

第114回アブダクション研究会開催のご案内

アブダクション研究会

代表・世話人 福永 征夫
TEL & FAX 0774-65-5382
E-mail: jrfd117@ybb.ne.jp

事務局 岩下 幸功
TEL & FAX 042-35-3810
E-mail: chaino@cf6.so-net.ne.jp

■ホームページ■

<http://abductionri.jimdo.com/>

第114回アブダクション研究会の開催について、下記の通りご案内を申し上げます。

(1) 第113回アブダクション研究会のご報告をします。

■2017年3月25日(土)に開催しました第113回アブダクション研究会は、『「光の場、電子の海----量子場理論への道」吉田伸夫著/2008新潮社/を読んで、粒子や場とは何かを学ぶ』という重要なテーマで、大河原敏男氏、八尾 徹氏、と世話人の福永征夫が、次のように分担をして、解説発表を進め、議論を展開して、大変に有意義な研鑽の機会を得ることができました。

序章	<u>原子と場----19世紀物理学の到達点</u>	担当	世話人	福永 征夫
第1章	<u>粒子としての光----アインシュタイン</u>	担当	世話人	福永 征夫
第2章	<u>原子はなぜ崩壊しないのか----ボーア</u>	担当	世話人	福永 征夫
第3章	<u>波動力学の興亡--ド・ブロイとシュレディンガー</u>	担当	世話人	福永 征夫
第4章	<u>もう一つの道----ハイゼンベルク・ボルン・ヨルダン</u>	担当	大河原 敏男 氏	
第5章	<u>光の場----ディラック</u>	担当	大河原 敏男 氏	
第6章	<u>電子の海----ディラックとパウリ</u>	担当	大河原 敏男 氏	
第7章	<u>量子場の理論----ヨルダン・パウリ・ハイゼンベルク</u>	担当	八尾 徹 氏	
第8章	<u>くりこみの処方箋--朝永・シュウイングー・ファインマン</u>	担当	八尾 徹 氏	
終章	<u>標準模型----20世紀物理学の到達点</u>	担当	世話人	福永 征夫

■ところで、量子力学や場の量子論の理論をめぐる学術の展開においては、常に、相対性理論との整合性の問題が追求されてきています。

■世界をマクロスコーピックに捉える相対性理論は、實在論的な立場から、主として演繹的な論理に基づいて構築され、展開されてきました。

■世界をミクロスコーピックに捉える量子力学や場の理論などの量子論は、確率論

的な立場から、主として帰納的な論理に基づいて構築され、展開されてきました。

■わたくし（世話人）の目からみると、自然や社会の系における循環やネットワークの問題など、われわれの目線のレベルのリアリティーを取り扱うメソスコピックな中間の世界は、
実在論的な立場と確率論的な立場が共存する世界であるように思われます。
そこでは、因果的な現象と相関的な現象が相補的に共存し、演繹的な論理と帰納的な論理が相補的に共存しています。
そのような中間の世界がもつ、特性や条件があるからこそ、自然誌や人類史を織り上げてきた、自己組織化という、秩序と自由が融合する相補的な現象が見られるのです。

■当日の会合のために、長期のご準備をお願いし、多大のご尽力をいただいた、大河原敏男、八尾 徹、の両氏には、心からのお礼を申し上げ、深く感謝の念を表します。

■ 量子力学から量子場の理論へ ■

【1】19世紀末の結論は、物質と力を別個のものとして捉える二元論だった

世界を形作る基本的な構成要素は何か？

地上に文明が誕生して以来、この問いは繰り返し投げかけられてきた。

19世紀末に科学者たちが到達した結論は、物質と力を別個のものとして捉える一種の二元論だった。

【2】原子は粒子として存在し、場は波動となって力を伝える

物質は原子によって構成され、力は場によって媒介される。

場は空間を満たし、その中に原子が点在する。

原子は粒子として存在し、場は波動となって力を伝える。

こうした二元論的な世界の描像は、それなりに完結したものである。

【3】20世紀に入ると、粒子性と波動性は混じり合うことが判明し原子と場の境界は曖昧になってきた

しかし、20世紀に入ると、事態は思いも寄らぬ方向へと進んでいく。

分割不能だとされた原子に内部構造が見いだされ、その構成要素の1つである電子が、ときとして波のように振舞うことがわかってきたのだ。

さらに、場を伝わる波に他ならないと思われていた光も、場合によっては粒子的な性質をかいま見せることも判明した。

粒子性と波動性は混じり合い、原子と場の境界は曖昧になってきた。

【4】1905年にアインシュタインは光が粒子性と波動性を併せ持つという光量子論を提唱した

1905年、粒子性と波動性が必ずしも排他的ではないという革新的なアイデアがアインシュタインによって提唱される。

光が粒子性と波動性を併せ持つという光量子論である。

光量子論は、彼以外に思いつける人が誰かいたか疑わしいと感じられるほど、それまでの常識から懸け離れた突飛な内容だった。

【5】光量子論は、量子というアイデアを軸に、粒子（原子）と波動（場）の二元論を統一する方向に人々を導くはずのものだった

アインシュタインの光量子論は、量子というアイデアを軸に、粒子（原子）と波動（場）の二元論を統一する方向に人々を導くはずのものだったが、そのことに理解を示す物理学者はなかなか現れなかった。

光量子論のブレイクスルーは、1920年代後半におけるヨルダンやディラックの研究まで待たなければならない。

【6】量子論は、光の問題を脇に置いたまま電子の理論として研究が重ねられた

アインシュタインによる光の理論として始まった量子論は、しばらくは光の問題を脇に置いたまま電子の理論として研究が重ねられ、1920年代半ばに、まず電子についての量子力学として一応の完成を見ることになる。

【7】「量子力学」が一応の完成を見た1926年は、物理学の転換点となる画期的な年だとされている

多くの科学史家は、1926年を、物理学の転換点となる画期的な年だとしている。

この年、シュレディンガーによる波動力学とハイゼンベルクらによる行列力学の同等性が証明され、両者を総合した「量子力学」が完成したと言われるからだ。

しかし、本当にそうなのだろうか？

【8】1926年当時の量子力学は、自然の謎の究明には未熟な理論だったはずだ

自然の謎を究明しようと奮闘してきた人たちにとって、1926年当時の量子力学は、まだまだ未熟な理論だったはずだ。

【9】「量子」のアイデアは、光と電子における波動と粒子の二重性の認識に由来する

「量子」のアイデアは、波動だと思われていた光がときには粒子のように振舞い、逆に、典型的な粒子であるはずの電子がときに波動のように振舞うという認識に由来する。

【10】1926年版の量子力学は、力学体系と呼べるほどのものではなく、「粒子の量子論」と呼ばれるべきものである

ところが、1926年版の量子力学では、光は理論の枠組みに取り入れられておらず、電子も、実体は粒子でありながら、その運動の仕方が波動方程式に従うという曖昧な形でしか定式化できなかった。

いわゆる量子力学は、力学体系と呼べるほどのものではなく、「粒子の量子論」と呼ばれるべきものなのである。

【11】相対論に適合する原理的な量子論は、粒子ではなく場に量子化の手法を適用した「場の量子論」である

量子論は原理的な理論なのだから、実用面よりも、その本質的な特性を理解するほうが重要だという考え方があるだろう。

しかし、量子力学は、実は、原理的な理論ではない。

この理論は、質点（質量を持つ点状の粒子）を扱うニュートン力学に、対応原理を適用して構築されたものであり、ニュートン力学が非相対論的であるのと同じように、「相互作用が伝播するスピードは光速を超えない」という相対論の要請を満たしていない。

原理的な理論は相対論の要請を満たす必要があるので、量子力学とは、あくまで、運動速度が光速に比べて十分に遅い現象に適用するための実用的な理論でしかないのである。

相対論に適合する原理的な量子論は、粒子ではなく場に量子化の手法を適用した

「場の量子論」である。

量子論の重要な性質である不確定性関係について言えば、粒子の量子論では、「粒子なのに位置が確定していない」というほとんど理解不能な主張になるが、

場の量子論では、「場の強度が不確定になる」という、もう少しわかりやすい主張に置き換えられる。

また、「粒子であると同時に波である」という二律背反的な主張ではなく、「波が粒子のように振る舞う」となる。

【12】原子内部における電子の振る舞いを記述するだけならば、実用的には粒子の量子論で充分だが、理論の完全性という点から見ると、これでは物足りない

原子内部における電子の振る舞いを記述するだけならば、実用的には、粒子の量子論で充分である。

しかし、理論の完全性という点から見ると、これでは物足りない。

原子のエネルギー状態が変化して電磁波が放出される場合、粒子の量子論では、エネルギーの差から光の振動数が求められるだけで、いかなる過程を経てどんな強度の光が放出さ

れるのか、全くわからないのである。

【13】量子力学の理論の欠陥は、不確定性関係を考えても明らかになる

理論の欠陥は、不確定性関係を考えても明らかになる。

行列力学で量子論の原理とされた交換関係によれば、電子の位置と運動量は、確定した値を持たない。

ところが、マクスウェル電磁気学によれば、静止した荷電粒子の周囲には、その位置を中心として強度が中心からの距離の逆2乗に比例する電場が存在するはずである。

したがって、電子の位置が不確定であるとは、電場の強度も不確定になることを意味する。

電子が量子論に従う以上、理論を完全なものにするためには、電磁場の量子論的な振る舞いも考慮しなければならない。

【14】1926年以降も理論の改良が続けられ、遂に量子場の理論という一つの完成形が作り上げられて、19世紀的な二元論は発展的に解消された

こうした状況に飽きたらない研究者たち（特に、ディラック、ヨルダン、パウリ、ハイゼンベルク）は、1926年以降も理論の改良を続け、遂に、一つの完成形を作り上げる。

こうして見いだされたのが、粒子性と波動性を併せ持ち、原子と場の双方を代替する「量子場」という概念である。

量子場の理論では、電子と光が同じ理論形式で記述されており、どちらも粒子と波動の二重性を示す理由が不自然でない形で示された。

19世紀的な二元論は、量子場を元にした統一的な理解へと発展的に解消されていくことになる。

[以上は、吉田伸夫著『光の場、電子の海』（2008・新潮社）並びに、吉田伸夫著『量子論はなぜわかりにくいのか』（2017・技術評論社）から、抜粋・引用させていただきました]

■なお、現代物理学では、すべての力を統一する大統一理論の研究が進められている。これには、量子場の理論の系譜につながる確率論的な統一理論だけでなく、ファラデーやアインシュタインの系譜につながる实在論的な統一理論の研究も行われている。あるいは、これから先には、实在論的な部分と確率論的な部分の両方を有する第3の道を辿るような理論の研究が行われる可能性もあるのかもしれない。

案内状最後部添付資料の「3. ある対話の例から相対論と量子論の世界観の違いを知る」を参照してください。

■この案内状の最後部には、『粒子や場とは何か』と題する3部構成の取りまとめ資料を掲載しました。

1. 場という考え方を知る

：この部分は、ロビン・アリアンロッド著＝松浦俊輔訳『世界を数式で想像できれば』（2006・青土社）から、抜粋・引用させていただきました。

2. 「光の場、電子の海----量子場理論への道」吉田伸夫著／2008 新潮社／を読んで、粒子や場とは何かを学ぶ

：この部分は、「光の場、電子の海----量子場理論への道」の各章の担当者による要約文を、そのまま掲載しました。ただし、序章は著作の全文を掲載しました。

序章	原子と場----19世紀物理学の到達点	担当	世話人	福永	征夫
第1章	粒子としての光----アインシュタイン	担当	世話人	福永	征夫
第2章	原子はなぜ崩壊しないのか----ボーア	担当	世話人	福永	征夫
第3章	波動力学の興亡--ド・ブローイとシュレディンガー	担当	世話人	福永	征夫
第4章	もう一つの道----ハイゼンベルク・ポルン・ヨルダン	担当	大河原	敏男	氏
第5章	光の場----ディラック	担当	大河原	敏男	氏
第6章	電子の海----ディラックとパウリ	担当	大河原	敏男	氏
第7章	量子場の理論----ヨルダン・パウリ・ハイゼンベルク	担当	八尾	徹	氏
第8章	くりこみの処方箋--朝永・シュウィンガー・ファインマン	担当	八尾	徹	氏
終章	標準模型----20世紀物理学の到達点	担当	世話人	福永	征夫

3. ある対話の例から相対論と量子論の世界観の違いを知る

：この部分は、メンデル・サックス著＝原田稔訳『相対論対量子論』（1999・講談社）から、抜粋・引用させていただきました。

■『粒子や場とは何か』と題する取りまとめ資料を、粘り強く、繰り返しお読みいただいて、19世紀から今日に至る物理学の探究の歴史を研鑽され、これからの研究活動とアブダクション研究会での探究に生かしていただくようお願いをいたします。

■ところで、話題が変わりますが、わたくしは最近、著しい高齢化と少子化の中で、高齢者と若年者が抱える、ある面の課題について、身じかに痛感する機会を経験いたしました。

■2015年7月の中旬に、会員の皆様に配信しました世話人のエッセイを、下記に再録しますので、ご高覧ください。

環境が人間の能力を発展させたり、錆びつかせたりする

◇わたくしには、**現在の高齢化と環境問題の趨勢がピークアウトするとされている、**

2050年に向かって進んでいるこの時期に、どうしても方向づけておかなければいけないコンセプトがあるように思われます。

◇それは、①人との会話を不得手にし好まない若年者が増えていることに歯止めをすることと、②高齢者の概念を熟達者の概念に転換して、人は生活習慣を刷新すればいつまでも伸び続けるのだという社会の通念と確信を築くことです。

◇ある都内の公共施設の会議室をお借りして、アブダクション研究会を開催したのですが、講演者の説明資料を投射するプロジェクターが機能しないという失敗をしました。

◇以前のNEC会館では専門の人にやってもらっていましたし、学会の発表でもスタッフがやってくれますので、わたくし自身がプロジェクターの扱いを知らなくてもよかったです。

◇新しい会場ではその条件がなくなっていたのです。ピンチに遭遇して、わたくしは現場で方法の限りをつくしたのですが、かなわなかったのです。

◇その翌日から、調査を始めました。

映らなかった機械A（品番を記録しておきました）、機械B（品番を記録しておきました）、ともにエプソン製でしたのでメーカーサイドに確かめました。

福永：プロジェクターのコネクターは、マイナスピ（メスピ）。

PCのコネクターもマイナスピ（メスピ）。

両方をつなぐには、プラスピ（オスピ）とプラスピ（オスピ）を両端にもつケーブルが必要なのですが、機械Aにも機械Bにもついていないのは、どういうわけなのか。

会場の担当の方に重ねて聞いても、そのようなケーブルはありませんという返事だったのです。

メーカーサイド：機械Aには付属品としてついていたはずですが。

機械Bではユーザーが用意する必要があります。

福永：機械Bには、PCのUSBから、プロジェクターのUSB端子に接続するコードがあったものですから、それに接続の機能があるものと推定して、いろいろやってみたのです。ところが、全く結果がでなかったのです。

メーカーサイド：機械BのUSB経路を利用するには、PC側にソフトのインストールが必要です。

◇われわれは、以上のようなボトルネックによって、失敗すべくして失敗したのだということが判明したのでした。

会場の施設側にも配慮の不足があったのですが、いまさら言っても、覆水は盆には返りません。

わたしくに事前の知識なり取り扱いの経験さえあれば、近所の電気屋さんから、プラスピ（オスピ）とプラスピ（オスピ）を両端にもつケーブルを緊急調達することもできたし、USB経路を利用することもできたのです。

◇ところで、都内にある、次のアブダクション研究会の会場を事前にチェックしたところ、プロジェクターの借用料がかなり高額なのです。
より低額品の借用の交渉をしましたが、自己防衛も必要と考えて、携帯用の自前のプロジェクターをネットで購入しました。
そして、くだんのプラスピン（オスピン）とプラスピン（オスピン）を両端にもつ5mケーブルを手に入れるため、辺鄙な立地のA電気という量販店に雨の中をタクシーで往復しました。

◇この量販店のA電気に関連して、わたくしが見聞きしたことは、またもや驚きの経験でした。
スタッフの人は、物品の場所まで案内してくれるのですが、ほとんど会話の機会を与えようとしないかのような無口な接客様式なのです。
帰りのタクシーの運転者が物知りの人でしたので、聞きましたら、最近の若い人には、初めての人と丁寧な言葉でやりとりするのを好まない、もっと言えば、嫌がり、忌避する傾向が増えているので、
量販店のA電気は、それに合わせた接客様式をベースにしているようだという話をしてくれました。

◇わたしがネットで取得した携帯用プロジェクターを試して見たのですが、やはりパワーが不足していて、大きな会議室での利用には向かないことも、経験をして見て、やっと分かったことなのでした。

◇いかにして、**熟達者が新しいことを経験しながら社会生活をするように、自分を仕向けていくことができるのか。**

◇**若年者が、他者とのコミュニケーションの習慣を充実させるように、いかにして、自分を仕向けていくことができるか。**

◇必要は発明の母とはよく言ったもので、環境が人間の能力を固定化したり、発展もさせるのです。
わたくしには、2050年に向かって進んでいるこの時期に、熟達者と若年者の社会的な活性化策は、どうしても方向づけておかなければいけないことだと思われま

以 上

（2）アブダクション研究会は、次なる30周年に向けて、新たに有意義なスタートを切ってまいります。

今年歩んできた道を踏みしめ、次なる30周年に向けて、新たなステージの夢と展望を描いて共有し、気持ちも新たに有意義なスタートを切ってまいりたいと存じています。

次なる30周年に向けた、新たなステージの夢と展望は、「どのような方向に広域学の確立をめざすのか」という点に求めて行きたいものと世話人は思案をしていま

す。

すなわち、それは、次の二点に集約されます。

①「精神」のプロセス、「物質」のプロセス、および「生命」のプロセスを、共通的に認識し理解できるように、広域的な知識を発見し発明して高次の包括的な知識を創造する道への入り口をどのように切り拓くのかを探究し、発信できるようにすること。

②以上の探究と平行に、「持続可能性を確保する知識と行動」を探究し実践に移すことのできる条件を確保できるようにすること。

皆様はいかがお考えでしょうか。

わたくし宛にご意見とご感想をお寄せくださることを希望し期待しています。

(3) 次なる30周年に向けた、新たなステージのアブダクション研究会は、「過去を想起し、未来を想像し予期して、今ここに対処する」という、人間の認知、思考と行動、評価・感情のパターンに則って、テーマや活動の時間・空間の深さと拡がりを追求してまいります。

これは、世界や社会の歴史と未来への展望のはざままで、現前に対して、避けず、逃げず、ぶれずに、本質的で、現実的な、対処をして行かなければならないという、アブダクション研究会がめざす、取り組みの基本的な姿勢と態度でもあります。

また、狭義には、過去とは、アブダクション研究会の今までの記録でもあり、未来とは、次回研究会から来年度までの予定と計画でもあります。

常に、そうした活動の時間・空間の深さと拡がりの幅・厚みと奥行きを意識し合い、認識し合い、確認し合いながら、現前の活動を連綿として引き継いで、躍動するように、活動を積み上げてまいります。

(4) 各界、各分野の皆様の積極的なご参加をお願いします。

既存の領域的な知識をベースにして、新たな領域的な知識を探索し、それらを広域的な知識に組み換えて、より高次の領域的な知識を仮説形式的に創造することを目標に、アブダクション研究の飛躍を期してまいりますので、各界、各分野、各層の皆様の積極的なご参加をお願いします。

(5) アブダクション研究会は、現在、新規の会員を募集しています。

新規の会員として、年齢・性別を問わず、①環境の変化に対応して個人や集団の能力をどのように発展させるのか。②人・もの・生命の情報のネットワークはどのように組織化されるのか。③持続可能性を確保するための知識と行動とはどのようなものなのか。などのテーマの研鑽と探究に興味と関心を共有でき、隔月のアブダクション研究会に継続して出席できる方を募集しています。

皆様のご友人や知人、関係先の方で、われわれと志を共有できる方がおられましたら、世話人または事務局に積極的にご連絡くださいますようお願いいたします。

(6) アブダクション研究会は、知識の広域化と高次化を目指し進化を続けてまいります。

1996年に設立されたアブダクション研究会は、地球規模の難題に真正面から対処するために、知識の広域化と高次化を目指し、いつまでも、真摯に、勇気を持って、粘り強く、積極的に、可能性を追求し、多様な探究を積み重ねて、一步一步進化を続けてまいります。

(7) 発表をしてみたいテーマのご希望があれば、世話人宛に、積極的に申し出下さい。

皆様には、今後に、ぜひとも発表をしてみたいテーマのご希望があれば、世話人宛に積極的に申し出をいただきたく、お願いを申し上げます。お申し出は、通年的にいつでも、お受け入れをいたします。上記の方向に沿うものなら、いかなる領域に属するいかなるテーマであっても、将来の可能性として、誠意を持って相談をさせていただき、実現に向けて調整を果たす所存であります。

記

◇ 日 時： 2017年5月20日(土) 13:00~17:00(本会)
17:15~19:15(懇親会)

◇ 場 所： 3331 Arts Chiyoda 2階・会議室

〒101-0021 東京都千代田区外神田6丁目11-14 (旧・練成中学校内)

TEL 03-6803-2441 (代表)

東京メトロ・銀座線 末広町下車④出口 徒歩10分 練成公園隣の旧・練成中学校内です。

*当日の連絡先(福永征夫・携帯電話)080-3515-9184



◇ テーマ： 解説発表

『ユクスキュル／クリサートに学ぶ
「生物から見た世界」(2005・岩波文庫)』

齋藤 帆奈 氏
(ガラス・アーティスト／モデル)

参考文献：当日までにお知らせします。

■■ 会員の皆様には、知人や友人もお誘いいただいて、
積極的なコミットメントをお願いします■■

◇プログラム：

- | | |
|------------------------------|--------------------|
| (1) 解説発表[PART-1] | <u>13:00~14:20</u> |
| <小休止> | <u>14:20~14:30</u> |
| (2) 解説発表[PART-2] | <u>14:30~15:50</u> |
| <小休止> | <u>15:50~16:00</u> |
| (3) 総合的な質疑応答： | <u>16:00~16:30</u> |
| (4) 諸連絡： | <u>16:30~17:00</u> |
| (5) 懇親会：<皆様の積極的なご参加を期待しています> | <u>17:15~19:15</u> |

【第114回 アブダクション研究会の出欠連絡について】

- 5/17(水)までに、下欄の要領で、必ず、ご返信ください。
- なお、研究会会場では、飲み物のサービスがありませんので、皆様が各自で、ペット・ボトルや水筒をご持参ください。

第114回 アブダクション研究会(5/20)の出欠連絡

- 5/17(水)までに、**必ず、ご返信ください。**
- 研究会、懇親会とも、必ず、下記により、ご連絡ください。
新会場のため、研究会、懇親会とも、より綿密な準備が必要なことを、何卒、ご理解ください。

FA X： 042-356-3810
E-mail： chaino@cf6.so-net.ne.jp 岩下 幸功 行

出席 出席
●5/20(土)の研究会に、未定ですが調整します。●懇親会に、未定ですが調整します。
欠席 欠席

ご署名 _____

■次々回 2017年7月度の第115回アブダクション研究会は、
●2017年7月29日(土)に、3331アーツ千代田にて、開催いたしますので、皆様には今からご予約いただき、積極的にご参加ください。

●テーマ：『「量子力学で生命の謎を解く」/ジム・アル=カリーリ & ジョンジョー・マクファデン著(2015・SBクリエイティブ)/を輪読研究して量子生物学の知見を学ぶ』

◇呼吸、光合成、嗅覚、磁気感覚、酵素作用、遺伝、意識、生命の起源・・・
◇生命の秘密は、量子の世界に隠されていた!!

- 第1章・・・はしがき
- 第2章・・・生命とは何か?
- 第3章・・・生命のエンジン
- 第4章・・・量子のうなり
- 第5章・・・二モの家を探せ
- 第6章・・・チョウ、ショウジョウバエ、量子のコマドリ
- 第7章・・・量子の遺伝学
- 第8章・・・心
- 第9章・・・生命の起源
- 第10章・・・量子生物学---嵐の縁の生命
エピローグ・・・量子革命

●至急に、解説発表の担当者の1次募集をいたします。
1人当たり、2~3章を分担いただく予定です。
5月20日(土)までに、世話人宛に、奮ってお申し出ください。

■皆様、どうぞ、ご期待ください■

◇ファラデーの「力線」は、磁石のそばで砂鉄が描く、よく知られた模様を用いた、仮説上の幾何学的な見立てだった。

砂鉄を紙の上にでたらめに撒いて、紙の下に棒磁石を置くと、砂鉄は美しい線を描いて整列し、それぞれの線は、磁石の一方の端から出て曲線を描き、反対側の端へと伝わっていくように見える。

このようなパターンが生じるのは、砂鉄のそれぞれが、N極とS極をそなえた小さな磁石のようにふるまうからだ。

◇砂鉄が連なったものをニュートン的に見ているうちは、棒磁石と砂鉄の間で遠隔作用する磁力の組み合わせが影響によって生まれる、時間の中で固まった、おもしろい模様以上のものは出てこなかった。

◇ファラデーは見方を変えた。

棒磁石の強い磁気の影響で、でたらめに散らばった砂鉄が、明瞭な曲線に並ぶという事実注目した。

棒磁石の力を、この線に沿って、砂鉄から砂鉄へと伝わるものと見た。

畑を渡っていく風が、麦を順に動かすのと同じことだ。

◇ニュートン派にとっては、遠隔作用する力は、関係する粒子にだけ作用したが、ファラデーは、砂鉄がなくても、棒磁石からの力は存在するのではないかと思った。

何と言っても、磁石の力の結果を明らかにする別の磁石がないからといって、その力がなくなるわけではないだろう。

ファラデーは、磁石は周囲の空間を磁化、あるいは「分極化」し、空間は、砂鉄のできるパターンと同様の、見えない曲線の力線のパターンで埋まっていると想像した。

◇磁化した空間が場で、ファラデーは、砂鉄のできた線に沿って磁石の力が伝わるのと同じように、磁石の力がその場を見えない力線沿いに次々と伝わっていると想像した。

◇それから、他の磁石が近くに置かれると、それはただちにこの力の連続的な流出の影響を感じると見た。

◇ファラデーは、しかじかの領域にある力線の数が、その領域にある力の尺度となることも想像した。

たとえば、磁石の磁極には、磁石の横よりも、力線がたくさんある。

◇これを従来の数学の言語に移し替えるとなると、かなり手の込んだ話だし、膨大な作業になるだろう。

対照的に、遠隔作用仮説は、磁力が空間を、点から点へ、1ミリ1ミリ、どう伝わるかについては、ややこしいことを言わなくてもよかった。

そもそも力が伝わる必要がなかったからだ。

あらかじめ場が存在しているというのではなく、棒磁石と近くの他の磁石の間に、瞬間的に、遠隔的につながりができるだけだ。

砂鉄の場合、棒磁石と、一粒一粒の砂鉄どうしの間に、遠隔的にはたらく力があつた。

◇物理学者がもうひとつの仮説をきちんと表現するとすれば、別の数学の言語が必要だということを見通したには、マクスウェルだけだったらしい。

■ファラデーとマクスウェル■

◇基本的な静止した現象に関するかぎり、1個の帯電した粒子や1本の磁石で実際に起き

ていることについて、ニュートン派との間に不一致はなかった。
何と言っても、静電気や磁気を扱う実験による科学は、二世紀も前から行われていたことで、プラスの電気を帯びた物体——絹でこすったガラス玉など——をテーブルに固定し、そのそばに、別のプラス電気を帯びた物体（「試験粒子」と呼ばれる）を置くと、この物体は固定されたガラス玉から押し返され、その力の強さも、クーロンの法則で計算できる。

◇固定粒子がマイナスの電気を帯びていたら、試験粒子はそこに引き寄せられる。
同様の状況を、2本の棒磁石で作ることができる。
その磁極は、クーロンの法則に従って、互いに引き寄せあったり押し返しあったりする。

◇不一致は、何が起きるかではなく、どう起きるかの方に関係していた。
帯電した二つの粒子の場合、ニュートン派の想定では、試験粒子に対する電気の力は遠隔作用で、固定粒子から試験粒子に、瞬間的にびよんと伝わる。
粒子そのものが、この（相互の）力に影響されると想定するだけだ。

◇ところがファラデーは、固定粒子は粒子との間の空間にあるすべての点に、「力線」を通じて作用すると見た。
棒磁石のまわりに見えない磁力の線ができ、砂鉄によって目に見えるように現れているのがそれだと思った。

◇電気の場合は、固定粒子のまわりのいろいろな点に試験粒子を置き、それぞれの場合について、試験粒子が押し返されてたどる道筋を記録して、固定粒子が、そこから放射される電気力の見えない線に囲まれていることを導いた（固定粒子がマイナスに帯電していたら、プラスに帯電した試験粒子は引き寄せられ、同じ力線を、内向きにたどることになる）。

◇同様に、電気が流れている針金のまわりに置いた砂鉄から、電気に誘導された磁力の見えない力線が、針金のまわりにできていることがうかがえ、磁石を動かすと、それに誘導されて見えない電気の力線ができると考えられた。

◇ファラデーによれば、電気や磁気の元のまわりにある力線は、その元の物理的影響力を表している。
これは、試験粒子があってその影響を明らかにするかどうかとは無関係に、空間に広がっている。
そのため、線は、その元の「影響力の場」を絵に描いて表したものとなる。
ほとんどの物理学者は、それをファラデーの素朴な考えと見て、まったく注目しなかったが、もちろん、ファラデーは素朴とは言えなかった。

◇その力線を用いて、クーロンの法則に対する代案となる、遠隔作用をまったく想定しない法則を立てた。
二つの帯電した粒子、あるいは二つの磁極の間の力の強さを、物体そのもの——その物体が有している電荷や磁荷の量と、クーロンの法則が求める通りの、両者間の距離——に結びつけるのではなく、粒子の周囲にできる場にある力線の数に結びつけた。

◇電荷のまわりの力線の図を見るとわかるように、電荷に近い、力の強いところには、小さな面積にも力線がたくさんある。
これと同じように、磁極のそばには砂鉄の線がたくさんできる。
このような力が強い領域では、力線の「密度」——場の小さな領域を通る線の数——が大きい。
固定粒子から遠ざかり、力が弱くなると、力線は広がって、「密度」も小さくなる。

◇ファラデーはこの説を、記号ではなく言葉で表し、場についての記述は、精密な量によるよりも、性質を述べたものだったが、マクスウェルは、ファラデーが実は、磁気や電気の現象を分析するための、まったく新しい、ニュートンとは違う方法の基礎を得ていることを悟った。

まだニュートンの方法に変わるまでにはなっていなかった——たとえばクーロンの法則は、静電気の力を計算するための、美しくも単純で正確な方法だった——けれども、マクスウェルは、ファラデーの基礎を取り上げ、それを数学的な「ベクトル場」に仕立てた。

2. 「光の場、電子の海-----量子場理論への道」吉田伸夫著 ／2008新潮社／を読んで、粒子や場とは何かを学ぶ

序章	原子と場-----19世紀物理学の到達点	担当	世話人	福永	征夫
第1章	粒子としての光-----アインシュタイン	担当	世話人	福永	征夫
第2章	原子はなぜ崩壊しないのか-----ボーア	担当	世話人	福永	征夫
第3章	波動力学の興亡--ド・ブローイとシュレディンガー	担当	世話人	福永	征夫
第4章	もう一つの道-----ハイゼンベルク・ポルン・ヨルダン	担当	大河原	敏男	氏
第5章	光の場-----ディラック	担当	大河原	敏男	氏
第6章	電子の海-----ディラックとパウリ	担当	大河原	敏男	氏
第7章	量子場の理論-----ヨルダン・パウリ・ハイゼンベルク	担当	八尾	徹	氏
第8章	くりこみの処方箋--朝永・シュウィンガー・ファインマン	担当	八尾	徹	氏
終章	標準模型-----20世紀物理学の到達点	担当	世話人	福永	征夫

はじめに

◇多くの科学史家は、1926年を、物理学の転換点となる画期的な年だとしている。この年、シュレディンガーによる波動力学とハイゼンベルクらによる行列力学の同等性が証明され、両者を総合した「量子力学」が完成したと言われるからだ。しかし、本当にそうなのだろうか？

◇量子力学は、半導体・レーザー・原子核などさまざまな分野に応用され、現代の科学技術文明を支える基礎理論となっている。こうした応用の際に必要な道具立てのほとんどが1926年までに出揃ったので、確かに、この時点で量子力学の枠組みが確立され、これ以降は、できあがった理論を応用する時代に入ったと見ることもできる。

◇だが、当時の物理学者にそうした自覚があったとは思えない。
水素原子の構造に関する予測は測定データと高い精度で一致していたので、量子力学が“役に立つ”理論であることは間違いなかったが、自然の謎を究明しようと奮闘してきた人たちにとって、1926年当時の量子力学は、まだまだ未熟な理論だったはずだ。

◇「量子」のアイデアは、波動だと思われていた光がときには粒子のように振舞い、逆に、典型的な粒子であるはずの電子がときに波動のように振舞うという認識に由来する。
ところが、1926年版の量子力学では、光は理論の枠組みに取り入れられておらず、電子も、実体は粒子でありながら、その運動の仕方が波動方程式に従うという曖昧な形でしか定式化できなかった。
量子力学とは、その大仰な名称とは裏腹に、単なる「粒子の量子論」にすぎないのである。

◇こうした状況に飽きたらない研究者たち（特に、ディラック、ヨルダン、パウリ、ハイゼンベルク）は、1926年以降も理論の改良を続け、遂に、一つの完成形を作り上げる。
これが、粒子ではなく場を量子論的に扱う量子場の理論である。
量子場の理論では、電子と光が同じ理論形式で記述されており、どちらも粒子と波動の二重性を示す理由が不自然でない形で示された。

◇量子場の理論の最大の障害は、数学的な扱いがきわめて難しい点である。
この理論の形式は1929年に提案されるが、当初は信頼できる計算がほとんどできなかった。
曲がりなりにも計算できるようになるのは、第二次大戦終結後の1940年代末であり、数学的な定式化がほぼ完成するのは、ようやく1960年代になってからである。
しかも、計算がどうしても難しくにもかかわらず、量子場の理論は、技術的な応用には全くといって良いほど役に立たない。
半導体の設計や新素材の開発を行うには、1926年版の量子力学さえ使えば充分なのである。
大学教育で量子場にほとんど目が向けられないのは、そのためである。

◇とは言っても、量子場の理論が、科学的な自然理解の極地であり、人類の英知の到達点であることは確かである。
たとえ何の役に立たなくとも、そこに示される物理世界の驚くべき姿をかいま見ることは、心を豊かにしてくれる体験ではないだろうか。

◇さらに、量子場の理論を視野に収めることは、ミクロの究極に迫ろうとした20世紀物理学史の全体像を理解する上でも、非常に重要である。
これまで、1926年までの量子力学の形成史と、1960年代以降の素粒子論の進展

は、別個に語られることが多かった。

しかし、この2つを量子場の理論というミッシング・リンクでつなぐならば、体系的な理論と知的な直観に基づいて探究を進めた物理学者たちの努力の跡が、一筋の太い線となっ**てははっきりと見えてくるはずだ。**

◇以下の解説では、量子場理論に至る道程が明確になるように、**粒子と波動の二重性という問題を常に中心にして話が進められる。**

□序章・・・粒子的な原子と波動的な場から世界が構成されるという19世紀の二元論的な見方を紹介する。

□第1章・・・20世紀に入り、粒子・波動の二重性が現れる最初のケースとしてアインシュタインの光量子論を取り上げる。

□第2章・・・ニュートン以来の古典物理学では説明できない現象として原子の安定性の問題に触れる。

□第3章・・・原子の安定性の問題を解決する理論として、電子を波動と見なすシュレディンガーの波動力学を紹介する。

□第4章・・・ハイゼンベルクらによる行列力学について述べるが、量子条件と不確定性原理に焦点を絞る。

□第5章・第6章・・・量子場の理論への突破口を切り開いたディラックの業績（電磁場の量子化と相対論的電子論）について紹介する。

□第7章・・・量子場理論の最も正統的な形式であるハイゼンベルクとパウリによる量子電磁気学を取り上げる。

□第8章・・・具体的な計算を可能にした朝永振一郎らのくりこみ理論を紹介する。

□終章・・・素粒子論の発展と標準模型を総括する。

序章 原子と場-----19世紀物理学の到達点

◇世界を形作る基本的な構成要素は何か？

地上に文明が誕生して以来、この問いは繰り返し投げかけられてきた。

◇こうした思索は、長い間、単なる思弁の域を出なかった。

世界の構成要素について、現実のデータと結びつけられる確固たる理論が作られるのは、ようやく19世紀になってからである。

当時の西ヨーロッパでは、鉱工業の発展に伴い物質や電磁波に関する高度な知識が産業界から求められたこともあって、職業科学者が実験や観測に基づいて実証的な研究を行うという近代的な体制が整えられつつあった。

◇19世紀末に西ヨーロッパの先端的な科学者たちが到達した結論は、物質と力を別個のものとして捉える一種の二元論だった。

◇物質は原子によって構成され、力は場によって媒介される。

場は空間を満たし、その中に原子が点在する。

原子は粒子として存在し、場は波動となって力を伝える。

こうした二元論的な世界の描像は、それなりに完結したものである。

◇しかし、20世紀に入ると、事態は思いも寄らぬ方向へと進んでいく。

分割不能だとされた原子に内部構造が見いだされ、その構成要素の1つである電子が、ときとして波のように振舞うことがわかってきたのだ。

さらに、場を伝わる波に他ならないと思われていた光も、場合によっては粒子的な性質をかいま見せることも判明した。

粒子性と波動性は混じり合い、原子と場の境界は曖昧になってきた。

◇こうした流れの中で見いだされたのが、粒子性と波動性を併せ持ち、原子と場の双方を代替する「量子場」という概念である。

19世紀的な二元論は、量子場を元にした統一的な理解へと発展的に解消されていくことになる。

気体分子運動論

◇ジェームズ・クラーク・マクスウェル（1831～79）は、原子論と場の理論をともに完成の域に高めた巨人であり、物理学史上に占める地位は、ニュートンやアインシュタインに匹敵する。

◇マクスウェルが採用した方法論は、物理学の規範になるものだった。

はじめに、出発点となる理論的な仮説を明確なモデルに基づいて作り、そこから演繹的にさまざまな帰結を導き出す。

これを実験で得られたデータと比較して、高い精度で理論と実験が一致するならば、最初の仮説が検証されたと考えるのである。

この方法論を実践することによって、彼は、原子論と場の理論を、哲学的な推測から確固たる物理学理論へと変貌させることができた。

◇マクスウェルの方法論が持つ特徴が最も明瞭に見て取れるのが、気体分子運動論である。

酸素や水素のような元素の実体を小さな粒子だと考える近代的な原子論は、19世紀初頭にドルトンによって提唱された。

この理論によれば、例えば、酸素と水素が水になる化学反応は、酸素原子1個と水素原子2個から水の分子（ドルトンの言い回しでは複合原子）ができる過程である。

こうしたドルトン流の原子論は、化学反応する物質量の比が一定になる（例えば、水になるときの

酸素ガスと水素ガスの容積比が常に1対2になる)ことを簡単に説明できるので、化学者にとっては便利な仮説だったが、原子が実際に存在するかどうかについては、懐疑的な人も少なくなかった。直接観測することのできない原子が、なぜ存在すると言えるのか？

◇これに対するマクスウェルの議論は明快だった。

確かに、原子そのものは観測できない。

だが、原子が存在すると仮定して理論を作り、そこから導かれる帰結が実験結果と一致すれば、原子仮説の信憑性は飛躍的に高まるはずだ。

◇このような観点から構築されたのが、**気体分子運動論**である。

この理論では、気体とは、分子が空間内部を自由に飛び回っている状態だと仮定される。

分子はニュートン力学が適用できる小さな粒子であり、ちょうどビリヤード球のように容器内壁にぶつかっては跳ね返されている。

もっとも、1個の分子はきわめて軽く、その個数は膨大なので(常温の大気で1立方センチ中に $0.3 \times 100 \text{億} \times 100 \text{億}$ 個の分子が存在する)、1個1個の分子が与える衝撃は区別できない。

気体が、孤立した分子の集まりであるにもかかわらず、まるで隙間なく空間を満たしている連続体のように感じられるのは、このせいである。

実感はどうであれ、気体は飛び回っている粒子の集まりだと仮定し、1個1個の分子が壁にぶつかったときの衝撃力を全て足しあわせたときにどうなるかを計算すると、実験によって見いだされていた経験則(ボイル=シャルルの法則)と同じ振舞いを示す圧力の式が得られる。

これが、原子や分子が存在するという根拠である。

◇マクスウェルのすごさは、こうした簡単な関係式に留まらず、「特定の速度を持つ分子の割合が全体の何%になるか」という速度分布の式まで求めてしまったことにある。

◇分子同士が衝突すると個々の分子の速度は頻繁に変化するが、分子数がきわめて多い場合は、特定の速度を持つ分子がやたらに多いといった分布の偏りが均されていき、最終的に、ある滑らかな速度分布に落ち着くはずである。

マクスウェルは、いくつかの仮定の下に、この分布を具体的な式の形で表した。

この式を「マクスウェル分布」という。

マクスウェル分布は、気体を構成する膨大な数の分子群が持つ速度分布を、温度に依存する関数で与える。

例えば、25°Cの水素ガスの場合、水素分子の平均速度は秒速1.9キロだが、全体の0.7%の分子は平均の2倍以上のスピードで飛び回っている----といったことが、この関数を使って計算できる。

◇マクスウェルは、さらに、速度分布の式に基づいて気体が持つ粘性(粘りけの程度)も計算した。

こうして導き出された粘性の値が、実験から得られたデータとほぼ一致していたため、粒子のように振舞う原子・分子の実在性は、さらに真実味を帯びることになった。

こうした研究はルートヴィヒ・ボルツマン(1844~1906)に受け継がれ、統計力学として大成される。

◇確かに原子そのものを見ることはできない(現在では、走査型電子顕微鏡を使って、金属結晶で原子が整然と並んでいる様子などを撮影することはできるが)。

しかし、原子が粒子のように振舞うと仮定した理論が一定の成功を収めている以上、信頼性の高い仮説として原子の存在を受け容れるべきだろう。

逆に言えば、「**原子は小さな粒子のようなものだ**」という見方の根拠になっているのはあくまで物理学の理論であり、理論が変更された暁には、それに応じて原子観も変えていかなければならないのだ。

マクスウェル電磁気学

◇マクスウェルには、気体分子運動論とともに、もう1つきわめて重要な業績がある。
電磁気学を確固たる理論体系として完成させたことである。
この理論で、彼は場の理論を全面的に展開して見せた。

◇電気と磁気の存在は、古代から知られていた。
前者は擦った琥珀が羽毛などを引きつける力として、後者は磁石が鉄を引きつける力として。
だが、離れている物質に作用するという謎めいた性質ゆえに、なかなか科学的な研究の対象にならなかった。

◇空間を越えて作用するという電気や磁気が持つ不思議さを解消しようとしたのが、1830年代におけるマイケル・ファラデー（1791～1867）の試みである。
彼は、電気や磁気の作用が空間を飛び越えて一瞬のうちに相手に届くのではなく、周辺の空間の状態をジワジワと変えながら連続的に伝わって行くと考え、空間の電氣的・磁氣的な状態を電気力線・磁気力線という線の形で表した。
彼のイメージによれば、空間には電氣的・磁氣的な作用を伝える未知の媒質が満ちており、電気力線・磁気力線は、その媒質の状態を視覚的に表現するものである。

◇ファラデーのアイデアを受け継ぎ、電磁気の現象を数学を用いて理論化したのが、マクスウェルである。
彼も、研究に着手した当初は、ファラデーと同じように、電気・磁気の作用が、空間に満ちている何らかの媒質によって伝えられると考え、この媒質が存在する空間領域のことを、電氣的・磁氣的現象が生起する場所という意味で、電場・磁場-----あるいは、両者を総称して電磁場-----と呼んだ。

◇こうして導入された電氣的・磁氣的な「場」の概念には、もともと「媒質が存在する場所」という消極的な内容しか与えられていなかった。
電磁気現象の担い手は場そのものではなく、あくまで場に満ちている媒質だと考えられていたのである。

◇しかし、研究を進めるうちに、マクスウェルは、電磁気の媒質が、現実の物質とは思えないほど奇妙な性質を示すことに気がつき始める。
例えば、その中を他の物体が何の抵抗もなくすり抜けていくほど希薄であるにもかかわらず、どうしても圧縮することができないといった点である。

◇じきに、マクスウェルは、電磁気の担い手が空間を満たしている媒質だと見なすのを止め、場所を伝わっていく電磁気の作用を数学的に表すだけで充分だと考えるようになる。
このような見解は、1864年の論文「電磁場の動力学的理論」に集大成されている。

◇電磁場の状態は、場所 x (エックス) と時間 t の関数となるベクトル (向きと大きさを持つ量のことで、太字で示される) で表される。
ここでは、場の概念を現代風に拡張して、電磁氣的な状態を表すベクトル関数 $\mathbf{E}(t, x)$ と $\mathbf{B}(t, x)$ を電場・磁場と呼ぶことにしよう。
電場と磁場は、あらゆる場所 x とあらゆる時刻 t で定義される。
現代の物理学教科書においてすら、「この場所には電場や磁場が存在しない」という言い方が当たり前のようにされているが、この表現は誤解を招きやすい。
ここで「存在しない」と言われているのは、正確には、 $\mathbf{E} = \mathbf{0}$ または $\mathbf{B} = \mathbf{0}$ と表されるような「電場・磁場の強さがゼロ」の状態のことなのである。
電場・磁場は、物質のように「存在するかしないかのどちらか」ではない。
それは、いついかなるところにも存在する。

ただ、その強さがゼロから無限大にまで連続的に変化するので。

◇マクスウェルは、ファラデーらが発見した電磁気の法則を $\mathbf{E}(t, \mathbf{x})$ や $\mathbf{B}(t, \mathbf{x})$ を用いた数式で表現し直し、これらを美しい方程式のセットにまとめることに成功した。これが有名なマクスウェル方程式であり、現在でも、原子レベルのミクロな効果が表面化しない範囲で、あらゆる電磁気現象を正しく記述することができる。

◇この理論によると、電荷や電流による電磁気的な作用が、空間を飛び越えて離れた物質に直接及ぼされることはない。

電荷や電流が存在すると、まず、これに接触している電磁場が作用を受ける。

そこから電磁場の変化が周囲にジワジワと拡がっていき、その変化が別の物質の所まで達すると、そこではじめて作用を及ぼすことになる。

◇マクスウェルの方程式で特に重要なのは、磁場の変動が電場を生み出し、電場の変動が磁場を生み出すという相互的な誘起作用にある点だろう。

この性質があるため、たとえ物質が全く存在していなくても、振動する電場と磁場は、互いに相手を誘起しながら、どこまでも波として伝わっていくことが可能になる。

この波は、電磁波と呼ばれる。

◇電磁波を発生させる最も簡単な方法は、正負の電荷を振動させる仕組みを使うことである。

こうした仕組みを「振動子」と呼ぶことにしよう。

例えば、バネの両端に正電荷と負電荷を取り付けて振動させると、周期的に変動する電場と磁場が作り出されるが、この電場・磁場は、互いに相手を誘起しながら周囲に電磁波として伝わっていく。

エネルギーの収支で見ると、これは、振動子が持っていた振動のエネルギーが、電磁波のエネルギーとして放出される過程である。

◇マクスウェルが、実験を通じて得られた電磁気作用の定数----現在では誘電率・透磁率と呼ばれるもの----を使って、この電磁波の伝播速度を計算してみたところ、秒速 31 万 740 キロという値を得た。

これは、1849 年にフィゾーによって測定された光の速度、秒速 31 万 4858 キロにきわめて近い（現在の値は秒速 29 万 9792, 458 キロ）。

このため、マクスウェルは「光は電磁波の一種である」と主張した。

当時、光は、宇宙空間をも伝わる波動であることが知られていたものの、その実体が何であるか定説はなかった。

その正体がマクスウェル電磁気学によって解き明かされたことから、理論の信頼性が急速に高まっていく。

◇マクスウェルは、原子論（気体分子運動論）と場の理論（電磁気学）という 2 つの基礎理論をはじめとして、物理学のさまざまな領域で比類のない業績を上げたが、1879 年に 48 歳で早世した。

この年は、奇しくもアインシュタインが生まれた年である。

電子の発見

◇物質は原子から構成されており、力は場によって伝えられる----マクスウェルが作り上げた理論からは、このような世界像が予想される。

しかし、この段階では、まだ原子同士がどのように結合しているかは謎に包まれており、物質と力の一般論について語るのは時期尚早だった。

事態が進展を見るのは、19 世紀も終わり近く、実験物理学が進歩して原子に関するデータが急速に集積され始めてからである。

◇中でもエポックメイキングな実験となったのが、1897年にジョゼフ・ジョン・トムソン（J・J・トムソン 1856年～1940年）が行った電子の比電荷（電荷と質量の比）の測定である。電荷を持った粒子の存在を仮定することで電気分解などの電気化学的現象を説明しようというアイデアは以前からあったが、この**仮想的な粒子が現実的な電子として姿を現したのは、このときが初めてである。**

◇J・J・トムソンが利用したのは、陰極線である。内部を真空にしたガラス管にプラスとマイナスの電極を取り付け、電極間に電圧を加えて強い電場を発生させると、マイナス極（陰極）から**ビーム状の何か**が飛び出すことが観測される。これが陰極線であり、19世紀半ばからその正体を巡って論争が繰り広げられていた。**J・J・トムソン**は、陰極線が負電荷を持つ高速の粒子と同じように磁場によって向きを変えること、陰極線を検電器に導くと負の電荷が測定されることなどから、これが**膨大な数の負電荷を持つ粒子の流れだと結論**した。さらに、電場や磁場によって陰極線がどれだけ曲げられるかというデータを元にして電子の比電荷を求め、**電子の質量が原子と比べてかなり小さいことを示した。**

◇こうして、19世紀末には、物質と力に関する1つの描像ができあがってくる。物質を構成する原子には電気的な内部構造があり、負電荷を持った多数の軽い電子と、正電荷を持つ別の粒子から成り立っている。正電荷の粒子の正体は、電解質が水に溶けるときにできるとされた仮想的粒子のイオンではないかという説もあった。

◇原子が電子とイオンという2種類の粒子から成るという見方は、物質が分割不能な粒子からできているという原子論の拡張版である。さらに、原子同士を結びつける力は、電子やイオンが作り出す電磁場を介して伝えられる電気的な相互作用だとされた。**原子と場の二元論的な世界像が、具体的に形作られたのである。**

◇一方に物質を構成する小さな粒子があり、他方に粒子間の力を媒介する場がある。原子と場という考え方は、直観的なイメージに馴染みやすい。しかしながら、**このシンプルな二元論は、20世紀の幕開けとともに音を立てて崩れ始めた。**

◇**新世紀の物理学は、粒子性と波動性が必ずしも排他的な性質ではなく、単一の物理現象の2つの側面であり得ることを示したのだ。**粒子的な原子と波動的な場といういかにも相容れがたく思われる2つの要素も、実は深いところで**1つにつながっているのではないか？**そんな考えも囁かれるようになる。こうして、**原子と場を1つの概念に統合しようとする物理学者たちの知的な闘いが始まったのである。**

第1章 粒子としての光---アインシュタイン

◇1905年、粒子性と波動性が必ずしも排他的ではないという革新的なアイデアがアインシュタインによって提唱される。光が粒子性と波動性を併せ持つという光量子論である。光量子論は、彼以外に思いつける人が誰かいたか疑わしいと感じられるほど、それまでの常識から懸け離れた突飛な内容だった。

アインシュタインの発想がいかに飛躍していたかは、当時、光がどのようなものとして捉えられていたかを知ると納得できるだろう。

◇17世紀にニュートンが光は粒子の流れだと主張して以来、「光の粒子説」は100年以上にわたってヨーロッパの学界を支配したが、19世紀初頭になると、ニュートンの権威を以ってしても抑えきれないほど、光が波であることを示す実験的証拠が集まってきた。

特に有名なのは、1805年頃にヤングが行った二重スリットの実験である。

光源から放射された光を2本の平行なスリットを通すと、背後にあるスクリーン上に濃淡の縞模様ができる。

これは、別々のスリットを通った光が干渉して生じる現象であり、バラバラに飛んでくる粒子では起こるはずのないものである。

◇決定的な進歩は、マクスウェルの電磁気学によってもたらされた。

電磁場の方程式を解くことにより、光の正体が、電場と磁場の振動が伝わっていく過程だと判明したのである。

古典物理学の金字塔とも言えるこの理論に対して、19世紀末から20世紀初頭の物理学者は、絶大な信頼を寄せていた。

ところが、アインシュタインの光量子論は、マクスウェルの権威に真っ向から立ち向かうものだった。

光量子論とは、光を、空間のある地点に局在するエネルギーの塊（エネルギー量子）の集まりと見なす理論である。

これは、100年前に打倒されたはずの古くさい光の粒子説を復活させる理論と受け取られかねない。

◇アインシュタインの理論に対する当初の反応は、冷笑と黙殺に近いものだった。

光量子論の評判がすこぶる悪かったのも、無理からぬことだ。

電磁波は、電場と磁場が相互に振動を誘起しあうことで発生する。

バラバラに飛び交う光の粒子が、どうやって振動を誘起させられると言うのか。

1901年、マルコーニが大西洋を越えて無線通信を行った際に利用した電磁波の波長は360メートルもあったが、この長大なうねりの中で、光の粒子たちはどのように編隊を組んで波の形を維持していたのか。

あるいは、ヤングの二重スリットの実験で、いったん二手に分かれた光の粒子が、再び出会ったときにどのように連絡を取り合って明暗の縞模様を作れるのか。

どう考えても、アインシュタインに勝ち目はなさそうだ。

◇にもかかわらず、物理学の歴史が示すように、光量子論は、近代と現代を分かつ科学革命の幕開けを告げることになる。

実は、この理論を、「光とはバラバラに飛んでくる粒子の集まりだ」と素朴に解釈するのが、そもそも間違いなのである。

光量子論とは、「光はエネルギーの塊のように振る舞うが、単なる粒子ではない」といういささか捉えどころのない理論であり、自己矛盾をはらんでいるとも思えるこの多義性が、ニールス・ボーアやルイ・ド・ブロイらによる量子論の次なる発展を可能にしたのである。

アインシュタインの光量子論に先立つものとして、ウィーンとプランクという二人の先駆者の業績を挙げておかねばならない。

喩えて言えば、ウィーン、プランク、アインシュタインによる三段跳びの要領で、巨大な跳躍をなし得たのである。

黒体放射の問題

◇ウィーンが特に関心を寄せたのが、「黒体放射」の問題だった。

物質を加熱すると、注入した熱エネルギーの多くは物質の温度を上昇させるのに費やされるが、一部は電磁波のエネルギーとなって外部に放出される。

これが「放射（熱放射）」と呼ばれる現象である。

現実に存在する物質の場合、表面で起きる複雑な反応のせいで、どのような電磁波が放出されるかを理論的に求めることは難しい。

そこで、グスタフ・キルヒホッフは、議論の手がかりとして、外から照射された電磁波をいっさい反射することなく吸収してしまう仮想的な物体について考えることを提案した。

この仮想的物体が「黒体」である。

黒体は、光を全く反射しないので、常に真っ黒に見えそうなものだが、実はそうではない。

物質は電荷を帯びた電子やイオンから構成されており、これらが熱で振動するため、振動子となって電磁波を放出するからである。

これが黒体放射である。

温度が低いときは、目に見えない赤外線が中心となるが、数百℃に加熱されると赤みを帯び始め、1000℃を越えると赤から紫に至る全ての可視光線を強く放射するために白く輝いて見える。

どんな物質でも、1000℃以上の高温になると、黒体放射とほぼ等しい熱放射を行うことが知られている。

◇19世紀後半のドイツで黒体放射に学界の関心が集まっていた背景には、製鉄業の興隆がある。

製鉄の工程で鉄の品質を保つために重要なのが、温度管理である。

熱力学によれば、黒体放射の場合、ある波長の電磁波がどれだけの強度（電場・磁場の振幅の2乗）になるかは物体の温度だけで決まる。

したがって、波長ごとの強度分布が温度によってどのように変化するかを表す式さえ得られれば、ある波長での強度の測定値を使って温度を計算できるはずである。

製鉄業者の期待とは裏腹に、強度の式を求めることは困難を極めた。

原子構造も未知だった時代のことであり、何をどうすれば良いかわからないまま、取って付けたような仮定を置いては根拠のはっきりしない計算をするだけで精一杯だったのだ。

ウィーン分布の発見

◇1896年、ウィーンは、トリッキーな議論を駆使して、黒体放射の強度分布を求めようとした。容器の中に気体と電磁波を閉じ込めることを考え、気体分子が一種の黒体として電磁波を放出・吸収していると仮定した。

しかし、ウィーンは、強度分布を計算するために、「ある分子が放出する電磁波の波長と強度は、その分子が持つ速度だけで決まる」という仮定を付け加えたのである。

現在の知識によれば、分子がどのような電磁波を放出するかは、分子内部にある電子のエネルギー状態に依存しており、分子自身が持つ速度と直接の関係はない。

したがって、この仮定は全くの誤りである。

にもかかわらず、ウィーンが導いた強度分布の式（ウィーン分布）は、なぜか測定データとかなり良い精度で一致していた。

◇ウィーン自身がどこまで自覚していたか定かではないが、電磁波の波長と強度が分子速度の関数になるという誤った仮定を置いた結果として、放射の強度分布は、気体分子運動論におけるマクスウェル分布の式と良く似たものになっていた。

細かな点を無視すると、両者の違いはただ1箇所、気体分子の運動エネルギーの代わりに、放射の振動数 ν （ニュー）に比例する項（後に採用される記法を使えば $h\nu$ ）が現れていたことである。

ここで、電磁波の振動数とは、電場や磁場が1秒間に振動する回数のこと、波長と振動数は、 $\text{波長} \times \text{振動数} = \text{光速}$

という関係式（1回の振動の間に波は1波長分だけ進むので、1秒間には波長 \times 振動数だけ進むという式）で結ばれている。

放射の強度分布が気体分子運動論の式と良く似ていた事実こそ、アインシュタインに光量子論を思

いつかせる直接のきっかけとなったものである。

誤った仮定が偉大な発見への道を拓いたとは、何とも皮肉なことだが、試行錯誤だけが前進のための手段となる最先端科学の世界ではよくある話だ。

◇三段跳びのステップを跳んだのは、プランクだった。

ウィーン分布は、当時の測定データと見事に一致していたが、物理学者たちは、なぜデータと一致するかをきちんと説明できる理論を模索していた。

そうした中で、プランクは、ある熱力学的な量 R が、放射を行う物質内部のエネルギー U に反比例する ($R \propto 1/U$) と仮定すれば、そこからウィーン分布が導けることに気がついた。

彼は、この仮定が黒体放射理論の基盤となるべき式だと信じる。

ところが、1899年に入ると、それまでより遥かに高温 (2000°C 以上) かつ低振動数 (波長が0.01 ミリ以上の遠赤外領域) での計測がドイツ物理工学研究所で行われ、ウィーン分布からのずれが見られるとの報告がなされた。

これを知ったプランクは、新しい分布法則を見つけるべく研究に着手する。

◇ ($R \propto 1/U$) と置くとウィーン分布が導かれる。

ところが、物理工学研での測定データによると、 U の値が大きいところで、 R は U ではなく U^2 に反比例するように見えた。

そこでプランクは、さしたる根拠がないにもかかわらず、($R \propto 1/U (1+aU)$) と置いてみた。

この場合、 aU がゼロに近く $1+aU \approx 1$ と置ける領域では、 R は U にほぼ反比例する。

一方、 aU が1よりずっと大きくなって $1+aU \approx aU$ となるときには、 R は U^2 にほぼ反比例する。

この式を仮定したときに強度分布がどうなるかを計算してみたところ、驚くべきことに、振動数の全領域でデータとピタリと合う式が導かれたのである。

これが「プランク分布」である。

彼は、1900年10月の物理学会の際、この「ウィーン分布の改良」について発表した。

プランクは、なぜ「プランク分布」が実現されるのかを、真摯に理解しようとして、さらに「数週間にわたって生涯で最もハードな仕事」を続けることになる。

そして、遂に、この分布法則が、ある大胆な仮説から導けることに気がついたのだ。

◇プランクは、黒体内部で電磁波を放出・吸収しているのは、電子やイオンで構成された振動子だと推測した。

バネにおもりを取り付けると、バネの強さとおもりの質量によって決まる固有の振動数で振動するが、それと同じように、電子やイオンから成る振動子も、ある固有振動数で振動するだろう。

無数の振動子が持つエネルギーを全て併せた中で、何%のエネルギーが固有振動数 ν のグループに割り当てられるかは、

ボルツマンが開発した統計力学を使って計算することができる。

ところが、従来の方に基づいて振動子のエネルギーを計算しても、プランク分布と一致する結果は得られない。

プランク分布と一致させるためには、振動子の持つエネルギーが、ある「エネルギー要素」の整数倍でなければならないのである。

このエネルギー要素を表すために、プランクは、後に「プランク定数」と呼ばれる定数 h を導入した。

固有振動数 ν の振動子は、エネルギー要素 $h\nu$ の整数倍、すなわち、 $h\nu$ 、 $2h\nu$ 、 $3h\nu$ ・・・といったとびとびのエネルギーでしか振動できないというのだ。

これがプランクの仮説である。

◇ニュートン力学やマクスウェル電磁気学において、粒子の位置や場の強度のような量は連続的に変化させられる。

例えば、通常のパネに取り付けられたおもりならば、おもりを引っ張って手を放す位置を調整しさえすれば、どんなエネルギーで振動させることも可能なはずである。

物質量がとびとびの値に限られることは、「量子化」と呼ばれる。
プランクが提案したのは、史上初の量子化に関する仮説（量子仮説）だった。
物理学の理論に、非連続的な量を導入したこと---これが、19世紀から20世紀への決定的な転回点になったのだ。
量子化という振舞いが顕著になるのは、プランク定数 h によって特徴づけられるミクロの世界である。
人間のスケールからすると、 h の値（ 6.626×10^{-34} ジュール秒）は途轍もなく小さい。
しかし、原子の世界において、 h の値は決して小さくない。
原子レベルの現象は、 h の大きさが無視できない結果として、日常的な世界とは隔絶したものとなっている。

◇定数 h の導入という画期的な業績を成し遂げたプランクだったが、実は、ある本質的な点を見誤っていた。
 $h\nu$ の整数倍のエネルギーでしか振動できないのは、彼が考えたような電子やイオンから成る振動子ではなかったのである。
プランクが提案した分布法則は、黒体放射の振舞いを完全に再現するものだったが、プランク自身は、自分が発見した式の意味を正しく理解することはできなかった。
何がとびとびのエネルギーで振動しているかが明らかにされるには、アインシュタインの登場を待たなければならない。
ともあれプランクは、1900年12月14日の学会講演で、いわゆる量子仮説を発表した。
この日付を量子論の誕生日とする科学史家も多い。

◇1905年にアインシュタインが光量子論を提唱した論文のタイトルは、「光の発生と変換に関する発見法的な観点」となっている。
ここで、「発見法的」と訳した *heuristisch* という言葉は、演繹や機能に基づく論理的思考ではなく、類推や直観を頼りに問題解決の道筋を発見していくやり方をさす。
興味深いことに、アインシュタインは、光量子論に至る発想の大部分を、プランクではなくウィーンに負っていた。
ウィーンは、電磁波を気体のようにシリンダーに閉じ込めて圧縮するという思考実験を考案したが、アインシュタインは、こうした思考実験に熱力学の式を適用する方法を模索していた。
そのさなかに、電磁波の熱力学的振舞いが気体と良く似ていることに気がついたのである。
これが彼の“エウレカ（見つけた）”である。
気体は、まるで空間を隙間なく満たす連続体のように見えながら、気体分子運動論の計算結果が測定データと一致することから、自由に飛び回る分子の集まりであることが実証できる。
同じように、電磁波の場合も、多くの観察が波であることを裏付けてはいるが、熱力学的に粒子の集まりのような振舞いを示すならば、その結果を重視すべきではないのか？
アインシュタインは、物理学のさまざまな分野の中で熱力学の原理に最大の信頼を置いていた。
彼は、自分の直観を信じて、電磁波が、自由に飛び回る粒子のようなエネルギーの塊から成り立っていると結論したのである。

光量子論

◇アインシュタインの主張によれば、振動数 ν の電磁波は、マクスウェル電磁気学で表されるような滑らかな波動ではなく、孤立したエネルギーの塊（エネルギー量子）が数多く集まった集団のように振舞う。
それぞれのエネルギー量子の大きさは、プランク定数 h を使うと $h\nu$ と表される。
要素的なエネルギーが $h\nu$ になるという点で、プランクとアインシュタインの理論は共通しているが、その内容は、決定的と言って良いほど異なっている。
プランクがエネルギー要素の担い手として物質内部の振動子を想定していたのに対して、アインシュタインは、電磁波自体がエネルギーの塊になると考えたのである。

プランクの議論は、かなり保守的な面を持っている。

当時は、原子の構造が全くわかっていなかったのも、エネルギーがとびとびの値になるという不思議な振舞いの原因を、未だ未知なる原子の性質に押しつけているからだ。

彼は、電磁波によって振動子がどのように共振するかをいろいろと考察しているが、その際に、電磁波そのものがマクスウェル方程式に従う滑らかな波であることを、全く疑っていない。

これに対して、アインシュタインは、すでに確立されたと思われていたマクスウェル電磁気学そのものが不完全だと喝破した。

物質内部の振動子が熱で振動すると、それが周囲の電磁場に伝わり滑らかな波動となって拡がっていく---のではなく、なぜか $h\nu$ のエネルギーの塊になってポロポロと飛び出してくるというのだ。プランクが固執した「粒子的な原子と波動的な場」というわかりやすい二元論が、ここで崩れ始めたのである。

量子という言葉

◇光量子論の登場により、物理学の一大革命となる量子論の幕が切って落とされた。

当初は見向きもされなかった光量子論だが、1916年、ロバート・ミリカンによる光電効果の精密測定でアインシュタインが予想した通りの結果が得られてから、急速に受け入れられるようになる。量子 (Quant) とは、古典物理学では連続的な値になるはずの量が離散的な (とびとびの) 値になったものを指す。

このとき、あたかも量子であることの身分証明であるかのように、必ずプランク定数 h が現れる。 h がゼロでないことが、物理量が離散的になるために必要である。

量子は、必ずしも粒子的なものとは限らない。

ボーアの原子模型では、角運動量と呼ばれる回転の勢いを表す量が離散的なる。

物理量が離散的になることは、一般に「量子化」と呼ばれる(「エネルギーが量子化する」)。

さらに、1920年代以降は、量子論的現象を扱えるように理論の定義を変えることも「量子化」と言われるようになった(「場の理論を量子化する」)。

粒子性の解釈

◇アインシュタインの1905年論文では、光量子を仮定すると、3つの現象(光ルミネセンス、光電効果、光電離)の特性が簡単に説明できることが示されていた。

光電効果とは、紫外線(波長が短く振動数の大きい電磁波)を金属などの固体に照射したときに、電子が飛び出してくる現象である。

この現象には、いくつかの不思議な点があった。

例えば、振動数がある値以下になると、どんなに振幅の大きい電磁波を照射しても電子が飛び出さない点である。

アインシュタインは、電磁波が電子にエネルギーを与える際に、1個の光量子がそのエネルギー $h\nu$ を丸ごと電子に与えると仮定することによって、この謎を説明した。

振動数 ν が大きな値で、 $h\nu$ が電子を外部に放り出すのに充分ならば、光電効果が起きる。

しかし、 $h\nu$ がそれほど大きくない低周波数の電磁波では、電子を放出できない。

電磁波の振幅を大きくしても、飛来する光量子の個数が増えるだけで、個々の光量子のエネルギーは同じままである。

◇光電効果の説明があまりに鮮やかだったために、光量子と言えば電子を弾き出す粒子のようなものというイメージが定着してしまっただが、これは誤解の元である。

電磁波を粒子の集まりであるかのように素朴にイメージすることの限界は、1909年にアインシュタイン自身が明らかにした。

黒体放射で満たされた容器内部の小さな領域を考えると、そこでの電磁波のエネルギーは、一定ではなくフラフラとゆらいでいる。

アインシュタインは、このゆらぎが、エネルギー $h\nu$ を持つ粒子がバラバラに飛んでくる場合と、マクスウェル方程式に従う滑らかな波動がゆらいでいる場合の和になっていることを示したのである。

つまり、電磁波は、純粋な粒子でも純粋な波動でもなく、その両方の性質が混じった何かだということになる。

アインシュタインは、光量子論を提唱した後も、しばらく量子論の研究を続ける。

1907年には固体の比熱の振舞いを解明する「アインシュタイン模型」を、1916年にはレーザーの原理となる誘導放出の理論を発表し、この分野の第一人者であることを見せつけた。

しかし、その後は、一般相対論や統一場理論に関心が移ったせいもあって、1924~25年の理想気体の量子論を最後に大きな貢献はなくなり、むしろ、学問の進歩に取り残されていく。

第2章 原子はなぜ崩壊しないのか---ボーア

◇アインシュタインの光量子論は、量子というアイデアを軸に、粒子（原子）と波動（場）の二元論を統一する方向に人々を導くはずのものだったが、そのことに理解を示す物理学者はなかなか現れなかった。

光の理論として始まった量子論は、しばらくは光の問題を脇に置いたまま電子の理論として研究が重ねられ、1920年代半ばに、まず電子についての量子力学として一応の完成を見ることになる。光量子論のブレイクスルーは、1920年代後半におけるヨルダンやディラックの研究まで待たなければならない。

原子の中の電子

◇量子論の研究対象が電子に絞られるきっかけとなったのが、1913年に提案されたボーアの原子模型である。

ボーアの登場によって、量子に基づく考え方がミクロの世界を理解する上で不可欠だという認識が広まることになる。

19世紀末に発見された電子は、いくつかの実験から、酸素原子や炭素原子の数万分の1の質量しかない超軽量の粒子であることが判明していた（現在の測定値によると、質量の値は 0.9109×10^{-27} グラム）。

電流や電気化学反応は、軽い電子が物質の内部をスイスイ動き回ったり他の物質に飛び移ったりすることによって生じると考えられる。

電子は負の電荷を持つ。

物質は全体として電氣的に中性なのだから、電子の負電荷を打ち消すような正の電荷を持つ何かが存在していなければならない。

さらに、磁場を加えたときの光学的な性質の変化から、少なくとも一部の電子は、物質内部で円運動していると推測された。

ここから、原子は正電荷を持つ正体不明の「何か」と負電荷の電子から構成されており、いくつかの電子が円運動しているというアイデアが生まれてくる。

◇具体的な原子の構造を初めて論じたのが、ジャン・ペランである。

1901年、彼は、中央に正に帯電した1ないし数個の重い核が存在し、その周囲にたくさんの軽い電子が回転しているというモデルを提唱した。

これは、巨大な太陽の周りを小さな惑星が回る太陽系に似ているので、「太陽系モデル」と呼ばれる。

この太陽系モデルは、一見もっともらしく思えるかもしれないが、実は、致命的な欠陥を抱えていた。

負電荷を持つ電子が回転運動を行うと、周期的に電磁場を揺さぶることになり、周囲へと拡がっていく電磁波を発生させる。

電磁波はエネルギーを外に運び去るので、電子はエネルギーを失って失っていく。

エネルギーを失った電子は、核の表面に落下し合体してしまうはずである。

これでは、宇宙に存在する全ての物質が一瞬のうちに崩壊してしまう。

このモデルは、明らかにどこかが間違っている。

ガイガー＝マースデンの実験とラザフォードの解釈

◇1909年、ハンス・ガイガーと、当時はまだ学生だったアーネスト・マースデンの手によって、原子構造解明の第一歩となる重要な実験が行われた。

この実験で使われたのが、 α 粒子であるが、 α 粒子とは、ウランやラジウムなどの放射性元素から高速で飛び出してくる粒子で、後にウランやラジウムの原子核の一部が壊れて外部に放出されたものと判明した。

当時、 α 粒子に関する研究の第一人者として知られていたのが、アーネスト・ラザフォードである。

当時、 α 粒子ビームの透過力は小さく、ごくごく薄い金属箔は素通りするものの、厚さが1ミリもあれば紙や木でも簡単に阻止できることが知られていた。

アルファ粒子を柔らかく受け止めるというのが物質の性質ならば、照射されたアルファ粒子が跳ね返されることなどないだろう---ラザフォードはそう予想したが、念のため、ガイガーとマースデンに実験させることにした。

実験を始めると、直ちに金属に跳ね返される α 粒子が観測された。

しかも、鉄やアルミに比べて比重の大きい鉛や金の方が効率的に α 粒子を跳ね返しており、原子の性質が重要な鍵を握っているように見えた。

α 粒子は、質量が電子の7000倍以上もあるので、そこらを飛び回っている電子など蹴散らして進んでいく。

したがって、 α 粒子を跳ね返す小さな塊は、電子ではない。

それは、物質から電子を取り除いた後に残る何かであり、しかも、 α 粒子よりもずっと重くなければならない。

この小さな塊---後の呼び方を用いるならば原子核(nucleus)---が原子の質量のほぼ全てを担っており、たまたまこれと衝突した α 粒子だけが跳ね返されると考えると、 α 粒子の振舞いは理解できる。

この見方が正しいのならば、核の周囲で動き回っている電子の拡がりに比べて、核の大きさは1万分の1程度でしかない。

1911年にラザフォードは、ニュートン力学に基づいて、小さくて重い原子核に α 粒子が跳ね返されるプロセスを計算した。

この計算結果とガイガーの測定データを比較して、ラザフォードは、金の原子核が持つ正電荷の大きさは、電気素量(電子の電荷の大きさ=1.602 $\times 10^{-19}$ クーロン)の約100倍だと結論した。

この値は、その後に判明した79という実際の値より大きいものの、原子核が電気素量の数万倍の電荷を持つという説を否定するには十分だった。

ボーアの原子模型

◇ニールス・ボーアは、ラザフォードの指導の下で実験装置を組み立てたり α 粒子に関する論文を執筆したりしていたが、原子構造の研究はデンマークへの帰国後も続けられ、1913年に3部から成る大論文「原子と分子の構成について」に結実する。

ガイガー＝マースデンの実験によれば、原子は、小さくて重い原子核と、その周囲にある軽い電子から構成されている。

しかし、ニュートン力学とマクスウェル電磁気学を元にして考える限り、このシステムは不安定となるはずであり、原子は瞬く間に崩壊する。

原子を安定させるには、それまでの物理学の常識を超えた特別な条件が必要だと考えざるを得ない。
この条件とはいったい何なのか？

ボーアは、この問いに対して、「量子条件」なるものを提案した。

◇量子条件とは、量子論的な振舞いの起源になるもので、プランク定数を含む式の形で表される。
この条件は、ニュートン力学やマクスウェル電磁気学とは全く異質の考え方に基づいており、過去の理論からは導き出すことのできない画期的なものだった。

ボーアが提案した量子条件の式は、その後、ゾンマーフェルト、ボルン=ヨルダン、ディラックによって次々と改良されていく。

ボーアの量子条件は、その後の量子論の展開において常に導きの糸となったのだ。

◇水素原子を例に取り、 $+e$ の電荷を持つ原子核の周りを1個の電子が円運動するケースについて考えよう（ e は電気素量）。

クーロンの法則によれば、原子核と電子の間に作用する電氣的な引力は、距離の2乗に反比例し、それぞれの電荷の積に比例する。

原子核と電子の距離が r のとき、原子核が電子を引っ張る引力は e^2/r^2 となる。

電子の運動に伴う電磁波の放出はないものとして、この引力によって電子がどのような運動をするか考えよう。

円の半径を r 、円軌道に沿った速度を v とすると、円運動による遠心力は mv^2/r となることが知られている（ m は電子の質量）。

遠心力は中心向きの引力と等しいので、
 $mv^2/r = e^2/r^2 \dots \textcircled{1}$ と表される。

ただし、これだけでは、 v と r の解は1つに決まらない。

ここまででは電磁波の放出はないと仮定してきたが、実際には、電子が円運動するときに電磁場を揺さぶるので、必ず電磁波が発生する。

円運動の周期 T は、円周 $2\pi r$ を速度 v で進むのに要する時間なので、 $T = 2\pi r/v$ となる。

電子は1秒間に $f = 1/T$ 回原子核の周りを回転し、同じ回数だけ電磁場を揺さぶって波出たせるので、発生する電磁波の振動数もこの値に等しく、

$f = v/2\pi r \dots \textcircled{2}$ と与えられる。

電磁波にエネルギーを持ち去られるため、電子はラセン起動を描きながら原子核に接近し、最後は合体してしまう。

◇このような原子の崩壊を防ぐため、ボーアは、電子の軌道半径が小さくなるのを禁止するような何らかの制約が必要だと考えた。

もちろん、こうした制約は、ニュートン力学やマクスウェル電磁気学には存在しない。

そこでボーアは、プランクの量子仮説を踏まえて、量子条件

$mvr = nh/2\pi \dots \textcircled{3}$ が満たされていなければならないと主張した。

これが、「ボーアの量子条件」である。

n は整数で、後に「量子数」と呼ばれる。 h はプランク定数。

左辺の mvr は角運動量と呼ばれる回転の勢いを表す量なので、この量子条件は、「電子の角運動量は $h/2\pi$ の整数倍になる」という形で表現できる。

◇量子条件の式とニュートンの運動方程式とを連立させるとどうなるかを見てみよう。

運動方程式①の両辺に mr^3 を掛けると、

$(mvr)^2 = me^2r$ になる。

この式の左辺と、量子条件の式③の左辺の2乗は等しいので、

$me^2r = (nh/2\pi)^2 \dots \textcircled{4}$ が得られる。

m 、 e 、 h は実験によって値が測定できる定数、 π は数学の定数なので、この式から円運動の半径 r は n^2 に比例することがわかる。

量子数 $n=1$ のときに半径が最小となり、それより小さい軌道は存在しない。

$n=2, 3, 4 \dots$ に対応して、最小半径の4倍、9倍、16倍 \dots の半径を持つ軌道だけが許されることになる。

◇ニュートン力学に従うならば、電磁波の放出によって電子は連続的にエネルギーを失い、少しずつ原子核に近づいていく。

ところが、量子条件を課した場合、この「少しずつ近づく」という過程が実現できないのだ。

電子の軌道は、 n の値によって区別される離散的な（とびとびの）ものに限られており、エネルギーを少しずつ失って半径がわずかに小さい軌道へと移ることが許されない。

特に、 $n=1$ は許される軌道の中でエネルギーが最低の状態であり、それより低いエネルギー状態に落ち込むことはない。

原子の崩壊は、量子条件によって食い止められるのである。

◇軌道半径が離散的な値になるのに伴って、軌道を周回する速度 v と水素原子が持つエネルギー E も、やはり離散的になる。

原子のエネルギーには、電子が速度 v で動くことによる運動エネルギー $mv^2/2$ と、電場に蓄えられる位置エネルギーがある。

電子が1つしかない水素原子の場合、位置エネルギーは、電子と原子核の間の距離 r の関数として $-e^2/r$ と表されることが知られている。

水素原子のエネルギー E は、この2種類のエネルギーの和となり、

$$E = mv^2/2 - e^2/r \dots \textcircled{5}$$

途中の計算は省略するが、量子数 n に対するエネルギーとして、

$$E = -2\pi^2 me^4 / n^2 h^2 = -\epsilon / n^2 \quad (\epsilon = 2\pi^2 me^4 / h^2) \dots \textcircled{6}$$

という離散的な（とびとびの）値が得られる。

このように、整数（量子数）で指定されるエネルギーの並びは「エネルギー準位」と呼ばれる。

量子条件はどのように導かれたか

◇そもそもボーアは、整数で指定されるとびとびの軌道しか存在できないという奇怪な量子条件を、いったいどこから捻り出したのだろうか？

論文では、まず、原子核から遠く離れた所にあった電子が回転数 f の軌道に落ち着くまでの間に、振動数 $\nu = f/2$ の電磁波が放出されるという（根拠のはっきりしない）主張がなされる。

その上で、「エネルギーが $h\nu$ の整数倍に限られる」というプランクの量子仮説を流用して、

$$(\text{原子が失うエネルギー}) = nh(f/2) \dots \textcircled{7}$$

という式を立て、電子の回転数 f を表す式②を使って計算が進められる。

計算は省略するが、運動方程式①を使って変形していくと、最終的に量子条件の式③が導かれる。

こうした議論を通じて、ボーアは、自分の理論とプランクの量子仮説との間にアナロジーが成立すると主張した。

この議論はメチャクチャである。

ボーアは、電子の運動エネルギー $mv^2/2$ と回転数 f を結びつける関係式があり、これが軌道を制限すると推測したようだ。

1912年頃のメモには、当時の測定データを元に、この2つの値の比を計算したことが示されている。

それによると、電子が最も内側の軌道にあるとき（量子条件によって導入される量子数を使えば $n=1$ のとき）、電子の運動エネルギーと回転数 f の比は、プランク定数 h の約0.6倍になる。

おそらく、この結果がインスピレーションを与えたのだろう。

軌道上にあるときの電子の運動エネルギーは、電子が遠方から軌道に落ち着くまでに失われるエネルギーに等しいという物理学の定理がある。

この定理を使って

$$(\text{ } n=1 \text{ のときに原子が失うエネルギー}) = \text{約} 0.6 \times hf$$

と表し、「約0.6」とは「 $1/2$ 」のことだと推測した上で、プランクの量子仮説と形を似せて式

⑦を書き下したのではない。
そうとも考えないと、量子条件の式は出てこない。

◇今の時代ならば、こんな論文を書いていたのでは誰からも相手にされないだろう。
だが、ボーアが生きていたのは、物理学の変革期である。
対象をさまざまな視点から複眼的に眺め、状況に応じて使えそうな学説を切り貼りしながら、旧弊な固定観念に覆い隠されている真実を見いだそうとする---こうした型にはまらないボーアの方法論によって、物理学の新しい地平が切り拓かれたのである。

◇ボーアの原子模型は、論文発表後、ごく短期間で学界に受け容れられるが、それは、決して理論そのものが優れていたからではない。
純粋に理論的な観点からすると、彼の論文には批判されても仕方のない点が多すぎる。
保守的な物理学者ですら否も応もなく承服せざるを得なくなったのは、四半世紀以上にわたる懸案事項だった線スペクトルの謎に、すっきりとした説明を与えたからである。
ボーアの理論では、線スペクトルと直接の関係を持たない量子条件を前提にすると、測定データと一致する予測が導かれる。
量子条件という良くわからない前提を含んでいたものの、実証的な成果をあげたからこそ、かなり信憑性が高いと評価されたわけである。
量子条件とはそもそも何なのか？
より根源的な理論から量子条件を導き出すことが、次に遂行すべき課題だった。
しかし、この課題は、すぐには成し遂げられなかった。
ボーアの量子条件が提唱されてから 10 年にわたって、「この条件はいったい何なのか」という問いはいったん棚上げされ、実験や観測と一致する理論を作り上げようとする動きが学界を支配していたからである。
新しい流れは、1924 年に突如として始まる。
そのきっかけになったのは、電子が波のように振舞うのではないかという素朴な思いつきだった。

第3章 波動力学の興亡---ド・ブロイとシュレディンガー

◇ボーアの量子条件は、量子論の歴史において、ちょうどプランクの量子仮説と良く似た位置にある。
プランクは、エネルギーが離散的になると仮定すれば黒体放射の分布を導けることは示せたが、エネルギーの離散化が光の粒子性の表れだという洞察を得るには、アインシュタインを待たなければならなかった。
同じように、量子条件の背後に潜む電子の波動性を見いだすのは、この式を導入したボーアではなく、より若い世代に属する新進の物理学者だった。

◇アインシュタインの光量子論の場合、学界に受け容れられるまでに 10 年、ディラックによって数学的な理論が構築されるまでにさらに 10 年以上を要した。
これに対して、電子の波動性についての洞察は、わずか数年のうちに壮大な理論---いわゆる波動力学---へと成長をとげ、1926 年から 27 年に掛けて学界を席卷するが、やがて致命的な欠陥が発見され、そのままの形では通用しないことが判明する。
2~3 年の間に起きた 1 つの学説の興亡は、予期しがたい偶然に満ちており、さながら 1 編のドラマのようである。

波としての電子

◇量子条件の背後に波動性が潜んでいることを最初に見て取って、「物質波」の概念を示したのは、ルイ・ド・ブロイである。

1916 年に行われた光電効果の精密測定でアインシュタインが予想した通りの結果が出たのに続いて、1923 年には、光量子と電子がビリヤード球のように衝突して跳ね返るというコンプトン効果が発見され、光量子論の支持者が急増していた。

波動と粒子という全く相異なる2つの性質が光に体现されていることに深く感動したド・ブロイは、光が示す波動と粒子の二重性について思いを巡らせるうちに、この性質が、単に光だけではなく、物質全般に関わるものではないかと考えるようになった。

ド・ブロイが見いだすことのできた1つの重要な関係式を、少し違う方法で示してみよう。

物理学の理論には、「時間的な量」と「空間的な量」がペアになって現れることが良くある。

波動の場合、振動数 ν は1秒間に何回振動するかを表す「時間的な量」、これに対して、波長 λ （ラムダ）の逆数は1メートルの間に何回振動するかを表す「空間的な量」である（理論物理学では、波長よりもその逆数が使われることが多いので、波長の逆数に波数という呼称を与えている）。

一方、運動する粒子の場合、エネルギーが「時間的な量」であるのに対して、運動量が「空間的な量」であることが知られている。

運動量とは、相対論による習性が必要のないときには「質量 $m \times$ 速度 ν 」で定義される量であり、エネルギーが「時間が経っても物理法則が変わらないことの帰結として常に一定の値になる（エネルギー保存の法則）」のに対して、運動量は「空間のどの場所でも同じ物理法則が成り立つことの帰結として常に一定の値になる（運動量保存の法則）」ことが証明されている。

アインシュタインの光量子論によって、エネルギー E と振動数 ν という2つの時間的な量の間に、 $E = h\nu$ という関係式があるのだから、それとペアになる空間的な量（運動量 mv と波長 λ の逆数）の間にも同じ関係式があるはずだ。

式で表すと、 $mv = h / \lambda \quad \dots \quad \textcircled{1}$ となる。

この λ が「ド・ブロイ波長」と呼ばれる物質波の波長である。

ド・ブロイのイメージによれば、電子は、波長 λ を持つ物質波に導かれるかのように運動する。

ただし、これはあくまでイメージであって、具体的にどのような式に従い、いかなる現象を引き起こすかは、はっきりしていなかった。

量子条件の導出

◇ド・ブロイは、物理学の歴史を変える重要な一点を指摘した。

それは、物質波の考えに基づけば、ボーアがほとんど独断的に与えた量子条件がすんなりと導けるということである。

ボーアの量子条件によれば、電子が原子核の周りを円運動する場合、 $mvr = nh / 2\pi$ ($n = 1, 2, 3 \dots$) という関係式を満たす半径 r のとびとびの円軌道だけが安定的に存在できる (v は電子の速度)。

ド・ブロイは、ここで、円軌道に沿って伝わる物質波に目を向けた。

ちょうど、円環状の水路を波が伝わる場合のように、物質波は、軌道を一周して元の場所に戻ってくるが、そこで、自分自身と干渉しあうことになる。

軌道を一周したときに波の山と谷が重なった場合は、自分で自分を打ち消してしまい波は消滅する。1周目に山と谷が重ならなくとも、前の波と少しでもずれていれば、何周かする間に山と谷が重なるようになって、結局、波は生き残れない。

波が残るのは、一周したときにちょうど山と山、谷と谷が重なっていて、自分を打ち消すことがない場合だけである。

この条件は、式で表すと、円軌道の長さ $2\pi r$ がちょうど波長 λ の整数倍になるということなので、 $2\pi r = n\lambda \quad \dots \quad \textcircled{2}$ となる。

この λ にド・ブロイ波長の式 $\lambda = h / mv$ を代入して整理すれば、ボーアの量子条件と同じ式 ($mvr = nh / 2\pi$) が得られる。

◇これまで、量子条件が何を意味するかに全く答えられなかった物理学は、ここに至って、「量子条件とは電子の波動性の現れだ」という具体的な考え方を手に入れたわけである。

ボーアは、原子が安定するためには電子の軌道がとびとびになるべきだと考え、そのために、根拠らしい根拠もなしに量子条件を捻り出した。

確かに、この量子条件を満たす電子の軌道はとびとびではあるが、それは、電子の軌道を制約する量子条件の式に整数 n が含まれており、 n の値ごとに半径が異なる軌道になった結果である。

これでは、「軌道が自然にとびとびになった」のではなく、「無理にとびとびにした」と言われても仕方がない。

これに対して、ド・ブロイの議論は、整数 n を含む式を前提としていない。

軌道を周回する波が生き残るための条件として、整数 n を含む式がすんなり導かれているのだ。

その論法には、どこにも無理がない。

ド・ブロイは、「かくも直接的に導かれたこの美しい結果は、われわれの方法を量子論に適用することの最良の正当化となるだろう」と記している。

◇この時点では誰も気づいていなかったが、実は、物質波の存在を示唆する実験結果は、1921年にクリントン・ディビソン、さらに同年にジョージ・パジェット・トムソンによって、すでに得られていた。

このように、ド・ブロイの論文の数年後には実験で確認されているとはいえ、当初の段階では、物質波のアイデアは思いつきとして黙殺されてもおかしくなかった。

しかし、いくつかの幸運が重なって、このアイデアは日の目を見ることになる。

第1の幸運として、アインシュタインは、たまたま自分が進めていた研究に物質波の考えが利用できるのではないかと思ったようだ。

1925年に発表した量子統計に関する論文(いわゆるボース=アインシュタイン凝縮を扱った論文)の中で、自説を補強する理論としてド・ブロイの業績を引用している。

第2の幸運として、この分野にシュレディンガーが参入してきたのである。

◇アインシュタインの理論によると、量子統計に従う気体分子は、互いに独立に運動しているのではなく、何らかの方法で他の分子と連絡しあっているかのように協調的に振舞うことになる。

気体分子がビリヤード球のようにバラバラに動き回っているとすると、熱力学の基本定理(絶対零度でエントロピーと呼ばれる物理量がゼロになるという定理)に矛盾する結果が出てしまうのだ。

この奇妙な性質を考察するうちに、アインシュタインは、量子統計に従う気体分子が光量子に似たものではないかと思いついたようだ。

光量子がバラバラに飛び回るビリヤード球のような粒子ではなく、波動性を示す電磁場と結びついた存在であるのと同じように、気体分子も、未知の波動場を介して互いに連絡を取り合っていると推測したのである。

こうした波動場の1つの候補として、ド・ブロイの物質波が紹介されている。

アインシュタインの論文は、さすがに先見性に富んでいる。

この時点では、まだボース=アインシュタイン凝縮は見いだされておらず、1932年になって、ようやく液体ヘリウムの「超流動」という形で発見された。

液体ヘリウムは、零下 271°C に冷却すると、突如として流動性が急激に増し、狭い隙間を何の抵抗もなく通り抜けたり容器の壁面を這い上がったりする。

この現象は、多数のヘリウム分子が1つの量子論的なシステムとして強調して動くことに起因するもので、その背後に波動的な振舞いを示す場を思い描いたアインシュタインの推測は、大筋において正しい。

シュレディンガー登場

◇エルヴィン・シュレディンガーは、1926年4月にアインシュタインに宛てた手紙で、「もし、あなたの論文(1925年論文)によって、ド・ブロイのアイデアの重要性を鼻先に突きつけられて

いなければ、これまでも、これから先も、何かが起きることはなかったでしょう（少なくとも私の側からは）」と書いている。

ド・ブロイの論文にはアイデアの種があるだけで、その内容はほとんどが推測の域を出ておらず、このままでは物理学理論としての体をなしていない。

では、どうすれば良いのか？

すでに 38 歳となり円熟期を迎えていたシュレディンガーは、ド・ブロイとは格の違う物理学のプロフェッショナルだった。

彼は、自分がなすべきことを正しく理解した。

ド・ブロイは、波長と運動量の関係を式で表しただけで、物質波がどのように伝わるかを具体的な式で示すことなく、「電子に付随する」といった曖昧な説明に終始していた。

だが、物理学の理論として定式化するためには、物質波が従う方程式---いわゆる波動方程式---を書き下さなければならない。

その上で、水素原子について波動方程式を解き、その結果がボーアの原子模型と基本的に一致することを示す必要がある。

できれば、水素以外のケースについても、具体的な方程式を解いて見せた方が説得力が増す。

シュレディンガーは、これらの課題を全て完璧に遂行したのである。

波動関数の導入

◇シュレディンガーの研究成果は、「固有値問題としての量子化」というタイトルの 4 部作として 1926 年に発表された。

関連するものを含めると、1927 年までに 9 編もの論文を執筆している。

これらは、20 世紀物理学の白眉であり、人類の大いなる遺産である。

第 1 論文の冒頭は、特に印象的である。

大論文で往々にして見られるような歴史的回顧から始まるのではなく、前置きなしに「この報告では、まず、最も簡単な水素原子の場合について、通常の量子化の手続きが、もはや《整数》という語が現れないような別の要請で置き換えられることを示したい」と記されている。

いきなり問題の核心を突いてきたのである。

ここでいう《整数》とは、ボーアの量子条件「 $mvr = nh / 2\pi$ 」に含まれる量子数 n のことだ。

ニュートン力学やマクスウェル電磁気学では、基礎方程式の中に整数が現れることはない。

放り投げた物体が描く放物線の形は、初速の大きさや向きを少しずつ変えていくと、それに応じて連続的に変化する。

こうした連続性が、古典物理学の基本的な性質である。

ところが、整数 n によって運動をとびとびに制限してしまうボーアの量子条件は、この基本的な性質と真っ向から対立する。

シュレディンガー論文の冒頭の一文を読んだ当時の物理学者がどれほど興奮したことか、容易に想像できる。

◇量子条件を整数を含まない別の要請に置き換えるために、シュレディンガーが踏み台にしたのが、物質波の干渉を考えることで量子条件が導けるというド・ブロイのアイデアである。

ド・ブロイは、電子に付随する物質波が半径 r の円軌道上を一周したとき、軌道の長さ $2\pi r$ が波長 λ の整数倍になるという関係（式②）がなければ、干渉によって自分自身を打ち消してしまうと考えた。

しかし、この議論には、「電子に付随する」という訳の分からない前提がついて回る。

そこでシュレディンガーは余分な前提を捨ててしまい、物質波だけの式を立てることにしたのである。

シュレディンガーは、まず物質波の状態を表す「波動関数」 Ψ （ブサイ）を導入した。

ド・ブロイが与えた「一周したときに自分自身を打ち消さない」という条件は、「一周したときに波動関数 Ψ の波形が元と同じ形になる」という意味に解釈することができる。

◇原子の場合、中心にある原子核からの距離 r と、地球表面と同じように定義した緯度 θ (シータ) および経度 ϕ (ファイ) をセットで与えれば、原子核の周囲のいかなる場所でも指定できる。ここで、半径 r の球の赤道に沿って波動関数 Ψ の変化を考えることにしよう。このとき、 r は一定値、緯度 θ はゼロになるので、 Ψ は経度 ϕ だけの関数となる。波の式は一般に三角関数で表されるので、 Ψ は、 $\Psi \propto \cos(a\phi + b) \dots \textcircled{3}$ と書くことができる。一周しても波形が変わらないという条件は、西経 180 度 ($\phi = -\pi$) と東経 180 度 ($\phi = +\pi$) で三角関数が同じ形になることを意味する。三角関数は、引数が 2π の整数倍だけずれても同じ関数形になることが知られているので、結局、この条件は、 $(+\pi a + b) - (-\pi a + b) = 2\pi a$ と表される (左辺は引数のずれ)。そして $a = n - 1$ ($n = 1, 2, 3 \dots$) $\dots \textcircled{4}$ と表される。つまり、波動関数は、 $\cos b, \cos(\phi + b), \cos(2\phi + b), \dots$ のような形のときにだけ、一周して波形が変わらないのである。ここで重要なのは、式④に含まれる整数 n が、理論の中に初めから前提として含まれていないわけではないという点だ。ポーアは、軌道をとびとびにするための方策として、整数 n を含む条件式を前提とせざるを得なかった。ところが、シュレディンガーの議論では、「波動関数は一周しても波形が変わらない」ことを要請した結果として、この要請を満たす波動関数の係数が (式読んで表されるような) 整数になったのである。波形についての要請には、整数は含まれていない。

シュレディンガー方程式

◇シュレディンガーの第 1 論文では、変分法と呼ばれる数学理論を使えば、 Ψ の方程式が演繹的に導けるかと思わせる議論がなされている。シュレディンガーが実際に方程式を見つけた方法は、それとは異なり、もっと素朴だった。水や空気の内側に発生する波動に関しては、19 世紀からいろいろと研究が進められており、波が従う一般的な方程式もいくつか考案されていた。その中には、どこにも進んで行かず、同じ場所で上下動を繰り返すだけの「定在波」についての方程式があった。波長 λ の定在波の振幅 Ψ は、一般に、 $\nabla^2 \Psi + (2\pi/\lambda)^2 \Psi = 0$ という方程式を満たす (∇ (ナブラ) は関数の傾きを求めるハミルトニアン) の微分演算子)。当時の研究ノートには、シュレディンガーがこの方程式を検討した跡が残されている。ここから物質はの波動方程式に到達する道筋ははっきりしないが、おそらく、次のようなものだったろう。まず、波長 λ としてド・ブロイの関係式 $\lambda = h/mv$ (式①を書き換えたもの) を採用し、さらに第 2 章式⑤のエネルギー関係式 $E = mv^2/2 - e^2/r$ を使って、 $(2\pi/\lambda)^2 = (2\pi mv/h)^2 = (2\pi/h)^2 2m (mv^2/2) = (2\pi/h)^2 2m (E + e^2/r)$ という書き換えを行う。これを元の式に代入して $(2\pi/h)^2 2m$ で割れば、 $(1/2m)(h/2\pi)^2 \nabla^2 \Psi + (E + e^2/r) \Psi = 0 \dots \textcircled{5}$ という方程式が得られる。これが、世に名高い水素原子のシュレディンガー方程式---正確に言えば、「時間に依存しないシュレディンガー方程式」---である。この式は、同じ場所で上下動を繰り返す定在波の振幅を定めるものだが、第 4 論文では、時間とともに進んでいく波についての方程式

---いわゆる「時間に依存するシュレディンガー方程式」---も提案された。

◇シュレディンガーは、第1論文で、この方程式を満たす関数が一般にどのような形になるかを計算している。

ここでは、ボーアの原子模型に対応する場合に話を限ろう。

このとき、波動関数 Ψ の中で経度 ϕ に依存する部分は $\cos(a\phi + b)$ (式③) で表される。

一周して元の場所に戻ったときに Ψ が同じ波形になることを保証するには、 a がゼロ以上の整数になる(式④)という形で量子数 n を導入しなければならない。

n を決めると波動関数の形が決定されるので、波動関数は整数 n によって分類される。

同じく $E = -\epsilon/n^2$ (第2章の式⑥) になることが示される。

したがって、ボーアの理論と同じように状態間の遷移によって光量子が放出・吸収されると仮定すれば、水素原子の線スペクトルに関して測定データと一致する値が導けるのである。

それだけではない。

ボーアの原子模型よりも遥かに複雑なケース、例えば、波動関数が大きく歪んでいるようなときでもエネルギーを計算することが可能になる。

そのパワーは計り知れない。

水素原子のエネルギーが離散的になるという謎に満ちた現象を、ある要請を満たす波動関数だけが安定的に存在できるという自然な形で改名したシュレディンガーの論文は、圧倒的な好意を持って迎えられた。

閉じ込められた波

◇水素原子のエネルギーが整数によって指定される離散的な値になることは、「閉じ込められた波動では特定の振動パターンだけが許される」という一般的な波の性質の現れである。

直感的にもわかると思うが、互いに強く引き合いながら飛び回る粒子がある場合、これを狭い領域に閉じ込めて安定な状態に保つのはほとんど不可能である。

強く引き合っている以上、粒子は即座に合体してしまうのがふつうだからだ。

しかし、波の振舞いはそうではない。

例えば、バスタブに張られた水をバチャバチャと掻き乱してから放置する状況を想像してほしい。掻き乱した直後、水の表面には大小さまざまな波が立っているが、そうした不規則な波はすぐに収まり、その後は、水全体が強調するかのように、表面が滑らかに上下する振動がしばらく続くことになる。

こうした振動は、どこにも進んで行かずに同じ場所で上下動を繰り返す定在波の一種である。

バスタブのように波が限られた領域に閉じ込められている場合、最初にあった不規則な波がエネルギーを失うと、限られた定在波だけが持続するような状態で安定する。

水素原子における電子の波動は、波動方程式の形が弦や水の波の場合とは少し異なるものの、波としての一般的な性質は共有している。

電子が原子核に捕捉されている場合、波動関数 Ψ の拡がり、原子核の周辺 1000 万分の1 ミリ程度の範囲に収まっている。

これは、波動が原子核の周りに「閉じ込められる」ことを意味する。

従って、波の一般的な性質に従って、量子化された定在波だけが安定した状態として持続できることになる。

弦の場合の「端が固定」に相当する条件は、波動関数 Ψ が経度方向に一周したときに元に戻るといった関数形についての制限となる。

第4章；もう一つの道—ハイゼンベルク・ボルン・ヨルダン

◇波動関数 Ψ と電子がそのなかでどのような関係で存在しているのかということに対して、凝集したまま振動する波束となってニュートン力学に従って振動し、伝播して行くという波の状態は何れ、エネルギーを放出し切って崩れて行く。

その波動の中で電子はどのような状態で存在しているのかという問いに対して、1926年にマックスボルンは実用的な見地から Ψ の波形を持った何かが実在するのではなく、ある事象が起きる確率を表すという事象であると主張したボルンの説は Ψ の中に電子の正体も包含されているということで現在でも通用している。

◇波動関数 Ψ の中のこの正体不明の電子の状態を掴もうとするグループの中に線スペクトルの測定データ(飛び飛び)及びハイゼンベルクが成し遂げたブレイクスルーを契機に一気に体系的な理論「行列力学」として完成されていく。

「行列力学」は「波動力学」と共に「量子力学」と呼ばれる一つの理論の2つの表現であり、どちらの理論に基づいて計算しても同じ結果が導かれることが判明した。

「行列力学」は、以降優秀な人材、ハイゼンベルク、パウリ(禁則)、ヨルダン、ディラック等を育てる格好な苗床となる。

◇行列力学は、ボーアの量子条件およびゾンマーフェルトによる改良版によると、すなわち水素原子核の周囲を電子が円運動(楕円軌道も含む)をしている時の量子条件は、「運動量を座標で一周期に亘って積分した値は、プランク乗数 h の整数倍になる」。

従って、量子条件を数式で表すと

$\oint p dx = nh$ (位置座標を x 、運動量を p)。

◇定式の量子条件は、プランクの量子条件 $E = nh\nu$ とは一見別物のように見えるが、水素原子の円軌道に適用させるとボーアの量子条件($mvr = nh/2\pi$)になり、振動子に適用させるとプランクの量子仮説になる。

◇電子が原子核の周囲を円運動若しくは楕円軌道で永続的に定常状態で回遊することは続かない。何かの拍子に電磁波を放出若しくは吸収して別の軌道に移るときに放出・吸収される電磁波が線スペクトルの源になる。

◇ハイゼンベルクの大胆な仮想的研究は、電子が一定の軌道を描いて運動するという $x(t)$ として表される古典的ニュートン力学を否定することから始まり、原子が量子数 m の定常状態から n の定常状態に遷移するときに電磁波の放出、吸収が行われていると仮定し、 $x(n,m)$ なるという量子数を考えることにした。

ハイゼンベルクは何時しか電子の状態を観測できるようになるという一切の希望を捨てることにより、行列力学の幕明けを齎し、ボルンとディラックに行列力学の誕生を引き継いでいく。

◇ボルンは、ハイゼンベルクから受け取った論文による電子の状態を表す $\sum a(n,m)b(k,m)$ (和は k の全ての値について取る)の数式に引っかかるものを感じ、行列の積を用いることにより、引数にあふれていたハイゼンベルクの論文の中の数式を行列により簡潔なものに書き改めた。

その理由として、ボルンは電子の位置 x だけでなく、運動量 p も導入したためであった。最終的に、 $px - xp = (h/2\pi)i$ という式を導いた。

(i は行列の掛け算で i に相当する単位行列で、 $i^2 = -1$ となる虚数単位を表す。 $px \neq xp$)。

◇量子条件を正しく数学的に表現させるには、ハイゼンベルクの理論を行列表現を使って書き直し、具体的に計算を行う手順を示したヨルダンの加担により行列力学という新しい理論を誕生させた。これにより、エネルギー準位等様々な物理量を計算する指針が与えられた。

◇しかしながら、行列力学の欠点は水素原子のエネルギーの計算すら出来なく、リュードベリの公

式の再現ができることを示す必要性があった。

これに対してパウリが挑戦し、水素原子のエネルギー準位が導かれる計算式がきちんと出されていたが、運が悪いことにパウリの論文よりもシュレディンガーの微分方程式を解くことにより水素原子のエネルギーが計算できる波動力学の論文に先を追い越されてしまった。

結果的に行列力学と波動力学は表現こそ違いがあれ、同じ結果が得られることになり、量子力学の誕生を齎したが、何をベース(基準)にするかで結果が変わってくるようになった。

◇行列力学では、ボア流の方法論に従ってベースが量子数 n の定常状態に限定され、物理量は行列の形で $x(n,m)$ で表現され、一方、波動力学では、波動関数 $\Psi(x)$ という位置 x 状態をベースに定常状態を表したもので、連続変数である x について微分方程式を解くことにより、容易に結果を求めることが出来る。

◇波動関数 $\Psi(x)$ は、常に電子が x の状態にあるわけではなく、電子は絶え間なく、位置を変えて存在しており、波動関数 $\Psi(x_1, x_2, x_3 \dots)$ のように複雑な形で表現せざるを得ない。

◇ハイゼンベルクが用いた量子論(量子条件)の不要な要素を削り落として電子の位置 x と運動量 p の関係の量子条件を更に発展させるためにポールディラックが登場する。

◇ディラックの量子条件は、 $px - xp = h/2\pi i$ を導いた。

この式は、現代物理学の神髄となっており、エントロピーを表すボルツマンの関係式、 $S = k \log W$ と並んで深遠でこの量子条件の真意を地球上で理解できる人がいるとは思えない程だ。しかしながら量子力学に見られる様々な不可思議がこの式に凝縮されているのだ。

◇ディラックは、量子論に従う物理量を記述するには古典的なニュートン力学に用いる定数 c と区別しなくてはならず量子論的数として、電子の位置と運動量を表すのに q 数(quantum number)を用いた。

ここにおいて、古典的ニュートン力学と量子力学が区別されるようになった。

◇電子の位置と運動量を測定するのにアインシュタインは霧箱の中で電子ビームの飛跡を測定することにより軌道という概念の正しさ追求しようとしたが、位置 x も運動量 p も確定できずに不確定であるということで不確定性の度合いを測定することで、電子を単に「粒子」として捉えるのではなく、「粒子性と波動性」を持っているとするハイゼンベルクの「不確定性原理」へと導かれて行く。

◇「不確定原理」:電子の位置と運動量を測定し、特定することは不可能である。

何故なら、電子の位置を測定しようとして何らかのエネルギーを電子に与えると位置も運動量も変わってしまうからである。

ハイゼンベルクは電子は単に粒子性として捉え、シュレディンガーは単に波動性として捉えていたが、ボアーにより「電子は、粒子性と波動性を併せ持つという」という視点に立つことが必要であると主張し、ディラックの主張と一致していた。

不確定性原理は、 q 数の特異な性質を明らかにした。ディラックの量子条件を満たす q 数の組 x と p とはどちらも値が一つに定まらずにぼんやりと広がっている電子雲のような存在で、粒子性と波動性を調和させるための次なるステップへと物理学者を導いていく。

第5章 光の場—ディラック

◇波動力学と行列力学との合体により量子力学が完成されて、原子のエネルギー準位や結晶で散乱された電子の分布などの知見が得られるようになったが、電磁場との総合作用との関係については

未だ言及されていなかった。

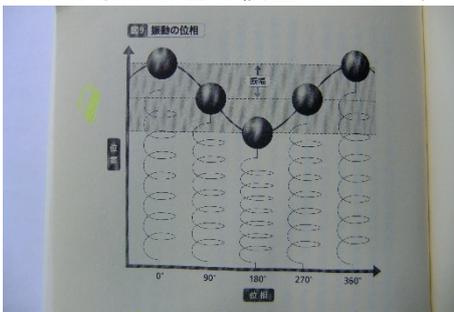
◇換言すると「粒子の量子論」としては完成されていたが、「場の量子論」としては未完成であった。アインシュタインの光量子論は存在していたが、光が $h\nu$ というエネルギーの塊として振る舞う光という説はあったが、電磁場を持つ粒子とどのように形で相互作用をするか数式で表すことはできなかった。

◇光が電磁場で振動しながら伝わって行くという仮説を裏付けるには振動との関連性を言及しなくてはならない。

◇振動の量子論の端緒になったのは 1900 年のプランクが提唱した量子仮説であるが、振動しているものは何であれ、それがディラックの量子条件を満たすもの、即ち、「 $px - xp = h/2\pi i$ 」に当てはまるならばエネルギーが $h\nu$ の整数倍に離散化された量子論が結論でき、エネルギー $h\nu$ のまとまりが n 個存在していると言い換えることが出来る。

◇研究が行き詰った時、科学者は出来る限り単純なモデルを造って、解決の糸口を見つけるが、波動性と粒子性のものが電磁場の中で振動しているというモデルに対して、ヨルダンがおもりをつけた小さなばねが無数に連結されているような弦を考え、一つ一つのバネが量子論的に振る舞う結果として、弦全体では粒子性と波動性の二重性を示すことを試みた。

しかしながらこのモデルだけでは、電磁場との関係や電子と光の相互作用を説明できない。



◇次なる一歩はフランス人で物理学の天才であった「ディラック」によって 1927 年に発表された「光の放出と吸収」という論文で齎された。

光と電子が相互作用を行っている場に量子力学を適用させた。

◇ディラックは天体力学で古典的に用いられていた「摂動論」という、惑星の軌道を求めるのに、太陽からの重力と惑星間の重力との差により、わずかなズレを段階的に加えて行く手法を電子と光からなるシステムに応用させた。

◇「電子と光」だけが混在するシステムにおいて、(i)電子だけが存在する場合、(ii)光だけが存在する場合、(iii)電子と光の相互作用が存在している場合の方程式を解くことから始めた。

◇電子と光との相互作用は、 $2\pi e^2/hc$ (e は電気素量、 h はプランクの定数、 c は光速) という係数が掛かることは知られている。

◇この係数は「摂動論」では次々に掛かってくる。

「摂動論」では、「電子のみが存在する場合は、波動力学や行列力学によって解決されているので」「光だけが存在する場合に焦点を当てて解決する必要性がある。

◇光は様々な振動数を持つが「要素波」の集合体として分解して便利な数学の手法を用いて求めることが出来る。

要素波の一つとなる振動数 ν の波は、エネルギー $h\nu$ の光量子が n 個集まった集団と見做すことが出来る。

◇ディラックの天才ぶりが発揮されたのは、振動という現象は位置が時間と共に変化する動きとして捉えるのではなく、エネルギーと位相という 2 つの量で表すことを考えた。

そしてこの 2 つの量と電磁波が従う式に書き直すと位相は、「電子と光の相互作用」の項だけに含まれる。換言すると「光の状態とは、光量子の個数のことで、「電子と光の相互作用」を光量子の個数の変化という形で捉える斬新な議論を展開していくことになる。

◇マックスウェルの電磁気学によれば、「電子と光の相互作用」を表す項は、電子の運動によって生じる電流と電磁場の積の形をしている。

「電子と光の相互作用」の項、電子の作用によつて光量子が 1 個生成される項と、逆に光量子が 1 個消滅する項の和で表される。

◇「摂動論」によると、放出される電子の数と吸収される電子の数は一致しないが、光量子が 1 つずつ放出、吸収される過程を考える手法で、一方の電磁気学では電場の状態は連続的に変化するものとして捉えるが、ディラックの理論は、量子条件を未だ式では表していないとする不完全さがあったが、アインシュタインが示した光量子の性質を見事に再現させ、ボアの振動数 $\nu = \Delta E/h$ の理論が導かれる。

ディラックは数学的確率論の観点から導入すれば「摂動論」によって解は得られるはずだと予測し、その解が見つかるまでに更に 20 年もの歳月を要し、「素粒子論」として体系づけられた。

◇ディラックの論文の難解さは c と q との説明に飛躍があり、湯川、朝永博士等を悩ませた。

◇「素粒子論」という学問体系の完成に至るまでに、電磁場の振動状態は光量子(後に光子という呼び名になる)という粒子は、あたかも粒子のように扱われてきたが、実際には要素波が持つエネルギー $nh\nu$ をエネルギー量子 $h\nu$ の n 個の集まりであると看做し、そのうちの一つの $h\nu$ を光子と呼んでいるに過ぎない。

つまり、光子とは、もともと電磁場の振動が持つ「とびとび」のエネルギーを粒子であるかのように表現したものにすぎず、そもそも位置を特定できる粒子ではない。(ハイゼンベルクの不確定性原理、1927年)

◇一般人にとって量子場の理論が分かりにくく、取っ付きにくいのは、素粒子と聞くと何か「小さなもの」としてのイメージで捉えがちだが、それは空間の中にポツンと存在するような「実体」ではなく、むしろ「状態」や「作用」を数学的に表現したものなのだ。

◇1927年の論文でディラックは、電磁場の具体的形を特定無いまま、「光の場」として光量子の数について言及しているが、電磁場の概念として、当時、電場 E と磁場 B を使って表していたが、式の形としてより単純となる電磁ポテンシャル $A(t,x)$ という式が用いられ、そこから電場と磁場の二つとも「場の量」として導くことができた。

◇電磁ポテンシャル $A(t,x)$ に量子条件を適用させると、振動のエネルギーが $nh\nu$ になることを導いている。

従って、電磁ポテンシャルこそが光の担い手であり、これを「光の場」として呼ぶのが妥当であろう。

◇「光の場」は、いくつもの波を重ね合わせた波束が粒子的に振る舞うと考えたシュレディンガーのアイディアは誤りで、「光の場」 $A(t,x)$ の振動を量子論的に扱うには $A(t,x)$ を量子論的な数 q 数と見做す必要がある。

◇現在の説では、波動性と粒子性の両方の性質を持つということに対する解釈として、一般的に波動性とは、振動のエネルギーは $h\nu$ の整数倍しか許されず、 $h\nu$ というエネルギー量子はそれ以下に細分されることなく、 $h\nu$ のまとまりであり続ける。これがシュレディンガーの波束と異なって光の場の振動状態である「光子」がいつまでも「 $h\nu$ が n 個ある」という粒子的な状態を維持できると解釈されている。

◇ディラック自身「光子」の捉え方として原子論よりの発想をし、「電子の海」という壮大な発想は実は勇み足で、後に思いも寄らぬ屈辱を味わうことになる。

第6章 電子の海—ディラックとパウリ

◇「光は $h\nu$ の塊のように振る舞う」という主張には、更に、電子と光が従う方程式の全貌を明らかにすることが必要である。

ディラックはこれに挑戦するが、量子力学の重大な欠陥に突き当たる。電子の振る舞いは、シュレディンガーの方程式によって決定されるが、電子の波動関数 Ψ と光の場 $A(t,x)$ の関係をどのように式にするかという点だった。

相対論に従うと時間と空間は密接な関係にあり、必ずペアになることが要請される。ディラックの役割は相対論に従って波動方程式を書き直すことだった。

3章の⑤式で、 $(1/2m)(h/2\pi)^2 \Delta^2 \Psi + (E + e^2/r) \Psi = 0$ 、ここで電子が原子内部に束縛されるのはこの式に位置エネルギーの項 $(-e^2/r)$ の項をそぎ落とせば、空間を自由に飛び回る電子(自由電子)の状態を表す式になる。

◇最終的にニュートン力学も考慮し、更に相対論にも修正を加えると、エネルギー E と運動量 p は、次の式を満たすことが知られている。

$$E^2 = (cp)^2 + (mc^2)^2 \dots \textcircled{3}$$

この式では、エネルギーと運動量は共に二乗になっており、ペアになって相対論の要請にかなっている。

更に、ディラックは E が p の一次式になるという大前提のもとに係数 α と β を使って次の式を書き下ろした。

$$E = cp\alpha + mc^2\beta \dots \textcircled{4}$$

ディラックは、行列や α 数では積の順番を入れ替えることにより、結果が変わるということを考慮し、終に、波動方程式を行列に拡張することによって不可能だと思われていたことをやってのけた。

◇電子の波動方程式は、式④の右から Ψ を乗じて作ることが出来る。

ディラックがその時に踏み台にしたのが、パウリが発表したスピンの理論であった。ディラックの方程式として、下記のもの成り立つのである。

図13 ディラック方程式

$$E \begin{pmatrix} \Psi^{(+)} \\ \Psi^{(-)} \end{pmatrix} = c\mathcal{P} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi^{(+)} \\ \Psi^{(-)} \end{pmatrix} + mc^2 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi^{(+)} \\ \Psi^{(-)} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} mc\Psi^{(+)} + c\mathcal{P}\Psi^{(-)} \\ c\mathcal{P}\Psi^{(+)} - mc\Psi^{(-)} \end{pmatrix}$$

◇スピンの理論が提起された要因として、ボアーの原子模型では解明されない課題点として、異常ゼーマン効果という、原子から放出される線スペクトルが原子に磁場をかけると1本だった線スペクトルが分裂して複数になる現象が1896年に発見され、ゼーマン効果と名付けられていたが、正常ゼーマン効果は、磁場によって電子の運動状態が変化すると考えれば説明できたが、分裂の幅が小さい異常ゼーマン効果を説明するのに1925年にサミュエル・ハウスマット等が電子自体が小さな磁石であると仮定すれば説明できるとする論文を発表した。

この小さな磁石はスピンと呼ばれ、外部か加えられた磁場により、電子のスピンの向く方向によりエネルギーに差が生じ、このエネルギーの差異さにより線スペクトルが分裂するというのである。

◇シュレディンガーの波動関数は、電子がどこに存在するのかという情報しか含まず、スピンの状態までは表していない。

この問題の解決として、1927年にパウリが発表した論文で、外部磁場に対して波動関数 Ψ がどちらを向くか、外部磁場に対してスピンの向きが同じ向き Ψ_a と外部磁場に対してスピンの向きが反対方向を向く Ψ_b の状態とし、

外部磁場の強さを B 、スピンの磁力の大きさを μ とすると、磁場とスピンの相互作用に起因するエネルギーは、スピンの向きが外部磁場と同じ向きになる Ψ_a の時最も低く、 $-\mu B$ に、反対向きになる Ψ_b になるときに最も高く $+\mu B$ となる。この理論は磁石がスピンのエネルギーを最小化しようとして磁力線の方向として常に北向きになることが日常生活で証明されている。

◇スピン相互作用を表すのにパウリが波動力学と行列力学を見事に融合させて導いた。

ディラックがこれを応用することで、相対論的な波動方程式を導いた。

即ち、ディラックは波動方程式の中に、電子の状態を表すスピンの向きとスピンの大きさの4つの成分を持つ方程式として完成させた。

◇ディラックの波動関数には、 $\Psi(+)$ と $\Psi(-)$ の二つの成分があるが、電子が静止状態の時、即ち運動量 $p=0$ の時、次の二つの式に分解される。

$E\Psi(+)=mc^2\Psi(+)$ $E\Psi(-)=mc^2\Psi(-)$ である。

ならば、負の質量エネルギーを持つ電子(粒子)は実在しているのだろうか。

◇この答えに対して、ディラックはこの世は電子に満ち溢れた「電子の海」という発想に辿り着き、「電子と陽子」という題の論文をまとめた。

つまり、もし負のエネルギーを持つ電子が存在するならば、正のエネルギーを持つ電子から放出されたエネルギーを次から次へと吸収して、運動量が大きくなり、世界は運動量の大きな負のエネルギーを持つ電子で埋め尽くされてしまう。

結果、宇宙の何処にでも負のエネルギーを持つ電子で埋め尽くされてしまい。

その存在感は感じられなくなる。

ディラックはその場所を空孔(hole)と呼び、物質の「存在」と「不在」の役割を果たしているとした。

又、ディラックは負のエネルギーを持つ電子で埋められている場所を陽子(proton)とし、物質を構成しているものは電子と陽子と見做し、陽子は「電子の海」における泡のようなものであるとした。(実際は、原子核は陽子と中性子(neutron)が結合したものである。)

◇この考えは、後の世に何も無い真空から電子と反電子がペアで作り出され、粒子と反粒子という相反する粒子が作られ、ビッグバンを生む莫大なエネルギーの源となり、宇宙、太陽系、地球、生命体を誕生させたとする理論に発展してきている。

◇ディラックの考えは、1932年、カールアンダーソンによって、宇宙線を霧箱で観測して正電荷をもつ粒子の発見につながり、陽電子(positron)と命名された。ディラックもアンダーソンもノーベル物理学賞を受賞した。

◇ディラックは、「電子の海に開いた空孔」というアイデアを理論化させるのに 1924 年に導入された「排他率」と呼ばれるパウリの理論を利用している。

「排他率」とは、比喩的には、電子が取り得る状態を一人用の座席であると考えられる理論で、1 つの座席には 1 個の電子しか座ることが出来ず、原子内の電子の場合、 $n=1$ に分類される電子軌道のエネルギー状態の座席に座れる電子の数は 2 つ (H_2 が 1 つで原子内の電子が 2 個の He で座席が埋まってしまう)。

このように「電子はある状態を占有する」という法則が排他率である。

パウリは排他率の発見で 1945 年にノーベル物理学賞を受賞している。

排他率の模型を添付に図示する。

◇排他率では内側の軌道程エネルギー準位が低く、電子数の多い原子では、エネルギーの低い内側軌道から順に電子で占有されていく。

◇ディラックによる「電子の海」のアイデアは、低いエネルギー状態が電子に占有されている原子のイメージを全空間に拡大したもので、エネルギーの値が負になる定常状態では、全て電子に占有されており、安定状態を保持されている。

まれに外部からのエネルギー供給により電子が飛び出さされ、空席が出来ると正のエネルギーを持っていた電子が光を放出して空席の座席に落ち込んできて安定する。

◇結果的に、パウリの排他率がディラック方程式を負のエネルギーの困難から助け出すための命綱になったのである。

ディラックの業績はパウリやハイゼンベルクの理論の完成度を高め、 q 数を用いて「 $px-xp=h/2\pi i$ 」という相対論的量子力学の枠組みとしてエレガントで鮮やかに転用した。

しかしながら、相対論とスピンの理論、さては異常ゼーマン効果の現象を解明したことで、パウリは自分は No.1 と自負していただけにディラックに対する衝撃は大きく反撃に向かったのは当然の成り行きだった。

◇パウリは、19 世紀に物理学に見られた「場と原子の二元論を、場の理論によって統一する」方向へと進んで行った。

一方、飽くまでも原子論者のディラックは、あらゆる物理現象は、真空中に充満する電子と光子(いまだ理論化されていない陽子)が繰り広げる状態遷移の過程であり、世界の構成要素である電子と光子は、互いにエネルギーをやり取りしながら様々な状態に遷移し、時には真空中の中に埋没するというのがディラックの原子論的な世界の理論であり、天才ディラックとパウリの対立は 1933 年には科学史上一つのピークを迎えることとなる。

◇しかしながら、1929 年にディラックが書いた「空孔理論」の論文の至る所に数式はなく、自信のないあいまいな表現で書かれていた。

1932 年にアンダーソンによって、反電子としての陽子が発見されるとディラックは自分の「空孔理論」の正しさを確信したが、パウリは「空孔」の考え方は信じないと主張し、対立が顕在化したのは、1933 年 10 月ブリュッセルで開催された第 7 回ソルベイ会議で、ディラックが「陽電子の理論」と題して講演を行った際に、パウリとボアーの質問に対する的確な返答がディラックは出来ず、「電子の海」としての「空孔理論」が天才のみが思いついた壮麗な間違いが顕在化され、パウリがヨルダンやハイゼンベルクと協力して作り上げた「場の理論」が正しい方向としてこれ以降の量子力学が発展していく礎になるのである。

第 7 章 量子場の理論－ヨルダン・パウリ・ハイゼンベルク

◇パウリは 1929 年に、ハイゼンベルグとの共同研究によって「量子場の理論」を作り上げた。これは、アインシュタインの「一般相対論」とともに 20 世紀物理学の金字塔と言われる壮大な成果であった。

この量子場の理論は、光だけでなく電子の存在をも、場の振動に還元してしまうというものである。「場」があらゆる物理現象の担い手であり、ただ一つの物理的実在と呼ぶ。

◇量子場理論の形成と実証

1. ヨルダンが基礎を作る 弦の理論 (第5章)

「拡がりを持つもの(弦、膜、媒質など)が量子論的な振動を行うと、粒子・波動の二重性を示す現象が生じる」—量子場理論の基本的発想 1927

量子条件 ①式で表わされる。 ヨルダンとクライン

$$\langle \Pi(t,x) \Phi(t,y) - \Phi(t,y) \Pi(t,x) \rangle = \hbar/2\pi i \quad \text{--- ①}$$

時刻 t と場所 x (あるいは y) がペアで現れている。場の概念

2. パウリが完成させる

「エネルギー量子と電子との関係」—電子とは場の振動が粒子のように振舞うことだと解釈
論文 1929,1930 ハイゼンベルクと共著—量子電磁気学の完成

3. 量子場の理論

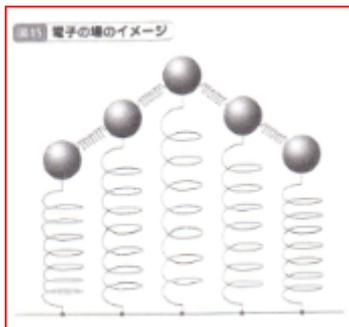
最も基本的な構成要素は、空間のいたる所に存在する「場」である。量子場の理論では、場そのものを量子論的な q 数だとみなす。

主役はあくまで「場」であって、粒子は派生的なもの。

電子の個数とは、 mc^2 というエネルギーのまとまりの個数。

電子の実体は、光と同じように「場の振動」である。

ただ、質量を持っているので、粒子のように振舞う。



4. 空孔と反粒子

1932 年に発見された陽電子も、量子場の理論で説明可能。

5. 電子と光の相互作用

電子の場と光の場を支配する方程式の相互作用項 ③

この式は電子と陽電子を含み、電子の場と光の場の相互作用を表わしている。

見かけ上、1 個の電子が 1 個の光子を放出する。

電子は単独で生成・消滅することなく、必ず陽電子とペアになって現れたり消えたりする。

6. 電子と陽電子の入れ替え

電子が生成すると、質量エネルギーが $+mc^2$ だけ増える。
陽電子が消滅すると、質量エネルギーが $-mc^2$ だけ増える。
量子電磁気学では、電子と陽電子を入れ替えても物理法則には変化がない。粒子と反粒子の入れ替え操作でも同じこと。

7. 量子場と波動

量子場理論では、電子の位置ではなく、電子の場が行う基本振動のエネルギー mc^2 を扱う。それが維持されるということが肝心である。量子場理論は、量子力学の上位理論である。波動が二重に現れる。電子の場の波と、あらゆる地点でのゆらぎの波。この関数の計算は困難を極める。半経験的な手法で近似計算。

8. 量子場はなぜポピュラーでないか

- 1) 「二重の波動」の理解
- 2) 計算できないー「くりこみ理論」の完成（1950年以降）待ち
- 3) 応用できないー必要ない、量子力学で充分
- 4) PR不足 ディラック・パウリ とともに変人

第8章 くりこみの処方箋 ー朝永・シュウィンガー・ファインマン

◇量子電磁気学（電子と光に関する量子場理論）は 1929 年にパウリとハイゼンベルグによって形式は完成。

しかし実用的でなかった。

測定データと対比できる実用計算には 20 年の歳月を要した。ーくりこみの処方箋

1. 無限大の困難

無限大の困難は、電子が自分自身と相互作用するようなケースで現れる。これを誰も（ハイゼンベルグ、ワイスコップ、ディラック、パウリでも）解決できなかった。

2. 原子核物理学の興隆

1932年チャドウィックが、原子核内部に中性子の存在を発見。

ー陽子や中性子に関する量子場の理論が提案されーフェルミの β 崩壊の理論や湯川の間接子論などが登場。

しかし原子核の理論計算は簡単（量子場理論不要）。

1938年以降 原子核の内側の巨大なエネルギー注目ー原子爆弾開発へ。

3. 戦争の時代

オッペンハイマー 原爆開発のマンハッタン計画の中心人物

ディラック 核兵器開発のためのウラン濃縮の研究

ナチスによるユダヤ人排斥ーアインシュタイン、ボーア、ボルン、パウリ、フェルミ等 脱出

ボルンー平和主義、しかし部下・学生が原爆開発に、ーあと(1955)核兵器廃絶運動に署名

ヨルダンー国粋主義、ナチス思想に共鳴

ハイゼンベルグー1938以降 核エネルギー研究へ

4. 戦争の終結 1945 とアカデミックな科学の再興

ファインマンー独自の計算手法

シュウィンガーー厳密な量子場の計算

朝永振一郎—量子電磁気学
3グループ 1948年に成果発表

5. くりこみ理論

朝永・シュウィンガー・ファイマン くりこみ理論 1965年ノーベル賞

3人とも独立に、くりこみ理論の正しさ・有用性を証明した。

朝永—有限な値の中に無限大の寄与が吸収されてしまうことを「くりこまれる」と表現
ラムシフト（原子のエネルギー準位がディラック方程式による計算値と合わない現象）の計算で
測定値と一致する値を得た（1948）

シュウィンガー—ラムシフトと異常磁気能率の計算に成功

ファイマン—分かりやすい標準的な計算手法を開発

6. くりこみの意味

計算の途中で現れる無限大をシステムティックに取り除いていく手法

「無限大の困難」を回避する方法

その後の改良によって、1960年代になってくりこみ理論を完成。

電子の状態は、空間の中に稠密に存在する無限に小さな量子論的バネによって表される。

このバネが例えば光の変化を受けた時の動きは解像度の低いモニターでは観測できない。

有限の解像度を持つモニターに映し出される過程を使って低解像度のモニターで

何が見えるかを計算。

更に1970年代「有限くりこみ」法でケネス・ウィルソン

1982年ノーベル物理学賞。

ただし、ミクロの極限では、量子電磁気学は不完全であった。

終章 標準模型-----20世紀物理学の到達点

量子場の概念の確立

◇量子場の理論を電磁気以外にも適用しようとする試みは1930年代に始まるが、肝心の量子電磁気学が無限大の困難に突き当たっていたため、とても学界の主流とは言えなかった。

◇1940年代末にくりこみの処方箋が与えられ、机上の空論かとも思われていた量子電磁気学が実効性のある理論へと変貌を遂げると、好意的な見方も少しずつ増えてはきた。

だが、1950~60年代には、無限大を強引に処理するくりこみの処方箋への不信感が払拭できなかったこともあり、いまだ量子場に対して疑いの眼差しを向ける人も多かった。

当時、量子場の理論は最先端からはずれたマイナーなジャンルであり、その研究者は、あまり注目されない論文を細々と発表し続けるしかなかった。

◇しかし、1970年代に入ると状況は一変する。

それまでの地道な研究が実り、量子場の手法によって従来の理論では説明できなかった現象に理解の光を当てることが可能になったのである。

さらに、この理論から予想される新しい現象が相次いで検証され、その正当性は否

定しようがなくなる。

◇こうして、量子場の概念に基づく包括的な理論の枠組み-----いわゆる標準模型---
が、物理学界で広く受容されるに至った。
標準模型は、21世紀初頭の現在でも圧倒的な成功を収めており、20世紀物理学の
1つの到達点となっている。

◇量子場の計算を行う際に一般に利用されるのが、ディラックが開発した摂動論の
手法である。

摂動論では、量子場同士の相互作用は小さな補正になると仮定し、まず、それぞ
れの量子場だけ（正確に言えば、その中でも波動の伝播に關与する項だけ）が存在する
場合を考える。

◇このとき、量子場を伝わる波動は、電子や光子と同じようにエネルギーがとびと
びの値となって、あたかも空間を飛び回る粒子のように振舞う。

量子場理論が広く認められる以前から、こうした粒子は「素粒子（elementary
particle）」と呼ばれてきた。

このため、量子場について研究する分野は、慣習的に「素粒子論」と呼ばれている。

◇ただし、これは、必ずしも実態を正確に表す用語ではない。

素粒子はビリヤード球のような粒子ではなく、あくまで量子場が粒子のように振舞
っているものであることを忘れてはならない。

◇素粒子の種類ごとに量子場が存在しており、この場があらゆる地点で量子論的に
ゆらいでいる結果として、エネルギーがとびとびの値になる。

こうしたとびとびのエネルギーの1つのまとまりが、素粒子なのである。

素粒子の標準模型

◇今日、重力作用以外のほとんどの物理現象は、ヤン＝ミルズ理論という量子場理
論によって統一的に記述することが可能だと考えられている。

物理現象を統一的に記述するこの枠組みは、素粒子の標準模型と呼ばれる。

標準模型は1970年代半ばまでに完成され、十分に満足のいく精度で実験と一致す
る予測を与える。

◇素粒子の標準模型は、20世紀物理学の到達点である。

重力が含まれないとは言え、その適用範囲は広い。

1000兆分の1メートル以下の極微の現象を解明する一方で、この世界になぜ物質
が存在するかという宇宙論的な問いにも答えてくれる。

◇何よりも重要なのは、量子場という単一の基本概念によってあらゆる物理現象を
理解できる点である。

19世紀の物理学では、原子論と場の理論を折衷させる形で現象を記述せざるを得
なかった。

しかし、20世紀後半になって、人類は、ようやく世界を量子場という統一的な視
座から眺めることが可能になったのである。

量子場理論の世界像

◇量子場による統一的な記述の完成は、世界の見方を静かに変革した。
現代物理学は、多くの人知らない間に、従来とは全く異なる世界像を作り上げていたのである。

◇量子場の概念が登場する以前、原子とは、何も無い空間の内部を動き回る小さな粒子状のものとして捉えられていた。
物質がこうした原子から構成されているとすると、物質が示す複雑さは全て、単純な構成要素の複雑な組み合わせとして生み出されることになる。
こうした複雑さは、組み合わせられている個々の要素に分解することが可能である。
これは、世界の複雑さが単純な要素に還元可能であることを意味する。

◇現在でも、一般の人は、19世紀的な原子論とそれほど変わらない世界像を持っているだろう。
陽子や中性子を知っている人は少なくないはずだし、科学にかんしんのある人ならクォークという言葉聞いたことがあるかもしれない。
だが、一般的な理解では、これらはあくまで空間の中を動き回る小さな粒子であり、互いに力を及ぼしながらくっついて物質を構成することになる。
こうしたメカニカル（機械的）な世界像には、空間を満たしている場がダイナミックに波動を伝えるというイメージが決定的に欠落している。

◇量子場の理論は、「空間の中を運動する小さな粒子」という19世紀的な道具立てを必要としない。
原子論では原子の存在がそもそもの前提となるが、量子場の理論では、あらゆる物理現象が場から生起する。
粒子的な振舞いをする素粒子は、量子場の振動がとびとびのエネルギーを持つことに由来する。

◇粒子的な振舞いだけではない。
量子場の理論は、空虚な空間すら前提としていない。
量子場は、近接する場のつながり（バネのイメージを使うならば、無数のバネが連結しているという状況）によって空間的な拡がりをも作り出している。
あらゆる物理現象が全て量子場の振動を通じて生起すると考えられるのだから、「まず空虚な空間が存在し、その中に量子場がある」という言い方は無意味なまでに冗長である。
「量子場がある」と言うだけで、空間的な拡がり内包されているのだ。

◇ニュートン力学では別個の概念として扱われていた空間-時間-物質-力が、量子場という1つの概念に集約されると言っても良い。
もっとも、空間と時間を量子場と一体にするためには、空間・時間のダイナミックな変動を扱う一般相対論を量子場の枠組みに取り入れる必要がある。

◇量子場の最大の特徴は、振動が起きるスペースとして、空間や時間とは別の次元を内包している点である。
これまでバネのイメージを使って量子場の振動を表してきたが、このバネが振動す

るのは、われわれが目にして縦・横・高さを持った3次元空間の内部ではない。それとは別の次元である。

◇量子場の状態は、量子論的な q 数で表される。

したがって、量子場が、この振動スペースのどこかで確定した値を持っているわけではない。

値が確定しない q 数の特性に従って、量子場は振動スペース内部に拡がり、バスタブに入れられた水と同じように、とびとびのパターンを持つ定在波となる。

こうしたパターンの離散性が、量子場に粒子的な性格をもたらしている。

◇このような振動スペースがはたして現実的なものか、それとも、理論の記述に現れるだけの数学的な虚構かは、今の時点では何とも言えない。

しかし、仮にこの振動スペースが実際に存在するとなると、世界の見え方は、空虚な空間内部を原子が運動するという19世紀的なものとは全く異なってくる。

◇われわれが3次元の空間と1次元の時間として認識しているものは、実は無数の（ある数え方によれば、1立方センチ当たり10の100乗、という途方もない数の）次元が集まった超高次元世界である。

19世紀的な原子論とは異なり、現象の複雑さは、膨大な次元数を持つ世界のどの部分次元で生起するか依存する。

こうして実現される複雑さは、構成要素の組み合わせに還元することができない。

素粒子論と言うと、世界を単純な要素に還元する理論であるかのように思われがちだが、実は全く逆なのである。

究極の理論を目指して

◇素粒子の標準模型は、数学的な美しさを湛え哲学的にも深遠な意味を持つ。

だが、残念ながら、これがあらゆる物理現象を解き明かす究極の理論というわけではない。

19世紀の終わりには、ニュートン力学とマクスウェル電磁気学によって全てが解明できるのではないかという淡い期待があったが、現代の物理学者は、解決しなければならない課題がなお山積しており、しかも以前にも増して手強いことを心得ている。

◇標準模型が究極の理論でないことは、いくつかの理由から明らかである。

第1に、この模型には、重力の作用が含まれていない。

重力は、単に宇宙論や天文学で重要な役割を果たしているだけでなく、アインシュタインの一般相対論によって時間・空間の構造と密接な関係があることが明らかになっている。

量子場が空間や時間に完全に取って代わるためには、重力を含む理論でなければならない。

◇第2に、くりこみの処方箋を使っている限り、ミクロの極限にまで理論を外挿することができない。

すでに用いた比喻を使えば、物理現象を映し出すモニターの解像度を無限に高くしようとする、どこかで理論が破綻してしまうのである。

◇第3に、標準模型には、いくつかの根拠のない仮定が含まれている。
例えば、電子とクォークの電荷は、厳密な整数比をなすとされており、ほんのわずかの誤差も許されない。
しかし、なぜ整数比になるのか、その理由は全く不明である。

◇究極の理論は、これらの問題を解決するものでなければならない。
候補となる理論はいくつかある。
例えば、超ひも理論と呼ばれるものは、先の3つの課題を全て解決できる可能性を秘めている。
しかし、この理論が正当だという確証は得られておらず、いまだ広く支持されるには至っていない。

3. ある対話の例から相対論と量子論の世界観の違いを知る

以下は、メンデル・サックス著＝原田稔訳『相対論対量子論』（1999・講談社）から、抜粋・引用させていただきました。

マニーは、物理学とそれに関連する哲学に対して定見をもっているが、それは1990年代の今日の物理学界の主流派の意見を代表するものである。ジャッキーは、マニーとは逆に非主流派に属し、モーは両者の間で、マニーに味方したり、ジャッキーに味方したりする。

【マニー】

ジャッキー、君は先週の議論のあと、どんなことを考えていたの？
依然として完全な秩序がこの宇宙を支配していると思っているのかい。
それとも、物理学では不確定性が基本的な役割を果たしているという多数意見を認めるようになったのかい？

【ジャッキー】

私は、宇宙全体が完全な秩序に基づいているということ、直観的にとても強く感じているわ。
もっとも、私たち人間はそういった秩序をすべて知り尽くすことはできないとは思うけどね。
人間の能力は限られているから、これは当然のことよ。
いずれにしても、私は依然として、この世の中は完全な秩序に従うものだという信念を持っているわ。
この信念は照明することはできないし、大多数の人の考えとは違うかもしれないし、私たちの能力は限られていて宇宙のごく一部しか知りえないかもしれないけれど、私は大筋において正しいと考えているわ。

【マニー】

ところでモー、君の方はどうなの。
二週間前、君は僕の考えのほうに近いように思っていたけど、先週の議論の終わり頃には、ジャッキーの考え方に惹かれていたよね。
そのあと、さらに考え直して、決着をつけた。

つまり僕のほうが正しいと考えるようになったと思うんだけど・・・。

【モー】

いまじゃ、君達二人の考え方の両方に賛成したい気持ちになっているよ。
宇宙には完全なる秩序があるという感じがする一方で、好むと好まざるとにかかわらず、秩序という概念では説明のつかない本質的なでたらめさがこの世の中にはあるのだという実験事実もあるように思われるんだ。
とにかく、われわれは客観的でなければね、ジャッキー。

【ジャッキー】

モー、実際の実験データに関して言うと、完全な秩序があると信ずるに足るデータより、本質的な不確定性があると信ずるに足るデータのほうが多いとは思われないわ。
何れにしても、私たちは信念に基づいて行動すべきよ。
誰であろうとも、信念に基づかない認識を主張するのは完全に間違っているわ。
具体的に研究をする場合、私たちは信念をもって十分な時間をかけて努力を積み重ねるべきだと思う。
そうすることによって、研究がうまくいくチャンスが増えると思うのよ。
もちろん、そういう保証があるわけじゃないけど。
アインシュタインの科学する姿勢がそのいい例だと思うわ。
アインシュタインは、彼の相対論が自然に対する忠実な理論だという信念を持っていたわ。
それは、相対性原理という相対論の基本理念が概念的にきわめて単純なものだという理由によるの。
この理由によって、アインシュタインは相対論が宇宙の真理を述べたものだと信じたのよ。
それで、生涯の大部分を相対論のさまざまな結論を吟味する研究に費やしたんだわ。
その結論の一つが、宇宙の法則は不確定性、つまり本質的な蓋然性に支配されるものだという主張に対する反論なの。
これは、物理的宇宙に対するアインシュタインの考え方の根底にある秩序というもののせいで、因果律を否定する量子論が自動的に排除されることを意味するものよ。

【マニー】

相対論的場の量子論の方はどうなの、ジャッキー？
この理論は、量子論と相対論とを統合したものだよね。

【ジャッキー】

いいえ、本当はそうじゃないのよ、マニー。
特殊相対論の主張は正しいという物理学界の認識に基づいて、粒子や放射の量子論を特殊相対論の条件に沿って任意の慣性系で成立させるような研究が行われたんだけど、その結果生まれた「場の量子論」という数学的理論は、重大な欠陥をもつものであることがわかったのよ。

【モー】

ジャッキー、その「重大な欠陥」というのはどういうことだい？
場の量子論は実験事実をすべてうまく説明していると思うけど。
とくに、電磁気学を扱った量子論である「量子電磁気学」の成功は大きいよ。
この理論の予言と実験事実の一致はきわめて精度の高いものだからね。
それでも君は、自然法則は本質的に不確定性、でたらめさに支配されているというコペンハーゲン学派の主張の正しさを納得しないのかい？

【マニー】

まったくのところ、量子電磁気学は、物理学において発見された理論のなかで、史上最高

とっていいほど完成された理論だと思うよ。

【ジャッキー】

二人とも、そう興奮しないでよ。

私もそのことはちゃんと知っているわ。

でもやっぱり、場の量子論には重大な欠陥があるのよ。

その欠陥というのは、量子力学と場の量子論をつくった一人であるディラックが指摘している問題と同じなの。

彼が最初に非相対論的量子力学を、物質から出入りする放射の問題を扱う相対論領域へ拡張したとき、得られた相対論的場の量子論の方程式には解がないということになったのよ。

それで、マニー、あなたも知っているように、話は次のように進んだの。

非相対論的量子論の数学的枠組みを、最初ディラック自身がやったように、特殊相対論における対称性の条件を満たすべく物質と放射の問題へ拡張したとき、「場の量子論」と呼ばれたその結果の理論では、すべて無限大の解しか得られなかったのよ。

けどね、マニー、これが現実の世界における私たちの実験事実を説明するはずの自然法則の結論だから困るのよ。

得られた自然法則から意味のある解が出てこないのなら、それは真の法則とはいえないわけだから、失敗作ということになるわ。

これは単純明快な結論だと思うけど。

【モー】

でも、ジャッキー、実験事実ときわめてよく合致する成果についてはどう考えるのかな？

とくに、量子電磁気学の場合はそうだね。

これは場の量子論が優れた科学理論だということを示すことにはならないの？

【ジャッキー】

モー、先週にやった議論でも強調したけど、科学哲学で主張されている次のことはもう一度言っておきたいの。

つまり、実験的検証は、科学的真理として認められるための必要条件ではあるが、十分条件ではないということよ。

提唱された理論は、論理的整合性をもち、実験事実をきちんと再現し、同じ物理的条件下では常に同じ結果が得られるようになっていなければいけないのよ。

【マニー】

科学理論が論理的整合性をもっていなければならないという君の考えには賛成できないね、ジャッキー。

実験事実をきちんと説明する限り、科学理論として十分な資格があると思うよ。

【モー】

たぶん、君たち二人は「科学」という言葉に対して別々の定義を考えているのだと思うよ。

言うまでもないことだけど、ある概念について議論する場合、その概念規定を明確にしておかないと議論は成立しないよ。

【マニー】

そのとおりだ、モー。

ジャッキーと僕とでは、「科学」という言葉の定義が違っているようだね。

この違いは、科学の研究が自然認識をどこまで深めることができるか、という点に関係しているように、僕には思えるな。

科学は、自然現象をできるだけ簡潔に記述するのが役目であってそれがすべてである、というのが僕の主張だよ。

ところが、ジャッキーの考えでは、このような自然界のデータの簡潔な表現は、このデータの背後にあるものを理解するための単なる 1 ステップにすぎないというわけだ。僕は、この「背後にあるものを理解する」という考え方の意義を認めることができないんだ。そういう考え方は宗教とまったく同じで、本質的には科学じゃないと思うんだ。

【モー】

この違いは、経験論者や実証主義者の考えと昔の科学観との違いと同じものじゃないだろうか。

【ジャッキー】

そうよ、モー。

これが、科学に対する私たちの哲学的立場の一番大きな相違点なのよ。

それはまた 20 世紀物理学に関するボーアとアインシュタインの歴史的に重要な最大の論点でもあるの。

この論争は、科学界でいまだに誰もが認めうるようなかたちでは解決されていない問題なのよ。

【モー】

僕は、物理学のほとんどの専門家が、ボーアやコペンハーゲン学派の考え方と同じマニエの考え方に賛成だと思う。

はっきり言って、ジャッキー、君のように实在論者の立場をとるメリットは何なの？

つまり、物理学者はみんな理論や実験の分野でうまく研究をやって、毎日新しい結果を得て、その最新の結果について国際会議を開いている。

研究者の予想と矛盾する結果は出ていない。

どうして君は、この大多数の研究者の意向に従って一緒にやろうとしないのだろう。

【ジャッキー】

言っておくけど、モー、私たちは物理の実験で、自分たちが見たいものしか見ないということがときどきあるのよ。

实在論の立場をとることのメリットは次のような点よ。

この立場に立つと、実験事実と直接基づかなくても新しいアイデアを得ることが可能で、そのおかげで実験室で発見できるような新しい実験事実の存在を教えられることもあるわ。そのことを示すいい例が、18 世紀と 19 世紀の物理学における電磁気学の経験よ。

【マニー】

18 世紀と 19 世紀に発見された電磁現象の基本的な関係は、純粋に実験的な発見だったんだよ、ジャッキー。

実験が、クーロン、アンペール、エールステッド、ファラデー、フランクリン、ヘンリーという人たちによって行われた点を思い起こしてほしいね。

そして、その結果が、マクスウェルの発見した方程式として集約されたんだよ。

このように、電磁気の理論は、物質を表現する本質的な場という概念を最重要視するファラデーの神秘主義的な考えとは関係なく、場の方程式というかたちできわめて効率的に成分化されたんだよ。

この事情は、それより二世紀前のケプラーの神秘主義の場合と似ているね。

ケプラーが神秘主義を信じていたからといって、天文学における彼の実験的発見の価値が下がるわけではない。

これは、ファラデーが信じた神秘主義のせいで、19 世紀の電気や磁気や光学における彼の実験的発見の重要性の値打ちが下がるわけではないのと同じだよ。

このように、ケプラーやファラデーやアインシュタインのような偉大な科学者の神秘主義

的な考えの部分は、実験事実に関してなされた彼らの科学上の貢献のことを考えれば、無視してもいいものなんだよ。

【ジャッキー】

マニー、もうこれ以上あなたに反論してもしょうがないわ。

いまの話に出てきた「神秘主義的」という言葉は、場違いのように響くかもしれないけど、物理の議論にとっては形而上学的な基盤となるものなの。

理論というものはそもそも料理のレシピのようなものではなく、哲学的精神に裏打ちされたものでなければならぬからよ。

理論の「形而上学的」側面は「物理学的」側面と同様に、私たちが科学者として理解しようとしていることに対して本質的な重要性をもつものなのよ。

あなたの主張によると、理論はすでに発見された実験事実を要領よく表現したものにすぎないということになるけど、その理屈でいくと、マクスウェル方程式に出てくる「変位電流」の場合はどうなるのかしら？

マクスウェルがこの項を方程式に加えたときには、それに対する実験的根拠は何もなかったのよ。

彼が変位電流を付け加えた理由は、そのために方程式の対称性がよりよくなるというものだったわ。

ここで重要なことは、この項を付け加えることにより、当時知られていたすべての光学現象を電磁現象として説明するのはもちろんのこと、電磁放射の伝搬を予言することができただけでなく、まだ発見されていない電波の存在をも予言できたことなの。

そして、ヘルツがこの電波という現象の検証にとりかかり、実際に発見することになったのよ。

それから約 20 年たって、マクスウェル方程式が「共変的」であるということにアインシュタインが気づいたの。

つまり、マクスウェル方程式は準拠する基準系に左右されない構造になっているということなの。

この発見によって、アインシュタインは相対論の基礎としての相対性原理の導入を果たすことができたのよ。

ここで私が言いたいのは、マクスウェルが（実験的発見に先立って）理論的観点から変位電流を方程式に加えなかったら、この方程式の共変性は出てこなかったということなのよ。したがって、ヘルツによる電波の発見やその他の実験事実の発見は言うに及ばず、アインシュタインによる特殊相対論の発見もずっと遅れることになったでしょうね。

【モー】

ジャッキー、電磁法則のなかに相対論のヒントがあるということは、すでにエールステッドやファラデーの実験結果に表れていたと思うよ。

エールステッドは磁力が電流によりつくられるということを発見し、ファラデーは、この現象は運動する電場（つまり電流）にほかならないことを示すものだという理屈を編み出したんだ。

ファラデーはさらに論理的に話を進めて、運動は完全に主観的なものだから、電場も運動する磁場にほかならない、磁場の場合とまったく同じように言えるはずだと結論した。

つまり、A が B に対して動くとする、同様に B も A に対して動くことを主張することができるということなんだ。

どちらの言い方をしても、物理法則の中味は完全に変化がない。

この問題については、以前に双子のパラドクス問題のときに議論したよね。

運動が完全に主観的な性質のものであるということは、ガリレオが天体の研究をしていたときに気づいたことだよ。

【ジャッキー】

運動と電気・磁気との関係はファラデーが最初に研究したもので、その結果、電磁誘導の法則が発見されたのよね。

よく知られているように、この実験事実に基づいて発電機が発明され、この技術は 19 世紀の産業革命にきわめて大きな貢献をすることになったわ。

でも、ファラデーの最大の目的は、客観的真理の発見にあったのよ。

この真理の発見が技術の分野の進歩をもたらすことになったけれど、それは科学における彼の基礎研究の発見の副産物にすぎないのよ。

ファラデーによる電気と磁気の基礎研究から、少し趣の変わった成果が生まれたわ。

それが、統一場の理論という概念の誕生だったの。

ファラデーが発見したのは、次のようなことよ。

磁気が、運動している電場の姿であるならば、運動は電気に関する現象の記述で主観的役目を果たすにすぎないのだから、電気は運動する磁場にほかならないということになり、したがって絶対的な電場とか絶対的な磁場というものはないことになる。

この結果から論理的に考えられる可能性は、電場や磁場は、それぞれが電磁場という統一された単一の場が観測の条件の違いに応じて電場というかたちで現れたり、磁場というかたちで現れたりするのだらうということなの。

これが統一場の理論の考えの始まりで、約 100 年後にアインシュタインによって再び取り上げられたアプローチなのよ。

この理論の可能性は、完成された彼の相対論の論理的構造にも見て取れるわ。

【マニー】

あのね、ジャッキー、現代の素粒子論も統一場の理論の考え方を追い求めているんだよ。いまの素粒子論は、コペンハーゲン学派やその実証主義的哲学の考えに基づくものだけれど、統一場の理論の研究が研究がアインシュタインの望む目的に沿う方向に進んでいるのは誰もが認めるところだよ。

ところがこの研究は、アインシュタインの实在論的アプローチとはまったく違うスタイルで進められているんだ。

つまりだね、ジャッキー、現在目指している統一場の理論の考えは、必ずしも实在論的神秘主義に基づいているわけではないということなんだ。

そして物理学者は、この統一場という考えに沿って、われわれが目にするものの背後にあるとされる实在というような余分なことを考えずに物理の研究を進めているんだ。

【ジャッキー】

マニー、あなたはアインシュタインが考えていた統一場の理論の意味と、今日の素粒子物理学の研究で意図されている意味とを混同していると思うわ。

この二種類の統一場の理論は同じ名前と呼ばれているけれど、その内容はまったく違うのよ。

モー、あなたの話で、ある考え方の正否を議論する前にまずその考え方の定義をはっきりさせておくべきだという点は、そのとおりだと思うわ。

ファラデーとアインシュタインにとっての統一場の考えと、今日の素粒子物理学者の考えとは完全に別物なのよ。

いずれの側に立つ人も、同じ名で呼ばれることになったこの理論の中味について、相手側の正当性を認めようとはしないのよ。

【モー】

でもね、ジャッキー、最近は科学の専門誌はもちろんのこと、マスコミでも、素粒子物理学において大統一理論（GUT）のような理論的アイデアが、統一場の理論を構築しようとしたアインシュタインの長年の夢を叶えてくれるのではないかと報じられているよ。

【ジャッキー】

それは真実とは程遠い話だわ、モー。

統一場の理論に対する素粒子論によるアプローチは場の量子論の考えに基づくもので、これは場の理論などとは呼べないものよ。

前にも言ったように、場の量子論は、量子力学における確率論に基づく不連続な実体としての粒子の散乱理論なのよ。

素粒子論で考えられている統一場という概念は、相対性原理に基づいて電気と磁気の統一が成し遂げられたように、ある基本原理から演繹的に統一を導き出すのではなく、量子電磁力学の枠組みに新たなパラメータや自由度を帰納的に持ち込むことを指しているわ。

さらに、アインシュタインやファラデーの統一場の理論は、連続的で非特異的な場の概念に基づいているわよね。

この理論には、特異な非連続的存在の粒子は原理的に登場せず、物質が観測される条件に応じてさまざまな力となって現れる単一の物質場しかないの。

これは、量子論で考えられている粒子的描像に基づく統一とは完全に違う概念よ。

【モー】

ジャッキー、ファラデーが統一場の理論に対して抱いていた概念と、今日の素粒子物理学における概念との根本的違いに関する君の考え方がわかったような気がするよ。

それを僕自身の言葉で言うと、こうなるんだ。

帯電した絶縁体の小球に対して観測者が静止している場合、この観測者は電荷をもった試験体では電場しか検出できないだろう。

しかし、この小球に対して運動している場合は、この観測者のいる場所に磁場が発生していることを、小球に触れることなしに感じることができるはずだ。

たとえば、運動している観測者の携帯用コンパスの針は、静止している場合とは別の方向を向く。

したがって、電場と磁場の両方が常に存在しているということになる。

しかし、このように観測の仕方を変えてみるまでは、両者の共存に気づかないでいるんだ。

これはちょうど、鍵穴から大きな部屋のなかをのぞく場合と同じだよ。

この場合、部屋のなかにさまざまなものがあったとしても、見方を変えない限り、見えるのは鍵穴の真正面の壁だけだ。

しかし、鍵穴から潜望鏡を突っ込んで見れば、前よりもたくさんのもが目に入ることになる。

【ジャッキー】

アインシュタインは言うに及ばず、ファラデーの考えは、自然界に存在するすべての力は潜在的に存在する一個の単一の力場が私たちを変えて現れた結果であるとするものよ。

つまり、観測しようとする現象に対する実験条件に応じてさまざまなタイプの力となって現れてくるの。

でも、このようにして顕在化した力以外のものが消失したわけではなく、依然として潜在的に存在したままなのよ。

ただ、そのときの条件下では、表に顔を出さないだけなの。

ファラデーの著作を読むと、彼は重力が電磁気力との統一体であると考えていたのがわかるわ。

実際に、彼はそのことを実験で示そうとしていたの。

もちろん、よく知られているように、彼はこの試みに失敗したわけだけど、それは彼が行おうとしていた実験条件下では、電磁気力と重力の強さが桁違いに異なっていたからなのよ。

ファラデーはそれにもかかわらず、このような統一が可能であると信じていたんだわ。

もし、彼が今日ここにいたとしたら、次のように言ったと思うの。

今世紀になって発見された原子核の世界で作用する短距離力も、ファラデーが求め、アインシュタインが探し続けた統一場に含まれている、と。

もちろん、アインシュタインのほうはこの短距離力のことは知っていたわけだから、そうは考えなかったでしょうけどね。

アインシュタインは、もし電磁気力と重力とを統一しえたなら、量子力学の理論はもちろんのこと、一般相対論に述べられている物質理論に対する線形近似というかたちで、さまざまな現象を説明できると感じていたのよ。

しかし残念ながら、アインシュタインは研究に生涯をかけたにもかかわらず、電磁気力と重力とを統一することはできなかったわ。

アインシュタインの偉大な業績の一つは、これまでの重力理論を彼の一般相対論という連続的場の理論によって新しく組み直したことなのよ。

この一般相対論は、ニュートンの万有引力の理論と交替することに成功したわ。

つまり、ニュートンの考えていた原子論や遠隔作用を、連続的場という概念やこの連続的分布をしている物質場の構成要素同士が有限なスピードで力を及ぼし合うという考えと入れ替えたの。

でも、アインシュタインの考えによれば、このような成功も、物質理論としての一般相対論の立場からすると、重力を他の基本的力と統一するというプログラムにとっての第一歩にすぎないものだった。

それで、マニーとモーに言いたいんだけど、ファラデーとアインシュタインの頭のなかにあった統一場の理論という考えは、自然法則としてもっとも一般的な場の方程式の解として出てくる一個の総合的な力場が存在し、この力場には物理実験ではいまだに発見されていないものも含めてすべてのタイプの力が存在するというものなの。

したがって、もし本当にこの総合的場が求められたならば、これまで夢想だにしなかったような新しいタイプの力が予言されることになるわ。

たとえば、これまでの宇宙論では考えもしなかったような大きな広がりをもつ空間や、素粒子物理学で経験したことのない小さい領域で作用する力が出てくるかもしれない。

【モー】

ところがジャッキー、いまの素粒子物理学で考えられている統一場という概念はそれとは違うんだよ。

そうだね、マニー？

【マニー】

そのとおりだ。

各粒子に対して、別々の場を想定するのが現在の統一場の理論の考え方なんだよ。

つまり、「クォーク」や「レプトン」（電子、ミュー中間子、ニュートリーノとこれらの反粒子）や「電弱力」を生む源と考えられている W ボソンや Z ボソンの場などが登場するわけだよ。

それでどうするかというと、これらの粒子に付随するすべての物質場を、いわばスープのように一個の総合的な場にまとめてしまおうというわけなんだ。

そして最後には、「グラビトン」という粒子を伴う重力をもこれに組み込みたい。

この「グラビトン」は、現在マクロな領域での重力を正しく記述しているアインシュタイン場の量子と考えられるものなんだよ。

しかし、そのように量子論の観点から重力をも統一してしまおうという試みは現在のところ成功していない。

これをやろうというのが、いわゆる GUT（大統一理論）のねらいなんだ。

ジャッキー、君はこの種の統一はアインシュタインやファラデーが考えていた統一場の理論より劣るものだと考えているように感じるんだけど、どうだい？

もしそうだとすると、考えられる二種類の統一場の理論が実験データと同じようによく合致する場合、その優劣をどうやって決めるんだろうか。

【ジャッキー】

私は決して現時点において両者の優劣を問題にしているわけではないわ。
私が言っているのは、アインシュタインの考えていた統一場の理論は、現在の素粒子論における統一理論とは完全に違うものだということなのよ。
この二つの統一理論は、それぞれ別の論理に基づくものであって、両者の科学というものに対する姿勢も異なっているわ（一方は帰納的方法によって科学的真理に迫り、他方は演繹的論理による）。
さらに、用いられている数学的手法も大きく違っているのよ。
したがって原理的に、同じ物理的状況に対しても、この手法の違いのせいで異なる物理的予言をすることになるの。
最終的に、実験結果に合うか否かで二つのアプローチに優劣がつくことになるわ。
