

超新星ニュートリノ、重力波で探る 星の大往生と宇宙の初期

ニュートリノ天文学の幕開け

1987年2月23日に、私たちの住む天の川銀河の伴銀河、大マゼランに超新星SN1987Aが発見されました。この光学観測による発見より3時間以上前の午後4時35分（日本標準時）に、小柴昌俊先生がリーダーを務めるカミオカンデは、SN1987Aから放出されたニュートリノをとらえることに成功していました。従来、天文学は光や電波などで観測することによって宇宙の姿をとらえていましたが、ここにニュートリノという素粒子で宇宙を観測するというニュートリノ天文学が創始されたのです。

大マゼランに現れた超新星は、太陽より10倍程度以上質量の大きい星が、その一生を終えるときの大往生の姿だということが言えるでしょう。太陽や夜空に

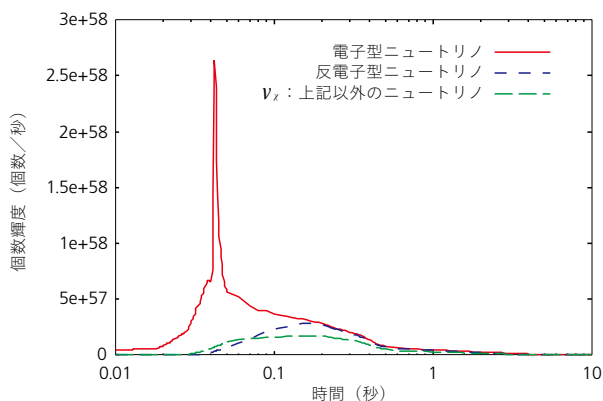


図1 超新星からのニュートリノ放出計算の一例。ニュートリノ振動の効果が現れる前。ニュートリノ振動によりニュートリノ間で転換が起こる。(戸谷、佐藤、Dalhead、Wilson、1998)

輝く恒星は、中心で核融合反応が起こり、その核燃焼のエネルギーによって輝いています。中心で水素が燃え、ヘリウムに、ヘリウムが燃え炭素や酸素にというように、前の段階の燃えかすを、さらに星の温度や密度を高めることによって、次のステージの燃料として使ってエネルギーを生み出しています。しかし、鉄まで核燃焼が進むと、もはや核エネルギーを取り出すことはできなくなります。このような段階になると、星は自分自身の強い重力で潰れてしまうと考えられています。星の中心にはブラックホールや、中性子星と呼ばれる天体が作られ、他の部分は爆発して飛び散ると考えられています。中性子星とは、半径はわずか10km程度ですがスプーン一杯の質量が1億トンにもなる、ものすごい超高密度の星です。

私たちはこの観測の直後、小柴先生と同じ東大物理教室に属していた利を生かし、ニュートリノの検出の直後、このデータを理論家の立場から解析しました。その結果、放出されたニュートリノの全エネルギーや、この爆発を起こした飛び散った元の星の質量、また中心に残されたはずの中性子星の質量などを推定し、世界に先駆けて発表することができました。同じような解析は、カミオカンデの後に発表された米国のIMBグループのニュートリノ検出のデータを加え、世界中で行われましたが、大筋では私たちの結果と一致するものでした。

観測と理論双方からのアプローチ

しかし、カミオカンデやIMBグループの検出したニ



超新星1987A。1987年2月23日、大マゼランに現れた超新星。
カミオカンデはこの超新星から放出されたニュートリノをと
らえることに成功した。(©Anglo-Australian Observatory)

ニュートリノはそれぞれ11個、8個という小さな数で、どのように星が爆発したのか、このデータから読みとることはできなかったのです。しかし、今やカミオカンデより30倍もの感度があるスーパーカミオカンデが稼働しています。もし私たちの天の川銀河の中心で超新星が起こったなら、およそ1万個のニュートリノが検出されるはずなのです。私たちは、超新星からどのようなニュートリノのシグナルがやってくるのか、長年理論的な研究を進めて来ましたが、その1つは、米国、ロスアラモス研究所のウィルソン (J. Wilson) のグループと進めた研究です。この共同研究により、もし超新星が私たちの銀河中心あたりで現れたならば、

スーパーカミオカンデのような大きな検出器で、10秒という短い時間にどのようなエネルギーのニュートリノが検出されるのか、具体的に予言することができました。

しかし、超新星からニュートリノがどのようにに放出され、また地球でどのようにに検出されるのか正確に予言をするためには、当然のことですが、ニュートリノ自身のことがわかっていなければなりません。スーパーカミオカンデのグループは、1998年、ニュートリノは質量がゼロではなく、有限の値を持ち、互いに異なった種類のニュートリノに変わったり、また戻ってきたりする現象（ニュートリノ振動）がおこることを、

世界に先駆けて発表しました。ニュートリノには、電子型、ミュー型、そしてタウ型の種類が知られています。

これらのニュートリノは、微妙に物質と反応する度合いが異なります。超新星の中心から放出されるニュートリノもこの3種類が混ざった状態で放出されますが、ニュートリノ振動の効果によって、飛び散る物質の中で互いに種類の異なったニュートリノに転換されることが予想されます。さらに、地球を貫いてスーパーカミオカンデにやってくるニュートリノは、地球内部でも互いに他のニュートリノに転換します。

しかし、ニュートリノ振動が実際はどのように起こるのかはよく解っていません。第一に、電子型、ミュー型、タウ型の順番で重くなっている（正規階層）のか、逆に、タウ型、電子型、ミュー型の順番で重くなる（逆階層）のか、まったくわかっていません。3種類のニュートリノの質量がどのような順番になっているかにより、ニュートリノ振動はまったく異なってきます。第2に、3種類のニュートリノ間で振動を引き起こす“混ざり方”を表す混合角のうち、 θ_{13} とよばれる値が未

知のままです。当然、超新星からのニュートリノのシグナルは、質量の階層や混合角によって大きく変化します。逆に言うと、超新星からのニュートリノが精密に観測されると、これらのニュートリノについての情報が得られると言えます。

私たちは、ロスアラモスグループとの共同研究を発展させ、これらのニュートリノの転換が超新星の中で実際どのように起こるかを調べ、スーパーカミオカンデでどのように観測されるか研究しました。もし、実際に私たちの銀河内で超新星が起これば、観測されたなら、そのシグナルとこの理論計算を比較することにより、ニュートリノの質量階層や、混合角についての情報が得られます。

宇宙の過去からやってくるメッセージ

しかし、超新星が私たちの天の川銀河の中に現れるのはこれまでの統計では50年から100年に1回です。これでは、とても待ち切れません。幸いなことに、宇

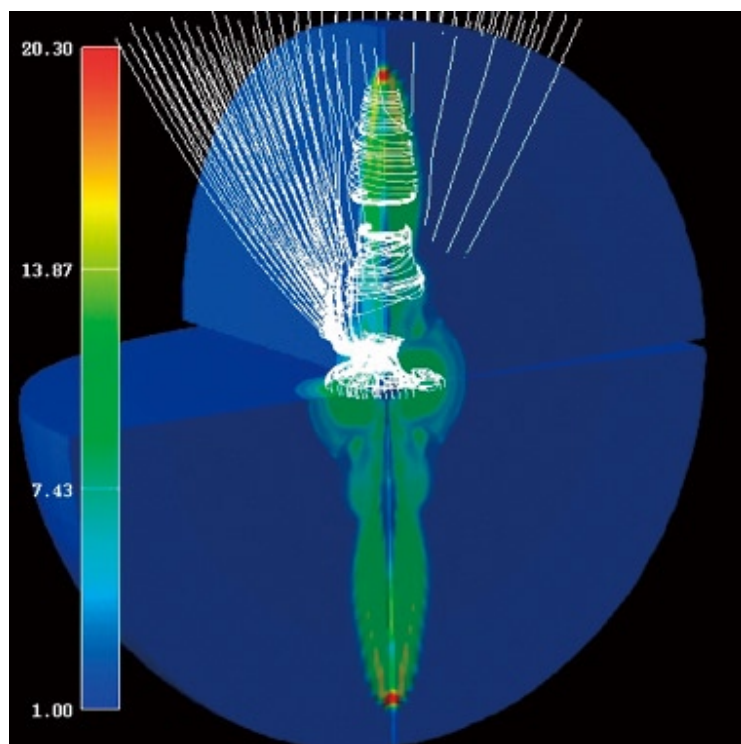


図2 磁場を持った星が自転しながら収縮し、爆発に転じる様子（コンピュータシミュレーション）。白い線は磁力線を表す。色は熱エネルギーの高さを表す。自転軸方向に強く磁場が巻き付き、ジェットの爆発が起こっている。

宙にはその初期から今までに起こったたくさんの超新星ニュートリノが充満しています。このニュートリノは1つの超新星からのニュートリノのように、10秒ほどのバーストとしてやってくるのではなく、時間的に変動しない「背景ニュートリノ」として観測されます。スーパーカミオカンデのグループは、大気中で宇宙線から発生する大気ニュートリノなどの信号を除いて、この過去の超新星からのニュートリノをとらえようとしています。

観測から現在得られている過去の超新星からのニュートリノの上限値は、私たちが理論的に求めたニュートリノのモデルの1つに近いところまできており、さらに感度が上がるならば、このニュートリノのモデルが正しいかどうかわかる可能性があります。超新星起源背景ニュートリノの強さは、過去にどれだけ超新星が起こったかにも依存します。したがって、この観測は宇宙の歴史を研究することにもなるのです。

重力波の観測も夢ではない

超新星の爆発は近年多様で複雑なものと考えられるようになってきました。爆発前の星の自転が速かったり、また強い磁場を持っていたりすると、自転軸方向にジェット状に爆発が起こったりします。ニュートリノの放出も方向によって変化する可能性が大きいでしょう。私たちのグループの当面の目標は、自転の効果や磁場の効果が大きい場合、はたしてどのような超新星爆発が起こるのかを明らかにすることです。これによって、このような超新星からのニュートリノが、どのような強さで放出されるかわかると期待されます。

また同時に、ニュートリノだけではなく、重力波も放出されます。重力波とは、アインシュタインの一般相対性理論で予言されている、空間の歪みが波のように伝わるものです。今、アメリカのLIGOという大きな重力波を測定する装置が稼働しています。また、日本でもこれに比べると小さな装置ですが、国立天文台でTAMAが稼働しています。

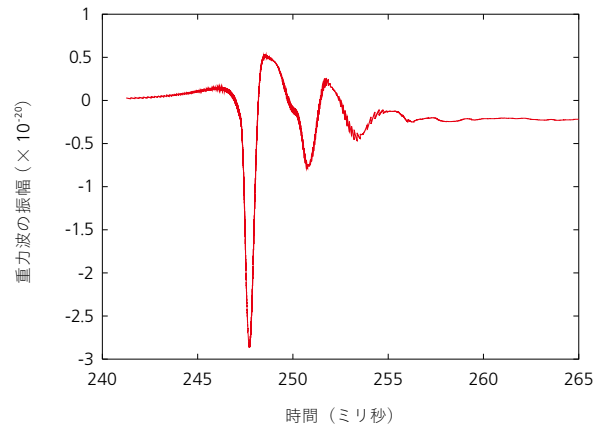


図3 超新星爆発で放出される重力波の一例。自転の速さが遅くなると波は細くなる。重力波が観測されれば、爆発のメカニズムがわかるようになる。

私たちの住む天の川銀河内や近傍の銀河で超新星が現れたならば、重力波がきっと観測されるはずです。また、ニュートリノの場合と同じように、過去の超新星からでた重力波が、宇宙のあらゆる方向からやってくるはずです。特に、宇宙の初期で星や銀河が始めて生まれだした頃、質量の大きい星が形成され、太陽の何十倍、何百倍もの質量を持ったブラックホールが形成されたと考えられています。この時放出された重力波も現在の宇宙を満たしているはずです。近い将来、宇宙の初期に作られた重力波が観測されることも夢ではありません。

同じようにスーパーカミオカンデの20倍の大きさのハイパーカミオカンデを作ろうと構想も進められています。かならず、近い将来、ニュートリノや重力波で、光などでは見ることのできない超新星の内部など、宇宙の姿が描き出されてくる時代がやってくるでしょう。

参考文献

- Statistical Analysis for the Future Detection of Supernova Neutrino Burst
Astrophys. J. **496** (1998) 216-225, T. Totani, K. Sato, S. Dalhed and J. Wilson
- Relic Neutrino Background from Cosmological Supernovae
New J. Phys. **6** (2004) 170 (27p), S. Ando and K. Sato
- Explosion Mechanism, Neutrino Burst, and Gravitational Wave in Core-Collapse Supernovae
Reports on Progress in Physics **69** (2006) 971-1144, K. Kotake, K. Sato, and K. Takahashi
- 超新星からのニュートリノバーストとニュートリノの物理
日本物理学会誌 第62巻 第9号 (2007) 668
佐藤勝彦、安藤真一郎、高橋慶太郎