

O.H.デレヴェンスキー「量子論のトリック」

日本語版について

この訳文は、論文"Деревенский О.Х., Фокусы-покусы квантовой теории" のロシア語原文からの全訳である。原文は <http://newfiz.info/qua-opus.htm> に掲載されている。

著者： アンドレイ・アリベルトヴィッチ・グリシャエフ（Андрей Альбертович Гришаев, Andrei Albertovich Grishaev）（本名）。ロシアの無所属の物理学者で、自身の個人サイト "Наброски для новой физики"（新たな物理学のためのスケッチ）（<http://newfiz.info/>）において注目すべき多数の論文や本を発表している。

O.H.デレヴェンスキー（O.X. Деревенский, O.H. Derevenskii）は筆名である。著者は、本論文のように非常にくだけた、しかもかなり皮肉っぽい調子で書かれた一般読者向けの論文ではこの筆名を使っている。

この論文については、ロシアの物理学者 S.N.アルテハがその著書『物理学の根拠（批判的な眼差し）：量子力学』（2015）（邦訳はサイト「物理の旅の道すがら」に掲載）において、「すべての物理学者がぜひとも読むべき論文である」（同書第 14 章）と高く評価し、要点のみを手短にまとめて紹介している。

訳者：吉田 正友（サイト：「物理の旅の道すがら」 <http://naturalscience.world.coocan.jp/>）

日本語版公開：2016 年 3 月

* 訳文中の角括弧 [] 内は訳注である。

O.H.デレヴェンスキー

量子論のトリック

「実際、20 世紀における科学技術の進歩は、量子効果とは何かを理解され始めたところにおいてのみ生じた。」
(論集『大科学者たちのジョーク』より)

量子論は数多くの物理学者さえをも戦慄させている。物理学者たちは、物理学自身が育ててしまったありとあらゆる基礎破壊者たちが、ありとあらゆる分野——古典力学の分野、電気力学の分野、とりわけ相対性理論の分野——に賢しげにくちばしを突っ込んでいることを、ああ、何と誇りに思っていることか！ しかし、量子論の暗殺を企てている者は誰もいない！ 「もし量子論がなかったら、人類は今も洞窟で暮らし、石斧を持って駆けずり回っていたらうってことが、ああいう馬鹿者どもにもはっきり分かっているのさ」と、科学アカデミー会員たちは愉快そうに語る。彼らの話によれば、量子論がなかったらレーザーはなかったはずで、レーザーがなかったら、若者諸君、君たちには陶醉するようなディスクはなかったのだ！ 量子論がなかったら金属や半導体の中で電子がどう動いているかについての理解は生まれなかったはずで、その理解がなかったら、若者諸君、君たちにはコンピューターも携帯電話もなかったのだ！

この話が全部ジョークだということを、若者はどこから知ることができるのだろう？ レーザー、コンピューター、携帯電話は、その出現について量子論の恩恵を少しもこうむってはいないのだ。実際には、これらの機器、そしてその他一連の注目すべき機器類は、もっぱら実験上・生産技術上のブレイクスルーのみを土台として創出された。そして量子論と呼ばれているもの——それは、単なる洗練された数学的手続きのパッケージであって、ミクロ世界の現実から得られた経験的事実を、それらの数学的手続きを用いて後付けで記述したものにすぎない。なぜ後付けで？ なにしろ、それらの経験的事実というのが、まったく前代未聞の代物だったからだ！

古典物理学というものは、たとえ光学機器を用いた場合にせよ、目で観測できる対象や過程を相手にしていた。そのような過程における物理諸量は連続的に、すなわちある領域から出発してすべての値を逐次的に取りながら変化する。例えば、石ころが点 A から点 B まで放物線に沿って飛んだとき、目には、石ころが放物線のその部分のすべての点を逐次通過したように見える。そして理論的公式は、「私の目に見えるもの、それが私の歌うもの」の原理に従って構築されていた。まさにその結果、古典物理学の公式では物理諸量の変化の連続性が死守されていた。微分計算や積分計算の発明でさえ、ここでは何事も変えはしなかった——それらの計算では、ある物理量の変化する区間を一様な微小素片に分割し、ある区間内でそれらの微小素片の大きさをゼロに収束させ、その結果としてまったく同じ連続性を得るというアイディアが利用されているにもかかわらず。ところが、連続性向けに醸造されたアプローチは、ミクロ世界の諸現象を記述するのにまったく適していないことが判明した。ミクロ世界では、どこを突っついてみても、いたるところで離散性が支配しているのだ。物理諸量は任意の値ではなく、離散的な組からなる、分割された値を取っ

ている。諸状態は互いに、滑らかな流れのようにではなく、飛び飛びに変化している。そしてここで生じた主要問題は、離散性を輝かしく記述しているはずの数学的道具立ての構築とはまったく無関係の問題であった。偉大なる理論家たちが、その知的エネルギーの10%を輝かしい記述に費やした後、その輝かしさの陰に隠れていた物理的意味を探し出すために残りの90%を費やさなければならないという状況に、どうしてもなったのだ。その探求は、遂には声がしわがれ、ヒステリーの発作や高熱状態が生じるまで行なわれた。彼らの間では、それは「思想劇 [drama of ideas]」と呼ばれていた。古典物理学の場合には、どんな悪夢の中でもそんな恐ろしい目に会わずにすんだ——物理的意味に関して、問題は存在しなかったからだ……。

親愛なる読者よ、テレビの画像が連続的でないことを発見したとき、どんな疑問があなたに生じたか、覚えておいでだろうか？ サッカー選手がフィールドを走り回り、ボールをあっちこっち蹴っ飛ばしている——それはみんな、個別の点からなっているのだ！ おそらく、あなたに生じた疑問は「あれ、これはどうしてこうなっているんだろう？」といった疑問だったのではなかろうか。これはきわめて正しい疑問である。ただし、この疑問における論理的アクセントは、「どうして」という言葉の上に置かれなければならない。この疑問において、「こうなっている」ということは、わざわざ説明しなくても暗黙のうちに理解されているからだ。さて、物理学者たちもマイクロ世界における離散性を発見したとき、それに類する状況に陥った。きっと、彼らすべてが、この離散性は自己充足的なものではあり得ないということを、ある者は背中で、ある者は皮膚で、ある者はお尻で（要するに直観で）感じ取ったに違いない。基本レベルにおいて「デジタル」な世界が、どうして自己充足的であり得ようか？ 実験家たちは、物理的現実から上位物理的現実^{〔訳注〕}への質的飛躍が生じる境界へと、ついにたどり着いた。物理的現実がじたばたすることができるのは、上位物理的現実のおかげである。所与の物理的性質と様々な物理的相互作用を持った物質粒子が存在できるのは、上位物理的現実のおかげである。……でも、ノー！ 理論家たちがそのように判断することを、状況が許さなかった——「それはいけない、非科学的だ！」。あるいは、彼らの言い分によれば、「物理的現実以外に、別の現実なんて存在しない！」。と言うわけで、彼らは非自己充足の本質——物理的現実——の第一原因をそれ自体のうちに探し出す仕事に取り掛かった。しかし、その第一原因は物理的現実のうちには存在しない以上、彼らは、——少々穏やかな表現の仕方をする——何かを思いつかなければならなくなった。首尾よくいったそのような思いつきのそれぞれから、マイクロ世界で生じていることについての無理解が、ますます増殖に増殖を重ねていった。でもね、理論家というのは、実に愉快的連中なんだよ！ 彼らは、無理解の深化を理解の深化と見事に偽ったのだ。もちろん、そのために彼らは頬っぺたをばんばんに膨らませなければならなかったけどね！

ところで、こう言っちゃなんだけど、すべてはあるつまらないことから始まったのであった。19世紀末、原子は振動子として、光はエーテル中の波として理解されていた。古典

〔訳注〕 「上位物理的現実」（仮訳）は著者独自の物理的世界観を表す造語で、おおよそ「物理的現実の上位に位置する現実」を意味する。この一節の記述、また本論文の後半部分に出てくる「特殊プログラム相互作用」等々に関する著者独自の物理的世界観に関する記述は本論文の本筋（現行量子論に対する批判）の理解にとって差し当たり重要ではないので、細部に拘泥せずに先を読み進めて一向に差し支えない。

物理学のこれらの理解は強力な発見誘導力を持っていた。つまり、原子内では何が振動しているのかとか、エーテルはどんな構造になっているのかといった細かい問題にこだわることなく、放射・吸収、分散……といった山ほどの事柄をまあまあちゃんと説明することができたのである。ところが、低周波数と高周波数でゼロに低下する非平衡（熱）スペクトルが、どこか真ん中辺に最大値を持っていて、その最大値の位置は放射体の温度に依存していることが判明したのである。「ああ、ドクター、信じてくれ、俺にはこんなドラマが起きてるんだ！ 一方にはレイリー—ジーンズの公式があって、こいつは低周波数でしか働かなくて、高周波数では無限大の中にもぐり込んでしまう。他方にはウィーンの公式があって、こいつも片っ方でしかちゃんと働いてくれない。両方の尻尾も背中も、全部いっぺんに与えてくれるような単一の公式が欲しくて欲しくてたまらないんだ。頼む、どうか助けてくれ！」というわけで、親切なドクタープランクは救いの手を差し伸べ、必要とされる公式を処方してやった。でも、もう手遅れだった。レイリー—ジーンズの公式やウィーンの公式といった類の公式は、「半経験的」公式と呼ばれ始めたのだ。この冗談めかした形容詞には、理論家たちが、実験家たちに劣らぬほど大きな貢献をしたことに対する微妙なあてこずりが含まれている。しかしプランクは難局をくぐり抜け、彼の公式はどうかこうにか、その形容詞の付かない単なる公式のまま残ることができた。それに加えて、成功に気をよくした彼は、いくつかのつじつま合わせ用の係数を大急ぎででっち上げた。それらの係数のうちの1つに $6.63 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$ という値を書き足すと、俗に言う「実験との輝かしい一致」が達成されることが判明した。

ところで、「輝かしい一致」というのは美辞麗句として言われているだけであって、実際には、そこでは、まともな教育を受けていない量子狂信者たちをショックのあまり卒中でぼっくりいかせる原因となるような、ある不吉なことが生じているのである。それはこういうことだ。そんな最悪の狂信者でも、同一の電磁スペクトルに関する表式は、周波数が引数となるように、または波長が引数となるようにと、2通りに書くことができることぐらいは知っている。さて、プランクはこの両方のバリエーションをごくくっ飲み込んだのだ。一見したところ、それらは美味しそうに見える……。しかし、それらの最大値の位置が一致するかどうか、ちょっと概算してみたまえ。事は簡単。引数についての導関数をあっちこっちで取り、ゼロに等しいとする。次にやることは、その結果を、何かある物理量、例えば kT （ここで k はボルツマン定数、 T は絶対温度）を単位としてうまく表せるエネルギーに当てはめることだけだ。すると、——同一のスペクトルにおいて！——波長についてのプランクの表式が与える最大値は $4.97kT$ のエネルギーに対応するのだが、他方、周波数についてのプランクの表式が与える最大値は $2.82kT$ に対応するのだ。これは、エレクトロニクスによって検証されたことなのだ！

少しよく考えてみると、事態がそのようなものであるとすれば、プランクの公式の両方のバリエーションは、実験との間で輝かしい一致を得ることができなかったという結論に至ることがあり得る。そして確かに、実験において輝いていたのは波長バリエーションのみであった。どうしてそうなったのか？ 実験では、熱せられた物体からの放射を、波長について較正されたモノクロメーターを通過させて受光器に送った。モノクロメーターの波長を合わせ直しながら、スペクトル全体を移動していった。受光器からの信号の最大値がスペクトルの最大位置を与え、それは $5kT$ のエネルギーに対応していた。他方、プランク

の公式の周波数バリエーションを実験で検証した者は誰もいなかった。その理由は沢山あった——特に、所要の帯域内で機能するすべてのスペクトル測定装置は周波数方式ではなく、波長方式であるということを考慮に入れた場合。

本来なら、物理学者たちはここで、「周波数バリエーションはまったく不確実な予測しか与えないから、不一致が現れてしまった」と言って懺悔すればよかったのだ。ところがどっこい、そうはしなかった！ 実を言うと、プランクの公式の周波数バリエーションを積分するのは、波長バリエーションを積分するのより比較にならないほど楽しくてしょうがないのだ。なので、理論家たちは他ならぬ周波数バリエーションにしがみついたというわけ。彼らは周波数バリエーションを保存しただけでなく、その根元にさらに土寄せをしてやった。前代未聞の話だ。理論全体をある 1 つの公式を土台として構築したのに、その公式を実験と輝かしく一致させる際には別の理論、つまり替え玉理論にこっそり差し替えたのだ！ みんなをがっかりさせないために、彼らはこのことを一般大衆に語ろうとはしなかった。一般大衆とは言えば、そんな芸当をうまくやってのけられるのはパテント師だけで、学者先生たちにはけっしてできないと考えていた。そして学者先生たち自身は、多分、「時は飛ぶように過ぎゆく」こと、つまり、キャンディが何を原料にして作られたかは、時間がたてば忘れられてしまうことを当てにしていたのだろう。そしてそののち、理論物理学の優に半分はそのキャンディで育て上げられたのであった……。

プランクは困った状況に陥ったが、ええい、かまったこっちゃない。とは言え、プランクは彼の公式に隠れている物理的意味を解明しようと試み、なし得るすべてのことを行なった。——「エネルギー掛ける秒」という次元を持って這い出てきた定数とは、いったい何か？ この定数と周波数の積はエネルギーを与えた。しかし、それは何のエネルギーか？ ある具体的な周波数のとき、このエネルギーも具体的なエネルギー、すなわち「1 ジュール分の 1」掛ける「しかじかの数」となる。ところが、平衡スペクトルは連続的であり、したがってそこにおける周波数の個数は無限大である。すべての周波数にこの定数を掛け、全部を合計すると、無限大のエネルギーが得られてしまう。ううん、にっちもさっちもいなくなかった、せめて、オオカミみたいに大声あげて泣きたいくらいだ。でも、オオカミさん、ちょっと待って。少々ずるい手を使って連続スペクトルを微小区間に分割すれば、そのそれぞれの微小区間上で周波数を定数とみなすことができるんだ。そうすればすべてが丸く収まる。つまり、必要とされる個数の具体的なエネルギー単位量 [portion of energy] (単位量はみな同一である！) を各微小区間に与えれば、必要とされるスペクトルが得られるのだ！

その先はすべてがまったく簡単にいくように見えるのでは？ とんでもない。次の点に気をつけていただきたい。放射・吸収スペクトル内におけるエネルギー分布は、エネルギー単位量の組——量子の組——によってうまくモデル化されている。これは物理的には何を意味しているのか？ これについては様々な意見があった。プランクは当初、量子は原子が電磁エネルギーの海と相互作用するときのみ発現する、すなわち、単位量ずつ生じるのは原子とその海の間のエネルギー交換のみであると考えていた。アインシュタインはその先まで進み、電磁エネルギーは単位量ずつ放射・吸収されるだけでなく、伝播もする、すなわち、「エネルギーの海」自体が個別的な量子から構成されていると考えた。本当の困難が始まったのは、まさにここからだった。なぜなら、ここでついに、物理的意味なるもの

が卵の殻をつつき破って姿を現したからである。量子論における物理的意味との関係は、きわめて独特なものだ。物理的意味にとって良きものは量子論にとって死であり、量子論にとって良きものは物理的意味にとって死なのである。

さて、次の問題はご自分でお考えいただきたい。物理学者たちはこの上なく愚かな問題に苦しむあまり、現世のすべてを忘れ、すっかり気が狂ってしまった。もし光量子のエネルギーが周波数にのみ依存しているのだとしたら、例えば、量子のエネルギーがプランク定数とその周波数の積とまったく正確に等しくなるためには、その周波数を持つ量子の中で、何かあるものが何回振動しなければならないのだろうか？ 何たるたわ言だ！ そしてなにしろ、このたわ言がさらにそのエネルギー単位量を原子に伝え、その結果、原子の中で何かあるものが振動したというのだ。その振動のエネルギーだけで、既に周波数と振幅の2つのパラメーターに依存していた。こう訊いてみたくなる。周波数にのみ依存しているじたばたエネルギー^{〔訳注〕}は、いったいどんな奇跡的な仕方、周波数と振幅に依存するじたばたエネルギーに転化するのか？ 吸収した光量子を消費し尽すためには、原子はいかなる振幅で、何回じたばたしなければならないのか？……

もちろん、今時の科学アカデミー会員たちはそんな問題で頭を悩ませたりはしない。彼らはその理由をこう説明する。「我々は馬鹿ではないぞ。古いアプローチが機能を停止したからこそ、量子論が現れたのだ！」と。いやはや。古いアプローチが機能を停止して、新たなアプローチが機能し始めただって？ もしかしたら、実験との一致に関する問題におけるペテンが、「新たなアプローチ」だとでも？ それじゃあ、あなたがたにお祝いの言葉を述べさせてもらおう。「量子論の誕生はこの上なく順調に進んだ！ 新生児は平衡スペクトルを勇ましくやつつけた後、その細めた眼差しを原子に関する学説に向けた。そしてニヤリと笑い、思わせぶりに揉み手をした……」と。

そもそも、実際のところ、当時における原子についての理解はあまりにもプリミティブであり、そのため、正電荷と負電荷の混合物を考え出さなければならなかった。例えばトムソンの原子モデルが人気を博していたが、このモデルでは、原子のほぼすべての質量と正電荷はある種の球体内に分布していて、負電荷はその内部に「レーズン入りプディングの中のレーズン」のように点在していると考えられていた。しかし、ごく薄い金属箔にアルファ粒子を打ち込むと、その一部が後方に跳ね返ってくるのをラザフォードの助手が検出した。そのようなことが起こり得るのは、原子のほぼすべての質量が原子内部のごく小さい部分に集中している場合である。ここから、原子のほぼすべての質量と正電荷がそこに存在している原子核という着想、そしてついでに、電子がクーロン引力によって原子核に落ち込まないためには、電子は遠心力によって保持されつつ、原子核の周りを回っていなければならないという着想がラザフォードに生まれた。

現在と同様、当時、遠心力は素粒子には作用できないことを理解している者は少なかった。遠心力は素粒子の回転の周速度の動径方向の勾配から生じるものであり、複数の素粒子からなる構造形成物にしか作用できない。原子核の周りにおける電子の回転は、原子核へのその落下を少しも妨げることができないはずである。しかも、電子軌道が擾乱を受けた後、いかなる秘密の力が軌道の復元を実現させるのか、不可解である。比較のため、地

〔訳注〕 「じたばたエネルギー」は正体不明の「振動エネルギー」を皮肉った言い換え。

球近傍の軌道上の人工衛星を例にとってみよう。小さな擾乱——例えば短時間のエンジン噴射——の結果、衛星の自由飛行は、今度は新たな軌道に沿って続けられることになる。ここにはいかなる復元力も存在しない。他方、原子内においては、復元力が必ず存在しているはずである。なぜなら、原子の構造は安定性の余裕と自己復元メカニズムを持っているからである。原子の大きさの再現性が、また原子の固有放射・吸収スペクトルがこのことを物語っている。そしてなにしろ、何かが生じた後に自己復元するべき、その何かが存在しているからである。さて、対向方向に放出され、秒速数千メートルの速度で飛行している1対の衛星が衝突した場合、それらの衛星の残骸の中で、まだ使用に適している部分は少ないだろう。ところで理論的計算によれば、原子内における電子の軌道速度はおよそ毎秒2000キロメートルに達する。2つの原子がごく軽く接触し、それらの電子たちがおでこを鉢合わせしたときに何が起ころか、ざっと見当をつけてみていただきたい。まあ、電子たちのおでこは十分に鉄筋コンクリートで、したがって彼らから破片は飛び出さないと仮定しよう。ただし、電子の軌道運動は確かに多少とも乱れることになる、だよね？ さて次に、通常の条件下の気体中では、各原子は毎秒およそ10億回の衝突を受けることを思い出していただきたい。でも大丈夫、原子は元のまま残る。原子というのは実にしぶとい奴だね！ ここで、アカデミー会員たちはこう言って我々をたしなめようとする。いわく、電子の旋回は非常に急速に進行するので、気体中の原子が衝突時に互いに反跳し合う原因となる電子軌道の非透過性について語ることは意味があるが、相異なる原子の電子たちが“おでこを鉢合わせする”などということはけっしてあり得ない、と。ちょっとお尋ねしたい、失礼ながら、原子が化学結合するとき、その電子軌道の非透過性はいったいどこに消えてしまうのか？ それともあなたがたは、化学結合の際に原子がどれほど深く浸透し合うか、度忘れしてしまったのか？ 例えば、物理学便覧の「分子の大きさ」という章をご覧あれ。そこには、分子内の原子の中心間の距離は、原子自体の半径より小さいことが稀ではないって書いてあるよ！ 要するに、自分がそうあって欲しいときには透過性が現れ、そうあって欲しくないときには非透過性が現れる、つまり、完全調和というわけだ！ そして、両者の違いがどこにあるかは、傍目にはまったく見分けがつかない！ そうなのだ……当時における原子についてのこのような理解は、見直しと修正を窮境からの解放としてひたすら待ち望むしかなかった……。

しかし解放の日は訪れず、窮境は以前よりもさらに深まった。原子の惑星モデルは単純素朴な田舎娘たちにしか役立たないということを、見直しと修正の理由として挙げることはできなかった。誰かが腹を立てるようなことはけっして行なってはならなかったからだ。それゆえ、次のような方策が取られた。「惑星モデルさん、ああ、彼女はなんて素敵なんだ！ 彼女には欠点があった1つしかない！ それは、軌道に沿って運動している電子からの放射に関係した欠点だ！ この欠点を取り除けば、万事オーケーさ！」 これこそまさに単純素朴な田舎娘たちが言っていたことだ。古典的理解によれば、原子内における電子の振動は、原子が励起状態にあることを意味していた。すなわち、その振動は、電磁エネルギーを吸収すると「大きく揺れ動き始め」、そのまま放っておくと減衰するが、ただしその際、蓄積された電磁エネルギーが放射される。さて、ちょっと考えてみたまえ。惑星モデルにおける電子の軌道運動とは、いったい何なのだろうか？ それはほかでもない、電子の2次元振動なのだ！ その軌道運動がどこから出てきたのか——誰がそんなにも首尾よく、必要な方

向への必要な力の足蹴りを電子にくれてやったのか——を解明した者は、どうしたわけか誰もいない。にもかかわらず、その首尾よい足蹴りによって原子軌道に入り、そのまま放っておかれた電子は放射のためにエネルギーを失い始め、きわめて急速に全エネルギーを失い、数回転する間に原子核に落ち込むはずだということで、みんなの意見は一致した。不条理が現れた——原子は長生きできないはずなのに、生きている。ほら見ろ、ちゃんと利用した場合でも、古典的理解は何たる袋小路へ導くことか！ この袋小路からの出口を今すぐ見つけ出せ！

ここで再び量子論的アプローチが起動し、ボーアはこれを基礎として、稀に見るほど輝かしい解決法を提案した。いわく、学生たちよ、次のことを学べ、もし問題が軌道に沿って運動している電子の放射に起因しているのなら、その問題は、軌道に沿って運動している電子は放射しないという簡単な公準 [postulate, 「要請」とも] を設定すれば解消できるということを、と。いやはや、たいしたもんだ！ ただし、まだいくらか修正を加える必要があった。いわく、原子のスペクトル中にはスペクトル線がいっぱいあることにもとづいて判断すると、原子においては、そこでは電子が放射しない、魔法の軌道の沢山の組合せがあり得る。そして、電子が放射するのは、ある軌道から別のより低い軌道へ飛躍するときに限られる。これに対応して、電子が吸収するのは、より高い軌道へ飛躍するときだ。またいわく、その際、そのような放射・吸収は、明らかに単位量ずつ、つまり量子として——プランクの仮説との素晴らしい一致に従って！——行なわれている、と。

ちょっと待った！ プランクの仮説では、量子は周波数という物理的パラメーターを持っているということを、あなたがたに思い出させる無礼をお許し願いたい。エネルギー単位量の大きさはその周波数によってのみ決定されているのだ。そしてほら、このエネルギー単位量が原子によって吸収されたら、どうしたわけかその原子の電子がより高い軌道に跳び移ったのだ。こう質問したくなる。そのとき、原子の中で、いったい何が量子の周波数で振動したのか？ この疑問に対する答えは長い間徹底的に追い求められたので、完全に確定的な形で言うことができる。すなわち、原子内においてプランク量子の周波数で振動しているものは、何もないのである。そうか、なるほど。ということは、親愛なる皆さん、あなたがたは、何かについてわざとやわやわにしているということだ！ つまり、プランクのエネルギー単位量が原子内にある間は、その大きさは周波数によってはまったく決定されていないということか?! それがプランクの仮説との一致と名付けられているのか？ 量子が原子によって吸収されるとき、量子のエネルギーは月並みながら、電子の軌道運動エネルギーの増加分に転化するのであって、それゆえ量子のかつての周波数からは思い出しか残らないのだと、あなたがたはまだ言い張っている。分かったよ、でももしそうだとすると、逆の過程の場合、つまり量子が放射されるとき、同一の周波数でのじたばたはどのようにして復元されるのか？ もしかしたら、原子の中にはポータブル式アナログ・デジタルコンバーターが存在しているのだろうか？ さあ、お答えください、どうぞご遠慮なさらずに！

ここで再び、アカデミー会員たちは我々をたしなめようと試みる。いわく、この著者はいったい何のためにそんなくだらないことを強調するんだ、ボーアの公準の主要内容はそれとはまったく別だというのに！ と。お答えしよう、それは、その主要内容を強調する前に、必要とされる知識をあなたがたに与えてやるためだ。では、その主要内容は、要するにどんなことに帰着するのか？ それは、原子が吸収・放射することができるのは、ボーア

の定常軌道自体における電子の運動エネルギーの差と等しい共鳴エネルギー単位量のみである、ということだ。これこそがその「主要内容」、すなわち量子論のセントラルドグマなのである。どうすりゃそこまで落ちぶれられるの？ なにしろ、異なる化学元素の原子においては、定常軌道系も異なっている、すなわち、それらに対応する量子エネルギー準位系も、すなわち、それらの準位系の間の差も異なっているのだ。そうだとすると、そのセントラルドグマからは、量子準位をシフトさせる、あるいはその幅を広げるための特殊な措置が施されない限り、ある元素の原子によって放射された量子は別の元素の原子によって吸収されることはできないという結論が導き出されることになる。ああ神よ、そんな状況においては、その三位一体の神——2つの原子と1つの量子——でさえ、過去における己の愚行の自覚によって気分がすぐれなくなるに違いない。「身内のためだけのもの」であることが判明しつつあるその量子を、「普遍的相互作用」がますます強く悲しませることであろう！ また、アカデミー会員たちは、レーザーは量子論のおかげで出現したということを感じ込ませるために、我々の頭をさらに混乱させているのではないか?! 親愛なるアカデミー会員のみなさん、「量子論のおかげで」ではなくて、「量子論にも関わらず、量子論に反して」なのだ。初期のレーザーでは、閃光電球による広帯域ポンピングが用いられていたのだ！ そしてこれは、あなたがたのセントラルドグマに対する実験による直接的反証である。すなわち、共鳴放射は、レーザー遷移エネルギーよりも大きいエネルギーを持つ非共鳴ポンピング量子の吸収の結果として発生するのだ！ さらにこんなこともある。明らかに非共鳴の紫外線を物質に照射すると、物質は蛍光を発し始める。その波長は、照射エネルギーと、その物質内における最も近い下位量子準位のエネルギーとの差に正確に対応しているのだ！

ところで、我々が夢中になって論じていたのは何の話だっけ？ それは、今や、理論家たちは様々な試練を経て、あきれるほど特殊な、筋金入りの人間になったという話だ。彼らにとって致命傷となる実験的事実によって脅しをかけても、彼らはビクともしなくなった。彼らは実験的事実なんて無視したくなったのだ。まだ彼らの心を動かすことのできる唯一の方法、それは、彼らが神とあがめる理論における、致命的な矛盾を突くことである。よし、やってみようじゃないか！ 他のやり方ではけっしてできないからね。やらなければならないのは、量子論の成果のうち最初の2つを比較してみることだけだ。1つは、平衡スペクトル——ご記憶のように、それは連続的である——が歌っているところのもの、もう1つは、原子に共鳴エネルギー単位量のみを吸収・放射させている、すなわち、原子の放射・吸収スペクトルを離散的にさせているところのものである……。筋金入りのあなたがた、そちらのほうではいったいどんな結果が得られるのか？ 原子は平衡放射の放射源になることはできないとでも?! また、原子は平衡放射熱交換に関与することができないとでも?! しかしそうだとすると、熱力学を、全部いっぺんに似非科学と宣言し、特別に割り当てられた場所に投げ込む必要があった。あなたがたはなぜそうしなかったのか？ そんなことをして手を汚したい者が見つからなかったからか？ いや違う、そこにはもっと高邁な動機があった、つまり熱力学の専門家たちが存分に才能を発揮して、そうして見事にそれに応えてくれたはずだからとでも？ 原子はまちがいなく平衡放射熱交換に関与していること、そして、特別に割り当てられた場所に追放するべきは熱力学ではなく、量子論であることが一瞬のうちに判明したはずである——これは、火を見るよりも明らかなことだ！ そ

れゆえ実際の話、量子論の発案者たちにとっては、一般大衆がこの件に関して何かを感じかないようにするために沈黙を守り、熱力学専門家と出会ったときは、そいつがぱっとしない奴だった場合でも、そいつに向かって丁寧にお辞儀をするほうが良かったのである。

そこで、ここが肝心なところだが、今や必要となったのは、ボーアの公準についていたるところでしゃべりまくることだった。いわく、それについてしつこく同じことを繰り返してしゃべり続ければ、平衡連続スペクトルをめぐる悪夢はひとりで忘れ去られるだろう。そして、なるべくもったいをつけるために、光電効果の場合と同様、この件に関していかなる疑惑も残さないようにするため、光エネルギー量子は具体的に実在する粒子であるという実験的証拠を無理にでっち上げ始めた。それは実は、恋人の顔をまともに見るのが恥ずかしかったのだ。すなわち、金属板に紫外線を照射したら、ついにそこから電子を叩き出すことができた。ところが、そのどの電子も、運動量の単位量ではなく、まるでエネルギーの単位量だけをひつつかんだかのような仕方で出てきたのだ！ まるで電子を足で蹴っばり出したのではなく、強火であぶったかのような仕方で！ ちなみに、「足で蹴っばり出したのではなく」と言ったが、それでもなお言い方が穏やか過ぎる。光電子は金属板の照射された側から、すなわち光電子を蹴っばり出した量子とは反対の方向に飛び出てきたのだ。まるで愉快的結果が得られたかのように、量子物理学者たちの中でその理由の説明に取り組んだ者は誰もいなかった——アインシュタインさえも。彼の有名な光電効果の方程式は、量子によって電子が叩き出される際のエネルギーバランスしか記述していなかった。それだけでは足りなかった。彼らは光量子がエネルギーだけでなく、運動量も運んでいることの証拠が欲しくなった。

では、その証拠をどこから手に入れるか？ ところで、彗星の尾は太陽光の圧力によって生じるという大胆な仮説をケプラーが唱えたのは、まだ 1619 年のことだった。まあ、彼がそんな仮説を唱えたのも無理からぬことだ。太陽からは高エネルギー粒子の流れ——いわゆる太陽風——が四方八方に吹き出していることを、彼は知らなかったのだから。ところが現在、専門家たちはあなたにこう説明している。「そんな風なんて無視しちまえ、太陽光の圧力のほうがずっと強いんだから！」と。彼らはこれをどこから思いついたか。地球軌道の半径上における太陽風の粒子の濃度と速度を知ることにより、その結果生まれる圧力を計算し、この圧力と、太陽エネルギーの流れ——いわゆる「太陽定数」——にもとづいて得られた計算上の圧力とを比較したのである。このようなやり方で計算した場合、太陽光の圧力は太陽風の圧力より 3 桁大きいという結果が得られる。しかし、太陽定数が広大な連続スペクトル帯域内におけるエネルギーの流れを記述しているのに対して、彗星の核が「ガスとして放出する」分子は光を選択的に拡散させていることにご留意いただきたい。このことを考慮に入れて計算すると、太陽光の圧力は太陽風の圧力より 1 桁小さいという結果が得られるのだ！ すると、専門家たちはしばらくの間何かもごもごつぶやいた後、そもそも計算などというものは何も証明しないのだ、と我々にご教示たまわる。でも、おじさんたち、あんたらは証拠が必要なんだろう？ 自分の目の前のお皿の上に証拠があるというのに、この 100 年間、あんたらはいったい何をしていたんだい？ 太陽活動が活発な時期には太陽風の強度が 1 桁増大するが、太陽からの光の流れは一定のままであるということを、まさか、あんたらは知らないのか？ もし彗星の尾が主として太陽風によって形成されているのだとすれば、それらの尾には太陽活動が静穏な時期と活発な時期とで差が認められる

はずだ。逆に、ここで主役を演じているのが光圧だとすれば、その差は認められないはずだ……。天文学者たちは声をひそめてささやいた、「沈黙せよ、騒音をあげるな！もし何かが起きたら、すべてを否定せよ！」と。しかし、ビーアマン [Ludwig Franz Benedikt Biermann] という勇敢な天文学者がいて、その差が認められることを公然と言明した。すなわち、彗星の尾は、光が圧力を与えることを少しも証明していないのである。

では、レベデフ [Pyotr Nikolaevich Lebedev] の有名な実験についてどう評価するのか？ なにしろ、その実験手法はきわめて巧妙であり、そのため、光圧は必ず発見されるよりほかにはなかったのだと我々は教えられているのだ。検討してみよう……。実験では、軽いねじれ振り子の羽根に取り付けられた薄い金属箔からなる標的に向けて電気アークの光が照射された。標的への照射はある一方の側から、あるいは他方の側から行なわれたが、それは振り子を揺り動かすためではなく、振り子の振動のゼロ位置を変位させることを目的としていた。その変位の大きさにもとづき、光圧からの力の効果に関する結論が下された。しかしなにしろ、ここにはさらに、標的の光が当たっていない側と比べ、光が当たっている側のほうが残留ガスの温度が若干高いことに起因するラジオメーター力が介入していた。このラジオメーター効果を減少させるため、振り子が収められているチャンバーの抽気が行なわれた。しかしもちろん、ラジオメーター力は完全に除去されたわけではない。では、他ならぬ光が圧力を与えていることを裏づけるにはどうすればよいか？ それはこうだ。マクスウェルの理論によれば、光を絶対的に反射させる表面への光圧は、光を絶対的に吸収する表面への光圧の2倍となる。そこでレベデフは鏡面と黒塗りの2つのタイプの標的を用いた巧妙な実験を行なった。ところが、まずいことが起きた。鏡面タイプの標の場合の効果が、黒塗りタイプの標の場合の1.2～1.3倍でしかないことが判明したのだ。女占い師にお伺いを立てるまでもない、それは、ラジオメーター力がはしゃぎまわったのだ……。面白いことに、それから何十年か経過した後、以前より比べものにならないくらい良質な真空条件の下でラジオメーター力を徹底的に除去した上で、レベデフの実験を再度行なうことが可能になった。成功が自ら腕に飛び込んできた、と思いきや、どうしたわけか獲物をつかまえた猟師は現れなかった。もしかしたら、大地が持つ、実験手法の巧妙さという栄養分が乏しくなってしまったのだろうか？ とんでもない！ どうやら、問題は次の点にあったらしい。その巧妙さがラジオメーター力を除去したら、力の効果も姿を見せなくなったのだ。そこで一般大衆がそれに気づかないようにするため、「ラジオメーターライトミル」という魅力的な名前のおもちゃが考案された。その羽根に光を当てると、確かに羽根が回る。愚か者向けには「このおもちゃの名前があなたをビックリさせませんように。実は、これは光の圧力で回転しているんですよ！」という説明がなされた。

ところで、量子論にとっては、光圧に関するその種の奇行はいわゆる余計なお世話というものだった。量子論が欲しかったのはそれよりはるかにデッカイもの、すなわち運動量が個別量子によって運ばれることの証拠であった。その証拠を探し出すのは、ラジオメーターライトミルのベアリングに潤滑油をさしたり、彗星がどんなふうに尻尾を振っているのかを覗き見したりするのとはわけが違っていた。量子は見ることも触れることもできなかった。それゆえ、必要とされる証拠は偉大なる思惟の力によって得られた——より正確には、偉大なる当てずっぽうの力によって。

例えばコンプトンの経歴を取り上げてみよう。彼は、ある種感銘深い仕方で成功を収め

た人物である。軽元素からなる標的上で X 線が散乱すると波長がずれ、そのとき、そのずれが散乱角にのみ依存しているという奇妙な現象があった。しかし、それが奇妙なのは古典理論、すなわち波動論の立場から見た場合であった。そこでコンプトンは運動量を X 線量子のものとする量子論的アプローチを適用しようと試みた。量子はそれが持つとされている運動量で、「弱く結合している」原子内電子と衝突し、それを原子から叩き出して「反跳電子」に変えるという予想が立てられた。するとエネルギー—運動量保存則から、散乱された量子のエネルギーは減少するという結論が導き出された。その減少は観測された波長の増大と一致していた！ さて、コンプトンがこの問題をちゃちゃっと片づけて見せたので、ほとんどみんながアッと驚いた——ただし、X 線の散乱に関する専門家たちを除いて。彼らは知っていたのだ、この抜け目のない男が、増大した波長を持つ成分についてだけ大声でしゃべりまくり、減少した波長を持つ成分については沈黙を守っていることを、なぜなら、もし本当のことを全部話したらいまましい結論を下さなければならなくなるはずだからということを、エネルギー—運動量保存則は様々なケースの半分では働いているが、残りの半分では働いていないということを、量子に帰せられている運動量というのは完全なデタラメであることを……。彼の親友である実験家たちは、「おい、コンプトン、一番大切なのはおじけづいたりしないことだ。俺たちがお前の効果を援護してやる」と言って彼を慰め、その援護、すなわち散乱した量子と「反跳電子」が正しく振る舞っていること、つまりそれらが同時に飛び出し、まさに保存則が要求している角度で飛び散っていることを証明する作業に取り掛かった。教科書では、それらの援護実験については、詳細には立ち入らず、ごくわずかししか書かれていない。そりゃあ当然だ。もし学生たちがその詳細を知ったとしたら、それらの実験の「証明力」の値踏みをして、大笑いするに違いない。

運動量の個別量子による輸送に関する証拠が料理 [= 捏造] されていたキッチンから登場した最初のクレープは、そんなものだった。でもほら、そのキッチンから、また何かさわやかな香りがしてきたぞ。今度はガンマ線量子に関する問題だ。吸収体である原子核において放射体である原子核と同じ量子遷移が生じているにもかかわらず、ガンマ線量子が、共鳴的に吸収されることを嫌がって駄々をこねていたのだ。理論家たちはこう説明してみんなを納得させようとしていた。「これはすべて、ガンマ線量子が反跳運動量を、ガンマ線量子を放射する側の核に対してだけでなく、吸収する側の核に対しても伝えており、その結果、最初は一致していたそれらのスペクトル線がドップラー効果により、その幅を超える大きさまで広がることに起因しているのだ」と。おやおや。そもそも、放射体のスペクトル線がドップラー偏移を受けるのは、その放射体にそれに相当する速度が既にあるときである。今検討されている場合においては、放射体である核は量子の放射の結果として反跳を得る。すなわち、放射の瞬間には、いかなるスペクトル線偏移もまだ存在していないのである。今、「瞬間には」と言ったが、それは、第 1 回ソルベイ会議の決議において、「量子は瞬間的に放射される」と明確に述べられているからである。（本当のところを言えば、もしそうだとすると、原子核は反跳運動量を得て、無限大の加速度で運動しなければならない。まったく、理性では理解できない不思議なことの発見が山ほどあるものだ！）もちろん、量子の吸収も瞬間的に行なわれる。すなわち、ここでも話は同じであって、最初に吸収が起こり、その後になって初めて、その結果としてのスペクトル線偏移が現れるのでなければならない。その偏移の影響を受けるとされている過程は、既に終わっているのだ！

反跳効果によるスペクトルの線幅拡大という解釈は何の役にも立たない！ なぜなら、次のような結果が見事に出てきたからだ。すなわち、共鳴吸収は、放射体である核と吸収体である核が十分低い温度にある結晶構造に組み込まれている場合に得られるということをメスバウアーが発見したとき、ここでは反跳は個々の核ではなく、結晶全体によって受け止められるのであって、その際に事実上ゼロとなるという論理的な結論が下されたのである。まさにそのとき、ある素敵な理論が誕生したのだが、それによれば、メスバウアー条件は、結晶の温度がいわゆるデバイ温度より低くなったときに到来するとされている。まあ、まともな失敗作が現れたということだ。なんと、鉄においては、そのデバイ温度が 647°K であるにもかかわらず、 14.4 keV の遷移の場合のメスバウアー吸収は 1046°K までの温度において観測されるのである。鉄が——そしてそれは鉄だけではない！——あなたがたの素敵な理論に向かってくしゃみをひっかけた。なぜなら、各波長にとって、ガンマ線放射とはとりもなおさずメスバウアー条件への独自の移行温度であるからだ！ どうしてなのか、その理由をご存じでしょうか？ それはどうやら、普通の条件下においては、共鳴吸収を妨げているのは反跳効果ではまったくなくて、原子核の熱振動に起因するドップラー偏移であるかららしい。温度が低下するとその振動の振幅は減少してゆき、最後にはガンマ線放射の動作波長よりも小さくなる。ところで、放射体あるいは吸収体が運動する範囲の大きさが放射波長よりも小さいときには、線形ドップラー効果は存在しないことが知られている。さあ、ほらメスバウアー条件が到来するぞ。ただし、この条件においては、原子核の熱振動に起因するドップラー偏移が消失するとき、結晶は立派な干渉フィルターに転化する。すなわち、きわめて幅の狭いメスバウアースペクトル線は、核内における量子遷移の性質ではなく、結晶構造の性質を示しているのだ！ 信じられないって？ それを検証するのは至極簡単だ。もしここで示されているのが結晶構造の性質であるとすれば、単結晶の場合に観測されなければならないのは何かと言えば、……それはメスバウアー効果の異方性だ！ 検証が行なわれた。まさにそのとおりだった。もう驚いて声も出ない！ もしどなたかガンマ線量子による「反跳効果」を今なお信じている方がおられるなら、他ならぬその異方性を説明してみてください。ただしその際には、メスバウアー条件においては、「反跳」が「結晶全体」によってあらゆる方向において一様に受け止められるような絶対的剛体性を結晶が持っていることが暗黙の了解事項とされていることを、説明の出発点としなければならない。さあ、どなたか説明してくださる方は？ 弁舌さわやかなみなさん、あなたがたはどこへ隠れてしまったんだい？

もしかしたら、あなたがたは自分にとって一番大切な感情を傷つけられて、腹を立てているのではないか？ その気持ちはよく分かる……。きっとあなたがたは子供の頃、光子ロケットの話を聞いたことがあるのではなかろうか——「ほらここに反跳がある、これぞまさしく反跳だ！」と。でもそれがおとぎ話だったことを、あなたがたが歳を取っても理解できなかったことの責任は、いったい誰にあるんだろうね？

さてここで、光量子が運動量を運ぶと信じている者たちは、その最後の論拠——彼らの意見によれば、完璧な殺傷能力を持つ論拠——を披露する。1960 年、地球近傍の軌道上でアメリカの人工衛星エコー1 号の運用が開始された。これは表面を金属でコーティングした直径 30 メートルの気球型の人工衛星で、その表面積に対する質量の比はきわめて小さかった。ところが、その軌道が段階的に大きく変化し始めたのである——まるで、太陽光が

衛星に対して実際に圧力を加えているかのように。これは光圧の純然たる実例のように見えるかもしれない。いやいや、とんでもない！ 太陽の有害な紫外放射が衛星の表面から電子をもぎ取り、衛星を正に荷電させた違いはない。周囲空間からの電子の補償流は非対称的に起こったはずである。すなわち、主として太陽の側に向かって飛んだ光電子の磁気作用により、流れてきた電子が、気球の太陽とは反対の側に負電荷濃度の過剰領域を形成したはずである。この過剰負電荷が、正に荷電した気球を引き寄せたはずである。これが、「太陽から遠ざかる」方向へ気球を引っ張った力に他ならない。諸量の推定値は、このメカニズムが完全に現実的であることを示している。そうだとすると、人工衛星エコー1号をめぐる事例は、光が圧力を生んでいることを証明していると言えるのだろうか？ どちらが正しいか、推理してみていただきたい。でも、それを推理するのは理論家たちにとって難しい仕事になるだろう——彼らの信仰は病的なほど堅固だから。「我らは信ず、巨星内においては、その核から進んでくる光が重力による収縮を食い止めていることを！ 我らは信ず、核爆発の爆心においては、光圧がきわめて大きく、そのため光圧によって衝撃波が生まれていることを！ これを信じぬ者は、そこに指を突っ込んで検証してみるがよい！」

しかしこの話はここまでにして、嵐のような20世紀初頭に話を戻そう。当時、理論家たちは簡単な問題に難儀するはめに陥っていた。もし光がれっきとした粒子であるのなら、光の波としての性質はいったいどこから出てくるのか？ 光が複数の平行スリットからなる系に当たったときの干渉現象を例に取ってみると、波動理論は、その先何が生じるかを少しも無理なく説明することができる。すなわち、波面はそれらのスリットを通過しながら複数の小区域に分かれ、これらが二次波の源となる。それらの二次波が重なり合うと、スリットの向こう側における光の伝播方向に依存する位相差に従い、あるいは互いに強め合い、あるいは逆に打ち消し合う。スクリーン上で干渉像——明るい縞と暗い縞の交互の繰り返し——が得られるのは、このことによる。お見事。しかし、量子論の立場からはその干渉像の起源をどう説明するのか？ ところで、その干渉像にもとづき、光の波長についても判断することができる。波における波長が何であるか、それは明らかなことだ。では、量子における波長とは何なのか？ そしてもし量子がまっとうな粒子であるのなら、量子は複数のスリットを一度に通過するのではなく、いずれか1個のスリットを通過するのではないから。そうだとすると、干渉像はどこから現れるのか？ それに加えて、スリットの数が多くなればなるほど、その干渉像はより鮮明になる。いったい何が得られるのだろうか？ 量子は1個のスリットを通過するが、しかし何らかの仕方でそれ以外のすべてのスリットを感じ取っているのか？

この件については、当初、大胆な飛躍によって問題を丸く収めようとする試みがなされた。いわく、各量子は1個のスリットを通過するが、多数の量子が飛んだときには干渉縞が得られる、つまり、量子が相互作用するのだ。いわく、量子における波長が何なのかは完全には分からないとしても、量子に波長があることに疑いの余地はない、と。はい、これでおしまい！ 相異なる量子が相異なるスリットをそれぞれの波の相異なる位相で通過し終わると、見よ、今度は互いに重なり合い、そこから干渉像が得られというのだ！ でもねえ……量子たちはスリットより前でもやはり重なり合うのだ。では、スリットより前における干渉像は、いったいどこにあるのか？ さらに疑問がある。スリット通過時の量子たちの位相がランダムに分布しているとする——これは非レーザー光源の場合には普通の

ことだ——、その大胆な説明からは、スクリーン上で明るい縞と暗い縞の系が得られるという結果はけっして導き出されない。量子の相互作用の結果としての干渉像についてこれ以上無駄話をしないで済むようにするため、次の話を付け加えておこう。特にこの目的のため、超微細な光束による実験が行なわれた。量子は事実上1個ずつ飛ばされた。そのため、最終的な写真上で何かを識別できるようにするためには、それらの量子が十分な数だけ飛行を終えるまで長い時間待つ必要があった。実験の結果、普通の光束による短時間の露出の場合に得られた干渉像と、超微細な光束によるかなり長時間の露出の場合に得られた干渉像とは同一であることが判明した。これぞまさしく「量子の相互作用」だ！ ちなみに、これらの実験結果は一部の理論家たちに対しておぞましい作用を及ぼした。彼らはこう判断したのだ。「量子が1個ずつ飛んだときでさえ干渉縞が得られる以上、我々は、各量子は干渉像全体をいっぺんに、ただしきわめて弱く描くのだと考える権利がある。そして新たな各量子とともに、その干渉像はますます強くなっていくのだ！」と。彼らの言うところによれば、各量子はスクリーン全体、あるいは写真感光板全体に広がる。おじさんたち、あんたらはせめて1回でも物理実験室の側まで行ったことがあるのか？ せめて1回でも写真を現像した経験があるのか？ せめて、感光板を構成している微粒子とはどういうものなのかに関心を持ってもらいたい。1個の微粒子が反応するためには、その微粒子は量子を丸ごと吸収しなければならないのだ！ 実際はこうだ。普通の光束の場合と同様、超微細な光束の場合にも各量子は感光版上のただ1点に突き当たるのである。両者の違いは、第1の場合には、明るい縞と暗い縞が即座に得られるのに対して、第2の場合には、それらの縞が描き出される——個別の点によって（！）——のを待つ必要があるということだけである。しかしこのことは、もし量子たちに波としての性質があるのなら、その性質は各量子に個別に存在するということを意味するのだ！

事態はますます複雑になってくる。光学機器ではいわゆるコーテッドレンズが広く利用されている。このレンズは普通のレンズと比べて反射が少なく、したがって光線透過率もよりすぐれている。レンズのコーティングの仕方は秘密でも何でもないが、そいつがどう機能しているかを理解しようとしたら、あつと言う間に気が狂ってしまうかもしれない。さて、反射を減らす必要のあるレンズの表面に薄層被膜を施すのだが、その際、所望の帯域の光に適した被膜の厚さの選択は、2つの境界面——空気と被膜の間および被膜とレンズの間の境界面——から波面が反射するとき、2つの位相の差が奇数の半波数に相当する位相差となるように行なう（そのような位相差を持つ2つの波は互いに打ち消し合うからだ）。そうすれば他にもない、反射が減少し、透過率が増大するのだ！ ここで、あれこれの境界面から反射した量子が互いに打ち消し合うと考えるのはナイーヴである。第1に、そのようにして打ち消し合ったそれらの量子は、反射光束から通過光束へ奇跡的なやり方で跳び移らなければならない。第2に、ここで打ち消し合うのが可能なのは同位相の量子のみであるが、非レーザー光源の場合、量子の位相はランダムに分布しているのだ……。ここでも再び、各量子は自らの正しい進路を個別に見出すということになる！ だけど、こん畜生め、量子はそれをどうやってやるってんだい？ もしかして、各量子はうまいこと立ちまわって2つの反射面からいっぺんに反射して、その結果自分で自分を打ち消し、反射光束から通過光束へ跳び移るのか？ それとももしかして、量子はそもそも反射そのものをしないのであって、もし後方に反射などしたら、その結果何だか変てこりんなことが生じ

てしまうのを事前に知っていて、それでブルドーザーみたいに前方だけに向かって突っ走るのか？

「いや違う、量子は事前に何も知ることはできない。我々と比べれば、量子って奴は完全な愚鈍なのだ！」と理論家たちは推理し、この前提から出発することにした。そして彼らがいつものように首尾よく得たのは、驚くべき結果であった。一方では、感光板上においては、量子は微粒子にそっくり入り込んだ。他方では、波動現象のときには、量子は何らかの仕方で自らと相互作用したのである——量子はいったい何のために、ひどく強く引っ張られて空間全体に広げられなければならないなかったのか！ 数ミクロンの隙間上に形成されるチンケなニュートン干渉環なんぞに、遠慮する必要はないのだ！ ローレンツは、水銀の緑色のスペクトル線の場合、経路差が波長の 200 万倍を超えても、それでもなお干渉が生じ得ることに同僚たちの注意を促した——すなわち、「量子の長さ」は 1 メートル以上でなければならないのである。しかし、この数字は上限ではない。Coherent Radiation 社製の色素レーザーによる放射におけるスペクトル線幅は全部で 15 kHz に達する。その等価コヒーレンス長は 3 キロメートルである。この長さの上に可視光の波長が何個納まるか、ざっと計算してみていただきたい。そして見よ、そのような経路差でも干渉はなお生じることができるのだ！ これは量子の「長さ」の話だ。ところがなにしろ、量子にはさらに「幅」があるのだ！ 口径が大きくなると望遠鏡の解像度が向上するのだとすると、なんと、量子の断面寸法は口径と比較し得る大きさであると仮定しなければならない。「そうだとすると、人間の目はどうして物を見ることができるのか？ 瞳は量子のごくわずかな部分しか通さないのに……」とローレンツは問うた。なにしろ、網膜の感光細胞に作用するためには、量子が丸ごとそっくり必要なのだ！ このローレンツの困惑は、直径 1 メートルの反射鏡を持つ望遠鏡が科学技術の奇跡とみなされていた時代のものであることに注意しよう。それが例えばゼレンチュクスカヤの望遠鏡^{〔訳注〕}が 6 メートルの反射鏡を備えている現代だったとしたら、ローレンツは人間の目についてどのような問いを発するのだろうか？

……理論家たちはふうふう言って苦しんだ挙句、量子がまっとうな粒子であるだけでなく、まっとうな波にもなるように何とかして巧妙に切り抜ける必要があるということで意見が一致した。彼らは「これで大丈夫さ、これは弁証法的アプローチと解釈することができる！」と言って互いに励まし合った。ふん、自分たちのお気に入りの手口——水増しによってごまかす方法——を利用する以外、何もより良いものを見出すことができず、でっち上げをしたってわけだ。手っ取り早く言えば、量子を取り上げて、それに波動関数を書き足したのである。波動関数とはいったい何なのか、彼ら自身ちゃんと知ってはいない。波動関数にはいかなる物理的意味があるかという件に関する華々しい議論が行なわれた後においてさえ、そうなのだ。もう一度この件に立ち戻ることになろう。単刀直入に言えば、波動関数とは、自ら乱雑に積み上げた諸問題を理論家たちが解決するのに役立つと称されている、数学的構造物である。各量子が波動関数の幸福な持ち主であると仮定してみたら、空間全体にわたる量子の広がり、また干渉を伴う回折をお望みのままに記述できるようになった。実は、新たな馬鹿げた問題が這い込んできたのは、まさにここにおいてであった。

〔訳注〕 ロシア連邦カラチャイ・チェルケス共和国ゼレンチュクスカヤに近い標高 2100 m のパツーコフ山に設置されている望遠鏡 BTA-6 のこと。1975～1993 年の期間、世界最大の望遠鏡であった。

例えば、波動関数で記述されているように量子が空間全体に、例えば 100 メートルにわたって広がっているのだとすると、量子のエネルギーもそれと同じ 100 メートルにわたって広がっているのだろうか？ これは馬鹿げた問題だが、原理にかかわる二者択一的な問題である。もし量子エネルギーが広がっていないのだとすると、波動関数とその物理的意味に関するすべての議論は、単なるけしからぬ冗談ということになる。もし量子エネルギーが広がっているのだとすると、量子が感光板の微粒子や網膜の感光細胞に吸収されるとき、そのエネルギーはいかなる絶妙な仕方で 1 点に縮小するのだろうか？ でもそんなこと誰も知らない！ この問題に対する答えはどうしても仕上がらなかった。そのような「縮小」のために、「波束の収縮」という高度に科学的な用語を思いついただけだ。でも、その収縮がどうやって生じるかについては、何も思いつかなかった。「どうやって、どうやって……」。それはこうやって生じるのだ——いったんそういうことになったんだから、議論はこれで終わりだ、以上！

さあ、話はどうなっていくか。理論家たちは可能なこと、不可能なことをすべてやってみたが、量子かられっきとした波はどうしても得られなかった。ところで、れっきとした波——例えば音波、あるいは水面上の波——は容易に識別できる特徴を持っている。そのような波は、相異なる独立した波源によって生まれた波であっても申し分なく干渉し合い、それらの波源の周波数が互いに近ければ近いほど、より強く干渉し合う。しかし、光の場合はそうは問屋がおろさないことを知っている者は少ない。相異なる独立した光源から出た光は、それらのスペクトル線がどんなに見事に重なり合っている、干渉し合うことはないのである。重なり合うスペクトル線が非常に狭いレーザーの場合でさえそうなのだ。2 台の同一型式のレーザーから出た光を混合して干渉像を得ようと試みた者は、どんなに長い間うまずたゆまず自らに鞭打っても、結局うまくいかなかった。お望みの方はこの実験をもう一度やってみることができる。ただし、うなりを干渉と呼ぶ誤りを犯さないようにしなければならない。2 台のレーザーの周波数のうなりを得るためには、長い間自らに鞭打つ必要はない。2 本の光線を動作が十分高速なフォトダイオードに送り、差周波数上で信号を取り出せばよい。我々が今論じているのはそれとは別のこと、つまり、その定義により静的である干渉像——例えば明るい縞と暗い縞の静的システム——である。そのような静的干渉像がフォトダイオードの鼻づらの上にまさに存在しているのであって、ただ単に、そこにおいては干渉縞は小さくて肉眼では見分けがつかないだけなのだと、お考えだろうか？ 肉眼では見分けがつかないと言うのなら、拡大してみよ！ 何かそれを妨げるものがあるとでも？ ほら実際、非レーザー光源からの場合でさえ、その干渉縞が——映画スクリーン全体に——映し出されているではないか！ ここでヒントを差し上げよう。ここでの秘密は、レーザー光源か、それとも非レーザー光源かの違いにはない。例外なしにすべての干渉計は、次のように動作している。干渉計は同一の光源からの光を分割し、相異なる進路を進ませた後、再び 1 つに統合しているのである。光の干渉像は、こうしなければ得られないのだ！ いったいどうしてだろう？ では、思い出してみよう。波動現象において、個別の各量子は何らかの仕方で自らのために正しい進路を見出しているのだ！ 干渉計の動作は、そのことのさらにもう 1 つの裏づけなのだ！

まったく、まるで怪談話みたいになってしまった。理論的思考が量子を波に転化しようと試みて渾身の力を振りしげれば振りしげるほど、すべてはますます大きな恐怖を伴って

姿を現すようになった。そのような波は物理的世界には存在せず、存在することができないのだ。あれこれの場合のうちの、まさにどの場合に相互作用すべきかを事前に知った上で、もっぱら自らとのみ相互作用し、最後近くになるとかなりの体積の空間を自分の身から捨て放ち、一瞬のうちに1点に縮小するとは、なんとご立派な波であることか！……理論家たちは夜毎悪夢に苦しめられた。悪夢の中で、波動関数を与えられてますます図々しくなった量子たちの一味が、理論家たちを思う存分侮辱しまくったのであった。いずれにせよ、理論的思考が前にも後ろにも出口のない袋小路に入り込んでしまったことが明らかになった。罪を負うべきは理論的思考ではなくてその袋小路であると世間に信じ込ませるために、粒子と波動の二重性という高度に科学的な用語が考え出された。この用語が意味しているのは、量子には粒子と波の両方の性質があるが、しかし、それらが互いにどうやって両立しているかは、(彼らいわく)我々がなし得る限りのことをしたにもかかわらず、ちっとも分からないということだ。それゆえ、もし誰かが量子についてまだ何か得心がいかないようだったら、文句は粒子と波動の二重性に対してつけさせろ。それよりもっといいのは、この二重性におとなしく慣れさせ、それに満足させることだ……。

なんとまあ、親愛なるみなさん、あなたがたは出口なしってわけだ！でも、袋小路に入り込む必要のない別のアプローチが間違いなくあり得る。ここで、ある1つのアプローチをご紹介します。このアプローチの要点は、物理的エネルギーをその様々な形態において持ち得るのは物質のみである、ということだ。これは、光エネルギーの量子は物質粒子——特に原子——においてのみ局在化することができる、ということの意味する。すなわち、普通イメージされている形での光量子、光速度で空間中を飛びまわる自立的なエネルギー単位量の形での光量子は存在しないのである。光量子は、原子と原子を分け隔てる空間を通過することなく、原子から原子へと直接跳び移る。しかも、パルス発生器と非線形セルの間におけるレーザーパルスの通過時間に関する分析結果が示しているように、原子から原子への光量子の跳び移りは瞬間的に生じる(このような結果を最初に得たのはバソフ^{〔訳注〕}とその共同研究者たちであった。詳しくは筆者の概論「相対性理論のイチジクの葉」[\[http://newfiz.info/rel-opus.htm\]](http://newfiz.info/rel-opus.htm) 未訳を参照されたい)。このように、光の伝播過程とは、原子から原子への光量子の瞬間的跳び移りの連鎖なのである。光速度が無限大ではなくて有限であることは、光量子の受け取り手となる原子を見つけ出し、そうすることによって光量子の進路を設定するアルゴリズムの応答速度が有限であることによって条件づけられている。このアルゴリズムを「エネルギーの量子跳び移りのナビゲーター」、あるいは略して「ナビゲーター」と呼ぼうという提案がなされている。波動現象も含め、光の伝播に関連するすべての効果は、まさにこのナビゲーターの働きによって条件づけられているのである。これこそは大問題の解決に他ならない。すなわち、原理的に両立不可能な性質を量子に帰して、それを「粒子と波動の二重性」という用語で取りつくろう必要はまったくないのだ。光量子はただ単にエネルギー単位量なのであって、したがっていかなる波動的性質も持っていない。そして回折と干渉に関する責任は、ナビゲーターが負っているのだ！それはどうということかと言えば、それは、ナビゲーターが光量子の跳び移りのあり得るすべての選

〔訳注〕 ニコライ・ゲンナジエヴィッチ・バソフ (Nikolai Gennadiyevich Basov) は旧ソ連の物理学者。1964年、レーザーおよびレーザーの発明に対して C. H. Townes, A. M. Prokhorov とともにノーベル物理学賞を受賞。

択肢の確率を全部計算し、その結果、光量子の跳び移りは、その場合に跳び移りの計算上の確率が最大となる原子に向けて行なわれる、ということだ。干渉像の明るい縞は、まさに、そこへの光量子の跳び移りの確率が最大である場所に相当している。このようなアプローチを取れば、前述した個別に飛ぶ光量子同士の干渉、あるいは「波束の収縮」などといったパラドックスはすべて一挙に解消される。重要なのは、ナビゲーターの自らのチャネルが、——それ以外の一切のことにはかかわりなく！——各光量子のために進路を設定するという点である。ここにはいかなる「袋小路」もなく、物事がすべて整然と収まっている！

しかし、全然だめ！ 理論的思考はまったく別の方向に向かって働いたのだ。理論家というものは、普遍的原理を作り出すのをひどく愛しているものだ。というわけで、ここでも普遍性への引力が物を言った。課題はこのように立てられた。量子における粒子と波動の二重性から「袋小路」が得られたというのなら、普遍性の見地から出発して、物理学全体をこの「袋小路」へ追い込んではいかないのだろうか？ と。もしそれと同じ「二重性」が物質粒子にもあることが分かったなら、どんなに素敵なことだろう！ このアイディアを推進したのはルイ・ド・ブロイであった。彼いわく、「各粒子は、それに対して波動を対応させてとらえることができる。その波の長さを見出すためには、プランク定数を粒子の運動量、すなわち粒子の質量と速度の積で割る必要がある。すべてはびっくりするほどうまくいく！」。でもねえ……相異なる基準系においては粒子の速度は相異なる、すなわち、粒子の波長も相異ならなければならないという、とりわけびっくりするような結果が得られてしまったのだ。それにまた、どうか、粒子が実験室基準系において静止するなんてことが起きませんように——その場合、粒子の波長は何と等しくなるのか？ プランク定数をゼロで割ると無限大が得られる。理論家諸氏よ、かかる特異性は何を意味するのか？ いまだに分からんって？ それともあなたがたは、その種の特異性に関する問題は「無視して忘れちまえ」法を用いて処理なさっているのだろうか？ それなら、ちょっとだけお時間を。あなたがたがいつ頃に興味を持つような話を一つ。さて、粒子が回折格子を通り抜けて飛んでいる。あなたがたの意見によれば、そのとき、回折が生じなければならない、だよね？ と。ところで、相対性原理によれば、回折格子が静止粒子に向かって飛んでいっても、それと何も変わらない。ただしこの場合には、ド・ブロイ波長は無限大となり、いかなる回折も生じないのだ！ あなたがたにとってド・ブロイ波と相対性理論のドグマのどちらがより重要なのか、きっぱり判断してもらいたい。だってなにしろ、あなたがたは公爵閣下 [= ド・ブロイ] に対して、原理的な質問ではなく、「あなたの波は何における何の波なのか？」といった類のくだらない質問を、まるで彼がその答えを知っているかのような調子でして、彼を散々悩ませたんだから。彼はこう答えて人々を納得させようとした。「重要なのは、それが何における波かということではなくて、それが波であるということだ！ あらゆる粒子は、我々がかつて考えていたそれではない。それは波束なのだ！」と。ご説明しよう。このようなアプローチを取った場合、粒子とは、その波長が小区間に収まる複数の波の山が首尾よく重なり合った結果得られる、「平地上のピーク」ということになる。しかも、そのような「波束」の移動速度は粒子の速度とぴったり等しくなるのだ！ 完全な勝利か？ おあいにくさま。詮索好きな同僚たちは、波の長さについての区間が、それらの波の速度についてのそれに相当する区間を意味していることに気がついた。でもそうだとすると、波束は

拡散しなければならない。すなわち、「ピーク」はまず山頂に、次に高地になり、最後には「平地」と完全に同じレベルになる。概算が行なわれた。電子に相当する波束の大きさは、約 10^{-26} 秒間で 2 倍になるはずだ！ この数字を評価するためには、水素原子内において、第 1 ボーア軌道上の電子はおよそ 10^{-16} 秒間で 1 回転していることを考慮する必要がある。すなわち、波動を軌道上に置いて計算してみたら、電子は軌道の 100 万分の 1 も進まないうちに拡散しなければならないという結果が出たのである！ みんなあつけにとられた……。そしてド・ブロイをなぐさめようとして、こう言った。「公爵閣下、あなたの波を統計的意味において解釈しようではありませんか！ 波のピークが存在する所、そこは粒子の存在確率がより高いのだ、と！」。ド・ブロイはじっと我慢してこう言った。「“統計的意味において”ねえ……。この統計が特にすぐれているのは静止粒子の場合なんだが……。まあ、そんなことはどうでもいい、君たちは私の説のささいな点を根掘り葉掘り詮索したのだということを忘れるなよ。必要なのは、粒子に波の性質があることを実験で検出することなのだ！」

この責任重大な課題は、歴史家たちを信じればの話だが、予定された期限内に見事なやり方で成功裡に遂行された。波動的性質が認められた最初の粒子となったのは電子であった。『ファインマン物理学』では、2 つのスリットを通る電子の通過に関する衝撃的実験^{〔訳注〕}が記述されている。いわく、電子たちが 2 つのスリットを通過するのが妨げられない場合には、スリットの向こう側のシンチレータースクリーン上で干渉像が得られる。一方のスリットをふさぐと干渉縞は消える。電子がどちらのスリットを通過するのかを追跡しようとする、やはり干渉縞は消える……。この記述は読者にきわめて大きな感銘を与えるが、1 つだけ残念なことがある。このような実験は今まで誰もやったことがないのだ。ご存じのように、電子のド・ブロイ波長は小さい。その波長用のスリットは原子と原子の間の隙間なのだ。ちょっと見当をつけてみていただきたい。電子のために、どうすれば 2 つのスリットしか付いていないスクリーンを作れるのだろうか？ どうすればその一方だけをふさげるのだろうか？ 一言で言えば、ナノテクノロジー！

デビッソンとガーマーはそれとはまったく別のこと——完全に可能なこと——をやった。彼らは、ニッケル単結晶の研磨薄片に対して直角に低電圧電子束を入射し（電子の場合、ニッケルを用いると特にうまくいった）、結晶によって反対側の半球（電子銃によって遮られている中心部分を除く）に向かって散乱される電子の角度分布を分析した。ブラッグ回折（すなわち薄片の表面に向かって傾斜している平行な原子平面からの波の共鳴反射）に相当する散乱ピークが見出された。しかも、それらのピークは、電子束のエネルギーがある適当な値であるときに、すなわち、理論的には、共鳴波長がある適当な値であるときに得られた。それはつまり、電子の波動的性質がその美しさの限りを発揮しているのだ！と思われるかもしれない。しかし、歓喜のあまり跳び上がる前に、ちょっと検討を加えてみようではないか。もしかしたら、ここでも何か言うべきことを言わずにいたのではないか！それは初めてのことじゃない！ よく見てみると……見えてきた……おやおや、なんとおぞましいことだ。第 1 に、これらの研究者たちは、観測された散乱ピークのすべてについて

〔訳注〕 ファインマン、レイトン、サンズ『ファインマン物理学 V：量子力学』（砂川重信訳、岩波書店、1979）、第 1 章第 4 節、第 3 章第 1 節など。本書の原著書はサイト <http://www.feynmanlectures.caltech.edu/> (Volume III) で閲覧可能。

語らなかった。最も強いピークは鏡面散乱の幅広いピークであったが、これは常に——あらゆる電子束エネルギーにおいて——観測された。すなわち、そのピークはブラッグ回折の所産ではあり得なかった。しかも、別の角度においてはいくつかの「余計な」散乱ピークがあったが、それらはブラッグ回折の概念にはどうしても整合しなかった。さらに次の問題がある。入射電子の速度が減少すれば、結晶内への電子の侵入深さは減少するはずである、すなわち、結晶の実効散乱容積は減少するはずである、すなわち、回折電子束の鮮鋭度は減少するはずであると思われるかもしれない。ところが実際には、すべてそれとは逆のことが起きているのだ！そして、それはもうブラッグ回折とは似ても似つかないものだ！忍耐心はまだかろうじて残っている。そこで、厚さがわずか原子層2つの別の金属の薄膜を散乱表面に施すと、それまでの散乱像は事実上消えて、その別の金属の場合における散乱像に取って代わられる。原子層2つの厚さの場合における傾斜原子平面とは、いったいいかなるものであり得るのか？デビッソンとガーマーが相手にしていたのは表面的な効果なのであって、したがって言うまでもなく、立体的な効果であるブラッグ回折ではなかったのである。その表面的な効果はいったい何なのだろうか？そう、二次電子放出に類するものであろう。ここでそう仮定すれば、すべてが収まるべき所に収まる。実際、ここでは電子の波動的性質は臭いすらしない……。

ところが、誰かが誰かに尋問した、「ここでは波動的性質の臭いがするぞ、違うかね？」と。波動的性質に対する引き渡し請求が提出された。そこで、波動的性質の人相書きが描かれた。沢山の実験家たちがこの名誉ある事業の継続に没頭した——「デビッソンとガーマーにできたのなら、我々にできないわけがあるのか?!」と。高速電子を薄い金属箔に当てて通過させると、配向無秩序微結晶における散乱に伴う「回折環」と称されているものが得られた。その描像は、電子がガス層あるいは蒸気層を通過したときに得られる描像と疑わしいほどよく似ていた。もちろん、ガス層や蒸気層にはいかなる微結晶も存在せず、またそこでは、月並みな機械的衝突の結果としての散乱しかあり得なかった。ところが、これも回折と呼ばれるようになったのだ！でもなにしろ、回折の場合の散乱角は、波長と、その散乱が生じる障害物の大きさとの比に依存しているのである。では、粒子の無秩序な運動が生じているガス中において、電子はいかなる障害物において「回折」したのだろうか？まあ、この問題を気にかけていた人間はいたのかもしれないが……。重要なのは、その描像が予想の正しさを完全に証明していたということだ！

それに加えて、ここではさらにもう一つの喜びが得られた。空っぽの帽子から波動的性質を取り出すこれらすべての手品は、自由電子を相手にして行なわれた。では、原子内電子の場合には、それはどうなるのか？みんなはちょっと考えてみて——あっと驚きの声をあげた。ボーアの定常軌道は、その軌道の長さ上に電子の整数個の波長が収まるという単純な条件に従っているんだっけ！これを名付けて「市場に売りに出す前に、ろくでもないボーア理論を投げ捨てちまった」と言う。もちろんそんなことをするのは残念だが、しかし他にどうすりゃいいんだ？なにしろボーア理論は、外殻上に1個の電子を持つ水素と水素様原子のエネルギー準位を記述するのにしか役に立たないのだ。例えば外殻電子が2個しかないヘリウムの場合でさえ、既に完全に記述不可能なことが出てきていたのである。3個以上の外殻電子を持つ原子については、もはや何をか言わんや！しかもローレンツの古典理論とは異なり、ボーア理論は放射を発する原子が磁場中にあるときのスペクト

ル線の増殖について、腹が立つほど何にも説明していなかった。要するに、この牝牛とどんなに格闘しても、もうこれ以上ミルクは採れなくなったのだ……。

瀕死の状況を生き返らせたのはパウリだった。彼は自分の禁制原理、すなわち「原子内電子よ、お前は、それが原子内におけるお前の仲間のうちのたとえ1個であろうとも、そいつが持っているのと同じの、いかなる量子数の値も絶対に持つてはならぬ！」を言い渡すことによって、スペクトル多重線の問題をあっさり片づけた。さらに、磁場中におけるスペクトル2重線をも包含するため、パウリは2つの値を取ることでできる4番目の量子数を威勢よく秤り取り、それを電子に与えてやった。専門家たちは、新たに現れる様々な理論的方法によってもう頭がぼうっとなっていたので、「では、あなたの禁制原理はどこから導き出されるのか？」とか、「4番目の量子数にはいかなる物理的意味があるのか？」といった類の質問を発してパウリを苦しめようとはしなかった。もし彼らが質問を発していたなら、量子論の最も傑出した成果の1つ——スピンに関する教説——は、萌芽段階で息の根を止められていたはずである。

非常にタイミングのいいことに、それより4年前、シュテルンとゲルラッハが面白い実験結果を得ていた。彼らは銀原子（その外殻電子は1個）のビームを強い非一様な磁場を持つ領域中で通過させた。するとビームはそこで2つに分裂した。原子が電氣的に中性である以上、その分裂は原子の磁気モーメントに対する作用によって引き起こされたことは明白であるように見えた——そのような場合、磁気モーメントは磁場の方向に、またはそれと逆の方向に向くはずであったからである。もし1つの「しかし」がなかったとしたら、この解釈がスペクトル2重線の問題を解決したように思われていたかもしれない。すなわち、「しかし」、相互作用領域に飛び込んできた原子たちが、きわめて多様な多数の方位のうち、いかなる不思議な仕方でも互いに反対方向の2つの方位のみを持ったのか、その理由をはっきり説明できた者はいなかったのである。

さて、「4番目の量子数」に関するパウリの発表に感銘を受けたゴーズミットとウーレンベックが洞察を試みた。いわく、原子の磁気モーメントではなく、原子内電子の固有磁気モーメントについて議論を進めれば、シュテルンとゲルラッハの結果ははるかに理解しやすくなる。彼らはこう考えた。「電子の大きさは非ゼロであって、電荷はその体積全体に分布している！ すなわち、電子が固有磁気モーメントを持つためには、電子は何をしなければならぬか？ そう、自軸の周りを回転することだ！」そこで若者たちは、英語で「スピン」と呼ばれているそのような回転に関するアイデアを携えてエーレンフェストのもとを訪れた。彼は「面白い！ 重要なのは、明確にイメージできるってことだ！ 発表したまえ！」と感想を述べた。「でも僕たち怖いんです、みんなに笑われなきやいいんですけど！」「怖いって、何が？」「僕たちざっと計算してみたんです。そしたら、電子の周縁部における回転の周速度は光速の何倍も大きくななければならないという結果が出たんです！」「ふうむ……確かにちょっとおかしい。何だろうな？ 簡単なメモを書いて、私に渡してくれないか。それから、君たちはローレンツのところへ行って、この話を全部直接話してみたまえ。彼はなにしろ、我々の間じゃ電子に関する大御所だからね！」彼らは話してみた。ローレンツは考えてみると約束した。それから数日後、ローレンツはゴーズミットとウーレンベックに、彼らのアイデアがいかなる結果をもたらすかについて書いた一文を手渡した。何か恐るべき怪物のようなものが得られた。回転する電子の磁気エネルギー

一は、その等価質量が陽子の質量を上回ることになるほど大きくなければならない。電子が普通の質量を持っているとした場合には、その半径は原子の半径を上回らなければならない！若者たちはエーレンフェストのところへ飛んで行った。「どうか僕たちのメモを返してください！」「回転する電子に関するメモのことかね？」と彼は聞き返した。「ああ、あれなら、すぐに送つといたよ。もう印刷中だ！」「エーレンフェスト先生、何ということになさったんですか！」「おい君たち、がっかりするな。世間はさんざん笑い物にするだろうが、そのうち沈黙しちまうさ。でも、アイディアは残る！」

すべてはまさにそのとおりとなった。必要とされたのは、スピンとは何かを明確にイメージしようなどという馬鹿げた真似をしないことだけだった。実際そうやってみたら、この概念は驚くほどの効率性をもって働いてくれた。人々は電子のスピンに対し、スペクトル2重線についての責任だけでなく、強磁性体の磁化率、超伝導性、超流動性……その他沢山のものについての責任を負わせた。このような地滑り的な大成功をバックグラウンドとした状況において、自由電子が実際にスピンを持っていることを実験で証明できた者は誰もいないという事実を指摘するのは、場所柄をわきまえぬ振る舞いであるかのように感じられさえする。例えば、電子束を2つに分裂させることはどうしてもできなかった。原子束を分けるのは大歓迎、だけど電子束を分けるのはあっかんべえ！何と面白いことになることか。電子たちのスピンと磁場との相互作用の力は、それらの電子を引き離すのには不足しているが、その代わり、質量が電子より5桁も大きい原子を引き離すのには十分なのだ！列車を引っ張る能力を持っているのに、正味荷重なしの自分自身の体を運んで歩く能力のない馬を、あなたは見たことがあるだろうか？

そんな馬たちが集まって群れをなしたとき、さらに面白いことになった。パウリが定式化した禁制原理は、同一原子内の電子に関するものであったことを覚えておいでだろうか？ところが、達成されたその範囲内にとどまることなく、この原理を一般的にあらゆる電子——特に、金属塊中の伝導電子——に対して拡大適用することが決定された。そのような電子のエネルギー分布を記述するフェルミ-ディラックの公式が作られた。禁制原理によれば、エネルギーの各値を持つことができるのは、そのような電子2個（互いに逆のスピンを持つもの）だけなのである。魔法みたいだな！教科書を開いてみると、離散的なエネルギー値を与える条件はこう書かれている。「金属塊の固有の寸法上に電子のド・ブロイ波の整数個——1個、2個、3個、等々——の波長が収まらなければならない」と。金属塊中の伝導電子が原子より少ないということはないということを知っていれば、電子状態が下から抜かさずに満たされていくとすれば、いかなるエネルギーがそれらの電子の最後の数対のものにならなければならないかを概算することできる。概算してみて、あっと驚こうではないか。超低温においてさえ、金属塊中の事実上すべての伝導電子は超相対論的電子であることが判明するのだ！事態がそのようなものだとなると、鉄塊は存在できないはずである。鉄塊は量子統計をほめたたえながら、一瞬のうちに蒸発してしまうはずだ！

理論家たちはすぐにこのことに気づいた。彼らは認めた。「確かに、道の曲がり角で何かが我々の車を少々外滑りさせてしまったようだ。学校の生徒たちにさえ笑われることになる……」と。またいんちきするはめになった。そこで、フェルミ-ディラック統計はエネルギー別の分布であるにもかかわらず、電子状態をエネルギー別ではなく、運動量別に勘定するようになった。それにどんなメリットがあるのか？と思われるかもしれない。なにし

ろ、電子のエネルギーが大きくなれば、その運動量もその分大きくなるのだから！ しかし、エネルギーはスカラーであり、運動量はベクトルであることにご注意いただきたい。電子の大群——その電子たちの運動量は相異なる方向を向いているはずである——が、例外の形で、同一のエネルギーを持つことが可能になった。このトリックにより、エネルギーについて必要とされる状態数が大幅に減少した。——それゆえ鉄塊はもう、一生の間に沢山のことを見るができるようになった。理論家たちは息を吹き返した。「我々にとってはこれで満足！ もう生徒たちに笑われることはない！」

なんてひどい。そうだろ？ あんたらは子供たちの喜びを奪ったから、それで幸せだっていうのかい？ そうかい、そうかい、しかたがない、いまに後悔するぜ。ほら、この子供っぽい簡単な質問に答えてみろ。金属中の伝導電子が原子と衝突すると、その結果、伝導電子の運動量のベクトルは1秒間に何百万回も変化する。この無秩序状態から、運動量の各値を2個以下の電子しか持たない理想的な秩序は、いったいどのようにして作り出されるのか？ 1個の電子と1個の原子とのそれぞれの衝突が生じた後、無数の電子のために、その運動量の分布全体を念入りに調べてやるのは誰なのか？

親愛なる読者よ、かつて、ユーモアのセンスを失っていなかった物理学者たちは、「マクスウェルの悪魔」という、俊敏な手を持った抜け目ないちっぽけな存在を考え出した。この悪魔は、気体で満たされた容器を2つの部分に仕切る壁の上において、最も素早い分子たちが第1の部分から第2の部分に通り抜けて行くようにするため、仕切り壁にあいている小穴の蓋をタイミングよく一瞬の間だけ開く。そのために特にエネルギーを消費することなく、分子のエネルギー分布を操作しているのだ！ でもどうせ、マクスウェルの悪魔はフェルミディラックのお化けと一緒に、自分のくだらなさを自覚して、恥ずかしさのあまりすぐにくたばっちゃうはずさ……。

ところで、フェルミディラックのお化けは金属中だけでなく、絶縁体中でも働かなければならない。でも、なしにしろ、金属と絶縁体の性質はまったく違っているのだ。どうして違っているのだろうか？ こう考えればいいと思われるかもしれない。すなわち、金属原子には外殻電子がわずかに1, 2個しかないのに対して、絶縁体原子にはそれより多い4~7個の外殻電子がある。固体の3次元構造を維持するためには、金属原子は必ず近接原子との間における自分の化学結合を周期的に切り替えなければならない。他方、絶縁体原子には、定常的な結合によって3次元構造を維持するのに十分なだけの外殻電子がある。その結果、金属は電流と熱をよく伝えるのに対し、絶縁体はその逆ということになる。金属は（光電効果や熱電子放出の際に）電子を簡単に手放すのに対し、絶縁体は簡単には手放さない。金属は可塑的であるが、絶縁体は脆性的である……。いわく、しかし、ノーだ！ ここではそんなふうに単純に考えちゃいけない！ 固体のバンド理論が我々に教えているように、ここでは量子力学的に考える必要がある！ と。でも、バンド理論は、自由電子ガスは絶縁体中にも存在すると教えている。絶縁体はいったいなぜ、電流を伝えないのか？ いわく、では説明しよう！ あらゆる固体中において、各自由電子はまるで他の自由電子が存在しないかのように、結晶格子のあらゆる陽イオンとのみ相互作用しているとみなされる。この冗談は科学的には「一電子近似」と呼ばれている。この冗談近似に従って——今度は大真面目で——波動方程式が解かれ、固体中の自由電子のエネルギーはどんなものでもいいというわけではない、という結果が得られる。すなわち、いわく、許容エネルギー帯もあれば、

禁制帯もあるのだ、と。いわく、金属においては、上側許容帯は完全には電子が充填されておらず、自由電子はその運動量ベクトルを変えられることができ、したがってそこでは電流が流れることが可能である。他方、絶縁体においては、上側許容帯は空っぽであり、次の許容帯——禁制帯によって上側許容帯と隔てられている許容帯——は完全に充満している。そこにはそもそも自由状態がない。絶縁体の場合、これはうってつけの話だ。いわく、絶縁体に電位差を印加すると、その中の自由電子は喜んで流れになって流れ始め、しかも自分の運動量ベクトルを変えられないのである、と。彼らがかawaiiそうだ！ 多分、彼らができることといったら、1 秒間に何百万回も格子原子と衝突することぐらいなのだろう。つまり、彼らは自分の運動量を変えられるとはいうものの、そんなこと恥ずかしくてできないのだ。うーん、そうだとすると、すべての希望はフェルミ-ディラックのお化けにかけるしかない。絶縁体中における電子の対向流——上下、前後、左右方向の流れ——が常に一様に保たれるようにするなどという仕事が手に負えるのは、このお化けだけだ。このお化けのプロ根性には、もう、うっとりするばかりだ！

一つだけ不可解なことがある。そのお化けは、自分がいかなる試料の中では導体中におけるように働き、またいかなる試料の中では絶縁体中におけるように働くべきかを、どのようにして察知するのだろうか？ なにしる、バンド理論は具体的な材料における伝導率がいかなるものになるかについて、まったく予測していないのだ。許容エネルギー帯の配置は、他でもなく、まさに経験的に見出される、つじつま合わせ的なパラメーターの組に一致している……。なのにおじさんたち、あんたらはこれを、「電子が金属中と半導体中においていかに運動するかについての理解」と呼ぶのかい？ そして、この理解なしにはコンピューターも携帯電話も存在しなかったはずだなどと言うのかい？ まったく、冗談が好きな人たちだな！

しかも、彼らによれば、量子統計に従うのは電子だけではない！ スピンは他の数多くの粒子、光量子に対してさえ与えられ、光量子はある頃から光子と呼ばれるようになった（光子中において自軸の周りを回転しているのは何かという質問だけは、けっして理論家たちに対して発してはならない——そんな「不適切な」質問をしたら、ぶん殴られちゃうかもしれないからね）。彼らいわく、ただし、光子における統計は電子におけるようなものではない、つまり、光子たちは禁制原理にくしゃみをひっかけたくなつたんだ、と。すなわち、光子たちは、複数の光子が同一の状態にあることを禁じられていない——それがたとえ、1 つ残らずすべての光子であろうと。理論家たちは、「それだけではない、彼らはそれを希求しているのだ——互いに同一となることを」と我々に断言する。でも親愛なるみなさん、あなたがたはそんなもの、どこで見たことがあるの？ ああ、レーザーでね！ で、それだけ？ どうやらあなたがたのところじゃ、普遍性ではなくて、ある種のみずばらしい個別的事例が得られているようだね。そもそも、光子の統計について語ること自体、こっけいな話だ。光放射のパラメーターは、光放射が発生する際の諸条件のみによって決定されている。したがって発生の諸条件をあるものとしたときには光子の「統計」はあるものになり、その諸条件をそれとは別のものにしたときには光子の「統計」はそれとは別のものになる。レーザーにおいても同様だ。単一周波数（シングルモード）レーザーは光子統計の偉大さの化身であると、あなたがたは我々に信じさせようとしているのではないか？ 我々のことを誰だと思ってるんだい？ 我々は知っているのだ、そのシングルモード動作を達成するた

めに、実験家たちがどれだけ苦労しなければならなかったかを——その1つのモード以外のすべてのモードを「制圧」する方法を開発するために。なにしろ、どのモードも、少しでもチャンスがあったら「うまいこと成り上がろう」としているからだ。その、互いの同一性への光子たちの希求とやらは、いったいどこにあるのか？「3つのタイプの嘘がある。嘘、厚顔無恥な嘘、そして統計だ」という有名なアフォリズムがある。もちろん、これだけでは不完全である。4つ目の場所に量子統計を付け加える必要がある。なぜなら、量子統計の創始者たちは「なるべく良いものを願っていた」^{〔訳注〕}からだ！。

もっとも、理論家たちが「なるべく良いものを願っている」のはいつものことだ。とりわけ、理論的思考は、ミクロ世界の奇妙な諸性質がボーアにおけるように公準として設定されるのではなくて、結果として得られるようにするため、たゆまず働いていた。その「なるべく良いもの」なるものが何であるかは、まったく明白だ！あれとあれ、これとこれ。提案されていたそんななるべく良いものとは、いったい何だったのか？そう、次のものから選択しなければならなかったのだ。第1に、ハイゼンベルクの行列力学、そして第2に、シュレーディンガーの波動力学。

ハイゼンベルクの主要なアイディアの要点は、数学的道具立てにおいては、ミクロ世界の対象物の場合も含め、実験において観測される諸量のみを用いるということにあった。ハイゼンベルクは問うた。「原子内の電子が核の周りの軌道上をどんなふうに飛んでいるのか、見た者はいるか？おや、誰も見たことがない？じゃあ、そんな問題について論じて空気を振動させるような真似はするべきじゃない！軌道なんて、とんでもないものを考え出したものだ！私自身は可観測量、すなわち原子の固有光学周波数およびそのスペクトル線の強度のみにもとづいて理論を構築するつもりだ！」彼の同僚たちは「よし、君は思う存分その理論を構築しろ」と言って彼を励ました。だが、ハイゼンベルクが「可観測量」の最良ではない選択をしたことにより、まさに最初の第一歩でへまをしでかした事実を彼にこっそり教えてやる者はいなかった。「光学周波数」について言えば、それはさらにひどい、とんだ代物だった。とは言え、とにもかくにもそこでは波長が観測されている。ところが、「強度」という言葉で理解されていたのは、双曲型振動の等価振幅——古典的意味における——であった。でも、その振幅を観測した者は誰もいなかった！なぜなら、原子振動には光学的な固有周波数は存在しないからだ！恐ろしい話だ……。ただし、それが恐ろしいのは、我々にとってである。量子論にとっては、それが正常なのだ。最初の第一歩におけるへまは、最終結果に対して少しも影響を与えなかった。

解決されたのは次のような課題であった。「可観測」量の組に対して、それと対応するように抽象的な量子論的諸量の組が設定された上で、前者を操作することにより、後者について何らかの判断を下すことは可能であるかという問いに対する答えが探し求められた。その結果、可能であることが判明した——口に出しては言えないようなどんな恥ずかしい嘘でも、紙の上 [= 論文] でなら言えたってわけだ。しかしこのとき、それらの組そのもの

〔訳注〕 これは、1993年に当時のロシア大統領エリツィンの配下であったチェルノムイルジン首相が自らの策定した経済改革案に関する記者会見の席で発した、「なるべく良いものを願っていたが、いつものような結果になってしまった」という有名な言葉の前半部分である。ロシア経済はエリツィン政権の施策によって奈落の底に突き落とされたことから、その後、この言葉は「地獄への道は善意で舗装されている」と同じような意味で一般に広く使われるようになった。

の組合せに関する一見したところ奇妙な規則が這い出てきた。数学者たちはそれをもっと注意深く眺めてみて、あっと驚いた。いわく、これは、行列の普通の乗法規則に他ならないではないか！ またいわく、抽象的な量子論的諸量を適切に記述するためには行列的な理解を利用すべきであることを、運命が指し示してくれたのだ！ そこで行列力学が一目散に走り出し、高い所へ一気に駆け上り、みんなに理論的頭脳のための糧をいっぱい与えてくれたので、ひらめきがまるで陽気な花火のようにポンポン打ち上がり始めた。それは、何に関するひらめきだったのだろうか？ ご説明しよう。その論理は次のごとし。行列が抽象的な量子論的諸量を適切に記述しているのだとすると、では、行列の代数的操作規則は何を記述しているのか？ ——もちろん、ミクロ世界における物理諸過程と法則性だ！ もしかしたら、半世紀前の行列代数の創始者たちは、無駄骨を折ったんじゃないのかい？ とんでもない、今じゃ行列代数は、そのすべてが役に立っているぞ！ つまり、こうしたのだ。古典力学の普通の方程式——ニュートン方程式、ラグランジュ方程式、あるいはハミルトン方程式——を取り上げて、そこへ古典的諸量の代わりに、それらの行列形式を代入した。そして歓喜の予感に胸をおどらせつつ、その怪物のうちに解を求めた。解が見出されたまさにそのとき、最も魅惑的なことが始まった。行列の成分は普通の成分ではなく、複素数成分、つまり虚数単位を持つ成分だった。それ以外のいくつかの数学トリックも行列と掛け合わせてみたら、解の怪物は前代未聞の珍奇な性質を持っていた。そこで彼らはそれぞれの珍奇さのうちに、お体裁だけだけど、物理的意味を探し求めた。「やいクソガキ、お前はいったいどこに隠れちまったんだ？ おーい、おーい！」 その意味をどんなに探し求めても、結局彼らが得たのはとんでもないシジフォスの労働だった。数学的操作のうちにはいかなる物理的意味も存在しないということを、彼らはどうしても悟ることができなかったのである。——物理的意味はあらゆるものに存在するわけではない、物理的理解のうちにしか存在しないのだ！ 理論物理学が行列力学から得た1つのささやかな、しかしきわめて価値ある贈り物がなかったならば、行列力学はそのまま消えていたはずだ。普通の数学では、積は余因子 [マ] の位置を入れ替えても変化しない。しかし、行列代数においてはそれは必ずしもそうではない。座標行列と運動量行列の積は、そのうちのいずれが1番目の余因子となり、いずれが2番目の余因子となるかに依存していることが判明した(そのような量の対は非可換量と呼ばれるようになった)。この数学的気まぐれからは、ハイゼンベルクの不確定性関係と呼ばれているもの、すなわち、座標の不確定性と運動量の不確定性の積は、プランク定数より小さくなり得ないという関係が得られた。この関係を生み出したものが数学的気まぐれであったとすると、この関係はなぜ今日、ミクロ世界の最も基本的な法則とみなされているのだろうか？ この関係は実験によって裏づけられているのだろうか？ 立派に裏づけられている！ ただし、それを裏づけたすべての実験は思考実験である。その例として、ハイゼンベルクのミクロ世界の顕微鏡をめぐる有名な思考実験があげられる。この実験は、どんなに目のでっかいあなたにも、電子における古典的軌道は見ることができないということを、2 掛ける 2 と同じくらい単純明快に示した。でも、どうしてこんな馬鹿げた結果が得られたのだろうか？ それは論理が鉄筋コンクリートだったからだ。いわく、電子のような微小なものを識別するためには、波長の小さい量子、すなわちガンマ線量子を利用する必要があるが、しかしガンマ線量子は大きなエネルギーと運動量を持っており、そのため電子上で散乱したとき、電子の運動をめちゃくちゃにす

るほど激しく電子をなぐりつける。この鉄筋コンクリート製論理には一つだけまずい点があった。それは、ガンマ線量子は運動量を持っていて、その一部を電子に与えるのだと敬虔に信じ込み、この不安定な砂地の上に論理を構築したことである。やったあ、信じるべきものを見つけたぞ！というわけ。でも、この信仰がなかったとしたら、彼らはいったいどこへ進むことができたのだろうか？ この信仰なしには、彼らの量子論全体はあつという間に崩壊してしまったに違いない。不確定性関係は信仰によってのみ支えられていた。しかし、確固として支えられていた。それはなぜか？ まず第1に、その定式化の単純さからして結構この上なかった。行列力学を知らない素人でも、不確定性原理の物理的意味について論じることが完全に可能だった。そして第2に、不確定性関係は、さらに「エネルギーと時間間隔」の対に関しても得られた。不確定性関係が理論家たちの前にまったく新たな展望を開いたのは、まさにこのバリエーションにおいてであった。「菓子職人は自分の失敗をクリームで、建築家はファサードで、医者とは土で覆い隠す」ということわざがある。そこで理論家たちはそれと同じ目的で、不確定性原理をシックなやり方で利用し始めた。この問題には後でもう一度立ち返ることにしよう。

ここでは、行列力学はしばらくの間その奇跡の道を前進し続け、一方、波動力学が静かに成熟して、果汁たっぷりの実をつけたという話をしよう。その創始者であるシュレーディンガーは連続媒質の物理に関する偉大な専門家であった。周知のように、連続媒質は自然界には存在しない。その代わり、この非存在物に関してその固有値の発見に関する課題が設定され、見事に解決された。その固有値の組は離散的なものとして得られた。それはまさにちょうど必要とされていたものだった！ 実は、普通の3次元空間における普通の波動方程式をもってしては、もう物理学者たちを驚かすことができなかったのだ。それゆえ、シュレーディンガーはこの新顔のために、多次元の数学的構造についての類似した方程式——いわゆる波動関数——を書いてやった。この方程式の解は多次元空間における波であるが、それは部分的には物理的3次元空間においても現れていた。シュレーディンガーは自分のアプローチをいくつかの個別的課題——1次元、次に2次元、さらに3次元のポテンシャル井戸——に適用しようと試み、多幸症にかかってしまった。どこにその秘密があったか、お分かりだろうか。なすべきことは境界条件をしかるべく与えることのみであり、そうすると最終的な解は、自然界で出会う任意の空間的配置を、さらにはエネルギーの固有値の任意の離散的組を記述していたのである。「リャ、リャ、リャ、シュ、シュ、シュ、お望みのものすべてを私は記述する！」——シュレーディンガーは耳にまわりついて離れなくなったこの流行歌を口ずさみながら、研究結果を発表した。しかし同僚たちは、当初、この新提案の重要性を高く評価するふりをしているか、あるいは本当は評価していないかのいずれかだった——特に、行列力学と取り組んでいた者たちは。彼らは歓喜に至る代わりに、この波動関数自体の陰に隠れている物理的意味とはいったい何なのかに対して嘲笑的な関心を示した。シュレーディンガーは悲嘆にくれた。「物理的意味なんてあいつらにくれてやれ。いったい誰の牝牛がわけの分からんことをモーモーほざいているんだ！」要するに、彼らはシュレーディンガーの感じやすい心の琴線に触れてしまったのである。彼はしかるべく考えをめぐらせることなく、波動関数、例えば電子の波動関数はその電荷の空間的分布を記述しているのであって、電子自体はド・ブロイにおけるのと同様、やはり波束であると言明した。そこで彼らはシュレーディンガーに、あらゆる点をよく分かる

ようにたっぷり説明してやった。すなわち、電子の電荷は空間全体に広がっているのではなく、小さな固有体積のうちに集中しているのだということ。また、電子は波束ではあり得ないということ。なぜなら、第1に、ド・ブロイにおけるのと同様、その波束は瞬間的に拡散するはずであるから。第2に、もし粒子が波束であるとする、それらの粒子はいったいどうやって衝突したり、互いに跳び離れ合ったりするのか？ それらの粒子は、波がそうしているのと同じように、互いの中を通過し合わなければならないはずではないか！

これに対してシュレーディンガーは次のやり方で答えた。彼は論文を発表し、その論文において、ミクロ世界の諸現象の記述に関する問題において行列的アプローチと波動的アプローチが等価であることを明確に示した。実際、得られたそれらの等価性は完全なものであった。いわく、行列力学の専門家諸氏よ、もしあなたがたが何かにおける何かを理解しているのであれば、私もそれを理解している。もし私が自分と他人の頭を混乱させているだけなのなら、あなたがたも同じことをしているのだ。そのどっちなんだ、選んでみろ！

ところで、そのような等価性、あるいはシュレーディンガーの言うところの「形式的同一性」は、一見したところ、ある点でまったくあり得ないように見えた。これら2つのアプローチは180度正反対のところに位置づけられていたからである。これらのアプローチの支持者たちが、それぞれ相手側を、まるで兵士がシラミを見るような目で見ていたのには、それなりのわけがあった。ハイゼンベルクの側はそもそも最初から離散性の考え方にもとづいた形式的・数学的アプローチを取っており、そこでは「粒子」が基礎概念となっていた。シュレーディンガー側のアプローチは連続媒体の古典力学で機能していた微分方程式を基礎としており、そこで基礎概念となっていたのは「波動」であった。しかし、そのような対立点にもかかわらず、これら両方のアプローチを1つにまとめようとする試みがなされていた。すなわち、粒子と波動の二重性を自らの下に服従させようという試み——ただし、それぞれの側からの試み——であるが、この二重性はいずれの側にも屈服しなかった。粒子と波動の二重性のうちに縫い込まれている矛盾は解消せず、かえって先鋭化する一方であった。そして、ミクロ世界で生じていることについての理解はどうしても得られなかった。さて、両者の間の緊迫したドラマが、時にはどんなところまで至ったか、ご想像いただきたい。1926年夏、ミュンヘンで開催されたゼミナールにおいて、シュレーディンガーは自らの波動力学について見事な講演を行ない、ほとんどすべての参加者を魅了した^{〔訳注〕}。聴衆は語り合った、量子飛躍はもう片がついた！、と。ハイゼンベルクががっくりきたことは言うまでもない。そこで彼はボーアに手紙を送り、ミュンヘンで何が起こっているかを知らせた。ボーアはシュレーディンガーに招待状を送り、コペンハーゲンの自分の家で1,2週間、人生の一大事について語り合おうではないかと提案した。実に面白いことに、コペンハーゲンにはハイゼンベルクもやって来た。「人生の一大事」に関する対話は、既にコペンハーゲンの駅にいるうちから始まった。シュレーディンガーは量子飛躍を攻撃し、それは途方もないたわ言であることを証明しようとした。他方、ボーアはその途方もないたわ言なしではやっぱりやっていけないことを説明した。この討論が毎日、早朝から深夜まで続けられた。この状態で数日が過ぎたとき、シュレーディンガーが高熱

〔訳注〕 以下、本段落の末尾までの記述はW. ハイゼンベルク『部分と全体 — 私の生涯の偉大な出会いと対話』（湯川秀樹序、山崎和夫訳、みすず書房、1999年新装版）の第VI章「新世界への出発」（特に118～124頁）の記述にもとづいて書かれている。

を発して床にふした。ハイゼンベルクはこう回想している。「ボーア夫人が彼の看病にあたり、お茶やお菓子を運んだりしたが、しかしそのときもニールス・ボーアはベッドの端に腰をおろし、シュレーディンガーに対し、“しかし、それでもやっぱりあなたは、……であることを理解しなければならないのだ”」、しかも、この場で即座に理解しなければならないのだ、等々と訓戒を垂れていた。

ボーアとの討論はハイゼンベルクさえをも「ほとんど絶望」に追いやり、「自然が、これらの原子実験において我々の前に姿を現しているように不条理なものであり得るということは、果たして現実なのだろうか」という疑問が彼を苦しめた。いわく、そりゃ、もちろんだ！ 不条理であり得るのは自然だけであって、理論は不条理ではあり得ないのだ！ おそらく、「電子には存在しない波動的性質を電子に帰したのは、何のためだったのか？」という疑問は、ハイゼンベルクを苦しめなかったのであろう。よろしいか、なにしろ、波動的性質は電子には存在しないのだ。デビッソンとガーマーが相手にしていたのは電子の回折ではけっしてないということは、彼らの実験の再実験を行なった様々な研究者によって再三指摘されていた。でも、そんな指摘をしちゃなんの！ 理論家たちにとっては、電子に波動的性質があることが、何が何でも、気が狂うほど望ましかったのだ。いわく、もしそうなら、もっとずっとずっと美しくなる！ ——お尻丸出しのくせに、ダイヤモンドのネックレスなんかつけちゃって！ もっとも、そのダイヤモンドとやらは偽物だって分かったけどね……。

ところで、もしかしたら、すべてはそれよりはるかに単純なのではないか？——もし、物質は基本的レベルにおいて、空間内において離散的であるだけでなく、時間内においても離散的であることを認識した場合には！ よろしいだろうか、素粒子とは、量子脈動子 [quantum pulsator の仮訳]、すなわち 2 つの状態の、固有周波数を持った周期的な交替なのである。ここではモニター画面上のピクセルが良いアナロジーとなる。ピクセルは周期的に光ったり、光らなったりする。この種のものは跳び跳びにしか進めないことは、子供にでも分かる。すべてが滑らかで連続的な古典力学の方程式がマイクロ世界には適さない理由が、まさにこのことから明らかになるはずだ。

しかし——ノーだ！ 量子脈動 [quantum pulsation] を仮定することはどうしても不可能だった。すぐさま沢山の馬鹿げた疑問点が生じたからだ！ その量子脈動はどこから取られるのか？ 量子脈動の周波数は何によって決定されるのか？ いわく、モニター上のピクセルとアナロジーなんてものを我々にこっそり吹き込まないでくれ！ ピクセルが点滅するのは、そのように作られているからだ。しかし、高度の科学的推理によれば、電子というものは作られることができない。電子は他ならぬ自分自身の力でこの世に出現したのだ！ そういうわけで、魅力的なのはただ一つ、固有体積を持った時間的に連続な小球のみである。その体積内には、不吉な相対論的無限大へと成長する能力を持った質量が集中している。そしてその体積全体には、どうやってだかは知らないが、電荷と呼ばれているものが広がっている。しかもおまけに、その小球は、そもそも明確なイメージを持たないスピンを持っている。いわく、我々の見るところによれば、ほら、馬鹿げた疑問点なんてないのさ！

とは言え、一つの疑問点が残っていた。ウィルソンの霧箱の中では電子の古典的軌跡が装いをこらして現れているように思われるのに、原子内では電子がまったく非古典的に振舞っているのはなぜなのか？ 実際には、電子がそこでどんなふうに振舞っているのか、そ

ここでどんなふうに運動しているのか、そもそも電子はそこで運動しているのかどうかを見た者は誰もいないのだ！ しかし、原子がどんなふうに放射したり吸収したりしているかにもとづいて判断すると、「位置」、「速度」、「軌道」といった古典的概念を原子内電子の場合に用いることは無意味だった。この状況の興味をそそる点は、次のことにあった。すなわち、理論家たちの見解によれば適切に原子の内部問題を記述しているとされる量子力学の深遠な学説は、抽象的な多次元空間内において働いていて、しかも非可換量を用いていたのであるから、したがって古典的で直観的な時間と空間のイメージとは原理的に両立し得なかった。ところが、我々の血の巡りの遅い頭の中には、それ以外の時間と空間のイメージはないのだ。それゆえ、量子論の専門家以外の地位ある理論家たちがその古典的直観をもって量子力学分野に参入しようと試みたとき、結果は必ず惨憺たるものとなった。その悲嘆に対する慰めを得るために可能な方法としては、例えば、自分の時間と空間のイメージを量子力学的概念に合わせて改造するため、我と自らのオツムのネジをぶっ飛ばすという手があった。いくつもの学派がこぞってこの道を歩み始め、自分自身ですらイメージできないことをいっちょまえに論じる能力を学派内の学徒たちが獲得したことを、異様なまでに自慢するようになった。これらの科学の進歩の子供たちとの間で行なわれた議論は、明らかにまったく無駄な営みであった……。

失業状態から抜け出すため、ハイゼンベルクは古典的な時間と空間のイメージを維持しつつ、しかしそのイメージが有効に機能する限界を設けるという提案を実に巧みに行なった。その限界の役割を果たしたのは不確定性関係であった。ハイゼンベルクは「不確定性関係が与える軌道よりも正確に、粒子の軌道について語ることは無意味だ。だから語るな。そんなものにはツバをひっかけろ。そうすりゃ、君たちの睡眠はただちに正常化する！」と説明した。同僚たちの不満はおさまらなかった。「ツバをひっかけろだって？ 各瞬間に正確な位置と運動量は存在するが、しかし我々はそれらを正確に測定できないということと、実際にそれらが存在しないということとは、別の話だ。さあ、どうなんだ？」ハイゼンベルクは説明を続けた。「これらの2つの場合がどうせ実験では区別し得ないのだとしたら、その2つにどんな違いがあるのか？ ついでに実験について言えば、ミクロな対象物に対して行なわれる測定の結果は必ず古典的な時間と空間の言語で反映されるが、しかしミクロな対象物そのものは、原理的にそれとはまったく異なった振る舞い方をしているのだ！ つまり、測定だけが、我々が消化することのできるミクロ世界における現実を生み出しているのだ！ ところが君たちは“でも、実際にはどうなんだ”などと、しつこく質問する！ いかなる測定も行なわれていないというのに！ 君たちはひと眠りして酔いをさましたまえ！ そうすりゃ、万事うまくいくようになる！」ここから量子力学の至宝——いわゆる確率論的解釈——まで、あと一歩だった。

さてここで、波動関数の物理的意味の件でシュレーディンガーをお手伝いしたあのボルンが、それより少し前に手柄をあげた [= どえらいへまをした] という話をする必要がある。ボルンによれば、波動関数の振幅の2乗は空間の相異なる点——特に原子内の相異なる点——における電子の存在確率分布を記述している。ボーアのこの解釈には、歴史家たちでさえ忍び笑いをもらしている。すなわち、この解釈は粒子の局在化、粒子の「位置」に関する古典的イメージにもとづいて立てられている。でもなにしろ、既にみんなが受けていた説明によれば、原子内では古典的イメージは機能しないのだ！ いわく、何だかんだ言っ

たって、どっちみち、古典論の醜い面下げて量子論の隊列にこっそり忍び込んできているじゃないか！……確かにそうだ、でも、ボーアの解釈には長所もあることを認めようではないか——なにしろ、この解釈はペテン師たちに沢山の喜びをもたらしてくれたんだから！ それはどういうことかと言えば、この解釈のおかげで、原子内電子に関して「軌道 [orbit]」という古典的概念が最終的に投げ捨てられ、「軌道関数 [orbital]」、あるいは「電子雲」という量子論的概念が導入されたということだ。この概念によれば、電子は、他ならぬその確率分布に従って何らかの仕方で原子内に広がっている。薄粥のような状態にある電子が、原子内でどのように運動しているのか——科学はもはやこの問題に悩んではいない。以前には、何はともあれ、何らかの遠心力が電子を原子核への落下から引き止めていた。ところが今や、薄粥状態、そして古典的運動の不在という状況の下で、遠心力は完全に無意味な存在と化した。では、いったい何が電子雲の原子核への内破 [implosion] を引き止めているのだろうか？ アカデミー会員たちはこんな問題には簡単に答えることができる。彼らは片目をつぶってこう答える。「これらの問題に関する 10 の研究所が 10 年かかって片付けられないほど沢山の問題について質問することができるのは、とんまだけだ！」彼らはなんてひどいんだ、冗談や洒落で答えるなんて！ じゃあ、真面目に答えたらどうなるの？ 彼らは人差し指を上げて相手を脅かしながら答える。「真面目に答えたら、とな。……じゃ、電子雲は何のために内破しなければならないんだ？ 軌道関数とはそういうものなのだ、話はこれで終わりだ、以上！」 そうなのだ……彼らが賢そうな顔をして馬鹿のふりをしたら、電荷のクーロン相互作用が原子内では働かないのはなぜなのかを説明する必要性が、いっぺんに消えてしまったのだ。これぞまさしく、山のように重い肩の荷がおりてほっとしたってやつだ！

ところで、もしかしたら、上の問いには、もっとずっと簡単かつ誠実に答えられるのではなかろうか？ 原子構造は電磁相互作用ではなく、粒子に対する特殊プログラム相互作用によって創出され、維持されている。それゆえ、原子構造は恣意的な構造とはならない。安定的な原子構造となり得るのは、そのバリエーションがプログラムによって指令されている構造のみなのである！ 電子と陽子の間の原子結合を——それらのクーロン相互作用をオフにすることによって——条件づけているアルゴリズムが、電子と陽子の量子脈動を交互に遮断している。量子脈動が電子にあるときにはそれは陽子ではなく、逆に、それが陽子にあるときには電子にはない、というように。そしてこの運動形態はエネルギーを持っている。そのエネルギーは指先や天井から天下り式に得られるのではない。それは、電子と陽子の固有エネルギーの減少、すなわちそれらの質量の減少と引き換えの形で得られる。もう一つだけ付言しておかなければならないのは、このエネルギーは、前に述べた周期的跳び移りが働く距離に依存している、ということである。ところでこのことは、電子と陽子における脈動の周期的遮断の周波数が所与のものであるとき、電子と陽子は互いにその周波数に対応した距離に存在しなければならないということを意味する。これこそが単純きわまる原子の構造なのだ！ ちなみに、原子核の構造もこれと同じ原理に従って形成されている。ただし、そこにおける量子脈動の周波数はより大きく、それらの遮断の周波数も同様であり、それゆえ、そこにおける質量欠損もはるかに著しい。このようなアプローチを取れば、原子核のすべての基本的性質がいっぺんに説明される——正統派物理学におけるように、出発点となる前提が互いに矛盾し合っている原子核モデル（液滴モデル、

シェルモデル、等々)を一切導入することなしに。それと同時に、多くの苦難を与えているコンプトン効果も説明される——ついでに反コンプトン成分もいっしょに。

原子核構造と原子構造がプログラムによる指令によって形成されているのに対して、分子構造はそれとはまったく別であることに留意しよう。分子はきわめて多様である。すなわち、分子構造はプログラムによって与えられた構造ではなく、ここでは恣意性が許されている。しかし、量子論は化学結合に関しても足踏みを続けている。研究者たちはイオン化学結合に手をつけようとはしなかった。イオン化学結合についてはすべてが明らかになっていたからである。科学によれば、塩化ナトリウムの分子——あのとってもしょっぱいやつ——がどのように形成されているとされているのか、あなたはご存じだろうか？ ナトリウム原子には外殻電子が1個あるのだが、その電子がナトリウム原子の暮らしにとってものすごく邪魔になっている。それゆえ、ナトリウム原子はその電子をやっかいばらいするため、そいつを与える相手をあれこれ探し回っている。それとは逆に、塩素原子の側では、完全な幸福を手に入れるためには電子がちょうど1個不足している。それゆえ、塩素原子はその大きく広げた両腕に電子をいつでも喜んで受け入れる用意がある。というわけで、ご当人たちが会おうと、ナトリウム原子は自分の電子を「やすやすと手放して」塩素原子にくれてやる——これは双方にとってうれしい話だ。2つの原子から2つのイオン——陽イオンと陰イオン——が得られ、2つは互いに引きつけ合う。はい、分子のできあがり！ でも……もし原子たちがこの話を聞けたとしたら、彼らは非常にびっくりはずだ。なにしろ、そもそも彼らは安定した原子だからである。ナトリウム原子は電子をそう簡単には手放さない。その電子はもぎ取らなければならないのだ。通常の場合、固有熱エネルギーはナトリウムのイオン化エネルギーより2桁ほど小さい。すなわち、電子脱離の「熱」バリエーションは脱落する。塩素原子の側にも、ナトリウム原子から電子をもぎ取る力はない。塩素イオン中におけるその電子の結合は、ナトリウム原子中におけるよりも弱い。では、ナトリウム原子が自分の電子を「やすやすと手放した」後、塩素はナトリウムに対していかなる誓いの言葉を語るのだろうか？ なにしろ、その誓いの言葉を通じて、2原子分子だけでなく、れっきとした結晶——いわゆるイオン結晶——が得られるのである。アーンショウの定理によれば、イオン結晶は存在することすらできない。静的電荷系は安定的であることができないからである。要するに、確かに、イオン化学結合についてはすべてが明らかになっていったことだ。それゆえ、研究者たちは同一タイプの原子(例えば水素)の間における共有化学結合の解明に取りかかった。もちろんそこでは、波動関数がなかったら何も解明されなかったに違いない。そこでは実に魅力的なことが発見された！ 水素原子同士が互いにめり込んでいく状態を記述すると、電子の波動関数は部分的に重なり合う——そして、それらの関数を使った数学トリックが可能になり、その結果、電子たちはあたかも互いに位置を交換し合うかのようになる。で、そのことからどんな結果が出てくるの？と思われるかもしれない。それは、その「位置交換もどき」から、いわゆる交換エネルギーについての表式が這い出てくるという結果なのだ。——いわく、分子が維持されているのは、この交換エネルギーによっているのだ！ ここで使われているトリックの要点は、その「位置交換もどき」が形式的な数学的手続き以上のものではないという点にある。初めてこの話を聞いた研究者たちは驚いた、「数学的手続きがどうやって分子内結合を生み出せるんだい？」と。彼らに対する説明はこうだった。「これは純粋に量子力学

的な効果であって、その古典的な類似物はない。慣れることだ！」

ついでながら、その後、「これは量子力学的な効果なのだ！」という論拠は議論好きな連中に対して魔法のような啓蒙効果を及ぼすことが分かった。「超伝導状態において、電子はなぜ結合してクーパー対になるのか？」「うーん、それは純粋に量子力学的な効果なのだ！」
「では、超流動性はなぜ生じるのか？」「これも純粋に量子力学的な効果なのだ！」……等々の問答によって、ついに完璧な啓蒙が達成される。学生の皆さんにお勧めしたい。オウムに「これは量子力学的な効果なのだ！」という言葉を教え込んでごらん、そしたらそのオウムは、ミクロ世界の物理の問題に関するどんな質問にも、高度の専門家みたいにちゃんと答えられるようになるよ。

しかし、確率論的解釈の話に戻ることにしよう！ なぜかと言うと、確率論的アプローチこそは、古典論的世界と量子論的世界を隔てる謎めいた境界の本質を理解するための秘密の鍵を与えるというアイデアが、理論家たちの頭にぱっとひらめいたからだ。彼らは実に面白い結果を得た！ 周知のように、マクロ世界における諸法則は相互間の一意的な対応関係を通じて発現する。すなわち、初期条件がある具体的なものであるときには、結果もある具体的なものになる。ところが研究者たちがミクロ世界に入り込もうとしたとき、彼らは不可避免的に一意性の欠如に直面することになった。散々考えた挙句、彼らは一意性の存在から一意性の欠如を得る方法を思いついた。いわく、一意的な諸法則はミクロ世界でも働いているが、しかしそれらが決定しているのは物理諸量そのものではなく、物理諸量の値の確率なのだ！ ミクロ世界ではすべてがあやふやでとらえどころがない、そしてすべてがぼんやり広がっていった、指の間からすべり抜けてしまうのはなぜなのか、その理由が分かった！ 不確定性がどこから来るのか、ついに分かった！ そして、問題とするべきことは、ミクロな対象物の状態が変化する原因がいかなるものであれ、その際、その状態が——あれこれの確率で——移行することのできるそれ以外の諸状態の豊かな選択肢がミクロな対象物にはあるということではないということ、また、それぞれの具体的な場合にそれらの諸状態のうちのいずれが実現するかを事前に予想することはできないということでもないということが判明した。そうじゃなくて、ある純粋状態から別の状態への移行とは、単純すぎるほど単純なことであるに違いない。すべては今までよりずっと愉快になった。彼らが我々に請け合うところによれば、ミクロな対象物は、混合状態、すなわち同時に複数の純粋状態にある機会をしきりにうかがっているのである。それは例えば、同時に5つの相異なるエネルギーを持つということ、あるいは同時に3つの相異なる場所に存在するということである。これはまあ、妻と一緒にいて、かつ愛人のそばにいて、かつそれと同時に図書館にいるといったタイプの話だ。重要なのは、混合状態において、そこに含まれるすべての純粋状態での存在確率の総和が1になるということである。さらにいわく、相互作用の結果生じるのは純粋状態の確率の再配分のみである。これはそうねえ、妻にフライパンで眉間を殴りつけられたら、愛人のそばにいる確率および図書館にいる確率は若干減少するであろうといったタイプの話だ。しかし、存在確率の総和はやっぱ1のままである。なんて素晴らしいんだ！ 理論家たちはついに強力な汎用認識ツールを創出し、こいつが、ミクロな対象物を相手とする実験から生まれたありとあらゆる不思議をめぐる当惑を、軽々と吹き飛ばしてくれたのだ！ このことを自覚した彼らは、量子力学は既に論理的完成の域に達し、物理的世界の構造の最も基本的な土台をつきとめたのだと語り始めた。

まあ、そりゃ当然だよ。かつて、世界の構造に関するあらゆる問題が「神がそのように創造されたのだ」で説明されていた時代があった。そして今や、すべてが「確率がそのようになっているのだ」という言葉で説明されるようになった。しかし研究者たちは、——きつと歓喜のあまり、なんだろうけど——これら2つの説明のうち2番目の説明は本質的には1番目と同一であることに気づかなかった。説明しよう。誰が何と言おうと、ミクロ世界では法則性が働いているのだ。すなわち、原子は固有の構造と固有の性質を持ち、けっして無秩序ではない仕方で互いの間でエネルギー量子を交換している、等々といったように。もしそのすべてが確率によって決定されているのだとすると、その確率自体は法則性に従っていなければならない。さもなければ、ミクロ世界は完全な無秩序状態になってしまうはずだ。そして確率が法則性に従っているのだとすると、このことが意味するのは、確率が初めから与えられているということだ！理論家諸氏よ、いったい誰がその確率を与える労を取ったのか？もしかしたら、あなたがたは今なお歓喜のあまり、判断力がちゃんと働いていないのではないか？

ところで、初めはみんながみんな喜んだというわけではけっしてない。例えばアインシュタインはそもそもこの話にびっくり仰天した。一大事が発生したのだ。もし基本的レベルで確率が世界を支配しているのだとすると、決定論的なマクスウェル方程式のおかげで出現した決定論的なローレンツ変換の上に構築されている相対性理論は、いったいどうなるのだ？な、なんと、無秩序だ！アインシュタインはそれまでの間は、やさしい叔父様の権利にもとづいて量子力学をちょこっとからかってやるだけだったのだが、確率論的解釈に事至った今、まるで叔父様が別人に変わったみたいだった。彼は生意気になった若造をその場でたたき殺してやる気になった。確率論的解釈では、自分がにっちもさっちもいかなかったのだ！哀れな若造の運命は風前のともしびとなった。アインシュタインは、どうしようもない不良の烙印を若造に押しつけてやるべく、新たな機会を執拗に探し続けた。しかし、ボーア率いるコペンハーゲン派の俊秀たちが、アインシュタインのあらゆる主張を根拠不十分として才気あふれるやり方で斥けたのであった……。大声での論争にすっかり喉が枯れてしまった双方のやんごとなき当事者たちは、今度はひそひそ声で和平協定の条文をつぶやいた。「相対性理論と量子力学とは原理的に相容れぬものなれど、両者を生かしむるべし。そしてもし何者か、両者を両立させんと試み、言わずとしれた馬鹿げたる結果を得る者あらば、その結果はその阿呆の欠陥のせいとするべし！」

この陰気なひそひそ話が聞こえた者は少なかった。そしておそらく、ディラックにもこの話は聞こえなかったのだろう。もし聞こえていたら、彼は電子についての相対論的量子力学の方程式づくりに取りかからなかったはずだ。「馬鹿げたる結果」が得られることが事前に分かっていたら、何のために努力するのか？とは言え、ディラックは稀に見るほど強い目的意識を持った人物だったから、最終的に得られた結果は、けっしてそのような「馬鹿げたる」ものではなかった。考えてもみよ。ディラックの理論からは、自由電子は正のエネルギー——固有エネルギーと運動エネルギーの和——だけでなく、それと正確に同じ大きさのエネルギー……ただし負のエネルギーも持つことができるという結論が直接導き出された。それだけでなく、負エネルギーを持つ電子は負の質量を持たなければならないという結論がただちに得られた。これってイメージできる？「負の質量」といった類のたった一つの珍奇な話と比べると、ルイス・キャロルの『不思議の国のアリス』に書かれて

いるあらゆる珍奇な話が、まるで幼稚な子供の片言のように感じられてくる。見よ、正電荷に向かう引力を受けている電子は、その負の質量により、その電子を引き付けているものの方向にではなくて、それと反対の方向に向かって加速するのだ！これは、誰かが川で溺れたら、そいつをそれより上流で探す必要があるというのに類する話だ。イメージできた？じゃあ、もう一つの例。負の質量を持つ電子が、理論家の非凡なおつむをぶん殴る。当然、その電子はおつむに運動量を伝える。ただし、その運動量は普通考えられる方向ではなく、逆方向を向いている。理論家をガツンと一発——やり方は額の真正面からガツンだろうと、額の横側からガツンだろうと大差はない——すると、彼のおつむは後ろへそっくり返るかわりに、前へこっくりするのだ！反対者たちは節度ある態度でディラックに話しかけた。「お聞きください、退廃を不条理まで進行させないようにしようではありませんか！」ディラックは食ってかかった。「何だと？お前たちは相対性理論や量子力学を退廃と呼び、これらの理論からの直接的帰結が不条理だと言うのか？！お前らがそう言ったって論文に書いてやるぞ……」すると反対者たちは、一瞬のうちに世間から姿を消した。彼らはそろばんをはじいたのだ、「ディラックの間違いに気づくなどという、軽はずみな真似をしちゃいけないのだ——あいつはものすごい才人だからな！まっ、しかたがない、あいつのために一肌脱いでやることにしようぜ……」と。そして一肌脱いだ。よろしいか、相対論的な見方によれば、自由電子のエネルギーは好きなだけ——無限大まで——大きくなるのだ。ディラックの幸運をもたらす手のおかげで、負の質量を持つ電子のエネルギーもまた、無限大——ただし負の無限大——に分け入ることが可能になった。しかしこのことは、最低エネルギー状態は存在せず、そうだとすると、正エネルギーを持つ普通の電子の状態は不安定であるということを意味する。それらすべての電子は量子跳躍により、負エネルギーの底なしの深淵に転げ落ちていくはずである。世界はかなり急速に、普通の電子の存在しない世界となるはずだ！いわく、我々がディラック先生、あなたはこれについて何とおっしゃいますか？……ふふん！そんな問題なんか、ディラックは追加命題を1個与えただけで、いっぺんに片づけちゃったよ。皆様、すべての負エネルギー状態は既に占拠し尽されております、という命題をね！底なしの深淵は既に満杯なのだから、普通の電子が転げ落ちていくべき所はどこにもない！普通の電子たちは生き続け、人生を楽しく過ごすがい！同僚たちはでっかいハンマーで頭をぶん殴られたみたいにいぼーっとなつて、こう尋ねた。「ということは、我々は負エネルギーの無限大の海の中に暮らしていて、しかもそのことに気づいていない、ということなのでしょうか？」ディラックは「おや、君たちは何のためにそんなことを言うのかね。よく見れば、何かしら気づくことができるのだよ」と言つて、同僚たちを正気に立ち返らせた。そして、啓蒙講習会の講義を開始した。いわく、負エネルギーを持つ電子が十分に高エネルギーのガンマ量子を捕まえて吸収すると（講義がここまで進んだとき、受講生たちの下顎がだらんと下がった。どう考えても、自由電子は量子を吸収することができない）、その電子は正エネルギー状態にぼーんと跳び上がる。そしてその結果得られるものは何か？いわく、それはこういう対だ。すなわち、普通の電子と、——以前の電子がいた場所における——負エネルギーの海の中の「空孔」との対なのだ、何となく分かるだろ？いわく、しかもこの「空孔」は単純なやつじゃなくて、そのすべてが、電荷の点でも質量の点でも正なのだ！同僚たちは何となく分かつて、そして確かに何かしら気づくことができたので、恐怖のあまり体が固まってしま

った。ディラックの理論では、電荷の保存則も質量の保存則も平然と踏みにじられているのだ。しかし、才人ディラックが反対者たちをそうやって恫喝したからには、もう誰もうんともすんとも言えなくなった。この悪夢の仕上げとして、電子と同様にガスを電離させるが、しかし疑いなく正電荷を持っている粒子の痕跡を撮影することにアンダーソン [Carl David Anderson] が成功した。ディラックの「ドーナツの孔」がウィルソンの霧箱の中で軌跡を残していたのだ！ ディラックは「うん、これぞまさしく既に1年前に私が君たちに話していたことだ」と言って、呵々大笑したのであった。

当時の状況全般を眺めてみると、物理学者たちの間における集団ヒステリーを抑止するべく、最も不屈な信念を持った物理学者たちはそのために必要とされる説明を行なっていた。いわく、ディラックは自分の相対論的量子力学方程式によって少々興奮しすぎたのだ。理性が健全な状態にある人間なら、加速器や真空放電管内部における電子の運動の計算のために、そんな方程式を適用しようとする者は誰もいない。ディラックは負エネルギーの海に関しても少々興奮しすぎたのだ。さらに、彼はその海の中の「空孔」に関しても少々興奮しすぎたのだ。アンダーソンがカメラで捕えたのはけっして「空孔」ではなく、紛れもない粒子なのである。見よ、ディラックはもっと、もっと、もっと興奮しすぎたのだ……。というわけで、彼はその後も興奮のあまりうわ言を言い続けるであろう——電子と同じ質量を持ち、正電荷を帯びているやつについて一番最初にしゃべったのは俺なんだぞ！と大声を張り上げながら。そのおかげで、ディラックは一番最初に発見された反粒子——陽電子——の存在を予言した偉大な理論家として、よりやすやすと認められることになるであろう。皆さん、万歳！ってわけだ。でも我々は、このうさぎさんをもっと先まで追いかけて行くことにしよう！

さて、話は次のことを指摘するのにちょうどいいところまで進んだ。理論家たちが物質の諸状態を量子化したときに彼らの燃えるような理性が達成したすべてのものは、彼らが電磁場を量子化したときに彼らの理性が達成したものと比べれば、がらくたでしかない。なにしろ、物質と場との間には原理的な違いがあるからだ。物質——それは自然界に存在するものである。他方、場はと言えば、そもそも、それは自然界には存在しない。量子場理論——それは存在しないものの理論である。場はそもそも、離れた電荷の相互作用における介在物として必要となったものでしかない。そのような介在物がなかったら、この世は物理学者にとって楽しくなくなる。いわく、もしそのような介在物がなかったとしたら、離れた電荷の相互作用から「神秘主義と降神術」の臭いがしてくるだろう、と。おいおい、そりゃちよつと言い過ぎだぜ！もし神秘主義者や降神術師が量子場理論を理解しようと試みたら、彼らは羨望のあまり顔面蒼白になってしまうに違いない！

様々な形態の物理的エネルギーを持ち得るのは物質のみであると、前に述べたことを覚えておられるだろうか？ そうだとすると、電荷と電荷の間の空間を満たす仲介物は不要ということになる。我々のこの見方に対して、「誰かにとって不要でも、別の誰かにとってはどうしても必要なのだ！ この問題は主観的好みのレベルではなく、客観的実験のレベルで解決されなければならない！」という反論があるかもしれない。まさか、我々がその反論に反対するとでも？ 勇気を持って真実を直視しようではないか。いかなる客観的実験も、場の挙動について直接的には語っていない。すべての客観的実験は、物質のみの挙動について語っているのだ。電荷の挙動を見て、「ああ、電子がほら、どこそこへ運ばれた……。

ほら見ろ、コイルの中でかくかくしかじかの大きさの電流が誘導されているぞ……。うん、それじゃあ、そこにおける場はかくかくしかじかだ！」という結論を下す。それだけだ！ 物質の挙動を眺めながら、場の挙動を臆測しているのである。そうなのだ、場の挙動とは何から何まですべて臆測であるということこそが、この上なく客観的なことなのだ！ いったい誰にとって、そんな臆測がどうしても必要なのか！

さてそこで、歴史を思い出してみよう。原子間の空間はエーテルによって満たされており、そこでは機械的応力・張力あるいは機械的波動さえもが生じ得ると考えられていた時代があった。そのすべてはマクスウェル方程式によって記述されていた。電荷が身震いすると、そこからエーテルを伝わって波動が走り、その波動が別の電荷を運動させる。いかなる神秘主義もなく、すべてはきわめて物理学的ではないか！ ところがその後、相対性理論の必要を満たすために、エーテルをお払い箱にせざるを得なくなった。そして、それまでの電荷の相互作用における介在物の代わりに、いったい何が提案されたか？ そう、場という単なる1つの名称が提案されただけだったのだ。いわく、これが新たな物理的現実でございます、なにとぞご愛顧のほどを！ でも、何に対する見返りとして、そいつをご愛顧してやらなきゃいけないの？ と尋ねたくなる。それは、そいつが他人を犠牲にして、他人の財産——マクスウェル方程式——を手に入れたことに対する見返りということかい？ しかし、他人の不幸の上に自分の幸福を築くことはできないと言われているではないか。まさにそのとおり！ 以前には、マクスウェル方程式は明確な物理的意味を持っていて、電荷間を走る波動は、——波動に対して指定されていたとおりに——媒質中における波動であった。今や、マクスウェル方程式は物理的意味を失い、波動は……真空中における波動となった。「いや、真空中ではない、そこには場があるのだ！」と、彼らは我々の誤りを正す。ああ、分かったよ、昔の媒質中の波動が場の中の波動になった——あなたがたにとってはそのほうが呑気に暮らせるってわけだね？ でも、「場の波動運動」とは、いったい何なんだ？ そこで、つまり何もない場の中で、何が振動するんだ？ 彼らは「場のエネルギー！」と答える。親愛なる皆さん、聞いてくれ、振動運動には復元力が不可欠なのだ。何もない場の中において「振動しているエネルギー」に対して作用する復元力とは、いったいいかなる本性を持った力なのか？ そんなもの、今まで見たことないって？ おやおや！ あなたがたはこの100年間、何と取り組んできたんだ——自分たちは場の理論を発展させているのだというふりをしながら？

場の理論は発展につぐ発展をとげたが、場に関する2つの主要問題はそれでもなお未解決のまま残っている。第1に、場のエネルギーは空間全体を連続的に満たしており、かつ無限に広いスペクトルを持っている。すなわち、場は、いわゆる無限個の自由度を持っている。ところで各自由度に対しては具体的な熱エネルギーが対応している以上、絶対零度以上の温度のとき（もっと簡単に言えば、常に）、任意の有限体積の場が持つエネルギーは無限大ということになる！ 親愛なる理論家の皆さん、あなたがたはそんなものをどこで見たことがあるのか？ 第2に、電荷とは無関係に存在しているとみなされていたエーテルとは異なり、場はまさに電荷によって生み出される。最高に美しい話だ。各電荷はそのささやかな寄与を場全体に与え、他方、その場全体のほうでは各電荷に作用を及ぼす。結局、各電荷が及ぼす作用には、自分自身に対する作用も含まれているということになる。もちろん、それは冗談だよね？ ちっとも冗談なんかじゃない。この「冗談」から、量子論では

発散をめぐるおぞましい問題さえ生じたのだ。それらの発散との間で、何と激しい闘いが繰り広げられたことか。あるいは彼らを「切り捨て」、あるいはまた彼らを「繰り込んだ」のであった。——で、その御利益はあったの？ 出来損ないはどんなに修正しても、出来損ないのままってことさ！……

ところが……、おや、「あなたがたの問題を解決できるのは私だけですよ！」という猫なで声が聞こえてきた。あれは誰の声だ？ 疲労困憊状態にあった理論家たちはびっくりして、「誰だ、お前は？」と尋ねた。「私のこと、誰だかお分かりにならないのですか？」「ああ、何だ、君か！ 量子場理論だ！ 君こそ、待ちに待った我らの理論だ！」というわけで、こんなことが始まった……。

手短かに言えば、場を徹底的に量子化したのである。もう、場にはわけの分からないいかなる波動も残らなかった。場は量子、あるいは光子の組になった。光子は互いを通り抜けて飛び回り、その際、互いに干渉しない。……でも、どうしてそうなるの？ なぜなら、光子とは波動の微小片のようなものだからだ、お分かりか？ いわく、波動にとっては、互いを通り抜けるのは普通のことなのだ！ 親愛なる専門家の皆さん、ちょっと聞いてほしい。もちろん、その発見のお祝いをあなたがたに言ってやってもいいけれど、でも、問題の解決に関する選挙前の約束はどうなったの？ 場の自由度の数は減少したのだろうか？ それでもやっぱり、元と同じように無限大のままだった。それだけではない。理論家たちは場の量子化の仕方を小細工して、温度が絶対零度のときでさえ、1つの自由度に対してゼロエネルギーが対応するようにしたのだ！ 今や、場は無意味な状況——絶対零度！——においてさえ維持され、前とまったく同じ無限大のエネルギーを持つということになった！ 我々はまさにそんなふうにして問題を解決しようとしているのだろうか？ おやおや。で、自分自身に対する電荷の作用は解消されたのだろうか？ いやいや、とんでもない！ その作用はこれで解消されるであろうなどと、よくもぬけぬけと言えたもんだ。とは言え、前進した点はあった。それは、以前の古典的出来損ないが量子論的出来損ないになり、そのおかげで、今や、その出来損ないは専門家たちの目にしか飛び込んでこなくなったことだ。

ところで、量子場理論がどんなに肩をいからせようと、量子によるエネルギー遠隔伝達の他に、さらに波動によるエネルギー遠隔伝達も存在する——原理的な波動という意味での。波動による伝達はパルスが消失するまで量子化することが可能であるが、しかし、その伝達はそのことによって波動であることをやめない。その伝達には原子さえも関与しているのだ！ 電波の伝播について言えば、その伝播は原子内におけるいかなる量子跳躍も伴ってはいない。エネルギーの波動による伝達と量子による伝達との間の原理的な物理的差異を、どうすれば見ないでいられるのだろうか？ なにしろ、それはこんなに簡単なことなのだ。つまり、前者の場合には、波動の周波数での電荷のあれこれの振動が生じているのに対し、後者の場合には、それが生じていないということだ！ いったい何のために量子化の手のひらを電波の領域まで広げる必要があったのか？ 酒を飲むなら、徹底的に飲め、そういうことなんだろう？ そんな酒盛りがいったん始まったからには、キュウリを残らず切り尽くすまで飲み続けろ、なんだろう？ 俺らはもう飲み始めたんだ、ええい、かまったこっちゃないってね。前のほうで、光子の大きさに関する問題について話したのを覚えておいでだろうか？ その話は、波長がせいぜい半ミクロンほどの可視光についての話だったから、今から思えば、まあ、それはまだ些細な話だった。ところで今度は、電波[radio wave]の代

わりに、ラジオ量子 [radio quantum] ——例えば波長が数メートルの——が飛び回っているところをイメージして見ていただきたい。簡単な計算が示すところによれば、ラジオ量子の大きさをめぐる問題は前の話より 200 万倍も先鋭化する。超長基線電波干渉計がすぐれた機能を発揮するのは、その受信アンテナが大陸間ほどの間隔で設置されている場合である。この場合のラジオ量子の大きさは横断面が数千キロメートル、長さはさらにそれ以上でなければならない。では、それはすなわち、発信側の原子から受信側の原子までの距離が例えば数十オングストロームのとき、そのような数千キロメートルもの大きさの桶は、前者の原子から後者の原子まで飛ぶことができるということか？ しかも、第1回ソルベイ会議の決議によれば、その桶は抜け目なく瞬間的に放射・吸収されるということか？ おじさんたち、あんたらは何かい、こんな話を全部信じてるのかい？

量子論の主要な成果が生まれたのはまだその先のことだった。その成果というのは、原子の場ではなく、自由電荷——例えば電子——の場との間の相互作用に関するものであった。もし場が光子の組であるのなら、自由電荷が場を通じて相互作用するためには、それらは光子を交換しなければならないはずである。しかし、自由電子は光子を吸収することも放射することもできない。電子にはそのために必要とされる内部構造が存在しないからである。一部の理論家たちは、電子の運動エネルギーは直接光子に転化することができると考え、その例として X 線をあげている。いわく、X 線は、X 線管の対陰極を衝撃する電子が急停止したときに生じるのだと。しかしそうだとすると——何しろ、停止の仕方は多様であり得るのだから！——X 線管の放射スペクトルは連続的なものになるはずである。しかし、その放射スペクトルは特徴的なピーク——対陰極の各材料に固有のピーク——を持っている。というわけで、事態は次のようになる。すなわち、飛来した電子が対陰極の原子から内部電子を叩き出し、それらの空位に外殻原子内電子が落ち込むとき、X 線量子が放射されるのである。このことは、特徴的なピークが X 線放射スペクトルにのみ存在し、吸収スペクトルには存在しない事実によって裏づけられる。要するに、自由電子は光子を交換することができないのである。特に、自由電子が静止している場合にはそうである——その場合にはエネルギー保存則が破られてしまうはずだから。

どうしよう？ ところで、量子論が何を教えているか、覚えておいでだろうか。それは、いくらでも大きなエネルギーの不確定性が可能であるという教えだ。ただしそれは、実は、十分小さい時間間隔においては、の話だ。俗に言うように、いいことは長続きしないものなのだからね。しかし、理論家たちは無分別にもその教えに大満足したのだ。なにしろ、とっても魅力的なものが手に入ったからだ！ もし基本法則がたとえ短時間でも働かないということにして、その間に自分の用件を片づけることができると仮定すれば、いくらでも好きなことを遠慮なしにでっち上げることができる！ よし、というわけで、理論家たちは先を争って走り出し、でっち上げを始めた。そして、仮想光子と呼ばれるものを創造した。仮想光子の場合には、「エネルギー保存則はあたかも満たされていないかのようである」とされている（これが正式な定式化なのだ！）。神秘主義者や降神術師にご用心！ 理論家たちは、「エネルギー保存則があたかも満たされていないかのようである」ことについて責任を負わずにすむようにするため、仮想光子は原理的に検出されないという公準を設定した。仮想光子が現実の光子と本質的に異なっているのは、それが「あたかも存在しないかのようである」！という点である。それ以外の点では、仮想光子はそのすべてが科学に従

っている。仮想光子は完全に現実的なエネルギーと運動量を運ばなければならないのだ！それは当然だ。なぜなら、2つの電子の間の相互作用は、一方の電子による仮想光子の放出、そして他方の電子によるその吸収とみなされているからだ。重要なのは、一般大衆が目をパチクリさせないうちに、この話を十分迅速にでっち上げることだった。そこで、この種の奇跡話を一般大衆にとって馴染みやすいものにするため、科学的には「ファインマン・ダイアグラム」と呼ばれている図式的コミックスが開発された。そこでは、波線と直線を区別することをちゃんと習得しさえすれば、ただちに自らを仮想現実に関するひとかどの専門家と感ずることができる。見よ、この仮想現実があらゆるものに対して、いかに直接的に、隅から隅までがっちりと仮想化の力を及ぼしているかを。そして重要なのは、これらすべては反証不可能であるということだ。なぜなら、いわく、仮想現実を検出されないのだから！このような愉快的な絵は、「でっちあげろ、思いつけ、試しにやってみろ」方式で一氣に描ける。必要なことは、直線を描くときは手を震わせてはならないという唯一の規則を守ることだけだ。震えない手でそんな絵を1,2枚描いてみると、仮想現実が現実の現実にも劣らず現実的だという確信がひとりで湧いてくる！学生たちは簡単に酔い痴れてしまう……。

後で試しに、そういう仮想現実の狂信者たちに、いかなる場も存在しないのだということを説明し、説得してみたまえ！ちなみに、現代医学では、仮想現実依存症についてほんとうに公式に語られている。権威ある医師たちは、この病気の患者のケアについてこうアドバイスしている——仮想現実との接触は1日1時間以下に制限すること、気晴らしになるような様々な話題についての会話をもう少し多くさせること、等々。そのとき、名医たちは自分たちの手ばかりにはっと気がついた！——俺たちは他ならぬこの病気で苦しんでいるのだと、物理学者たちが文字どおり大声で症状を訴えていたのに、医学は彼らを助けに駆けつけなかったのだ、と。ともあれ、ついに治療が始まったのは実に喜ばしいことだ！

場の狂信者たちのうち、いかなる場も存在しないということをすぐに理解するのが困難な者に対しては、2回の診察でその治療任務の遂行を試みることができる。そのためには、まず手始めとして、いかなる光子も存在しないということを習得させる必要がある。既に述べたように、実験は次のことを示している。光エネルギーの量子は原子から原子へ——少なくとも数メートルの距離を——事実上瞬間的に跳び移る。そのような跳び移りの際、運動量の伝達は生じていない。著者よ、あなたは「光子」はそもそも飛んではいけない、とりわけ、光速で飛んだりもしない、そして運動量を運んでいない、と言うだけでは足りないとも言うのか？ そのとおり。でもこの話にはまだ続きがあるのだ。「光子」は、周波数の重力シフトも、周波数の2次ドップラーシフトも受けてはいない。これらの効果を受けているのは、物質内におけるエネルギー準位のみなのである（「相対性理論のイチジクの葉」[前掲]を参照のこと）。さらに、「光子」は周波数の1次ドップラーシフトも受けてはいない。この1次ドップラーシフトに関与しているのはエネルギーの量子跳び移りのナビゲーターであるが、しかし、光量子を与える側および受け取る側の原子がそこでどのように運動するかということは、跳び移らされるエネルギー単位量の大きさに影響を与えない。そして最後に、光子に対し、光子から物質粒子に、そして物質粒子から光子に完全に転化する能力を持った才能あるまっとうな粒子というレッテルを貼ろうとするのは、まったくの見当違いである。誓って言うが、そのような才能が発揮されることは決してない！

十分なエネルギーを持ったガンマ量子がいかにして電子-陽電子対に威勢よく変身するかという作り話においては、あることがわざと言い残されている。それは他でもない、ガンマ量子は重原子核に当たらなければならないということだ。その対はまさにそこから飛び出してくるのである。原子核がなければ、そのトリックは成立しないのである。……ちゃんとした資格を持った専門家たち——聖なる科学界、別称ガラクタ——は、まるで、つまらない詐欺にひっかかっているかのようだ。電子と陽電子は各 511 keV の 2 個の量子に転化して完全に消滅するとかいう、いわゆる電子と陽電子の対消滅に関する大規模詐欺については、もはや何をか言わんやだ。からかわないでくれよ！ここで得られるのは 511 keV の 1 個の量子なのである。そして電子と陽電子は完全に消滅するのではなく、強く結合した対を形成するのであって、その対は十分なエネルギーを受け取ったときには再び分裂することができるのである。光子と物質粒子の間には相互転化の可能性はない。あるのはそれに関するおとぎ話だけだ。ああ、このおとぎ話を現実に見せかけるために、実験家たちは何と手の込んだ計略を用いたことか（「相対性理論のイチジクの葉」[前掲]を参照のこと）！

では、まっとうな粒子であることが否定された後、光子にはいったい何が残るのだろうか？ 1 通の在職証明書だけだ、そうだろう？ そしてその在職証明書には、その愚か者のために、「本証明書は、この者が絶対的に安定な 4 種類の基本粒子の 1 つであることを証明する」と書かれているのではないか？ 親愛なるみなさん、愚か者のために書かれた書面によって物理的性質を解明することなどできはしないのだ！ この種の紛争の審理においては、実験閣下が最高裁裁判官になるべきであるということに、多分、すべての人が同意されるのではなからうか？ ならば、実験が下した判決を受け入れていただきたい——光子は存在しないという判決を。そしてここで、量子論が何を教えているか、思い出していただきたい。量子論いわく、場とは光子の組である、と。とすれば、光子が存在しないのなら、場も存在しないということになる。お分かりか？

「しかし、電荷は互いに対して直接的に作用することができないではないか！」と彼らは叫ぶ。もちろん、できない。さもないければ、おかしいことになるに違いない。とりわけ、同符号の電荷は互いに斥け合うと信じている場合はそうなる。1 個の自由電子について検討してみよう。その電荷は、その体積全体に何らかの仕方で広がっているとみなされている。本当に本当の話、素粒子物理学には形状因子の決定、すなわち粒子の体積中における電荷分布を記述する関数の決定というれっきとした実験分野がある。さてそこで、電荷が電子の体積全体に広がっているということは、すなわち、1 個の電子の各素片に対しては素片電荷^[訳注]といったようなものが対応しているということを意味する。もしそれらの素片電荷同士が押しのけ合っている——しかも、ものすごい力で！——とすると、電子が爆発するのを抑止している反作用が存在していると仮定せざるを得なくなる。それだけでなく、そう仮定した場合、電子の素粒子としての評判が落ちることになる。電子を爆発させる作用とそれを抑止する作用のエネルギーは、電子の静止質量に相当するエネルギーを何桁も上回る、途方もないものになるはずである。しかしそうだとすると、電子と陽電子が

[訳注] 「素片電荷」は仮訳である。このロシア語の用語はごく一部でしか使われていない用語であり、辞書には収録されていない。

対消滅するときには、その途方もないエネルギーは何の痕跡も残さずに消え失せるということになる。そこでは、仮想光子でさえ何の助けにもならないはずだ！

ところで、もしかしたら、すべてはそれよりはるかに単純なのではないか？ 粒子は、その中に、ある特定の周波数における量子脈動が存在する場合に電荷を持つ。その周波数を電子周波数と呼ぶことが提案されている。なぜなら、電子におけるその周波数は、まさにその周波数（約 $1.24 \cdot 10^{20}$ Hz）であるからだ。電荷に正負の2種類が存在することは、電子周波数における量子脈動が互いに逆の2つの位相を持っていることに起因しているのである。したがって、電荷はエネルギーの特徴ではなく、電荷同士はけっして互いに作用し合わない。粒子における電子周波数の存在——それは、電磁相互作用と呼ばれているものの働きを実現せしめているプログラムパッケージに関するマーカー（標識）であるにすぎない。粒子は次のマーカーを持っている。すなわち、そのプログラムパッケージが粒子に対して作用し、その粒子の各種エネルギーの転化を制御することのマーカーである。複数の自由荷電粒子においては、それらの固有エネルギーと運動エネルギーの間の転化が制御されている。プログラムパッケージのアルゴリズムの内容とは、おおよそ、「諸電荷の平衡分布の攪乱を除去するように運動せよ」といったものである。大雑把に言えば、まさにこれが自由電荷の電気力学のすべてなのだ！ いかなる場も、いかなる波動もない。我々にとって波動のように思われるもの——それは、そのプログラムパッケージ自体の応答速度によって条件づけられた遅延を伴う、電荷の逐次的移動に他ならない。その応答速度こそが、「真空中における電磁波の速度」の大きさを決定しているのである。

エネルギーの量子跳び移りのナビゲーターの応答速度もそれと同様にして発現している。量子の受け取り手となる原子の探索が光速で行なわれ、次に、それっ！とばかりに、原子から原子へのエネルギー単位量の瞬間的跳び移りがなされる。もちろん、そのような過程はけっして原子自体の性質から発するものではなく、それゆえ、何らかの追加的制御によって条件づけられているのでなければならない。アカデミー会員たちは我々に助言する、「ははあ、その制御というやつは、何か超自然的なものだな。そんな超自然的なものなど、存在しない！ 存在するすべてのものは、自然的なのだ。それを超えるもののことなら、精神科医に相談しろ！」と。ちょっと待った、精神科医に相談すべきなのは誰なのか、はっきりさせようじゃないか。「超自然的」という言葉は多義的な言葉だ。あなたがたの言っているのは、「物理学的測定装置に対して作用しない」という意味での「超自然的」か？ それなら、それはまさに、あなたがたの「場」の特徴点だ。それは、あなたがたが存在しないと主張している、典型的な超自然性だ！ それとも、もしかして、あなたがたが念頭においているのは、「オッカムの剃刀が切り落とそうと待ち焦がれている不要な存在」という意味での「超自然的」か？ おやおやおや！ しかし、あなたがたの場の理論——存在しない場についての理論——には、不要な存在が山ほどあるではないか。そこでは剃刀では足りない、ブルドーザーが必要だ！ それとも、念頭におかれているのは、「理解するにはあまりにも複雑すぎる」という意味での「超自然的」か？ 自分を卑下するふりをするのもいい加減にしろ！ 我々が量子脈動子をモニター画面上で点滅するピクセルを例として説明したことを覚えておいでだろうか？ このアナロジーを発展させよう。2つのピクセルが画面の別々の場所で点滅している。すると見よ、（コマンド「Op！」に従って）次のことが起こる。一方のピクセルの点滅の周波数がある大きさだけ減少すると、他方のピクセルの点

滅の周波数がそれと同じ大きさだけ増加するのだ。これがエネルギーの量子跳び移りモデルである。学校の生徒にも理解できるモデルだ！ 比較のために言うと、例えば「光子の生成演算子」とは何かなどということは、生徒には絶対に理解できない。あなたがたに内緒で教えてあげよう。それは精神科医にも理解できない！ ただし、精神科医にそれを説明しようとはしないこと——さもないと、あなたがたにとって状況はさらに悪くなる。

以上述べてきたすべてのことを否定して、光エネルギーはそれでもなお放射源と受け手側に依存することなく存在しつつ、空間を貫通することが可能であるという考え方を支持する証拠を、どなたかお持ちだろうか？「証拠はあるぞ！」とアカデミー会員たちが叫び、感動的な話を語り始める。いわく、我々から10光年離れたところで強力な閃光を発生させた後で、その発光装置をいっぺんに破壊した。その受光装置のほうは、それから10年目が終わる直前になって我々が完成させたのだが、それでもやはり光信号を受信することができた！ いわく、発光装置は既になく、受光装置がまだ存在していないその10年の間ずっと、その光エネルギーはいったいどこに存在していたのか？ お答えしよう。それがどこに存在していたかは明らかだ——建造中の受光装置に向かって、星間空間中の原子から原子へと跳び移っていたのだ。アカデミー会員たちは勝ち誇ったように叫ぶ、「そうだとすると、透過される光の上限強度は、光がそこを「跳び移っていく」原子の濃度によって決定されるはずだ！ その濃度が小さければ小さいほど、光の透過のされ方は悪くなるはずだ！ それは間違いだ。我々は実験室において超高真空中で強力レーザー光線を通して！」と。もちろん、通している。ただし、注意してもらいたいのは、それが実験室でということだ。そこでの超高真空区間の長さは微々たるものだ。そこでは光は入射口から出射口までひとつ跳びで跳び移ることができる。では広大な宇宙空間ではどうかと言えば、そこではすべてがまったく異なっている。そこでは物質濃度の小ささが、現実には透過能力に対する制限要因として働いている。「太陽定数」、すなわち太陽放射の強度の恒常性を条件づけているのは、放射源である太陽の活動の安定性（太陽における安定性とはいかなるものなのか？そこで何が起きているのか、ちょっと考えてみていただきたい！）ではまったくなくて、まさに、太陽放射をその透過能力の極限において透過させている惑星間物質の濃度の小ささであるという意見がある。その濃度が1桁大きければ、太陽は我々を焼き尽くしてしまうはずである。信じられない？ では、大彗星が太陽と地球の間を通過したとき、何が起こったかご存じだろうか？ 太陽から遠ざかる方向を向いた彗星の尾が高い物質濃度を持ったゲートを形成し、そこを通じて太陽が通常よりも強く地球をあぶったのである。それが原因でどこかでは干ばつが起こり、またどこかでは逆に洪水が起こった……そのせいで飢餓や伝染病、戦争が……。しかし、大昔から言い伝えられている異変の予兆としての彗星に対する恐怖は愚かな迷信にすぎないと、現代科学はみなしている。それは無知な人民大衆がひまつぶしに思いついた迷信だと……。では、現代科学よ、答えてみろ、レーザー光線で宇宙飛行体を破壊するという面白い企てが挫折したのは、なぜなのか？ 装甲板に溶融穴をあけたり、有翼ロケットを墜落させたりする能力を持つガスダイナミックレーザーの実験用試作機は現に存在する。実は、その能力は地球表面近傍における能力なのである。宇宙空間では、そのような結果はまったく得られていない。それはなぜか？ 宇宙空間では真空の質が完全に良質だからだ。「強力レーザー光線」を作って、その真空を通過させてみる！ ところが、それはできっこない。空気を通過して金属に溶融穴をあけることのできる

レーザーは、宇宙空間においては、スパイ衛星の感光素子を故障させるというたわいもない任務を果たすのがやっこさなのだ。ただし、親愛なる読者よ、ご注意のほどを。これは軍事機密なのだ！ もしこの軍事機密が漏えいしたら、「スター・ウォーズ」をテーマにした作品を作っているアニメ製作者、映画製作者、コンピュータゲーム製作者に、いったい何が起こるだろうか？ 彼らに対する需要が激減する！ 世界経済はそのようなショックに対する備えができていない！

さて、この話も終わりに近づいてきたが、原子核物理学分野において、量子論で理論武装した学者先生たちがどこに到達したかを眺めてみる時間はまだ残っている。彼らは、正電荷を持つ陽子同士は、クーロンの法則に従って互いに斥け合わなければならないということから出発した。いわく、核力は「斥力よりも」はるかに強いが、その代わり、核力は近距離力である。つまり、陽子はただ単に互いにおでこを触れ合わせた状態で凝集しているのだ。すなわち、おでこが触れ合うまで陽子同士が接近するためには、それらはまず最初に、斥力に勝たなければならない、つまり、いわゆるクーロン障壁を克服しなければならない。本来の自然条件下でそのようなことが起こるためには、陽子はものすごくいかした仕方で衝突しなければならない、つまり、数千万度の温度に相当するエネルギーを持たなければならない。そんな温度は自然界のいったいどこにあるのか？ 学者先生たちはその謎を解いた。「それは恒星の中だ！ そこでは原子核同士がひつつき合っている！」 しかしその後、悪夢のような事実が明らかになった。より正確には、太陽内では原子核は互いに剥がれ合っているのだ。太陽にはきわめて多様な原子が落ち込んでいるが、太陽から飛び出してくるのは陽子なのである！ これは、太陽では熱核反応が進行しているというバージョンとはどこか整合しない！ 学者先生たちは全然動じなかった。「平気、平気！ 我々の実験室条件下では、すべてがそのとおりになるだろう！ なぜなら、加速器では陽子を必要なエネルギーまで加速できるからだ。我々は今ちょうど、ターゲットに陽子を照射しているところだ。陽子はまさしく、ターゲットの原子核にひつつくことになるだろう！」 ふん、それが何か？ ここでもまた、ある種の困惑が生まれた。エネルギーが小さいとき、陽子は単に原子核上で散乱していただけだったのだが、エネルギーが大きくなったとき、陽子は核反応を引き起こしたのだ。たとえ陽子が原子核に「ひつついた」としても、そのような原子核は長生きしなかった。もっとも、これには例外があった。すなわち、このような方法でリチウムからベリリウムの同位体が得られたのである。しかし、この反応は共鳴的な性格を持っていた。この反応は、ターゲットに衝突した陽子がある1つの特定のエネルギーを持っている場合にのみ生じたからである。要するに、実験室実験は次のことを完全な確定性をもって裏づけた——原子核の構成要素がどこからやって来るのか、科学にはまったく分かっていなかったということ。

学者先生たちはひそひそ声で言い始めた。「原子核の構成要素がどこからやって来るかなんてことで、我々は何のために悩まなきゃならないんだ？ 我々にはもう何もやるべきことはない、そうだろう？ それらは既にどこからやって来たのだというところから出発しようではないか。それらは何にもとづいて維持されているのかを考えよう——それがすべてだ！」 言ったからには即実行。いわく、核力の中間子理論を受け入れろ！ 迷うことなく、すべてを最新の「量子力学」モードに従って受け入れろ！ いわく、つまり手短に言えば、核子——陽子と中性子——が互いに引きつけ合っているのは、互いにパイ中間子を交換し

ているからだ。しかもそのパイ中間子は単純な粒子ではなく、仮想粒子だ。それが仮想粒子であるということ——それは原理的なことであり、様々な不明点を一気に吹き払ってくれる。例えば不明点その1：核子内のパイ中間子はどこからやって来るのか？ どこからもやって来はしない！ それらは「あたかも存在しないかのような」ものなのだ！ はい、お次は不明点その2：核子の間における有質量粒子の投げ合いは引力ではなく、斥力しか生むことができないのではないかと！ いわく、ワッハッハ！ それは、古典力学ではそうだとことだ。ミクロ世界ではどんな奇跡でも起こり得るのだ——横方向への引力でさえも！ ちょっと待ってくれ！ あなたがたによれば、仮想パイ中間子は核子から核子へ本当の電荷を運ぶことができ、それによって中性子を陽子に、あるいは陽子を中性子に転化させる。周知のように、中性子は陽子に転化することができる。しかし、その際に解放されるのは電子なのであって、中性子と陽子の質量差より2桁大きい質量を持つパイ中間子ではない！ いわく、ワッハッハ！ じゃあ、不確定性原理は何のためにあるんだ？ この原理によれば、エネルギー保存則は「あたかも破られるかのようなものである」ことができる。パイ中間子の質量に相当するその「破れ」にもとづき、核内におけるパイ中間子の寿命(10^{-23} 秒)が得られた。この時間の間に、パイ中間子は光速で運動することによって「核力の作用半径」をкаろうじて走破することができるはずだ。ゼイゼイ言いながらだが、しかしできるはずだ！ いわく、原子核はまさにこれにもとづいて維持されているのだ！

この小ずらい説明バージョンは、至極単純な問題に対してすら答えを与えていなかった。その問題とは、もし核力が核子の任意の対（陽子-陽子、陽子-中性子、中性子-中性子）の間において同一であるのだとしたら、陽子のみ、あるいは中性子のみからなる核子複合体は、なぜ存在しないのか？ またそもそも、原子核内における中性子は何のために必要なのか？ しかも、必要というだけではない。原子核が安定的であるためには、核内の陽子が多くなればなるほど、ますます多くの余計な中性子が必要になるのは、なぜなのか？ ……等々の、なぜ、何のために、あるいは何の根拠があつて、といった問題である。そのような至極単純な問題があまりにも沢山存在したため、中間子論は、核力理論が答えるべき主要問題、すなわち、結合している核子における質量欠損はどこから来るのか？ という問題をついに解明することができなかった。まさにこの質量欠損の本性の理解に達することができなかったにもかかわらず、原子爆弾の製造が成功したのだった！

学者先生たちはその耳をつんざくような成功の轟音による励ましを受けて、さらにもう一つの善行を思いついた——いわゆる「制御熱核融合」である。加速器での核融合実験で得られたみじめな体験は、アカデミー会員たちを少しも困惑させなかった。彼らは一般大衆に向けてこう説明した。「もし我々が超軽原子核を数千万度まで加熱できるようになれば、世界のエネルギー問題は解決される。数千万度まで加熱したとき、原子核はクーロン障壁を克服することが可能になり、まるで恋人たちみたいにひつつき合って、膨大なエネルギーを放出するのだ！」と。おじさんたちよ、そのためには、何のために数千万度が必要なんだい？ 最も単純な軽原子核の融合反応——陽子1個と中性子1個の融合——を取り上げてみよう。この反応は、常温においてさえも膨大なエネルギーを放出しながら進行するはずだ。ここでは反応物はクーロン障壁を克服する必要がないからである。ほらまさに、世界のエネルギー問題の解決だ！ もしかしたら、あなたがたには商業量の陽子と中性子の入手に関して何か困難な点があるとしても？ じゃあ、まず最初に小型の陽子-中性子加熱器を

作って、それを大統領にプレゼントすればいいのに。大統領は大喜びするはずだよ、「こんな誰も持っていない、でも私にはある！」と言って！ しかも、その加熱器は便利で安全、環境にやさしくて、おまけに廃棄物ゼロだ！ 大統領はその加熱器から滴り出る重水を専用のビンに収集して、そいつを原子力発電所長にいい値段で売ることができるはずだ。聞くところによれば、原子力発電所じゃ、そのお水はものすごい需要があるそうだから……。しかし、ああ残念！ アカデミー会員たちは陽子と中性子の融合反応には関心がないのだ。問題は、彼らのところじゃ、その反応がどうしたわけか必要とされていないということだ。数千万度における反応、これこそが必要とされているものなのだ！ これこそが興味深くて将来性のあるものなのだ！

今日では、次のことを確定的に断言することができる。中間子論が果たしたポジティブな役割は、それが核物理学においてせめて何かしらを解明したということではなくて、とんでもないデタラメがもっと沢山詰め込まれたバージョン——量子色力学——にととの良き土台となったことにある。量子色力学では、仮想パイ中間子による核子の交換は、元のまま完全に残されている——原子核内で盛んに進行している諸過程のきわめて多様な組の中の1個のみじめな個別の場合として。オッカムの剃刀がキラリとひらめかないようにするため、そいつをなるべく遠いところに隠した上で、核子の構成部分、すなわち、分数電荷を持ついわゆるクォークについての議論が始まった。これは素晴らしい！ 前のほうで、電荷とは電子周波数における量子脈動の存在であるという話をしたことを覚えておいでだろうか？ その周波数があれば電荷が存在し、その周波数がなければ電荷も存在しない。だから、分数電荷は存在しないのだ！ でもまあいい、それが存在するとしよう。では、分数電荷を持ったその変わり者たちは、いったいどうすれば一緒にいることができるのか？ そう、古き良きお手本と類似物 [パイ中間子のこと] に従い、いわゆるグルーオンの交換のおかげでそうすることができるのだ。理論的思考の飛躍がすぐさま目に飛び込んでくる！ おやおや、もっと愉快になるようにするため、ずいぶん沢山の新しい量子パラメーターをクォークとグルーオンに与えてやったんだね——あなたがたにもイメージできないパラメーターを！ いわく、クォークにはアップクォークとダウンクォークがある。それらにはカラーもあるし、チャームもあるし、フレーバーだってあるんだ！ 「フッフッフッ、ダウンクォークの臭いがするぞ！」

量子色力学は理論物理学の基本原則を神聖なるものとして守りながら構築された。「既に採用されている理論には、おかしいところはまったくない。それゆえ、新理論はいかなる場合にも旧理論を否定してはならない。新理論は旧理論を個別の場合としてその内に含んでいなければならない」。そのようなやり方を採用した以上、量子色力学が核力の中間子論の欠陥を少しも取り除けなかったのは当然の話だ。逆に、量子色力学は独自の欠陥をさらに追加したのである。それらの欠陥の中で最も有害なものは、いわゆる閉じ込め問題であった。核子がクォークとグルーオンからなっているのなら、核子をこれらの構成要素に分割することが可能である、そしてさらに、量子色力学の正しさを裏づけるために、クォーク-グルーオンプラズマを得ることも可能であるように思われたのだ！ そこで実験家たちは核子の粉碎作業に取り掛かった。殴って殴って、どんなにぶん殴っても分割することはできなかった。その際、核子に作用を加えるために用いられたエネルギーは、等価質量に換算して核子自体の質量を何桁も上回るエネルギーであった。ところが核子はどうして

も割れなかった——いわく、クォークは核子内でそんなにも強く結合しているのだ。「質量欠損」という用語に馴染みのある人のために説明すると、ここでの質量欠損は、質量自体よりも何桁も大きいということになるのだ！ 学者先生たちは今にいたってもなお、ここにはまだ何か十分に理解されていない点があるようなふりをして、こんなことを言っている。核子をもっと強く殴ってやる必要がある。核子たちのおでこを鉢合わせさせろ、もっと強烈に！ そうすりゃ、核子はきっと分裂する！ 大型ハドロン衝突型加速器をくれ！ そして、愚かな一般大衆がこの計画のこの上ない深刻性に疑いを抱かないようにするため、公開討論会を開催した——大衆に人気のある道化芝居方式による討論会を。「ビム^{〔訳注〕}、聞いた話だけどね、学者さんたちがでっかい、あれ、なんて言うんだっけ、かそ、かそ、加速器を作ってるんだって！」「そんなの勝手に作らしときゃいいじゃねえか、ボム！」「僕が言ってるのはね、やらしといていいのかってことなんだ。ビム、じゃあ君はこわくないのかい、学者さんたちがそいつを始動させたとき、ばあっと燃え上がっちゃうかもしれないんだよ！ もしかして、それはほんとに僕らみんなを焼き尽くしてしまうんじゃないのかい？ そうなったら、まったくひどいことになる！」と言ってボムはふさぎこんだ様子をし、涙のツブツブを描いた2本のテープを投げる。ビムはせかせか歩きまわりながら、「何言ってんだ、お前。こわがる理由なんて全然ねえって俺は思うぜ！ ほら、ハンカチ取れよ！」と言ってなぐさめる。「ありがとう、ビム……。もう、僕、ちっともこわくない！ 僕たち、学者さんたちの成功を祈ることにしようか？」「もちろんだ、ボム。きっと、うまくいくぜ！」

何のためにもっとうまくいかせる必要があるの？と思われるかもしれない——何しろ、それらの学者先生たちは、量子色力学の正しさは、精度が何と 10^{-19} にも達する実験で裏づけられていると、もう既に言明していたのだから。でももちろん、彼らはここであまりにも誇張しすぎてしまった。そんな間違いじみた精度で測定される物理量は存在しない。すべての物理諸量の中で最も正確に測定されているのは周波数だが、今のところ、その測定精度の最高記録は 10^{-16} のオーダーなのである。量子色力学を裏づけた研究者たちは、いったいどこから 10^{-19} という数字を導き出すことができたのだろうか？ それはもちろん、どこかからだ。それは測定結果ではまったくなくて、「マルチパラメーター最適化」の結果だったのである。より簡単に言えば、それは数学的つじつま合わせの結果だったのだ。そのつじつま合わせは2倍精度で、またディスクの空き容量がまだ許すときは3倍精度でも行なうことが可能なのだ……。ところで、我々は最初のうち、不審に思っていた——衝突型加速器に関する専門家たちは、なぜ実験の詳細を我々から隠しているのか、そしてなぜ最終製品しか——自分たちの研究のうちのセンセーショナルな結果しか——科学共同体に提供しないのか？と。それらの結果のうちもっとも単純なものは、電子1個と陽電子1個を十分正確にセッティングして衝突させた結果、重粒子流が生まれた！ というものだった。ところが実際には、その実験では電子と陽電子を1個ずつ衝突させたのではなくて、電子と陽電子のビーム、しかもきわめて強力なビームを絡み合わせていたのである。だとすれば、たった1個の電子-陽電子対から重粒子が得られたという証拠はどこにあるのか？ このことを専門家たちに質問してみるがいい。彼らはこう答えるだろう、「法律によって禁じ

〔訳注〕 「ビムとボム」は19世紀末から20世紀半ばまでロシアのモスクワボリショイサーカスで大きな人気を博した道化師コンビの役名。この役名は英語では"Bim and Bom"と表記されているが、この文脈では"Bim"は"beam"を、"Bom"は"bomb"を連想させるように思われる。

られていないすべてのことは、許されているのだ！」と。うーん、それはまぎれもなく犯罪心理というものだ！

それゆえ、彼らとは別の学者たちが「今こそ科学と倫理の結合を図らねばならない」といった議論をしているのを聞くと、風刺作家のジヴァネツキーが合点がいかずに述べた次の疑問が思い出されてくる。「最初に製品の出荷体制を整備しておいて、その後になってから製品の品質管理対策に着手するなどということを、いったいどうすればできるのか？」

サイト「新たな物理学のためのスケッチ」(<http://newfiz.info/>)の資料による。