

過去の超新星を使って宇宙の膨張を測る

ティコ・ブラーエの超新星とそのエコーの観測

今から約12,000年前、私たちの銀河系のなかで星が一つ、大爆発を起こした。そのとき発せられた光は西暦1572年11月に地球に届いた。この新たな星は金星ほどに輝いた「客星」として、まず韓国そして中国で記録された。約1週間後、デンマークの天文学者ティコ・ブラーエが、この星をカシオペア座に発見した。望遠鏡のない肉眼観測時代の最大の天文学者と呼ばれ、正確に星の位置を記憶する能力に長けていたティコは、それが明るさや色に変化している新しい星「新星」であることにすぐに気づき、見えなくなる1574年3月まで明るさと色の変化を記録し続けた。「宇宙は変わることはない」とするアリストテレス以来の宇宙観の変革を迫る画期的なできごとであった。

その後、望遠鏡が発明され、1609年にはガリレオによって望遠鏡を使った天体観測が行なわれた。近年では技術の進歩によって、可視光以外の波長（電波、赤外線、X線、ガンマ線）でも天体を観測できるようになった。短期だが明るく輝く「新星」は銀河系外の遠方の銀河にも発見され、1934年、カリフォルニア工科大のバーデとツヴィキーは、遠方の特別に明るい「新星」を「超新星」と命名した。ティコの観測した星の位置には超新星の残骸が発見されて「ティコの超新星残骸」と呼ばれるようになり、特にX線や赤外線による観測などで、残骸中の元素の組成が調べられてきた（図1）。しかし、1572年の超新星の光そのものは、望遠鏡で観測する術はなく、その超新星の詳しい性質

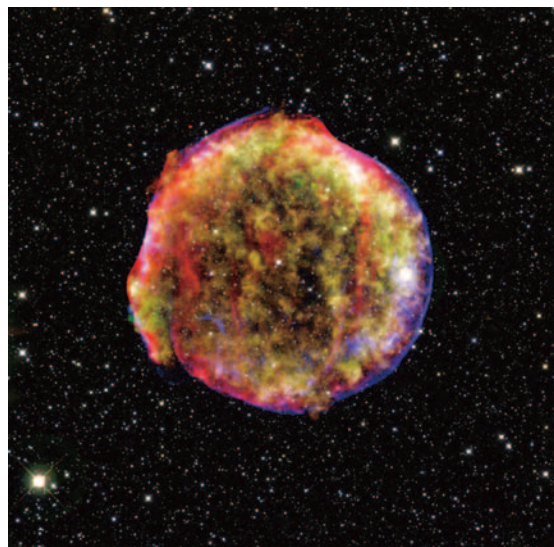


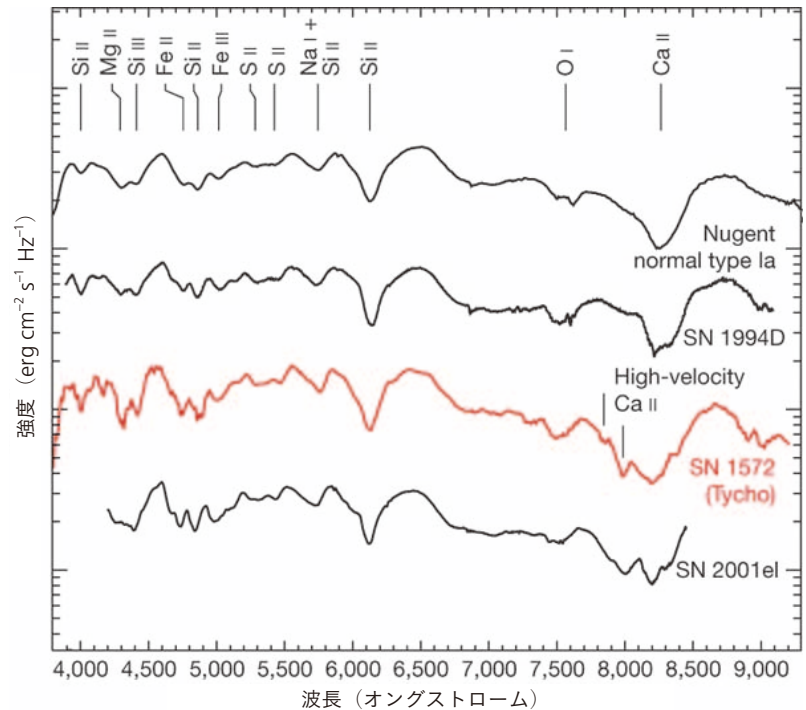
図1 ティコの超新星の残骸
（マックスプランク天文学研究所提供）。

もわかりようがなかった。

ところが、436年たった2008年になって、ティコの超新星の正体を教えてくれるメッセージが宇宙から届けられた。運んできたのは「光のエコー」である。「光のエコー」とは、光源から出た光が、離れた場所にある星間雲に含まれるチリによって反射され、遅れて地球にやってくる現象をいう。遅れてやってきた光が運んでくるのは、ティコの超新星の爆発当時の過去の情報である。「光のエコー」は、いわば、過去を再現するビデオテープのようなものである。

光が次々とより遠くの物質に反射してやってくると、あたかも光が移動しているように見えることになる。この光の移動をスペインにあるカラアルト天文台

図2 ティコの超新星 (SN 1572) のエコーのスペクトル (赤線) と、いくつかのIa型超新星のスペクトル (黒線) との比較 (Krause et al. 2008 Nature 456, 617)。



での観測で確認し、2008年9月、国立天文台、数物連携宇宙研究機構 (IPMU)、マックスプランク天文学研究所の観測グループによって、すばる望遠鏡が向けられた。そして「光のエコー」を観測し、436年前には肉眼で見るしかなかった光を分光することに成功したのである。ティコ・ブラーエの目が見たのと同じ光が、遠回りして今到達し、強力な現代の望遠鏡によって、初めて分光観測できたということは、素晴らしいというしかない。

得られたスペクトル (図2の赤線) を、これまでの超新星のスペクトル (図2の黒線) と比べた結果、Ia型と分類される超新星のものと見事に一致した。スペクトルの谷間を作っている吸収線は、鉄、シリコン、マグネシウム、酸素などの元素のものと特定され、この超新星爆発がこれらの元素を大量に生成・放出したことが分かる。(ただし、宇宙に大量に存在しているはずの水素の吸収線が見えない。) さらに、Ia型超新星は銀河系内のものでも、数千万光年というはるか遠方のものでも、どれも極めてよく似ていることが確認

できる。

では、Ia型超新星とはどのような星が爆発したものなのか。私がIa型超新星の研究に携わり始めた1980年代の初めの頃は、図2のスペクトルがどの元素で作られているかも理解できていなかった。とにかく、水素は存在しない星の爆発なので、普通でない進化を遂げた星のはずである。太陽の2倍ほどの質量を持ったヘリウム星と白色矮星とが2大候補だった。白色矮星モデルが確立してきたのは、その後の観測と理論の進展による。

白色矮星とは

太陽のような恒星は、その中心で水素を燃やしてヘリウムを生成することで輝いている。中心付近の水素が燃え尽きてしまうと、外側のガスが金星軌道ほどまでふくれて赤色巨星になる。星の中心では、今度はヘリウムが燃えて炭素や酸素が生成され、やがてヘリウムが燃え尽きると、星の外側のガスはさらに地球軌道

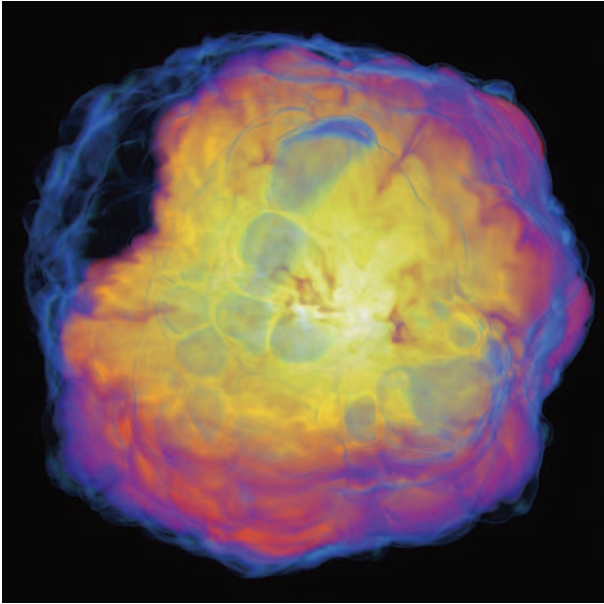


図3 白色矮星の爆発の3Dシミュレーション。カラーは内部で合成された鉄などの重元素を示す。(W. Hillebrandt 提供)

くらいまでふくらむ。最終的に、外側の層がはがれて惑星状星雲とよばれる星雲が形成される。中心に残された炭素と酸素からなる芯は、高温で地球ほどの大きさしかないことから、白色矮星と呼ばれる。

白色矮星は普通の星とは異なっている。普通の恒星は、ガスが熱運動し広がろうとする圧力によって、自らの重みで縮もうとする重力に対抗している。それに対して白色矮星は、電子が量子力学的な現象である縮退をすることによって重力に対抗している。パウリの排他律によると、ある特定のエネルギーとスピンの量子状態になれる電子は一つだけである。縮退した電子は低いエネルギー状態がほかの電子によって占められてしまうと、どんどん高いエネルギー状態にならざるを得なくなり、これによって重力に対抗する圧力（縮退圧）が生じるのである。

白色矮星は小さな星で、典型的な質量は太陽と同じくらいのものからその半分程度、半径は太陽の100分の1程度で地球とほぼ同じ大きさである。密度は非常に高く、角砂糖ほどの大きさでも重さが1トンもある。電子の縮退圧で重力とバランスをとっているが、

縮退圧で支えられる質量には「速度は光速を越えられない」という特殊相対性理論からくる「チャンドラセカールの限界質量」という上限がある。星の質量が限界質量に近づくと、中心密度が無限大に近づく。このことがIa型超新星の性質に重要な意味をもっている。

白色矮星の核爆発

白色矮星が単独で存在している場合、それはただ冷えていくだけである。しかし、白色矮星がほかの星と連星系を形成している場合は、その運命に大きな違いが生じる。連星系のなかには周期が一年程度かそれ以下というものがある。これだけ二つの星が接近していると、白色矮星の相手の星が進化し膨張したさい、そのガスが白色矮星の上に降り積もり、白色矮星の質量が増え、チャンドラセカールの限界質量に近づいていく。

チャンドラセカールの限界質量にぎりぎり近づくと中心密度が高くなり、炭素どうしが融合する核融合反応が始まる。狭いところに酸素と炭素が押し詰められている白色矮星は、ある意味で固体燃料の固まりみた

図4 Ia型超新星 SN 1994D (左下) (NASA提供)。



いなものなので、いったん火がつくと爆発的に反応が進行し、まさに炭素爆弾となる。そのシミュレーションの一例を図3に示す。

火がついた中心部分の温度は50億度から100億度になくなり、ほとんどの炭素と酸素がニッケル56になる。このとき、中心以外の部分は冷たいままで1000万度くらいしかない。火の玉のような中心部分から上がった熱いニッケル56の泡が、まだ冷たいまわりの炭素を多く含む領域に触れると、そこでも炭素が爆発的に燃え、さらにそれが次の領域に伝わる。こうして、炭素が燃える波面が泡のような形を伴って、一気に星全体に広がっていく。ある条件下では、泡から衝撃波が発生して爆轟波となり、非等方な爆発を起こす。

中心で作られたニッケル56は放射性元素で不安定なため、半減期約1週間でコバルト56に崩壊し、それがさらに半減期78日で安定な鉄56に崩壊する。崩壊するときに放出される γ 線は非常にエネルギーが高く、飛び散っていく周りのガスを励起して、光り輝かせる。したがって、超新星がどれだけ明るくなるかは、放射性元素のニッケル56がどれだけ生成されたかに

よって決まる。超新星の観測とは、宇宙で「鉄」が形成されつつある、正にその現場を目撃していることに他ならない。白色矮星は、その質量がチャンドラセカールの限界質量に近くなると爆発を起こすので、生成されるニッケル56の質量も太陽質量の約0.6倍とほぼ決まっている。そのため、超新星の明るさがほぼ一定になるのである。

Ia型超新星の明るさと宇宙膨張の加速・減速

Ia型超新星は100億～1000億個の星からなる銀河全体に匹敵する明るさで輝くために、100億光年彼方のものも観測できる。そして、図2のスペクトルがほとんど同一のように、どれもほとんど同じ絶対的な明るさを示している(図4)。そのため、超新星の出現した銀河までの距離を測る良い「標準光源」として使われ、宇宙がダークエネルギーによって加速膨張していることを直接的に示す上で、非常に役に立った。

では実際に、宇宙膨張の加速はどのように見出されたのだろうか。図5の線は、宇宙の大きさを表す銀

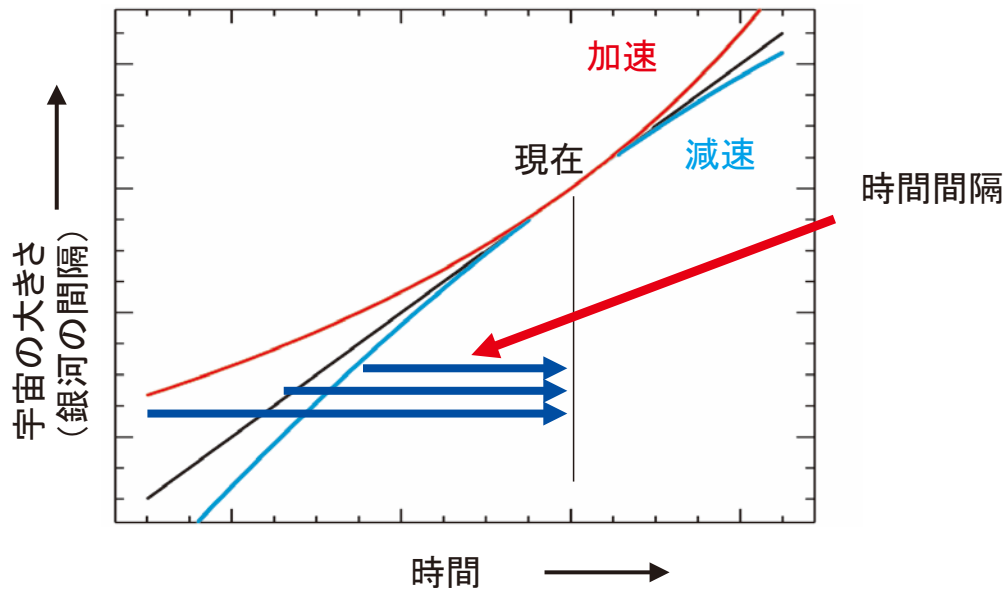


図5 膨張する宇宙のサイズと時間の関係。宇宙膨張が加速（赤線）あるいは減速（青線）される場合と、加速も減速もない場合（黒線）との比較。

河間の間隔（縦軸）が時間（横軸）が経つにつれて広がって、宇宙が膨張していく様子を模式的に示している。この線の傾きが膨張速度を示しているのも、もし宇宙膨張が加速していると赤線、減速していると青線のようなカーブを描くことになる。

また、この図5で、過去に放射された光の波長は、銀河間隔の広がりとともに長く（赤く）なり、現在の時点で、 z だけ赤方偏移して観測されることになる。したがって、縦軸で、過去の宇宙が現在よりどれだけ小さかったかという大きさの比が、 $1/(1+z)$ に相当することになる。

そこで、もし宇宙膨張が加速していると、初期のころは現在より遅かった膨張のスピードが、だんだんと加速された結果、現在のスピードに到達したことになる。この場合、宇宙の大きさが、例えば現在の半分ころ（すなわち赤方偏移 ~ 1 ）の時代の天体からの光が届くのにかかる時間は、加速がない場合より長くなる。これは宇宙の年齢がより古いことを意味する。したがって、加速がない宇宙と比べると超新星はより遠

くにあることになり、本来の明るさが同じでも暗く見える。

それに対して、宇宙膨張が減速している場合は話が逆になる。初期のころは膨張のスピードが現在より速かったので、同じ赤方偏移をもった超新星までの距離が、減速がない宇宙と比べると近いことになり、超新星の見かけの明るさが明るくなる。

ダークエネルギー

図6の縦軸の「明るさのずれ」は、ある赤方偏移で観測された超新星が、加速も減速もない宇宙に出現した場合と比べて、暗ければ点は上にいき、明るければ下にくることを示す。この図にプロットされた超新星の明るさは、多数の観測データの平均値であるが、赤方偏移が0.5あたりでは、空っぽの宇宙よりも暗いと有意に主張することができる。

一方、赤方偏移が1.7あたりでは、超新星は明るく見えている。このことから、遠い過去においては宇宙

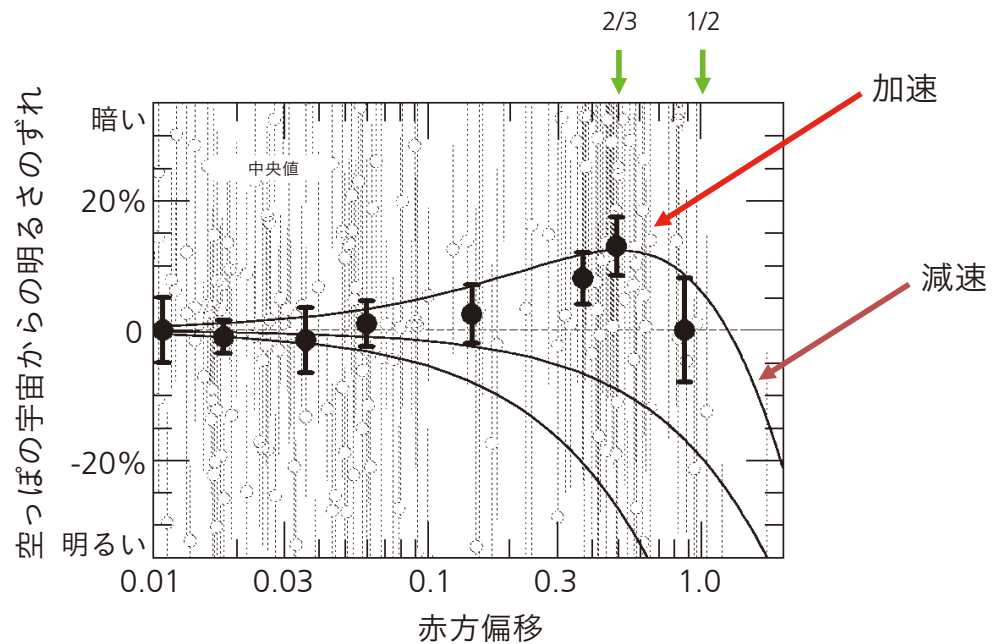


図6 赤方偏移の大きい遠方の超新星の明るさ。加速も減速もない空っぽの宇宙の場合の明るさとのずれ(Tonry et al. 2003 ApJ 594, 1)。

の膨張は減速していたが、宇宙が大きくなるにつれて、60億年ほど前から、膨張が加速に転じたという結論が得られる。

宇宙膨張が減速するのは、宇宙に含まれる物質が重力を及ぼす効果として理解できる。それが加速に転じたのは、「斥力」を及ぼす「反重力」源の効果が重力の効果を上まわったためである。この斥力を及ぼすものの正体は不明なため、「ダークエネルギー」と呼ばれている。宇宙背景放射の観測など、ほかの観測結果と組み合わせると、現在の宇宙を構成するのは、約73%のダーク（暗黒）エネルギー、約23%のダークマター（暗黒物質）、そして、わずか4%のふつうの物質ということになる。じつに宇宙の96%がダークである（図7）。

このダークエネルギーの正体は何か、どんな状態方程式をもっているのか、アインシュタインの導入した定数なのかどうかは、物理学の根幹に関わる疑問である。この疑問に答えるためには、さらに詳細な観測と理論研究によって「精密宇宙論」を構築する必要がある。

る。すなわち、さらに遠方の超新星を多数観測することによって、Ia型超新星の性質が出現する銀河の種類や赤方偏移によって系統的に変わっていないかなどの点を調べて、系統誤差をもっと小さく

する必要がある。次世代の天文観測衛星、宇宙望遠鏡と地上の巨大望遠鏡をうまく組み合わせることで、精度のよい観測を積み上げていく必要がある。

IPMUでは、こうした観測研究と、理論的研究すなわちIa型超新星を生み出した連星系をつきとめ、その母銀河のタイプとの関係を明らかにし、爆発の異方性の効果や爆発による元素合成などをシミュレーションによって調べていくなどの研究とを組み合わせ、「精密宇宙論」の構築に向けて、Ia型超新星の正体に迫ろうとしている。

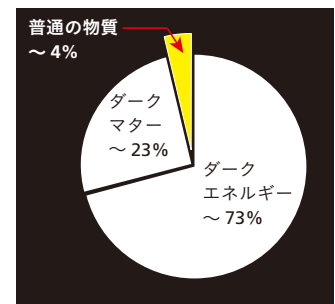


図7 宇宙の組成。