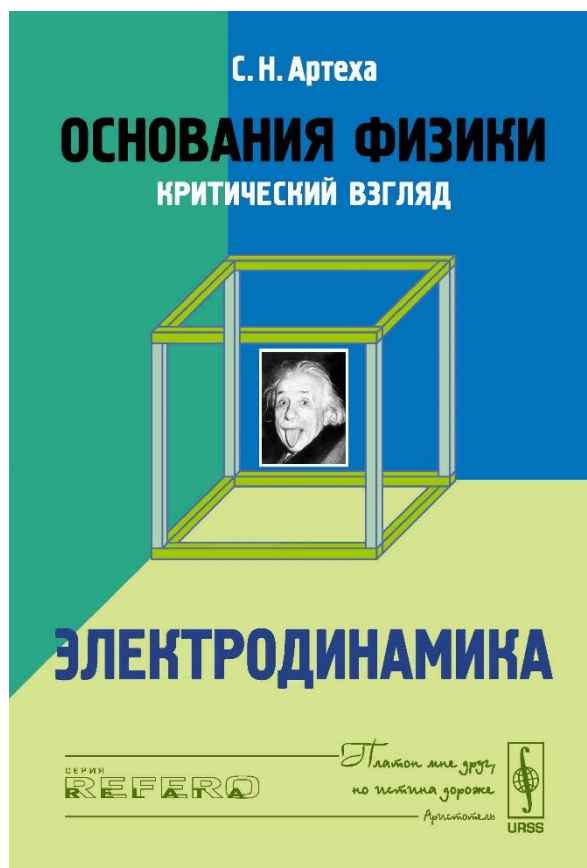


S. N. アルテハ

物理学の根拠（批判的な眼差し）

電気力学



LBC 22.336 22.3shch

セルゲイ・ニコラエヴィッチ・アルテハ『物理学の根拠（批判的な眼差し）：電気力学』，モスクワ，LENAND， 2015， 全 208 頁（Relata Refero）

本書は2部からなり，量子力学および現代電磁気現象理論に関する体系的分析をテーマとしている。理論物理学における数学の適用のいくつかの誤りが検討される。この第2部では現代電磁気現象理論（その基礎，解釈，数学的方法および帰結）の数多くの論争点や根拠不十分な側面が詳しく吟味される。本書には電気力学分野における一連の実験についての批判的分析が含まれている。これらすべてのことは，現代電磁気現象理論の根拠づけは不十分であり，その基礎について真剣に研究する必要があることを示している。本書では電磁気現象に関連したいくつかの代替的なアイデアも検討されている。

本書は大学生，大学院生，教師，科学技術者，そして物理学の根拠について関心を持つすべての人々にとって有益なものとなる。

ISBN 978-5-9710-0902-3

© LENAND, 2014

\*\*\*\*\*

### 日本語版について

本書は "Артеха Сергей Николаевич, Основания физики (критический взгляд): Электродинамика. М.: ЛЕНАНД, 2015. – 208 с. (Relata Refero)" のロシア語原文からの全訳である。

原著書は日本のロシア語書籍専門店で入手することができる。原著書の電子形態での公開は著者と版元との間の契約に従って 2022 年以降となる見込みである。

著者：セルゲイ・ニコラエヴィッチ・アルテハ（Сергей Николаевич Артеха, Sergey Nicolaevich Arteha），数理物理学準博士，ロシア科学アカデミー宇宙科学研究所

著者の関心領域：プラズマ，流体動力学，大気電気学，古典物理学，物理学基礎論，数論

著者の Web サイト：[http://www.antidogma.ru/index\\_ru.html](http://www.antidogma.ru/index_ru.html)（ロシア語）

[http://www.antidogma.ru/index\\_en.html](http://www.antidogma.ru/index_en.html)（英語）

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

日本語訳公開：2017 年 2 月

\* 訳文中の角括弧 [ ] 内は訳注である（文献指示を除く）。

\* 訳文中の「物質\*」については巻末の「訳注」を参照のこと。

## 目 次

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| まえがき                             | 4   |
| 序 論                              | 8   |
| 第1章 静電気学                         | 10  |
| 第2章 誘電体                          | 12  |
| 第3章 電流                           | 19  |
| 第4章 磁場                           | 24  |
| 第5章 マクスウェル方程式                    | 29  |
| 第6章 場のエネルギー、力                    | 43  |
| 第7章 波動の放射                        | 66  |
| 第8章 媒質中における波動の透過                 | 78  |
| 第9章 電磁場中における電荷の運動                | 84  |
| 第10章 磁気                          | 92  |
| 第11章 超伝導                         | 100 |
| 結 論                              | 101 |
| 付 論： 類縁関係にある理論および代替理論に関する簡単なコメント | 102 |
| あとがき                             | 106 |
| 文 献                              | 109 |
| [訳注] 訳文中の「物質*」について               | 112 |

## まえがき

先を進む家畜の群れの後について行くのではなく、進むべき道を  
歩んで行くことには、何ら非難すべきところはない。  
(セネカ)

我々の時代には、いわゆる公的承認が研究活動の主な評価基準として最重要視されるようになった(ソ連時代、あるいは過去幾世紀かの時代にそんなことをしたら、嘲笑を招いたに違いない!)。多くのサラリーマン研究者たちは高い評価(発表回数や被引用回数)を追い求めるうちに、「科学は空虚な営みを忌み嫌う」ことを忘れてしまう。もし自分の全人生を捧げた理論が、あと100年も経たないうちに虚偽であることが判明するだろうということを知ったら、いい気持ちはしないはずだ……。まさにそれゆえに、科学の基礎に対しては、最も真剣かつ誠実な取り組みが必要とされる。

この本書第2部を執筆するにあたっての主な構想の1つは、電気力学に存在する**原理的な**問題点を明示的な形で洗い出すということであった。もちろん、そもそも現実とは何の関係も持たず、長い間科学の発展にブレーキをかけてきた相対性理論と比べれば、電気力学はあれこれの程度まで有効に機能している理論である(この理論を厳密性の手本とみなしている者もいる)。しかし、注意深く検討してみると、その根拠が満足し得るものでないことは明らかである。前進を遂げるためには、現状をありのままに認識し、「ごみをカーペットの下に掃き入れる [=問題を糊塗する]」のをやめなければならない。物理学者たちはそのときにこそ初めて、現在存在する様々な現実的問題について、科学界のエスタブリッシュメントによる否認を恐れ、まるで地下活動のようにひそかに考えをめぐらすのではなく、自らの考えを公然と述べるようになるだろう。そしてそのとき、事態が死点から離れて動き出すことは間違いない。

無論、すべての科学者がかつて習い覚えた「真理」に対する忠誠を墨守しているというわけではけっしてない。一部の科学者たちは原理的に新たなものについて検討し、さらには理論の基礎について批判的な分析を行なおうという気持ちを持っている。筆者はファインマンに心から感謝したいと思う。彼は(他の理論家たちの「数学化された繁文縟礼」とは違って)まさに現象そのものの物理を理解しやすいものにしようと試みており、その結果として、彼が叙述している理論に含まれる数多くの疑わしい側面を暴露しているからである。

概して言えば、真の科学者にとって、理論物理学のアプローチには幻滅させられる点が多々含まれている(科学界の専従職員にとっては、それは中世的な反啓蒙主義への転換の契機なのだ!)。それは、何かあるものを、最終的形態を既に持っている一般的なものとして人為的に宣言しなければならないという点である。しかし、その「一般的なもの」が誤りであることが判明するやいなや、そこから得られたすべての個別的結果もいっぺんに水泡に帰し、すべてをゼロから見直さなければならなくなる。これに対し、一般物理学的なアプローチは歴史的アプローチと同様、(真理の探究という面において)ある長所を持っている。すなわち、経験的事実(実験事実)は常にそのようなものとしてとどまり続け、

そのため、データの一般化や解釈にとって別の可能性があった段階における「道の分岐点」に随時立ち戻り、現象のそれ以外の側面（それもやはり現実的なものである）に手を触れることなく、選択を変更することが可能であるという点である。

「法則」と「定義」の違いを思い出そう。法則は、そのそれぞれが相互に独立に、当該の法則から独立した方法によって測定することが可能な物理諸量の間における相互関係を表している。それ以外のすべてのものは、独立した方法によっては測定不可能な量の定義なのである（この問題に関する H.ポアンカレの所説を思い出していただきたい）。それゆえ、物理学者は、あれこれの表式、方程式、主張、原理、法則から何を期待してよいか、何を期待してはならないかを明確に認識するため、それらのものの一般性の度合い（ステータス）を常に理解していなければならない。エネルギー保存則という、重大な意味を持つ例を取り上げてみよう。それは原理ですらなく、むしろ「規約」というべきものである。すなわち、

第1条 エネルギー保存則は常に満たされる。今日現在（ここに今日の年月日を記入すること）、エネルギーの表式は

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_{j-1} \quad (1)$$

という形を持っている（その日現在に正しいと見なされているすべての表式をこの式の右辺に記入せよ）。

第2条 あなたが量  $E_j$  に関してエネルギーの非保存を発見したときは、その量のために美しい名称を見出し、(1)の右辺に  $E_j$  の表式を書き加え、第1項を最初から読め。

これはもちろん冗談だが、しかし「あらゆる冗談において、冗談はその一部分のみである [=それ以外の部分は真実である]」。エネルギー保存則は課題の解決を簡単化するのに役立っているが、当然、それは検討対象となっている現象の原因とメカニズムが**既に知られている**場合に限られる。その場合、この法則はただ単に、**既に知られている**運動方程式の第1積分であるにすぎない。現象の原因が既知の原因に帰着されない場合には、（**今度はもう既知ではない**）エネルギー保存則は何の役にも立つことはできない。エネルギー保存則には新たな項が付け加わる可能性がある。例えば、かつて熱現象や電磁気現象に関してそれが生じた。それゆえ、「境界表示用の赤旗の範囲外に越え出る」ことを恐れてはならない。

「それらの赤旗が進むべき道に沿って配置されているのか、それともその道をさえぎるように配置されているのか」を調べること——研究者の役割はまさにこのことにあるのだ（物理学は過去 2000 年間に「ほんの少し」変化したのだから、今後 2000 年間にも同じことが生じ得る）。

**現実**とその単純化された**記述モデル**を混同してはならない。ましてや、何らかの理論を絶対化してはならない。数学がその厳密性と整合性をもって人の心を取りこにしていることはよく分かる。しかしここで重要なのは、勘違いをしてはならないということだ。我々の方程式は絶対的に厳密かつ精密なものではなく、近似的なものに過ぎないということを是非とも明確に理解する必要がある。それゆえ、恒等式の場合と同様、方程式の**厳密に**数学的な取り扱い**は人を誤らせる危険性をはらんでいる**。その例は数多く挙げるができる。例えば、表式を証明したり導出したりする際、しばしば方程式の両辺の微分が行なわれている（この問題は、切り捨てにより線形化された方程式についてはもはや言うまでも

ない)。しかし、切り捨てられた被加数は（それがきわめて小さい値であったとしても！）急激に振動する項を含んでいる可能性があり、導関数においてはその振動項が、残された項に匹敵する値を（あるいはそれよりさらに大きい値さえをも）与えることになる（関数とその導関数は互いに独立である！）。その結果、あるパラメータ値における結論は、完全に誤りとなる可能性がある。それゆえ、証明における（空間座標および時間座標に関する）微分操作は、明確に**数学的な恒等式**に対してしか適用することができない。近似された分布関数およびそれに関する方程式の利用という例に対しても、これと同じ指摘が当てはまる。それだけでなく、揺動値の場合にはいわゆる「振動の2次効果」は明らかに失われる。このことは、各要素（平均、ばらつき、尖度、等々）に対して独自の事実上独立したプロセス実現が対応している、すなわち系内に「間欠性」が存在している個別の場合については、もはや言うまでもない。それゆえ、物理学における数学的計算それ自体は「天国への入場許可証」にはならない（物理学上の着想の真理性を保証しない）。

電磁理論（すべての最重要実験を含む！）は特殊相対性理論の成立よりもはるか以前に創出されたものであり、相対性理論に対するいかなる必要性も持っていなかった（現在も相対性理論なしでまったく十分にやっていくことができる）。それゆえ、まるで特殊相対性理論が「電磁理論の頂点をなすもの」であるかのように事態を描き出し、問題の本質を逆の歴史的順序で叙述するのは馬鹿げたことである。それはまさに、この疑似理論の思考上の記号の組み合わせではなく、現実の諸現象を誠実に研究していた科学者たちに対する侮辱に他ならない（[1]の相対性理論批判を参照のこと <http://www.antidogma.ru>）。あらゆる疑似理論に対する自らの態度を決定する際は、L.H.トルストイの次の言葉を思い出すべきかもしれない。「人類の福利にとって、暴き出された虚偽は明確に言い表された真理と同じほど重要な収穫物である」。

この本書第2部が目標としているのは、現在一般に認められている電気理論の状況についての十分に詳しい批判的概観を与えることである。そこでは電気力学自体（すなわちその道具立てと基本的な理論的基盤）の内部矛盾、不正確性と恣意性、また一般に認められている基本的な電気力学実験（使用されている装置等々）の現行解釈に対する批判が提示されるとともに、電気力学の現在の見解と矛盾するいくつかの（一般には認められていない）実験が検討される。付論にはそれほど広く知られていないいくつかの代替理論に対する簡単なコメントが含まれている。筆者は電磁気現象理論に加えるべき変更に関する自らの見解は述べていない。そのような研究は査読付き学術雑誌で発表されるべきだと考えているからである。ただし、いくつかの建設的なアイデアが本書全体の中でコメントの形で述べられている。

本書は物理学者、とりわけ当該分野の専門家を読者として想定しており、最も有名な（最良の）教科書に対する批判的コメントを、その章節番号を示しながら順序立てて述べるという形で構成されている。ただし、それは具体的な個々の教科書に対するクレームではない（それはただ単に、叙述の論理上、何らかの文献に依拠する必要があるという理由によるものである）。もし他の教科書や本に依拠したとしても、同じ要素（考え方、手法、方法）を読み取ることができるはずである。批判の対象とされている教科書からいくつかの段落や数式、図版等々を詳しく引用することは、本の大きさという点でも出版の可能性という点でも、本書をあまりにも大部なものとしてしまうため、残念ながらそれはできな

ったこととお詫びしたい。それゆえ、ほとんどの場合、検討されている問題の本質を理解することが可能とは思いますが、一部の場合については、検討されている教科書を手元に置いて読み進めることが望ましい。筆者が自らに与えた目標は、存在するすべての問題点を「細かく噛み砕いて」説明することではなく、簡潔な命題の形で、物理学の当該領域が抱える不一致点や問題点、矛盾点に研究者の注意を喚起するということのみであった（引用部分を含め、いくつかの重要語句は筆者によって太字で強調されたり、感嘆符が付けられたりしている）。基本的に、本書では既存諸理論の根拠に対する疑念がかなり外交辞令的な形で表現されている。そのようなシグナルとなる語句に注意を向けながら、生じている問題について自らの力で考えを深めていただくことを願っている。そのときにこそ初めて、事態が死点から離れて動き出すという希望が現れるだろう。本書は「電磁気現象理論の必要とされる徹底的根拠づけ、修正および追加研究に関するプログラム」とみなすこともできる。では、電気理論の分析に取り掛かろう。——素晴らしい認識の旅となりますように！

## 序 論

私の仕事は真理を語ることであって、  
それを信じ込ませることではない。  
(J.-J. ルソー)

一般的なコメントをしよう。概して言えば、理論物理学の演繹法を用いた諸現象の記述方法はある種の欠陥品であり、それが役に立つのは科学的方法としてというより、むしろ学生の暗記方法としてである。「一般原理」からその記述を導き出すためには、事前に結果を知っている必要があるからだ（しかも、新たな効果が発見されたときは、いかなる場合もただちにそれらの「一般」原理のうちいくつかの原理の変更がもたされることになるが、そのことを事前に検討することも予見することもまったくできない）。

電気現象と磁気現象を研究する物理学の一大領域についての検討に移ろう。これは多くの科学者にとって厳密性と根拠性の手本であり、その成果は万人に十分に知られており、争う余地はないと思われている領域である。疑いもなく、これは有効に機能している理論であって、その実験、考え方、方法、蓄積された成果の圧倒的大部分はこれからも科学の蓄積庫に留まり続けることだろう。しかしここでもやはり、全部がそれほど光輝いているわけではない。物理学のこの領域にもかなり沢山の論争点と欠陥が存在している。物理学者たちには、それらの論争点と欠陥を知っていただきたい。そうなったとき、問題の解決法とその根拠をより迅速に見出すことが可能となろう。

この序論では、予備的なコメントから話を始めたい。「正電荷」および「負電荷」という用語が使われているが、これらの用語の導入は引力と斥力のいくつかの**記述方法の1つ**にすぎない。ところが、このような方法は常にある疑問を引き起こす。それらの小塊同士は、いかにすれば互いに飛び離れることなく、一緒に居続けることができるのか？ ここから、同符号の電荷同士をコンパクトな物体中に引き留める新たな力を導入する必要性、あるいはさらに悪いことに、一連の物理的性質の場合に無限大の値に導くことになる点状物体を人為的に導入する必要性が生じてしまうのである。

場のイデオロギーは、試験電荷の持ち込みは何に対しても（電荷に対しても、物体に対しても、それらの運動に対しても）まったく影響を及ぼさないという、あり得ないことを前提にしている。例えば、いかにすれば物質を分極させずにおくことができるのか？ 概して言えば、場のイデオロギーは物体の数が2個以上のとき、既に困難に直面するのだ！

p-p, p-n および n-n 間の核力は等しい [2, III, §8-4, 原著 II, §8-4] という考え方は、厳密には誤りである公算が大きい。なぜなら、そうだとするとよりコンパクトでより重い同位体（中性子数がより大きい同位体）が存在するはずであり、実際、各元素ごとにその限定された同位体系列が存在しているからである。

「叙述を相対性理論および量子力学と一致させる」という『バークレー物理学コース』[4]の考え方は、それだけで人に不審の念を抱かせる。実験対象（永遠なる自然）が、いったいどうすれば具体的な今日の時点における純粹に理論上の推論（技巧）に対して依存するということがあり得るのか？



我々の唯一の宇宙を例にとると、我々は（今のところ理論的に理解されていない）物質\*と反物質\*の間における非対称性をいたる所で観測している。もしかしたら、より深いレベルでも弱い非対称性が存在しているのかもしれない。それゆえ、粒子と反粒子の完全な電荷対称性を公準 [postulate, 「要請」とも] として厳格に定めること [4, §1.1] には意味がない（諸電荷の間には認められないほど微小な差が存在し、1 個の「素電荷」ではなく、複数の電荷量が存在する、あるいはそもそも 1 個の電荷量も存在しない可能性が十分にある）。例えば、光には微小な電荷があるという仮説が存在する（今のところそのような電荷量を実験的に検出することは不可能である）。電荷量を決定するための方法はただ 1 つ、電磁力による方法しかない。それゆえ、電磁力が電荷の運動に依存している以上、**電荷の保存**を確かめるためには、**すべての電荷が（「対称的に」）静止していなければならないこと**を示す必要がある（そしてさらに、その依存性が何を原因としているのか——電荷を原因としていないということはないのか？——を実験的に決定する必要がある）。荷電粒子の構造と性質（電荷の存在自体）は今のところ古典力学によっても量子力学によっても説明されておらず、いずれか一方の理論を人為的に高く評価し、他方の理論を低く評価することには意味はない。必要なのはそれらの理論のあらゆるプラスとマイナスを冷静に秤にかけてみることである。

教科書 [5] では、多くの問題が「裏返し」に描き出されている。すなわち、円板の回転は明らかに特殊相対性理論の矛盾性を証明しているのであって（なぜなら、長さの縮小は空間の運動特性に帰せられているからである）、けっして「複雑な変形」の必然性などを証明してはいない。古典論においては、絶対的剛体とは、ある具体的な現象を記述する際にはその微小な変形を捨象してもよい、ということしか意味していない。自然は諸作用の伝達速度をまったく制限していない（速度  $c$  で伝播するのは電磁相互作用のみである！）。そして、素粒子が点であるということは、特殊相対性理論の歴然たる（そしてとっくに実験によって覆された）愚論なのであって、けっして自然が要求していることではない。

では、この物理学領域（電磁気現象理論）の逐次的分析に話を進めよう。

## 第1章 静電気学

最も単純なところ——静電気学——から始めよう。残念ながら、場のイデオロギーも、またポテンシャルのイデオロギーも、1体以上の場合における静電気学的課題に対してすら一目瞭然たる解決を得る助けにはならない（方程式は形式的解のための方程式であり続ける）。

「静電気学とは、ガウスの法則プラス……である」というファインマンの主張<sup>[訳注]</sup>が意味し得るのはただ1つ、静電気学の方程式は定義不十分である（自己充足性を欠いている）ということのみである。

静電場中において平衡が成立することは不可能であるという主張は、純粋にモデル的な課題の場合における主張である。なぜなら、現実の電子と陽子は電荷だけでなく、さらに磁気モーメントも持っている（スピンを持つ粒子の場合、純粋の静電気学は存在しない）からである。また、なぜ平衡は動的ではなく、静的でなければならないのか（絶対零度の場合はどうか）？ なにしろ、固体は電磁力によって保持されているのであって、だからこそ我々は固体を固定のために利用することができるのだ。しかもイオン結晶が存在する事実そのものが、そのような主張と矛盾している。

真空中における静電気学の方程式の厳密性は、唯一の法則——真空中におけるクーロンの法則——と完全に等しいのだから、それに関する叙述は真空中におけるクーロンの法則から始めるべきであることは言うまでもない。しかし、物質が存在する場合について何か抽象的な一般化を行なう前に、我々は場というものを、いったいどのような意味に解するのかを決めておく必要がある（量  $\mathbf{D}$  を抽象的な仕方で導入すると、それによって方程式の一般性がただちに失われてしまう）。唯一の可能性——それは、真空中の場合と同様、電磁力的アプローチを利用しながら進んでいくことである。そうだとすると、誘電体中において電荷に作用する力を、その誘電体が液体でも気体でもない場合には（その場合は問題が生じない）、その誘電体中において切り取られた（電荷のサイズよりもわずかに大きな）空洞内において電荷に作用する電磁力という意味に解する必要がある。しかし、その場合には、電磁力の法則

$$F = \frac{q_1 q_2}{\varepsilon(r, X, Y, Z) r^2}$$

（ここで、一般的な場合には関数  $\varepsilon$  は試料の幾何学的特性にも依存する）から出発したほうがよい（また、より正確である）。ここから、最も多く利用されている個別の場合についての分別的な一般化を得ることが可能となる（また、欺瞞なしでやっていけるのはこのようなアプローチのみである）。（モデル的・数学的課題の場合ではなく）現実の物理的状況においては、実験的に検証可能な具体的なクーロンの法則から偏微分方程式に移行することには、いささか疑わしいところがある。なぜなら、第一原理（例えばゲージ）から決定されない追加的な（！）諸条件（電気力学に移行する際の初期条件、境界条件、ゲー

[訳注] 文献 [2, III, §5.1, 原著 II, §5-1] で述べられている次の主張のこと：「二つの静電気の法則がある。ある体積から出る電場の流束は内部にある電気量に比例するというガウスの法則と、電場の循環は  $\mathbf{0}$  である—— $\mathbf{E}$  はある関数の  $\mathbf{grad}$  である——の二つ。この二つの法則から静電気について何でも言いあてることができる」。

ジ条件) が要求されるからである。それだけでなく、現実の境界条件は常に揺れ動いており、実際のカウントは「最後から」始まる(しかも、相異なる課題の場合、無限小への減少は解によって異なるが、実際には区別がつかない)。何らかの対称性によって解を事前に変換するのはどうか? しかしそれを計算することが可能なのは事実上、(任意の幾何学的構造の場合ではなく)一部の個別の場合に限られており、しかもその場合における対称性の条件は、当該の過程について我々の理解するところのもの(さらにもう1つの追加条件)なのであって、これについても独立した形で検証を行なうことが望まれる。

静電気学の場合、一連の概念(例えばポテンシャルの概念)は厳密に数学的に導入することが可能である[4, 第2章]が、一般的な場合には、それはまったくそうではなくなる。帯電球殻の半径減少という課題の場合には、場のエネルギーに関する関数を厳密に(数学的に)導入することが実際に可能であるが、空間の残余部分における場が変化しないのは、この個別の場合だけである。一般的な場合には、「説明上の」困難が存在する。もし我々が1つの中性系から2つの帯電系を形成したとすると、そのために幾分かのエネルギーが一度に消費された(その配置の場合における、新たな非ゼロのポテンシャルエネルギーが出現した)が、場は空間全体にわたって、しかも段階的に形成され始めることは明らかである。空間全体にわたるポテンシャルエネルギーと場のエネルギーとの同等性は、どう取り扱えばよいのだろうか? なにしろ、それとは逆の再統合(中性化)を行なった場合、十分に離れた(無限遠の)空間領域はやはり大きな時間間隔をおいてしか影響を及ぼすことができないはずであるが、しかしその時点までに系は既に中性になっており、したがって場との間で相互作用することはできなくなっているのである。

最大限厳密な見方をした場合、**固定された配置**においてガウスの法則の微分形が導出されるということ、また任意の体積についてそれを導出することができるということは、積分自体の等式に含まれる被積分関数の等式が成立するということを保障しない。我々はなぜ、物質を「アメーバ状のもの」、すなわち、物質にどれだけのものを付け加えようと、物質中では(質的に)何も変わらないとみなさなければならないのか? いったいなぜ、系全体は自らの固有の境界を「感じない」という**公準を定める**必要があるのか? 系全体の特性(特に、系のサイズ。そして体積が新たなものになるごとに、そのサイズは新たなものになる)に依存した周期的付加ということが十分にあり得る。例えば、それは、系のある種の(定常波タイプの)固有振動に対応している、あるいは構造の静的周期性を反映しているということがあり得る。このように、ガウスの法則の微分形は実験的なクーロンの法則よりも厳密性が劣っている。ストークスの定理に対してもこれと同様のコメントを行なうことができる。

このように、静電気学のようにごく単純な領域を手始めに眺めて見ただけで、いくつかの疑問が引き起こされる。

## 第2章 誘電体

今度は誘電体の問題に話を進めよう。誘電体中のスリット内における場  $\mathbf{E}$  あるいは  $\mathbf{D}$  の、そのスリットの方に依存した大きさに関する等式は、実験的にはまだ確定されていない（我々がここで論じているのは法則ではなくて定義の問題なのだから）。その等式は、静電気学の方程式に対する信仰にもとづいて宣言されているにすぎない [2, III, 第10章, 原著 II, Chapter 10]。多くの課題（普通の水の場合の課題でさえ）は、答えを覗き見た後に「解決」されている（理論の予測力はいったいどこにあるのか？）。歴史的経緯をたどってみると、液体とのアナロジー [2, III, §11-4, 原著 II, §11-4] は、実際には逆であった。電気力学の方程式が（すなわち、その解も）、理想的液体の挙動とのアナロジーに従って導入されたのである。

誘電体中の場のポテンシャルは諸ポテンシャルの総和に等しいということ [6, §21, 英訳版§2.2] は仮説であり（さらに相互作用ポテンシャルもあり得るのだから）、相互間の距離が小さい諸束縛電荷のポテンシャルの正確な挙動もまだ知られていない。一様に分極しているとき、誘電体中の束縛電荷は誘電体の表面に集中的に現れるという主張は、純粹に形式的（数学的）な主張である。なぜなら、その主張は、それらの量とサイズの測定精度に依存しており、現実には、我々はそれらの量とサイズにもとづいて平均化を行なっている（より正確には、受け手側の測定装置自体が平均化を行なっている）からである。外部場が存在しないとき、分極はゼロであるという主張もまた、測定値の精度および平均化のスケールに依存している。それらの現象は、焦電気および圧電気の場合にのみマクロスケールで明確に検出されるものであって、一般的な予測には引っ掛からない（予測から抜け落ちる）。それゆえ、それらの現象を取り上げて論じるべきではない。場の大きさに対する分極の比例性もスケール（近いおよび遠いオーダーのサイズ）に依存している。

現実には測定可能な唯一の量は作用する力である以上、あらゆる追加的量（例えば誘電体中の電束密度  $\mathbf{D}$  の導入）は、ただ単にある新たな量の（数学的）定義でしかなく、したがってその関数の挙動や図形表現 [6, §23, 英訳版§2.4] が物理学にとって独立した関心を引くものになるということは、まずあり得ない。 $\mathbf{E}$  に対する  $\mathbf{P}$  の依存性は一般的な形では定義することができない（そして、テンソル依存性 [tensor dependence] よりも複雑であることが判明する可能性がある）。「静電場の完全な方程式系」 [6, §22, 英訳版§2.3]

$$\begin{aligned}\mathbf{E} &= -\text{grad}\varphi, \quad \mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \\ \text{div } \mathbf{D} &= 4\pi\rho, \quad D_{2n} - D_{1n} = 4\pi\sigma\end{aligned}$$

はきわめて大きな制約を持っている。この方程式系において、誘電体の諸性質と電荷の分布は自己無撞着的にではなく、恣意的に与えられており、場（力）は、結果として得られるものがそれになる（計算上だけの場や力）。数学的観点から見た場合でさえ、この方程式系が正しいのはポテンシャルが連続的で、かつ無限大における場の挙動が確定されている場合に限られる。一方、物理的現実においては、いくつかの力は常により幅広い条件の下に存在することになる（制約的な諸前提が確定されれば、系の一義性も証明される）。

この方程式系は、強誘電性および焦電性が存在する場合の誘電体と場を記述していない(理想としては、単一の現象についての記述は単一でなければならない)。

場  $\mathbf{E}(\mathbf{R})$  が非一様であるときにその性質を保持し続けるような均質な誘電体 ( $\epsilon = \text{const}$ ) [6, §23, 英訳版§2.4] が自然界に存在し得るのかどうか——それは、実験に課せられる問題である。そしてそれと同時に、その  $\epsilon$  自体をどのようにして実験的に測定するつもりなのかを明確にする必要があるはずである。例えばクーロンの法則を通じて測定するのであれば(おそらく、これが唯一の方法である)、 $\epsilon$  の定義値の導入も他ならぬクーロンの法則を通じて行なう(また、その定義値をさらに任意の不均質媒質および非線形媒質の場合について一般化する)必要がある。数学記号の取り扱い上の便利さは、物理学にとっては第二義的な事柄である(自明のことだが、現実との照応関係を持たないいくつかの純粋に「アカデミックな」数学的解を得たいという願望からではなく、現実の実験の実践的な必要性から出発するのであれば)。概して言えば、媒質を特徴づける係数  $\epsilon$  の導入は、試験電荷を含めたすべての電荷が媒質中に沈み込んでいて、しかもその媒質のサイズが、互いに最も離れている電荷の間の距離をはるかに上回っていることを前提としている。クーロンの法則を通じて  $\epsilon$  の定義値を導入することができるのは、このような場合である。そうでない場合には、我々が相手にしているのは媒質ではなくて物体ということになり、その物体の幾何学的特性および電荷との間の相互の位置関係をさらに考慮することが必要になる。誘電体中への「沈み込み」という考え方は、誘電体中に沈み込んでいるときの電荷の場の勾配が、誘電体の分子と分子の間に引き入れられたある1個の電荷によって「分離」されたそれらの誘電体分子同士の間と同じオーダーの距離において、取るに足らぬほど小さい勾配であるということをも前提としている(そうでないとすると、追加的な分極電荷を考慮することが必要になる)。

誘電体中における点電荷の場の計算 [6, §23, 英訳版§2.4] は近似的に行なわれている。なぜなら、非一様な場における一様な分極が可能であることが事前に想定されているが、これは明白ではないからだ(非一様な電荷密度  $N(\mathbf{r})$  が生じる可能性が考慮されていない)。

振幅が顕著に変化する(そして隣接分子にとって最も本質的な意味を持つ)分子間の場の、「緩慢に」変化するある種の平均的な(より弱い)場への交替 [6, §28, 英訳版§2.9] はまことしやかな仮説にすぎない。この仮説はある物質の場合は偶然に有効であるが、他の物質の場合はやはり偶然に有効ではない(それゆえ、双極子を持つ誘電体の場合におけるローレンツ-ローレンスの式の一般化はしばしば誤りとなっている——実験的に裏づけられていない—— [6, §29, 英訳版§2.10])。そもそも、このようなあらゆる理論化が意味を持ち得るのは、(実験でたまたま見出された答えからではなく)第一原理から係数の数値を定めることが可能な場合に限られる。しかし今のところ、教科書においては(また理論においても)それはなされていない!

帯電した極板の間に置かれた誘電体(固体誘電体、あるいは容器内の液体誘電体)が、クーロンの法則や  $\epsilon$  の概念を想起した場合、一見そうでなければならないと思われるように極板間の引力を減少させるのではなく、現実には逆に、それを増大(!)させるというのは奇妙なことである。ところが、誘電体が液体で、極板が完全に誘電体中に浸漬されている場合には、引力は減少(!)する。 $\epsilon$  の値の意味が入れ替わったのはなぜか([7]を参

照のこと)？ おそらくこれは、重ね合わせの原理は真空中においてのみ、または媒質中においてのみ有効である（あるいは場の重ね合わせの原理だけでなく、原子自体および分子自体による場の遮蔽がある役割を演じている）という問題なのではなかろうか？ ここで何が問題なのかと言えば、それは、変位（それが仮想上の変位であれ）と測定は、双極分子同士の間にのみ行なわれ得るということである。その場合には場が（そして力

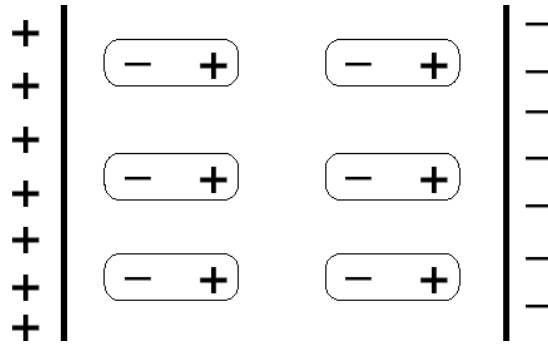


図1 双極子間の場

も!) 増大したことが、図1から分かる。なぜなら、最短距離は反対符号の電荷までの距離となる（しかも、ポテンシャルにもとづいて評価すると、ゼロ勾配の代わりに、場を増大させる所要の勾配が付け加わった）からである。しかし、極板が完全に誘電体中に浸漬されている場合には、純粹の重ね合わせ状態の下で、力は**そもそも**変化してはならなかった（または、極板の向こう側の誘電体からの相互間の距離は相対的に大きいので、ごく微弱にのみ変化しなければならなかった）のであるらしい。したがって、**遮蔽**を考慮する必要がある！ その場合にのみ、 $\epsilon$ は定数とみなされることができる（また、**新たな**顕著な距離依存性は現れない）。このこととの類推で、物質が磁場に及ぼす影響の問題が興味を引く（なぜ反磁性体と常磁性体の両方が存在するのか？ また、用いられている方程式によれば、強磁性と残留分極のアナロジーはもっと完全なものでなければならぬように思われる）。

誘電率の概念は [4, §10.1] ではコンデンサーの容量を用いて導入されているが、そこでは**媒質全体**（極板自体を含む!）の**マイクロな均質性**が前提とされ、また、端効果は無視されている（このことは方法論上の限界性を伴うことになる）。厳密に言えば、その本質という点で、あらゆる方法は当該の配置の場合における**実効的な**  $\epsilon$ を導入するという手法を取っている（そして  $\epsilon(x, y, z, t) = \text{const}$  への移行は**純粹に数学的にのみ**行なわれている）。当然、より一般的な場合には、諸量のうちのいずれがその（理論的および）実験的意味を維持し続けるのか？ という疑問が生じてくる。それゆえ、そのようにして**導入される人工ゼリー**  $\epsilon = \text{const}$  から現実の物質のマイクロ構造への移行は、けっして確実なものではない（より正確に言えば、そこではただ単に、その都度、諸量に対する所要の数値の付与が行なわれているにすぎない）。つまり我々は、厳密でない近似的な諸現象の記述を（その都度、所要の「まことしやかな呪文」と一緒に）与えられているのである。

[4, §10.2] の多極的記述は、電荷系から大きな距離の場合にのみ近似的に正しい。理論家たちが絶えず用いている双極子の場合でさえ、「現実の」双極子

$$q \rightarrow \infty, \mathbf{r} \rightarrow 0, q\mathbf{r} = \text{const}$$

は自然界では存在し得ない。双極子の電荷間の距離が変わらないという仮定は不正確である。概して言えば、量子力学とはミクロスケールにおける電気力学の否定なのだから、電気力学を正当化する「まことしやかな呪文」のために、ここで量子力学を援用するのは適切なことではない（当然、電気力学の側にとっては実際的な疑問が残る。すなわち、各原子を、原子核を取り巻く球対称な電子雲の  $\mathbf{p} = 0$  の静的分布とみなすことは可能かといった疑問である）。

[4, §10.7] において  $N$  個の分子双極子から分極密度が「収集」される時、ここにはずいぶん部分がある。分子は無秩序な並進運動、回転運動および振動状態にあり、分子間には空間が存在する、等々といった部分である。それゆえ、実験の幾何学的配置に依存するある実効分極が確立するのだと、「事実にもとづいて」主張することだけで済ませることができ（そしてその幾何学的配置とミクロな諸量との関係は隠されたまま残される！）、しかも分極した物質が作る場と2つの帯電層が作る場との等置はある種の近似にすぎない。原子中および分子中のすべての電荷は運動状態にある。また、純粹に一般に受け入れられている電気力学の観点から見た場合、軌道角運動量とスピン角運動量の保存を考慮すると、物質内部では  $\text{rot } \mathbf{E} = 0$  であると主張することはとても可能とは思われない。より正確には、あり得るのは  $\langle \text{rot } \mathbf{E} \rangle = 0$  または  $\langle \text{rot } \mathbf{E} \rangle = \text{const}$  のいずれかであり、静的場の中では事実上何

も変化しない（そしてこの実験に何も影響を及ぼさない）。それゆえ、表式  $\langle \mathbf{E} \rangle = -4\pi\mathbf{P}$  はただ単に実効分極の定義であるにすぎない。それと同様に [4, §10.8] の表式  $\mathbf{P} = \chi_e \mathbf{E}$  および  $\varepsilon = 1 + 4\pi\chi_e$  はある量  $\varepsilon$  と  $\chi_e$  のせいぜい定義であるにすぎない（そこから何かを得ることが可能な方程式と、そこから何も得ることができない定義との一般的な違いを思い出していただきたい。定義とはそれ自体、取り扱われる対象の中に新たな量を導入するものである以上、そこからは何も得ることができないのである）。物質（液体（!）の油）中におけるクーロンの法則の表式から、力（または場）は  $\varepsilon$  分の1に弱化するという結論が導き出されている [4, §10.11]。任意の球の内部における電荷は  $Q$  よりも小さくなるという文句は、必ずしも自明ではない（それは分子構造に依存する）。球の内部の分子がすべて「欠陥のない」分子である（各分子の全電荷がみな等しくゼロである）場合には、その合計値は正確に  $Q$  となる。力が常に減少しなければならないということは自明ではない。次の連鎖、すなわち

$$\dots \rightarrow q \rightarrow \rightarrow Q \leftarrow \leftarrow \dots$$

という連鎖の中に我々が電荷  $q$  を置いたとすると、その電荷にとって、最も大きな力の影響は最近傍の電荷から来るはずであり、その影響が場を強めるはずである（少なくとも、最終的にそのようなこともあり得る）。その先では、最小変化を含んでいる記述の  $\varepsilon = \text{const}$  の場合への適用が試みられている。例えば、

$$\text{div}(\varepsilon \mathbf{E}) = 4\pi\rho_{\text{free}}$$

という選択、および

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi(\rho_{\text{free}} + \rho_{\text{bound}})$$

という記述の任意の選択である。

この記述全体は、電荷および試験電荷が誘電体（液体の！）中に完全に沈み込んでいる場合にのみ適用可能である。一般的な場合には、任意の関数依存性  $\epsilon(\mathbf{r}, t)$  および任意の幾何学的配置への移行は行ない得ない。量  $\mathbf{D}$  の導入は、ただ単に次なる新たな定義であるにすぎない。「その中では  $\mathbf{P} \sim \mathbf{E}$  であるところの物質」 [4, §10.11] としての誘電体という概念自体の導入は、その本質という点で、圧電性と強誘電性に関する「やっかいな」問題を回避する目的でなされている。しかし、この特徴にもとづいた場合、我々は物質を *post factum* にしか区別することができない。

場のエネルギー密度の  $\epsilon E^2$  という定義 [4, §10.? [節番号不明]] はそれと同じ制約を持っている。いたるところで  $\epsilon = \text{const}$  なのだ！ 大部分の場合、具体的な新物質の分極メカニズムは事前には知られておらず ([4, §10.14] で打ち明けられているように、氷の場合ですら知られていない)、また、全電流を自由電荷の流れと束縛電荷の流れに分割することは困難であり（非一義性が存在する。すなわち、値は2つあるが、結果は1つなのだから）、それゆえ、新物質に関する理論の予測力は大きくない。

[8, §13] では  $\mathbf{E}$  の代わりに新たなベクトル  $\mathbf{D}$ （これは追加的な解釈なしに実験的に決定することできない）が導入され、誘電体に関するガウスの定理が定義されているが、それは単なる公準的な定義であるにすぎない。すなわち、まるで1つのスカラー方程式は2つのベクトル量（6つの変数）を決定する（見出す）のに役立つかのように考えることが可能になってしまう。

教科書 [8]（これは資料のレベルおよび課題の選択という点では十分に優れた教科書である）は、おそらく、基本的問題についての深い考察を目的とした本とは言えない。これはむしろ、固定された所与（既知）の結果を得るためのまことしやかな道筋を学生たちに暗記させることだけを目的とした本である。信仰として採用されているいくつかの命題が不正確であることが判明した場合に生じ得る変化を追跡する方法を、この教科書から学ぶことはできない。また、一連の計算は数学的厳密性という点で特に優れているとは言えない。

通常、多くの現象は相互に関連しているのだから、最終状態に転移する道筋を、あれこれのパラメーターを固定する方法を用いて恣意的に選択するのは、明らかに厳密ではない（例えば、そのような各プロセスが可逆的になるわけではない）。しかも、自然が選択しているのは恣意的な転移の道筋ではなく、唯一のプロセスなのである。また、誘電体として「理想的な」媒質、すなわち不変的な（何ものにも依存しない）誘電率を持った非圧縮性流体を利用しているのは厳密ではない。

有極性誘電体の分極についての記述 [8, §36] においては、誘導モーメントの弱さの評価は平均的なマクスウェル場  $\mathbf{E}$  について行なわれている。しかし、秩序化の際のミクロな場は著しく異なっている可能性があり、したがってそのような強まった場が作用している時間における影響の評価を行なう必要がある（これはむしろ、媒質の定量的なパラメーター値の適切な解釈という問題に関係がある）。ここからは、まさにそのような情報が引き出されるからである。



今のところ強誘電体に関する完全な理論は存在しない [8, §39]。

$$(1 - Na\beta)\mathbf{P} = N\beta\mathbf{E}$$

(ここで  $a$  は定数,  $\beta$  は分子の分極率,  $N$  は単位体積中の分子数) の解についての定性的コメントは大きな意味を持つとは思われない。なぜなら,  $(1 - Na\beta) = 0$  という解は, せいぜい  $\mathbf{E} = 0$  の場合の1つの「点」にすぎないからである (ここで  $\mathbf{E} \neq 0$  の場合には, 分極率は無限大になる!)。揺動を考慮すると, 常に  $\mathbf{E} \neq 0$  である。ギンズブルクの理論は (ランダウの理論にもとづいて), 我々が相手にしているのは第二種相転移であること, その相転移は分極化の度合いにもとづいて転移点に割り当てられた熱力学ポテンシャルを用いて記述することが可能であることを**仮定している** (これは再び,  $\mathbf{P}$  の連続性を仮定している)。この種の「理論」は現象の**物理的メカニズム**をまったく解明しておらず, ただ単に事前に測定された依存性に**似通った解**を持つ数学方程式を人為的に「選び出している」にすぎない。

[9, §6] では, 誘電体中の静電場に関する表式を導出する際, 量  $\mathbf{P}$  は  $\langle \rho \rangle = -\text{div } \mathbf{P}$  として人為的なやり方で導入されている。第1に, 人為的に導入された量の場合, 物体外 (および境界上!) における  $\mathbf{P} = 0$  という条件は追加的な条件である。第2に, 量  $\mathbf{P}$  は非一義的な量である。なぜなら, この量は等式から積分のゼロに対して「割り当てられた」ものだからである (そのような割り当て方法は多数ある)。第3に, ここでも再び, 任意の形態の物体に関する等式  $\int \langle \rho \rangle dV = 0$  は,  $\langle \rho \rangle$  および  $\mathbf{P}$  の形態に対する非依存性を意味しない!

それはさらにもう1つの追加的仮説である。また, この定義の場合, その定義において誘電体が金属と何によって区別されているのか, 理解不能である (なぜ金属の場合にはその種の人為的関数  $\mathbf{P}$  を導入してはならないのか?)。

[9, §10] では, 電場中における誘電体に関する熱力学的関係式を導出する際, その電場は誘電体外の導体上の電荷によって作られたものとして提示されている。ここでは, 最終的表式の中に誘電体内の電場しか含まれていないのであれば, その表式は電場の起源に依存しないとみなされている。しかし, このことは証明を必要としている。なぜなら, 誘電体内の電場が同一であったとしても, 導体の配置が異なるときは, 周囲空間中における**電場の変化は, 誘電体の存在に応じて相異なったものとなり得る**からである (さらに誘電体の体積, 誘電体内部の温度分布その他のパラメーターもまた, それに応じて相異なったものとなり得る)。熱力学的関係式の利用は, **もうそれだけで**, 物体 (および材質) のあらゆる具体的性質に関する知識, すなわち, それらについての事前の解明 (測定) を**必要とする**。したがってここでも再び, 理論の予測力という問題が生じてくる (例えば電気ひずみに関する予測力を思い出そう)。この問題が特に先鋭に現れるのは, 結晶 (焦電体結晶, 強誘電体結晶および圧電体結晶を含む) の場合である [9, §13]。すなわち, この理論を利用するためには, あまりにも多くの厳密な事前知識が必要とされる。

液体誘電体中における電気力の導出 [9, §15] においては, 誘電体の境界が定められているのか否かが明確にされていない。なにしろ, 境界が定められた誘電体の場合には, 誘電体の形態 (例えば外力によって維持されている形態) の影響が現れるのである。温度勾配に対するあり得る依存性を切り捨てていることもまた, 近似的なやり方である。仮想変位

を与えたとき、導体のポテンシャルは不変である、そして誘電体の変形は等温的であるとみなす必然性は証明されていない。さらに、物質の各粒子はそのポテンシャル値と一緒に変位するということが証明なしで仮定されている（まさか、ポテンシャルは物質に組み込まれて「凍結された」性質だとでも言うのか？）。

[9, §15] の公式 (15.11)

$$P_0(\rho, T) - P_{\text{atm}} = \frac{\rho E^2}{8\pi} \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right)_T - \frac{\varepsilon - 1}{8\pi} (\varepsilon E_n^2 + E_t^2)$$

の「意義」も理解不能である。この方程式は、「液体内の電場の強さにもとづいて液体の表面近傍におけるその密度」を決定するものであると主張されている。しかし、密度  $\rho$  を決定するためには、 $T$ ,  $P_0$ ,  $\varepsilon$ ,  $\mathbf{E}$  の分布を知る必要があるという結果になっているではないか。 $\rho$  そのものを測定したほうがより簡単なのではないか？ もし、これらすべてをそれぞれ独立した形で測定することができないのだとしたら、この公式の正しさをどうやって検証するのか？ したがって、体積力の大きさ  $\mathbf{f}$  に関する表式を含め、このセクションにおけるすべての表式は近似式である（特定の条件の下でのみ近似的に正しい）。

このように、誰もがよく知り慣れ親しんでいる誘電体理論は、注意深く吟味してみると、ある種の不満感を呼び起こす。これが唯一あり得る普遍的な理論、アルゴリズムの内的整合性と厳密な根拠を持った理論であるとは、とても思われぬ。

## 第3章 電流

今度は電流の概念およびこれに関連した諸現象の分析に話を進めよう。金属中の場から始める。

概して言えば、空洞内には場が存在しないことの証明 [2, III, §5-10, 原著 II, §5-10] は厳密ではない。なぜなら、金属は何らかの仕方で統一体として維持されていることを、我々は考慮に入れていないからである（あるいは、それは外力か?）。それとまったく同様に、それとは別のやり方で異なる図（図 2）を描くことが可能である。回路内では  $\text{rot } \mathbf{E} \neq \mathbf{0}$  であるが、では、ここから何が導き出されるのか？ここでは、固体の物体（fixer）が存在する場合の静電気学と同様、望みのものすべてが存在することができる。

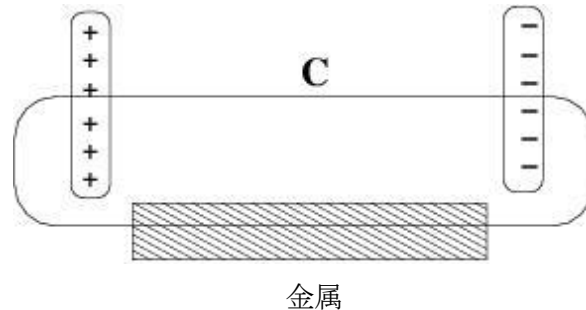


図2 空洞内の場

オームの法則とは、その本質において、対象物の材質、その幾何学的特徴（もしその正確な特徴を論ずるのであれば、これはもはやそれほど簡単な問題ではなくなる）、温度、圧力、外場および内場、等々に依存する、ある未知量  $R$  の定義である。また、ジュールの法則の恒等式 [6, §35, 英訳版§3.1]

$$Q = RJ^2 = J(\varphi_1 - \varphi_2) = J \int_1^2 E_s ds$$

は適用可能な領域が相異なっているという事実は、導入されている諸概念（平均値）が近似的な性格を持っていることを物語っている。それと同様に、電流密度に関する表式  $\mathbf{j} = \lambda \mathbf{E}$  は  $\lambda$  という量の定義である。この表式はオームの法則の微分形と呼ばれているにもかかわらず、これが法則のステータスを持っているとはまず考えられない（しかも、これは特定的前提条件の下で導出された表式である）。概して言えば、実験で得られたマクロな方程式から、「ミクロな方程式」（精密な方程式）を得ることはできない。それは常に、あり得る様々なバリエーションのうちの1つにしかならない。完全に同一のやり方で得られた比電流強度に関する諸方程式（すなわち、一般性の度合いが同一の諸方程式）

$$q = j^2 / \lambda = \lambda E^2 = \mathbf{jE}$$

の一般性の度合いは相異なるという主張が、ここでも再び宣言的な形でなされている（1番目の方程式が最大の一般性を持っていると宣言されている）。

電流の定常性の条件、連続方程式の条件および電流の流れ [6, §37, 英訳版§3.3] に関しては、次のことが想定されている。

1. 電流は中性である。
2. 「機械的に」固定されている電荷は存在しない。
3. 境界および材質の効果（準弾性作用）はあからさまな形では考慮しない。

さもないと、場の非全体的な変化、あるいは電荷の再配分が電流の変化を引き起こしてしまう、また、帯電した「噴流」が発生したり消滅したりすることに伴い、電流が「半閉回路」になってしまう可能性があるからである。この「電気保存」の公準は、記述上のある種の選択にすぎない（「基準をなす予測」が実験的に観測可能な現象と一致さえすれば、様々な選択が可能であって、その場合、中間的な「観測可能でない本質」は任意のものとなり得る）。直流の場合、自由電荷の密度はゼロに等しいと称することの証明は正しくない。例えば、もしわれわれが複数の非中性電流（ビーム）を同時に取り上げた場合はどうなるか？

外部起電力 [6, §38, 英訳版§3.4] に関しては、電気現象とその性質の記述は統一的でなければならないということを指摘しよう。すなわち、

- 1) 超伝導について思い出そう。この場合には、電流は存在し、外部起電力は存在せず、抵抗はゼロに等しい。
- 2) 磁場は電流によって引き起こされると考えられているのだから、エネルギー消費なしで永久磁石が存在するということが、電流にとって起電力の存在は必須ではないことを証明している。
- 3) しかも、原子自体もまた、起電力の存在が必須ではないことを裏づけている。そもそも、非中性電流についてはより明確な定義が必要である。 $\mathbf{E}$  にさらに  $\mathbf{E}_{\text{ext}}$  を付加するという問題は、次の疑問を生じさせる。すなわち、その区域において現実に測定されるのは、どちらの場なのか？あるいは、これら 2 つの量——補助的量——は、ただ単に理論上の都合のためのものなのか？

[6, §40, 英訳版§3.6] では、トルマン [Richard C. Tolman] の実験を説明するために、直流に関する一般方程式が利用されている。すなわち、それに先行するすべての「まことしやかな」考察は、検証すらされていない。最終時点においては電流も加速度もゼロになると想定されているが、それは厳密には誤りである。遅れ（経時的緩和）が生じるからである。それに加えて、抵抗がそのプロセスの関数  $R(\omega)$  となる可能性がある。しかも、検流計の慣性特性、さらにコイルと非可動型検流計の接続方法（摺動接触子を通じた接続）が交流の測定値  $\int J dt$  に影響を及ぼす可能性がある。すなわち、この実験の結果は明らかに定量的ではなく、定性的なものでしかない。

興味深い疑問がある。場  $\mathbf{E}$  は誘電体中（例えば空気中）および真空中ではほとんど伝播しない（きわめて急速に減衰する）（スイッチを入れてもアイロンが熱くならない）が、金属中では著しく大きな距離まで伝播する。金属中における電場維持メカニズムは、いったいいかなるものなのか？

古典的電気伝導論に対してあらゆる実験との定量的一致[6, §41, 英訳版§3.7]を期待し、その結果、それに対して「不採用」の判定を下す前に、次のすべてのファクターを考慮する必要があるはずである。

1) 厳密には、電子は場に沿って運動していない（さらに格子場および場  $\mathbf{B}$  が存在するからである）。

2) 散乱は「行き当たりばったり」に生じているのではなく、特定の角度分布に従って生じている。

3)  $\mathbf{v}_e$  の初期値はゼロではない。

4) 衝突時の  $\mathbf{v}_i$  値は（平均）熱量である。

5) この場合における電子の平均運動エネルギーは計算値でなければならない。

6) 未知の「文字」 $l$ ——自由飛程長さ——の導入は、何ら新たなものをもたらさない。

7) 熱容量に関して、金属の場合と誘電体の場合では違いがなければならないということは、必ずしも自明なことではない。なぜなら、いずれの場合にも、電子は結晶格子点に**固定されている**原子核の外に存在している、すなわち、熱伝達は電子によって行なわれているからである。金属中の電子は自由電子とみなされるという違いがある役割を演じているのは、熱伝達の**速度**、すなわち熱伝導率に関してのみである。それゆえ、熱容量の差にもとづいて電子濃度値を評価するのはあまりにも乱暴すぎる。

8) 量子論の場合には、自由飛程長さに関しても、原子間の平均距離よりはるかに大きな値が得られている。

9) 古典論の場合には、 $T$  に対する  $\lambda$  の依存性の導出は、明白な形で、まったく何も批判されないような仕方で行なわれている。

10) 小さい距離における場はまだ知られていない。つまり、電子と格子の間の正確な相互作用はまだ知られていない。それが解明されたときに初めて、厳密な古典論を構築することが可能になるはずである。

11) 金属の電気伝導性もまた、ad hoc な仮説によってではなく、（超伝導性を含めた）単一の関係式によって表されなければならない。

観測不可能な表式  $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$ （これは法則ではなく、 $\sigma$  という量の定義である）から、実験的に観測可能な表式  $I = U/R$  を得ることは可能であるはずだが、しかし、その逆の移行は唯一可能な移行というわけではない。

オームの法則における自由電子による伝導メカニズム、また電子の速度増大を制限する摩擦を信じるとすれば、オームの法則が妥当する範囲が幅広い（すなわち、 $\sigma$  が定数であり、その関係が線形関係である）ということはきわめて疑わしい。衝突についての考え方もかなりパラドキシカルである。なにしろ、あらゆる原子はむしろ「空虚」と言うべきものであり、したがって電子にとっては何かと衝突するより、原子を通り抜けて飛んでいったほうが簡単なのである（つまり、教科書の説明に反して、ここには「宿命的な」ものは何もないのだ！）。しかし、これは物質構造に関する現代諸理論に共通する問題である。それゆえ、2つの金属の接触が**非オーム性**であることも奇妙である。

電子の秩序運動の速度は毎秒数ミリメートルであることを思い出そう。それゆえ、[4, §4.5] の冒頭において  $\tau$  の特性時間が場中における金属の**伝導率**にもとづいて評価されているのに対し、その先では結晶中の電子の移動経路を評価するために**熱速度**（それは毎秒

数百キロメートルである) が代入されているのは、いささかいんちきくさい。そして最終的に $\sim 30 \text{ \AA}$  という大きさが得られているが、これはあまりにも大きすぎる！ それゆえ、当然のことながら、 $\tau$  のこの大きさに関係を持っているのは熱速度ではなく、定方向運動の速度でなければならないはずである(その場合には、それよりはるかに小さい経路が得られるはずである)。一般に受け入れられている選択方法に従った場合、温度の低下に伴って金属の伝導率が増大することも奇妙である。一方、「ドリフトモデル」の場合には、 $(\mathbf{E} \times \mathbf{B})$  の合成場における) 状況は定性的にそれより良くなり得るはずだ！ さらに、実験上の疑問が生じてくる。秩序化した電子スピンの占める、導体表面上に生じる磁場中におけるその割合は、どのような割合なのだろうか？

$\text{NaNO}_3$  の電気分解におけるナトリウムイオンの白熱灯内部への透過 [8, §93] は、いくつかの疑問を生じさせる。 $\text{Na}$  イオンが非溶融法で製造されたガラスを透過するのに、それより軽い電子が透過しないのはなぜか？  $\text{Na}$  がガラスバルブ内部の全体には分布しておらず、溶液の上方の上部に存在しているのはなぜか？ 電気分解と中和処理の停止後、 $\text{Na}$  がガラス自体の内部に存在していないのはなぜか？ 電流のエネルギー全体が電解質の加熱(ジュール熱)にのみ向かい、物質の破壊に向かうエネルギーは存在しないという主張は奇妙に思われる。もし形成される生成物(例えば  $\text{H}_2$  や  $\text{O}_2$ ) が次の段階で等温反応に入ることができるのだとすると、追加エネルギーを得ることができるということになるのか？

[8, §84] の例2において、電流の流れている導線内のジュール熱は、導体の周囲の空間からの電磁エネルギーの流入の結果であると「宣言」されている。では、ジュール熱はどこで発生するのか？ 導線内をエネルギーが流れる過程で、**導線の全体積内で**発生するのか？ しかしそうだとすると、もし**その隣に**(電流の流れていない!) 導線の**断片を**置いたとすると(さらにいいのは、電流の流れている導線を金属管の断片の内部に通すことである)、その断片の  $\mathbf{H}$  は同じ値になり、 $\mathbf{E}$  は近い値になる可能性がある。すなわち、導線(または金属管)のその断片の区間を通過するエネルギー流束は、閉回路の導線の同じ区間を通過するエネルギー流束と同等となり、そして前者のジュール加熱は後者に近いものにならない(なにしろ、エネルギーは吸収されたか、吸収されなかったかのいずれかなのだ!) しかし、それは違う！ もしエネルギーが「すべて導線の中心に流れ集まり」、そこで熱が発生するのだと考えたとすると、中空の金属管の抵抗はほぼゼロとなるはずであるが、これも違う。それゆえ、ウモフ・ポインティング・ベクトル<sup>[訳注]</sup>からの「作用」の解釈をめぐっては、すべて順調に事が運んでいるわけではない。ところで、次のコンデンサーに関する例3では、それより前の箇所ですら簡単に投げ捨てられていた変位電流の概念が利用されている。しかも、ウモフ・ポインティング・ベクトルは一義的ではない。著者シヴーヒンは古典物理学を批判し、相対性理論を賛美している。ところがまさにここで、電磁パルスは相対性理論の出現よりも前にマックス・アブラハムによって導入されていたことが「判明」しているのだ！ そうだとすると、彼の批判はまったくの空文句に聞こえる

<sup>[訳注]</sup> 空間中におけるエネルギー流束に関する一般的な考え方は、1874年、ロシアの物理学者 N. A. Umov によって初めて導入された。そのため、エネルギー流束密度の物理的本性の具体化を伴っていないエネルギー流束密度ベクトルはウモフ・ベクトルと呼ばれている。このベクトルの表式は Umov によって弾性媒質および粘性流体についてのみ得られた。1884年、Umov の着想は J. H. Poynting によって電磁エネルギーに適用され、さらに深く検討された。そのため、電磁エネルギーの流束密度はポインティング・ベクトルと呼ばれている(ロシア語版 Wikipedia による)。

(相対性理論以前にはいかなる概念が不足していたというのか?)。理論家たちは、実験による検証を一度たりとも(!)受けたことのない例(信仰の表明)を援用することを好む。例えば、軸方向磁場中における円筒形コンデンサーの放電時には、確かに回転が生じ得るわけであるが、しかしその際には、**外部条件が変化した瞬間**、荷電粒子の運動状態の変化の**具体的メカニズム**が発動されることになる。したがってそのような実験は(もしそれが行なわれたとしても)、「定常的に」回転するエネルギー流の存在を証明しないはずである(例えば、**静止している**コンデンサーのジュール加熱はどこに消えてしまったのか?)。

電磁誘導の起電力値に関する現行の計算方法においては、金属の電気伝導率が大きいことが前提条件とされているが、実際の起電力実験においては、その値は電気伝導率にはまったく定量的に依存していない。すなわち、

$$\text{grad } \varphi \equiv -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$$

(すなわち、 $\mathbf{E} \equiv 0$ !)でなければならない。しかしそうだとすると、分極の原因そのものが存在しないことになってしまう(Z. I. Doctorovich, 1994<sup>[訳注]</sup>)!

定常電流に関する表式 $\text{div } \mathbf{j} = 0$  [9, §21]は、電荷が個別にあるいは分割された形で発生することは不可能である(局所的な対(ペア)としてのみ発生する)という我々の仮定を反映しているだけである。関係式 $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$ もまた、ただ単にあらたな未知量 $\sigma$ を付け加え、線形的依存性の計算にとって最も簡単な関係式を選びたいという我々の願望を反映しているにすぎない。 $\sigma = \text{const}$ という選択は、我々が問題にしているのは無限大の1種類のタイプの媒質であることを意味している。境界上においては $j_{n1} = j_{n2}$ であるという選択には、何の根拠もない。導体には制限がある可能性があり、誘電体中には追加的な点電荷が存在するという事は、境界条件のより厳密な根拠づけを必要としている。 $\sigma$ が正であること(ミクロな特性)を証明するためにエントロピー増大の一般法則(熱力学)を援用するのは人為的に見える(現代電気力学では、自明の事柄が常に有効というわけではない。例えば、負電荷のみが運動していることは自明であるにもかかわらず、運動しているのは正孔であるとみなさなければならないことがある)。また、永久磁石の存在は、異方体の場合には $\mathbf{j}_0$ が存在する可能性があることを証明しているが、ここではエントロピー増大則はまったく何の関係もない。直流(焦電気)は、例えば、外場 $\mathbf{E}$ に対して常に垂直である可能性がある。

このように、仔細に検討してみると、電流についての記述といった「工学的応用」でさえ、その記述の理論性という点で光彩を放っているわけではない。

[訳注] この論文(原文ロシア語。英訳版あり)は著者 Z.I. ドクトロヴィッチの個人サイト "Естественная физика (Natural Physics)" <http://www.doctorovich.biz/> で入手できる。英訳版の題名は "Paradoxes in the Electromagnetism Theory and the Methods of their Eliminating" (1994)。

## 第4章 磁場

次に、磁場の概念およびその発現の理論的記述について検討しよう。

電流の流れている導線に対する磁気力の作用についての説明 [2, III, §13-3, 原著 II, §13-3] は完全に正しいわけではない。すなわち、正イオン骨格は不動(すなわち針金そのもの)であり、その針金に対して磁気力は作用することができない。例えば、電子が導線の表面に移動して電場を作り出し、その電場が金属のイオンに作用し、導線を動かすと言うことができるはずである。

純粹の静磁気学と純粹の静電気学への区分はあまりにも人為的である。そこでは次のことが想定されている。

1) 電流は全体として中性である(例えば電子流を検討することはできない)。

2) 我々は、同一の(!)現象を、互いに対して運動している相異なる基準系内においては研究することができない。

概して言えば、湧き出し口あるいは吸い込み口の存在を確認するためには、磁力線が1点から出る、あるいは1点に入るということは必須のことではまったくない。なぜなら、垂直運動も存在するからである。電流が流れ始めたところをイメージしていただきたい(プロセスには常に始まりがある)。磁場は、擾乱がその時間内に到達することのできた、電流から若干離れた所においてのみ存在することになる。しかし、若干の時間が経過すると、それより離れた所において、磁場も最終的な形で出現する。例えば、直線電流の場合、それはリングとなる。したがって、磁場のリングはその場に静止せずに、湧き出し口から遠ざかる方向に向かって拡大していく(このイメージにおいて、リングが閉じた形状を持っていなければならないとした場合)。これもまた湧き出し口からの一種の流れである。

電流の磁場(力場)の厳密な定義には困難な点がある [6, §42, 英訳版§4.1]。第1に、そこで論じられるのは**中性電流**であり、**中性電流の不動素片**をいかにして分離するのかは知られていない。第2に、ここでもまた、小さい距離における磁場の性質は知られていない。第3に、公式

$$\mathbf{F} = \frac{J}{c} [d\mathbf{s} \times \mathbf{H}]$$

は  $\mathbf{H}$  の強さの定義以上のものではない(それについては多数のきわめて多様な定義を考え出すことが可能である)。そしてさらに、ニュートンの法則の力  $\mathbf{F}$  も単なる「文字」 $\mathbf{F}$  の定義にすぎない(ポアンカレを思い出していただきたい)。第4に、この場合における重ね合わせの原理は、公準として単に追加的に定められているだけである。第5に、ビオ-サバールの法則は実験によって積分値を決定しているのであって、その積分値からは電流素片の場に関する表式を多数の方法によって導き出すことができる。

[6, §52, 英訳版§4.11] では、自己インダクタンスの導入は純粹に形式的な仕方で行なわれている(その定義では、積分に電流密度が含まれている)。第1に、自己インダクタンスが有限であることが証明されていない(すなわち、いかなる物理的意味でも持つことができる)。第2に、自己インダクタンスが電流(電流の力)には依存しておらず、そこで提示されている幾何学的特性にのみ依存していること、すなわち、回路そのものを特徴づけ



る定数であることが証明されていない（別の側面から見ると、純粹に幾何学的な特性を通じて表されている他の教科書における表記は物理的意味を持たないことが確認される。その表記は無限大に向かっていくからである）。その結果、そのあとに出てくる自己インダクタンスを用いたいくつかの公準的な定義（電束  $\Phi$ 、ポテンシャルエネルギー）もまた、物理的意味が不明確となっている。

普通の電気力学では、磁力線 [6, §53, 英訳版§4.12] が適用されている例は限られている。その理由は、物理学者たちは、磁場の場合のポテンシャルを別の仕方で導入することを望んでいないということ、あるいは連続的充填立体 [これが適訳かどうかは不明]（ちなみに、それはトーラスである）の表面が存在し、数学でベクトル  $\mathbf{H}_1$  と  $\mathbf{H}_2$  が垂直方向において接するという事実からは、ベクトル

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_1 + \mathbf{H}_2$$

が任意の表面に接するという（この状況は個別の場合——我々の事例においては円筒対称の場合——にのみ成立する）は導き出されないということだけではない。その理由はさらにもう1つ、この描像が定常性、すなわち  $t = \infty$  を前提としていることにある。しかし、そのような場合、磁力線の経時的な「延長」という記述は不適切である。実際、電流投入の時点を観察する場合には（1点からの電荷分離とは異なり、電流投入は常に存在する）、新たな磁力線の伝播または／および出現を描出する必要がある。その際、トーラスの場合には、（対称性の結果として）電磁線はトーラス表面の各点から出現し始め、それが「伝播」するときには、既存の磁力線に沿って「伝播」する（しかし観測者にとっては、その描像は完全に定常的であるように見える）。

空間の連結性の定義 [6, §54, 英訳版§4.13] の与え方は不完全である。例えば、2つのループ電流  $J_1$  と  $J_2$  の場合には、連続的変形によって互いに1つにまとめることのできない4つの回路となる（その領域は3重連結と宣言されているにもかかわらず、3つの回路ではない）。すなわち、1) ループを包含していない回路、2) 電流  $J_1$  を包含している回路、3) 電流  $J_2$  を包含している回路、4) 電流  $J_1$  と  $J_2$  の両方を（中心を經由して）包含している回路である。提案されている方法に従って（単連結が得られるまで追加される、いくつかの仕切り [partition, barrier] を用いて）仮想磁荷が導入されているが、その導入は、真磁荷の存在も非存在も証明しない。なぜなら、それ以外の方法によって磁荷を導入することはできないことの証明は存在しないからである。しかも、場に関する方程式も様々な方法で導入することができる（例えばアンペールの表式を思い出そう）。磁気単極子の存在、その「数学的な」（記述上の）特性および観測可能なパラメーターに関する問題は今も未解決である。

導入されている磁気シート [magnetic sheet] の概念 [6, §55, 英訳版§4.14] はきわめて不十分である。すなわち、無限に薄い線状電流  $J = \text{const}$  が仮定されている。また、考察は外部区間にしか及んでいない（同一の回路の相異なる素片の相互作用も考慮されていない）。ポテンシャルの多義性（補助関数の多義性。補助関数は様々な方法で多数導入することが可能である！）は重要ではない。なぜなら、意味を持っているのは測定可能な物理量のみだからである。ソレノイドの磁場を現実の磁石の磁場と（人為的に考え出された磁気シートとではない！）比較する際は、現実の磁石の内部では磁場がどのように分布しているのかという問題が実験的に解決されなければならない。

運動する導体中における電流誘導の導出に際しては、導体は内場に影響を及ぼさないこと、また自己誘導作用（ここでは自己誘導作用ですらない！ より正確に言えば、導体の一部分の他の部分に対する作用である）は存在しないことが暗黙のうちに仮定されている。ミクロスケールにおける磁力に関する表式が厳密に正確ではない仕方を取られていて、結局、各種の「微量添加物」を含んでいるときには、非定常運動の場合には**積分値**でさえ変化する可能性がある。また、非定常運動、サイズが変化する回路および交番磁場の場合に、全磁束のみを通じて誘導起電力を定義することも疑わしい（さらに非中性回路に関する疑問も生じてくる）。なぜなら、電磁相互作用の最終的速度の結果として、固定された時点における「回路」という概念自体が幾分不確定的になるからである。 $\Phi = \text{const}$  のとき  $\varepsilon_{\text{ind}} = 0$  という等式についてでさえ、単極インダクターや単極発電機の場合には問題がある。「運動する磁場」（例えば回転磁場）という概念は存在し得るのかという問題 [10]、また磁場には非慣性的な性質が存在し得るのかという問題も未解決である。

どうしたわけか、電磁誘導の法則の導出に際しては、諸量は絶対速度には依存してはならず、相対速度にのみ依存しなければならないとみなされているが、これは仮説にすぎない。磁束の変化の原因は重要ではないということ、また何らかの役割を演じているのは全磁束であり、磁束分布ではないということも仮説である。概して言えば、この「場の理論の精神」（1点におけるすべての諸量は、**同一の1点における場**および場の導関数に依存しなければならないという考え方）は、ヒステリシス現象（当該の状態への転移経路に対する依存性）によって覆される。磁性媒質が存在するという事は、事実上、依存関係式の中に複数の絶対速度（あるいはそれと同じことだが、少なくとも3つ以上の相対速度）が現れるということの意味する。そして  $\mathbf{H}_{\text{micro}} = \mathbf{B}$  という単純な入れ替えは、けっしてそれほど単純ではない。すなわち、（振動数の）相異なる振動の伝播と減衰の仕方は相異なり、重ね合わせの法則は破られ、また結果は平均化の方法に強く依存する。起電力に関するこの公式 [6, §77, 英訳版§6.2] の実際の裏づけは、間接的なやり方で——電流の力の測定にもとづいて——（しかも、オームの法則は正しいと仮定した上で）しか行なうことができない。準定常電流という考え方は近似的な考え方であり、窮地から脱するために——急速な変化や二次誘導を排除し、せめて現実との何らかの（線形）近似を得るために——導入されたものである。

方法論の観点から見ると、電荷に作用する力という、**公準として定められた**（そしてミクロスケールにおいて検証することが不可能な）力を通じた起電力の導入の仕方 [4, §7.3] は、おそらく、成功しているとは認められないのではなかろうか。そこでは、その起電力を「あらゆる状況でも」厳密であるとみなさなければならないとされているが、それはあまりにも過大な要求である。ループが垂直で複雑な形状を持っている場合には、磁束の決定の際にただちに疑問が生じてくる。ループに向かって張られている諸表面のうち、どれが「正しい」のか、そして他の表面が適さないのはなぜなのか？ また、磁束の保存が等式  $\text{div } \mathbf{B} = 0$  から導出されているが、この等式はただ単に我々が**選択したもの**であるにすぎない（！）ことを思い出そう。一様な磁場中におけるループの直線運動が検討されているときには、ループがその位置を変えているにもかかわらず、起電力が発生するとされている。ところが、**一様な磁場中**で検討される対象が単極発電機の場合には、起電力は発生しない

とされている（「説明」の不平等さ、そして現代電気力学における「推論」の不十分さがただちに目に飛び込んでくる）。

異なる系の間を「跳び移り」、あれこれの観測者が何を見ることになるかを確かめる [4, §7.4] よりも前に、各系において独立に測定することが可能な量はいかなる量であるか（すべての量なのか？）を明確に決定しておく必要がある。ファラデーの実験におけるローレンツ不変性 [4, §7.5] について語るのは、（それほどまでに小さな運動速度の場合においては）きわめて滑稽である（また、ガリレイ不変性についてのみ語ることを恐れるには及ばない）。全導関数

$$\frac{d\mathbf{B}}{dt}$$

の代わりに偏導関数

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

を代入すると、数学との実に独創的な「ダンスの踊り方」が生まれる（数学者たちはこんなものを見たことがあるだろうか？）。なにしろ、それより前の箇所で述べられていた 3 つの実験すべては、磁束の変化の諸原因に対する非依存性（すなわち全導関数！）について語っていたのだから。

巻き数  $N$  の直方体トロイダルコイルに関する自己誘導の表式 [4, §7.8] には、奇妙なことに  $\ln(b/a)$ （ここで  $b$  はトーラスの外側半径、 $a$  はトーラスの内側半径）という比が含まれている。すなわち、

$$b \rightarrow 0, a \rightarrow 0, b/a = \text{const}$$

とすると、その「消失した」構造物のインダクタンスは以前と同じ（有限）になる。導線の直径がゼロのワイヤーループを通過する磁束は無限大になってしまう！ 直径が有限な導線についての検討の場合には、回路のワイヤのどの部分を通じて磁束を計算するのか？ という疑問が生じる（そしてこれは、磁束は理論どおりに常に電流に比例するのか？ という実際上の疑問である）。

**場の全体**にわたる積分を通じてエネルギーを記述する方法 [4, §7.10] は、非常に良い方法というわけではない。無限大の空間全体の場のエネルギーをうまく「収集する」あるいは「分散させる」より、系をある状態から別の状態に、またその逆方向に転換させることのほうが、はるかに迅速に行なうことができる。

[8, §55] における循環定理の導出は方法論的に根拠が不十分であるように思われる。磁気ポテンシャルの概念が利用されているのに、そのすぐ先では（循環定理の微分形の導出に当たって）、電流が存在する領域では場  $\mathbf{B}$  は非ポテンシャル的であると述べられている。そうだとすると、「導出」全体の根拠は不十分である。もし場  $\mathbf{B}$  が回路の導線自体を除いたいたるところでポテンシャル的であり、ポテンシャル的でないのは導線内部のみであるとみなすとすれば、ソレノイド場には「あまりにもわずかな場所」しか残らない。電流の磁場と電流の外部の空間内の磁場シートとの等価性（境界条件を一致させる際における）という主張には、考え込まないわけにはいかない。なにしろ、その場合には「電流の内部」は「運動する電子の内部」を意味するようになるわけだが、しかし電子の内部構造に関連

する（電場および磁場の分布を含めた）すべてのことは、今のところ我々の空想（あるいは信仰！）の領域内にのみとどまっているからである。

物質中の分子電流も信仰の対象である。我々は分子電流を、それに対する場  $\mathbf{B}$  の何らかの依存性を裏づける目的で直接的に測定することができないからである。より正確な言い方をすれば、その依存性のある種類が（真空中における諸法則を想起させるようにするために）あらかじめ公準として定められている。そして我々に対しては、場  $\mathbf{B}$  の測定値を用いて  $\mathbf{j}_m$  の**所要**の値をつじつま合わせで出すことが求められている。 $\mathbf{j}_m = \text{crot } \mathbf{I}$  という表式 [8, §59]，そしてベクトル  $\mathbf{H}$  および境界条件の決定もまた、我々の**選択の結果**である。さもないと、我々が「それ以外の」選択をした場合の別の形式においては、内部矛盾をはらんだ決定や非一義的な解が必ず得られてしまう。このように、我々の選択は、自然がまさにそのような構造を持っており、それ以外の記述モデルを導入することはできないということ、まったく**意味していない**！ [8, §61] によれば

$$\text{div } \mathbf{H} = -\frac{\mathbf{H} \text{grad } \mu}{\mu} \neq 0$$

なのだから、選択されているその記述方法に従った場合、媒質  $\mu$  に非一様性が存在するとき、場  $\mathbf{H}$  は真空中における伝導電流すら意味しないのだ！

存在するとされている電場と磁場の質的「差異」に関する問題について言えば、いずれの場合にも、遮蔽特性は遮蔽カバーの媒質の特性に依存している。例えば、超伝導体製の遮蔽カバーの内部では外場からの**完全な磁気保護**が可能である。

このように、磁場理論を注意深く検討してみると、一般に受け入れられている理論は、それが与えている答えよりも多くの基礎的な問題点を抱えていることが明らかになる。

## 第5章 マクスウェル方程式

今度は電磁気に関する学説の「最も神聖な」基礎部分、すなわちマクスウェル方程式に話題を進める。電磁理論のすべての成功、そのすべての威力と厳密性はまさにここに現れているはずだ！ より注意深く眺めてみよう。

補助的なコメントから話を始めたい。(v に関して) 非線形的な相対論的運動方程式の場合、人為的に区別された場の重ね合わせの原理は、信仰あるいは定義である(科学ではない)。時間の遅れというイデオロギーを考慮したとき、重ね合わせの原理は2粒子の場合でさえ無限に複雑な(宣言的な、口先だけの)ものとなる。相対論は唯一検証可能な力のアプローチを根絶し、その代わりに抽象的で検証不可能な場のアプローチを押し付けようと試みている。

[2, III, §1-4, 原著 II, §1-4] の法則 (1.6) <sup>[訳注]</sup>

$$\text{任意の閉曲面}S\text{を貫く}\mathbf{E}\text{の流束} = \frac{\text{内部にある総電荷}}{\epsilon_0}$$

は正確化を必要としている。すなわち、 $S$ は、 $t = R_{\max}/c$  (ここで  $R_{\max}$  は電荷から表面までの最大距離) を超える時間の間、電荷に対して静止している固定された表面なのである。

[同上] の法則 (1.8)

$$\text{任意の閉曲面}S\text{を貫く}\mathbf{B}\text{の流束} = 0$$

についても同様の説明が必要とされている。さて、[同上] の「法則」 (1.7)

$$\text{輪郭線}C\text{に沿った}\mathbf{E}\text{の循環} = -\frac{d}{dt}(\text{表面}S\text{を貫く}\mathbf{B}\text{の流束})$$

はどうかと言えば、これは、そのような循環に関するいかなるメカニズムも与えていない。第1に、 $\mathbf{B}$ の流束は、表面  $S$  の中心においてのみ、その縁に触れることなく、輪郭線  $C$  を変化させることができることになる(そうだとすると、原因はいったいどこにあるのか?)。まさか、 $\mathbf{E}$ の循環が変化するのだろうか? 第2に、信号に対する応答の遅れのメカニズムは、ここのどこに表されているのだろうか? 同様のコメントが [同上] の法則 (1.9)

$$c^2(\text{輪郭線}C\text{に沿った}\mathbf{B}\text{の循環}) = \frac{d}{dt}(\text{Sを貫く}\mathbf{E}\text{の流束}) + \frac{\text{Sを貫く電流の流束}}{\epsilon_0}$$

にも当てはまる。

電気力学の微分方程式におけるあらゆる等号は不正確である。なぜなら、それは方程式ではなく、**原因が結果を引き起こすこと**の表記なのであって、したがってその原因と結果の位置を交換すること、あるいはそれらの構成部分を移動させることすら不可能であるからである(たとえそれが、あらゆる数学の規則に従って正確になされたとしても! )。

<sup>[訳注]</sup> (1.6) および (1.8) の  $S$  は引用者が付け加えたものであり、原著書にはない。(1.7) および (1.9) の  $S$  は原著書に元々あるが、そこでは、 $S$  は「任意の曲面 (閉曲面でない)」と定義されている。

クーロンの法則 [2, III, §5-8, 原著 II, §5-8] の正確性をラム-レザフォードの測定実験における水素原子の [2 つの状態の] エネルギー差と結びつけるのは、大いなる仮説である (2 つのエネルギー値は諸理論を一般化したものであり、それらの実験による直接的検証はなされていない)。

導体内部には場  $\mathbf{E}$  が存在していることが判明する可能性がある (例えば、もしすべての伝導電子が導体のある領域から出ていったとすると、その領域では導体が局所的に導体であることをやめ、場  $\mathbf{E}$  が存在することが可能になる)。静電気に関する  $\text{rot } \mathbf{E} = 0$  という条件は自然の性質ではなく、マクスウェル方程式からの純粋に理論的な帰結 (追加条件) である。

重ね合わせの原理は場の概念に何かを補完しなければならない。さもないと、1 つの場を外場と試験電荷の場に区分することが不可能になり、その基本理念は無意味 (不確定な、あるいは錯綜した) ものになってしまう。ただし、場の重ね合わせを公準として定めることができるのは、真空 (線形媒質) の場合に限られる。非線形媒質が存在する場合には、そのことにより、媒質の応答は外場の諸性質だけでなく、試験電荷の諸性質とも結びつけられることになる。非線形媒質を考慮するためのいかなる原理も存在しておらず、したがってそのような原理の導入方法を公準として定めなければならなくなるだろう (こうして、場の方程式の一般性は失われる)。

個別電荷の固定 (デーモンによる固定とでも?) はまったくのファンタジーである。いずれにせよ、電荷たちは有限時間の間に四散し、平衡状態に向かっていく。さらに、ファインマンの告白を信じるとすれば、形成されつつある (外部から固定されていない) 電荷分布をめぐる静電気学の課題を解決するための、いかなる特別の方法も存在しない。例えば、鏡像法ではすべてが遡及的に生じる。まず最初に固定電荷をめぐる何かの天下り式の課題が解かれ、もし何らかの解析上の等ポテンシャル面が見つかったならば、その逆の課題——それに類する伝導面の近傍における電子に関する課題——が解決された、というふりをするのである。すなわち、この理論はアルゴリズムの内的整合性を欠いている。複素変数関数論は 2 次元の場合にしか適用することができず、しかも、それはどっちみち間接的な方法 (または前後あべこべな方法) である。残るは数値法のみである。

運動する磁場あるいは電場の存在の可能性およびそれらの影響に関する問題の解決は、マクスウェル方程式に対する限りなき信仰にもとづいてではなく、実験的になされなければならない。静電遮蔽度に関する問題、導体中における電流と場の分布に関する問題 (オームの法則) も同様である。

追加的な諸量のある組み合わせが意味を持たないにもかかわらず、そのような諸量が導入されている場合、それは必ずある決まった疑念を引き起こす (例えば、ティティウス-ボーデの法則に合わせた理論的つじつま合わせ——ただし、追加的な軌道を導入したやり方での——のように)。微分方程式の階数の増加は、必然的に境界条件 (および/または初期条件) の数の増加をもたらす。では、それらの条件が実験的に測定不可能な場合には、それらをどこから取ってくるのか? ここでも再び、得られるのは (アルゴリズムに従った理論ではなく)、我々が見たいと欲しているものに合わせたつじつま合わせという結果になる。そのような状況が、例えばベクトルポテンシャルとスカラーポテンシャルの導入 [2, III, §14-1, §14-2, 原著 II, §14-1, §14-2] に際して生じている。そこでは、解を見つけるため

に追加条件を完全に恣意的なやり方で設定せざるを得なくなっているが（方程式系は十分に確定されていない）、それを利用すれば、いつでも所望の形につじつま合わせすることが可能である（すなわち、常に答えを覗き見する必要があるのだから、この理論は予測力を持っていない）。

[2, III, §15-4, 原著 II, §15-4] に対するコメント。ポテンシャル  $\phi$  と  $\mathbf{A}$ , 場  $\mathbf{E}$  と  $\mathbf{B}$  は両方とも暫定的に導入された数学記号（補助的な量）である。古典物理学においては、直接的に測定することが可能な量は、座標、時間（あるいは基準振動数）、質量、力、速度である。もちろん、計器の目盛りををそれら以外の量に合わせて設定することは可能だが、しかしそれはあれこれの相互関係、メカニズムおよび解釈に対する信仰に依存することになる。現代電気力学と量子物理学との対比 [2, III, §15-5, 原著 II, §15-5] は完全に正しいというわけではない。そこでは両者が人為的（公準的）に区分されているからである。アハラノフ-ボーム効果 [同上] は、ベクトルポテンシャル  $\mathbf{A}$  が「真理であること」を証明しているというより、むしろ我々の磁気についての理解が不正確であることを証明していると言ったほうが正しい。概して言えば、**実験的・理論的**科学としての物理学の目標となり得るのは、独立的に測定可能な（すべての）諸量間の相互関係を発見し、見出されたそのような法則からの帰結を予言することのみなのである。積分方程式への遅れの導入 [2, III, §15-6, 原著 II, §15-6] は、それらの方程式を真空の場合の計算にとってさえまったく適さないものになっている。そして、その状態が電磁場の伝播過程に依存する可能性のある物質が存在する場合には、それらの方程式は明らかに不確定となり、所望のものに合わせたつじつま合わせの可能性を残すことになる（アルゴリズムの内的整合性を欠いた理論）。

電気計器の大部分は、電流に対する磁場の作用に関する同一の原理を用いている。すなわち、物理学的には、それは、一般に受け入れられている理論的解釈に従って相異なる物理量に合わせて目盛が定められた、同一の計器なのである。それゆえ、同一の計器を用いたのでは相異なる物理量を**独立**に測定することは不可能であり、したがってそれによって何らかの法則を検証することはできない。実際には、微分形のマクスウェル方程式は同内容の積分形の方程式からの帰結であるにもかかわらず、ファインマンは「**‘磁束規則’の例外**」を挙げている [2, III, §17-2, 原著 II, §17-2]。つまり、回路を貫く磁束は変化しないが、それでも起電力が存在する、またそれとは逆に、回路を貫く磁束は変化するが、それでも起電力は存在しないという例である。すなわち、この理論はアルゴリズムの内的整合性を欠いている。それがまさにそうでなければならぬことを賢そうな顔をして説明するためには、あらかじめ答えを知っている必要があるからである。それだけでなく、ファインマンが挙げている2つの例は着想の本質という点で同一であるにもかかわらず、その結果は正反対なのだ！ また、回路の運動に起因する、または場の変化に起因する起電力の発生という結果を、まったく相異なる方程式に帰しているのはいかがわしく見える。これらすべてのことは、電気力学の基礎部分でさえ、その完成度が不十分であることを物語っている。さらにその先で、原理の根本に関わる諸問題を検討する際に述べられている「電流は十分にゆっくりと変化する」という文言<sup>[訳注]</sup>には驚かされる。なぜなら、どの導関数が

[訳注] ファインマンは [2, III, 原著 II] の「§17-6 相互インダクション」で次のように述べている：「次に、コイルがいくつか固定されており、磁場が変化する場合を考える。前に電流が電場を作る場合を述べたとき、定常電流だけを考えた。しかし電流がゆっくり変化する限り、磁場は各瞬間に定常電流と大体同じであろう。こ

最も重要であるかは事前には知られておらず、そもそもそれは、実験的に確定する必要がある事柄であるからである（十分に検証済みの理論において、比較を行なおうとしている対象が何であるかを指定するという文脈においてならば、そのような文言は意味を持ち得るかもしれない）。

無限に広い平面から「進行する波」 [2, III, §18-4, 原著 II, §18-4] は、それ自体、非現実的な例である。いわんや、そのような運動が瞬間的に生じる場合にはなおさらのことである（なぜなら、例えば、無限大の導関数が生じ、極限移行が相異なる結果に導く可能性があるのだから）。スカラーポテンシャルとベクトルポテンシャルの共同の変更規則、また共同のゲージ条件 [2, III, §18-6, 原著 II, §18-6] の人為的な導入は、第1に、力はただ1つであり、 $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{E}$ ,  $\phi$ ,  $\mathbf{A}$  という量はすべて補助的な量であることを疑う余地なく立証している。第2に、その導入は、マクスウェル方程式の一部の解に制限を加え、あるいはそれらを破棄させる可能性がある（そしてそのことにはいかなる理論的根拠もない）。

ポテンシャル——それは、人為的に導入された量である。また、ポテンシャルは電荷の位置と速度のみに依存する（例えば、さらに加速度には依存しない）という前提は、「天降り式」に人為的に採用されたものである。補助的になされたあらゆる主張を原理の地位に引き上げることは、どこまで許されるのだろうか？ 方法論的な誤りを指摘しよう。ファインマンは [2, IV, §5-2, 原著 II, §26-2] において、電荷が運動するときの場  $\mathbf{E}$  の変化について、場  $\mathbf{E}$  は運動する電荷の前後方向では弱くなり、横方向では強くなると述べている。ところが [2, IV, §5-3, 原著 II, §26-3] では、場のローレンツ変換を

$$E_{\parallel}' = E_{\parallel}, \quad E_{\perp}' = \frac{E_{\perp}}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \quad \text{[訳注*]}$$

と書き、これは同じことだと言っている。「飛行機を決めるという有名な問題」 [同上] に言及していることは、当惑を引き起こす。その計算が一度も検証されたことがない（それ以外の多数の原因による現実の場の何百ボルトもの振動により、その計算上のマイクロボルトの電場を感知できない）のであれば、その効果は事実上分離することができない。

微分形のマクスウェル方程式を、それらの方程式がそこから「抽出」された実験上のマクロな法則よりも一般的であるとみなすことが可能であるとは、とても思われぬ。例えば、数学的変換のためにガウスの定理を利用することには、非常に大きな制約がある。すなわち、そこから電束が導出されているクーロンの法則の検証は、（非）点電荷から十分に離れた場合についてしか行なわれていない（したがって座標精度の実際のばらつきは粒子のサイズと比肩し得るものになる）からである。かつて、電荷はある程度理想化されたもの——事実上、平均化されたもの——とみなされてさえた。すなわち、微小粒子に構造はなく、微小粒子は磁気モーメントを持っていない、そして微小粒子の諸性質は球対称である、と。したがって、その結論は個別電子に対してすら適用しえない（より正確に言

の節の議論では、電流は常に、これが当てはまるくらい十分にゆっくりと変化すると仮定する」。

[訳注\*] この式は [2, IV, §5-3, 原著 II, §26-3] の原著および邦訳版の表 5-4 では  $E_{\perp}' = \frac{(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})_{\perp}}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$  と書かれている。



えば、厳密でなく、確証を欠いている)。ましてや、素電荷をさらに小さい非球状粒子(その現実の構造、密度およびモーメントが未知である粒子)に分割するのは、まったくの(不条理な)仮説である。特殊相対性理論においては粒子は点粒子なのだから、 $\text{div } \mathbf{E}$ はその点において無限大となり、電気力学は特殊相対性理論とはまったく整合しない。それゆえ、結論の導出に際しては、 $\text{div } \mathbf{E}, \rho$ は有限であり、また境界面上に電荷は存在しないという要請がなされているだけでなく、 $\text{div } \mathbf{E}, \rho$ の(素電荷のサイズを超えるあるサイズについての)平均値が利用されている。また、平均値に関する積分の等式からは、被積分関数の等式はけっして導き出されない。なぜなら、体積 $dV$ はけっして任意ではない、すなわち、ある有限な体積より小さくないからである。このように、それはただ単に、 $\text{div } \mathbf{E}, \rho$ の平均化された微小値と同じ結果をマクロスケールで与える関数を導入することが可能であることに対する信仰にすぎない。しかし、ミクロスケールにおいては(それはメガスケールにおいても同様なのだが)、それらの関数の挙動は非常に大きく異なっている可能性がある。それらの関数を素粒子の場合について分析すること——それは実験の専権事項である。それだけでなく、クーロンの法則は微分方程式

$$\text{div } \mathbf{E} = 4\pi\rho$$

よりも明確である。なぜなら、クーロンの法則では、試験電荷に作用する力、すなわち場が電荷量から一義的に導き出されるからである。これに対し、微分形の場合には、1つの電荷に対して複数の場が対応することができる(すなわち、その微分方程式の中には、実際には等号は存在しないのであって、そこからの帰結は必ずしも恒等ではない)。

電気力の仕事の定義は、そもそも方法論的にナンセンスである。なにしろ、その全体は相互に静止している物体について導出されているのである(言い換えれば、静力学とはいったい何なのか?)! 実際には、電気力は速度だけでなく加速度に対しても依存しており、したがって相異なった形状の経路の場合(各加速度は少なくとも方向の点で異なるものになるのだから)、仕事は相異なったものになる(また、閉じた経路に沿った積分はゼロにはならない)。断熱運動の場合には、極限を求め、 $\mathbf{v} \rightarrow 0$ 、 $\mathbf{a} \rightarrow 0$ のときのその不変性を証明しなければならないはずである。場の循環の定義のためにストークスの数学的定理を利用すること[6, §7, 英訳版§1.7]は、必ずしも正しくない。第1に、回路は表面電荷とも、空間電荷とも交差してはならず、場の大きさは有限で連続的でなければならない(特殊相対性理論はその点電荷とともに、ここでいっぺんに脱落する)。第2に、場に関するクーロンの法則は「メゾスケール」についてのみ導出(検証)されたものであり、素粒子のサイズと比較し得るミクロスケールにおけるその挙動は知られていない。したがって、我々は $L$ を

$$\oint_L \mathbf{E}_l d\mathbf{l}$$

に恣意的に変えることはできない。回路 $L$ は好きなように小さくすることはできない。同様に $\int_S \text{rot } \mathbf{a} dS$ の場合、 $S$ は有限である。しかし、その場合には、

$$\int_S \text{rot } \mathbf{a} dS = 0$$

という積分条件から、 $\text{rot } \mathbf{a} = \mathbf{0}$  ということは導き出されない。この量はミクروسケールでは任意となり得る——例えば、距離とともに急速に振動し、急速に減少する項を含むことがあり得る。 $E_i$  の連続性も必ずしも自明のことではない——例えば、不変量に変化するという場合があり得、その場合、閉じた回路に沿った仕事を用いた証明は、何事をも排除しない証明になってしまう。

物理的に無限小の量を導入し、ある小さい体積について平均化するということは、その量が線形的であり、我々が関心を持つ量に対して「線形的な」作用を及ぼすことを前提にしている。そうでないとすれば、実効量（平均量とは異なる量）を導入し、真の量ではなく、実効量の間関係を求める必要がある。なぜなら、実験で測定し得るのは、その関係のみ、およびそのような量のみであるからである。スカラー量

$$\overline{\frac{\partial \psi}{\partial x}} = \frac{\partial \overline{\psi}}{\partial x}$$

に関する等式 [6, §25, 英訳版§2.6] は、バルクは変形し得えず、かつ連続的である（連続性を持っている）という追加的な仮定の下に導出されている。

ミクロナ場の方程式はミクروسケールの場合について厳密に導出されたものではない（より正確な言い方をすれば、小さい距離では相矛盾している）以上、平均化されたマクロナ方程式への移行 [6, §26, 英訳版§2.7] においても厳密性を欠いている。誘電体の記述においても、ある種の内的な不満足性（自己無撞着性と自己十全性の欠如）が感じられる。準弾性力が公準として定められていること [6, §27, 英訳版§2.8] が、「答えを覗き見る」（ある性質を後で「正しいやり方」で記述するために、事前にその性質を測定する）ことを余儀なくさせている。誘電の分極を決定する際、様々な平均量を同列にしているのは大いなるこじつけである。ここで何が問題なのかと言えば、それは、平均量というものは、原則的に、ミクروسケールにおける量（例えば場）の振幅よりもはるかに小さいということである。それゆえ、そのような同列視は、すべてはある範囲内において線形化することが可能であるという、隠された信仰なのである。しかし、そのような平均値は、（そこには依存性の非線形区間も「含まれている」のだから）何らかの実効値をもって分極率の代用物とするという結果をもたらす。その結果、我々が得るのはある種のプリミティブな現象論ということになる。なぜなら、それらの実効係数  $\beta_{\text{eff}}$  と、量子力学的（あるいは任意のミクロナ）計算から得られる真の係数  $\beta$  との間には、理論的な関係すら存在しないからである。

マクスウェル方程式に対しては、何を期待することができ、何を期待することができないか？ 第1に、同一の現象はいくつかの方程式によって記述することができる。自明のことだが、諸パラメーターに対するある1つの量のあらゆる物理的依存性は、**数学的な線**としてではなく、何らかの有限な精度で決定される（諸パラメーター自体の決定精度、計器の慣性特性、選ばれた当該の現象と他の諸現象との間の弱い相互関係、ゆらぎの存在についても思い出そう）。すなわち、**物理的依存性**は、グラフ上では**数学的な線**によってではなく、帯によって表される。このように、同一の物理的依存性は（また諸現象の複合体さえも）、複数の相異なる方程式によって（さらには「質」の点で相異なる方程式、すなわち代数方程式、超越方程式、微分方程式、積分方程式、作用素方程式、等々によってさえも）記述することができる。第2に、ある具体的な現象を記述するある具体的な方程式（例

例えばマクスウェル方程式あるいはディラック方程式、等々が選ばれたとき、それらの方程式が同一タイプの諸現象の**複合体全体**（その後初めて発見されることになる諸現象を含む複合体全体）を記述しているという保証は、事前には存在しない。残念ながら、何らかの方程式の「無謬性」（原理的な厳密性と完全性）に対する狂信的な信仰が、どんな犠牲を払ってでも自分のその信仰を救わねばならないという気を似非研究者たちに起こさせ、様々な ad hoc な（具体的な個別的現象だけのための特別の）仮説を思いつかせたり、「難所」ではまことしやかな「科学的呪文」を唱えさせたりしているといったことがしばしばある。第3に、ある「名だたる」方程式系の**すべての個別解**が、少なくとも何らかの物理的意味を持っているという保証はまったくない。「非物理的な領域」がどこからか出現し、あるいは後になってからたまたま「行き当たった」ある領域では、それらの方程式が適用できないことが判明したときの呪わしい気持ちを思い出そう。物理学の課題の1つは、あれこれの解が持つ物理的意味の解明にある。あらゆる偏微分方程式系と同様、マクスウェル方程式は「過負荷状態」にある（一定の追加条件——境界条件、初期条件、ゲージ条件——を課せば、また、あれこれの記号の組み合わせへの物理的意味の与え方に応じて、多数の「天下り式」の解を得ることができる）。筆者の個人的意見によれば、理想としては（将来いつの日か）、物理学は方程式（数学方程式）の複雑化の道に従って発展していくのではなく、単純さの方向、あるいは諸原理の結合や解の組み合わせ（それは最も単純な解——代数解——の組み合わせかもしれない）の方向に向かって進んでいかなければならない。それゆえ、マクスウェル方程式を「あらゆる状況に適した理想的なもの」と認めることは、けっして可能とは思われない。

物理学の大部分の方程式には等号を置くことができない。原因と結果を入れ替えてはならない（そして、外部条件として**与えられている**ものと、公式の意味に従って求められるものとを明確に区別する必要がある）からである。例えば化学では、**プロセスの方向**を示すために、等号の代わりにしばしば矢印が置かれている。同一の結果が複数の原因によって引き起こされることがある（複数の原因は相異なる法則や公式によって表されるのだから、結果を知っていても、それによって自動的に原因を知ることができるわけではない）。それぞれの公式は独自の適用分野（法則の実現分野、そして当該の具体的場合への法則の適用可能性）を持っている。公式を「変形」して得られた結論が誤りであることが判明するという場合に出会うこともある（方程式系を解く際にもこのことを思い出すべきである）。

磁場に関するマクロな方程式 [6, §67, 英訳版§5.8] を「厳密に」導出しようと試み、単純化のための多数の仮定がなされている箇所では、「いずれにせよ、補助的諸量は最終的な方程式から消えることになる」という、科学もどきの自己正当化がなされている。しかし、この呪文は厳密な証明ではない。なぜなら、そこでは係数が1以外の数字となり得るからである（例えば体積と面積の場合、 $S^3$  に対する  $V^2$  の比は境界面  $S$  の形状に依存する）。

変位電流は、定常電流の磁場の方程式を連続方程式と整合させるために（すなわち、ここでも再び、それらの方程式の以前の形を公準化するために）、純粹に形式的に導入されている [6, §88, 英訳版§6.13] ことに注意を払おう。それらのうち第1の方程式は、考慮されていない増分（そこからの積分効果はゼロに向かっていく）を含んでいる可能性があるのだから、新たな方程式もそれとまったく同じ「精度」で正しいということになる（次の疑問も生じるかもしれない。我々はなぜ、例えば  $\mathbf{H}$  の定義を変更するのではなく、いわゆ

る「変位電流」の新たな増分を  $\mathbf{j}$  の新たな定義のうちに含めているのだろうか?。  $\mathbf{j}_s$  に対しては、それと同じ諸原理から出発して、一般に受け入れられている表式だけでなく、その発散がゼロを与える任意の関数を追加することが可能であり、しかもそのとき、課題の具体的な設定の仕方（初期条件、境界条件）に応じて、それらの関数は相異なったものになり得るのだ！ 伝導電流と変位電流は一連の効果（例えばジュール加熱、等々）に関して非等価である。そして実際、それらがなぜある場合には考慮され、別の場合には考慮されないのかの理由を「説明するまことしやかな呪文」を唱えるためには、「答えを覗き見」しなければならない。（電荷をまったく持たない場  $\mathbf{E}$  は存在し得るのかという問題は今も未解決である。物理学者たちははるか昔に、諸性質を持たない絶対的空虚から「諸性質の組を持つ物理的真空」へ「ドリフト」した。それゆえ、もしかしたら、場  $\mathbf{E}$  は真空の分極によって定義することが可能なのではないか?）周波数分散が存在すること、また進行するプロセス自体に依存する非線形的な諸性質が存在することを考えると、現実の媒質中におけるマクスウェル方程式の正しさもまた、疑わしいものとなる（物理学の知識のこの部分に、物理学者たちは事実上まだ到達していない）。開路における準定常電流あるいは交流の場合、結果は回路の「閉鎖経路」に強く依存しており、最短経路は何によっても特定されないというのは、お定まりのまことしやかな「呪文」である。エネルギー流束の観点に立てばこの呪文を正当化することは可能かもしれないが、しかし場には慣性的な性質があるという仮定の下では、慣性系の場合、真空中における電磁場のエネルギーは直線に沿って伝播するはずである。しかしいずれにせよ、電流の回路が非慣性系中にある場合について一般化することには疑問が生じる。

ある1点における場（および力）を積分則に従って計算するときには、作用を及ぼしている領域からその1点までの間における電荷および電流の分布を知っている必要がある（そしてこの分布問題は原理的な困難を引き起こさない）。ところが場の微分方程式を解く場合には、我々は全領域における初期条件、また空間中の（何らかの）閉じた境界面全体における境界条件を知っていなければならない。そのような諸条件の与え方が厳密であることはけっしてなく、直感的にも必ずしも明瞭ではない（これは、電気力学の主要方程式の好ましい形という問題に属する）。なにしろ、その「アカデミックな」解の現実化の可能性（および安定性）という問題がまだ残っているのだから、本質的には、我々は課題の設定において、我々にとって望ましい分布（場）の形を公準として定めているわけである。

[6, §91, 英訳版§7.1] では、経験則の一般化がなされた上で、場の方程式系が「数学的公理」として宣言され、さらにその先では、それらの方程式の物理的厳密性について深く考えることなく、それらは厳密にであれ近似的にであれ、数学的にしか解くことはできないとされていることが、かなりはっきりと見て取れる。場の方程式の導出は、媒質の諸性質に関するある種の簡単化のための**仮定**に立って行なわれている（すなわち、それは**モデル的な**方程式なのだから、それらを「どんな状況でも」厳密に正しいなどと宣言するべきではない）。 $\mathbf{B}$  の発散関数（これは  $t$  の任意の定数であることが判明している）は課題の設定の仕方に関わりなく、常にゼロであると仮定されている。その先の箇所では我々が出会うのは、方程式系ではない！ なぜなら、それらの方程式のうちの1つ、

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi\rho$$

は**定義**であるからである。さらに、現実の媒質の諸性質を記述するため、線形関係が公準として定められている。16個の未知数に対して、我々は17個の線形方程式を持っているのである（すなわち、解が一義的であるためには、1つの方程式は線形依存でなければならぬ。そうでないというのなら、それはつじつま合わせ関数だ！）。 $\epsilon, \mu, \lambda$ を所与の関数として選択することは、何を意味し得るのだろうか？もし我々がそのような選択を行なう目的で、それらの関数の電氣的測定を既に行っていたのだとしたら、では、それらの方程式の意味はどこにあるのだろうか。なにしろ、その場合には、我々は補助的な諸性質を測定する代わりに、我々が関心を持つ量そのものを直接測定することができたはずなのである。実際のところ、マクスウェル方程式を自己無撞着的（かつ完全）なもののみならずとはできず、したがって媒質のそれらのパラメーターを**独立に**計算することを可能とする、別の何らかの理論に当たってみる必要がある。[6, §91, 英訳版§7.1]において、電磁プロセスからの作用の**具体的な測定方法**が示されない限り、それらの方程式はそれ自体としては何も意味しないことが明確に強調されていることは注目に値する。にもかかわらず、ここでは、電磁エネルギーの変化（**公準化された表式**を変化させること）を通じて「決定を下す」ことが提案されているのだ！電磁場のマイクロなマクスウェル方程式からのマクロな方程式の導出もまた、一連の**追加的仮定**の下で行なわれている。

マクスウェル方程式の解の一義性の証明 [6, §93, 英訳版§7.3] では、**あまりにも強い条件**が用いられている。すなわち、場  $\mathbf{E}$  および  $\mathbf{H}$  は時刻  $t=0$  における空間全体 (!) におけるものとして与えられているが、これは理論的にも実践的にもきわめて非現実的である。また、場  $\mathbf{E}$  および  $\mathbf{H}$  が時刻  $t=0$  におけるある体積中におけるものとしても与えられているが（これも難しいことである）、それに加えて、これらの場のうちの一方について、時間全体  $0 \leq t \leq t_1$  の間における体積の境界面に関する境界条件が知られているとされている

（要求されている補助的データの数がいささか多すぎる）。その先では、さらに  $\mathbf{E}_{\text{外部}} = 0$

という条件が課せられ、様々な可能解は初期時点では一致するとされている。近似されたポインティング・ベクトルをそのような一般的証明のために利用することは厳密性の点で疑わしい。無限大における条件もきわめて厳しく、そのため、概して言えば、放射、一定流束、所与の振動（ゆらぎ）を含んでいるような種類の課題を排除してしまう。

実践的な観点から見ると、19世紀の積分方程式のどこに難点があるのか、理解できない。 $\rho$  と  $\mathbf{j}$  を知っていれば、現実の力も、（補助的な）場  $\mathbf{E}$  および  $\mathbf{H}$  も正確に計算することができるのである。そこには難点があるという見方は、遠隔作用論を放棄するという原理だけから発しているのだろうか？その結果、[6, §94, 英訳版§7.4] では**6**つの未知成分の代わりに、さらに新たな**4**つの補助的量——ポテンシャル  $\varphi$  と  $\mathbf{A}$ ——が導入されている。その際には、媒質の諸性質は一定であるとみなされている（そうでないとすると、それらの性質は測定される以前は未知であるにもかかわらず、何も計算することができなくなってしまう！）。しかしなにしろ、 $\text{div } \mathbf{B} = 0$  は数学上の個別の場合にすぎないのだ。すなわち、 $\mu$  が関数であるのなら、 $\text{div } \mathbf{H} = 0$  または  $\text{div } \mathbf{B} = 0$  のいずれかを選択する必要がある。このように、

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$$

という定義は、もう既に限定されたもの（ある種の個別的仮説）になっている。その先の箇所では、それらの4つの量に対して追加的な関係、すなわち

$$\operatorname{div} \mathbf{A} = -\frac{\varepsilon\mu}{c} \frac{\partial \varphi}{\partial t}$$

が導入されている。そしてその結果、再び  $\rho$  と  $\mathbf{j}$  にもとづいて  $\varphi$  と  $\mathbf{A}$  を計算することが必要になり、場  $\mathbf{E}$  および  $\mathbf{H}$  の計算はそのあとになってからようやく行なわれている。いずれにせよ、結局のところ、得られたのは中途半端な理論であった。なぜなら、場の理論においては、理想としては（場の源としての） $\rho$  と  $\mathbf{j}$  という量自体が、求められる関数でなければならないからである。しかし、この課題は数学的に解決されていない（あまりにも難しすぎる）。つまり、ただ単に、「記号」の書き方のちょっとした練習をやってきたにすぎないのである（なぜなら、「 $\rho$  と  $\mathbf{j}$  が与えられている。 $\mathbf{E}$  および  $\mathbf{H}$  を見出せ」という課題の設定の仕方は、19世紀以来変わっていないからである）。

球の問題の解では遅延ポテンシャルとともに先進ポテンシャルも得られる [6, §95, 英訳版§7.5] が、通常、後者は恣意的に投げ捨てられている。1個の点源の場合なら、それはまだ直感的に受け入れることができる（ここでも再び、我々は数学を「訂正」しているわけだ）。ところが有限なサイズを持つ電荷の場合（そこでは各点を他の電荷を持った点を取り囲んでおり、したがって相異なる時刻に「反映される」場を考慮する必要がある）には、しかるべき根拠づけが要求される。遅延ポテンシャルを含んでいる解 [6, §96, 英訳版§7.6] は、媒質の性質  $\varepsilon$  と  $\mu$  が一定というかなり人為的な場合を想定したものである。さもないと、我々は1点におけるポテンシャルではなく、ある種の「複雑な中間物」を相手にすることになってしまうからである。ベクトルの代わりにスカラー  $R$  および  $v$  と書くということは、電荷は線形運動すること、そしてそれを1本の線に沿って観測することを意味している。各点におけるポテンシャルが空間全体について  $t - \frac{R}{v}$  に依存しているということは、

時間全体にわたる空間各点における電荷の分布、電流および運動を知っていることを意味する（すなわち、最終的形においてあまりにも詳細な知識が必要となる！）。得られた方程式は、変位電流が補助的概念であることを示している。なぜなら、電荷の運動がなければ、変位電流は存在しないからである。にもかかわらず、場の伝播メカニズムにおいては、それらの方程式が利用されている。それゆえ、この理論は完全に首尾一貫しているとは思われない。なぜなら、ここでも再び、その推論の連鎖の**中間部**が、未知の**第一原因**に根拠を求めるよう指示しているからである。

教科書 [4, §7.11] では、変位電流の導入は、導入される微分方程式系を無矛盾にするという唯一の目的に従って人為的なやり方で行なわれている。しかし、その無矛盾性は次の疑問とは無関係であることを指摘しよう。すなわち、その方程式系は**すべての**場合をカバーしているのか、方程式系が可解である場合のその解は厳密解なのか、それとも近似解なのか、また、導入されたそのような電磁気現象の記述方法はどれだけの普遍性、唯一性および有益性を持っているのかという疑問である（マクスウェルが相対性理論を利用し得なかったことに対する「著者の遺憾の念」も滑稽に見える）。ここでの問題の核心は、[4, §7.13] のマクスウェル方程式において、我々は8個の線形方程式を持っているが、しかし電荷密度と電流密度は空間全体において所与であるとみなされている、すなわち未知数は

6 個である（そして発散方程式とは、場に関する境界条件である）ということである。課題の対称性をしばしば個別的な形で与えなければならなくなっている（その対称性を解において自動的に得るのではなく！）という点も指摘しよう。さらに、問いと答えの順序を取り違えてはならない。すなわち、(1) 自然界には何らかの**厳密解**が存在するかという問いに対して、その答えがイエスの場合にのみ、(2) マクスウェル方程式はその**厳密解**を与えるのか否かを検証することが可能なのである（しかし、検証の順序が逆の場合には、その検証は、マクスウェル方程式の任意の解は自然現象の**厳密な記述**であることの証拠にはならない）。そして最後に、解の重ね合わせの利用という強力な原理は、真空中における（線形の）マクスウェル方程式に**のみ**当てはまるのであって、媒質中における非線形方程式には当てはまらない。また、そもそも電気力学に特殊相対性理論を援用するのは奇妙である。なぜなら、特殊相対性理論における電荷は分布した電荷ではなく、原理的に点電荷であるからである。しかし、その場合には、多くの実践的課題が数学的な特異点を持つことになるはずである。

もちろん、マクスウェル方程式を電気力学の基礎的な公理とみなすことは可能である。しかし、純粋に演繹的な方法（理論的方法）は常に欠陥を伴う。なぜなら、この方法は、法則に対していかなる事後修正も加えることを許さないからである（教条性）。さらに、そもそもマクスウェル方程式自体は、力に関する具体的な「閉じた方程式」が導入されない限り、いかなる意味も持たない（それが導入されたときに初めて物理学が始まる。すなわち、まさにその結果として、「文字 **E** と **B**」が何を意味するかを実験的に検証することが可能になるのだ！）。マクスウェル方程式の性質（例えばその不変性）に関する半数学的な思弁は奇妙に見える。しかも、導入されたローレンツ力に関する表式の「原理的な」（つまり、無限の）**厳密性**を検証することは可能とは思われない。それに加えて、**厳密な電荷保存**（電荷の**加法性**、系の運動に対する電荷の非依存性、等々）を証明することは原理的に不可能である。それはせいぜいのところ、諸現象の**記述方法**についての**我々の選択**であるにすぎない（もしかしたら、単なる選択であるほうが良いのだろうか？）。

**スカラー**表式であるガウスの定理の意味内容は、クーロンの実験的（！）法則の**ベクトル**表式の意味内容よりも常に**少ない**。それゆえ、この定理を電気力学の基礎的公準の地位に引き上げることは、この定理を実験的に検証不可能なもの（立証することも反証することも不可能なもの）にする。それはそれ自体、（答えを「覗き見たり」、対称性や不変性などを人為的に「振り当てる」ことによって）解の「所要の」形を与えることを可能とする、ある種の「狡猾な策略」である。

$\text{div } \mathbf{E} \neq 0$ ,  $\text{div } \mathbf{B} = 0$  という「事実」は、我々が場 **E** の力線の方向を動径ベクトル **r** の方向と取り決め、他方、

$$\mathbf{B} = \frac{q}{cr^3} [\mathbf{v} \times \mathbf{r}]$$

という表式にもとづいて（ちなみに、この表式は小さい **r** の場合についてはまったく検証されたことがない）、我々が場 **B** の力線の方向を動径に対して垂直と取り決めたときの、**我々の選択**からの帰結以上のものではない。

マクスウェル方程式の導出 [8, §81] に際して変位電流の概念が導入されるとき、いずれにせよ、そこには大きな恣意が残る。第 1 に、遠隔作用の考え方にもとづいた法則が存在

するが、それらの法則は役に立たない、などという主張がなされている。しかし、他ならぬそれらの法則にもとづいてマクスウェル方程式の微分形が導出され（たったそれだけ！）、それらの形 [積分形と微分形] が完全に等価であることが証明されたのは、今からほんの少し前のことだ。今、その等価性はどこに隠れてしまったのか？ 第2に、諸作用の伝播速度の有限性とそのプロセスの急速な変動性に注目するとすれば、それらの微分方程式自体の導出に際しては、（形式的な数学の検討だけでなく）物理学的な諸原理の検討、すなわち、境界の選択およびその性質の決定（境界は固定されているのか、固定されているとすればどこに固定されているのか、それとも境界は場と一緒に伝播するのか？）、また境界上における場の性質（諸量あるいは流束は一定なのか？）に対しても、せめていくばくかの注意を払わなければならないはずである。方程式を微分形で表すことが可能であるということは、ただ単に、場の理論を利用するための**補助的な数学的条件**であるにすぎない。そのような理論を構築する目的、すなわち、諸相互作用の伝播速度の有限性を考慮に入れて急速に変動する諸プロセスを記述することを可能にする、という目的から出発する必要がある。そして、提案されている方程式（ガウスの定理、電荷の非存在、電磁誘導の法則）の検証を、この**物理学的な要件**を満足しているか否かという点についてのみ行なうべきである。それは行なわれていない。第3に、変位電流の導入は、（循環定理を変換する目的で）完全に人為的になされているように見える。なにしろ、電荷保存則（ここでは  $\mathbf{j}$  は全 (!) 電流を、そして  $\rho$  は全電荷を含んでいる）とガウスの定理から出発した場合、全 (!) 電流は

$$\mathbf{j} = \frac{\mathbf{D}}{4\pi}$$

となるわけだが、この量に対して等置されているのは変位電流  $\mathbf{j}_{\text{変位}}$  のみである。では、この「変位電流」が電荷保存則に関与しないのはなぜなのか？ という疑問がただちに生じてくる（「一方から金を奪って他方に借金を返す」という結果になっている。つまり、電荷保存則か循環法則のいずれか一方において「借金の穴埋め」をしなければならない）。さて、第4の問題は、このような選択は唯一の選択というわけではないという点である（この点にはこの教科書の著者も気づいている [8, §81]）。この選択は、その発散がゼロである任意のベクトルを量  $\mathbf{j}$  に付け加えることを許すからである）。第5に、ある方向に考えを持っていかせるような2つの誘導的な推定（例）を用いて、その実験事実が裏づけになっていると主張している語句は、きわめて弱々しく響く。そこで論じられているのは、データの解釈——現行理論にとって必要とされる数値を、直接測定されていない量に対して当てはめること——でしかない。さらに、電気力学の方程式は、**あらゆる電荷およびその運動（電流）を所与の (!) ものとしたときにおける場の定義として考え出されたものであり、現在にいたるまでそのようなものとして導出されているのだ**ということを思い出そう。実際、一部の研究者たちは現代電気力学が持つ可能性を明らかに過大評価し、電気力学はあらゆるパラメーターを自己無撞着的に記述することができているとみなしている。しかし、この過剰な自負は現実（実験）によって覆されている（量子力学が創出された事実、また絶え間なく現れる様々の ad hoc な仮説を思い出そう）。それゆえ、特に例1（球からの動径方向の電流）に対して、次の疑問が生じる。あなたはなぜ、プロセスは、あなたが



そのプロセスをそのようなものとして人為的に与えた、まさにそのとおりにひとりで進行しなければならないと考えるのか？ もし**所要**の電流が外力によって**供給される**というのなら、その外力が場の理論の方程式にあからさまな形で含まなければならない！ 第2の例（導線で接続されたコンデンサーの皮膜）においても、すべてがうまくいっているわけではない。真空コンデンサーの内部（中間部）には電荷はまったく存在せず（ $\rho \equiv 0$ ），したがってその場合、ガウスの方程式から  $\dot{\mathbf{D}} \equiv 0$  が導き出される。プレートとプレートの間の中間部には分極電荷は存在しない、すなわち  $\text{div } \mathbf{E} \equiv \text{const} = 0$  ( $\text{div } \dot{\mathbf{E}} \equiv 0$ ) であり、それ以外はない。このように、磁場をいかなる法則（表式）に従って**定義する**かという問題は、まだ解決されていない（急速に変動する諸プロセスの場合について、この問題を実験的に解決する必要がある）。最後に6点目として指摘したいのは、創出されるべき場の理論は、その理論における方程式が偏微分方程式であることをまったく要求していない、ということである。**局所性**という要件は、いかなる物理的原理によっても根拠づけられていない、人為的・追加的な数学上の条件なのである！

教科書 [8, §82] では、基礎的なマクスウェル方程式として正直に4つの方程式のみが挙げられ、それらを電気力学の公理とみなすことが提案されている。当然、次の疑問が生じる。では、今までそれらの方程式の「根拠づけ」や「導出」の試みがなされてきたのは、いったい何のためだったのか？ しかも、その種の公理は複数導出することが可能なのである（公理の唯一性に関する問題が生じなかったとしても、例えば、より良い「モデル」選択に関する問題が生じる）。物理学的な観点から見ると、提案されている方程式系は不十分である。その方程式系は、用いられている「文字」を測定するための方程式をまったく含んでいないからである。数学的な観点から見ても、その方程式系は完全ではない。16個の量のために、8つの方程式が書かれている。もちろん、純粹の数学においては、非線形媒質に関する非線形方程式の場合、方程式の数が変数の数と一致する必要はまったくない。しかし、物理学の方程式の場合には、自明のことだが、（諸量が連続的であり、小区間において線形化することが原理的に可能であることにより）それらの数は一致していなければならない。境界条件が存在したとしても、あるいは構成方程式が付加されたとしても、それによって事態が変わるわけではない。しかも、構成方程式は媒質に関する新たな未知関数（あるいは未知定数）を持ち込むが、それらに関する方程式は存在しない。つまり、それらは外から与えられた関数（あるいは数）なのである。したがって、諸課題を完全かつ自己無撞着的に解決しているという電気力学の自負を捨て去らなければならなくなる。このように、「マクスウェル方程式が持つ強固な基礎」という語句には、根拠がないように思われる。

ゲージ不変性 [5, §18, 小教程§45] についても若干の当惑を覚える。第1に、任意の定数ベクトルをベクトルポテンシャルに加えること、また任意の定数をスカラーポテンシャルに加えることが可能であるということは、（この教科書に書かれているように）「特に」  
〔訳注〕 なのではなくて、勾配の不変性に「加えて、さらに」なのである。第2に、作用は力

〔訳注〕 [5, §18, 小教程§45] の当該箇所は次のとおり。「特に、任意の定数ベクトルをベクトルポテンシャルに、また任意の定数をスカラーポテンシャルに加えることができる。このことは、 $\mathbf{E}$  と  $\mathbf{H}$  の定義が  $\mathbf{A}$  と  $\varphi$  の導関数のみを含み、したがって、後者に定数を加えても影響がないということからも、ただちに明らかである」。

によって決定されるのだから、**個別的でない形で一義的に決定されなければならないのは  $\mathbf{E}$  と  $\mathbf{H}$  ではなく、単一の力の表式に含まれる、 $\mathbf{E}$  と  $\mathbf{H}$  との総合的な組み合わせなのだ!** このことは、 $\mathbf{A}$  と  $\varphi$  の選択におけるさらに大きな恣意を許すことになる。それゆえ、これらのポテンシャルに対し、どれだけ、いつ、そしていかなる追加条件を課することが可能なのかはまったく未知である（非線形的な場合はなおさらである）。

マクスウェル方程式に対する境界条件は、何らかの物理的原理にもとづいてではなく、ただ単に、マクスウェル方程式がモデル的な場合に一義的な解を持つようにするために定められている。では、それらの条件は実際には（自然界においては）いかなるものなのか？ はたして、 $\mathbf{H}$ あるいは $\mathbf{B}$ の跳躍を持つような磁場を創出してはならないのだろうか（また、遷移領域のスケールとは、何を意味しているのだろうか）？ 例えば、平行に接合したいくつかの相異なる有限長ソレノイド内の磁場は、相異なるものになる。また、[磁場を]パルス的に投入したとき、波面はくっきりとした境界を持つ。光のパルスを思い出そう。では、ある場合には実例が現に存在しているというのに、別の条件下ではそれは存在しなくなるのはなぜなのか（それはいかなる原理なのか）？

マクスウェル方程式は、喧伝されているその普遍性や厳密性にもかかわらず、媒質は不動であるという仮定の下で導入されたものなのである（マクスウェルの方法と厳密に(!) 同じ方法によって媒質の運動を考慮に入れようとしたヘルツの試みが失敗に終わったことを思い出そう）。しかし、場の変化は（単なる場の投入だけでも）、媒質自体に対する場の作用を、そして媒質の運動（および媒質の性質の変化）を引き起こす。したがって、媒質の運動を厳密に考慮することができるのは、**運動する媒質の電気力学**（マクスウェル方程式を基礎としている現代電気力学においてではなく、今はまだ創出されていない電気力学）**においてのみ**であろう。また、 $v/c$ の比は小さいという、暗号化のための語句 [=自分の誤りを悟られぬようにするための意味不明な暗号文のような言葉] は、ここではまったく無関係である。そのような語句が意味を持ち得るとすれば、それは、厳密な電気力学において、2つの場合（媒質の運動速度が  $v$  の場合と  $c$  の場合）における同一の効果の大きさの比較が行なわれるときであろう。しかし我々は、媒質が速度  $c$  で運動したとき、いかなる効果が観測される可能性があるかを知っていない。概して言えば、現代電気力学における「**相対論的大変革**」を信仰している限り、そのような比較にもとづいた評価がなされるようになる可能性はない。第2に、媒質が運動している場合 ( $v \neq 0$ ) と静力学的な場合 ( $v = 0$ ) における諸効果の比較を行なうこともやはり不可能である。なぜなら、運動する媒質の電気力学<sup>[訳注]</sup>に移行したときに生じ得る、何らかの**新たな非ゼロ効果**の量の出現も予測不可能である、すなわち、ゼロ量に対する非ゼロ量の比は、それに対応するゼロ速度に対する非ゼロ速度の比と同様に、不確定（情報量がゼロ）となるからである。

このように、マクスウェル方程式は「揺るぎない地盤」というより、むしろ「不安定な砂地」と言ったほうが正しい。電磁理論のこの基礎は、根拠の確実性、唯一性、厳密性、アルゴリズムの内的整合性のいずれの点に関しても、科学理論の手本とみなすことはできない。

[訳注] 改めて指摘するまでもないと思うが、ここでの「電気力学」は、この日本語の物理学用語が「electrodynamics (電気動力学)」の一般的な訳語であることを念頭において読む必要がある。

## 第6章 場のエネルギー・力

次に、ポテンシャルエネルギー、ポテンシャル、力といった電磁理論における包含性の大きな諸概念の検討に移り、それらの概念の内的整合性、無矛盾性、そして実験との一致について分析してみよう。

一般的に言えば、ポテンシャルエネルギーは相互作用する対象間の相互の位置関係と常に結びつけられており [2, III, §8-5, 原著 II, §8-5] , それ以外の全宇宙はここではまったく無関係とされている (通常, ポテンシャルエネルギーは検討対象が存在する場所と結びつけられるか, あるいはそこに局所化される)。そのエネルギーをある唯一の電荷と, さらにまた分割不可能な電荷と結びつけて考えるのは, (抽象的に電荷を点状とみなすのと同様に) 無益な空理空論である。電荷の相互作用のポテンシャルエネルギーを場のエネルギーと結びつけること [同上] は, 原理的に間違っている。我々が2つの電荷の相互の位置関係を急速に変化させたと想像してみよう。ポテンシャルエネルギーはただちに变化するが, では, 両方の電荷から非常に大きく離れた場所における場は, ここでいかなる関係を持つことになるのか? なにしろ, その擾乱は, もし伝播速度が  $c$  であったとしても, 位置関係が変化する時間の中にその場所に到達することはできないはずだからである。もし積分を行なう表面を無限遠でない所で切ったとすると, 計算において, その表面に沿った積分は消滅せず, したがっていずれにせよ, その公式は誤りとなる。そもそも, 力は2つの電荷間の直線に沿って作用することが実験的に解明されたとしたら, 宇宙のそれ以外のすべての場所における場は, いかなる「意味」を持つのだろうか? 場がエネルギーを持ち得ることは疑いないが, しかし, あらゆる場がエネルギーを持っているのだろうか? さらに, ゆらぎがポテンシャルエネルギーの非ゼロ準位に導くという点でも, その公式は奇妙である。ポテンシャルエネルギーをさらに近接作用論にもとづいて, そのような仕方で他と結びつけることは奇妙である。なぜなら, 空間のある1点における静止電荷の場は完全に確定しており, 空間のその1点に試験電荷を置けば, そのことが即座に, その時刻  $t$  において力の作用を引き起こす (つまり,  $U = -\int \mathbf{F} d\mathbf{r}$  は既に確定している) のであって, それに先行するあらゆる  $t-dt$  は重要でないからである。

物体の状態はその座標  $(x, y, z)$  と速度  $(v_x, v_y, v_z)$  によって特徴づけられ, その一方を他方から切り離すことはできない。その具体的な状態において物体に作用するのは単一の力  $\mathbf{F}$  なのであって, この力の電気力と磁気力への分割は完全に約束事的なものである。磁気力に関する表式も約束事的なものである。なぜなら, 非中性電流 (例えば荷電粒子束) の場合, その速度が何との関係で決定されるのか不明であるからである (相対性はまさに完全に消滅し, 絶対速度を局所的に導入する必要がある)。

運動する電荷に対する電流の作用を電子の速度で運動する系の視点から説明するために, 中性の導線の場合の電気力を考え出さなければならなくなっている [2, III, §13-6, 原著 II,

§13-6] [訳注\*] [訳注\*\*]。しかしここでは、なにしろ、電荷は導線全体において出現するとされている。その電荷は、いったいどこから出てきたのか？ 導線の長手方向のサイズの収縮による電荷密度の変化 [訳注\*\*\*] は、説得力がない。例えば、電気力学の現代的な理解によれば、閉じた超伝導ループは不変であり続けなければならない、したがってループは中性でなければならない。古典論では自明な事柄である粒子の挙動の不変性を説明するために、特殊相対性理論ではまず最初に電荷密度の変換、次に力の変換、そしてさらに時間の変換をでっち上げなければならない。空っぽの場所でそんなことをするのは、複雑すぎはしないか？

若干のパラメーターの変化のみにもとづいた電流ループのエネルギーに関する表式が、真であるか否かという問題 [2, III, §15-1, 原著 II, §15-1] [訳注\*\*\*\*] は、必ずしもわかりきったことではない。なぜなら、物体**自体**がポテンシャルエネルギー $U_1$ の状態からポテンシャルエネルギー $U_2$ の状態に移行した場合には、運動エネルギーも変化する、すなわち、一定速度 $v$ を保持するためにも、エネルギーを奪うか、または追加しなければならなくなるはずだからである。そもそも、電流維持のメカニズムはきわめて多様なものであり得る。例えば磁石を例に取ってみると、現代的な見方によれば、その磁気は内部電子によって維持されているとされているではないか。まさか、我々が磁石をほんの少し動かすと、それによってその内部電子の運動が著しく変化するとでもいうのだろうか？ では、もしそうだとしたら、外部電子の運動はどうなるのか——もっと著しく変化しなければならないはずではないか？ もしかしたら、温度も変化し得るのだろうか？ しかし、そういった類のすべての問題は、導入されるエネルギーの定義自体とは無関係であるべきである！

諸公式を導出する際、無限遠における空間的条件を利用していることもきわめて奇妙である。それが何であれ、当該の具体的な場所からそんなに遠い所にあるものの挙動が、どんな意味を持ち得るのか？ そしてその挙動は、いかなる時点で考慮されなければならないのか（実際、積分を導出するときには、遅延ポテンシャルですら誰も考慮しようとはしない。——それは限りなく複雑な計算になる）？ それはましてや、具体的な場所——始点および終点——と結びついている、物体あるいは場のポテンシャルエネルギーが論じられる場合には、なおさらのことである。要するに、遠隔作用論からの解放を欲して場の理論

[訳注\*] 邦訳版では§13-6の節名は「電磁場の相対性」と訳されている。原著の節名が"The relativity of magnetic and electric fields"であること、また同節の内容から判断すると、「電場と磁場の相対性」と訳すべきではないかと思われる。

[訳注\*\*] ファインマンは§13-6の「電流の流れている針金を微視的に記述しよう」という語句で始まる段落において、導線が静止している座標系 $S$ の場合について「針金全体として帯電していないと考える」と述べている。そしてその3つ後の段落では、電荷が静止している座標系 $S'$ の場合についてこう述べている。「次に $S'$ で起こることをみよう。そこでは粒子は静止していて針金が速さ $v$ で走りすぎる（略）。針金と一緒に走る正電荷は粒子の所にある磁場 $B$ をつくる。しかし粒子は**静止**しているから、**磁気力はない！**粒子に力が働くとすれば、それは電場からくる力である。従って動く針金は電場をつくるはずである。しかしそれには針金が**帯電**してみなくてはならない——電流のある中性の針金が動くとき帯電してみえるはずである」。

[訳注\*\*\*] ファインマンは§13-6で「 $S$ で知っていることから $S'$ における針金の電荷密度を計算してみなくてはならない。どちらも同じであると考えられるかも知れない。しかし[ローレンツ収縮により——引用者補足] $S$ と $S'$ とでは長さがちがう（略）から、体積も変わる。電荷**密度**は電荷の占める体積に関係するから、密度もまた変わるはずである」と述べている。

[訳注\*\*\*\*] ファインマンは§15-1の末尾で「 $U_{力学} = -\mu \cdot B$ は系の全エネルギーを含んでいるわけではない」、「それはにせのエネルギーである」と述べ、次の§15-2をその理由の説明に当てている。

を提案したものの、ところがそれは近接作用論ではなく、「無限大遠隔作用論」であることが判明してしまったというわけだ！

4次元ベクトル、4次元勾配における空間量の符号の入れ替え [2, IV, §4-3, 原著 II, §25-3] は、ローレンツ変換が満たされるようにする目的だけで人為的に考え出されたものである。なぜなら、ローレンツ変換は空虚な空間における場に関係しており、したがってその定義の適用可能性は制限されているからである。ファインマンは、電荷保存則がすべての基準系において満たされていることを強調しているが、特殊相対性理論によれば電荷自体が変化するとされており、これはもうそれだけで明らかに無意味であることを強調しようとはしない。すなわち、(仮想上)長さが収縮したとき、導線や電流が破れることはないのである。電子の数も陽子の数も変化しない(粒子自体の生成も消滅もない)。また、個別の電子あるいは陽子の全電荷は不変であると予想される。すなわち、追加的な電荷密度の出現に関する記述は無意味である。なぜなら、その出現は、ある系から別の系への移行時における相異なる形態の力(電気力と磁気力)の相互転換を説明する目的だけで人為的に考え出されたものだからである。このことは、単一の力を人為的に考え出された転換特性を持つ2種類の力に分割する、まさにそのような記述が内部矛盾をきたしていることを単純明瞭な形で示している。

局所的エネルギー保存 [2, IV, §6-1, 原著 II, §27-1] をめぐる問題は相対性理論にしか存在しない。例えば、古典物理学では、2つの物体が有限な質量を持っている場合、それらが相互作用してそれらの速度(すなわち各物体の運動エネルギー)が変化する場合、我々が2つの物体の運動のうちいずれに関心を持つかに応じて、同一のポテンシャルエネルギーを第1の物体の位置に属するとも、また第2の物体の位置に属するともみなすことができる。局所的エネルギー保存則は任意の体積について導き出される、すなわち

$$-\int_V \frac{du}{dt} dV = \int_V (\nabla \cdot \mathbf{S}) dV + \int_V (\mathbf{E} \cdot \mathbf{j}) dV$$

は任意の体積について成り立つ、それゆえ積分記号を取り除くことができるという主張 [2, IV, §6-2, 原著 II, §27-2] もまた、完全に正しいというわけではない。例えば、体積  $V(t)$  を変数とした場合には、追加的な被加数が現れ、結果は別のものになることは明らかである。事実、提案されている導出方法は体積の(宇宙のあらゆる力による)非自己無撞着的な固定を暗黙のうちに仮定しており、既にこのことだけで、検討対象となり得るプロセスを、そこでは物質、放射および計器の間の相互作用が固有有効体積に対して影響を及ぼさないようなプロセスのみに限定している。同一時点における諸量  $(\mathbf{E} \cdot \mathbf{j})$  のみを考慮するというやり方は、あり得るヒステリシス現象(物質の応答反応の遅延)に注意を払っておらず、このことも解の適用範囲を制限している(我々の世界を電磁力のみで創り出すことはできない——さらにそれ以外の様々な力や性質が存在するのだから)。

ファインマン [2, IV, §6-3, 原著 II, §27-3] は、エネルギー密度とエネルギー流に関する表式をマクスウェル方程式から純粋に形式的に導出しようと(ただ単に、美しい形になるように公式をつじつま合わせし、所要のやり方でそれぞれの被加数に形容辞を与えようと)試みている。そのような表式は唯一あり得る表式ではないという当たり前の異議だけでなく、それとは別の異議もある。マクスウェル方程式においては、原因と結果を入れ替えることができないのである(例えば、場の存在から電流の存在は導き出されない。また、多

くの電気力学的メカニズムは順序の反転を許さない)。すなわち、実は、マクスウェル方程式には数学的な等号は存在していないのである(存在しているのは、より正確には「矢印」、あるいは「原因が結果を引き起こす」ことの記号による表記である)。しかも、そこでの電流は、ローレンツ力から取られたものである。すなわち、それは現実の物質\*的な運動粒子からのものである。事実上、我々はまたもやここで、諸量の単なる公準化を相手にしているわけである(ましてや、そこでは実験的に得られた表式の検証は行なわれていない)。

荷電粒子の場のエネルギーについて検討する際 [2, IV, §7-1, 原著 II, §28-1], ファインマンは粗雑なモデルを採用し、それらの内部問題を示している。しかしそれは、自然界における実際の事態とは直接的な関係を持っていない。2つの物体のポテンシャルエネルギーとは、実際には何を表しているのだろうか? それは、それらの物体自体は変化しないという条件の下でそれらの相互配置が変化するためには、仕事が必要である、ということを表しているのである。その仕事が必要ない場合には、物体自体の形状を不変のまま維持しているエネルギーについて検討しなければならなくなる。もし我々が(他の諸性質を不変としたままで)中性の物体を圧縮しようとする、あるいは巧妙な言い方で表現されているように「半径をゼロに」しようとする<sup>[訳注\*]</sup>、(無限遠における存在しない場について積分を行わなくても)物体もそれに抵抗することになる。それゆえ、単純な疑問が生じてくる——電子の実際の半径(理論家たちにとって都合の良い半径ではなく)は、どれだけなのか? そのような半径こそを用いなければならない。この本では、エネルギーに関するすべての表式は、電磁場しか存在しない(これは間違っている)という条件の下で導出されており、それゆえ、物体の外部(物体同士が接触するまでの間)についてしか検討することができない。しかも、そもそも、その考え方は、事実上、それ以外のいかなる力も存在しないという条件の下で、「それら同士の間では相互作用しない帯電した塵」を無限遠から単一粒子に寄せ集めるといふ考え方なのである。自然の諸法則を精密に記述するためには、それはあまりにも大きな(非現実的な)抽象化である。

ポテンシャルの差という概念の導入 [6, §8, 英訳版§1.8]<sup>[訳注\*\*]</sup>は、任意の断熱運動の場合における極限の定義を必要とする。ここでは、もしその概念が電気学の他の諸部門における利用を想定したものであるのなら、運動時間は無限大ではあり得ないということは明らかである。静電気力がポテンシャルを持っていることの証明は幻想から生まれた。なぜなら、(永久機関を通じた)そのような推論は、それ以外の任意の力(特に、断熱運動時

[訳注\*] ファインマンは「点電荷の場のエネルギー」に関するこのセクションにおいて、「単純な電子のモデルとして、半径  $a$  の球面上に一様に電荷  $q$  が分布しているとしよう」とした上で、その電磁場の全エネルギー  $U_{\text{elec}}$  として式 (7.1)  $U_{\text{elec}} = \frac{1}{2} \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 a}$  を導出し、これについて次のように述べている。「これは  $a$  をゼロにしない限り

差支えない。しかし点電荷で  $a$  をゼロにするとき大きな困難が生じる。場のエネルギーは中心からの距離の 4 乗に反比例して変化するため、その体積積分は無限大になる。点電荷を囲む場には無限大のエネルギーが存在する」。

[訳注\*\*] タムはこのセクションの冒頭で次のように述べている。「当該の経路において静電場の力がなす仕事は経路の始点と終点の位置にのみ依存するという事情は、静電場のポテンシャルというきわめて重要な概念を検討に導入することを可能にしている。定義：静電場の 2 点間におけるポテンシャルの差は、単一の正電荷が第 1 の点から第 2 の点に移動するときに静電場の力によってなされる仕事に反対符号を付けたものに等しい。ここでは、単一の試験電荷が移動するとき、静電場を生じさせているすべての電荷は静止し続けると仮定する」。

における) に対しても適用することが可能なはずであり、このことは任意の力がポテンシャルを持つことを意味することになるが、それは誤りであるからである。問題の要点は、**現実の試験電荷**は現実の諸電荷に対していかにして影響を与えるのか(それらの電荷内における内部プロセスおよびそれらの運動の変化)ということにある。この問題は、実験が解決しなければならない。

導体内部のポテンシャルの不変性 [6, §9, 英訳版§1.9] に関しては、1つ訂正すべき点がある。その精度の決定は、余剰電子数によって(ここでは、例えば、非中性導体の場合において余剰電子数が1, あるいは2, 等々であることをイメージしよう)、または自由電子の総数によって(ここでは、「中性化可能な」場の最大の大きさに対する制限が存在する)行なわれている。しかし、静電遮蔽装置の場合、その形状に鋭い凹凸があるときには、電荷の局所的な分布は平均的な分布と異なることがあり得る。単一の「対象」のポテンシャルを導入すること自体、完全に正しいというわけではない。なぜなら、その大きさは、その「対象」そのものだけでなく、その周囲のものにも依存しているからである。

ポテンシャルの導入は、(計算上の便宜を目的とした) 純粋に数学的な仮説なのである。電気力線という概念は、この概念の物理的意味の必然性およびその物理的諸性質 [6, §10, 英訳版§1.10] を検討・評価するためには、あまりにも約束事的すぎる。電気力線は、電荷上で始まり、無限遠において終わるだけでなく、有限な点——例えば、2つの同符号の電荷の中央——において終わり、その先では、それらの電荷を結ぶ線に対して垂直な対称面上を動いていく可能性がある(その中央には電荷は存在しないにもかかわらず、すべてはまるでそこから電気力線が出ていくように見える)。

概して言えば、ポテンシャルの概念と同様、ポアソン方程式もまた、点電荷のポテンシャルに関する表式よりも厳密であるとみなすことはできない。それゆえ、積分

$$\int \frac{\rho dV}{R} + \int \frac{\sigma dV}{R}$$

の長たらしい、純粋に数学的な導出 [6, §12, 英訳版§1.12] は、大きな物理的意味を持っていない(それは諸点のポテンシャルの総計にすぎない)。電荷の近傍および内部における関数の挙動 ( $R \rightarrow 0$  のときの関数の連続性、有限性および関数の形自体) に関して発見されたすべての問題はそのまま残されている。しかも、無限遠におけるポテンシャルの挙動に関するまったく余計な知識が必要であるという、さらに新たな要件が付け加わっている。それはまるで、「お待ちください、私はあなたのラジオのどこに不具合があるかを判断する前に、アルデバランまで飛んで行って、あなたのラジオの集積回路 N33 から生まれるポテンシャルのそこでの挙動を知らなければならないのです」と言うようなものだ。現実のポテンシャルの唯一性に関する(数学的ではなく)物理学的な面からの証明も、それと同じほど厳密性を欠いている。

事実、我々は各点における電荷密度も、場も、ポテンシャルも実験的に知ることはできない。そのため、数多くの問題が信仰の独占権の下にとどまっている。導体の**電位**(およびその不変性)でさえ、一種の仮説である。なぜなら、実験が与えるのは導体の全電位であり、その内部では、場の作用の下で、 $\varphi$  の変化を補償する「誘導起電力」が生じている可能性があるからである。もしかしたら、電極の分極(電解電流の減少)は、そのような効果の発現なのかもしれない。この課題の設定において唯一確実な条件となり得るのは、

各導体の全電荷である。表面における電位ジャンプ、あるいは電気二重層を考察する際の電位ジャンプの決定 [6, §14, 英訳版§1.14] はまったく厳密でない (電位が確実なのは, [そこで論じられている「無限に薄い層」ではなく, ] **有限な厚さを持つ層から遠く離れた所**においてのみである)。

点電荷の相互作用エネルギー [6, §15, 英訳版§1.15] (より正確には, その変化) もやはり, 物理学的には電荷自体から遠く離れた所 ( $R \gg r_0$ ) においてのみ決定することができる。しかし, 有限な体積密度または表面密度を導入した場合でも, 有限性の問題はなくなる。なぜなら, 既に電荷が存在している点への電荷の移動という課題を検討すること (また, そのとき両方の電荷が変化しないとみなすこと) は, 物理学的に無意味だからである。数学的変換を用いて場の局所エネルギーを導入する試み [6, §16, 英訳版§1.16] も, 完全に正しいわけではない。例: 1) ポテンシャルは物理学的には定数までの精度でのみ決定されているが, このことをそこの公式から見て取ることができない。2) すべての量の電荷の近傍における極限值は仮説である。3) 無限遠における ( $R_s \rightarrow \infty$  のときの) 場の挙動に関する余計な知識を背負い込まれることになる。4) 無限大の体積全体に関する積分同士の等式からは, 被積分関数同士の等式はけっして導き出されない (それが可能だとしたら, そうやって沢山の馬鹿げた話を「証明」することができる)。5) この場のエネルギー中における自己作用の計算は方法論的に誤っている。

荷電表面 (または電荷) が存在する点におけるポンドロモーティブ力の, 当該点における場のエネルギーを通じた表式 [6, §17, 英訳版§1.17] は仮説である。そのエネルギーの表式にもとづいたポンドロモーティブ力の決定 [6, §18, 英訳版§1.18] には, きわめて大きな制約がある。なぜなら, 現実には, 有限系の場合, 諸パラメーターのうちの1つの変化は, 他の一連のパラメーター (例えば電荷分布, 電荷間の距離, ポテンシャル, 誘導される「試料の微小起電力」, 等々) の変化を常にもたらすからである。しかも, 静電気の場合は  $\mathbf{v} = \mathbf{0}$  でなければならない。電荷系 [6, §19, 英訳版§1.19] (または個別電荷) の安定性についての分析は  $R^{-2}$  の依存性のみによつて行なわれているが, これは小さい距離の場合は仮説である。また, 1 番目, 2 番目, 3 番目の導関数はゼロに等しく, 4 番目の方程式はゼロより大きいという条件は, 条件の数が変数の数よりも大きいということによつては覆されない (なぜなら, いくつかの特殊な配置の場合には, いくつかの条件は依存的な条件となり得るからである)。これはより厳密な証明を必要としている。興味深いことに, イオン結晶がアーンショーの定理を「裏づける」可能性があるのかもしれない ( $T \rightarrow 0\text{K}$  のとき, もしかしたら, イオン結晶は爆発しなければならない?)。

誘電体が存在する場合, 場 (仕事) のエネルギーを  $\rho$  と  $\sigma$  を含んだ

$$W = \frac{1}{2} \rho \phi dV + \frac{1}{2} \sigma \phi dS$$

の形 [6, §30, 英訳版§2.11] に書くことは, 自由電荷の場合には, 文字  $W$  の単なる定義にすぎない。なぜなら, 自由電荷の移動時における場の力の仕事を導出するときですら, 表式  $e_1 \phi_1 = e_2 \phi_2$  は, (積分を用いている以上) 電荷から小さい距離にある諸量の未知の性質に依拠しているのだから, もはや誘電体が移動する場合については, 場の力の仕事を一般的な形で見出すことはまったく不可能である。このように, エネルギーに関する公式 (より正確に言えば, 文字  $W$ ) は, 単なる公準にすぎない。無限遠における場は, 電荷の配置が



いかなる場合でもゼロに向かうというわけではない。このことがエネルギーの導入の可能性に制限を加えている理由の1つとなっている。それだけでなく、体積エネルギー密度の導入は、近接作用あるいは遠隔作用といかなる関係も持っていない。なぜなら、[これらの作用の間の] 違いは遅延の存在になければならないのに、 $w$ に関する公式

$$w = \frac{1}{8\pi} \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} = \frac{\varepsilon}{8\pi} E^2$$

からは、そこにあるべき時間の絶対値がいかなるものであるかは、まったく読み取ることができない（より正確に言えば、現在時刻  $t$  のみが存在すること、すなわち、遅延は存在しない(?) ことを読み取ることができる。言い換えると、我々はいったいどんな表面——ここでも再び、遠隔作用する表面——によって電荷を取り囲もうとしているのか、理解することができない）。エネルギーに関する表式を導出する際の推論が厳密でないという結論は、そのエネルギーの大きさが、変動する場の場合には（実験値に対して）一致しないという点からも導き出される（ここでは、我々はただ単に、現代電気力学のたまたま目についた欠陥を指摘したにすぎない）。

$$w = \frac{\varepsilon}{8\pi} E^2$$

の形をした場のエネルギー密度に関する表式は、方法論的に奇妙に見える。媒質が存在すると、力が逆に減少しているからである。場そのものを検討すると、入射波の他に、あらゆる方向に向かう反射波が存在することは明らかである。すなわち、 $(E + \sum k_i E_i)^2 \geq E^2$ （ここで  $k_i$  は波の反射率）を得る（散乱）。弾性エネルギーが現実には何を意味するのかも疑問である。なぜなら、双極子は準弾性でないこともあり得るのであり（非調和振動）、時間依存性への移行（反応と緩和の考慮）は一般的な形では行なうことができない。このように、我々はただ単にある未知の諸エネルギーの組（全エネルギー）を得るだけなのであって、 $w = \varepsilon E^2 / (8\pi)$  という量は、誘電体中における電場の自由エネルギーに等しい[6, §31, 英訳版§2.12] ものとして、ただ単に公準として定められているにすぎない（そうだとすると、それは信仰であり、したがって隠ぺいのためのいかなる似非根拠も必要がない）。そしてさらに、その量が**限界を持つ**（無限大ではない）現実の誘電体中において実際に測定可能なのか、また計算値と整合しているのかという疑問が生じてくる。すなわち、 $w$  の表式は近似的なものであって、原理的なものではない（例えば、 $E^2 / (8\pi)$  を双極子自体から自由な体積について規格化——再規格化——する必要はないのだろうか？）。

誘電体中のポンドロモーティブ力はモデル的な仮定の下でのみ導出されている。それらの仮定のうちのいくつかを列挙してみよう。「一般的方法」[6, §32, 英訳版§2.13] においてさえ、すべての量が滑らかさや一様さを持っていることが仮定されている（幾何学的因子が存在しないということは、すべてのサイズは無限大であるということの意味する）。また、小さい距離における諸量の依存関係に関するあらゆる不確定性についても思い出そう。表面積分がゼロに向かうのは、すべての条件の下で、また場あるいは電荷のあらゆる分布においてではけっしてない。場のエネルギーは、計算の中である種の未知の弾性エネ

ルギー（一定ではないエネルギー）を含み込んでいる。媒質は非圧縮性（接線応力を持たない）とみなされている。すなわち、液体誘電体、特に固体誘電体の場合に関して追加的な研究が必要とされている。体積力を張力に帰着させているが、それは諸量の連続性と有限性を前提としている。

導入されている電場の張力テンソル [6, §34, 英訳版§2.15] の一般性の度合いに対し、制限をもたらしているものが何であるかを指摘することができる。それは、測定範囲のサイズが小さい（大きな距離について平均化を行っている）——微量に達していない——こと、また、用いられている  $\epsilon$  が誘電体の現実の限界性（境界が与える影響）およびその形状（幾何学的因子）に対して独立であることである。

2つの電流素片の相互作用に関する表式 [6, §43, 英訳版§4.2] はきわめて疑わしく見える。第1に、作用反作用の法則が満たされていない。では、もし我々が  $R_{12} \rightarrow 0$  に向かわせたらどうなるのか？ なにしる、この場合、力の合計は明らかにゼロに向かわなければならないのだ。すなわち、電流素片に関する記述は誤りである。第2に、同一の軸上における2つの電流素片の相互作用が存在しないのは奇妙である。もしかしたら、アンペールの表式のほうがより現実と合致しているのかもしれない（あらゆる「見解の不一致」の理由を、伝播する電磁場に帰着させることができる）。

場あるいはポンドロモーティブ力の表式に対しては、線状電流と体積電流 [6, §44, 英訳版§4.3] のいずれの場合においても、我々がそれらの結果を理論的結果とみなすか、あるいは実験結果とみなすかにはかかわりなく、いくつかの疑問が生じてくる。なにしろここでは、最近傍の電流素片（および電流の媒体）同士の相互作用に関する側面が解明されていない。その理論自体の観点に立ち、記述されている諸表式を正確な理論的微量として受け入れた場合には、それらの表式から、実際に観測される場や電流へどのようにして移行するのだろうか（電流媒体の運動の自己無撞着的な変化、また近隣電流素片が外場に及ぼす追加分の影響を考慮する必要がある）。それとは逆に、それらの結果を実験的に厳密な結果とみなした場合には、それらの結果におけるすべての量は、**実効的な自己無撞着的量**ということになる。ではその場合、それらの表式の中から、電流素片に関する真の表式をどうやって選び出すのか？

電気力学において、諸量は距離  $R$  に対して依存しており、しかもとりわけ  $R \rightarrow 0$  のときに特に強く依存しているのだから、途中式の書き表し方 [6, §45, 英訳版§4.4] はもっと正確な書き表し方、すなわち  $\langle \mathbf{j} \rangle = e \langle n \mathbf{u} \rangle$  でなければならない<sup>〔訳注〕</sup>。それと同様に、ローレンツ力の書き表し方を  $R$  が小さいときに厳密であるとみなすことには、いかなる根拠もない。

[10], [13], [14] の実験 [J. Guala-Valverde の実験] は、その力を、むしろ磁気力に関するアンペール力の形で書く書き表し方を支持する証拠を示している。まさにその場合にこそ、電動機（発電機）内で磁気力が仕事をするときの矛盾が解消する。さらに、ホール効果はマクロな効果であるから、ここでは量子力学はまったく何の関係も持っていない。一部の物質の場合における正のホール係数の存在は、電磁力の書き表し方が誤っていることを物語っている。さらにまた、ある依存性についての検証は、等式に含まれるすべてのパラメ

〔訳注〕 タムは途中式 (45.1) (英訳版 (4.18)) を  $\mathbf{j} = en\mathbf{u}$  と書いている。

ーターが独立した方法で既に決定されていることを前提としている。 $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{R}$  および自己無撞着場  $\mathbf{H}$ , ならびに  $\sin(\mathbf{v}, \mathbf{H})$  の厳密な測定は行なわれていないのだから,  $e/m$  の決定も近似的なものにすぎない。

無限遠におけるポテンシャルに関する条件は物理的な条件ではなく, 個々の具体的な記述方法 (解法) によって規定された数学的な条件である。例えば, そこでの場はゼロに向かっているにもかかわらず, プラスの無限遠とマイナスの無限遠において相異なる挙動をするポテンシャルを描くことができる (図3)。

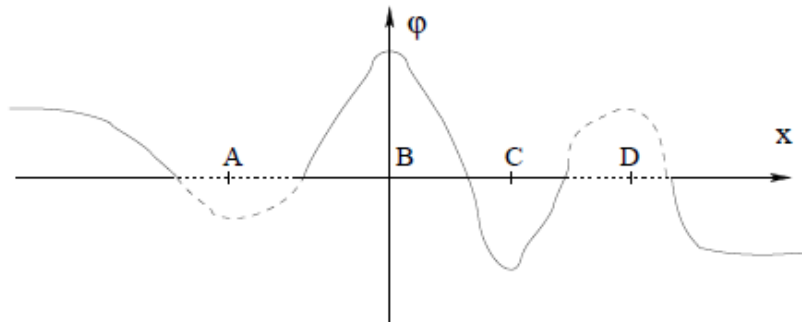


図3 ポテンシャルの挙動と場

ポテンシャルはいたるところで異なり, かつゼロではない (そして基準原点を移動させることによってポテンシャルをゼロにすることができるのはすべての点のうち1点 (!) においてのみであり, すべての点において一度にそうすることはできない) にもかかわらず,  $-\infty, A, B, C, D, +\infty$  の6つの「点」のすべてにおいて, 場はゼロに等しい。現実には, そもそも, ある点における解は, その点から大きく離れた所における条件に対していささかなりとも顕著に依存してはならない。例えば, 遠方における条件をしかるべきゆらぎ条件 (その条件は空間座標と時間座標に依存する可能性さえある) とみなさないのは, いったいなぜなのだろうか? さらに, 次の状況について検討してみよう。他の銀河に属するあらゆる惑星にとって, 我々の地球は無限に遠く離れた「境界点」とみなすことができる。しかし, はたして我々の所では, いたるところで場が存在せず, ポテンシャルは (互いに対して等しく, かつ) ゼロに等しいのだろうか? では, その銀河の場合にのみゼロに近いとかいうポテンシャル部分を, それ以外のすべての, しばしば巨大な場やポテンシャルから, いったいどうすれば実際に区別することができるのか? このように, 無限遠における現実の条件は知られておらず, 単なる信仰 (事前を選択された課題の数学的形式化にとってのみ必要とされる信仰) であり続けているのだ! それゆえ, (微分方程式に未知の境界条件を付け加えることによる) 場 (既成の解法) からポテンシャルへの (喧伝されている) 移行の価値は, きわめて疑わしい。

具体的な境界条件 (例えば無限遠における境界条件) を用いて **厳密な** 関係式 (方程式) を得て, 遠く離れた表面に関する積分に移行するというやり方も, きわめて疑わしい。なぜなら, 現実には, そのような条件が **厳密に満たされる** ことは **けっしてない** からである。導入されている表面特性 [6, §49, 英訳版§4.8] および方程式は自然界では現実化されていない (それらは数学的極限のある選択であるにすぎない)。そして, **計算対象である関数**

の無限遠における挙動（関数の減少速度）に対する、厳密と称されている方程式の局所的点（！）における依存性は、この理論の悪しき側面の特徴（この理論の限界性）を示している。現実には、無限遠におけるポテンシャル（ $\mathbf{A}$  および  $\varphi$ ）の挙動は、 $AR < \infty$ ,  $R \rightarrow \infty$  といったタイプの人為的条件によっては制限され得ない（その挙動が制限するのは課題の範囲である（図3参照）。マクスウェル方程式の普遍性はいったいどこにあるのか？）。無限系（例えば無限長ソレノイド）の諸特性の取得は、「呪文を唱える」ことを通じてしか行なわれていない。なぜなら、マクスウェル方程式では、それらの諸特性の導出に際して、無限遠における諸量のそれとは別の挙動が利用されていたからである。

磁場のポンドロモーティブ力がなす仕事の計算 [6, §50, 英訳版§4.9] に対しては、次の疑問が生じる。その力は、電子流束を通じて作用を及ぼし、また導体の全質量を動かしているのに、いったいどうすれば電流  $\mathbf{j}$  そのものに対してまったく影響を与えずにいられるのか？ それに付け加えられるべき未解明の疑問は、生じ得る回路の変形、また加速後における最終的運動が果たす役割に関するものである。それらもまた、電流の力を変化させる可能性がある。磁束の変化を通じた仕事の書き表し方は、限定的な性格を持っている。第1に、（発電機と電動機の両方の）単極誘導の場合について、効果が存在している（したがってその効果が一律な仕方で、すなわちアルゴリズムに従って記述されなければならない）にもかかわらず、

$$\mathbf{H} \delta \mathbf{S} = 0$$

とされている。第2に、

$$\delta \Phi = \int_{\Delta} H_n dS$$

は、回路を通る磁束の変化にまったく対応していない。なぜなら、 $\Delta$ とは、回路が運動するとき、回路が**相異なる時点**において描く「円筒形」の側面であるからである（ $\mathbf{J} = \text{const}$  とし、磁場  $\mathbf{H}$  自体の変化を無視した場合には、回路が変形なしに並進運動をするとき、その大きさは現実の大きさと数値的には一致するのではあるが）。

電流のポンドロモーティブ相互作用および相互誘導係数の計算 [6, §51, 英訳版§4.10] に際しても、制限条件が用いられている。すなわち、場  $\mathbf{H}$  に対する電流の影響は存在しない（自己無撞着場）、電流  $\mathbf{J}$  の力は完全に「固定」されている、回路および回路素片は変形せず、加速運動をしないという制限である。閉電流の場合の作用反作用の法則の保存が哀れな言い訳に聞こえるのは、今述べた一般性に対する制限のためばかりではない。なにしろ、現実には、「連続した」電流  $\mathbf{J}$  は実際には**個別**の電子からなっているのだから、それらの個別の電子は「諸素片のための補償の欠如」を味わわなければならなくなる。例えば、各電子が直径方向上で正反対の位置にある電子対が、ある正電荷の中心の周りを回転しており、別の電子対が、円筒形の同一の軸上に存在する別の正電荷の中心の周りを回転しているとする。ただし、2番目の電子対は1番目の電子対に対して  $90^\circ$  の方向を向いているものとする。  $90^\circ$  の角度をなして運動したとき、作用反作用の法則は満たされないとされているのだから、2番目の電子対は追加的なエネルギー消費なしに加速を受けることになる（これは永久機関ということか？）。

電場と磁場は、本来、（静止電荷の相互作用と電流——運動する電荷——の相互作用とに**約束事**として区分されている）電荷の相互作用の場という同一の場の2つの「部分」を

表している。電子のスピンに関する古典論的解釈に問題が生じるのは、相対性理論の諸条件が課されたときに**限られる**。また、量子力学が「うまく成し遂げる」ことができたのは、諸現象を説明することではなく、人為的公準を導入する方法で、いくつかの現象を**記述すること**にすぎなかった。電子のスピンに起因する力とローレンツ力との関係 [6, §58, 英訳版§4.17] , すなわち

$$\frac{F_{\text{sp}}}{F_{\text{Lor}}} = \frac{h}{4\pi mv} \frac{1}{H} |\nabla H|$$

は、運動速度が小さいときにはスピンを考慮する必要があることを示している。また、距離が小さいときもそれを考慮する必要がある（例えば原子の場合。そのような距離においてはすべての場が著しく変化するのだから）。

電気力学には「人為的に生み出された」単位系が多数存在することに対し、厳しい言葉を二、三述べないわけにいかない。（理論物理学における単なる「数学記号」の操作だけで研究作業を終えた者ではなく）数値的評価、あるいは実際に検証可能な計算を行なおうとたとえ一度でも試みたことのある者は、おそらく、公式中の様々な換算係数や入れ替え操作の乱雑な堆積物にぶち当たる羽目に陥ったことがあるのではなかろうか。そのような人為的な状況が永久に続いてはならない。この問題のすべては、一方では、（単位系は沢山考え出すことが可能で、しかもそれらすべては対等であるなどということを示すために）多数の単位系をはびこらせた相対論者たち、そして他方では、絶対単位系を熱烈に擁護し、理論的計算において国際単位系（SI）の代わりに絶対単位系を喧伝している者たちの限らない傲慢さのうちに潜んでいる。実際の問題における国際単位系の優越性は明白であることを指摘したい。第1に、歴史的に、あらゆる研究と発見は、他ならぬ実用単位での測定にもとづいて行なわれてきた。第2に、現段階においても、あらゆる測定、検証、装置（計器）の設定は実用単位を用いて行なわれ（目盛り決めされ）、コントロールされている（ところが、彼らは理論的でつち上げのために、換算のための関数や係数を導入することを強制している）。最後に、第3点として、絶対単位系におけるいったい何が相対論者たちをそんなにも惹きつけているのか、考えてみよう。それは、（公式自体の物理的意味を問うことなく）公式中にあからさまな形で書かれている文字  $c$  なのだ！ しかしなにしろ、この文字は**真空中**における電磁相互作用の伝播速度に対して**しか**関係を持っていないのである。真空の場合でさえ、このことが光の伝播モデルを構築する上で妨げとなっており、いわんや現実の媒質の場合には、この文字をあからさまな形で書くことは、まったく余計なことである（誤った方向に向かう唯一の轍に人をはまり込ませる）。なぜなら、媒質中におけるマクスウェル方程式あるいは波動方程式は、媒質中における波動と媒質との相互作用の具体的な物理的メカニズムにも依存しているからである。このように、「一般化」のための係数の個数、そして方程式のあれこれの被加数へのそれらの係数の含め方は、様々に変化し得るのである。絶対単位系を選択すると、その結果、媒質中におけるモデルや方程式系の選択に対する制限が何の根拠もなくプログラミングされることになる。

次のコメントは、再び、境界条件を利用した解の探求に関して採用されているイデオロギーに関するものである。検討されているプロセスに対して、どこかきわめて遠い所の境界条件がどんな関係を持ち得るのだろうか？ なにしろ、減衰する場や力は、（厳密な解と

称するものの) いかなる解の場合にも, ある距離  $R$  を超えると現在の測定精度の範囲内では互いに区別し得なくなり, 自然界において現実に観測されるそれらの量のゆらぎよりはるかに小さくなる可能性があるからである。明らかに, そこでは原因と結果が取り違えられている。(もしそれ以外のものが存在しないのであれば) それらの源が遠くの場合や力を決定するのであって, その逆ではない。

(ローレンツ力の場合と同様) 力の密度の書き表し方は公準である。さもなければ, 4 つの (!) ベクトル量と 2 つのスカラー量のすべてを独立的に決定することが可能であることが要求されることになる。微分形のマクスウェルの微分方程式が厳密であると信じるとすれば, 力に関する「閉じた方程式」となるのは(ある場それ自体は, それだけでは何も表してはいない——文字による抽象化にすぎない——のだから), ローレンツ力とは異なる表式である ([12] 参照)。それだけでなく, マクロな量の場合と平均量の場合とで同一の形式が公準として定められているのは奇妙である。すなわち,  $\mathbf{j}_{\text{micro}}$  も  $\mathbf{H}_{\text{micro}}$  もミクロスケールでは巨大な範囲内で変化するが, 積の平均値は一般的な場合には平均値の積と等しくないのである。しかも, 媒質の任意の非一様性が  $\mu$  を変化させる(ここでも再び, 二次振動効果が生じ得る)。概して言えば, 導入されている公式を適用することができるのは, **均等・一様な媒質** ( $\mu = \text{const}!$ ) の場合のみである。それゆえ, 誘電体中の平行スリットおよび垂直スリット内における  $\mathbf{H}$  と  $\mathbf{B}$  の大きさの測定 [6, §65, 英訳版§5.6] は厳密ではなく, ただ単に, 所要の量に近似したある新たな量の公準的な**定義**を行っているにすぎない。

外部磁場中の磁石に作用するポンデロモーティブ力の計算 [6, §75, 英訳版§5.16] では, 外部磁場中において磁石自体に生じ得る性質の変化が考慮されていない(しかもその場合には, その全磁場が何とかして無撞着的に決定されなければならない)。そもそも, **測定可能な力を, 公準として定められている場のエネルギー**を通じて計算するのは奇妙である。その結果, 力の密度が(相異なる値を持った相異なる 2 つの表式さえもが) 現れているが, 実は, その密度は現実には別のものである可能性があり, また, 意味を持っているのはその密度の積分値のみである。これはあらかじめ自明なことであった。なぜなら, **測定されるマクロな関係式**からは, 電流素片に関するミクロな関係式を相異なる無限個の方法で導き出し, 相異なる結果を得ることが可能であるからである。もし我々が 20 世紀以前に発見された積分法則から少しも前進できないのなら, いったい何のためにそんなに膨大な繁文縟礼を作り出す必要があるのか?

磁場エネルギーの表記形式が「得られている」箇所 [6, §81, 英訳版§6.6] では, 当然, 次の一連の疑念が生じてくる。

1)  $1/R^2$  よりも急速に  $[\mathbf{HA}] \rightarrow 0$  となる場合は, あり得るすべての場合を包含しているわけではない。

2) すべてのポテンシャルは付加定数以下の精度でのみ決定されている。例えば, 図 4 において場  $\mathbf{E} = 0$  は相異なる領域において相異なるポテンシャルに対応している。ベクトルポテンシャルの場合も同様である。したがって,  $\mathbf{A} \rightarrow \mathbf{A} + \text{const}$  の入れ替えを行なったとき, 結果は変わってはならない。すなわち, すべての減少が  $\mathbf{H}$  のものとして認められな

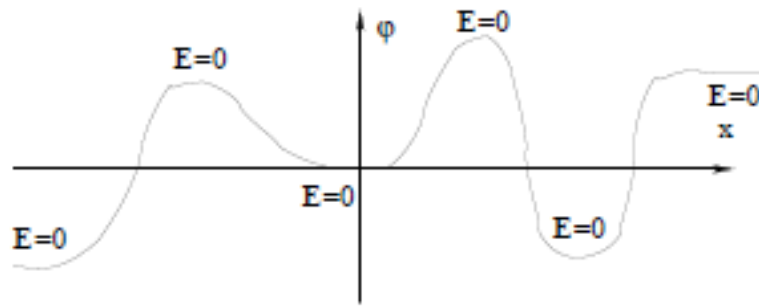


図4 場とポテンシャル

ればならないのであり、このことは、もうそれだけで諸結論の適用範囲を著しく制限している。

3) そして最後に、無限大の表面について積分したときに平均値として得られた密度が特徴づけることができるのは、その効果の**積分値のみ**である。つまり、その値は、電流の相互作用エネルギーの表記形式といかなる点でも違いがないのである。相互作用領域において捨てられた項は、残された項からの寄与に匹敵し得る、あるいはそれを上回る寄与を与え、**現実の局所密度分布**において本質的な役割を演じている可能性がある（例えば、大気の平均エネルギー密度は、具体的な自動車を横倒しにした具体的な大竜巻のエネルギー分布とは無関係である）。

単一の力からの2つの部分の分離（電場と磁場からの分離、およびそれらの場そのものの分離）は、かなり約束事的なものであることを思い出す必要がある。特殊相対性理論は、ローレンツ力の磁気部分からの誘導と、変化する磁場によって生じる電場からの誘導との間の非対称性を**解消しておらず** [6, §85, 英訳版§6.10]、ただ単に、これら2つの場合の等価性を（例えば効果の発現時間という点で、それらは明らかに非等価であるにもかかわらず）**公準として定めている**にすぎない。微分形のマクスウェル方程式が得られるということは、それらの方程式の自動的な一般性を意味しておらず、実は、それらの方程式が導出された際の諸条件（課題の設定の仕方）を明瞭な形で固定化し、それ以外の条件を排除しているのである。当然、ローレンツ力について次の疑問が生じてくる。ローレンツ力の磁気部分の計算は、はたして、粒子の経路上において変化する磁場から生じる電気力の部分を既に考慮に入れているのだろうか？「一般に採用されているシナリオ」に従った場合、その計算は1次精度でしか行われていない公算が最も大きい。交流の場合にも、電場と磁場への区分 [6, §86, 英訳版§6.11] は完全に首尾よくいつているわけではない。そのような「アルゴリズム」の場合、数多くのかかなり直観的な事柄が無益で不正確なものになる。もしかしたら、ポテンシャル部分と渦部分への区分のほうが、より生産的で一目瞭然たるものになるのかもしれない。

運動する媒質の場合 [6, §110, 英訳版§8.1] には、特殊相対性理論の空想的な要求の満足を追い求めるあまり、電気力学は自らのより重要な部分——現実のマイクロ構造や運動との関係——を放棄している。その結果、マクスウェル方程式は何ものをも意味しない記号に関する方程式の組み合わせに転化し、そのため、それらの方程式の不変性自体はもはやいかなる意味もまったく持たなくなっている。マクスウェル方程式に意味を与えてくれるはずの唯一の方程式（閉じた方程式）は、**定義として**導入されている（そしてつじつま合わ

せなものになっている)。相対論者たちは常識 [= 健全な判断力] (直観的な一目瞭然たる理解) を放棄したにもかかわらず、諸公式のいくつかの要素については、それらを直観的なやり方で根拠づけようと試みている。しかし、それはかなりぎこちなく見える。例えば [6, §111, 英訳版§8.2] では、分極と磁化 (これらのものの意味ですら既に明確であることをやめ、それらの名称しか残っていない!) に関する表式の中で、直観的に説明しようと試みられているのは被加数のうちの一部分にすぎず、「その他の部分」については特殊相対性理論を参照せよとしている。この種の科学もどきのまやかしには、一文の価値もない (例えば、でっち上げた任意の所望の効果  $b+c+d$  をあらかじめ任意の量  $a$  から引き出しておいて、「その他」のすべてのものを残りの部分に帰する、つまり  $a \equiv b+c+d+(a-b-c-d)$  とすることができる)。このこととの関連から、「定義」として導入されているその種の量に関し、「実験データ」を援用していることも奇妙である。なにしろ、それらの量は効果 (直観的な効果!) の一部分しか記述していないからである。そして「特殊相対性理論のおまけ分」はまったく検証されていない。

単極誘導 [6, §112, 英訳版§8.3] の「説明」も満足感を引き起こさない。第1に、「物質\*的回路」<sup>[訳注]</sup> はそれでも結局、厳密に非閉回路となっており、それゆえ、我々はいったい何のために回路に「物質\*的区間」なるものを追加するのか、理解することができない。第2に、磁束は連続的に増大するという結果が得られている。しかし、それはたわ言である! その回路は若干の時間の経過後に完全な回転をし始めるのだから、磁束をいくらでも大きな値まで持っていくことができるはずである。では、(回転する磁石だけがあって) ジャンパー線がなかったとしたら? 磁束の無意味な増大とは、いったい何なのか? あるいは、その原因は導線なのか? それも馬鹿げた話だ! また、もし永久磁石の代わりに直流が流れているソレノイドが置かれていて、そのスイッチを一瞬のうちに切ったとすると、磁束の巨大な変化が得られるはずであり、その変化は、単極機のそれ以前における仕事の時間に本質的に依存していなければならない (そんなことは誰も観測したことがない!)。第3に、J. Guala-Valverde の実験は、回転する場 (あるいはアンペアル力の存在) の現実性の証拠、すなわち電磁場が慣性的な性質を持っていることの証拠として解釈することができる。特殊相対性理論はこのことをけっして認めることができない (数多くの事柄がいっぺんにきわめて簡単なことになり、特殊相対性理論の解釈は無意味になる)。古典論からは、特殊相対性理論などまったくなしに、回転する磁石 (および導体) 中には  $E_r$  成分が存在することがきわめて簡単に導き出される。

クーロンの法則 [4, §1.4] は、きわめて小さな距離およびきわめて大きな距離では厳密に検証されていない。そもそも、単なる点電荷は存在せず、存在するのは磁気モーメントを持つ有限なサイズの荷電粒子のみである。しかも、クーロンの法則とは、「電荷」という概念の定義なのである。電荷の加法性という主張でさえ、ある電荷は他の電荷が接近しても変化しないという仮定に依拠している。重ね合わせの原理は常に実験的裏づけを必要としているのであって、厳密な原理として利用することはできない (ただし、近似的な方法としてだけなら利用してもよい)。 $kr^2$  の形のクーロンの法則の検証の際にも、そこで検

[訳注] タム [6, §112, 英訳版§8.3] によれば、ここでの「物質\*的回路」とは「閉回路を形成している、媒質の物質\*点 (要素) の総体」を意味する。



証されるのは何なのか——比例係数  $k$  の不変性なのか、それともべき指数 2 の不変性なのか?——という疑問が常に生じることになる。

おそらく、「エネルギー」概念の導入を「本質の洞察」[4, §1.5] と呼ぶことはとてもできないだろう。それはせいぜい、一連の計算を簡単にしているだけだ。ただ単に運動の積分を用いているだけだからである。電荷系のエネルギーを計算する際には、第 1 に、我々の電荷は既に「何らかの仕方で単一の点に集まっている」とみなされている。そして第 2 に、それらの電荷の特性（例えば電荷の「固有エネルギー」が依存しているサイズ）は、それらの電荷同士が接近したときに変化しないとみなされている。これらすべてはもはや既に、絶対的に厳密ではあり得ない。残念ながら、一般に受け入れられている諸公式を用いた計算は、イオン結晶（例えば NaCl）の安定性を説明することができない。ポテンシャルエネルギーには極小値がなく、したがってここでもまた、一般に受け入れられている電気力学の厳密性に対する疑念が生じてくる。もちろん、場の概念の導入は計算を簡単化することを可能にするが、それは、我々が特定の 1 つの電荷の挙動にのみ関心を集中したからである。しかし、その導入が正当であるのは、それ以外のすべての電荷の配置が不動である場合のみである。さもなければ、相異なる試験電荷が系内で相異なる変化をし、したがってすべての大きさをまったく同じようにして「ゼロから」再計算しなければならなくなる。

クーロンの法則はガウスの法則 [4, §1.10] よりも情報量が大きい。なぜなら、追加的に球対称性を（それが厳密に存在するという条件の下で）あからさまな形で特に取り上げているからであるが、その球対称性は流束に関するガウスの法則からは自動的に導き出されない（それゆえ、後者においては、それが可能なところで球対称性を人為的な仕方で探し出し、ガウスの法則に追加しなければならない）。ニュートンの引力の法則の書き表し方は正しい。重力定数  $G$ （局所定数！）の大きさは、経時的に、および宇宙のスケールにおいてはまったく不変ではないことが判明する可能性がある。SI 単位系でのクーロンの法則の書き表し方もまた、その種の係数 [= 比例係数  $G$  に類する係数] を除外している CGS 単位系での電荷測定単位を選択することに比べ、より望ましい。なぜなら、これまで行なわれたあらゆる実験は地球の条件下で行なわれたものであり、したがって得られた局所的な値が宇宙的な空間的・時間的スケールにおける「グローバルな定数」であることの証拠は、1 つもないからである（例えば、一連の定数はエーテルの渦流れ時に若干変化する可能性があるというエーテル論の考え方がある）。

電子の電磁エネルギーを特殊相対性理論において公準として定められている値  $mc^2$  と等しいものにするという唯一の目的に従い、何の役にも立たないことが明白な「電子モデル」を「学生向けの課題にもとづいて構築」しているのは滑稽でしかない。

さらにもう 1 つの現象そのものが電気力学の不十分さ（自己充足性の欠如）を示している。化学反応は明らかに電磁気的な本性を持っている。にもかかわらず電池中の電荷は電場に逆らって動いている。そこで我々は、起電力は副次的なものであるとみなすことを人為的に余儀なくされている。また、ポテンシャル（それは独立した物理的意味を持たない）は無限遠においてはゼロに等しいとみなす必要があるということは、いかなる一般原理からも導き出されない。それは任意の定数かもしれないし、非減少関数（例えば周期関数）かもしれないし（あるいはそもそも、波動と

は「ゼロ点振動」なのかもしれない), さらにはまた, 無限増加関数 (ただし,  $\mathbf{E} \rightarrow 0$  となるために, あるいは定数に向かってゆっくりと増加する関数) なのかもしれない (なぜなら, 我々は無限遠における現実の諸条件をまったく知らないのだから。それに, 空虚ではない我々の唯一の宇宙のどこで, そんな「空虚な」無限遠を探すのか! )。

導線間で作用する力の場合, 電荷が存在しないことを「証明」するために金属板を挿し込むより, 導線のうちせめて一方だけ (両方のほうがよいのだが) を実際にすべての側から遮断したほうがよい。

E.パーセル [4, §5.2]が表式

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + \frac{q}{c}[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]$$

は量  $\mathbf{B}$  の定義であると語るとき, それは現実の「事態」であるかのように聞こえる。実は, その定義は何も新たなものを与えていないのだ。すべての (!)  $\mathbf{v}(x, y, z)$  について  $q$  を知る必要があり (未解決の疑問: 運動時におけるその測定はどのようにして行なうのか?),  $\mathbf{E}(x, y, z)$  を知る必要があり (未解決の疑問: 実験的に測定可能な場は運動時に変化するか?), 力  $\mathbf{F}(x, y, z)$  の測定を行なう必要があるのである (運動する対象物の場合にそれをどのようにして行なえばよいのか, まだ知られていない!)。そしてその結果, 我々はある種の「非常に価値ある」関数  $\mathbf{B}$  を得ることになるわけだが, それより, 我々が実際に必要としているものを直接測定したほうがもっと簡単なのではないか? 実は, ここでは, 電場の作用は  $\mathbf{v}(x, y, z)$  に依存しないことが公準として定められているのである (それは現在行なわれている選択であって, それ以上のものではない)。運動時の電荷の大きさを測定することは不可能である。静止時の電荷はクーロン力にもとづいて測定されるが, クーロン力にもとづいて運動時の電荷の大きさを測定しようとすると, 我々は電荷の不変性を公準として定めることを余儀なくされるのだ! 著者 [4, §5.3]は, 電荷の不変性を公準として定めるために, 球面上に分布する大量の無限小試験電荷に作用する平均力を測定する必要があるという, 「もっともらしい科学もどきの呪文」を唱えている。本質的に, それは単に, 場  $\mathbf{E}$  という量の新たな定義の選択にすぎない。当然, 次の疑問が未解決のまま残されている。その具体的な選択は, 選択された記述方法にとって最適なものなのか? そして, 自然は現実にそのような構造になっているのか? そのようにして定義された電荷が不変であることを示す, 直接的な実験や証拠 (ましてや「完璧な」証拠 [4, §5.4]) は存在しない。言うまでもないことだが, そもそも, ある系内で固定された表面に関する数学上の積分をどうすれば測定することが可能なのか, 想像することすら困難なのである。

相異なる原子や分子の中性度の比較は, あまりにも (!) 粗雑で人為的である。それは, E.パーセルの本で主張されているように, ただ単に粒子の速度という点だけが相異なっている諸系に限ったことではない。第1に, すべての速度は変化し, かつそれらは相互の間で協調化されている (相異なる諸系について独立的ではない)。第2に, それらの系のそれぞれは, 現代的な見方によれば, ただ単に機械的に同一の部分系 (粒子) から成り立っているのではなく, 相異なる全質量を持っている。その結果, 例えば, 放射において質量欠損が現れ, 系が形成される際, その

分が消え去ることになる。すなわち、諸系のうちのあるものにおいては「何かあるもの」が存在していないのであって（その「何かあるもの」が何に現れているかは、まだ確実に知られていない。——それは、 $+q_1$ と $-q_1$ 、あるいは $q_1/m_1$ と $q_2/m_2$ との等比関係、等々である）、したがってそのような知識を欠いたままで**他の系**との間で比較を行なうことは、もうそれだけで不適切である。同位体の光学スペクトルの比較の場合にも、1つのパラメーターではなく、いくつかのパラメーターが一度に変化する！そして、運動時における神話的な質量変化に関する「仮想」実験（1回も行なわれたことのない実験）についての挿話 [4, §5.4]もまったく余計である。しかも、質量分析器は相対論的質量変化を示しておらず（たとえ、そのような系における速度は実験で直接測定し得ないからだとしても）、ただ単に別の対象物の場合の別の質量を記録しているにすぎない（質量差は放射のために費やされたのだ！）。今、ここでは、「電荷の大きさは、相異なる運動系において同一でなければならない」という特殊相対性理論の主張を記憶に留めておこう（我々はこの先で磁力について検討する際、この主張に立ち戻ることにする）。特殊相対性理論（長さの収縮）に依拠した場の変換については本書では検討しないので、この問題については特殊相対性理論の誤りが示されている文献 [1]（および <http://www.antidogma.ru>）を参照していただきたい。

運動する点電荷の場に関する表式 [4, §5.6]

$$E' = \frac{Q}{r'^2} \frac{1-\beta^2}{(1-\beta^2 \sin^2 \theta')^{3/2}}$$

には、ある種の矛盾がある。それは、 $\theta' \approx \pi/2$ で $v \rightarrow 0$ の場合には、距離 $r'$ が大きくなったときも含め、 $E' \rightarrow \infty$ となるという点である（諸パラメーターをそのように選ぶことが可能なのだ！）。力線の切り替え（遠い過去の履歴に対する依存性）に関する記述 [4, §5.7]も奇妙である。点電荷を急停止させた場合、遠隔点においては、その点電荷はいまだにその先へ向かって運動しつつあるものとして現れるのであって（力の瞬間的方向は、常に、その点電荷に向かう**数学上**の方向を指し示している！）、したがってその点電荷は、その次に、現実の停止地点まで後戻りしなければならないことになるのか？

特殊相対性理論とクーロンの法則が正しいとすれば、磁気現象は存在し「なければならぬ」 [4, §5.9]などという話をでっち上げるのは、学生たちを愚弄する行為である（では、もし特殊相対性理論が正しくなかったらどうするのか？ 磁気現象は実験的事実として、電磁理論が創出されるよりもはるか昔から知られていたものであって、それより後における相対論の理論家たちによる捏造や「説明」にはまったく依存していない）。第1に、現実の実験は有限なループを用いて行なわれている（そこには無限遠におけるゲームはない）。しかし、そのとき、特殊相対性理論における全電荷は不変でなければならない（特殊相対性理論それ自体に対する矛盾が生じる）ことを思い起こそう。第2に、**正電荷が静止**しており、**負電荷が運動**していることにはかわりなく、正電荷から生じる場と負電荷から生じる場は等しいことが**公準として定められている**（なにしろ、電場は**余剰電荷からのみ**生じるとみなされているのだ！）。第3に、電気力がある系においてゼロであったならば、その電気力は、「相対論的」変換後、別の系においても同じようにゼロのままではなければならなかった。

第4に、では、固有電子系へのそのような相対論的移行がなされたときに全電場（その余剰電荷から生じる電場＋生じると言われている相対論的電場）が正確にゼロになるような余剰電荷により、導線（今、我々には電流が流れるループが2つあるとしよう）のうちの1本をかすかに帯電させたとしたらどうなるのか？ なにしる、実験室基準系においては、そのような荷電（非中性）ループは「非荷電」ループと相互作用せず、磁場および相互作用（特殊相対性理論の出現以前に古典論によって発見された相互作用！）は元のままであり続ける。ところが、特殊相対性理論の立場から検討を行なうと混乱が生じる。今や、運動系内に力は存在してはならないのだ！ 第5に、この種の「行きつ戻りつの相対論的ジャンプ」は、科学もどきの呪文を唱えることにより、既に歴史的に知られている問題の答えに合わせて（つまり「後知恵で」）解をつじつま合わせするだけのために発明されたものである。

ポンドロモーティブ力の計算を行なう際は、物質と電気は空間中に連続的に分布しているとみなされている（これは現実には必ずしもそうではない）。すなわち、このことは、検証されたのはある種の平均であったということを意味している。しかし、なにしろ平均値の場合には、

$$\langle D^2 \rangle \neq \langle D \rangle^2,$$

$$\left\langle \frac{1}{\varepsilon} \right\rangle \neq \frac{1}{\langle \varepsilon \rangle}$$

なのである。また、誘電体は流体で等方的であり（場が存在する場合には、これは既に近似である）、電気は物質と一緒に運動するとみなされている（そのような強固な凍結 [frozen-in] もやはり近似である）。さらに、そのプロセス自体が等温的とみなされている [8, §34]。結局、検討されているのは具体的な誘電体モデルであることを正直に言う代わりに、まるでポンドロモーティブ力が一般的な形で見出されたかのような主張がなされている。

[8, §49] の次の語句は完全なまやかしのように思われる。「力  $F_m$  を決定する法則は、……実験諸事実の一般化によって得られた。…… $\mathbf{F}_m = \frac{q}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{B}]$  である。ここでベクトル  $\mathbf{B}$  は電荷の大きさおよびその運動に依存しない」。第1に、それがそうであり得るのは、すべての量を（それらの実験とは原理的に異なる実験にもとづいて）**独立的に決定**することが可能な場合のみである。しかし、少なくとも量  $\mathbf{F}_m$  および  $\mathbf{B}$  に関して、それはそうなっていない（すなわち、我々が相手にしているのは法則ではなく、定義である）。第2に、特殊相対性理論において場  $\mathbf{B}$  は基準系に依存して変化すると主張されることになるのは、まったく早急すぎる。第3に、「実験諸事実の一般化」によって力に関する多数の表式が一度に得られているが、それらの中で最も有名なのはやはりウェーバーの公式とアンペールの公式である（最近の実験 [10] は、他ならぬアンペールの公式を支持する証拠を示している）。概して言えば、「実験から得られた」表式のそれぞれは固有の長所と短所を持っている。

実は、（ヘビサイドを始めとする）物理学者たちは、磁気力の書き表し方を、ただ単に、（「未知のもの」全体を磁場  $\mathbf{B}$  に帰着させた上で）その時点において一般に受け入れられ

ている形式に従って、人為的に**公準として定めてきた**にすぎない。その選択の「総括」として、今日、我々はローレンツ力の形式での磁気力の書き表し方

$$\mathbf{F} = q \left( \mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{B}] \right)$$

を相手とするようになったわけである。そして突然、その種のありとあらゆる「公準的発見」の結果として、特殊相対性理論においては、量  $\mathbf{E}$  および  $\mathbf{B}$  は基準系に依存する量、すなわち**速度に依存する**量とするという公準を定める必要があることが判明するのである。かくして、そのような選択の**唯一の目的**（そして魅力）、すなわち、一方は速度にまったく依存せず、他方は速度に比例する2つの被加数の和に力を分割するという目的は、達成されなかったことが判明する。したがって、場と力の種類の最適な選択の探索という課題は解消されない（「その全体」は個別にはではなく、**総体としてのみ働く!**）。どんなに小さな作用（例えば測定）も運動パラメーターを著しく変化させる可能性があるという事情により（量子力学を思い出そう）、個別粒子を対象とする実験は困難である。電流素片を対象とする実験はと言えば、それは原理的に不可能であり、それゆえ、当該の実験精度において信頼し得る表式は閉回路に関する表式（例えばビオ-サバールの法則、あるいはアンペール力）のみである。作用反作用の法則が破られているのは奇妙である。すなわち、正面衝突の場合には、 $r_{12} \rightarrow 0$  のとき、その法則が回復しなければならないはずであるが、現代電気力学ではそうっていないのである（したがって、 $r$  が小さいときの諸公式の正確性には疑念がある）。

電磁誘導現象のマクスウェルによる解釈 [8, §66] は、観測可能な**一部の**現象のいくつかの数学的書き表し方のうちの**1つ**にすぎず、しかも、**物理的メカニズム**そのものの解明を欠いている。その記述形式には限界がある。回路が**固定されている**（不動で変形し得ない）とみなされているからである。積分形の書き表し方からの微分形

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

の「抽出」の正しさを純粹に数学的な形で根拠づけることは、原理的にできない。なぜなら、系の境界を持つ**物理的な**役割と影響という要因を解明する必要があるからである（その解明作業は、ある小さい距離から開始する必要がある。この要因が顕著なものとなる可能性がある）。そして、「あらゆる場合に、誘導電流はローレンツ力全体によって引き起こされる」ということは、導入された定義（信仰!）からの**帰結**にすぎない。相対論者たちは、単極機についての検討から場の慣性的な性質を何が何でも除外しようと試みている（さもないと相対論全体が「蒸発」してしまう）。相対論的な場の変換もまた、物理的に裏づけることの不可能な「数学記号ゲーム」である。なぜなら、測定可能な量はたった1つ、力の大きさだけだからである。

インダクタンスの定義 [8, §68]

$$\Phi = \frac{1}{c} LJ$$

においては、環状導線の内部にいったいどうやって回路を設けるのか、結局、語られることはなかった。 $\Phi$  という量は測定不可能な量（つまり、単なる記号の組み合わせ）である

ことに注意しよう。そして、ここで援用されている次のセクションにおけるインダクタンス  $L$  の定義もまた、磁気エネルギーの測定不可能な量  $W_m$  を通じてなされているのである。

表面電流の極限值  $JN = \text{const}$  に移行した場合でさえ、 $N \rightarrow \infty$  のとき、ソレノイドのインダクタンスは無限大に向かっていくことに注意しよう。具体的な材料の諸性質 ( $\epsilon, \mu, R, \rho$ ) は、常にある決まった仕方で相互間で (また外部条件と) 関係を持っており、したがって一般的な場合には、個別の量に対してあれこれの値、例えば  $R=0$  といった値 [8, §69] を人為的に与えてはならない。磁気エネルギーと呼ばれる、初期状態から最終状態への移行の仕方によらない「運動積分」を定義することが可能であるという結論は、仮説である。例えば、完全に厳密であるなら、導線およびその材料をエネルギー消費なしに変形させることはできない。しかも、その意味という点で、「磁気エネルギー」とはいったい何なのか？ もしそれが空間全体における場のエネルギーのことであるのなら、言うまでもなく、そのエネルギーは電流の投入および増大の順序と方法に依存する。この教科書で主張されていることは、磁気エネルギーを何か電流の有効ポテンシャルエネルギー (あるいは運動エネルギー?) のようなものと解釈した場合でも、あるいはまた、その状況が既に無限の時間にわたって定常的であり続けているといった人為的な追加条件を導入した場合でも生じ得る。

「磁気エネルギー密度の局所化の定義」を目的とした磁気エネルギー密度に関する表式の導出 [8, §70] は、かなり大きな制限を課せられている。第1に、配置全体が厳格に固定されている。第2に、原因が「隠蔽」されている。なにしろ、その「証明」においては、無限長ソレノイドの場合、場  $\mathbf{B}$  は電流  $J(t)$  が変化したときにしか変化することができないとされているのだ。また、高速変動電場の場合には「(69.3) の公式は意味を失う」という語句も意味不明である。もしそれらの公式が、その意味内容として何らかの法則を表しているのならば、そこで言われていることは、そのとおりのかもしれない。しかし、それらの公式は  $W_m$  の定義しか表していないのだから、測定不可能な量  $W_m$  がお馴染みの任意の形式的要件を満たすことになるような量  $L(t)$  を選び出すことが十分に可能である。公式の「厳密な数学的導出」は、必ずしも非の打ちどころのないものではない。そこでは、方程式  $\text{div } \mathbf{B} = 0$  (すなわちベクトルポテンシャルの存在) に対する信仰が利用されている。また、無限遠における「救済のための」条件が利用されている。そして最後に、具体的な体積に依存しており、その体積について積分したときにゼロを与えるような十分に任意の「ゼロ振動」は存在しないという結論は、その導出からはどうしても導き出されない。

若干のパラメーターの不変性という追加条件の下での (これだけで既に人為的だ!) エネルギーを通じた磁気力に関する表式の導出 [8, §72] , より正確には定義の導入は、結果の限界性 (近似性) を意味している。例えば、一様な磁場にさえ力のモーメントが存在し、それは物体の形状 (したがってまた磁歪) および物質の  $\mu$  に依存している。強磁性体の場合、 $\mu$  (または  $\kappa$ ) という概念の導入は何ものも与えてくれない。なぜなら、それはただ単に、ある新たな未知関数の定義であるにすぎないからである (したがって、方程式系の完全性と一義性のためにはさらにもう1つの方程式が必要とされるが、それは存在しない)。

場と電流がする仕事に関する表式 [8, §84] の導入は、変位電流を考慮に入れずに行なわれている（「ここでは読む……。ここでは読まない……。ここでは油染みと……」<sup>〔訳注〕</sup>）。熱伝導率はゼロと仮定されている（抵抗に起因するオーミック損失が存在するにもかかわらず！）。そして、すべてはますます順調であり得るかのようになり、つまり、その表式はただ単に「マクロな電気理論の公準の1つとみなされなければならない」と語られている。また、量  $u$  とは内部エネルギー**全体**の密度のことを言うのだと、「口先だけで」宣言されている。物理学に取り組むとは、何と簡単なことだろうか！ 何でもいから何か公準を導入し、「余分な」パラメーターの数が十分でありさえすれば（例えば一般相対性理論におけるように）、あとは、得られる解のための解釈を探すだけでいいのだ。そして、その公準が実験的法則から厳密に導き出されたものである必要はまったくない（現行解釈におけるマクスウェル方程式系全体を眺めてみていただきたい！）。しかし、実践的研究に携わる人々は、現実的な計算を行なうために、他ならぬ実験的法則から出発しているのだ。記号同士が符合していさえすればそれでいいという態度で「数学記号ゲーム」に興じているのは、理論家たちだけである。エネルギー密度に関する表式は、測定不可能な表式として理論家たちの信仰の独占権の下にとどまり続けている。

電磁場のエネルギー・運動量テンソルを導出する際 [5, §33]、数学的な組み合わせを行なった結果、非対称的な量が得られた。この量に対し、対称化のための被加数が人為的に付け加えられた。そのため、テンソルの対称性という要件が物理的に何ごとも意味しない、あるいはそのテンソルのすべての成分が補助的量となるという結果になっている。もしベクトル  $\mathbf{E}$  と  $\mathbf{H}$  が互いに垂直で同じ大きさであるとすれば、そこで宣言されているテンソルを対角形にもってゆくための擬ユークリッド計量においては、光速度よりも速く運動する系が要求される（相対論者たちはこのことをけっして許さないだろう）。それだけでなく、**対称化の後に**、電磁場の場合、トレースは  $T_i^i = 0$  であることが判明し、このことがその先においてビリアル定理 [5, §34] の導出の際に利用されている。ところが、ビリアル定理の導出のために、さらに、両立し得ない仮定が利用されている。すなわち、荷電粒子は有限運動（したがって加速度運動）をするという仮定、そして放射（無限遠に向かっていくエネルギー）は存在しないという仮定である。それゆえ、その結果は、近似的に非荷電粒子系に対してしか適用し得ないということがあり得る。得られた表式に電磁力を人為的に含ませようと試みている箇所では、エネルギーは（点電荷の固有電磁エネルギーにより）無限大であること、したがってそのエネルギーを運動エネルギーに含ませる（すなわち再規格化を行なう）べきであるという「科学もどきの呪文」を唱える必要があることが判明している。マクロな物体のエネルギー・運動量テンソル [5, §35] の導出においても、本質的にそれらと同じ限定的な結果（さらに、気体およびニュートン流体の場合にのみ正しい圧力の等方性という仮定）が利用されている。それゆえ、極限状態方程式の導出も仮説にとどまっている。

〔訳注〕 そのときの状況に合わせて何かを適用したり、適用しなかったり、さらにはその場で思いついた何か適当こと（例えばたまたま目に入った「油染み」）を言ってごまかそうとする無責任な姿勢を皮肉っている。

静電気学の場合のクーロンの実験的法則 [5, §36] でさえ、マクスウェル方程式から自動的に得ることはできず、場が半径方向を向いていて、距離のみに依存しているという追加条件の下でなければ得ることができないことに注意しよう。場のエネルギーに関する表式から電荷の静電エネルギーを得る際には、電荷の数が限られていて、限られた領域内に集中していることが仮定されている（したがって、無限の表面に沿った積分を行なう際は、無限遠における (!) 場の減少法則が事実上既に考慮されている）。相対論者たちは場の全エネルギー [5, §37] をめぐる状況を「逆さまにひっくり返して」いる。すなわち、彼らは、固有エネルギーが無限大になるという事実から、現実の粒子は点状ではない（そして特殊相対性理論は矛盾している）という自然で論理的かつ明瞭な結論を下す代わりに、小さい距離における電気力学の適用可能性自体に制限を加えている。こうすることにより、彼らは電子の質量の電磁的部分に関する問題（また、特殊相対性理論の枠組み内では矛盾したものとなり、この理論の破棄を要求することになる問題）を**解決**しようとするあらゆる試みを排除しているのである。物理学的観点から見ると、今日採用されている自己相互作用を含む項の単純な除外という方法と同様、形式的な再規格はこの問題を解決することができない。なにしろ、得ようとしている依存関係に関するそのような手順には、周囲の配置の変化に応じて固有エネルギーとともに生じる**有限な変化**も含まれていないからである（この状況は、例えば、ボールを気密室に入れるとき、圧力が相異なるにもかかわらず、ボールの収縮または膨張とは無関係に、そのゴム膜のポテンシャルエネルギーは一定であるとみなすのと類似しているかもしれない）。相矛盾した相対論的公式を用いた電子半径の「発見」は、検証不可能な無益な空論にすぎない。

[5, §38] において特殊相対性理論の観点からなされている等速運動する電荷の場の計算は、その形式的・数学的アプローチという点、また現象の物理についてのいかなる説明もなされていないという点で我々を落胆させる。どうやら、著者は、ここでは科学もどきの呪文は明らかに無力だと考え、それを唱えることすら忌避したらしい。数学的観点から見た場合でさえ、何のために静止系中のポテンシャルを探す必要があるのか、明らかではない。なぜなら、それを行なった後に、まず運動系中で場（作用力にもとづいて現実測定可能な唯一の量）を探し、次に場に関する変換を用いて静止系に移行することになっているのだから。静止系中のポテンシャルが所要の座標にいったん**既**に見出されさえすれば、その座標について微分を行ない、場を見出すことが可能であるように思われる。その結果自体もいささか奇妙である。すなわち、 $v \rightarrow c$  のとき  $E_{\perp} \rightarrow \infty$  となる、すなわち、ある1つの電荷が別の電荷のそばを低速度で飛び過ぎる場合には、ある距離  $R_{\min}$  の所を飛び過ぎる時点において、作用力は有限となるのに対して、亜光速で飛び過ぎる場合には、作用力は無限大に向かっていくことになるのである（もちろん、その軌道には特異性はない。なぜなら、軌道は、飛び過ぎる短い時間における力の作用の「積分」値によって決定されるからである。しかし、その力の増大は不可解である）。ところで、理論物理学者たちは現象の本質に取り組もうとすることすらとうの昔にやめて、「記号ゲーム」にしか関心のない半数学者になってしまった。我々が速度  $c$ （任意の基準系中において不変の速度）で伝播する電磁力を相手にする場合には、静止系中の第1の物体に対し、軌道上の当該地点から第2の物体の「像」が作用を及ぼすことになるが、その地点からその時点までの間に、



その作用は速度  $c$  で到達したのだと思われる。すなわち、例えば直線に沿った運動の場合、物体が接近しているときは

$$R \rightarrow R' = \frac{R}{\left(1 - \frac{v}{c}\right)}$$

となり、物体が遠ざかっているときは

$$R \rightarrow R' = \frac{R}{\left(1 + \frac{v}{c}\right)}$$

となる。結果は物体が接近しているか、それとも遠ざかっているかには依存しないという、一般に受け入れられている主張は、物理学的観点から見ると奇妙である。

[9, §2] で計算されているのは、[このセクションの節名である]「導体の静電場のエネルギー」ではなく、導体から遠く離れた所における静電場のエネルギーである。「エネルギー素片」にもとづいて現象全体についてどれだけのことを判断することができるのかは、大きな疑問である（例えば、表面近傍におけるエネルギー——表面に対する電荷の親和エネルギー——が投げ捨てられている。また、電荷が大きいときには導線が爆発することがあることが知られている。すなわち、導体内部のポンドロモーティブ力が投げ捨てられている）。それゆえ、線形関係（容量係数と静電誘導係数）は（弱い静電場の場合における）近似的なものである。このコメントは、外場中の導体のエネルギーに関するものである。さらに、そのような場は無限遠の電荷によって創出されているように描き出されているが、しかしなにしろ、エネルギーに関する公式の導出の際には、無限遠における境界条件  $\phi, E \rightarrow 0$  が用いられていたのだ。また、接地された物体の場合にも厳密に  $\phi_0 = 0$ 、無限遠においても厳密に  $\phi_\infty = 0$  と同時にみなすことが可能かどうかは知られていない。

単極誘導についての検討が [9, §63] でなされるとき、そこでまったく奇妙なのは、その効果が静止した導線の視点から説明されていないことである（そのメカニズムは明らかに存在しない！ しかし、このことのうちに自然が設定した問題を見出そうとする試みすらなされていない）。現象の物理を解明する代わりに、磁石と結合された系（このときは導線が磁場中で運動する）への移行が形式的な形で行なわれている。その際には、**2つの系は等価ではない**ことについてのコメントすらなされていない。すなわち、初期の系は慣性系であったが、磁石系は非慣性系（回転系）なのである！ 記号のつじつま合わせだ！

このように、エネルギーや力といった重要な電気力学的概念は、それらを検証してみたところ、期待されていたほど厳密であるわけでも、首尾一貫しているわけでも、実用に適しているわけでもなく、むしろ、アカデミックな数学記号ゲームと言ったほうが正確であることが判明した。

## 第7章 波動の放射

現代電磁理論のもう1つの重要部門、すなわち波動の放射に関連する部門について検討し、その厳密性を分析してみよう。

ファインマンはまず最初に、第1に、縦成分を完全に恣意的に除外した上で、電磁波は横波でなければならないこと、第2に、電磁波は平面波の重ね合わせとして表されることをまことしやかに「証明」している [2, III, §19-1, 原著 II, §20-1]。ところがそのあとに「突然」、それはまったく一般解ではなく、特殊解であったことが判明する。なぜなら、さらに球対称解と円筒波が存在するからである。概して言えば、このような推論の進め方は数学的に厳密ではない。なぜなら、一般解は常に源を含み、それらの源に依存していなければならないからである。

[2, III, §20-2, 原著 II, §21-2] では、点源の導入は人為的に（純粋に数学的に）行なわれており、この珍妙なものがいったい何なのかについての物理学的な検討すらなされていない。例えばベクトルポテンシャルの場合には、点電流なる概念を導入しなければならなくなるはずである。では、それはいかなるものなのか？ もしそれが運動する粒子（存在しない点粒子）であるのなら、それは1か所に止まっていないで移動する。ではなぜ、偏微分方程式が書かれているのか？ 他方、スカラーポテンシャルの場合には、それと同様の源において、電荷はまるで1か所に止まっているかのようになる。点源を含んでいる波動方程式の解の見出し方はいずれにしても誤っている。なぜなら、 $\varphi = S(t-r/c)/r$  は、原点を含めたいたる所において、**点源を含んでいない波動方程式を等しく満たしているからである**。それゆえ、事実上、この本では、方程式は点源を含まないものでなければならず、また原点においては方程式を点源を含むものとみなす必要はまったくなく、必要なのはただ単に、ポテンシャルを点源のポテンシャルと同一視することだと主張されているのである。しかし、この場合でさえ、まことしやかな推論はまたも失敗を犯している。なぜなら、 $r$  が小さいときは、この公式（分子）を素直に  $r$  について展開し、極限

$$\varphi = \frac{S(t)}{4\pi r} - \frac{S'(t)}{4\pi c}$$

を得ることが可能であるからである。ポテンシャルの経時的な任意振動はいったいどこに投げ捨てられたのか？ なにしろ、一般的な場合には、それが場を与えるのではなかったのか？ しかも、それだけでなく、点源を含んだ解はそれ以外の多数の方法によって得ることが可能なはずである。それは例えば  $\varphi = \varphi_0 + St^2/(2c^2)$  あるいは  $Sr^3/6$  を付け加えるといった方法である。

ファインマンは、運動する電荷の電場に関する自分の公式 [2, III, §20-1 の (20.1), 原著 II, §21-2 の (21.1)] <sup>〔訳注〕</sup> を裏づけようと試み、それに非常に長い時間をかけている。その際、彼は低速度の非相対論的運動なるものを検討しているが、あるときはそれを遅延

〔訳注〕 ファインマンの公式は次のとおり： $\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{\mathbf{e}_{r'}}{r'^2} + \frac{r'}{c} \frac{d}{dt} \left( \frac{\mathbf{e}_{r'}}{r'^2} \right) + \frac{1}{c^2} \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{e}_{r'} \right]$ ,  $c\mathbf{B} = \mathbf{e}_{r'} \times \mathbf{E}$ 。

によって無視し、あるときはそれを考慮に入れている [2, III, §20-4, 原著 II, §21-4]。その結果、完全に厳密性を欠いた推論が得られている。時間に関する1番目と2番目の導関数を比較する必要があるのだとしたら、「低速度の運動」とは何を意味するのか？ そもそも、座標に関する微分を行なう際に（偏導関数！）、追加的な時間に関する導関数が、いかにして現れることができたのか?! なにしる、それは全導関数ではないのだ！ 直接計算を行なう代わりに、追加的な(!)人為的条件を通じて場  $\mathbf{E}$  を得ていることは、当惑を引き起こす。彼が座標に関する偏導関数を取ったときには時間に関する追加的な導関数が現れたのに、彼が時間に関する積分（逆の手続き）を行なうときには座標に何も起きないのはなぜなのかも、理解しがたい。導出の手順全体が明らかにつじつま合わせの臭いを発している。そしてそのすべては、それらの解が互いに**非常に似通っている**と断定することだけを目的としている。その結果がビオ-サバルの法則と正確に一致していない事実も疑念を呼ぶ。この場合、何を確定的な実験的事実とみなすべきなのだろうか？ そして、何が検証されるのだろうか？ 私の意見によれば、その答えは物理学者にとって一目瞭然たるものでなければならない。

ランダウの主張によれば、相対性理論および場の理論においては、素粒子は点粒子とみなされなければならないとされている。もちろん、それは越権行為である。なぜなら、あらゆる理論の（ましてや、馬鹿げた相対性仮説の）要求に対しては、実験が優越権を持っているからである。ファインマンはどうかと言えば、彼は正直に、リエナール-ウィーヘルト・ポテンシャルの導出の試みを、電荷は分布を持つとみなした上で行っている [2, III, §20-5, 原著 II, §21-5] <sup>〔訳注\*〕</sup>。ここですべての考え方は純粹に古典論的である！ それゆえ、特殊相対性理論によれば電荷の体積は減少しなければならなかったことを思い出すならば、現代の相対論的見解との次の不一致が生じることになる。すなわち、相対論的因子はどこに隠れてしまったのか？ さらに、場はまさに電荷によって創出されること、すなわち、距離は運動する電荷との関係において決定されなければならないことを思い出すなら、対象物までの距離も収縮しなければならないはずなのだから、現代の相対論的理論と実験との完全な不一致が得られることになる。このように、リエナール-ウィーヘルト・ポテンシャルがそのような（ファインマン方式による）導出を持ち得るのは、特殊相対性理論が用いられておらず、かつ古典物理学が正しい場合に限られる。電荷が一定の速度で運動する場合 [2, III, §20-6, 原著 II, §21-6] にも、ポテンシャルに関する表式（公式 (20.39) , 原著

(21.39) ) <sup>〔訳注\*\*〕</sup> の中で奇妙な因子  $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$  が得られている。この因子は何に対しても当てはめることができない（一定と称する電荷にも、半径にも当てはまらない。そこに

〔訳注\*〕 ファインマンは運動する電荷のポテンシャルに関するこのセクションにおいて、点電荷について、最初に「"点"電荷というのは電荷密度  $\rho(x, y, z)$  を持つ、都合によっていくらかでも小さく考える非常に小さい帯電球の意味である」と定義した上で、「点"電荷を小立方体形とみなし、その立方体の辺の長さを  $a$  として計算を進めていき、所要の結果に達した箇所、最後に電荷の"大きさ"  $a$  は最終結果に入っていないので、同じ結果は電荷がどんな大きさに縮んでも——点になっても——成り立つ」と書いている。

〔訳注\*\*〕 この表式は次のとおり：
$$\phi(x, y, z, t) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \frac{1}{\left[ \left( \frac{x-vt}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \right)^2 + y^2 + z^2 \right]^{1/2}} .$$

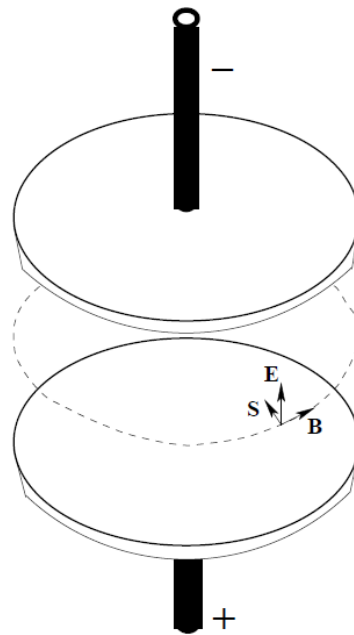


図5 コンデンサーのエネルギー

は既に独自の因子が存在している)。すなわち、この因子は物理的な原因もメカニズムもなしに、「空中から」取られているのである。

コンデンサーの内部へのエネルギーの流入 [2, IV, §6-5, 原著 II, §27-5] (図5 参照) をめぐっては、いくつかの「些細な」疑問が生じてくる。エネルギーは軸に向かって流れていくと主張されている。我々が極性を絶えず変化させているところを想像してみよう。ベクトル  $\mathbf{E}$  と  $\mathbf{B}$  は符号を変えたが、エネルギー流は依然として内部の軸のほうを向いている (そのようなことは、例えば、ゼロ近傍の外部の源がなかったとしても、ただ単にゆらぎによって生じるはずである)。コンデンサーの内部が真空だとすると、絶えず軸に向かって流れ続けるエネルギーはどこに「沈殿」するのか、そしてそのことは何に現れているのか? 単一の導線についても疑問がある。電場と磁場の中における粒子の運動は、掲げられているベクトル  $\mathbf{E}$  と  $\mathbf{B}$  の方向図と一致しない (ドリフトについて思い出そう)。その結果、すべての公式が正しいと仮定したとしても、エネルギーは外部から導線の内部に流入しない。そしてそのエネルギー流は、まさに「素朴な直観」がこっそり教えてくれるとおり、導線に沿った成分を持っているのである。しかも、もし我々がコンデンサーあるいは導線を遮蔽した場合、外部からの場のエネルギーの流入に何が生じるのか、理解できない。では、電流が電荷を帯びているとしたら、何が生じるのだろうか? さらに、「遠い所の電荷の空間全体への拡散およびその内部への流入」は、中性電流の場合は奇妙である。1つの電荷と1つの磁石との静的構成物の周囲を回るエネルギーの還流はたわ言である。そのエネルギーがいったい何の中を還流するのか、理解できないからである。なにしろ、特殊相対性理論 (いわゆる質量とエネルギーの等価性) によれば、それは質量の運動、しかも加速度運動 (円に沿った遠心加速度) でなければならないのだ! では、(再び、現代の理論的見解によれば) 放射はいったいどこに隠れてしまったのか? その場合、磁石と電荷が

互いに相互作用することができないのだとしたら、いったい何が放射をすることができるのか？ 電磁場の運動量 [2, IV, §6-6, 原著 II, §27-6] は公準的に導入されている。そして粒子のすべての速度が相異なる空間ベクトルである場合には、多数の疑問、特に場の運動量の大きさに関するアインシュタインの結論について疑問が生じてくる。

全質量に占める電磁質量の割合に関する問題と同様、運動する電荷の場の運動量に関する問題の検討 [2, IV, §7-2, 原著 II, §28-2] は自然とは無関係であり、何らかの個別理論としか関係を持たない。疑問は単純である。電子は真に中性である粒子との衝突を受けるのだろうか？ 電子が中性粒子とまったく衝突しないとすれば（ただし、それを決定するのは簡単ではないのだが）、電子の力学的質量はゼロであり、全質量は純粋に電磁的な本性を持つということになる。しかし、 $mc^2$ を通じた場のエネルギーに関する表式 [2, IV, §7-3, 原著 II, §28-3] は検証不可能な（特殊相対性理論においてのみ必要とされる）仮説であるから、その表式に合わせて電磁質量、いわんや力学的質量（あるいは「未知の」力からのポアンカレ応力）をつじつま合わせすることは、「濁り水の仮説」である。概して言えば、相対論的不変性の要求は完全に不当であり、電磁理論、そしてその他の場の理論（例えば原子核理論）にとって、可能な選択を制限するものとなっている。どう見ても、それらの要求はただ単に、自然界における唯一正しい解を探求から除外しているにすぎない。要するに、真空中における点状閃光の不変性は、電磁場、しかも真空中のみににおける電磁場以外のいかなるものとも、まったく無関係なのだ！

放射エネルギーに関して、そこには方法論の点で不可解なくつかの側面がまとわりついている [2, II, §3-2, §4-2, 原著 I, §28-2, §29-2]。第1に、エネルギー流の概念を導入するのであれば、どうすれば  $1/r$  に対する場の依存性を個別に検討することができるのか？ なにしる、電荷の近傍にはその同じ場の別の「諸部分」、ただし別の依存性を持った諸部分が存在するのだ。そして、場のエネルギーが電荷から「出発」したとき、エネルギーの塊はどこへ消えていくのか？ それは再び「沈殿」し、「付着」して、何かの中に移転するのだろうか？ なにしる、エネルギーは真空中を運動するときは保存されなければならないのだ。第2に、量  $E^2$  に対する場のエネルギーの比例関係は、事実上、 $v^2$  に比例する試験電荷の古典的運動エネルギー、および場の大きさに対する速度の比例関係から取られている。しかし、1) 電荷は単に場 **E** 中を運動するだけでなく、場 **B** 中をも運動するのだから、運動の依存関係はより複雑である。電荷は固定点の周りで振動すらしめないだろう（例えば、媒質中では波動との共振が存在する可能性がある）。2) なぜ我々は試験電荷の速度を  $\mathbf{v}_0 = 0$  と取らなければならないのか？ それは、絶対座標系ということか？ 分布を  $f(\mathbf{v}_0)$  と選べば、再びすべての依存関係が複雑化する。第3に、ある距離だけ離れた2つの一様な場源を取ってみよう。その場合、放射の位相関係に応じて、ある距離の所で場はゼロとなる。しかし、一方の場源が閉じているとき、他方の場源からのエネルギー流はその地点を通過するはずである。では、エネルギーはその場源から出発したのか、それとも出発しなかったのか？ もしエネルギー流が自立的な実体であるとする、エネルギー流は、離れた所にある他の場源からの別の場がその地点に向かって飛んでくるであろうことを知ることができたのだろうか？ ではそのとき、2つの（ほぼ同方向の）非ゼロのエネルギーは、いったいいかにしてゼロを与えるのか？ 一般的に、重ね合わせの原理は、その理念的側面においては、場的なアプローチに対して対抗的に働く。すなわち、重ね合わせの原理は、場は独

立したのではなく、その地点における試験電荷にとっては、その場はさらに2つの場源の配置と相互運動に依存していることを示している。それは、まぎれもない**相互作用のポテンシャルエネルギー**である。そのエネルギーは、なぜ $(t-t_i)$ に依存することができないのか？ そして最後に、もし運動する電荷のエネルギーが「出発」することができるのなら、そのエネルギーはなぜ消滅しないのか？

特殊相対性理論はエーテルを否定し、真空を空虚とみなしている。では、真空のインピーダンス（抵抗）は377オームである [2, II, §7-2, 原著 I, §32-2] などと、いったいどうすれば語ることができるのか？ 真空のインピーダンスは検出されているのだから、特殊相対性理論こそは、炎症を起こした頭脳が生み出した単なる空想である。加速時の電荷の放射エネルギーを計算する際、ファインマン [同上] は狡猾な手を使っている。すなわち、その公式には遅延を考慮に入れた加速度が含まれているにもかかわらず、彼は、エネルギーはその時刻に放射されたとみなすのは正しくなく、それゆえ、1つのサイクルにおける加速度の2乗の平均を計算する必要があると述べている。いったいどうすればそうなるのか。なにしろ、特殊相対性理論においては、源が任意の運動（古典論では光速以下の運動）をするとき、波動が源から「飛び立った」ならば、源は波動に追いつくことはなく、放射に対するその寄与を変えることはないとされているのである（観測点に到着した波動の時間にもとづいて、波動がそこから当該時刻に当該検出点まで到達することのできた、その球面を描くことが常に可能である）。

既に指摘したように、エネルギー密度に関する数学的表式は近似的にのみ書き表されたものであって、**所与の地点における現実の大きさ**は、一般に受け入れられている書き表し方とは異なっている可能性がある。**所与の地点におけるポインティング・ベクトル**に関する一般に受け入れられている書き表し方も近似的なものである。それだけでなく、近似的に検証することが可能なのは積分値のみであって、微分値は任意の回転関数 ( $\text{rot } \mathbf{f}$ ) に変えることができる。ポインティング・ベクトルの概念 [6, §92, 英訳版§7.2] は、穏やかな言い方をすれば、一連の場合に奇妙であることが判明する。

1) 定常的な静止している電荷と磁石の場合には、あれこれの特徴的な軌道（例えば円軌道）に沿って運動するが、いかなる具体的なものにも発現することのない、任意のエネルギー流を「作る」ことができる。

2) 導線の場合には、エネルギーは周囲の空間から半径方向に沿って「流入」し、起電力領域においては半径方向に沿って外に「流出」するとみなさなければならないことになるが、しかし、第2の領域から第1の領域への導線に沿ったエネルギー流は存在しない（エネルギーはいったいかにして第1の領域に入り込むのか？）。

3) 伝播する光の場合には、マクスウェル方程式により場  $\mathbf{E}$  と  $\mathbf{H}$  が同時に最大値にも最小値にも達するということが疑わしい。エネルギーはある形態から別の形態に移行するという、教科書において広く普及しているアナロジーを、いったいどう取り扱うべきなのだろうか？ エネルギー流は定常的なものではなく、変化するものだという結果が得られているが、それは、エネルギーを定常的に放射しているのは源（ランプ）ではなくて、エネルギーが自発的にあるいは出現し、あるいは消滅するということになるのか？  $\mathbf{E} = 0$  かつ  $\mathbf{H} = 0$  である地点には、エネルギーはまったく存在しないのである。

電磁場が媒質を通して伝播していくとき、媒質の性質  $(\epsilon, \mu)$  はまったく変化しないという仮定は、近似的・モデル的なイメージでしかない。実際には、波動自体が、そこを通して伝播していく媒質の性質をわずかに変調させているのである。表皮効果が表れるとき、なぜエネルギーは深部に「浸透しない」のかという問題についてのポインティング・ベクトルの観点からの「説明」は、ナイーブに見える。なにしろ、定常場中であれ、変動場中であれ、ポインティング・ベクトルは常に半径方向に沿って外部領域から中心に向かっていく、つまり、エネルギーは常に一方向に「流れている」からである。したがって説明すべきであったのは、エネルギーは導線の中心までは「ほとんど到達しない」ことの原因であった。

振動子の場 [6, §98, 英訳版§7.8] を計算すると、近似解を適用することのできる「中間領域」が見出される。その際に考慮する必要があるのは、第1に、解（級数）が収束することを事前に仮定すること、第2に、切り捨てが、大きさ順にのみ従って真の解に近似した答えをもたらすということだけである。得られる公差は常に有限であり、関数的挙動は、級数の最初の数項について算出された解の挙動とは著しく異なったものになる可能性がある。その結果、その近似的関数の微分は、（例えば高次高調波が存在する場合には）真の関数依存性とは大きく異なった関数依存性を与えることになる可能性がある。言うまでもなく、[6, §99, 英訳版§7.9] における振動子の場は正確なものではなく、近似的なものにすぎない。当然のことながら、その解を適用することのできない（答えを得た際の条件が満たされない） $\omega$  あるいは $\lambda$ が存在する可能性が常にある。また、高調波への分解（フーリエ展開）に関しても制限が存在する可能性がある。

誘電体中の平面波に関する方程式の導出 [6, §100, 英訳版§7.10] は、 $\epsilon$  と  $\mu$  の不変性および  $\rho$  と  $\mathbf{j}$  の非存在に依拠している。現実には量  $\rho$  は  $\rho \neq const \neq 0$  であるが、しかし急速に振動する関数が存在する。それと同様に、光線  $\mathbf{j}$  が通過する区域にも急速に振動する関数が存在する。さらに、ベクトル  $\mathbf{E}$  と  $\mathbf{H}$  の両方が同時に最大値に達することになる解は、あり得るモデルの1つ以上のものではない。それが実際にそうであるかどうかは、個別の実験が確定しなければならない。

あらゆる物理理論は、現実の「100分の1」のぼやけた反映にすぎない（近似モデル以上のものではない）。そして遠隔作用理論と近接作用理論 [6, §109, 英訳版§7.19] は、その反映の両極端をなしている。抽象的な「電荷」は存在しない。存在するのは、明確な具体的性質を持った現実の粒子である。それゆえ、ファラデー-マクスウェル流の「力線の密集」は数学的抽象化として、あっさり有効性を失ってしまう（純粹の場という構想を最終的な形まで発展させることがついにできず、現在、この構想が用いられていないことはもはや言うまでもない）。力学的諸理論でさえ、擾乱が有限な速度で伝播し得ることを禁止していない。今のところ、より実際的な有効性を持っていることが分かっているのはハイブリッド型の理論である。しかも、実験は、場は電荷または／および電流（すなわち物質\*的媒体）が存在するときのみ存在し得ることを示している。時刻  $t$  における諸量のみに対する依存性という書き表し方自体は、それだけではまだプロセスの瞬間性を語っていない。「天下り式に与えられた曲線」 $\mathbf{r}(t)$ （すなわち、任意の導関数に依存する曲線）は、それ

$$m\ddot{\mathbf{r}}(t) = \mathbf{F}(t)$$

の解として提示することが常に可能である。また、

$$\mathbf{F}(t) \equiv \mathbf{F}_1(t, \mathbf{r}) \equiv \mathbf{F}_2(t, \mathbf{r}, \mathbf{v}) \equiv \mathbf{F}_3(t, \mathbf{r}(t), \mathbf{v}(t), \dots, \ddot{\mathbf{r}}(t), \dots) \equiv \mathbf{F}_4(t - t_0)$$

という定義と変換を導入することも常に可能であるから、それらの書き表し方のどれ1つとして、それ自体は遠隔作用についても、瞬間性についても、遅延についても語っていない。さらに、すべての方程式は（積分方程式にせよ、偏微分方程式にせよ）同一の実験的基礎を持っている、すなわち、それらの一般性の度合いは同一なのである（しかも、ある場合には、それらはさらに追加的な諸条件を「負わされている」のだ！）。静的な場のエネルギーの局所化に関する問題をめぐるあらゆる困難は、元のまま残されている。急速に変化する場の場合には、場のエネルギーと運動量に関する正確な表式の決定に関する問題も一義的ではない。

[8, §83] では、電磁波はその上に電荷が固定されている無限平面の運動を例に取って「説明」されている（ $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$  が得られる）。有限な対象物の場合には、力線の相互配置は複雑になる。なぜなら、 $\mathbf{E}$  の力線が発散する直線であるのに対し、 $\mathbf{B}$  の力線は閉じていなければならないからである（張力が距離とともに増大するときは楕円形）。 $\epsilon E^2 = \mu H^2$ 、すなわち任意の時点において電気エネルギーは磁気エネルギーと等しいという関係式も奇妙に見える。ここで議論されているのは平均値ではない！ 他ならぬ瞬間値なのだ（これは電磁波の概念そのものと矛盾している）！ このように、（波動中の運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの場合にそうであったように）一方のエネルギーが他方のエネルギーに逐次的に移行することはなく、ある時点には最大となり、別のある時点にはゼロとなる。そして伝播していくそれらの点において、そのエネルギーは常にゼロにとどまり続ける。もしある点においてすべてのエネルギー（および場）がゼロになるのなら、それらはいかにすれば隣の点において「ゼロから復活する」ことができるのか？ ここでは、場のアプローチはまったく「臭いすらない」（それはむしろ、普通の粒子に似ている）！

理論家たちにはるかに先んじて実務家たち（実験家、エンジニアなど）が選択した SI 単位系に対して、シヴーヒンは攻撃をしかけている [8, §85]。CGS 単位系と MKS 単位系は、（物理学の観点から見れば）原理的に SI 単位系といかなる違いもないという点を指摘しておこう。SI 単位系でのマクスウェル方程式はより単純に見える。ところが相対論者たちは、その方程式の中に "c" という文字が存在しないことに甘んじることができないのだ。さらにシヴーヒンは、その方程式ではいかなる量には意味があり、いかなる量には意味がないかが見落とされていると、悪意を込めて論じている。しかし、それらすべては今のところ信仰の問題であり続けている（実は、そこに導入されているすべての量はモデル的記述のために人為的に導入されたものであり、したがってそれらのうちどれ1つとして、理論の解釈を抜きにして直接的な形で測定することはできない）。それゆえ、SI 単位系には、いかなる (!) 原理的欠陥もまったく存在しないのだ！ 真空中において量  $\mathbf{E}$  と  $\mathbf{D}$ 、また  $\mathbf{B}$  と  $\mathbf{H}$  が同等であるという主張は、シヴーヒンの信仰である（何らかの具体的諸条件の下での数値的一致が諸概念の同等性を保証したことは、まだ一度たりともない）。それらすべては、SI 単位系で表された電磁場の統一性をけっして破棄するものではない。また、電磁相互作用を（諸量の別の組み合わせを用いて）別のやり方で記述する可能性も排除されていない。それだけでなく、SI 単位系は、実験においてその必要性が見出された場合には



諸法則に変更を加えることを可能にする（SI単位系には現象のメカニズムも組み込まれているからである）。他方、ガウス単位系は既に厳格に固定的に与えられたもの（信仰の公理系）であるから、それ以後におけるすべてのものは *ad hoc* な仕方ですべて「上部に増築する」ことしかできない。

ヘルツ双極子の放射 [8, §141] の記述において、ベクトル  $\mathbf{D}$  が求められている方程式の形は人為的に選択されたものである。すなわち、1) その形はわずか3つの依存性—— $\mathbf{p}$ ,  $\dot{\mathbf{p}}$  および  $\ddot{\mathbf{p}}$  に対する依存性——による制限しか受けていない。2) 解は常に成分  $\mathbf{p}$  と  $\mathbf{r}$  に分解することができるかと仮定されている。3) あり得るとされる  $\mathbf{r}$  に対する依存性に制限を加える際、有次元の定数 ( $[\mathbf{r}_0]$ ,  $[\mathbf{p}_0]$ , 等々) は存在しないと仮定されているが、これはそうでない可能性がある。4) いかなる境界条件も初期条件も存在しないと仮定されている（双極子が点であることも仮定である！）。5)  $t' = t - r/v$  に対する依存性を導入することは、説明という場面ではしごく当然のこととして理解し得るとしても、しかし実践的な場面においては、物体のあらゆる運動法則に関する知識を（すなわち、この追加的な課題の解をも）前提とすることになって具合が悪い。電磁波の場合、ワイヤー格子 [8, §142] が波の透過を強く妨げる可能性があるというのは奇妙である（減衰は、ワイヤーによって「覆われている」面積の全面積に対する比に依存していなければならないのかもしれない）。おそらく、場の磁気成分の変換に依存する別の説明があり得るのではなからうか。

[8, §143] では、レツヘル線系に関して、マクスウェル方程式系を用いることなしに(!) 有限な波動伝播速度が得られている。そして、それが「帯電状態」（あるいは電圧、電流）の伝播であるということは少しも重要なことではない。それはただ単に、マクスウェル以前の物理学では場の概念がまったく導入されていなかったというだけの話だ（それに、いずれにせよ、導入された場についての判断は、それ以前と同じその現実の相互作用のみにもとづいて行なわなければならないのだ!）。ところで、同軸円筒形導線の場合には、自由空間中における普通の波動伝播速度が得られる。それゆえ、（伝播メカニズムの物理にとって）「原理的な重要性を持つ」変位電流を用いることなしに同一の結果が得られることに対する「弁解」は、きわめて滑稽に聞こえる。

エネルギーの密度と流れ [5, §31, 一部のみ小教程§57] に関する公式を導出する際、著者は

$$\frac{d}{dt} \rightleftharpoons \frac{\partial}{\partial t}$$

というように、かなり堂々と（自分にとって都合のいい所で）まったく種類の異なる微分を相互に入れ替えている。それに加えて、電気力学における場の考察では、しばしば平面電磁波が考察の対象とされている。ところがその場合（無限調和振動の場合）には、エネルギー流は無遠くにおいて減少すらない（一般的な場合には、任意の境界面に関する積分は、常に、非ゼロの出射波からの全エネルギーを与える）。それゆえ、一般的な場合には、無遠くにおける積分項を「投げ捨てている」公式は、原理的なレベルで誤っている（最良の場合でも、近似的にしか正しくない）。

物理量の展開において多重極モーメントを用いるときには、通常、モーメントのある有限な個数という制限を受けることになる。その際、現代電気力学 [5, §41, 小教程§62, §63] においては、半径依存性に関する展開（あるいは比較）についての制限しか受けておらず、

角度依存性がもたらす影響に対しては、特に強い注意は払われていない。例えば、 $\sum e_\alpha = 0$  かつ  $\mathbf{d} \neq \mathbf{0}$  のときでさえ、その展開が  $\pi/2$  近傍の角度の場合の双極子モーメントによる制限を受けることはあり得ない。なぜなら、そのとき  $\mathbf{dR}_0 \rightarrow \mathbf{0}$  となり、展開式のその次の(!)項を考慮する必要があるからである。同様に、力とエネルギーの場合にも角度に関して得られた近似的表式の適用可能性には限界があり、したがってそのような表式を用いて得られた結論は、制限を課せられたものとなる。

相異なる課題を「解決」する際、ポテンシャルに関して**相異なる**追加的な人為的条件が課せられているのは奇妙である。例えば、(3次元の場合の)波動方程式を得るときには  $\varphi = 0$ ,  $\text{div } \mathbf{A} = 0$  とするとされていたのに、その先では、それが一義的な解をもたらさないことは明瞭であるにもかかわらず(!), 4次元形式においてはローレンツ・ゲージが最良であるなどということ(それが不変だからという理由で!)我々に「納得」させようとしている[5, §46, 小教程§77]のは滑稽に見える。それにもまして疑わしいのは、場は無限遠において減少するという性質を用いて導出されたマクスウェル方程式を、無限遠において減少しない(!)もの、例えば平面波[5, §47, 小教程§69](ここではマクスウェル方程式にもとづいて場、ポテンシャル、エネルギー密度、ポインティング・ベクトルが書き出されている)、あるいはまた無限の構造物(平面構造物、平形あるいは円筒形コンデンサーの構造物、等々)に対して直接的に適用しようと試みていることである。また、「場の固有振動」[5, §52, 小教程§76]の計算においては、それより前の箇所では無限遠における条件を用いて導き出されていた方程式が利用されている。しかも、波動方程式が適用されている。ところで、それより少し前の箇所では静電場の展開[5, §51]がなされたとき、ポテンシャルはその方程式を満たしていなかった。すなわち、我々が欲するもの、それが我々の選択するもの(答えを覗き見た上で?)という結果になっている。境界条件(定在波か進行波か)をめぐっても同じ状況——我々が欲するもの、それが我々の得るもの——となっている。そして、その展開式の導入の目的自体が不可解である。すなわち、ある地点における力の作用(唯一測定可能な量)を決定するためには、その地点における場を知る必要があるわけだが、しかし提案されている展開式では、無限個の係数を知らなければならないのである(また、係数の個数は制限され得るのか、もし制限されているとすればそれはいくつなのかを事前に知ることはできない)。

リエナール・ヴィーヘルト・ポテンシャル[5, §63, 小教程§78]の導出は、粒子自体に関するポテンシャルの選択時における空虚な空間(相対性原理)に対する信仰から出発してなされている。さらに、ポテンシャルは4元ベクトルをなしていなければならないという信仰が利用されている。そして次に、 $\mathbf{v} = \mathbf{0}$ の場合を満たす様々な形のうち、そこで選ばれている形が唯一の形であることは証明されていない(実は、それらは好きな数だけ導入することができるのだ)。その解もいくつかの疑問を引き起こす。まず、 $1/R^2$ に対してではなく、 $1/R$ に対して比例する項、すなわち無限遠においてゆっくりと減少する項が存在している(したがって、電気力学の基礎方程式が導出された際の諸仮定が、無限遠における減少という条件を満たしていないことは明らかである)。次に、 $\mathbf{R} \parallel \mathbf{v}$ かつ  $v \rightarrow c$ のとき、場  $\mathbf{E}$ (すなわち力)は無限大に向かっていく。 $v \rightarrow 0$ のとき、場  $\mathbf{E}$ が一様に運動する電荷の場に移行しないことは明らかである(例えば、 $v \rightarrow c$ のときは  $E_\perp \rightarrow \mathbf{0}$ であるのに対し、

一様な運動の場合は  $E_{\perp} \rightarrow \infty$  となる)。遅延ポテンシャルのスペクトル分解 [5, §64] について述べている箇所について言えば、直ちに場自体を探すことが可能であったのなら、何のために最初に  $\rho$  と  $\mathbf{j}$  からポテンシャルを探すのか（後ろ向きの推論の進め方）、理解することができない。展開（例えば、ラグランジアン [5, §65] における  $v/c$  に関する展開）を行なう際には、その議論は、被加数から取られた同一の累乗の  $v/c$  についてではなく、相異なる被加数から取られた同一の合計値について進めなければならない。例えば、角度依存性が存在する結果として、相異なる展開式を——角度に応じて——用いることが必要になる。

その本質という点で、現代電気力学において、我々はポテンシャル（また、場の方程式の代わりにポテンシャルに関する方程式）を導入することにより、方程式の次数を高めているのである。厳密なアプローチを取るのであれば、追加的な初期条件および/または境界条件をその分だけ増やす必要がある。ゲージあるいはそれ以外の追加条件を設定することは、そのような手順を含意している。ただし、その手順の役割は何から何まで明らかというわけではない。すなわち、明確に検証することの可能な、境界における実験データとの突き合わせを行なう代わりに、ただ単に何らかの形式的判断（方程式）にもとづいているにすぎない依存性が導入されたときに、解の唯一性、また課題の物理と解との一致が維持されるかどうかは明らかではない。同一タイプの課題（境界条件や配置に特異性のない課題）においてさえ、しばしば相異なる追加条件が導入されていることは注意を引く。それは例えば、電荷系から遠く離れた所の場合 [5, §66, 小教程§79] の場合、また平面波の場合（さもないと角度依存性が相異なったものになってしまう）である。このように、この理論には、明らかにアルゴリズムを欠いたところがある。さらに、実験との比較を行なう際に考慮する必要があるのは、放射の個別的な事象は事実上捉えられておらず、ただ単に粒子流の衝突時における放射 [5, §68, 一部のみ小教程§80] の統計的特性が検出されているにすぎないという点である。放射に関する近似的表式を見出す際には、（球座標系におけるもの以外の）放射の角度依存性は事実上考慮されておらず（展開は  $R$  についてしか行なわれていない）、したがってその解はいくつかの角度に関しては正しくない。 $e_1/m_1 = e_2/m_2$  のときに放射が存在しない [5, §70, 小教程§80] <sup>〔訳注〕</sup> のは奇妙である。しかしなにしろ、ポジトロニウムは最終的に 2 つの  $(3)\gamma$  量子に転化するのではないか？ また他方では、原子は放射をしない（原子の場合、その条件が満たされていないにもかかわらず）。このように、現代電気力学は放射プロセスを適切に記述しているという見方には、おそらく賛同することはできないのではなかろうか。

[5, §71, §72] では、有効放射（本質的には全放射）（および強度）に関する公式が得られているが、実は、それらの公式の意味は何から何まで明瞭というわけではない。すなわち、それは、系から**出発している**放射ではない（近傍の場は別の場なのだから）。また、放射の角度分布は、系の近傍における角度分布とも、系から遠く離れた所における角度分

〔訳注〕 小教程§80 問題 2 の解では、2 つの相反発する粒子が正面衝突するときの制動放射の全エネルギーの表

式として  $\Delta\mathcal{E} = \frac{2}{3c^3} \left( \frac{e_1}{m_1} - \frac{e_2}{m_2} \right)^2 (e_1 e_2)^2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dt}{r^4}$  が得られている。ここで  $e$  は電荷、 $m$  は質量であり、添字 1, 2 は 2 つの粒子のそれぞれを指す。

布とも異なったものとなり、したがって積分値は厳密ではない。さらに、その放射を実験的にいかにして実証するのか理解することができない（それが観測装置の存在する1地点にあるのではなく、「広く広がっている」場合）。——系からずっと遠く離れた所で「捕獲網」を持って走り回り、すべての波を捕まえて積分するのか？ また、観測装置との具体的な相互作用のメカニズムが、測定された値に影響を及ぼさないのか？

[5, §73, 一部のみ小教程§81] では、高速度で運動する粒子からの放射に関する表式を得る際、静止する粒子の場合からの移行が用いられているが、これを行なうことが可能なのは単一粒子の場合のみである（すなわち、これは2体理論——1つの粒子と1人の観測者の理論——である）。静止する粒子の場合への極限移行も存在するようにするため、表式を4次元の形に書き換える必要があることが公準として定められている（ここでも再び、特殊相対性理論への盲目的信仰）。しかし、そのような状態（地点）からは、無限個の依存性を導出することが可能である。このように、その解が唯一の解で、かつ自然界に対応したものであることの証拠はない。立体角  $do$  への放射および全放射の強度に関して得られた

スカラー式<sup>〔訳注\*〕</sup>が、あまりにも多くの変数 ( $\mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}}, \mathbf{R}, t, \mathbf{E}, \mathbf{H}$ ) を含んでいることが注目を引く。このことは、ここで検討されている粒子の運動が「手作業で」与えられたものであることを意味している。例えば、現代電気力学における内部整合的な方程式の解き方に従った場合には、（それが所与の場の場合であったとしても）速度が常に加速度に対して垂直であるということを事前に与えることはできない。波動の放射およびエネルギー損失の結果として、そのような相互配置は個別の時刻にしか存在し得ないからである。「磁気制動」放射 [5, §74] という概念の導入に際しての課題の設定の仕方そのものに対しても、以上と類似したコメントが与えられる。その放射にもかかわらず、粒子は円に沿って運動し続ける（すなわち、それは外部からの定常的なエネルギー流入を伴う運動なのであって、そのエネルギーが放射に費やされるのである）。粒子流に関して解釈を行なう際は、粒子自体に起因する磁場の変化、また相異なる粒子に起因する波の合成（平均化）を考慮する必要がある。

光の理論およびそれに対する現在の諸見解に対しては、ヴィクトル・モロスによって指摘されている一連の疑問がある（サイト <http://www.antidogma.ru> に掲載されている彼の論文を参照のこと<sup>〔訳注\*\*〕</sup>）。光はその源にのみ依存しているのであって、受け手には依存していない。すなわち、その理論は非ポテンシャル的でなければならないはずである。諸速度の一致は光の電磁的本性を証明していない（金属中の電流も速度  $c$  で「やって来る」が、

〔訳注\*〕 小教程§81のその公式は次のとおり：
$$\mathbf{E} = \frac{e}{c^2 R} \frac{\mathbf{n} \times \left\{ \left( \mathbf{n} - \frac{\mathbf{v}}{c} \right) \times \mathbf{w} \right\}}{\left( 1 - \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}}{c} \right)^3}, \quad \mathbf{H} = \mathbf{n} \times \mathbf{E}.$$
 この式で  $\mathbf{n}$  は

放射の方向の単位ベクトル ( $\mathbf{R} = \mathbf{n}R$ )であり、また  $\mathbf{w} = \dot{\mathbf{v}}$  (粒子の加速度)、遅延時刻  $t' = t - R/c$  という関係になっている。

〔訳注\*\*〕 Viktor Moroz (Виктор Мороз)の論文の入手方法：<http://www.antidogma.ru> のホームページの"2.

Antirelativistic Library" → "ALPHABETICAL CATALOGUE" → 英語論文は"Roman alphabet"の"M"を、ロシア語論文は"In Russian"の"M"をクリック。

しかしそれは光ではない！)。マクスウェルによる光の理論は誘電体中における理論であり（変位電流しか考慮されていない），そこではオームの法則は考慮されていない。しかしなにしろ，例えば電解質は良導体であり，不透明でなければならないはずであるが，そうはなっていない！

電気力学によれば円軌道に沿って運動する電子は放射をしなければならないのか，という疑問（Z. I. Doctorovich, 1996<sup>〔訳注\*〕</sup>）に対するコメント。ダイポールアンテナのQ値が1未満であるのに対して（それはすぐれた放射器である），ループアンテナのQ値は100を超えることが実験によって知られている（これは，損失が円形コイル自体の内部における損失のみに限られていることに関係している）。すなわち，1つの運動の2つの成分への運動論的分解は，動力学的な最終結果のそれらに対応する2つの結果への分解を与えないのだ！

ある係数  $m$  をエネルギー  $E$  の表式に導入することができる [2, III, §8-5, 原著 II, §8-5]<sup>〔訳注\*\*〕</sup> ということは，その量  $m$  が重力による引力の源になるかどうかということとは，（その量を我々が質量と名づけた場合でさえ）まったく無関係である。例えば，特殊相対性理論の現行解釈によれば，総放射の質量は放射の全運動量に依存する，すなわち，重力は奇妙な仕方でも出現したり，消失したり，跳び移ったりすることができることとされている。

真空中において，波面は光線の伝播方向に対して常に垂直であることが事実上公準として設定されている（例えば，特殊相対性理論において光行差を「説明」するために）のは奇妙である。また，ここでは空間の等方性はまったく何の関係も持っていない（その等方性はそのような公準の設定を必要としていない）。すなわち，発射された光の方向が既に特定のベクトルを与えるのだから，観測者の運動方向はそのベクトルとの関係で決定することができるのである。

[9, §115] におけるチェレンコフ放射の理論的説明に関しては若干の疑問が生じる。 $\omega = k_x v$  という関係においては，粒子は媒質中を一樣に運動する，すなわち放射をしない（さらに正確に言えば，媒質との間でまったく相互作用しない）と仮定されている。では，相互作用を伴わないそのようなプロセスのメカニズムとは，いったいいかなるものなのか？この放射と制動放射との理論上の差異（すべての極限移行）は，粒子は点であるという非現実的な仮定にもとづいている。まず最初に，これを放射するのは**媒質自体**であると語られ，その次に突然，**粒子**が放射に費やす全エネルギー損失から，チェレンコフ放射と関連する部分が分離される。では，いったい何が放射をするのか？

このように，波動の放射というきわめて重要な現象の記述に関して，現代電気力学にはかなり多数の問題点があることがわかる。

〔訳注\*〕 この論文（原文ロシア語。英訳版あり）は著者の個人サイト <http://www.doctorovich.biz/> で入手できる。英訳版の題名は "Some Notices to the Question of the Application Degree of the Classical Physics for the Microworld' Problems Solutions and Necessity of the Introduction to the Quantum Postulates Physics" (1996)。

〔訳注\*\*〕 ファインマンはここで「局所的エネルギー保存の原理」について説明する中で次のように述べている。「エネルギーが局在する場所をはっきり言えることが必然的である**物理的**理由もある。重力理論によると，すべての質量は重力の源である。そのうえ， $E=mc^2$ によって質量とエネルギーとが同等であることも知っている。したがってエネルギーはすべて重力の源である。エネルギーのあり場所を決められなければ，すべての質量のあり場所も決まらない。したがって重力場の源のあり場所について何も言えないことになる。そうすると重力の理論は不完全になる」。

## 第8章 媒質中における波動の透過

次に、現代電磁理論のいくつかの適用についてより詳しく検討しよう。媒質中における波動の伝播に関する記述についての検討から始める。

物質中を進む光の伝播速度  $c/n$  を見かけ上の速度 [2, II, §6-1, 原著 I, §31-1] と呼ぶことは、捏造された特殊相対性理論の理論的原理を実験の上に置くことである。媒質中における擾乱の伝播も電磁力がもたらす結果であるが、しかし光の（等方的な）速度はここでは何の関係も持っていない。すなわち、擾乱の伝播速度は音速であり ( $v_s \ll c$ )、しばしば非等方的であるという結果を実験は与えているのである。しかも、位相のずれを通じた遅れの説明は中途半端である。なぜなら、 $-\infty$  から  $+\infty$  までの調和解のどこにも、電場が加えられた時点が含まれていないからである（そしてそのような課題の設定の仕方だけが、波面を個別化して取り扱うことになる）。

屈折率に関する表式の導出 [2, II, §6-1, §6-2, 原著 I, §31-1, §31-2] においては、原子による**数学的平面**の放射に関する理解はあまりにもモデル的である（なにしろ、物質中では空虚が最も大きな部分を占めているのだから）。実際には、層全体 ( $z_2 - z_1$ ) に沿って分布する原子が再放射をしているのである。それだけでなく、再放射はあらゆる方向に向かってある確率で生じている。その確率もまた**実験にもとづいて**決定されなければならない。したがって、純粹に1次元の「遅れ」の検討はモデル的で、しかもあまりにも粗雑である。そして最後に、放射がいかにして**素粒子自体を通して**生じるのかは、まだまったく知られていない ( $\gamma$  量子も電磁放射であると信じるとすれば、 $\gamma$  量子の散乱についての検討から、そのとき、何かが生じているのでなければならないことは明らかである)。それゆえ、「特殊相対性理論の高度な原理」を用いる必要性があるという主張は不適切である。

**実験的・マクロ的な**クーロンの法則は、素粒子の場合におけるそれと類似した形の書き表し方の正しさを保証しない。この法則の適用可能性が保証された（検証済みの）ものであるためには、粒子のサイズと比べてそれらの間の間隔が大きく、しかも軌道（または位置）の測定精度がそのサイズの範囲内において高くなければならない。ミクロの対象物の場合には、試験電荷が無限小であるということは、（他の電荷が存在するとき、荷電粒子の性質と状態に変化は生じないということ——重ね合わせの原理——と同様に）実現不可能な抽象化である。荷電表面における  $\mathbf{E}$  のジャンプの導出は方法論的に不正確である。すなわち、ガウスの定理の導出の際、周囲表面上の電荷は考慮されておらず、またこの課題においては、側面の高さと面積が減少すると、その表面は縮小して**荷電線**になってしまうのである。

計算から明らかのように（ポインティング・ベクトル）、エネルギーは波の位相速度で流れる [6, §100, 英訳版§7.10]。それゆえ、必ず波束を検討する必要があるという語句は奇妙に聞こえる。では、単色波はエネルギーを運ばない（つまり、単色波は源がなくても存在し得る）とでもいうのか？ このセクションより前の箇所ですべてのことは、重ね合わせの原理の有効性（マクスウェル方程式の線形性）という仮定の下で導出されていた。しかしそうだとすると、フーリエ展開を用いることにより、それぞれの高調波のエネルギーは位相速度で伝達されるという結果が得られる（もし1つの単色高調波

はエネルギーをまったく伝達しないとみなすとすれば、そのような高調波の総和もエネルギーを伝達しないことになる。非線形媒質の検討を行なうためには、諸原理（基本的事項）に対するより一般的なアプローチが必要であるが、そのようなアプローチは取られていない。それゆえ、分散が存在しない場合、エネルギー伝達について記述するためには群速度を検討する必要があるという語句は根拠がない（空文句の）ように思われる。

縦波の存在の可能性 [6, §101, 英訳版§7.11] について吟味するためには、まず最初にその性質（その *a priori* な伝播速度は任意のものであり得る）および検出方法を決定する必要があることを指摘しておこう。反射と屈折に関する諸法則は、ただ単に、平面波の存在、境界条件、および当該プロセスの進行時における波のタイプの不変性という仮定にもとづいて得られたものにすぎない（では、もし波のタイプが変化し得るのだとしたら？）。屈折率や誘電率  $\epsilon_1$  と  $\epsilon_2$  は単なる定数である。これらの定数は、理論から自己整合的に導き出すことはけっしてできず、逆に、決定されるべきものなのである。それゆえ、 $n$  と  $\sqrt{\epsilon}$  の差異<sup>〔訳注〕</sup>は、一様媒質の初歩的モデルに関してはすべてがそれほど単純というわけではないということの意味している。しかし今まで、マクスウェル方程式におけるそれ以外の何も検討すらされてこなかった。ここでも再び、存在している分散に合わせた  $\epsilon$  の値の単なる修正（つじつま合わせ）ではなく、問題のより一般的な分析が求められている。（任意の材料中におけるのと同様）金属中においては [6, §102, 英訳版§7.12]、 $\rho=0$  は、ある一定のスケールについての平均値とのみみなすことができる。ミクロスケールにおいては  $\rho \neq 0$  であり、波の場の中においては、当然、 $\rho$  の変動が生じる（したがってそれらの微小スケールの変動が果たす役割を決定する必要がある）。さらに、すべての公式は、媒質の性質 ( $\epsilon$ ) が不変である場合についてのみ得られたものである。すなわち、それらの公式は、導体の内部（ただし、移行 ( $\epsilon_1 \rightarrow \epsilon_2$ ) が生じる導体の境界近傍ではない所) においてのみ近似的に適用することができる。

[6, §104, 英訳版§7.14] のセクション全体は、静電場中における（ポインティング・ベクトルとしての）エネルギーの連続的循環（縦方向磁場中における荷電した円筒形コンデンサー）という、明らかに馬鹿げた話をテーマとしている。しかし、そのような循環の検出を目的とした放射線源からの（場  $\mathbf{E}$  を排除するための）放電をめぐる着想は説得力がないように見える。なぜなら、自由電荷が生じる以上、交差した電場と磁場  $[\mathbf{E} \times \mathbf{B}]$  中において、それらの自由電荷が軸の周りの円に沿ってドリフトし始め、まず最初にガスを回転させ、次にコンデンサー自体を回転させるからである。しかし、なにしろそれは、有名な歴然たるメカニズム（この場合は間接的に2つの中間「鎖」を介して作用するメカニズム）なのである。ところで、角運動量の「排除」はもっと簡単に行なうことができた。外部磁場を排除すればよかったのだ。そのようにした場合、系の回転への移行メカニズムは発見されるだろうか？ もちろん、ノーだ！

〔訳注〕 タムは「誘電体中における平面波の反射と屈折」に関するこのセクションで、屈折率  $n$  と誘電率  $\epsilon$  について  $n = \sqrt{\epsilon}$  という等式を導き出し、この式は一部の種類の誘電体の場合には実験で裏付けられているが、しかし多数の誘電体の測定データにおいてこの等式が成立していない事実を示している。

電気力学における一連の課題を解決しようとする際、その何らかの「直観的な」解決法を我々に提案しようとする試みはなされているとは言え、しかし、現代電気力学においてはすべてが直観的に明瞭であるというには程遠いというのが現状である（アルゴリズムの内的整合性を備えたアプローチが欠如している）という事実が、我々の心のうちにある種の不満を呼び起こす。例えば、導体に沿った場は大きく離れた所を伝播するのに対し、導体の奥に向かう場が表皮深さにおいて減衰する [6, §106, 英訳版§7.16] のは、なぜなのか？ それはただ単に、我々が即座にそのようなタイプの解を選択したからではないのか？ まさか、導線やケーブル中の高周波電流は誘電体内の波によってのみ伝播するとでもいうのか？ そして、その場合はまったく減衰しないのか？ そうだとすると、場は事実上、金属の連続性が途切れている所が存在するときも変化してはならないはずである。そうだろうか（明らかにノーだ）?!  $\mathbf{j} = \lambda \mathbf{E}$  という我々の選択も奇妙に見える（この選択は、実験的に検証可能な等式  $I = U/R$  からはけっして一義的に導き出されない）。また、 $\mathbf{E}$  が減衰するとき、それは  $\mathbf{j}$  の減少をももたらすはずであるが、しかしなにしろ、 $\mathbf{j}$  は管内を流れる水流に類似したものなのである。まさか、電子がどこかで蓄積して、追加的な電荷を創出しているのか（すなわち、我々は減衰を相手にしているのではなく、ただ単に、プロファイルの変化を相手にしているだけなのか）？ それとも、導線に沿っては  $\mathbf{E} = \text{const}(l)$  かつ  $\mathbf{j} = \text{const}(l)$  であるとみなすべきなのか？ しかしなにしろ、場は瞬間的には伝播しないのだ。すなわち、 $\mathbf{E}$  も  $\mathbf{j}$  も、さらには  $\rho$  も変化しなければならないのである（高周波電流の近似理論においては、電荷  $\rho$  は計算の途中式において現れる！）。

強磁性体 [6, §108, 英訳版§7.18] に関しては、ある場の中の強磁性体は、別の場の中の同一の強磁性体とは性質が異なっている可能性があるという点を指摘しよう。すなわち、（無秩序な）熱エネルギーだけでなく、秩序運動（例えば波の中における）が生じる可能性が十分にあり、また、強磁性体の収縮が生じる可能性があるのである（すなわち、境界条件をどこで連続させるべきかを、我々は *a priori* に知っていなければならないことになるのではないか？）。さらに、磁区同士の相互作用エネルギーが変化したり、構造「要素」の再配列が生じたり、 $\epsilon, \mu, \lambda$  が変化したりする可能性もある。しかも、それらの性質は（非断熱的な）プロセスの速度に強く依存している。このように、この本で提案されている記述の仕方はきわめて疑わしい。さらに、ポインティング・ベクトルを通じた「外側から」の諸量の決定の仕方は人為的である。なにしろ我々は、通過波、反射波、散乱波および吸収波の振幅を知っていなければならない、つまり、どっちみち課題全体を解かなければならないのだ！

電磁波に関する記述においては、1) 微妙な差異を持ったあらゆる事項がマクスウェル方程式によって記述されていると「信じる」ことが、我々に対して「要求」されている。2) 非現実的な「吸収をしない無制限の一樣媒質」が導入されている。3) あらゆる性質は  $x$  と  $t$  のみに依存している。すなわち、「垂直方向の無限大の表面」が広がっている（しかしなにしろ、現実には、我々は常に3次元の場合を、そして「幅と高さ」が制限された光線を取り扱っているのだ！）。4) それ以外の「拡散する解（あるいは空間的に閉じた解！）」が存在しないことが証明されていない。5)  $\mathbf{E}$  と  $\mathbf{H}$  の位相の一致は、当該の解が唯一解であることに対する、またそれらの解はマクスウェル方程式のみから（！）発見することができることに対する、我々の「信仰」からの帰結にすぎない。



表皮効果 [8, §144] の記述においては、第1に、電荷密度の変化はまったく存在しないこと ( $\text{div } \mathbf{j} = 0$ ) が仮定されている。第2に、あり得るすべての解のうち、その解を採用した場合には電流が1つの軸に沿って流れ、場  $\mathbf{B}$  が別の垂直軸の方向を向き、すべての依存性が第3の空間成分に依存することになるような解のみが抽出 (人為的に選択) されている。シヴーヒンは、マクスウェル方程式にもとづいたテスラ変圧器の動作に関する「厳密で明瞭な」記述は存在しないことを正直に認め (このような態度こそが「理論の偉大さ」なのだ)、そのような記述の代わりに、不変場および準定常場の理論にもとづいた記述を用いているが、もちろん、それは不満足な結果に終わっている。

媒質中における場の方程式をマイクロなマクスウェル方程式 (実験においては常にマクロなパラメーターを取り扱っているにもかかわらず、どうしたわけか公準によって信頼し得るものとして定められている方程式) から「得る」際には、平均化の手続きが適用される。しかし、その手続きが一義的なのは線形近似において (量の揺らぎの最大値が、その平均値よりもはるかに小さいとき) のみである。なぜなら、数学的方程式においては、一定の規則に従って被加数と乗数を移動させることが可能であるからである。例えば、方程式  $\text{div } \mathbf{E} = 4\pi\rho$  と  $\text{div } \mathbf{E}'/\rho = 4\pi$  は完全に相等しいが、しかし1番目の方程式からは

$$\text{div } \langle \mathbf{E} \rangle = 4\pi \langle \rho \rangle$$

が、2番目の方程式からは (ゆらぎの定義とテイラー級数展開を用いることによって)

$$\frac{\text{div } \langle \mathbf{E} \rangle}{\langle \rho \rangle} \left( 1 - \frac{\langle \text{div } \mathbf{E}' \rho' \rangle}{\langle \text{div } \mathbf{E} \rangle \langle \rho \rangle} + \dots \right) = 4\pi$$

が導き出される。何を、いかなる方程式から平均する必要があるのか、そしてゆらぎに関して何を、いかにして仮定するかという問題はミクロスケールの電気力学自体の枠組みを越えており、追加的な諸原理と諸条件の解明を必要とする。

誘電体中における場 [9, §75] の方程式を導出するとき、 $\langle \rho \mathbf{v} \rangle$  と他の諸量との関係を厳密に確定することは可能とは思われない。その結果、まず最初に、ある組み合わせが  $c\mathbf{H}$  として形式的に記号で表される。すなわち、磁場の強度の場合と同一の文字が用いられる (その量がまさに強度  $\mathbf{H}$  であることの証明なしに)。そして次に、ある種の「場の変化の緩慢さ」に関する語句が発せられ<sup>[訳注]</sup>、(その緩慢さに関するいかなる定量的パラメーターも示されることなく) それが  $\mathbf{H}$  の同一の依存性を保存するのだとされる。一般的には、宇宙のどこかでは、その方程式をめぐるそのような状況が具現化されることがあり得るのかもしれない。しかし、それぞれの具体的場合へのその方程式の適用可能性に関する問題は、いまだに未解決のまま残されている。

運動する媒体 [9, §76] の場合の  $\mathbf{D}$  と  $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{B}$  と  $\mathbf{H}$  の間の関係の相対論的一般化 (およびミンコフスキーの公式の導出) は、数学的観点から見て当惑を生じさせる。すべての曲線は、 $\mathbf{v} \equiv 0$  のときのゼロ点の一致のみにもとづいて得られている! このように、それらの

[訳注] ランダウとリフシツは [9, §75] において、誘電体中における「場の変化の緩慢さが、不変な場に関して得られた以前の表式を強度テンソルのために利用することを可能にしている」と述べている。

関係（モデル的な関係！）は、運動する誘電体の場合にはまったく根拠を欠いている。ところがなにしろ、それらの関係なしには、マクスウェル方程式は具体的な対象を持たない空疎なものになってしまうのである。厳密に言えば、一般的な場合における関係は単純な線形依存性ではなく、積分的な依存性（それ以前の履歴を含んだ依存性）を持たなければならないことは、もはや言うまでもない。

[9, §79]における透磁率 $\mu(\omega)$ の「不法な修正」という語句は滑稽に聞こえる。そのことの「証明」もまったく奇妙である。すなわち、まず最初に、どうしても平均化することのできなかつた精密な方程式

$$\text{rot } \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} \langle \rho \mathbf{v} \rangle + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

から、形式的にのみ——「補助的な外来電荷」と称するもの（どうしたわけか、その電荷は媒質にはまったく影響せず、場に対してだけ影響を及ぼすのだ！）を導入する方法で——得られた方程式

$$\text{rot } \mathbf{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

を差し引く。その結果、未知の精度を持った「余分な」項 $\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t}$ が得られる。しかし、 $\mathbf{M}$ が物理的意味を持つのは、この項を無視できる場合のみであると宣言されている。もしかしたら、この項は方法の誤りの結果でしかないのではないか？あるいは、 $\mathbf{M}$ を再定義することが可能なのではないか？ ことによったら、自動的に

$$\frac{1}{2c} \int \left( \mathbf{r} \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} \right) dV = 0$$

となる場合が存在し得るのではないか？  $\text{rot } \mathbf{M}$ の増大にとって、物体のサイズは小さくなくてはならないという主張は数学的に奇妙である（きわめて奇妙でさえある！）（なにしろ、微分操作  $\text{rot}$  とは極限を取る操作を意味しているのだから）。 $\varepsilon - 1 \sim 1$  [この記号" $\sim$ "は「オーダーが等しい」を意味し、「近似的に等しい」よりも粗い。]という選択も恣意的である。すなわち、ここで行なわれる評価が大きな振動数に関するものである以上、 $\varepsilon - 1 \approx 0$  [この記号" $\approx$ "は「近似的に等しい」。]でなければならない。数学的な疑問だけでなく、さらに物理学的な疑問もある。すなわち、その評価はすべての量が一樣（均一）であることを前提としてなされているが、例えば、それらの量がスケールの違いに応じた構造的性質を持っていること（例えば、微小な秩序運動、スピン、等々の存在）を前提としていないのはなぜなのか？ 後者のほうがはるかに現実に近いのではないか？

空間的分散（率直に言えば、それは常に存在しているのだ）の導入に関する箇所では、何事も厳密に導き出すことができていないことが判明する。その結果、[9, §103]では、本質的にマクスウェル方程式の厳密な記述を放棄し（例えば、 $\mathbf{H}$ をまったく導入していない）、しかもその際、再定義された量 $\mathbf{D}$ のうちに、そのすべてが未知である項を含めるといふ仮定がなされている（すなわち要するに、量 $\mathbf{D}$ の以前の物理的意味が放棄されている）。さらに、

$$\langle \rho \mathbf{v} \rangle = \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t}$$

という再定義が恣意的になされている。すなわち、分極 $\mathbf{P}$ の物理的意味も放棄されている。このように、マクスウェル方程式は、物理的意味が未知のいくつかの文字に関する数学的方程式系に転化している。 $\mathbf{D}$ と $\mathbf{E}$ の線形関係は仮説であり、ましてや、今や、 $\epsilon_{ik}$ は以前の物理的意味を持たなくなった(例えば、 $\mu$ に対する依存性をも間接的に含むようになった)。

[9, §117]における散乱現象の記述では、マクスウェル方程式における「一般的関係」

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$

は不十分であって(つまり、以前の偉大なる厳密性が疑念にさらされている?)、そのため、さらにもう1つの依存性(本質的には追加的な未知関数 $\alpha_{ik}(\mathbf{r}, t)$ )

$$D'_i = \epsilon E'_i + \alpha_{ik} E_k$$

(ここで $E'$ は散乱波のもの、 $\alpha_{ik}$ は入射波のものである)(つまり、場全体は入射場と散乱場の合計と等しくない)を導入する必要があることが、「突然」明らかになっている。

「もっと単純な」疑問もある。そもそもなぜ、光にとってある材料は透明なのに、別の材料は不透明なのか? なにしる、現代的な理解によれば、原子内では物質\*よりも空虚のほうが多いのである。相異なる物質の原子の間に原理的な違いはない。では(光子は電子や原子核と相互作用しない、すなわち原子によって吸収されないのなら)、いったい何が、ある場合は光をまったく通過させず、別の場合は物体表面に光がある角度をもって入射したとき、光にその軌道を変えさせるのだろうか? 光子はなぜ、物体表面との間で相互作用するとき、その表面がランダムに配向し不規則に「震えている」事実上内部が空虚な原子の十分にランダムな寄せ集めではなく、まるで明確に表された数学的表面であるかのよう

に相互作用するのか?  
このように、媒質中における波動の伝播の記述に対する現代電気力学の適用可能性は、その厳密性とアルゴリズムの内的整合性という面で大きな疑念を引き起こす。

## 第9章 電磁場中における電荷の運動

さて今度は、電磁理論の中で最も単純なように見えるかもしれない要素——電磁場中における荷電粒子の運動の記述——についての検討に話を進めよう。これこそは純粹の力学なのだから、あっと驚くような話などあるはずがない。でも、本当にそうなのだろうか？

電気力と磁気力への区分は約束事的なものである。例えばニュートンの第二法則を例に取ると、力は、形式的には加速度にも依存している可能性がある [15]。概して言えば、いったい何のために、あらゆる外的パラメーターは明確に分離することが可能であることを必ず仮定する必要があるのか？ はたして、同値類全体——陰関数——には、用途は存在しないのだろうか？ 場  $\mathbf{E}$  と場  $\mathbf{B}$  への分離が約束事的なものであるということ自体が、瞭然性を放棄することを余儀なくさせている。なぜなら、その結果は観測系に依存したものになるからである（そしてそのことが、理論によって現実性に対して課せられる、強い制限となる）。

質量を運動量と速度の間の比例係数 [2, IV, §7-3, 原著 II, §28-3] として物理学的に定義することはできない（たとえ数学的にはそのような等式が正しいことがあり得るとしても（例えば中性粒子の場合に））。なぜなら、その場合には、質量は独立した物理学的概念ではなくなり、より複雑な運動量概念を通じた公準的定義（直接測定することができず、特定の理論的解釈の下でのみ成立する定義）として表されることになるからである。その最大の手抜きは、電子の自己相互作用——エネルギーの無限大への増大に伴う、電荷のかなり高速な自己加速が生じる可能性——である。それゆえ、この理論の全体、特にこの「現象」をめぐるのは、何かが間違っている。第1に、1軸に沿った（純粹に1次元の）運動を検討することは不当である。なぜなら、磁場は電子自体の「ブーストラップ」、そしてその3次元運動をもたらすからである。第2に、現に存在する（測定可能な）電子自体の磁気モーメントが最初から考慮されていない。第3に、半径をゼロに近づけていくこと ( $a \rightarrow 0$ ) は、力の極限值を算出することを許さない。なぜなら、我々は高次導関数の挙動を知らないからである。また例えば、もし運動が原理的に振動的な運動である場合には（もしかしたら、それは修正版古典電気力学と「量子力学的」効果の間の物理学的関係を得るための道であるのかもしれない）、高次導関数の役割が増大し、すべての項が有限となる可能性があるからである。第4に、 $a \rightarrow 0$  とは何を意味するのか？ まさか、電子には固有のサイズはないとでもいうのか？ それはあるとき、我々は電子をそう定義しようという考えが我々の頭に浮かんだからとでもいうのか？ では、現実にはどうなのか？

ファインマンが掲げている素粒子の表 [2, IV, §7-5, 原著 II, §28-5] からは、主張されているのとは正反対のことが読み取れる。すなわち、追加的な正の (!) あるいは負の (!) 質量は、電荷の存在とはいかなる関係も持っていないのである。そして、何らかの理論の何らかの方程式から電子と  $\mu$  中間子の質量を「導出する」 (!) こと [同上] ——それはそもそも、抽象化に対する明らかに過剰な信仰である。質量の電磁的部分が存在することの実験による裏づけの問題は未解決のまま残されている（おそらく、厳密な意味ではそれは質量ではなく、具体的な相互作用プロセスに関係した運動量あるいはエネルギーなのではないか？）。

逆方向の一般化がなされ、マクロスケールにおける粒子の観測可能な挙動から、ミクロスケールにおけるその挙動が導出されたとすれば、そのとき、それは平均的な挙動であることが考慮されなかったことになる。例えば、現実の軌道は高速で振動している可能性がある。それだけでなく、多数の粒子の挙動から、それらの粒子の相互作用を排除することは困難であることを、これまで誰も考慮したことがない（求められる正確な諸法則を事前に知ることなしに、その排除をいかにして行なうかは知られていない）。したがって、ある個別の荷電粒子の挙動に関して選択された「一般化」は、多数の仮説の1つにすぎない。

2つの板の間の真空中における熱電子電流 [6, §11, 英訳版§1.11] の導出に対しては、いくつかの方法論上の疑問がある。第1に、それはもはや静態ではなくて運動なのだから、静電気力を検討するのではなく、全ての力と依存性を検討する必要がある。第2に、 $v_0 = 0$  は天下り式の仮説であり、この状況に対する制限となっている（むしろ  $v_0 = v_T$  (熱速度)

としたほうがよい)。第3に、 $x=0$  のとき  $\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0$  とみなすのは、またもや恣意的な仮説である。電極間には同符号の荷電粒子が存在し、このことが場全体（および電極自体の場）を歪ませることは言うまでもないが、このことは考慮されていない。

クーロン力の対称性 ( $\sim 1/r^2$ ) からは、小距離における同じ対称性（球対称性）はけっして導き出されない。例えば、粒子が非球形の場合、あるいはその密度分布が一様でない場合には、大距離では依存性は球対称に近づいていくが、小距離では対称性からのずれが顕著になる。すなわち、ミクロ運動の複雑さについての考慮の試みは、粒子の非対称構造という点に関しても行ない得るのである。

ドリフト運動のイデオロギーは、非相対論的な場合でさえもいくつかの奇妙な点を持っている。第1に、ドリフト運動は質量に依存しない。すなわち、1個の余剰電子が1トンの物質をドリフトさせることができるのである。これは観測結果と明らかに矛盾している。第2に、垂直方向の電場と磁場の場合、ドリフト速度は電場と磁場の強度の比のみに依存し、それらの強度の絶対値には依存しない。したがって、電場と磁場（それ自体）がいくらでも小さいときでも、観測され得る大きな速度を持ったドリフトを生じさせることができる。これも観測結果と明らかに矛盾している。ところがなにしろ、ドリフト速度は（特定の場の配置における）ローレンツ力に関する方程式からの厳密な帰結なのである。すなわち、ここでも再び、ローレンツ力をめぐっては何かが間違っている。

もしかしたら、レントゲン [W. Roentgen] , エイヘンワリト [A. Eikhenvald] <sup>[訳注]</sup> およびウィルソン [C. Wilson] によって行なわれた諸実験 [6, §113, 英訳版§8.4] においては、物質のミクロ構造と電荷の**非共存性**にもとづいた分極場の具体的メカニズム（場  $\mathbf{H}$  中における運動と遠心力）, および交差した電場と磁場の中におけるドリフトの具体的メカニズム（ホール効果）を考慮する必要があるのかもしれない。異なる慣性系における諸法則の同一性というガリレイの考え方を使って取り繕いを行なうことには意味はない。なぜなら、ガリレイによる議論は隔離された同種の**閉鎖系**に関するものであって、開放系や相互浸透系に関するものではなかったからである。しかし、磁場、ましてや重力場からの隔離をめぐっては

[訳注] エイヘンワリト (Aleksandr Aleksandrovich Eikhenvald, 1863~1944)はロシアの物理学者。1901~1904年に「静電場中を運動する物体の磁気作用」に関する実験的研究を行った。

いくつかの問題点がある。基準系の運動に対する電荷  $e$  の大きさの非依存性は、未検証の公準にとどまっている。場（および力）の変換を一目瞭然たる形で理解することが可能なのは、 $\mathbf{E}=\mathbf{0}$  というただ1つの個別の場合のみである [6, §115, 英訳版§8.6] <sup>〔訳注〕</sup> というのは、奇妙な話である。しかも、電気力学の諸法則の不変性は（マイケルソンの実験によってもまったく！）検証されていないのである。もしかしたら、電磁場の慣性的性質を採用すれば、より明瞭な解釈がもたらされるのかもしれない。

厳密に言えば、クーロンの法則は、すべての電荷が静止していることを仮定している。しかしなにしろ、物体の平均速度 (=0) は電荷の速度とは無関係なのである（少なくとも、それは熱速度である！）。ところで、特殊相対性理論は諸力の変換を仮定している以上、 $v_i \neq 0$  の存在は、例えば、荷電体の温度が上昇したとき、荷電体の引力の大きさの系統的变化をもたらす（もちろん、電荷は他ならぬその引力を通じて決定される）。その結果、電荷の変化を公準として定めなければならなくなるのではないか（我々もまた、荷電粒子の構造もその内部運動も知らないのだから）？

〔他の理論家たちの〕完全なドグマティズムを背景として見たとき、運動する電荷から出る運動する力線を描き出そうとする試み [4, §5.5, §5.6, §5.7] は、もうそれだけで素晴らしい。ただし、その試みは、電磁場には（ガリレイ流の）慣性的性質が存在するかという問題（ずっと先の帰結までを見込んだ仮説）の立て方をすれば、さらに有益であったはずである。

方程式に数個のパラメーターが含まれている場合には、場  $\mathbf{E}$  と  $\mathbf{B}$  は  $\mathbf{v}$  に依存しないという語句 [4, §6.1] は思弁的なものとなる。すなわち、場の変換だけでなく、逆解  $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B}(\mathbf{r}, t(\mathbf{r}_0, \mathbf{v}_0, \mathbf{v}, \mathbf{r}))$ 、等々の代入が可能であることに言及する必要がある。

勝手に考え出された力線の位置と性質 [4, §6.2] に基づいて磁場の性質を「導き出す」というのは、きわめて奇妙である（例えば、場が投入されたとき、無限の空間の力線による充満がいかにして生じるかは知られていない）。ここでも再び、積分等式からの微分部分の「抽出」は、唯一可能なものではない。

ポテンシャルを用いて得られる一般解は常に答えを与えるわけではない [4, §6.3] ということは、微分的アプローチの限界性を物語っている。個別の電流素片からの寄与を一義的に決定することは不可能である（そしてそれは仮説である）。それゆえ、ビオ-サバールの法則を通じて積分的な場を導入することがより望ましい。

ホール係数の反対符号 [4, §6.9] は、事実上、一般に採用されている電気力学（また特殊相対性理論の普遍性）に対する反駁となっていることに注意を向けよう。すなわち、電流の方向と大きさは実験的に知られており、アンペール力も（その方向を含めて）実験的に決定することができ（運動量は保存されなければならない）、電気の担体をめぐっても確定性が存在する（金属は「這って移動」などしない）。ところが突然、ホール効果の大きさに

〔訳注〕 タムはこのセクション「基準系の変換。電場と磁場の違いの相対的性格」において  $\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \left[ \frac{\mathbf{v}}{c} \mathbf{H} \right]$ ,

$\mathbf{H}' = \mathbf{H} - \left[ \frac{\mathbf{v}}{c} \mathbf{E} \right]$  という公式を紹介し、次のように述べている。この公式の導出の仕方は「相対性理論の教科書において見出すことができる。相対性理論を直接援用することなしにこの公式を一目瞭然たる形で根拠づけることが可能なのは、上記において検討した  $\mathbf{E}=\mathbf{0}$  という個別の場合に限られる」。

も、さらにはその符号にも不整合性が現れた！ それゆえ、マイクロ世界においては、電気力学は適用範囲の点で（近似的適用に関してさえ！）明らかに限界を持っている。

電気力学の諸課題のかなりの部分は、明確に決定された境界条件（あるいは無限遠における条件）を用いている。それゆえ、この観点から見ると、諸法則や諸方程式（例えばクーロン、マクスウェル、等々の）の積分形から微分形に移行するとき、それらの方程式が境界条件（体積）に対してまったく感受性を持っていないということは奇妙である。それはまるで、「任意の体積」という語句が、系のサイズに依存するあらゆる種類の関数を自動的に排除してくれているかのようである。

ニュートン力学における合力の概念は、点状物体に適用したときに良く機能する。非点状物体は追加的な検討を必要とする。例えば、前にも述べたドリフト運動をめぐる困難を思い出していただきたい。電子の比電荷の定義 [8, §89] は、（他の諸概念との間で調整した上ではあるが）作用力（電気成分と磁気成分に分割したローレンツ力）に関する表式の**選択**に依拠している。すなわち、その定義は、導入された場  $\mathbf{E}$  と  $\mathbf{H}$  の**定義**と結びついている。そして素電荷自体の定義 [8, §90] に対しては、これまで常に多数の疑問が投げかけられてきた。なぜなら、その方法は、すべての量を小さい値の領域に接近させるという、**検証不可能な近似操作**を用いているからである。

電磁運動量、電磁エネルギーおよび質量の概念 [8, §91] は、既に古典電気力学によって導入されたものである。この教科書の著者は、いったい何のために相対性理論に対して「おまりの宣誓」を行なっているのか（なにしろここでは、相対性理論に優先権はないのだ!）？ ファインマンは、電子の電磁質量と非電磁質量とを整合させることはどうしてもできないこと（これは現代電気力学の矛盾点である!）のうちに、正直に問題点を認めていた。これに対し、シヴーヒンにおいてはすべてが「初等的」である [=初等教育の授業で何かを天下り式に教え込むような議論の進め方をしている]。つまり、「おやなんと、係数が  $4/3$  になったぞ。そんな係数はあっさり**投げ捨て**て、相対性理論が正しいのだという**公準を定めよう**ではないか」というわけだ（そして、すべての不一致点の解決を将来の公準にゆだねなければならない）——その事実を特殊相対性理論の「手抜き」とみなしたほうが、より論理的であるにもかかわらず！ 電子の電磁的半径に関しても、[8, §91] ではすべてが簡単に片づけられている。つまり、「係数  $2/3$  を投げ捨てて、量子力学を使ってさらに“カモフラージュ”しようではないか」というわけだ（この分野の研究者たちが電気力学の諸問題を解決しようと試みることをすら禁止するために!）。

場の中の粒子の作用 [5, §16, 小教程§43] に関する表式の導入方法は、この手続きを持つ「つじつま合わせ（公準）的性格」をまざまざと示している。第1に、作用の加法的性格（自由電子に関する作用+場との相互作用に関する項）が公準として定められている。第2に、2つの特性——電荷および4元ベクトル——が公準として導入されている（それ以外の種類の項、例えばスカラー項といった項が存在しないことがいかなる一般原理からも導き出されない（このことはこの教科書の著者も認めている）のと同様、それらの特性の導入はいかなる一般原理からも導き出されない）。ポテンシャルのそのような定義の一義性も（それは存在しない）、定義がまさにそのような形を取る必然性も、自然を完全かつ適切に記述するためにはそのような定義で十分であることも、今のところ証明されていない。その先の [5, §17, 小教程§44] では運動方程式が「導出」され、ある種の「文字」 $\mathbf{E}$

と  $\mathbf{H}$  に関する定義が導入されているが、それが他ならぬ我々が測定している場であること  
のいかなる証拠もまったく存在しない。

ドリフトに関連する諸問題 ( $m$  に対する非依存性,  $\mathbf{E}/\mathbf{H} = \text{const}$  のときの  $\mathbf{E}$  と  $\mathbf{H}$  の大きさ  
に対する非依存性, 等々の問題) は, 現代電気力学のローレンツ力を含んでいる方程式の  
それ以外の解 (相対論的解および非相対論的解) も, やはり原理的に厳密なものではない  
と推定することを余儀なくさせる。

[5, §26, 一部のみ小教程§52] において, 回転と発散を取ることによって  $\mathbf{E}$  と  $\mathbf{H}$  の2つ  
の定義から2つの方程式を「得ている」のは奇妙である。第1に, そのような操作は情報  
量を増加させることはできず, 減少させることしかできない。第2に, それはあくまでも,  
いかなる実験的物理学法則ともまったく無関係な記号を取り扱う, 形式的・数学的操作 (記  
号の組み合わせ) でしかない。4次元記号から「存在するのは4つの独立な方程式のみで  
あることが見て取れる」というせいぜいそれだけの理由だけで4次元記号で書き表そうと  
する, 狂信的な欲求にも驚かされる。(元々のマクスウェル方程式の組からは, それと同  
じことは見て取れなかったと考えることができる)。

全体の作用および電磁場に関する作用 [5, §27, 小教程§53] の導出に際しては, いくつ  
かの無根拠な方向誘導がなされている。第1に, 各粒子ごとの作用が加法性を持っている  
こと, また粒子  $S_m$ , 場  $S_f$  および相互作用  $S_{mf}$  <sup>[訳注]</sup> に関する個別の被加数の和の形で表すこ  
とが可能であること (すなわち, 場を投入したときに  $S_m$  が変化しないこと, また現実の粒  
子を持ち込んだときに  $S_f$  が変化しないこと) が仮定されている。それだけでなく, 試験電  
荷と現実の電荷 ( $e$  の倍数である電荷) の間の違いを考慮する必要がある。第2に, 場が  
存在することを現実に決定することが可能なのは, 場が物質\*的对象物と相互作用する  
ときのみであるのだとしたら, その関数——場に関する個別作用——とは, いったい何なの  
か? 第3に, 重ね合わせの原理は真空中においてのみ正しく, 線形媒質の場合, それは近  
似的に正しい。しかし非線形媒質の一般の場合には, 重ね合わせの原理は満たされない。  
したがって (線形微分方程式を導出するための) 場に関する作用の二乗特性という要件が  
正しいのは, 真空中においてのみである (では, そのきわめて個別的な場合のために, そ  
れほどたっぷり数学について無駄話をすることに意味はあるのだろうか?)。

クーロン場中における荷電粒子の運動 [5, §39] に関する特殊相対性理論および現行の  
(相対論的) 電気力学の結果は完全に不可である。すなわち,  $Mc < \alpha$  (ここで  $M$  は粒子  
の角運動量であり,  $\alpha = ee'$ ) の場合には, 粒子は中心に落下するのである! 放射を考慮  
しなくても, 既にそうなるのだ! 全自然 (原子と分子の安定性) は, この「結果」と明ら  
かに矛盾している。この「解」において, 粒子は有限時間の間に中心に落下するが, しか  
しその際, 運動量の動径成分が無限大 (!) に向かっていくことも奇妙である。すなわち,  
粒子は中心に対して無限大 (!) の運動エネルギーを持つ (しかし系全体のエネルギーは  
有限のままである) ことになる。

[訳注] このセクション「電磁場の作用関数」では次のように述べられている。「電磁場とそこに置かれた粒  
子とからなる系全体に対する作用関数  $S$  は, 3つの部分から成り立っているはずである:  $S = S_f + S_m + S_{mf}$ 。こ  
こに,  $S_m$  は粒子の持つ性質にだけ依存する作用の部分である。(略)  $S_{mf}$  という量は, 粒子と場との間の相互作用  
に依存するような作用の部分である。(略)  $S_f$  は場それ自身の性質にのみ依存するような作用の部分である。す  
なわち,  $S_f$  は電荷が存在しないときの場に対する作用なのである」。



電荷が有限な空間領域内で運動し、有限な運動量を持っているとしても、そのことは、その運動が有限な周期を持った周期運動になるということをまったく意味しない。つまり、諸軌道は共通尺度で比較し得ないもの [incommensurable] になる可能性がある。その場合には、「平均」磁場を計算する際、平均化時間は無限大でなければならない。すなわち、その計算はいかなる実際的意義も、理論的意義すらも持たない。[5, §43, 小教程§65] における諸公式の間の不整合が注目を引く。ビオーサバルの法則を得る場合には  $\langle \mathbf{j} \rangle$  のみの平均を書いているのに対し、ベクトルポテンシャルを得る場合には表式全体の平均を書いている。ところが、1 番目の場合に正しい表式

$$\langle \mathbf{A} \rangle = \frac{1}{c} \sum \langle e_n \mathbf{v}_n \rangle / R_n$$

を書いたとすると、ベクトルポテンシャルは時間の関数であり続けることがただちに明らかになる。無限大の平均化時間(諸公式の導出は平均化にもとづいて行なわれているのだ!) および表式全体の平均化に関する上記と同様のコメントが、系の磁気モーメントに関する表式に対しても当てはまる。したがって、そこに書かれている表式(その表式は、ゼロ近傍における角度を除き、磁気モーメントのベクトルと動径の間のすべての角度に関して近似的に正しい)の他に、さらに変動項も常に存在することになる。力のモーメントに対しても同じコメントが当てはまる。

放射による減衰[5, §75]の際における電荷の自己作用を考慮する必要性に関する問題は、未解決のまま残されている。なにしろ、外場の場合、ローレンツ力におけるすべての項は、**定義に従って**(つまり、厳密性をてらって)導入されたものだからである。ポテンシャルの変換の利用に対しては、それらのポテンシャルの**物理的根拠**および解の唯一性に関する疑問が生じる。次の間接的な疑問もまだ徹底的な検討を受けていない。すなわち、ある所では偏導関数を取るときに**明示的な座標依存性のみ**を考慮する必要があるとされている(このことは数学的に正しい!)のに、所によってはそのことを「忘れて」、偏導関数を全導関数に替えている(例えば変換を、すなわち非明示的な依存性を利用している)のはなぜなのか? 放射の際、系はエネルギーを失う(系は定常的ではない)、すなわち、有限な時間  $T_0$  が存在するのだから、平均化を行なう際に、

$$\frac{1}{T_0} \int \frac{d}{dt} (\dots) dt$$

を含んでいる、今はもう有限である項を捨てることは、近似的な表式しか与えない。角運動量の平均損失量に対してもそれと同じコメントが当てはまる。そもそも、放射の反作用力を孤立粒子に適用することが可能かどうかは、大きな疑問である。

「厳密な」現代電気力学における粒子の自己加速は、その非厳密性を証明している。そして、無限大の固有電磁質量からはせいぜい「2 つの無限大の引き算」しか生まれなかったという空理空論は問題を解決するどころか、この問題における現代電気力学の無力さを際立たせるばかりである。それゆえ、その諸結果を諸場が存在するときに定量的に適用することが可能か否かという問題は未解決のまま残されている。まさか、**有限な場**(無限大の無限分の1の大きさの場!)を付け加えたら、「**無限大同士の引き算**」の**厳密な正確性**

が復活したとでもいうのか？ [5, §75] の末尾で与えられている、互いに引き付け合う 2 つの電荷の落下に関する問題においては、次の点が注意を引く。すなわち、もし

$$\frac{2|\mathcal{E}|M^2}{\mu\alpha^2} = 3$$

であるとすれば、エネルギーの変化は

$$\frac{d|\mathcal{E}|}{dt} = 0$$

であるのに対し、運動量の変化は

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} \neq 0$$

となるのである（ここで  $\mu$  は換算質量、 $\alpha = |e_1 e_2|$  である）。このように、その結果の正確性と適用可能な範囲は未知のまま残されている。

大速度の場合について得られた力に関する非厳密な表式 [5, §76] を、4 元ベクトルに対する表式の形式的情報のみと極限値の利用によって一般化しようとする試みも厳密ではない。放射制動力がローレンツ力を上回っている場合を含め、その種の放射制動力の適用可能性は疑念を引き起こす。また、力の変換による「証明」は、相対論的信仰にすぎない。（ただし、大速度のときのエネルギー損失がエネルギーの 2 乗に比例していること、そしてそれが流体力学における媒質中の運動に関する類似した場合を想起させることは注目に値する。）

現代電気力学においては、自由電荷の場合の散乱波の振動数は、運動量保存則により、入射波の振動数とは近似的にしか一致することができない（さもないと、 $E \sim \omega$  なのだから、エネルギーは変わらないはずなのに、運動量のほうは変わることになる）。 $\mathbf{v} = 0$  である系の中では粒子は放射をしないという [5, §78] の語句は、（現代電気力学と照らし合わせてみても）きわめて奇妙に聞こえる。第 1 に、いったん「放射が粒子から出発した」のならば、その放射は任意の系へ移行するときにも速度  $v$  で運動することになる、つまり要するに、 $v < c$  の任意の速度のとき、エネルギーも粒子から「流出」しなければならない。第 2 に、そのような移行をするとき、 $\mathbf{v} = 0$  という電荷の速度は一瞬の間だけである。さもないと、我々は連続的に「ジャンプ」する（非慣性的な）基準系に移行しなければならないはずであるが、そのような場合、諸公式のすべての導出は明らかに不当なものとなる。第 3 に、「1 つの入射波が失うすべての運動量は 1 つの自由粒子によって吸収される」とみなすのは奇妙である（そうだとすると、入射波中におけるエネルギー損失についても語る必要がある）。（いくつかの荷電粒子からなる）現実の原子や分子の場合、散乱プロセスは集団的プロセスとみなす必要がある。

ホール効果の記述において、磁場  $\mathbf{H}$  は外場として語られている [9, §22]。それは方法的に必ずしも正しくない。なぜなら、第 1 に、選択された任意の 1 つの電子にとって、それ以外のすべての電子によって作り出される磁場は、やはり外場となるからであり、第 2 に、測定することが可能なのは合成場のみであるからである。有限な導体中における固有磁場にとってのホール効果は既に電気伝導率の定義のうちに含まれていることが、ただ

単に仮定されている。そのようなアプローチは、第一原理から諸依存性を探し出すことを困難にするとともに、結果を展開式の最も単純な項のみに限定することになる。このように、本質的には、ただ単にいくつかの新たな未知関数が導入されているにすぎない。熱電現象に関する諸公式中に  $\mathbf{jVP}$ ,  $\nabla TVP$  その他の項が存在しないことについて、エントロピー増大則にもとづいてなされている推論は厳密ではない。なぜなら、それらの項は2つ以上存在するわけであるが、エントロピー増大則において定符号の組み合わせをもたらすような、それらの項の間のいかなる相互関係も存在しないことは、証明されていないからである。

磁気流体力学では、方程式の数と変数の数を一致させる（「完全」系を記述する）ためにエントロピー保存式が付け加えられている [9, §65]。これは方法論的に美しくなく、人為的に見える。なぜなら、エントロピー自体は測定装置によって測定されないからである（すなわち、その考察は、人為的なモデル的性格をあらかじめ前提している）。

このように、現代電気力学における荷電粒子の運動に関する記述は、数学的厳密性と物理学的根拠の手本とはみなし得ない。

## 第10章 磁気

次に、現代電磁理論による磁気現象の記述についての分析に移ろう。この現象は古くから知られていたが、これがミクロの対象物（粒子）まで理論的に拡張されたのはもっと後になってからのことである。それゆえ、ここでは電磁理論は理想的な状態にあるはずだと思われるかもしれない。検討してみよう。

教科書においては、一方では、スピンは古典的運動に帰することはできない [6, §58, 英訳版§4.17] と何の根拠もなく主張されている。ところが他方では、電子のスピン磁気モーメントは電流の作用に帰することができると主張されている。ミクロ電流の伝導電流と分子電流への分割  $\mathbf{j}_{\text{micro}} = \mathbf{j}_{\text{cond}} + \mathbf{j}_{\text{mol}}$  [6, §60, 英訳版§5.1] は、その本質において、点状のミクロ電流から、その平均的部分  $\mathbf{j}_{\text{cond}}$  ——マクロな部分——が分離されたということのみを意味している。磁化ベクトル（分子電流の単位体積当たりの磁気モーメント）を用いた記述は、分子内運動の周期の平均化、そして相異なる分子（および電子のスピン）の脈動の間の非協同性を意味している。一般的な場合には、そこではすべてのミクロパラメーターがランダムではなくて協同的である、コヒーレント状態への移行が存在する可能性が十分にあり得る。

磁性体が存在するときのベクトルポテンシャル [6, §61, 英訳版§5.2] を決定する際、一般的な場合には、マクロな量（**1点における関数!**）に関する積分同士の等置

$$\int \frac{\text{rot} \mathbf{I}}{R} dV = \frac{1}{c} \int \frac{\mathbf{j}_{\text{mol}} dV}{R}$$

からは、 $\mathbf{j}_{\text{mol}} = c \cdot \text{rot} \mathbf{I}$  は導き出されないことを指摘しよう。ここで何が問題かと言えば、それは、これらの積分は、磁性体が**所与の配置のされ方**をしているときの磁性体の**体積全体**をその内に含んでいるということである。一般的な場合には、積分同士の等式からは、被積分関数の等式は導き出されない。この  $\mathbf{j}_{\text{mol}}$  という量は、量  $\mathbf{A}$  を決定するために**具体的に与えられた配置全体**を特徴づける量である。 $\mathbf{j}_{\text{mol}}$  は表式に線形的に含まれているのだから、他ならぬこの  $\mathbf{j}_{\text{mol}}$  は、物理諸量の間におけるそれ以外の何らかの積分的な**線形依存関係**を近似的に特徴づける可能性がある。しかし、非線形的な関数（物理諸量）の場合には、この  $\mathbf{j}_{\text{mol}}$  の代入が不正確さを生じさせる可能性がある。もし我々が別の体積  $V$  を取ったとすると、それはもはや**別の課題**になってしまうのである（ここでも再び、一部の場合には、その別の課題のために形の似通った代入を導入することが可能ではあるが、しかしそこには任意の体積への厳密な数学的移行はない!）。この完全に一般的なコメントは、積分形の法則から微分形に移行する際の基本的な場の方程式の導出に対しても当てはまる。それだけでなく、非線形表式においては、例えば2次振動効果が生じる可能性がある。

非線形媒質（および誘電体（例えば弾性双極子を持つ誘電体）や磁性体（例えば強磁性体））の場合、重ね合わせの原理という考え方自体が誤りとなり、（原理的に線形的な）マクスウェルの場の方程式を一般化するための方程式を探す必要がある。その記述は単一でなければならぬと思われるかもしれない。しかし、電磁理論の諸原理の観点から見ると、常磁性体、反磁性体、強磁性体といった相異なる物質の存在自体が奇妙に見える（相異なる効果）。我々はここでもまた、微分方程式から場を決定するためには、無限遠にお

ける条件 ( $R \rightarrow \infty$  のとき  $HR^2 < \infty$ ) の満足が求められるのを見ることになる。ただし、その場合、単一の (無限遠までの) 解が確定される時間が無限大であるとする、無限遠における条件は、そして実験的観点から見ると無限遠における場の挙動もまた、見出すことが不可能になる (あらゆる測定装置の精度限界を超える) のではないか? 別の側面から見ると、純粋に数学的な電流と運動の系は、電磁理論の中で検討することが原理的に完全に可能なはずであり、当然、すべての場は完全に確定されることになる。しかし、一般に受け入れられている方程式を用いてそれらを単純に計算することはできない。これはまさに、現行理論の持つ可能性に対する制限である。この観点から見た場合、(それに続く微分段階や追加的な条件 (例えばゲージ選択, あるいは追加的な境界条件や初期条件) を必要とする) ポテンシャルの導入は、この理論の適用可能性と厳密性に対して追加的な制限をもたらすだけになる可能性がある。しかも、そもそも一様な媒質の場合の透磁率という概念は、すべての分子, 原子, そして諸粒子もそれ自体の**内部** (電子の内部, 陽子の内部, 等々) において**まさにその透磁率**を持っていることを前提としているが、これは明らかに現実と矛盾している。

[6, §66, 英訳版§5.7] に掲げられている、磁場中の磁性体が受けるポンドロモーティブ力の

$$\mathbf{F} = (\mathbf{M}\nabla)\mathbf{B} + [\mathbf{M} \times \text{rot } \mathbf{B}]$$

という形の書き表し方は、ミクロな対象物の場合とマクロな対象物の場合に同時に正しくなることはできない。なぜなら、平均化を行なう際、関数 (積) の平均値は平均値の関数とは等しくなく、ミクロスケールではすべての量の变化は著しく大きなものとなる可能性があり、しかも、諸公式が導出される際の条件となっている媒質の一様性がミクロスケールでは乱されるからである。近似式

$$\mathbf{f} = \frac{\mu - 1}{8\pi\mu} \nabla B^2$$

は、まさにこれらの欠陥を持っている。それゆえ、ポンドロモーティブ力にもとづいて  $\kappa$  と  $\mu$  を「測定」するということは、でっち上げられたポンドロモーティブ力の作用が現実に近くなるように新たな実効量  $\kappa_{\text{eff}}$  と  $\mu_{\text{eff}}$  を**定義**すること (ポンドロモーティブ力に関する表式の形を理論に合わせてつじつま合わせすること) に他ならない。

磁気に関する量子力学的検討を行なうことの不可欠性への言及 [6, §68, 英訳版§5.9] は、**一般に受け入れられている** 古典電気力学の**非厳密性**を語っているだけであって、それ以外の何らかの首尾一貫した古典電気力学があり得ないことを語っているわけではない。歳差運動と反磁性が「記述」され終えた所で、反磁性効果は、原子の磁気モーメントに関する等式がゼロであるという条件の下で観測されることが明らかされている。しかしなにしろ、この場合には、いかなる歳差運動も磁気モーメントの変化も生じないのである (回転していない物体を歳差運動させることが可能だというのなら、やってみたまえ!)。しかも、ジャイロスコープとの類推を通じた歳差運動についての記述も万事順調というわけではない。すなわち、支持体からの反作用 (!) が必要なのであって、したがってそれがあるときにのみ諸力の和が歳差運動をもたらすのである (それがなければ力学的な並進運動

や波動運動が生じる可能性がある)。例えば、コマの逆立ちを伴うジャニベコフ効果 [Dzhanibekov effect] <sup>〔訳注\*〕</sup> を思い出していただきたい。

キュリーの法則 [6, §70, 英訳版§5.11] をめぐっては、制限の原因について、 $T$  の低さ、「一連の物質」、その他の依存性、等々といった一連の「まことしやかな呪文」を ad hoc に唱えざるを得なくなっている。一般に受け入れられている電気力学によれば磁場は運動エネルギーに影響を及ぼさないのだから、磁束を通じて場の変化のプロセスを（それがいかなる回路を通過する磁束であるかは未知なままで）記述することは、科学もどきの欺瞞（所要の結果に合わせたつじつま合わせ）である。まさか、場  $\mathbf{H}$  を瞬間的に投入したときも、断熱的に投入したときも、その結果は以前と同じになるとでもいうのか？

また、古典物理学では、 $M$  および  $\langle R^2 \rangle$  の大きさはゼロから無限大までの値を取らなければならない [6, §71, 英訳版§5.12] ということはまったくなく、それと同様に、 $\kappa \equiv 0$  でなければならないということもない。これは純粹に、電気力学の一般に受け入れられている解釈に関する問題である。マクロな場  $\mathbf{H}$  の平均値の作用の下での歳差運動の記述はまったく奇妙に見える。なにしろ現実には、マクロな場とは何桁も異なっている可能性のあるミクロスケールな場を考慮する必要があるからである。しかも、すべてのスピンの配向も事前に知られていないのである（それゆえ、この理論の予測力は疑わしい）。

強磁性に関しても、この理論には予測力がなく、多数の問題が答えを与えられぬまま残されている。磁気モーメントの相互作用力がある物質では大きく、他の物質では無視し得るほど小さいのはなぜなのか？ すべての物質において電子のスピンの秩序化に關与するわけではないのはなぜなのか（なにしろ、回転するコマはその配向を維持するのだ）？ ここでは交換力はまったく無関係である。秩序化によって大きな自続場を創出する可能性が存在するか、それとも存在しないかのいずれかなのであって、したがって後付けによって「説明」するのではなく、物質のクラスを事前に区分する力を持った判断基準が必要とされる。磁化状態の持続性に関する語句は人為的な「呪文」に聞こえる。要するに、一般に受け入れられている電気力学からは、低温のとき、すべての物質は強磁性体でなければならないことになるのである。「ワイスの磁区 [Weiss domain]」に関する記述 [6, §72, 英訳版§5.13] も結果に合わせたつじつま合わせに見える（それならそもそも、ある物質には残留磁化が存在し、別の物質には存在しないのはなぜなのか？）。（顕著な）磁気異方性や磁歪が、1000 倍も弱い原子の磁気相互作用に残されるのは奇妙である。

当然のことだが、線形的なローレンツ変換は、また重ね合わせの原理でさえも、現実の非線形的媒質には適用すること（原理のレベルに達するほど厳密であること、そして自らの制限をあらゆる理論に対して押しつけること）ができない。その最も明瞭な例は強磁性体におけるヒステリシスである。しかし、それ以外の媒質や現象の場合でも、原理的には状況はそれより少しも良くはない。すなわち、あらゆる変化は現在の状態だけでなく、プロセスのそれ以前の履歴全体によっても決定されている。なぜなら、現実の媒質中では、相異なる擾乱（例えば振動数の擾乱）が相異なる速度で伝播し、相異なる仕方でも減衰している（また障壁を通過している）からである。

〔訳注\*〕 1985 年、宇宙滞在中のソ連の宇宙飛行士ジャニベコフによって偶然実証された効果。この効果は「テニスラケットの定理 (tennis racket theorem)」あるいは「中間軸の定理 (intermediate axis theorem)」から導き出される帰結である。

本質的には、マクスウェル方程式も原理的に厳密であり続けることができず、事実上情報量の小さいものになってしまう。すなわち、媒質の諸係数が汎関数（検討されるプロセス自体の関数）になり、「未知数」の数が方程式の数よりも多くなる。そのため、我々が媒質の諸係数を人為的に所与の関数として取る（つまり、モデル的・数学的な課題を選び取る、あるいは求める答えを覗き見る）場合にのみ、答えを近似的に得ることができるということになる（ここから、例えば理想的強磁性体のモデルが生じる）。

一様な媒質という概念は奇妙である。そこでは透磁率は磁石の外部でも内部でも一定でなければならないが、それは現実にはけっして満たされることがない。磁性理論において宣言されている磁気と電流の記述の統一性に反して、それらの力ですら相異なった挙動をしている。それらの力は、2つの磁石の場合には $\mu$ に逆比例しているが、1つの磁石と1つの電流の場合には $\mu$ に依存せず、2つの電流の場合には $\mu$ に比例している（奇妙な非対称性）。タム [6, §74, 英訳版§5.15] は $\mu = \text{const}$  の場合について、磁性理論の「新たなバリエーション」を導入している。そこでは非対称性が徹底的に除去されているが、彼は、それは単なる用語の問題にすぎないと主張している（しかしそれは、課題がそのように設定された場合、 $\mu$  という量が物理的意味を持たないことを認めることに他ならない）。今最後に物理的意味について述べたことは、その課題をまことしやかに変形しただけの場合——一様な外部媒質 [6, §74, 英訳版§5.15] の場合——にも、間接的に裏づけられる。すなわち、 $\mu$  に対する普遍的な依存性は存在せず、場は、磁石の幾何学的形状と磁性体および外部媒質の透磁率の複雑な関数として決定されている。このようにして、そもそも透磁率という概念自体の導入の意味があつと言う間に失われている。しかもそれは、まだ定常的な場合にすぎないのだ！

磁性体が存在する場合には、場のエネルギー密度は一般的な形で計算することができない [6, §82, 英訳版§6.7] ことが判明し、したがってその密度を単に公準として定めているにすぎない。すると当然、今度はその「条件」とそれ以外の諸方程式との整合性について、疑問が生じてくる。現実には、プロセスが媒質  $\mu_{\text{medium}}$  と磁性体自体  $\mu_{\text{magnetic}}$  の性質に対して（温度と磁歪を通じて）及ぼす自己整合的な影響を考慮することは、様々な困難を引き起こす（その例として、場に対する  $\mu$  の非線形的な依存性と周波数分散、また媒質中に等方性が存在しない可能性を挙げることができる）。

ポンドロモーティブ力の計算 [6, §83, 英訳版§6.8] においては、それより前に公準として設定されていたエネルギー密度に関する公式から再び出発しているが、ここでもまた積分同士の等式から被積分関数の等式に関する結論が下されているのはきわめて奇妙である。このように、具体的な局所的地点について得られた力の「密度」に関する表式は、まったくいかなる意味も持たない（それは、地球表層の平均密度あるいは平均組成を計算するのに等しい。すなわち、ある場所には水があり、ある場所には鉄鉱層があり、ある場所には水銀がある、等々となっているのであって、まさにそれらの局所的偏差こそが、実験的に記録される重力場と磁場の異常を決定しているのである）。それゆえ、粒子のあらゆる局所的挙動は、そのような「大域的平均値」にもとづいて計算された挙動とは大きく異なる可能性がある。このような観点から見ると、（ここでも再び粗い近似で計算された）歪力を導入するかしないかには違いはない。なにしろ実際には、このアプローチにおける  $\mu$  は

つじつま合わせされた未確定の関数であるからである。磁場の応力テンソル [6, §84, 英訳版 §6.9] も正しいのは平均においてのみであり、局所的な場所においては誤りである。

物質の磁性理論を現在既に完成したもののみならず、とてもできないだろう（一連の現象論的な事実や依存性は知られているものの、この理論の予測力は大きくない）。より正確には、そこで議論されているのは、それぞれのクラスの物質（反磁性体、常磁性体、強磁性体、等々）のための、いくつかの雑多なまことしやかなモデルである。物質の磁氣的性質をその組成にもとづいて決定するのは困難である [4, §11.1]。例えば、銅は反磁性体であるが CuCl は常磁性体であり、Na は常磁性体であるが NaCl は反磁性体である。また、黒鉛は異常に高い反磁性を持っている、等々といったように、**磁気力の相対的な弱さ**にもかかわらず、相異なる物質における磁気の発現の仕方が作用範囲の点でも定性的な点でも**多種多様**である（反磁性、常磁性、強磁性、等々）ことが注目を引く。それらの依存性が場の強度に対する依存性（強磁性体の場合）、また場の強度の2乗に対する依存性（反磁性体および常磁性体の場合）の両方の形で発現しているのは奇妙である。なにしろ、教科書においてはほとんど必ず、原子内における諸性質は（ましてや原子の内殻の場合には）、外部作用には事実上依存していないことが強調されているのである。この点から見ても、磁氣的性質の温度に対する強い依存性が発現していることはまったく理解しがたい。

磁「荷」が存在するか否か [4, §11.2] は知られていない（なぜなら、電流の磁場の創出には電子と原子のスピンが関与している可能性があり、しかも「素粒子の磁石の両極」の間の微小体積中に測定装置を設置することはできないからである）。磁「荷」の探索が不成功に終わっている原因は、例えば、その「荷」に対して不適当な諸性質が帰せられているという理由で説明できる可能性がある。

当然のことながら、（**B** または **H** に対する **M** の線形依存性を通じた）磁化率の定義は近似的な性格を持っている。「磁化強度 **M** と場 **B** の次元は同一であるにもかかわらず、係数  $4\pi$  があるために、それらを同一の単位で表すことは不正確となろう」という語句は、まさに滑稽な傑作のように聞こえる（では、円周の長さをセンチメートル単位で表すことができるというのか？）。

もちろん、試験片中の磁場 **B** はミクロスケールでは**非一様**であり、その**平均値**は実験の幾何学的配置**全体**に依存している。双極子（電気双極子および磁気双極子）の場合、離れた領域の場にもとづいて物質中におけるその表式を決定することはできない。例えば、場は、近傍においては

$$E \sim \frac{q}{r^2}, \quad p = qr = \text{const}$$

であり、小さな双極子（ $r \rightarrow 0$ , ただし  $p = \text{const}$ ）の場合には

$$E \sim \frac{\text{const}}{r^3} r^3$$

は有限値である。すると、場のエネルギーは  $E^2 dV \rightarrow \infty$  となる！

さらに、教科書 [4, §11.10] の著者は、導入された電束密度 **D** と磁束密度 **B** の両方について、それは試験片中で決定することのできない量であると、かなり明確に述べている。このように、電束密度 **D**、磁化強度 **M** および磁束密度 **B** の表式は、ただ単に文字の組み合わせのある種の**定義**であるにすぎない。これらの文字の組み合わせは、境界条件（一般



の場合には  $\text{rot } \mathbf{D} \neq 0$  かつ  $\text{div } \mathbf{H} \neq 0$ ) が消えることにより、マクスウェル方程式系を複雑化している。

公式においては、測定可能な諸量（さらに良いのは、比較対照が可能なように調整することのできる諸量）のみを取り上げるべきであるという主張に、賛同すべきなのではなからうか。また、測定単位について言えば、いくつかの量の次元が同一であるとき、その量に「新」名称を与えることによって自分自身を混乱させたり、測定単位の間のあるかもしれない違いをでっち上げたりするべきではない。したがって、**実験**という観点から見ると、著者 [4, §11.10] が擁護している  $\mathbf{M} = \kappa \mathbf{B}$  という定義より、 $\mathbf{M} = \kappa \mathbf{H}$  を通じた既存の磁化率の定義に賛同したほうが良い。一般の場合には  $\mathbf{M}$  は  $\mathbf{H}$  と方向が一致しないのはなぜなのか、その理由を磁気理論から理解することはできない。なにしろ、多結晶（磁区）の配向がランダムな場合には、場  $\mathbf{H}$  の任意の方向からの磁化容易軸の偏差  $\theta$  は、 $\theta = \text{const}$  のとき等確率になる（ $\phi$  に依存しない！）のである。

磁気は古典物理学には存在するべきではない、なぜなら磁場は運動エネルギーを変化させないからであるというボーアの結論 [8, §75] は、真空中における**個別の (!) 自由素粒子**にしか当てはまらない。磁場は粒子の運動形態を変化させる以上、固体の場合には、すべてがその構造と性質に依存している。量子力学における一連の相関関係の**公準的な**導入もまた**説明ではなく**、ランジュバンの理論よりも優れている点はまったくない。

[8, §76] における反磁性の「説明」では、次の点が目に飛び込んでくる。第1に、原子核は固定されているとみなされている。さもないと原子核に対しても磁気力が作用することになり、そうすると原子核の場合、電子とは異なった  $\Omega$  が得られてしまうからである。第2に、検討されているのは孤立原子であり、集団のプロセスではない（集団的な力も、衝突も存在しない）。第3に、磁場投入時におけるラーモア回転の発生の計算はあまりにも簡略化されている（この教科書のこれより前のセクションでは、古典系は磁気モーメントを持つことができない、なぜなら磁場は仕事をしないからであると**主張されていた**ことを指摘しよう）。すなわち、1) 外部磁場との関係における原子の配向は任意であり得る。2) 単一原子の場合、初期時点において  $\mathbf{B} = 0, \Omega = 0$  であると、どうすればみなすことができるのか？ なにしろ、運動している（軌道に沿って回転している）電子自体と原子核が磁場を創出しているのである（その磁場が空間全体において恒等的にゼロであるということはけっしてあり得ない）。

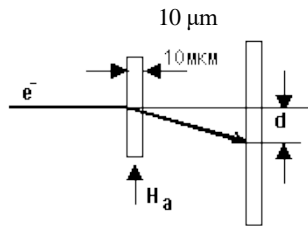
次のセクション [8, §77] で常磁性について「説明」する際には、今度はもう統計的アプローチが採用され、歳差運動は常磁性体の磁化をもたらすことはできない、すなわち、その磁化は原子同士の相互作用の結果発生すると主張されている（磁場の投入プロセスのことはすっかり忘れられている）。一部の金属の常磁性については、（測定結果のうちに、 $T$  に対する  $\kappa$  の依存性を盗み見ることにより）伝導電子のスピン磁気モーメントによって説明する「必要がある」ことが判明している。なんと驚くほど情報量が多く、予測力の大きな理論であることか！

強磁性 [8, §79] を定量的に説明するためには、近距離交換力を人為的に反古典的な仕方導入する必要があるということも、一般に受け入れられている短距離での電気力学の諸法則が不正確であることを物語っている。金属箔を用いたドルフマンの実験 [訳注 (本段落末尾)] において、それらの交換力が  $\beta$  粒子に作用しないのはなぜなのか、その理由はいまだに説

明されていない。しかし、もしかしたら、それでもやはりそれはただ単に考慮に入れられていない何らかの集団的プロセスであって、まさにそれゆえに磁区構造が形成されるのではなかろうか？

〔訳注〕 J.G. Dorfman はソ連の物理学者。磁性理論、固体物理学および物理学史の専門家。モスクワ大学核物理学研究所のウェブサイトに掲載されている資料は、ドルフマンの実験について次のように解説している。

「ワイスマンの分子場の静電的本性 J.G.ドルフマンの実験（1927年）は、強磁性体中における内部分子場の



非磁性的本性を証明した。もし金属箔（図）が飽和値まで磁化されていて、ワイスマンの場が磁性的本性を持っているとすれば、（磁場中のローレンツ力による）電子線の偏差  $d$  は実効場  $\mathbf{B}_a + \mathbf{B}_w$  によって決定されなければならない。これは  $\mathbf{B}_a$  よりも著しく強い（ $\mathbf{B}_w \sim 10^3 \text{ T}$  である！）ドルフマンの実験では、その偏差は実効場  $\mathbf{B}_a \sim 1 \text{ T}$  に相当していた。このことはワイスマンの場の静電的本性を裏づける証拠となっている。」

強磁性体の場合、そのホール係数が通常の金属よりも  $10 \sim 100$  倍大きい [8, §98] ののは奇妙である。ところで、正のホール係数を持つ多数の金属が存在するという事実は、巨視的な (!) 領域においてさえ、一般に受け入れられている電気力学が万事順調というわけではないことを意味している。さらにもう1つ奇妙な点がある。ファインマンによれば、プラズマは反磁性でも常磁性でもあり得ない、なぜなら、ローレンツの磁気力は仕事をしないからであるとされている。ところが、これは実験データと矛盾している（そうだとすると、プラズマの磁気閉じ込めはまったく機能することができなくなるはずだ！）。また、「正孔伝導」の概念（科学もどきの呪文による後付けでの似非説明）の導入は、電気力学全体を抹消してしまう。その電気力学は、「第一原理」から出発して、いったい何が現実運動しているか（それは電子である）、また、それらの粒子に対してローレンツ力がいかに作用しているか、等々について決定してきた（そして、それらすべてを次の段階におけるあらゆる証明において利用してきた！）はずなのだが……。

磁場中の熱力学的関係式の導出 [9, §321] に際しては、仕事に関する関数のうちの1つが無限遠面についての関数に変換されている。第1に、ここにはいかなる物理学的原理もない。その項は、境界面をどこに取るかに応じて様々なものになる（つまり、その項は不確定である）。そしてその無限遠面は、何によっても特定されていない。第2に、個別励起原子でさえエネルギーを放射することができ（荷電粒子系については言うまでもない）、その電磁放射エネルギーは無遠慮まで飛んでいく。すなわち、運び去られるエネルギーは同一の有限な大きさとどまる。第3に、そもそもプロセスがここで、この具体的な場所で生じ、あらゆる作用が有限速度で伝播するのだとしたら、いかにすれば無限遠面を取ることが可能なのか？ そして我々が関心を持っているものが有限時間内における結果であるとすれば、我々は永遠に待ち続けることはできない。差し当たって可能なのは、その無限遠面との間における因果関係のせいぜい何らかの類似物が確定されることぐらいのものであろう。磁性体の全自由エネルギー [9, §32]、また電流系のエネルギー [9, §33] を導出する際にも無限遠面に対するそれと同様のアプローチ（すなわち被加数の除外）が取られている。

さらに、電流分布  $\mathbf{j}$  はその電流によって創出される場および磁性体の分布に依存していないとは、とても言えないのではなかろうか。それはただ単に、 $\rho$  と  $\mathbf{j}$  が所与の量とみなされ（それぞれの電荷素片は、あれこれの正確度を持った所与の法則にもとづいて「手作業で

導入」されている), それ以外のすべての量 (例えば場) が求められることになるように, 現代電気力学が定式化されているからにすぎない。

磁場中の力 [9, §35] を計算する際, 最初に応力テンソルを計算するときに  $\mathbf{j}=0$ , すなわち  $\text{rot } \mathbf{H}=0$  としていたのに, その先で導関数を代入するときには

$$\text{rot } \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}$$

であることを「突然」思い出すのは首尾一貫していないように思われる。

結晶の磁気対称性 [9, §37] に関する推論は不完全に見える。粒子にはスピンの存在し, また粒子の秩序化があり得ることが考慮されていないからである。その場合,  $t \rightarrow -t$  の交代は, 諸粒子の一体としての運動によって条件づけられている  $\mathbf{j}$  のみの符号を変える。最初に, 交換相互作用は磁気相互作用よりも量的に大きいと述べられているが, いくつかの元素 (例えば希土類元素) の場合には, それはそうになっていない。またしても「理論は, それにとって理論が正しい場合にとってのみ正しい」, そして我々はそのことを *post factum* にしか知ることができないという結果になっている。

このように, 磁気という誰もが知っている現象の説明と記述という点で, 現代電気力学において物事は望まれるほど万事順調に進んでいるわけではない。

## 第11章 超伝導

電磁理論のもう1つの適用例として、超伝導現象について検討しよう。

超伝導現象 [8, §80] もまた、一般に受け入れられている電気力学の不完全性を示している。例えば、交流に対する抵抗を説明するためには、2流体モデルを人為的に発明せざるを得なかった。臨界場に対する依存性を決定する際には「自由エネルギー」が純粹に形式的に、あからさまな表式なしに語られている。ロンドン兄弟の形式的理論にも厳密性の欠けた推論や雑駁な計算が多数含まれている。磁区構造は「科学もどきの呪文」を使って語られている。超伝導体の第1種と第2種への区分の導入は、測定不可能な量を通じて行なわれている（それは、理論の体裁を維持するための *post factum* であることを意味する）。BCSモデルは量子現象として解釈されており、したがって現実の超伝導メカニズムの理解であることを自負することができるとはとても思われぬ。少なくとも、そのサイズが電子間の平均距離を著しく超えている電子対の場合、BCSモデルはおとぎ話の領域に属する。しかも、ボソンはここではまったく無関係である。なにしろ、ヘリウム原子あるいはアルゴン原子の原子核（ボソン）は、金属内部を抵抗なしに飛び回ってはいないのだ！

[9, 第6章] では、超伝導現象に対する奇妙な「アプローチ」が示されている。実際の適用の観点から見て興味深い問題、すなわち  $T_c$ ,  $H_c$  その他の発見の問題を検討することは手に負えないことが判明し、そのため、電氣的性質は関心に値するものではなく、導体の磁氣的性質の結果であるにすぎないと宣言されている。そしてその先では、磁氣的性質の定性的挙動についての分析がマクスウェル方程式に対する信仰にもとづいて行なわれている。また、超伝導体の第1種と第2種への区分も「偶然的に」（必要に迫られて *post factum* に）行なわれている（中間状態、層構造あるいは渦構造、等々）。磁化強度  $\mathbf{M}$  と同様、磁場強度  $\mathbf{H}$  は物理的意味を持たないと最初に述べていたにも関わらず、その先ではそれらを「形式的な仕方」で導入して利用している（またもや「ここでは読む……。ここでは読まない……。ここでは油染みつと……」という態度である）。

そもそも、いかなる超伝導も存在しないのだという意見さえある（例えばO.H.デレヴェンスキーの論文「電気との目隠し鬼ごっこ」 (<http://newfiz.info/elvo-opus.htm>) [19] <sup>[訳注]</sup> を参照されたい)。この論文では現代電気理論に対する多数の異議が述べられている。筆者はそれらの異議について一理論家としてコメントすることはしないが（原文を読んだほうがいい）、これに関する実験家たちの意見を聞いてみたいと思っている。

[訳注] 邦訳版はサイト「物理の旅の道すがら」 <http://naturalscience.world.coocan.jp/> に掲載されている。

## 結 論

さて、現代電磁気現象理論に関する分析結果をまとめると、理論面および実験面におけるこの理論の一定の成果を客観的に認めつつも、それでもやはり我々の目には次の点が見えてくる。その理論的基礎、理論の数学的具現化、そして実践的方法のいずれも、十分な物理学的、論理的あるいは数学的な根拠を誇ることはできない。この理論の厳密性もまた、求められる科学的厳密性から程遠いところにある。しかも、アルゴリズムの内的整合性のレベルは高くない。言うまでもなく、電磁気分野における実験上、技術上の成果はこれからも揺るぎないものとして残り続けるであろう。しかし、理論自体はどうかと言えば、そのある部分は個別的な仮説、また実験によって事前に知られている結果に合わせた後付けのつじつま合わせで溢れかえっている。それゆえ私は、一連の理論的側面は将来的に変革されることになるであろうとあえて予測する。厳密な新電磁理論はマイクロ世界を含めたあらゆるスケールにおける諸現象を正確に記述するようになり、それゆえ、現在の量子力学の「電磁気学への適用可能分野を完全に包摂する」（そして量子力学を「吸収する」）ことになるであろうと私は考えている。

我々は主にアカデミックな教科書にもとづいて電気力学について分析を行ってきた。しかし、現行の見解と矛盾する多数の実験（A. Rodin, G.V. Nikolaev, R.T. Sigalov, V. Chernikovの実験およびその他多数の実験）が存在する。それらもまた、新たな修正電気力学においてアルゴリズムに従って首尾一貫した形で説明されなければならない。



出発点に戻らなければならないときが来たのではないか？

## 付論：類縁関係にある理論および代替理論に関する簡単なコメント

形式に従った定量的指標を追い求める中で、人類はきわめて多数の物理理論を生み出してきた——高度に科学的な理論から、高度に不条理な理論にいたるまで。そして、実に逆説的なことだが、後者のかなりの部分がアカデミズム科学によって擁護されているのである（これら2つの理論を区別するための補助的判断基準は、実験的に検証可能な結果の量に対する、人為的にでっち上げられた繁文縟礼の量の比率である。その比率が小さければ小さいほど良い）。

情報の流れはきわめて膨大であるから、電気力学分野におけるすべての代替的アイデアについて多少なりとも本格的な概観を行なうことは困難である。しかも、筆者は代替理論には通じていない（代替理論について本格的に調べたい方は一次資料を読まれたほうが良い）。それゆえここでは、描像を完全なものにするためにいくつかのアイデアについて簡単に言及し、ごく表面的なコメントと評価を与えるにとどめる（筆者が既に知っている理論も含め、すべての代替理論について分析できないことをあらかじめお詫びしておきたい）。

自明なコメントから始めよう。ある新たな理論が別の疑似理論（例えば特殊および一般相対性理論、相対論的宇宙論、ビッグバン理論、等々）に依拠している場合、あるいはそれを含んでいる場合には、次なる新たな疑似理論しかその結果となり得ないことが、ただちに明らかになる。ここでその実例となるのは、相対性疑似理論と量子力学（仮設構造物）から「遺伝的欠陥のあるハイブリッド」を合成しようと試みている弦理論（および超弦理論）である。そこでは、近い将来、化けの皮を剥がされないようにするため、弦（ストリング）のレベルは最も奥深い所——亜原子レベル以下——に置かれている。そりゃあ、当たり前だろ！ なにしる我々は、亜原子レベルより上のすべてのレベルについては、既に何から何まで知り尽くしているのだから（疑似科学者たちによれば、物理学の終焉が近づいている！）！ つまり、疑似科学者たちにとっては、4次元空間、ブラックホールやモグラの穴、暗黒エネルギーや暗黒物質に関するおとぎ話だけでは足りないのだ！ 今や、彼らには新しい遊び場がある。10次元時空、さらには26次元時空という遊び場だ！ 国家予算でまかなわれる、個人的な数学ゲーム用の何と広大なお砂場だろう！ これらの疑似理論やそれに類する理論（M理論、ループ量子重力理論）について分析することには、何の意味もない。

次のコメント。ある新たな理論が本書で検討されている理論を不変要素として含んでいる（後者を拡張しようとしている）場合、その理論は、本書において見出された後者のすべての「欠陥」（根拠の欠如、矛盾、問題点、不十分さ）を自動的に受け継いでいることになる。例えば量子電磁力学や電弱理論はそのような理論に分類することができる。当然、それらの理論においては、それ独自の固有の問題点（無限大の真空エネルギー、真空の重力場、再規格化の疑わしさ、級数や積分の発散性、原理的に抽出不可能な粒子、でっちあげられたいわゆる量子数、等々の幻想的な色や悪臭）が付け加わっており、問題点の総数は増える一方である。数学化されたこれらすべてのおもちゃがもたらした成果はゼロである（それらのおもちゃをめぐってマスメディアで起こされている騒音を成果とみなさない

ならば)。

自明のことだが、代替理論において可能なのは、その提唱者らによって具体的になし遂げられた事柄を評価し、検討されている研究対象に関する先行者たちによる同様の結果と比較することのみであって、その提唱者らに対して完全な知識(「神の方程式」)を要求することではない。あらゆる理論は暫定的に次の2つのグループに区分することができる。1) 観測される現象を記述しているだけで、現在実験的に研究することのできるレベルを超えてさらに深く掘り下げようとはしない理論、2) 記述される現象の法則性を発見するだけでなく、その内部を覗き込み、その原因を発見しようと試みている理論。

1番目のグループ(「私は仮説を作らない」タイプ)に分類することができるのは、例えば、I.I.スミスキーの研究『相互作用理論』[12]である。彼は、この場合における主要問題は力に関する問題である(「真理は力にあり」という考え方を十分明確に定式化している。もしマクスウェル方程式を絶対的に厳密なもののみならずとすれば、電磁気力(本質的には、すべての「文字」に対して実験的に検出可能な意味を付与する閉じた方程式)は、(ローレンツ力について行なわれたように)外部から人為的に導入されるのではなく、マクスウェル方程式それ自体から自動的に得られるのでなければならない。[12]ではまさにそのような手続きがなされ、電磁気力に関する新たな自己整合的な表式が得られている。もちろん、原子のスペクトルを古典的なやり方で得ることが、その表式の正しさの最も主要な裏づけとなるはずであるから、この理論の提唱者に対してはそれをなし遂げることが望まれる(それがなし遂げられるまでの間においては、マクスウェル方程式に関しては、電流素片に関する表式は積分形の実験的法則から多数のやり方で導出することができることを忘れないようにするべきである)。

さらにもう1つの本格的な代替的現代電気力学は、ガウス-ウェーバー電気力学である(この理論はA.-M.アンペールの着想から生まれ、C.F.ガウスとW.E.ウェーバーによってまとまった形に仕上げられ、その後W.リッツによって発展させられた)。その着想はきわめて重要な意味を持っているから、これに関する知識は一次資料から得たほうが良い(いくつかの論文の翻訳[露訳]がS. Semikovのサイト<http://www.ritz-btr.narod.ru>に掲載されている)。現在ではウェーバー力の元来の表式の修正に関するいくつかの提案がなされており、これによって従来存在した問題点が除去されようとしている。ここでもまた、実験だけが「自分の言葉」を語ることができる。

"autodynamics" (Ricardo Carezani, 1940) は1番目のグループに属するもう1つの理論である。この理論の土台となったのは「ニュートリノ」実験の詳細な分析であり、そこからニュートリノは存在しないという結論が導き出されている。その結果、力(および質量の速度依存性)に関する特殊相対性理論とは別の表式が提案された。そこで論じられている質量概念の変更については、それに対する反論として、相対性(疑似)理論に対する反論([1]参照)の場合と同じ論拠を挙げることができる。しかしそこで論じられている力(および動力学)については、その「決裁」は実験が下さなければならない。ちなみに、自然界にニュートリノ粒子は存在しないという結論には、その後、他の研究者たちも達していた。

次のコメントは、そもそも内部充実体[solid objectに相当する露語の仮訳]の存在を否定し、この世界におけるすべてを波動構造(波、渦、ソリトン、等々)の所産とみなしている諸理論に関するものである。そのような形成物の安定性が限られていること、またそれらの形

成物が相互作用後における自己復元力を持っていない（粒子は相互作用後もその識別可能な離散的性質を保持し続ける）ことに関連したそれらの諸理論に対する当然の反論に加えて、波動形成物は相互を通り抜けて進んでいくのに対して、粒子は相互に衝突し、反跳（反射）さえするという点に注意を払う必要がある。例えば全空間についてのフーリエ展開について考えていただきたい。調波は媒質なしでは相互作用しない。しかも、我々の巨大な宇宙の中で、どの調波が何に属しているかを、どのようにして決定するのか？

さて次に、場の理論のあるバージョンにおいては、遠隔作用論と近接作用論と称するものが人為的に対置されているという点についてコメントしよう。表式（方程式、法則）が偏微分方程式で書き表されているということは、我々の前にあるものが近接作用論であることをまったく意味しない！ 現代諸理論においては、解を見出すためには境界条件を代入する必要があるし、しかも方程式自体も何らかの境界条件を考慮に入れて得られている。ところが、場の理論の現行バージョンにおいては、それは無限遠における条件である。その結果、（有限な距離の）遠隔作用論の代わりに得られたのは、喧伝されているような近接作用論ではなくて、超遠距離作用論であったのである！ だから、我々はだまされているのだ。つまり、ポテンシャル理論、あるいは任意の境界問題は近接作用論を表すこと（局所的であること）ができないのである。その例外となり得るのは、局所的な流束（自由空間中の場合には、粒子自体の諸性質によって決定される付加質量に似た何かあるものを反映する流束、また一般的な課題の場合には、さらに実験の配置にも依存する流束）を伴うように課題を構成することである。今のところ、場の理論のそのようなバージョンは見当たらない。もし誰かがそのような着想を具現化することができたならば、その者に荣誉あれ、である。

すべてのエーテル理論が近接作用論であるということ、そして概して言えば、（多くの現代理論が疑似数学的性格を持っているのとは異なり）事物の深奥を洞察し、諸現象の原因とメカニズムを理解しようと試みている、まさに物理学の理論であること、すなわち先にあげた2番目のグループに属していることは明らかである。（現代の諸理論がすべての現象を説明できていないだけでなく、数多くの問題点や内部矛盾を抱えていることには目をつぶり）この世界に存在するあらゆる現象を一度に説明し尽くせという不可能なことを理論に対して要求する敵対者を最も多く持っているのは、エーテル理論である（そのような敵対者は、高水準の教育を受けた半物理学者兼半数学者たちの中にもいるし、科学界の取り巻きの流す宣伝を何も考えずに信じ込んでいる専門家たちの中にもいる）。エーテル理論はきわめて多様であり、すべての提唱者を列記することすら困難である。それゆえ、ここではいくつかの特徴的な例をあげるにとどめよう。それは例えば、エーテルを気体状とする理論（V. A. Atsyukovsky<sup>[訳注]</sup>, P. D. Prussov）、電子-陽電子または光子とする理論（A. V. Rykov）、粒状とする理論（A. I. Zakazchikov）、エーテルは分域構造を持つとする理論（K. A. Khaidarov）、相異なる符号のチャージを持つとする理論（F. F. Gorbatsevich）、単一の符号のみのチャージを持つとする理論（V. I. Mirkin）、固体状とする理論（Ye. V. Gusev）、液体状とする理論（V. M. Antonov）であり、その他にも数多くの理論が存在する。エーテ

[訳注] サイト「物理の旅の道すがら」<http://naturalscience.world.coocan.jp/>に掲載されている V. A. アツェコフスキー『相対性理論の基礎に関する批判的分析』のエーテル動力学に関する記述を参照されたい。



ル自体の微粒子についても、その微粒子は等方的または異方的である、数種類存在する、一連の複雑な性質を持っている、転換する、等々、様々な見方がある。いくつかの理論はかなり十分詳細に練り上げられているが、様々な方向性の中で、本格的な分析の対象とすることができるのはどのような方向性なのだろうか？ 自明のことだが、あれこれの理論を立証または反証する、あるいはすべての理論を棄却させることができるのは、**実験的に裏づけられた新たな予測**の総体のみである（ただし、公認科学によって喧伝されている実験を決定実験とみなすことはできないのは明らかである）。現段階では、そのような諸理論の「内部」問題に関して次のようなコメントをすることができる。エーテル粒子が転換能力を持っているとすれば、我々の世界の多くの対象物が持っている実験的に立証可能な自己同一性と離散性の自己復元および保持のメカニズムは、どのようなものなのか？ 複雑な性質を持っているエーテル粒子の場合には、それらの性質（その性質の生起および作用の原因とメカニズム）の説明という問題が再び生じることになる。例えば、両方の符号のチャージを持つエーテルについて検討する場合、これまで未解決の問題、すなわち、単一の統一体としての各チャージを維持しているのはどのような力なのか、反対符号のチャージ同士が引きつけ合うメカニズムはどのようなものなのか、相異なる符号のチャージ同士はなぜ中性化しないのか、といった問題がそのまま残る（つまり、問題が再びより深いレベルに持ち越される）ことになる。また、もしエーテルが互いに反発し合う単一符号の粒子であるとした場合、我々の世界が純粹に気体状の世界ではない（エーテルが凝縮して固体状や液体状の物体にもなっている）のはなぜなのか？ 固体状エーテルの場合における主要な「内部」問題は、何がその固体状形成物を1つにまとめ続けているかという問題である。また、銀河から素粒子にいたるまでの、大きさとエネルギーがまったく異なる諸物体がその固体状形成物を通り抜けて運動するメカニズムを説明する必要がある（確かに、光子は結晶を通り抜けることができるし、電子も金属中で運動することができる。しかし、固体中においてそのようなことが生じるのは一部の対象物の場合のみであり、しかもそれは限られたエネルギー範囲内においてである）。

あらゆる理論に対して期待したいことは何か？ それは、少なくとも、1) 内部矛盾のない、諸現象に対して首尾一貫したアプローチを取ること、2) 検討される諸現象の全体について、内部整合的なアルゴリズムに従って単一の仕方で記述する（それぞれの個別の場合のための個別的仮説を設けたり、答えを覗き見たりしない）こと、3) 人為的にでっち上げられたガラクタを弄ぶ数学ゲームを得るのではなく、第一原理から出発して、実験的に検証可能なすべての量を得ること、4) 実験的に検証可能な新たな予測を行なうこと、5) 諸現象の原因とメカニズムを可能な限り説明することである。

## あとがき

論争においては身分の貴賤も肩書も名前もない。  
重要なのはただ一つ、真理のみであって、その前  
においてはすべての人間は平等である。

(R.ロラン)

筆者はこの本を、電磁気現象理論の根拠づけを行ない、そこから導き出される修正をこの理論に加えるための「プログラム」とみなしている。この理論が抱える何らかの部分的な不整合や問題点に出会った人々は、これまでも数多く存在した。しかし、この理論に含まれているごまかし、不整合、人為的仮説や内部問題の体系全体を知り尽くしていたわけではないのではなかろうか。それゆえ、本書は、人々の「目から鱗を取り除き」、存在する様々な問題点やそれらに対する対応の仕方について、自立的に深く考えるための手助けをすることを課題としていた。そのためには、いつか昔に暗記した即席の既成知識を記憶から引っ張り出すのではなく、すべてを自覚的に、「目を見開いて見る」ことを学ぶ必要がある。かつて物理学の「岐路」において、なぜあれこれの物理学上の決定やアイデア、法則、方法論が選択されたのか、その理由を知らなければならない。これまでに蓄積されてきた事実や経験の観点に立って過去のアイデアに対して評価を下す力を身につけ、必要な場合はその「岐路」に立ち戻り、より正しい選択を行なわなければならない。

こうおっしゃる方がおられるかもしれない。「そもそも、どうしてこんな批判書が必要なんだ？ この本では完成した理論が代替として提案されていないのだから、なおさらだ」と。しかし、あらゆる仕事は必要な時に必要な場所で、所要の質と量に従ってなされなければならない。さもないと、それは「シジフォスの労働 [= 徒労]」に終わってしまう。現時点においては、科学共同体は電気力学を厳密性の手本とみなしており、今のところ電磁気学の応用分野におけるいかなる新たなアイデアも受け入れる用意ができていない。しかし、科学の基礎は一人ひとりの物理学者にかかわる問題である。来たるべき革命を待っているべきか、それとも、もっと大人になることを学び、生じている諸問題の解決方法を適時に(進化の道に従って)探求するべきか？ ダチョウのように砂に身を隠すのではなく、諸問題の困難な側面の検討に取り組まなければならない。

残念ながら、「偉大なる物理学革命」は科学界における状況の劣悪化をもたらした。

(真理に関心を持つ) 誠実な研究者たちからなる科学者共同体は惰性的な塊に転化し、そこでは真の科学者は相対的にわずかな割合しか占めていない。自己浄化と自己組織化のプロセスはほとんど機能しなくなった。現在の科学界においては、科学者たちを暫定的に次の4つのグループに分類することができる。1) 真の科学者、2) 単なる給料取りのサラリーマン研究者、3) 科学界の役人、4) 特定のイデオロギーに染まった疑似科学者。

科学界の偽学者たち(損得勘定に従って喜んで「黒を白と言いくるめる」者たち)は数は多くはないが、しかし事実上すべての「CM タイム」は彼らが握っている。現代宇宙論および2つの相対性理論は、公的に援助されている疑似科学に分類する必要がある(量子力学の存在自体が、微小スケールにおいて現代電気力学が内部問題に直面していることを

物語っている)。科学界の役人たちは厳格な官僚的秩序を維持する役割を果たしている。彼らは「風向き次第で有利なほうへ動く」人間たちであり、いつでも支配的な意見の「先頭の旗」とともにいようとする。

科学者共同体の圧倒的部分はあらゆる仕事に従事する用意のある、単なる給料取りのサラリーマン研究者たちによって構成されている。多くの者は誠実に働こうという気持ちを持っているが、しかしそれは、誰かによって配置された境界表示用の赤旗の範囲内においてである。そしてサラリーマン研究者たちの著しい部分は、科学とは何かについて、あるいは科学者の活動の倫理的側面については考えようもしない（彼らの潜在意識には、「最終目的として世間に認められることを渴望して絶えず忙しく働き続け、あらゆる出土品を平気で秘宝と偽る発掘者」というステレオタイプが浸透しているのではないかという印象を受ける）。

真の科学者の姿勢は、次の言葉のうちに見事に定式化されている。「真理を発見しようと欲する者は、論敵の主張や推理のうち、論敵に劣らぬほど熱心に真理を探し求める。……彼は、論敵がその考えを最も正確に表現するための言葉を見出せるようにするため、論敵に力を貸そうと努める。彼は、論敵自身が自らを理解している以上に深く、論敵を理解しようと試みる。具体的な問題に関する論争の参加者は、論敵が主張している事柄を覆したり、貶めたり、ぶち壊したりする目的で論敵の論拠の個々の弱点を利用するのではなく、論敵の主張から、真理の発見に役立つあらゆる価値あるものを抽出するべく努力を払わなければならない」（T. コタルビンスキ<sup>〔訳注〕</sup>）。

真理の探究、自分と他人の成果の促進、そして論争の進め方に対して真の科学者としての態度を取っている者は、はたして多いと言えるのだろうか？ 科学理論というものを、「陽のあたる場所」をめぐる動物的な競争本能の精神に従って受け止めてはならない！ もう、「問題をカーペットの下に掃き入れる」という卑しい習慣を捨てようではないか。そしてそれとは逆に、物理学理論のうちに存在する不整合、他の事実や検証済みの理論との間の矛盾、アルゴリズムを欠いた手法、ad hoc な追加的仮説、物理学上、哲学上、方法論上あるいは数学上の未解決の諸問題に関する情報を正直に伝え合うようにしようではないか。これらの問題が正直に明るみに出されたとき、あらゆる研究者はそれらを解決しようと試みることができるようになる。我々の世代がそれらを解決できなかったとしても、我々に続く諸世代は、きっとそれを成し遂げることができるに違いない。重要なのは、将来の各新世代がゼロから出発して、「それらの問題をカーペットの下から、まるで地下活動のように人目を避けてこっそり引っ張り出す」ようなことをする必要がなくなるようにすること、そして、最も若く、最も生産的な年齢の人々がそれらの問題について考え、解決することに全力を集中することができるようにすることである。（例えば、「傑出した」物理学者たちによる科学の終焉に関する愚痴話とは違って、「〇〇に関する未解決の諸問題」という題名のついた数学書は、常に人にインスピレーションを与えてくれるものである。）

---

〔訳注〕 タデウシュ・コタルビンスキ (Tadeusz Kotarbiński) は、戦間期ポーランドにおけるポーランド学派（ルヴーフワルシャワ学派とも言う）の代表的な哲学者。ポーランド学派は、文化史上稀に見る社会的色彩の濃い文化運動を担った、論理学者・哲学者・数学者らの総称である（『岩波哲学・思想事典』の「ポーランド学派」の項目等を参照した）。

科学者の倫理的質と誠実性、また自分の研究遂行の際および他の科学者たちの研究の評価の際における公平性についての**自主的な評価の基準**を、科学の主要スポンサーとしての国家が策定するのも悪くはないかもしれない。少なくとも、そのような問題を提起すれば、それだけで多くの人々がそれについて深く考えざるを得なくなるだろう（科学上の顕著なブレイクスルーが生じていない現状を背景として、外部から人為的に押しつけられている現行の形式的な研究活動評価基準は、研究者たちが価値ある成果を得ることを促進しているどころか、むしろ計画達成にやっきになり、「権力を握っている派閥により近いところに群がり集まる」ことを余儀なくさせている）。最大限幅広いテーマに関する論議を受け入れ、あるいは自らが犯した誤りを認めようとする適切な態度を研究環境のうちに育む必要がある（誤りを犯すことにも、誤りを認めることにも悲劇的なことは何もない）。そうなったとき、現在権力の座についている言葉の本来の意味での疑似科学者たちを一掃し、科学界の役人たちの派閥主義と権威主義を消滅させる、科学界の自己浄化プロセスが再び始まる可能性がある。科学に携わる人々が、この活動分野における「自分だけの陽のあたる場所」を追い求めるのではなく、本物の真理の探究に取り組むことを希望する。そして、真の科学者たちが科学界により多く存在するようになることを願う。科学という活動の舞台には、競争心に燃えたせつかな連中ではなく、互いに志を同じくする仲間である、正直で誠実な人々しか存在してはならない。

## 文 献

[本訳書では原文に記されている頁番号はすべて省略し、章節番号のみを示した。]

- [1] S.N. Artech 『相対性理論の基礎に対する批判』（モスクワ, LKI/URSS, 2007, 全 224 頁）, <http://www.antidogma.ru>.  
[邦訳版はサイト「物理の旅の道すがら」<http://naturalscience.world.coocan.jp/>に掲載されている。]
- [2] R. Feynman, R. Leighton, M. Sands 『ファインマン物理学』第 3 巻（Mir, モスクワ, 1977 ; 第 9 版, モスクワ, LIBROKOM/URSS, 2014）.  
[本書の露訳版, 邦訳版および原著は, 巻の構成と章番号が互いに異なっている（原著（英語）はネットで入手可能：<http://www.feynmanlectures.caltech.edu/>の特に Volume I と II）。アルテハによる本書（文献 [2], [3], [11]）からの引用箇所は, 邦訳版ではファインマン, レイトン, サンズ『ファインマン物理学 II : 光 熱 波動』（富山小太郎訳, 岩波書店, 1968）, 『同上 III : 電磁気学』（宮島龍興訳, 1969）および『同上 IV : 電磁波と物性』（戸田盛和訳, 1971）に含まれている。そこで, 本訳書の文献指示は, 露訳版の章節番号は省略し, まず「邦訳版の巻番号, 章節番号」, 次に「原著の巻番号, 章節番号」を用いて, 例えば [2, IV, §5-2, 原著 II, §26-2] のように表記した。]
- [3] R. Feynman, R. Leighton, M. Sands 『ファインマン物理学』第 5 巻（Mir, モスクワ, 1977 ; 第 9 版, モスクワ, LIBROKOM/URSS, 2014）. [上記 [2] の訳注参照]
- [4] E. Purcell 『電磁気（パークレー物理学コース）』第 2 巻（Nauka, モスクワ, 1971）.  
[原著（英語）はネットで一部のみ入手可能: "Scribd. Edward M. Purcell, Electricity and Magnetism, Berkeley Physics Course"で検索。邦訳版は E. パーセル『電磁気（パークレー物理学コース）』（上・下）（飯田修一監修・翻訳, 丸善, 1989, 復刻版 2013）。アルテハが参照している露訳版（ネットで入手可能）は原著の一部を削除した独自の章立てになっている（原著の版が異なっている可能性もある）。本訳書の文献指示では原著の章節番号に従ったが, 露訳版に対応する章節番号を確認できなかった箇所が一部にある。]
- [5] L.D. Landau, E.M. Lifshitz 『場の理論』（Nauka, モスクワ, 1988）.  
[邦訳版は L.D. ランダウ, E.M. リフシッツ『場の古典論—電気力学, 特殊および一般相対性理論（ランダウ=リフシッツ理論物理学教程）』（恒藤敏彦, 広重徹訳, 東京図書, 1978）。日本で「大教程」と略称されている本書の基礎概念を簡潔に体系化したものの邦訳版として, L.D. ランダウ, E.M. リフシッツ『力学・場の理論—ランダウ=リフシッツ物理学小教程』（水戸巖, 恒藤敏彦, 廣重徹訳, 東京図書, 1976 ; ちくま学芸文庫, 筑摩書房, 2008）がある。「大教程」からの引用箇所にはほぼ相当する記述が「小教程」に見つかった場合には, 例えば [小教程§45] と付記し, 参照の便を図った。原著（ロシア語）はネットで入手可能: [http://alexandr4784.narod.ru/landau\\_02.html](http://alexandr4784.narod.ru/landau_02.html). 英訳版 "L.D. Landau, E.M. Lifshitz, The Classical Theory of Fields" も <https://archive.org/details/TheClassicalTheoryOfFields> で入手可能。]

- [6] I.E. Tamm 『電気理論の基礎』 (Nauka, モスクワ, 1966) .  
 [原著 (ロシア語) はネットで入手可能 (原著名を入力) 。英訳版 "I.E. Tamm, Fundamentals of The Theory of Electricity" もネットで入手可能 : <https://archive.org/details/TammElectricity>。原著と英訳版は節番号が異なるので, 本訳書の文献指示では例えば原著が§21, 英訳版が§2.2 の場合には [6, §21, 英訳版 §2.2] のように表記した。]
- [7] W. Panofsky, M. Phillips, **Classical Electricity and Magnetism**, (Addison-Wesley, Massachusetts, 1962).  
 [邦訳版は W.K.H. パノフスキー, M. フィリップス 『電磁気学 (上・下)』 (林忠四郎訳, 1967~1968 ; 新版 (POD 版) , 2002, 吉岡書店。原著 (英語) はネットで入手可能 : "W. Panofsky, M. Phillips, Classical Electricity and Magnetism, [PDF]" で検索。]
- [8] D.V. Sivukhin 『電気』 (Nauka, モスクワ, 1977) .
- [9] L.D. Landau, E.M. Lifshitz 『連続媒質の電気力学』 (Nauka, モスクワ, 1992) .  
 [邦訳版は L.D. ランダウ, E.M. リフシツ 『電磁気学 連続媒質の電気力学 1・2 (ランダウ=リフシツ理論物理学教程)』 (井上健男他訳, 1982~1983, 東京図書) 。原著 (ロシア語) はネットで入手可能 : 例えば <http://www.kinetics.nsc.ru/chichinin/pmlic.htm> で原著名を入力して検索 (djb ファイル) 。]
- [10] J. Guala-Valverde, **On the Electrodynamics of Spinning Magnets**, (Spacetime & Substance, Vol. 3, No. 3 (13), 2002, pp.140-144).  
 [ネットで入手可能 : 著者名・論文名で検索。]
- [11] R. Feynman, R. Leighton, M. Sands 『ファインマン物理学』 第 6 卷 (Mir, モスクワ, 1966) . [上記 [2] の訳注参照]
- [12] J.J. Smulsky 『相互作用理論』 (ノヴォシビルスク, ノヴォシビルスク大学出版部, ロシア科学アカデミーシベリア支部地質学・地球物理学・鉱物学合同研究所学術出版センター, ノヴォシビルスク, 1999) .
- [13] J. Guala-Valverde, P. Mazzoni, R. Achilles, **The homopolar motor: A true relativistic engine**, (American Journal of Physics, V. 70, N 10, 2002, p.1052).  
 [ネットで入手可能 : 著者名・論文名で検索。]
- [14] R. Achilles, **Again on the Guala-Valverde Homopolar-Induction Experiments**, (Spacetime & Substance, Vol. 3, No. 5 (15), 2002, pp. 235-237).  
 [ネットで入手可能 : 著者名・論文名で検索。]
- [15] S.N. Arteha 「相対性理論のいくつかの側面に対する批判」 (『空間・時間・引力. 第 9 回国際科学会議 (2006 年 8 月 7~11 日) 資料』, Tessa, サンクトペテルブルク, 2007, 7~17 頁) . <http://www.elibrary-antidogma.narod.ru/bibliography/Arteha2.doc>  
 [邦訳版はサイト「物理の旅の道すがら」 <http://naturalscience.world.coocan.jp/> に掲載されている。]

### 追加文献

- [16] J.J. Smulsky 『相互作用理論』 (ノヴォシビルスク, ノヴォシビルスク大学出版部, ロ

シア科学アカデミーシベリア支部地質学・地球物理学・鉱物学合同研究所学術出版センター, ノヴォシビルスク, 1999, 全 294 頁) .

- [17] E.B. Klyushin『自分に対する物理学講義』(モスクワ, Bumazhnaya Galereya, 2005, 全 336 頁, 第 2 版) .
- [18] T.A. Lebedev『現代物理学のいくつかの論争問題』(レニングラード工業大学, 1955, 第 2 部, 全 67 頁).
- [19] O.H. Derevenskii 「電気との目隠し鬼ごっこ」, <http://newfiz.info/elvo-opus.htm>  
[邦訳版はサイト「物理の旅の道すがら」<http://naturalscience.world.coocan.jp/>に掲載されている。]
- [20] R.V. Fyodorov『物理学：危機的問題，新たな始まり』(チェルノフツィ, Prut, 2005, 全 400 頁) .
- [21] Yu. I. Petrov『物理学の基本的観念のパラドックス』(モスクワ, URSS, 2012, 全 336 頁, 第 2 版) .
- [22] V.M. Dryukov『物理学者たちは何について沈黙しているか』(Grif i K, トゥーラ, 2004, 全 96 頁) .
- [23] G.V. Nikolaev『現代電気力学とその矛盾性の原因』(Tverdinya, トムスク, 2003, 全 149 頁) .
- [24] L.A. Shipitsin『電気力学と量子力学の流体力学的解釈』(モスクワ, MPI, 1990, 全 49 頁) .
- [25] A.L. Shalyapin, V.I. Stukalov『古典電気力学・原子物理学概論』(UMTs UPI, エカテリンブルク, 2006, 全 490 頁) .
- [26] H. Poincaré『科学論』(Nauka, モスクワ, 1983, 全 736 頁) .
- [27] B.M. Moiseev『光量子の物理的モデル』(モスクワ, LIBROKOM, 2011, 全 80 頁) .

## [訳注] 訳文中の「物質\*」について

他の欧米諸語と同様、ロシア語には「物質」を意味する複数の単語がある。物理学で主に使われている用語は「**материя** [materia]」と「**вещество** [veschestvo]」である。本来、この2つの単語の日常的用法における概念は大きく重なっており、両者の違いを文脈から切り離して定義することは事実上不可能である。しかし、ロシアの物理学界ではこれらの用語の使い分けについてある程度の合意が成立しているように思われる（当然のことながら、両者の概念の具体的な内容は論者の立場によって異なる）。

しかも、本書の著者はこれらの用語を明確に区別して使っている。したがって訳文の理解に混乱を生じさせないためには、両者を訳し分けなければならない。しかし、訳者の知る限り、これらの用語に対応する日本語の物理学用語は「物質」の1語しか存在しないため、異なる用語によって訳し分けることはできない。そこで、多少煩わしさを感じさせるかもしれないが、「**материя**」は「物質\*」、**「вещество」**は単に「物質」と表記することで両者の違いが分かるようにした。

かなり大まかな括り方をすると、「**материя** (物質\*)」は「**вещество** (物質)」の上位概念であり、「**материя**は**вещество** および場などからなる」と言うことができる。おそらく、日常的な語感では、日本語の「物質」から思い浮かぶのは「**вещество**」のほうであろう。

ロシア語版 Wikipedia の記事「**Материя**」は次のように説明している（一部のみ抜粋）。

「**материя** —— 客観的現実, 空間の内容物, 科学および哲学の主要カテゴリーの一つ, 物理学の研究対象。

物理学は、空間と時間（時空）の中に存在する何ものかとしての **материя**（ニュートンに始まる理解——空間は事物の入れ物, 時間は事象の入れ物）, または空間と時間の性質をそれ自体が与える何ものかとしての **материя**（ライプニッツに始まり, 後にアインシュタインの一般相対性理論において表現された理解）を記述する。時間の中で様々な形態の **материя** とともに生じる変化が物理的現象をなす。物理学の主な課題は、あれこれの種類 **материя** およびその相互作用の性質を記述することにある。

#### 主な種類の **материя**

現時点では3つの形態の **материя** が存在する。

・ **вещество** —— ハドロン物質, バリオン物質 / 古典的理解における物質, 反物質 / 中性子物質 / その他の種類の物質 / クォークグルーオンプラズマ / 仮説上のプレクォーク超高密度物質\*形成物

**вещество** とは異なり, 場の内部に空虚はなく, 場は絶対的な稠密性を持っている。

- ・ 場（古典的意味での） —— 電磁場, 重力場 / 量子場
- ・ 物理的本性が不明な物質的\*対象 —— 暗黒物質\*, 暗黒エネルギー