



Interview

## ヘーラルト・トホーフト教授 に聞く

聞き手：杉本 茂樹

### 若い頃から一番の興味は物理学

**杉本**：今日お話しできる機会を頂き、ありがとうございます。伺いたいと思っていたことが沢山あります。

**トホーフト**：どうぞ聞いて下さい。

**杉本**：まず第一に、いつ、どのようにして科学に興味をもつようになったのですか？

**トホーフト**：私は多少例外的だったと思います。まだとても小さい時、多分保育園の頃だったかもしれませんが、自分が自然の世界に興味をもつようになるだろうと気がついていました。私には、自然よりも人間を理解する方がはるかに難しかったです。また、読み書きを習うより、足し算や引き算のほうがずっと易しいことに気がつきました。ヨーロッパでは、普通6歳で、少なくとも基本的な読み方、書き方を習います。それより前に、私は読み書きはできませんでしたが足したり引いたりでは

ヘーラルト・トホーフトさんは2011年以来オランダのユトレヒト大学の名誉教授を務めています。1999年に「電弱相互作用の量子構造の解明」によりJ.G. フェルトマンと共にノーベル物理学賞を受賞したほか、1979年にハイネマン賞、1981年にヴォルフ賞、1986年にローレンツ・メダル、1995年にフランクリン・メダル1999年にオスカー・クライン・メダル、2010年にロモノソフ・金メダルなど、多くの輝かしい受賞歴があります。1972年にユトレヒト大学からPh.D.の学位取得し、1977年に同大学教授に就任しました。

きて、それを面白いと思っていました。

**杉本**：数学に興味があったのですか？

**トホーフト**：数学と物理でした。私の家族の中では、ある程度物理のことが話題になっていました。おじが理論物理学者で、その分野では良く知られていました。私の大おじのフリッツ・ゼルニケもノーベル物理学賞を受賞しました。それで私は大変刺激を受け、幼い頃からずっと物理に興味をもっていると気がついていました。

**杉本**：なるほど。物理学者になろうと決めたのはいつですか？

**トホーフト**：物理学者になろうと本当に決めたのがいつだったかは分かりませんが、物理はいつでも常に私の一番の興味の対象でした。多分、9歳、10歳、あるいは11歳の頃、私は物理学者になるだろうと意識していました。

**杉本**：その後、あなたは博士課程でフェルトマンの学生になり、すぐにヤン-ミルズ理論のくりこみ可能性についての研究を始められました。そうですね？

### ヤン-ミルズ理論のくりこみ可能性について研究を開始

**トホーフト**：そうです。フェルトマンはどうやってヤン-ミルズ理論のくりこみを行うかという問題について研究していました。彼は非常に良い健全な手法

を開発しており、私はそれに魅了されました。しかし、彼は「これは非常に難しいので、君は何か別の研究をする方が良くかも知れない。」と言ったのです。私は「いえ、あなたが研究を続けているその問題にとっても興味があります。その問題をもっと理解したいのです。」と答え、最初からこう言いました。「私は、あなたがどういう困難に直面しているか分かっています。ですから、私にできることをやってみたいのです。」

**杉本**：当時はゲージ理論に懐疑的な人たちが多かったそうですね。

**トホーフト**：当時はそうでした。今では、皆「電弱理論のようなものは存在していて、唯一の問題はそれをどうやってくりこむか、だった」と言いたがる傾向が強いので、歴史がどう展開したかを述べるのはいささか難しいのですが、当時その問題がどのように考えられていたかという、全然違っていました。つまり、大多数の物理学者は場の理論を研究に用いようとは考えませんでした。彼らは場の理論に代えて、何かもっと良いもの、無限大をくりこむ必要のないものを用いたがりました。幾つもの“電弱理論”があり、一つのアプローチは散乱行列、別のアプローチはカレント代数、といったように、素粒子を理解しようとする多くの代数的なアイデ

ィアがありました。しかし、その当時、場の理論は全く人気がありませんでした。

**杉本**：そうでしたか。では、フェルトマンとあなたはなぜゲージ理論を信じたのですか？

**トホーフト**：フェルトマンは非常に現実的な人でした。彼は弱い相互作用を理解するには基本的な問題が存在すると分かっていた。彼は実験結果について調べました。実験的には、弱い相互作用について、また素粒子と力のその他の性質について、既に多くが知られていました。また、それらのもつ対称性についても非常に良く分かっていた。群論を用いるゲルマン理論が知れ渡っていたためです。物理にとって、群論、特にリー群がいかに重要であるか、分かっていた。それは明らかでしたが、どうやって素粒子を厳密に記述するかは大きな謎でした。フェルトマンは場の理論の一般的な定式化は気に入っていましたが、彼も場の理論をそれほど重要視はしておらず、誰もが言っていたこと、つまり、「場の理論は多分正解ではないだろう」を繰り返すのみでした。しかし、とりあえず他にすべきこともありませんでした。彼は場の理論では恐らく答を得られないだろうと考えていました

杉本茂樹さんは京都大学基礎物理学研究所教授で、Kavli IPMUの客員上級科学研究員を兼ねています。



が、私は、細部を理解していない点を除けば、原理的には解くことができるものだと分かっていた。私たちは、光子を除いて素粒子のくりこみ効果をどう取り扱えばよいのか、基本的に理解していませんでした。光子は理解されていました。事実上、最も理解されていた素粒子でした。

**杉本**：そうですね。

**トホーフト**：光子はベクトル粒子です。では、なぜ他のベクトル粒子をくりこむことがそんなに難しかったのでしょうか？問題は質量でした。フェルトマンは、弱い相互作用が質量をもつベクトル粒子によって引き起こされることを理解しており、このような素粒子に対してユニタリ性を持ち、くりこみ可能な理論をどのようにして作るか理解しようと試みていました。彼はその過程で多くの問題を見出しました。彼はゲージ不変性を用いる独自のやり方でその問題に取り組み、ヤン-ミルズの論文に多大な関心を寄せていました。彼は、どうもこれが問題を解決する方法のようだと言いました。

**杉本**：なるほど。

**トホーフト**：彼は必要なものを全て手にしていましたが、この理論をどうやってくりこむかということについては、まだ答が得られていませんでした。当時、この理論は単に一つの可能性と

考えられていて、自然界の全ての力を理解する唯一の方法になるとは予想されていませんでした。

**杉本**：当時、その理論のくりこみ可能性を証明しようと試みる人たちは多かったのでしょうか？

**トホーフト**：いえ、くりこみ可能性を研究していた人たちはそれほど多くはありませんでした。アブダス・サラムがいて、ステイブーン・ワインバーグがいましたが、彼らは、「一体、どうやれば全てのつじつま合わせができるのだろうか？」「これらの力を記述するにはどうすればよいのだろうか？」「次にどういう素粒子が発見されるのか、どうすれば分かるだろうか？」等々のような、もっと包括的な問題を調べていました。くりこみは、それ程はやりのテーマとはいえなかったですね。

**杉本**：あなたは、この問題に取り組み始めたとき、うまくいくと思いませんか？

**トホーフト**：主要な問題に答えることができている以上、うまくいくかどうかは分かりませんでした。しかし、私は非常に意欲的でしたし、自分が見つかることのできる最高の答を得たいという思いは確かでした。ですから、私は「もしこの問題がなんとか解けるものならば、自分が解いてみよう」と考えていました。

**杉本**：なるほど。それで、くり

こみ可能性の証明を完成させたとき、どういう気持ちになりましたか？

**トホーフト**：最初考えたことは、「これが正しい方法であると他人を納得させなければならぬ」ということでした。くりこみには賛成しないという意見があったからです。ですから、私が出したことが何であるにせよ、批判しようとする人たちがいると悟っていましたし、フェルトマンも同じ反応を示しました。「多分君は何か面白いことをやったようだが、人からはあれやこれや聞かれるだろう。答を用意してあるのかね？」私は、私には答えられない非常に多くの質問をされるだろうと悟りました。これは非常に数学的な問題なのです。物事を述べる場合、数学者は非常に厳密ですが、私はややいい加減でした。彼はこう言いました。「ここは、もっと厳密でなければならないところだ。さもないと、誰も君を信じてくれないだろう。」

**杉本**：この成功に興奮しましたか？

**トホーフト**：ええ、これは私がヒッグス機構の重要性を確かに悟った時でしたので、非常に興奮しました。実際は、私はヒッグスとアングレールの論文を余りよく知らなかったため、それをヒッグス機構とは呼ばなかったのです。私は同じように考えた人たちがいたと聞きました。

それで、この理論を最初に論文に書いたのが自分ではないということを受け入れましたが、ヒッグス機構が正にフェルトマンが定式化した問題に対する解答であると理解したのは、間違いなく私が最初であると感じました。

**杉本**：そうでしたか。

### アノマリーを全て相殺する方法を発見

**トホーフト**：「今やどうやってやるべきかを正確に理解したが、細部を詰める必要がある」と私は悟りましたが、その細部は大して重要ではないことでした。最も重要な点はアノマリーでした。あるダイアグラムを対応する相殺項を用いてくりこみ、別のダイアグラムをやはりそれに対応する相殺項を用いてくりこみ、そうやって総和を取ったときにユニタリ性が保たれているかどうか明らかではなく、実際に反例も知られていました。このやり方が破綻する理論の例があったのです。左巻きの粒子と右巻きの粒子が別の粒子であるというカイラル対称性がある場合です。

**杉本**：カイラルフェルミオンですね。

**トホーフト**：カイラルフェルミオンはアノマリーを内在していて、それは非常に危険に見えます。どんな理論もそういうアノマリーをもっているわけではなく、少なくとも私たちが知って

いる理論はもっていません。しかし、それでもそういう危険はあったわけです。ひょっとするとまだもっと他にも危険なアノマリーがあるかもしれません。理論をくりこみ規則を定式化する過程で、アノマリーが存在せず、全てつじつまが合うことを証明する必要がありました。なぜなら、もしアノマリーが存在するとくりこみがユニタリ性を壊し、それはその方法が実際は機能しないことを意味するからです。

**杉本**：そうですね。

**トホーフト**：私はアノマリーが存在しても、多分ユニタリ性が保たれるように理論を書き換える方法があるのではないかというように多少の期待をもっていたのですが、その期待はたちまちのうちに消え去ってしまいました。そうではなく、アノマリーは全て相殺しなければならないのです。しかし、それはどれほど強い制限なのでしょう？ 一体、全てのアノマリーを相殺できる理論というものがあるのでしょうか？ これは知られていませんでした。

**杉本**：なるほど、当時は標準模型のアノマリー相殺は知られていなかったのですか？

**トホーフト**：そうです。ただ、フェルミオンのアノマリーは解消できる可能性があることが知られていました。これは確実ではありませんでしたが、私は純

粋なゲージ場の部分もどうやって相殺するか分からないアノマリーをもっているかもしれないと考えました。それが相殺できると証明することが必要でした。要点は、くりこまなければならない自由なパラメータの数よりアノマリーの相殺に使える項の数の方が少ないことでした。従って、齟齬が生じて、理論がくりこみ可能に見えても全てのダイアグラムを詳細にわたって計算しようとするとうまくいかないかもしれないことに気がつきました。アノマリーと相殺項が互いに矛盾していると、理論はユニタリになりません。ですから、これも証明しなければならない重要なことでした。欠けていたのは理論を正則化するうまい方法であって、実はこの点で私は次元の数を変えるアイデアをもっていました。

最初、私は5次元、6次元、7次元を試して、これらの次元を正則化因子として用いました。本質的にはほぼうまくいったのですが、完璧ではなく、それから私は $4+\epsilon$ 次元あるいは $4-\epsilon$ 次元を考えて、 $\epsilon \rightarrow 0$ の極限をとることが正しい答、あるいはもっとずっと良い答であることを発見しました。実際、それは正しい答でしたが、驚くべきことでした。なぜなら「 $4+\epsilon$ 次元とか $4-\epsilon$ 次元とは何を意味するのか？」と問われると物理的にも数学的にも意味をなさないか

らです。しかし、私は数式に $\epsilon$ が現れる部分は、ダイアグラム上で任意にとれるただの数にすぎないことに気がつきました。 $\epsilon$ として複素数を選び $\epsilon \rightarrow 0$ の極限をとってもかまわないのです。

**杉本**：そのくりこみ可能性を証明するには、どのくらい時間がかかりましたか？

**トホーフト**：一つの問題は、自分自身が納得するのにどれくらいかかったかです。それは結構早くて、1年程度でした。確かに、次元くりこみ\*を導入した後、私はこれが答であり、それ以上の証明は必要ないと悟りました。ただし、それは厳密には数学的な証明といえるものではありません。実際上大事な点は、「その方法で全てのオーダー(次数)に対してうまくいく」ことを証明することでした。この問題を私たちは次のように表現しました。「任意の数までのループを含む全てのダイアグラムが次元くりこみを用いてくりこめること。」これにはさらにある程度の作業が必要でしたが、この問題を解決するためには、実際この方法が最善であるとすぐに決着がつかしました。

#### ヤン-ミルズ理論のベータ関数について

**杉本**：あなたは、グロス、ウィルチェック、ポリツァーの論文より前にヤン-ミルズ理論のベ

ータ関数が負であることをご存知だったと聞きましたが…

**トホーフト**：はい、そうです。ちょっと変な話ですが。勿論、私はその問題に物理的観点から取り組んでいました。物理学者として、私はこれらの場が実際上どのように振る舞うのか理解したかったのです。それには、この系が非常に短距離でどう振る舞うのか、また非常に長距離でどう振る舞うのかが非常に重要です。非常に早い時期、次元くりこみなどよりずっと前に、私は短距離の極限で起こることを自問しました。

**杉本**：次元くりこみより前にですか？

**トホーフト**：はい、短距離の極限で理論が十分に収束するならば、1ループあるいは高々2ループのレベルで証明するだけで良い訳ですから。もし理論が全く相互作用をもたなければ、それを知るだけで良く、それ以外は全て重要ではなくなります。そこで私は計算し、距離を短距離にスケールさせ、最終的なダイアグラムを得て、それがどのようにスケールするか知ることができました。私は「これで良い」と思いました。それは、現在「漸近的自由性」と呼ばれているものとして正しい符号もっています。私はその符号が現在の漸近的自由性を意味していることをはっきり見て取ること

\* 次元正則化を用いたくりこみ処方

ができました。ですから、私は多くの人々がそれを大きな問題としていたことを理解できませんでした。ビョルケン・スケーリングについて議論がありましたが、ビョルケンがスケーリングについて述べた際、彼が意味したことが私には良く分かりませんでした。人々は「ビョルケン・スケーリングは場の理論がうまくいかないことを証明するものだ」と言いました。私はなぜ彼らがそう言うのか理解できませんでした。なぜなら「理論をスケールさせてみると完全にうまくいく。何が問題なのか分からない。」と考えたからです。しかし、私が悟っていなかったのは、まだ誰も理論のベータ関数を計算したことがなかったということでした。

**杉本:** なぜそれを論文として発表しなかったのですか？

**トホーフト:** まず第一に、私はもっと切迫した問題があると考えていました。もっと切迫した問題とは、これは強い相互作用の理論であろうから、なぜクォークが閉じ込められているかを理解することでした。強い相互作用の本当の問題はクォークでした。なぜ自由粒子として現れないのだろうか？ 私は、この問題に対して半分は答えたとはいえませんが、残りの半分は無限遠で何が起きるかで、勿論その方がもっとずっと難しかったです。フェルトマンはここで

「なぜクォークが出てこないのか理解しない限り、君は何もしないことにならない。論文にする価値さえない。」と言ったことで、私をやや間違った方向に向けたと思います。それは誤りでした。勿論私は論文を書くべきでした。私は理論を信じていましたが、正しくベータ関数を計算して、それが負であり、従って純粋なゲージ理論が強い相互作用の理論の非常に有力な候補であると理解していたのは私ただ一人であったということに気がついていませんでした。現在、私たちは誰でもこれがどのようにクォークの閉じ込めに導くのか知っていますが、当時は全くの仮説に過ぎませんでした。

**杉本:** なるほど。クォークもグルーオンも発見されていなかったにもかかわらず、QCDを受け入れるのは容易なことでしたか？

**トホーフト:** はい、なぜならクォークはカラー量子数をもっており、全ての物理的状態はカラー変換で不変でなければならぬので、私はクォークが自由粒子として出てくる理由は全くなかったと思っています。逆に、「なぜ自由なクォークが存在しなければならないのだろうか？」と問うこともできます。「それは存在しない。」が答です。私は理論が自由なクォークを含む必要はないということを基本的に理解したと考えました。し

かし、ここで問題は何かクォークを結びつけているのかということです。もし物理的状態、つまり理論の漸近的状态を理解していないなら、どうすればそのような理論がユニタリな理論であると分かるでしょうか。その問題は、基本的には幾つかの洞察によって解答が与えられました。その一つは、渦糸が存在するという事実、そして、それを安定に保つ機構が超伝導体のマイスナー効果と呼ばれる、モノポールの閉じ込めを引き起こす機構に対して双対な機構であるという事実でした。クォークを閉じ込めているのは「双対マイスナー効果」で、それで全てが理解できるということが徐々に認識されてきました。

もう一つは、漸近的状态が自由なクォークではなく、ジェットであるという、ジェットの物理でした。ジェットはハドロンの粒子で形成されていて、高いエネルギーで飛び出してきた単独のクォークのように振る舞います。クォークはジェットとして姿を現し、グルーオンも同様です。ですからクォークジェットとグルーオンジェットがあります。こうしてユニタリ性が回復し得ることが理解されました。しかし、こういったことは非常に複雑です。適当でいいだろう、というのではなく、もっと厳密な数学的取り扱いが必要です。

**杉本:** 現在、QCDの閉じ込めは十分に理解されていると思われませんか？

**QCDの閉じ込めは、物理学者には受け入れられるが数学者には不満足**

**トホーフト:** 物理学者としては、私はこれらの組み合わせは十分に受け入れられるものであり、それが全てを説明すると思います。しかし、数学者だったら、「この状況はまだ不十分だ」と言うでしょう。QCDは量子電磁力学の精度と同じレベルに達してはならず、その一部が閉じ込めの問題であって、現在では「質量ギャップ問題」と呼ばれています。それは「純粋なゲージ理論、QCDは質量ギャップを生成するか？」という問題で、そこからすぐに次の問題が派生します。「質量ギャップを計算できるか？」「QCDで一番軽い粒子が何か理解できるか？」答は、基本的にパイ中間子がQCDの一番軽い粒子ですが、私たちはそれを数学的に厳密に証明できるでしょうか？ また、そもそも質量ギャップとは何かを数学的に定義できるでしょうか？ 仮に理論をどのように定義するか、また問題をどのように定義するか、分かっていたとしても、果たして理論のもつこの性質を証明できるか、ということが問題です。

奇妙なことに、現在私たちが

できる最善の方法はその問題を数値的に証明することなのです。格子の上に理論を置いて、大きなコンピューターを用いてシミュレートします。できるだけ細かい格子をとると、正しく物理学者全員が期待するように理論が振る舞うことが分かります。ですから問題はなくて、「数学的に全て証明可能だ。最初の10桁がこの定理に従うのだから、どこまでもこの定理に従うに違いない」と物理学者は言うでしょう。しかし、数学者はこれを証明とは受け入れないでしょう。当たり前です。物理学でもやはり問題ですが、私はそれを観念的な問題と考えます。QCDがどのように振る舞うのか理解するためになら、私たちにその問題を解くことは必要ありません。しかし、数学的な観点から問題が解かれる必要があることは良く理解しています。恐らく数学的証明の重要性は、問題を数学的に証明したとすれば、より速く、より正確に計算する新しい途も見つかるかもしれないということです。質量ギャップの存在を数学的に証明することは、成功すれば全てを精密に計算できるので時間の浪費にはならないでしょう。

**杉本：**いつかその問題が証明されるとお考えでしょうか？

**トホーフト：**そう思います。必要なのは、いわば無人島の修道院に本とコンピューターとラッ



プトップとインターネットと共に住み着いて、その証明のためだけに取り組む修道士です。何百個もの微小量 $\epsilon$ と $\delta$ があって、それらを正しい位置に置くことが必要で、そうすれば証明できると思います。私は、これが私たちの物理理論の性質であると強く信じています。私たちは皆、理論が正しいと信じており、従って証明可能であると信じていますが、それは非常に困難でしかも非常に報われない仕事となるでしょう。なぜなら、20年後に修道院から現れた修道士がこう言うとした。「ご覧下さい、ついに私はQCDの存在を証明しました。」すると、物理学者全員が彼を見つめて、こう言うでしょう。「何が問題なのですか？ あなたはなぜこの研究をずっと続けてきたのですか？ 私たちはQCDが立派な理論であると前から知っていました。」ですから、彼は報いられないでしょう。たとえそれが非常に重要な数学的問題だったとしても、それで彼がノーベル物

理学賞を受賞することは多分ないでしょう。

#### 1/N展開と弦理論

**杉本：**なるほど。次は1/N展開について伺いたいのですが。どうしてあなたは散乱振幅を1/Nに関して展開するアイデアを得たのですか？

**トホーフト：**当時私はCERNのフェローでしたが、こういった新しく素晴らしいアイデアが続々と浮かんできました。その一つが、正に今言った「QCDのための良い近似法を得るにはどうすればよいか？」という問題でした。小さい値をとるパラメータがQCDにあるだろうか？ 物理的にはそれほど小さくはないかもしれないが、もし非常に小さくチューニングできたら正確に計算できるような、そういうパラメータがあるだろうか？ もしパラメータの値がそれより大きければ理論はやや正確さを欠きますが、それでも系統的に展開できます。全てのパラメー

タの中で、勿論1/Nが浮かび上がり、そこで私はこう自問します。「ラーズNの理論は任意のNの理論とどのように違うのだろうか？ Nが無大の極限はどのようになるのだろうか？」私はダイアグラムに何らかの単純化が起きることが分かっていました。「それはどういう種類の単純化なのだろうか？」私は答を見出しましたが、残念ながらその答は、Nが無大の極限でさえ得られるダイアグラムはまだ非常に複雑で厳密に計算することはできない、というものです。ラーズN展開を明示的に行うことはできません。結合定数についての級数展開はあらゆる平面的ダイアグラムを発生させ、それらは複雑すぎて解けません。QCDのラーズNダイアグラムを解くためにある種の内部方程式を得る何らかの方法がないか、私は随分一生懸命探しましたが、これまでのところ、うまくいっていません。

勿論、平面的ダイアグラムしか残らず、それが弦理論の世界

面ダイアグラムに非常によく似ているため、この問題は非常に興味深いものです。その時点までに、私たちはクォークを結びつける渦糸があることを理解していました。ですから、これは原理的には渦糸がどこから現れるのか理解するための完璧な方法となるでしょう。

**杉本**：この $1/N$ 展開は弦理論の摂動展開に似ています。

**トホーフト**：その通りです。

**杉本**：それを弦理論の定式化に使うことができると考えられましたか？

**トホーフト**：ええ、確かにそれは私たちの期待でした。それはまた、弦理論の正当さを立証するであろうと私は期待していました。どうして全ての双対共鳴模型が強い相互作用に対して非常にうまくいくのか、それが説明してくれるでしょう。実際、私は $N$ が無限大の極限でのQCDを理解したいという私の問題を弦理論が解決すると期待していました。多分、それは閉じた形で書き表すことのできる理論です。要点は、 $1/N$ が0の極限、あるいは $N$ が無限大の極限は、メゾンもバリオンも相互作用しない極限です。それは相互作用をもたない理論で、従って厳密に解けるのではないかと考えるかもしれません。相互作用をもたない理論は基本的に自明です。必要なのは質量スペクトルを知ることのみです。私は

弦理論でこれができるはずであると考えました。多分、 $1/N$ 展開はある弦理論と等価でしょう。私は実際そうであると分かることを期待していました。しかし、何度もやってみましたが、QCDの $1/N$ 極限と一致する弦理論を特定することはできませんでした。

**杉本**：弦理論は量子重力の有力な候補とお考えですか？ それとも…

**トホーフト**：個人的には、弦理論は量子重力に対する非常に優れた、また興味深い数学的アプローチですが、十分ではないと考えています。物理的にはもっと何かがあるはずで、物理的な問題と数学的な問題を区別しなければいけません。数学的には、弦理論は非常に興味深い数学的枠組みです。量子重力を理解しようとするには非常に真剣に受け止めなければなりません。物理的には究極の根本的方程式は弦理論ではないと私は考えます。しかし、この点では私は少数派です。

**杉本**：あなたは、ブラックホールのエントロピーについての考察からホログラフィーのアイデアを最初に提案されました。その後、マルダセナや他の人たちが弦理論の観点でこのアイデアを改良しました。この進展をどのようにお考えですか？

### プランクスケールにおける量子重力の物理的自由度をどうやって理解するか

**トホーフト**：彼らは私が全く考えていなかった方向に行っていました。彼らは双対性を用いていますが、ホログラフィーと全く同じものではありません。双対性は面白いと思いますが、私たちの物理的問題に対する答えにはならないでしょう。助けにはならないと思います。ある問題を別の問題に関係付けます。ホログラフィーは、ある異なった理論が同値であるという意味で用いられています。しかし、それは全く私の問題ではありませんでした。問題は、量子重力の物理的自由度を、特にプランクスケールでどうやって理解するかということです。私はプランクスケールではビットとバイトだけが情報として得られると確信しています。物が存在する容れ物としての連続体は、もはや存在しません。それでも弦理論は実数と連続体で考えるべきであると示唆しています。私は、今や、実数が全ての究極的理論の基本的変数であるとは、もはや信じない段階に達しました。私は、究極的理論は基本的にビットとバイトだけに基づくものであろうと考えます。しかし、それがどのように機能するのか理解することは、今、大問題です。私たちはそれを理解していません。

さて、ホログラフィーは、自由度が実際は空間で決まる自由度より小さいことを表します。それは、基本的に表面の自由度に対応します。私は、ホログラフィーの物理的な実体は、弦理論やホログラフィー、AdS/CFT対応、等々について通常聞くこととは違うと考えます。ホログラフィーが、自由度は時空の体積で決まるものではなく、表面の自由度であることを示すその物理的理由は、量子力学の根本的な起源そのものにあると考えます。もっともな理由があるはずで、私が見つけれられる理由は、情報量損失です。要点は、ある体積の空間内に存在する物理的対象に関する全情報は、既にその空間の表面に見出されるはずであるということです。ある時空の領域を考えてみましょう。その領域は表面で囲まれています。その表面で起こる全ての物理的現象を観測すれば、実際は内部で起きていることを再構成できます。これは変に聞こえるかもしれませんが、ちょっと考えてみれば、変ではないと分かります。なぜなら、重力場はガウスの定理に従い、それは表面における重力場を知ればその内部に存在するエネルギーの大きさが正確に分かることを意味しています。エネルギーの大きさが分かれば、ハミルトニアンが分かります。厳密に言うと、重力に対するガウスの定理から、

どんな表面であっても表面における重力場を正確に知れば、原理的に全系のハミルトニアンを得たことになります。それは、内部も理解されることを意味します。

それは、勿論非常におかしな状況で、私のやり方で行わないと量子重力は常識外れの理論になってしまうことを意味します。私のやり方とは、量子力学の理解そのものを再評価しなければならないということです。もし量子力学を決定論的理論で置き換えれば、私はホログラフィック原理をもっとずっと良く理解できます。それは、実際は量子理論が全ての内部情報をそっくりそのまま保つものではないということを示します。情報は散逸します。表面と、それを通過して散逸した情報を考えてご覧下さい。すると、もし表面上でデータを知れば、その内部がどのように時間発展するか予言できるために必要な全情報もっていることになります。それは直感に反すると思いますが、今私には、量子力学の究極的理論でこれがどのようにして可能になるか、いろいろなアイデアがあります。

#### 最良の理論は実験的事実を説明する理論

**杉本**：あなたは大変多くの独創的な研究をされてきました。中でも一番気に入られているのは

何でしょうか？

**トホーフト**：私は今でも研究者生活の最初の数年間のこと、つまり、ゲージ理論のくりこみについて、次元くりこみについて、またヒッグス機構がくりこみで果たす役割について、アイデアを得たことを非常に誇りに思っています。磁気単極子を思いついたのは非常に幸運でした。1/N展開もそうでしたが、また、インスタントンと、理論の明示的な対称性の破れにおけるその役割についても幾つか非常に良いアイデアを得ました。標準模型はラグランジアンを見るとバリオン数は保存されなければならないように見えますが、実際はバリオン数を保存しません。インスタントン効果を考慮すると、バリオン数は保存されないことが分かります。これは非常に深遠で美しい発見でした。これらは本質的なことであり、従って私の仕事のうちではベストであると思います。

しかし、別の意味で、まだいろいろ証明しなくてはならないことはありますが、後の重力と量子力学についての仕事も誇りに思っています。重力と量子力学について、誰とでも喜んで議論しますが、問題を解決するような非常に優れたアイデアを出したわけではありません。私には、まだ量子重力は私たちが理解していない大問題で、それを根本的に進歩させたいと思

います。勿論、物理学は結局のところ実験科学であることを理解するべきです。考え得る最良の理論は、実験的に観測されている事実を証明あるいは説明する理論です。私が知りたいことは、なぜ物理定数とその値をもつのか、なぜ陽子と電子の質量比がその値なのか、等々、そのような自然の定数がどこから決まるのかを理解することです。それはまだできていません。それがまだこれからすべき仕事が多々あると私が考える理由です。

#### 科学者を志す若者へのアドバイス

**杉本**：分かりました。科学者になりたいと思っている若い人たちへのアドバイスをいただけないでしょうか。

**トホーフト**：科学はいまだに極めて興味深い活動です。科学者になれば、何かを発見するでしょうが、普通はとても小さいことです。もし何か大きなことを見つけたら、勿論それはもっと素晴らしい経験です。しかし、何かの課題について研究する場合、その研究が、重力を解き明かしたり、万物の理論を発見したり、あれこれを理解したりするような、私たちが真に興味をもつ究極的な問題にどのように関係しているかを知りたいと自覚する必要があります。私たちはこういった問題に一晩で答える

ことはできないし、また現在の若い学生たちがそのような問題に一晩で答を見つけることは多分ないでしょう。しかし、彼らは、答を得るために何歩か前進することに貢献するかもしれません。ただし、こういった大きな問題が何であるかを理解している場合にのみ貢献できるのです。あなたたちは大きな問題に取り組むべきです。幸運に恵まれ、困難な問題に取り組むことを恐れなければ、何か興味深い答を見出すかもしれません。

もう一つのアドバイスは、極めて批判的であれということですが、特に、自分自身の結果に批判的でなければいけません。それまでに見出したこと、あるいは理解したことに満足してはいけません。常に「これは理解したのだろうか?」「あれは理解したのだろうか?」「なぜこの答は違う方法で定式化できないのだろうか?」といった、もっと詳細にわたる疑問をもつべきです。もし自分に非常に批判的に問いかければ、多分、何か新しく興味深い答を見出すことでしょう。

**杉本**：予定した時間がきたようです。お話しできてとても楽しかったです。

**トホーフト**：ありがとうございました。

**杉本**：ありがとうございました。