

超新星爆発と元素合成

伊 藤 裕*

1. 宇宙の錬金術

「去年のノーベル物理学賞は誰が貰いましたか？」という質問に答えられない人は天文月報の読者の中にはおられないはずで、インド出身の正統的理論天文学者チャンドラセカールと宇宙の錬金術師ファウラーでした。こう並べて形容すると、チャンドラセカールは正真正銘の大学者でファウラーは偉大ではあるけれどもその譚名から連想されるように何やらいかがわしいことも言う人のような印象を与えるかもしれません。確かにチャンドラセカールは研究においてだけでなく、教育においても、身だしなみや言葉づかいにおいても非の打ち所の無い人であるようです。アメリカの週刊サイエンス誌の1983年11月25日号に掲載された抜群におもしろい解説記事で「抜群教授 (デイシュティングィッシュド・プロフェッサー)」という肩書をもつサルピーターがそう書いています。これに対してファウラーが宇宙の錬金術師と言われるのは決して彼が信用のおけない人物であるということの意味するものではありません。それは彼が恒星内部での元素合成の研究において大きな功績をあげたという理由によるものです。「宇宙に存在する主な元素の中でこの世の始まりの大爆発の時にできたのは水素(H)とヘリウム(He)だけで、炭素(C)や窒素(N)や酸素(O)などそれ以外の元素はほとんどが恒星の内部で作られたものである」という読者がすでに良く御存知の大真理は彼によるところが大なのです。昔の錬金術師が夢見た金ももちろん恒星の内部で作られますから、ファウラーを彼らの首領に祭り上げることに異論のあろうはずがありません。

2. II型の超新星

ファウラーが立派な賞に輝いたからといって、恒星における元素合成の問題はもうほとんど片付いたのだというわけにはいきません。特に恒星進化の最終段階、体操競技でいえばフィニッシュにあたるころがよくわからないのです。その理由は単純です。理論予測と観測結果とを突き合わせながら考察を進めてゆくという自然科学の常道を踏むことがままならないのです。例として太陽

の10倍の質量(10 M_{\odot})の星を考えましょう。中心部のHがすべてHeに合成され、Hの殻燃焼のために外層が赤色巨星になったあと、中心部のHeが燃え出してCとOが合成されます。これから後の予想される進化が図1に示されています。この星はやがてII型の超新星爆発をおこすものと考えられますが、図1の横軸はその爆発の時刻までの星の余命です。横軸が対数目盛になっていることに注目して下さい。元素合成は加速度的に進行するのです。私達が観測できるのは巨星の表面だけですが、中心部のこのような進化は早すぎてその影響が外層に伝わるいとまがありません。どんなに高性能の望遠鏡をもってしても、「この星では今ネオン(Ne)が燃えているからこれから10年以内に超新星爆発がおきる」などという予報を出すことはできないのです。

超新星とその残骸の観測はこのような、星の進化の末期における駆け込み的な、しかし宇宙の化学進化にとって本質的に重要な、元素合成についての貴重な資料を提供します。星の解剖学的研究が可能になるのです。ただしII型の超新星の場合にはそれが明るく輝いている間はHを主成分とする外層が不透明で中心部まで見通すことはできず、一方、膨張によって中心部が透けて見えるようになる頃には暗くなってしまって観測が難しいという不利な事情があります。そこで爆発後数百年を経た超新星の残骸の中に星の破片を見つけてその化学組成をひとつひとつ調べてゆくということが必要です。最近数年間にわたった観測によって、図1の右下の部分にあたるOやNeや珪素(Si)族だけから成る発光気体が私達の銀河系の超新星残骸はもちろんのこと、大小マゼラン雲や2千万光年の彼方にある銀河の超新星残骸にもぞ

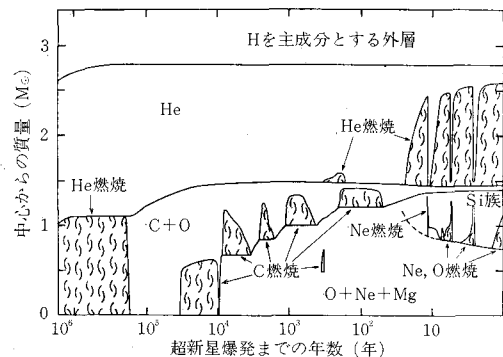


図1 10 M_{\odot} の星の中心付近における化学進化。(Nomoto, K., 1984, Ap. J., 277, 791 (in press))

* Joint Institute for Laboratory Astrophysics, University of Colorado and National Bureau of Standards, USA. Hiroshi Itoh: Supernova Explosions and Nucleosynthesis

くぞくと発見されています。これらの気体の発光の機構を明らかにして化学組成を求める試みも、筆者を始めオーストラリアやアメリカの人達によって進められています。いずれスペース・テレスコープが打ち上げられて質の良い観測資料が増えれば、発光理論の展開と相俟ってこの分野は飛躍的に発展することでしょう。

「図1で右下の部分は超新星爆発がおこっても中性子星になってしまうから放出されないのではないか?」という鋭い疑問を持たれる読者もおられることでしょう。その通りです。中性子星をもつかに星雲ではHが少なくHeが多いということ以外に顕著な化学組成の異常は認められません。ですから前の段落で述べたような超新星残骸は $10M_{\odot}$ よりかなり重い星の爆発によってできたものなのですが、実はそういう星の爆発のしかけがまだわかっていません。 $10M_{\odot}$ より重い星では図1でできたSi族も燃えて鉄(Fe)族まで合成されます。元素合成が進むと核エネルギー解放の能率が悪くなり、これが星の中心部の加速度的進化の一因なのですが、Feができてしまうと核エネルギーを発生させることができなくなります。原子核反応が止むわけではありませんから、これから先は吸熱反応がおこります。これまで外層の重圧に対抗してきた中心部はこの時点で核エネルギーの蓄えを使い果たし、逆に一度解放したエネルギーを取り戻し始めるわけです。結果は圧力の低下による重力崩壊です。よくわからないのはこの重力崩壊がどのようにして超新星爆発に転ずるのかという点です。中心部が中性子星やブラックホールになり、それを踏み台にして外層が吹き飛ぶのでしょうか?ニュートリノの輸送を考慮しても数値計算の結果ははかばかしくありません。又、重い星が爆発したとされる残骸の中に中性子星はほとんど見つかりません。一方、「超新星から放出された物質が輪の形をして膨張している」という観測的証拠を主張する人達います。星の回転が重要なのでしょうか?まだFeになっていない層での核融合によって発生するエネルギーの役割はどうでしょうか?そして、爆発のしかけによって、爆発の前後の急激な元素合成はどう影響されるのでしょうか。いずれも今後の研究に待たなければなりません。

3. I型の超新星

爆発のしかけがこの数年間に急速に明らかになりつつあり、元素合成にも大きく寄与するのではないかと今人気者になっているのがI型超新星です。I型とII型の超新星は可視光のスペクトルの特徴で区別するのが決まりです。Hのスペクトル線のはっきり存在すればII型、そうでなければI型です。I型はどんなハッブル型の銀河でも発生しますが、II型は楕円銀河では見つかり

ません。更にII型は渦状腕に集中しているけれどもI型はそうでもないということもあって、II型の元の星は図1に示したような重くて若い星、I型の元の星は軽くて古い星と考えられています。質量の岐れ目は $8M_{\odot}$ あたりにあるようです。 $8M_{\odot}$ より軽い星ではHeが燃えてCとOが合成されたあと、HとHeを主成分とする外層が放出され、裸になった $1M_{\odot}$ ほどの中心部は白色矮星となって冷えてゆくものと思われ、この白色矮星が連星系を構成していると、相手の星から質量を供給されて適当な条件の下ではI型の超新星爆発をおこすに至るといふ台本があります。

I型超新星の光度曲線はII型のものと違って、どれもよく似ています。図2のようにいくつかの光度曲線を重ねてもあまり散らばりが生じません。このことはI型の爆発にはひとつのしかけしかないことを暗示しています。図2で最大光度から40日以上経った時期の等級が直線的に減少していることに注目して下さい。爆発した星は膨張によって急激に熱エネルギーを失うために、爆発後もエネルギーが連続的に供給されていないと尾をひいたような光度曲線は実現されません。図2を見ると最大光度から40日以内の時期の等級も別の割合で直線的に減少しているようです。等級は星の光度の対数ですから、等級が時間的に一定の割合で減少することは光度が指数関数的に減少することです。このような特徴は放射性元素の崩壊のものと同じです。特に原子核を構成する陽子と中性子の総数(質量数)が56のニッケル(^{56}Ni)は半減期6.1日でコバルト(^{56}Co)にベータ崩壊し、 ^{56}Co は更に半減期77日で ^{56}Fe にベータ崩壊しますが、この2つの半減期は図2で等級が2段階で減少する時間尺度と良く一致するではありませんか。実際、詳しく計算してみると、 ^{56}Ni が最初に $1M_{\odot}$ ほどあると図2の光度曲線が非常によく再現されることがわかりました。1980年のことです。そんなに大量の ^{56}Ni や ^{56}Co や ^{56}Fe があるのならI型超新星の輻射スペクトルにその証拠が見られるはずですが。図3には1972年に出現した超新星SN1972eの爆発後255日目のスペ

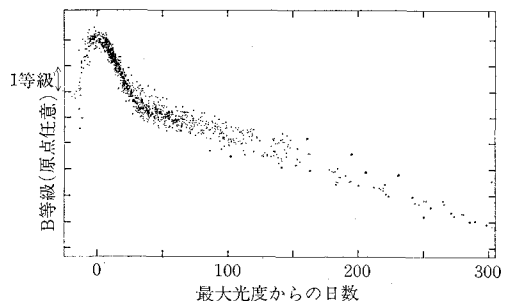


図2 38個のI型超新星の合成光度曲線。(Barbon et al., 1973, *Astronomy & Astrophysics*, 25, 241)

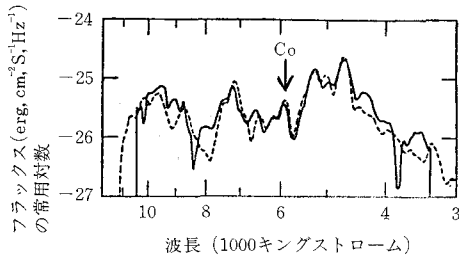


図3 I型超新星 SN1972e の爆発後255日目のスペクトル (実線) と $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ の崩壊モデルによる理論スペクトル (破線). 矢印は Co^{++} イオンの輝線を示す. (Axelrod, T. S., 1980, Proc. Texas Workshop Type I Supernovae, p. 80, ed. Wheeler, J. C., Austin, Univ. Texas)

クトルが実線で示してあります。破線は、始めに ^{56}Ni だけから成る一様密度の気体球が $\rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ と崩壊してエネルギーをガンマ線や陽電子として発生しながら膨張するときに期待される理論スペクトルを表わします。観測と理論予測は非常に良く一致しています。この時点では原子核は $1 - (1/2)^{255/77} = 90\%$ が ^{56}Fe になっていますから、スペクトルのうねうねとした形の大部分は ^{56}Fe の正イオンによる光の吸収と放射で決まっていますが、残り10%の ^{56}Co の影響も図3の矢印のところにちゃんと出ています。この素晴らしい博士論文も1980年に発表されました。

「もっと初期の ^{56}Ni が ^{56}Co に崩壊する時期のスペクトルはどうなんだ？」と意欲的な質問をなさりたい読者もおられることでしょう。観測されたスペクトルには、O, ナトリウム (Na), Si, カルシウム (Ca), Fe などの吸収線が見られます。爆発直後には星の物質の密度が高いので星の表面近くだけしか観測できません。結局、星の表面近くには Si 族などいろいろな元素があり、中の方には Fe 族が $1M_{\odot}$ ほど詰まっているということになります。偶然とはいえ地球内部の元素分布に似ているとはおもしろいではありませんか。そう言えば白色矮星は地球と同じくらい大きさでした。もっとも密度と質量は数十万倍大きいのですが。

白色矮星爆発説はこのような観測事実を説明できるのでしょうか。答は概ね「イエス」です。質量が $1.4M_{\odot}$ で C と O がその半分ずつをしめる白色矮星が比較的ゆっくりと爆発して超新星になった時に予想される化学組成分布が図4に示されています。爆発に伴う元素合成はゆっくりとは言っても約1秒間で完了し、星は全体が飛び散って中性子星は残りません。図4を見ると超新星の表面近く (図の右の方) には上であげたいろいろな元素ができており、中心付近には ^{56}Ni が $0.6M_{\odot}$ あります。めでたしめでたしです。恒星進化論の研究者と恒星大気論の研究者が祝杯を上げるため意気揚揚と繰り出

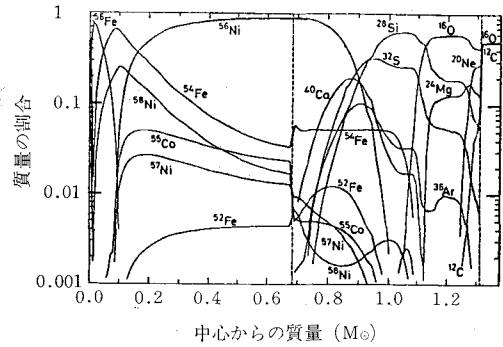


図4 CとOを主成分とする $1.4M_{\odot}$ の白矮星が質量降着のために比較的ゆっくりと爆発して超新星になった時に予想される化学組成分布. (Nomoto, K. 1984, in Proc. The Third Workshop of Advanced School of Astronomy: Stellar Nucleosynthesis, ed. Chiosi, C. & Renzini, A., in press (又はもう出版された?))

した後は、しかし、超新星の残骸を調べている人達が頭を抱え込んで残ります。

4. 行方不明の鉄

I型の超新星は私達の銀河系の中でもいくつか目撃されています。ケプラーとチコ・ブラーエが1604年と1572年にそれぞれ目撃したSN1604とSN1572 (SNはスーパーノバの頭文字) はとりわけ有名です。その当時はスペクトルの観測などももちろんできなかったのですが、明るさの変化の記録からI型であったと推定されているのです。1006年に出現して有史以来もっとも明るく輝いたとされるSN1006もI型であったと推定されています。これらの超新星は爆発してから日が浅いので、Feを主成分とする超新星物質はまだ爆発現場近くにあるはずですが、ところが奇妙なことに、これらの超新星の残骸が出す電磁波のスペクトルには $1M_{\odot}$ ものFeの存在を示すような証拠が何も無いのです。筆者はこれを「行方不明の鉄の問題 (ミッシング・アイロン・プロブレム)」と一人で勝手に呼んでいます。

中性子星が残らない超新星爆発の場合に、放出された物質が爆発から数百年を経ても電磁波を出すことができるのはそれが周囲の希薄な気体と非弾性衝突をするからです。まず超新星の表面の層の物質が周囲の気体と衝突して減速・圧縮され、運動エネルギーの一部が熱エネルギーに変わります。減速の結果この層の膨張速度は後続の層のものより小さくなり、後続の層は次々に追突して減速・圧縮・加熱の現象が超新星物質の中へ伝わってゆきます。高速道路で一台の車が急ブレーキをかけると数十台の車が連鎖的に追突するのと同じことです。一方、衝突された周囲の気体は超新星の物質に押されて加速・圧縮され温度が上がります。この加速された層はその外

側のまだ静止している層を押しますから、この加速・圧縮・加熱も周囲の気体の中を外向きに伝わってゆきます。ブルドーザーで雪をかいてゆくのにな似ています。超新星の物質は平均すると毎秒1万キロメートルという初速を持ちますが（ちなみに地球の直径は1万3千キロメートル）、そのような場合には両方の気体は百万度から十億度にも加熱され、主としてX線を放射するものと予測されます。実際、アインシュタイン衛星が撮ったチョコの超新星残骸のX線写真には2つの同心の殻が写っています。上の考察から、内側の殻が超新星の物質、外側の殻が周囲の気体と解釈するのが自然です。内側の殻の方が外側の殻より明るいので、もし超新星の物質の主成分がFeであれば、X線スペクトルには強いFeの輝線が現れるはずですが、ところがアインシュタイン衛星がケプラーとチョコの超新星残骸のX線スペクトルを観測したところFeの輝線は並の強さでしかありませんでした。SN1006のスペクトルに至ってはFeの輝線は並の強さどころか存在すらしませんでした。Feはどこへ行ってしまったのでしょうか？

ひとつの解釈は「超新星物質はまだその表面近くの層だけしか加熱されておらず、Fe（図4では ^{56}Ni ）が多い中の方はまだ冷たいのだ」というものです。表面近くの層にはSiや硫黄(S)などがたくさんありますが、実際にケプラーとチョコの超新星残骸のX線スペクトルではこれらの元素の輝線は並以上の強さを持っています。又、SN1006の残骸の背後には青い準矮星がありますが、この星のスペクトルを国際紫外天文衛星(IUE)で調べたところ、毎秒数千キロメートルの速さで膨張する冷たいFeによる吸収線(影)が発見されたという報告もあります。しかし一方では、X線を出している気体の質量は $1M_{\odot}$ よりかなり大きいという結果が得られています。チョコの超新星残骸の場合には、超新星物質が $2M_{\odot}$ で周囲の気体が $2M_{\odot}$ と見積られています。超新星物質の質量は化学組成の仮定のしかたによっては1桁ぐらいは下げられるのですが、そうすると力学的に具合の悪いことになります。「超新星の濃い物質と周囲の薄い気体が衝突をしている間、ある時刻までに加熱される部分の質量を比べると、前者は後者と同じくらいかそれより大である」ということを大学教養課程の流体力学を使って示すことができるからです。

ところで最近、筆者とイギリスのフェビアンはII型超新星の残骸の進化を調べ直しました。II型超新星は赤色超巨星の爆発であるということは前に述べました。このことは光度曲線の性質からも導かれます。一方、赤色超巨星からは1年に $10^{-6}\sim 10^{-4}M_{\odot}$ ぐらいの割合で物質が流れ出していることがわかっています。超新星残骸の観測からも「恒星風」が吹いていたという証拠が挙がって

います。「風速」は毎秒10キロメートルぐらいですから重い星が赤色超巨星でいられる時間、例えば10万年では数光年しか広がれません。そのような「星周物質」が $1\sim 10M_{\odot}$ 存在すると超新星残骸の流体力学的進化やX線放射がどのように影響されるかを明らかにするのが目的でした。その結果、「行方不明の鉄の問題」との関連でひとつおもしろいことが見つかりました。星周物質が更にその周囲にある気体よりはるかに高い密度を持っていると、衝突によって高温・高圧になった星周物質と超新星物質はその周囲の空間へほぼ自由に膨張し、そのために温度が急激に低下して超新星物質からのX線が一旦消える、という現象です。星周物質はその周囲の気体と衝突していますから外の方から再び加熱され、やがて超新星物質も再加熱されるのですがそれまでには数百年ぐらいの間が空きます。筆者はこれを超新星物質からのX線の阻ぎ(ラル)と一人で勝手に呼んでいます。I型の超新星の残骸への応用は簡単です。約 $1M_{\odot}$ の超新星の周りに約 $1M_{\odot}$ 、半径約1光年の星周物質があり、更にその周りに普通の星間気体の雲間成分のような気体があるとすると、超新星物質は一旦その大部分が1千万度以上に加熱された後、急激に断熱冷却してX線の阻ぎが約1千年の間続きます。この考えに立つとチョコの超新星残骸の2つのX線殻のうち内側の明るいものは実は星周物質だということになります。Feの輝線が並の強さしかないのは当然です。SiやSの輝線が強いのは、超新星物質の表面近くの層とレイレイ・テイラー不安定性(軽い油の上に重い水を乗せようとしても位置がひっくり返ってしまう現象)で混ざり合ったのでしょう。超新星物質が図4に示されているようにH、He以外の元素を主成分としていると、それは非常に効率良く電磁放射をして更に冷却するという結果も得られますが、これはSN1006の残骸で見つかった冷たいFeの気体の存在を説明するのに都合がよいです。膨張速度も説明できます。更に、冷えてしまったFeは密度が高いので再加熱されてもX線を出せるほどには温度が上がらないかもしれません。

I型超新星が星周物質をもっているという観測的証拠はいくつかあるのですが割愛します。残された問題は星周物質の形成です。質量は問題ありません。 $8M_{\odot}$ の星が $1M_{\odot}$ の白色矮星になるためには $7M_{\odot}$ を放出しなければならないのですから。しかし、放出された気体を星のごく近くに引き止めておけるものなのでしょうか？星間気体の圧力によっては可能かもしれませんが、連星系の相手の星からの質量放出の方が都合が良いのではないのでしょうか。惑星状星雲の形成の例からもわかるように、恒星からの質量放出は決して時間的に一定の割合でおこるものではありません。相手の星からの質量放出が活発に

なり星周物質が連星系の近くに溜まり、同時に白色矮星にも一部が降り積もってI型超新星爆発の引金を引く、というような台本は虫が良すぎるでしょうか。いずれにしても、恒星進化のフィニッシュとしての超新星現象を理解するためには、私達の創造力もこれからまだ2回ひ

ねり3回転宙返りくらいしないとイケないのかもしれない。

論文の別刷やプレプリントを送って下さった野本憲一さんに感謝します。

お知らせ

第3回 IAU アジア太平洋地域会議参加申込みについて

上記会議が来る10月1日から6日まで京都国際会館において開催されます。この会議のSecond circularおよび申込み用紙は、当該地域内のIAUメンバーおよび日本天文学会特別会員の方々には2月に発送済です。この会議に関心のある方で、参加申込み用紙の配布を希望される場合は、下記宛に書面で（電話ではなく）御申込み下さい。

〒606 京都市左京区北白川追分町
京都大学理学部宇宙物理学教室
石沢俊亮

山田科学振興財団よりの援助、申込みについて

昭和59年度の研究援助は募集開始59年9月、締切日60年3月31日です。詳細は本誌の10月号か11月号に掲載する予定です。他に下記の援助がありますので申請要領、申請書等御入用の方は直接

〒544 大阪市生野区巽西1丁目8番1号
ロート製薬株式会社内
山田科学振興財団 宛申込み下さい。
(電話 大阪(06)758-1231 呼出)

援助名	募集開始	締切日
来日 (60年4月~61年3月分)	59年4月1日	59年11月30日
長期間派遣 (60年4月~61年3月分)	59年4月1日	59年11月30日
短期間派遣	出発月の4ヵ月前の15日が締切日 (例: 59年10月出発の場合 59年6月15日が締切日)	
学術交流集会 (60年4月~61年3月分)	59年4月1日	59年9月30日

新刊紹介

Theory of the Earth's Shape (Developments in Solid Earth Geophysics, Vol. 13)

V. DRAGOMIR, D. GHITĂU,
M. MIHĂILESCU, M. ROTARU
Elsevier Scientific Publishing Company, 1982
(A5判, 694頁)

本の標題から判断すると測地学における地球の形という特定分野のみを取扱っているように見えるが、そうではなく、測地学そのものの高度な教科書である。原著はルーマニア語で書かれていて、本書は1977の改定版の英訳である。末尾の文献表を見ると、英訳に際して、かなりの加筆が行なわれたようである。

本書の構成は29章からなり、6部にわけられている。第1部では、ポテンシャル論と、天文観測と重力観測を用いてのジオイドの決定法が述べられている。第2部では規準楕円体上での2次元測地学、第3部では天文観測と測地三角網観測との結合が論じられている。ここまですべてが古典的測地学であって、本書の約6割があてられている。第4部では、人工衛星を有限距離にある規準点とする3次元測地学が議論されている。第5部では、主として人工衛星の運動を用いてグローバルな規準楕円体とジオイドの決定法が述べられている。第6部は、プレート運動も含む地殻変動の決定法が論じられている。

全体を通じて数式がかなり出てくるが、天下りではなく基本式からの導出がかなりていねいに述べられている。しかし筆者の専門とする人工衛星の力学が議論されている第25章は、Levallois and Kovalevskyの一般測地学の第4部の丸写しに近くて、かなり意味不明の式や文章が散見される。測定・計測技術についての記述はほとんどないが、観測の原理については、多数の図を用いて、わかりやすく説明されている。

本書は、面上の2次元測地学から、人工衛星・月を用いた3次元測地学へ、さらに時間的変動を考慮した4次元測地学へと発展しつつある測地学の総合的教科書である。

(木下 宙)