宇宙物理学

超新星は 2 つの顔をもつ

The supernova has two faces

Daniel Kasen 2010 年 7 月 1 日号 Vol. 466 (37–38)

星の死に方は、これまで考えられていたよりも種類が少ないことがわかった。
以前は異なるタイプと考えられていた 2 種類の超新星は、
新たな観測データと既存の観測データの分析から、
実際には 1 つのいびつなコインの裏表だったことがわかった。

一部の星は 10 億年あるいはそれ以上生きたのち、超新星爆発を起こしてわずか数秒間でばらばらになる。我々が目にするのは、最後のすさまじい一瞬ではなく、その直後のようすだ。つまり、星の破片が作る光輝く雲であり、これは秒速 1 万キロメートルを超える速度で吐き出され、観測可能な宇宙の果てまでの半分を超える距離にあっても、我々はそれを見ることができる。東京大学数物連携宇宙研究機構（IPMU）特任助教の前田啓一（まえだけいいち）らは、今回、こうした超新星の残骸の分布を調べ、星の最後の瞬間が不均等で球対称ではないことを示し、*Nature* 2010 年 7 月 1 日号に報告した [1]。

前田らの研究は Ia 型超新星に関するものだ。Ia 型超新星は、高密度の炭素と酸素からなる白色矮星（わいせい）が核融合反応で起こす爆発と考えられており、伴星からの質量降着によって臨界質量に達する [2]。Ia 型超新星のピーク時の光度はほぼ一定しており（約 10^{36} ワット）、超新星の見かけの明るさを測定すれば、超新星までの距離を推定できる。宇宙論研究者は Ia 型超新星を利用して、宇宙の大きさやビッグバン以降の宇宙の拡大のようすを求めてきた。Ia 型超新星は、きちんと較正されれば約 10 パーセントの誤差で信頼できる距離指標として使える。しかし、宇宙論パラメーターの範囲を限定するには、さらに高い精度が欲しい。Ia 型超新星でそれができるかどうかについては、一部の宇宙物理学者は疑問視している。Ia 型超新星となる星は、銀河のさまざまな場所で生まれ、すさまじい嵐のような大爆発の中で死ぬ。そうした超新星がすべてよく似ていると考えることは可能なのだろうか。

実際のところ、すべてがよく似ているとはいえない。最近の観測から、Ia 型超新星にもさまざまなものがあることが明らかになった。宇宙物理学者にとっては興味深く、気になる研究結果だ。特に、一部の超新星は異常な高速で物質を放出する。これは、爆発から 1 週間ほど後のスペクトル線のドップラー偏移で測定されたものだ。これらの星の破片の外層は、典型的な超新星よりも 50 パーセントも速い速度で運動していた [3,4]。これらは Ia 型超新星のよりエネルギーの高い特殊型のように思える。こうした超新星は、低速で物質を放出する超新星よりも非常に明るいと思うかもしれないが、そういうわけではない。しかし、Ia 型超新星の光度に系統的な違いがあれば、その違いがたとえ小さくても、正確な距離指標としては役に立たなくなってしまう可能性がある。

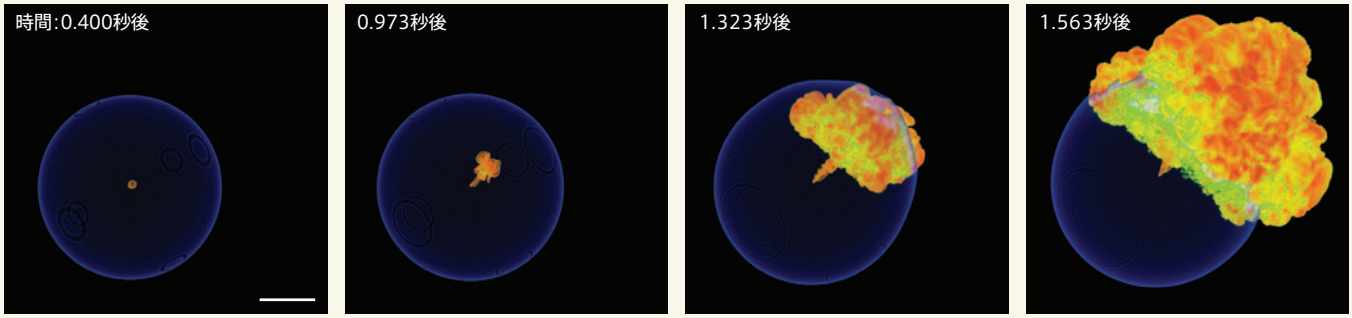
今回、前田らは、高速で物質を放出する超新星と低速で物質を放出する超新星の違いは、同じ超新星の 2 つの側面にすぎないと結論した [1]。前田らのデータは、超新星の爆発メカニズムは不均等であり、星の片側はもう片側よりも高速で吹き飛ばされるという仮説を支持している。Ia 型超新星が高速のタイプか低速のタイプであるかは、その 2 つの面のどちらがたまたま我々に向いていたかにすぎないというわけだ。

この描像は、白色矮星はどのようにして爆発するかを説明する特定の理論モデルと一致しているように思える。その理論モデルによると、爆発直前の白色矮星はゆっくりと燃焼しつつ、熱核反応の暴走を引き起こす臨界温度に少しずつ近づいていくと考えられる [5]。星の中心核の中では対流は双極子的になる。熱いガスの泡は流れによって少しずつ表面へ向かって上昇した後、星を半周し、再び中心部へ沈み込む [6,7]。爆発を点火する最初のスパークはこの上昇流の中に捕らえられており、核融合反応は星の中心からわずかに離れて始まる。

点火場所のこの小さなずれが不均等な爆発をもたらす。核融合反応が野火のように広がるとき、炎と灰は浮力によってキノコ雲のように上昇する [8–10]（図 1）。浮力を得た火の玉は星の表面に近づいたところで爆轟（ばくごう）を起こすかもしれない [11–13]。あるいは星から飛び出て表面のすぐ上で爆轟を起こすかもしれない [14]。どちらにしても、その結果は似ている。星の片側はもう片側よりも、より完全に燃焼して灰になり、より高速で放出される。

こうした不均等な爆発は、数年前から

©2010 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved



UNIV. CHICAGO FLASH CENTER

図 1. 不均等な超新星爆発。前田らの Ia 型超新星の観測結果の分析は、超新星爆発に不均等をもたらすメカニズムがあることを示唆している[1]。ここに示したシミュレーション結果によると、白色矮星は中心からわずかに離れた場所で最初に点火し、熱核反応の炎が白色矮星を消滅させ始める。燃えた物質は熱く、浮力があるので炎と灰はすばやく上昇する。その結果、星の片側はもう 1 つの側よりもより完全に燃え、より高速で放出される。スケールバーは 1000 キロメートル。

計算機シミュレーションで予測され始めていたが、それが現実世界で実際に起こっているのかどうか、確かめるのが難しかった。我々が観測する超新星は、少数の例外を除いて、その詳細を分解して観測するにはあまりにも遠く、地球からは構造のない光の点のように見えるからだ。超新星からの光は偏光していることが多く[15]、これは爆発が球対称ではないことを意味するが、破片の雲の正確な形状を推定するのは難しかった。

今回、前田らの研究チームの巧みな分析により、破片の雲の形状のあらましを知ることができた[1]。成功のカギは忍耐強さにあったようだ。天文学者たちはパパラッチと似ていて、ピークを過ぎた燃え尽きた星には急速に興味を失ってしまい、カメラの向きを変えて新しい現象を追いかけがちだ。しかし、今回の新しい研究結果は、超新星をその最盛期の数年後に追跡調査することで得られた。数年後の超新星の明るさは 100 分の 1 以下に衰え、既に破片は広がってその密度は低くなり、半透明になっていた。だから、星の灰の雲の中をのぞき込み、物質の完全な分布を測定することができた。年老いた超新星はもはやその第二の顔を隠すことができなかったのだ。

前田らは、超新星爆発のこの種のデータを新たな観測や既存の観測記録からたくさん集め、その結果、Ia 型超新星の本当の姿が見えてきた[1]。放出した物質の速度が高速だった超新星の場合は、破片の中でも高速なものが地球に向かって運動していたらしい。放出した物質の速度が低速にみえた超新星の場合はその逆だ。破片の中でも高速なものが地球から見て向こう側へ運動していたため、爆発初期には、それが破片の雲に隠れて地球から見えなかったらしい。違いは超新星の種類の違いではなく、観測する視点の違いだった。おそらく、これら超新星を地球から見たときの角度はランダムであるはずだ。観測から推定された非対称性は、中心からずれた爆発から予想される非対称性とおおむね一致しており、これは、理論モデルの優劣を決める手立てともなるかもしれない。

Ia 型超新星爆発にみられる多様性のすべてが、不均等な爆発で説明できるわけではない。少数の超新星の特色はこの描像では簡単には説明できない。それを説明するには、全く異なる爆発プロセスが必要になるかもしれないし、通常とは異なる星が元になっているのかもしれない[16]。しかし、少なくとも現在、超新星によくみられる違いの多くは、非対称性のためであることを観測も理論も示唆している[17]。超新星は地球から見てランダムな方向を向いているので、この効果が超新星の輝度にもたらすずれは、系統的ではなく、統計的なもののはずだ。これは宇宙論研究者にとってうれしいニュースだ。たくさんの超新星を観測しさえすれば、さまざまな角度からまんべんなく観測したことになる。つまり、拡大する宇宙を測る私たちの物差しは、超新星がさまざまな顔をもっていることによって狂うことはない、ということだ。■

（翻訳：新庄直樹）

Daniel Kasen、カリフォルニア大学バークレー校物理学科およびローレンスバークレー国立研究所原子核科学研究部門（米国）。

1. Maeda, K. *et al. Nature* **466**, 82–85 (2010).
2. Hoyle, F. & Fowler, W. A. *Astrophys. J.* **132**, 565–590 (1960).
3. Branch, D., Drucker, W. & Jeffery, D. J. *Astrophys. J.* **330**, L117–L118 (1988).
4. Benetti, S. *et al. Astrophys. J.* **623**, 1011–1016 (2005).
5. Höflich, P. & Stein, J. *Astrophys. J.* **568**, 779–790 (2002).
6. Kuhlen, M., Woosley, S. E. & Glatzmaier, G. A. *Astrophys. J.* **640**, 407–416 (2006).
7. Zingale, M. *et al. Astrophys. J.* **704**, 196–210 (2009).
8. Niemeyer, J. C., Hillebrandt, W. & Woosley, S. E. *Astrophys. J.* **471**, 903–914 (1996).
9. Livne, E., Asida, S. M. & Höflich, P. *Astrophys. J.* **632**, 443–449 (2005).
10. Jordan, G. C. iV *et al. Astrophys. J.* **681**, 1448–1457 (2008).
11. Khokhlov, A. M. *Astron. Astrophys.* **245**, 114–128 (1991).
12. Livne, E. *Astrophys. J.* **527**, L97–L100 (1999).
13. Hillebrandt, W., Sim, S. A. & Röpke, F. K. *Astron. Astrophys.* **465**, L17–L20 (2007).
14. Plewa, T., Calder, A. C. & Lamb, D. Q. *Astrophys. J.* **612**, L37–L40 (2004).
15. Wang, L. & Wheeler, J. C. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **46**, 433–474 (2008).
16. Howell, D. A. *et al. Nature* **443**, 308–311 (2006).
17. Kasen, D., Röpke, F. K. & Woosley, S. E. *Nature* **460**, 869–872 (2009).

©2010 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved