

連載

恒星天文学の源流【16】

星の進化論とHR図表 その5

～熱核反応と星の進化論～

小暮智一（元京都大学）

1920年代、エディントンによって星のエネルギー源として何らかのサブアトム反応が必要であると知られるようになったが、具体的な過程は未知であった。1928年にガモフ、アトキンソンらによって反応過程解明への端緒が得られ、1930年代後半に星のエネルギー源として核融合反応が発見された。今回はこの時代に星の進化論に大きな足跡を残した、ハンス・ベータ、フォン・ワイゼッカー、ジョージ・ガモフの3人の生涯と進化論への寄与を辿って見よう。1930年代末は第2次大戦の時代にもあたり、また、戦後は冷戦時代となって深刻な核戦争の脅威にさらされていた。ベータやワイゼッカーはその当事者でもあったので脇道にそれるが、それにも少し触れてみたい。

12. ハンス・アルブレヒト・ベータ (Hans Albrecht Bethe, 1906 - 2005)

12.1 その生涯

ベータは1906年7月、当時ドイツ領だったシュトラスブルクで生まれた。母はドイツ系ユダヤ人であったが、ハンスは父に従ってキリスト教徒になった。フランクフルトのヨハン・ウォルフガング・ゲーテ (Johann Wolfgang Goethe) 大学で物理学を学び、博士課程はミュンヘン大学でアルノルト・ゾンマーフェルド (Arnold Sommerfeld) の指導を受けている。1929年から1933年までミュンヘン大学に勤務し、固体および結晶物理学の分野で大きく貢献している。

ベータ家はユダヤ系であったため、ナチス

が政権を握った1933年に英国に逃れ、1935年にアメリカに亡命する。ニューヨーク州中部の町イサカ市にあるコーネル大学の物理学教授に招聘され、1975の定年まで勤めるが、退職後もこの大学で没年の2005年まで研究を続けていた。コーネルに移った1935年から38年にかけては、もっぱら核反応の研究を進めていた。この間に彼は星のエネルギー源に大きな興味を持つようになったが、それについては次節で述べよう。

1937年、講義のためにデューク大学を訪れ、物理学教授のエワードと親しくなった。その折、教授の娘ローズ・エワード (Rose Eward) と巡り会い1939年に結婚した。2人は大学のあるイサカ市に住み、2人の子供をもうけている。ベータは2005年3月に心臓発作によりこの地で死去した。享年98歳であった。

第2次大戦中が勃発すると彼は戦争に協力する立場をとり、ロバート・オッペンハイマー (Robert Oppenheimer) がニューメキシコ州のロスアラモスに秘密兵器研究所を開設したとき、それに加わった。原爆製造のためのマンハッタン計画においてベータは理論部門の部長に任命され、ウラニウムの爆発的連鎖反応を起こすのに必要な臨界質量の計算などに当たっていた。

戦後はアメリカ連邦政府の科学技術関係の政府委員や顧問として、政策の実施にも参加しているが、水素爆弾の危険性を表明するなど、平和への志向を表している。冷戦時代における平和論については後述しよう (12.3節)。なお、伝記についてはコーネル大学ホー

ムページなどを参照した ([92], [93])。

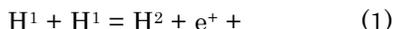


図 33 ベーテの肖像 [93]

12.2 核反応と星のエネルギー

1938年4月、ジョージ・ガモフ(第14節)はワシントンで星のエネルギー源に関する会議の開催を内外の天体物理学、核物理学分野の研究者に呼びかけた。この会議には両分野から10名ほどの参加者があったが、その中にハンス・ベーテも加わっていた。彼はそれまで星のエネルギーについてはほとんど無関心であったが、この会議で大いに触発されたという。彼は直ちに天体物理学の習得に入り、半年後にはエネルギー問題の検討に入った。その成果は翌年(1939年)の3月に第1の論文[94]として表れている。この論文は次に述べるような水素からヘリウムを合成する反応の考察であるが、それには2つのプロセスが可能であると考えた。

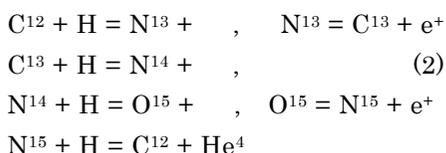
第1は陽子-陽子反応である。基本的な過程は



と表される。ここで e^+ は陽電子、 γ はガンマ線である。この反応は標準的な星中心状態(温度2000万度、密度80 g/cc、水素存在比

35%)で線として毎秒、1グラムあたり2.2 ergのエネルギーを発生する。しかし、(1)式で得られた重水素(H^2)から He^4 を合成するには Li^5 への変換を通して陽子を捕獲する必要がある。ベーテは最初 Li^5 が不安定と見積もったため、リチウムより重い元素合成はできないとして、陽子-陽子反応は当分放置された(後述)。

第2は炭素・窒素反応(後にCNOサイクルと呼ばれる)である。 He は次のサイクルによってHから合成される。



このサイクルが一巡すると4個のHから He が合成される。ここで C^{12} は触媒として働き、サイクルは元に戻る。ベーテはこのサイクルが星のエネルギー源として有効に働くために必要な中心温度を計算し、それを代表的な星の観測値と比較した。それを表2に示そう。この表で観測値の光度、中心密度、水素存在率はストレングレン(Strömgren [95])の値を採用し、中心温度はエディントンモデル[72]による値を用いている。

表2の結果について彼は「極めて満足できるものである」と述べているが、それには条件があって、この反応過程は主系列星に対してのみエネルギー源として適用できる。その理由は表2のカペラの中心温度の不一致に見られる。なぜなら、カペラは巨星であって、エディントンモデルによると巨星の中心温度は600万度、中心密度は 0.16 g cm^{-3} であるから、温度が低すぎてCNOサイクルでは説明できない。このような低い温度で可能な熱源としては



が考えられるが、 Li^7 がなぜ巨星に存在でき

表 2 炭素・窒素サイクルによる中心温度と観測との比較 [94]

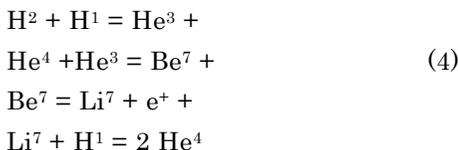
星名	観測モデルから得られた推定値				CN 反応による 中心温度 100 万度
	熱生産率	中心密度	水素存在率	中心温度	
	erg/g/s	g/cm ³	%(質量比)	100 万度	
太陽	2.0	76	35	19	18.5
シリウス A	30	41	35	26	22
カペラ	50	0.16	35	6	32
U Oph A	180	12	50	25	26
Y Cyg A	1200	6.5	80	32	30

るのかは未解明であった。ベータは巨星の熱源には困って、重力収縮が主な熱源ではないかとまで考えたりしている。

当時の核反応理論では水素からリチウムより重い元素の合成は困難であった。そのため、ベータは重い元素はすべて星の誕生以前に合成され、ラッセル組成と呼ばれる宇宙の元素組成はすでにそのときから成立していたと仮定した。従って、星が誕生した後の進化で核反応として進行するのはただ H から He への合成のみとなる。

こうしてベータは CNO 反応を発見したが、巨星の熱源に適用できないこと、重い元素の存在を前提にせざるを得ないことなどに問題が残る、また、陽子-陽子反応についても課題が残っていた。

このうち、陽子-陽子反応についてはガモフの弟子であるクリッチフィールド (C. Critchfield) によって基本的な解が得られたのでベータは共同で論文に仕上げた ([96], [97])。それは(1)式で与えられる陽子-陽子反応に続いて He⁴ を合成する次の反応サイクルが見出されたからである。



このサイクルは 1500 万度程度のときに有効に働く。ベータは最初、太陽中心温度としてエディントンの導いた 4000 万度を信用したため、上のサイクルは太陽で期待される反応速度に比較してあまりにも高すぎるとして、熱源としてのサイクルの可能性を疑っていたのであった。また、(4)式の第 3 式に現れるニュートリノは太陽ニュートリノの起源としてのちに観測と比較される項である。

ベータは 1967 年にノーベル物理学賞を受賞しているが、受賞理由は多くの研究業績のなかで「原子核反応理論への貢献、特に星の内部におけるエネルギー生成に関する発見」であった。



図 34 ノーベル賞授賞式におけるベータと妻のローズ[91]

12.3 「ロスアラモスからの道」

ベーテの戦後の活動は 1991 年に出版された「ロスアラモスからの道」[98]で辿ることができる。これは「原子科学者通報」、「サイエンティフィック・アメリカン」、「アトランティック月報」などの雑誌や、ニューヨークタイムス、ワシントンポストなどの新聞に掲載した記事を事項ごとに編集したものである。事項としては「核爆弾」、「兵器管理」、「勧告と異議」、「核力」、などがあり、そのほかに 5 人の物理学者の紹介や、天体物理学の解説なども含まれている。



図 35 ロスアラモス市に建てられたブラッドベリー科学博物館。マンハッタン計画の研究の歴史、原爆開発の歴史や、貴重な文書なども展示されている[99]

ベーテは戦後、アメリカの核兵器関係の政府顧問として政策に加わり多くの意見書や勧告を出しているが、時代は激しい東西対決と「鉄のカーテン」下での核兵器開発競争の最中であつた。平和への願いと核戦争への恐れとが交じり合っていたからベーテの対応は苦渋に満ちたものであつた。例えば、サイエンティフィック・アメリカン誌に書かれた「水素爆弾」という記事(1950)がある。ビキニで水爆実験の行われる 4 年前である。彼もソ連で

秘密裏に進んでいる水爆計画に強い危惧を抱いていたが、アメリカでの推進計画が当時のトルーマン大統領の決断で進められることになったときは、反対意見を述べている。彼は水爆の威力と恐怖について次のように世論に訴えていた。

「計画中の水爆は広島型原爆の 1000 倍の威力を持っており、その爆発波と熱波は瞬時に半径 50km の人畜を殺傷し、放射能はさらに広い範囲で瞬間的と永続的な被害を与えるであろう。人類にとって道徳的にも多大な害となる。・・・戦後アメリカ国内においても日本への原爆投下は誤っていたという感情が広がっており、私もそう考えている。・・・」

しかし、1950 年に朝鮮戦争が勃発すると冷戦の危機が一挙に高まり、ベーテもついに水爆製造に一役を担うようになった。

ドイツ生まれでオープンハイマーやハイゼンベルクらとも親しかったサイエンスライターのリロベルト・ユンク (Robert Jungk) はその著「千の太陽よりも明るく」(1956, [100]邦訳あり)のなかで原子科学者の社会的責任を厳しく批判している。ベーテも著書の中でユンクの書評を行い、彼の論調に同感しつつも、アメリカの当事者としてオープンハイマーやテラーらの核兵器推進者の責任を擁護する姿勢もにじませている。ベーテは 1955 年頃、ユンクに対し次のように述べている。

「わたしは内心の不安に付きまといわれ、依然としてそれから離れることができないことを、遺憾ながら告白せざるを得ません。わたしはこの問題(水爆に協力したこと)をなお解決してはいないのです。わたしは相変わらず自分が過ちを犯したという気持ちがあります。しかし、わたしはそれをやってしまったのです。」

また、「科学と道徳」(1962)の記事はコーネ

ル大学の民主主義研究所のマクドナルド (D. McDonald) によるインタビューに答えたものであるが、その中でもベーテは科学者の責任について率直な意見を述べている。例えば、「(核兵器の開発について)、アメリカの核物理学者の間に統一した反応はみられないのですか？」という問いには「科学者の意見は両極端にまたがっている。(なかには) もっとも恐るべき兵器でも、その結果を考えることなく開発を進めるべきだという人もいる。・・・(科学者はそれぞれ社会に対して影響力を持っているが、軍当局や議会に向けた意見の影響力が大きい。・・・) 私に言えることは軍事に関する事項について政府や各委員会はその平和維持の視点から望ましいものであるか、将来前進できるものかどうか、良心的な判断を下すべきであると信じているということである。」このインタビューの最後にベーテは次のように述べている。

「(これまで述べてきたことは科学ではなく主に技術の問題であった。) 技術はわれわれの生活に巨大な影響力を持ってきた。残念ながら軍事技術が特に際立っている。軍事技術は人々を大きく混乱させてきた。今でもそうである。われわれはまだ正しい対応を見出していない。それを見出すのは科学ではなく、人間性(道徳的な) 価値の見直しから由来すべきである。」

この反省はベーテの戦後における平和活動、とくに軍縮問題への取り組みの背景となっている。「ロスアラモスからの道」は厳しい冷戦時代を生きた良心的なアメリカ人の記録となっている。

13. カール・フリードリッヒ・フォン・ワイツェッカー (Carl Friedrich von Weizsäcker, 1912 - 2007)

13.1 その生涯と人柄

ワイツェッカーは外交官のエルンスト・フォン・ワイツェッカーの息子としてドイツ北部のキールで生まれた。叔父のリチャード・フォン・ワイツェッカーは元ドイツ大統領、祖父はビュルテンベルグ王国の首相カール・ヒューゴ・フォン・ワイツェッカーという名門一家である。父が外交官で各地に転勤したため、カール・フリードリッヒもそれに伴って移動し、スツットガルト、バーゼル、コペンハーゲンなどで成長した。1929年(17歳)からベルリン大学でハイゼンベルグの指導で物理学を学び、その後、コペンハーゲンでニールス・ボーアから原子物理学の薫陶を受けている。

ワイツェッカーはその著「人間的なるもの庭」(1977, [101])の最後に「自己紹介」という章をおき生涯の思い出を語っているが、これは生活や仕事の伝記ではなく、自らの精神史といえるものである。そのなかで若き日のエピソードを2つ語っている。

1つは父がスイスのバーゼルでドイツ領事をしていた頃でカール・フリードリッヒは12歳であった。祭りの踊りの列からはなれて「すばらしい星空の夜の中に逃れ出た。」「星空のえもいわれぬ素晴らしさの中には、何らかの仕方で神が現在していた。・・・同時に私はあの星々が物理学の諸法則を充足している原子から成り立つガス球であることも知っていた。」「(星と神の) 二つの真理の間の緊張は、解明できないものであるはずがない。」という体験である。

もう1つはそれより1年ほど前に新約聖書の拾い読みを始めていた頃の話である。あるとき、「山上の説教の真理は私の心を打ち、私をひどく狼狽させた。もし、ここにあることが真であるなら、私の生活は間違っていたのだ。」「深い宗教的感動に浸っていたある夜のことであったが、私は神への奉仕に自分の生涯を捧げる約束をした。」「(そのためには)

牧師となることしか考えられなかったが、私はやはりむしろ天文学者になりたかったのである。」

このような体験や宗教的精神はワイツゼッカーの生涯を貫いた大きな幹となっている。しかし、それにもかかわらず彼は第2次大戦中、原爆製造という任務を遂行しなければならなかった。



図 36 ワイツゼッカー(1993年)の肖像
(Carl Friedrich von Weizsäcker
- Wikipedia, the free encyclopedia)

ここで大戦中のワイツゼッカーについて一言触れておこう。彼の「自己紹介」によると、1939年のクリスマス、ベルリンにいた彼にハイゼンベルクから原爆製造の可能性について打診があった。それを受けて翌年、彼はハイゼンベルクとともにカイザー・ウィルヘルム研究所の物理学と化学研究部門を統合して「ウラン・プロジェクト」を立ち上げた。しかし、1年余りたった頃、彼は「原爆製造ということはわれわれの可能性をはるかに超えることを認識した。そしてわれわれは(核)反応炉模型についての仕事に集中したのである。」

しかし、アメリカではワイツゼッカーが核兵器開発に取り組んでいることに大きな脅威を感じていた。アインシュタインは1939年と1940年の2回にわたってルーズベルト大統領に手紙を送り、ワイツゼッカーを責任者

とするドイツの開発能力の高さを指摘していた。その手紙がアメリカにおける核兵器開発の原動力になり、マンハッタン計画の発端になったことはよく知られている。ワイツゼッカーは戦後、ステファニア (M. Stefania) のインタビューのなかで「われわれは原爆を作らなかったが、世界初の原子炉を製造したことを誇りに思う。」と述べている[102]。

戦争終結後、1年間、英国に拘束されていたが(このときに日本への原爆投下の事実を知らされたという)、1946年に許されて帰国し、ゲッチンゲンのマックス・プランク研究所の物理学部門の部長として復帰する。1957年から69年まではハンブルク大学の哲学教授を務め、1970年から80年までは彼のために設けられたマックス・プランク研究所の「現代世界における生存条件」部門の部長に迎えられ、核戦争の危険と脅威からの脱却を目指す軍縮、平和問題と取り組んだ。また、このころ、インドの宗教家ゴピ・クリシュナ (Gopi Krishna) と協力して「西洋科学と東洋の知恵」財団を設立して、哲学の幅を東洋思想にまで広げている。1980年に定年を迎えたが、その後も物理学を始め、哲学、社会学、宗教の分野で多くの業績を残している。

ワイツゼッカーは2007年、病を得て永眠した。享年94歳であった。その一生を振り返るとその姿は巨大な一本の樹木のような。物理学という太い幹の周りには哲学、宗教など広い分野での活躍が緑の葉を広げている。「世紀の巨人」という献辞も誇張ではない。なお、伝記は主に[101]、[103]によった。

13.2 熱核反応と星の進化

ワイツゼッカーもベーテと同じように星の熱源としてのCNOサイクルを1937年に発見しているが、発見を伝える論文([104, 105])はベーテの論理的、数量的な扱いに較

べて、思索的、探求的である。彼は星の内部で進行する熱核反応を吟味し、それらが観測されている水素量とどのような関係を持つかについて考察している。彼はまず星内部の水素相対量は陽子-陽子反応で重水素と陽電子を生じ、ガンマ線を放出する熱核反応 (1) 式で説明できると考えた。しかし、この熱源は温度の依存性が低く、主系列星の早期から晩期までの大きな光度差を説明するのが難しい。

そこで、ベータと同じように、重い元素は星が現在の姿に生まれる以前にすでに形成されていたと仮定し、水素からヘリウムへの合成にこだわらない核反応の連鎖を捜し求め、その結果、(2)式と同じ形のサイクルを導き、彼はこれを炭素サイクルと呼んだ（現在ではCNOサイクル）。詳しい導出過程に触れていないが、このサイクルの発見は1938年でベータより1年早い。このためCNOサイクルの発見はベータとワイツゼッカーの2人に帰せられている。

こうした熱核反応の理論に基づいて、星の進化を考察しているのです、その思索の後を辿って見よう。

まず、星のエネルギー生産機構として4つの可能性を挙げた [105] :

1. 単純な重力収縮、星の化学組成の変化は伴わない。
2. 元素合成、水素から始まって重い元素を合成しながら核エネルギーを生産する。
3. 星内部の物質の一部が濃密な中性子へと変換することに由来する重力収縮。解放されるエネルギーは重力エネルギーとともに核反応エネルギーを伴っている。このエネルギー源は高密度の星に適用される。
4. 質量の完全な放射への転換。物質消滅によるエネルギー生産。

このうち、第2のエネルギー源はチャンドラ

セカールが「ワイツゼッカーの仮定」と呼んだものである（恒星天文学の源流[15]）。ワイツゼッカーも第2過程を採用しているが、元素合成には広い意味と狭い意味がある。

狭い意味とは星内部の核反応はエネルギー生産に寄与するだけである。広い意味はエネルギー生産だけでなく、星の元素組成も変化させる、というものである。水素からヘリウムへの合成は知られていたが、重い元素の合成過程は単純ではない。ベータの場合と同じようにCNOサイクルによってHeが合成されるが、なぜ、星の内部にC, Nのような重い元素が存在するかは明らかでない。従って、広い意味での元素合成はワイツゼッカーの時代にはまだ未解明の過程であった。そのため、重い元素の合成は星形成以前の始原的過程として存在を仮定し、その上でCNOサイクルの発見に到達したのである。

上記の4つのエネルギー源のうち第4は核物理学では「絶望的な低い生起確率しかない」として否定している。1から3までの過程について、ワイツゼッカーは星の進化と関連して次のように考えた。

- 1) 星の形成は冷たいガスの収縮から始まるので、最初は熱源1で輝くであろう。
- 2) 中心温度が十分に高まると熱核反応による熱源2に移る。ここで星は安定になり、生涯の多くの時間をこの熱源で過ごす。
- 3) 安定期の最後に近づくと、中心温度と中心密度の上昇からエネルギー解放が急激に進み、星を直接爆発させるか、あるいは不安定な脈動期を経たのちに爆発する。
- 4) この爆発によって中心に中性子を含んだコアが残り、ある時期に熱源3で輝くようになる。

この進化経路によると主系列星と赤色巨星との関係はどうなるのであろうか。巨星につ

いてワイツゼッカーは、赤色巨星には水素の重い同位元素が多数存在しており、その崩壊が熱源になっているとした。しかし、その過程は明確でなく、赤色巨星の熱源はベータとともに両者にとって未解決の問題として残されていた。

13.3 太陽系生成論

天文学の分野でワイツゼッカーがもっとも活躍した分野の1つに惑星系形成論がある。それについて概要をまとめて見よう ([106], [107], [108])。

太陽系形成論について 1930 年代に議論になっていたのは原始星雲の収縮によるという星雲説と、太陽と恒星との近接遭遇による太陽からの放出されたガスの凝縮によるという遭遇説であった。しかし、どちらも星雲状ガスは散逸してしまい、惑星の誕生が説明できないという困難を抱えていた。

そのなかでワイツゼッカーが 1943 年に提唱した惑星系形成論 [106] は極めて有望な説として注目を浴びた。その理論の特色をまとめて見よう。

1. 基本的に星雲説の立場を取る。古典的な星雲説、遭遇説ともにガスは散逸して惑星系を形成しない。散逸を避ける過程として原始ガス星雲のなかの乱流に注目する。
2. 銀河系内の星間媒質には乱流が存在し、乱流要素 (eddy) として種々のサイズで分布する。原始太陽星雲はそうした乱流要素の一つとして生まれた。乱流要素は重力作用によって内部のガス運動が不規則でなくなり、中心の周りのエピサイクリックな渦動を生じる。
3. 原始太陽系星雲は渦動の集まりであるが、渦動の分布は図 37 のように 5 個の渦動が段階的に分布する。5 個という数はボー

デの法則と調和するように仮定された。

惑星は乱流要素からではなく、乱流要素に囲まれた静かな空間で誕生した。

4. 原始星雲はガスと少量の固体微粒子からなり、惑星は微粒子間の衝突、合体によって成長した。
5. 原始星雲の構成は大部分が水素とヘリウムであったが、その多くは角運動量とともに太陽系外に散逸した。

このような乱流理論に基づく理論はガモフとハイネクの紹介 [108] によって英語圏の研究者に大きなインパクトを与え、テル・ハール (ter Haar) によって拡張されるなど [109]、現在の惑星形成論の源流となっている (Kuiper [110]参照)。

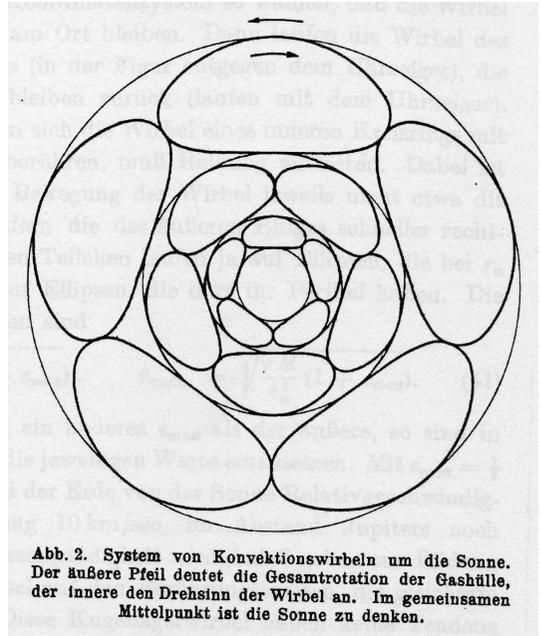


図 37 原始太陽星雲における渦動構造 [106] 上の矢印は星雲 (円盤状) の全体的回転方向、下の矢印は渦動内のガスの運動方向を示す。隣接する渦動は異なった向きに運動する面で接する。

13.4 哲学的考察

ワイツゼッカーは1950年代以降も量子理論や時空論など、物理学の分野でも研究を続けているが、活動の軸足は哲学的考察に移ったようである。考察の範囲は哲学、宗教、自然科学など多岐にわたっているが、基本にあるのは人間論である。彼には多数の著書があるが、ここでは冷戦時代に書かれた「人間的なるものの庭」[101]と、晩年に書かれた「人間とは何か 一過去、現在、未来の省察」(1991年 [111]) (いずれも邦訳あり) について紹介して見よう。

1) 「人間的なるものの庭」 邦訳で830頁に達する大著である。「庭」とはいくつもの小道があるという意味である。この書は人間を歴史的存在として理解しようとする試みである。歴史的とは人間界、自然界を問わず、彼の言葉によれば「平原と危機」の連鎖である。「平原」とは進化が長期的、安定的に進行する時期であり、「危機」とは短期間に急激な変動を示す時期で、歴史はこれを交互に繰り返す。人間の歴史で言えば、危機は戦争であったり、「産業革命」や「科学革命」であったりする。自然界では例えば星の進化に現れる急激な変化がある。

こうした人間論から彼は現在(冷戦時代)の科学技術の時代について4つの「憂慮」を表明している。第1は「資本主義社会において階級格差は消滅しない」、第2は「共産主義社会においては市民的自由が実現されない」、第3は「近代文化において世界はますます統治できなくなっている」、そして第4は「近代意識においては無意味という感じがますます強くなっていくように見える」。彼はこうした憂慮を「世界国家という調整機関が存在しないこと」、それから派生する「環境破壊の危機」、「世界の統治不可能性」にまとめている。平和問題についても「兵器の超強大さに頼った戦争抑止は信頼のおけるものではない。」、

「平和を作ることのできるのは、自らが平和的である人のみである。」とのべて平和教育の意義を強調している。

2) 「人間とは何か」 この書も大著である。前著につづいてここでも歴史的人間論が中心であるが、ワイツゼッカー哲学と呼ぶべき彼の心情で満たされている。それは自然科学者によるカント流の思索と言つてよいかもしれない。自然科学者として、彼の文化社会批判には絶えず量子論の蓋然性と相対論の相対性が姿を見せる。その一方では根底にキリスト者としての宗教的精神が流れている。彼は自らを「キリスト信仰に生きる実存」と呼んでおり、生涯ドイツ ルター派から離れることはなかったが、カトリックや他の宗派に対して開かれた理解をもっていた。こうした基盤に立って最後の章「人間はどこへ行くのか」では再び、平和論に戻り、最後に彼の決意を表明している。その言葉を再現しておこう。

「私は地球規模の破局の危機について今日まで自分の生涯を通して語ってきたつもりです。これからも語り続けていかなければと痛感しています。・・・しかし、私は歴史の究極的終焉の到来を一度として考えたことはありません。今もそうです。今日まで力説してきたことは、行動への勇気です。どんなことがあっても、決してたじろがないこと、でした。」

この二つの書を読むことによって、われわれはワイツゼッカーの深い泉のような人柄に触れることができる。

14. ジョージ・ガモフ (George Gamov, 1904 - 1968)

14.1 生涯と人柄

ガモフ(ロシア名:ゲオルギイ・アントノヴィチ・ガモフ)はロシアのオデッサ(現ウクライナ)で生まれた。少年の頃から科学に興味

を持っていたが、13歳の誕生日に父からプレゼントされた小型望遠鏡で星空への憧れを持ち、このとき将来は科学者になりたいと決心したという。

1922年にオデッサのノボロシヤ大学に入学し、翌年レニングラード大学（現サンクトペテルブルク）に転学して理論物理学を専攻する。学友にレフ・ランダウ（Lev Landau）とマトヴェイ・ブロンシュタイン（Matvey Bronstein）がいる。ブロンシュタインは量子重力論で知られているが人権主義を主張したためにソ連邦政府によって拘束され1938年に銃殺されている。1920年代から30年代にかけてソ連では大量粛清の波がうねり、科学者の中にも犠牲になった人が多数いた。暗い時代であった。

ガモフはレニングラード大学では1923年から29年まで核物理学の研究を進め、とくに放射性元素からの粒子放出の機構についてトンネル効果の発見と考察を行っている。その後、西ヨーロッパに留学して、コペンハーゲンの理論物理学研究所、ケンブリッジのキャベンディッシュ研究所などで核物理学の研究に打ち込み、ロバート・アトキンソン（Robert Atkinson）、フリッツ・フーターマンス（Fritz G. Houtermans）らと共同で太陽、星内部での熱核反応の効率の計算を行ったりしている。帰国したガモフはレニングラードのラジウム研究所で研究を進め、1932年にはヨーロッパ初のサイクロトロン建設にも加わっている。

このころ、同じ理論物理学者の仲間の1人、リューブフ・ヴォクミンゼバ（Lyubov Vokhminzeva）と知り合いになり、1931年に結婚している。2人は次第に自由主義的志向を強め、政治的圧迫を受けるようになった。成功しなかったが闇にまぎれて黒海沿岸から出国を試みたこともあったと言う。1934年に

ベルギーのブラッセルで開かれたソルベー会議の折、彼はリューブフとともに出席することができたので、そのあと帰国せずに米国に亡命する。

アメリカではジョージ・ワシントン大学から招聘されて理論物理学教授になり、1954年までここにとどまる。1956年からコロラド大学で没年の1968年まで教鞭をとる。最後の年の8月、ガモフは病を得てコロラド州のボルダーで死去した。享年64歳であった。ガモフの生涯はコロラド大学ホームページ [112] と Wikipedia [113] を参照した。



図 38 ガモフ（1930年頃）の肖像 [112]

14.2 星の進化論

ガモフは1929年から1931年頃にかけて放射性元素の崩壊を中心に核物理学の理論的研究を進めていた（[114], [115]）。陽子が核内から放出されるためには原子核を取り囲む強い陽電気のポテンシャルの壁を通過しなければならない。同じように陽子が原子核に捕獲されるためにも陽子はポテンシャルの壁を通過しなければならない。このプロセスは量子力学的にトンネル効果と呼ばれる。

ガモフのトンネル効果の理論は早速グリニッジ天文台のアトキンソンとゲッチング大学

のフーターマンスによって星の内部に応用された ([116], [117])。アトキンソンは 1931 年にガモフのトンネル効果とガス分子速度のマックスウェル分布を組み合わせ、星の中心温度では原子は陽電子を捕獲して重い元素を合成していくという理論を詳細に検討している。彼は陽子捕獲過程によって星のエネルギー源と元素組成を説明しようと試みた。陽子捕獲だけですべての元素組成を説明することには成功しなかったが、トンネル効果とマックスウェル分布の組み合わせはその後の核融合反応の基本的過程となっている。

ガモフはアトキンソン、フーターマンスの理論に基づいて星内部の熱核反応とそれに基づく星の進化の研究に取り組む。1938 年には熱源が星の中心に集中するという点源モデルと、熱源が中心からある距離の殻状に集中するという殻源モデルとを考察した ([118], [119])。その結果、点源モデルは採用できないとして放棄しているが、その理由として、

(1) 核反応率は温度の指数関数的に増大するので、核反応の進行とともに星の光度と表面温度が急激に増大し、観測的な質量光度関係に違反すること、および、(2) このモデルによるとカペラの中心温度と密度は太陽より小さくなり、カペラの明るさが説明できないことなどを挙げている。それに代わってガモフは熱核反応には選択的の温度効果が存在し、ある温度で核反応率が最大になると考えた。この場合には星の中心からある半径で有効な温度となり、その半径に近い殻内で熱核反応が発生し、殻内部は不活性の等温核になる。核反応によって水素量が減少すると熱源の殻半径は緩やかに変動し、星の進化が質量光度関係に違反しない範囲になる。また、カペラは太陽より半径が 10 倍も大きいので熱源の殻の半径も太陽より大きく全体的な熱量も大きいであろう。従ってカペラが太陽より明るいことと矛盾しない。こうして星の内部のエ

ネルギー生成は殻源モデルによって説明できる。これがガモフの基本的アイデアであった。

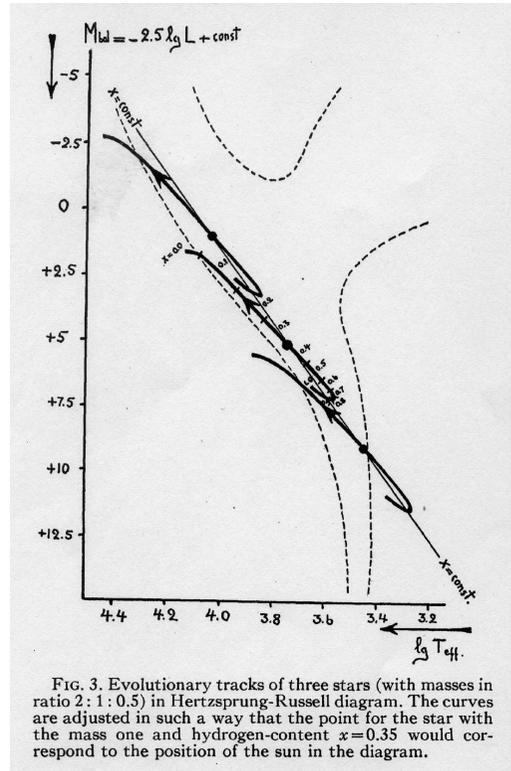


図 39 殻源モデルと HR 図上での星の進化経路。[119] 質量が 2, 1, 0.5 倍太陽の 3 例を示し、太陽質量の星の現在点が太陽で、黒丸で示されている。

ガモフはそれ以後、個別の核反応の評価よりも、殻源モデルに基づく星の進化論に重点を置いて議論を進めている。彼の到達点は 1941 年にポピュラー・アストロノミー誌に掲載された記事「われわれの太陽は爆発に向かう」 ([120]) に見られるので簡単にまとめて見よう。

まず、星の爆発にはどんなものがあるだろうか？ 歴史的に顕著な星爆発としてベツレヘムの星、かに星雲、チコの超新星、そのほかに毎年のように発見される新星がある。超

新星になるのは大質量の星であり、中小質量の星は通常の新星になるのであろう。シリウスは太陽よりずっと重い星なので、それが爆発するとベツレヘムの星と同じように輝くに違いない。それに較べると太陽は普通の新星程度であらう。

太陽の爆発とはどのようなものであろうか？ それには太陽の熱源を知る必要があるが、今日ではそれが熱核反応であることに疑いはない。それは星の中心部での高温高圧のもとで元素を変換する錬金術なのである。温度 2000 万度という太陽中心では水素をヘリウムに変えるという錬金術が働き、太陽を輝かせるに十分なエネルギーを生み出す。太陽の熱源として水素の重要性が認識されるようになったが、最初の頃は水素が消費されると星は収縮して冷たくなっていくのではないかと考えられていた。しかし、筆者（ガモフ）は反対の道筋を指摘した。水素が減少すると星は反って輝きを増し、最後には爆発してしまうのである。太陽も同じ道を辿るが、太陽はいまより 100 倍も明るくなってから爆発する。

それでは太陽はいつ爆発するのであろうか。突然爆発して人類に襲い掛かる心配はないのか。人類は「ダモクレスの剣」の喩えのように、つるされた剣の下で絶えずおびえながら暮らさなければならないのであろうか。幸い、太陽の錬金術反応は大変バランスよくゆっくり進むので、突然爆発することはない。しかも、爆発が起こるのは数 10 億年後であるから、心配は不要である。こうしてガモフは読者を安心させてくれるのである。

なお、ガモフは HR 図を従来のように分光型と絶対等級との関係ではなく、進化論の立場から横軸を有効温度、縦軸を光度の、それぞれ対数で表わすという手法を導入した最初の人である [118]。

14.3 普及活動

ガモフはサイエンスライターとして多くの人から愛されてきた。「不思議の国のトムキンス」(1940)、「原子探検のトムキンス」(1945)などのトムキンスシリーズをはじめとして物理学、宇宙論を中心に一般読者向けに多数の普及書を著してきた。科学普及の功績によって 1956 年に UNESCO からカリング賞を贈られている。

トムキンスシリーズは銀行員のトムキンス氏が大学の講演会に出席したものの難しい話に眠くなり、うとうとしているうちに奇妙な夢を見るという筋立てである。夢は相対論世界のゆがんだ世界であったり、原子内部の輪郭のはっきりしない世界であったり、さまざまである。愉快的挿絵も多いがそれらはガモフ本人によって描かれたものである。その 1 つを紹介しよう。図 40 は、「原子探検のトムキンス」でトムキンス氏が原子内部に忍び込んだときの挿絵である。また、1940 年に著された「太陽の誕生と死」([121])は「われわれの太陽は爆発に向かう」と同じ論旨であるが、軽快な文章はいつまでも人をひきつける。ガモフの解説はいまでもう時代遅れになっているが邦訳書も多く、1950 年代に青春を送った筆者には懐かしい思い出が多い。

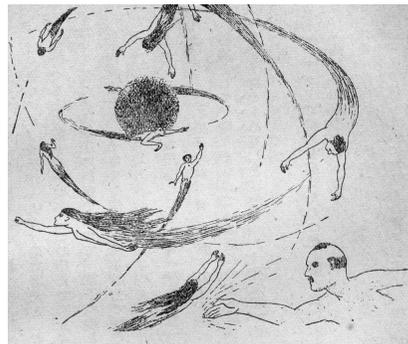


図 40 原子内部に紛れ込んだトムキンス氏
（「原子探検のトムキンス」より）

文 献

- [92] Hans Bethe, コーネル大学ホームページ <http://bethe.cornell.edu/about.html>
- [93] Hans Bethe, Wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Hans_Bethe
- [94] Bethe, H. 1939, *Physical Review*, 55, 434 – 456, Energy production in stars. (星の内部におけるエネルギー生産)
- [95] Srömgren, B. 1937, *Ergebn. d. Exakt. Naturwiss.* 16, 465
- [96] Bethe, H. and Critchfield, C. 1938, *Phys. Rev*, 54, 248 – 254, The formation of deuterons by proton combination.
- [97] Bethe, H. 2003, *Ann. Rev. of Astr. Astrophys.*, 41, 1 – 14, My life in astrophysics.
- [98] Bethe, H. *The Road from Los Alamos (Masters of Modern Physics)* (「ロスアラモスからの道」)、(核兵器と軍縮論、平和論を主題としたエッセイ集、星のエネルギー源、超新星爆発についてのエッセイも含む)
- [99] ブラッドベリー科学博物館, 「アメリカ西部を巡る旅」(web)より http://www.countryhouse.co.jp/WildWest/west_trip/newmexico/losalamos/
- [100] Jungk, Robert, 1958, *Brighter than a Thousand Suns – A personal history of the atomic scientists* (1956年、原題 *Heller als Tausend Sonnen*)、邦訳ロベルト・ユンク、菊盛英夫訳「千の太陽よりも明るく-原子科学者の運命」(文芸春秋社、1958)
- [101] Von Weizsäcker, C. F. 1977, *Der Garten des Menschlichen – Beiträge zur geschichtlichen Anthropologie*. 邦訳「人間なるものの庭—歴史人間学論集」, ワイツゼッカー著、山辺建訳, 2000年刊 (法政大学出版局)
- [102] Maurizi, Stefania, 2002, Interview with Carl F. von Weizsäcker (ドイツにおける原爆製造期におけるワイツゼッカーの心情を率直に訪ねたインタビュー) (http://www.stefabuamaurizi.it/Interviste/en-carl_friedrich_von_weizsaecker.html)
- [103] Neuneck, G. 2007, *Physics Today*, Death notice from the German Pugwach Group
- [104], Von Weizsäcker, C. F. 1937, *Physikalische Zeitschrift*, 38, 176 - 191, Über Elementumwandlungen im Innern der Sterne. I. (Element transformation inside stars. I. (恒星内部における元素変換))
- [105] Von Weizsäcker, C. F. 1938, *Physikalische Zeitschrift*, 55, 633 - 646, Über Elementumwandlungen im Innern der Sterne. II (Element transformation inside stars. II. (恒星内部における元素変換)) (R. H. Milburnによる英訳は *A Source Book in Astronomy and Astrophysics*, 1900 – 1975, p. 309 – 339にある。)
- [106] Von Weizsäcker, C. F. 1943, *Zeitschrift für Astrophysik*, Vol. 22, p.319 – 355, Über die Entstehung des Planetensystems. Mit 2 Abbildungen.(惑星系形成論)
- [107] Von Weizsäcker, C. F. 1947, *Zs.f. Phys.* 124, 614, (Origin of solar system)
- [108] Gamow, G. and Hynek, J. A. 1945, *ApJ*, 101, 249, Recent progress in astrophysics, A new theory by C.F.Weizsacker of the origin of the planetary system (ワイツゼッカーの惑星系形成論の英語による紹介)

- [109] ter Haar, D. 1945, Leiden Observatory, PhD Thesis, Studies on the origin of the solar system. (カルマンの乱流理論を取り入れた太陽系生成論、ワイツゼッカー理論の拡張)(ter Haar, D. 1950, ApJ, 111, 179, Further studies on the origin of the solar system 参照).
- [110] Kuiper, G. P. 1951, Astrophysics, A topical symposium, Ed. Hynek, McGraw-Hill, p.357 - 424, Origin of the solar system.
- [111] Weizsäcker, C. F. 1991, Der Mensch in Seiner Geschichte、邦訳「人間とは何かー過去・現在・未来の省察」ワイツゼッカー著、小杉、新垣訳、2007年刊(ミネルヴァ書房)
- [112] George Gamow, コロラド大学ホームページ <http://www.colorado.edu/physics/Web/Gamow/life.html>
- [113] Wikipedia、George Gamow (http://en.wikipedia.org/wiki/george_Gamow)
- [114] Gamow, G. 1928, Zs.f.Phys., 51, 204 - 212, Zur Quantentheorie des Atomkernes.(原子核の量子理論),(波動力学に基づいて 粒子放出の物理過程を考察した。)
- [115] Gamow, G. 1929, Zs.f.Phys., 52, 510 - 515, Zur Quantentheorie der Atomzertrümmerung. (原子崩壊の量子論について).
- [116] Atkinson, R. and Houtermans, F. G. 1929, Zs. f. Phys., 54, 656 -665, Zur Frage der Aufbaumöglichkeit der Elemente in Sternen. (星の内部における元素合成の可能性について)
- [117] Atkinson, R. 1931, ApJ, 73, 250 - 295 (I), ApJ, 73, 308 - 347 (II), Atomic synthesis and stellar energy. (元素合成と星のエネルギー源)
- [118] Gamow, G. 1938, ApJ, 87, 206 - 208, A star model with selective thermo-nuclear source (選択的熱核エネルギー源をもつ星のモデル)
- [119] Gamow, G. 1938, Physical Review, 53, 595 -604, Nuclear energy sources and stellar evolution (核反応エネルギー源と星の進化)
- [120] Gamow, G. 1941, Pop. Ast., 49, 360 - 365, Our Sun is bound to explore (われわれの太陽は爆発に向かっている)
- [121] Gamow, G. 1940, The birth and death of the Sun, The Viking Press, N.Y. (邦訳:ガモフ著、白井俊明訳「太陽の誕生と死」、白楊社)

小暮智一 (元京都大学)

訂正

1月号 p12 図10のキャプション

誤: (RWTH= Rheinisch-Westphälische Technische Hochschule - Aachen)(出典 <http://www.reth-aachen.de/go/id/xql>)

正: (RWTH= Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule - Aachen)(出典 <http://www.rwth-aachen.de/go/id/xql>)

5月号 p11 左欄上から11行目

誤: 星の質量と温度との関係

正: 星の質量と半径との関係