

付録B 素粒子論の流行模型

これまで半世紀以上に渡り、素粒子論では数々の「新しい模型」が一時的に大流行し、そして消えていった。ここでは、それらの模型を簡単に解説しておこう。今でも、その流行した「言葉」に惑わされている読者が少なからずおられるものと思われる。そしてこの解説を読まれると「物理の理論家は自然を理解する事より、何か他の別の目的で模型を作っているのではないか」という疑念を一部の読者は抱く可能性はあろう。さらに、多くの読者諸氏は物理学のノーベル賞に対してかなり強い疑問符を持たれてしまう事も充分あり得るだろうと思う。しかし現実を直視して、物理学界における問題点を明らかにして行かない限り、今後の物理の発展はあり得ないことも確かである。このため、ここでの記述は多少、辛口になっているかも知れない。

この章では一般相対論関係の流行語(ブラックホール、ダークマターなど)は解説していない。これらはすでに本文中で説明しているからである。但し、重力波の話は看過できない問題点を含んでいるため少し解説をしておこう。

1 大統一理論

そもそも弱い相互作用と電磁的な相互作用は完全に異なった自然現象を記述している模型である。それにもかかわらず、この二つの理論模型は同じ様な基礎をもつ理論体系によって統合されるべきであるという奇妙な論理が、ある時期に流行してしまった。この理由の一つには繰り込み理論の成功があるものと思われる。1950年代に提案された繰り込み理論は量子電磁力学(QED)において、大きな成功を収めたと考えられていたのである。その際、このQEDはゲージ理論であったため、ゲージ理論こそが基本的で正しい理論体系であるという強い思い込みが大半の物理学者の間に蔓延していたのである。

1.1 統一理論

電磁場と弱い相互作用を統一する模型として提案されたのが Weinberg-Salam 模型として知られている非可換ゲージ理論である。しかしこの模型ではその構成粒子が物理的観測量ではないため、弱い相互作用の理論としては使い物にならない模型である事が現在はわかっている。ところが当時、非可換ゲージ理論が持っている模型特有の困難を指摘する人はほとんどいなく、現実には最近までこの理論模型が標準理論として君臨していたのである。この標準模型が実験を再現できたのは、その模型が最終的には CVC 理論に帰着されるように調整されていたからであった。そしてこの CVC 理論は弱い相互作用に関係するほとんどすべての観測事実を正確に再現している優れた模型である。しかし実際問題としては、この標準理論の提唱者達の方がノーベル賞を受賞している。

1.2 大統一理論模型

量子電磁力学と弱い相互作用を「統一」するだけでは物足りなく思ったのか、これに強い相互作用をするクォークまで含めようとして考え出された模型が大統一理論である。もはや、お話にはならないレベルの理論体系であるが、これに結構、人々は引き付けられたものである。この理論によれば、陽子が崩壊する可能性があるとして、ある時期には「陽子崩壊」の実験まで計画され、実行されたのである。しかしながら、現在までのすべての実験結果は、陽子は崩壊しないことを示していて、陽子崩壊は完全に否定されている。

1.3 超新星爆発のニュートリノ

ここでこの陽子崩壊実験に関係するコメントであるが、KAMIOKANDE における陽子崩壊の実験では、その実験の試運転中に超新星爆発により放出されたと考えられる複数個のニュートリノを偶然に観測することができたのである。これは数百年に 1 回爆発するかどうかという銀河系内の超新星爆発をニュートリノによって観測できたと言う意味では重要な実験となった。しかしこれは偶然の発見であり、このニュートリノの観測事実を過大評価することは科学の進展にとってプラスにはならないことも注意する必要がある。

2 ゲージ理論

量子電磁力学では摂動計算により物理的な観測量が良く再現されている。そのなかで、電子の異常磁気能率の計算ではバーテックス補正に発散が出てくるため、この無限大の処理の処方箋として繰り込み理論が提案された。この繰り込み理論については本文中で解説しているのでここでは省略しよう。むしろ、その繰り込み理論の結果を利用した新しい計算手法が提案されたのであるが、それが繰り込み群方程式であった。

2.1 繰り込み群

繰り込み理論は摂動論によって計算されたものであるが、この結果を使って導出された繰り込み群方程式は摂動論を少し超えている理論であるという奇妙な触れ込みがなされた。このため、繰り込み群はある時期に一世を風靡したほどであった。しかしながら、繰り込み理論はどのように計算したとしても所詮、摂動論の範囲内であり、それ以上の物理的な結果を得る事は勿論、あり得ないことである。さらに言えば、最近になって量子電磁力学においては繰り込み自体が必要ではない事が証明されたため、繰り込み群方程式による模型計算はその根拠を完全に失ってしまったのである。

2.2 Wilson の繰り込み群

物性理論では Wilson が独自の方法で繰り込み群方程式を発展させている。これは一見、繰り込み理論とは異なるように見えるが、実際には摂動で計算した結果が、元の相互作用の形に戻るという要請から求められており、繰り込み理論と良く似た原理に基づいている。この模型は相転移現象に応用されたが、その模型の計算過程には飛躍が大きすぎて、物理的に受け入れることは非常に難しいものである。相転移は多体問題をきちんと解いてはじめて理解される問題であり、繰り込み群方程式のような、相互作用のある種の近似で評価して得られた方程式で理解されるような問題ではない事と関係している。物質と電子との散乱過程をどれだけ詳細に計算できるかと言う問題であろう。

2.3 漸近的自由

強い相互作用を記述する理論模型は量子色力学 (QCD) であるが、これは非可換ゲージ理論であるため、自由場の Hamiltonian がゲージに依存してしまい、摂動計算ができないことが証明されている。このことは、クォークとグルオンが閉じ込められている事と関係していて、実際、クォークもグルオンも自由粒子としては観測されていない。ところが、この QCD において無理矢理に摂動計算を実行して、その結果、繰り込み群方程式を導出した模型計算がある時期、流行したことがあった。この模型計算によると、クォークが大きな仮想的運動量を持っていると、そのクォークはほとんど自由粒子的になると主張したものである。しかしこれは物理的には何を言っているのか全く分からないものであった。ところが人々はこの主張を受け入れて、漸近的自由の概念がある時期に流行したものである。それどころか、この理論の提唱者達はノーベル賞を受賞している。

2.4 次元正則化 (Dimensional Regularization)

ゲージ理論 (特に QED) においてフェルミオンやフォトンの自己エネルギーを計算すると無限大が出てきてしまう。特に、フォトンの自己エネルギーを計算するとどうしても 2 次発散の無限大が現れてしまうのである。ところが、この 2 次発散があると繰り込みができないため、何とかこの 2 次発散を消去したいと当時の理論屋は考えたものである。それで様々な「正則化」を用いて、何とかこの 2 次発散を消去することを考案したのであるが、その中でも次元正則化と言う手法は非常に奇抜なアイデアに基づいている。それは運動量積分を実行するとき、 d^4p の積分を d^Dp (但し、 $D = 4 - \varepsilon$) の積分にすると言うものである。こうすると 2 次発散は消えてしまい、繰り込み可能な形が得られると言う主張であった。これは単純な数学なので簡単に検証できるのであるが、この 2 次発散が消えた理由は数学の公式の使い方が間違っていただけであった。今となっては、フォトンの自己エネルギーは観測量ではないので、2 次発散しても全く問題はない。しかし当時は、繰り込み理論に対する理解がひどく浅かったためか、2 次発散が自然に消えることは「重大な発見」として捉えられた。現在では、フォトンの自己エネルギーに関連するすべての観測量に発散がないため、繰り込み自体が不要である事が証明されている。そしてこの次元正則化は一体、何だったのかという疑念だけが残っている。ちなみにこの次元正則化の提唱者 2 人もノーベル賞を受賞している。

2.5 格子ゲージ理論

空間を格子にして、その格子上で場を定義して、その離散化された場によって経路積分を行う方法が格子ゲージ理論模型である。これは摂動計算を超えるものとして、ある時期にはかなり流行したものである。しかしながら人々は、経路積分の定義内容をきちんと検証するわけでもなく、場の理論における経路積分の定式化をそのまま鵜呑みにしてしまい、計算を実行してしまったのである。現実には、場の理論において、空間を格子状に切ってその点における離散化された「場」の量についての経路積分は、物理的にはまったく無意味であることが証明されている。この格子ゲージ理論で深刻な事は、計算が膨大な数値計算で実行されるため、ともするとその計算結果の物理的な議論がおろそかになってしまうことであろう。いずれにしても「通常の Hamiltonian 形式で不可能な非摂動計算は他の計算手法でも同様に不可能である」と言う事は物理学の基本事項でもある。

2.6 Wilson ループ

一時期、Wilson ループという計算法が爆発的に流行したことがあった。これは、例えばクォーク間のポテンシャルを計算するときゲージ不変な物理量として Wilson ループを考えればよいという提案である。しかしこの手法は、ちょっと調べればすぐにわかる事であるが、その模型の連続極限をとると元の理論(例えば、QED)には帰着されない事が証明されるのであった。従って、Wilson ループで計算した量がどのような物理量に対応しているのか不明である。結果的には、経路積分を使って求めた計算結果は単純に「幾何学的」なものであり、これは勿論、物理とは無関係である事が示されている。ところが、当時 Wilson はこの Wilson ループの計算によりクォークの閉じ込めの実験事実を証明したと主張したのである。このクォークの閉じ込めは線形閉じ込めであるとしているが、そこで使われた理論は実は QED 模型であり、QCD ではなかったのである。電子が閉じ込められてしまっただけでは、物理的に無意味な結論である事は自明である。ところがどういう理由からか、人々はこの理論を受け入れてしまったのである。これは「物理七不思議」の一つとも言えよう。ちなみに Wilson は相転移の業績でノーベル賞を受賞しているが、ある時期、ヒッピーになったとも言われている変人であった。

3 自然界の対称性

物理学においては、対称性が極めて重要な役割を果たしている。自然界において、系が持っている対称性が自然に破れたり、その系の保存則が外力なしで壊れたりすることはない。しかし一時期、対称性が自然に破れてしまうという理論や場の理論が持っている保存則が正則化をしたら自然に破れてしまったと言う模型計算が流行してしまったのである。

3.1 自発的対称性の破れ

南部達が提唱した「自発的対称性の破れ」の模型に関しては、この本ですでに充分詳細に説明しているので、ここでの解説は最小限にしておこう。自発的対称性の破れとは、カイラル対称性がある場の理論模型において、正しい真空はその対称性を失った状態が実現されていると言う主張である。しかし、これは単純な計算ミスであり、現実には「カイラル対称性は自発的に破れることはない」と言う事が証明されている。この理論が単に彼らの模型計算の主張だけで終わって他の模型に応用されていなければ、それ程重大な問題を惹き起こす事はなかったことであろう。

3.2 ヒッグス機構

この自発的対称性の破れの考え方がヒッグス機構という新しい模型に発展して行き、さらにそれが弱い相互作用に応用されるに至って、様々な深刻な問題を惹き起こす原因になってしまった。ヒッグス機構とは、自発的対称性の破れのためゲージ自由度が失われてゲージ粒子が質量を獲得するというお話である。しかしこれは理論的な整合性は皆無である。さらに言えば、この模型が応用された Weinberg-Salam 模型は非可換ゲージ理論であり、その構成粒子であるウィークボソンはそのカラー電荷がゲージ依存であるため厳密に解いたら観測量ではない。しかしヒッグス機構という近似をしたら、これらのボソンがうまく観測量になったと言う模型であるが、この奇妙な論理を信奉してきた物理屋が大半であったと言う事実は驚きでもある。ちなみに、この自発的対称性の破れの理論とヒッグス機構の提唱者はノーベル賞を受賞している。

3.3 カイラル・アノマリー

カイラル・アノマリーに関してこの本である程度の解説をしているので、説明は最小限にしよう。カイラル・アノマリーとは、質量のないフェルミオンの模型において通常成り立っているカイラルカレントの保存則が、アノマリーのため破れてしまうという主張である。このアノマリーは1次発散を正則化した時に現れる有限項のことである。しかし、アノマリー導出で用いられた1次発散は見かけ上現れたものであり、非物理的であることが証明されている。実際、物理的な三角形図の計算には1次発散は存在しなく、見かけ上の1次発散は単純な計算間違いを犯したために現れたものであることがわかっている。現実にはアノマリーなど何処にも存在していないし、保存則が外力なしで破れる事は自然界ではあり得ない事である。

3.4 超対称性

フェルミオンとボソンを同じ群の基底として取り入れる模型が超対称性理論として流行したことがある。これは弱い相互作用のボソンである W^- ボソンの電荷と電子の電荷が同じであると言う事が出発点であった。しかしながらこの電荷という概念が粒子の量子数であるという認識を持っていれば、ボソンの電荷とフェルミオンの電荷が同じであることは極めて自然であり、不思議なことではない。実際、電荷に対応している結合定数は W^- ボソンと電子では全く異なっている。ところが、当時はこのボソンとフェルミオンを同じ群の仲間として取り扱うことにより、電荷の同一性を導き出そうとした理論が流行したのである。これが超対称性理論である。しかし、基本粒子としてのボソンはウィークボソン (W^\pm, Z^0 ボソン) のみであり、この超対称性理論を支持する実験事実は何処にも存在していない。

3.5 超弦理論

この超対称性と一般相対論を基礎にして、さらにアノマリーを考慮した理論体系が超弦理論である。すなわち、ボソンとフェルミオンでアノマリーが打ち消し合う模型を作り、さらに一般相対論も含んでいると主張する超弦理論の理論体系が、ある時期に大流行したのである。ところが、一般相対論は正しい理論ではない事が証明されており、さらにアノマリーの存在も否定されたため、この超弦理論模型が依拠していた重要な理論的根拠はすべて消えてしまったのである。従って、この模型は今となっては最も無意

味な理論体系と言えるものである。現実には、超弦理論を標ぼうする人達は、この問題が発覚する前から「超弦理論模型でどのような物理的観測量が計算できるのか興味がない」と主張していたものである。この事は、この理論模型が最初から物理学の模型とはなり得ない事を示していたのである。

4 重力波

最近になって、重力波の事が話題になっている。これには驚きを超えて、あきれざるばかりである。重力波とは、一般相対論における「波の方程式」から類推したもので、媒質を伝播する「古典的な波」の事である。従って、これは重力子とは無関係であり、重力波の伝播は空間(エーテル)の振動として捉えている。このため、これが相対性理論と矛盾することは良く知られている事実でもある。慣性系の空間は相対的であり、絶対的な空間(エーテル)は存在しない事は100年以上に渡る、膨大な検証実験や理論的な進展により、完全に確立している。そしてそれは現代物理学の基盤ともなっている。

- 何故、重力波か? : それにもかかわらず、重力波の話が出てくるのは何故であろうか? 一つには、この重力波実験を行っている相当数の物理屋は、一般相対論を信じようとしているからであろう。この理由として、彼らは一般相対論が特殊相対論を超える理論であるという「妄想」に取りつかれているからであると考えられる。さらに言えば、この手の実験家は、自然を理解しようとする事よりも、科学で何か一発当てる(大発見する)と言う事にのみ重きを置いている人達であることが主な原因であろう。

- エーテルの亡霊 : 重力波はエーテル仮説を復活させない限り存在できない代物である。そのあり得ない重力波を測定しようと没頭することは、悲劇的でもあるが同時に喜劇的でもであろう。そしてその人達が個人的な趣味として重力波の測定を考えることは、科学の世界に取って特に問題を惹き起こすことにはならないであろう。しかしながら、今回の実験のように、膨大な予算を浪費している場合は、そのまま野放しにしておいて良い問題ではない。それは地味ながら堅実な研究をしている他の分野の予算を強奪している事になっているからである。

References

- [1] J.D. Bjorken and S.D. Drell, “Relativistic Quantum Mechanics”,
(McGraw-Hill Book Company,1964)
- [2] J.J. Sakurai, ”Advanced Quantum Mechanics”, (addison-Wesley,1967)
- [3] Fields and Particles
K. Nishijima, W.A. Benjamin, INC, 1969
- [4] Symmetry and Its Breaking in Quantum Field Theory
T. Fujita, Nova Science Publishers, 2011 (2nd edition)
- [5] Fundamental Problems in Quantum Field Theory
T. Fujita and N. Kanda, Bentham Publishers, 2013

この小ノートは教科書「宇宙の夜明け」の付録に入れた部分を
抜粋したものである。

藤田 丈久