

マイケル・ターナー教授に 聞く

聞き手: 杉山 直

ダークエネルギーの名付け親

杉山 IPMUへようこそ。あなたはダークエネルギーの名付け親、発案者として知られていますが、どのようにしてこの名前を思いついたのですか？

ターナー 名前は短くて覚えやすいこと、ある程度は正確であることが必要です。でも、あまり正確にしすぎない方が良いでしょう。つまらなくなってしまう。

杉山 「ブラックホール」は良い例ではないでしょうか？

ターナー 「ブラックホール」は実に素晴らしい例です。

杉山 以前はブラックホールのことを「つぶれたもの」という意味のcollapsersなどと呼びました。ジョン・ホイーラーがつけた名前だと思いますが...

ターナー はい。ブラックホールは実に覚えやすく、また結構正確です。ダークエネルギーもそうあって欲しいものです。まず、

その名前はダークマターと完璧に呼応しています。相対論では、エネルギー密度と同程度の圧力を及ぼすものは何であっても「エネルギー的」と呼ばれ、圧力が非常に小さければ「物質(マター)的」と呼ばれます。ダークエネルギーは、圧力がエネルギー密度と同程度であるという意味で、物質に似ていると言うよりもずっとエネルギーに似ています。

杉山 でも圧力の符号が逆で、相対性理論で言うところのエネルギー条件^{*1}も破っていますが...

ターナー 良い名前というものはずしも正確ではないのですよ。正確にしようとする、名前はどんどん長くなり、理解できる人がどんどん減ってしまいます。その意味でもブラックホールは素晴らしい。不正確ではないし、実に覚えやすい。ダークエネルギーも同じように考えて欲しいですね。

杉山 わかりました。では、次にIPMUの印象をお聞かせください。

ターナー IPMUはとても時宜にかなっていると思います。エネルギーに満ちており、世界中から多くの人を引きつけています。IPMUは日本国内だけで

マイケル・ターナーさんはシカゴ大学の特別功労教授で、天文学・天体物理学、物理学、エンリコ・フェルミ研究所、カヴリ宇宙物理学研究所(KICP)に所属しています。宇宙論研究者として世界的に有名で、1984年に米国天文学会からワナー賞、1997年に米国物理学会からリリエンフェルド賞などを受賞。2003年から2006年まで、米国立科学財団NSFの数学・物理系科学局長を務めました。

^{*1}: 通常の物質(流体)では、エネルギー密度と圧力の3倍を加えたものが正である(強いエネルギー条件)という条件。

なく、国外にも大きな影響を及ぼすでしょう。今日のサイエンスは非常に国際化が進んでいますから、日本で起きたことは日本を変えるだけでなく、世界も変えるのです。ですから私はIPMUに非常に刺激を受けています。

杉山 IPMUの主たる目的は数学者、物理学者、天文学者、天体物理学者の間の垣根を取り払い、宇宙の謎の解明を促進することです。ところで、あなたが研究者としてスタートしたのは、素粒子物理学者としてでしょうか、それとも天体物理学者としてでしょうか。

ターナー 最初は素粒子物理です。私はスタンフォード大学の線形加速器センター（SLAC）の大学院生で、一般相対論に興味をもちました。実際、一般相対論の研究で博士論文を書きました。重力波についてです。その後シカゴ大学に行き、デイヴィッド（デイヴ）・シュラム^{*2}に影響されるようになったのです。彼は言いました。「天体物理も宇宙論も素粒子物理もそれぞれ面白い。3つ一緒になるともっともっと面白い！」私は最適の時に最適の場所において、さらに大事なことはデイヴ・シュラムという最適の指導者を得たのです。

杉山 まさにそうですね。私はその1980年代のことを知りたいのですが、素粒子的宇宙論の黄金時代のようなものなのでしょうか。

ターナー いや、黄金時代では

^{*2}:シカゴ大学で活躍した宇宙論研究者。宇宙論と素粒子理論、核物理を結んだ研究を行った。1945年生まれ、1997年に自らの操縦するジェット機の事故で悲劇的な死を遂げる。

^{*3}:中性子星やブラックホールなどの強い重力源、また重力波についての研究などで知られる。スタンフォード大学名誉教授。

なかったと思います。これから黄金時代になるかもしれないものがまさに始まった時だったと思います。二つの分野が融合した最初です。その頃はこの極大と極小の融合がどれほど成功するかということに、いろいろ異なる意見がありました。デイヴ・シュラムは素粒子物理と宇宙論を融合させることにすごく熱中していました。スタンフォードでの私の指導者だったボブ・ワゴナー^{*3}は冷めていました。彼は、初期宇宙についての宇宙論の一つの柱であるビッグバン元素合成の研究のため、最初の計算機プログラムを書いた人ですが、私にこうアドバイスしたのです。「重力波のような、もっと安全なことをやりなさい。」

杉山 素粒子的宇宙論よりは安全ですね...

初期宇宙論の 90-goジャンクボンド時代

ターナー 新しくて毛色の違うものは、どんなものであれ最初はうまく発展するかどうかかわらないものです。1980年代には基本的には無謀でずいぶん大胆な推測の山でした。もし正しかったら素粒子物理も宇宙論も変えてしまうようなものでしたが。しかし、こういう無謀な推測が、一体、検証可能なのか、その結果正しいということがわかるのか、全く見通しがありませんでした。言ってみれば、1980年代は初期宇宙論にとって、ジャンクボンド（高利回りだがリスクの高い債券）でイケイケの時代でした。何でもありで、すごく野心的なアイデアがあふれていました。宇宙ひも、テクスチャー、相転移、磁気単極

杉山直さんはIPMUの主任研究員の一人で、また名古屋大学理学研究科の教授でもあります。



子、宇宙ひも上の磁気単極子、カルーザ・クライン、アクシオン... 中でも2つの最も重要なアイデアが素粒子のダークマターとインフレーションでした。この2つのアイデアは人気を博して宇宙論分野全体の進展を促しました。そして構造の進化を議論する枠組みに導いたのです。今は冷たいダークマター (CDM) として知られているものですが、検証可能なはっきりした予言をしたわけでは、天文観測屋はCDMに彼らができる最高の敬意を払いました。否定してやろうとしたのです。

杉山 しかし成功しませんでした...

ターナー 成功したとも言えます。観測屋はCDMをずっと否定してきました。それでもCDMは隙間を縫って生き延びてきたのです。ついに、私たちはすべてのデータにうまく合う最新版を手に入れました。CDMにダークエネルギーを加えた枠組み、別の言い方ではラムダCDM^{*4}です。今や挑戦すべきことは、ダークエネルギーとは何か理解すること、またデータの質がどんどん良くなっても理論はデータを説明できるのか確認することです。もし1990年代にデータが現れ始めなかったら何が起きていたか、私にはよくわかりません。確かなことは、もし1990年代の観測がなかったら、今、我々は黄金時代の入り口に立っていません。推測することには

*4: ラムダはギリシャ文字のΛで、インシュタインが重力場方程式に導入した宇宙定数を表す。

*5: 宇宙論、銀河形成、ダークマターなどの研究によって知られる。現在はオックスフォード大学教授。

*6: 宇宙での大規模構造の先駆的な観測、また数値シミュレーションを行ったことで知られる。カリフォルニア大学バークレー校教授。

疲れ果てていたと思います。

杉山 では何がこの黄金時代の重要な観測なのでしょう。スローンデジタルスカイサーベイのような銀河探査か、宇宙マイクロ波背景放射か、遠方超新星探査か...

ターナー いろいろな観測があります。実にたくさんあるということが、今を特別な時代しているのです。大規模構造、マイクロ波の宇宙背景放射、高赤方偏移の宇宙、ダークエネルギーの研究、ダークマターの実験、LHC等々。こういう様々な観測を取りまとめ、全体として評価してやると、個別のデータを単に足し合わせたより、はるかに大きな価値を持ちます。これらの観測すべてに共通するのは、1980年代に現れた2つの重要なアイデア、インフレーションと冷たいダークマターの検証が可能なることです。1980年代に戻ってみると、宇宙の曲率を測定することができるとはとても考えられていませんでした。そこで天文学者は物質密度の測定に集中していました。それは非常に難しいことでした。宇宙を非常に広く深く観測することがどうしても必要となるのです。

杉山 その通りです。銀河の計数を使う等々...

ターナー あなたがパークレーにいたときのことで、多分覚えていますが、当時は観測による Ω (宇宙の密度パラメーター) の値がほとんど1に到達しました。でもその後減り始め、とうとう0.3になったわけですが。

杉山 そうです。1994年のある日のことだと思いますが、パークレーでは学期の終わりのセミナーで、ディベートを行いました。ジョー・シルク^{*5}とマー

ク・デービス^{*6}が...

ターナー どちらの立場を取るかコインを投げたのですよね。その問題は全く未解決でした。

杉山 そう、コインを投げました。一人は $\Omega=1$ の平坦な宇宙の立場をとり、もう一人は低密度の宇宙に賛成する議論を展開したのです。それは見ものでした。今ではこういう楽しみは無くなりました。ダークエネルギーという思いもよらないブレークゲームに加わったため、全てのデータが宇宙は低密度だが平坦だと示していますから。

ターナー ダークエネルギーは実に素晴らしい物語です。この物語の始まりは1980年です。インフレーションを信じた者は非常に注意深く「インフレーションの帰結は、物質の密度パラメーター $\Omega_{\text{matter}} = 1$ を意味するものではない」と言っていました。インフレーションが意味するところは宇宙が平坦なことなのです。しかし、当初、我々は (未知の) 素粒子のダークマターによって、 $\Omega_{\text{matter}} = 1$ が実現するのではないかという希望を持っていました。なぜなら、当時すでに、宇宙を平坦にするだけ十分な物質があるならば、それは普通の物質であるバリオンではなく、素粒子のダークマターでなければならぬことが知られていたのです。素粒子のダークマター自身、とても奇妙なものでした。そして1980年代のうちに Ω_{matter} の測定値が大きくなって1に近づいたのですが、その後下がりだし、1990年代の末には Ω_{matter} がどうしても1に届かないことが明らかになってきた結果、インフレーションは窮地に追い込まれてしまったのです。そこで最後の窮余の策として宇宙を平坦にするための不足分を補うのは宇宙定数

のようなものではないかと提案したのです。

杉山 そうですが、でもそれは最後の最後に導入するものではないでしょうか。

加速する宇宙膨張の発見は一夜にして宇宙論を一変させた

ターナー 1997年頃の宇宙論を振り返ると、どこへ向かっているのかははっきりしませんでした。インフレーションとダークマターのアイデアがあり、 $\Omega_{\text{matter}} = 0.3$ でさえあれば、とても物事がうまく説明できることがわかっていました。しかし、実はインフレーションは Ω が1であることを主張する訳です。ですからハッピーエンドになるとはとても思えませんでした。そして1998年の「宇宙膨張が加速している」という発見が、一夜にして状況を一変させてしまったのです。

杉山 それは超新星のデータですね?^{*7}

ターナー その通りです。

杉山 私の記憶が正しければ、最初の論文では誤った結論に達したと思います。

ターナー 確かに最初の10かそこらの超新星のデータは、宇宙の加速膨張を示してはいませんでした。1998年の最初の発見のデータでさえ、それほど強い証拠ではないのです。しかし、それを見た瞬間、皆こう言ったのです。「やった。ついに答えが得られたぞ。宇宙にはダークマターとダークエネルギーが満ちていて、膨張を加速させているのだ。加速膨張宇宙とダークエネルギーで全てを統一的に説

*7: 遠方の超新星の距離と赤方偏移を観測することで、宇宙の膨張がその当時現在よりも遅かったか、速かったかを知ることができる。宇宙膨張が減速しているのか加速しているのかわかるのである。



ターナーさんの一般向け講演会の様子 (p. 45参照)

明できる。」その証拠は最近10年間で極めて強固になりました。

杉山 超新星データの発表の2年後には、気球実験のブーメランも、マイクロ波宇宙背景放射の観測により、宇宙が平坦であることを証明しました。これは本当に大きな成功でした。

ターナー そうです。2000年は非常に重要な年で、実際、ブーメランが平坦性の問題を解決しました。しかし、分岐点は1998年だったのです。どうしてなのか、一例を上げましょう。1998年4月に、デイヴ・シュラムはジム・ピーブルス^{*8}と宇宙が平坦かどうかについてディベートをすることになってい

^{*8}: ビッグバン宇宙論研究の先駆者。宇宙マイクロ波背景放射の理論的予想を行い、その発見を助けた。水素原子形成過程の詳細な計算を最初に行い、宇宙での構造形成に関しても重要な業績がある。プリンストン大学名誉教授。

ました。このときは役割分担をコインを投げて決めるのではなく、シュラムが平坦な宇宙、ピーブルスが平坦でない宇宙について主張することになっていました。ご存知と思いますが、シュラムは1997年12月に飛行機事故で亡くなったのです。亡くなる前の秋に、彼はずっとピーブルスとのディベートを心配していました。彼が平坦な宇宙を弁護して勝つことができると思えた材料は、唯一 Λ (宇宙定数) だけでした。デイヴは始終私の部屋に来ては「超新星のデータはまだか?」と言ったものです。超新星のデータが未報告なので、12月の段階でデイヴはピーブルスがディベートに勝つと考えていたように思います。超新星の結果が報告されたのは、彼の悲劇的な死のわずか数週間後でした。私はディベ

ートの世話人からデイヴの代役を頼まれましたが、世話人はこう言ったのです。「ジムはディベートの主題が何かははっきり知らないと言っています。」私は「何を主題にすることになっていたか、知ってますよ。平坦か、そうでないかです。」と言いました。そこでジムと話したら、彼は「確かにそうだけれども、もはや私は平坦でない宇宙について主張したいと思わない。」と言ったのです。宇宙の加速膨張の発見は、この例にあるように、全てをほとんど一夜にして変えてしまったのです。

杉山 データが出た後なので...

ターナー まあ、超新星のデータは決定的ではなかったし、反論することもできたと思います。しかし、災いの前兆に気づくことはできました。全体の構図は途方もないものだったけれ

ども、ついに全てがびったり取まってしまったのです。

杉山 今や、冷たいダークマターと宇宙の平坦性とダークエネルギーが全てのデータを非常にうまく説明するのですが、もはや他の可能性を考えなければならぬ理由は無いのでしょうか。

ターナー そうですね、それは立場によるでしょう。私が「天体物理学的宇宙論研究者」と呼んでいる、宇宙の歴史を再構成することに興味を持つ人たちは、あなたが今言ったモデルでもとてもハッピーだと思います。なぜなら、ダークエネルギーが何であろうとも、宇宙定数で表される真空のエネルギーに非常に良く似ていて、宇宙がどのように進化して構造を形成したのかを理解するという目的のためには、基本となる宇宙モデルは十分良く知っていると言えるか



ターナーさんの一般向け講演会の様子 (p. 45参照)

らです。しかし、私が「原理主義的宇宙論研究者」と呼ぶ、宇宙の基本的な特質や、それがなぜそうなのかに強く興味を持つ人たちはもっと多くのことを知りたいと考えるでしょう。

杉山 ダークマターは何か、ダークエネルギーは何かということですね？

ターナー その通りです。再度ダークマターに戻りますが、天体物理学的宇宙論研究者はアクションかニュートラリーノかにはこだわりません。重要なことは、非常に冷たいということです。一方、原理主義的宇宙論研究者にとっては、ダークエネルギーが宇宙定数とほとんど同じに振舞うように見えても、もし1%でも違いがあれば重大事なのです。同様に、ダークマターについても、彼らにとってはアクションとニュートラリーノ

の違いは重大事です。つまり、天体物理学的宇宙論研究者は基本モデルについて彼らが知りたいと思うことを十分に知っており、私にはとてつもなく興味深く思えることを研究できるのです。それは我々がどうやってここに至ったのか、最初の恒星は、最初の銀河は、という宇宙の歴史を再構成することです。しかし、原理主義的宇宙論および宇宙の誕生の見地からは、我々はやっとなら表面をひっかいているに過ぎません。

杉山 了解しました。あなたは多分、どちらかという原理主義者に属しているのではないかと思います。もう一つ質問があります。もしダークエネルギーの起源が宇宙が誕生した当初のプランク時代にあるとすると、現在のこんなに小さなダークエネルギーは不自然で、あり

そうもないことになります。従って、適切な説明が必要です。あなたはどのように説明しますか。

偉大な理論家になるには、解くべき大問題が必要

ターナー プランクスケールより30桁以上小さなダークエネルギーのスケールは、プランク時代の物理とは無関係であることを示唆しているように見えます。とは言うものの、ダークエネルギーがいったい何と関係があるのか、何も手がかりがないのです。今日の会議の様子がこの状況を良く表していると思います。理論家はダークエネルギーが何かについて、良いアイデアをもっていません。アイデアはたくさんありますが、ほとんどがその場しのぎで、他の何かに光を当てるといことがないため、どれも説得力があり

ません。しかし、この問題の素晴らしいところは非常に大きな問題であるということです。実に大きくて、解決の見通しは全くついていません。

杉山 理論家として、あるいは研究者として、このように大きな問題に取り組むことができるのはとても幸せなことに違いありません。

ターナー その通りだと思います。わくわくするような時代には、データや頭の良い人たちだけでなく、大きな問題が必要なのです。アメリカの第42代大統領、ビル・クリントンはずば抜けた政治的手腕を持っていましたが、解決すべき重大問題の無い時代の大統領だったので

杉山 こんどの大統領には解決すべき多くの問題があります。実に重大な問題が...



ターナーさんが一般向け講演会で示したスライドから

ターナー まさにその理由で、ビル・クリントンはバラク・オバマをとてもうらやんでいると思います。偉大な理論家（あるいは偉大な大統領）になるには、解くべき大問題がある時代に生きている必要があります。しかし、問題が本当に大きいと、自分が活躍できる間にそれが解決される保証がありません。ダークエネルギーの解明には、5年から10年か、あるいは100年かかるかもしれません。

杉山 ダークマターについて考えると、ツヴィッキー*9が1930年代にその存在を発見しましたが、まだ正体がわかって

*9: カリフォルニア工科大学で活躍した天文学者 (1898-1974)。超新星と中性子星の関係に着目し膨大な観測を行ったこと、超新星が距離の決定に使えることを見いだしたこと、銀河のカタログを作成したこと、さらにダークマターの存在を最初に発見したことなど、顕著な業績がある。

いません。ダークエネルギーについても同じことが起きるかもしれないですね。

ターナー 全くその通りです。ツヴィッキーはその時代で最も独創的な天体物理学者で、ダークマターが何者か推測しました。中性子星、白色矮星、ブラックホール等です。彼のリストには新粒子はどこにもありません。80年ほどかかって、我々は今まさにダークマターの謎を解こうとしているように見えます。ダークエネルギー解明にはそんなに長くかからないことを期待しましょう。ひょっとすると、解決はもう間近かも知れないのですよ。

杉山 我々の次の大仕事は何でしょうか。ダークエネルギーはとんでもなく難しそうだし、ダークマターはすぐ解決できそうだし。データは殺到しています。

将来の宇宙論についてのお考えは？

ターナー 私は今、こう言えるのではないと思うのです。「我々は理論と観測が一緒になった、極めてエキサイティングな時代に生きています」と。我々は非常に強力なアイデアと素晴らしい観測装置をもっています。今が黄金時代なのかどうかは、10年から15年先に次のような質問に対する答えがどうなっているかで決まることだと思います。「我々は大きな問題を幾つか解決したでしょうか？ 例えば、我々はダークマターの正体を理解したでしょうか、宇宙はいかにして始まったか理解したでしょうか、ダークエネルギーとは何か理解したでしょうか、普通の物質の起源であるバリオン生成を理解したでしょうか、星と銀河の形成の筋書きを書き終えた

だろうか、等々」

杉山 おっしゃっていることは、新しい知識への大きな跳躍、宇宙の新しい理解のように聞こえますが...

ターナー 本当にエキサイティングなのは、IPMUの設立方針の一つ、「天文学だけではなく、素粒子物理だけではなく、数学だけではなく。それらは皆結びついていて、どれかの飛躍は多分3分野全部が共に飛躍することにつながる。」ということですよ。

杉山 IPMUで何が起きるか、また見に来てください。

ターナー 是非また来たいと思います。あなた方はとても特別なものを創造しました。IPMUが世界の科学をどのように変革するか、楽しみに注目しています。

杉山 ありがとうございました。