

題名	物理と数学を巡る冒険
Title	Adventures in Physics and Math
著者名	エドワード・ウィッテン
Author(s)	Edward Witten
言語 Language	日本語・英語 Japanese, English
書名	稲盛財団：京都賞と助成金
Book title	Inamori Foundation: Kyoto Prize & Inamori Grants
受賞回	30
受賞年度	2014
出版者	公益財団法人 稲盛財団
Publisher	Inamori Foundation
発行日 Issue Date	12/31/2015
開始ページ Start page	140
終了ページ End page	175
ISBN	978-4-900663-30-5

## 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。今となつては、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は思えました。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になります。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。

## Adventures in Physics and Math

Edward Witten



Fig. 1

Image ID: P-23883C/BW, ©NASA

From a young age, I was fascinated by astronomy. This was not exceptional because the late 1950's were the start of the space race and everyone was excited about space. I really cannot remember how much my interest in astronomy predated the space race. At the age of about nine or ten, I was given a small telescope (a 3 inch reflector) and one of the highlights of my growing up was to see the rings of Saturn. Something that puzzles me in hindsight is that in those days I thought Saturn was hard to find. By now, having assisted several children with their own small telescopes, I am quite aware that Saturn is one of the most obvious objects in the sky and easy to find from almost anywhere on Earth in any small telescope on any clear night when it is above the horizon. It will not look like it does in a professional photo, but it is a striking sight through any telescope (Fig. 1).

As a youngster, I dreamed of growing up to be an astronomer, but I was also very much afraid that by the time I was an adult, astronomers would have to live and work in space. This sounded dangerous to me. Looking at how things turned out half a century or so later, we see that space satellites play a very important role, but the astronomers who develop them and use them stay safely on the ground. I suppose that the repair of the Hubble space telescope by astronauts is one of the very few cases in which work related to astronomy has been done by humans actually working in space. Incidentally, though space telescopes play a substantial role, ground-based astronomical observations are certainly still very important.



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)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いました。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。ジェイブ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

At about age 11, I was presented with some relatively advanced math books. My father is a theoretical physicist and he introduced me to calculus. For a while, math was my passion. My parents, however, were reluctant to push me too far, too fast with math (as they saw it) and so it was a long time after that before I was exposed to any math that was really more advanced than basic calculus. I am not sure in hindsight whether their attitude was best or not. However, the result was that for a number of years the math I was exposed to did not seem fundamentally new and challenging. It is hard to know to what extent this was a factor, but at any rate for a number of years my interest in math flagged.

Eventually, however, I understood that math and theoretical physics were the fields in which I had the most talent, and that I would really only be satisfied with a career in those fields. I was about 21 years old when I made the decision between mathematics and theoretical physics, and I made this decision based on very limited knowledge about either field. My choice was theoretical physics, in large part because I was fascinated by the elementary particles.

This was in the early 1970's. For a 20 year period, beginning roughly when I was born, there had been an amazing succession of discoveries about elementary particles. At the beginning of this period, the proton and neutron and the atomic nucleus had been the smallest things known. The modern concept of elementary particles barely existed. But beginning around 1950, there had been an explosion of discoveries. This had resulted mostly from new technologies, especially but not only the ability to make particle accelerators in which elementary particles are accelerated artificially to very high energies.

In short, when I started graduate school at Princeton University in the fall of 1973, the study of elementary particles had been in a state of constant tumult going back at least two decades. But beneath the surface there was the potential for change. What we now know as the Standard Model of particle physics had been written down, in essentially its modern form, in a long process that had been essentially completed, just a few months before I started graduate school, by David Gross, Frank Wilczek, and David Politzer. (David Gross was later to be my graduate advisor.)

The period of perpetual revolution in the world of elementary particles actually



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

continued during my graduate days. One of the biggest discoveries of all was announced on November 11, 1974. This was the discovery of the  $J/\psi$  particle. Though its lifetime is far less than a nanosecond, it was astonishingly long-lived for a particle of its mass and type. It was such a dramatic discovery that it led to a remarkably speedy Nobel Prize for the heads of the teams that made the discovery, and people used to talk about the November revolution in physics. To those of you who are too young to remember the Cold War or who might want to brush up on your history books, let me just say that there is another event that used to be called the November revolution.

Anyway, by November, 1974, I had just about learned enough about elementary particles that I could understand what the excitement was all about and what people were saying, but not quite enough to participate prominently. After what looked to me like some initial confusion, it was realized in a few days that the  $J/\psi$  particle was made from a new kind of quark. As I say, to me it looked like this realization followed a few days of initial confusion, but it may be that things were clearer even sooner to the senior professors, and their understanding just took a while to filter down to us students.

I have gone into so much detail about this to try to explain what my interests were as a graduate student in the mid-1970's. In short, when I was a graduate student, the era of perpetual revolution in particle physics was still in full swing. I assumed it would go on and I was hoping to participate in it. But in hindsight, the quick success in understanding the  $J/\psi$  maybe should have been a hint that the scientific landscape was going to change. In fact, it turned out that the surprising properties of this new particle made perfect sense in the Standard Model, and even had been predicted before, though I don't know how well-known the papers making this prediction had been. Certainly I had not known about them.

Meanwhile, I developed another interest as a student, which in a way contained seeds of some of my later work. Here I should explain to those of you who are not physicists that one side of what theoretical physicists do is to try to understand the laws of nature, and the other side is to try to solve the equations in different situations and work out predictions for what will happen. The separation between these two sides of the subject is not always so clear. For example, there is no hope to understand what are the correct laws of nature without at least some ability to solve them and find their predictions. But in practice, much of what physicists do is to try to understand the



況で、物質の振る舞いを理解しようとする事です。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えませんでした。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ったのです。

大学院時代とその後長きにわたって、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ったものの、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、研究者は現実には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

behavior of matter in situations in which, at least in principle, the appropriate equations are known. This can be easier said than done; for instance, it is one thing to know the Schrodinger equation, which describes the behavior of electrons and atomic nuclei, and another thing to solve the equations and understand the behavior of a piece of copper wire.

As a particle physicist, my main goal in principle was to understand what are the fundamental equations. However, the emergence of the Standard Model created a novel situation. Some very new fundamental equations were in the process of being established just as I began my graduate studies, and some of them were really very hard to understand. In particular, the Standard Model said that protons, neutrons, pions, and other strongly interacting particles are made from quarks, but no quarks were to be seen. To reconcile the contradiction, one had to believe that quarks are “confined,” meaning that no matter how much energy one pumps in, quarks can never be separated. The catch was that the Standard Model equations that are supposed to describe quark confinement are opaque and difficult to solve. So it was hard to understand if quark confinement would really happen.

Understanding quark confinement became my passion as a student and for a number of years afterwards. But it was a very hard problem and I did not make much progress. In fact, in its pure form of demonstrating quark confinement using the equations of the Standard Model, the problem is unsolved to this day. To be more precise, from large scale computer simulations, we know that the result is true, but we do not really have a human understanding of why.

I gained a couple of things from this experience, even though I was not able to solve the problem I wanted. One was negative. I learned the hard way what I regard as one of the most important things about doing research. One needs to be pragmatic. One cannot have too much of a preconception of what problem one aims to solve. One has to be ready to take advantage of opportunities as they arise.

Reluctantly, I had to accept that the problem of quark confinement that I wanted to solve was too difficult. To make any progress at all, I had to lower my sights considerably and consider much more limited problems. (As I will explain later, I eventually made a small contribution to the problem, but this was almost 20 years later.)



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年間で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、著名な数理論理学者のアーサー・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。

On a more positive note, in accepting this and making what progress I could on more limited problems, I began to get some experience thinking about what physicists call the strong coupling behavior of relativistic quantum systems—the behavior of these systems when the equations are hard to solve by standard methods. This experience became important in my later work.

Here I should again explain to those of you who are not physicists that when the coupling is weak, everyone who goes to graduate school in physics learns what to do. When the coupling is strong, a large variety of questions and methods come into play. As a result, I am not sure that there is any such thing as being an expert on how quantum systems behave for strong coupling, and in any event certainly I myself never have become such an expert. I have learned quite a bit while always feeling like a beginner.

In 1976, I completed my Ph.D. at Princeton University, and moved to Harvard University for what proved to be four years of postdoctoral work. It was also a very eventful time personally. Chiara Nappi, whom I married in 1979, arrived at Harvard as a postdoctoral fellow at the same time that I did. We had met at a physics summer school in the French Alps in 1975. She was invited to Harvard by a distinguished mathematical physicist, Arthur Jaffe. Our first child was born while we were still at Harvard.

At Harvard, I learned a lot from many of the senior professors, originally the physicists and then some of the mathematicians as well. I do not want to go into too much technical detail but I will try to give a flavor.

One senior colleague at Harvard was Steven Weinberg, who was a Standard Model pioneer (and 1979 Nobel Laureate). There were certain fundamental topics in physics that I had had trouble understanding as a graduate student. I think Steve thought that many of the physicists had some of the same confusions I did. Whenever one of these topics came up at a seminar, he would give a small speech explaining his understanding. After hearing these speeches a number of times, I myself gained a clearer picture.

I also learned a lot from Sheldon Glashow and Howard Georgi. Glashow was a senior professor and another Standard Model pioneer and 1979 Nobel Laureate. Georgi was a junior faculty member, just a few years older than I was. In fact, office space was scarce at Harvard and Georgi and I shared an office.



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・グラシローとハワード・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ロー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。

グラシローとジョージは、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つたまま続いているとすれば、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、しかし、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いモデルであり、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

Glashow and Georgi, among other things, were experts at building models to explain the results coming from particle accelerators. I learned a lot from them, and had the age of perpetual revolution continued, I probably would have aimed to learn to do what they did. But as I have already hinted, the nature of experimental progress was changing at just this time. Great advances have continued, in areas ranging from neutrino physics—which is well-developed here in Japan, by the way—to cosmology. Important new particles have been discovered, most recently the Higgs particle. But rather than perpetual revolution, the surprise coming from particle accelerators during these decades has been the fantastic success of the Standard Model. It works much better, and at much higher energies, than its inventors must have anticipated.

Although I certainly did not realize this at the time, the changing landscape meant that I would find more opportunity in somewhat different directions. That is why my interaction with yet another senior physicist at Harvard, Sidney Coleman, proved to be important. He was a legendary figure for his insights about quantum field theory, and was the only one of the physicists I have mentioned who was actively interested in strong coupling behavior of quantum fields. The others appeared to regard such questions as a black box, not worth thinking about.

On a number of occasions, Coleman drew my attention to significant insights that I think I would otherwise just not have heard about, or at least not until long after. Often these insights involved fundamental mathematical ideas about relativistic quantum physics, or its relationship with other areas of modern mathematics. There are many topics that were important in my later work that I had simply no inkling of until I learned about them from Coleman. At the time I could not make much sense of what I was hearing, but luckily I remembered enough that it was useful later. Just to give one example, I can remember Coleman explaining to me an insight, originally due to the Soviet mathematician Albert Schwarz, that certain surprising results of physicists working on the Standard Model actually had their roots in the “index theorem” of Michael Atiyah and Isadore Singer. This was actually a major theorem of 20th century mathematics, but I had never heard of it, or even of the concept of the index, or of the names Atiyah and Singer.

I should explain that although in the 17th, 18th, and even much of the 19th centuries, mathematicians and physicists tended to be the same people, by the 20th



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す。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

century the two subjects had appeared to go different ways. This happened because mathematics made advances that seemed to take it far away from physics, but also because physics after around 1930 had moved in directions—involving relativistic quantum field theory—that seemed too difficult to understand mathematically.

My graduate education in physics had occurred at a time when there was not much engagement between cutting edge mathematics and physics. Like the other physics graduate students I knew, I had not learned the sort of things one would want to know if one wished to grapple with contemporary questions in mathematics. It was typical of a physics graduate education of the time that I had never heard of the Atiyah-Singer index theorem or most of the other things that I heard about from Coleman.

Developments such as the role of the Atiyah-Singer theorem made some of the most prominent mathematicians curious about what physicists were doing. I started talking a lot to some of the mathematics professors at Harvard, especially Raoul Bott and David Kazhdan. I also got to know Michael Atiyah and Isadore Singer. Atiyah invited me to visit in Oxford in the winter of 1977–8 for the first of what turned out to be many visits. Atiyah and Singer were important influences in my later work.

I was interested in what the mathematicians had to say and I certainly learned a lot of new things. At the same time, I was reasonably skeptical of whether the mathematicians could shed light on the physics problems that I was interested in—especially the problem of quark confinement, which I mentioned before.

In fact, I wasn't entirely wrong in this skepticism. The renewed interaction between mathematics and physics that was developing in the late 1970's has proved to be far more robust and significant than I anticipated at this time, and also far more important in my own work than I expected. However, it has remained difficult for mathematicians to grapple with quantum field theory, and the importance of modern mathematics for physicists has come mainly because of new problems that have emerged from the physics.

Only gradually, I started to see a payoff from what I had been learning from the mathematicians. At first, each time this happened, it seemed like an exception. I will describe one of the first instances. This occurred soon after I had joined the faculty of



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になります。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

Princeton University in 1980. I was interested in supersymmetric field theories, which seemed to have the potential to solve some problems left open by the Standard Model of particle physics. I was puzzled in trying to understand the nature of the vacuum in these theories. The behavior I found was simpler than seemed to be explained by standard ideas of physicists.

Trying to get to the bottom of things, I considered simpler and simpler models, each of which turned out to contain the same puzzle. After pondering this for a long time, I eventually remembered—I think while in a swimming pool in Aspen, Colorado in the summer of 1981—a lecture that I had heard by Raoul Bott about two years earlier. At a physics summer school in the French island of Corsica, Bott had given a group of physicists a basic introduction to a mathematical topic known as Morse theory. Morse theory had been fundamental in Bott's own work, but I am sure that just like me, most of the physicists at that school had never heard of it, and had no idea what it might be good for in physics. And I had probably not heard of Morse theory again until that day in 1981 when—dimly managing to remember part of what Bott had told us—I realized that Morse theory was behind what I had been puzzling over.

A different way of saying much the same thing is that one could apply basic tools of quantum physicists to get a new understanding of Morse theory. My paper linking these two subjects is called “Supersymmetry and Morse Theory” (Fig. 2). My original motivation was to understand supersymmetry, but the paper has probably been more important for its influence on Morse theory. It is probably the first paper I wrote that is well-known in the mathematics world. Or at least it is better known than any of my other papers up to that point.

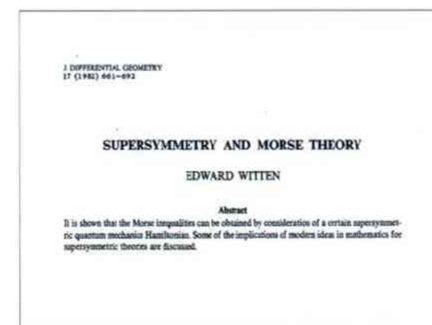


Fig. 2



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、コロラド州アスピ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・ポットから受けた講義を思い出しました。ポットは、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、ポ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、ポ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しようということです。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



Fig. 3

This is actually a typical example of how my work from that period—around 30 years ago or a little more—was related to mathematics. I was trying to answer physics questions; the possible mathematical interest was secondary. If the answer to the physics question shed some light on the mathematics, then this was a surprise. At first, the surprises seemed like isolated cases, not part of a pattern. It took a long time to really recognize that there was a pattern.

There is actually a human side to this that I would like to mention. Marston Morse, who had invented Morse theory starting in the 1920's and 1930's, was from 1935 on a professor at the Institute for Advanced Study in Princeton, where I work. He died at an advanced age in 1977 and I never met him. However, his widow Louise Morse remains well and active at the age of more than 100. I got to know her after my work on Morse theory. She has continued to host gracious receptions for the mathematical community in Princeton until very recently.

Before saying more about the relation of my work to mathematics, I should tell you about the major influence on my physics that I have not mentioned so far. This is String Theory.

The Standard Model of particle physics describes the interactions of nature that are important for elementary particles—what physicists call the strong, weak, and electromagnetic interactions. Left out is gravity. Gravity is important for stars, galaxies, and the Universe as a whole, but its influence for an individual atom or elementary particle is unmeasurably small (Fig. 3). The best description that we have of gravity is Albert Einstein's theory of General Relativity. This was Einstein's greatest creation,



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がありません。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のは、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。

according to which gravity results from the curvature of spacetime. Einstein actually developed his theory of gravity before Quantum Mechanics had emerged in its modern form. His theory is what we call a classical or pre quantum mechanical theory.

Updating Einstein's theory of gravity to take Quantum Mechanics into account has been a dream of physicists since the 1930's. But it is a tough challenge, and direct experimental clues are scarce or nonexistent, beyond the bare fact that General Relativity and Quantum Mechanics both exist and are important parts of the description of nature.

Both then and, in my opinion, to the present day, direct assaults on this problem have yielded little insight. This is actually an illustration of something that I explained before: the need to be pragmatic in research. One generally should not have too much of a preconception of what one is aiming to do. At a given moment, the time may simply not be ripe to solve a particular problem. Progress on something else may be needed first, and the key may eventually come from an unexpected direction.

In the case of Quantum Gravity, the unexpected direction was String Theory. The physicists who developed the roots of String Theory in the late 1960's and early 1970's were not thinking about Quantum Gravity. They were trying to understand the force that holds an atomic nucleus together. The theory that these physicists developed was incredibly rich. But it was not entirely correct as a theory of the strong interactions, and it went into eclipse following the emergence of the Standard Model. However, in the 1970's, a few physicists—among them Joel Scherk, David Olive, John Schwarz, and Tamiaki Yoneya—realized that String Theory might actually give the key to Quantum Gravity (Fig. 4).

The basic idea of String Theory, to state it naively, is that an elementary particle is not a point particle but a little loop of vibrating string (Fig. 5). If one asks why this simple idea leads to a deep theory, the best I can do by way of a non-technical answer is to remind you of the beauty of music. The many different ways that a string can vibrate lead to the richness of music and (if String Theory is correct) the unity of the elementary particles (Fig. 6).

By the early 1980's, Schwarz was developing this idea with Michael Green (and



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に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



Fig. 4

John Schwarz (left)

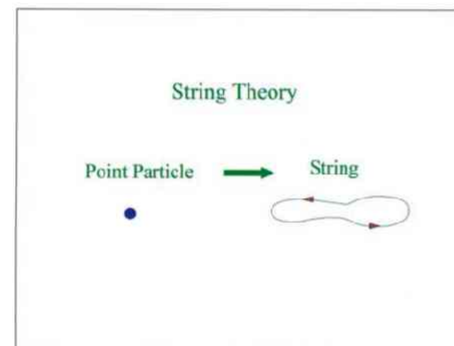


Fig. 5

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

sometimes with Lars Brink) and they were obtaining very interesting ideas. I became aware of and fascinated by what they were doing. I was reluctant to be involved, in part because I thought that even if the theory is right, understanding it would be an incredibly long-term challenge. (In fact, among the criticisms of String Theory that are made by some prominent physicists, I personally think this is the most cogent one, to the present day.) Still, I became fascinated, and for example I spent most of the summer of 1982 trying to learn the theory by studying a review article that Schwarz had written.

In 1982–3, though I remained reluctant to become wholeheartedly involved in String Theory, I did a few things that were relevant. The work of Green and Schwarz had the potential not just to combine General Relativity with Quantum Mechanics but to unify gravity with all the forces of the Standard Model. But I realized that there was a problem—a theory like they were building was going to have trouble accounting for the peculiar “handedness” of elementary particles. Technically, this was because of



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していました。

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させていただきますが、1つだけお話し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

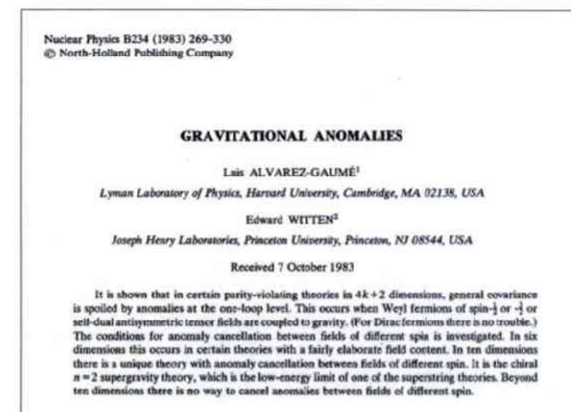


Fig. 7

something called “anomalies.” They had to cancel to make the theory work.

I explored this question in a paper “Gravitational Anomalies,” with Luis Alvarez-Gaumé (Fig. 7). We were not able to solve the problem, but we did discover a related phenomenon—technically known as anomaly cancellation in Type IIB superstring theory. Without trying to explain this in detail, let me just say that, even before one tries to use it to make a theory of nature, the internal consistency of String Theory depends on a lot of miraculous-looking details that delicately hang together when one looks closely. This internal consistency is a remarkable story and it is one of the reasons for believing that String Theory should be taken seriously. By discovering anomaly cancellation in Type IIB superstring theory, Alvarez-Gaumé and I made our own small contribution to that story. However, the problem of handedness of elementary particles remained.

One day in the summer of 1984, I learned that Green and Schwarz had discovered a new way to cancel the anomalies. To me this was electrifying news. It had been clear to me for several years that the problem of anomalies was the main obstacle to make theories of physics derived from String Theory significantly more realistic. So it was obvious that one was going to be able to do much better, and this was certainly borne out by work in the following months.

Almost immediately, I wrote a short paper “Some Properties of  $O(32)$  Superstrings,” explaining some of the most obvious points about why the new



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、弦理論がいっ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。そしてその数ヵ月後、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

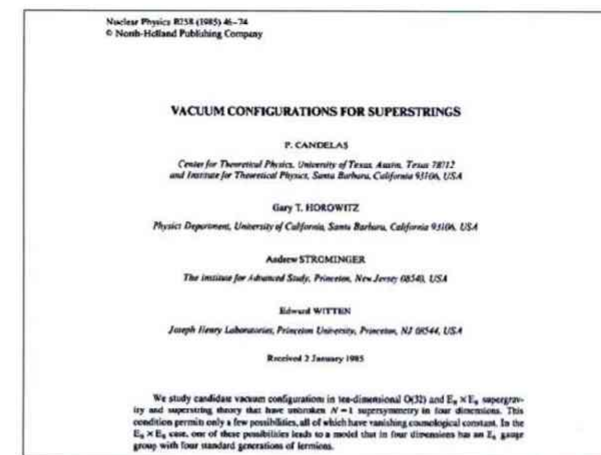


Fig. 8

mechanism of anomaly cancellation made string theory potentially more realistic. But a few months later, with Phil Candelas, Gary Horowitz, and Andy Strominger, I wrote a more significant and satisfying paper “Vacuum Configurations For Superstrings” (Fig. 8).

This paper was interesting for physics because we showed how to get semi-realistic unified models of physics out of String Theory in a rather elegant way. It also had an impact on the relationship between physics and mathematics because the construction used rather modern ideas in differential geometry in an essential way.

In fact, once one took String Theory seriously, one soon found a lot of reasons that physicists would have to pay attention to previously unfamiliar topics in more or less modern mathematics. For example, at a basic level, a string moving in spacetime sweeps out a two-dimensional surface with the property of what mathematicians call a Riemann surface. Riemann surfaces are an important topic in the mathematics of the last century, and they became important for physicists primarily because of String Theory.

From my vantage point, all this made the interaction of physics with more or less contemporary mathematics far more robust and significant. Opportunities to apply physics-based insights to “purely mathematical” problems stopped seeming like exceptions.



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との違いは、なかなか分かりづらいかもしれません。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。

In my own work in the years just after 1984, the development that is most worth mentioning here involves topological quantum field theory. This was partly motivated by hints and suggestions by the mathematician Michael Atiyah, who pointed to mathematical developments that he suggested should be better understood using physical insight. Other hints came from developments in physics.

Each problem here involved applying physics ideas to a problem that traditionally would have been viewed as a math problem, not a physics problem. These were all problems that I would not have seriously considered working on until String Theory broadened our horizons concerning the relations between mathematics and physics. In each case, the aim of my work was to try to show how a problem that naively is “purely mathematical” could be approached by methods of physicists.

I will just tell you about one of these problems. It involved knots in ordinary three-dimensional space. A tangled piece of string is a familiar thing in everyday life, but probably most of us are not aware that in the 1900's, mathematicians built a deep and subtle theory of knots. By the time I became involved, which was in 1987–8, there was a puzzle, which Atiyah helped me appreciate. The mathematician Vaughn Jones had discovered a marvelous new way of studying knots—for which he later received the Fields Medal. Vaughn Jones had proved that his formulas worked, but “why” they worked was mysterious.

It may be hard for someone who does not work in mathematics or science to fully appreciate the difference between understanding “what” is true and understanding “why” it is true. But this difference is an important part of the fascination of physics and mathematics, and I guess all of science. I will say, however, that the difference between “what” and “why” depends on the level of understanding one has at a given level of time. One generation may be satisfied with the understanding of “why” something is true, and the next generation may take a closer look.

Anyway, getting back to knots, I was able to get a new explanation of Vaughn Jones's formulas by thinking of a knot as the trajectory followed by an elementary particle in a three-dimensional spacetime. There were a few tricks involved, but many of the ideas were standard ideas of physicists. Much of the novelty was just to apply the techniques of physicists to a problem that physicists were not accustomed to thinking about.



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かるのおかげなのです。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います。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います。

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次元時空中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

This work became one of my best-known contributions, among both mathematicians and physicists. But it is also an excellent illustration of something I said in my acceptance speech the other night. No matter how clever we are, what we can accomplish depends on the achievements of our predecessors and our contemporaries and the input we get from our colleagues. My ability to do this work depended very much on clues I got from work of other scientists. In several cases, I knew of these clues because colleagues pointed out the right papers to me or because the work was being done right around the corner from me by colleagues at the Institute for Advanced Study in Princeton. It also helped at a certain point to remember some of what I had learned from Sidney Coleman back when I had been at Harvard, involving yet another insight of Albert Schwarz.

I have only had the chance to describe some highlights of my experiences in mathematics and physics until about 1990, but I think these highlights are reasonably illustrative. This was really my formative period. By this time, I had quite a bit of experience in doing research, and had developed something fairly close to my present outlook on many questions. I will not try to give a complete account of what has happened since then, partly because it would be too long and partly because we probably do not yet have enough perspective on some of the more recent developments. However, I want to say a little about my work in the years 1994–5, which I regard as the most productive in my career.

By this time in my life, I had basically spent about two decades working on quantum field theory, but this work involved a sort of split personality. The early part of my career had involved conventional problems of particle physics, which in the Standard Model we understand in terms of quantum field theories in four-dimensional spacetime. Starting in the late 1980's, when I worked on problems like knot theory, I was basically studying somewhat similar field theories, though with rather different goals. The rest of my work was in string theory and largely revolved around a quite different and rather special class of quantum field theories, in two dimensions.

The bifurcation of my interests in two different classes of quantum field theories, studied with methods that are often quite different, felt a little strange. What happened in 1994–5 was that a larger perspective emerged in which all quantum field theories in all dimensions play a role. Many physicists contributed to this. My own contributions



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年に起ったのは、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・サイバーグと共同で、数学者からも物理学者からもサイバーグ・ウィッテン理論と呼ばれる理論を発表しました。ただし、この名前の持つ意味合いは、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います。と言いますのも、それによって、物理学者と数学者のものの見方が今も違う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。すでにお話ししたのですが、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

basically had two parts.

With Nathan Seiberg, I developed in 1994 what both mathematicians and physicists call Seiberg-Witten theory, though this phrase means rather different things to mathematicians and physicists. I want to explain this in some detail because it reflects the differences in outlook that still exist today between physicists and mathematicians.

To physicists, Seiberg-Witten theory was our new way of understanding how certain quantum field theories behave when quantum effects are big.

When one is doing research, the trick is to find a problem simple enough that one can solve it but interesting enough that solving it is worthwhile. Seiberg and I managed to do this by finding quantum field theories that were simple enough that we could solve them and subtle enough so that we could learn useful lessons by solving them. Among other things, Seiberg-Witten theory enabled me to finally make a small contribution to the understanding of quark confinement, as I had dreamed to do as a student. It is instructive to look back and realize how far out of reach this contribution would have been in my student days, when I had first worked on this problem. As I told you before, another lesson about research is to not have too many preconceptions about what one might be able to accomplish at a given point in time.

My work with Seiberg also had mathematical implications to the study of four-dimensional spaces. These implications are what mathematicians usually refer to as Seiberg-Witten theory. This is actually an interesting illustration of the fact that although in some ways, mathematics and physics have grown much closer together during my career, in some ways they remain far apart. The goals of the two fields and the tools that they can reliably use are quite different. Mathematicians using what are called Seiberg-Witten equations (along with other tools) have made wonderful discoveries in geometry, but usually without much reference to the quantum side of Seiberg-Witten theory.

The following year, drawing among other things on the experience from Seiberg-Witten theory, I proposed a somewhat similar picture of the behavior of String Theory for strong coupling, when the standard methods of calculation are not adequate. In doing this, I built on and extended the work of quite a number of colleagues. It will not



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があれば、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ことです(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

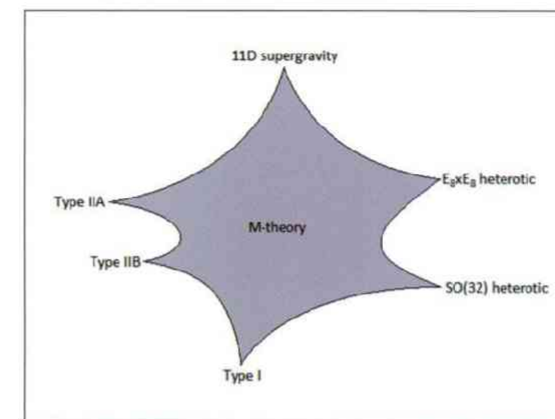


Fig. 9

wikipedia

be practical here to explain all of the clues, but I want to mention that at the annual string theory conference that was held in Berkeley in 1993, John Schwarz had been very excited about work he was doing with Ashoke Sen which in hindsight was on the right track. I had never seen John so excited except at the beginning of 1984, a few months before he and Michael Green made their epochal discovery about anomaly cancellation. So I listened carefully and this was one of the things that pointed me in the right direction.

At any rate, the picture that emerged was that all the string theories as traditionally understood are different limiting cases of a single richer theory, now called M-theory (Fig. 9). This theory is the candidate for superunification of the laws of nature. The traditional string theories are alternative descriptions of a bigger reality; they each tell part of a richer story. All quantum field theories in all dimensions are part of this richer story.

I have often been asked why I used the name M-theory to describe the richer theory that has the traditional string theories as limiting cases. M-theory was meant as a temporary name pending a better understanding. Some colleagues thought that the theory should be understood as a membrane theory. Though I was skeptical, I decided to keep the letter “m” from “membrane” and call the theory M-theory, with time to tell whether the M stands for magic, mystery, or membrane. Later, the membranes were interpreted in terms of matrices. Purely by chance, the word “matrix” also starts with “m”, so for a while I would say that the M stands for magic, mystery, or matrix.



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おいて、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。

Perhaps I should conclude by briefly explaining my view of the significance of the mathematical and physical work that I have been involved in. It actually is more simple to explain my opinion on the mathematical side. Quantum field theory and String Theory contain many mathematical secrets. I believe that they will play an important role in mathematics for a long time. For various technical reasons, these subjects are difficult to grapple with mathematically. Until the mathematical world is able to overcome some of these technical difficulties and to grapple with quantum fields and strings *per se*, and not only with their implications for better-established areas of mathematics, physicists working in these areas will continue to be able to surprise the mathematical world with interesting and surprising insights. I have been lucky to be at the right place at the right time to contribute to part of this.

On the physical side, though there is no definitive answer, there are many circumstantial reasons to believe that String Theory and its elaboration in M-theory are closer to the truth about nature than our presently established theories. String/M-theory is too rich and its consistency is too delicate for its existence to be purely an accident. Another strong hint is the elegance with which unified theories of gravity and the particle forces can be derived from String/M-theory. Moreover, where critics of String Theory have had interesting ideas, these have tended to be absorbed as part of String Theory. Finally, String/M-theory has repeatedly proved its worth in generating new understanding of established physical theories, and for that matter in generating novel mathematical ideas. All this really only makes sense if the theory is on the right track.



稲盛財団2014——第30回京都賞と助成金

発行 2015年12月31日

制作 公益財団法人 稲盛財団

〒600-8411 京都市下京区烏丸通四条下ル水銀屋町620番地

Phone: 075-353-7272 Fax: 075-353-7270

E-mail [postmaster@inamori-for.jp](mailto:postmaster@inamori-for.jp) URL <http://www.inamori-for.jp/>

**ISBN978-4-900663-30-5 C0000**