

量子的粒子の通時的識別可能性  
Diachronic discernibility of quantum particles

今井 慶悟

**Abstract**

It is said that particles of the same type cannot be distinguished in principle in quantum mechanics. It has been discussed so far whether or not quantum particles satisfy the “Principle of the Identity of the Indiscernibles” (PII) for the sake of the ontology of quantum mechanics. In this paper, first, we point out that the previous studies have been solely concerned with the synchronic discernibility of particles, and that the diachronic aspect has been ignored so far. Then, we consider in what sense discernibility must be required given that PII holds for quantum particles that change over time.

**1 研究テーマ**

量子力学がいかなる存在論を措定しているかといった物理学における形而上学的問題の探求の一環として、量子的な同種粒子と「不可識別者同一原理」(PII: Principle of the Identity of Indiscernibles) の関係がこれまで検討されている。だが、先行研究が扱ってきたのは専ら粒子の共時的な識別の問題で、時間的に変化する系における量子的粒子の識別はほとんど議論されてこなかった。そこで、通時的な側面から量子的粒子と PII との関係を検討する。

**2 研究の背景・先行研究**

我々の身の回りは様々なモノで溢れている。こうしたモノの同一性や区別可能性の本質については、古くから哲学上の問題とされてきた。とりわけ本稿で重要となるのが、ライプニッツが主張したとされる「不可識別者同一原理」—あらゆる性質において区別できない対象は同一だとする原理—である。

数・集合・人格などのように時空間において形をもたない対象を除けば、身の回りのモノを要素還元主義的な観点からみたとき、モノの究極の構成要素は素粒子だといえる。量子統計力学の知見によれば、同じ種類の量子的粒子は原理的に区別できないとされ(不可識別性)、量子的粒子は(複合粒子も含めて)フェルミ粒子とボース粒子に大別される。こうした事情から、ミクロな粒子に対しても、日常的な物体と同様の個性性を付与できるとする想定は、必ずしも自明なものではなくなる。同種粒子は原理的に区別できないのだから、PII を考慮すると、同種粒子は「全く同じ」(数的に同一)ということが帰結するように思われる。しかし、一方で PII は量子的な状況下では破れている可能性もある。そうだとすると、「異なるはずのモノが(異なるはずなのに)そ

の性質から区別できない」ということになる。すると、粒子に個性性を付与するには単なる性質ではなく、「このもの性」(haecceity)のような、他の性質に還元できない何らかの形而上学的概念に訴える必要があるのだろうか？

こうした問題意識のもと、同種粒子と PII との関係がこれまで研究されている。先行研究は便宜上、(a) : 2000 年代初頭以前, (b) : 2000 年代初頭以降, (c) : (b) への批判 という 3 段階に分けられるが、その前に、同種粒子の不可識別性と PII について補足しよう (補足は [5] § 2-4 などを参考とした)。

#### 【同種粒子の不可識別性】

まず、不可識別性自体は量子論における仮定であり、理論的な導出によって得られるものではない ([13], p.346)。しかし、こうした仮定の妥当性は様々な実験結果からも実証されているために、量子論における基本的な一原理だと考えられている。これを支持する一例として、古典論と量子論での粒子の統計的な振舞いの違いがある。

いま、二つの箱 A, B を用意し、これらの箱に二粒子を入れる操作を考えたとき、系の状態は何通りあるかを考えよう。まず、古典論の場合は、二粒子をそれぞれ a, b とラベルづけると、粒子 a, b 共に A にあるか、a が A で b が B にあるか、b が A で a が B にあるか、a, b 共に B にあるかの 4 通りの場合が考えられる (よって、各状態をとる確率は 1/4)。

一方、量子論での統計は次の (ア), (イ) のいずれかである。まず、(ア) ボース粒子の場合 : 二粒子が共に A にあるか、一方が A で他方が B にあるか、二粒子が共に B にあるかの 3 通りしかない (よって各確率は 1/3)。古典論とは異なり、A, B にそれぞれ粒子が一つずつ存在する状態が 1 通りしかないのは、同種粒子の不可識別性のために、粒子同士を入れ替えたときの全系の状態と元の状態が本質的に同等で、2 つの独立な場合とみなせないためである (これを置換不変性と呼ぶ)。次に、(イ) フェルミ粒子の場合 : 一方が A で他方が B にあるという 1 通りしかない。なぜなら、フェルミ粒子では複数の粒子が同一の状態をとることが禁じられているためである (二粒子共に同じ箱には入れない)。これはパウリの排他原理と呼ばれ、系全体の状態を表す波動関数の (反) 対称性から帰結する。

#### 【不可識別者同一原理】

PII は、形式的には一般に次のように表される。

$$\forall x \forall y \forall F (Fx \leftrightarrow Fy) \rightarrow (x = y) \quad (1)$$

(1) において、 $x, y$  は適当な個体、 $F$  は何らかの性質を表す述語である。こ

れまで PII の妥当性に関しては様々な議論がなされ、反論も挙げられている。その中でも有名なもののひとつが、Black[2] による二つの球の思考実験である。二つの球体だけが存在し、それ以外には何も存在しないような完全に対称的な宇宙を想定する。両球は一定の距離だけ離れているが、二つの材質や形状、大きさなどのあらゆる属性を共有しているとする。このとき、これらの球は (仮定より) 数的に異なるにもかかわらず、区別できない。よって式 (1) は破れているようにみえる。

こうした議論の妥当性は、(1) での性質  $F$  の中にどのようなものまでを認めるのか次第で変わりうる。 $F$  の範囲内に、対象そのものがもつ「内的な」性質のほかにも、時空間などのように状況に依存する「外的な」性質や、関係的な性質など、より広範囲の性質まで含めるほど、 $F$  はより論理的に緩やかな主張となるためである。

不可識別性と PII について補足したので、先行研究での議論を概観しよう。

(a)2000 年初頭以前：2000 年初頭までは主に、量子的な同種粒子は PII を破るものであり、PII を擁護するのであれば、単なる性質に還元されないこのもの性のような形而上学的概念を導入する必要があるとされた ([6], [9])。先に述べた粒子の統計的振舞いから、古典的粒子と異なり、量子的粒子はラベルを付けて区別できないことが示唆される。その意味で量子的粒子は個性をもたず、2つの異なる同種粒子は内的な性質 (質量、電荷、スピンなど) で識別不可能である。よって同種粒子に関して PII は破れているように見える。また、状態に依存した外的な性質については、量子的粒子は古典的粒子と異なり、時空間での確定した軌跡をもたないため、粒子の経路による識別も難しいだろう。

(b)2000 年代初頭以降：しかし、2000 年代初頭以降、(a) とは反対の結論を導く研究が相次いでなされた ([10], [8], [9] など)。[10] は、同種粒子との関係で重要となる PII の解釈に関して、識別に用いる性質の特徴を次のように 3 つに分けた上で、識別可能性を分類する。

1. 対象が絶対的に識別可能 (absolutely discernible)  $\leftrightarrow$  それらは、一項述語で表される性質のうち少なくともひとつに関して異なる
2. 対象が相対的に識別可能 (relatively discernible)  $\leftrightarrow$  それらは、少なくともひとつの順序関係に関して異なる  
(例：特定の時刻同士の「より早い/より遅い」という関係。)
3. 対象が弱く識別可能 (weakly discernible)  $\leftrightarrow$  それらは少なくともひとつの対称的かつ非反射的關係に関して異なる。

(例：ブラックの二つの球 a, b.  $R(x, y) =$  「 $x$  は  $y$  と距離  $d$  にある」とすると、 $R(a, b)$ ,  $R(b, a)$  は真だが、 $R(a, a)$ ,  $R(b, b)$  は偽。故に、a, b は弱く識別可能である。)

この上で、スピン  $1/2$  の電子対の一重項状態において、「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・非反射的關係があることから、電子 (フェルミ粒子) は「弱く識別可能」である (よって PII は部分的に擁護される) と論じられる<sup>1</sup>。

(c) (b) への批判：(b) のような議論を基礎にした一連の研究に関しては、あらかじめ粒子同士の数的な差異性を前提とした循環論法だという批判 [7] や、(b) での議論は Black の二球のような古典的粒子には適用できても、量子的粒子にも並行して適用するのは妥当でないという批判 ([3] など) がある。

### 3 筆者の主張

先に、近年の先行研究では識別可能性を分類した上で、弱い識別可能性に基づきながら同種粒子において PII を擁護していることをみたが、これまでのこうした議論は、同一の時刻にある二粒子が識別可能かどうか、すなわち共時的な識別可能性を問題にしている。一方、量子的粒子の識別が問題となる状況は、そうした共時的な場合だけでなく、時間発展を考慮した通時的な場合もあるだろう。量子的粒子の通時的な識別可能性に関してはこれまでほとんど論じられていない (ただし、近年 [1] が扱っている)。以下では、時間発展する系において、粒子の通時的な識別可能性を検討しよう。

まず、通時的同一性が問題となることは、同種粒子の不可識別性が、置換不変性などとは別に、しばしば次のような粒子の散乱過程に注目して導入されることから示唆される ([12], [13] など)。

図 1 はスピンが上向きの二つの電子を左右から衝突させて、衝突後に散乱する電子を検出器  $D_1, D_2$  で検出する実験を重心系で表したものである。(a) では左から発射された電子は右から発射された電子と相互作用して散乱角  $\theta$  で散乱し、検出器  $D_1$  で検出される。一方、(b) では左から発射された電子は散乱角  $\pi - \theta$  で散乱し、検出器  $D_2$  で検出される。検出器  $D_1, D_2$  でそれぞれ電子を検出するとき、それがもともと左からきた電子なのか右からきた電子なのかを知ることは原理的にできない。ここで「原理的に」識別できないというのは、測定装置の技術的限界のような我々の無知によって区別できないということではなく、どれほどの精度を以て測定しても、自然の本性として、二粒子に名前をつけた上で系の時間発展を追えないということだ ([13], pp. 343-344)。そのため、少なくとも同種粒子における散乱過程のような状

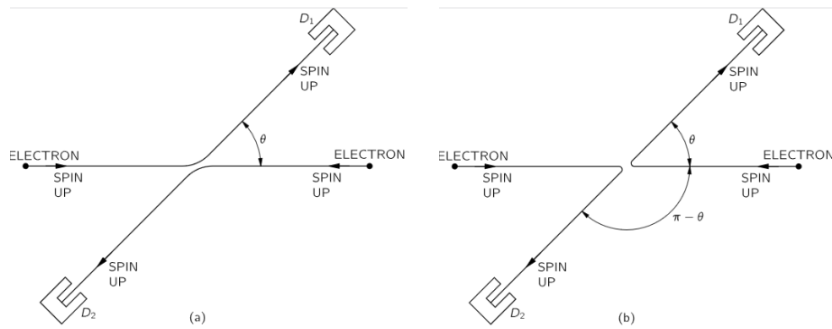


図 1: 粒子の散乱実験 (図は Feynman *et al.* [4] より)。

況下では、粒子の確定した「軌跡」という考え方は意味をなさない。同種粒子の散乱過程においては、本当は (a) と (b) のどちらかの過程を粒子がたどっているとはいえない。

一方、異種粒子の散乱過程であれば、たとえば  $D_1$  で検出した粒子が a か b かどちらかを、粒子の内的な性質に基づいて判定できる (通時的同一性が維持される)。これより、散乱過程では、衝突させる粒子同士が異種か同種かによって、粒子の通時的な同一性が左右される。それでは、時間発展が問題となる状況では、異なる時刻における各粒子間で PII はどの程度維持しうるのだろうか? 以下ではケース I, II でこのことを検討しよう。

#### ケース I: 単一の量子的粒子の運動

図 2 のように、E から時刻  $t = t_1$  で量子的粒子を入射し、他の粒子とは相互作用させずにそのまま  $t = t_2$  に検出器 D で検出するという過程を考える。このとき、直観的には入射粒子と検出された粒子は



図 2: 単一の量子的粒子の運動

数的に同一だと考えたい。もちろん、E から D に向かう過程で粒子は確定した軌跡を描いて運動しているのではなく、あくまで空間に確率的に分布しているという点で古典的粒子の運動状況とは異なることには注意されたい。このように、単一の量子的粒子の運動のもとでは粒子は通時的に同一だという直観は、どの程度 PII と整合的に維持できるのだろうか。

まず、少なくとも入射粒子と検出された粒子が質的に同一であることは保証される。よって、これらの粒子は絶対的には識別不可能である。一方、たと

例えば「E から入射されてから  $t$  秒経過している」というような、とりわけ時空間などに依拠した外的な性質を考えると、粒子は識別可能のように思われる。しかし、通時的同一性が問題となっている状況でこうした時空間などに依拠した識別を許すと、粒子が通時的に同一性を保ちつつ運動しているという直観を維持するのが途端に困難になる。もちろんこれ自体は古典的な対象でもあてはまることだが、古典的对象の場合は、四次元主義や三次元主義などに訴えて、時間のうちに存続する同一の対象という直観を維持することはできよう ([11], p.17)。しかし、量子的対象は少なくとも時空間的な連続性を欠いているため、そのような手法で通時的同一性を維持することは難しい<sup>2</sup>。かといって、識別に用いる性質から時空間などの外的な性質を初めから一概に除外してしまうと、仮に通時的同一性が失われていたとしても、粒子に同一性があると不適切に主張するおそれがある。

このように、量子的粒子の通時的な識別を考える上では、PII にどのような性質まで導入すべきかに関して、古典的对象の通時的な識別や、先行研究のような共時的な粒子の識別の場合以上に微妙な問題があるといえる。しかも、困難はこれに尽きない。ケース II では状況はより厄介である。

#### ケース II : 同種粒子の散乱過程

図 3 は同種粒子の散乱過程を図 1 より単純に示したものである。E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> から時刻  $t = t_1$  で入射した同種粒子が、 $t = t_2$  で相互作用し、 $t = t_3$  でそれぞれ検出器 D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> で検出されるという散乱過程を考

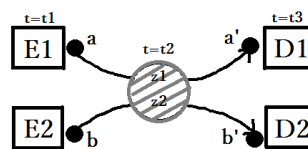


図3：同種粒子の散乱過程

える。始状態 ( $t = t_1$ ) の二粒子を a, b, 終状態 ( $t = t_2$ ) の二粒子を a', b' とする。同種粒子であるから、たとえば  $t_3$  に D<sub>1</sub> で検出された粒子が、 $t_1$  に E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> のどちらから入射された粒子かということは原理的に識別不可能である。よって、a' は a と b とも数的に異なるといえよう。しかし、一方で、a' は a や b と同種であるから、物理的性質は全く同じで、質的には同一である。このように、同種粒子の散乱過程においては、ケース I とは異なり、粒子の通時的な同一性が失われている。

以下では a と a' の識別可能性に注目しよう。もし PII が成立しているのなら、a と a' は何らかの性質によって識別されねばならない。まず、a と a' は同種粒子であるから絶対的には識別不可能である。それでは両者を識別するのに適切な関係的性質はあるのだろうか。ここで、ケース I から示唆されたように、通時的な変化の前後での粒子の識別にどのような性質までを導入

すべきかは綿密な検討を要することに注意されたい。我々の日常的な直観からすれば、一つの対象の時間発展を考えると、対象は通時的に同一性を維持するか、あるいは徐々に変化していつ次第に同一性を喪失すると考えるのが自然であろう。こうした見方では、始状態と終状態で対象が数的に同一か否かは、それらの状態での対象がもつ性質を比較することでわかる。

しかし、量子的な状況では、 $t_1$  で  $a$  と呼ばれた粒子がその後も数的に同じ粒子であり続けるかどうかは、系の時間発展において  $a$  と同種の粒子との相互作用が特定の時刻で生じるかどうかによって左右される。始状態と終状態での粒子が数的に異なるか否か（通時的同一性が失われるかどうか）は、単に二つの状態における粒子の性質だけで決まるのではなく、その過程で干渉が起きるかどうかで決まるというのが一つの見方である [1]。このように通時的同一性の判定には、系全体のたどった履歴が要求される。こうした事情から、散乱過程で始状態 ( $t = t_1$ ) における一粒子  $x$ （ここでは  $a$  もしくは  $b$ ）と終状態 ( $t = t_3$ ) での一粒子  $y$  ( $a'$  もしくは  $b'$ ) とを PII に則って識別するためには、

$\phi(x, y, z_1, z_2; t_c) =$  “ $x$  と  $y$  が同種粒子であり、かつある時刻  $t_c \in (t_1, t_2)$  において、 $x, y$  と同種の二粒子  $z_1, z_2$  が存在し、 $z_1$  と  $z_2$  が相互作用する”

などのような文の真偽に注目するのがよいかもかもしれない。粒子の識別のための具体的な述語の形式の探求は今後委ねるが、ケース II においては、異なる時刻の粒子の数的な同一性を判定するために、 $x$  や  $y$  以外の項も含んだ関係が要求されることがここから示唆される。

#### 4 今後の展望

本稿では、量子的粒子と PII との関係に関する先行研究をみた上で、これまでの同議論が専ら粒子の共時的な識別に関わり、粒子の通時的な変化には注意が払われてこなかったことを指摘した。その上で、散乱過程に注目しながら通時的に変化する粒子の識別可能性について論じた。ただし、本稿の内容は先行研究で見過ごされてきた側面に注目したものであり、これまでの議論の俎上に未だ十分に載ってはおらず、考察も定性的な範囲に留まっている。そのため、今後は先行研究の線に沿いながら、量子論の数学的な形式に基づくより精緻な検討を行う必要があるだろう。その上で、粒子の通時的な識別のために述語に要請される適切な条件を今後考察していきたい。

注

<sup>1</sup> ボース粒子に対しては当初、[8] は、無条件的 (categorical) ではなく確率的に (probabilistically) のみ弱く識別可能としていたが、のちに [9] が同議論を拡張し、結果的にはボース粒子に関しても、PII を擁護している。

<sup>2</sup> 霧箱実験などでは、不正確でも粒子の軌跡をほぼ連続的に追跡できると思うかもしれない。だが、霧箱中の雲を確認したからといって、量子的対象としての粒子が時間発展するさまを直接観察しているとは直ちにはいえないだろう。

## 文献

- [1] Bigaj, T. (2020): “Synchronic and diachronic identity for elementary particles”, *European Journal for Philosophy of Science*, 10.3: 1-17.
- [2] Black, M. (1952): “The Identity of Indiscernibles”, *Mind*, 61: 153–164.
- [3] Dieks, D. and Versteegh, M. (2008): “Identical Quantum Particles and Weak Discernibility”, *Foundations of Physics*, 38: 923–934.
- [4] Feynman, R., Leighton, R.B. and Sands, M. (1964): *The Feynman Lectures on Physics: Volume III* <<https://www.feynmanlectures.caltech.edu/>>, 2020/12/07 閲覧.
- [5] French, S. (2019): “Identity and Individuality in Quantum Theory”, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, in Zalta, N.(ed.), <<https://plato.stanford.edu/entries/qt-idind/>>, 2020/12/07 閲覧.
- [6] French, S. and Redhead, M. (1988): “Quantum Physics and the Identity of Indiscernibles”, *British Journal for the Philosophy of Science*, 39: 233–246.
- [7] Hawley, K. (2009): “Identity and Indiscernibility”, *Mind*, 118: 101–119.
- [8] Muller, F. and Saunders, S. (2008): “Discerning Fermions”, *British Journal for the Philosophy of Science*, 59: 499–548.
- [9] Muller, F. and Seevinck, M. (2009): “Discerning Elementary Particles”, *Philosophy of Science*, 76: 179–200.
- [10] Saunders, S.(2006): “Are Quantum Particles Objects?”, *Analysis*, 66: 52–63.
- [11] 倉田剛 (2017) : 『現代存在論講義 II 物質の対象・種・虚構』, 新曜社.



[12] 小出昭一郎 (1969) : 『量子力学 (II)』, 裳華房.

[13] 田崎晴明 (2008) : 『統計力学 II』, 培風館.

(京都大学)