唯名論者にとっての抽象性：時空領域の外側の物理世界 *

藤田翔

概要

These days, “scientific theory” deals with many theoretical entities. These entities include many things; universal entities to be instanced by many particulars such as electrons and balls, high-order physical abstract objects calculated mathematically not to correspond to observables such as Actions or Lagrangians. We can understand these entities in theoretical models and frameworks within which to theorize facts and phenomena by “idealization” and “abstraction”. Though Scientific realists commit theoretical entities, A question rises. Which kind of entity do they assert realism of? Universals in a model or particulars in an actual world? The former is realism and the latter is nominalism. In this paper, I consider whether particulars don’t have abstract features at all because a distinction between universals and particulars is often compared to that between abstractness and concreteness. While concrete physical objects interact with us through experiments and observations causally, abstract objects like mathematical numbers and sets are causally inert. So in fact, causality is a very important aspect to distinguish universals and particulars. But I want to show that the microphysical theory gives abstractness to particular quantum objects even if we choose a nominalistic approach and that some particulars oscillate in a physical abstract realm other than in spacetime. Therefore, I will introduce two new kinds of abstract features in microphysical particulars; one derived from only structural characters for material particles, the other from an abstract realm for virtual particles to oscillate in. These abstractnesses are what not universals in models but particulars in worldly systems possess.

Keywords: scientific realism, structural realism, metaphysics of quantum theory, nominalism, model

1　はじめに

科学的実在論の主張は今や多義的である。電子に関する実在論 VS 反実在論のように、物理学を初めとする科学理論に登場する理論的存在者をどのように位置付けるのかというテーマは、科学的説明の意義とも密接に関わっている。これは、観測不可能な存在者を持ち出す科学理論をどのように解釈

* *CAP* Vol. 13 (2021) pp. 141-173. 受理日: 2021.5.24 採用日: 2021.12.4 採用カテゴリ: 原著論文 掲載日: 2021.12.28

するのかという、現代科学哲学の主題に端を発しているが、最近の議論 (Psillos 2010; 2011) では数学の哲学や普遍論争 (Quine 1960; Field 1980; Balaguer 1998) をも巻き込んで発展している。

数学による抽象的な理論的存在者は実在できるのかどうかという問い掛けが、科学的実在論の論争に深く関わっている。数学によって記述される抽象的存在者は虚構 (fiction) に過ぎず、実際に時空内に存在している具体的な (concrete) 個々の物理的存在者のみ実在を認めるという唯名論的な立場がある (Yablo 2001; 2008, Burgess& Rosen 1998)。確かに理論の中には多くの数学的モデルや理論モデルが存在し、それらは端的に抽象的である。その一方で例えば理論的存在者は、シロスによれば経験科学の理論に登場する NMAO(no mathmatical abstract object) としてモデルの中で実在しており、しばしば純粋な意味での数学的な存在者である MAO(mathmatical abstract object) とは区別されている (Psillos 2010)。電子は NMAO の事例であるが、これはこの世界に存在する個々の電子というよりは、それらによって共通に例化される普遍者を指示している。この普遍者は言わば全ての個々の電子の共通点を網羅しており、モデルにおいてそれらが満たすであろう自然法則の理想的な体現者であるという意味で (Cartwrite 1983)、「十分に単純化された抽象的存在者」である。科学的実在論者は、この抽象的な理論的存在者の実在にコミットすべきなのか、あるいは個々の電子のような、この世界に存在する具体的な存在者のみ唯名論的に認めるべきなのかという問題に直面しているのである。

水分子や細胞など、理論的存在者は物理学だけでなく、あらゆる経験科学に登場するが、こういった存在者の措定の背景には、モデルや因果性に関する科学哲学上のテーマが多く含まれている (Psillos& Curd 2010)。科学的説明の中で、因果的説明は大きな役割を占める一方で、理論の有用性や包括性も重要なファクターである。特に現代物理学は、具体的な物理的領域での現象レベルでの因果関係を超えて、統一的な法則や、数学的対象による高階の説明の構造的パターンも与えているのも事実である。

抽象性の中にも様々な段階があり、物理学的な存在者は一層単純化されている。実際に「錆びた鉄球」よりも、単なる「鉄」の方が多くの具体物に例化されるように、情報の単純化はそれだけで抽象性を増す。上記の NMAO を普遍者として捉える以上、抽象的であることは大前提にはなるが、それを例化する具体的な物理的存在者の数で言えば、やはり水分子や～細胞といった複雑な特定の構成物よりも、それらを構成していると言われている漠然とした電子や原子の方が圧倒的である。物理主義の中でも特にミクロ物理主義 (microphysicalism) 的な捉え方をすれば、この物理世界の存在者と現象は、全て粒子の集まりとそれらの相互作用に還元されるという表現ができるわけである。こういった還元や存在論的な優先性の主張には、多くの問題も付随するが (Hüttemann 2004)、少なくとも物理学が化学や生物学等の複合的な系を扱う科学理論以上に、あくまで構成要素同士の相互作用として、より根本的なレベルで現象を捉えようとしているということは端的に言えるだろう。ゆえに経験科学の中で物理学は最も基礎的であり、究極的な構成要素のメカニズムを扱う物理学は、他の経験科学と比べれば、より抽象度合いの高い存在者を扱う傾向にあると言える。

そして、物理学はこの段階的な抽象性とは別の意味での抽象性も備えている。それは言わば、シロスの文脈で言うところの NMAO を認めない唯名論にとっても、最早認めざるを得ない新たな抽象性である。本論は、この物理学に特有だと思われる抽象性を明らかにするために、この世界の具体的な

存在者を物理学理論を元に、果たして唯名論的な立場でどこまで追求することが可能なのかということを示したい。もし、抽象性が上記の段階的な意味しか持ち得ないならば、それは具体的な存在者のみを認める唯名論者にとっては消去できるはずである。単純化は理論やモデルの内部で起こる認識論的な手段であり、実際に物理世界に存在する具体的な存在者とそれが担う現象の中にこの抽象性が介在する余地はないだろう。しかし、量子物理学理論を唯名論的に捉えていくことで、具体性の対義語としての抽象性とは異なった、新たな意味での抽象性が炙り出されるのである。

重要なのはこの量子物理学理論が記述する物理的な意味での抽象性、すなわち世界の側にある抽象性を掘り下げることである。実際に物理学理論は現象の構造に対して、理想化や抽象化を通じて普遍構造に到達するが、仮に個々の具体的な存在者の情報に目を向けたとしても、それらが究極的に抽象化から免れることはない。その一例として、量子物理学が正しい限り、物体の構成要素に関する究極の事実とは、素粒子と言われる対象の振る舞いであるが、これらの対象は、個々にではなく抽象的な構造のみから特徴を与えられる。さらに、場の構成要素である仮想粒子は我々の住む空間ではなく、物理的ではあるが抽象的な仮想空間の中で振動しているように描かれている。場そのものは空間的に広がっていると記述されるが、その構成要素はこの実空間領域とはまた異なった抽象的な領域で運動しながら、物理現象を通して我々の時空領域との因果性も備えているのである。量子論の記述を単に抽象的だと帰結するのは容易いが、その意味をさらに踏み込んでカテゴライズすることは、量子世界の存在論的な解釈をする上で有用であろう。

本論で取り上げたいのは量子物理学による、この唯名論的な探究の中で生まれる２通りの意味での「抽象性」である。１つ目は構造によって外的に与えられる、個々の粒子の備える抽象性であり、２つ目は仮想粒子の存在領域としての抽象性である。前者は、多粒子系における粒子の同一性や区別の不可能性という観点で、哲学的なテーマとして長きに渡って取り上げられており (元々は French& Redhead 1988; Lowe 1994; French& Krause 1995 等[*1])、殊更に存在的構造実在論 (OSR) の文脈 (Ladyman 1998; French & Ladyman 2003; Ladyman 2007; French 2010) でも多く論じられてきたが、本論ではこういった立場を独自の唯名論的なアプローチと関連付けて解釈したい。一方で後者に関する抽象性が直接的に取り上げられることは殆どなく、そもそも量子論の記述自体が抽象的だからと、その他の数学的機構やモデルによる抽象性と一括りにされている印象を受けやすい。しかし抽象性にも様々な意味があり、特に後者はこれまで個別者の特権であった時空内の存在領域という概念を、より拡張した事例とも言えるだろう。この事例は現代物理学において、物理的領域の一般化へと繋がり、時空が最も基礎的な存在者というわけではないという、脱時空的な描像 (Paul 2012) とも特に整合的である。これらの抽象性は普遍者の備える単純化による抽象性ではなくて、理論的存在者を実在論的にではなく唯名論的に捉えることで得られる、個別者自体の備える抽象性である。

本論の流れは次の通りである。２章では物理学における抽象的な存在者の分類を導入し、物理世界の具体的な存在者との対応付けを行う。その上で従来の抽象性の意味を確認しながら、実在論者と唯名論者がどういった観点において、それぞれ科学的実在論の立場を取り得るのかということを整理する。３章では上記の新たな２通りの抽象性に順に触れて、２章の考察と比較しながら個別者の持つ抽

[*1] 逆に粒子の区別が可能という立場としては、ここから派生する Saunders 等の議論がある。

象性を特徴付ける。最後にこの新たな抽象性から得られる新たな形而上学的観点の可能性と、現代物理学との関わりを述べる。

2　科学理論に登場する２通りの抽象的な存在者

物理学理論の中に登場する抽象的な存在者は、２通りの存在者に大別される (Psillos 2010)。１つ目が「物理的な抽象的存在者」(命名自体は Dummet 1991, 300) であり、２つ目は純粋な数学的存在者である。この論文ではシロスの表現に倣って、前者を NMAOs(non mathematical abstract objects)、後者を MAOs(mathematical abstract objects) と呼ぶことにする。すなわち前者のグループには具体的な物理世界に何らかの対応者を持つ普遍者等が該当し、後者のグループには数や集合などの数学の理論の中に登場する対象や構造が該当する。そして両者はともに、物理世界の現象を説明するための認識論的なツールとしてモデルになることはあれども、物理世界とは因果関係を持たないという特徴を持つ。両者の完全な区別は難しいところではあるが、まずはこれらの２つのカテゴリーを簡単にまとめておきたい。

2.1　NMAO と MAO

数学的に記述される抽象的な存在者は、それが物理世界の何かを表象しているという点で有用である。NMAO はモデルに登場する、物理的な性質を帰属されるような抽象的な存在者であり (Psillos 2010 p.950)、非数学的とは言え、数学的な構造も確かに備えている。そしてモデルにおける数学的な記述は、物理的な系に部分的に対応している。

例えばシロスが提示しているように、線形調和振動子 (LHO) の科学的説明の例を取り上げてみる (p.951)。調和振動子とは、単振り子の往復運動を表すモデルにおける、永久に同一の周期で往復運動を繰り返す対象である。しかし、現実の振り子は空気抵抗を受け、振幅が大きくなればそれだけ理論上の調和振動子の振る舞いから遠ざかり、十分に時間が経過すればやがて静止する。実際に調和振動子はこの物理世界のどこにも存在しないが、それでも現実の振り子の運動をある程度正確に近似しており、その振る舞いを説明している（周期が振幅の平方根に比例し、振幅の長さを変えると周期も変化する等々）。この意味で調和振動子は十分に抽象化かつ理想化されたモデルではあるが、この理論的対象は、個々の現実の振り子の運動を表象しているという点で、実際の物理世界の中に対応者を持っている。言い換えるならば、数式などの普遍的な数学的構造は、物理世界とは直接因果関係にはないものの、それでも物理世界の因果構造と何らかの同型性を備えている (French&Ladyman 2003)。

一方で、数や集合などの純粋な数学的な対象は、科学理論に登場する理論的対象とは異なって、物理世界に対応者を持たない。不可欠性論法に代表されるような、クワインやそれに準ずる立場を取れば、これらの純粋な数学的対象の実在を認めることも可能だが (Quine 1960)、これらの実在の議論は本来は数学の哲学や形而上学におけるテーマであり、従来の科学哲学の文脈とは直接関係を持っていないように思われる。

しかし、NMAOs と MAOs との厳密な区別は難しい。現に上記した LHO のように、NMAOs は物理量としての数学的構造を部分的に備えており、最早理論モデルにおいて数学的対象と非数学的対象の二分はナンセンスである。NMAOs を部分的に担う数学的対象の例としては、シロスは他に位相空間やベクトル空間、そして群などを挙げている (p.951)。他にも量子論におけるヒルベルト空間などは、物理世界の現象を説明する上での補助的な数学的機構であり、物理世界に直接の対応者を持たない。すなわち、これらの数学的部分無くして NMAOs は語れないために、物理的な抽象的存在者にとって数学的構造は必須なのである。

そして科学理論は、各々の理論モデルにおいて、数学によって記述された構造を段階的に持っている。すなわちモデルの中の抽象的存在者は、物理世界と部分的に対応者を持つだけでなく、さらに高階の構造にも繋がっていく。高階の構造とは、解析力学で記述されるような作用やラグランジアンといった、各々の物理量をより数学的に定式化した量であり、言うなれば構造の元（藤田 2019）となっている。現代物理学における力の統一などの理論は、こういった高階の構造同士の繋がりを前提としている[*2]。現代物理学理論がますます抽象化されていくのは、この高階の領域による解析の比重が大きい所為ではないだろうか。このように数学的に拡張された物理量の構造が物理的存在者と呼べるのか、あるいは数学的存在者と呼べるのかは曖昧である。

2.2 モデルと系の模式

物理世界とこれらの抽象（数学）世界の表象関係を表したのが図 1 である。物理世界と抽象世界は、それぞれ表象されるもの（target）と表象するもの (model) の関係にある (Frigg 2010 p.266)。方程式や法則はモデルの構造であり、高階の構造と合わせて全体のモデル系を構成している。また、モデルはそれを成立させる言語を前提ともしている。上記のモデルの領域は、確かに共に数学的な構造を含んでいるが、物理学理論における NMAO と MAO を区別すると、さらに図 2 のようになる。モデル系にせよ数学的存在者にせよ、それらの世界は表象対象の物理系とは因果的に隔離された世界であることは疑いない。しかし、これらの抽象世界は表象関係を通して、物理世界と密接に関わっているのである。

例えば図 1 のイラストに即して、地球上での単振り子の運動の非相対論的なモデルを考えてみよう。単振子は、その材質に関わらず巨視的な物体であり、素朴実在論の立場で言えば、少なくともこの物理世界に存在している。振り子が最下点を対称に左右に往復運動を行う現象を、例えばニュートン力学を用いた数学的モデルを借りるならば、質量 m を持つ質点（調和振動子）と見なされる単振り子が、運動方向に（斜め下向きに）一様重力加速度 g の成分 $g\sin\theta$ を受けて運動すると表現できる（θ は図 1 のように、最下点の位置を基準に左向きを正として測った角度である。）。現代物理学ではこの重力加速度はニュートン力学を用いた制限事例に過ぎないが、この単純な力学モデルでは、単振り子の幅が十分に小さく、$\sin\theta \approx \theta$ が成立する場合、図のように単振り子の長さを l、振り子の描く円弧の変位を x（θ 同様に、最下点の位置を基準に左向きを正とする）と置くと、$m\frac{d^2x}{dt^2} = mg\theta = mg\frac{x}{l}$

[*2] 実際に最小作用の原理に従って、各々の作用が極値を取る条件で物理学の基本法則は全て導かれるようになっているために、高階の構造は具体的な構造以上に統一的である。

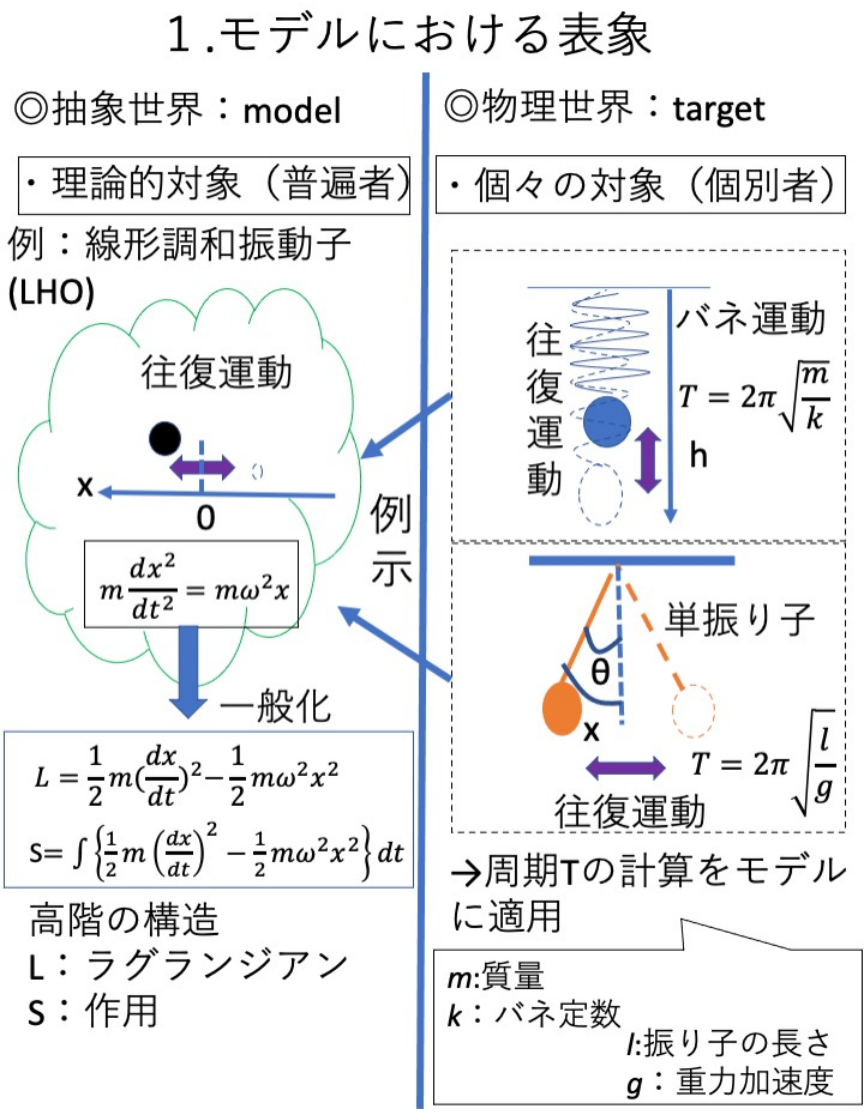

図１　モデルによる表象：現象が実際に起こっている物理世界と、それを説明するために用意された抽象世界との関係を表している。抽象世界は言語によって記述され、普遍者の持つ法則などの構造を持つが、それらは物理世界の存在者によって例示（例化）されている。一方でそれらの法則をさらに数学的に定式化した高階の構造（構造の元）もモデルには登場しており、構造には階層があることを物理学理論の見取り図が示している（藤田 2019）。

の単振動の表式が成り立つのである。これにより、単振り子は $x = 0$（最下点）を中心に往復運動を行うことが力学的に示されて、その振動周期は $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ で与えられ、振り子の長さの平方根に比例する形で周期が計算できることからも、この調和振動子のモデルは物理世界の単振り子の運動を高精度で予言できる。

モデルは物理世界の個々の事例を表象しながらも、独自の数学的な構造を備えている。実際に単振

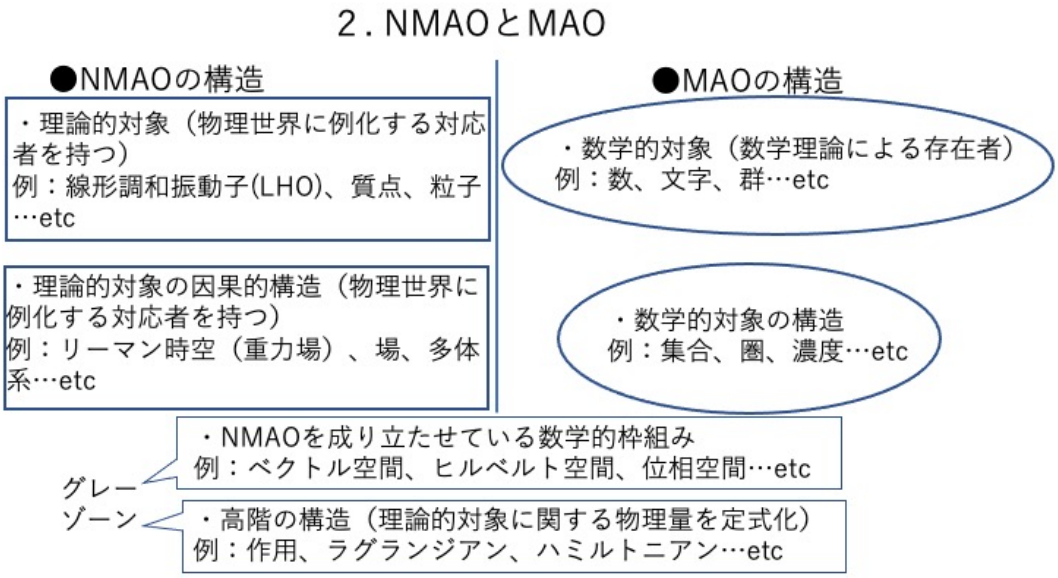

図 2　2 つの抽象的存在者：左が NMAO（物理的な抽象的存在者）を、そして右が MAO（純粋な数学的存在者）を表している。比較的に区分が容易な理論的存在者と数学的存在者の他に、両者のグレーゾーンとしてモデルにおける高階の構造や NMAO を成立させている数学的な枠組みを導入している。しかし、これらの区分の境界同様に、対象や構造の明確な境界も曖昧なので、これがあくまで著者の恣意的な区分けということは断っておきたい。

り子のモデルが有用なのは、調和振動子という質点が、物理世界の具体的な単振り子に対応しているからである。図 1 にある通り、単振り子以外では、例えば天井に吊るされたバネの他端に結びつけられたボールの運動（単振動）の説明にも調和振動子のモデルが使われている。この質点自体は、物理世界ではなくモデルの中に登場する抽象的な物理的存在者であり、物理世界のいくつもの対応者によって例化され、その振る舞いを例示されている。この力学モデルは、力学の基本法則といった仮説的な系の構造を備えながら物理世界と関係を保ち、その構造の中で得られる各々の物理量を積分することで、我々は作用等のさらに高階の構造へと辿ることができる。

この物理世界が時空的な領域であるという意味においては、物理世界と数学的モデルとの対応関係は、電子や原子といった物質粒子としての量子論的対象を扱った理論でも同様である。ボールや単振り子のようには直接観測されないミクロな電子などに関しても、理論が真であるならば、それらを例化する対応者はあくまでこの時空的な領域に実在している。標準的な解釈によれば、電子の波動関数は電子の局所的な存在位置を各々の時刻における確率密度という形で与えており、場も同様に物理世界の時空間の点において何らかの値を備えている。電子や場などの理論的存在者の実在の議論は多岐に渡っているが (特に場の扱いに関しては例えば Cao 1997)、これらの存在者は表象されるものの中に、すなわち具体的な物理世界に対応者を持つ。

すなわち、原子や電子のような直接目には見えない理論的対象であっても、それらが目の前の巨視的な机やボールの空間的な部分的要素であることは疑いない。ボールは時空座標系に決まった値を持っている具体的な対象であり、それらの各々の構成要素である電子等の粒子も、時空的な拡がりを

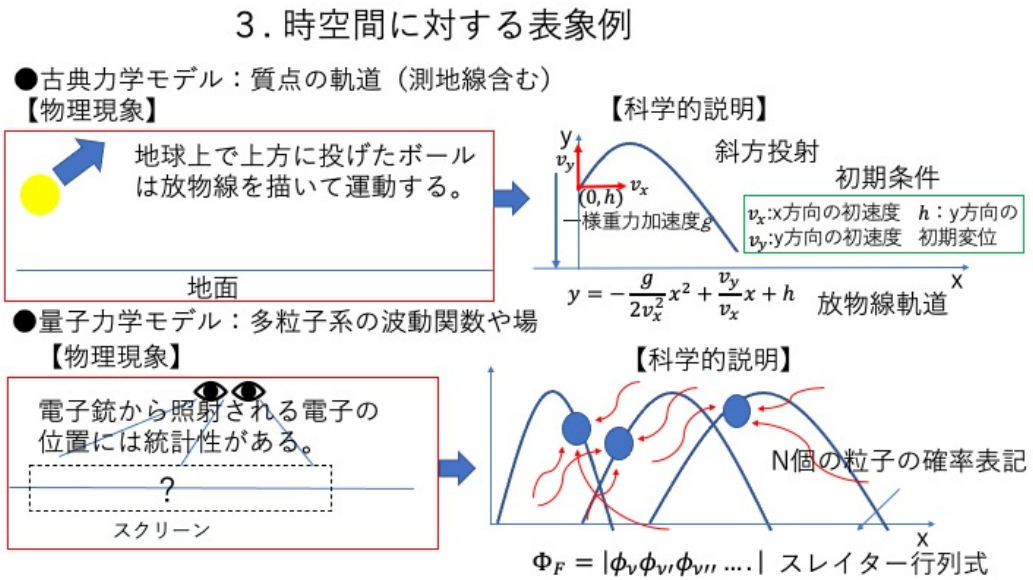

図 3　時空領域に対応関係を持つモデル：古典物理学においては、初期条件さえ与えれば、物体の状態は決定論的であるとして、時々刻々の軌道が得られる。量子力学においては、粒子の局所的な位置は波動関数によって確率論的にしか決まらないが、それでもその関数は、空間上のどこに粒子が存在するのかを記述している。なお、N 個の多粒子系の波動関数は本来は 3 N 個（N × 3 次元）だが、この図では一次元 x のみ描いており、波動関数は N 個の空間座標と時間座標による発展を表した関数としている。すなわち古典物理学と量子物理学は、共に時空間に存在する物体を表象するモデルを用いている。

逸脱していない。実際にこれらの粒子群の振る舞いは、(3 次元空間座標) × (粒子数の数) の空間座標と時間座標を合わせた多元的パラメータを伴う波動関数を用いた多体系の量子論などで記述される（図 3、数式は次章で導入）。量子論の記述や数学的手法がいかに抽象的であっても、それが示す世界の振る舞いは具体的な物質粒子が担っているのである。量子論の抽象的な法則や高階の構造など、物理学が経験や観測を越えた領域を扱っていたとしても、それを物理学理論とするためには何らかの表象対象の、すなわち時空領域の物理的な現象に帰着させる必要があるのだ。

2.3　実在論の向かう先

科学理論の真偽と科学的実在論には一種のジレンマが付き纏う。科学理論を文字通りに解釈すると偽である一方で、理論そのものを文字通りに解釈しなければ今度は実在論が偽となる。これは central dilemma(C-D) である (Psillos 2011 p.6)。現に文字通りに科学理論を解釈すれば、実際の物理世界というよりは、数学的構造の伴う理想化されたモデルにコミットすることになり、かといってこれを避けると、実在論者は理論が述べることの何について言及しているのかという問題点に直面する。

モデルなどの抽象的存在者は虚構 (fiction) であり、実在していないという主張もあり得るが、科学的実在論は科学理論が生み出すモデルの中に登場する抽象的な存在者を認めるべきだという立場がある。それは前節で述べたように、科学理論は個々の単振り子や原子に関してではなく、それらによっ

て例化されるモデルの中の対象に関して述べているからであり、この立場が次のように述べることで、C-D を解決する 1 つのきっかけとなる。

> 理論は文字通りに理解されるべきであり、そして真である。しかし、もしそれらが真であるならば、それらは具体的な存在者と同様に、抽象的な存在者に関しても真なのである。(Psillos 2011 p.9)

上記で記述されている具体的な存在者と抽象的な存在者の関係は次の通りである。

> 実在する存在者 A(三角形、あるいは調和振動子) は、(とある確実な目的で)、他の実在する存在者 B（三角形の道路標識、お祖父さんの古時計の振り子）を表象している。とはいうものの、この実在する存在者 A の理論的記述 D が構成された（それが具体的な物理的対象 B の理想化と抽象化に面しているように設計されている）過程は、D が B の的確かつ正確な記述には到達しないようになっているのである。もし我々が D を構成する過程にばかり目を向けるならば、その時に我々は B の虚構の記述を作り上げるのに終始するだろう。しかしこのことは、D が的確かつ正確に記述しているものは何もないことを含意しない。すなわち産物としての（そして抽象的対象としての）モデルこそが D が当てはまっているものなのである (p.9)。

これは、科学理論は物理世界に存在する個々の具体的な対象ではなく、それらに部分的に例化される、モデル内の抽象的な対象を直接扱っているということである。実際の単振り子もバネに吊るされたボールも永久的に調和振動子のような往復振動を続けることはない。すなわち、科学的実在論は個々の個別者だけではなく、普遍者の実在を主張しているということになる。これは科学的説明という観点で考えると、「個別者の振る舞いを説明するために、それとは因果的に不活性な普遍者を持ち出すという意味」において、因果性という基準を用いない解釈の方法である。

> 理論の抽象的な内容は、与えられた説明の一般性を保証し、異なる現象を理論モデルの中で統一するのに重要な役割を担っている。これら全てのことは、無奇跡論法（そして最善の説明への推量）の意味に、より近付いた説明の必要性があると意味しており、そこでは因果的な考察は、多くの説明的考察群の中から選ばれる一例に過ぎないのである。（中略）しかし明確なのは、全ての説明が因果的ということではないということだ（上層の法則を指示することで下層の法則を説明する等もある)。そして説明はさらに、系のより抽象的な特徴から出ることもあり得る。ゆえにたとえ因果的な説明が重要だとしても、立派な抽象的装飾を備えた理論の全体が、最善の説明を提供するように解釈されるような、より一般的な階層が存在するのである (Psillos 2010 p.957)。

この階層というのは幾分曖昧な表現ではあるが、理論が理論であるために、すなわち一般性が抽象性を必要とする限りにおいて、各々の個別者を理論に取り組む上では重要なモデルの役割があると考えられる。すなわち科学理論に登場する理論的対象は、物理世界の現象を直接引き起こす存在者というよりは、それらの現象論的法則をより抽象化した基本法則に従う、モデルの中に登場する物理的な抽象的存在者なのである。

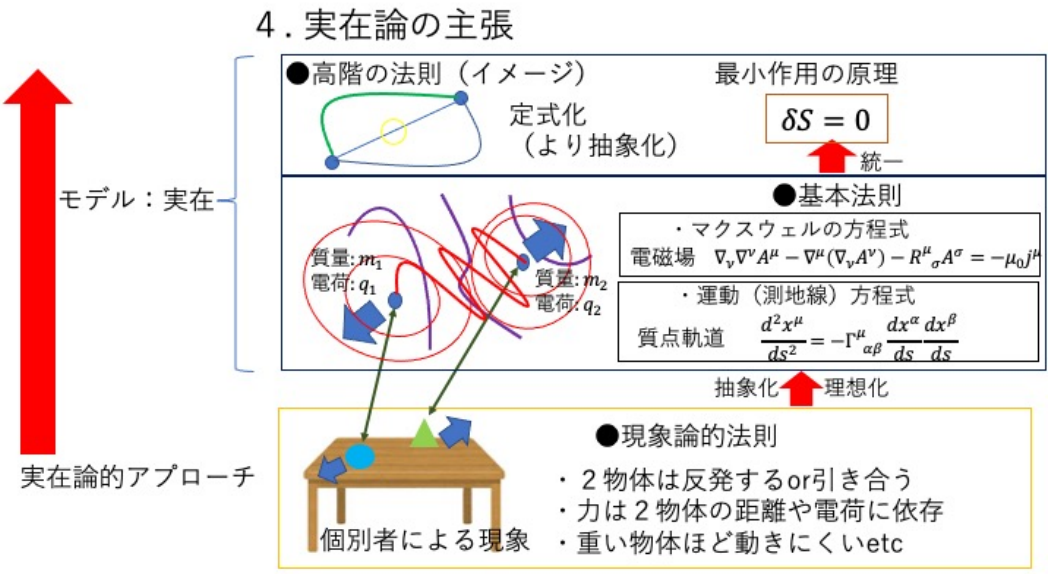

図４　実在論の主張するモデル内の存在者：我々が生きる物理世界においては、具体的な物体が現象を引き起こしている。これらの現象論的法則を元に理想化や抽象化を通じて、物体の運動や場に関する物理学の基本法則が得られる。しかし、基本法則で記述される質点や場はあくまでモデル内の抽象世界に存在する理論的存在者であり、物理世界の存在者に部分的に例化されるのである。これらの基本法則をさらに定式化することで、高階の作用などに到達することができ、各々の基本法則は作用が極値を取る条件、すなわち最小作用の原理として統一化される。実在論はモデルにおいて、より抽象化する方向へと存在者の種類を拡大させている。

以上により一般化や法則化によって、科学的実在論者はより普遍的なコミットメントを要求している。よってシロスの実在論は、次のように帰結される。

- 科学的実在論者は一般化された物理法則に従う、抽象化と理想化を経た普遍者としての存在にコミットすべきであり、理論的対象は因果とは別の説明という点で有用であるために実在している。

場や観測不可能な量子的対象が、実際に理論の通りに空間に存在（あるいは分布）している（そのままの形で物理世界に対応者を持つ）のかはさておき、それらは観測事実である現象や実験データを元に介在させる何らかのモデルの内部において、物理構造を一般化する理論的存在者として実在しているのである。作用などの高階のモデルも因果的には隔離された対象ではあるが、たとえば最小作用の原理という一つの規則から、各々の基本法則が得られるという統一的な解釈を与えているという点においては、高階のモデルは、現象の説明としてはより有用である。すなわち、シロスが唱えるような実在論的主張は図４の上の矢印の側に、より普遍的な方向へと向かっていると帰結できるだろう。数学的存在者というよりは、普遍者を認める実在論の立場であれば、理論的存在者は抽象的な存在者として認められる。

この抽象化によって、表象される側である物理世界の現象や事実はやや曖昧なものになる。確かに

この理論化やモデル化の結果として主じる NMAO の実在の主張は、NMAO が数学的構造という特徴を持つために、構造実在論といった既存の科学的実在論的立場とも相性が良く、現代物理学理論の抽象的な表現や定式化をある意味正当付ける。世界を表象するためにモデルを用いることが、我々の現在の認識に多分に依存することを踏まえると、この立場は、「実際の世界のあり方」そのものというよりは、我々が用いているツールによる認識化された実在論、例えば認識的構造実在論（ESR）[*3] 等と整合的かもしれない。従って、この抽象性は冒頭で述べた単純化による抽象性から発展した、理論という枠組みにおける抽象性であり、物理世界に存在する個別者の事情のみに完全に即したものではない[*4]。逆に言えば、この実在論の立場では個別者が実際にどのような形で物理世界において振る舞っているのかということは、後回しにできるのである。

著者は本論において、モデルの実在ではなくこの個別者の事情に着目することで、表象するもの（モデル）ではなく、表象されるもの (target) の側にある抽象性を炙り出し、物理世界における存在論的な観点での新たな実在描像に踏み込みたい。ゆえに一度シロスの立場を離れて、唯名論的な立場を検討したい。

2.4 唯名論の向かう先

物理世界に直接対応者を持たないような、より抽象的な存在者さえも認められ得る実在論の主張の一方で、科学的実在論は唯名論的に十全な存在者のみにコミットすべきだという立場もある。この唯名論的に十全な存在者とは、物理世界の具体的な存在者である。ここでも物理的対象と数学的対象の二分が含意されており、この二分は科学理論における数学的に定式化された文を、敢えてその数学的な枠組みを持ち出さずに認めることは可能かという考察に基づいている。極端な例を挙げれば、理論に現れる数学的体系を虚構と捉えて、それらを全く持ち出さずに物理学理論を作り直すといった奇抜な取り組みがある (Field 1980)。この虚構主義的な考えを改良していく形で、各々の唯名論的主張が確立されていく。

唯名論的解釈にも様々なバリエーションがあるが (例えば Burgess 1983)、唯名論的十全性は構成的経験主義の経験的十全性 (Van Fraassen 1980) とも幾分似通っている。それはシロスも引用しているような (Psillos 2010 p.948)、次のような消去主義的な見方である。

> 理論 T が数学的な存在者に渡って量化されない一連の結果において正しいならば、...（中略）理論 T は唯名論的に十全である (Leng 2005 p.77)。

すなわち、理論 T の中で数学的な存在者に触れない部分、つまりは物理的な個別者に関する記述のみ真であるならば、理論 T は唯名論的に十全であると帰結して、理論 T 全体の真偽には触れることなく数学的な存在者を消去できるということである。この考え方は、理論が述べる事柄のうち、観測

[*3] 唯名論との関わりで、世界の側の構造を扱う存在的構造実在論 (OSR) との関係を次章で考察するが、シロスの実在論はどちらかと言えば、認識論的な立場（Worral 1989) に近いと言える。

[*4] 調和振動子とバネのような、素朴実在論が通用するようなマクロな系で見れば、比較的に明瞭な形で普遍者と個別者が対応（例化、例示）関係を持つだろうが、対応関係が見えにくい場や、そもそも物理世界に対応者を持たない高階の構造ともなると、個別者を意識せずとも物理学理論が成立するためである。

可能な内容に関して真であれば、観測不可能な部分に関する真偽には触れず、あくまでそれらを道具的に扱う経験的十全性と対応しているわけだ。この解釈をより丁寧に解釈するならば、恐らくは前節にあげた理論の法則化や一般化の問題等にも対応できるように、例えば、

> ある言語で書かれた理論モデルの具体的な部分に関する構造が、その具体的な部分に関する意図的解釈の構造と同型であるようなモデルを持つ時に限り、唯名論的十全性が定義される (Ketland 2011p.208)

と読んでも整合的だろう。こういった定式化の試みは、抽象化が一層進む科学理論の中でさえ、唯名論が生き残るべき方向性を指しているとも解釈できる。

ここで着目したいのは、具体的な物理的対象の持つ因果性の重要性である。唯名論的十全性を、「あたかも理論が真であるかのように具体物が振る舞う」(Ketrand 2011) と表現したところで、NMAO と MAO の境界同様に、具体物と抽象物の境界も曖昧である。2.1 で抽象的な物理的存在者である NMAO を取り上げたように、物理学理論において具体物＝物理的対象（構造）と抽象者＝数学的対象（構造）の二分法は成り立たない。モデルの中の理論的対象 (NMAO) は物理的性質を帯びた抽象的存在者であるために、理論が真であるかどうかは、その NMAO の対応者である個別者によって引き起こされる現象によって、経験的に（近似的に真であると）確かめるしかない。すなわち具体物は、実験や観測等を通して我々と相互作用するという因果性を備えている。この点において、個別者はモデルにおける普遍者とも、数学的対象とも一線を画している。常識的に考えれば、我々と因果的に作用できるということは、この物理世界の存在者であるという意味で、個別者に対応する数式は単なる理論上の構造ではなく、因果的構造とも呼べるだろう。理論全体の構造の中から因果的構造を取り出して、この因果構造を科学的実在論の実在の基準として定めるという立場もあるのだ[*5]。

要するに理論モデルの構造と因果的構造の間に同型性（あるいは準同型性）があることが唯名論的主張の拠り所となる。具体的な構造を因果的構造と読み換えることで、ケトランドの唯名論的十全性のテーゼは、たとえば次のように置き換えられる。

> 理論 T のモデルの副構造（唯名論的事実の表象に合致する副構造）が世界の因果的構造と同型であるならば、理論 T は唯名論的に十全である（Psillos 2010 pp.952-953）。

これは実在論者であるシロスからの否定的な文脈における引用であり、すなわち、理論を構成する全体の抽象的な構造のうち、因果に関わる具体的な構造のみに部分的にコミットできなければ、理論が唯名論的に十全とは言えないということである。一方で、経験的な現象は理論の抽象的な構造の中でこそ埋め込み可能だという解釈もあり (van Fraassen 2006)[*6]、唯名論者はこの具体的な因果性を手掛かりとして、個別者としての物理的対象にのみコミットしているということになる。

唯名論の立場は、当然ながら実在論とは真逆になる。例を挙げるならば、作用などの高階の存在者

[*5] 時空内の位置取りや因果性の有無を基準に用いた、具体物と抽象物の定義も現代では物議を醸しているが、科学哲学の文脈において、時空内に具体的な位置を占め、検出等の因果的な作用を及ぼすことは、理論的対象やそれらによる構造の実在を示唆する上での有力な根拠でもある (Chakravartty 1998, 2007)。

[*6] これは構造に関する経験主義的な立場ではあるが、次章で導入する構造実在論の見解とも大いに関連している。

は数学的な定式化によるものであり、レングの述べる「数学的な存在者に渡って量化されない一連の結果」とは言い難く、さらにケットランドの言う「具体的な部分に関する構造」でもない。因果的構造と一口に言っても、理論全体と具体的な個別者の間にはギャップがある。既述した通り、理論は理想化や単純化を経た抽象的な基本法則を元にしており、個別者に行き着くためにはそこから一段下の現象論的法則[*7]や、理想化や単純化を排除した現実的な系へと適用させていく必要がある。例えば調和振動子の数式から得られる単振り子の周期の予言においては、NMAO 等の調和振動子の構造から計算されたものを、個別者である現実の単振り子の往復運動の周期を実際に計った値と比べることで誤差や近似を施している。すなわち、調和振動子に関する理論構造の中から周期という概念を副構造として抜き出して、我々が因果的に介入できる具体的な単振り子の構造に結び付けているのである。この個別者の構造こそが「意図的解釈の構造」であり、理論から副構造をいかに選び出し、これらの具体的な構造にどのように適用させるかという選択に解釈者の意図が入り込む余地がある。この適用に成功して初めて理論モデルは唯名論的に十全であり、科学的実在論はこの個別者に纏わる実在にコミットすべきということである。唯名論的主張は模式図としては実在論とは違って下の矢印の側に、すなわちより個別的な方向へと向かっていることになる。もし抽象物を一切認めない唯名論の立場であれば、理論的存在者や NMAO のような間接的な存在者の実在は認められないのである。

しかし、ここで唯名論者にとって、抽象的な存在者に関する存在論的態度をどのように考えるのかということは悩ましいことである。これは、唯名論者が抽象的な存在者にどれだけ寛容になれるのかということでもある。極端な場合を挙げれば、上記した抽象物を一切認めない立場であれば、あらゆる推定的な抽象物を無しで済ませるように理論を再定式化するべきであろうが、それだと具体的対象に関する一般的な主張は一切不可能になり、個別者を内包するような一般性は議論できなくなる (Psillos 2010 p.951)。かといって、仮に抽象的な存在者全てではなく、NMAO のみ認めるというような部分的選択をしたところで、2.1 で述べたように NMAO と MAO の境界線はグレーであるために、結局は数学的な抽象的対象も認めざるを得ないだろう。そもそも理論の唯名論的内容が具体的な存在者のみを指示するならば、やはり抽象的な存在者を完全に禁止するしかないのだろうか？

ここで理論的には不可欠だが、形而上学的（存在論的）には無しでも済ませられるという数学の役割 (Pincock 2007) に着目したい。これは我々の認識レベルの変動性とも関わっている。我々には具体的な個々の対象に関する理論はなく、数学によって一般的な関係式や法則で記述されるのが通常であることは既述した通りである。そこで少し見方を変えて、我々は物理的な個々の対象に関するあらゆる事実を知ることは、原理的には不可能であるために、理論に関する確証を得るための手段として、敢えて数学を用いているとしよう。ピンコックの論文自体には明記されていないが、NMAO と MAO は共に理論の数学的な定式化に関わる対象（ここでは敢えて 2 つを区別せずに、文脈的に数学的対象と括る）であり、このことが理論的な不可欠性ということである。しかし、一方で物理的対象と数学的対象の間に因果的な結び付きはないのだから、現象を表すための究極的事実や根底の事実は、必ずこの 2 種類の対象の事実に分離できる。これにより最も根本的な物理的事実こそが、唯名

[*7] 現象論的法則は直接観測可能な（測定可能な）系に関する関係的法則であり (Cartwright 1983)、基本法則と比べてより因果的構造に近いと言えよう (図 5 も参照)。

論的実在論者にとって、物理的対象や性質のみにコミットメントする理由を与え、数学的事実は、物理的事実を説明するための理論的装置やフレームワークに過ぎないという、虚構主義的な立場が与えられるのである。これが数学の理論的不可欠性と存在論的不必要性を同時に主張する方法である (Pincock 2007 pp.266-267, 元の発想は Balaguer 1998 p.130-141 より)。

結局は現状の根底の物理的事実に対する証拠によって、存在論的なコミットメントは左右される。

> 実際の根底の物理的事実が経験科学の唯名論的内容を真にして、経験科学のプラトン的な内容が虚構であると主張することは、一貫しており理に叶っている (Pincock 2007 p.268)。

この根底の物理的事実というのが、何を指しているのか突き止めるのが難しいところではあるが、経験科学の唯名論的な記述の真偽は、現状得られている証拠によってのみ判断するしかなく、唯名論的な内容には非決定論的な要素が付き纏うのである。言い換えるならば、「究極的事実へのアクセスがないと、唯名論的実在論者は自身の存在論的なコミットメントにも同様にアクセスできないだろう」(p.268) ということである。ピンコックが挙げている例 (同じく p.268) で言えば、温度の下限値の有無は数学的事実にではなく、あくまで物理的事実によって決まる。そして現状の証拠が下限値の有無を決定するのに十分でないならば、下限値の存在を信じることは、証拠を持たない何かを信じることに値する。現状の科学理論の数学的体系のうち、どの部分が唯名論的な真理を与えてくれるのかは、我々が知識として得る根底の物理的事実の詳細（物質のミクロな構成要素や時空の正体など）次第なのである。この唯名論的実在論者による根底の物理的事実の追求が、個々の物理的対象にコミットすることに繋がる。それは図 5 の下向きの矢印の向きに沿って、より多くの具体的な情報を引き出すことで、数学化された科学理論から経験科学の真なる内容を掴むことなのである[*8]。

以上により、特に数学体系を虚構と捉える唯名論的立場の共通見解をまとめると、次のような帰結が得られる。

- 科学的実在論者は、抽象化と理想化を経てモデルの中で与えられる理論的存在者のうち、具体的な個別者に対応するものに部分的にコミットすべき（唯名論的十全性）であり、現状の数学はその対応を担う関数として、あるいは根底の物理的事実に関する我々の無知を補う上で有用な道具なのである。

そして、この具体的＝唯名論的なアプローチから抽象性の帰結を得るのが本論の取り組みである。確かに先行研究によれば、唯名論的な十全性を得ることは、モデル化された抽象的な物理的存在者ではなく、具体的な（因果的な）物理的存在者にこそコミットするための方法であると言えるだろう。しかし、この具体的なアプローチは、量子物理学の探求においては、逆に抽象性を際立たせることに繋がる。物体の構成要素からは、個別者独自の特徴というよりは構造的な性質のみが得られ、量子場理論においては因果性も含んだ、物理的ではあるが抽象的な領域の開拓も意図されている。次章では唯名論的アプローチにおける、この 2 通りの因果的な抽象性を示す。

---

*8 この発想は、上記の構造間の同型性の議論とも整合的であるが、数学体系を虚構と捉える消去主義的な立場というよりは、むしろそれが何らかの点で世界の真理値を与える立場（真理値唯名論）と解釈すべきかもしれない。

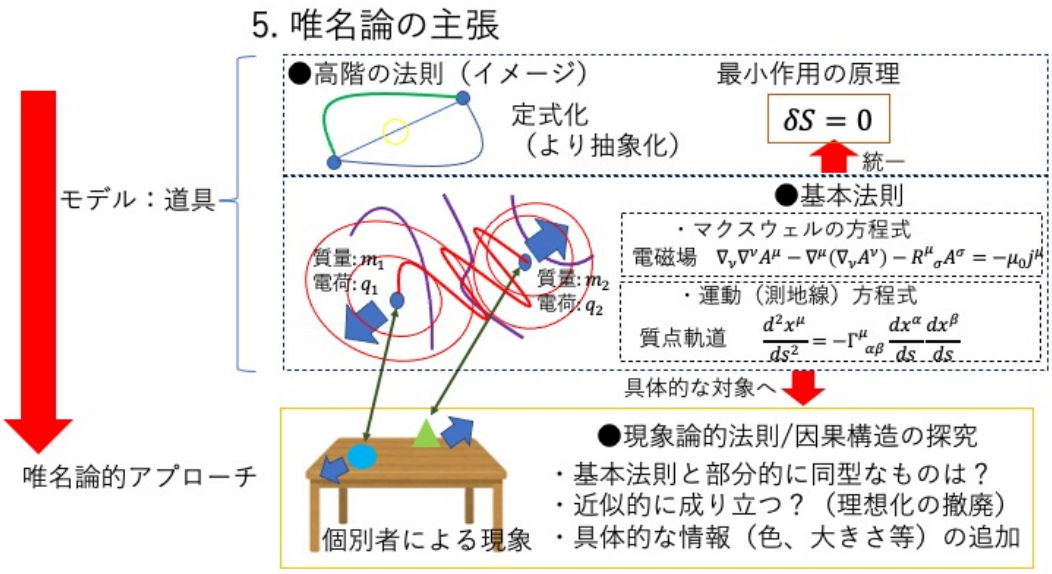

図 5　唯名論の主張する現象内の存在者：唯名論的な十全性とは、科学理論が用いているモデルの構造が現象とあくまで直接関わっている因果的な構造と、何らかの同型性を保つ場合にのみ成立するという考え方である。唯名論は、科学的実在論はモデル内の理論的存在者を全面的に受け入れるのではなく、あくまで実際に現象を及ぼしている因果的な存在者に実在の焦点を与えるべきと捉える立場である。これは巨視的な物体などに関しては、理論的存在者にそのまま対応する個別者の実在を主張しているが、直接観測不可能な場や電子などに関しては、あくまで因果的構造を通じて副次的に認められる存在者の実在を意図するということになる。基本法則などが抽象化や理想化を経た上で成立している以上、唯名論者は実在論とは逆で、具体的な情報を追加していく方向に存在者を見出すことになる。

3　因果的に活性な抽象性

この唯名論的な主張を、量子スケールの文脈で考察したい。唯名論者は、参照している物理系において、ミクロな構成要素の正体や性質を掴むことで真理を獲得するためには、図 5 にある通り、下の矢印の側に、すなわちより具体的な方向へと向かう。これは既述しているように普遍者 (universal) ではなく、個別者 (particular) の性質にコミットする方向である。すなわち、物理学理論において個々の個別者に関する事実を完全に抜き出すことは、それらの構成要素の事情に触れることなしには済ませられないだろう。しかし、それで非数学的な（抽象性を伴わないという意味で）個々の個別者の事実集合が完成するわけではなく、やはり量子論は全ての個別者に共通する抽象的な構造を抜き取ることで、法則化や一般化を伴えるようになっている。それゆえに量子論という理論体系が物理学に含まれるわけである。結局は構成要素に関する具体的なアプローチ（図 5 における下向きの探究）も抽象的な定式化（図 4 における上向きの探究）に収まっているために、単純化による抽象化という手法は量子スケールでも避けられない。しかし、量子論においてはこの単純化による抽象化とは異なった、別のタイプの抽象化が含まれていることが示唆できる。本章ではその 2 通りの抽象性にいよいよ

迫る。

3.1 量子論における根底の事実

ピンコック自身は逆に量子物理学的な事情を取り除くことで、科学者は物理系のより優れた説明を与えることができるとしている (Pincock 2007 p.260)。例えば目の前にボールがあるとして、そのボールを地球上で投げた場合にどのような運動をするかということに関して力学的な説明を与える際に、それがどういった材質でできているのかということ（究極的にはボールの構成要素）を考えることは、ボールの運動を考える上では必要ではない。なぜならばボールの材質はボールの軌道には無関係であり、空気抵抗を無視した近似モデルの元では、粘土でできたボールであろうが、金属でできたボールであろうが、同様の運動を行うのだ[*9]。個々の対象の具体的な構成要素には触れずとも、すなわちわざわざ根底の事実に触れずとも、共通の情報のみで科学的説明ができることが古典力学の特徴であり、これは却ってシロスの実在論的立場の根拠となる。

個別者の本性を具体的に探究することで、各々の違いが出てくる分野も当然ある。重力運動の共通構造とは異なり、粘土と金属では、物質（化学）成分そのものが異なることは明白だが、それらが性質の違いを生み出している。例えば磁石を近付ければ、金属のボールのみ反応するだろうし、その事実はボールの構成要素として用いている金属の特徴によって電磁気学的に説明できる。電磁気学理論は通常金属の種類毎に異なる磁性の説明を与えるだろうが、同一の金属に対しては、やはり同一の説明を与える。さらに具体的な情報となれば、その金属のサビや腐食・劣化の程度などであり、その事実のために、たとえ同一の金属であっても異なる挙動が示されるかもしれない。このように抽象化によって個別者を包括していく作業とは異なり、具体的な事実を次々と与えていくと、個々の個別者のみに沿った科学的説明ができあがるだろう。このように唯名論的に下向きに矢印を辿れば、個々の具体的な情報が次々と加わり、それはやがて個々の粒子に関する量子論的な記述に行き着く。

量子物理学においてさえも抽象化は常に付き纏う。ボールという 1 つの対象でさえ、無数の個別者のパターンを持つが、現代物理学においてはそれらのパターンは、究極的にはその物体を構成する最小単位である素粒子的な対象の事実に行き着く。これらの素粒子は種類が限られており、粒子群の配列や分布の事実こそが、複合的な性質（ゆくゆくは物質的な性質や化学的な性質等）を創発しているとも言えるだろう。それらのメカニズムはさておき、ある物体における構成要素全体の事実は確かに個々の物体に固有だろうが、その構成要素の系は単に種類が限られた 2 粒子間の相互作用といった形で再び簡略化された数学的な特徴によってのみ記述されることになる。結局は複数のボールを区別する具体的なアプローチは、共通して量子論による抽象的法則に行き着くということである。これはモデル化する系がマクロな系からミクロな系に移っただけで、ここで言う抽象化は単純化の意味も確かに備えている。

しかし量子論による粒子の記述には、マクロな系では生じなかったような個別者の曖昧性が見られる。そもそも各々の粒子は、ボールのように明確に区別が付く対象というわけではない。各々の電子

[*9] ピンコック自身は別の例を出している。彼はオイラー路（一筆書き）において、グラフの辺に対応付けられた橋の材質が何であっても、これらを成り立たせているオイラーの定理の抽象的な説明は変わらないと述べている (p.260)。

は質量や電荷といった内的性質を共通に持ち、空間的配置やエネルギー準位、スピンの値といった外的な性質群でのみ異なっている。粒子の性質の厳密な区分は難しいが、ここでは観測によってのみ値が確定するという意味合いでの単項的性質、そして他の粒子の状態に依存し、条件確率的に求められるような関係的性質といった「状態に依存する物理量」を総じて外的性質群とする (French & Redhead 1988 p.240)。量子論では理論が要請するパウリの排他原理により、複数の電子が全く同一の性質群を担うことは無いものの、その異なる外的性質群を具体的にどの粒子が担うのかという点に関して明確に示すことはできない。すなわち多粒子系は個々の電子の状態の重ね合わせで記述されており、1 つの電子はあらゆる外的性質群を同時に備えているのだ。

これは同種粒子の区別の問題と絡んでいる。エンタングルメント状態にある任意の 2 個の電子を区別することはできず、個々の粒子の性質は、フェルミディラック統計に基いた 3 N 次元の空間座標を持つ波動関数のスレイーター行列式の構造の中でのみ、N!通りの状態（項）のエンタングルメントとして次のように記述的に与えられる。

$$
\begin{aligned}
\Phi_F &= |\phi_1\phi_2\phi_3...\phi_N| \\
&= \phi_1(x_1,y_1,z_1)\times\phi_2(x_2,y_2,z_2)\times\phi_3(x_3,y_3,z_3)\times...\times\phi_N(x_N,y_N,z_N) \\
&- \phi_2(x_1,y_1,z_1)\times\phi_1(x_2,y_2,z_2)\times\phi_3(x_3,y_3,z_3)\times...\times\phi_N(x_N,y_N,z_N) \\
&+ \phi_2(x_1,y_1,z_1)\times\phi_3(x_2,y_2,z_2)\times\phi_1(x_3,y_3,z_3)\times...\times\phi_N(x_N,y_N,z_N) \\
&- ... \qquad (1)
\end{aligned}
$$

各々の N 個の粒子 (x_n, y_n, z_n)(n=1,2,3..N) は個々の状態 ϕ_n(n=1,2,3..N) に一対一で対応するのではなく、各々の粒子が ϕ_n(n=1,2,3..N) の全ての状態を備えた上でエンタングルされている構造の中にある。もし粒子が個物であると仮定するならば、究極的に具体的なアプローチによって、他の個体とは異なる何らかの事実を経験的に取り出すことができる個々のボールと量子的粒子は明らかに異なる。同種類の粒子は全て同様の内的性質を持ち、エンタングルされている多粒子の物理場からそれらを観測的に見分けることは不可能であるからだ（French & Redhead 1988）[*10]。結局は量子的対象に対して唯名論的な探究の果てに、特定の個別者を他の個別者と決定的に見分けることはできない。

3.2 世界の側にある抽象性と唯名論的アプローチの関係

この粒子の特異な描像を、再び科学的実在論の捉え方で整理したい。例えば、個々の粒子の区別の問題は存在的構造実在論 (OSR) の文脈でも取り上げられている。これらは数的同一性の問題に加え

[*10] 古典力学の範疇においても経験的に区別ができない 2 つの対象は可能であるが（例として宇宙に存在する対照的な対象やユークリッド平面上の点などが挙げられている; Dieks & Versteegh 2008 p.925）、それらは個々の性質において区別こそできないものの、無反射的な関係が与えられれば、少なくとも同一ではないと帰結できる（weak discernibility）。これを標準的解釈の枠組みにおける量子力学にも適用させて、粒子の区別を試みたのが Saunders(2003a; 2006) であるが、Dieks & Versteegh(2008) はこの適用を量子論の理論的性格ゆえに不適切だと批判している。weak discernibility による量子的粒子の区別は以降も洗練されていくが (Muller & Saunders 2008; Muller & Seevink 2009)、本論ではこの区別の議論には深入りせずに、古典的な 2 つの対象は同じ時空的な位置を完全に共有することはできないために見分けが付くが、量子的対象はエンタングルメントによって、実際の測定が起こるまでは完全に同じ状態すら共有できるために、問題が生じているという程度の言及に留めておきたい。

て、そもそも粒子が個物か非個物（場の励起状態）なのかどうかは形而上学的に決定不全であるという問題とも関連している（Ladyman 1998, pp.419-420）。もし複数の粒子が区別できないならば、それは従来のライプニッツの不可識別者の原理（あらゆる同一の性質を持つ対象同士は同一のものである）と一見矛盾していることになる。これらの粒子を敢えて区別するためには、各粒子に究極的なこのもの性（haecceitas あるいは primitive thisness(Adams 1979)）に訴えることでライプニッツの原理を守るという方法があるが、そういった超物理学的な概念を敢えて持ち出さなくとも、個々の粒子ではなく、多粒子系という抽象的な構造を改めて実在の基本単位として捉えることで、新たな実在概念が提起されている (Ladyman 1998, French& Ladyman 2003[*11])。

世界を構造的に捉えると、随分と見通しがよくなる。粒子の単項的性質や関係的性質などは 1 つの構造から引き出される情報と一括りにできて、単項的性質に還元できない二項関係による関係的性質を固有（inherent）の性質と捉える (Teller 1986) ことで、構成要素ではなく構造がより原初的 (primitive) な存在であることが正当化される。OSR は同じ構造的解釈でも、粒子に関する上記の決定不全性の問題を残す認識的構造実在論 (ESR) と違って、量子論の解釈とも整合的である。物質粒子は個物でも非個物でも最早どちらでもよく、たとえ同一性なども付与できない極めて曖昧な概念であったとしても、OSR の立場では個々の対象は構造の用語の中でこそ、新しく作り直されるべきなのである (French & Ladyman 2003)。

この構造における抽象性は、単純化された普遍者の持つ抽象性というよりは、むしろ個別者が備えるあらゆる性質、すなわち世界の側にある構造の一部だとも考えられる。確かに多体系の粒子に関して、その認識面においてモデルの持つある程度理想化された構造を扱うこともあるだろうが[*12]、それらを例化している物理世界における各個別者の粒子群は、構造化された多体系の記述（電子の場合は 1 式と内的性質）のみからあらゆる物理的事実を引き出していると解釈される[*13]。各々の電子のような、個別者である具体的対象は、数学的な構造のみから性質を得るという意味において抽象的性質を備えているのである。

すなわち図 6 にあるように、個別者としての粒子に関する根底の物理的事実は抽象的性質を超えた具体的なアプローチの中で得られるのではなく、抽象性そのものに由来しているのだ。個別者は我々と観測や実験を通じた因果関係を備えているために、

- 個別者である粒子の持つ抽象性は、理想化や一般化を伴った表象においてではなく、各粒子の根底の因果的事実そのものに由来しているのである

と特徴付けられる。漠然とした数学的構造と具体的な因果構造との対応などは、量子論の観測問題や

[*11] Cao によれば、粒子か場のどちらがより根本的なのかという二者択一を古典的な観点で捉えるのは最早不可能だとして、量子場そのもの（第二量子化や場の量子化によってより抽象的に得られたもの）を新たに実在の単位として捉えるべきであるとしている (Cao 1997 pp.17-19)。

[*12] 実際に物理学者が実用面で何らかのモデルを作る際には理想化や抽象化を用いるだろう。

[*13] この粒子と多体系の構造の関係は、マクロな一般相対性理論の時空描像において、時空点という対象が計量による時空構造のみからその同一性 (identity) を引き出していることと対応付けられる (Esfeld & Lam 2008)。対象は完全に構造に還元されるがゆえに、消去されるべきだという強い主張が好まれることもある (French 2010)。

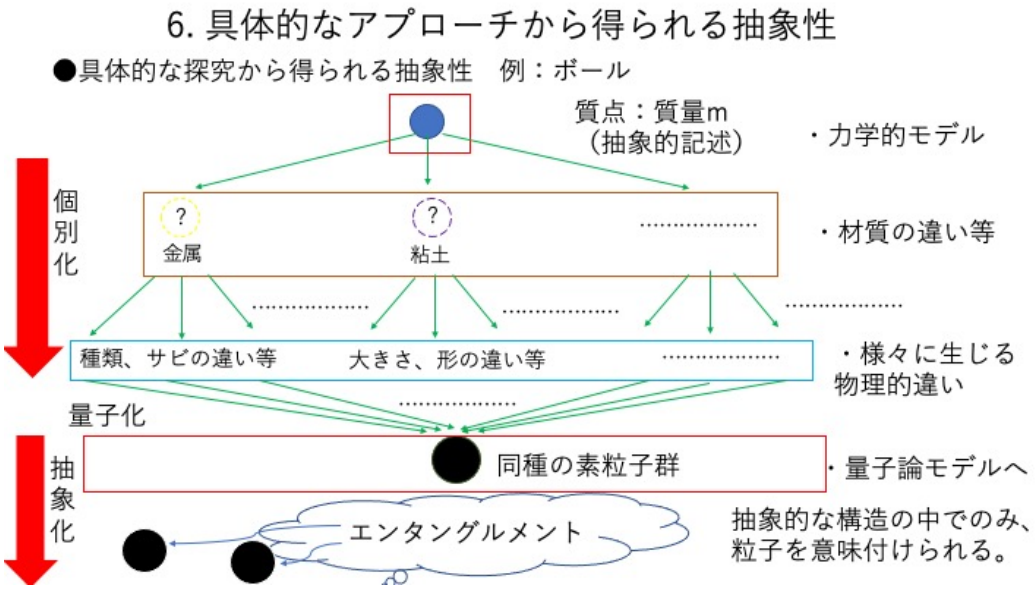

図６　具体性から得られる抽象性：ボールという巨視的な対象の性質を論じる際に、質量のような抽象化された普遍者としての性質のみを持つモデルから出発して、構成要素の具体的な（詳細な）情報を次々とモデルに付け足していく。それによって、モデルはますます個別者としての特徴を備えていき、その独自の特徴が重要となる物理的な性質によって区別されることになる。しかし構成要素をさらに細かく量子論の粒子まで辿れば、究極的にはボールの材質が何であったとしても、同種の部品に行き着いて、それらの部品は再び抽象的な構造によってのみ個々の性質を得ることになる。

解釈問題とも関わる大きな課題であろうが、唯名論的な根底の事実の追求は、単純化の意味合いでの抽象性を越えた個々の粒子の事実にではなく、改めて構造化された抽象性の中でのみ得られる帰結に到達するのである。

唯名論的アプローチは OSR が捉える世界の描像とも対応している。というのもモデルの中だけで見れば、単純化された普遍的な性質も上記の構造的性質も理論的存在者（あるいは対象）の備えた抽象化された性質に過ぎない。そういう意味ではシロスの実在論的なアプローチではこの２つの抽象性を敢えて見分けることができず、何らかの説明という点で有用である限り、ぞれ以上のことまでは言及できない。しかし２．４で述べたように、唯名論的アプローチは経験科学における数学的記述の先にある物理的事実にコミットしている。実在論的な見解では抽象性の出所は、量子論の高度に数学化されたモデルに過ぎない一方で、唯名論的な見解ではそれはあくまで世界の側面なのである。ピンコックは数学は存在論的には無しでも済ませられるとしたが、もし OSR の主張する世界の抽象的構造が単に数学的ではなく、物理的存在者を仮に部分的にでも指示しているならば、両者は矛盾しないとも言えるのではないだろうか？この両者の対応関係を考えると、改めて数学的構造と物理的構造との境界が問いとなる。

数学的構造と物理的構造の意味の曖昧性に対する一種の妥協が、両アプローチを分かっているとも言えるのではないだろうか。結局シロスはこの量子論における物理的事実、すなわち因果構造を現象

から明確に括り出す術がないために (Psillos 2010 p.956)、唯名論的なアプローチではなく実在論的なアプローチに終始しているとも考えられる。量子論の全体構造の中から観測に関わる具体的な因果構造のみを独立に抜き取るのは難しく、実際の物理的構造（内容）が何であるのかという問いは、OSR に対する悩ましい問題でもあるが (Ladyman 2007 pp.39-40, van Fraassen 2006 p.306 等)、見方を変えれば物理的存在者が真に何であれ、プラグマティックな意味においては、それらが担う構造が世界には存在する (Saunders 2003b p.130) とも言える[*14]。重要なのは量子的世界の実在を捉える上では、個別者の事実に踏み込む唯名論的アプローチは、OSR 同様に構造という新たな抽象性を、理論ではなく具体的 (concrete) な世界の側に見出していることなのだ。

3.3 因果的な抽象的領域の存在

モデルの中の理論的存在者ではなく、個別者が備える抽象性として、もう一つの事例に移りたい。それは時空領域を逸脱した物理的領域の存在である。現代物理学においては実際に具体的な物理世界を、高次元も含めた広義な時空領域と考えただけでは説明できない事例が存在している[*15]。その一つが場の量子化によって得られる仮想粒子の振る舞いである。仮想粒子とは、時空点において値を持つ場という存在者に対して、量子化という手続きを通して得られる理論的対象である。ただし、これらの粒子は物理的な時空領域というよりは、物理的ではあるが「時空とは異なる抽象的な領域」において運動していると言える描像があり、これも個別者に関する世界の側にある抽象性である。この抽象的な領域はこの時空世界と因果関係を備えていることを述べる。

3.3.1 仮想粒子に代表される光子の扱い

物理学に光子なる概念がもたされたのは、２０世紀初頭である。電磁場の一種である光の波動説と粒子説は近代科学の黎明期から論争の歴史を持つが、光電効果を説明するためのアインシュタインの光量子仮説は、それまで劣勢だった光の粒子性が再び取り上げられた代表事例として広く認知されている。これは、古典的な電磁場理論だけでは説明が付かない光に関する事実に対して、光が光子という個々の構成要素の集まりだという解釈を持ち出すことで得られる科学的説明である。

しかしこの光子は量子論的な観点で、電磁場の構成要素（媒介粒子）と呼ぶこともできるだろうが、前節で挙げた電子等の物質の構成要素といった、物理的な空間部分を担うような対象（いわゆる物質粒子）とは少し事情が異なる。とは言え光の粒子説は、光電効果の後に発見されるコンプトン効果等によっても根拠付けられる一般的な解釈であり、現代の量子物理学においてはスタンダードである。尤も現在の量子論を知らない当時のアインシュタインにとっては、光子（光量子）も電子と同様に、あくまで系の空間上の微視的な縮図として意図されていたかもしれない (Einstein 1905)[*16]。し

[*14] 構造と非構造の区分や、上記の粒子の形而上学的観点（対象と構造の優先性）など、構造的解釈には論者による恣意性が絶えず付き纏うが、Saunders 自身は、「構造は端的に数学的というわけではなく、プラトン的な実在に対しては中立的である」としている (p.129)

[*15] 超弦論で前提にされるような、高次元の領域なども、明らかに具体的（時空かつ因果）領域と抽象的領域の区分のグレーゾーンであろうが、本論では触れず、あくまでも時空領域の延長という意味で取り敢えず具体的領域としておく。

[*16] 光子という概念は、関連する以降の論文 (1906; 1907) も含めて登場せず、アインシュタイン自身の当時の粒子描像は

かし、その後に提唱される量子電磁力学 (QED)[*17]を経た現代物理学においては、光子は量子的な観点で極めて仮想的な理論的対象なのだ。要は、光子は位置座標 x をパラメータとした波動関数によって記述され、局所的にスクリーン状に観測されるような存在者として標準理論で扱われているわけではない[*18]。

本項では、現代の量子電磁力学理論におけるこの光子のメタファーとも感じられる理論的な導出をまずは見てみたい。たとえば電磁場のエネルギー表記は粒子説の入り口であるが、表記自体は光の波動性を特徴付ける物理量の組み合わせでも与えられる。波動論において、真空中（他に物質が無いという意味で）の電磁場は、基本法則であるマクスウェルの方程式を出発点とし、文字通り空間中を光速で伝搬する電磁波である。電磁場のエネルギー E は、非相対論的には電磁場のベクトルポテンシャル $\vec{A}(\vec{r},t)$ の波の振幅 $Qmax$ と角振動数 ω を用いて次のように与えられる：

$$E = \frac{\epsilon_0}{2}\omega^2 Qmax^2。 \tag{2}$$

ここで、ϵ_0 は真空の誘電率で与えられる定数である。実際の波動は、適当な境界条件を定めることで、条件を満たす複数の波の重ね合わせ（線形性）によって与えられるために、全エネルギーは各々の波の振幅 $Q_k max$ とそれに対応する角振動数 ω_k を用いた上記のエネルギーの足し合わせ E_{total} になる[*19]：

$$E_{total} = \sum_k \frac{\epsilon_0}{2}{\omega_k}^2 Q_k max^2。 \tag{3}$$

よって電磁場のエネルギーを上げるためには、各々の波の振幅 $Q_k max$ や角振動数 ω_k を大きくしたり、波の数そのものを増やすことが必要なように思われる。これが古典的な電磁場の波動描像によるエネルギーの表記である。

ここで、調和振動子の粒子的な描像で電磁場のエネルギーを捉えてみる。とは言ってもここから特に何か補助的な数式的変形をする必要はない。光を光子の集まりと解釈したいならば、3 式を振幅 $Q_k max$、そして角振動数 ω_k で以って振動している各々 k 個の調和振動子の集まり（波の数＝振動子の数）と表現する（言い換える）だけである。単純に個々の波が個々の振動子に対応していると解釈すれば、電磁場とは光子の集まりという解釈にもなり得るのだ。

つまり古典論においては粒子描像は波動描像の単なる言い換えであり、両描像は決して相反するわけではない。上記の粒子モデルを例化する個別者として見た場合、2.2 の図 1 の具体例のように、光子は x や h という座標系を貼られた空間方向（バネ運動の場合は鉛直方向、そして単振り子の場合は水平方向）に沿って振動しているわけではない。調和振動子が振動しているのは空間座標の値ではなく、空間上のあらゆる点で関数化されている、電磁場のベクトルポテンシャル $\vec{A}(\vec{r},t)$ の値 $Q_k(t)$ なのである。すなわち、電磁場を調和振動子の集まりと見た場合、振動子は電磁波の伝搬する実空間で

現代の光子概念とはまた異なっているだろう。

*17 電磁場の量子化は主に１９２０年代後半以降の取り組みとなるが、歴史的には Fermi(1932) が放射に関する量子論の中でまとめて定式化している。

*18 光子の波動関数に関しては、最後の章で少しだけ触れている。

*19 藤田 (2020),pp.8-10 の数式群よりやや変更。元は小出 (1991)pp.170-176 の数式群参照。ω_k に対して角振動数という表現は本論で捕捉した。

はなく、あくまで値 $Q_k(t)$ の拡がりによって作られる言わば仮想空間を振動しており、ゆえに仮想粒子という表現が生まれるのである。古典電磁力学理論において光子の振動は、一種のメタファーなのである。

光の粒子描像は量子化による離散構造によって、より鮮明な描像となる。そもそも光の粒子説は光を微視的に見た場合の仮説であり、系に量子化という手続きを適用させることが現代物理学における大前提である。量子電磁力学理論において、1 個の調和振動子のエネルギーは、

$$E_n = n\hbar\omega \tag{4}$$

と、角振動数 ω と量子数 n（ 0 以上の整数値）に比例する形で与えられ（$\hbar$ はデイラック定数である)、エネルギーは飛び飛びの離散的な値になる。そして全体のエネルギー（正確にはエネルギー固有値）は、全ての調和振動子の重ね合わせということで、量子数 n_k と ω_k を用いた形で、

$$E_{total} = \sum_k n_k \hbar\omega_k \tag{5}$$

と同じく離散的に与えられる（ここで真空エネルギーは無視する)。古典論の 3 式と比べると、量子数という概念が新しく登場し、振幅のパラメータが消えているのが特徴である。そして 4 式を 1 個の調和振動子ではなく、n 個の調和振動子のエネルギーと解釈することで、5 式は角振動数が ω_k の波毎に n_k 個の光子が存在するという描像を成立させる。整数値という離散値しか取れない量子数を個数と表現することで、光子の生成消滅演算子が定義され（小出 1991 pp.174–175)、光の粒子説は明確な解釈（粒子描像）を備えるのである。

しかし、粒子描像も波動描像も古典量子共に数学的にはあくまで電磁場の一つの構造の異なる形式に過ぎない (藤田 2020)。実際に量子電磁力学理論においても、角振動数 ω_k の一定の波にとって、光を強くすることは量子数を大きくすることであり、それが波動の振幅の増加に対応すると考えれば、理論的にはただ光の振幅を上げることで、エネルギーの値が離散的に増加するというだけである。もちろんこの量子化による離散性自体は、それまで多数挙げられていた光の粒子性を特徴付けるための、ある意味後付けの理論ではあるのだが、ここで考えたいのは、わざわざ光子という理論的対象を持ち出さなくても、波動描像で説明が事足りるならば、仮に量子化したところで粒子描像はメタファーに過ぎないのではないだろうかということである。

3.3.2 光電効果という根底の事実が意味する光子の実在

光の粒子描像は、このままでは名前の通り単なる仮想である。量子電磁場の離散的な波動描像で科学的説明が成立するのであれば、科学的実在論の立場において「光子が実在している」という主張にはあまり意味がない。量子電磁力学理論の数式を見る限りでは、電磁場のエネルギーは離散的であるというだけである。それを波動自体のエネルギーが単に途切れ途切れになっていると解釈しようが、有限個の光子に分解されると考えようが、それは最早形式の違いである。むしろ時空座標に沿った波動描像の方が物理的とさえ言えるかもしれない。

そしてこの曖昧な光子の実在性を、より根拠付けている根底の事実に光電効果がある。ここで 2.4 の唯名論的十全性の議論を思い出したい。

- 科学的実在論者は、抽象化と理想化を経てモデルの中で与えられる理論的存在者のうち、具体的な個別者に対応するものに部分的にコミットすべき（唯名論的十全性）であり、現状の数学はその対応を担う関数として、あるいは根底の物理的事実に関する我々の無知を補う上で有用な道具なのである。

唯名論者にとっては、具体的な個別者の振る舞いと照合するまでは、両描像はともに単なる道具でしかないのかもしれない。しかし、光電効果の現象に関する事実を仕入れた時、光の正体が光子であるという描像には唯名論的に十全と言える余地がある。光電効果によって、波動描像以上に粒子描像を優遇する根拠が備わるのだ。

ここでいよいよ光電効果の中身に移ることとする。光電効果とは、金属や絶縁体といった物質の表面に光を照射すると、光電子という光のエネルギーを受け取った電子が表面から飛び出すという現象（正確には外部光電効果という）であるが、これが因果的構造を備えている現象であることは疑いない。光の（角）振動数や振幅を適当に調整しながら実験を試みると、次の事実が示されている。すなわち、

1. 光を照射する際に、光の（角）振動数が大きいほど取り出せる個々の光電子のエネルギーは大きくなる。
2. 取り出せる光電子のエネルギーは、光の強さ（明るさ）を表す振幅の大小には無関係である。
3. 光電子が取り出せる（角）振動数を一定に保った状態で、光の振幅を大きくすると、個々の光電子のエネルギーは変化しないが、取り出せる光電子の数は増加する。

これが量子電磁力学を実践する際の根底の実験的事実である[*20]。

この光電効果の物理的内容を、現代の量子電磁場のエネルギー式を用いて検討したい[*21]。電子は個々の粒子としては、たとえば絶縁体等の物質の表面において、仕事関数と呼ばれる正電荷によるエネルギーに束縛されており、電子を取り出すには最低でも仕事関数以上のエネルギーを与える必要がある。逆に言えば仕事関数以上のエネルギーさえ与えれば、電子を物質表面から取り出せることは、古典電磁気学の見解とも矛盾していない。そして 4 式を見れば、角振動数 ω を大きくすることも、量子数 n を大きくすることも、エネルギーの増加という観点においては全く同じ要因である。すなわち角振動数と、量子数に対応するはずの振幅のどちらの値を大きくしても同様に光電子は取り出せるはずである。

1 の実験事実は、波動描像でも十分に通用する内容である。量子数 n は整数値しか取れないので、n=1 の時のみエネルギーは最小値となる。つまり振幅をいかに小さくしようが、ゼロ（光を全く照射しない状態）でない限りは電磁場のエネルギーは最低でも $\hbar\omega$ である。すなわち ω の値が大きくなれ

[*20] 科学史的には陰極線の研究において、１９０２年に物理学者レーナルトによって確認された実験的事実である (Lenard 1902)。

[*21] 一般的な物理の教科書などでは、古典的な波動論、すなわち 3 式を意図した上で、波動描像では説明できないとして、粒子描像を前提とした 5 式へと誘う流れが殆どだが、本論ではたとえ 5 式であっても、波動描像のままで考えると問題点に直面することを示すこととする。

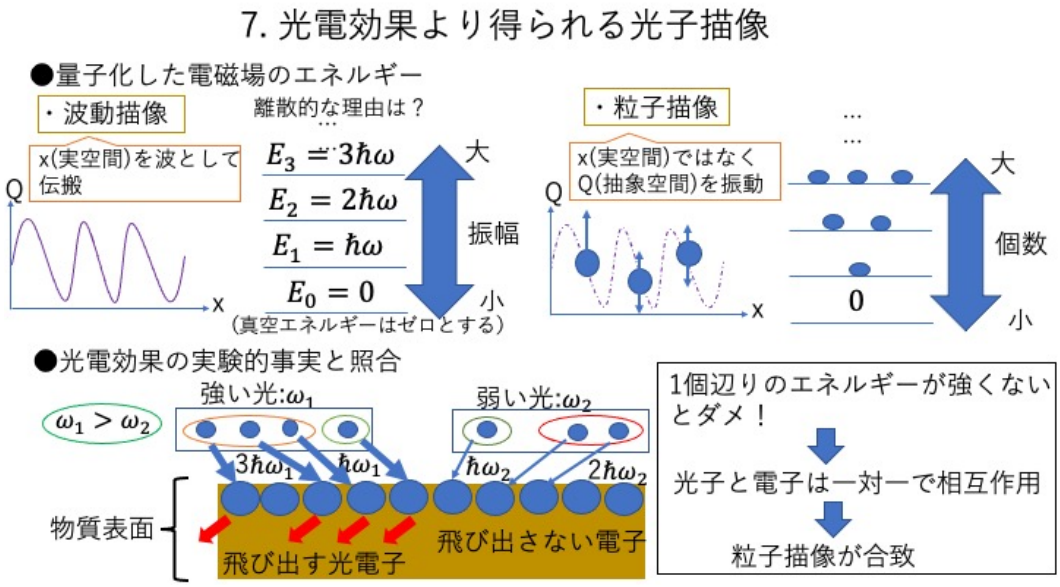

図 7　光子の実在のイメージ：量子論において、電磁場を離散的なエネルギーを持つ波動と見るか、あるいは振動数のみでエネルギーが決まる複数の光子の集まりと見るかは、あくまで離散的な構造の解釈次第である。しかし、光電効果による事実は後者の粒子描像と非常に鮮明に結び付く。

ば、光電子の得るエネルギー $n\hbar\omega$ も同様に大きくなるので、4 式や 5 式は 1 の事実とは矛盾しないのだ。

しかし、波動描像のままでは 2 や 3 の事実を説明することができない。なぜならば、仮に ω が小さくても、n の整数値を十分に大きくとれば、$n\hbar\omega$ で表されるエネルギーはいくらでも大きくできるために、光電子の得るエネルギーも同様に大きくできるはずだからである。にも関わらず、振幅の増加は 2 の個々の光電子のエネルギーとは無関係なこと、さらに 3 の光電子の数のみの増加を引き起こすことに関して、波動描像はこれ以上何も語ってはくれない。

ここで粒子描像が大いに役立つのである。光の粒子説では、光と物質の相互作用である光電効果を、微視的には粒子同士の、すなわち光子と電子の 2 粒子間の相互作用と考える。粒子描像では n は光子の個数を表しているので、角振動数を上げることと振幅を上げることは、たとえ 4 式的には同じ電磁場のエネルギー増加を意味していたとしても、それぞれ実態の異なる変化なのである。角振動数を上げることは、1 個当たりの（n=1 の）光子のエネルギー $\hbar\omega$ を大きくすることであるが、振幅を上げることは光子の数を増やすことである。もし、波ではなく光子が電子にエネルギーを与えることで、光電効果が起こるのであれば、光子 1 個当たりのエネルギーが大きくならない限りは、電子 1 個に与えるエネルギーも同様に大きくなれない。すなわち、光子 1 個は電子 1 個にしか作用できず、光を物質に照射することは、光を構成する個々の光子を物質の中にある個々の電子にぶつけることだと解釈される。古典的には単なる波動の言い換えでしかない光子という表現に、量子論は極めて直感的な物理的解釈を与えているのである（図 7）。光子と電子の具体的なやりとりが、両者に因果的な接点を与えるのだ。

この粒子描像によって、光子だけでなく、光子が振動している仮想空間もまたメタファー以上の意

味を持つ。既述した通り、光子が粒子として振動しているのは値 $Q_k(t)$ からなる一次元座標系の仮想空間である。調和振動子を例化している通常の単振り子などは、空間座標系 $x(t)$ を例化したこの実空間上を振動しているが、光子の振動領域はこの時空領域（正確には空間領域）とは異なる領域なのである。これもモデルにおける抽象性とは明らかに異なった意味での物理的な抽象性である。光子の振動する仮想空間は、モデルの中にある例化される側の抽象的な領域ではなく、例化する側の物理的領域であり、光電効果という現象を通じて我々の世界と因果的な繋がりを備えている抽象的領域なのである。

3.3.3 実在論的な解釈

最後にこの光子と光子の振動領域に関して、シロスの実在論と唯名論の立場における違いを科学的実在論との関わりも含めて述べておきたい。

シロスの実在論の立場であれば、光子や光子が振動する抽象的領域は、モデル内において実在していると考えられる。2.3 のシロスの立場をもう一度列挙する。

- 科学的実在論者は一般化された物理法則に従う、抽象化と理想化を経た普遍者としての存在にコミットすべきであり、理論的対象は因果とは別の説明という点で有用であるために実在している。

光電効果を説明するための光子理論、すなわち量子電磁力学理論は光子をモデル化している。電磁場の数式的構造より得られる、抽象的領域 $Q_k(t)$ を振動する光子は、あくまで現象とは直接因果関係を持たない理論的対象である。量子電磁力学理論においては、波動描像ではなくこの粒子描像が現象の説明的役割を担っているのである。実在論にとってはこのモデル内の理論的対象である光子は、調和振動子の一種として実在していると言えよう。このように、シロスの実在論的立場であれば、一般的な電磁場の粒子描像は科学的説明としては十分に有用であるために、光子は NMAO として実在していると帰結できる。

さて、以上より光子は量子電磁力学モデルにおいて実在すると言うのは容易いが、このシロスの立場を取った上で、量子電磁力学理論から得られる光子が、従来の科学的実在論に求められる実在の要請を満たしていると言えるかどうかはまた別の問いである。というのも確かにこの理論モデルは、光電効果の現象をうまく説明できて、1 から 3 に挙げられる光子と電子の相互作用なる因果構造（数学的に厳密化されているかはさておき）を捉えてはいる。しかし、理論が実験的なレベルで矛盾しないという事実は、科学的実在論が理論的存在者の実在を主張する根拠としては乏しい。それが実在していると主張するためには、想定される反実在論的主張を切り抜ける必要があるからだ。仮に反実在論者が直接観測不可能な光子や電子に関して、2.4 で挙げたような不可知論的立場を取ったとしても、このモデルにおける実在論とは矛盾しないのである。ゆえにこのシロスの立場が、物理世界の存在者の実在を主張する科学的実在論として主張されるためには、モデルが現象を説明するだけでなく、この電磁力学理論が何らかの理論的美徳 (theoretical virtue) を備えている必要があるだろう。

仮に量子電磁力学理論以外にも光電効果を説明する理論が今後誕生すれば、実在論的立場は不利に

なる可能性があるが、それでも現代物理学においては例えば包括性に頼った擁護が可能である。量子電磁力学理論と光電効果の関係だけを眺めてみても、反実在論の反論を切り抜けることは難しいかもしれないが、実際に光子の措定は、光電効果の他に上述したコンプトン効果という光の散乱現象もうまく説明している (Compton 1923)。つまり光子という一つの存在者の措定が複数の現象を説明するという意味で包括的である。さらにこの電磁力学理論は場の量子化というカテゴリーの一例であり、他にも強い力や弱い力、量子重力理論における重力の量子化などの手法にも大きく関わっている。強い力を扱う量子色力学 (QCD) は、量子電磁力学の電磁場と電荷の構造に倣って、ヤン・ミルズのアイソスピンとゲージ場の構造として一般化されたもの (Yang & Mills 1954) を基盤としており、この類推が高エネルギー状態において、電磁気学と弱い力の統合を行った電弱統一理論 (Glashow 1961; Weinberg 1967; Salam 1968) の手法にも受け継がれている。要するに場の量子化は理論的にも実験的にも、力の統一の先駆けとなっているのである。すなわち、量子電磁力学モデルは単に特定の現象を説明するだけでなく、量子場理論という包括的な理論の一例なのだ。現代物理学の究極の目的である力の統一理論の完成が途上という事情を考えると、この包括性を実在の絶対的な基準に挙げることは憚られるが、それでも現時点での実在論者の根拠として、これほどの包括性はある程度の説得力を持つだろう[*22]。

反実在論的立場との絡みで確認しておきたいのは、この普遍者実在論の立場では、個別者としての光子の事情には敢えて触れず、物理的領域としての抽象性という観点を、モデルの抽象性と一括りにしているということである。というのもこの実在論では、場や観測不可能な量子的対象に加え、作用などの高階の存在者も含めて、モデルが現象をうまく説明できる（物理的な構造を反映する）ことが何よりの前提である。言わば、モデルと世界との対応関係を軽視して、モデルを世界を解釈する上での経験を超えた上での意味論的側面と見なせば (Suppe 1989)、光子描像は単なる説明のためのツールであり、その振動領域も一般的な調和振動子の振動領域も同じモデルの側の抽象性に過ぎないのである。すなわち場や観察不可能な存在者に関して、唯名論的十全性が必要とされるわけではなく、時空領域と物理的な抽象的領域を敢えて区別する必要はない。個別者である光子の物理的な実態に関しては、実在論の立場ではそこまで問題にはならないのではないだろうか。

3.3.4 唯名論的な解釈と物理的世界の一般化

一方で、唯名論者にとっては、

- 光電効果という物理的事実が、光子だけでなく、光子の振動領域をも単なるメタファー以上のものにしている

と言えるのではないだろうか。モデルに実在の重点を置くシロスの実在論とは違って、唯名論者はあくまで理論が唯名論的十全性を満たす因果的な（具体的な）観点を考える必要があるからだ。ピン

[*22] 現代における光子描像が物理学において必須なのかということは、脚注 16 に記したように科学史的な事例を考えてもそれだけで重要なテーマになるのではないかと著者は考えている。しかし今回は、あくまでシロスの実在論と他の唯名論的立場で光子理論を捉えるのが主題であるために、ここで、光子理論が実在論を果たして支持するのかというトピックに深く踏み込むことはしない。

コック風に言えば、消去されるべき数式的な構造から物理的事実を抜き出すことが唯名論者の課題であるために、粒子描像を根拠づけるのは単なる説明ではなく、光電効果による因果的な個別者同士の物理的構造となる。相互作用はあくまで光子と電子の粒子間でのみ（一対一で）行われるという解釈こそが、意図された光子描像の因果的構造の理解に繋がる。4 式の離散的なエネルギーは、この解釈を備えることで、光電効果の事実を共に満たし、ようやく粒子描像が唯名論的十全であると言えるのだ。

唯名論者にとって重要なのは、この光子の振動領域がモデルの中にではなく、世界の側にあるということだ。量子電磁力学モデルの光子を例化している個別者としての光子は、光電効果の構造を、物理世界において例示しているのだ。これはモデルをあくまで認識論的な手段と捉えるシロスにはない、数学的構造を存在論的には認めないピンコックならではの見解である。さらにこの見解は、3.2 でも挙げたように、構造には必ず物理的側面があると考える限り、それらを世界の存在論的な基盤とする OSR の解釈とも整合的である。ピンコックは物理的事実を重要視しているために、モデルではなく個別者である光子に行き着くが、光子は光電効果やコンプトン効果が及ぼす因果的構造の中に確かに存在している。さらに各々の光子は量子化された電磁場の構造から各々の性質（4 式や 5 式）を得ており、これは 3.1 で帰結した個別者としての電子と同様である[*23]。しかし個別者である各々の電子（あるいは一般的な場なども含めて）が実際の空間の中で振る舞い、何らかの値を観測されるのに対して、各々の光子は物理的な抽象的領域の中で振る舞っており、間接的に現象に因果的に加担しているという点に両者の違いが見られる。科学的実在論の文脈において、光子は存在論的に構造の中で意味を与えられ、抽象的な仮想空間の中を振動しているのである。

すなわち唯名論者にとって、この抽象的領域を物理的な世界と認めることが、初めてこの時空領域（空間領域）の外側に具体的な物理世界の領域を見出すことに繋がる。因果的に触れることが不可能な高階の数学的な構造は、唯名論的な十全性とは無縁な存在かもしれない。しかし、この光子は空間内のどこにあるのかはさておき、電子に対して因果的に相互作用している。実空間ではなく仮想空間を振動する光子は、数学的存在者でも高階の存在者でもなく、唯名論的に認められるべき存在者として、時空内の存在者と因果的なやりとりをしているのである。この抽象的領域を物理的領域と存在論的に認めることで、唯名論者は初めて電磁場の構成要素が光子であるという、光の粒子説を真にすることができるのである。

因果的な構造の中に、この光子が振動する抽象的領域を認めることは、時空領域などの物理的領域をより一般化することに繋がる。

- 光子は量子論的な系においては、電磁場の構成要素として存在しているが、光子が明確に粒子的な振る舞いをしている（振動している）領域は抽象的であり、この抽象的領域は表象として

[*23] 構造実在論や粒子の同一性の議論においては、フェルミオンである電子の議論と並行して、ボソンである光子の議論も引き合いに出されており、Saunder(2003b p.131) や Ladyman(2007p.38) は、フェルミオンとは異なってボソンあるいはゲージ粒子は対象（object）ではないと述べている。これは、ボソンには 3.1 で挙げたパウリの排他原理が働かず、複数の粒子が完全に同一の外的性質群を得られることにも関連しているが、対象概念の妥当性に関しては本論では触れず、少なくとも光子も電子同様に、抽象的な構造のみから物理的事実や性質を得ているという解釈は彼らとも共通していることに着目したい。

のモデルの存在領域ではなく、あくまで個別者が存在する物理的領域なのである。

光の粒子説という２０世紀初めの大発見は、この後に続く量子論のように、物理学理論の抽象的な定式化に先立った、この物理世界の領域という概念を拡張させるためのきっかけだったのかもしれない。

この光子描像は観点的 (perspective) なモデルである。この光電効果と量子電磁力学理論の事例は、科学哲学でありがちな理論選択の問題とはやや事情が異なる。というのも本論で挙げた量子電磁力学における粒子描像と波動描像は、異なる別々の理論体系というわけではなく、あくまで一つの数式的構造を実験事実と矛盾無く理解するための補助的な解釈手段である。そのために、数式の構造によってのみ一意に真偽が決まるような理論の事例と比べて、些か解釈の自由度が大きい。さらに、真理は粒子描像と波動描像の二者択一というわけでもなく、現代の量子物理学においては、存在者は絶えず異なる二面性を状況に応じて使い分けている。つまり、今回の光電効果という事例に際しては、粒子描像の方がたまたま好まれたということに過ぎない。要するにこの粒子描像は、電磁場の完全な真理というよりは、観点主義的な文脈で適したモデルの一例なのである (Giere 2004; 2010)。抽象的領域の光子の実在は、それがモデル内の普遍者であれ、あるいはそれを例化する個別者であれ、現状の科学モデルが合致するミニマルな実在論によって擁護されるべきなのかもしれない。

4 おわりに

本論文は、科学的実在論が主張する実在の意味と、経験科学の備える数学的体系との関係性の一つのあり方を論じた。これは、科学的実在論が実在を擁護する存在者は、モデルの中に登場する抽象的な物理的存在者なのか、あるいは物理（実際の）世界に登場する具体的な存在者なのかという、形而上学における実在論と唯名論との普遍論争の背景と関わりを持つ。さらに数学の哲学で論じられる、経験科学における数学の不可欠性と存在論的なコミットメントの関係性とも絡んでいた。

唯名論的アプローチによって、実在論が述べる以上に現代物理学の抽象性をカテゴライズすることができた。シロスの実在論にとっては、仮に物理世界と直接因果関係を持たなくても、科学的説明の機能を備えているという点において、理論的対象（構造）は普遍者として実在しているが、唯名論者にとってはその理論的対象（構造）を例化する個々の対象（構造）こそが実在していることになる。種々の個別者の情報から、理論によって共通の性質を抽象化することで得られるのがシロスの実在論が擁護する普遍者だとすれば、唯名論者は逆に普遍的な数学的構造に、個々の個別者の根底の事実を付け加えることで、構成要素である具体的な対象に行き着く。しかし現在の量子物理学においては、構成要素の究極的な根底の事実は、むしろ抽象的な構造のみに支配されており、対象に関する唯名論的な探究は、OSR と同様に二項関係をベースとする構造的な抽象性へと行き着く。さらに光子のような仮想粒子、すなわち場の構成要素である対象を論じる際には、上記の抽象性に加え特定の物理量によって作られる「物理的な抽象的領域」こそがそれらの明確な存在領域となる。この２通りの抽象性こそが、モデルではなく世界の側にある抽象性なのである。

因果性と抽象性という、一見相反する概念にこそ物理学理論の繋がりがあることが唯名論的アプ

ローチより得られた。電子のような物質粒子の多粒子系の抽象的な構造から因果関係を掴むのは容易ではない一方で、光子の場合には、具体的な個別者は光電効果のような物理現象を通じて我々と因果的な関係を持つが、それらは時空領域を越えたところに存在することになる。これはたとえ唯名論者であったとしても、個別者の居場所として、抽象的領域を認めなければならないということである。数学的な体系を虚構と捉え、あくまで因果性を重視する唯名論者にとっても、この新たな抽象性を因果に含めなければいけないというのが本論文の帰結である。

本論で用いた光電効果の粒子描像の話は、あくまでそれが正しいとする標準的な現代物理学の枠組みを前提としたが、粒子説の実態に対しては不完全ながらも様々な対抗馬がある。たとえば光の粒子説を用いずに光電効果やコンプトン効果を説明する物理学者自身の見解もある (Lamb & Scully 1969; Scully & Sargent 1972)。実際に今回は電磁場の量子化によって、光子が抽象的な仮想空間を振動することに着目したために、電子の波動関数のような、光子の実空間的な分布には一切触れていない。このことがより光子という輪郭を曖昧にしているわけだが、3.3.3 でも触れたように、科学哲学的に光の正体が光子だという解釈が、果たして本当に擁護できるのかということは、他の科学史的な事例やパラダイムも踏まえた上で、著者の更なる課題としたい。一方で我が国でも近年では、光子の空間的な局在性として、光子自体の波動関数も古典的なマクスウェルの方程式や、粒子間の相互作用との関連性で取り上げられている (笹部, 安達 1989；北野 1992)。こういった事例にも目を向けることで、光子の実在性がより危うくなったり、あるいは物質粒子の実在性と同等に扱われる可能性があることも最後に付け加えておきたい。

抽象的領域という存在論的領域において仮想粒子が実在すると捉えることは、物事の基盤を時空領域に求める時空主義者 (spatiotemporalism) にとっては不利かもしれない。光電効果という現象に対する説明として、光の粒子説が有用かつそれが比喩以上の意味を持つならば、電磁場の構成要素である光子は、確かに空間上ではなく物理量が作る仮想空間上を振動している。すなわち根底の事実は、時空とは独立した領域にあるということで、このことは、理論的存在者を例化している具体的な個別者の脱時空的な解釈を仄かしている。この考え方は、時空が最も基礎的ではないという最新の物理学を取り入れた見解 (Paul 2012) などとも合致しており、具体的（因果的）な個別者＝時空的領域の存在者の枠組みをまさに改変しよういう試みでもある。科学的探究の中で得られる抽象性の本質がどこにあるのかといった観点で、形而上学的な捉え方も大いに影響を受ける可能性に期待したい。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP21J01573 の助成を受けたものです。本論文の作成に当たって、形而上学関連の文献を紹介頂いた出身研究室の後輩諸君、そして非常に有益なご指摘を下さった二名の匿名の査読者に感謝致します。特に一人目の査読者の方には、拙著の意義を見出す上で、著者のこれまでの専門分野との関連性も示唆頂き、自身の方向性に一層光明を得ることができました。重ねてお礼申し上げます。

参考文献

Adams, Robert M (1979) “Primitive Thisness and Primitive Identity” *Journal of Philosophy*, 76, pp. 5–26.

Balaguer, Mark (1998) *Platonism and Anti-Platonism in Mathematics*, Oxford: Oxford University Press.

Burgess, John P (1983) “Why I am not a nominalist” *Notre Dame Journal of Formal Logic*, 24 (1), pp. 93–105.

Burgess, John P & Gideon Rosen (1998) *A Subject With No Object: Strategies for Nominalistic Interpretations of Mathematics*, Oxford: Oxford University.

Cartwright, Nancy (1983) *How the Laws of Physics Lie*, Oxford: Oxford University Press.

Cao, Tian Yu (1997) *Conceptual Developments of 20th Century Field Theories*, Cambridge: Cambridge University Press.

Chakravartty, Anjan (1998) “Semirealism” *Studies in History and Philosophy of Science*, 29 (3), pp. 391–408.

——— (2007) *A Metaphysics for Scientific Realism:Knowing the Unobservable*, Cambridge:Cambridge University Press.

Compton, Arthur H (1923) “The Spectrum of Scattered X-Rays” *Physical Review Series*, 22, pp. 409–413.

Dieks, Dennis & Marijn A.M Versteegh (2008) “Identical Quantum Particles and Weak Discernibility” *Foundations of Physics*, 38, pp. 923–934.

Dummett, Michael (1991) *Frege: Philosophy of Mathematics*, London: Duckworth.

Einstein, Albert (1905) “Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt” *Annalen der Physik*, 17, pp. 132–148.

——— (1906) “Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption” *Annalen der Physik*, 20, pp. 199–206.

——— (1907) “Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme” *Annalen der Physik*, 22, pp. 180–190.

Esfeld, Michael & Vincent Lam (2008) “Moderate structural realism about space-time” *Synthese*, 160 (1), pp. 27–46.

Fermi, Enrico (1932) “Quantum Theory of Radiation” *Reviews of Modern Physics*, 4, pp. 87–132.

Field, Hartry (1980) *Science Without Numbers*, Princeton: Princeton University Press.

French, Steven (2010) “The interdependence of structure, objects and dependence” *Synthese*, 175, pp. 89–109.

French, Steven & James Ladyman (2003) “Remodelling Structural Realism: Quantum Physics

and the Metaphysics of Structure" *Synthese*, 136 (1), pp. 31–56.

French, Steven & Décio Krause (1995) "Vague Identity and Quantum Non-Individuality" *Analysis*, 55 (1), pp. 20–26.

French, Steven & Michael Redhead (1988) "Quantum Physics and the Identity of Indiscernibles" *British Journal for the Philosophy of Science*, 39, pp. 233–246.

Frigg, Roman (2010) "Models and Fiction" *Synthese*, 172 (2), pp. 251–268.

Giere, Ronald (2004) "How models are used to represent reality" *Philosophy of Science*, 71 (5), pp. 742–752.

..... (2010) *Scientific Perspectivism llustrated(ver)*, University of Chicago Press.

Glashow, Sheldon L (1961) "Partial-symmetries of weak interactions" *Nuclear Physics*, 22, pp. 579–588.

Hüttemann, Andreas (2004) *What' s wrong with microphysicalism?*, London: Routledge.

Ketland, Jeffrey (2011) "Nominalistic Adequacy" *Proceedings of the Aristotelian Society New Series*, 111, pp. 201–217, Oxford University Press.

Ladyman, James (1998) "What is Structural Realism?" *Studies In History and Philosophy of Science Part A*, 29 (3), pp. 409–424.

..... (2007) "On the Identity and Diversity of Objects in a Structure" *Proceedings of the Aristotelian Society*, 81 (Supplementary Volume), pp. 23–43.

Lamb, Willis & Marian Scully (1969) "The Photoelectric Effect without Photons" in *Polarization Matter and Radiation* (Jubilee volume in honor of Alfred Kastler), Presses Universitaires de France, Paris.

Lenard, Philipp (1902) "Ueber die lichtelektrische Wirkung" *Annalen der Physik*, 313 (5), pp. 149–198.

Leng, Mary (2005) "Platonism and Anti-Platonism: Why Worry?" *International Studies in the Philosophy of Science*, 19 (1), pp. 65–84.

Lowe, Edward Jonathan (1994) "Vague Identity and Quantum Indeterminacy" *Analysis*, 54 (2), pp. 110–114.

Muller, F.A & Simon Saunders (2008) "Discerning Fermions" *British Journal for the Philosophy of Science*, 59, pp. 499–548.

Muller, F.A & Michael Seevinck (2009) "Discerning Elementary Particles" *Philosophy of Science*, 76, pp. 179–200.

Paul, Laurie Ann (2012) "Building the world from its fundamental constituents" *Philosophical Studies*, 158 (2), pp. 221–256.

Pincock, Chris (2007) "A Role of Mathematics in the Physical Sciences" *Nous*, 41 (2), pp. 253–75.

Psillos, Stathis (2010) "Scientific Realism: Between Platonism and Nominalism" *Philosophy of Science*, 77 (5), pp. 947–958.

——————— (2011) “Living with the Abstract: Realism and Models” *Synthese*, 180 (1), pp. 3–17.

Psillos, Stathis & Martin Curd (2010) *The Routledge Companion to Philosophy of Science*, Routledge.

Quine, Willard van Orman (1960) *Word and Object*, Cambridge, MA: MIT Press.

Salam, Abdus (1968) “Weak and Electromagnetic Interactions” in Riazuddin (eds), *Selected Papers of Abdus Salam: (With Commentary)*, World Scientific Pub Co Inc (1994).

Saunders, Simon (2003a) “Physics and Leibniz’s Principles” in K. Brading and E. Castellani (eds), *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, Cambridge: Cambridge University Press.

——————— (2003b) “Structural Realism Again” *Synthese*, 136, pp. 127–33.

——————— (2006) “Are Quantum Particles Objects?” *Analysis*, 66, pp. 52–63.

Scully, Marian & Murray Sargent (1972) “The concept of the photon” *Physics Today*, 25 (3), 38.

Suppe, Frederick (1989) *The Semantic Conception of Theories and Scientific Realism*, Urbana: University of Illinois Press.

Teller, Paul (1986) “Relational Holism and Quantum Mechanics” *British Journal for the Philosophy of Science*, 37, pp. 71–81.

van Fraassen, Bastiaan C (1980) *The Scientific Image*, Oxford: Oxford University Press.

——————— (2006) “Structure: Its Shadow and Substance” *British Journal for the Philosophy of Science*, 57, pp. 275–307.

Weinberg, Steven (1967) “A Model of Leptons” *Phys. Rev. Lett*, 19, pp.1264–1266.

Worrall, John (1989) “Structural Realism: The Best of Both Worlds?” *Dialectica*, 43, pp. 99–124.

Yablo, Stephan (2001) “Go Figure: A Path through Fictionalism” *Midwest Studies in Philosophy*, 25, pp. 72–102.

——————— (2008) “Abstract Objects: A Case Study”, *Nous*, 36 (s1), pp. 220–240.

Yang, Chen-Ning Frank & Robert L. Mills (1954) “Conservation of Isotopic Spin and Isotopic Gauge Invariance” *Phys. Rev*, 96, pp. 191–195.

北野正雄 (1992)「光学の基礎に関する最近の研究-2 光子状態を中心として」,『応用物理』, 61 (6), pp. 576–583.

小出昭一郎 (1990)『量子力学 II』(改訂版) 裳華房.

笹部薫, 安達 俊美 (1989)「光子に対する量子力学の構成および Maxwell 方程式との関係」,『 電気学会論文誌. A』, 109 (2), pp. 49–55.

藤田翔 (2017)「構造的解釈から見た時空の創発：どうして時空原子は時空ではないのか?」,『 科学基礎論研究 』48(1), pp. 1–19.

藤田翔 (2019)「時空の実在性と現代物理学との関わりー構造はマクロとミクロを繋げるのか？」博

士論文 大阪大学大学院人間科学研究科.

著者情報

藤田翔（名古屋大学　日本学術振興会特別研究員 (PD) fujita.sho@h.mbox.nagoya-u.ac.jp）