

ハイゼンベルク方程式を最初に書いた人は ハイゼンベルクではない

谷村 省吾

名古屋大学大学院情報科学研究科¹

(2011年11月22日受理)²

今日「ハイゼンベルク方程式」と呼ばれている式を最初に書いた人はハイゼンベルクではなく、「ニュートン運動方程式」を最初に書いた人はニュートンではないといったエピソードを紹介し、なぜそういった食い違いが生ずるのか考察し、学術誌・学会誌の存在意義を考え直す契機を提供したい。

1 冊子版素粒子論研究の終刊に際して

『冊子版素粒子論研究』が最終刊を迎えるとの報に触れ、私でも残念な思いがあり、寄稿したいと思いました。個人的なことですが、私は修士論文を素粒子論研究1992年85巻1号に掲載していただいたのが素研への初めての寄稿であり、そもそも学術誌に寄稿する初めての経験でした。名古屋大学E研の沢田昭二先生や北門新作先生に(E研では先生を先生とは呼ばないのですが)、君の修論は素研に載せるといいよ、と言っていたら、投稿しました。論文のタイトルは「トムとベリー」(量子力学のベリー位相と猫の宙返り運動をゲージ理論で統一的に記述するという研究であり、猫の代表格のトムと物理学者のベリーの名前をくっつけて題名にしました。明らかに「トムとジェリー」の洒落です)というものでした。そんな冗談のようなタイトルでよく掲載してもらえたなと思いましたが、おかげさまで、その論文は仲間内で面白がられ、「トムとベリー」は私の書いたものの中では最も有名な論文になりました。また、私の修論に前後して、並木美喜雄氏による「私大問題(?)と若手グループ」(1991年83巻5号と1992年85巻1号)という記事のやりとりを読み、素粒子論研究を通して研究者たちの真摯な討議に触れることができました。その後も素粒子論研究には研究会報告や自分の講義ノート(2003年106巻6号)を掲載していただきました。自分の歩みは素研に刻まれているという思いがありますから、素粒子論研究冊子体発行の終了には感慨を覚えます。

誰の眼にも明らかなことですが、現代は、ネット・電子媒体で情報を伝達・記録するのが当たり前の世の中になりました。紙媒体の雑誌はいずれは消えゆく運命にあると思

¹e-mail: tanimura[AT]is.nagoya-u.ac.jp

²素粒子論研究(冊子版)119巻4C号(2012年2月号)pp.280-290に掲載。電子版 Vol. 10, No. 3(2011). 2012年3月13日に参考文献の記述を増補。

ます。とくに読者層が限定されている学術誌・同好会誌をいちいち印刷・配布する必要はないでしょう。『冊子版素粒子論研究』への投稿原稿が少なくなり、発行回数を減らしているというニュースを読んだとき、私も素粒子論研究を盛り上げるために何かできることはないかと考えはしたのですが、名案も出せず、世の趨勢に抗えないまま座視しておりましたことを申し訳なく思います。素粒子論研究の発行母体である素粒子論グループのメンバーの多くも同様の気持ちでおられることと思います。

しかし『電子版素粒子論研究』が発刊され、素粒子論研究は装いを新たにし、魅力的なものになりつつあるように見えます。カラーページはもちろんのこと、音声ファイルも掲載できるようになりましたし、ネットのリンクも利用できます。今後、アニメーションや、インタラクティブなアプリケーションの利用も進むでしょう。誰でもネットで情報を発信できるのなら会誌という形をとらなくてもよいではないか、という意見もあり得るでしょうが、誰でも個人でウェブページを開設・維持するスキルがあるわけではありません。また、あるレベルの同業者集団が作ったアーカイブなら有用で信用のおける情報の保管場所になるでしょう。電子版素粒子論研究の存在意義は大いにあります。残る問題は、これだけのシステムを誰が管理・改良していくかということと、そのコストを誰がどう負担するかということでしょう。その点については関係する方々が賢明な準備をされていることだろうと思います。そうすると残る問題は、素粒子論研究というメディアを活かした魅力的なコンテンツを我々は提供し続けるか？ということだけだと思います。

2 ハイゼンベルク方程式の逸話

僭越な話はこれくらいにして、学術誌としての素粒子論研究にふさわしい話を書きたいと思います。つまらない記事で貴重なページをふさいでしまったらごめんなさい。私が数年前から気づいていたこと、「ハイゼンベルク方程式を最初に論文に書いた人はハイゼンベルクではない」というエピソードを、少し引き延ばしてお話ししたいと思います。

物理では「 ψ の法則」とか「 ψ の方程式」と呼ばれるものを、たいていは教科書を通して学びます。しかしよく調べてみると、それを最初に発見した人は ψ さんではない、という事実気づくことがあります。教科書の著者も決して悪意はないはずだと思うのですが、そうした誤謬が生じる理由はいろいろあるでしょう。

理由(1)教科書というものは、歴史的順序に沿って試行錯誤の事実を羅列するよりも、学習者が理解し記憶しやすいように、論理的整合性を優先して理論を再構成して提示する。そのとき人の名前を言わばアイコンとして概念や法則に付けてしまう。(2)教科書の著者も、いちいち原論文にあたって概念・法則の第一発見者と内容をつきとめてから本を書いているわけではない。たいていは自分が受けた講義や読んだ本を通して名前を憶えたのであり、出典を確認したわけではない。つまり教科書は2次情報・3次情報であり、誤情報を伝えてしまうことがある。(3)第一発見者は存命ではないことが多く、また外国人

であることも多く、第一発見者に義理立てする必要を感じないし、間違っただけを書いても文句を言われぬ。 (4) 物理学の学習者・研究者が知りたいのは、普遍的な概念・法則・科学的事実であり、個人・歴史ではない。

もちろん、物理法則や数学の定理に「 の法則」、「 の定理」という人名を冠する必要があるのか？という論点もあり得るでしょう。しかし、人名が付いていることは、アイコンとしての覚えやすさがありますし、親しみも湧きますし、「こんなふうに自分も名前を残したい」という動機付けにもなっていると思います。人名を冠することの弊害よりは長所の方が大きいでしょう。

また、概念の境界の問題があります。概念というのは、土地とは違って拡張が容易で、石油のように使ったらなくなるものでもなく、ただでいくらでも使えるものですので、便利で普遍性のある概念は節操なくどんどん拡張して使われる傾向があり、当初の発見者が全然意図していなかったところでも使われることがあります。量子力学の「ベリーの位相」 [1] などがそうした例として挙げられるでしょう。「ベリーの位相」は Michael V. Berry さんが発見した文脈とは全然異なる文脈に連れ出されて行っています。もともと「外部パラメータを持つハミルトニアンが離散的エネルギー固有状態を持つとき、外部パラメータのループ状の準静的変化に伴ってエネルギー固有状態に生じる位相ホロミーが物理的影響を持つ」ことをベリーは発見したわけですが、この条件を全然満たさない現象であっても「ベリーの位相」と言ってしまう論文はたくさんあります。準静的でなくてもよいし、ループでなくてもよいし、縮退点がなくともよいし、エネルギーが連続スペクトルであってよい。全部「ベリーの位相 (あるいは topological phase, geometric phase)」と呼ばれます。ベリーさんも自分のアイディアの適用範囲が拡大されていくことを怒る必要もないので看過しておられるのだらうと思いますが、あまり無節操に使い回されるのもどうかと思います。それにしてもトポロジーとは無関係なものまで topological phase と呼ぶのはおかしいという点については以前、藤川和男氏が物理学会誌上で指摘されています [2]。

さて、標題に掲げたハイゼンベルク方程式の初出問題ですが、これは私一人が気づいていることではありません。佐々木隆氏も同様のことを書いておられます [3]。私の調査は手緩いかもしれませんが、調べた限りでは以下のようなことがわかりました。通常、ハイゼンベルクの運動方程式と呼ばれるものは

$$i\hbar \frac{dA}{dt} = [A, H] \quad (1)$$

です。現在入手が容易な資料は van der Waerden の本 [4] ですが、これを読む限りでは、この方程式 (1) は Born, Jordan の 1925 年の論文に初めて現れます。彼らに先んじて 1925 年の Heisenberg の論文は行列力学の原形を示していますが、論文中にこの式をあからさまには書いていません。そして同年の Dirac の論文にはこの式が書いてあります。ですからこの方程式 (1) は「Born-Jordan-Dirac の方程式」と呼ぶのがふさわしいものです。ま

た、正準交換関係

$$[q_r, q_s] = 0, \quad [p_r, p_s] = 0, \quad [q_r, p_s] = i\hbar\delta_{rs} \quad (2)$$

を「ハイゼンベルクの交換関係」と呼んだり、この関係で定まる代数を「ハイゼンベルク代数」と呼ぶことがあります。Heisenberg は1925年論文にこの式を書いていません。この式(2)が初めて書かれたのも Born-Jordan の論文と Dirac の論文です。Born-Jordan は作用積分の量子化条件から(2)を見つけています。Heisenberg も作用積分の式を書いているのですが、変数を (q, p) にとらず (x, \dot{x}) にとっていて、一般的な交換関係には達していません。この変数の違いは些細な違いではありません。1926年には Born-Heisenberg-Jordan の共著論文が出版されますが、そこでは正準交換関係は所与のものとして扱われています。この発見の経緯は Born 自身のノーベル賞講演 [5] や石井の本 [6] に書かれています。また Heisenberg 自身ノーベル賞講演で(2)は Born, Jordan, Dirac のものだと言っています。

そうすると、いつごろからどういう経緯でこの式(1)は「ハイゼンベルク方程式」と呼ばれるようになったのか? という疑問が湧きます。歴史的変遷を追跡できる代表的な文献として Dirac の *The Principles of Quantum Mechanics* [7] を調べてみました。この本はもちろん有名で影響力のある本ですが、版を改めるごとに内容の大幅な取捨選択が施され、文章の細かい部分まで手が加えられています。従って Dirac の思考の足跡をたどることができる資料になっています。

1930年の first edition, p.97 には交換関係も運動方程式も書かれており、それぞれ quantum conditions, equation of motion と書かれています。"Heisenberg" の名前は出て来ません。p.99 に Schrödinger's Form for the Quantum Conditions という表題の節があり、p.112 には Schrödinger's wave equation が出て来ます。p.113 から Heisenberg's Matrices という節で、時間発展を状態ベクトルに押し付ける Schrödinger representation と、物理量の方に押し付ける Heisenberg representation を導入していますが、運動方程式を Heisenberg equation とは呼んでいません。p.114 には This scheme of matrices, in which the Hamiltonian is diagonal and the matrix elements all vary with time according to the law (3), was discovered by Heisenberg in 1925 and was historically the first form of quantum mechanics. と書かれています。

1935年の second edition になると、p.91 で正準交換関係(2)を fundamental quantum conditions と呼んでいます。p.113 に Schrödinger's Form for the Equations of Motion という節があり、p.116 には Schrödinger's wave equation があります。続いて、p.118 から Heisenberg's Form for the Equations of Motion という節で運動方程式(1)も書いていますが、ずばり Heisenberg's equations of motion とは呼びません。この中で Schrödinger picture, Heisenberg picture という言葉も出て来ます。

1947年の third edition ではどうでしょうか? p.113 には Heisenberg dynamical variables, Schrödinger dynamical variables という言葉が出て来て、Heisenberg's form for the

equations of motion あるいは quantum equations of motion in Heisenberg's form という言い方をしています。そしてついに、p.115 に Heisenberg's equation of motion という表現が出て来ます。私が探した限りでは、これが Dirac の The Principles of Quantum Mechanics における “Heisenberg equation” の初出場面でした。p.136 では調和振動子の運動方程式をハミルトニアンから導くときに the Heisenberg equations of motion と書いています。

1958 年の fourth edition でもこのあたりの記述はあまり変わっていません。皆さんも自分のなじみの量子力学の教科書で「ハイゼンベルクの方程式」がどういう扱い方をされているかチェックしてみると面白いでしょう。ちなみに「シュレーディンガーの波動方程式」の方は、そういうブレはないように思われます。

1925 年の論文で Heisenberg が扱っていたのは、現代的な記法で書けば

$$\langle m|A(t)|n\rangle = \langle m|A|n\rangle e^{i(E_m - E_n)t/\hbar} \quad (3)$$

のような時間依存する行列要素でした。Heisenberg は matrix という言葉は使っていませんでしたが、行列の積と同等な積演算が定義されることに気づいていたし、それが非可換な積になることもはっきりと論文に書いています。しかし Heisenberg はハミルトニアンに相当するものは導入していませんでした。また正準交換関係のような基本的な関係式もまだ見出していませんでした。正準交換関係とハミルトン演算子を初めて量子力学に導入したのは Born, Jordan, Dirac でしょう。これで物理量の一般的な運動方程式を書けるようになりました。現代の物理学者であれば、ハミルトニアンを抜きにしてハイゼンベルクの運動方程式とは呼ばないでしょう。でも 1925 年の時点で Heisenberg は非線形振動子の運動方程式

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -f(x) = -\omega_0^2x - \lambda x^2 \quad (4)$$

を書いて行列要素 $\langle m|x|n\rangle$ を計算していますが、それ以上に一般的な運動方程式を書く方針は持っていなかったように見えます。正準交換関係を知らずにどうやって行列要素を計算するのだと思われるでしょうが、Heisenberg は Kramers の分散関係を使っていて、それが実質的に正準交換関係の役割を果たしています。

同時代人である Dirac がこれらのことを知らなかったはずはありません。しかし、Dirac は教科書の記述を、運動方程式発見の功績は Heisenberg のものであるかのような書き方に徐々に移行していきました。私の想像ですが、Schrödinger picture 対 Heisenberg picture という構図を明示した方がわかりやすく、「Schrödinger の波動方程式」に対比させて「Heisenberg の運動方程式」を並べた方がきれいだと考えて Dirac はこういう書き方にしたのでらうと思います。Dirac はクリアでロジカルな理論を提示したかったのであり、この方程式は誰が最初に書いたかなどということにはあまり興味がなかったのだらうと思います。それにしても、まさに量子力学の立役者の一人であり、すべての事情に通じていたはずの Dirac が、自分が第一発見者であることを書き残そうという執着心をまったく見せず、量子力学の論理構成を優先して人の名前をシンボリックに使っているのは驚きです。

3 ニュートン、アインシュタインは何をした人？

おそらく科学史上には似たような出来事は何度も起きているのでしょう。言わば名前を盗られた、あるいは名前を忘れられた真の第一発見者がたくさんいるのでしょう。

例えば、山本義隆氏の著作 [8] によれば、今日、人々が「ニュートンの運動方程式」と呼んでいる式

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F \quad (5)$$

を明確に力学の基本原理として位置付けたのは、ニュートンではなくオイラーだそうです。「ニュートンは微分積分の発見の先取権をめぐるライプニッツと争った」という逸話は有名ですが、そもそもニュートンは力学を微分方程式で定式化していませんでした。また、「ニュートンは万有引力の逆 2 乗則から運動方程式を解いてケプラーの惑星運動の法則を導いた」という言われ方もしますが、ニュートンが本当にしたことは、楕円軌道から力の逆 2 乗則を導くことです（微分方程式を解いて惑星の軌道を得たのは Hermann と Johann Bernoulli で、1710 年のことだそうです。詳しくは山本 [8] をご覧下さい）。いまでこそ我々には「力学の運動方程式は力が与えられたときに物体の運動（軌道）を決めるものだ」という考え方が染みついています。ニュートンにとっての運動法則は「運動（軌道）が与えられたときに力を求める」ための規則でした。現代では「力から運動を求める」のが順問題ですが、ニュートンの時代は「運動から力を求める」のが順問題でした。つまり、どこかで順問題と逆問題が入れ替わったのです。ニュートンは幾何学的極限操作とでも呼ぶべき天才的方法を編み出して、計算よりはむしろ作図によって力学の問題を解きました。ニュートンの技巧があまりにも天才的で、余人にまねのできない技術だったので、オイラーが、誰でも計算すればできる方法として微分方程式の形の力学を整備したのです。ニュートンの『プリンキピア』初版が出たのが 1687 年、オイラーの『力学：解析学的に示された運動の科学』が出版されたのが 1736 年、オイラーが運動方程式 (5) が力学の基礎原理だと宣言する論文を提出したのが 1750 年だそうです。ですから、ニュートンとオイラーが活躍していた時期は約 50 年の隔たりがあります。その頃は誰も「ニュートンの運動方程式」とは呼んでいませんでした。しかし、大陸で発達した解析的スタイルの力学を 19 世紀のイギリスの学者たちが取り入れて教科書を書く過程で「ニュートン力学」という形に整理していったようです。私はこれらのことを科学史の本 [9] の著者の一人である有賀暢迪のぶみち氏の講演を機に知りました。

別の例を引き合いに出すと、アインシュタインの有名な功績の一つとして「光電効果の解明」があります。確かにアインシュタインが光量子仮説を唱えた 1905 年の論文 [10] には光電効果のことも書かれていますが、それは論文の最後の方に光量子仮説の説得力を増すための証拠の一つとして書かれています。もちろんそれも重要な部分ですが、論文の主たる狙いは、黒体放射のヴィーンの公式（プランクの公式ではなくヴィーンの公式です）は光が粒子だと考えるとうまく説明がつくことを示すことにあり、そちらの議論に紙数の

大部分が費やされています。私は田崎晴明氏の本 [11] を読んでこのことを知りました。アインシュタインはその後にも輻射の量子論について論文をいくつか書き、1907年にはプランクの公式を導出していますが、量子化されているのは「共鳴子」のエネルギーだという考えに基づいています。「共鳴子 (resonator)」とはプランクが言い出した概念で、現代的な視点から見ると何なのかははっきりしませんが、アインシュタインは「空間中に束縛された電子」(1905年)、「物質と輻射の間のエネルギーのやりとりの仲立ちをする、一定振動数を持つイオン」(1907年)などと書いており、ずばり「光子」だということまで踏み込んでいません。輻射の吸収・放出の素過程において交換されるエネルギーだけでなく運動量も量子化されているという結論は1917年の論文に現れて来ますが、それでも「光子の運動量」とは言っていません。つまり光量子論は1年やそこらで出来上がったわけではありません。また、アインシュタインはもっぱら光電効果にこだわっていたわけではありません。それでも「アインシュタインと言えば光電効果」が有名になってしまったのはなぜでしょう？ 人々が原論文を読まずに、噛み砕かれた解説書を頼って物理を学ぶから元の論文の内容を知らない、というのが最大の理由だとは思いますが、それにしても量子力学の教科書が「光電効果」の解説に多くの紙数を割いているようにも見えません。なぜ「アインシュタインの光量子論」よりも「アインシュタインの光電効果」のフレーズが有名になってしまったのでしょうか？ それはアインシュタインへのノーベル賞授賞理由が For his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect (理論物理への功労、とくに光電効果の法則の発見に対して) となっているからではないでしょうか。これもまた時代の影響下での評価だったのでしょうか。私が言いたかったことは、「1905年にアインシュタインは光は粒子であると考えて光電効果を解明した」という紋切型の言明で満足してしまうと量子論に関するアインシュタインの貢献の大部分を見落とすことになる(しかも黒体輻射の問題は1900年のプランクの公式の発見で片が付いたかのような誤った印象を抱く)ということです。

付け加えますと、光電効果は光量子仮説によらなくても、古典電磁気学と電子の量子力学によって定量的に説明できることを霜田光一氏や Lamb が示しています [12]。コンプトン散乱についても同様のことが言えます。我々は「 $\lambda = \lambda_0 \sqrt{1 - \beta^2}$ 」という現象は旧来理論では説明できなかったが新理論で解明された」という形の成功談を読み聞かされて物理を学ぶことが多いのですが、一つの説明で満足してしまうと、本当にそれしか説明方法はないのか？と突っ込んで考える機会を逸してしまいます。これは歴史的な文脈の問題と言うよりは、教育の問題であり、どれだけ広く深く物理を理解しているかという問題だろうと思います。

そのほかにも素粒子論の研究者になじみの深いローレンツゲージも、発案者は Lorentz (ローレンツ、オランダ人、ローレンツ力・ローレンツ変換で有名)ではなく、Lorenz (ローレンス、デンマーク人、電磁気学の研究で多くの功績がある) だったことは最近ちょっと有名になった話であり [13]、書かれたものを読んだ人も多いと思います。太田浩一氏 [13] は、ローレンツ力についてもグラスマン、ガウス、J. J. トムソン、ヘヴィサイドなどが

先んじて研究していることを指摘し、「ローレンツ力」と呼ぶ根拠はないとしています。

また、統計力学の久保公式の先駆的な公式を中野藤生氏が見出しておられたことも、ようやく最近認められてきました [14, 15]。また、それより以前に梅沢博臣氏・亀淵迪氏 [16] も外場に対するカレントの応答関数の式を書いています。「すべての次数の輻射補正を取り込んでいるという意味で、これは Schwinger の公式を一般化したものと見なせる」と論文に書いてありますが、摂動論によらずに(いわゆる)ハイゼンベルク演算子を用いてカレントの相関関数を書き下すというアプローチは当時としては革新的なものでした。後の久保公式は基本的にはこれと同じ流儀で定式化されています。梅沢・亀淵が扱っていたのは量子電磁力学の真空偏極であり、場の量子論の発散の分析に主眼が置かれていました。中野・久保が扱っていたのは有限温度平衡状態からのずれを誘起する外場に対する系の応答の分析であり、久保亮五氏の方が非平衡統計力学の一般論を作ろうという明確な狙いを持っておられたということでしょう。これらの業績を適切に位置づけできるほどの見識を私は持ち合わせておりませんが、梅沢・亀淵と中野・久保を対比させるなら、物理としての問題意識・文脈は別のところにあったが、数学的には類似の問題定式化をしていたケースと見た方がよいでしょう(それぞれの業績の歴史的意義については高橋康氏の論説 [16] と中嶋貞雄氏の論説 [17] が参考になります)。

4 その人のことを忘れない

調べものをしながら書いているうちにあれもこれもと気づくことがあって話が膨らんでしまいましたが、もともと私が言いたかったのはこういうことです：我々学者集団は、仲間としての学者の功績を尊重すべき立場にいます。なぜなら研究の真価を一番理解してくれるのは学者仲間だからです。尊重・顕彰の方法はいろいろあるでしょうが、一番の顕彰は「その人のことを忘れない」、「その人の学問上の寄与を正確に記憶して大切にすることだ」と思います。『冊子版素粒子論研究』の最終号にかこつけて言うわけではありませんが、なぜ我々は学術誌・学会誌を発行し交換し保存するのか、いま一度思い直す機会になったのは本当のことです。

長年にわたって『冊子版素粒子論研究』の発行を支えて下さった方々、とくに最後の冊子版の編集長を務められた笹倉直樹氏と、理論物理学刊行会の職員として素研の刊行に長年携わってこられた野坂京子さんに感謝と尊敬の意を表し、『電子版素粒子論研究』の益々の発展を祈って、この拙文を締めくくります。

平成 23 年 11 月 20 日 谷村 省吾

参考文献

- [1] M. V. Berry, “Quantal phase factors accompanying adiabatic changes,” Proc. R. Soc. Lond. A **392**, 45-57 (1984).
- [2] 藤川和男「ベリー位相を再考する」日本物理学会誌 2007 年 3 月号 pp.163-171.
- [3] 佐々木隆「ハイゼンベルグ方程式」数理科学 2009 年 6 月号 pp.24-29.
- [4] B. L. van der Waerden (editor), Sources of Quantum Mechanics, Dover (1968).
- [5] ノーベル賞講演：M. Born, “The statistical interpretations of quantum mechanics,” (1954), W. Heisenberg, “The development of quantum mechanics,” (1932).
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/
- [6] 石井茂「ハイゼンベルクの顕微鏡：不確定性原理は超えられるか」日経 BP 社 (2006).
- [7] P. A. M. Dirac, The Principles of Quantum Mechanics, Oxford Clarendon Press (1930, 1935, 1947, 1958).
- [8] 山本義隆「古典力学の形成：ニュートンからラグランジュへ」日本評論社 (1997).
- [9] 中根美知代ほか共著「科学の真理は永遠に不変なのだろうか：サプライズの科学史入門」ベレ出版 (2009). (これは谷村が聴いた講演とは別ですが)有賀暢迪「黎明期の変分力学：モーペルテュイ、オイラー、ラグランジュと最小作用の原理」数理解析研究所講究録No.1749, 16-29 (2011); <http://eagle.ifs.tohoku.ac.jp/rims2010lagrange/>
- [10] アインシュタイン(中村誠太郎、谷川安孝、井上健訳編)「アインシュタイン選集1：特殊相対性理論・量子論・ブラウン運動」共立出版 (1971).
- [11] 田崎晴明「統計力学 I」培風館 (2008).
- [12] 霜田光一「光の粒子性の証拠」パリティ1993 年 8 月号 pp.75-77. W. E. Lamb, Jr. and M. O. Scully, “The photoelectric effect without photons,” (1968); http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19680009569_1968009569.pdf. 日本物理学会編「量子力学と新技術」培風館 (1987) 第 9 章 光の量子効果(矢島達夫執筆): 従来、光の量子論でなければ説明できないと考えられていた現象の多くが、じつは古典論でも定量的に説明可能であることがわかってきて、光の古典論の復権が Neo-Classical Theory と呼ばれ、1965~1978 年頃に論争を巻き起こしたことが書かれています。

- [13] 太田浩一「電磁気学 I, II」丸善 (2000). 太田浩一「電磁気学の基礎 I, II」シュプリンガー・ジャパン (2007). (太田氏の本は、すべての発見・発案について第一発見者・原論文・出典をつきとめてから書く、という姿勢が貫かれており、驚異的な本になっています。) J. D. Jackson and L. B. Okun, “Historical roots of gauge invariance,” *Rev. Mod. Phys.* **73**, 663-680 (2001).
- [14] R. Kubo, “Statistical-mechanical theory of irreversible processes. I.—General theory and simple applications to magnetic and conduction problems”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **12**, 570 (1957). 木村初男、服部真澄、山下護、杉山勝「中野藤生先生インタビュー～線形応答理論から半世紀を経て～」*物性研究* 84-2, 157 (2005).
- [15] 中野藤生「ひとつの電気伝導計算法」*物性研究* 84-2, 205 (2005). 中野藤生「電気伝導計算のノート」*物性研究* 84-2, 215 (2005). これらは 1955 年の物性論研究に掲載された論文の再録。
- [16] 高橋康「昔話 名古屋における場の理論」*素粒子論研究* 114-6, 35 (2007), とくに p.47. H. Umezawa and S. Kamefuchi, “The vacuum in quantum electrodynamics,” *Prog. Theor. Phys.* **6**, 543 (1951), とくに p.548 (13), (14) 式. J. Schwinger, “Quantum electrodynamics. II. Vacuum polarization and self-energy,” *Phys. Rev.* **75**, 651 (1949), とくに p.658, (2.7) 式.
- [17] 中嶋貞雄「線形応答理論の成立」*日本物理学会誌* 1996 年 10 月号 pp.699-705. 物理学会誌の web page にも公開されています: http://www.jps.or.jp/books/50thkinen/50th_10/001.html 興味深い部分を引用しておきます: 筆者自身の立場を明らかにしておきたい、と前置きした上で《フォーマリズムよりも物理に重点をおく。実際、場の量子論や Green 関数法のコンセプトが普及した現時点で見れば、フォーマリズムとしての線形応答理論が明らかにしたことは、「摂動として加えた外場が、多体系の物理量の期待値に誘起する 1 次の変化は、系の遅延 Green 関数で表示できる」という、almost trivial な“数学的”結論に過ぎない。重要なのはその“物理的”意義の方である。電気伝導のような、Joule 発熱をともなう“非可逆”過程が、Green 関数のような“一見純粹に力学的”な表示によって記述できるという事実の発見、確認が重要なのである。力学法則の可逆性と熱現象の非可逆性を両立させるべく苦闘した Boltzmann から半世紀余を経て、非可逆過程の統計力学はようやくこの簡潔な表現に到達したといえよう。統計力学史上、画期的な成果である。》
- [18] 谷村省吾「21 世紀の量子論入門」*理系への数学* (現代数学社) 連載. (2011 年 3 月号, 8 月号, 12 月号で量子力学の歴史の一端を紹介しました。)