

宇宙に於ける惨劇：恒星が惑星を飲み込む

(筆者)

Garik Israelian

〈Instituto de Astrofísica de Canarias Via Lactea S/N, 38200 La Laguna Tenerife, Canary Islands, Spain〉

e-mail: gil@iac.es

(訳者)

伊藤孝士

〈国立天文台 天文学データ解析計算センター 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

この記事は、2001 年夏に nature に掲載された論文 (Israelian, G. et al. "Evidence for planet engulfment by the star HD82943", nature, 411, 163-166, 2001) の内容を元にし、原著者 (Garik Israelian 博士) が日本の一般読者のために書き下ろした解説です。HD82943 の「飲み込まれた惑星」についての情報については、以下のサイトからも得ることができます。 <http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2001/pr-10-01.html>

10^m クラスの望遠鏡、想像もつかないほど精密な観測機器、そして高速の計算機を装備して天文学者が宇宙について学び始めて以来、科学とフィクションの境界は曖昧になっている。21 世紀の入口に差しかり、私達は、19 世紀の SF 作家達であれば驚嘆したに違いない宇宙現象を目の当たりにしている。

最初の太陽系外惑星 (木星の半分の質量を持つ) が白鳥座の 51 番星を周回していることが発見されてから、7 年が経過した。現在、少なくとも 100 個に近い惑星が太陽と似た星の周りを回っていることがわかっている。私達の銀河系には何十億個という惑星が存在していることは疑いない。けれどもそういう惑星たちは、私達の太陽系の惑星たちと同様に安定に存在しているのだろうか？

私達は太陽がかなり安定な恒星であることを知っている。45 億年前に輝き始めて以来、太陽の表面温度 (5,500K) はわずかに 300K 上昇し、半径 (700,000km) は 4,000km 増加したに過ぎない。

太陽と地球の安定性は、地球上での生命進化の鍵となる条件である。生命の進化にとってもっとも大きな脅威となり得るものは、宇宙空間に存在する小天体の落下であり、原理的にはこれが惑星に於ける生物進化の連鎖を断ち切ってしまうことすらあり得る。幸いにして、そういうことは地球上では発生しなかった (地球に降って来た天体は生命進化の鎖を断ち切るほど大きくなかった)。だが今や私達は、まったく異なる種類の惨劇が、この生命の長い進化の道筋を最初の段階から容易に断ち切ってしまうことに気が付いた。惑星が母なる星に飲み込まれて破壊され、その生涯を終える可能性があるのである。

こんな風には書くとハリウッド製の SF 映画の一場面のように聞こえるかもしれない。けれども、HD 82943 という恒星を周回する惑星系に於いてこういうことが実際に生じたということが、今や信じられている。HD 82943 は私達の太陽と非常に良く似ている星であり、太陽系から 88 光年の距離、うみへび座に位置する。ジュネーブ太陽系

外惑星探査グループは最近、この HD 82943 を周回する二つの惑星を発見した。うち一個は主星から 1 天文単位（天文単位は地球-太陽間の距離）にあり、木星の 90% 程度の質量を持っている。もうひとつの惑星は一個目の惑星の二倍弱の質量を持ち、主星からの距離も二倍弱である。両方の惑星の軌道は共に長い楕円である。このことは、惑星間の重力相互作用が系の最終的な状況を定める鍵となった可能性が高いことを意味する。

惑星が飲み込まれる現象の議論を始める前に、ちょっと回り道をして宇宙の化学進化をおさらいしておくことにしよう。私達は、恒星系の化学進化という基礎に立って自分たちの知識を復習しておく必要がある。恒星系の化学進化は惑星系の形成と進化の理解のために大いに助けとなるからである。

化学物質の生成と進化

すべての水素、ヘリウム、重水素、そして少量のリチウムは、ビッグ・バンから 20 分以内に生成したと考えられている。このわずかな数元素の始原的な合成は、星の形成のための必要条件であった。そして、重力によって薄く広がった物質が集まって収縮し、最初の星が誕生した。最初の原始星はビッグ・バンに於いて生成された化学物質から構成されていた。しかし、星はその進化の過程で、水素とヘリウムの一部を燃やし、より重い元素である酸素、炭素、窒素、ナトリウム等を合成した。

水素の熱核反応には少なくとも 1,000 万度の高温が必要であるが、この温度は更に重い元素（鉄、コバルト、ウランなど）を作り出すほどには熱くない。こうした重い元素は、宇宙に於いてもっとも激しいイベントである超新星爆発によって作り出される。太陽質量の 8 倍以上の質量から進化を開始する星の寿命は短く、その生涯の終わりには超新星爆発を起こし、超高密度の中性子星あるいはブラックホールを残す。星の質量程度のブラックホールは、新しい世代の星を産み出すための物

質を供給しない。なぜなら、そうしたブラックホールは 10^{65} 年という極めて長い寿命を持っているからである（非常に重いブラックホールは驚いたことに 10^{100} 年の寿命を持っている！）。

超新星爆発によって星間空間に放り出された物質は、周期表に載っているほとんどすべての元素を含んでいる。第二世代の星は、ビッグ・バンにより形成された物質、および第一世代の星の燃焼過程により形成された物質の双方を含んでいる。第三世代の星は、これら第二世代の星が燃えた“灰”などから出来ている。星の世代が次々と進むにつれて“金属”成分（天文学者はヘリウムより重い元素をすべて金属と称する）は増えて行く。こうした化学的なサイクルは、宇宙に於けるすべての物質、即ち、惑星、褐色矮星、ガス、塵、そして銀河全体を含む物質がブラックホールに飲み込まれるまで継続する。

およそ 10^{50} 年の後、宇宙は「ブラックホールの時代」へと突入する。この「死」の時代がどの程度継続するのかはまだ良くわかっていないが、多くの宇宙物理学者は 10^{100} 年以上はブラックホールが宇宙を支配するであろうと考えている。その後何が起こるのか、私達は予想する勇気がない……。

どんな銀河の中にも、異なる質量、異なる年齢、異なる世代の星がどの時点でも存在し得る。私達の銀河系の推定年齢は 120 億年から 180 億年という幅を持っている。天文学者はまだ第一世代に属する星（金属を含まない星）を発見できていないが、ごく最近、金属含有量が太陽の 1/10,000 以下の星達が発見された。銀河系の金属量の増加が非常に迅速に進行したことは興味深い。銀河系の進化の最初の 20 億年で、星間物質中の様々な金属の原子の数は 1,000 倍程度に増大した。従って原理的には、10 億年から 100 億年の年齢を持つ星はどれも同じような数の金属原子を保有している可能性がある。

しかしながら、少なくとも二つの理由でこの

枠組は明らかに単純化し過ぎである。まず第一に、様々なタイプの超新星は異なる量の酸素、鉄、ウランなどを放出する。第二に、太陽型の低質量星は少なくとも 100 億年は輝き続けるのに対し、質量が大きな星はせいぜい数百万年しか輝き続けない。このことは、質量の大きな星こそがすべての重元素の生産と物質の循環の主要な原因であることを意味している。或る種の星が他では見られない元素の存在量比を持つことを説明する際には、こうした事情を考慮する必要がある。けれども、星の化学組成をその光から推定するにはどうすればよいのか？ また、そのような推定はどのくらい正確なのだろうか？

星に関して私達が集めるほとんどすべての情報は、星の「大気」（星の外側を覆う部分であり、ここから光子が放たれて観測者に届く）が生成する放射の分析から得られている。太陽の大気はわずかに厚さ 100km であり、太陽の半径と比べると大変に薄い。けれども、この薄い外層部分は、私達が直接見ることができない星の非常に深い層について多くを語ってくれる。星の大気は観測と理論を繋ぐリンクなのである。20 世紀を通じて天文学者は、星の大気の構造、および星の力学的性質や化学的性質を知るために、星の光を分析するとても洗練された方法を編み出して来た。そうした方法によって、標準的な太陽型の星の大気の化学組成の推定が 10% から 20% の精度で可能になっている。様々な太陽型の星では元素存在量が千倍も違い得ることを思い出すと、このことは非常に印象深い。元素存在量に関する膨大な量の計算と結び付いた何千何万という観測が、星や銀河の化学進化に関する現在の私達の見方を形作ったのである。元素存在量の世界に於いてはカオスは存在しない。例えば、大気中に酸素よりもウランを多く含む星は存在しないし、これには強固な理由がある。異なる世代、異なる質量の星に於いて観測される元素存在量のパターンが似ていることもない。

惑星質量の伴星を伴う星は、惑星を持たない星に比べて大気中の金属量が多い

太陽系外惑星が最初に発見された後すぐに明らかになった最も重要な結果のひとつは、惑星系を持たない星に比べて、太陽系外惑星の母星の大気にはより多くの金属が含まれているということである。なおここでは、現在の惑星探索計画ではまだ感度が足りないために、木星のように大型で、かつ短い周期で高速に軌道を周回する惑星を専ら探しているという事実に留意する必要がある。現在までに知られている太陽系外惑星系が私達の太陽系とは非常に異なった姿のものばかりとなっているのは、この理由による。木星－太陽間の距離よりもずっと母星に近いところを周回する大質量の惑星が多く発見されているのである。従って、太陽系外惑星の主星について現時点で私達が言えることを、様々な特質を持つ一般の惑星系（例えば私達の太陽系）へと敷衍することは、観測精度の限界からまだ出来ないということである。

太陽系外惑星系の主星の化学進化を研究することにより、惑星の形成と進化について何を知ることが出来るのだろうか？ 惑星を持つ星と持たない星を比較すると、惑星を持つ星の方が大気中の金属原子が平均して二倍も多い。この観測事実に関する可能な説明は少なくとも二つある。ひとつは、惑星は大概の場合に、金属に富む原始惑星系円盤を持つ金属に富む星の周囲で形成されるというものである。この仮説は巨大惑星形成の古典的理論、即ち地球質量の十倍ほどの原始惑星の上に原始惑星系円盤ガスが暴走的に集積することによって木星のような巨大ガス惑星が形成される、という理論に基づいている。木星のようなガス惑星の核は、小さな小惑星サイズの微惑星（金属を含む固体粒子の集合

体で、少なくとも km サイズ) の集積によって形成される。金属含有量が多い原始惑星系円盤内ほど、微惑星の形成確率も高い。もしこの仮説が正しければ、銀河系の生涯の初期、星や星の周りの円盤がまだ金属に乏しい時代には、惑星の形成が行われなかったと推測できる。また、金属含有量の乏しい銀河には惑星がまったくあるいはほとんど無いということになる。

観測される金属量超過に関してはもうひとつの説明が存在する。惑星や微惑星の落下によって星の大気が「汚染」されて来たというものである。惑星や微惑星の集積による金属量増加の起源についての鍵のひとつは、奇妙なことに、太陽系の地球型惑星と木星型惑星の金属含有量の違いにある。落下する惑星の組成が星の大気と同じものである。星の金属含有量は変わらない。10 地球質量の金属核と 308 地球質量の水素-ヘリウム外層を持つ木星は、太陽の二倍の金属含有量を持つ。このことは、太陽が木星を二個飲み込んでしまうと、太陽大気の金属含有量は 20% 増加するということを意味している。飲み込まれた物質の希釈に関しては興味深い問題がある。集積した物質は星の体積全体にわたって混合されるのではなく、表層の対流層に留まるということが重要になるのである。対流層にある大気は急激に沸騰した湯のように泡立っており、大気の上層から下層へ物質を輸送する。対流層の質量は星の年齢と質量に強く依存している。太陽について言えば、対流層の質量は全質量のわずか 3% に過ぎない。星の進化の最初の 3000 万年のうちに対流層は急激に縮小して質量を失うので、物質が飲み込まれるタイミングが決定的に重要となる。物質があまりに早い段階で飲み込まれても、その後の進化に於いて星全体という大きな体積の中で希釈されてしまうだろう。

惑星を持つ星と金属含有量の分布の観測結果を説明する際、惑星集積のシナリオは困難に陥る。観測によれば、惑星を持つ星ほど金属含有量が非

常に高い。惑星を持つ星の 70% 以上は、太陽に比べておよそ 1.6 倍もの金属を含んでいる。その一方で、太陽の 3 倍以上の金属を含む星が発見されないという事実を対流層の「汚染」シナリオという見地で説明することは難しい。

太陽型で質量が太陽の 20% くらいの星は、質量比にして 10 倍も違う対流層を持っている。にも関わらず、このような軽い星の大気にも太陽と同様な量の金属の存在が観測されている。このことから、星の質量という指標とは独立に、惑星の形成過程に於いて金属含有量を調節する未知の機構が存在しているのかもしれない。

惑星集積シナリオの検証という意味では、金属含有量に基づくアプローチは様々な不確定性に晒されていることに留意する必要がある。より確かな方法があるとすれば、標準的な星の大気には無いが、惑星を飲み込んだ星の大気には存在する元素を探すことである。その意味で、リチウムの軽い同位元素である ${}^6\text{Li}$ は惑星集積過程の優秀なトレーサーになり得る。

リチウムには、異なる温度での核反応によって崩壊するふたつの同位体がある。 ${}^6\text{Li}$ と ${}^7\text{Li}$ が崩壊する温度はそれぞれ $2 \times 10^6 \text{K}$ と $2.5 \times 10^6 \text{K}$ である。星の大気中での対流が上層にあるリチウム核をより深くて熱い層へと運び、そこでリチウムは急激に壊される。若い星は全体にわたって対流しており、始原的なリチウム核のほとんどは星の内部でわずか数百万年のうちに燃え尽きる。太陽型の星および太陽と同程度の金属含有量を持つ星の多くは、初期の大気にあった ${}^7\text{Li}$ の多く (50%, あるいはそれより多量) を保持している。いずれの場合も、初期に存在した ${}^7\text{Li}$ 核のうち 20% ほどが対流により壊されてしまうと、大気の混合過程を生き延びられる ${}^6\text{Li}$ はほぼ確実に存在しない。かくして、太陽型あるいは太陽と同程度の金属含有量を持つ星で、 ${}^7\text{Li}$ を持っている星は多く発見されているが、 ${}^6\text{Li}$ を持っている星は知られていない。ここで私達はしばしば「太陽と同程度の金

属含有量」という言い回しを強調する。これは、星の対流層の深さは星の質量とその金属量に依存するからである。

惑星の質量はせいぜい木星の12倍から14倍以下であり、その内部温度は ${}^7\text{Li}$ や ${}^6\text{Li}$ の核を燃やし尽くすほどに高くは決してならない。従って、対流層が縮小した（対流層下部が、深くて熱い層まで到達しなくなった）後に惑星を飲み込んだ星の大気を高分解能の分光観測により観測すれば、 ${}^6\text{Li}$ が発見されるであろう。惑星飲み込みシナリオに関するこの“ ${}^6\text{Li}$ 試験”は、少なくとも太陽質量の10%より大きな質量を持つ星に対して適用可能である。と言うのも、惑星を飲み込むことによって得た ${}^6\text{Li}$ の核を保存しておけるほど十分に薄い対流層を持っているのはこのような星だけだからである。一方、対流層の縮小には1,000万年から3,000万年の時間が必要とされる。従って、あまりにも早い段階、すなわち対流層の底が ${}^6\text{Li}$ の核を効率的に破壊するような高温に達しているような時期に惑星が飲み込まれてしまうと、 ${}^6\text{Li}$ の核を検出できないということもまた明白である。

ここで、次なる疑問が直ちに発生する。そもそも私達はどうして、惑星または微惑星が母星に飲み込まれたと考えるのだろうか？そして、この過程はいつ発生したと思われるのだろうか？

惑星を食べる星

惑星形成の古典的理論（上述）では円に近い惑星軌道が予期され、木星のような大惑星が星から2～3天文単位以内の場所で形成されることを許してはいない。けれども、現在の天文学者はまさにそのような状況を観測している。巨大惑星をその形成初期の位置（現在の木星軌道あたりの場所）から現在の位置、つまり太陽と水星の距離よりも近い場所に移動させるための幾つかのモデルも提唱されている。標準的な惑

星円盤モデルによると、0.1天文単位よりも近い場所での温度はおよそ2,000 Kであり、これはどんな固体微惑星（惑星を作るブロック材のようなもの）をも蒸発させてしまうに十分な温度である。そのような類の惑星の移動は、惑星が誕生してから1,000万年ないし2,000万年程度のうちに生じるとされる。

そうしたモデルによって知られるようになったメカニズムのひとつによれば、円盤の物質が粘性（流体の摩擦）によって内側に移動するのだから、惑星だって内側に移動するに違いないということになっている。若い星の周りの原始惑星系円盤内に於ける降着流は、新しく生まれた惑星を内側に引っ張るであろう。それに加え、円盤内での惑星の運動が密度波を励起し、それによってトルクが発生する。これにより、惑星軌道の内側と外側に物質が移動し、円盤にギャップができる。ひとたびギャップが形成されると、惑星は円盤に固定され、いずれは円盤と共に母星に飲み込まれてしまう。惑星がそのガスの外層を集積し、星が円盤の残存物質を集積するにつれ、内側への惑星の移動を維持するのに必要なガスが円盤内では欠如するようになる。

この時点から、今までとは異なる惑星移動のメカニズムが働き出す。惑星は、その形成過程に於いて取り残された夥しい数の微惑星と重力的に相互作用し始め、その相互作用が惑星の移動の引き金になるのである。惑星移動の時間スケールは円盤内にある微惑星の総質量に依存するが、数千年から数十億年である。

惑星の内側への移動過程を止めるために、理論家は様々なメカニズムを提唱している。円盤の最内部分をきれいに掃いてしまう強力な星の磁場などである。けれどもこの磁場モデルは、その「きれいな」領域よりも十分に外側にある惑星の存在を説明できない。星の近くにある微惑星やガスが散逸してしまうと（固体物質は星の近くで熔融する）、星を抱くかのような近接軌道を周回すると

いう状況でもって、惑星の移動過程は停止するであろう。

もうひとつの重要なメカニズムは、巨大惑星間での重力相互作用に関するものである。もしも原始惑星系円盤が通常の場合よりも長く持続するか、あるいは通常の場合よりも多くの物質を保持しているならば、原始の惑星は木星質量の数倍以上の質量を獲得するであろう。惑星が質量を獲得して太るにつれ、惑星の軌道半径は様々な類の軌道不安定を発生しながら進化する。惑星たちは、お互いの軌道が交差するまで摂動を及ぼす。このように、ひとつあるいは複数の惑星が系外に放出されるか、母星に飲み込まれるまで、惑星の軌道はカオスのかつ予測不能的に進化する。こうした劇的な変化の結果、惑星の軌道は非常に扁平になる。系の最終状態は初期条件、つまり惑星の数や軌道パラメータなどに強く依存する。こうした過程は5,000万年を越える時間スケールで生じる。

二個の巨大惑星を持つ星、HD82943の系に話を戻そう。筆者らのグループ（筆者 Israelian, Santos, Mayor, および Rebolo）は、チリにあるVLT 8.2m鏡の1台を用いた観測で、この星の大気中に大量の ${}^6\text{Li}$ を発見した。この大気中のリチウムの量から、この星の熱い内部で死を迎えた第三（あるいは複数の）惑星が存在したと私達は推論している。この星はかつて二倍の木星質量あるいは三倍の地球質量の惑星（共に同量の ${}^6\text{Li}$ を含む）を飲み込んだ可能性があるのである。この星は太陽よりも

10% 重く、モデルによれば、対流層の底は惑星を飲み込んだことによる ${}^6\text{Li}$ が保存される温度にあること、少なくとも ${}^6\text{Li}$ の大半が消失してしまうような高温にはないことが予測されている。この種の観測をより多く行うことにより、今回のシナリオに対して更なる制約を与えることができるであろう。

訳者からの謝辞：本稿の翻訳に際しては、京都大学の太田耕司さんと国立天文台の青木和光さんから数多くの貴重な御意見を賜った。この場を借りて深く御礼申し上げたい。

Cosmic catastrophe: star swallows planet

written by Garik ISRAELIAN

translated by Takashi Iro

Abstract: We have found a large amount of ${}^6\text{Li}$ in the atmosphere of a star HD 82943 which harbors two planets. From the amount of lithium in the star's atmosphere, we infer that there was a third planet (or several planets) that died in the hot interior of the star. The star could have swallowed a planet with a mass of about 2 Jupiters or 3 Earths. Based on our original publication (Israelian et al., nature, 411, 163-166, 2001), here we introduce the several features and background motivation of this study to the general readers in Japan.