



## 日本天文学会公開講演会へようこそ

日本天文学会理事長 土佐 誠

日本天文学会では、春と秋の年2回全国各地で年会を開催して研究発表・交流の場を設けておりますが、この機会に、市民の皆さんにも最新の天文学を紹介したいと考え、公開講演会を開催しております。

今回は、日本天文学会が創立100周年を迎えるにあたり、特別なプログラムを用意いたしました。天文愛好家・アマチュアの活躍、すばる望遠鏡が活躍する観測天文学、新しい宇宙を開拓するスペースの天文学、そして宇宙の始まりに迫る理論天文学など、世界をリードするわが国の天文学の発展と今日の姿を、それぞれの分野で指導的な活躍をされている方々に講演していただきます。

なお、創立百周年を記念して、この講演会の他に「シリーズ現代の天文学」全17巻（日本評論社）の刊行、ロゴマークの制定、記念切手の発行、日本天文学会の百年史「日本の天文学の百年」（恒星社厚生閣）の刊行などがありますので、そちらにも関心をお持ちいただければ幸いです。

### P R O G R A M

2008年3月29日（土）11:00 - 17:00（開場10:30）

有楽町朝日ホール 朝日新聞記念会館

#### 第一部

講演：「天文愛好家と天文研究者の100年」

山岡 均（天体発見賞選考委員会委員長 九州大学）

#### 第二部

講演：「z項から100年～「すばる」望遠鏡の時代に～」

小平桂一（総合研究大学院大学 学長）

講演：「宇宙空間からの天文学の発展」

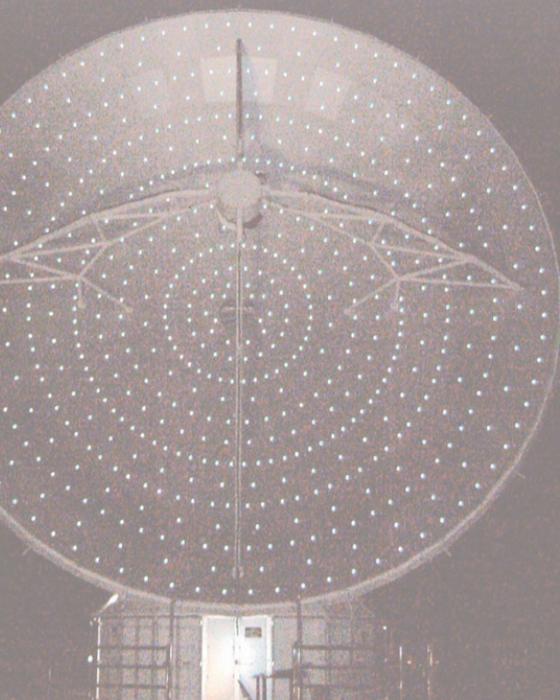
井上 一（宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部長）

講演：「宇宙論の現状と展望」

佐藤勝彦（東京大学大学院 教授）

# 日本天文学会公開講演会

（学会創立百周年を記念して）



## 1. はじめに

天文学は、研究を業務とする大学教員や研究機関職員だけでなく、天文愛好家、いわゆるアマチュア天文家による貢献が大きい学問領域です。このような状況が成り立つためには、愛好家の方々の熱心なご努力に加え、愛好家と研究者との間に良好な関係が築かれ、天文学の深化と普及に協力・連携してきたことが重要であったと考えます。本講演では、この100年間の天文愛好家の活躍と、研究者との連携の様子について見ていきたいと思います。

## 2. 日本天文学会・天文同好会の創設

1908年は日本の天文学にとって画期的な年となりました。「日本天文学会」が設立されたのです。東京天文台（後の国立天文台）の初代台長であった寺尾寿が会長、後に雑誌『現代之科学』を興し科学ジャーナリズムの嚆矢となった一戸直蔵が和文誌『天文月報』（図1左）の編集主任となりました。

日本天文学会は、創設時の会則にも「天文学の進歩及普及を以て目的とす」と記されているように、広く門戸が開かれた学会です。発足時の会員は、専門家である特別会員が170名、主に愛好家である普通会員が480名ほどと、当時から多くの天文愛好家の参加がありました。この傾向は現在でも続いています。

大正になって、京都大学の山本一清を中心として、愛好家組織「天文同好会」が設立されました（1920（大正9）年）。創立時は200名程度の会員数でしたが、熱心な勧誘活動により1年ほどで7～800人にも増加したといえます。東京天文台の専門家の参加もあり、研究者と愛好家が共に加わった全国的な組織となりました。その後、機関誌『天界』（図1右）用の紙の配給を受ける便宜のため会名の名称は「東亜天文学会」と改められ、現在に続いています。

当時の天文愛好者の活動としては、流星や変光星の観測があり、これらの機関誌に観測結果が報告されています。それに続いて、太陽黒点や月による惑星の掩蔽、惑星面の観測などが報告されるようになってきました。

## 3. 本邦初の天体発見

1936（昭和11）年、3つの新天体が日本人の手によって発見されました。彗星 C/1936 O1（Kaho-Kozik-Lis）と、「とくげ座 CP」と名付けられた新星、そしてやはり新星であった

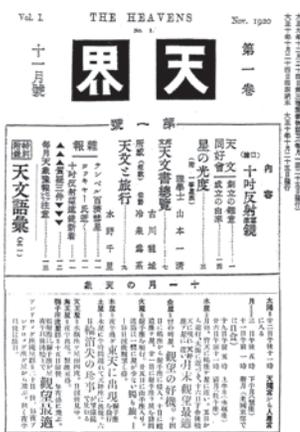


図1 日本天文学会の和文誌「天文月報」創刊号（1908）の表紙（左）と、天文同好会（現在の東亜天文学会）の機関誌「天界」創刊号（1920）表紙（右）。いずれの雑誌も現在も同じ誌名で存続している。

「いて座 V630」です。それまでも日本で新天体が発見されたことはありましたが、それらはいずれも、海外ですでに発見されていたものを、その情報を知らずに再発見した「独立発見」でした。1936年の3天体はすべて、世界で一番乗り、正真正銘の「第一発見」だったのです。

天体の発見は、その天体の研究を通じて天文学の進歩につながるものであると同時に、発見が広く報じられることで天文学の普及にも貢献する業績です。彗星に発見者の名前が付けられることなど、報道を通じてご存知の方も多いことでしょう。天体発見の偉業を賞賛し、また後に続く人の現われんことを願って、日本天文学会では「天体発見賞」を創設しました。これらの3天体の発見者、下保茂、五味一明、岡林滋樹が、最初の受賞者となりました。下保は東京天文台の職員で、当時からこの賞は、愛好者に対象を限ったものではありませんでした（図2）。

独立発見であっても、第一発見にほとんど遅れず、また迅速に通報することで、天体の確認や継続観測に資することができます。1942（昭和17）年の新星「とも座 CP」は、明け方の南天低いという悪条件にもかかわらず、日本国内で6人も独立発見者があり、日本天文学会ではそのうち初日に発見した4名を表彰しました。後に、「天体発見功労賞」として制度化されるものの最初期の例です。



図2 下保への天体発見賞の送付状。

## 4. 戦後の興隆

第二次世界大戦後の日本を勇気づけた出来事のひとつに、本田實による彗星の発見があります。戦前にも彗星の独立発見があった本田ですが、第一発見は1947年のC/1947 V1 (Honda)が初めてでした。これを嚆矢に、本田は1968年までに独立発見を含めて12個の彗星を発見しました。本田に続いて、関勉や池谷薫など、多数の彗星捜索者が活躍し、彗星発見は日本のお家芸とまで言われるようになります。

本田は1970年以降、新星の捜索に重点を移します。死去する1990年までに11個(独立発見を含む)の新星・特異天体を発見し、後に続く多数の新星捜索者の範となりました。



図3 超新星2002apは、国内の公共天文台でのスペクトル観測により、膨張速度がたいへん大きい「極超新星」と判明した。ぐんま天文台撮影。

日本人が発見した特異天体としては、太陽程度の質量の星が、終末期に外層を放出する「ヘリウム・シェルフラッシュ」と呼ばれる現象を起こしたところを捉えた「いて座V4334」が有名で、発見者である櫻井幸夫の名から、世界的にもSakurai's Objectの通称で呼び習わされています。

1990年代以降、望遠鏡の口径径化、CCDカメラの普及によって、暗い天体の観測が容易になり、遠方の銀河に出現する超新星の発見が相次ぐようになりました。串田麗樹、青木昌勝、板垣公一のように、10個以上の超新星を発見した方もいらっしゃいます。誇るべきは単に発見数のみではありません。広瀬洋治が発見した超新星2002apは、発見後間もなく日本国内の公共天文台で行われたスペクトル観測で、たいへん特異なものであることが報告され、その後すばる望遠鏡をはじめとする世界各地の観測機器によって詳細に観測がなされました(図3)。また、板垣は、自身が発見した超新星2006jcが、大爆発の2年前にも小規模な増光を起こしていたことを報告しました。この前代未聞

の現象は、板垣も著者として名を連ねた論文によって、雑誌Natureに報告されました。

## 5. 発見以外の活動

天文愛好家の活動は、天体発見に留まりません。長年にわたる地道な観測や軌道計算、天文伝承の収集や天文ソフトの作成など、その活躍はたいへん広く、また深いものです。また、インターネットをはじめとする通信の進歩にともなって、予想外の流星群の活動、いつ起きるかわからない変光星の増光などを検出し通報して、日本の次に夜が訪れるヨーロッパやアメリカ大陸での観測を呼びかけるといった貢献も増えてきました。

これらの活動を賞賛し奨励するために、日本天文学会では、2001年から「天文功労賞」を創設し、天文愛好家による際立った活動を表彰してきています。突発的な現象の観測などの短期的な業績、長年の観測などの長期的な業績の両者を表彰してきていますが、これまでに後者として、

- ・2001年 成見博秋(変光星の目視観測光25万点)
- ・2002年 広瀬敏夫(星食・掩蔽の観測と指導)
- ・2003年 豆田勝彦(長年にわたる流星の眼視観測)
- ・2004年 武蔵高等学校中学校太陽観測部(75年にわたる太陽面の継続

観測。図4)

- ・2005年 佐藤健(長年にわたる木星面の観測)
  - ・2006年 藤井貢(自作低分散分光器による幅広い多数の突発天体の分光フォローアップ観測)
  - ・2007年 浦田武(太陽系小天体の発見と軌道計算)
- の各氏に受賞していただきました。

今後も、天文愛好者と研究者との協力関係を維持発展させていくことは、天文学の進歩と普及にたいへん意味があると期待されます。それを実現するためには、相互から手を伸ばした交流、特に研究者からの情報提供が重要な役割を果たすでしょう。将来に向けて、私たちのなすべき行動はたくさんあります。それを着実に実行していくことが、良好な関係を継続する第一歩となるはずで

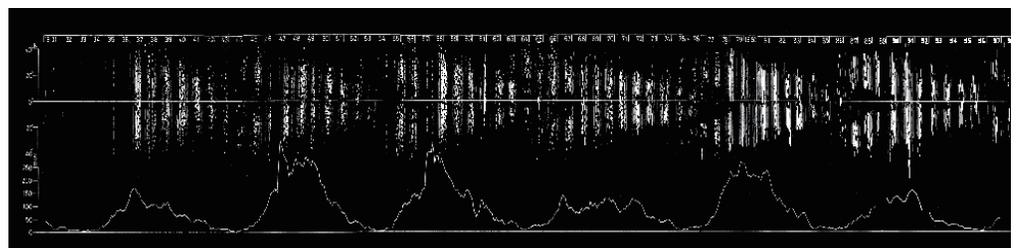


図4 武蔵高校太陽観測部による蝶形図。11年周期で活発になる太陽活動が、何サイクルにもわたって記録されている。

日本天文学会が創設された1908年、今から100年ほど前には、世界の天文学は、また日本の天文学は、どのような状況にあったでしょうか。測地学と銀河天文学から一、二の典型的な局面を拾って振り返ってみましょう。

日本では水沢緯度観測所の木村栄が「z項」を発見し、初めて日本の天文学の力が国際的に認められた時代です。19世紀末から20世紀初頭にかけて、当時はヨーロッパを中心として度量衡の標準化や、国際的な時刻、緯度・経度の制定などが盛んに行われていました。その中で、地球自転軸の変動を精密に捉えたいという要請があり、国際観測事業としてヨーロッパ、北米と並んで日本にも観測点が必要になりました。恒星の子午線通過を精密に観測するのです。ドイツ製の観測装置が供与されるのでドイツの観測者が派遣されるべきだという考えに対し、日本は日本人が観測責任を持つことを主張し続け、やっと各国の了解を得ました。ところが最初は「日本の観測だけが誤差が大きく理論値からはずれる」と非難を浴びる事態になりました。若くして観測室長の重任を負った木村栄は、観測装置を何度も点検し、あらゆる誤差要因を検討し直しましたが、これといった原因を突き止められずに苦悩の年月を過ごすこととなります。

彼の徹底した厳しい点検と万全を期した観測の積み上げは、やがて数年後には「自分の観測結果は間違っていない」という自信に変わっていきました。しかし、すると地球自転の理論には合わないのです。ある日、観測所職員達とのテニスから自室に戻って机の引き出しを開けた途端に、知られていた理論式に新たな項（z項）を付け加えて観測結果を当てはめ直してみることを思いつきました。やってみると、見事に各

国の観測結果を、水沢のものも含めて、同じような精度で新しい式に合わせることができたのです。世界中の天文学者もこれには兜を脱ぎ、木村のz項を受け入れるようになりました。その後の研究から、地球は剛体ではなく、特に内部には流体核を持っていて、外殻と内核との相互作用が自転軸の変動に影響を与え、それがz項として現れることがわかりました。z項の発見により、木村栄は最初の学士院恩賜賞を、また後年には最初の文化勲章を受章しました。この日本天文学の曙光とも言えるエピソードは、科学をする者の自己への厳しさ、厳密さ、ねばり強さ、精密さ、権威に囚われない発想の柔軟さなど、100年後の私たちに教訓を残しています。

これは天文学の基礎となる測地観測分野の当時の出来事ですが、宇宙観測では、E. ヘールの尽力により1908年にウィルソン山に1.5m反射望遠鏡ができて、私たちの太陽系を取り囲む恒星世界の構造が大きな議論になっていました。19世紀末に形をなした分光学を使って恒星をスペクトル分類し、恒星のスペクトル型と光度との関係を示す経験則を基本に、恒星の距離を割り出しました。天の川銀河系を近場から手探りして、その拡がりや構造の見当をつけ始めていました。今でこそ「アンドロメダ銀河」として親しまれている「隣の銀河」も、100年前には、何者か正体がわかっていなかったのです。1920年には、有名な「アンドロメダ星雲」論争がH. シャプレーとH. D. カーチスとの間で交わされました。天の川銀河は非常に大きくて、アンドロメダ星雲は太陽系と同じく天の川銀河の中に在るとする説と、天の川銀河はさほど大きくなくて、アンドロメダ星雲は遠く離れた隣に在る同等規模の銀河だとする説が対立したのです。

ウィルソン山に1919年に建造された2.5m望遠鏡の力も手伝って、その後、アンドロメダ星雲の中の明るい変光星の精密観測等から、「隣の銀河」説に軍配が上がりました。

日本の天文学界は、こうしたことをニュースとして聞き知っただけでした。東京天文台に65cm屈折望遠鏡が輸入されたのは、さらに後の1929年、銀河スペクトルの赤方偏移からハッブルの法則が導かれた年でした。

z項の発見から100年近く経った今、木村栄博士が奮闘された水沢緯度観測所は、自然科学研究機構・国立天文台・水沢VERA観測所に引き継がれて、天の川銀河構造の観測的研究と地球の衛星・月の内部構造の研究で、世界をリードしています。VERAと呼ばれる特殊な超長基線電波干渉計システムを日本列島に張り巡らせて、天の川銀河内の恒星の位置と運動の精密観測を行い、それらに働く重力場から「ダーク



夜間休息所

観測所

氣象観測器

図1 創設間もない頃の水沢観測室。



マター」の分布を割り出して、その素性に迫ろうとしています。また月探査衛星「かぐや」を月に送って、放出した孫衛星と共に月を周回させ、月の重力場を精密に計測することを通して内部の密度分布を探り、月の起源についての手がかりを得ようとしています。

恒星の観測的研究では、我が国も1960年に東京天文台・岡山天体物理観測所に1.9m反射望遠鏡が完成して大きな飛躍を遂げましたが、パロマー天文台の5m望遠鏡が活躍する時代とあって、銀河宇宙の研究にはいかにも力不足でした。東京天文台・木曾観測所に1972年、広視野の1mシュミット望遠鏡が完成して、やっと近傍銀河の定量分類などの独自の研究を展開することができました。1980年には念願の野辺山宇宙電波観測所の45mミリ波望遠鏡と干渉計が完成し、宇宙分子を手がかりに銀河規模での星形成領域や星間雲の研究で世界最先端の観測的研究を行える時代が到来しました。この頃には、欧米の光学天文学者達は世界的な観測適地に3.5mから4m級の反射望遠鏡を建設して、着々と銀河宇宙の彼方へと探査の手を伸ばし、銀河団や宇宙大構造の本格的な研究を始めていました。私たちの隣の銀河、アンドロメダ銀河についても、銀河の中身に踏み込んで、例えば、明るくてはっきりそれとわかる球状星団等の研究が進められていました。

「すばる」望遠鏡のハワイ・マウナケア山頂設置計画が検討され始めたのは、1980年頃の、そのような状況下でのことでした。初めは3.5m級、次いで5m級、そして7.5mを検討し、最後に8.2mに挑戦することになりました。1mシュミット望遠鏡しか自前で作ったことのない日本の天文学界が、8.2mを、しかも外国の標高4200mの高山に建造できるものか。ほぼ100年前の緯度観測事業の際に向けられたのに似た国際的視線を意識しなかったと言えは嘘になるでしょう。しかし結果的には、日本の天文学界は立派に「すばる」を建設し、今や世界をリードする成果を挙げています。とりわけ、様々な開発要素を取り込んだ口径8.2mの新技术望遠鏡が、主鏡装着後3ヵ月足らずで目標性能を達成したことは、世界を驚かせました。10年間に亘る慎重で粘り強い事前検討を踏まえて、職人気質とでも呼べるような精密さと徹底さをもって根気良く追求した、日本の科学者と工学者の協働の成果です。その努力が実って、今では世界中の多くの天文観測者にも使われています。

現在活躍している新技术大望遠鏡の中で、鏡筒先端に位置する主焦点カメラを備えているのは「すばる」だけです。これは日本のロボット技術の高さを物語るものです。この主焦点カメラの活躍は目覚ましく、人類が確かめ得た最も遠い銀河の世界を129億光年の彼方にまで推し進めました。また銀河宇宙の大構造が、既に100億年近くも前の昔に形成されていたことを明らかにしました。こうして遠くまで見渡すことで、物質世界の歴史を辿り「宇宙誌」を読むことができます。その中で地球や人類のアイデンティティーを問い直すことに

なります。「かぐや」が月から送ってくる惑星「地球」の映像とも重ね合わせて考えてみてください。

65億人ものホモサピエンスが生息する、この小さな水の惑星・地球は、科学技術に依存したグローバル化が急速に進行しています。137億年に亘る宇宙誌の中の100年程度の、いわば瞬時の出来事です。いったい地球と人類のこれからはどうなるのでしょうか。こうした問題に対しても、国境を越えた協働の中で、日本文化の特性を活かした貢献をしたいものです。

ここで少し、「すばる」望遠鏡の観測をもとに現在私が行っている「アンドロメダ銀河」の研究についてお話ししましょう。100年前には正体不明だった「星雲」を「すばる」主焦点カメラで撮影すると、個々の普通の星までを見分けることができます。太陽系が吸収物質の多い凸レンズ状の銀河円盤面内に在るために、私達が天の川銀河の全体を見渡すことは困難です。そこで「隣の似た銀河の円盤を調べよう」となります。私達は今まで見えなかったような小粒の星団をアンドロメダ銀河の円盤部で探しあげ、その年齢、質量、重元素比などを決定し、星団マップを作っています。そこから、銀河円盤の形成史を読み解くことができるのではないかと考えています。これは北欧のバルチック海に面した小国・リトアニアの研究者、V. ヴァンセヴィシウスさん達との共同研究です。

最後に、現在進行中のALMA計画の紹介をしておきます。これはアメリカ、ヨーロッパ、アジアが共同で、北部チリの5000mの砂漠高原10km四方に、60台を越える10m級のミリ波・サブミリ波電波望遠鏡を建設してその電子情報を光ファイバーで繋ぎ、大きな干渉計とする計画で、着々と工事が進んでいます。高い感度と解像力を併せ持っていて、宇宙原初の原始銀河雲や恒星誕生時の原始惑星円盤などの観測に威力を発揮します。特にサブミリ波帯は多くの分子の観測に重要ですし、宇宙の果ての天体からの放射が赤方偏移して観測されることも期待されています。「アジア」と言いましたが、今のところ日本が主であるものの、アジアの他の地域の天文学者も参加しつつあります。前に触れたVERA計画でも、発展するにつれアジアの他の国々の電波望遠鏡群が基線網に加わりつつあります。

天文学は、もともと世界中の人類が宇宙に向き合う、国際性の非常に強い学問分野です。木村栄の孤独な苦闘に始まった日本の天文学は、100年経って今や開かれた世界の中で大きな役割を担っています。こうした世界中の天文学者の協働が、地球の平和促進に寄与するように願っています。



図2 すばる望遠鏡で撮影されたアンドロメダ銀河。

# 宇宙空間 からの 天文学の発展

Hajime INOUE 井上 一

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部長

人類は長い間、可視光と呼ばれる、電磁波の種類で言えば非常に限られた領域でのみ宇宙を眺めてきました。これは、主には、利用できる電磁波の検知器が人間の目に限られていたためです。それが1930年代からは、無線通信技術の進歩によって、宇宙を眺める電波の窓が開かれ、新しい発見が続々と行われ、電波天文学は光学天文学に匹敵する一大分野へ発展しました。そして、さらに、1950年代頃からの気球・ロケット・人工衛星などの技術の発達によって、人類が宇宙を眺めることのできる電磁波の領域は格段に広がりました。宇宙からやってくる各種電磁波の多くは地球を包む厚い大気に散乱されたり吸収されたりしてしまい、地表に届く電磁波は、可視光・一部の波長の赤外線・電波に限られるからです。

日本における、大気の外に出て行う科学観測は、1950年代後半から、気球とロケットを使って始められました。気球実験は、1950年代なかばから、宇宙線研究のために始められました。そして、次第に気球の性能向上が図られ、実験体制も整備され、天文観測を含め、さまざまな科学目的の気球観測・実験が行われるようになりました。一方、1955年のペンシルロケットの飛翔実験から始められたロケット開発は、1958年の地球観測年頃から、観測ロケットとして科学観測に使われ始めました。その後、ロケットの打ち上げ能力はさ

らに拡大され、1970年にはわが国初の人工衛星が打ち上げられて、科学衛星時代の幕開けを迎えました。以来、これまでに打ち上げられた日本の科学衛星・探査機は31機にもなります(図1参照)。

わが国において、気球・ロケット・人工衛星を用いた、宇宙空間からの天文観測に先鞭をつけたのは、X線天文学でした。1960年代後半には、観測ロケットや気球を用いて、その頃発見されたいくつかのX線源の位置や性質を調べる先駆的な観測がなされ、1979年に打ち上げられたわが国初のX線天文衛星「はくちょう」(1979年打ち上げ)の成功につながっていきました。そして、その後も、「てんま」(1983年打ち上げ)、「ぎんが」(1987年打ち上げ)、「あすか」(1993年打ち上げ)、「すざく」(2005年打ち上げ)と、欧米の衛星に比べると小型ではありながら、特徴をはっきりさせた衛星を継続的に打ち上げて、着実に成果を挙げてきています。このようなX線観測は、中性子星やブラックホール周辺での高エネルギー現象、超新星残骸における重元素拡散や粒子加速の様子、銀河団を包む高温ガスの存在、暗黒物質の分布・量的把握など、それまで知られていなかった宇宙の新しい姿を次々と明らかにし、今ではX線天文学は、光学天文学・電波天文学に並ぶ一大分野へと成長しています。そし

	1970	1980	1990	2000
試験衛星 初期科学衛星	おおすみ しんせい たんせい2 たんせい たんせい3 でんぱ たんせい4 たいよう			SFU
地球周辺・ 磁気圏観測		きょっこう じきけん	おおぞら あけぼの	GEOTAIL れいめい
太陽観測		ひのと	ようこう	ひので
天文観測 X線 赤外線 電波	はくちょう	てんま ぎんが	あすか (SFU:IRTS) はるか	すざく あかり
月・惑星探査		さきがけ すいせい	ひてん	のぞみ はやぶさ かぐや
打ち上げ ロケット	L-4S M-4S M-3C M-3H M-3S	M-3SII	M-V	H-2A

図1 これまでに打ち上げられた日本の科学衛星・探査機とそれらを打ち上げてきた日本のロケット(ただし、GEOTAIL、「れいめい」はそれぞれ米国とロシアのロケットによる。また、SFUの打ち上げロケットはH-2)。画像はJAXAホームページより。

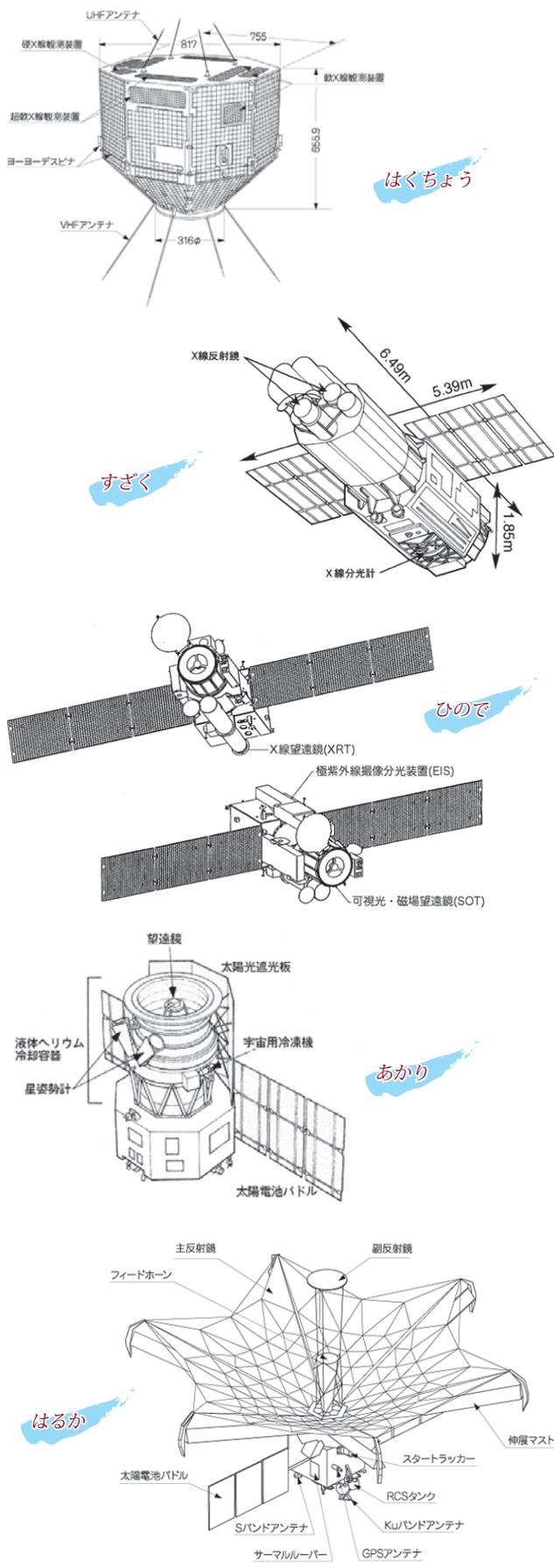


図2 日本の科学衛星。画像は JAXA ホームページより。  
て、宇宙空間からの高エネルギー電磁波の観測は、ガンマ線領域にも着実に広げられつつあります。  
人類として最初に行われた宇宙空間からの天体観測は、太

陽からの X 線に対してのものでした。わが国においても、紫外線や X 線の太陽観測は、宇宙からの X 線観測とほぼ同じ時期から始められました。そして、1981 年には、わが国初の太陽観測衛星「ひのとり」が打ち上げられ、太陽フレア時の X 線放射について数々の新しい発見が行われました。1991 年には、わが国 2 番目の太陽観測衛星「ようこう」が打ち上げられ、X 線反射望遠鏡が搭載されて、太陽表面の活動の生々しい X 線画像が初めて明らかにされました。さらに、2006 年には、わが国 3 番目の太陽観測衛星「ひので」が打ち上げられ、搭載された可視光望遠鏡が、大気揺らぎのある地上では得ることのできない太陽表面の鮮明な映像を明らかにし、太陽表面で起きている種々の現象について新しい発見が続々となされつつあります。

赤外線においても、地上で観測できる波長は非常に限られており、ほとんどの波長の赤外線は、宇宙空間に出ないと観測できません。わが国における赤外線観測は、1970 年代後半に、気球を使うところから始められました。その観測は、観測ロケットを用いたものに広げられ、世界に先駆けたマイクロ波背景放射に関わる観測も行われました。1995 年には、宇宙空間を利用したいくつもの実験を一緒に行う工学試験衛星 (SFU) に赤外線望遠鏡が搭載され、天の川に沿った赤外線の分布について新しい発見が行われました。そして、2006 年には、わが国初の赤外線天文衛星「あかり」が打ち上げられました。この衛星には、摂氏マイナス 270 度近くまで冷やされた口径約 70 cm の赤外線望遠鏡が搭載され、ほぼ全天の赤外線の強度分布の観測がこれまでにない感度と撮像精度で行われました。現在、赤外線の全天強度地図が作成されているところですが、数々の発見がなされることが期待されています。

電波は、ほとんどの波長が、地上まで届くため、主には地上の電波望遠鏡によって多様な観測が行われてきています。宇宙空間に電波観測装置を持ち出すメリットは、地上の電波望遠鏡と組み合わせ、地球の大きさをはるかに越える超長基線の電波干渉計 (VLBI) を作ることにあります。わが国では、1997 年に、世界で初めて、宇宙空間に電波天文衛星を打ち上げ、地上と衛星とによって、スペース VLBI システムを作ることに成功しました。世界初の電波天文衛星は「はるか」と名づけられ、地上の電波望遠鏡群と共同して、主に活動銀河核からのジェットについて精密画像を取得し、数々の新しい発見を行いました。現在は、「はるか」の後継機として ASTRO-G 衛星の計画が立ち上げられ、開発が進められています。

以上の、電磁波における天文観測に加え、宇宙から来る高エネルギー粒子 (宇宙線) の観測においても、主に、気球を使った観測が行われてきています。そして、今や、宇宙ステーションに設置される日本の実験施設「きぼう」の上に宇宙線の観測装置を搭載し、観測を行う計画が進められています。また、宇宙からの重力波を捉える試みにおいても、地上観測装置の開発と並行して、宇宙空間に重力波観測装置を持ち出す計画が練られています。



## はじめに

「私たちの住んでいるこの世界はどのような構造をもち、またどのように形成されたのだろうか。」

これは人類の歴史が始まった頃から問い続けられている疑問です。私たちは自然世界を観察することによって、世界を構成する物質の性質や、その運動の法則を見つけ、また自分自身の体を基準としてより小さな世界、大きな世界へと認識を広げてきました。直接手にすることのできない宇宙については望遠鏡により、また肉眼で見ることのできないミクロの世界は顕微鏡やさらに小さな素粒子の世界は加速器を用いて、物質の存在様式と運動の法則を探求してきました。

日本天文学会が創設された20世紀初頭、現代物理学を支える2本の柱、相対性理論や量子論が作られ、またE. ハッブルによって、私たちの住む銀河系の外に銀河が無数に存在する宇宙が広がっていることが明らかにされました。さらにハッブルによってこの銀河宇宙はどんどん広がっていること、つまり宇宙の膨張が発見されました。ハッブルの宇宙膨張の発見は、宇宙は昔に遡れば物質密度が極めて高い状態から始まったこと、つまり宇宙には始まりがあったことを示すものでした。G. ガモフは宇宙は密度の高い状態から始まっただけでなく、温度も極めて高い状態、火の玉から始まったとする理論を提唱し、その名残である宇宙マイクロ波背景放射も1965年に発見されました。今日の科学的宇宙論、ビッグバン宇宙論は、アインシュタインの相対性理論、宇宙膨張と宇宙マイクロ波背景放射という2つの観測事実に基づいた理論です。火の玉として生まれた宇宙が膨張し、冷却する過程で銀河団や、銀河、そして恒星が形成されるという宇宙進化のシナリオは、観測とも一致し現在の標準的宇宙論のモデルとなったのです。

## インフレーションと量子論的宇宙の創生

1980年代、宇宙論の新たな進展が始まりました。

量子論や当時大きく進歩した力の統一理論に基づいて宇宙の誕生に迫ろうという研究が大きく進むようになりました。力の統一理論とは、自然世界の基本的な4つの力、重力、電磁気力、強い力、そして弱い力をひとつの力として統合する理論です。素粒子的宇宙論によって描き出された宇宙の誕生のシナリオは次のようなものです。

①我々の宇宙は時間も空間も物質もない“無”の状態から量

子論的効果によって創生された。

②誕生直後、この量子論的な極微の空間はまもなくインフレーションと呼ばれる急激な加速度的な膨張を始め、巨大な宇宙となった。そしてインフレーションの終わる頃、宇宙を加速度的に膨張させていたエネルギーが熱エネルギーに転化し、宇宙は火の玉となった。今日の宇宙を満たすエネルギーや物質はこの時作られたのである。

③インフレーション中に宇宙に存在した量子論的な揺らぎも、急激な膨張で空間的に大きな密度の揺らぎとなった。このようにして仕込まれた密度の凸凹は、その後次第に成長し、現在の銀河や銀河団など多様で豊かな宇宙の構造が形成された。

このようにインフレーション理論は極微の小さな空間を宇宙に膨張させ、その中にエネルギーや物質を満たし、しかもそれがどのような構造として成長するかも決めているのです。

しかし、インフレーション理論は当時の有力と考えられた統一理論に基づいて作られたのですが、現在そのような確かな統一理論は存在せず、インフレーションを引き起こすエネルギーを担っているものは「インフラトン」と呼ばれています。

今やインフレーションの理論はカオティックインフレーション、ハイブリッドインフレーション、拡張インフレーション、……オープンインフレーションと、数え切れないほどのモデルが提案されています。

宇宙の創生を議論する量子宇宙論も、その基礎となっている量子重力理論も未完なままです。宇宙の創生を研究するためには相対性理論を量子論的に取り扱うことのできる理論が不可欠ですが、この両者の相性は悪く、今もって量子重力理論はできあがっていません。現在統一理論として最も有力と考えられているのは超ひも理論です。当面それがいつ完成するかわかりませんが、この未完の超ひも理論を使って宇宙の創生やインフレーションの研究が、現在盛んに模索されています。

## 観測的宇宙論の進展

素粒子論的宇宙の理論的研究の進展に呼応するように観測的に宇宙の大構造の研究や初期宇宙の研究が1980年後半から大きく進むようになりました。M. ゲラー等による銀河団が何億光年も壁の上に連なったグレイトウォール発見、さらに、グレイトウォール状の壁はいたるところにあり、それらがつ

ながった蜂の巣のような構造をしていることがわかってきました。一方、蜂の巣の辺に囲まれた銀河の数が少ない領域、ポイド（超空洞）も発見されました。このような宇宙の構造をさらに明らかにし、宇宙の地図作りのプロジェクトが始まりました。その最も代表的なスローン・デジタル・スカイサーベイ（SDSS）は1998年から始まり、20億光年の遠方までの宇宙の大構造、地図作りを現在も精力的に進めています。

1989年、宇宙背景放射を精密に観測する人工衛星、COBE（Cosmic Background Explorer）がアメリカ・NASAによって打ち上げられました。COBEに搭載された遠赤外絶対分光計は、マイクロ波宇宙背景放射が温度2.7Kの完璧なプランク分布をした熱放射であることを初めて明らかにしました。さらにもうひとつの装置、差分マイクロ波放射器（DMR）は背景放射の強度の方向分布に、極めてわずかではあるが、揺らぎが存在することを示しました。DMRの空間的分解能は10度角程度ですが、背景放射が放射された宇宙の誕生から30～40万年の頃の宇宙に物質密度の揺らぎが確かに存在したことを示したのです。銀河や銀河団、超銀河団などの宇宙の大構造はこの揺らぎが次第に成長したもので、この発見は宇宙の大構造形成の研究者が待ち望んだものだったのです。この揺らぎの振幅は $10^{-5}$ 程度のきわめてわずかな値ですが、量子揺らぎが引き伸ばされたものとするインフレーション理論の予言とよく一致し、インフレーション理論は観測から強い支持を得ることになりました。COBEの成果は天文学の歴史に残る大きな成果であり、2006年度のノーベル物理学賞が、COBE衛星の責任者でありFIRASの代表者であるJ. マザーと、DMRの代表者であるG. スムートに授与されました。

さらにNASAは2001年、COBEよりおよそ30倍の空間分解能を持つ衛星、WMAP衛星を打ち上げ、より精密に背景放射の揺らぎを観測しました。その結果はインフレーション理論のもうひとつの予言、宇宙が平坦であることも示しました。宇宙の年齢も同様にして、137億年という値が得られました。これ

はハッブル望遠鏡による従来の手法の観測で求められたおよそ140億年という値ともよく一致するものでした。このように観測的データは大筋でインフレーションを含めてのビッグバン理論が予言するものと完璧に一致するものだったのです。

私たち人類はアインシュタインの相対論から、およそ100年で、宇宙の誕生から現在に至る統一的宇宙の進化像を描くことに成功したと言えるでしょう。現在さらにこの宇宙進化像を肉づけする多くの観測計画も進んでいます。ハッブル宇宙望遠鏡や日本のすばる望遠鏡などの大望遠鏡によって、銀河が作られ出した頃と思われる時代も描き出されるようになっていきます。光や電波などで観測することのできる初期の宇宙は、宇宙が電磁波に対して透明になった時刻以後、およそ宇宙創生から40万年後です。21世紀末には、COBEが宇宙開闢30万年ころの宇宙の地図を描いたように、重力波によって宇宙創生直後のインフレーションが起こった頃の地図も描き出すことができるかもしれません。

### 新たに生じた謎 ダークマター、ダークエネルギー問題

このようなビッグバン宇宙論の大きな成功にもかかわらず、宇宙論には大きな謎が生じています。科学の進歩が常にそうであるように、観測の進歩でこれまでの理論が裏づけら

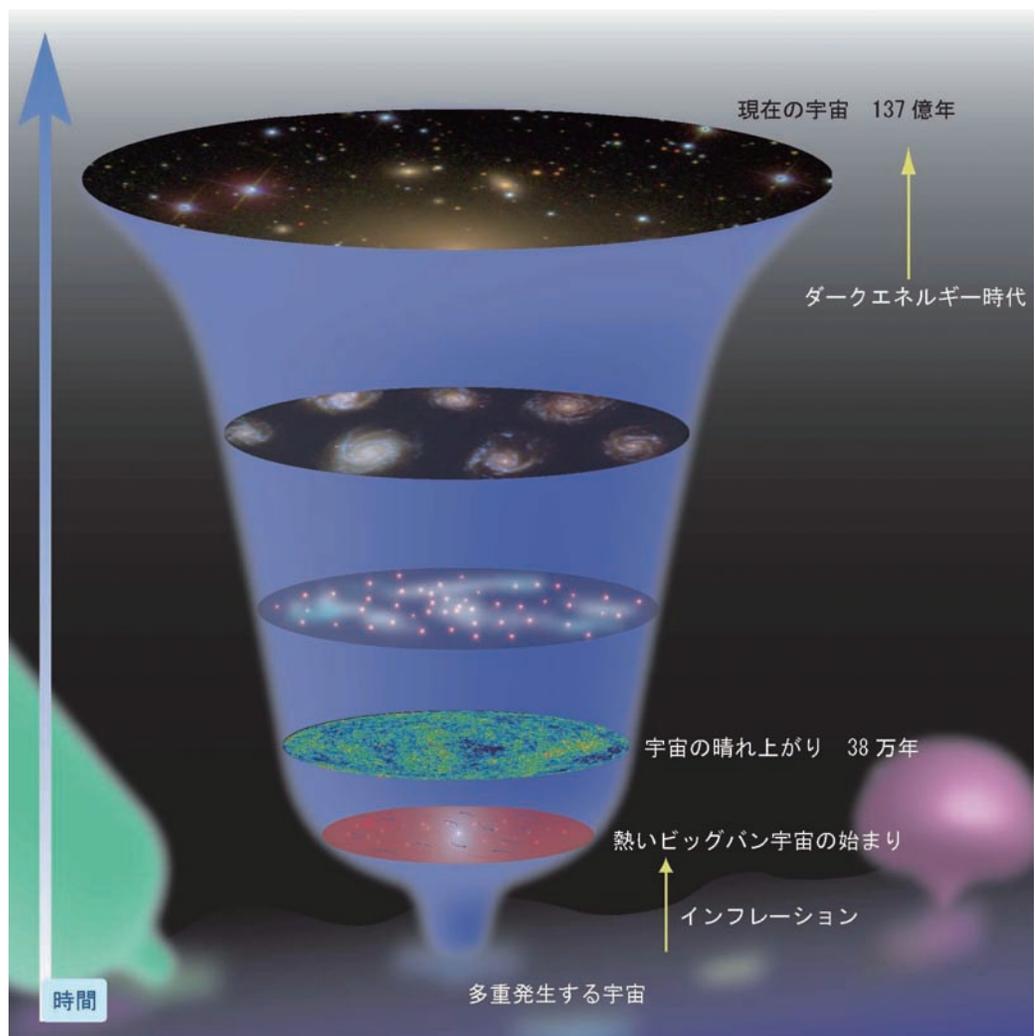


図1 宇宙の創生から現在に至るビッグバン宇宙の進化像

れると共に、新たな謎が生まれてきたのです。それは私たちの住んでいるこの宇宙を構成する物質の96%が何であるかをまったく知らないことです。遠方の超新星の観測から、現在の宇宙は、宇宙初期のインフレーションとよく似た加速的宇宙膨張を始めているらしいことがわかってきました。第2のインフレーションとも呼ぶべき加速膨張は100億年ごとに宇宙の大きさが倍になるという緩やかなものですが、この加速の原因となっているエネルギーは、現在ダークエネルギーと呼ばれています。

また私たちの銀河系をはじめ、銀河の周りには通常の物質で作られている星やガスとは異なる正体不明の物質、暗黒物質が10倍近く存在していることが知られています。WMAP衛星の観測データの解析では宇宙におけるエネルギー質量の割合はおよそ通常の物質が4%、暗黒物質が26%、ダークエネルギーが70%であることがわかっています。

暗黒物質候補としては超対称性理論が予言するニュートラリーノをはじめとして各種の素粒子が考えられています。そのような粒子を直接地上に設置した検出器で検出しようという実験も行われています。また2008年から稼働を開始する世界最大の加速器、ラージハドロンコライダー（LHC）によって、暗黒物質について何らかの示唆が得られるかもしれません。

アインシュタインは1917年、永遠不変な宇宙のモデルを作るために自分の方程式、アインシュタイン方程式を改ざんし宇宙定数を加えました。ダークエネルギーの値が時間的に変化しないものならば、ダークエネルギーは宇宙定数と同じようなものと言うことができます。

しかしその値が変化する可能性もあります。ダークエネルギーの正体は皆目わかっていませんが、特になぜ観測されている量だけあるのか大きな謎です。1989年、S. ワインバーグは、この問題は「人間原理」で説明される可能性を示唆しました。

人間原理は、まずいろいろの物理定数や異なる物理法則を持つ宇宙が無限に存在すると考えます。現在観測されているダークエネルギー密度をはるかに越えるような値を持つような宇宙では、早い時期に加速度的膨張が始まり宇宙の構造は

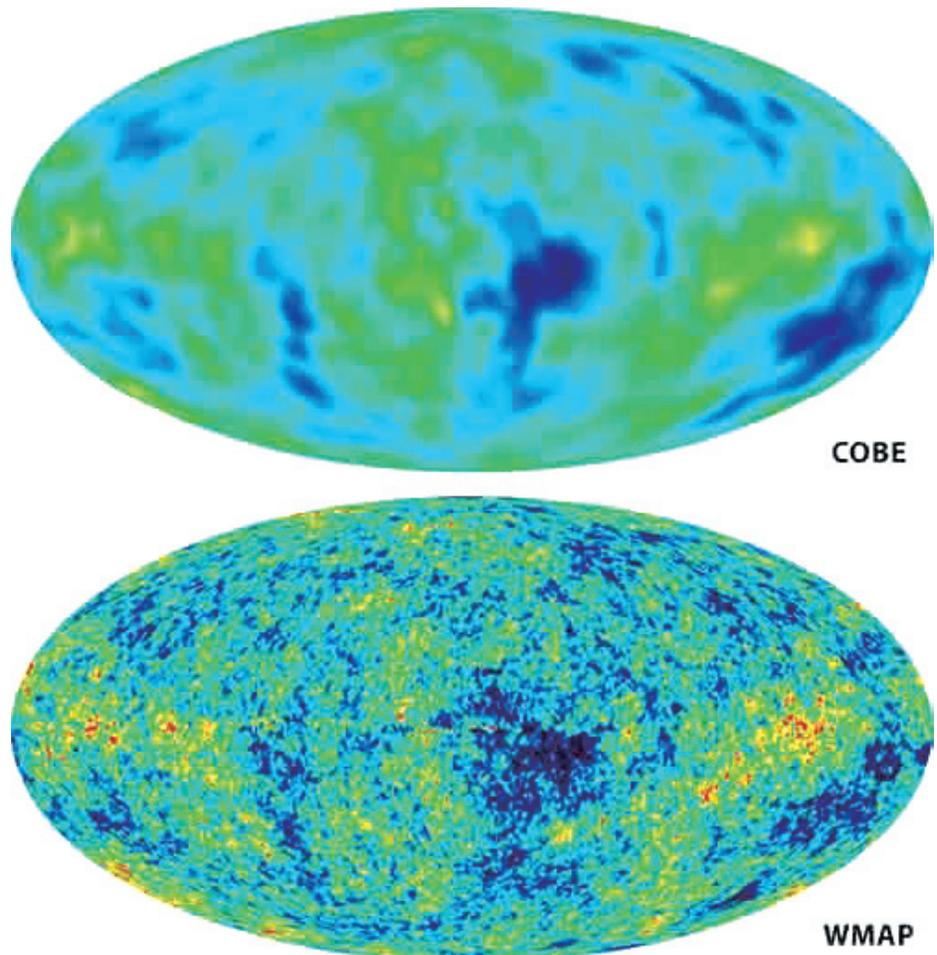


図2 COBE衛星とWMAP衛星の描いた宇宙マイクロ波背景放射の強弱の天球図。宇宙が始まって40万年ころの様子を表す。COBEは始めて後に銀河や銀河団に成長する揺らぎがこのころに確かに存在していたことを明らかにした。この揺らぎはインフレーション理論と良く一致する。WMAPは高い精度でCOBEの観測を確認すると共にビッグバン理論に基づいた解析をおこなない宇宙が平坦であることや宇宙の年齢が137億年であることなど示した。NASAホームページより。

十分形成されず知的生命体も生まれません。従って認識主体である知的生命体は生まれず、その宇宙は存在しても認識されません。知的生命体が生まれるのは現在の値程度のダークエネルギー、もしくはそれ以下の値を持つ宇宙のみです。従って認識される宇宙はすべて現在の値程度かそれより小さな値を持つ宇宙のみということになります。

人間原理の考え方は誤りではありませんが、科学的な研究を通じて求められる物理量に対して人間原理を適用すると、研究の放棄ともなりかねません。現在の段階では理論的、観測的研究を続けるべきでしょう。ダークエネルギーの時間的変化や、また空間的な非一様性が存在するのかわからないのか、そのような研究がまず第一歩でしょう。赤方偏移パラメータの大きい遠方銀河の分布や、水素21cm線の観測で、この問題に迫ろうという計画も立てられています。また超ひも理論や、それに基づく膜宇宙論、つまり私たちの宇宙は10次元空間に浮かぶ膜の世界だと考える理論などでダークエネルギーを説明しようという試みもあります。ダークエネルギーの存在は宇宙論的意義以上に物理学の根幹にふれる問題でしょう。

科学は矛盾や謎を解くことによって進むものです。ダークエネルギー問題は、21世紀に花開く新たな宇宙論、物理学への鍵なのかもしれません。