

反電子ニュートリノ反応で⁹⁸Tcを生成

早川 岳人*1 梶野 敏貴*2
Hayakawa Takehito Kajino Toshitaka

1. はじめに

近年、加速器や原子炉等を用いた人工ニュートリノ源によってニュートリノ物理学の研究が飛躍的に進んでいる。しかし、宇宙で最大のニュートリノ源は、重力崩壊型超新星爆発であり通常のニュートリノ源では分からない情報をもたらす可能性が高い。1987年のカミオカンデの超新星ニュートリノ観測によって、重力崩壊型超新星爆発がニュートリノによって駆動されていることが検証された。我々の銀河系で超新星爆発の発生頻度は100年に2回程度と言われており、現在もスーパーカミオカンデ等の大型ニュートリノ検出器が次の機会を待ち望んでいる。

一方、超新星ニュートリノの直接観測ではなく、ニュートリノで生成された元素の組成からも超新星ニュートリノが研究されている。図1に示すように、

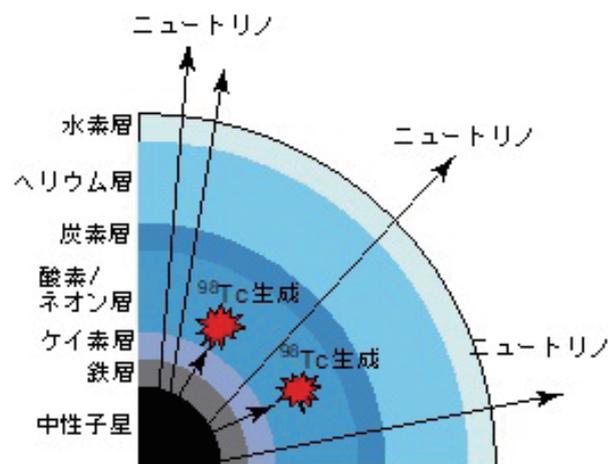


図1 超新星爆発のニュートリノによる元素合成の概念図
 超新星爆発の初期に、中心部に形成された中性子星から膨大な量のニュートリノが放出される。その極一部が外層で、既に存在していた核種とニュートリノ・原子核反応を起こして新しい核種を生成する

超新星爆発において、ニュートリノが外層を通過する時に既に存在している核種と核反応を起こして、新しい核種を生成するのである（ニュートリノ過程と呼ばれる）^{1,2)}。ニュートリノによって生成された核種の量から、原始中性子星より放出されたニュートリノの平均エネルギーを評価できる。平均エネルギーは、超新星爆発のメカニズムの理解や、ニュートリノ振動等の基礎的な物理現象の理解に必要な不可欠な物理量である。

ニュートリノには、電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノ、反電子ニュートリノ、反ミューニュートリノ、反タウニュートリノの6種類のニュートリノが存在している。これまでの研究で、ニュートリノ過程では反電子ニュートリノを除く5種類のニュートリノによって主に元素が生成されていることが判明していた。しかし、超新星ニュートリノの理解には、6種類すべての平均エネルギーを知ることが必要不可欠である。そのため、反電子ニュートリノの生成率の割合が高い新しいニュートリノ生成核種の発見が求められていた。本稿では、超新星爆発ニュートリノによって⁹⁸Tc（テクネチウム98）が生成されている可能性について紹介する。

2. 超新星ニュートリノ過程

ニュートリノ・原子核の相互作用する確率は低い。そのため、ニュートリノによる核種の生成量は少ない。そのため、宇宙における他の元素合成過程による生成量が非常に少ない核種において、超新星ニュートリノによる生成量が有意な割合になる。そのような核種として、2013年以前には、わずかに⁷Li（リチ

ウム), ^{11}B (ホウ素), ^{19}F (フッ素) 等の軽元素の他, ^{138}La (ランタン), ^{180}Ta (タンタル) のみが知られていた。2013年, Hayakawa, *et al.* によって, 消滅核種 ^{92}Nb (半減期は約3千5百万年) が超新星ニュートリノで生成された可能性が指摘された³⁾。 ^{92}Nb の半減期は太陽系の年齢と比較すると非常に短いため, 現在の太陽組成ではほぼゼロである。しかし, 始原的隕石の研究によって太陽系形成時に ^{92}Nb が存在していることが判明していた。Hayakawa, *et al.*³⁾ では, 理論計算によって太陽系形成時の ^{92}Nb の量が説明できることが明らかになった。

今回報告する研究⁴⁾ では, ^{98}Tc が超新星ニュートリノで生成される可能性が指摘された。更に, 反電子ニュートリノの寄与が大きい可能性も指摘された。なお, これまで ^{98}Tc の宇宙起源として超新星爆発の光核反応⁵⁾ や, Ia型超新星爆発⁶⁾ 等が提案されていたが, 起源は確定していなかった。

一般に, 恒星は図1に示すように玉ねぎ構造をしており, 中心部に重い元素, 外側になるにつれ軽い元素が占めるようになる。主要な成分は内側から, 鉄, ケイ素, ネオン, 酸素, 炭素, ヘリウム等であるが, 同時に少量のスズ, 金, ウラン等の重元素も含んでいる。これらの重元素は, 恒星が誕生した時点で, 星間ガス中に既に含まれていたものである。

太陽より質量が8倍以上の恒星は, 寿命の最後に重力崩壊型超新星爆発を引き起こす。まず, 中心部に存在する鉄コアが重力に耐えきれずに収縮して原始中性子星を形成する。やがて, 中性子星から膨大な量のニュートリノが放出され, 外層にエネルギーの一部を落とす。その結果, 超新星爆発が発生する。ニュートリノが外層を通過する時, ニュートリノの一部が既に存在している原子核とニュートリノ・原子核反応を起こし, 新しい核種を生成する。 ^{98}Tc については, ニュートリノが酸素/ネオン層を通過する際に, 既に存在していた ^{98}Mo (モリブデン) や ^{99}Ru (ルテニウム) 等の重元素の一部と核反応を起こし, 一定の確率で ^{98}Tc を生成する。しかし, これまで ^{98}Tc の生成について, 実験データはもちろん理論計算値もなかった。そのため, ^{98}Mo や ^{99}Tc 等の原子核の詳細な構造を計算して, ニュートリノと原子核の反応率を計算した。

ニュートリノ・原子核相互作用は, 電子ニュートリノによる荷電カレント反応, 反電子ニュートリノ

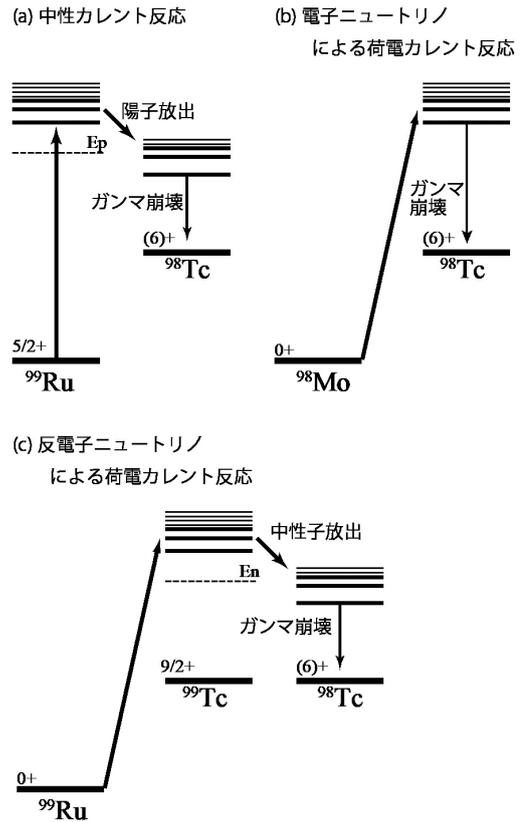


図2 ニュートリノ原子核反応の例

(a) 中性カレント反応, (b) 電子型ニュートリノによる荷電カレント反応, (c) 反電子型ニュートリノによる荷電カレント反応。荷電反応では, 最初にニュートリノの吸収によって陽子と中性子の間に変換が発生する

による荷電カレント反応, 6種類のニュートリノによる中性カレント反応の3種類に分類できる(図2)。中性カレント反応ではニュートリノの非弾性散乱によって原子核が励起し, 中性子(陽子)離別エネルギーを超えた場合, 中性子や陽子を放出して他の核種に変換される。電子ニュートリノによる荷電カレント反応では, 電子ニュートリノが原子核に吸収され, 中性子が1個減り陽子が1個増える。反電子ニュートリノによる荷電カレント反応では, 同様に陽子が1個減り中性子が1個増える。これらの荷電カレント反応において, 励起状態が生成され γ 崩壊する場合もあれば, 更に核子を放出して他の核種に変換される場合もある。

これまでの超新星ニュートリノ元素合成の研究では, 電子ニュートリノによる荷電カレント反応の寄与が1番大きく, 次に中性カレント反応の寄与が大きいことが判明していた。その結果, 反電子ニュートリノの寄与が小さいことが判明していた。これは,

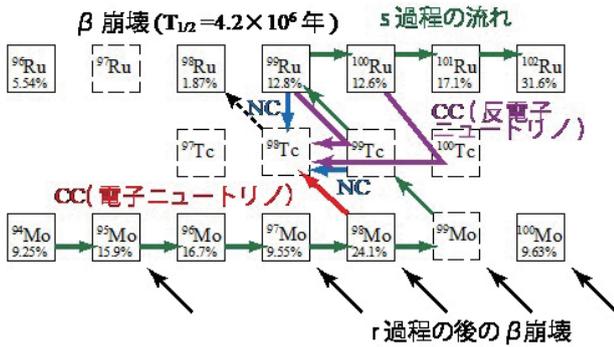


図3 Tc 同位体の核図表の一部と元素合成の流れ

Mo, Ru 同位体は遅い中性子捕獲反応 (s 過程) と急速な中性子捕獲反応 (r 過程) の終了後の β 崩壊で主に生成された。しかし, ^{98}Tc はどちらも生成できない。NC は中性カレント反応を示す。CC は荷電カレント反応を示す

反電子ニュートリノの荷電反応の元となる原子核の量が少ないためである。例えば, ^{180}Ta を生成する場合には ^{180}W から生成されるが ^{180}W の太陽系における同位体組成は僅かに 0.12% である。しかも, 超新星爆発に至る前の段階で, 中性子照射を浴び (弱い s 過程と呼ばれる) ほとんどが消滅してしまうためである。これは, ^{138}La を生成する ^{138}Ce でも同様である。最終的に, ニュートリノ生成核種に対して電子ニュートリノの寄与は 70%~90% もの大きな割合になる。残りは, ミューニュートリノ, タウニュートリノとそれらの反ニュートリノであり, 反電子ニュートリノの寄与はだいたい 1%~4% 程度に過ぎなかった。

図3に Tc 同位体近傍の元素合成の流れと核図表の一部を示す。Ru と Mo の同位体のほとんどが, s 過程と r 過程と呼ばれる 2 つの中性子捕獲反応過程で生成されている。 ^{98}Tc は s 過程の元素合成の流れから外れており, r 過程に続く β - 崩壊では ^{98}Mo が安定同位体のために生成されない。また, ^{98}Ru も安定同位体のため, β + 崩壊でも生成できないという特徴がある。ニュートリノ過程で, ^{98}Tc は主に ^{98}Mo から電子ニュートリノの荷電カレント反応で生成されると予想されていた (図3の赤線)。また, ^{99}Tc 等から中性カレント反応 (青線) ニュートリノの寄与より小さいはずである。 ^{98}Tc が特徴的な点は, ^{99}Ru 及び ^{100}Ru から反電子ニュートリノの荷電カレント反応による生成の可能性がある点である (紫線)。

次に, 超新星爆発モデルを用いて計算を進めた。

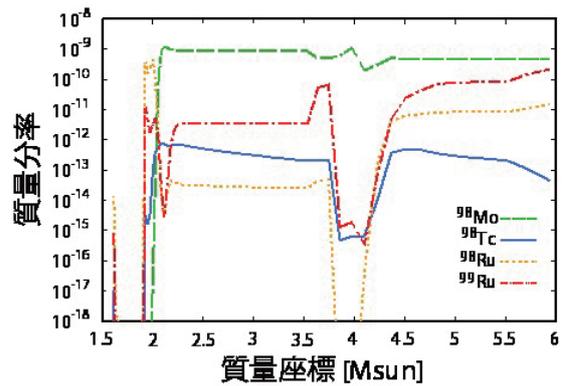


図4 超新星爆発モデルによるニュートリノ元素合成の計算結果の例

X 軸は中心からの座標を太陽の質量を 1 とした単位で表示したもの。Y 軸は質量分率

1987 年にカミオカンデで検知されたニュートリノを放出した歴史的な超新星爆発 1987A を再現するために構築されたモデルを用いて計算を行った。また, 超新星爆発より前の段階の恒星の中の核反応を計算することで, 超新星爆発の時に存在していた重元素の量を計算した。この計算によって, 超新星爆発の段階で存在していた ^{98}Mo 等の重元素の量を求めた。次に, 既に計算してあったニュートリノ・原子核反応率を組み込み, 超新星爆発時にニュートリノで生成される ^{98}Tc の量を計算した。図4がニュートリノによって生成された核種の組成の例である。 ^{98}Tc が生成されていることが判る。これらの計算結果から 1 回の超新星爆発で生成される ^{98}Tc の量を求めた。

3. 宇宙核時計

^{98}Tc は約 420 万年の半減期で娘核の ^{98}Ru に β 崩壊する放射性同位体である。太陽系の年齢の約 46 億年より短いため, 太陽系形成時に存在していても現在の太陽系には実質的に存在しない。しかし, 太陽系形成時に存在していた場合には, 始原的隕石中の娘核の ^{98}Ru の量を計測することで, 太陽系形成時の ^{98}Tc の量を知ることができる。なお, ^{98}Tc を生成した超新星爆発から太陽系形成までの年代を知ることが可能であり, このような放射性同位体は宇宙核時計と呼ばれる^{7,8)}。そこで, 太陽系形成直前に太陽系近傍で超新星爆発が発生した場合に, 太陽系に存在していた ^{98}Tc の量を計算した。

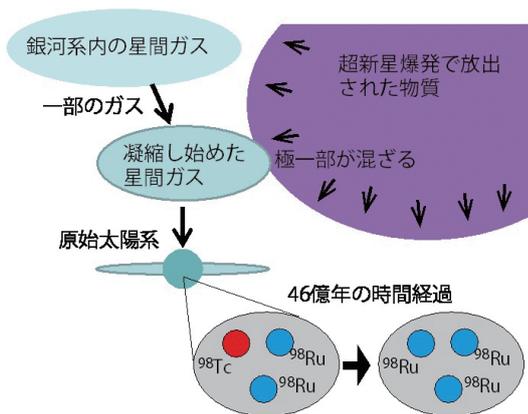


図5 太陽系に超新星爆発で生成された物質の一部が混ざった様子

太陽系の原始物質に消滅核種が混ざってから太陽系誕生までの時間を評価可能

図5に示すモデルを用いた。星間ガスが重力収縮し始め、原始太陽系を形成する。前後して、太陽系近傍で超新星爆発が発生し、生成された物質の一部（質量にして太陽系の質量の1/1,000程度）が太陽系を構成する物質に混ざったとするモデルである。類似の放射性同位体核種として ^{92}Nb が超新星爆発のニュートリノ過程で生成された可能性が指摘されている³⁾。本研究では、超新星爆発モデルによって求めた1回の超新星爆発で生成された ^{98}Tc の量と、過去の ^{92}Nb 宇宙核時計の研究等から推定されている年代（100万年から3千万年）を用いて計算した結果、太陽系形成時に ^{98}Tc が存在していれば隕石の研究で十分測定可能な量があることが判明した。

超新星爆発の計算において、反電子ニュートリノが存在しない場合と、存在した場合の ^{98}Tc の生成量の差から、反電子ニュートリノによる ^{98}Tc の生成量を求めた。反電子ニュートリノの寄与は、 ^{98}Tc の生成に対して最大20%あることが判明した。

4. まとめ

既存のニュートリノで生成される重元素は、ほとんど反電子ニュートリノを除く5種類のニュートリノで生成されることが判明している。そのため、 ^{98}Tc は、現時点ではただ1つの反電子ニュートリノの寄与が大きい核種である。また、隕石研究が進展すれば太陽系形成時に存在していた ^{98}Tc の量を評価できることが示された。その量を知ることができれば超新星爆発における原始中性子星から放出された反電子ニュートリノの平均エネルギー（及びエネルギースペクトル）を決めることが可能である。

スーパーカミオカンデや計画中のハイパーカミオカンデで、将来、超新星爆発からの反電子ニュートリノがより精密に計測されると期待される。そのエネルギーから、ニュートリノ元素合成の研究で推定されたニュートリノの平均エネルギーの検証が可能であり、次の観測が待たれる。

参考文献

- 1) Woosley, S. E., *et al.*, *Astrophys. J.*, **356**, 272-301 (1990)
- 2) Heger, A., *et al.*, *Phys. Lett. B*, **606**, 258-264 (2005)
- 3) Hayakawa, T., *et al.*, *Astrophys. J.*, **779**, L9-L13 (2013)
- 4) Hayakawa, T., *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **121**, 102701 (2018)
- 5) Dauphas, N., *et al.*, *Nucl. Phys. A*, **719**, C287-C295 (2003)
- 6) Travaglio, C. *et al.*, *Astrophys. J.*, **795**, 141 (2014)
- 7) Becker, H. and Walker, R. J. *Chem. Geol.*, **196**, 43-56 (2003)
- 8) Lugaro, M., *et al.*, *Science*, **345**, 650-653 (2014)

(* 1 (国研)量子科学技術研究開発機構,

* 2 北京航空航天大学)