

|             |                                                                                                                                                                          |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 氏 名         | 佐 藤 勝 彦                                                                                                                                                                  |
|             | さとう かつ ひこ                                                                                                                                                                |
| 学 位 の 種 類   | 理 学 博 士                                                                                                                                                                  |
| 学 位 記 番 号   | 理 博 第 316 号                                                                                                                                                              |
| 学位授与の日付     | 昭 和 49 年 3 月 23 日                                                                                                                                                        |
| 学位授与の要件     | 学 位 規 則 第 5 条 第 1 項 該 当                                                                                                                                                  |
| 研究科・専攻      | 理 学 研 究 科 物 理 学 第 二 専 攻                                                                                                                                                  |
| 学 位 論 文 題 目 | <b>Formation of Elements in Neutron Rich Ejected Matter of Supernovae</b><br><b>—Dynamical r-process Stage—</b><br>(超新星から放出される中性子の多い物質中における元素の合成<br>—動的な r-プロセスの段階について—) |
| 論文調査委員      | (主 査)<br>教 授 林 忠四郎    教 授 長谷川博一    教 授 玉 垣 良 三                                                                                                                           |

### 論 文 内 容 の 要 旨

自然界に存在する鉄より重い元素の大半、とくに鉛より重い元素のすべては、原子核が急速な中性子捕獲とベータ崩壊を繰り返すことによって合成されたものと考えられている。この過程を r プロセスというが、この過程が進行するためには、大量の中性子と  $10^9$ °K 以上の高温が必要であることが知られている。このような条件は恒星の進化の終段階における爆発的な現象において実現されるものと考えられるが、これまでの r プロセスについての多くの研究は、温度や中性子密度を時間的に一定として取扱ってきた。

主論文は、超新星爆発の際に放出される中性子に富んだ物質中で進行する r プロセスを時間的に追跡して、形成された重元素の存在量を太陽の化学組成と比較したものである。この追跡においては、多種の原子核のベータ崩壊や核分裂による発熱と、中性微子放出や膨張による冷却の効果を考慮に入れている。また、r プロセスでは、陽子に比して中性子が極端に多い原子核が対象となるが、これらの原子核の中性子捕獲の断面積としては、共鳴準位からの寄与を統計的に加算することにより、高次部分波の寄与を含めた断面積を求めて使用している。さらに、ベータ崩壊率については、崩壊の強度関数が核の励起エネルギーによらずに一定であり、その値はすべての核について  $10^{-4.5}\text{sec}^{-1}\text{MeV}^{-1}$  と仮定して、崩壊率を求めている。

以上に求めた核反応率を用いて、申請者は r プロセスの進行を物質膨張の式、核反応の式、熱エネルギー変化の式の連立微分方程式を数値的に解くことによって、いろいろな場合について調べている。すなわち、物質の膨張速度や初期の中性子と陽子の個数比は、超新星の内部のどの領域から物質が放出されるかに強く依存するので、このことを考慮した多くの場合について計算が行われている。さて、r プロセスは温度が  $3 \times 10^9$ °K に降下して荷電原子核の相互の反応が無視できるようになる段階から始まる。これ以前の高温段階における種々の原子核の存在量の時間変化の概要は、すでに参考論文 3 で調べられていて、申請者はその結果を主論文の計算の初期値として用いている。重要な初期値は、中性子個数密度と r プロセスの種になる原子核の存在量である。

以上の計算の結果として、申請者は次のような結論を見出している。まず、初期においては物質は断熱膨張的に急激に冷却するが、約  $0.1 \sim 0.01$  秒の後には、膨張にもかかわらず急激に温度が上昇して  $10^9$ °K 以上に達し、まもなく中性子が消費されて  $r$  プロセスは終了する。この終了時の温度は、中性子と陽子の初期の個数化によらず、ほぼ一定であるという興味ある結果を見出している。この結果を申請者は次のように説明している。大量に存在する核種は中性子捕獲反応とその逆反応が釣り合っている中性子過剰の核であるが、初期の急激な冷却によって、さらに中性子過剰になるとともにベータ崩壊は速くなる。他方、膨張は減速するので、ある時期より後はベータ崩壊が膨張より速くなり、放出電子によって物質は加熱されるのである。ところで太陽系の重元素の存在量を説明するためには、 $r$  プロセスは  $10^9$ °K 以上で進行しなければならないことが知られているが、主論文の結果はベータ崩壊や核分裂による発熱がこのような高温の保持に重要な役割をもつことを明らかにしている。

さらに申請者は、重元素の存在量の計算値と観測値とを比較することによって、物質の膨張速度が重力的自由落下の速度の30倍を越える場合には観測値が説明できないこと、また逆に、1倍より小さい場合には中性子が  $r$  プロセスの始まる前に消費されてしまうことを見出している。

参考論文1は、中性子星を構成する高密度物質の状態を明らかにするために、密度の上昇に伴う原子核物質から中性子物質への相の変化を論じ、原子核が消失する臨界密度を調べたものである。参考論文2は、参考論文1において導出した状態方程式を用いて、中性子星のとりうる内部構造を計算したものである。参考論文3は、超新星爆発の際に放出される高温、高密度の物質が  $10^{11}$ °K から  $3 \times 10^9$ °K まで冷却する過程を調べたもので、この温度範囲では、ベータ崩壊などの弱い相互作用による反応が進行し、原子核の存在量はいわゆる熱核平衡の分布をとりながら変化することを見出している。この結果は、主論文の計算の初期値として採用されている。

### 論文審査の結果の要旨

宇宙に存在する重元素は、恒星進化のある段階で進行した逐次的な中性子捕獲とベータ崩壊によって形成されたものと考えられている。これらの重元素の存在量を説明するためには2種の中性子捕獲過程が必要であって、1つは原子核の安定領域の近傍を進むゆっくりした過程 ( $s$  プロセス) であり、他の1つは大きい中性子密度のもとに中性子過剰の原子核をつくりながら急速に進行する過程 ( $r$  プロセス) である。この  $r$  プロセスは恒星進化の爆発的な段階で進行するものと考えられているが、これまでの研究は温度と密度を一定とした静的な場合について行われ、具体的な爆発現象についての計算はなかったのである。

主論文は、大質量の恒星進化の終段階である超新星爆発に際して、中心には中性子星が残るとともに、外層の自由中性子に富んだ物質が放出される場合に、この放出物質中での  $r$  プロセスによって形成される重元素の存在量を詳細に計算したものである。まず、原子核物理学の知識をもとにして、中性子過剰の原子核の核反応率とベータ崩壊率を詳しく求めている。ついで、 $r$  プロセスが開始する時期の中性子個数密度と種となる原子核の存在量については、以前に参考論文3で求めた値を用いて、物質が中性子星の外層のいろいろな領域から放出される場合を考慮している。また、物質の膨張速度は明確でないので、重力的自由落下の速度の1, 10, 30, 100倍である場合の各々について計算を行っている。計算には、6000種の

核種を考慮に入れて、膨張による密度変化の式、ベータ崩壊と核分裂による加熱を含めた温度変化の式、核反応による各核種の存在量の時間変化の式の3つを連立させて数値的に解いている。

その結果として、申請者は多くの重要な結論を導くことに成功している。まず、物質は最初は急速に冷却するが、やがてベータ崩壊が急速に進むために温度の降下が停止、あるいは上昇に転じて、中性子消費のためにrプロセスが終了するときの温度は  $10^9$  K 以上であることを見出している。この温度は重元素の存在量の観測値を説明するのに必要な温度であることがこれまでの静的なrプロセスの計算で知られていて、主論文の結果は重元素の超新星起源の説を定量的に裏づけたものといえる。申請者はさらに、膨張速度が自由落下速度の1倍以下、ならびに30倍以上の場合には、太陽表面の観測値と合うような存在量が得られないことを見出している。

以上のように、主論文は超新星爆発の際に進行するrプロセスによって重元素の起源が説明できることを明らかにしたものとして、天体核物理学の発展に寄与するところが大きい。なお、参考論文はいずれも、申請者が宇宙物理学と原子核物理学の広い分野にわたって、豊富な知識とすぐれた研究能力をもっていることを示している。

よって、本論文は理学博士の学位論文として価値あるものと認める。