

## 超新星爆発とニュートリノ

### いろいろな元素はいつどこで作られたか?

我々の周りにはいろいろな元素がある。人間には酸素、炭素、水素が主成分として含まれる。地球の主成分は鉄、酸素、ケイ素、マグネシウムだといわれている。貴金属と言われるものには金や銀があり、原子力発電所で電気を生み出すにはウランが使われている。こうした多種多様な元素は宇宙の歴史の中で、いつどこで作られたのだろうか?

近年の高感度宇宙観測によって宇宙の始まりが明らかになってきた。宇宙は今から137億年前にビッグバンとよばれる火の玉からスタートした。火の玉はエネルギーの塊であり、粒子と反粒子(クォークと反クォーク、電子と陽電子、等々)が生まれた。何らかのメカニズムによって反粒子は消え、粒子が残り、クォーク、電子から元素が合成された。ビッグバンの時に我々の周りにある多種多様な元素が合成されたのであろうか? ビッグバンに始まり宇宙は膨張している。ビッグバン時の元素合成はこの膨張との競争であり、残念ながら膨張速度が非常に速かったために、作られた元素は水素、ヘリウムと微量のリチウムまでが限度で、それよりも質量数が大きな元素を作ることができなかった。

水素やヘリウムからその先の元素を作るには核融合反応をおこす必要がある。太陽の中心では核融合反応が起きているが、太陽中心の温度は $10^7$ 度、密度は $150\text{g/cm}^3$ ぐらいであり、このぐらいの温度での核融合反応は水素を原料としてヘリウムを合成する反応で

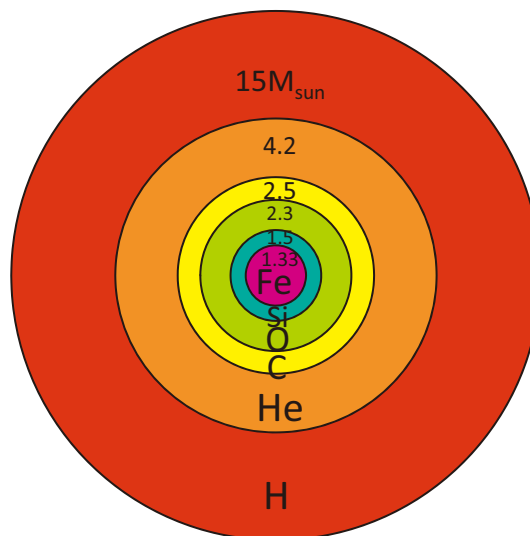


図1 超新星爆発直前の重い星の内部の様子

あり、それよりも重い元素を作ることはむずかしい。太陽よりも10倍程度以上重い星の内部ではもっと高い温度、もっと高い密度の環境を作ることができる。温度が $10^8$ 度、密度が $10^4\text{g/cm}^3$ ぐらいにあがるとヘリウム元素3つが融合して、炭素ができる反応がおこる。 $10^9$ 度、 $10^6\text{g/cm}^3$ ぐらいになると炭素の核融合から酸素、ネオン、ナトリウム、マグネシウムなどを作ることが可能になる。そして、更に温度、密度が高くなると酸素からケイ素、ケイ素から鉄、コバルト、ニッケルなどができる。この時点で星は図1に示すような玉ねぎ状の内部構造を持ち、中心には鉄を主成分とする核、そして外に向かってケイ素、酸素、ヘリウム、水素のそれぞれの層ができる。核融合反応はいったんここでストップする。なぜならば、鉄は最も結合エネルギー



図2 1987年に大マゼラン星雲で起きた超新星爆発。右は爆発前の写真、左は爆発後。  
©1989-2010, Australian Astronomical Observatory, photograph by David Malin.

が大きい元素（つまり、陽子、中性子が最もがっちりと固まっている原子核）であるため熱的な反応ではその先の核融合反応ができないからである。（ちなみに、このような重い星は核融合反応の進行も早く1000万年程度でこのような玉ねぎ構造が作られる。現在の太陽の年齢が46億歳であることと比較する非常に短い星の一生であることがわかっていただけと思う。）さて、星の中心核はここでおもしろい現象をおこす。エネルギーが中心核から外へ逃げていくため収縮して温度が上昇する。約 $5 \times 10^9$ 度を超えると鉄がヘリウムに分解する吸熱反応 ( $^{56}\text{Fe} + \gamma \rightarrow 13^4\text{He} + 4n - 124.4 \text{ MeV}$ ) によって不安定になる。そして、密度の上昇と電子ニュートリノの放出にともなって電子捕獲反応（原子核内外の陽子の中性子化： $e^- + p \rightarrow \nu_e + n$ ）がおき、中性子星（あるいはブラックホール）の形成へと進む。中性子星は原子核レベルの高い密度（ $\sim 10^{14}\text{g/cm}^3$ ）をもつ天体であり、太陽程度の質量が10km程度のサイズに

収まってしまう。これが超新星爆発\*の始まりである。物体が持つ位置エネルギーは物体のサイズに反比例するため、このようにコンパクトな星の形成は莫大なエネルギーを生み出す。このエネルギーの一部は衝撃波の発生に使われ星を爆発させるのである。爆発によって、星の外層は吹き飛ばされるが、その際に局所的に急激な温度や圧力の上昇が起き、短時間に原子核反応が急激に進む。こうした原子核反応によって、金、銀、ウランといった重い元素が合成されるのである。超新星爆発は星の内部の元素を宇宙にばらまく。ばらまかれた元素はやがて重力によって集まり、新たな天体が生まれる。我々の太陽、地球もこうしたプロセスによって生まれた天体なのである。

\* 超新星爆発は、光学観測のスペクトルによって、Ia型（水素の吸収線なし、ケイ素の吸収線あり）、Ib型（水素の吸収線なし、ヘリウムの吸収線あり）、Ic型（水素、ケイ素、ヘリウムの吸収線なし）、II型（水素の吸収線あり）に分類される。Ia型は炭素の白色矮星が爆発的に燃える現象と考えられ、Ib、Ic、II型は中心核の重力崩壊による爆発だと考えられている。

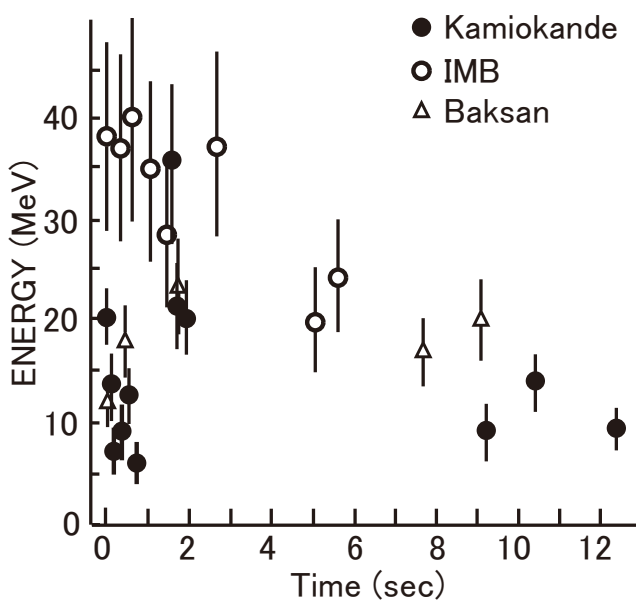


図3 カミオカンデ、IMB、Baksan実験が捉えたSN1987Aからのニュートリノ信号

以上は、天体物理学、原子核物理学によって描かれたシナリオであり、これが正しいかを実証するためには超新星爆発の観測が必要であった。次節で観測について述べる。

### 超新星爆発ニュートリノの観測

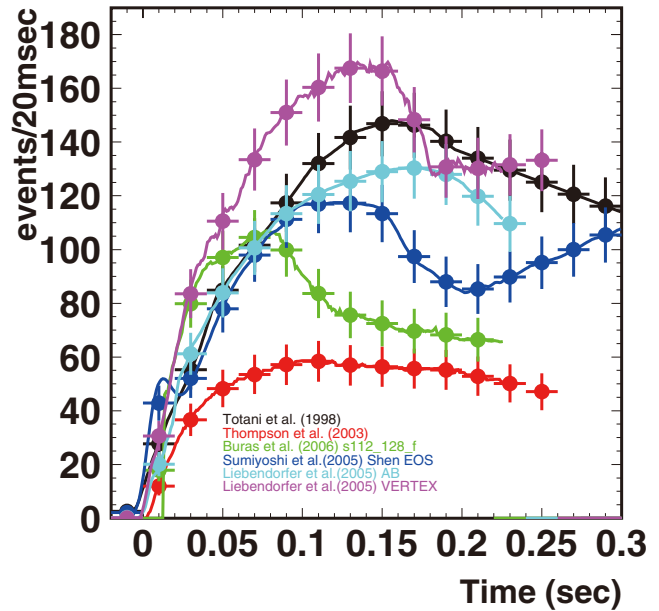
多種多様な元素の源である超新星爆発だが、爆発の際に解放されるエネルギーは非常に大きく $10^{46}$ ジュール以上と見積もられる。これは太陽が生まれてから今までに放出してきた全エネルギーの数百倍に相当し、いかに莫大であるかがわかると思う。このエネルギーのほとんど（99%程度）はニュートリノによって星から運び出される。ニュートリノは物質との相互作用が小さいために、高密度の星の内層を通り抜けられるからである。超新星爆発のシナリオを検証する出来事が1987年におこった。

1987年2月23日にカミオカンデ実験とIrvine-Michigan-Brookhaven (IMB) 実験は超新星 SN1987A にもともなうニュートリノバーストを捉えた。カミオ

カンデは、1983年に岐阜県神岡町の神岡鉱山の地下1000mの場所に建設された装置であり、3000トンの水タンクに948本の直径50cm光電子増倍管を取り付けた装置であった。IMB実験はオハイオ州モートン塩鉱の地下600mに作られた7000トンの実験装置であり、2048本の直径20cm光電子増倍管を使用した。この超新星爆発は、我々から17万光年かなたにある大マゼラン星雲で起きたものであり、光による観測を図2に示す。

図3はカミオカンデ実験、IMB実験（および後に観測が報告されたBaksan実験）が捉えたニュートリノ現象を示す。カミオカンデが11個、IMBが8個、Baksan が5個のニュートリノ事象を観測した。横軸の範囲を見てもらえばわかるように、ニュートリノが放出されたのは十数秒間程度だった。つまり、中心核が重力的に崩壊するのにかかる時間はたったの10秒程度だったのである。一方、爆発による衝撃波で星の外層が吹き飛ばされ、光が外へ出てくるまでには数時間かかる。実際、SN1987Aにおいて光度の増加が観測されたのは、ニュートリノ放出の時刻から3時間ほ

図4 いくつかの超新星爆発シミュレーションが予測する爆発から0.3秒後までのスーパーカミオカンデにおけるイベント頻度の変化。超新星までの距離は銀河中心までの距離（約3万3千光年）を仮定。



どたってからだった。

カミオカンデ、IMB、Baksanが捉えたニュートリノ事象はたった24個しかなかったが、その事象数とエネルギーから超新星爆発の際に解放されたエネルギーが見積もられ、それは予想されていた値（ $\sim 3 \times 10^{46}$  ジュール）とほぼ一致した。

### 将来の観測と爆発メカニズムの解明

SN1987Aのニュートリノ観測によって超新星爆発の基本的シナリオは正しいことが示されたが、爆発の詳細なメカニズムについてはまだ解明されていない。世界のいくつかのグループがコンピュータシミュレーションで超新星爆発を起こさせようと研究を行っている。しかし、現状では正確な情報を入力しているにもかかわらず「爆発」に成功していない。どうも何らかの物理過程が現在のシミュレーションには抜けているようである。この問題を解決するためには、もっとたくさんの超新星ニュートリノ事象を捉えて、爆発の様子を詳しく見る必要がある。我々の銀河で超新星爆発

が起きれば、50000トンの実験装置スーパーカミオカンデ（SK）では10,000近くの事象が捉えられるはずである。図4はいくつかのシミュレーションが予測する爆発から0.3秒後までのSKでのイベント頻度の変化である。超新星までの距離は銀河中心までの距離（約3万3千光年）を仮定している。精密な時間プロファイルの観測によってどのような爆発モデルが正しいかを判断できる。

超新星爆発の高密度状態はニュートリノ素粒子物理学にも新たな知見を与えるかもしれない。地下におけるニュートリノ観測によってニュートリノ振動が解明されてきたが、第3の振動モードやニュートリノ質量の階層性の構造など、解明されていないことがまだまだある。高密度の中心核では、ニュートリノ振動の物質効果（MSW効果）によって混合角が小さくてもニュートリノ振動が大きくなる可能性があり、超新星ニュートリノのスペクトルを使って、未知の振動パラメータが決まってしまう可能性もありうる。

我々の銀河での超新星爆発の頻度は30–50年に一度と言われている。何とか近年中に起きてもらい、豊

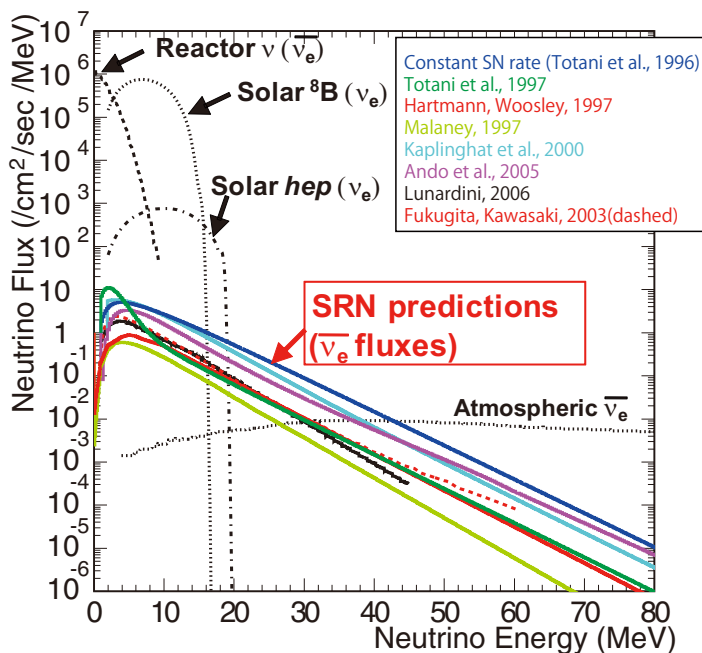


図5 地表にふりそぐいろいろなニュートリノのエネルギースペクトル。色つきは超新星背景ニュートリノの予想されるスペクトルを示す。

豊富な情報を我々に与えてほしいものである。

## 超新星ニュートリノで探る宇宙の歴史

我々の宇宙には約 $10^9$ 個の銀河がある。ひとつひとつの銀河には約 $10^{11}$ 個の恒星がある。質量が太陽の10倍以上の恒星は全体の0.3%程度なので、宇宙のはじめから起こった超新星爆発の数は $10^{17}$ 個と見積もられる。つまり、平均すると1秒に1回、宇宙のどこかで超新星爆発が起きてきたことになる。この宇宙のはじめからの超新星爆発によるニュートリノ（超新星背景ニュートリノとよばれる）は今の宇宙に満ちているはずであり、その強度は1平方センチメートルあたり毎秒数十個と見積もられている。こうしたニュートリノを捉える事ができれば、宇宙のはじめからの重元素合成の歴史を探ることができるかもしれない。

図5は地表においてどのようなニュートリノが飛んでくるかを示している。色つきの線は各種モデルから予測される超新星背景ニュートリノのスペクトルであ

る。エネルギーの低い方には原子炉からのニュートリノ、太陽からのニュートリノがあり、エネルギーの高い方には宇宙線が大気中で作るニュートリノがある。しかし、20MeV近傍は超新星背景ニュートリノが主たる成分であると考えられている。ちなみに、太陽ニュートリノは正粒子のニュートリノであり、それ以外は反電子ニュートリノである。したがって、反電子ニュートリノを捉えることができれば、10MeVから30MeVぐらゐの範囲に超新星背景ニュートリノが「見える」はずである。スーパーカミオカンデでは、超新星背景ニュートリノの観測に向けて開発研究を始めている。具体的にはタンクの水に質量で0.1%のガドリニウムという物質を溶かし、反電子ニュートリノが陽子と反応した際に陽電子と中性子がガドリニウムに捕獲されて放出されるガンマ線を捉えようという計画である。現在はその試験段階であるが、本番がスタートすれば年間何発かの信号を捉えられるはずである。超新星ニュートリノは宇宙をみる新たな手法を我々に与えてくれるはずである。