一般論文

量子的対象の存在論の決定手続きをモデル化する

―個別量子系における単粒子の同一性・個体性に注目して―

今井 慶悟*

Modeling a Procedure for Providing the Ontology of Quantum Objects: Focussing on the Identity and Individuality of Single Particles in Individual Quantum Systems

Keigo IMAI

abstract

Since the 2000s, studies on the ontology of quantum objects have developed relatively actively. However, few studies have thoroughly addressed not only theoretical and metaphysical perspectives but also experimental viewpoints within specific cases. This paper aims to clarify the ontology of quantum objects, focusing on the issues of identity and individuality. Specifically, it constructs a new model that represents a procedure for providing the ontology of quantum objects, with particular attention to single-particle experiments in individual quantum systems. The proposed model is developed by complementarily organizing, abstracting, and integrating the discussions of Bueno (2018), Imai (2024), and Chen (2016, 2018, 2023), which examine the ontology of microscopic objects from theoretical and/or experimental perspectives. Although this model cannot independently resolve the issues of identity and individuality for quantum objects in specific cases, it is a valuable tool for exploring the ontology of quantum objects from a broader framework.

§1 はじめに

量子的対象の同一性・個体性を中心とした存在論に関する研究は，特に 2000 年代以降，議論の新たな展開を迎えたこともあり，近年比較的盛んになされている（Saunders 2003, 2006 ; Hawley 2006, 2009 ; Muller and Saunders 2008 ; Dieks and Versteegh 2008 ; Muller and Seevinck 2009 ; Dieks and Lubberdink 2011, 2022 ; Bigaj 2020, 2022 ; Muller

* 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
E-mail: imai.keigo7@gmail.com

and Leegwater 2022；今井 2022；大畑 2024 など多数）．ただし，もっぱら理論的・形而上学的観点にもとづくこうした議論に対して，具体的な実験的状況をも想定しながら，特に単一の量子的（ミクロ的）対象の存在論について考察した研究は，現状，あまり多いとはいいがたい．しかし，数は少ないものの，科学的実在論論争（以下，適宜，実在論論争とする）絡みの議論も含めた近年のいくつかの先行研究（Chen 2016, 2018, 2023；Bueno 2018；今井 2024 など）から，こうした特定のケースにおけるミクロ的対象の同一性・個体性の問題を扱うには，そのケース特有の実験的・理論的もしくは形而上学的な背景をおさながら対象の存在論を考える必要があり，その回答にいたるまでのプロセスは決して一枚岩ではないことが示唆される．そこで，本稿では，量子的（ミクロ的）対象の同一性・個体性を中心とした存在論の解明を目的として，特に単粒子系の実験的ケースにも注目しながら，量子的対象の存在論を与える手続きのモデル構築を行う[1]．

本稿の構成は次の通りである．まず，§2 では，本稿の研究背景や問題設定に関する導入を行う．続く §3 では，決定不全性から量子的対象の存在論へのコミットメントを拒否する Bueno（2018）の議論を概観するとともに，ブエノに対する今井（2024）の反論・提案を確認しながら，その課題を明らかにする．§4 では，前節の内容をうけて，チェンによる実験的実践に注目した個体存在論（Chen 2016，2018）および実在論的議論（Chen 2023）を紹介する．そして，§5 では，§3 および §4 でみた議論をそれぞれ整理・モデル化したうえで，さらにこれら両モデルを相互補完的に統合することで，量子的対象の存在論を与えるための手続きに関する図式的なモデルを構築する．また，Xe 原子の配置実験（Eigler and Schweizer 1990）を適用事例としながら，得られたモデルの評価・検討を行う．最後に，§6 で本稿の内容をまとめる．

§2　研究背景および問題設定

研究の背景と問題設定について，量子的対象の同一性・個体性がどのように問題とされてきたのか，なぜ個別量子系における実験状況に注目するのか，どういう問題設定を念頭において議論するか，といった点を中心に，もう少し補足を与えておこう．

[1] なお，本稿における「量子的」と「ミクロ的」という語については，議論の脈絡に応じてある程度使い分けられるが，厳密には区別せず，基本的には交換可能なものとする．本稿は量子的対象の存在論を主題とするため，「量子的」の語を用いる一方で，本稿で扱う先行研究はむしろ観察不可能な理論的対象に関する実在論/反実在論の枠組み（科学的実在論論争）でしばしば展開されているために，その関連から「ミクロ的」という語も用いる．

本稿の主たる関心は量子的対象の存在論を，実験的側面にも注目しながら明らかにすることにあるが，本稿でとるアプローチは，量子力学の哲学における主要な先行研究の展開からすれば，やや独特かつ異質なものである．量子力学の哲学では，量子的対象の同一性・個体性に関して，概ね次のような経緯で研究されてきた（今井 2022 ただし一部改変；cf. French and Bigaj 2024）．

まず，量子的対象の個体性をめぐる議論をごく簡潔に確認しておこう．個体性（individuality）とは，素朴には，対象が個体（individual）として成立することであり，個体がもつべき性質としては，統一性・可算性・識別可能性・時間的持続などといった特徴づけが考えられる（§ 4.1 で提示した，Chen（2016）による個体の形而上学的・理論的基準も参照のこと）．ただし，とりわけ，量子的対象の個体性をめぐる議論においては，（特に識別可能性に関連するが）**不可識別者同一原理（PII：Principle of the Identity of Indiscernibles）**を量子的対象が満たすかどうかが問題とされてきた．PII は，**「どんな二つの個体についても, 一方がある性質をもつのであれば, 他方も必ずその性質をもつということが (ある範囲での) 任意の性質について成り立つのならば, 両者は数的に同一である」**という原理である（今井 2022）[2]．PII の成否を考えるうえで，ここでいう性質量化（式 1 中の F）の中にどの範囲のものまで認めるかが重要となる．

本稿では，量子的対象になんらかの意味で個体性を認める立場を**個体説**としよう．他方で，量子的対象が個体性をもたないとする見解を，**非個体（non-individual）説**と呼ぶことにしよう．非個体とは，たとえばクラウゼの用法では，同種の集団の要素として加わることはできるものの，数的同一性をもたず，ラベルや名前で再同定できないような実体をさす（Krause 2011, pp. 61-62）．非個体説は，2000 年代までは主流であった（Teller 1983；Redhead and Teller 1991, 1992；Dieks and Versteegh 2008；Krause 2011；Krause and Arenhart 2020 など）ことから，これは先行研究でしばしば**標準的見解（received view）**とも呼ばれる．

量子的対象の個体性が疑問視され，非個体説が主流とされてきた背景には，まず，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）が, 内的属性

[2] PII は論理式では次のように表される．

$$\forall x \forall y \forall F((Fx \leftrightarrow Fy) \rightarrow (x = y)) \tag{1}$$

ただし， x, y は適当な個体, F は何らかの性質を表す述語である．式 1 の対偶を自然言語で表せば，「どんな二つの個体についても, それらが数的に異なるのであれば, それらは少なくとも一つの性質において異なる」となる．ただし，式 1 の性質量化 F の中に，ある種の数的同一性や数的差異性に関する非質的性質まで含めてしまうと，式 1 はトリヴィアルに真となり，PII の成否を論じる意義が失われかねない．したがって，本稿では，式 1 の性質量化の範囲から非質的性質を除外することにする．

（電荷・質量・スピンなど，系の状態に依存しない属性）から原理的に区別できず（同種粒子の不可識別性），それゆえ，（少なくとも一部のバージョンの）PII を満たさないと考えられたことにある．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）．他方で，実際，以下にみるように，PII の性質量化の範囲を内的属性や外的属性に限定した場合，量子的対象は PII を満たさない．

いま，２つの同種粒子（たとえば電子）が存在するとしよう．それらは，たとえば経験的に粒子の個数を確定できることなどから数的に異なると考えるのであれば，不可識別性により，電荷・質量・スピンなどといった内的属性では識別できない[3]．よって，量子的対象について，PII（1）（の対偶）における F を内的属性に限るとき，PII は成立しない．

内的属性から同種粒子を識別できなくとも，時空間的な位置や軌跡などの外的属性からであれば識別できると思うかもしれない．しかし，それも困難である．なぜならば，量子的対象については，不可識別性とは独立に不確定性が成立する，つまり，（少なくとも標準解釈では） 粒子の時空間的な位置と運動量を同時に確定させることは一般にはできないため，量子的対象は時空間的に確定した連続的な軌跡をもてないからである．

このように，内的属性からも外的属性からも量子的対象が識別できないのであれば，個体説の出る幕はないのだろうか．そうとも限らない．個体説の立場は大きく二つに分けられる．

ひとつは，粒子同士の**「弱い識別可能性（weak discernibility）」**に訴えるものである．非個体説で同種粒子が内的属性からも外的属性からも識別できず，PII を満たさないと考えられたのに対し，とりわけ 2000 年代以降，同種粒子も「弱く識別可能」

[3] ただし，同種粒子の個数を経験的に確定できることから，それらが数的に異なると考える見解には異論がありうる．たとえば大畑（2024）は，非個体説（標準的見解）の見解を，同種粒子が数的差異性をもつことを拒否する立場だとして整理する（大畑 2024, p. 98）．大畑は，『この見解 [標準的見解] にしたがえば，量子的対象はそもそも「つぶ」として数えられる対象ではないのだから，〔PII〕の適用範囲から外れる．そうした対象を強引に「二つ」とみなしたとしても，それらの間に〔PII〕は成り立たない』（大畑 2024, p. 97）と述べ，標準的見解（非個体説）の根幹にあるのは，量子系の性質を全体論的に説明する態度だとする（大畑 2024, p. 98）．このように，論者により諸立場の整理・定式化の方法には違いがありうるが，本稿の以後の目的（単粒子に関する存在論の決定手続きのモデリング）からすれば，この論点はさしあたり深く立ち入る必要はない．

（weakly discernible）とする見解が現れた．これは対称的かつ非反射的な関係的性質を性質量化の範囲に含めることで，同種粒子の識別が部分的には可能だとするアプローチである（Saunders 2003, 2006；Muller and Saunders 2008；Muller and Seevinck 2009）[4]．これ以後，こうした議論の妥当性を含め，量子的対象の同一性・個体性をめぐる存在論的研究は，近年比較的活発に展開されている[5]．

個体説のもう一つの様式は，**「超越的個体性（transcendent individuality）」**に訴えるものである（French and Redhead 1988 など）．つまり，「あるものの個体性は，それがもつあらゆる質的性質（qualitative properties）を超えるような特徴である」（Ladyman et al. 2007, p. 134）と考え，こうしたなんらかの形而上学的な特徴から，粒子が個体性をもつとする見解である．超越的個体性は，ある個体をまさしくその個体たらしめるような，単なる質的性質に還元できない形而上学的概念である．この見解では，粒子は，いかなる内的属性，外的属性，関係的属性などによっても識別はされず，まさにこうした超越的個体性によって識別されることになる．超越的個体性には，たとえば，ロックの実体の基体（substantial substratum）や，裸の個物（bare particular），ドゥンス・スコトゥスのこのもの性（haecceity），アダムズ（Adams 1979）の原始的これ性

[4] 弱い識別可能性による個体説の擁護の考え方は，Saunders（2003, 2006）がまず与えたフェルミ粒子のケースをもとに，今井（2022）にならってごく簡潔に述べると以下のようになる．いま，具体例として, 次のようなスピン 1/2 のフェルミ粒子対（典型的には電子対）の一重項状態（系の全スピンが 0 の状態） $|\Psi\rangle$ を考える（ただし空間部分は省略し，スピン部分だけ表す）．

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|z{+}\rangle_1\,|z{-}\rangle_2 - |z{-}\rangle_1\,|z{+}\rangle_2\right) \tag{2}$$

式 2 は，直観的には，$|\Psi\rangle$ が，「二つの電子 (フェルミ粒子) 対 1,2 があって，それらの z 成分のスピンについて，粒子 1 が +（アップスピン），粒子 2 が -（ダウンスピン）である状態と，粒子 1 が -，粒子 2 が + である状態が重ねあわされている（各状態が観測される確率は 1/2）」ような量子もつれ状態であることを表す．ここで, いま二項関係 R を, $R(x, y)$ = “x は y と反対向きのスピンをもつ”と定義すると, 一方の電子の z スピンは他方の電子のそれと反対向きだが, 自分自身の電子に対してスピンが反対向きであるということはない. すなわち，たとえば粒子 1 について, $R(1, 2) \wedge \neg R(1, 1)$ である（R は対称的かつ非反射的な二項関係）. したがって, 式 2 において，「一方の電子は他方の電子とスピンが反対向きだが, 自身に対しては反対向きではない」という対称的・非反射的関係があることから, 電子 (フェルミ粒子) は「弱く識別可能」である．なお，フェルミ粒子に関しては当初，無条件的に弱く識別可能だとされた一方, ボース粒子は確率的にのみ弱く識別可能とされたが（Muller and Saunders 2008）, のちに Muller and Seevinck（2009）が同議論を拡張し, 結果的にはボース粒子に関しても, フェルミ粒子と同様に弱く識別可能だと論じられた.

[5] 「弱い識別可能性」の論法に対する批判的検討は，たとえば Dieks and Versteegh（2008）や Hawley（2006，2009）などが行っている．また，多粒子系の量子力学でこれまで標準的に採用されてきた，状態空間（テンソル積ヒルベルト空間）における添字（番号）が粒子を指示するという前提を拒否することで，同種粒子を一粒子状態から個別化できると解釈するさらなる近年の展開については Dieks and Lubberdink （2011，2022），Muller and Leegwater（2022）などを参照せよ．

（primitive thisness）などといった，さまざまな種類がある（cf. Ladyman et al. 2007, p. 134 注 10）．注 1 で述べたように，PII の性質量化に非質的性質を含めないのであれば，量子的対象は PII の適用範囲外となる．しかし，この見解では，そのことは個体説を支持するうえで問題とはならない．なぜならば，量子的対象が個体であることは，PII の成立によって保証されるのではなく，まさに量子的対象が超越的個体性をもつことによって与えられると考えるためである（French and Redhead 1988, p. 244）．

個体説・非個体説の展開の概観は上記の通りだが，こうした議論はもっぱら，粒子の共時的な識別可能性に注目したものであり，粒子の通時的な側面に注目した議論は依然として乏しい状況が続いている．通時的側面に注目しながら量子的対象の同一性・個体性を扱った研究はわずかだが，量子力学の哲学に属するものとしては Bigaj（2020）および今井（2022）などが，また科学的実在論論争の枠組みから扱ったものには §3 でみる Bueno（2018）などがある．

共時的な側面では，通常，複数の同種粒子の同一性・個体性が問題となるのに対し，通時的な側面では一粒子系の時点で同一性・個体性が問題とされることが重要な点である．一粒子からなる量子系（個別量子系）を実現する重要な技法にはトラッピング実験などがある．典型的なトラッピング実験（イオントラップなど）は，荷電粒子を電場もしくは磁場中に閉じ込めて，単一の粒子からなる量子系を実現するものだが（今井 2024, p. 30），個別量子系を実現する技法には，§ 4.2.2 で紹介する光ピンセットを用いた実験や，§ 5.4 でも事例として挙げる原子操作など，多くの種類がある（ただし § 4.2.2 で紹介される事例は必ずしも量子的対象を扱ったものではない）．

単一の粒子を扱うことができるこうした個別量子系の実験的文脈では，多粒子系の量子力学の枠組みで前提とされる不可識別性（置換不変性）の枠外にあることから，一見，粒子の同一性・個体性は問題なく維持されるようにもみえる（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し，少なくとも標準解釈では量子的対象は時空間的に連続的な軌跡をもたない．そのため，量子的対象の（特に時間を通した）同一性・個体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）．

本稿で個別量子系をとりわけ問題にするのは，このように，こうした文脈が，哲学的な観点からは，とりわけ時間を通した量子的対象の同一性・個体性といった存在論的問題を考える上で注目に値すると考えられるためである．こうした問題に取り組む上では，特定の考察対象・実験状況に注目して量子的（ミクロ的）対象の個体性・実在性に注目した先行研究を参照・援用することになる．これらの先行研究では，経験

的証拠から対象の存在論あるいは（その前提となりうる）実在論を与えられるかどうかなどといった，認識論的問題が争点となりやすいことにも関連して，科学的実在論論争の枠組みでしばしば議論が展開される．その関係で，しばしば，ローカルな存在論（量子力学の哲学で問題となる）と，そのための前提となりうるグローバルな実在論（実在論論争で問題となる）の間の連関を明らかにすることも課題となる．

こうした背景から，本稿では，以下のように問題設定を行う．

(1) 個別量子系における単粒子の反実在論に対する今井（2024）の批判・提案の問題点は（少なくとも部分的には）いかにして補完されるか？
(2) (1) を通じて与えられる，特定の考察対象や実験状況に注目した場合における，量子的対象の存在論の決定手続きはいかなるものか？

(1), (2) の問題に取り組むうえで，本稿では，基本的には量子力学の哲学の延長にある問題意識（量子的対象の存在論の解明）に端を発しているものの，先行研究の議論の脈絡の関係上，理論の真理性や，理論的対象の実在などに関する懐疑論的立場が問題とされる実在論論争の枠組みにも適宜注意したうえで議論を行う．また，本稿では，個別量子系における単一の量子的対象の存在論に必ずしも限定されないような，ある程度汎用的な適用も望まれるモデル構築を志向する．こうしたモデル構築において，存在論を与えるための手続きに注目するというアプローチは，筆者が知る限りでは先行研究にはみられない独創的なものである．このようなアプローチをとる動機は，個体性や実在性の成否に関連しうる諸条件の論理的な明示化を可能にすることである．同手法は，量子的対象の存在論に関する一種の概念工学的なアプローチとして位置づけられる可能性がある[6]．

§3　単粒子の実在論批判およびこれに対する反論

個別量子系における単一の量子的対象の同一性・個体性を認める立場に対してはいくつかの批判が存在する（Krause 2011；Bueno 2018；Krause and Arenhart 2020）．こ

[6] 概念工学とは，ゆるく特徴づけるとすれば，「哲学を工学の一種として位置づけようとする哲学観」のことである（戸田山ほか 2019, p. 3）．概念工学は，技術産品だけではなく，諸概念や理念などのさまざまな抽象概念（知識・心・自由意志など）を設計・評価・改訂する枠組みを志向する．(1), (2) の問題設定にしたがい，量子的対象の存在論の決定手続きを与えるモデルを構築するうえで，（現段階での実行可能性はともかくとして）将来的にはコンピュータへの実装の土台となりうるようなものを志向することも，筆者としてはやぶさかではない．本稿での試みが潜在的には概念工学的でありうると想定するのは，こうした事情による．

のうち，本稿では，（便宜上ではあるが）Bueno（2018）による議論を中心にみる．そこで，本節では，Bueno（2018）による単粒子に関する実在論的立場への批判を確認するとともに，こうしたブエノの議論に対する今井（2024）の反論・提案を紹介しながら，その問題点をみる．なお，本節の内容は今井（2024）の§ 2，3，4 に大きく負っている．

3.1 決定不全性による単粒子に関する実在論批判

ブエノは, いくつかの種類の個別量子系における実験を取り上げ，こうした実験では単粒子を直接的に扱うことから, 一見すると, これらのケースは量子的対象に関する反実在論的（ブエノ自身の言葉では「経験主義（empiricism）」的）な立場に対して困難を与え，実在論が適切となる事例のように思われることを確認する[7]．しかし, このような先端的な実験物理学の事例においてでさえ, 依然として反実在論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, 量子的対象に関して実在論か反実在論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[8].

こうした背景を念頭においたうえで，ブエノの議論内容の要諦を確認しよう．ブエノは，**「刷新された決定不全論法（the underdetermination argument revamped；以下，（UDR）とする）」**と呼ばれる議論を提示し, 個別量子系の実験における単粒子の実在論を批判する. 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（特に量子的対象の存在論に関する解釈）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

[7] ブエノは, 陽電子のペニング・トラップ（Dehmelt 1990）, 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 原子の配置実験（Eigler and Schweizer 1990）という複数の実験を題材とする. 彼によれば，陽電子の実験とは異なり, 残りの実験は, 扱う対象の大きさが原子レベルのナノスケール（10^{-9}〜10^{-7} 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という（Bueno 2018, p. 240）.

[8] 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狭義の実在論/反実在論の定式化とは必ずしも一致しない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．本節で扱うブエノ流の反実在論は，実在論論争の意味で用いており，のちにも述べたように，量子力学の哲学における実在論/反実在論の双方にさえコミットしない立場である．

全性に含める．こうした決定不全性から反実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．ただしここでの提示の仕方も今井（2024）を踏襲する．

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, 粒子は個体かあるいは粒子は非個体か, などの量子力学の解釈（特に，量子的対象の存在論に関する解釈）をも決める必要がある．
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, 実験結果だけからは決まらない（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. 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（反実在論）というのが，（UDR）の要点である. ここでいう反実在論とは，粒子の非実在性に対する積極的なコミットメントを指すのではなく，粒子の特定の存在論にコミットできないことから消極的に帰結する立場であることに注意しよう（そのため，注 8 でも述べたように，ここでは，標準解釈などのような，量子力学の哲学における意味での反実在論でさえ必ずしも前提とできないだろう）．本稿で「反実在論」というときは，特に断りがない限り，ブエノ流の決定不全論法から帰結するとされる反実在論を指すものとする．

3.2 「理論選択可能性の文脈相対化」にもとづいたブエノへの反論

かくして，ブエノは，孤立した単粒子の存在論に関する解釈に関する決定不全性から，単粒子に関する実在論を退けることで，その同一性・個体性を認めない．こうした議論に対して，今井（2024）は**「理論（解釈）選択可能性の文脈相対化」**という観点から，ブエノの反実在論的な議論に回避できる余地があることを指摘する．今井は，自身の論点の本質的な考え方を，**「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」（今井 2024, p. 36）とまとめる．そこで，今井のブエノへの反論内容について確認しよう．ただし，今井 (2024) はトラッピング実験を主に念頭においているが，以下で「トラッピング実験」としている箇所は，適宜，より広義の個別量子系における実験として想定しても構わない．

今井は，たとえ量子力学の基礎における解釈の文脈で経験的には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能になるとは限らない, と論じる（今井 2024, p. 35）．なぜか．今井は，トラッピング実験などのような文脈では，量子力学の基礎における解釈の文脈では生じなかったような別の非経験的要素が重要な位置を占める可能性があるためだと指摘する．ここで，今井がいう文脈とは，特定の考察対象や実験系の配置・構成・設定などにかかわる状況のことだと理解するのが適切だろう．そこで，今井（2024）では単に「文脈」と呼ばれているが，（一般的な意味での文脈と区別するために）本稿ではこれを**「設定文脈（configuration context）」**と呼ぶことにしよう．今井は，ある設定文脈ごとに応じてに決まる「非経験的要素」として，特に理論選択の合理的基準を想定している．こうした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）．こうした非経験的要素としての合理性基準に関する議論は Kuhn（1977）によるものが有名である．今井（2024）では専ら合理性基準とあるが，本稿でのちに取り上げる他の基準（実在性基準など）もある種の合理性に関連しうることから，区別のため，以下ではこうした理論選択の合理性基準を**「理論的基準（theoretical criteria）」**と呼ぶことにしよう．また，やや正確性を欠くが簡便のため，本稿では，理論的基準というとき，その設定文脈における理論的背景も適宜合わせて考えることにしよう．そして，今井は，トラッピング実験の設定文脈においては, 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うることに注目する．そして，たとえば, ある実験状況では，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・操作などができることから, 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，また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, 粒子の個体性をより支持すべきである, という立場がありうるとする（他方で，別の観点から，粒子が非個体だとすべき可能性も否定できないともいう）．今井はここではどの解釈を支持するべきかを明示的には述べないが，いずれにせ

よ，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設定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, という点が重要だと指摘する．もちろん，今井は常にそのような設定文脈に相対的な解釈選択が可能だといっているわけではなく，場合によってはその可能性があるとするにすぎない．それでも，設定文脈に応じた理論的基準の要素変化を考慮せず, 量子力学の基礎の設定文脈で生じる決定不全性から直ちに，トラッピング実験の設定文脈でも同様に解釈選択ができなくなるという暗黙の想定に立脚するブエノの議論は不適切だとして，今井はブエノに反論するのである．

3.3 今井（2024）の提案における疑問点・課題

ただし，こうした今井（2024）の提案にも，いくつかの疑問点や課題がある[9]．

（a）**設定文脈の必要性**：まず，そもそもなぜ設定文脈を考えたうえで，それに相対化された理論・解釈の選択可能性を考える必要があるかという疑問はありうる．これについては，次のように応答できるだろう．今井も述べる通り，たしかに，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, 特定の解釈を優先的に支持することが行われる（今井 2024, pp. 34-35）. その意味では，もし設定文脈を持ち出さないのであれば，それは量子力学の哲学で通常なされるように，どの解釈を選択するべきかという議論を行うのと同じことになる．しかし，ここではトラッピング実験という状況における対象の存在論が問題となる以上，こうした特有の状況に注目して解釈選択が可能だという論拠を示さない限り，（UDR）における反実在論への対抗としては不十分であろう．他方，設定文脈相対化というアイデアを導入することで，どういう実体を対象とした，どういう状況を考えているのかを明確にできる．設定文脈を導入し，それに応じた理論的基準を考えるという提案は，まさにこの点をくみ取るうえで有用といえるだろう．

（b）**注目すべき理論的基準の要素を与える手がかりの不在**：設定文脈の導入が有用だとしても，課題は残される．たとえば，今井は別の設定文脈を考慮することで，そこで注目すべき理論的基準の要素が変化する可能性を指摘する．しかし，その設定文脈においても，どの理論的基準の要素に注目すべきかに関する手がかりは依然として乏しい．たしかに，ある別の設定文脈を考えることで，特定の条件が成立しているな

[9] 以下の (c)，(d) の問題点は，査読者のうちの一名からの指摘によるものである．有益な指摘をくださり感謝申し上げます.

どの事情から，その状況にふさわしい存在論を選択できる余地が開かれるかもしれない．だが，そうであれば，その事情とはどのようなものだろうか？

（c）**理論的基準の使用は IBE ではないのか**：今井が依拠する理論的基準の使用は，最善の説明への推論（IBE）の一種に他ならないのではないか，という問題もありうる．科学的実在論論争において，推論形式としての IBE の妥当性については（とりわけ実在論批判の脈絡で）多くの問題視がされてきた（cf. 戸田山 2015, pp. 55-71）．もっとも，理論の真理性や，理論的対象の実在に関する懐疑論的な立場が問題となる科学的実在論論争とは異なり，必ずしもこうした問題設定にしたがわない量子力学の哲学においては，IBE はさして問題にならないだろう．だが，今井の提案が，実在論論争の枠組みの中でブエノへの反論として与えられる以上，理論的基準が IBE に相当する限り，それを用いて理論（解釈）選択が可能とすることへの正当化が必要であろう．

これについては，今井の提案があくまで設定文脈相対的に行われていることや，IBE を直接正当化するこれまでの試みは旗色が悪いように思われることから，推論規則としての IBE を正当化する積極的論証をここでは与えない．さしあたって，理論選択や発見法としての IBE については，その限りでは，ここでも使用できるものと考えられる．実際，暫定的に（真として）受け入れるべき仮説を同定するための発見法（ヒューリスティック）としての IBE 使用については擁護論が与えられている（小川 2022）[10]．

（d）**論理的可能性の指摘にとどまる**：今井は，理論的基準を設定文脈相対的に考えることで，ブエノの反実在論に対抗する余地がある，とするが，これは論理的可能性を示すにとどまり，粒子の存在論に関する特定の解釈を一意に選択できるような事例を積極的・具体的に挙げているわけではない．しかし，論理的可能性だけではなく，ブエノの反実在論を退けるような具体的な事例が存在することまでいえなければ，ブエノへの反論としては不適当であろう．

このように，今井の提案にはいくつかの問題点が挙げられる．本稿では，（b）〜（d）すべての完全な解消まではできないかもしれないが，これらの課題をうけて，今井の提案内容をより補完・発展させるためには，特定の考察対象や実験状況に注目しなが

[10] ただし，こうした場合の認識論的含意については別途議論の余地がある．ファン・フラーセンは，理論への没入（immersion）と理論へのコミットメントを区別した（van Fraassen 1980 [1986], pp. 80-83 [pp. 152-155]）．よって，理論的基準で理論・解釈を一意に選択できたとしても，その理論や解釈にもとづいた世界観に没入することが方法論的に正当化されるだけであり，こうした理論や解釈が真であるという認識論的コミットメントまで正当化されるかどうかは別である．ただし，本稿ではある設定文脈に相対的に存在論を考えており，こうした没入とコミットメントの区別が有効に働くかどうかについては疑問の余地がある．ここでは，設定文脈の外での認識論的コミットメントまでを要求しているわけではない．

ら，科学哲学としての同一性・個体性の存在論（あるいはそのための議論の前提となりうる実在論論争に関する議論）を扱った先行研究を参照・援用することが有用であろう．こうした先行研究はいまだ多くはない中で，哲学者のチェン（Ruey-Lin Chen）らは，必ずしも量子的対象に注目したものではないが，一種のトラッピング実験に関連した事例（光ピンセットを用いた実験事例）を扱いながら，観察不可能なミクロ対象の個体存在論ないしは実在論的議論を行っている．チェンの議論は，（b’）理論的基準とは異なる基準によって，ミクロ的対象の個体性や実在性を保証しようとするものであり，（c’）（少なくとも陽には）IBE に依拠せず，（d’）個体として実在する対象の事例を実際に与えるものであることから，単に有用でありうるという以上に，彼の議論を参照する強い動機が生まれる．特に（b’）の点は，今井の提案において，注目すべき理論的基準の要素を与える手がかりの候補となる見込みがあると筆者は考えている．そこで，次節ではチェンの実験的な個体存在論および実在論を紹介する．

§4　チェンの実験的な個体存在論および実在論

前節で，単一の量子的対象に関する実在論へのブエノの批判（およびそれに対する今井の反論）をみた．ブエノにせよ，今井にせよ，個別量子系における実験に注目はするものの，最終的には量子力学の解釈の選択が可能かどうか，という理論的観点にもとづいて自説を展開している．他方で，チェンらは，理論的・形而上学的な観点ではなく，科学の実験的実践に注目しながら，ミクロ的対象の実在論や個体性を擁護する一連の議論を精力的に展開している（Chen 2016, 2018, 2023；Chen and Hricko 2021, 2023 など）．近年の彼の研究成果の多くは，実験対象の個体性に焦点をあてたもの（Chen 2016, 2018 など）と，実在論（Chen 2023; Chen and Hricko 2021, 2023 など）に焦点をあてたものに，便宜上，ある程度は分けられる．そこで，本節では，§3.3 の今井の提案との関連から，まず個体の存在論に関する Chen（2016, 2018）の議論を簡潔に概観したうえで，次に，主に Chen（2023）における彼の実験的実在論をみることにする．ただし，本稿の主眼は，§2 の問題設定 (1)，(2) の解明にある．そのため，本節では，チェンの議論の批判的検討は直接には行わず，§ 3.3 における今井の提案と対比されるポイントを簡潔に確認するにとどめる．（ただし，次節の § 5.3，5.4 で，筆者はチェンの議論とは異なる見解を提示することになる．）

4.1 個体性の実験的な基準

Chen（2016, 2018）において，チェンは，形而上学的・理論的な基準とは異なる，科学における実験的な観点にもとづく個体性の基準を提唱する[11]．彼が実験的な個体の概念（a conception of experimental individuality Chen 2016, p. 350；以下，本稿では（EI）とする）と呼ぶこの基準は，対象に関する**操作可能性（manipulability）・分離可能性（separability）・構造的統一の維持可能性（maintainability of structural unity）**という３つの条件からなる．ただし，これら条件の内容について述べる前に，チェンが形而上学的な基準とは別に（EI）を提唱する背景を確認しておきたい．

チェンが科学の実験的実践にもとづく新たな個体性の基準を提唱する背景には以下の２つが挙げられるだろう．まず，日常的な対象のあり方や常識的直観から出発して，概念分析などを経て構築された個体性の基準が，個別科学の現場で科学者たちが対象を個体として扱う仕方と必ずしも調和しないように思われることである．また，理論と異なる実験の自律性・独自性が考えられることである．これらの点について，もう少し補足しよう．チェンが，個体性のための形而上学的・理論的な基準ないしは重要な特徴づけとして挙げるのは次のようなリストである（Chen 2016, p. 351）．ただし，どの条件も個体性のための必要条件ではあるかもしれないが，十分条件ではないだろうとする．（以下のような（M1）～（M6）の述べ方だと，まるで個体であるための十分条件を与えているようにみえるため，この点は注意されたい．）

（M1）個別性（Particularity）: x が個別的（particular）であるならば，x は個体である．つまり x を指定するために指示詞（demonstrative）を用いることができれば，この x（*this x*）ということができる．
（M2）区別可能性（Distinguishability）: x をその環境，そしてその環境におけるほかの対象から区別できれば，x は個体である．
（M3）可算性（Countability）: x を数えることができれば，x は個体である．
（M4）境界画定性（Delineability）: x の時空間的な境界をひくことができれば，x は個体である．

[11] 彼の実験的な個体性の基準（EI）は，はじめ Chen（2016）で提示された．Chen（2018）は Chen（2016）をさらに発展させ，実験的な個体化のプロセスや，そのプロセスにおける２つの基本的なモード（存在論的モードおよび認識論的モード）の存在を指摘する．そして，Chen（2016）で挙げられた（EI）を満たすボース・アインシュタイン凝縮や遺伝子操作といった実験的事例に加えて，フェルミ凝縮の事例も挙げ，ボース・アインシュタイン凝縮とフェルミ凝縮の実験が，対象の創造（creation）にかかわるのに対し，遺伝子操作の実験は対象の表出（presentation），つまり取り出されていることにかかわるとする．Chen（2018）は，対象が創造される事例が存在論的モードに，表出される事例が認識論的モードにそれぞれ対応するという．

（M5）統一性（Unity）：x がその部分からなる斉一な全体（a unitary whole）であれば，x は個体である．
（M6）持続（Persistence）：時間を通じた変化を経験する間，その統一性を保ち続けることができれば，x は個体である．

物理学や生物学などの自然科学は，身の回りの通常のあらゆる個体とされる対象が，生物，細胞，分子，原子，電子などといった科学的な対象からなると教えているように思われる．だとすれば，（M1）〜（M6）といった形而上学的な基準をこれらの科学的対象にも拡張して適用できるかどうかが問題となる．チェンは，この問題に対して否定的に答える．

なぜならば，物理学，生物学などの個別科学ごとにも，その領域に応じた個体性概念が生じうるが，それらが必ずしも形而上学的基準と整合的とも限らないためである．たとえば，（少なくとも一部のバージョンの）PII は，量子力学の帰結と整合しない可能性がある（Chen 2016, p. 353），つまり，量子的対象について，§2 でもみたように，性質量化を内的属性や時空間的な属性に限るバージョンの PII は破れているように思われる．チェンによれば，PII は上記の基準（M2）と対応する．また，進化論では，自然選択が作用するあらゆる対象が生物学的な個体とされるため，生物学的な種（biological species）に自然選択が作用すれば，それらも個体ということになる（Chen 2016, p. 353）．これは，種を（個体ではなく）自然種として扱う形而上学的な見解を拒否することになるかもしれない[12]．

このように，個体性に関する形而上学的な基準は，個別科学の中で生じうる基準と相いれない可能性がある．これを受けて，自然主義的な傾向をもつ科学哲学者は，個体性の基準に関する哲学的説明は，現在の最善の科学理論にうったえながら発展させたりテストされたりされるべきだと主張する道がある．しかし，チェンは，個体性の理論的概念は，科学的実験とっては十分でも適切でもないと述べる．その背景には，実験が理論科学からある程度独立した営みであること，哲学理論や科学理論は誤謬可能性があること，そして，認識的な側面にかかわる哲学や科学の理論とは異なり，実験の本質は，行為にかかわるものだという点がある．チェンは，これらのポイントを考慮することで，操作可能性，分離可能性，構造的統一の維持という，３つの条件か

[12] Chen(2016) はここでは明記していないが，ここで挙げられているものは，生物学的な種をクラスではなく個体とする種の個体説のような立場だろう．種の個体説は生物学者・哲学者のギゼリンにより，生物学における「実在」の問題や，命名法上のタイプの存在論的身分などの諸課題を解決するものとして提唱された（Ghiselin 1974）．

らなる新たな個体性基準を提唱する．これらの条件は，**操作（manipulation），分離（separation），構造的統一の維持（maintenance of structural unity）**という，実験科学に特有の行為にかかわる条件から引き出されるとする．各条件については，チェンが挙げる科学的事例をみながら理解するのがよいだろう．

チェンは，（EI）を満たすと思われるような事例を物理学・生物学それぞれの領域について与えている．彼は物理学的事例としてはボース・アインシュタイン凝縮（Chen 2016, pp. 355-359；Chen 2018, pp. 202-203 参照）およびフェルミ凝縮（Chen 2018, pp. 203-205 参照）を，生物学的事例としては遺伝子改変（Chen 2016, pp. 359-364；Chen 2018 pp. 205-207 参照）などをそれぞれ挙げている．

本稿では，紙幅の都合から，ボース・アインシュタイン凝縮の事例にしぼって確認しよう．ボース・アインシュタイン凝縮（Bose-Einstein Condensation, 以下 BEC とする）は，ある温度（臨界温度）以下において突然，多数のボース粒子が最低のエネルギー準位の状態に落ちこみ，系全体で波動性が実現する相転移現象である．1925 年に理論物理学者のボースとアインシュタインによって理論的に予言された．彼らはボース・アインシュタイン統計を定式化し，こうした統計に従うボース粒子（光子，^{4}He, ^{87}Rb, ^{23}Na など）の極低温での振舞いを記述した．その後，BEC は物質の第 5 態だと考えられるようになった（残りの 4 態は，固体・液体・気体・プラズマである）．ボースらの予言の 70 年後の 1995 年，アメリカのコーネルとウィーマンらを中心とする物理学者のグループが，およそ 2000 個の互いに区別されない ^{87}Rb（ルビジウム 87）原子の BEC を実験室内で約 15 秒の間つくりだすことに成功した（Anderson et al. 1995）．彼らは，ルビジウムに対して 170 ナノケルビン ($170 \times 10^{-9}K$) 以下の温度まで気体原子を冷却させた．

こうした実験において，科学者たちは，レーザー冷却，光学的・磁気的トラッピング，蒸発冷却などという精密な技術を用いてボース凝縮体（BEC 状態において多数のボース粒子からなる対象）をつくりだし，多数のミクロな粒子集団からなる，ひとつのマクロな個体としての凝縮体を実現させている．このような先端技術を用いてつくりだされた凝縮体は，まず，操作されている．また，互いに識別不可能な個々のミクロ的なボース粒子とは異なり，マクロな２つのボース凝縮体（原子の雲）は操作によって分離されている．だが，凝縮体の寿命は短い．凝縮体の周囲の温度が臨界点まで上昇すると，個体内で内的部分の原子の統一をつくりだす縮退状態がとけて，構造をもった対象が消滅する．ここから，第３の必要条件である構造的統一の維持が示唆される．構造的統一とは，個体の構成要素がある特定の仕方でひとつに構造化される

ことを意味する．操作可能性・分離可能性・構造的統一の維持可能性は，各々が実験的文脈における個体化のための必要条件だが，3 条件全体は一体となって，この文脈における個体化の十分条件を構成するとチェンは指摘する（Chen 2016, p. 358）[13]．

かくして，チェンは，（EI）の 3 条件がボース凝縮体において成立していることをみる（実際には，BEC などのいくつかの実験的事例に注目して，3 条件を抽出したのだと思われる）．これらは，実験的文脈においていかにして対象が個体としてつくりだされている，もしくは取り出されているかを与える条件であり，（M1）～（M6）のような形而上学的基準とは異なる観点から提示されているものである．

チェンの（EI）において重要なことは，まず，（EI）が，諸科学を横断するような個体性の概念であることである．彼は，物理学と生物学ですでに役割を果たしている共通の個体性概念が存在することを示している．また，（EI）は，科学者がどういった条件下で対象の個体性を実現するといえるかの条件を提示するものである．さらに，彼は，（EI）がほかの理論的な概念にとってかわることができる，あるいはそうであるべきだと主張するわけではない．そうではなく，この概念が科学的実践に固有のものであり，また（EI）が個体への理論的コミットメントに対する最も強い証拠を提供しうると主張する（Chen 2016 p. 350）．

チェンはこのように科学の実験的実践にもとづく新たな個体性概念を提示したのち，さらにこれを科学的実在論論争の議論に適用している（Chen and Hricko 2021, 2023；Chen 2023 など）．彼の（EI）は，あくまでも特定の実験的文脈に注目して得られた基準であり，その妥当性は事例に相対的と考えるべきであろう．それゆえ，本稿で問題にするような個別量子系における実験の文脈において，同様の基準を適用して対象の個体性・同一性の成否を判断できるかどうかはまた別の話である．とりわけ，理論負荷性が無視できないような文脈においては，理論的な基準とも合わせて考察する必要が生じるだろう．ただし，Chen（2023）で，彼はこうした実験的実践した議論を展

[13] ただし，3 条件は必ずしも相互に独立ではないとされる．チェンは，3 条件の間の論理的な関係として，構造的統一の維持は，個体の操作・分離の双方を実現するための必要十分条件だという（Chen 2016, pp. 358-359）．このことを，チェンは，“Mx & Sx ⇔ MSUx” という論理式で表現する（“M”, “S”, “MSU”はそれぞれ操作，分離，構造的統一の維持を表す）．さらに，「科学者が実体の実験的個体性を実現したといえるのは，その科学者が，実体を分離でき，操作できて，また操作と分離の期間中その構造的統一性が失われなかったと示せたとき，かつそのときに限る」（Chen 2016, pp. 358-359）として，これを“EIx ⇔（[Mx & Sx] ⇔ MSUx）”と表現している（“EI”は実験的個体化を表す）．しかし，だとすると，(EI) を構造的統一性の維持も含めて（2 条件ではなく）3 条件として提示する意義にやや疑問が残る．また，ここではとりわけ個体性を実験的に実現するプロセスとしての個体化（individuation）が念頭におかれており，論理式で表現することで，その前後で述べられる上記の内容をくみ取り損ねるおそれがあると思われる．

開する過程で，理論負荷性から独立に，対象の存在に関する信念を保証できるようなケースが存在することを，事例とともに示している．これは，個体性・同一性の問題よりはむしろ実在論論争の議論にかかわるものだが，前節のブエノの議論とそれに対する今井の批判が実在論論争の枠組みで展開されている以上，これについても積極的に参照すべき論点だと考えられる．そこで，次に，Chen(2023）の議論をみることにしよう．

4.2 Chen(2023) の実験的実在論

4.2.1 ハッキング流アプローチによる実験的実在論

Chen（2023）は，ハッキング流の実験ベースの実体実在論を支持しながら，ある実験的な事例においては，操作（可能性）などといったしかるべき基準を満たすことで，観察不可能なミクロ的対象の実在を措定する理論の正しさに依存せずに，その対象の（最小限の意味での）実在に対する信念を保証できる場合がある，と論じる．ここでは，Chen（2023）にならい，操作（可能性）などといったこうした基準を**「実在性基準（criteria of reality）」**と呼ぶことにする．実在性基準には，以下で取り上げる操作基準のほかにも，単位量あたりの数の実験的確定（experimental determination of number per unit）といった基準などもあるが（Chen and Hricko 2023），本稿では主に操作基準を取り上げる．

彼は，光ピンセット（optical tweezers）を用いたいくつかのトラッピング実験では，操作されている/もしくは操作可能性という基準―以下，これをチェンにならって**「操作基準（manipulation criterion）」**と呼ぼう―によって実験対象の実在性に関する我々の信念を，理論から独立に，つまり以下の（T1），（T2）のテーゼを満たすようにして保証できるという．

(T1) 実験的議論の中には，実体（entities）の存在を措定し，その性質を記述する理論の正しさに依存せずに，実体の存在に関する信念を保証するものがある．
(T2) 実体の存在を裏付けるために使用される実験プロセスと結果の中には，実体と実験装置との相互作用を説明する理論に依存せずに解釈および判断できるものがある．

（Chen 2023, p. 280）

まず注意すべきなのは，(T1), (T2) にもあるように，チェンは，ある実験においては，直接観察不可能な実体の存在に関する信念を，理論から独立に保証できる場合が

ある，と主張している点である．常にそうだというのではない[14]．

後にも述べるように，チェンのこうした議論を裏付ける論証のポイントは，彼が，実験対象に帰属されうる性質を，**存在的性質（ontic properties）**と**理論的性質（theoretical properties）**に区別し，前者の存在的性質にもとづくことで，理論に依存しない実在性基準を構築できると考えている点である．先に挙げた操作基準もこうした実在性基準の一例であるが，実在性基準は存在的性質に由来するものであり，必ずしも操作基準だけに限らない．そこで，以下ではチェンが挙げる光ピンセットの事例にも沿いながら彼の議論を追っていくが，その前に，ハッキングの実験的議論との関係も含めた彼の議論の位置づけや特徴についてコメントしておきたい．

まず，ハッキングは，「あなたが電子を浴びせるならば，それは実在する（If you spray electrons then they are real）」（Hacking 1983 [2015], p. 24 [p. 64] ただし訳は一部改変）という有名なテーゼで端的に表されるように，電子のような理論的実体が操作可能であるならば，それらは実在するという，操作（可能性）による理論的実体の実在性基準を提示した．ただし，チェンも述べるように，ハッキングの実体実在論には，少なくとも以下のような批判がされてきた（Chen 2023, § 3）．まず，操作（可能性）は実在のための必要条件でもなければ十分条件でもないという批判がある．つまり，操作できないが実在すると考えられる対象（たとえば宇宙論的な実体など）もあれば，操作可能だが実在しないと考えられる対象（固体物理学における正孔や準粒子など）などもある．こうした批判以前からすでに，ハッキングは実験的操作は対象の実在のための必要条件ではないことを示唆はするが，結果的には別の議論を通じて，自身の実験的実在論を擁護する．ただし，それに付随して，悲観的帰納法，理論負荷性，IBE などに関連する別の問題点も生じた．とりわけ，理論負荷性は，チェンも挙げるとおり，ハッキングに対してなされた第二の批判に関連する．つまり，ハッキングの立場が本当に理論から独立かどうかは自明ではないという批判である．なぜならば，たとえば，浴びせた対象が実際に電子だと解釈するためには，電子自体に関する理論や，電子とそれを操作・検出する装置との間の相互作用を説明する理論を必要とする可能性があるためである．このように，ある実体の存在に関する信念を保証する

[14] 実際，たとえばチェンは，哲学者のゲルフェルトがハッキングの実体実在論における操作可能性の基準を批判するために挙げる準粒子のケース（Gelfert 2003）に言及し，準粒子，つまり多体系の集団励起（the collective excitations of a many particles system）は操作可能だとしても，それを解釈するための理論が必要であるため，(T1) あるいは (T2) を満足しないことを認める（Chen 2023, pp. 294-295 Note 2）．

には，その実体に関する仮説・理論や，それを操作する装置との相互作用に関する仮説・理論が必要でありうる．そこで，チェンは，操作基準を実際の事例にあてはめて，実験的な実在論を支持するためには，先にも述べた（T1）と（T2） の意味で，その適用が理論に依存しないことを示すべきだとする．

それでは，いかにして，(T1), (T2) の意味で，理論から独立に実体の存在に関する信念を保証すればよいのか？ これを考える助けとしてチェンも言及するのが，§3 でみた Bueno（2018）の議論の中でも挙げられる，走査型トンネル顕微鏡（Scanning Tunneling Microscope：STM）による Xe（キセノン）原子の配置実験（Eigler and Schweizer 1990）の事例である．チェンも，（ブエノとは立場を異にするが）彼と同様，Xe 原子として引っかかれた（dragged）対象を同定するためには，「STM 先端の探針表面で引っかかれた」という性質を Xe 原子に帰属する必要があることなどに同意する．こうした性質には，実体（Xe 原子）と装置（STM の先端）との間の相互作用を含む．そして，この性質を記述・特定するためには，量子力学のような理論が必要である．つまり，この性質は理論依存的である．そこで，実験的な実在論を擁護するうえでは，このように理論依存的な性質以外のなんらかの性質を実験対象（Xe 原子）に帰属できなければならない．そのような性質は（もしあるとしたら）どのようなものか？

チェンによれば，存在的性質と呼ばれるものがそうした性質である．彼は，実験対象に帰属できる性質を，存在的性質と理論的性質の二種類に区別する．そして，存在的性質は，実体の存在に関する在り方に由来する性質であり，それゆえに実在に特権的なアクセスを与えるものだとする．チェンによれば，存在的性質の例として，**個体性（individuality），可算性 (countability)，観察可能性（observability），可触性（tangibility），操作可能性（manipulability）**などがあるとする．他方で，理論的性質は，ひとつもしくは比較的少数の科学理論によって仮説を立てられたり使用されたりするような性質で，その例には，ニュートン力学における慣性や，静電気学における電荷，そして量子色力学におけるカラーチャージなどがあるとする．

実体に帰属される性質を，存在的/理論的な性質に二分する提案はチェン独特のものであり，チェンが自身の実験的実在論を擁護する上では，この存在的性質（およびそれに由来する操作基準などの実在性基準）が重要な役割を果たす．そこで，理論的性質とは対照的な存在的性質の特徴を列挙しておこう．

(ア) [領域横断性] 存在的性質は，通常，多くの異なる科学理論（熱力学と電磁気学など）や分野 (天文学と化学など)，さらには異なる科学 (物理科学と生物科学など) の基礎となったり，それらにまたがったりしている．（Chen 2023, p. 286）

(イ) [理論独立性] 存在的性質は，観察・測定・実験などの非理論的な方法で実証できる．（Chen 2023, p. 287）
(ウ) [観察可能性に対する代用可能性] 存在的性質の存在論的地位は観察可能性と同じか，少なくとも非常に似たものを示す．それゆえ，観察可能性ではアクセスできない場合でも，実体の存在へのアクセスを提供できる．（Chen 2023, pp. 287-288）

チェンは，存在的性質がこうした特徴をもつことから，実験によって実体に存在的性質を帰属できれば（つまり，実体が少なくとも 1 つは実在性基準を満たすことができれば），その実験によって実体の存在が実証されるといえるとする．上記の (ア)〜(ウ) の特徴により，存在的性質をもつ実体に対するコミットメントは，理論に依存せずとも，我々がその性質を全く知らないような実体に対する空虚なコミットメントにはならないと彼は論じ，自身の実験的実在論の理論独立性に対して想定される反論に応答する．

4.2.2 光ピンセットを用いた実験の事例研究

こうして，チェンは，特定の実験的事例では，操作基準などのような実在性基準が（T1），(T2）の意味で，理論から独立な基準として適用可能だとして，理論に依存せずに実験対象の（最小限の意味での）存在に関する信念を保証できると論じる．彼は，光ピンセットを用いたいくつかの実験をこうした事例として例示する（Chen 2023, § 5）．そこで，具体的な実験の中でいかにして，理論から独立に実験対象の存在に関する信念が保証されうるとチェンが考えているのかをみよう．なお，以下の実験の概要に関する記述も，Chen(2023) の § 5 に大きく負っている．

光ピンセット（optical tweezers）は，物理学者のアシュキンによって 1970 年代に発明された装置であり，レーザー光の輻射圧（radiation pressure）を利用して，実体を捕捉・操作するのに用いられる装置の一種である．

光ピンセットの装置は，数十 nm から数十 μm のサイズにまで及ぶ，様々な物理学的な粒子や生命システムを捕捉・制御するための多用途の手段として用いられるようになった．実際，アシュキンらは 1980 年代に，光ピンセットを用いて，原子を含むナノスケールの粒子，誘電体粒子（dielectric particles）から，比較的大きいサイズの粒子である，コロイド，エアロゾル，さらにはバクテリアやウイルスなどのような生物学的な対象までトラップしている．

光ピンセットを用いた実験事例のうち，Chen(2023) で与えられるのは，アシュキンらによる最初の誘電体粒子のトラッピング実験（Ashkin et al. 1986）と，いくつかの

他の科学者グループによって行われた，DNA のような単一の分子を捕捉，固定，制御する実験（Perkins et al. 1994; Wang et al. 1997）である．

Ashkin et al.（1986）の実験において，彼らは，次のような装置を用いて，直径 10 μm のガラス球が水中でトラップされていることを示す写真を得ている（装置の模式図および写真は，Ashkin et al. 1986, p. 289 あるいは Chen 2023, p. 291 を参照）．水を満たしたセル内の一方にレーザーレンズを挿入し，そのレーザーレンズに向かいあった方向にあるもう片方のレンズが粒子を光トラップに引き込むために用いられる．粒子をトラップする過程は顕微鏡および検出器で観察・記録される．顕微鏡が受け取った光はスプリッターによって 2 つの互いに垂直なビームに分割される．観察者はビームの 1 つを受け取り，トラップの過程を眼でみて視覚的に確認できる．一方，検出器がもう一方のビームを受け取り，プロセスを記録し，実験対象の写真を得る．こうした結果を受けて，アシュキンらは，「散乱光のビーム角度が大幅に減少し，それが後方への力を生じさせていることがはっきりとみられる (The sizable decrease in beam angle of the scattered light, which gives rise to the backward force, is clearly seen)」と説明している (Ashkin et al. 1986, p. 289). チェンは，このことを，「科学者は入射ビームと散乱ビームの目に見える軌跡にもとづいて，何かがトラップされたと判断する．彼らは理論的な解釈なしに操作をみた（[T]he scientists judge that something has been trapped according to the visible trajectories of the incident and scattered beams. They saw the manipulation without theoretical interpretations.)」と言い換えられるとする（Chen 2023, p. 291）．

また，チェンは，光ピンセットを用いた，DNA のような単一高分子のトラッピング実験の事例（Perkins et al.1994 ; Wang et al. 1997）も例示する．Perkins et al.(1994) の実験で科学者らはモデルポリマーとして DNA を選択し，光ピンセットを使用して水溶液中の DNA 分子を制御した．この実験で科学者らは，はじめに単一の DNA 分子をマイクロメートルサイズのビーズに取り付け，光ピンセットを用いてビーズを保持した．単一 DNA 分子は，流動する流体中で完全に伸びてから，緩和した．科学者らは蛍光顕微鏡を使用して，操作中の DNA 分子の変化を観察した．彼らは，4.5 秒間隔と 0.28 秒間隔で DNA 分子の変化の写真を撮り，DNA 分子が完全に伸びた状態から緩和された後の 2 つの一連の画像を作成することで結果を記録した（写真は Perkins et al. 1994, p. 823 あるいは Chen 2023, p. 292 を参照）．

チェンは，こうした光ピンセットを用いた実験において，実験対象の存在に関する信念を理論から独立に保証できる根拠を，次のように説明する．

これらの実験では，光ピンセットを用いることで，なんらかの実験対象（誘電体粒

子，ウイルス，バクテリア，DNA 分子など）が操作されている．実験対象が操作されているかどうかは，操作のプロセスが顕微鏡で観察されることから判断される．よって，操作基準によれば，対象の存在に関する信念は保証されそうである．問題は，科学者が光学や装置に関する理論を用いて光ピンセットを発明したことから，光ピンセットを用いる実験が理論負荷的でありうることである．これに対して，チェンは，光ピンセットの動作原理がこれらの理論に依存していることは認める．しかし，彼は，このことは実験対象の存在の証明が理論に依存していることを意味するものではないとする．なぜなら，実験を遂行する科学者は，操作が実現されていることを判断するために，こうした理論を必要とはしないためである．科学者が行う必要があるのは，実体が元の環境から引き出されてトラップされたかどうかを顕微鏡で観察することである．そのために，科学者は実験対象そのものではなく，操作のプロセスを観察する．たとえば，DNA の実験（Perkins et al. 1994）では，科学者は確かに蛍光顕微鏡で DNA 画像を観察しているが，実験対象の DNA の存在は，観察ではなく操作によって実証されている．さらに，操作プロセスは DNA 分子の一連の画像で表示されるため，操作自体は解釈されるのではなく観察されたといえる．一連の画像は，何か (DNA 分子) が一定期間固定され，その後その状態が継続的に変化したことを示している．一連の顕微鏡の像にもとづいて，科学者は，固定された DNA 分子が存在し，それらの画像から DNA が操作されたことを示す強力な理由を得る．よって，この操作プロセスの観察から，肉眼では観察できない DNA のような対象の存在が強く裏付けられる．

かくして，チェンは，光ピンセットによる実験操作の判断が理論に依存しない限り（T2）が正当化されること，および，操作基準が満たされるのであれば，実験対象の存在に関する信念を強く保証することから，（T1） も正当化されると論じる[15]．このよ

[15] もちろん，顕微鏡を通して得られる像が，観察対象そのものと一致するかどうかを解釈・判断するうえでも，光学理論や装置の設計原理などに依存する可能性が一般には指摘される．ただし，チェンはここでも，今みてきたような実験を考える際は，存在に関する信念を保証するうえで，こうした理論負荷性は問題にならないとする．なぜならば，ここでチェンが挙げる実験では，顕微鏡は主な実験装置の外側に配置されており，顕微鏡は実験対象の操作のために使用されたのではなく，実験対象から反射された光を受動的に受け取ったにすぎないためだ，という（Chen 2023, p. 295 Note 7）．また，チェンは，ハッキングが顕微鏡の像の信頼性を示すために与えた格子の議論（the Argument of the Grid）（Hacking 1985, pp. 146-148）と，この議論に対するファン・フラーセンの批判（van Fraassen 1985, p. 298）にも言及しながら，自身の主張の中では，こうした論争が顕微鏡観察の使用を危険にさらすものではないと述べる（Chen 2023, p. 295 Note 6）．なぜなら，ここで挙げた実験では，科学者は実体とその性質それ自体（たとえば DNA 分子の形や構造）を観察するのではなく，操作（2 つの異なる時間間隔における DNA 分子の 2 組の画像）を観察することによって実体の存在を証明しているためだとする．

うに，存在的性質に由来する実在性基準（ここでは操作基準）が満たされていることが，肉眼もしくは顕微鏡などの補助的手段によっていえることで，対象に存在的性質を帰属できることから，実験対象の最小限の意味での存在を理論の正しさに依存せず保証できる，というのである．

4.2.3 Chen（2016，2018，2023）の議論へのコメント

本節でチェンの議論を取り上げた動機は，あくまで §2 で述べた問題設定 (1)，（２）のための手段とすることであるから，ここではチェンの議論に対する直接の批判的検討は割愛するが，前節における今井（2024）の提案との関連でポイントを述べておこう．チェンの議論は今井の提案とは異なり，経験的証拠および理論的背景から（IBE に相当する基準を用いて）理論・解釈の一意の選択を介して特定の存在論を与えようとするのではなく，理論を介さずに，実験から直接に対象の実在性や個体性（に関する信念）を保証しようとする．そのため，IBE を用いない（と思われる）点や，また，特定の事例における対象の個体性や実在性を（論理的可能性にとどまらず）実際に示す事例を与えるという点で，今井の提案と好対照をなす．特に，Chen（2016，2018）の（EI）や Chen（2023）の実在性基準は，今井の提案を補完するうえで利用できそうな要素である．ただし，チェンの議論は必ずしも量子的対象の存在論に注目したものではないため，本稿の目的からすると，たとえば実在性基準や理論からの独立性が成立しない場合の存在論をいかに与えるのかといった点が気になるところである．そこで，次節では，今井の提案とチェンの議論を相互補完的に統合させることで，量子的対象の存在論の決定手続きを与えるための新たな枠組みを提唱する．

§5 量子的（ミクロ的）対象の存在論を与える手続きのモデル構築

§3 および §4 の議論は，異なる観点にもとづく議論だとはいえ，量子的（ミクロ的）な対象の同一性・個体性といった存在論を考えるうえで，それぞれ示唆的なものである．ただし，§3 における今井の提案に課題が残されていることはすでに述べた．また，§4 のチェンの実験的な個体存在論および実在論については，前節では直接的な検討を割愛したが，理論から独立してミクロ的対象の個体性・実在性を擁護できるケースの存在を示す試みという点からも，量子的対象の存在論に関するより大きな問題系の中に再構成して位置づけなおすに値するものと考えられる．

そこで，本節では，これまでみた議論を踏まえつつ，以下のような流れに沿って，量子的対象の存在論を与える手続きを表すモデルを構築する．まず，§3，および §4 の各議論において，いかなる仕方で（特に単一の）量子的対象の存在論が決定されうるのかをそれぞれ特徴づけ，それらをモデル (S-1), (S-2) として図式化する．次に，これらのモデルを統合する操作を行う．具体的には，今井（2024）の提案から得られるモデルにおける課題を，Chen(2016，2018，2023) から得るモデルを援用して補完することで，発展的に拡張させる．そして，こうして新たに得られた拡張的なモデル（S-3）にもとづいて，特定の事例における単粒子の存在論がいかなる手続きで与えられうるかを確認しながら，新たに得られたモデル（S-3）の評価・検討を行う．

5.1 モデル (S-1) の抽出

まず，§3 で述べたブエノの反実在論に対する今井の応答の枠組みにおいて，単粒子の存在論が与えられる手続きを確認しよう．この枠組みでは，仮にある設定文脈で（もしくは特定の設定文脈を離れて），実験対象である単粒子の決定不全性が成り立つとしても，別の設定文脈を考えることで，そこで理論的基準の重視すべき要素が変化する可能性に注目して，単粒子に関する反実在論を回避できる余地があることを示すのであった．

この枠組みを図式的に落とし込んで得られるモデル（S-1）は，図 1 のように表されるだろう[16]．図 1 は，ある（新たな別の）設定文脈において，もし理論的基準の重視すべき要素が新しく変化するのであれば，それに応じて，対象の存在論の選択がときに一意に規定される可能性があることを表している．もちろん，常に存在論が定まるとは限らない．もしその設定文脈における理論的基準を考慮しても，存在論を依然として（非経験的にも）決定できないのであれば，ブエノの指摘するとおり，対象の存在論にコミットできないことになる（反実在論）．

[16] なお，本稿で図示したモデル（S-1）～（S-3）（図 1～3）は，量子的対象に関する存在論の決定手続きを与える一種のフローチャート（流れ図）に相当するが，情報工学などで一般に用いられるフローチャートの表し方を必ずしも踏襲していない．その意味ではややフォーマルさに欠けると思われるだろうが，図中の文字情報などとの兼ね合いから視認性を優先することにした．図中において，とりわけ色付き角丸四角は条件分岐を表すものとする．

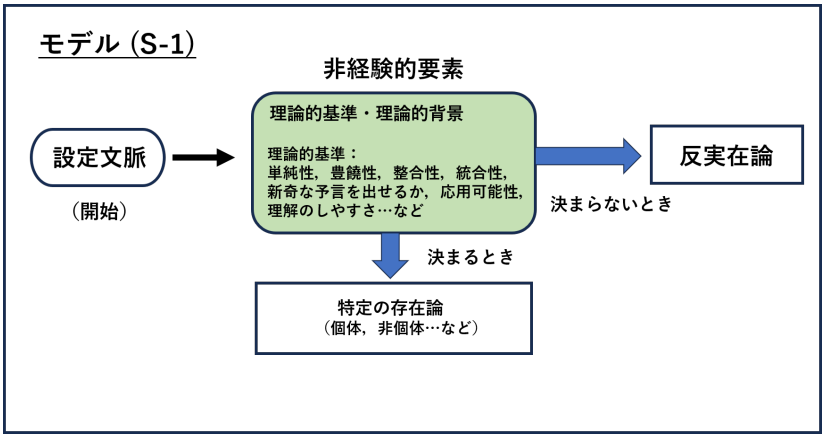

図 1　モデル (S-1)：設定文脈相対的に理論的基準のあり方を考える

5.2　モデル（S-2）の抽出

次に，§4 で述べたチェンの実験的な個体存在論・実在論において，単粒子の存在論が与えられる手続きを確認しよう．この枠組みで，チェンはミクロ的対象の実在が問題となる特定の実験的事例に注目し，そこでまず操作基準などの実在性基準の成否を判断して，そのうえで，(T1)[実体の存在を措定し，その性質を記述する理論の正しさからの独立性] および (T2) [実体と実験装置との相互作用を説明する理論の正しさからの独立性] の意味で理論から独立して対象が存在すると信じることを保証できるかどうかを問題にする．そして，もし実在性基準（たとえば操作基準）が成立し，理論負荷性も免れられるのであれば，何らかの対象を実際に操作できる以上，その対象に関して実在論をとることができる，という具合に議論が展開される．他方で，実在性基準が成立していても，理論負荷的であるとすると，その対象の存在論的身分は不安定となり，実在論を必ずしもとれなくなるだろう（たとえば注 14 で述べた準粒子のケースなど）．また，チェンも指摘するように，実在性基準は，対象の実在に関する信念を保証するための必要条件ではない（Chen 2023, p. 294）ため，こうした実在性基準が成り立たないからといって，対象に関する反実在論が帰結するとは限らない．

これより，チェンの枠組みを図式的に落とし込んで得られるモデル（S-2）は，図 2 のように表されるだろう．図 2 では，まず，チェンが特定の実験的事例に注目した実在論を志向することにもとづいて，ある事例を考えたとき，その事例において（存在

的性質に由来する）特定の実在性のための基準，たとえば操作基準（Chen 2023）や，単位量あたりの数の実験的確定の基準（Chen and Hricko 2023）など が成立するかどうかを考える．ここである特定の実験的事例に注目するのは，(S-1) で特定の設定文脈を考えたことと類比的である（今井の提案にチェンの議論を援用する動機づけの一つとなる）．そして，実在性基準が成立するのであれば，対象の存在が（とりわけ (T1), (T2) の意味で）理論独立であるかどうかを考える．もし理論負荷的であれば，チェンが支持しようとするような実験的実在論の事例からは外れる．他方で，もし理論から独立であれば，対象について実在論をとることができる．さらに，§ 4.1 でみた Chen（2016，2018）の実験的な個体存在論の基準（EI）とも組み合わせて，（EI）の 3 条件（操作可能性・分離可能性・構造的統一の維持可能性）がもし成立していれば，対象の実験的な個体性を主張することもできるだろう[17]．

他方，実在性基準や理論独立性が成立しない場合の対象の存在論については（彼の議論の枠組みの内部だけでは）決め手に欠ける部分がある．この点については，次にみるように，新たなモデル（S-3）ではある程度は補完可能となると思われる[18]．

5.3 新たなモデル（S-3）の構築

すでに得たモデル (S-1), (S-2) を統合して，新たなモデル (S-3) の構築を目指そう．まず，すでに指摘したように，(S-1) には，少なくとも次のような課題があるのであった．つまり，(S-1) では，ある設定文脈における注目すべき理論的基準の要素を与える手がかりが不在である．

そこで，筆者が提唱したい新たなモデル (S-3) は，図 3 のように表される．以下では，モデル (S-3) の内容を説明するとともに，これがどのようなプロセスで得られるかを述べよう．

まず，モデル (S-3) 構築のためのプロセスは，次のように記述される．

(1) (S-1) でのある設定文脈において，注目すべき理論的基準の要素を与える手がかりを明確

[17] § 4.1 でも述べたように，3 条件はそれぞれ実験的な文脈における個体化のための必要条件だが，3 条件全体は一体となって，この文脈における個体化の十分条件を構成すると考える（Chen 2016, p. 358）．それゆえ，このとき 3 条件のどれかが成り立たない場合は，実在性はいえたとしても，個体性まではいえるとは限らないだろう．

[18] なお，(S-2) において，(I) 実在性基準と (II) 理論独立性から先に検討した後に (III) の (EI) を検討する際に，(I) の実在性基準が個体性に由来することで，(I) の成否の検討に (III) の基準が必要となる可能性が生じるかもしれない．これについては，今回は (I) の実在性基準では主に操作基準を想定し，個体性に直接由来するような実在性基準は前提とせず，こうした循環が生じないような場合に議論を限定するものとする．後でみる (S-3) でも同様とする．

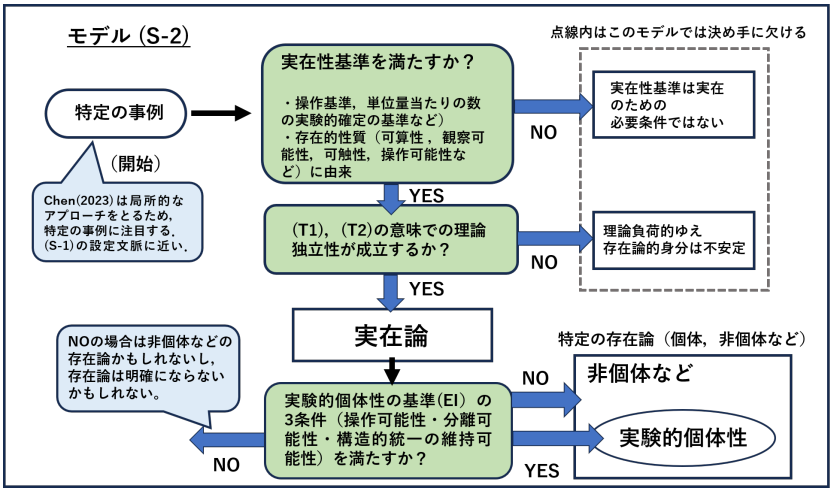

図 2　モデル (S-2)：実在性基準と理論独立性に注目しながら対象の実在性・個体性に関する信念を保証できるかを検討する

にするために，チェンの実験的議論を援用して補完する．具体的には，操作基準などの（I）実在性基準の成否，(II)（T1）および（T2）の意味での理論独立性の成否，そして，（III）実験的個体性の基準（EI）の成否が，その設定文脈において注目すべき理論的基準の手がかりを与えると想定する．

(2) (I),（II）の双方が成立する場合は，その対象について実在論を支持できる．（I），（II）の一方でも成立しない場合は，その場合に特定の理論的基準の要素に注目できるかどうかを考える．

(3)（I），（II）の双方が成立し，さらにもし (III) も成立していれば，（EI）から，その対象の個体性を支持できる．そうでない場合は，(2) と同じく，特定の理論的基準に注目できるかどうかを考える．

(4)（2），(3) で理論的基準に注目する場合にも，（I）～（III）を構成する各々の条件の成否にまで注目する．さらに，その設定文脈において，存在論を一意に決定するために注目すべき理論的基準・理論的背景の手がかりを与えるかどうかを考える．

(5) もし特定の存在論が決定できるのであれば，(I)～(III) のいずれかが成立していなかったとしても，その設定文脈における理論的基準に注目することで，対象が個体あるいは非個体などとすることができる．

(6) もし存在論が一意に決定されず，考慮可能な他のいかなる設定文脈に注目しても同様に存在論が決定できないのであれば，§ 3.1 で提示したブエノの (UDR) にしたがって，対象の存在論にコミットできなくなるだろう（反実在論）．

このような方針でモデル構築を行う動機を簡潔にいえば，理論的基準から存在論を

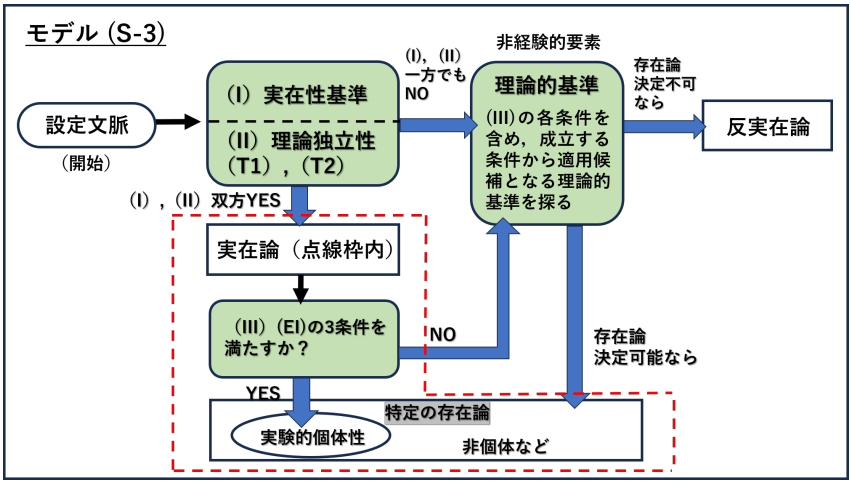

図 3　モデル (S-3)：(S-1) と (S-2) を相互補完的に発展させたモデル

一意に選び出せる見込みを，(I)〜(III) の成否に応じていわば段階的に評価することを可能にすることである．(I)〜(III) すべてを満たす場合は，対象が実験的個体性をもつと考えられる．だが，(III) が不成立でも，(I) や (II) が成立していれば，このことと理論的基準をあわせて考慮することで，まだ対象に存在論を与えられる見込みがあるかもしれない．他方で，(I) や (II) の一方でも成立していない場合でも，同じように理論的基準に訴えることで存在論を決定する道が全く閉ざされるわけではないが，その際に個体性をもつといえる見込みは（I），(II）の双方が成立しているときよりも低い可能性がある．（もちろん，非個体として決定される可能性もないわけではない．）

かくして，(S-1), (S-2) を統合した新たなモデル (S-3) が構築される．得られた (S-3) は，(S-1) においてある設定文脈で注目すべき理論的基準の要素の手がかりを実在性基準・理論的基準，さらには実験的な個体性基準が与えると考えることで，理論的基準を拡張させたほかにも，(S-2) だけからは対象の存在論を考察する決め手に欠ける部分を結果的に補完した点などから，元のモデル (S-1), (S-2) を大きく発展させたものだといえる．また，図 3 において，点線の内部では対象に関する（科学的実在論論争の意味での）実在論が成立していることも注目に値する．ただし，もちろん (S-3) にも依然として多くの問題が残されている．そこで，次に，具体的な事例を通して (S-3) のステップを確認しながら，(S-3) の評価・検討を行う．

5.4 モデルの評価・検討

ここでは，ブエノ流の反実在論への論駁自体を志向するのではなく，「単一の量子的（ミクロ的）対象を扱った特定の事例において，非経験的要素（理論的背景・理論的基準）を考慮することで，存在論を一意に決定できるか？」という問題意識に沿いながら，(S-3) の評価を行いたい[19]．個体性の理論的・形而上学的（伝統的）な基準・特徴づけ (§ 4.1 の (M1)〜(M6) を参照) からすれば，(EI) のような基準が成立していることと，対象が個体であることの間にはギャップがある．それでは，そのギャップはどうやって埋められるのか？ チェンによれば（つまり (S-2) の図式では），§ 4.1 で述べたような科学における実験の自律性・独自性や，§ 4.2 でみた存在的性質を実体に帰属させることで埋められるということになるだろう．他方で，(S-3) は，理論負荷性があったとしても，ギャップが埋められる可能性がまだ残るとする．なぜなら，その設定文脈において成立している事情次第では，存在論が決められる余地があるとするためである．それがどんな事情であるかはケースによるが，ここでは，Bueno (2018) や Chen (2023) も言及した走査型トンネル顕微鏡 (STM) による Xe 原子の操作実験の事例 (Eigler and Schweizer 1990) で考えてみる．STM は，非常に鋭く尖らせた探針を試料表面から 1nm 程度の距離に保持し，試料表面の凹凸を原子レベルの空間分解能（原子分解能）で観察する顕微鏡である（橋詰・一杉 2011, p. 3）．STM により，探針先端と試料間の電子雲（波動関数で表される）の重なりに電圧を印加した際に非接触の状態で流れるトンネル電流を検出しながら試料表面上を走査（スキャン）することで，試料表面のミクロな構造を観察することができる（cf. 魚崎 1991, p. 302）[20]．STM の名前の由来にもなっているトンネル電流は，量子力学的なトンネル効果（あるポテ

[19] なお，以下の評価・検討の議論では，実在論よりもむしろ存在論（個体性の成否）に焦点をあてていることから，(S-3) を示した図 3 におけるフローチャートと一部対応しないようにみえるかもしれない．この点については，説明のための便宜上の都合であることから容赦されたい．

[20] 2 枚の平板状の金属を接近させ，比較的小さいバイアス電圧 V を印加した際に観測されるトンネル電流密度 J_τ は，自由電子近似で，

$$J_\tau = \frac{2\pi e^2}{h} \cdot \frac{\kappa_0}{4\pi^2 d} \cdot V \exp(-2\kappa_0 d) \tag{3}$$

で与えられる（魚崎 1991, p. 302）．ただし，e は素電荷（1.602×10^{-19}C）を，h はプランク定数（6.626×10^{-34} J・s）を，d は金属間の距離をそれぞれ表す．また，κ_0 は波動関数の減衰距離の逆数で，電子質量 m（9.109×10^{-31} kg）および障壁の実効高さ ϕ（双方の平板の仕事関数の平均で，金属の場合は数 eV）と次式で関係づけられる．

$$\kappa_0 = (4\pi^2 \cdot 2m\phi/h^2)^{1/2} \tag{4}$$

ンシャル障壁よりも小さいエネルギーをもつ粒子（電子など）が，波動性の顕在化により，一定確率でポテンシャル障壁を透過する現象）によって生じる．IBM 社の物理学者アイグラーらは，STM を用いて，35 個の Xe 原子をニッケル表面上に“IBM”の文字状に配置し，操作中の様々な段階の配置された原子の画像を記録した（Eigler and Schweizer 1990）．

この実験における原子の存在論を与える手続きは，(S-3) に即していえば次のようになるだろう．まず，この原子操作の実験的事例を取り上げ，STM の探針によってニッケル表面に原子を文字状に配置できる（そして画像記録も残されている）という状況が，一つの設定文脈に相当する．

ここで，まず，理論負荷性の成否について考える．原子配置実験の設定文脈においては，原子の存在に関する信念を (T1) および (T2) の意味で理論から独立に保証できるかどうかが問題となる．まず，Chen（2023）は同実験において科学者たちが，「先端の最も外側の原子の真の化学的正体と構造は我々にも不明である（[T]he true chemical identity and the structure of outermost atoms of the tip are unknown to us）」（Eigler and Schweizer 1990, p. 525）および「先端とキセノン原子間の支配的な力はファン・デル・ワールス相互作用によるものであるが，こうした暫定的な結論にはさらなる調査が必要である（[T]he dominant force between the tip and the xenon atom is due to the Van der Waals interaction, but this tentative conclusion requires further investigation）」（Eigler and Schweizer 1990, p. 525）と述べることを引き合いに出しながら，それでも，こうした無知にもかかわらず，科学者たちが Xe 原子を配置できたと考えることに注目する．そのうえで，チェンは，「結果として，科学者たちは，先端がキセノン原子とどのように相互作用するかについての理論に関する知識なしで，STM の先端を使用して実験対象（それらはキセノン原子であるとする）を操作した．同様に、科学者たちは，キセノン元素の原子論の正しさに関する信念の保証なしで，実験対象を操作した．このケースは、テーゼ T1 を強力に裏付けている」と述べる（Chen 2023, p. 285）．よって，チェンによれば，(T1) は裏付けられる．しかし，他方で，(T2) が裏付けられるかどうかは怪しい．なぜならば，操作基準などを満たすことで，原子が存在し，実

ここで重要なことは，基本的には，J_τ が金属・試料間の距離に対して指数関数的に依存することである（ただし，自由電子モデルにしたがわない場合や，平板間のトンネルでない場合は，トンネル電流 J_τ は式 3 のように簡単な形では表されない）．このことから，トンネル電流は原子一個分（1 Å程度）の距離変化でさえ，非常に大きく変化する．実際，魚沼（1991）は，式 4 において $\phi = 3$ eV の場合のトンネル電流の距離依存性を，種々の電圧条件について計算した結果を与え，いずれの場合にもトンネル電流が 1 Å の距離変化に対して約 1 桁変化することを示している（魚沼 1991, p. 303, Fig. 2）．

際に原子が操作されていると主張するためには，原子（実在性が問題となる実体）と STM の先端（実験装置）との間の相互作用を説明する理論に訴える必要があるためである．たとえば，注 20 で与えたトンネル電流密度の式 3 などはその一例だろうが，この背景にあるのは量子力学をはじめとする理論である．この点は，§ 4.2.2 でみた，光学顕微鏡を用いた光ピンセットの実験ケースとは事情が異なる．注 15 でも述べたように，光ピンセットの実験の事例では，顕微鏡は実験対象を操作するために使用されていたわけではない．他方で，ここでの原子操作ケースでは，STM の探針はまさに原子を操作するために用いられている．実際，先にみた光ピンセットの実験ケースとは，対象の大きさや安定性にくわえ，顕微鏡の種類や動作原理も異なっている．こうした事情から，「STM 配置に関する実験的議論においては，理論とその一部の正しさが避けられない」とチェンも述べる（Chen 2023, p. 285）．

次に，（EI）の各条件の成否を考える（これは実在性基準の成否を考えることにもなる）．すでにみたように，少なくとも顕微鏡の画像記録からは，個々の実体を操作していること（異なる時点における異なる像を含んだ一連の系列）が STM の画像記録から判断されるため，（EI）のうち，操作可能性（操作基準）は満たされるだろう．また，個々の原子を操作できていることから，ある単一の原子とその周辺の環境や，複数の同種の原子同士を分離できている．よって，分離可能性も満たされるだろう．他方で，構造的統一の維持可能性までは（少なくともチェンが挙げる，ボース凝縮やフェルミ凝縮のケースと同様の意味では）この事例では成立自体を判定できないと思われる[21]．

チェンの議論（つまり（S-2）の図式）からすれば，（EI）の 3 条件が成立していないとすれば，その時点で，個々の Xe 原子について実験的な個体性は認められないと思われる．また，実在性についても，(T1), (T2) を裏付けるように理論独立性が満たされなければ，その時点で対象に関する実在論をとることができるかも怪しくなる（図 2 を参照）．他方で，（S-3）は，チェンほど実験主義的ではなく，理論負荷性があっても，存在論を決定できる可能性が残るとする．ここでの設定文脈においては，その背

[21] § 4.1 でも述べたように，構造的統一の維持（可能性）とは，個体の構成要素がある特定の仕方でひとつに構造化されつづけることをさす．たとえば，Chen（2016）が事例として挙げるボース凝縮体の事例では，多数の原子からなる集合体について，この条件が成立するとされる（凝縮体は巨視的量子効果による産物ゆえ，肉眼でも観察可能なのであった）．他方で，（複数の原子からなる系全体の構造とは別に）操作・分離される個別の原子を問題とするのであれば，同条件の成否は STM からも判断できないだろう．ただし，扱う対象が原子ではなく分子であれば，構造的統一の維持も成立する場合があるといえるかもしれない．なお，この点は，チェンが与えた 3 条件同士の関係（注 13 参照）と整合しないと思われるだろうが，注 13 でも述べた事情から，筆者は（少なくともここでの設定文脈については）構造的統一性の維持が，ほかの 2 条件と必要十分だとは想定しない．

後にある発想の候補となるのは次のような一種の奇跡論法的な考え方であろう[22].（ただし，通常の奇跡論法とは異なり，ここでは，特定の設定文脈に限って適用されていること，その設定文脈では対象（原子）の操作可能性・分離可能性という条件が成立すること，さらに，対象の実在性だけでなく存在論（ここでは個体性）までも確定しようとする意図で持ち出されていることに注意すべきである.）

つまり，もし，(EI) のうち 2 条件（操作可能性・分離可能性）が成立しているにもかかわらず，その設定文脈で原子に関する実在性および個体アプローチを支持できないとしたら，配置実験の技法を応用することで可能な装置（論理回路など[23]）が実際に技術的にうまく稼働しているのは奇跡（宇宙論的偶然の一致）ではないか，というものである．これは，理論的基準のうち，とりわけ**技術的応用可能性**（一種の科学の成功といえる）に訴えることで，対象の実在性および個体性を支持しようとする奇跡論法タイプの論証と考えられる．もちろん，奇跡論法自体は IBE の一種であるため，IBE 使用を疑問視する反実在論の側からすれば非説得的だろうが，少なくとも発見法的使用に対する擁護論（小川 2022）があることは§ 3.3(c) ですでに述べた.

ただし，IBE 使用の問題をおくとしても，こうした一種の奇跡論法が，Xe 原子に対する実在論だけでなく，存在論まで決定する力をもつかどうかについては，依然として疑問の余地がある．実際，トラップされた状況においてさえ，単一の量子的対象は非個体説とも問題なく両立するという指摘がなされている（Krause and Arenhart 2020, § 3 [pp. 8-11] など）.（ブエノ流の反実在論は，こうした点から帰結するのであった.）

これに対しては，次のような応答が可能かもしれない．そもそも，なぜ (M1)〜(M6) のような伝統的な個体性基準によって個体性の成否を考えるべきなのだろうか．(M1)〜(M6) は，主に日常的な事物のあり方にもとづいて概念分析から得られる個体性（これを 個体性$_1$ としよう）の特徴づけである．他方で，科学の進展にもとづいて，こうした“素朴な存在論”が改訂を迫られないとは限らない．実際，実験に注目したチェン

[22] **（無）奇跡論法（no miracles argument）**とは，「科学の成功からの議論」とも呼ばれ，次のように定式化されるような，実在論を擁護する議論である（戸田山 2015, pp. 55-56）．つまり，広く受容された科学理論が様々な意味で成功しており，その成功が理論が（近似的に）真であることによって最もよく説明できることから，その科学理論が（近似的に）真であるだろうと論じる議論である．ここでいわれる科学理論の「成功」については，(1) その理論が技術開発に応用され有用な装置や方法を生み出したこと，(2) その理論が導かれる予言がよく当たってきたこと，(3) いろいろな方法でいろいろな科学者が行ってきた実験の結果がそろっていること（収束）が主に挙げられる（戸田山 2015, p. 56）.

[23] たとえば，物理学者のハインリッヒらは，原子操作の技術を応用して大規模な分子カスケード（金属表面上に配置された不安定な分子が，連鎖反応によって移動を繰り返すもの）を実現・作成し，これにより論理回路が実際に動作したと報告している（Heinrich et al. 2002； cf. 橋詰・一杉 2011，第 3 章中 pp. 57-60）.

の個体存在論および実在論はまさしく，実験に自律性・独立性があることや，存在的性質を実体に帰属できる可能性があることに注目しながら，(M1)〜(M6) のような伝統的な個体性基準に固執すること自体を批判するものと考えられる．それゆえ，チェンの個体存在論の枠組みではもはや (M1)〜(M6) のような条件までを必要とはしない．

Xe 原子の配置実験という設定文脈においても，これと類比的に考えることができるだろう．つまりこの設定文脈においては，まず，個体説・非個体アプローチの双方に関して経験的には決定不全が生じるとはいえ，操作可能性・分離可能性が成立している．また，個々の原子について構造的統一の維持可能性までは成立しないにしても，代わりに，理論的基準の一要素である技術的な応用可能性（実体を個物のように操作・分離することで論理回路の作成・稼働に成功した）を念頭におくと，個体説が非個体説よりも相性がよいと思われる．なぜなら，原子操作によって論理回路のような装置を実現する動機付けは，非個体説ではなく個体説によって積極的に提供可能となると考えられるためだ．もちろん，他方で，非個体説をとる動機としては，量子性が絡む様々なほかの実験結果や，場の量子論との整合性などから，伝統的な個体の特徴づけである (M1)〜(M6) を量子的対象が一般には満たさないと考えられるといった事情があろう．ただし，それらはここで考えているローカルな設定文脈特有の事情ではない．

もっとも，このような応答は，単に「個体性」という言葉の適用範囲を広げようとしただけで，伝統的な意味での 個体性$_1$ の成立までを保証するものではないかもしれない．そうかもしれないが，すでに述べたように，そもそも科学における実験的実践の文脈を考えるうえでは， 個体性$_1$ に固執することが批判されており， 個体性$_2$ のようなものも，新たな個体性概念の範疇として認めてはどうかというのがここでの提案である（チェンの議論自体そう読むことはできる）．これは，ある意味では，個体性概念に程度を認める考え方にもつながる[24]．

もちろん，この文脈で， 個体性$_2$ にとどまらず， 個体性$_1$ までも支持する可能性が全くないと現段階で決まるわけではない．ただし，それを論じるためには，その設定文脈においてとりうる存在論の候補（ここでは個体説，非個体説など），成立する特定の条件

[24] たとえば，本稿の議論とはやや異なる脈絡・方法においてではあるが，哲学者のショーヴィエは，（一部の意味での）個体概念が少なくとも部分的にはもつ 3 要素として，存在論的自律性（ontological autonomy），形式的統一性（formal unity），質的単一性（qualitative singularity）があるとし，これら 3 要素がそれぞれ程度をもつことから，個体にも程度が導入されると論じる（Chauvier 2016, § 2.2 [pp. 30-39]）．もちろん，個体性になんらかの仕方で程度を導入するのであれば，そのような考え方の整合性や許容範囲などについては別途議論の必要があるだろう．ただし，本稿ではこの点までには立ち入らない．

（ここでは操作可能性および分離可能性），そして考慮すべき理論的背景・理論的基準（ここでは技術的な応用可能性など）の相互関係をより精緻に明らかにする必要がある．(S-3) においては，これらの関係の詳細な明示化まではできていない．この点に関しては，今回の議論の枠組みを大きく超え出でるため，本稿では深入りはせず，別の機会に委ねよう．

議論がやや錯綜したのでまとめると，（S-3）において，Xe 原子の操作実験という設定文脈を考えるうえでは，操作可能性・分離可能性という条件が成立していることにくわえ，ある種の奇跡論法的な発想から引き合いに出される技術的応用可能性（理論的基準の一つ）などの観点から，チェンの個体性に関する議論を類比的に適用することで，上記の意味での 個体性$_2$ を支持できる可能性はある．ただし， 個体性$_1$ を支持する積極的な論証までを（少なくとも現段階では）与えるものではない．

このように，(S-3) のモデルだけでは，ミクロ的対象の存在論を考察する上での指針を提供する見取り図としての側面は否めず，それ単独で存在論的問題を解決しきれるものではないことは事実である．今井の提案で問題とされた，IBE の使用や，反実在論に対抗する論理的可能性にとどまるといった点についても，（発見法的な IBE の正当化があることや，個体性$_2$ の支持可能性を指摘したとはいえ）（S-3）において完全に解消されているわけではないだろう．

それでは，（S-3）には価値がないのだろうか？ 筆者としては，これらの問題は依然として残されるものの，(S-3) のようなモデルを構築することには意義があると考えられる．今回得られたモデルから，たとえば，次のような知見などを見て取れる．

- (S-2)（図 2 参照）においては，実在性基準が成立しない場合や，それが成立しても理論負荷性が絡む場合においては，対象の存在論を考察する決め手に欠ける部分がある（灰色点線内部の状況）．しかし，(S-3)（図 3 参照）においては，特定の設定文脈において理論的基準を考える手がかりが，（S-1）のようにそれ単独ではなく，チェンの議論に由来する（I）～（III）の基準からも与えられることで，より広い観点に注目して存在論を考察する余地が得られることがわかる．
- (S-3) から，Bueno(2018) による決定不全論法から量子的対象に関する反実在論に行きつく段階以前に，いくつかの段階で，対象の存在論が決定される可能性もあることがわかる．
- 量子的対象に関して，ローカルな存在論的議論（量子力学の哲学）と，グローバルな実在論/反実在論に関する議論（実在論論争）の間の関係を部分的ではあ

るが，橋渡ししている（この点は先行研究でもあまり明らかにされていない論点と思われる）．

こうした知見は，§3，§4 でみたような個々の議論を整理したうえで，それらを統合して新たなモデルを構築したり，またこのモデルにしたがってミクロ的対象の存在論をあらためて考察したりすることで明確になった点である．筆者が知る限りでは，特に量子的対象について，特定の事例に注目したいくつかの議論を整理・抽象化・統合することであらたな存在論のモデルを図式的に得るこうした試みは前例に乏しく，新規性に富むものであろう．その意味では，現段階では（S-3）にはさらなる精緻化の余地が残されるものの，これをたたき台とすることで，個別科学におけるより豊かな存在論の研究につながる道が開拓されると考えられる．

§6　結論

本稿では，量子的対象の同一性・個体性を中心にした存在論の解明を目的として，これまでの複数の先行研究の示唆を受けながら，特に個別量子系における単粒子の実験的事例に注目しつつ，量子的対象の存在論を与える手続きに関するモデルを得た．§2 で，本稿の研究背景と問題設定を述べた後，§3 では，Bueno（2018）の決定不全論法に対する今井（2024）の反論・提案を確認し，そこで残された問題点の補完のために，チェンの実験的な議論を参照する動機が生まれることを指摘した．§4 では，理論的・形而上学的な観点とは別に，実験的な観点から対象の個体性や実在性を示す Chen（2016，2018，2023）の議論をみたうえで，理論から独立に，ミクロ的対象の個体性や実在性を保証する事例があるという主張を事例とともに確認した．そして，§5 では，今井（2024）および Chen（2016, 2018, 2023）の議論をそれぞれ（S-1），（S-2）としてモデル化したうえで，両モデルを相互補完的に統合して，新たなモデル（S-3）を得た．さらに，Xe 原子の配置実験を事例に，(S-3) の評価・検討を行った．同実験の設定文脈では，理論独立性や構造的統一の維持可能性といった条件の成立には疑念がある一方で，操作可能性・分離可能性は成立していることにくわえ，一種の奇跡論法的な発想から技術的応用可能性（理論的基準の一つ）などに訴える動機が生まれることにより，実験対象について文脈限定的には実験的な個体性（個体性$_2$ とした）を支持できる可能性を指摘した．現段階では（S-3）はラフ・スケッチに留まり，多くの課題・問題点が残されるうえ，（S-3）だけでは様々な場合における量子的対象の同一性・個体性の成否に白黒つけられるわけではない．その意味で今回得られたモデルは決して

“魔法の道具”ではないが，量子的対象の存在論を与えるための手続きを図式化するという，前例に乏しいこうした研究をたたき台として批判的に継承することで，具体的な科学的事例にもとづくより豊かな存在論を生み出す土壌を切り拓くことができるだろう[25].

参考文献

Adams, R. M. 1979. “Primitive thisness and primitive identity”, *The Journal of Philosophy*, 76(1): 5-26.

Anderson, M. H., Ensher, J. R., Matthews, M. R., Wieman, C. E., and Cornell, E. A. 1995. “Observation of Bose-Einstein condensation in a dilute atomic vapor”, *Science*, 269(5221): 198-201.

Ashkin, A., Dziedzic, J. M., Bjorkholm, J. E., and Chu, S. 1986. “Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles”, *Optical Letters*, 11 (5): 288–290.

Bigaj, T. 2020. “Synchronic and diachronic identity for elementary particles”, *European Journal for Philosophy of Science*, 10(3), 33.

———. 2022. *Identity and Indiscernibility in Quantum Mechanics*, Cham, Switzerland: Palgrave Macmillan.

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.

Chauvier, S. 2016. “Why individuality matters”, in A. Guay, and T. Pradeu (eds.), *Individuals Across the Sciences*, 25-45: 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,

[25] 本稿の内容は，2023 年 11 月 19 日に科学基礎論夏のセミナーにおいて筆者がオンラインで行った発表内容，および 2024 年 3 月 3 日に国立陽明交通大学（台湾）で開催された Taiwan-Japan Philosophy of Science Workshop にて筆者が行った発表内容を大きく発展させたものです．これらの機会において筆者に有益なアドバイスをくださった方々，中でも特に国立中正大学（台湾）の Ruey-Lin Chen 氏や，国立陽明交通大学（台湾）の Jonathon Hricko 氏に深く感謝申し上げます．また，本稿の内容について大変有益なコメントをくださった二名の匿名の査読者および伊勢田哲治氏（京都大学）にも深謝いたします．本研究は JSPS 科研費 JP 24KJ1410 の助成を受けたものです．

R.L. Chen, and M. B. Fagan (eds.), *Individuation, Process, and Scientific Practices*, 192–213: Oxford University Press.

———. 2023. “Are there experimental arguments independent of theories? In defense of a Hackingian approach to the scientific realism debate”, *International Studies in the Philosophy of Science*, 36(4): 279-297.

Chen, R. L., and Hricko, J. 2021. “Experimental individuation and philosophical retail arguments”, *Synthese*, 198(3): 2313-2332.

———. 2023. “Experimental criteria for accessing reality: Perrin’s experimental demonstration of atoms and molecules”, *European Journal for Philosophy of Science*, 13(1): 13.

Dehmelt, H. 1990. “Experiments on the structure of an individual elementary particle”, *Science*, 247(4942): 539-545.

Dieks, D., and Versteegh, M. 2008. “Identical quantum particles and weak discernibility”, *Foundations of Physics*, 38: 923–934.

Dieks, D., and Lubberdink, A. 2011. “How classical particles emerge from the quantum world”, *Foundations of Physics*, 41(6): 1051-1064.

———. 2022. “Identical quantum particles as distinguishable objects”, *Journal for General Philosophy of Science*, 53(3): 259-274.

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/ 2025 年 1 月 30 日アクセス.

French, S., and Redhead, M. 1988. “Quantum physics and the identity of indiscernible”, *British Journal for the Philosophy of Science*, 39: 233–246.

Gelfert, A. 2003. “Manipulative success and the unreal”, *International Studies in the Philosophy of Science*, 17 (3): 245–263.

Ghiselin, M. T. 1974. “A radical solution to the species problem”, *Systematic Biology*, 23(4): 536-544.

Hacking, I. 1983. *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy*

of Natural Science, New York: Cambridge University Press. [イアン・ハッキング. 2015.『表現と介入』, 渡辺 博 訳, 筑摩書房．]

———. 1985.“Do we see through a microscope?”, In *Images of Science: Essays on Realism and Empiricism, with a Reply from Bas C. van Fraassen*, edited by P. M. Churchland, and C. A. Hooker, 132–152. Chicago and London: The University of Chicago Press.

Hawley, K. 2006. “Weak discernibility”, *Analysis*, 66(4): 300-303.

———. 2009. “Identity and indiscernibility”, *Mind*, 118(469): 101-119.

Heinrich, A. J., Lutz, C. P., Gupta, J. A., and Eigler, D. M. 2002. “Molecule cascades”, *Science*, 298(5597): 1381-1387.

Krause, D. 2011. “Is Priscilla, the trapped positron, an individual? Quantum physics, the use of names, and individuation”, *Arbor*, 187(747): 61-66.

Krause, D., and Arenhart, J. R. 2020. “Identical particles in quantum mechanics: favouring the Received View”, arXiv preprint, arXiv:2004.13517.

Kuhn, T. 1977. “Objectivity, value judgment, and theory choice”, in T. Kuhn, *The Essential Tension: Selected Studies in Scientific Tradition and Change*, 320-339, Chicago: University of Chicago Press.

Ladyman, J., and Ross, D., Spurrett D., and Collier, J. 2007. *Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalized*, New York: Oxford University Press.

Muller, F. A., and Leegwater, G. 2022. “The case against factorism: On the labels of ⊗-factor Hilbert-spaces of similar particles in quantum mechanics”, *Journal for General Philosophy of Science*, 53(3): 291-306.

Muller, F. A., and Saunders, S. 2008. “Discerning fermions”, *British Journal for the Philosophy of Science*, 59: 499–548.

Muller, F. A., and Seevinck, M. 2009. “Discerning elementary particles”, *Philosophy of Science*, 76: 179–200.

Perkins, T. T., Quake, S. R., Smith, D. E., and Chu, S. 1994. “Relaxation of a single DNA molecule observed by optical microscopy”, *Science*, 264 (5160): 822–826.

Redhead, M. and Teller, P. 1991. ”Particles, particle labels, and quanta: The toll of unacknowledged metaphysics”, *Foundations of Physics*, 21: 43–62.

———. 1992. “Particle labels and the theory of indistinguishable particles in quantum mechanics’, *British Journal for the Philosophy of Science*, 43: 201–218.

Saunders, S. 2003. “Physics and Leibniz’s principles”, in K. Brading and E. Castellani, (eds.) *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, 289-307, New York：Cambridge University Press.

———. 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.

Teller, P. 1983. “Quantum physics, the identity of indiscernibles and some unanswered questions”, *Philosophy of Science*, 50: 309–319.

van Fraassen, B. C. 1980. *The Scientific Image*, Oxford: Clarendon Press. [B.C. ファン・フラーセン. 1986.『科学的世界像』 丹治 信春 訳, 紀伊國屋書店.]

———. 1985.“Empiricism in the philosophy of science”, In *Images of Science: Essays on Realism and Empiricism, with a Reply from Bas C. van Fraassen*, edited by P. M. Churchland, and C. A. Hooker, 245–305. Chicago and London: The University of Chicago Press.

Wang, M. D., Yin, H., Landick, R., Gelles, J., and Block, S. M. 1997. “Stretching DNA with optical tweezers”, *Biophysical Journal*, 72 (3): 1335-1346.

今井 慶悟. 2022.「量子力学における粒子の識別可能性 ―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)

———. 2024.（研究ノート）「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―」,『科学哲学科学史研究』, 第 18 号: 29-40.

魚崎 浩平. 1991.「電気化学の周辺を探る機器分析入門―走査型トンネル顕微鏡」,『電気化学および工業物理化学』, 59 巻 4 号: 302-307.

大畑 浩志. 2024.「量子的対象とは何か ―このもの主義的束理論に基づくアプローチ―」,『科学基礎論研究』, 51(1-2): 93-113.

小川 亮. 2022.「哲学の一般的方法としての「最良の説明への推論」」,『科学哲学』, 55（1）: 1-21.

戸田山 和久. 2015.『科学的実在論を擁護する』, 名古屋大学出版会.

戸田山 和久 (編）. 唐沢かおり（編）. 2019.『〈概念工学〉宣言! ―哲学×心理学による知のエンジニアリング―』, 名古屋大学出版会.

橋詰 富博, 一杉 太郎. 2011.『走査トンネル顕微鏡技術』, 岩波書店.