Process, and Scientific Practices*, 239-258: Oxford University Press.
- Chen, R. L. 2016. “Experimental realization of individuality”, in A. Guay and T. Pradeu (eds.), *Individuals Across the Sciences*, 348-370: Oxford University Press.
- . 2018. “Experimental individuation: creation and presentation”, in O. Bueno, R.L. Chen, and M. B. Fagan (eds.), *Individuation, Process, and Scientific Practices*, 192-213: Oxford University Press.
- Dehmelt, H. 1990. “Experiments on the structure of an individual elementary particle”, *Science*, 247(4942): 539-545.
- Eigler, D. M., and Schweizer, E. K. 1990. “Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope”, *Nature*, 344(6266): 524-526.
- French, S. and Bigaj, T. 2024. “Identity and individuality in quantum theory”, in E. N. Zalta and U. Nodelman (eds.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Spring 2024 edition, Metaphysics Research Lab, Stanford University. <https://plato.stanford.edu/archives/spr2024/entries/qt-idind/> 2024 年 7 月 3 日アクセス.
- Heppenheimer, T. A. 1994. “A positron named priscilla: trapping and manipulating atoms”, in M. Bartusiak et al. (eds.), *A Positron Named Priscilla: Trapping and*

¹² 本稿の内容は、2023 年 7 月にハノイ (ベトナム) の Vin University で行われた国際会議 APPSA (The 10th Biennial Meeting of the Asia-Pacific Philosophy of Science Association 2023) において、著者が第一日 (2023/07/21) に行った口頭発表内容の一部に由来します。本稿を作成するにあたり、2023 年 7 月に APPSA に参加された方々や、伊勢田哲治氏 (京都大学)、および本稿の内容を審査された匿名の研究者から有益な助言をいただきました。ここに記して深謝いたします。また、本研究は、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP21110 の支援を受けたものです。

- Manipulating Atoms*, 34-59: Washington, D.C., National Academy Press. <https://nap.nationalacademies.org/read/2110/chapter/4> 2023 年 10 月 31 日アクセス.
- Krause, D. 2011. “Is Priscilla, the trapped positron, an individual? Quantum physics, the use of names, and individuation”, *Arbor*, 187(747): 61-66.
- Laudan, L. 1990, “Demystifying underdetermination”, in *Scientific Theories*, C. W. Savage, (ed.), (Series: Minnesota Studies in the Philosophy of Science, vol. 14), 267–297: Minneapolis. University of Minnesota Press.
- Monton, B., and Mohler, C. 2021. “Constructive empiricism”, in E. N. Zalta (ed.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Summer 2021 edition, Metaphysics Research Lab, Stanford University. <https://plato.stanford.edu/archives/sum2021/entries/constructive-empiricism/> 2023 年 10 月 31 日アクセス.
- Muller, F., and Saunders, S. 2008. “Discerning fermions”, *British Journal for the Philosophy of Science*, 59: 499–548.
- Muller, F. and Seevinck, M. 2009. “Discerning elementary particles”, *Philosophy of Science*, 76: 179–200.
- NobelPrize.org. Press release. Nobel Prize Outreach AB 2023. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1989/press-release/> 2023 年 10 月 31 日アクセス.
- Rosen, G. 1994. “What is constructive empiricism?”, *Philosophical Studies*, 74(2): 143–178.
- Saunders, S. 2006. “Are quantum particles objects?”, *Analysis*, 66: 52–63.
- Schenkel, T., Hamza, A. V., Barnes, A. V., and Schneider, D. H. 1999. “Interaction of slow, very highly charged ions with surfaces”, *Progress in Surface Science*, 61(2-4): 23-84.
- Van Dyck, M. 2007. “Constructive empiricism and the argument from underdetermination”, in B. Monton (ed.), 2007. *Images of Empiricism: Essays on Science and Stances, with a Reply from Bas C. van Fraassen*, 11–31: Oxford University Press.
- van Fraassen, B. C. 1980. *The Scientific Image*, Oxford: Clarendon Press.
- . 1989. *Laws and Symmetry*, New York: Oxford University Press.
- 今井 慶悟. 2022. 「量子力学における粒子の識別可能性 一粒子の通時的同一性に注目して」, 京都大学大学院文学研究科修士論文. (2022 年 1 月 6 日提出)

戸田山 和久. 2015. 『科学の实在論を擁護する』, 名古屋大学出版会.