

第3章 一般相対論とその問題点

この章では一般相対論の方程式をまず紹介し、その物理における問題点について解説して行こう。一般相対論の数学的な詳しい説明はここでは省く事になる。専門書がいくらでもでているのでそちらを参考にしていきたい。

物理学は自然現象を理解するために、その自然の一部を単純化して重要部分を取り出し、その自然現象を理解できる理論体系を構築する学問である。その最もよい例が Maxwell 方程式である。この理論も含めて、物理のすべての理論体系は現象を再現できるような現象論として作られている。ところが一般相対論に限って、残念ながらアインシュタインは実験ではなくて「思考実験」を原理として出発して理論体系を構築したのである。このため、一般相対論は自然界において何を記述しようとしたのかと言う対象（自然現象）が不明瞭であり、従って現実性が無い理論となっている。

この章では、一般相対論における概念的な困難についてしっかり見て行きたい。また、一般相対論が物理量として予言している水星の近日点移動の問題も具体的な数値とともに解説して行こう。観測との比較でも一般相対論による水星の近日点移動の予言値は観測値とは一致しないことが示されている。さらに決定的な現象として「うるう秒の問題」がある。水星の近日点が移動するならば、当然、地球もそれに応じた変化をするべきである。この当たり前の事が、現代技術の進歩、特に正確な時間測定の長足な進歩により、測定されてきた事は意味深いものがある。実際、地球の近日点移動と同じ現象がうるう秒として非常に正確に観測されていたのである。しかも、この地球の公転の遅れは一般相対論の予言では全く合わないのに対して、ここで紹介している新しい重力理論は水星の近日点移動の観測値の再現とは比較にならないほどの高い精度で観測データと完全に一致している。それは地球の公転が最も正確に観測されていると言う事を考えれば、理論との正確な一致は当然でもある。

3.1 一般相対論の方程式

アインシュタインが一般相対論の方程式を構築した際、その主要目的は電磁場と同じように重力場に対する方程式を導出したいと言う点にあったと考えられる。恐らくは、アインシュタインは重力場に対する Poisson 型方程式から出発したものと思われる。それは

$$\nabla^2 \phi_g = 4\pi G_0 \rho \quad (3.1)$$

と書かれる。ここで、 ϕ_g は重力場であり、 ρ は物質の密度である。この式自体は基本的には正しいと考えられる。それは勿論、実験的に重力場 ϕ_g が $\phi_g = -\frac{MG_0}{r}$ と書かれているからである。ただし、これはあくまでも大雑把に正しいと言っているだけであり、この Poisson 型方程式を導出する Lagrangian 密度がわかっていたわけではない。ここでは、アインシュタインによる一般相対論の方程式がどのように導かれたのかを直感的に理解して行くための解説をして行きたい。一般相対論の方程式の物理を理解するためには、細かい数学は実は不要である。むしろ、いかなる物理現象を一般相対論の方程式により記述しようとしたのかをしっかりと理解する事こそが最も重要であり、この事により物理をより深く理解するための一助になればよい。

3.1.1 一般相対論の直感的導出

一般相対論の方程式は

$$R^{\mu\nu} - \frac{1}{2}g^{\mu\nu}R = 8\pi G_0 T^{\mu\nu} \quad (3.2)$$

と書かれている。ここで $g^{\mu\nu}$ は計量テンソルを表し、 $R^{\mu\nu}$ は Ricci テンソルとよばれる量で計量テンソル $g^{\mu\nu}$ で書かれている。また、 $T^{\mu\nu}$ は物質のエネルギー・運動量テンソルと呼ばれるものである。この式は、もともと重力場に対する Poisson 型方程式を一般化する事を目標にして、求められたものであろうと思われるが、彼が何故一般化を目指したのかの物理的な理由は不明である。恐らくは、Poisson 型方程式だけでは重力場に関して不十分であるとアインシュタインは考えて、結局は電磁場の方程式と同じような式にしたかったのであろうか。ここで

$$g_{00} \simeq 1 + 2\phi_g \quad (3.3)$$

$$T_{00} \simeq \rho \quad (3.4)$$

と仮定することができたとすれば、確かに直感的にはアインシュタインの一般相対論の方程式が導かれる事が納得できるものではある。

3.1.2 一般相対論と重力場

このように、式 (3.3) を仮定すると、この式から確かに重力の Poisson 型の方程式 (3.1) $[\nabla^2\phi_g = 4\pi G_0\rho]$ が導出されている。これは非常に重要な物理的な意味を持っている事は明らかである。実際、この事により「一般相対論の方程式は重力場に関係している」と人々は受け入れたのである。従って、この仮定された式 (3.3) が本当に成り立っているのかどうかと言う問題をきちんと検証する事が極めて重要であるの言うまでもないことである。

- 式 (3.3) の物理的な意味は？： しかしながら以下に見るように、一般相対論を重力の理論と関係つけることは容易なことではない。ここでアインシュタインは「弱い重力場の極限」では式 (3.3) $[g_{00} \simeq 1 + 2\phi_g]$ のように置くことができるかと主張したのである。しかし計量テンソル $g^{\mu\nu}$ は方程式の未知関数であり、何故、それが重力場 ϕ_g と関係つけられてこのようにおけるのかという議論はなされていなく、またその理論的な根拠を見つけることはまったくできていない。さらに進んで、 $g^{00} \simeq 1 - 2\phi_g$ とおくと重力場が斥力になってしまうことがわかる。この不定性からみても「一般相対論は重力理論である」という主張を理論的に正当化することはほとんど不可能であることがわかる。

- 致命的な欠陥： さらに致命的な欠陥として、この式 $[g^{00} \simeq 1 + 2\phi_g]$ 自体が、実は物理的に意味をなしていないのである。 g^{00} の右辺の 1 は座標系の単なる数字である。ところが、 ϕ_g は力学変数であり、この足し算は成立しない。これはカテゴリーの異なる量を無造作に足し算している事に対応している。

もう少し具体的に言えば、これは数字の 1 に新幹線の速度 250 (km/h) を足せと言っている事に対応していて、お話にならない低レベルの間違いである。しかしこの式 $g^{00} \simeq 1 + 2\phi_g$ を認めたため、一般相対論が重力理論であると長い間、人々は思い込んできたものであり、この誤解の事実はどうしても程に重いものである。実際問題として、このような基本的な考察が一般相対論関係では行われていなかった事の方がより深刻な問題であり、一般相対論に対して現象論的そして実証的な検証が欠如している事と関係している。

3.1.3 エネルギー・運動量テンソル $T^{\mu\nu}$

一般相対論の式で右辺に現われているのは、エネルギー・運動量テンソル $T^{\mu\nu}$ であるが、実はこの物理的意味はあまり明確とはいえない。物質が作っている物理量ではあるが、物質による密度 ρ というスカラー量からテンソル量を作る物理的な理由はない。さらに、このエネルギー・運動量テンソル $T^{\mu\nu}$ は、フェルミオンの「場の理論」を知らない限り定義するのが難しい。実際、粒子描像でのエネルギー・運動量テンソルが物理的に明瞭に定義できるかどうかは良くわからない。一般相対論では、 $T^{\mu\nu}$ は星の分布関数から作られると仮定されている。その意味では、 $T^{\mu\nu}$ を現象論的に作ることは可能でも、これが基本的な物理量にはならないことに注意する必要がある。これは電磁場の方程式と比較するとより明確になる。Maxwell 方程式の右辺にででくるカレント ρ と j は物質が作る電荷密度と電流密度であるが、これらは量子力学の方程式をフェルミオンの多体問題として解くことにより原理的には求められる。これに対して、 $T^{\mu\nu}$ は方程式の中での役割がこのカレントに近いものではあるが、しかしその物理的な意味合いはほど遠いものである。 $T^{\mu\nu}$ は星の分布関数から作られており、その分布は重力下の運動方程式により決定される。従って一般相対論においては、その方程式以外に星の分布関数を定めるための「重力下の運動方程式」が暗黙の裡に仮定されている。

3.1.4 一般相対論の数学は複雑，物理は単純

物質があった時にどのような重力場ができるかと言うのが重力場に対する Poisson 型方程式であったのに対して、一般相対論の方程式は物質があった時に空間を測る計量テンソル $g^{\mu\nu}$ がどうなるかと言う事を決める方程式になっている。重力場を求めるべき所なのに、何故、計量テンソル $g^{\mu\nu}$ を求める問題にすりかわってしまったのであろうか？さらに、アインシュタインは何故そのような事をしたかったのであろうか？この疑問に対しては、ここでは答えはない。恐らくは科学的にはある程度答えられる事なのかもしれない。いずれにしてもアインシュタインにとって、重力が Poisson 型方程式を満たす単純なスカラーであろうとはとても考えられなかったのであろうか。

3.1.5 計量テンソル $g^{\mu\nu}$ の問題点

計量テンソル $g^{\mu\nu}$ が座標に依存していると仮定されているが、この座標は何処から測られるのであろうか？これは一般相対論の方程式を見ればわかるように物質場の重心からである。従って、物理的には物質全体が作る重力場を通して計量テンソルが決定されるものとなっている。この事を Maxwell 方程式と比較して考えてみよう。Maxwell 方程式においては、電荷密度と電流が存在した時、それに応じて電場 E と磁場 B が求められるが、この時、電場と磁場の座標系は常に電荷密度と電流をあらわす座標系を起点として測られている。従って、電場と磁場は物質の重心を原点として測られているのであり、この事で物理的に問題になる事は勿論、あり得ない。それは Maxwell 方程式がどの慣性系でも成り立ち座標の取り方には依存しないからである。

しかしながら、この時、それが計量テンソル $g^{\mu\nu}$ だとすると話は別で、これは問題になる。それは計量テンソル $g^{\mu\nu}$ が時空を測る物差しに対応していると考えているため、物質が存在している「時空」がその計量を変えてしまうと、それは最も重要である相対性原理と明らかに矛盾する事になっている。これはまさに、等価原理が相対性原理と矛盾するという事と同じ意味合いである。この等価原理については、後程、詳しく議論して行くので、その内容をしっかり考えて理解して貰いたい。

- 時間と空間座標は独立： ここで座標についてであるが、一般相対論の計量テンソル $g^{\mu\nu}$ やエネルギー・運動量テンソル $T^{\mu\nu}$ の時間と空間座標は独立である。しかしながら、Newton 方程式では質点の空間座標が時間の関数になっている。このため、その質点を区別することはできなく、従って $T^{\mu\nu}$ を表現することはできない。一方、場の理論では空間と時間は独立であり、粒子を表すのは状態関数であるため確かに、 $T^{\mu\nu}$ を表現することは可能である。

- 座標系の時間とは何か？： 計量テンソル $g^{\mu\nu}$ が時間の関数であるとしているが、その時間は座標系の時間である事になっている。しかし座標系の時間とは物理的にどう言うものなのであろうか？通常感覚では、これは観測者の時間である。そして質点の運動を記述するときの時間は観測者がその質点の座標を時間の関数として記述するので、時間の起点は観測者が決める事ができる。

しかし今の場合、 $g^{\mu\nu}$ の時間の起点はどのように選ばよいのであろうか？一般相対論の方程式 (3.2) を見る限りでは、その起点は右辺の質量分布が与えられたときを時間の起点にしているのであろう。そうだとすると、右辺は一般相対論とは無関係に決定されているので、時間の起点は無限の過去と言う事になっている。しかしながら、方程式の時間の起点の問題さえもはっきりとはわ

かってはいない状態でその方程式を解いたとしても一体、人々は何を理解したいのであろうか？

3.1.6 物質に対する方程式の欠如

アインシュタインは重力場に対する Poisson 型方程式だけでは、何かが不十分であると思ったのであろう。前述したように、それは恐らくは、電磁場の方程式の事が頭にあったからだと考えられる。そのために、テンソル型の方程式に持って行きたかったのであろう。しかしながら、一般相対論の方程式だけでは、物理学としては不十分なのである。この一般相対論の枠組みでは、物質が高速で運動して相対論的になった時に、その物質が重力の影響をどのように受けるかの方程式が欠如している。そして、これこそが最も重要な問題である。

- 相対論的粒子に対する方程式： すなわち、高速で運動する陽子が重力場の下でどのように運動するのかと言う基本的な問題が設定されていない。具体的に言えば、重力ポテンシャルがあった時に、相対論的なフェルミオンが Dirac 方程式によりどのように決定されるのかと言う基本的な問題が解かれていないのである。しかしながら、この一般相対論が作られた当時は、フェルミオンに対する Dirac 方程式どころか、Schrödinger 方程式も知られていない。従って、物質に対しては Newton 方程式のみが基本方程式でありこれは場に対する方程式になっていないので、ある意味での困難さがでて来ているはずであった。一つには、Newton 方程式では座標が質点をあらわしているが、これだとその質点を区別したい時にどうして良いかわからなくなっている。さらには、計量テンソルにあらわれる座標はその空間の点を表しているのであろうが、その点が質点とどのような関係になるのかが不明になる。場の理論では、空間と時間は独立であり、それらが関係する事は無い。そして場によって粒子を表す時に、その場が空間と時間に依存しているのである。一方において、Newton 力学は粒子の座標が時間とともにどのように動くかを表しているのである。従って、空間座標と時間の区別の仕方が場の理論とは全く異なり、同じ理論体系の中に組み込む事は、基本的に不可能な問題である。その意味では、時代背景から考えて、アインシュタインが一般相対論を考えて、このような場に対する基本方程式を作ろうとした事自体がもともと無理があったという事である。

3.2 等価原理

アインシュタインは一般相対論を構築する際、実験から出発しないで、等価原理という思考実験により考案した「原理」から出発してしまった。もし彼が Newton 方程式を相対性理論に合うように、高速粒子に対しても成立するべき方程式を作ろうとしたならば、それ程大きな間違いは犯さなかったと思う。物理学において、一般相対論を除く全ての理論は実験事実を記述する事を目的として方程式を作っている。Newton 方程式は質量 m の質点に力 F をかけるとその質点に対する方程式は $m\ddot{r} = F$ あり、これが古典力学の物理現象をうまく記述してくれる事がわかっている。また、Maxwell 方程式は4つの微分方程式から成立しているが、それぞれの方程式は電磁気的な現象を記述する方程式を統合したものである。例えば、Gauss の法則は電場 E に対する方程式であり、電荷分布 $\rho(r)$ に対して $\nabla \cdot E = \frac{\rho(r)}{\epsilon_0}$ と書かれているが、これはクーロン力を良く記述しているし全ての実験と矛盾がない。さらに、水素原子における電子のエネルギースペクトルは Dirac 方程式によってほぼ完璧に再現されていて、相対論的量子力学の正しさは証明済みである。

- 等加速度運動系： それでは「等価原理とは何か」が問題となってくる。原理というからにはそれを証明する事は出来ない。さらには、この原理は何かの観測量として実験的にわかっている事ではない。何が等価であるのか？それは、「一様重力場での物理と等加速度運動をしている系での物理が同じである」と言うのが仮定である。これは非常に強い要請になっている。例えば、一様重力場での粒子の加速度は $\ddot{z} = -g$ であるから、確かに重力場における加速度と重力定数は同じになっている。しかし、これは Newton 方程式そのものであり、原理でもなんでも無い事になり、ここからは新しい物理は出て来ない。ところが、アインシュタインは等加速度運動系という非現実的な系を仮定してしまった。実際、エレベーターの系を考えて、その系での物理を考えるとどうしても光が曲がるか空間が歪むかのどちらかの結果を考えざるを得なくなり、この原理に従ったら、当然重力場において空間が歪むという奇妙な仮定を置かざるを得なかったのである。

- エレベーターの箱とその空間： もう少し専門的に言えば、エレベーターの系と言っても、空間が動いているわけではなくエレベーターの箱が動いているだけである。それは明らかで、箱が存在しないエレベーターの系は定義できないからである。一方、慣性系の場合、空間がその系ごとに定義できており、またその慣性系における観測者の存在も定義される。等速直線運動をしている電車において、その電車の箱を取っ払ったとしてもその空間は定義されている。このた

め、観測者の存在を仮定することができるのである。これらの事はアインシュタインが相対性原理(どの慣性系でも観測量は同じである)をきちんとは理解してはいなかったのではないかと疑わざるを得ないものとなっている。

● 空間と座標系：ここで「慣性系の空間」とは何かをもう少し詳しく解説しよう。今、地上の静止系を座標系 A として導入し、観測者 A は原点にいるとしよう。この時、等速直線運動をしている電車を考え、その電車の運動座標系 B を定義して、観測者 B はその座標系の原点にいるとしよう。ここで物理において使われている「空間」とは、座標系 B が動いているためその空間と一緒に動いているという言い方をしている。この時、電車の箱が取り扱われたとしても観測者と座標系は何も影響を受けない。そしてそれぞれの系で同じバネの実験をするとすべて同じ観測量が得られることがわかり、これが相対性原理の根幹となっている。一方、等加速度運動系で同じことをしようとしても、ある速度(加速度)で箱が取り除かれると、観測者はその系に存在することはできない。従って、物理で使う空間とは、結局、慣性系で定義された座標系とその観測者の事だと考えれば間違えることはない。

● Gedanken Experiment (思考実験)：物理学で最も大切な事は、常に実験から出発してその観測事実を如何に整合性を保った理論で理解できるかと言う事である。これに対して、一般相対論においてアインシュタインは「Gedanken Experiment (思考実験)」を基にした「原理」から出発してしまったのである。実際、エレベーターの系を考えてそこで光が曲がったり空間が歪んだりしたら、それは仮定した「原理」が正しくない事を意味していると考えべきであった。この事は、物理の専門家ではない人達や若い人達がむしろ正確に理解できるのではないかと思われる。しかし、それ以上に「Gedanken Experiment」から理論を構築しようという姿勢は科学者としては絶対に避けるべきものである事は言うまでもない。科学は自然を理解しようとする学問であり、物理学の理論は自然現象を数学の言葉を使って理解を深める事を目的としているからである。

3.3 重力ポテンシャルと Dirac 方程式

現在知られている基本的な相互作用は電磁氣的な力，弱い相互作用，強い相互作用そして重力である．力の強さを示す結合定数という言葉でいうと，重力は最も弱い．実際，弱い相互作用と比べても重力は30桁以上も小さい．重力の次に弱いのが弱い相互作用である．この力は，中性子が β 崩壊する時や π 中間子が崩壊してミューオンとニュートリノになって行く過程を記述する事ができる．これらの相互作用と比べると，電磁氣的な力はかなり強い相互作用であると言える．実際，我々の物質の世界は基本的には電磁氣的な力で支配されている．原子や分子が出来ているのも，全て電磁氣的な力である．最後に，最も強い力として強い相互作用があり，これは原子力エネルギーや太陽のエネルギー源になっている．星の内部で起こっている核融合はまさに強い相互作用による核子間の束縛エネルギーをうまく利用する事により得られている．

重力は星の生成に大きな影響を与えているが，それは何故であろうか？重力は力の強さとしては一番弱いのであるが，しかしながら2つの重要な性質のために，大きな影響を星の形成では発揮する事になるのである．その2つの性質とは，力の到達距離が $\frac{1}{r}$ である事および常に引力である事である．特に，重力は常にどんな場合でも引力であり，おまけにその力は遠距離まで及ぼすため，いずれは全ての核子は引き寄せられて星を形成して行く事になっている．

- 量子数と電荷： 重力以外の力は基本的に電荷に対応する「量子数」が重要な役割をする．電子と陽子の間のクーロン力は引力である．これは，電子がマイナスの電荷という量子数を持っているのに対して陽子はプラスの電荷の量子数を持っている．同じ電荷の場合には斥力であり，異なる電荷間では引力になっている．一方，重力の場合は常に引力であり，粒子間の重力はその質量にのみ依存している．従ってその力は弱くても常に引力で長距離力であるため，結局，最後には重力が他のどの力よりも勝ってしまうのである．

- 相対論的な陽子： 粒子が高エネルギーになると相対論的な陽子の運動を重力場の中で考える事が必要となる．ところが重力ポテンシャルを Dirac 方程式のどの部分に入れたら良いのかという基本的な問題が未解決のままであった．この事は1970年の始め頃までは深刻な問題として人々の興味を引いていたが，その後パッタリと議論が途絶えてしまった．その主な原因は一般相対論への信奉であろう．ところが一般相対論は場の理論ではなく，その方程式は計量テンソルに対するものである．従って，正常な場の理論の枠組みの中に重力を入れる事が，結局，現代物理の最も重要な課題である事は当然である．

3.4 重力問題の方向性

ここで問題を整理してみよう。まず、Newton 力学では重力がある場合の方程式は良くわかっていて、実際、Kepler の法則にしても重力下での Newton 方程式を解けば問題なく理解されている。そしてその Newton 方程式はどのように導かれるのかというと、これはよく知られているように Schrödinger 方程式からきちんと導かれるものである。Schrödinger 方程式は場に対する方程式であるから、Newton 方程式を導くには何らかの近似をする必要がある。直感的にわかりやすいのは Ehrenfest の定理として知られているように、演算子(座標と運動量)の期待値を取る事である。この手法により、Schrödinger 方程式から Newton 方程式が導かれる。そして Schrödinger 方程式は非相対論の近似をすれば Dirac 方程式から求められる事から、結局、Dirac 方程式から、Newton 方程式が導かれる事を意味している。

- Dirac 方程式と重力ポテンシャル： 逆に言えば、Dirac 方程式の中に重力ポテンシャルを入れられないとしたら、それは最もよく知られている重力ポテンシャルの場合の Newton 方程式が求められない事を意味している。この事より、Dirac 方程式の中に重力ポテンシャルを入れた方程式を考えるのは一番最初にされるべき最も重要な事である。この問題が未解決のまま重力の問題を考えてきたために、重力の問題解決に対する正しい方向性を見失っていたと言える。恐らく、1960年代の多くの物理屋はこの問題をかかなり深刻に考えていたと思われるが、ゲージ理論信仰の魔物により、この手の研究はすべて避けられてしまったものと考えられる。

- クーロン場の Dirac 方程式： ここで少し数学を使ってこの問題を見て行こう。まず、重力ポテンシャル中の Dirac 方程式を議論する前に、クーロンポテンシャル $V_c(r) = -\frac{Ze^2}{r}$ 中の質点(質量 m) に対する Dirac 方程式を書くと

$$\left(-i\nabla \cdot \boldsymbol{\alpha} + m\beta - \frac{Ze^2}{r}\right) \Psi = E\Psi \quad (3.5)$$

となっている。一方、重力ポテンシャル $V(r) = -\frac{G_0mM}{r}$ の場合、もしクーロンと同じだとすると、式(3.5)と同様に

$$\left(-i\nabla \cdot \boldsymbol{\alpha} + m\beta - \frac{G_0mM}{r}\right) \Psi = E\Psi \quad (3.6)$$

となる。この場合、非相対論化をしてもクーロンと同じで影響はない。

- 重力場の Dirac 方程式： 実際問題として正しい方程式は

$$\left[-i\nabla \cdot \boldsymbol{\alpha} + \left(m - \frac{G_0 m M}{r} \right) \beta \right] \Psi = E\Psi \quad (3.7)$$

であることがわかっている．しかしながら，これまでこのような重要な問題を未解決のまま放置していた事自体が最も深刻な問題であると言える．

- スカラー場によるポテンシャル： 第4章で詳しく議論するように，新しい量子重力理論によって，式(3.7)の Dirac 方程式が導出されている．すなわち，電磁場の場合とは異なっていたのである．この事は水星の近日点移動の問題を取り扱う時に，重大な効果を引き起こす事になる．それはクーロンポテンシャルの場合，非相対論の極限をとっても全く影響する事はなかったが，スカラーポテンシャルとして入ってくると，非相対論の極限において重力の付加ポテンシャルを新しく生み出すことになっている．これはベクトルポテンシャルによる Zeeman 効果の場合と同じ機構である．この新しい付加ポテンシャルが水星の近日点移動の問題を見事に解決している事がわかっている．

- 繰り込み理論： 何故，スカラー場によって重力相互作用がうまく記述されるのかと言う問題はかなり難しく，実は繰り込み理論と密接に関係している．実際，この繰り込み理論を深く理解することが，この新しい重力理論を理解するための必須条件である．繰り込み理論とは，量子場の理論で摂動計算した時に現れる無限大をうまく処理して，観測量を有限量として求めて実験と比較する数学的な技法である．具体的には，場の量子化を実行すると，2次の摂動計算であるフェルミオンの自己エネルギーに Log 発散の無限大が現れてしまう．自己エネルギーは観測量ではないのでそれが無限大になっても気にする必要はないが，問題は観測量に無限大が出た場合である．特に，量子電磁力学における異常気能率補正を計算するとその計算結果に Log 発散が現れることが知られており，これが最も深刻な問題点であった．そしてこの無限大をうまく処理して，電子の異常気能率の実験値を正確に再現したのが繰り込み理論である．しかしながら，この繰り込み理論にも様々な問題点が浮上している．特に，観測量である電子の磁気能率補正の計算において，その計算手法に一部，誤りがあることが見つかっている．そして現在の量子場の理論において摂動計算を実行した場合，どの観測量に対しても繰り込みが不要であるという可能性が指摘されている．この問題は第5章でもう少し詳しく議論して行こう．

関連図書

- [1] Fields and Particles
K. Nishijima, W.A. Benjamin, INC, 1969
- [2] Symmetry and Its Breaking in Quantum Field Theory
T. Fujita, Nova Science Publishers, 2011 (2nd edition)
- [3] Fundamental Problems in Quantum Field Theory
T. Fujita and N. Kanda, Bentham Publishers, 2013
- [4] Bosons after Symmetry Breaking in Quantum Field Theory
T. Fujita, M. Hiramoto and H. Takahashi
Nova Science Publishers, 2009
- [5] New Fundamentals in Fields and Particles
T. Fujita (editor), Transworld Research Network, 2008
- [6] J.D. Bjorken and S.D. Drell, "Relativistic Quantum Mechanics",
(McGraw-Hill Book Company,1964)
- [7] J.J. Sakurai, "Advanced Quantum Mechanics", (addison-Wesley,1967)
- [8] B.W. Parkinson and J.J. Spilker, "Global Positioning System", Progress
in Astronautics and Aeronautics (1996)
- [9] Simon Newcomb, "Tables of the Four Inner Planets", 2nd ed. (Washing-
ton: Bureau of Equipment, Navy Dept., 1898).
- [10] B.G. Bills and R.D. Ray. (1999), " Lunar Orbital Evolution: A Synthesis
of Recent Result