



# じつきょう 理科資料

NO. 71

サイエンス・プラザ

## 2011年ノーベル物理学賞

名古屋大学大学院理学研究科教授 杉山 直

2011年のノーベル物理学賞は、宇宙の膨張が加速していることを発見した業績に対して、ローレンスバークレー国立研究所及びカリフォルニア大学バークレー校のパールムッター (Saul Perlmutter) とオーストラリア国立大学のシュミット (Brian P. Schmidt)、ジョンズ・ホプキンス大学のリース (Adam G. Riess) の3名に与えられた。

宇宙の膨張が加速していることが、なぜノーベル賞に値するのだろうか。まずは、歴史を紐解いてみよう。

### 膨張する宇宙の発見

1910年代、20年代こそ、宇宙論研究にとって大きな契機となった時期である。1910年代には、二つの大きな発見があった。リーヴィットによる変光星を用いた宇宙での距離の測定方法の発見と、スライファーによる赤方偏移の発見である。

前者は、小マゼラン星雲にある多数の変光星を測定することで発見された。リーヴィットが見出

したのは、暗い変光星は変光の周期が短く、明るい変光星は長いことであった。宇宙では、遠方の天体は見かけが暗くなる。一般には、天体が暗くても、その天体が放つ光そのものが暗いのか、それとも遠方にあるのか、区別することは困難だ。しかし、リーヴィットが観測したのは、小マゼラン星雲にある、すなわち、すべて同じ距離にある変光星であった。つまり、彼女の観測結果は、変光星の周期とその本当の明るさにより相関があることを示しているのである。いったんその関係がわかれば、同じ種類の変光星が別な星雲にあっても、その変光の周期を測ることで、本当の明るさが見かけの明るさは、距離の2乗に反比例して暗くなる。そこで、見かけの明るさを測定して、周期から得られる本当の明るさと比較すれば、その星雲までの距離が決定できるのだ。

厳密に言えば、この方法で得られる天体までの距離は、小マゼラン星雲までの距離との比になる。そのため、小マゼラン星雲までの距離は別な方法、例えば星の明るさと色の関係を用いて決定する必

### ◆ も く じ ◆

サイエンスプラザ

2011年ノーベル物理学賞 ..... 1  
準結晶 ..... 7

トビックス  
小惑星探査機「はやぶさ」により明らかになった  
小惑星イトカワの正体 ..... 12

高校物理実験の実態と基本実験講習会 ..... 16

高校生へ私が選んだ1冊の本  
生命の未来を変えた男  
山中伸弥・iPS細胞革命 ..... 20

要はある。この発見によって、人類は史上初めて、天の川銀河（銀河系）を越えた遠方の天体までの距離を測定できるようになったのである。

スライファーは、分光という観測手法を天文学に持ち込み、星の出す固有のスペクトル線のズレを測定することで、当時「渦巻星雲」として知られていたもののほとんどすべてで、スペクトル線が赤い方向にずれていること、すなわち赤方偏移を起こしていることを発見した。このことは、光のドップラー効果によって説明がつき、渦巻星雲が、我々から遠ざかっていることを意味している。この遠ざかる速度のことを後退速度と呼ぶ。

以上の2つの観測を結び合わせて、ハッブルが宇宙の膨張を発見したのが1929年のことである。ハッブルは、リーヴィットの方法で求めた距離と、スライファーの方法で求めた後退速度の間の関係を多くの星雲について調べ、距離と速度が比例していることを発見したのだ。このことは、宇宙の空間が場所によらず一様に広がっていると考えたと説明がつく。例えば、空間が2倍になるということは、全ての天体の間の距離が2倍に広がることを意味する。Dという距離にあった天体は2Dに遠ざかる。このとき、2倍になるのにかかった時間をTとすると、 $(2D - D)/T = D/T$ が遠ざかる速度である。これは確かに距離に比例している。この遠ざかる速度が距離に比例しているという関係をハッブルの法則と呼ぶ。なお、最近、ルメートルというベルギー人の神父・天文学者が、ハッブルに先んじてフランス語で書いた論文の中に宇宙の膨張の発見を記していることが広く知られるようになり、一部で話題を呼んでいる。

膨張する宇宙を説明する理論もまた、この頃に作り上げられた。アインシュタインが一般相対性理論を完成させたのが1915年のことである。一般相対性理論は、空間や時間が重力によって決定されるという理論だ。この理論を宇宙に最初に適用したのは、アインシュタインその人であった。アインシュタインが見出したのは、重力は引力としてしか働かないので、重力によって宇宙の空間はつねに収縮する方向に力を受ける、ということ

であった。このことは、しかし、宇宙の空間は静止していると考えていたアインシュタインにとっては受け入れがたい結論であった。静止している初期条件を与えても、すぐさま空間は縮んでいってしまうのだ。そこで、アインシュタインは、なんと大胆にも空間の収縮を打ち消す「反重力項」を方程式に導入する。宇宙項である。

その後、フリードマン、さらにはルメートルという研究者が、より一般的な、空間が膨張収縮する宇宙モデルを提案した。例えば膨張で始まった宇宙であれば、宇宙項などなくても、重力の働きでその速度を徐々に遅めながら膨張を続けることが可能である。ハッブルの観測がまさに膨張を証明したことから、もはや宇宙項の存在が無用となったことを悟ったアインシュタインは、宇宙項の導入を「生涯最大の失敗」と悔いたと伝えられている。

### 超新星による膨張の加速の発見

以上述べてきたように、通常の反重力項のない理論では、宇宙の膨張は、重力の働きによって遅くなっていくことが予想される。膨張が遅くなっていることを調べるには、過去の宇宙での膨張速度を測ってやればよい。それが現在よりも速ければ、減速していることになる。

宇宙では幸いに、過去の膨張速度を測定することが可能だ。遠方の天体の膨張速度を測定してやればよいのである。遠方の天体の光は到達するのに時間がかかる。現在見えている天体の姿は、光が到達に必要な時間分だけ過去の姿なのだ。そこで問題となるのが、減光である。過去、つまり遠方の天体なので、非常に暗くなり、観測が難しい。例えばリーヴィットの変光星を使うことは不可能である。せいぜい5,000万光年の天体、つまり5,000万年前の膨張しか測定できないのだ。宇宙の年齢は137億歳であり、膨張が減速しているのを確認するためには、少なくとも70～80億光年かなたまで距離と速度の関係を求めてやる必要がある。

非常に遠方の天体の距離を決定する方法として

近年注目されてきたのが、Ia型超新星を用いる方法である。とてつもなく明るい天体現象である超新星は、重たい星の最終段階の大爆発現象である。超新星の光のスペクトルに水素の吸収線が含まれるものをII型、含まれないものをI型と分類する。I型のなかでもケイ素の吸収線が見られるものをIa型と呼ぶ。じつは、Ia型とII型は爆発の物理過程が大きく異なる。

II型は、質量が太陽の8~10倍以上ある星が、核融合の燃料を使い果たす際に、圧力と重力のバランスが崩れ、中心部が急激な重力収縮をするとともに外層部が吹き飛ばされることで起きると考えられている。中心には、中性子星か、または太陽の25倍以上あるような巨大な星の場合には、ブラックホールが残される。II型は、もとの恒星の質量に応じて爆発の規模が異なり、その明るさも違ったものになる。

一方、Ia型では、太陽のような軽い星が核融合を終えた後の白色矮星と、通常の恒星が連星を形成している場合に起きる。恒星から白色矮星にガスが降り積もっていき、そこでの重力が増加していく。やがて、白色矮星の持つ圧力によって支えることができる限界に到達し、重力による急激な収縮がおき、爆発するのだ(図1参照)。この限界のことをチャンドラセカール質量と呼ぶ。Ia型は、チャンドラセカール質量という物理的に決定される質量で爆発が特長づけられるために、爆発の規模がほぼ一定であると考えられる。つまり、超新星としての明るさが同じ、ということになる。

このようにIa型は、その明るさがほぼ一定であることから、宇宙での距離の測定に最適であると考えられる。見かけの明るさを測定すれば、減光の度合いから、そこまでの距離を決定できるのだ。ただし、そのためには、距離が分かっている銀河で起きた超新星について、その明るさを測定し、爆発時の真の明るさを知る必要がある。そこで、1990年代になって、詳細に検討したところ、大きな発見があった。じつはIa型はすべて同じ明るさ、というわけではなく、明るいものもあれば暗いものもあること、さらに、明るい超新星は、

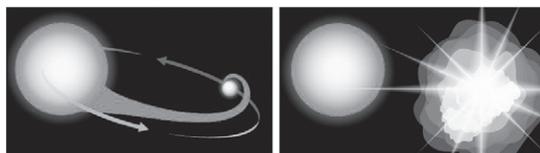


図1 Ia型超新星爆発

左図は、白色矮星と恒星の連星系。恒星からガスが白色矮星に降り積もっていく。太陽質量の1.4倍、チャンドラセカール限界に至ると、自身の重力を支えきれなくなり、超新星爆発を起こす(右図)。ノーベル賞委員会の一般向け情報より転載。

時間をかけてゆっくりと暗くなっていくが、暗い超新星はすぐに暗くなっていくことがわかったのである。この発見によって、Ia型超新星による距離の決定精度が格段に高まった。また、Ia型超新星はとても明るく、すばるなどの大型望遠鏡を用いれば、100億光年かなたであっても観測可能である。Ia型超新星を用いて、数十億光年から100億光年かなたの銀河までの距離を決定し、赤方偏移による膨張速度と比較することで、過去の宇宙の膨張速度を測定することが可能となったのである。

これらの発展を受けて、1990年代に、2つのグループがIa超新星の集中的な探査を行った。パールムッターが率いた超新星宇宙論プロジェクトと、シュミットが率いた高赤方偏移超新星探査チームである。前者ははやくも1988年に計画をスタートさせた。そこで、超新星オンデマンドというシステムを構築した。超新星は、一つの銀河では100年に一回程度しか起きない希な現象である。これをつかまえるためには、とにかくたくさん銀河をモニターし続ける必要がある。そこで口径4mの中型望遠鏡に広視野カメラを取り付け、一つ一つの領域を3週間ほどの間隔を開けて定期的に撮影し、前回は写っていなかった星を見つけ出すことで超新星候補を選び出す。いったん超新星の候補が見つかる、10m級の大型望遠鏡のどれかを利用してその分光観測を行い、Ia型であることの確認を行い、赤方偏移も決定する。あらかじめ超新星は見つかることがほぼ確実であることから、天体を指定せずに大型望遠鏡の観測時間を予約することが可能となる。そのため、ユー

ザの要求（天体の指定）があった時にサービスを提供する方式、つまりオンデマンドというわけである。このシステムにより遠方の超新星が発見されるようになった。90年代中頃には、距離決定の精度も高まってきたこともあり、超新星の専門家をそろえた高赤方偏移超新星探査チームも観測を始め、90年代後半には熾烈なレースを繰り広げることとなる。

当初は、どちらのチームも、宇宙の膨張が減速していることを確認し、その度合いを測定することを目的に観測を進めていた。まず、先行していた超新星宇宙論プロジェクトが97年に、7つの遠方の超新星を用いた結果として、確かに、宇宙が減速しているとの報告を行った。続いて、98年に、高赤方偏移超新星探査チームが16個の超新星を用いて、驚くべき事に宇宙が加速している証拠を見つけた、との論文を出版した。この論文で、データの解析を主として行ったのがリースである。その後すぐに、超新星宇宙論プロジェクトも42個の超新星を用いて、宇宙膨張の加速を疑う余地なく示す結果を発表している。

図2が超新星宇宙論プロジェクトの42個の超新星のデータである。横軸が赤方偏移、縦軸が超新星のみかけの明るさと真の明るさから求めた距離だ。この関係が直線になるのが、ハッブルの法則である。宇宙膨張が減速していれば、過去の膨張が現在よりも速いことになる。このグラフでいえば、同じ距離にある天体が、単純なハッブルの法則に比べて、より大きな速度、つまり横軸でより右側に移動するはずである。グラフの形が、より「寝た」ものになることが期待される。一方、加速している場合であれば、過去の膨張は現在よりも遅く、同じ距離の天体が、より小さな速度を持つことになる。グラフが「立つ」ことになるのだ。観測データは、遠方、すなわち過去の宇宙では、直線よりも立っていることを示している。宇宙膨張は加速しているのだ。

現在では、超新星の数も約500個に増え、また、90億光年彼方の超新星までとらえることに成功している。その結果は、現在の宇宙の加速を示す

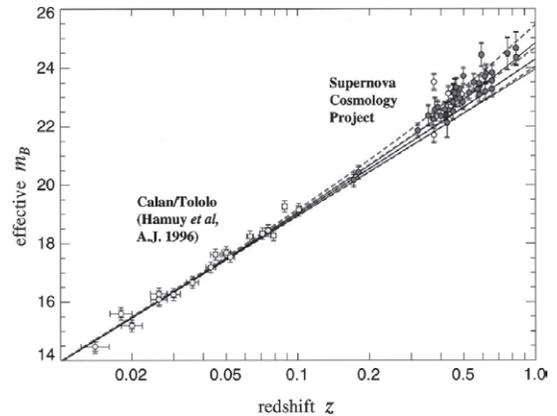


図2 超新星宇宙論プロジェクトチームによる42個の遠方超新星データ

18個の近くで起きた超新星のデータも同時にのせてある。横軸は後退速度を表す赤方偏移、縦軸は等級。点線と実線が、宇宙項や物質の量を変えた場合の理論曲線。実線のうち一番上にきているものが、ハッブルの法則、つまり等速膨張をする場合になっている。統計的にデータがこの実線よりも立っている（上にきている）ことから、宇宙の加速膨張が示された (Perlmutter et al., *Astrophysical Journal* 517 (1999), 565より転載)。

ものであり、また、宇宙は誕生後およそ70億年までは減速をしていて、そこで加速に転じたこともわかってきた。

## ダークエネルギー

重力の働きは、膨張を減速させる一方であった。加速する宇宙、というのは、衝撃をもって迎えられた。何らかの反重力項が宇宙に存在していることを示唆するからである。

当初は予想通り減速していた宇宙が加速に転じた理由を最も自然に説明するのが、アインシュタインの宇宙項だ。宇宙項は宇宙全体に漂っており、空間が広がっても薄まることがない。一方、通常重力を及ぼす物質は、空間が広がるにつれて薄まり、重力も弱くなる。つまり、宇宙初期では、物質のつくる重力が宇宙の膨張を決定づけていたために、膨張が減速していたのに、やがて、空間が拡大するとともに、宇宙項の働きが勝り、膨張が加速に転じた、と考えることができるのである。

空間が広がっても、斥力としての強さが変わらないのが宇宙項である。しかし、膨張を加速させるために必要なのは、少しぐらい薄まっても、物

質よりも薄まり方がゆっくりであればよいこともわかっている。また、逆に、極端な場合として、膨張とともに、増えていくようなものも考えることができる。このような、宇宙項を含み、さまざまな可能性も考慮した、宇宙膨張を加速させる働きを持つものを、ダークエネルギーと呼ぶ。「エネルギー」というのは、空間を拡げる仕事をするためのエネルギーが真空から供給されていることから名付けられた。

ダークエネルギーがどのように空間の膨張とともに振る舞うのか、果たして宇宙項そのものなのか、といった疑問に答えるためには、さらに正確に宇宙膨張の時間進化を測定する必要がある。超新星を用いた方法を推し進めることはもとより、銀河の分布を用いた方法なども検討されている。銀河の群がり具合は、自分自身の重力による集団化と、それを妨げる空間膨張とのせめぎ合いで決まる。膨張が加速されると、集団化を妨げる方向

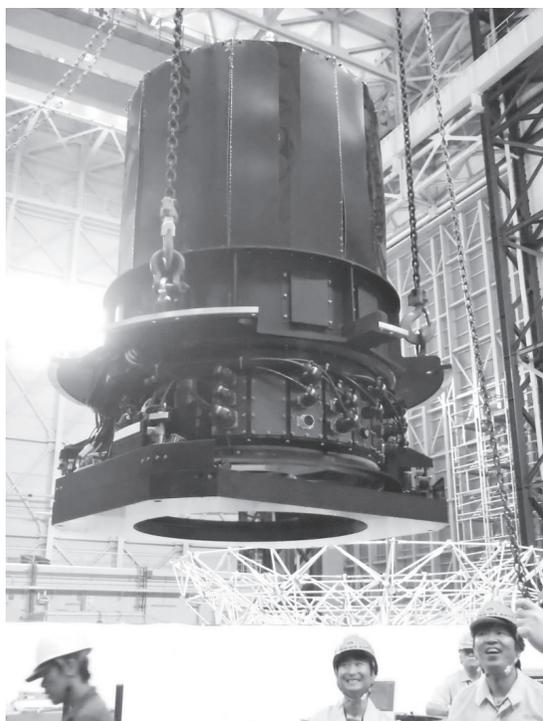


図3 すばる望遠鏡に取り付けられる超広視野カメラ HSC

このカメラで、空の広い範囲を一度に撮影することで、莫大な数の銀河の像を得ることが可能となる。その像の歪みを求めて、ダークエネルギーの構造形成に対する影響を調べる(国立天文台提供)。

に働く。つまり銀河の分布の集団化の時間進化を調べればダークエネルギーの進化がわかるのである。じつは、銀河を見るだけでは十分でない。銀河の重力を形作っているのは、目に見えないダークマター(暗黒物質)だからだ。ダークマターを直接測定するために、例えば重力レンズ効果を用いる。ダークマターのつくる構造が生み出す重力が、空間を曲げることによってレンズとして働き、それよりも遠方の銀河の像を歪ませるといった効果である。大望遠鏡で、遠方の銀河の像を大量に撮影し、その像の歪みを統計的に検証することで、間にあるダークマターの分布がわかるのだ。そこで、現在、すばる望遠鏡に新たな超広視野カメラを取り付ける計画が進んでいる(図3)。2012年3月までには、設置を完了し、5年ほどをかけてデータを取っていく予定である。ダークエネルギーの詳しい性質がこれによって明らかになり、正体に迫ることができるかもしれない。ご期待いただきたい。

## ダークエネルギーと宇宙の運命

ダークエネルギーは空間が広がってもあまり薄まっていかない。そのため、現在の宇宙、そしてさらに未来の宇宙で重要な役割を果たす。実際に、宇宙の運命を決定づける働きをする。例えばダークエネルギーが宇宙項であったとしよう。すると、宇宙の膨張は指数関数で表されるものとなり、宇宙は膨張速度を速めながら永遠に膨張を続けることとなる。この場合には、遠方の銀河は急激に暗くなり、また赤方偏移で赤くなり、可視光では観測できなくなっていく。ついには、宇宙はほとんど空っぽになり、我々から観測できる銀河系の外の天体の数はごくわずかなものになってしまう。現在局所銀河群と呼んでいるアンドロメダ銀河を含む30個ほどの銀河の集団のみが残されるだろう。

さらに、100兆年もたつと星が死に絶える。恒星は軽いものほど寿命が長いですが、核融合できる最も軽い恒星の年齢がおよそ100兆年であり、その頃には、新たな星をつくる材料の水素ガスもほと

んど枯渇しているものと考えられる。

元素もいつの日にか、崩壊すると予想されている。小柴先生にノーベル賞をもたらしたカミオカンデ実験は、もともと陽子の寿命を測定する目的で作られた。理論的には、陽子といえどもいつかは、壊れると考えられるからである。ただし陽子の寿命は途方もなく長い。それでも大量の陽子があれば、壊れる確率を高めることができる。そこで、大量の陽子を、純水として用意し、崩壊を待ったのがカミオカンデ実験なのだ。残念ながら、カミオカンデ実験、さらにはそのバージョンアップ版であるスーパーカミオカンデ実験でもまだ崩壊の兆候は見つかっていない。現在のところ、陽子の寿命は $10^{34}$ 年よりは長いことがわかっている。それでも悠久の時間の間には、いつかは崩壊すると考えられている。白色矮星や中性子星といった恒星のなれの果ても、いつかは消えてなくなってしまうのである。

ではブラックホールはどうだろうか。ブラックホールも、ホーキングの説によれば、吸い込む物質がなくなると、周りの空間に粒子を放出しながら蒸発していく。これにも、とてつもなく長い時間がかかる。質量にもよるが、太陽の数倍程度の質量のブラックホールであれば、完全に蒸発するまでに $10^{70}$ 年ほどが必要となる。いずれにせよ、ブラックホールでさえ、消えてしまうのだ。

結局、宇宙項がダークエネルギーの正体であった場合には、空っぽの宇宙がいつまでも存在する、という運命が予想される。

一方、ダークエネルギーが増加していく場合はどうだろうか。このときは、有限時間内に、宇宙という風船が破裂する。つまり、ありとあらゆる天体間の距離が無限大になってしまうのだ。通常は宇宙膨張による力など感じない銀河系や太陽系などもバラバラになり、さらには、宇宙を引っ張る力は、分子間力や核力にも打ち勝ち、すべてのものをバラバラにしてしまう。このような劇的な宇宙の終わりをビッグリップと呼ぶ。

ひょっとするとダークエネルギーは、将来、熱にかわるなりして、消えてしまうかもしれない。

その場合には、膨張は加速から、再び減速に転じる。その後、宇宙がつぶれてしまうのか、それとも永遠に膨張を続けるのかは、今はわからない。じつは、我々研究者は、宇宙のほんの始まりの時期に存在していた（現在のものとは別の）ダークエネルギーが熱に変わったことによって、ビッグバンが引き起こされたと考えている。このときのダークエネルギーが導いた指数関数的膨張こそ、インフレーションと呼ばれる初期宇宙の大膨張である。インフレーションを起こし、熱化して消えることでビッグバン宇宙を誕生させた立役者こそ、ダークエネルギーなのだ。ただし、今のダークエネルギーは、その時のものに比べて100桁もエネルギーが低い。そのため、たとえ消えてしまっても、大した熱は生むことはなさそうである。遠赤外線ではやっと宇宙全体が輝いて終わりになるだろう。

ダークエネルギーを知ることは、現在の宇宙ばかりか、未来の宇宙までも知ることにつながるのである。

宇宙膨張が加速していることの発見は、宇宙の膨張を支配し、運命をもコントロールするダークエネルギーの存在を強く示唆するものであった。ノーベル賞にふさわしい業績である。