

物理と数学を巡る冒険

エドワード・ウィッテン

幼い頃から私は天文学に魅せられていました。もっとも当時これはさほど珍しいことではありません。と言いますのも、1950年代後半に宇宙開発競争が始まり、誰もが宇宙に胸を躍らせていたからです。それ以前から天文学に興味があったかどうかはあまりよく覚えていません。ただ、9歳か10歳の頃に、3インチ反射望遠鏡を贈られて、それで土星の環を見ることが、少年時代の私には無上の楽しみの1つでありました。今思えば不思議なことに、当時の私は土星を見つけにくい惑星だと思っていました。今となっては、何人かの子供たちにそれぞれの小型望遠鏡の使い方を教えてあげたこともあって、土星がとても明るい惑星で、晴れた夜、地平線から上っていれば、どんな小型望遠鏡でも、地球上のほとんどどこにいても簡単に見つけられることはよくわかっていますが。プロの写真家が撮った写真のようにはいきませんが、望遠鏡を使いさえすれば、印象的な土星の姿を目にすることができるのです(Fig. 1)。

子供の頃は天文学者になりたかったのですが、自分が大人になる頃には、天文学者は宇宙で暮らし、宇宙で仕事をしなければならなくなると子供心に思い込んでいました。私にはそれがとても危険なことのように思えました。半世紀ほどの状況の変化を見ると、宇宙衛星がきわめて重要な役割を果たしているものの、それらを開発し、利用する天文学者は、地球上で安全に作業をしていることがわかります。おそらく、天文学の関連で実際に人が宇宙空間で作業を行っている数少ない例は、宇宙飛行士によるハッブル宇宙望遠鏡の修理ではないでしょうか。ちなみに、宇宙望遠鏡は天文学の研究に欠かせない役割を担いますが、地球上で行う観察も、やはり天文学の研究には非常に重要です。

11歳の頃、その年齢にしては高度な数学の本をプレゼントされました。理論物理学者だった父は、私に微積分の手ほどきをしてくれました。そのため、しばらくの間は数学に熱中しました。ただし両親は、数学(と両親が考えるもの)に私が急激にのめり込んでしまうことをよしとせず、ですから、私が初歩的な微積分よりもはるかに本格的な数学に触れることになるのは、それからずいぶん先のこととなります。当時の両親の方針が良かったのかどうか、今の私にはわかりません。ただ、そのため長い間、私が教わるたぐいの数学が、抜本的に新しいものであるとか手ごたえがあるものというふうには思われませんでした。それがどの程度影響したのかは

わかりませんが、いずれにせよ私は長い間、数学に興味を感じなくなったのです。

しかし最終的に、私が最も才能に恵まれているのは数学と理論物理学であって、自分にはそうした分野に進む以外の道はないと思い至りました。21歳の頃、私は、数学と理論物理学のどちらを選択するかを決めたのですが、当時の私には、どちらの分野についても乏しい知識しか持ち合わせていませんでした。その知識をもとに理論物理学を選んだわけですが、その大きな理由は素粒子に魅せられたからです。

今お話ししたのは、1970年代初めのことです。私が生まれた頃から20年の間で、素粒子の分野では驚くべき発見が続きました。1950年頃は、陽子と中性子、それにそれらから構成される原子核が最も小さな粒子だと考えられていました。今、私たちが考えている素粒子の概念はほとんど存在していなかったのです。ところがその頃を境に、様々な発見が立て続けに起こります。その大きなきっかけは新しい技術の開発、とりわけ(とはいえこれだけではありませんが)粒子を人為的に加速させることできわめて高いエネルギー状態にできる粒子加速器の開発が可能になったことでした。

簡単に言いますと、私がプリンストン大学大学院に入学した1973年の秋、素粒子の研究は、少なくともその20年ほど前からの激動期が続いていました。ただし、その表面下では変化が兆していました。現在、素粒子物理学の標準模型として知られる理論が生み出されてきました。本質的には現在と変わらない形式で、長い試行錯誤の末にようやく生み出されつつあったのです。これが私が大学院に進学するわずか数ヵ月前に起きたことで、デビッド・グロス、フランク・ウィルチェック、デビッド・ポリツァーの3氏によって行われました(ちなみにデビッド・グロスは、後に私の指導教官を務めてくれることになります。)

私が大学院に通っていた頃は、素粒子の分野における果てしない革命の時代でした。1974年11月11日には、最大の発見が発表されました。ジェイプサイ中間子の発見です。この中間子は寿命が1ナノ秒よりもはるかに短いのですが、その質量と種類を考えると、驚くほど長寿命と言えるのです。これは画期的な発見だったために、発見に携わったチームのリーダーは信じられないほどの速さでノーベル賞を受賞しました。そしてこの発見は、物理学界の11月革命として語られるようになったのです。幼かったために冷戦を覚えていないという方、あるいは歴史の本でもひもとき直してみようかと思われる方には、「11月革命」と呼びならわされていた出来事はもう一つあるのだと申し上げておきましょう。

それはさておき、1974年11月の時点で私が素粒子について持っていた知識では、みんなが何に興味しているのか、何の話をしているのかは理解できたものの、その興奮を十分に分かち合うことはできませんでした。初めはよく分からなかった私にも、数日後、ようやくジェイプサイ中間子が新しい種類のクォークから成る中間子であることがわかりました。先ほどもお話ししたように、私の場合、こうして理解するのに数日かかりました。ベテラン教授連中にはより明解ですぐにわかるようなことだったかもしれませんが、私たち学生までもが理解できるようになるには、しばらくの時間がかかったということです。

この話をこれほど詳しくお話するのは、1970年代中頃に大学院生だった私が何に興味を持っていたのかをわかっていただくためです。簡単に言うと、私の大学院時代、素粒子物理学の分野では、果てしない革命の時代が全盛期を迎えていました。その時代がずっと続くと思っていた私は、自分もその一翼を担いたいと考えていました。ただ、今にして思えば、ジェイプサイ中間子を理解することから、科学全体に変化が起きつつあることを察知できていればよかったのかもしれませんが。事実、この新しい粒子の持つ驚くべき特性は、標準模型によって完全な説明が可能であり、しかもそれについては、すでにいくつかの論文で予想されていたことが明らかになったのです。もっとも、そうした予想を行った論文がどれほど知られていたのかはわかりません。実際私はそれらの存在を知らなかったのです。

その一方で、大学院生の私にはもう1つ興味を引かれることがありました。そして、ある意味、それがその後の私の研究につながっていくところもあったのです。ところで、物理学が専門でない皆さんのために、ここで少しご説明しておかなければなりません。それは、理論物理学者は自然の法則を理解しようとする一方で、様々な状況で方程式を解き、今後何が起こるのかを予想しようとしているということです。理論物理学のこの2つの側面は、必ずしもはっきりと区別できるわけではありません。たとえば、自然の法則を解き明かし、その法則による予測を明らかにできなければ、どれが正しい法則なのかを理解することはできません。ところが実際に物理学者が行っているのは、ほとんどの場合、少なくとも原理的には適切な方程式が明らかな状況で、物質の振る舞いを理解しようとするということです。この2つの側面を同時に実践するのは、口で言うほど簡単なことではありません。一例を挙げれば、電子や原子核の振る舞いを説明するシュレーディンガー方程式について知っているということと、そうした方程式をいくつも解いて一本の銅線の振る舞いについて理解することとは、別問題だからです。

素粒子物理学者として、基本的に私の目標とするところは、そうした基礎方程式

が何なのかを理解することでした。ところが、標準模型の登場によって新たな状況が生まれたのです。私が大学院で研究を始めたちょうどその頃、全く新しい基礎方程式がいくつか確立されつつあり、中には理解することがきわめて難しいものもありました。特に、標準模型では、陽子、中性子、パイ中間子、そしてそれ以外の相互作用を行う粒子はクォークで形成されているものの、どのクォークも観察できないとされていました。この矛盾を解消するためには、クォークが「閉じ込められている」、つまり、どんなにエネルギーを費やしてもクォークを取り出すことはできないと考えざるを得ませんでした。クォークの閉じ込めを説明しようと思われていた標準模型の方程式には、わかりにくく、しかも解くのが難しいという問題点がありました。そのため、クォークの閉じ込めが本当に起こるのかどうかは、なかなか解明することができなかつたのです。

大学院時代とその後も長きにわたって、私はクォークの閉じ込めを解明することに情熱を燃やしました。しかし、これはきわめて困難な問題であり、私はあまり成果を上げることはできませんでした。実際、標準模型の方程式を用いてクォークの閉じ込めを説明するということは現在にいたるまで未解決のままです。もっと正確に言うなら、コンピュータによる大規模なシミュレーションによって結論が正しいことはわかっているのですが、それがなぜかということは、私たち人間の理解を超えているのです。

この問題を解きたいという願いは叶わなかつたものの、この経験からいくつか得るところもありました。1つは苦い教訓です。そこでつくづくと思い知らされたことが、現在私が研究を行う際にもっとも重視することの1つとなっています。すなわち、研究者は現実に即した態度で臨まなければならないということです。解明しようとする問題について先入観の持ちすぎは禁物です。チャンスが巡ってきた時に、そのチャンスを活かせるように準備しておく必要があるのです。

残念ながら私は、クォークの閉じ込めという問題の解明が、自分には難しすぎるということを認めざるを得ませんでした。何らかの成果を出すためには、もっと目標を低く設定して、もっと限定された問題に取り組む必要がありました(後で詳しくお話ししますが、結局私は、クォークの閉じ込めという問題に少しばかりの貢献をすることになります。ただし、20年近く経ってからの話ですが)。

しかし、もっとプラスの面についても言うなら、この現実を受け入れ、より限定的な問題で何らかの成果を出そうとすることで、私は相対論的量子系の強結合での振る舞いと物理学者が呼ぶ現象——標準的な方法で方程式を解くことが難しい場合

の相対論的量子系の振る舞い——について考察することで、ある程度の経験を積んでいくようになりました。そしてこの経験が、のちの私の研究に大きな意味を持つことになるのです。

ここでももう1つ、物理学が専門でない皆さんのために、少し説明しておかなければならないことがあります。大学院で物理学を専攻する学生は、弱結合の場合にどうすべきかを学ぶにすぎません。強結合の場合には、様々な疑問や方法が入り乱れて浮かび上がってくるのです。ですから、強結合の場合に量子系がどのような振る舞いを示すのかについての専門家のような存在はいないはずですし、少なくとも私自身は決してそのような専門家ではありません。かなりのことを研究してきましたが、いつでも初学者のような気がしているのです。

1976年、プリンストン大学で博士号を取得した私はハーバード大学に移り、その後の4年間をそこでポスドク生活を送ることになります。その間、私生活ではいろいろなことがありました。私と同じ時期にポスドク研究員としてハーバードにやってきたキアラ・ナッピとは1979年に結婚しました。彼女と出会ったのは、1975年にフランス・アルプスで開催された物理学のサマースクールでした。彼女は、著名な数理物理学者のアーサー・ジャフィーに誘われてハーバードにやってきたのです。最初の子供を授かったのも、ハーバードにいた時でした。

ハーバードでは、多くの先生方に様々なことを教えていただきました。専門を同じくする物理学の先生方ばかりでなく、数学が専門の先生方からもです。専門的な話は控えたいと思いますが、少しだけ、当時の様子をお話ししたいと思います。

ハーバードでの先輩の1人にスティーブン・ワインバーグがいました。彼は標準模型の先駆者であり、1979年にノーベル賞を受賞しました。大学院の頃の私には、物理学の基本的なテーマでなかなか理解できないものがありました。おそらくスティーブンは、他の多くの物理学者も私と同じような困難に悩まされていると思ったのでしょう。そうしたテーマがセミナーで取り上げられるたびに、彼は自分が理解していることを手短かに説明してくれました。こうして何度も彼の説明を聞いたおかげで、よりはっきりしたイメージが得られるようになったのです。

シェルドン・グラシヨールとハワード・ジョージからも多くのことを学びました。教授であったグラシヨールも標準模型の先駆者であり、1979年のノーベル賞受賞者です。ジョージは若手の教員で、私よりも少し年上でした。実は、ハーバードでは研究室のスペースが不足していたので、私たちは一緒に研究室を共有していたので

す。

グラショーとジョージは、特に粒子加速器から得られた結果を説明するためのモデル構築を専門としていました。2人からは多くのことを学びました。果てしない革命の時代があのまま続いていけば、私は彼らが行っていたのと同じ研究をしようと思ったはずですが、すでに触れたことですが、実験によってもたらされる進展は、その性質をまさにこの時期に変えつつあったのです。ニュートリノ物理学——これについてはここ日本で研究が進んでいますね——から宇宙論に至るまで、様々な分野で目覚ましい進展が続いていました。重要な意味を持つ新しい粒子がいくつも発見され、つい最近ではヒッグス粒子が発見されました。しかし、果てしない革命などよりも、数十年にわたる粒子加速器から生じた驚きとは、むしろ標準模型のすばらしい成功にあります。標準模型は、その発明者の予想よりもはるかにより高いエネルギー状態にある場合でも適応できるものだったのです。

当時の私は全く気づいていなかったのですが、科学に根底的な変化が生じるということは、私にとってそれまでとは少し違う方向にもっとチャンスが生まれるかもしれないということでもありました。だからこそ、ハーバードでのもう1人の先輩物理学者、シドニー・コールマンとの交流が、私には大きな意味を持ちました。彼は、場の量子論に関する優れた洞察で伝説的な人物であり、私の見るところ、強結合な場の量子論に大きな関心を寄せた唯一の物理学者でもあります。他の物理学者は、この問題をブラックボックス、つまり考える価値がない代物と見なしていたように思われます。

私はたびたび、コールマンの優れた洞察に興味を引かれました。そうした洞察は、彼から聞かされなければ耳にすることもなかったでしょうし、よしんば耳にすることがあったとしても、もっとずっと後になっていたでしょう。多くの場合、彼の洞察は、相対論的量子物理学に関する数学の基本的概念や、他の数学の分野と相対論的量子物理学の関係に関するものでした。私のその後の研究に重要な意味を持つテーマも多くあったのですが、コールマンから教えてもらうまでまったく思いもよらないことでした。初めて聞いた時はそれほどよくわかったとは言えない状態でしたが、幸いにも、後に役立つ程度には覚えていました。ここで、コールマンが私に教えてくれた洞察の一例をご紹介します。それはもともと、旧ソビエトの数学者、アルベルト・シュワルツが述べたことなのですが、標準模型について物理学者がもたらした驚くべき成果には、実は、マイケル・アティヤとイサドール・シンガーが発表した「指数定理」に由来するものがあるということです。実はこの定理

は、20世紀の数学におけるきわめて重要な定理なのですが、私には初耳でしたし、指数という概念も、さらにはアティヤやシンガーという名前も聞いたことがありませんでした。

ここで話ししておかなければならないのは、17世紀、18世紀、それに19世紀の大半でさえ、数学者は同時に物理学者でもあるのが普通だったのに、ところが20世紀になると、数学と物理学という2つの学問は別々の道を歩むようになったようです。その原因は、数学の分野における数々の進歩により、物理学との距離が離れていったからだと思われまゝ。しかしそれ以外にも、1930年頃から、物理学の研究が、相対論的量子場理論など数学的解釈がきわめて難しいと思われる方向に向かったことが挙げられます。

私が大学院で物理学を研究していた当時は、最先端の数学と物理学の間にあまり交流がない時期でした。まわりの他の物理学専攻の大学院生と同じく、私も当代の数学の問題に取り組まんとする者が知っておきたいたぐいのことなどは学んでいませんでした。私はアティヤ・シンガーの指数定理や、その他の多くのことをコールマンの話から知ったのですが、そうしたことをそれまで全く聞いたこともなかったというのは、当時大学院で物理学を学ぶ者であればごく当然のことであつたのです。

アティヤ・シンガーの指数定理などの新たな展開をきっかけに、極めて優秀な数学者の中にも物理学の分野で起きていることに興味を持つ者が出てきました。私は、ハーバードで教鞭を執る何人かの数学者、とりわけラウル・ボットやデビッド・カジュダンとたびたび話をするようになりました。また、マイケル・アティヤとイサドル・シンガーとも知り合いになりました。アティヤは、1977年から翌年にかけての冬に私をオックスフォードに招待してくれたのですが、この後、私はたびたびこの地を訪れることとなります。両氏は、後の私の研究に大きな影響を与えました。

私は数学者たちの話すことに興味を持ち、当然のことながら、新しい知識も多く得ました。同時に、自分が興味を持っている物理学上の問題、とりわけ、先ほどお話ししたクォークの閉じ込めという問題に、数学者が解明の手がかりを与えてくれるかどうかについては懐疑的にならざるを得ませんでした。

実際、私のこの疑念は完全に間違っていたわけではありません。1970年代後半に再び始まった数学と物理学との交流は、当時の私が予想したよりもはるかに活発

で、重要な意味を持っていたばかりか、私の研究にも思った以上にずっと大きな影響を与えました。しかし、やはり数学者には場の量子論はあまりにも難解なものでしたし、物理学者にとって現代数学が重要になったのは、もっぱら物理学の分野で生じた新たな問題に用いるときくらいにすぎなかったのです。

それでも、ほんの少しずつではありましたが、私が数学者たちから学んだことが役立つようになりました。はじめの頃はそういうことが起こるたびに、これはたまたまそうなったのだと思っていました。初期の例を1つご紹介します。それは、1980年に私がプリンストン大学の教員となってすぐの出来事でした。私は超対称場の理論に興味を持っており、そこには素粒子物理学の標準模型では未解決のまま残されたいくつかの問題を解く可能性があるように思われました。ところがそうした理論で真空の性質について理解しようとしたものの、頭を悩まし当惑するばかりでした。私が発見した振る舞いは、物理学の標準的な概念による説明よりも単純なものだったのです。

真相を解明するために、より単純なモデルからさらに単純なモデルと、次々に検討していったところ、そうしたモデルのいずれであっても同じ当惑が続きました。それについてずっと考えていた時に——たしか、1981年の夏に、コロラド州アスペンのプールで泳いでいた時だと思います——その2年ほど前にラウル・ボットから受けた講義を思い出しました。ボットは、フランス領コルシカ島での物理学のサマースクールで、モース理論と呼ばれる数学の理論に関する基本的な知識を物理学者のグループに紹介してくれました。そのモース理論は、ボット自身の研究の基礎を成すものでしたが、私だけでなく、参加した物理学者のほとんどは、その名前すら聞いたこともなかったでしょうし、それが物理学にどれほど役に立つのか見当もつかなかったはずです。そして、ボットの話の一部をおぼろげに思い出した1981年のあの日まで——私の頭を悩ませている問題の背後にモース理論が存在することに気づいたあの日まで——私がこの理論について再度耳にしたことはなかったような気がします。

別の言い方をすれば、量子物理学者の基本的なツールをモース理論の新たな理解に適用するということです。そして、この2つの主題を結びつけた私の論文が、“Supersymmetry and Morse Theory (超対称性とモース理論)”です(Fig. 2)。そもそもこの論文を書こうと思ったのは、超対称性を理解するためでした。ところが、この論文はむしろモース理論に及ぼした影響において重要性が認められているようです。おそらくこれが、私の書いた論文で、数学界で有名になった初めてのものでしょう。というより、少なくともあの時点では、私のどの論文よりも有名に

なった論文だったでしょう。

実は、その時期——およそ30年かもう少し前ですが——から私の研究がどのように数学と結びつくようになったかを示す典型的な例がこの論文であるのです。私は、物理学上の疑問に答えようとしたのであって、数学的に面白そうかどうかは二の次だったのです。物理学上の疑問に対する答えが数学に何らかのヒントを与えたとすれば、それは私にとって予想外の驚きでした。当初、こうした予想外の出来事は特異なケースであって、いつも起こるものではないと思っていました。そうではないことに気がついたのは、ずいぶん後の話です。

ところで、モースとの縁は論文の上だけにとどまりませんでした。そのことについてもお話ししようと思います。1920年代から30年代にかけてモース理論を創始したマーストン・モースは、1935年以降、現在私が在籍しているプリンストン高等研究所で教授を務め、1977年に天寿を全うされました。ですから、私はお目にかかったことはありません。ただし、奥様のルイーザ・モースは100歳を超えた今もご健在です。私が彼女と知り合ったのは、モース理論の研究を始めた後でした。彼女はつい最近まで、プリンストンの数学者のためにたびたびパーティを催してくださいました。

私の研究と数学の繋がりについて話を進める前に、1つお話ししておきましょう。私の物理学研究に大きな影響を与えたものについて、まだ触れていませんでした。それは弦理論なのです。

素粒子物理学における標準模型は、素粒子にとって重要な意味を持つ自然の相互作用——物理学者が言うところの強い力、弱い力、電磁気力——について明らかにしました。後の一つは重力です。重力は、星や銀河系、そして宇宙全体にとって大きな意味を持つのですが、個々の原子や素粒子にはごくわずかな影響しか与えません(Fig. 3)。重力についての説明として現在得られる最上のもは、アルベルト・アインシュタインの一般相対性理論です。これは、アインシュタインが生み出したもっとも偉大な理論であり、それによれば、重力は時空の曲率から生じるのです。実は、アインシュタインがこの理論を考えたのは、量子力学が現在の形で登場するよりも前のことでした。そのため彼の理論は、古典力学、あるいは前量子力学と呼ばれています。

アインシュタインの重力理論を修正して量子力学も組み込めるようにすることが、1930年代以降の物理学者の夢でした。しかし、それは容易なことではありませ

ん。なぜなら、一般相対性理論と量子力学はいずれも存在し、どちらも自然現象の説明において重要な一部を成しているという事実そのものを超えて、実験で得られる直接的な手がかりは皆無に等しいからです。

当時も、そして私が思うに現在に至るまで、この問題に正面からぶつかってもほとんど何の洞察も生まれていません。実は、これこそが、先程説明したことの傍証ともなるのです。つまり、研究においては現実即した態度で臨まなければならないということです。人は、自ら目指すことについて先入観を持ちすぎてはいけません。ある問題を解明するにはまだ機が熟していないという場合もあるのです。まずは何か他のことについての研究の進展が必要な場合もあり、そして最終的には思いもよらぬ方向から解決の鍵が得られることもあるかもしれないのです。

量子重力の場合、「思いもよらぬ方向」というのが弦理論でした。1960年代後半から1970年代前半にかけて、弦理論のルーツとなるものを展開した物理学者には、量子重力のことなど頭にありませんでした。彼らは、原子核を構成する力について明らかにしようとしていたのです。彼らが展開した理論は驚くほど豊かなものでしたが、強い力に関する理論としては完全に妥当といえるものではありませんでした。そのため、標準模型の登場とともに、表舞台から姿を消してしまいました。しかし、1970年代になって、数名の物理学者——ジョエル・シャーク、デビッド・オリーブ、ジョン・シュワルツ、米谷民明など——が、弦理論が量子重力解決の鍵になるかもしれないことに気づいたのです(Fig. 4)。

弦理論の基本的な考え方を簡単に説明すると、素粒子は点粒子ではなく、振動する小さな弦の輪だということです(Fig. 5)。しかし、こんな単純な考え方がなぜ深遠な理論へとつながっていくのでしょうか。その疑問に対して専門用語を使わずにうまく答えようとするなら、みなさんには、まず美しい音楽を思い浮かべていただきたいと思います。1本の弦が様々な振動することで、様々な音からなる豊かな音楽になるし、そして(弦理論が正しいならば)様々な素粒子を統一的に表現することにもなるのです(Fig. 6)。

1980年代初期の段階で、シュワルツはマイケル・グリーンと共同で(そして時にはラース・ブリンクと共同で)この概念を展開しました。そして、いくつもの大変面白い概念を思いついていました。私は彼らの行っていることを知り、とても強く惹かれました。ただ、私にはそれに関わることにためらいもありました。その理由の1つには、たとえこの理論が正しいとしても、理解するには途方もない時間がかかる困難な問題だと思ったからです(事実、著名な物理学者による弦理論批判の

中で、今のところ私が最も的を射ていると思うのは、この点です)。それでもなおこの理論への想いは絶ちがたく、私は1982年の夏のほとんどを費やして、シュワルツの書いた総説を検討して、弦理論についての理解を深めようと思いました。

1982年から翌年にかけて、私はまだ弦理論への全面的な取組みをためらっていたものの、この理論に関連する研究をいくつか始めていました。グリーンとシュワルツの研究は、一般相対性理論と量子力学を結びつけるだけでなく、標準模型で表れる3つの力と重力の統一を実現できる可能性を秘めていました。ただし私は、1つ問題があることに気づきました。それは彼らが構築しているような理論では、素粒子に特有の「掌性」の説明に関して難があることです。専門的に言えば、これは「アノマリー」と呼ばれる現象が原因でした。つまり、この理論が妥当性を持つには、アノマリーの相殺が必要だったのです。

私はこの問題を、ルイ・アルバレ=ゴメとの共著論文“Gravitational Anomalies (重力異常)”で掘り下げました(Fig. 7)。私たちにはこの問題を解決することはできませんでしたが、IIB型超弦理論におけるアノマリーの相殺という関連現象を発見しました。これについての詳しい説明は控えさせていただきますが、1つだけお話しておこうと思います。それは、まだそれによって自然の理論ができてはいないとしても、弦理論の内的整合性は、仔細に見れば緻密に組み合う奇跡のような細部が数多くあることで成り立っているということです。この内的整合性は注目すべき点であって、弦理論を真剣に受け止めなければならない理由の1つでもあります。アルバレ=ゴメと私は、IIB型超弦理論におけるアノマリーの相殺を発見したことで、その点にささやかながらの貢献をしました。ただし、素粒子の掌性という問題は、依然として未解決のまま残されていたのです。

1984年の夏のある日、グリーンとシュワルツがアノマリーを相殺する新たな方法を発見したことを知りました。その知らせに私の背筋を電気が走りました。アノマリーの問題は、弦理論に基づく物理学の理論の妥当性を向上させるうえでの最大の障害であることは、数年来私がはっきりと認識していたことであつたからです。この発見によって、さらに研究が進むことは明らかでしたし、そのことは、その後数ヶ月の研究で実証されました。

さっそく私は、“Some Properties of $O(32)$ Superstrings ($O(32)$ 超弦理論のいくつかの特性)”という小論を書き上げました。これは、アノマリーを相殺するその新たなメカニズムにより、弦理論がいつそう妥当な理論となりうる根拠として、最も明白な点をいくつか説明するものです。そしてその数ヶ月後、私は、

フィリップ・キャンデラス、ゲイリー・ホロヴィッツ、アンディー・ストロミンガーと共同で、それよりも重要で納得のいく論文、“Vacuum Configurations For Superstrings (超弦理論の真空構造)”を書いたのです(Fig. 8)。

この論文が物理学者の関心を引いたのは、非常に明解なやり方で、弦理論に基づく、より実現可能な統一モデルを明らかにする方法を示したからです。またこの論文は、その理論構成において微分幾何学のかかなり現代的な概念を本質的に使用したことにより、物理学と数学との関係にも影響を与えました。

実際、いわゆる現代数学の問題で、物理学者たちが、これまであまり馴染みのなかったものに対して関心を寄せるべき理由は、弦理論を真剣に受け止めさえすれば、たちどころに理解されるのです。たとえば、基本的なことですが、時空において弦は運動しながら、数学者がリーマン面と呼ぶものの特性を有する2次元の面を描きます。リーマン面は、20世紀の数学界において重要な問題であり、もっぱら弦理論の存在によって、物理学者たちにとっても重要な意味を持つようになったのです。

私の視点からは、こうしたすべてのことによって、物理学と最新の現代数学といわれるものとの交流がこれまでになくさかんになり、大きな意味を持つようになったのです。物理学に基づく洞察を、「純粋数学」の問題にあてはめるという試みが、もはや珍しいことではなくなりました。

1984年以降の私の研究に関して、ここで触れておくべき展開は、位相的場の量子論に関わるものです。この研究を始める1つのきっかけになったのが、数学者のマイケル・アティヤからのヒントと助言でした。彼が指摘してくれたのは、数学における展開で、物理的な洞察に基づけばより深く理解できるかもしれないものがあるということでした。それ以外のヒントは、物理学における展開から得たものでした。

個々の問題に対して、以前なら物理学ではなく数学の問題とみなされたであろう問題に、物理学上の概念を適用するというアプローチを取りました。そうした問題はどれもこれも、数学と物理学との関係についての私たちの視野を弦理論が広げてくれなければ、私が真剣に取り組もうと考えることのなかったものです。いずれの研究でも私が目指したのは、「純粋数学」の問題と素朴に信じられているものに対し、いかにして物理学者的な手法でアプローチしうるかを明らかにすることでした。

そうした問題について、1つご紹介します。それは通常の3次元空間における結び目に関することです。紐がもつれることは、日常生活ではよくある話です。しかし、1900年代に数学者たちが結び目についての深遠かつ巧妙な理論を築いたことを知る人はあまりいないものと思います。私がこの研究に取り組むようになった1987年から1988年頃、なかなか解けない問題が1つあったのですが、アティヤのおかげで私はそれを認識することができました。数学者のヴォーン・ジョーンズは、結び目理論について驚くべき研究方法を発見しました。ちなみに、この功績が認められ、彼は後年、フィールズ賞を受賞しています。ヴォーン・ジョーンズは自らの公式を適用した結果が正しいものであることを証明しましたが、それが「なぜ」正しいものとなるのかは謎でした。

数学や科学に関わっていない人にとって、「何が」真実かを理解することと、「なぜ」それが真実なのかを理解することの違いは、なかなか分かりづらいかもかもしれません。しかし、この違いは物理学と数学の持つ魅力の重要な要素でありますし、すべての科学においてもそうなのかもしれません。ただし、この「何が」と「なぜ」の違いをどこまで考えようとするかは、考えようとする人の、その時の理解の度合いによって違うと言えましょう。つまり、ある世代の人たちは「なぜ」真実なのかを理解することで満足しても、次の世代の人たちは、もっと詳しく調べてみようと思うかもしれないからです。

結び目に話を戻しますと、私は、3次元時空における素粒子の軌道として結び目を捉えることで、ヴォーン・ジョーンズの公式の新たな解釈を与えることができました。いくつかトリックはあるのですが、アイデアの多くは物理学では標準的なものです。目新しいことと言えば、物理学者の思考の対象としては馴染みが薄い問題に対して、物理学上の技法を応用したことだけです。

この研究は、私が成した貢献としては、数学者と物理学者双方の間で最も有名なものの1つになりました。しかしそれと同時に、昨日の授賞式のスピーチでお話したことを示す端的な例でもあります。私たちがいかに賢明であっても、先人の業績や同時代に成し遂げられた成果、そして仲間たちから得られたものなしには、何も達成しえないのです。私がこの研究を成し遂げられたのも、他の科学者の研究から得た手がかりのおかげなのです。時には、同僚たちが適切な論文を勧めてくれたことでそうした手がかりを得たこともあれば、プリンストン高等研究所で間近に接した同僚たちの研究がきっかけになったこともありました。また、アルベルト・シュワルツによる洞察など、昔ハーバード大学でシドニー・コールマンから学んだ

ことなどを思い出し、それがあつた時には役立ったこともあります。

1990年頃までの数学と物理学に関する私の経験で重要な出来事のうち、お話しできたのは数例ですが、こうした出来事からよくおわかりいただけるかと思ひます。この時期は私が研究者として実際に成長した時期でした。この頃までに、私は研究で数々の経験を積み、多くの問題に対する現在の私の考え方もほぼ形成されていりました。その後の出来事について事細かにお話しするつもりはありません。1つには時間がかかるからでもありますし、また1つには、最近の展開の中には、まだ私たちが全体の見通しについて十分把握できていないものがあるからです。ただし、私が自分の研究人生で最も実り多い時期と考えている1994年から1995年にかけての研究については、少し触れておきたいと思ひます。

それまでに、すでに私は場の量子理論の研究に20年近くの歳月を費やしていましたが、この研究は、まるで二重人格者のように、正反対の側面を持つものでした。初期の頃の私の研究は、素粒子物理学では従来からある問題に関するもので、こうした問題は、標準模型では4次元時空における場の量子論に基づいて理解されます。結び目理論などの問題に取り組んでいた1980年代後半からは、よく似た場の理論を中心的に研究していましたが、その目標はだいぶ異なっていました。その後の研究は弦理論に関するものとなり、2次元における場の量子論という、それまでとは全く異なる、特別な種類のテーマが中心になりました。

私の関心が2つの異なる場の量子論に、それも研究方法が全く異なるものに分かれたことは、いくらか奇妙な感じを与えるものでした。1994年から1995年に起つたのは、すべての次元の時空であらゆる場の量子論が関係する大局的な考え方の登場でした。これには多くの物理学者が貢献しました。私の貢献は、基本的に2つの部分に分かれています。

1994年、私はネイサン・サイバークと共同で、数学者からも物理学者からもサイバーク・ウィッテン理論と呼ばれる理論を発表しました。ただし、この名前を持つ意味合ひは、数学者と物理学者で異なります。この点については少し詳しくお話ししようと思ひます。と言ひますのも、それによつて、物理学者と数学者のもの見方が今も違ふことがわかるからです。

物理学者にとってこの理論は、量子効果が大きい場合に、特定の場の量子論がどのような振る舞いを示すかを理解するための新しい方法です。

研究を行う場合の秘訣とは、解くことができる程度には明快であり、しかも解くことに価値がある程度には興味深い問題を見つけることです。サイバーグと私も、場の量子理論という、解くことができる程度には明快であり、しかも解くことで有益な教訓が得られる程度に込み入った問題を見つけることができました。特に私は、サイバーグ・ウィッテン理論によって、学生の頃の夢だったクォークの閉じ込めの理解に、少し貢献することができたのです。考えてみれば、初めてこの問題に取り組んだあの頃の私なら、こうした貢献などとても手の届くものではなかったでしょう。すでにお話ししたことですが、研究に関するもう1つの秘訣とは、ある時点で自分が成し得るかもしれないことについて、あまり先入観を抱くべきではないということです。

サイバーグとの共同研究は、4次元空間の研究に数学的に関係する部分もありました。それを、数学者は一般にサイバーグ・ウィッテン理論と呼びます。実は、このことからある興味深い事実が明らかになります。それは、私が研究生活を始めてから現在に至るまでの間に、数学と物理学の距離が非常に近くなった部分もあれば、依然として大きく離れている部分もあるということです。この2つの学問は、目指すゴールも頼りにするツールも全く異なります。数学者は、いわゆるサイバーグ・ウィッテン方程式を(他のツールと共に)用いて、幾何学上の素晴らしい発見をしてきましたが、サイバーグ・ウィッテン理論の量子論としての側面に着目することは、通常ありません。

この翌年、特にサイバーグ・ウィッテン理論で得た経験を活用して、標準的な方法では計算ができない場合の弦理論の強結合での振る舞いについて、サイバーグ・ウィッテン理論とほぼ同様の説明を発表しました。その際、私は多くの同僚の研究成果を参考にし、なおかつそれらを拡張させました。そうした手がかりを得た研究すべてについてここで触れるわけにはいきませんが、1つだけご紹介しておきたいのは、1993年にバークレーで開催された弦理論に関する年次会議で、ジョン・シュワルツが、アショク・センとの共同研究について熱弁をふるったことです。今考えると、その研究は正しいものだったのですが。彼のあんな姿を見たのは、あの時と1984年の初めだけです。ちなみに後者の数ヵ月後、彼とマイケル・グリーンがアノマリーの相殺について画期的な発見をしました。バークレーでの会議で私は彼の熱弁に耳を傾けたのですが、これも、私に進むべき方向性を示してくれた出来事でした。

いずれにせよ、頭に浮かんだのは、従来から提唱されているどの弦理論も、1つの包括的な理論がそれぞれ限定的に現れたものだという事です(Fig. 9)。この1

つの包括的な理論は、現在、M理論と呼ばれています。この理論は自然の法則の大統一理論になるのではないかと期待されています。これまでの数々の弦理論は、より大きな現実を別々の方法で記述しており、つまりそれぞれの理論が、より意味深いストーリーの一部を語っているということです。あらゆる次元における場の量子論は、そのいずれもがこの重大なストーリーの一部なのです。

ところで、ある極限として従来からの弦理論を含むこの意味深い理論を、なぜM理論と名づけたのか、しばしば質問を受けます。M理論というのは仮称であって、今後さらに研究が進めば、別の名称に代わるかもしれません。仲間の研究者の中には、これを「メンブレン(membrane、膜)」の理論として理解すべきだと考える者もいました。私は懐疑的だったのですが、メンブレン(membrane)の頭文字をとってM理論と呼ぶことにしました。ただし時間が経つにつれて、Mはマジック(magic)か、ミステリー(mystery)か、メンブレン(membrane)のどれかの意味だと言うようになりました。その後、メンブレンは行列理論に基づいて解釈されるようになります。全くの偶然なのですが、行列を意味するマトリクス(matrix)という単語も「m」で始まるのです。そこでそれからしばらくは、Mは、マジック(magic)、ミステリー(mystery)、マトリクス(matrix)のどれかを意味すると言うようにしていました。

最後に、これまで私が取り組んできた数学と物理学を併用した研究の重要性について、私自身の考えを手短にお話ししておかなければなりません。この場合、私の考えは、数学の観点から説明した方がわかりやすいでしょう。場の量子論と弦理論には、数学上の多くの謎が隠されています。そうした謎は、今後長きにわたって、数学の分野で重要な役割を果たすことでしょう。これらの謎に数学的手法で取り組むのは、専門的な問題点がいくつもあるため、困難です。数学者がこうした専門性に関わる困難さを克服し、すでに確立されている数学の分野に対して場の量子論や弦理論が持つ意味だけでなく、これら理論そのものの議論に取り組むようになるまで、これらの理論を研究する物理学者が、興味深くしかも意外なその洞察で、数学者を驚かせ続けることができるでしょう。私が幸運だったのは、ちょうどいい時にちょうどいい場所にて、その一翼を担えたことです。

物理学の観点から言うなら、未だ最終的な答えは出ていませんが、多くの状況証拠から、弦理論とその統合理論であるM理論が、すでに確立されているどの理論よりも自然に関する真実に近いと考えられます。弦理論・M理論は内容が実に豊かであり、精緻な一貫性を有しているため、この存在を単なる偶然として捉えることはできません。他にもこのことを強く裏付けるのが、重力と素粒子の力とを統合する

理論が弦理論・M理論からもたらされる際の明解さです。さらに、弦理論を批判する人たちが興味深い見解を持っていた場合でも、そうした見解は往々にして弦理論に吸収されてきました。弦理論・M理論は、既存の物理理論に新たな解釈をもたらし、さらにそれに関連した数学上の新しい概念を生むことで、その重要性をたびたび証明してきました。弦理論・M理論が正しい方向性に向かっていると考えなければ、この事実を合理的に説明することはできないのです。



Fig. 1

Image ID: P-23883C/BW, ©NASA

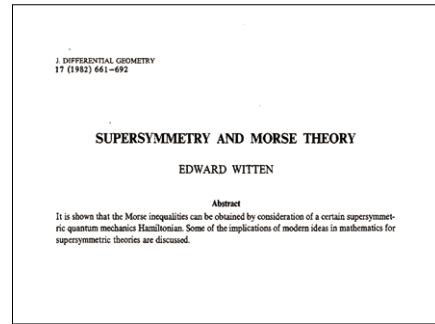


Fig. 2

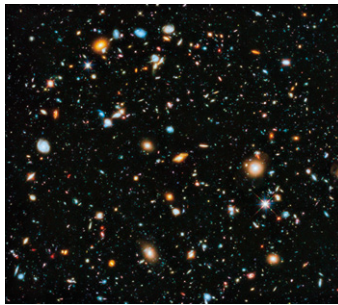


Fig. 3



Fig. 4

John Schwarz (left)

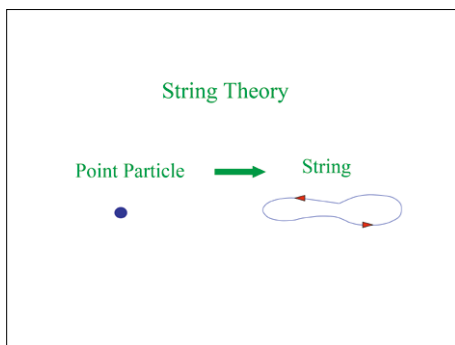


Fig. 5

Why does this lead to something deep?

The best answer I can give is to remind you of the beauty of music. Like a violin string, one of these strings can vibrate in many ways:

This leads to the richness of music and – if string theory is correct – the unity of the elementary particles.

Fig. 6

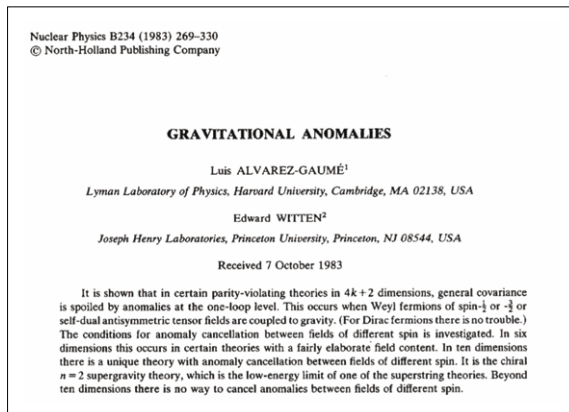


Fig. 7

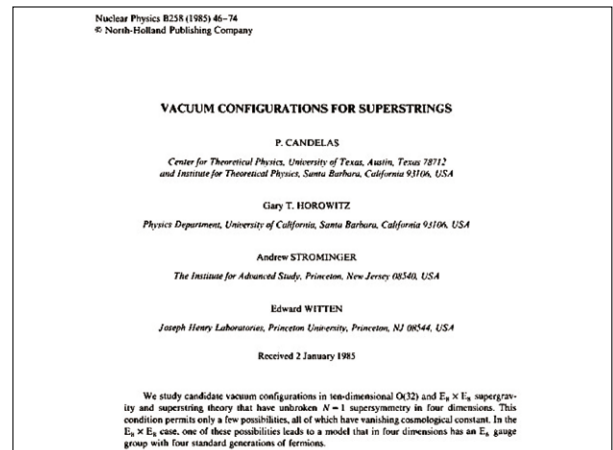


Fig. 8

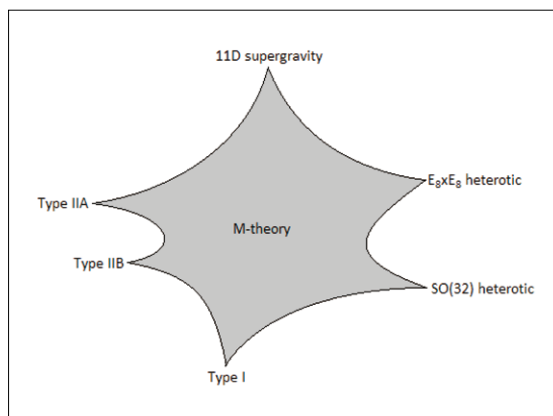


Fig. 9

wikipedia