

# Round Table Talk : ネイサン・ザイバーク教授に聞く

ネイサン・ザイバーク Nathan Seiberg  
プリンストン高等研究所教授

大栗 博司 Hirosi Ooguri  
Kavli IPMU 主任研究員

立川 裕二 Yuji Tachikawa  
Kavli IPMU 教授

**大栗** 過去数十年の間に場の量子論と弦理論は著しい進展を遂げ、その中で、あなたは重要な貢献をされました。4次元 $N=1$ 理論のザイバーク双対性、4次元 $N=2$ 理論のザイバーク-ウィッテン解、非可換空間上のゲージ理論のザイバーク-ウィッテン・マップ、リウビル理論のザイバーク限界、共形場理論のムーア・ザイバーク方程式、アフレック-ダイン-ザイバークのスーパーポテンシャル、等々、数多くのアイデアと方法にあなたの名前が付けられています。その一つ一つが私たちの進展の重要なステップとなってきました。

今日は、この歴史を振り返り、あなたがどのようにしてこれらの発見を成し遂げられたのか、また場の量子論と超弦理論の将来の発展についての展望を伺いたいと思います。

**ザイバーク** 本題に入る前に、招待していただいたことと温かい言葉をいただいたことにお礼を申し上げます。Kavli IPMUに滞在中の厚遇には全く感激しています。お二人をはじめ、機構長、他の研究者とポストドク、事務職員の皆さんも私の世話をし、私の訪問がうまく行って爽り多いものになるように尽力して下さっています。素晴らしかったです。これまでこのようなもてなしを受けた覚えがありません。ですからとても感謝していると同時に戸惑っています。



大栗 博司

ネイサン・ザイバーク

立川 裕二

**大栗** ご丁寧ありがとうございます。

あなたは1982年に博士の学位をワイツマン科学研究所から授与されて、すぐにポストドクとしてプリンストン高等研究所（高等研）に行かれたのですね。

**ザイバーク** その通りです。ポストドクとして行きました。

**大栗** 私が研究者になる前のことでした。私は1984年に大学院生になりましたが、いわゆる第1次超弦理論革命の後、超対称性について知られていたことに追いつきたくてあなたの論文を熱心に読んだことを覚えています。あなたは高等研に行かれてほとんどその直後か、あるいは多分1年後に超対称性について研究を始められたのではないのでしょうか？

**ザイバーク** ほとんどすぐに始めました。1982年から83年にかけてのクリスマス休暇中に超対称性の研究をしたことを覚えています。

**大栗** それでは高等研に到着後、完全に研究の方向を転換されたのですね。あなたはワイツマン科学研究所では何

かテクニカラーに関連した模型の構築をなさっていたと伺っています。

**ザイバーク** そうなのですが、うまくいきませんでした。それで、ポストドクになった機会に、方向を転換するべきだ、そして超対称性が面白そうだと考えたのです。

**大栗** その当時、あなたが超対称性について一番面白いと思われたのは何だったのでしょうか？

**ザイバーク** 超対称性は、興味深い知的構造であり、現象論にも関連があるかもしれないと思いました。マイケル・ダインは、以前から超対称性を研究しており、それを私が勉強するのを励ましてくれました。彼は、まだプレプリントの形だったベスとバガーの本を勉強するように薦めてくれました。（ユリウス・ベスはその丁度1年前にプリンストンでの一連の講演を終えたところでした。その時学生だったジョナサン・バガーがノートを取り、結局それが有名な本になったのです。）

**大栗** マイケル（ダイン）もそこでポストドクをしていたのですか？

**ザイバーク** 高等研でマイケルは5年任期の所員でした。私は新任のポストドクとして着任したのです。彼には大変お世話になりました。私のメンター(指導者)になってくれたのです。彼からは大きな影響を受けました。私たちの最初の研究課題は超対称QCD(量子色力学)のダイナミクスに関するものでした。当時その理解がどんなに混乱していたか、今では想像することさえ困難です。

**立川** それからあなたが超対称性の破れに関する論文をイアン・アフレックとダインとの共著で発表したのですね。

**ザイバーク** 私たちが書いた最初の論文はアン・デイビスとの共著で、超対称性に基づくスーパーポテンシャルについて書きました。当時はそれさえも自明ではなかったのです。その主題に関しては、それ以前にエドワード・ウィッテンが重要な仕事をしていました。

**大栗** ウィッテンの指数に関する論文のことを仰っているのですか？

**ザイバーク** 2つの論文がありました。一つは指数について、もう一つはダイナミカルな超対称性の破れと呼ばれるものです。これらの論文は素晴らしい内容に満ち溢れたものでしたので、非常に注意深く勉強したことを覚えています。特に、クォークが有限な質量を持つ超対称量子色力学の振る舞いが解析されていました。しかし、当時はクォークの質量が0の場合の理論の振る舞いについて、矛盾のない描像は存在していませんでした。私たちはアンと共に理論の(ポテンシャルの)平坦な方向を解析した論文を書き、そこではあるスーパーポテンシャルが生成されるであろうという議論をしました。私たちの解析は問題の無矛盾条件と対称性に基づくものでしたが、このスーパーポテンシャルが実際に生成されることは証明しませんでした。

### 超対称性とスーパーポテンシャル

**ザイバーク** その後アンが去り、私たちはイアン・アフレックと一緒に研究

を始めました。その夏、私たちはこのスーパーポテンシャルがある状況下でインスタントンによって生成されることを示す論文を書きました。当時は、非くりこみ定理\*は厳密であり、また非摂動的に正しいと信じられていたため、これは非常に驚くべきことでした。

**大栗** あなたは通常の議論が間違っていると納得したのですか？

**ザイバーク** 非くりこみ定理についてほとんどの過去の議論はファインマン・ダイアグラムに基づくもので、本質的に摂動的なものでした。それはインスタントンには適用されません。インスタントンの計算自体はおそらく1週間かかったと記憶しています。それから文献に載っている全ての議論を調べ、その誤りを修正するのに更に2か月かかりました。

そして、私たちは短いレターを書き、その後スーパーポテンシャルを導く長い論文を書きました。

**立川** それがアフレック-ダイン-ザイバーク-スーパーポテンシャルですね。

**ザイバーク** フレーバーとカラーの数によりますが、インスタントンあるいはグルーノの凝縮によって生成されることを示しました。フレーバーの数ももっと多いとスーパーポテンシャルは生成されず、質量0の理論の真空の縮退は解けません。私にとってこれは最大の驚きでした。これらは幾つかの基底状態を持つ場の量子論です。

**大栗** モジュライ空間をパラメータとする連続無限個の基底状態ですね。

**ザイバーク** 私にとってはとても驚きでした。

**大栗** ということは、超対称性理論の非常に重要な概念の幾つかが1年内外で現れたわけですね。

**ザイバーク** それ以前の論文に前触れがありました。主にはエドワード・ウィッテンの数篇の論文と、特に2+1次元で同じ問題を解析したイアン・アフレック、ジェフリー・ハーベイ、エドワード・ウィッテンの論文でした。

また、私たちはある程度の時間を費やして素粒子の現象論的モデルの構築を

試みました。ですから、主には超対称性を破ることに興味を持っていたのです。真空のモジュライ空間を持つ理論は困りものでした。その目的に使えなかったのです。

そして、1984年の夏にマイケル・グリーンとジョン・シュワルツが革命的な論文を書き、一夜にして物理の世界が変わりました。

### 1984年の第1次超弦理論革命

**大栗** それについてお聞きになったのは、いつのことでしたか？

**ザイバーク** 8月末か9月初めでした。誰もがこの素晴らしいブレイクスルーについて話していましたが、私たちポストドクは、誰一人としてそのブレイクスルーとは何のことも分かっていませんでした。それまで私たちが聞いたことのなかった弦理論という何か謎めいた理論でしたが、これは何か古手の人たちが研究し、放り出したもののようなものでした。彼らは「これはうまくいかなかった試みだから、若手は学ぶべきではない」と考えたのです。

イアン・アフレックは1年間パリに行っていて、マイケル・ダインと私は「このまま超対称ゲージ理論の研究を追及しようか、それともこの新しい理論を研究しようか？」決めなければなりません。そして、弦理論を研究することに決めたのです。その秋、デイビッド・グロスが主として若手の教育のため、プリンストン大学で素晴らしい弦理論の講義を行いました。その講義は非常に人気があり、プリンストン大学と高等研の全ポストドク、学生全員、教員多数が聴講しました。講義は巨大なレクチャーホールで行われました。

**立川** それはヘテロティック弦理論が構成される前でしたか？

\* 量子力学や場の量子論において、ある物理量の値が量子補正を受けないという主張は、「非くりこみ定理」と呼ばれる。非くりこみ定理があてはまる量は、古典極限で計算することができる。ここで問題になっているスーパーポテンシャルの場合、摂動展開では非くりこみ定理が成り立っていたが、インスタントン効果まで考えると量子補正を受け、非くりこみ定理は破れていた。

**ザイバーク** その秋の間にヘテロティック弦理論が構成され、カラビヤウ・コンパクト化が発見され、その他多くの主要な発展がありました。私たちの多くは、遅れずについて行くことに非常な困難を感じていました。私たちがボゾンの弦のような基礎的な題材を勉強していた間に、数多くの新たな発見がなされました。

**立川** デビッド・グロスは講義の間にそういった最新の発展全てをカバーしたのでしょうか？

**ザイバーク** 彼の講義は、主としてボゾンの弦に関するものでした。

**立川** その講義ノートはこれまでに何らかの形で出版されましたか？興味深い歴史的な資料になるかもしれません。

**ザイバーク** デビッドは当時入手できたレビュー論文に従ったと思います。後に、私がイスラエルのワイツマン科学研究所、それからラトガーズ大学にいた時に弦理論を教えましたが、デビッドの講義を聞いた時の私のノートを基に、内容を拡充し、かつ最新版に改訂して使いました。

話を1984年に戻すと、その後何年かの間、マイケル・ダインと私は弦理論について共同研究を続けました。

**大栗** あなたは超対称性に関する研究を脇に置いたわけですが、それにもかかわらず、その後数年の間に行った弦理論に関する研究では、明らかにご自身が開発されたツールを利用されたものがあります。たとえば、世界面インスタントンに関する研究です。

**ザイバーク** 間違いなくその通りです。特に、真空のモジュライ空間についての考察、縮退を解くことのできる非摂動効果の探求、それらの正則性による制御は私たちの弦理論に関する研究で最も重要なものでした。

その典型的で興味深い例が種々のインスタントンの計算に現れます。その答えの実数部がインスタントン作用で、虚数部がトポジカル・チャージですが、実数部と虚数部を組み合わせると正則解を与えます。これによりインスタントンがスーパーポテンシャル

に寄与できることが保証されます。当時は全く魔法のように見えました。アフレックとハーベイとウィッテンは2+1次元の場の理論でそれに気が付き、私は3+1次元の場の理論で見つけ、その後弦理論の4次元時空におけるスーパーポテンシャルに対する世界面インスタントンの寄与で同じことが起きたのです。そういうことが起きる度に、まるで奇跡的につじつまが合っているように見えました。私たちはなぜそれが起きたのか、深遠な根本的理由を知りませんでした。勿論、現在は完全に理解されています。

その間、マイケルと私は弦理論における様々な現象を巨視的な観点から理解しようと試みました。私たちの問いは、低エネルギーの観測者の視点でそれらを記述するにはどうすれば良いかということです。そして私たちは時空の有効作用と、特に4次元時空におけるスーパーポテンシャルに関して世界面の方法により得られた多くの結果を取りまとめようと試みました。弦理論は低エネルギーの観測者が意外に思うような現象をどの程度まで導くことができるか調べようということが動機でした。記憶が正しければ、微視的な(世界面の)論法を用いて見出された多くの「奇跡的な」結果が、簡単に巨視的に説明されることが分かりました。

実際、研究をこのように進めたことが、世界面の方法に存在する数多くの興味深く微妙な効果を明らかにする上で役立ちました。結局、主として私たちが用いたツールは、時空の超対称性に伴う4次元時空におけるスーパーポテンシャルの正則性でした。これは世界面の計算では表に現れないことであり、従って許される解についての強力な制限を導きます。

**大栗** あなたの論文で『弦理論における巨視的な物理から得られる微視的な知見』という表題のものがありますが、その観点を如実に表していると思います。

これは他の人たちのほとんどがしている、微視的な記述から巨視的な結果を導こうということと逆でした。あな

たは低エネルギー有効理論の一般的な性質が微視的な性質の幾つかを説明するうえで役立ち得るということを主張されました。

**ザイバーク** その通りです。なぜなら対称性には低エネルギー理論では明らかなのに短距離の計算では表に現れないものがあるからです。弦理論の非くりこみ定理がその一例です。その元々の証明は世界面の方法に基づくものでしたが、コンタクト項に関連した微妙な点を見抜くには感度が十分ではありませんでした。マイケルと私は4次元時空におけるスーパーポテンシャルの正則性に基づく別の証明を見出しました。その巨視的な証明は全く概念的であり、非常に初等的なものです。そして、非自明なくりこみが生じるかもしれない特殊な状況を指し示していました。これは後にマイケル・ダインとエドワード・ウィッテンの論文で議論されました。

これには困惑させられました。世界面の方法はそういう特殊な状況はないということを示唆していたからです。この問題の詳細な解析が世界面の方法に新たな光を当て、先行研究では無視されていたコンタクト項の重要性を明らかにしました。

より簡単な証明は、時にその本当の内容を理解させてくれます。もし動かせる部分が非常に多い何かとても複雑な問題があり、何が本質的で何が本質的でないかよく分からないとすると、どうやって証明するか見通すのが困難です。しかし、簡単な証明では、それははっきりしていました。これは低エネルギーの記述がどのように抜け道を指し示すのかというもう一つの例です。

#### 共形場理論とトポジカルな場の理論

**大栗** また、あなたの研究には、グレゴリー・ムーアと共同でなされた、共形場理論の分類や、フュージョンとモジュラー不変性を特徴づける多項式方程式系の発見など、数学に非常に深く広い影響を与えたものがあります。



また、それらは物理学にも影響を与えていて、物性論（凝縮系物理）におけるトポロジカル相がその一例です。ですから、場の量子論から導かれる深遠な数学的構造は広く応用されてきました。

グレッグと一緒に研究された共形場理論の分類は、私が高等研に着任する直前に発表されました。この研究が行われた経緯を伺いたいと思います。

**ザイバーク** 振り返って見ると、その研究はダニエル・フリーダンとシュテファン・シェンカーの研究から始まったのです。（グレッグ・ムーアは、それと独立に関連したアイデアを持っていました。）

**大栗** 彼らは全ての共形場理論の空間という考えを提唱しました。

**ザイバーク** 彼らはリーマン面上のあるベクトル束を用いた描像を持っていましたが、当時私には全く理解できませんでした。私には彼らが何を考えているのか、あるいは彼らがどこを目指しているのかさえ分かりませんでした。その後、エリック・フェアリンデの研究がこの話の一場面として登場しました。彼はプリンストンを訪れて、現在ではフェアリンデ代数とフェアリンデ公式として知られていることについて講演したのです。彼は有理共形場理論のフュージョン則をある性質を満たす整数によって記述し、モジュラー変換行列 $S$ がそれらを対角化するはずであると示唆しました。それは素晴らしいものでした。彼がどのようにこの素晴らしい洞察を得たのか、私は未だに分かりません。

それでグレッグ・ムーアと一緒にフェアリンデの仕事を理解しようと試みました。ある程度進展した後、偶然私たちは蟹江幸博と土屋昭博の論文を見つけました。（昨日初めて土屋さんに会って、とてもうれしかったです。）その論文は非常に数学的なものでしたが、何とか私たちは自分たちが使える簡単な概念を抽出することができました。私たちは有理共形場理論における共形ブロックの変換の性質を調べ、そ

れらが有限個のデータのセットにより特徴付けられることを示しました。さらに、そのデータは数個の多項式で与えられる多数の極めて制限の強い無矛盾条件を満足しなければなりません。実はこれらの制約条件の数が余りに多すぎるので、解の存在は驚くべきことに思われました。

これらの多項式から得られた結果の一つは、フュージョン則とモジュラー行列 $S$ との間の関係についてのフェアリンデの予想を証明できたことでした。私には彼の直観は未だに驚きです。どうやって彼はこの予想を考えついたのでしょうか？

私たちは明確で矛盾のない構造を手にしたにもかかわらず、当時はそれを与える厳密な数学的枠組みが何なのか、全く考えつきませんでした。私たちの注意を圏論に向けてくれたのは、デイビッド・カジュダンおよびピエール・ドリーニュとの有益な会話でした。勿論、その時点では私たちは圏論について何も知識を持ち合わせていませんでした。カジュダンが薦めてくれた本をぱらぱらと見た時のこと、それから「こんな本をどうやって読んだらいいんだ？」と自問したことなど、今でも実に生き生きと思い浮かびます。その日はそのまま帰りました。幸いなことに私はグレッグと一緒に仕事をしていました。翌朝、彼は我々がその本から知る必要のあること全てを要約した見事な講義を私にしてくれたのです。

**大栗** グレッグらしいですね。

それはウィッテンのジョーンズ多項式に関する論文が出る以前でした。私は高等研に行く直前にあなたの有理共形場理論の分類についての論文を読んだことを覚えています。

**ザイバーク** 細部に渡って全てを覚えているわけではありませんが、一見無関係な問題を扱う異なる系統の研究が幾つかあって、それらが一体となったのです。その一つは有理共形場理論で、フリーダンとシェンカー、フェアリンデ、それから私たちの仕事が始まります。ウィッテンはジョーンズ多項

式に興味を持っていました。私たちは1988年の春と夏に一連の論文を書きました。ウィッテンの論文は1988年の秋に出ました。

**大栗** その2つの方向の研究に交流はありましたか？

**ザイバーク** ウィッテンがどの程度私たちの研究に影響を受けたのか、私は知りません。彼は論文の中ではっきり私たちの研究に言及しています。しかし、3次元の描像に基づく彼の考え方は、より広く、より一般的で、より深い洞察力を持っていました。私たちは2次元で一連の変換を行いました、それを3次元の理論と考えるべきであったことは認識していませんでした。

**大栗** 実際は、ウィッテンはウィルソン・ループの期待値を計算する際に、それを2次元の問題に還元し、モジュラー変換とフュージョンの言葉を使いましたね。

**ザイバーク** しかし、彼は、本質的に3次元性を用いるような操作も用いました。そして、勿論、彼はチャーン-サイモンズ・ラグランジャンによる美しい記述も行っています。

**大栗** しかし、現在ではラグランジャンを持たない理論にも使われています。ですから、あなたたちの到達点に戻ってきているともいえます。

**ザイバーク** その通りですが、それでも全構造の裏には、3次元のローレンツ不変な理論、それからトポロジカルに不変な理論さえ潜んでいることを仮定しなければなりません。実際問題としては、何かを計算する際、私たちがした計算とそれほど違いがあるわけではありません。しかし、私たちの概念的描像の方が優れているというわけではないのです。

それから私たちは有理共形場理論に関する自分たちの研究とウィッテンのチャーン-サイモンズ描像の間の辞書を完成させようと試みました。それには1年かかりました。その後グレッグはイエール大学に移り、私が思うに一連の研究の最も素晴らしい応用を成し遂げました。ニコラス・リードと共に



ムーア・リード状態を発見したのです。

### リウビル理論の解明

**大栗** それは物性物理学に対して直接的に応用されてきましたね。

第2次超弦理論革命以前のこの時期にあなたがなさった別のことを伺いたいのですが、それはリウビル理論に関する研究です。これは長年に渡り非常に混乱が続いた研究課題で、間違ったことが数多く唱えられました。

私は、あなたが京都に来られてリウビル理論に関する混乱の多くを解決する一連の講義を行い、全てをきちんと整理されたことを覚えています。あなたは多くの間違った説を捨て去り、あなたが選んだものは後で全部正しいとわかりました。どのようにしてそれをなさったのですか？

**ザイバーク** この共形場理論が共形場理論の一般的公理を満足しないことに悩まされました。従って、つじつまの合った描像が得られるようにするには、どのように公理を緩めれば良いのかを問うことは自然なことでした。

**大栗** リウビル理論は多くの点で、普通の理論とは違います。例えば、リウビル理論の真空の概念は非常に混乱を生じさせるものです。ヒルベルト空間に属さない状態が存在しますが、それでも理論の中で果たす役割があります。あなたは、混乱していたところを一挙に整理して判りやすくしました。

**ザイバーク** ありがとうございます。

**大栗** いえ、単なるほめ言葉ではなく、

あなたがどのようにしてそれをなさったのか伺いたかったのです。

**ザイバーク** まあ、非常に混乱していました。これらの問題を自分に問いかけてみたことを覚えています。

以前にクニズニク、ポリヤコフ、ザモロヂコフが2次元重力についての美しい論文を書きました。その直後に彼らの結果のリウビル理論による解釈をデイビッドとディストラー、および川合が与えました。それからダグラスとシェンカー、ブレジンとカザコフ、それからグロスとミグダルが2次元重力を記述するために行列模型を使いました。彼らの答えは極めて単純で美しいものでした。それ故に、私はたとえリウビル理論が共形場理論の一般的公理を全ては満足しないかもしれないにもかかわらず、何か意義のある理論であろうと感じました。これが動機となって詳しく調べたのです。

行列模型からのデータに加えて、半古典的なリウビル理論についても膨大な文献がありました。うまく行くはずだがうまく行っていないものが沢山あったので、ただ、なんとかうまく行かせようとしただけです。そして、その続きの仕事をグレッグと共に行いました。私たちは行列模型とリウビル理論の間のこの関係をより正確なものにしようと試みて、非常に実り多い時を過ごしました。

勿論、それ以来、この理論に関する我々の理解は、リウビル理論の厳密解を見出したドーンとオットー、ザモロヂコフ兄弟、その他の研究により完全

に変わってしまいました。

### 正則性の威力

**大栗** その後、あなたは1990年代初めに、多分第2次超弦理論革命の前の2年間、超対称場の理論に立ち返られました。何かが起きることを予期されたのでしょうか？ これをお聞きするのは、あなたが1990年代初めの数年間、超対称性についてなさった仕事が、第2次革命の進展の中で本質的な役割を果たすことになったからです。あなたが超対称場の理論に立ち返られたのは、何が動機だったのでしょうか？

**ザイバーク** 私は共形場理論と2次元重力を研究していましたが、そろそろ研究テーマの変え時だと思ったのです。それで、ヨッシ・ニルと一緒にクオークとスクォークの質量についての理論模型を構築する研究をしました。それからマイケル・ダインとアン・ネルソンの超対称性の破れのゲージ伝達に関する新しい論文のことを知りました。（後に、彼らはシャーマンとも、またニルとも共同で研究しました。）彼らは、弦理論が現れた時マイケルとイアンと私が打ち切った超対称性の破れについての問題と同じ問題を取り上げることにしたのです。

**大栗** では、それはあなたがアフレックとダインと一緒になさった研究の続きというわけですね。そのおよそ10年後でしたか？

**ザイバーク** その通りです。彼らは1992年から1993年にその仕事をしました。

アンはラトガーズを訪れ、私たちは色々議論しました。当時私は超対称性に飽き飽きしており、その研究に引き返したいとは思っていませんでした。しかし、彼女は私をその研究に引き戻すことに成功したのです。

**立川** 引き返したくなかったのですか？ それはびっくりです。

**ザイバーク** 引き返したいとは思いませんでした。「もうこの研究は済ませたので、何か新しいことを始めたいも

のだ」と思っていたのです。

アンはラトガーズに私たちを訪ね、マイケル・ダインと一緒にいった研究について話しました。それは私にとって非常に刺激的でした。私たちは議論を始め、やがてR対称性と超対称性の破れの関係についての論文を書きました。(それはネルソン-ザイバークの定理と呼ばれることがあります。)これは10年前にイアンとマイケルと私が考えたことの続きで、それをより具体的にでもっとはっきりした法則に変えたのです。

**大栗** それを超対称場の理論に対する現代的アプローチの始まりでした。

**ザイバーク** それは要素の一つでした。2つ目の要素は私のヨッシ・ニルとの研究に影響されたもので、私たちはスプリーオンと、スーパーポテンシャルがスプリーオンに関して正則でなければならぬという事実を用いました。

**大栗** それを超対称性理論でスプリーオンの方法が用いられた最初でしたか?

**ザイバーク** スプリーオンが現れたのは、特に超対称性の破れとの関連ではもっと前でした。ここで新しい点は、通常の超対称場の結合定数を全て背景超対称場とみなすことにより、スプリーオンとして扱うことであつたと思います。その主たる応用は非くりこみ定理を導くことでした。

**大栗** この方法を超対称性理論に導入したのはあなただったのですか?

**ザイバーク** そうだったかどうか、よく分かりません。しかし、超対称性理論の関連で全ての結合定数を背景場とみなしたのは、恐らくそれが最初でした。私は、それを思いついてから数時間ほどの間に多くのことがジグソーパズルを完成させるようにびったり収まったことを覚えています。

ここで歴史をたどってみたいと思います。1980年代以前に場の量子論の振る舞いがある一般的な要請を満たすことがはっきり理解されていました。マレー・ゲルマンはそれを全体主義原理「禁止されないものは全て義務である。」と述べました。同じことをトホ

ーフトは「ナチュラルネス」、すなわちパラメータは対称性のような正当な理由によって禁止されない限り、自然で一般的な値を取ると述べました。しかし、超対称性理論はその原理に反するように見えました。スーパーポテンシャルはくりこみができず、一般的でない値を取り得ます。これは奇妙に見え、一般的でない値を取る原因である相殺が起きることは奇跡的に思えました。その後、非摂動効果が摂動的非くりこみ定理に反することに気がついた時、一定の理解の枠組み(organizing principle)の必要性がはっきりしました。言い換えると、「超対称性理論において場の理論の一般的性質がどの程度まで真なのか?」ということです。

スーパーポテンシャルの正則性に基ついた現在の見方はゲルマンの全体主義原理の正当性を立証し、トホーフトのナチュラルネスとも合っています。スーパーポテンシャルは他の全ての項と同じ一般的性質を持ちますが、一つ違う点があり、それは一般的性質を使う場合、同時に正則性を考慮しなければならぬことです。この理由により、私は論文の題目として『「ナチュラルネス」対「超対称非くりこみ定理」』を選びました。

それは私にとって非常に満足のゆくものでした。多くの異なる計算結果と多くの異なる現象が一つの理解の枠組みを用いて同時に理解されたのです。何年もの間堂々巡りをしたあげく、突然全てが一つに纏まったように感じました。これが正しい考え方であることは明らかでした。

**大栗** 正則性の重要性を認識されたのは何時のことだったのでしょか?

**ザイバーク** 私は何年かに渡って徐々にスーパーポテンシャルの正則性の威力を認識したのです。私たちはスーパーポテンシャルの計算で、実数部と虚数部を独立に計算した結果が驚くべきことに正則であると分かった例を数多く見てきました。その当時は、これは奇跡であり、計算の無矛盾性の非自明なチェックのように見えました。

また、これを非くりこみ定理に用いることは、完全に新しいわけではありません。例えば、エドワード・ウィッテンは世界面上の弦理論の摂動的非くりこみ定理に対して正則性を用いて議論し、マイケル・ダインと私は弦理論の摂動定理について同様の論法を用いました。これらの場合、場に関しての正則性であつて、パラメータに関しての正則性ではありません(但し、時空の場は世界面上の理論ではパラメータになるのですが)。また、3+1次元の場の理論におけるパラメータに関する正則性は、ビクトル・ノビコフ、ミハイル・シフマン、アルカディ・ヴァインシュタイン、ヴァレンティン・ザハロフの各論文、それから印刷公表はしていませんがジョー・ポルチンスキーと私が行った研究にも登場しました。他にも例があると思いますが、私が忘れてに違いありません。

**大栗** それは1993年の夏のことですね。しかし、あなたは1980年代末にも本質的にはそれを使っていませんか?

**ザイバーク** その通り、使いました。しかし、当時は理解の枠組みと呼ぶに値する根本的なものとは見ていませんでした。

**大栗** 興味深いお話です。というのも、私がベルシャドスキー、チェコッティ、ヴァッファとトポロジカルな弦理論についての論文を書いたのもその年(1993年)で、その論文もいわゆるBCOV方程式と呼ばれる漸化式を導くために正則性とその超対称性との関係を用いました。

**ザイバーク** あなたたちの論文は一つの節目でしたね。多くの問題点を明らかにし、多くの重要な結果に導きました。しかし、それは別系統をたどった発展でした。同じようなアイデアが独立に異なる文脈でほとんど同時期に現れたことは驚きであり、また興味深いことです。

私たちは科学における歴史的発展を議論しているところですが、私は有名な黒沢監督の映画、『羅生門』を思い



出しました。

**立川** その映画の原作は芥川の小説ですね、日本では学校で教わります。

**ザイバーク** 私はその本のことは良く知りませんが、映画は大好きです。そのストーリーの教訓の一つは、同じ事実であっても人が違うと違って見えるということです。これは科学の歴史にも共通することです。幾つか別系統の発展があり、典型的にはそれぞれが異なる問題を動機としています。従って、同じ時期に研究した別の研究者をインタビューすると、恐らくある出来事の完全に違うバージョンの話の聞くことになるでしょう。そして、どちらかの話がもう一方のよりも正しいのだということはありません。単に両方とも違う見方を反映しているだけなのです。

あなたの質問に戻りますと、当時私は主として4次元の場の量子論に興味を持っていました。しかし、4次元の場の量子論の非摂動的な振る舞いについて、何か言うことができるという考えは全く想像もつきませんでした。

**大栗** その通りです。4次元で解析的に理解できる非摂動的物理があるとは予想外でした。

**ザイバーク** 正則性が理解の枠組み作りのためのツールであるということが理解されると共に、突然物事が明らかで容易になりました。

**大栗** 従ってそれが指導原理となりました。

**ザイバーク** 新しいツールを手に入れた時は、最大限野心的であるべきです。「正則性を用いて場の量子論の未解決の問題全てに取り組むことができるだろう。」と考えたことを覚えています。

まず第1段階として私は量子色力学の超対称版を振り返ってみました。以前、イアンとマイケルと共にフレーバーの数が少ない場合については、理論の振る舞いを理解したので、私はフレーバーの数が増えた場合に起きることを理解したいと思いました。新しい考え方や新しいツールという武器により、私は古典論での真空の縮退が場の量子論でも解けないが、それでも極め

て興味深い効果があることに気がつきました。例えば、真空のモジュライ空間の複素構造が量子論では変形を受けます。他の場合には、新しい質量0の複合粒子が現れます。それは驚きでした。それまでは、強い相互作用の力学により理論にはエネルギーギャップが存在する、あるいは質量0の粒子は全て自発的対称性の破れに対応する南部-ゴールドストーン・ボゾンであると信じられていたのです。それに対して、この場合は自発的対称性の破れと関連のない質量0の複合粒子が存在し得るのです。この事実は、後に $N=2$ 理論(質量0のモノポールが存在)および他の $N=1$ 理論(質量0の複合ゲージ場、質量0のグルーボール、質量0のエキゾチック粒子、等々が存在)の長距離での振る舞いを理解する強い動機となりました。

その後、私はケン・イントリリゲータ、ロバート・リーと共に益々複雑な模型の研究を始め、新しい方法は非常に強力で多くの厳密な結果を導くことが分かりました。

それからアショク・センが極めて興味深い論文を書きました。

**大栗** 彼のモノポールの研究の話ですか？

#### 双対性とザイバーク-ウィッテン解

**ザイバーク** そうです。 $N=4$ 超対称性理論で磁荷2のモノポールの存在を確立したセンの論文についての話です。その論文は双対性に対する真の障害を取り除きました。その論文の前に双対性について考えた人達がいました。磁荷2のモノポールの重要性を強調したのはウィッテンだったと思います。そして、そのようなモノポールは存在しない、従って双対性の考えは全く間違っていると信じられていました。センの論文はそのモノポールを見出したもので、一夜にして双対性は正しいに違いないということが明らかになりました。

**大栗** ここに立川さんがいるので、私たちのどちらかがその説明をした方が

良いのではないのでしょうか。1990年初めには電磁双対性、つまりS-双対性を信じた人は余り多くありませんでした。

**立川** そうですね、弦理論の研究をパーティだとすると、僕は随分遅れて参加したことになります。

**大栗** 勿論、モントネンとオリープの研究があったと思います。それからオリープとウィッテン、そして…

**立川** ゴダード、ニュイツ、オリープですか？

**大栗** そうです。しかし、1980年代の末にオリープとウィッテンの論文を読んだ時、私は彼らが双対性の証拠を示すよりも、この奇跡的な公式は双対性を仮定しなくても説明できるのだと言っている印象を持ちました。すなわち、全ては超対称性で説明できるのだと。

現在、私たちはそれを、双対性を動機づけるものとして使います。しかし、当時は、基本的に双対性は必要ないと説明するものでした。

**ザイバーク** 彼らは超対称代数の小さな表現に属する状態を考えました。そのような状態を現在ではBPS状態と呼んでいます。彼らはこれらの状態の特別な性質の多くを表現が小さいという事実から得られるものとして説明しました。これらの特別な性質が合理的に説明されたため、誰もがこれを双対性の証拠として用いるべきではないと考えました。

加えて、双対性は $N=4$ 理論で2つのモノポールの束縛状態の存在を要求しました。そして、そのような状態は存在しないと考えられたのです。

**大栗** そうでした。しかしそこでアショクが束縛状態があると示したことは…

**ザイバーク** 研究の上の相転移だったのです！その論文以前は、双対性は細かい専門的なことで余り重要ではないとみなされていました。何かが双対であるかのように見えても、その双対性が厳密に成り立つと信じる理由がないからです。その後、一夜にして双対性の重要性が明らかになりました。

**大栗** アショクの論文で、量子物理で

は双対性が現実に起こると納得しましたか？

**ザイバーク** 直ちに私は $N=4$ 理論では双対性は事実だと納得しました。しかし、後に分かったように、それがこれほど重要で中心的な役割を果たすことになろうとは、その時は想像もしてませんでした。

その後、私はエドワード・ウィッテンと共同して $N=2$ 超対称性理論の研究を開始しました。

**大栗** ウィッテンとの共同研究開始前から $N=2$ 理論に興味をお持ちでしたか？

**ザイバーク** はい。私はそれを単に $N=1$ 超対称性を持つ理論のひとつと考えていました。そして、 $N=1$ 超対称性で益々複雑な例を解析していたところでしたので、そのリストの項目として自然に現れたのでした。また、純粋な $N=2$ ゲージ理論が質量0の光子を持つことは明らかで、純粋な $N=1$ ゲージ理論は閉じ込めが期待されました。ですから、より良く理解することにより閉じ込め機構を説明できると期待していました。

**大栗** そして、あなたが実際にそれをなさったのですね。 $N=1$ ではなく、 $N=2$ の場合について説明する方がうまくいく可能性が高いと考えられたのですか？

**ザイバーク** それよりも、 $N=1$ の特別な場合と考えていました。 $N=2$ に特有な性質により、うまい具合にもっといろいろな量を計算できます。しかし、閉じ込めの問題については、それが本質的なものではありません。

少し遡ると -1987年の秋だと思いますが、ウィッテンがドナルドソン理論を $N=2$ 超対称ヤン-ミルズ理論をツイストしたものとして説明する論文を書きました。そのおかげで物理学者がドナルドソン理論を理解しやすくなりました。しかし、その論文はドナルドソン理論を解くことにはなりませんでした。

**大栗** 数学的問題の物理的解釈を与えたわけですね。

**ザイバーク** しかし、数学者から聞いて

た話では、彼らの観点からは問題の解決にはならないということでした。なぜなら、やはり結局のところドナルドソンがしたのと全く同じ計算をしなければならぬからです。

それでも、もっと広い目で見ればこれは驚くべき論文です。エドワード・ウィッテンはこの論文でトポロジカルな場の量子論の概念を導入しました。これは数学と物理学の両方にとって、広範な影響力を持つ結果を伴う極めて奥深いアイデアなのです。

その研究について話を聞き、私はインスタントの方法という自分のツールキットを用いて $N=2$ 理論に関してその真空のモジュライ空間について考察し、その計量が漸近的にどのように補正を受けるかを示した短い論文を書きました。私はその論文が興味のあるものとは考えず、出版したいとさえ思いませんでした。しかし、エドワードはそれを出版するように私を励ましたのです。実際、彼はドナルドソン理論に関する論文の中で、私のその論文のアイデアは、理論のさらなる発展にとって重要かもしれないと言いました。このことについては、彼は完全に正しかったのです。1988年のことでした。

**大栗** それが現在ザイバーク-ウィッテン解と呼ばれているものの出発点になり、実際解をみつめる際の境界条件となったのでした。

**ザイバーク** そうです。私は『無限遠における振る舞い』についての論文を書きましたが、それを追及することはしませんでした。その後、1994年に超対称性理論に戻った際に自分の1988年の論文を思い出しました。私は真空の縮退は解けず、インスタントの無限級数が真空のモジュライ空間の計量を補正することを知っていました。問題は、どのようにしてそれを評価するのか、またどのようにして級数を足し上げるのかということでした。

先ほど言ったように、その時ケン・イントリリゲータとロブ・リーと私は共同で研究していました。私たちはス

ーパーポテンシャルがインスタントの無限和で与えられる模型をいろいろ研究して論文を書きました。私たちはスーパーポテンシャルの特異点および漸近的な振る舞いが判っていることから、正則性と組み合わせることによって無限級数の和を明示的に閉じた式で書き下すことに成功しました。そこで、私は $N=2$ 理論でも同じことができるだろうと楽観的でした。

私がウィッテンとの共同研究を開始すると、大変な速さで進展し始めました。数週間以内に純粋なゲージ理論と物質がある場合の理論の完全な解が得られました。閉じ込めとカイラル対称性の破れを含むあらゆる種類の興味深い物理現象が明らかになりました。

ウィッテンは、直ちにこの解が4次元のトポロジーを持つ問題を単純化するのに役立つであろうと気が付きました。しかし、私は4次元の場の量子論の力学を理解することにもっと興味がありました。

その後すぐに私は $N=1$ での双対性について論文を書きました。その論文では $N=1$ 超対称ゲージ理論の双対な記述が提示されています。この研究は多くの教訓を与えてくれました。第一に、電磁双対性が普遍的であることが分かりました。 $N=1$ 理論は $N=4$ および $N=2$ 理論よりも包括的で、同じような双対性を示します。第2に、この場合には弱結合の複合ゲージ場が存在します。これはゲージ対称性が基本的なものではないという事実を強調するものです。この点は、以前に主としてアーベリアンゲージ理論において知られていましたが、この場合にもっと劇的なものでした。

この間、ウィッテンは私たちの $N=2$ 超対称ゲージ理論の解を持つ4次元トポロジーとの関係について論文を書きました。

**大栗** そうですね。現在それはザイバーク-ウィッテン方程式と呼ばれています。それは出発点のドナルドソン理論よりも強力であることが分かりました。

**ザイバーク** それは物理的には非常に



はっきりしていて、ドナルドソン理論の複雑な点の多くは小スケールのインスタントンに伴うものだからです。そして、新しい多様体に関連した計算をする度に同じ小スケールのインスタントンを制御しなければなりません。くりこみ群を使えば、平坦な空間で小スケールのインスタントンを一度だけ計算すれば良くて、あとはそれらが出てこない有効理論が得られます。それから考えている曲がった空間にその有効理論を適用できます。この有効理論は、もはや小スケールのインスタントンを持たないので、出発点の理論に存在した多くの複雑な点はもう存在していません。ですから、その理由で…

**大栗** 既に有効理論に組み込まれているので…

**ザイバーク** すでに組み込まれているので、もう気にしないで済みます。実際、低エネルギーの理論は小スケールのインスタントンを持ちません。それがこの方程式を極めて強力なものとしている理由です。

**大栗** 立川さんは1995年には高校生でしたか？

**立川** はい。ザイバークという名前を初めて聞いたのがその頃です。

**大栗** ザイバーク-ウィッテン理論のことを数学の一般向けの雑誌で知ったと聞きましたが…

**立川** ええ、京都で江口徹さんがエドワード・ウィッテンをインタビューしました。1994年の初めだと思います。それが『数学セミナー』誌に載ったのを読んだのです。

**大栗** その通りです。日本の会社の後援でウィッテンが京都に来て、一般向けに講演をしました。私はその手配に関わりました。

**立川** エドワードは江口さんに、その時あなた(Seiberg)としていた研究に極めて興奮していると話しました — それほど説明はありませんでしたが。例の日本の一般向けの雑誌に、1994年の夏の発行ですが、そのことが載っています。

**大栗** 論文が出る前でしたね。その結

果が印刷の形で報告されたものとしては最初でした。

**立川** それから深谷さんらの日本の数学者がザイバーク-ウィッテン理論に非常に興味を持ちました。そして、深谷さんがその数学の一般向けの雑誌に、数学の観点からザイバーク-ウィッテン理論についての入門的な論文をシリーズで書き始めました。それで、私は最初の何年かはザイバーク-ウィッテン理論は純粋数学と思っていました。

やっとザイバーク-ウィッテン理論の物理的な部分を学んだのは、超対称性理論の勉強を始め、結局ベスキンのレビュー論文に出会った後のことでした。

**ザイバーク** TASI (Theoretical Advanced Study Institute in Elementary Particle Physics) 講義録ですか？

**立川** はい、TASI 講義録です。それでやっと物理の観点からザイバーク双対性とは何か理解しました。既に2003年か2004年になっていました。長いことかかったものです。

#### 2005年の第2次超弦理論革命

**大栗** ウィッテンの超弦理論の双対性でのブレークスルーについて聞いたのはいつでしたか？

**ザイバーク** 彼は、それについて研究中に少しずつ私に話してくれました。それから彼が南カリフォルニア大学で講演した時に最終版を聞きました。

**大栗** 1995年の超弦理論国際会議でした。

**ザイバーク** その時、私はラトガースから研究休暇を取り、高等研に滞在中でした。私たちは国際会議の前の週に議論し、彼はその研究のある部分はどうまくゆくだらうと私に話してくれました。しかし、それは彼の講演の発表内容とはまだ全く異なるものでした。私は彼の講演を聞いて唖然としました。私は彼の後で講演することになっており、「こんな話のあとで私は何をすれば良いのだろうか?」と思いました。

**立川** 何について講演したのですか？

**ザイバーク** 場の理論の双対性について

話しましたが、それはまだ数か月しか経っていない話で、その時点でほとんどの人たちはそれを知らなかったわけですから、私は講演するのに良いテーマだと考えたのです。しかし、ウィッテンが彼の超弦理論の双対性についての描像を発表した後では、私の講演は既に時代遅れに思えました。

**大栗** あれは素晴らしい講演でした。良く覚えています。

**ザイバーク** 彼はその講演でほとんど全体像と言えるものをはっきりと説明しました。

私は壇壇に上がりましたが、非常に困惑してこう言いました。「トラックを運転しなければいけない気分です。」それから講演しましたが、その後のことは覚えていません。しかし、そのセッションの3番目の講演者だったジョン・シュワルツが「もしナティ(ザイバーク)がトラックを運転しなければならないなら、私は三輪車を運転しなければならない。」と言って講演を始めたと言いました。

**大栗** その年、この分野は本当に相転移を起こしました。あなたが場の量子論、超対称性理論で発展させた多くのアイデアがそれに組み込まれました。

**ザイバーク** ウィッテンはその点に導いた多くの発展を車輪のスポークに例えました。超対称性、BPS状態、真空のモジュライ空間、強結合領域での自由度など、これをまとめたのが一本のスポークです。

しかし、また別系統の発展がありました。11次元の超重力に関するマイケル・ダフ、クリストファー・ハル、ポール・タウンゼント、その他の研究は極めて重要でした。そして、ガリー・ホロビッツ、アンディー・ストロミンジャー、その他の超重力の解の種々のソリトンや広がりを持ったオブジェクトの研究も本質的でした。

ですから、同時に起きた多くの異なる発展があり、それら全てを矛盾のない描像に収めたものが超弦理論の双対性の描像だったのです。私はそれらが互いを進歩させ合ったのだと思いま

す。なぜなら、一つの観点から見るとある側面が明らかであり、別の観点からみると他の側面が明らかであったからです。それらが全体として結びついて、完全で矛盾のない描像になったのです。

**大栗** 立川さん、あなたが高等研に行ったのは何年でしたか？

**立川** 2006年でした。私は今議論されたようなこと全てが起こったずっと後になって、やっと超弦理論のコミュニティーに加わりました。1984年や1995年の輝かしい時代のことを聞く度に、いつもうらやましく思います。

**大栗** そういうことは繰り返すものです。例えば、私は大学院生の時にコールマンの講義録を勉強しましたが、彼の言葉を引用すると、「遠い彼方から持ち帰った数々の豪華な品々に彩られた栄光の祝勝パレードに、観客は畏敬の念に息をのみ、歓呼の声を上げた。」これらは全て1970年代に発見され、私は全部間に合いませんでした。

**ザイバーク** そして1970年代には、1930年代と1920年代に起きたアイデアの栄光のパレードについて語られました。いつもそういう風なのです。

このような劇的な発見の連鎖が減速する兆候はありません。そして、過去の経験に基づけば、これは今後も何度も起きることだと思います。それから、これまでいつもそうだったように、思いもよらない驚くような起き方をしたいと思います。

いつでも、ほとんどの人が全く興味を持たず、なぜ面白いのかもわからないようなテーマで研究している人がいます。そういう研究が真のブレークスルーをもたらすということがあります。

そのためには、私たちは常に柔軟な精神を持って違う考えを受け入れることが本当に必要なのです。私たちはこの自由な考え方を持つべきなのです。誰でもやっていることはそのままやらせてあげ、多様性を奨励しましょう。もし誰もが同じ問題を研究しているとすると、思いがけないところから私たちが本当に必要とするアイデアを得



るということはなくなるでしょう。

### 科学の統一

**立川** 1996年から2016年まで20年飛んでも良いですか？

**ザイバーク** どうぞ。

**立川** では、あなたは最近物性物理について論文を書き、明日の講演ではその話をされます。何が動機となってこの研究テーマに興味を持つようになったのですか？

**ザイバーク** この話題はとても魅力的です。物性物理学者は信じられないようなことを発見しました。それを理解したいのです。

私は科学がすべて繋がっていることを固く信じています。素粒子現象論、弦理論、物性物理学というように、それぞれ違う箱に理論物理学者を分類するのは嫌いです。私たちは理論物理学者であって、理論物理学を細分化した異なる分野間にはっきりした境界はありません。それよりも、過去何年にもわたり、ある分野から別の分野へといった交流が数多く見られました。

大栗さんと私はシカゴ大学での南部陽一郎さんの業績を讃えるシンポジウムから戻ったばかりです。学際的な物理学の重要性が非常に良く分かるシンポジウムでした。南部さんの研究は、物理学の一つの分野から別の分野へと輸入されたアイデアが巨大な衝撃を与え、分野間の有益な相互交流につながった好例です。これは、ジョバンニ・ヨナラシニオと共著の彼の最も有名な

論文『超伝導とのアナロジーに基づく素粒子の力学模型』にはっきりと示されています。

私が現在行っている物質のトポロジカル相に関する研究について聞かれたことに戻ると、単に美しいアイデアを調べようとしているだけです。これらは場の理論が示す素晴らしい現象で、場の理論の研究者は誰もが理解しなければならないことであると思います。加えて、これらの現象が現実の世界に現れ、現実の物質と結びついていくことは、満足感を与えてくれるものです。

**大栗** しかも、実験でこれらのアイデアを検証できるわけですから。

**ザイバーク** それから、これらの新しいアイデアは場の量子論における新たな洞察にも導いてくれると思われ、その後それを高エネルギー物理や弦理論に持ち帰ることができるかもしれないのです。

物質のトポロジカル相の研究におけるアイデアの多くは高エネルギー物理に端を発したものです。例えば、アノマリー、キャランとハーベィのアノマリーの流入、組みひも群の統計、ウィッテンのトポロジカルな場の量子論、その他が主なツールとして使われています。

ですから、ここでは高エネルギー物理学の理論家が役に立つ仕事をする可能性があると思います。まだもっと多くのことができるという明らかな兆候があります。しかし、最低限でも何か新しいことを学ぶことになり、新しいことを学

ぶといつも気分爽快になります。

**大栗** 今回は超対称性を持たない理論ですね。

**ザイバーク** 以前、有理共形場理論に関連したトポロジカルな理論のように、関係のあるテーマを研究したことがあります。ですから、役に立つかもしれないツールを私は幾つか持っていると思います。

一般的に、どんな研究課題、あるいは研究の方向にも成功する保証はありません。私の学生やポスドクにいつもこう言います。「研究はどんなに努力してもリスクがつきまとう。成功の保証はない。一つの成功を期待して多くのことを試してみるべきである。しかし、そのほとんどがうまくいかないことを受け入れる覚悟が必要だ。うまく何か新しいことを知るほんのわずかの日々のためにそうするのだ。」

#### 成果は予測できない

**大栗** 座談会を終える前に、もう一つ伺いたいことがあります。あなたは、研究グループの運営と学生およびポスドクに対する指導・助言を非常にうまくやってこられました。研究グループを成功させるものは何だとお考えですか？

**ザイバーク** 第一に、私とその名誉をいただくわけにはいきません。私が研究グループにいる時はいつも多くの同僚と一緒に、彼らが科学的な雰囲気とグループの運営に本質的な貢献してくれました。

Kavli IPMUであなた方がしていることは、明らかに正しい。ここには優れた、活気にあふれたグループがあり、世界的なリーダーの何人かが Kavli IPMU にいます。私がいつも注意深く読むような論文を書く人々です。過去数日、私はそのグループの活動を見てきましたが、それは本当に楽しいことでした。興味深いセミナーを聞いて、活気のある議論に加わりました。ですから、私が言えることは、今の活動を続けるようにということが全てです。

一般的なアドバイスとしては、多様

な研究者のグループを作って活気のある環境を作り出すということです。異なる身分、異なる才能、異なる種類の専門技術、異なる経歴を持つ人たちがいるべきです。例えば、数学的なことを指向する人々、優れた物理的直観を持つ人々、計算の得意な人々、等々です。

皆が互いに交流し、研究について議論することを奨めたいと思います。何かが問題になった時、いつも誰か答えを見つけられる人がいるようにです。

どうやってポスドクを選ぶかという問題もあります。どのポスドクが成功するかどうか、はっきり予言できる人はいないと思います。それより、完璧な選び方をしようとするべきではないと考えます。それは不可能ですから。単に多様な研究者のグループを集め、彼らのために適切な雰囲気を作り出すことを試みるべきです。

もう一つのアドバイスは、ポスドクに何が自分たちにとって役に立つと思うのか、聞いてみることです。

**立川** 私が高等研にいた時、ポスドクがピザを食べながらミーティングをしようかとあなたが私に提案されたことがありました。

**ザイバーク** それはあなたのアイデアだったと思いますよ。

**立川** そうでしたっけ？ いずれにしても、私たちはそのうちに毎週午後の『ピザ談話会』を始めました。

**大栗** 教員は出なかったのですか？

**ザイバーク** 教員は出ることは許されませんでした。

**立川** そうでした。あれはとても面白かったです。

さて、何か将来のビジョンをお聞かせいただけますか？

**ザイバーク** 研究者は全てを事前に予定した5年計画を持つべきだと考える人たちがいます。旧ソビエト連邦のように。この問題を解いて、次の問題に移り、そして…

**立川** 日本ではまだそのシステムがあります。

**ザイバーク** それは実験研究者に対し

てはいくらか意味があります。しかし、理論家の進歩はもっとランダムウォークに似ています。理論家は色々なところから刺激を受けます。セミナーを聞き、インフォーマルな議論に加わり、論文を読み、等々です。これは彼らの研究の方向に予測できないような影響を与えます。場合によっては彼らが現在行っている研究の方向をあきらめて新たに別の方向を目指すようなことさえあるかもしれません。既定の研究プロジェクトの中でさえ、大抵の場合、研究成果は初めから予測できるものではありません。

この座談会では私の研究の過程を振り返って話しましたが、私自身の経験からこのような予期しなかった結果になった幾つかの例を共有しました。

ですから、これから5年間に私が何を研究するか、お話しすることは不可能なのです。そうしたらおかしなことになります。

**大栗** そうですね、あなたの実例は、後で非常に有用なことが分かった超対称性理論における方法のように、直観に従って興味を持ったことを追及したことを示してくれています。

**ザイバーク** 私は運が良かったと思います。私は長期に渡る計画を持ちませんでした。多分1年前かあるいはそれ以下でした。あなたの論文でも同じことではないかと思います。現在あなたが興味を持っているテーマを2、3年前に予想はできなかったはずですよ。

研究が面白い理由は、その答えに驚かされるからです。もし答えを予言できたら驚かされることにはならないでしょう。ほとんど当然なことですが、成果を予測することはできません。ですから、そうしようとするべきではないのです。

興味を持ったことを追及し、一所懸命研究を続け、自分の周りで起きていることに注意を払い、柔軟であること。これらがルールです。それでうまくいくこともあり、そうはいかないこともあります。