

知は地球を救う 6. 宇宙の誕生と進化

— 太陽・地球・生命はビッグバン・燃える星・爆発する星 の内部でつくられた元素から出来ている —

臼 田 秀 明

帝京大学教育学部教育文化学科 〒192-0395 東京都八王子市大塚359

要 約

本稿では、我々の宇宙観の変遷について主に概観するとともに、ものの基本的な要素に対する概念の変容についても簡略に辿る。

人類は、狩猟採集生活の時代から天空の動きを観察しそれを暮らしに役立てたり、天空を神々に見立て宗教的な対象としたり、天空がどのように生まれたかに思いを巡らせ宇宙創造神話を生み出したりしてきた。天空の動きについては、我々は長い間それを肉眼で捉え、思弁的に理解しようとしてきた。それは2世紀のプトレマイオスの天動説として大成され、その説を多くの人が千数百年に亘って信奉し続けた。16～17世紀になると、コペルニクスの理論あるいはガリレオの望遠鏡の観察などに支えられた地動説が唱えられるようになったが、それは一般にはなかなか認められなかった。17世紀にはニュートンが万有引力の法則を発見し、続く18世紀に大型望遠鏡による観察が始まり新たな天文学が胎動した。更に、星の光を色の成分に分解する研究が可能となり、20世紀には遠い星の光がドップラー効果により長い波長の光に変化していることが見出された。それは、宇宙が従来考えられていたような永遠不滅で静的なものではなく、膨張し続ける動的なものであることを明らかにした。その後、可視光線以外の様々な電磁波の観測が地上あるいは宇宙探査機により行われた。それらの観測結果と理論的な研究により、現在、我々は宇宙が137億年前に極めて小さな超高温の火の玉のようなところからビッグバンとして始まり、膨張し続けているという動的な宇宙観を共有するようになった。

宇宙・太陽・地球・生命などあらゆるものを構成する元素は宇宙創成のビッグバン、輝く星の内部あるいは星が死滅する爆発の時につくられたことが明らかにされた。

以上のことは、我々に宇宙が星の誕生と死の繰り返しにより成り立っていることと、我々を含む全てのものが宇宙で生まれた星屑から出来ていることを知らしめた。

このように宇宙の成り立ち・元素の合成過程・我々の基盤を「知る」ことは、我々がどこから来た者であるかを明らかにしてくれる。そのような視点を持つことは、我々が現在抱えている環境問題を含んだ多くの課題に対処するための価値観を構築する際の大きな礎となると考えられる。しかし一方で「知は地球を救えるか」という根源的な問いかけが残る。その問は、古代ギリシャのソクラテスが宇宙、ギリシャの社会を始め多くのことを考えた時に思い至った「無知の自覚」と関わるものである。そのことも含めて最後に「知は地球を救えるか」について考察する。

キーワード：宇宙観、元素合成、ビッグバン、膨張宇宙、無知の知

はじめに

このシリーズのテーマは、現在の我々の抱える「いのちと環境についての現代の問題」(1, 2)を宇宙開闢から地球・生命の誕生・更に人類の過去を踏まえた上で考えることである。我々がどこから来たかについて全ての人を知ることは、異なる伝統・文化を持つ多様な世界の人々の間に通底する世界観を構築し、その問題に立ち向かうことを可能にすると考えたからである。

既に、①我々の抱えるいのちと環境の問題(1, 2)、②人類の数百万年に亘る歩み(3)、③農耕を開始してからのおよそ1万年に亘る変遷と現代に於ける農業問題(4)、④人類による森への侵食の歴史・熱帯雨林の最近の急速な破壊・環境倫理など(5)について述べた。

今回は宇宙の誕生と進化について、先ず現在分かっている基礎的な事柄を整理した上で、主に以下の3点について時間を追いながらまとめる。第一は137億年前の宇宙の誕生と進化について、神話的世界から、永遠不滅である天が不動の地球の周りを回る天動説を経て、ビッグバンに始まる動的な宇宙観にどのように辿り着いたかに関して、第二はものを構成する基本単位として「火・風・水・土」などを考えていた古代から、どのように我々が元素という概念に至ったのかについて、第三は元素が宇宙のどこでどのように生成されたかに関してである。

最後に、古代から始まる膨大な観察・研究成果から出来上がった我々の宇宙像についての「知」の歴史を考えた時に、我々の「知」はどこまで及んでいるのだろうか、我々は何を「知っている」のだろうかということを考えさせられる。それは正に、ソクラテスの言う「無知の知」をどのように受け止めるかということでもある。即ち、果たして「知は地球を救えるか」と言えるのかが問われることになる。そのことについて最後に考察する。

今回も、筆者の専門外の原典から頻繁に引用するが、その際には原文を多少平易に要約したものもあることを予めお断りしておく。また宇宙誕生などについては筆者の理解を超えるものが多かった。理解した範囲で出来るだけ噛み砕いてまとめることを心がけたが、誤りや不十分な所もあると思われる。そのような箇所も含め、興味のある方は是非原典に当たって頂きたい。多少長いので以下に目次を示す。1. 基礎的事項：生物と時の移ろい、地球・太陽・月の動き(144頁)。2. 古代の宇宙観(149頁)。3. ギリシャの宇宙観・地球観・物質観(154頁)。4. 9～15世紀前半までの宇宙観(161頁)。5. 天動説から地動説へ、そしてニュートンによる天体物理学の幕開け(163頁)。6. 18～19世紀中頃の宇宙観：巨大望遠鏡による新たな発見(168頁)。7. 元素の発見(170頁)。8. 19世

紀後半～20世紀前半の宇宙観(172頁)。9. 1960年代以降の宇宙観(184頁)。10. いくつかの天体の特徴(189頁)。11. 知は地球を救えるか(193頁)。12. まとめ(201頁)。結語(202頁)。

1. 基礎的事項：

生物と時の移ろい、地球・太陽・月の動き

1.1 生物と時の移ろい：多くの生物は地球の自転・公転による日周と年周、月の満ち欠けのリズムの中で生き永らえ、進化してきている。

多くの動物は日が昇り、夜が明けると太陽の下で活動し始め、日が落ち満天の星空が広がる夜に眠りにつくような1日のリズムを持っている。他の多くの生物も1日を、リズムをもって生きている。

また春になると桜が咲き、しばらくすると田植えが終わり、梅雨が始まる。炎天下の夏に旺盛に育った稲は秋にたわな穂をつける。やがて冬が来て、梅の花芽に雪がつもり、1年が経つ。生物は1年の季節の移ろいも感知しながら生き永らえて来た。

我々人間は生物として、そのようなリズムを持っていると共に、暦や時計を発明し、時の流れと季節の移ろいを知的に認識するようになった。しかし、暦や時計の発明は、700万年に及ぶ長い人類の歩み(例えば、3参照)の中では、ごく最近のせいぜい数千年前になされたに過ぎない。

生物は腕時計やカレンダー無しに、1日、1年のリズムを捉えている。例えば、植物は日(夜)の長さの変化を感知しながら、花を咲かす準備を始める(花芽の形成)。しかし、年によって桜の開花時期は多少ずれる。それは形成された花芽の成長が温度により影響を受けるからである。植物の開花だけでなく、渡り鳥やクジラなども日長変化により季節変化を受け止め、季節により快適な生息地域や食べ物を求めて移動する。その時には地磁気を頼りにナビゲーションをし、新たな場所に移動していると考えられている(例えば、6参照)。

季節の移ろいを捉えるのに寒暖の変化に頼ると、時おり訪れる季節外れの暖かい日や寒い日に混乱させられてしまう。しかし、日の長さの変化を感知することは、たとえ曇っていても昼は昼であり、季節変化を正確に捉えることを可能にさせる。生物はそのような明暗変化を感知するしくみを獲得することにより季節変化を捉える適応力を増して繁殖してきた(明暗に依存しない生物時計もある。次頁1.3参照)。

1.2 1日の長さ：昼と夜からなる1日は地球の自転から生まれる。現在我々が使っている1時間は19世紀の約

100年間における地球の自転による1日の長さの平均を24時間として決められた¹ (7)。しかし、地球の自転速度は、月の引力による潮汐力からもたらされる「潮汐摩擦」(潮の満ち引きによって起こる海水と海底との摩擦)によってだんだん遅くなっており一定ではない(7)。一方、地球の自転と月の公転の角運動量の合計は一定に保たれるために²、地球の自転速度の減少は、月の公転運動の速度を高めることになる。即ち、月の公転運動は速くなり、月の公転の遠心力は強まり、月は少しずつ地球から遠ざかることになる³ (8-230p)。

また、地球の公転に要する時間(1年の長さ)は太陽による引力の影響を受けるが、それはきわめて小さく一定と考えられる(例えば、9)。即ち、地球の自転によりもたらされる1日の長さは次第に長くなっており、1年の日数は地球誕生後の約46億年間で大きく変わってきたことになる。

例えば、46億年前の1日はおよそ6時間で1年は1,434日、多くの化石が見つかり始めるカンブリア爆発の起きた5.5億年前のカンブリア紀の1日は約21時間、1年は417日であったと理論的に推定されている(9)。

このような理論的な推測以外にもサンゴの化石を用いてその成長速度を解析する実証的な研究も行われた。サンゴの成長速度は昼と夜で、また季節によっても違うためにサンゴの化石には日輪や年輪の縞模様があらわれる。それを利用すると1年の日数を調べることが出来る。その結果、6億年前の1年は424日、恐竜が減じた6,500万年前の1年は371日と推定された(10)。

一方、今から1億8千万年後には1日は25時間になると予想されている(7)。その時の1年は350日になるはずである。

1.3 生物の体内時計：このように1日の長さは、約46億年の長い地球の歴史の中で大きく変化してきた。生物は40億年前に誕生し、27億年前頃になると太陽の光を利用し酸素を発生する原核生物のシアノバクテリアが増え、世界の様相は大きく変わっていった。27億年前の1日は10時間強であったと推定されている(9)。シアノバクテリアは現在も生存している。シアノバクテリアがどのように1日を捉えているか(体内時計)、その仕組みが詳しく調べられている。

シアノバクテリアから取り出した3つの蛋白質とATP(生物がエネルギー源として利用出来る化学物質のアデノシン三リン酸)を試験管内に共存させると明暗の変化が無くとも24時間のリズムが発生することが近藤孝雄らにより明らかにされた(11, 12)。この研究は、生物には24時間を体内のリズムとして計測出来る“体内時計”があることを、その部品も特定しながら明確に示したものである。

生物は長い間水の中だけで暮らしていた。生物が上陸を果たしたのはオルドビス紀の4億7500万年前頃と言われている(例えば、5参照)。その頃の1日の長さは21時間強であった(9)。1日の長さが次第に長くなる中で体内時計がどのように変化したかは分からないが、現生の生物の多くは24時間の1日に対応した体内時計を持っている。その生物の体内時計の多くは明暗の変化をシグナルとして動いている。しかし、海外旅行をした時に時差にすぐ対応出来ず、昼夜のリズムが乱れてしまうように、新たな明暗サイクルにリセットされるまでには、個人差などを含め多少時間が掛かる。また大学では入学後、大きく変わる生活環境に適応出来ず体調を崩してしまう学生の悩みを聞くことがある。尋ねてみると、夜にうまく睡眠が取れなくなることが原因である場合が多い。生物は1日の明暗のシグナルを利用した体内時計に従い24時間のリズムの下で暮らしており、そのリズムが乱れると、様々な変調をきたしてしまう。

勿論例外もある、例えば、深海で暮らす生物には明暗に基づく1日のリズムはない。そこで暮らす生物がどのような体内時計をもっているか、あるいはどのような1日のリズム(概日リズム)を持っているかは分かっていない。また極地方では白夜や極夜があり、そのような地域に生息する生物は、明暗に依存しない概日リズムを持っているものとそうでないものがあることが分かり始めている(13)。例えば、北極地域に住むトナカイでは明暗に反応してホルモンのメラトニン⁴の分泌が調節されているが、明暗変化のない白夜や極夜にはメラトニンの分泌には概日リズムが認められないことが報告されている(14)。それは、その間には体内時計が働いていないことを示す例である。

我々の睡眠にもメラトニンが関与しているが、その他

¹ 地球の自転速度が遅くなっていることが分かったために、1967年に1秒の長さは原子時計により決め直された。

² 例えば、フィギュアスケートの選手が回転する時に、次第に手を縮めると回転速度は早くなる。これは、物体が持っている回転の強さを表す物理量である角運動量が保存されるために、手を縮めることで半径が減った分だけ回転速度が上がった結果である。

³ 現在では宇宙船によって月面に設置された鏡に向けてレーザー光を照射し、地球に戻ってくるまでの時間を測定することにより、月は1年に3.8cmずつ地球から離れていることが分かっている。

⁴ メラトニンは松果腺から分泌されるホルモンで、その血中濃度は昼に低く、夜に高い概日リズムを示し、睡眠と関連している。

にも我々には色々な概日リズムがある。例えば、我々の血糖値は満腹・空腹時にもほぼ一定に保たれるようになっている。夕食後朝食まで食べ物を取らない間に、肝臓に貯めておいた糖分を使い果たすと、食物由来の糖分ではなく、我々の体の成分から糖をつくる糖新生というプロセスが働き始め血糖値を高める。糖新生は我々が睡眠中に活発に働く。このように我々の概日リズムは意識とは関係なく働いている（例えば、15参照）。

1.4 人間と季節：このように生物は40億年の間、長さの変わる1日や、日数の変わる1年の季節変化を感知しながら、昼夜・移ろう季節の中で多様に変化する環境・食料源に対応しながら生き永らえてきた。現生のチンパンジーを観察すると、彼らが移ろいゆく季節を認知し、実の熟す時期や場所を判断し食物を効率よく採取していることが分かる（例えば、16参照）。彼らがどのように季節の移ろいを判断しているかは定かではない。

我々の祖先も狩猟・採集に頼っていた時代から季節の移り変わりを認識し、食糧を探していたはずである。時代が下り農業を始めるようになると、いつ種を播くかなど、季節をより正確に把握する必要が生まれたに違いない。我々の祖先は、例えば栗の花が咲く頃に、あるいは遠くの山の残雪の形が馬のようになったなどの変化を捉え、田植えを始めたと思われる。日本で稲作が始まるのはメソポタミアや長江流域で作物の栽培が始まった時から遥かに時代が下った、今からおよそ3000年前頃である。約1万年以上前に野生のムギやイネの種を撒き始めたメソポタミアや中国の人々は先史時代の人々で、文字の記録は残っていない。しかし彼らも、それぞれの地域に特有な生物や風景の変化を手掛かりに、あるいは、太陽・月・惑星の動きや日の長さの変化を観測することにより、暦に匹敵するような概念をつくり、暮らしを維持していたことは容易に想像される。

1.5 地球・太陽・月：地球は赤道半径が6,378.137km、極半径が6,356.752kmで、赤道半径のほうが21.385km長い、球に近い回転楕円体である。月は地球の周りを楕円軌道で、地球から平均38.4万km離れた所を公転している⁵。月の自転周期と公転周期は等しく、月は地球に常に同じ面を向けている。月の赤道半径は1,737.9kmで極径1,735.7kmよりやや長く、回転楕円体である。月の半径は地球の4分の1強である。太陽は地球からおよそ1.5億km離れた所にあり、その半径は69.6万kmで地球の109倍である。地球と太陽との距離は月までの距離のおよそ390倍

で、太陽の半径は月の約409倍で、地球から見た時の月と太陽の大きさはほぼ同じである。月が地球と太陽の間に入ると日食が起きる。ある時には月が太陽を完全に隠す皆既日食となり、ある時は月が地球から皆既日食の時より離れ相対的に小さくなり、太陽を隠しきれず金環日食となる。以下に見るように地球の公転軌道も楕円軌道である。

1.6 地球の歳差運動と公転：地球は太陽の周りを真円ではなく楕円軌道で公転（平均速度29.78km/秒）している。図1は極端に示してあるが、実際の公転軌道は円に近い。太陽に最も接近した近日点通過と太陽から最も遠ざかった遠日点通過の際の地球と太陽の距離の差はおおよそ400万kmで、地球と太陽との平均距離（1天文単位）約1.5億kmの3%弱である⁶。

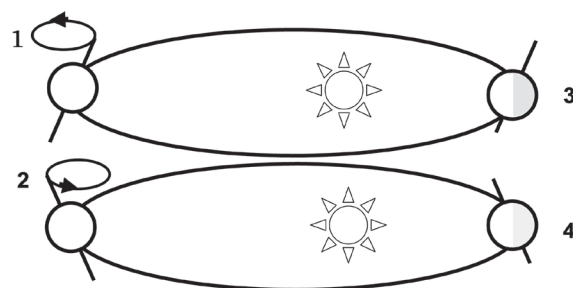


図1. 地球の公転軌道と自転軸の歳差運動。（図は概念図で、縮尺等は事実を反映していない。図11以外の全ての図も同様の概念図である）。説明本文参照。

また地球の自転軸は現在23.4度傾いているために、ほとんどの地域で日の長さが1年を通して変わっている。この自転軸の傾きは一定ではなく22.1°～24.5°の間をおおよそ4.1万年の周期で変化している。

更に地球の自転軸はコマが傾いて回っている時に軸が首を振るのと同じ、歳差運動と呼ばれる動きをする。地球の歳差運動の周期はおおよそ2.6万年である。つまり図1の上の状態から下の状態に変化し、再び上状態に戻るのに2.6万年かかるのである。地球が図1の3の位置の時は、北半球は冬至であるが、楕円軌道の同じ所の4の位置では北半球は夏至となる。即ち現在の冬至の日は約1.3万年後（歳差運動の周期約2.6万年の半分）に夏至となる。このように季節は1年におおよそ $365.25 \text{ (日/年)} \times 24 \text{ (時間/日)} \div 26,000 \text{ (年)} = 0.33 \text{ 時間} \div 20 \text{ 分}$ ずれている。地球が歳差運動をするのは、太陽や月、惑星の引力によって、傾いている地球の地軸を引き起こそうとする力が働いた

⁵ 月の地球からの近地点の距離は36.3万km、遠地点の距離は40.6万kmである。

⁶ 公転軌道が完全な真円であると、その離心率は0である。離心率が増えるにしたがって、長径と短径の差が広がり、離心率が1となると放物線となる。現在の地球の公転軌道の離心率は0.0167であるが、それは一定ではなく0.0034～0.058の間を複数の要因に支配されて変動している。その変動周期には約9万5千年、12万5千年、40万年の3種類がある。

めであると言われている。

1.7 黄道と春・秋分、夏・冬至：人々は長い間、太陽・恒星・惑星が地球の周りを回っていると思いその様子を観察してきた。地球を中心として、それらが運動していると考えられる球体を天球とした。実際には地球が太陽の周りを公転していることが分かったが、そのような仮想の天球を考えて、太陽や星の見かけの動きを考えることは暦をつくるなど実用的なことについては有効であり、正確な暦が古くから作られた。

不動の地球に対して太陽や星が動くと考えた様子を図2に示した。それは地球の自転軸の北極を延長した所を天球の北極とした時に、仮想の天球の赤道にあたる所を天の赤道としたものである。地球は太陽に対して 23.4° 傾いた自転軸をもって自転しているの太陽の見かけの通り道を表す黄道は天の赤道に対して 23.4° 傾いている。天の赤道と黄道が交わる所が北半球の春・秋分点で、夏至と冬至は図2に示した通りである。2010～2011年では、春分点から夏至までは92日17時間56分、夏至から秋分点までは93日15時間41分、秋分点から冬至までは89日20時間29分、冬至から春分点までは88日23時間43分と、それぞれの間隔は一定ではない(17)。(図3参照)。

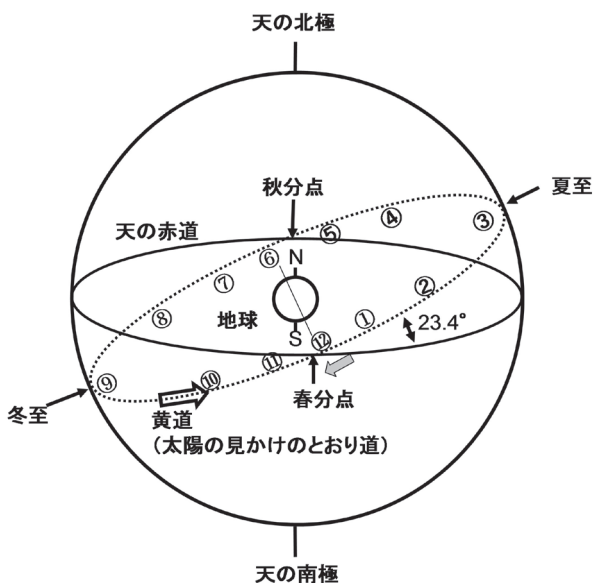


図2. 天球上における天の赤道・黄道・黄道12宮。黄道は仮想の天球上における太陽の見かけの通り道、天の赤道は地球の自転軸の北極を延長した所を天球の北極とした時の仮想の赤道にあたる。12宮は①から順番に「おひつじ座」「おうし座」「ふたご座」「かに座」「しし座」「おとめ座」「てんびん座」「さそり座」「いて座」「やぎ座」「みずがめ座」「うお座」である。黄道上の矢印は太陽の見かけの動きの方向である。⑫の下矢印については本文(1.8)、153頁脚注15参照。

北半球における夏至の日には、太陽が最も北よりの東から昇り、最も北よりの西の地点に沈み、南中高度が最も高い。冬至はその反対で、春分と秋分には太陽が真東から昇り真西に沈む(図3)。これは地球の自転軸が公転軌道に対して 23.4° 傾いているためである(図1, 2)。このようにして生まれる季節変化が、我々を含め生物に大きな影響を与えている。

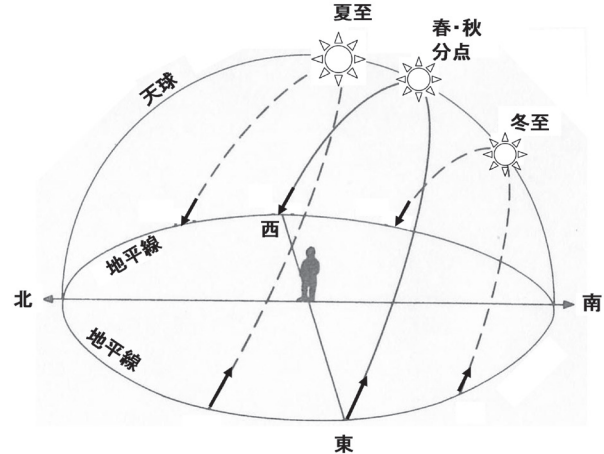


図3. 仮想の天球上における北半球の春・秋分、夏至、冬至の日の出と日の入り。

1.8 黄道12宮：黄道上に昼間見えるはずの星座は実際には見ることは出来ないが、日の出と日没の前後を含めた星座の観察から昼間に見える星座を推定し、黄道上に12の星座を当てはめたものが、黄道12宮である(図2)。それはその後占星術(152頁2.4.3参照)に利用された。占星術の星座は春分の日昼の黄道に見られるはずの星座から始まる。数千年前に占星術が生まれた頃は、それは「おひつじ座」であった。しかし歳差運動のために、次第にずれ、現在ではそれは「うお座」になり、次には「みずがめ座」になろうとしている(図2の⑫下の矢印はその変化の方向を示している)。

1.9 1年：1年は地球が太陽の周りを一回りする時間であるが、それには二通りの決め方がある。一つは太陽が黄道上の春分点(図2)から出て再びそこに戻ってくるまで、それは春分回帰年(太陽年)である。現在その1年は365.2424日である。それに対して、恒星年は太陽が天球上のある恒星に対する特定の位置から再び同じ位置に戻る時間である。即ち恒星年は地球が太陽の周りを一周する時間で、それは365.25636日で太陽年よりも約20分長い。これは前述した歳差運動のために、例えば春分点も1年に20分ずつずれており、このような違いが生まれる。

1.10 月の満ち欠け、恒星月・朔望月：月は地球の周りを公転している。一回公転するのに要する時間は、地球

から見て月がある恒星の向きに見えてから再び同じ恒星の向きに見えるまでの時間であり、それを公転時間としたものが恒星月である。それは地球が図4の1の位置から太陽の周りを2の位置まで公転した時間で、27.321662日である。一方、我々に馴染み深いのは朔望月である。1の位置では月は地球を向いた反対側に太陽の光が当たっている新月である。月は次第に三日月、上弦の月、満月、下弦の月と変わり再び新月に戻る。新月は2の位置ではなく、更に地球と月が公転した3の位置で見られる。このような月の満ち欠けに基づいた新月（満月）から新月（満月）までを朔望月という。現在の朔望月の長さは29.53059日である。即ち朔望月の方が恒星月より2日強長い(17)。

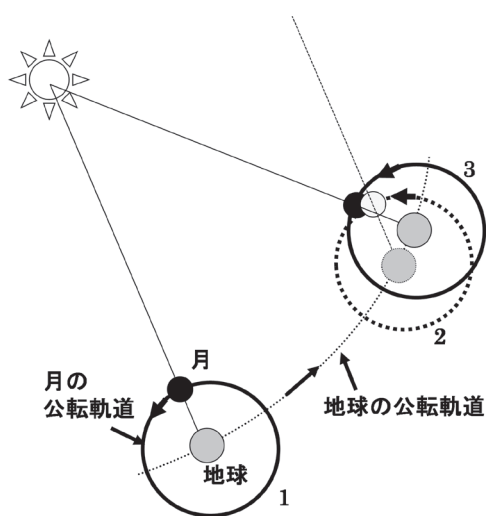


図4. 月の公転と恒星月・朔望月。月の公転軌道は天球上では白道と呼ばれる。白道は黄道に対して天の赤道から離れる方向に約5°傾いている楕円軌道である。黄道と白道の交わる近くで、新月あるいは満月になった場合に日食と月食が起こる。

1.11 地球の自転と1日：1日は地球が1回自転する時間であるが、それについても基準の取り方により二つの1日がある。図5の1の地球の位置では地球上のA点で太陽が南中し、反対側のB点ではある恒星が南中している。地球が自転し2の位置になると、B点では再び恒星が南中し、1恒星日が経過したことになる。しかし、その時にはA点では太陽はまだ南中しておらず、もう少し時間が経った3の位置になると、A点で再び太陽が南中する。それまでの時間が1太陽日である。恒星日は23時間56分4.0905秒で、平均太陽日⁷は24時間3分67.5554秒である。(図5)

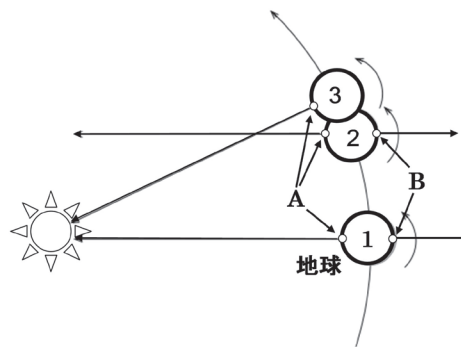


図5. 地球の自転と1日。説明本文参照。

1.12 視差：地球が太陽の周りを半周すると、図6のPとP'の間の距離は地球と太陽の距離の2倍となる（PP'=約3億km）。それぞれの時に見たある恒星（S）の位置を観測地点（P, P'）の天頂（Z, Z'）に対して求めれば、年周視差 $\angle PSP'$ を求めることが出来る（図6）。それを三角測量に当てはめれば地球から恒星までの距離を求めることが出来る。古くから多くの人が年周視差の測定に挑んだが、恒星ははるか遠くにあり年周視差は極めて小さいためにその測定は困難であった。初めて測定されたのは19世紀のことであった。現在の測定によれば地球に最も近く太陽を除くと3番目に明るい恒星のケンタウルス座アルファ星（4.37光年）の年周視差は0.755秒（17）とごく僅かなものである（169頁6.5参照）。

顔の前に指を一本立てて、左右の眼で交互に指を見ると指の位置が背景に対して変化する。これも両目の距離が離れていることにより生じる視差で星の年周視差と同じ原理である。

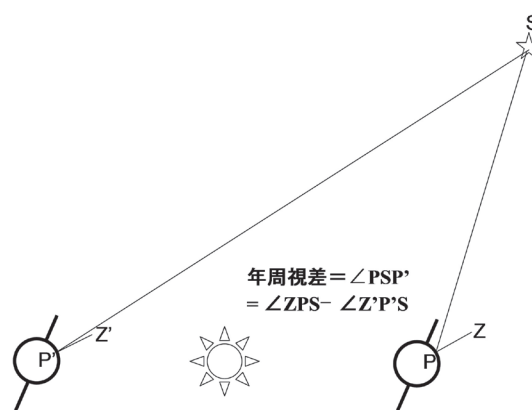


図6. 星の年周視差。説明は本文参照。

⁷ 太陽日の長さは、秋分の頃は冬至の頃より約50秒短いなど季節によって変わる。そこで一般には平均値が用いられている。太陽日は恒星日より多少長い、我々には太陽日の方が、意味がある。

1.13 星までの距離：年周視差は星までの距離を測定する一つの手段である。星までの距離はたいへん遠いのでそれを表すためには三つの単位がある。①天文単位は、地球と太陽との平均距離（約1.5億km）を1天文単位としたものである。②光年は、光が1年かけて進む距離（ 9.46×10^{12} km）を1光年としている。③パーセクは、星の視差の角度が1秒になる時の距離を1パーセク（pc）としており、それは約3.26光年である。長い距離を表す時にはメガパーセク（Mpc）が用いられる（1Mpc \approx 326万光年）。

我々の宇宙観は宇宙の大きさを段階的に明らかにすることによって大きく変わってきた。そのような宇宙に関する様々に行われた距離の測定は“距離はしご”と呼ばれることが多い。“距離はしご”を一段登る毎に我々の宇宙観は大きな変容を遂げてきた。“距離はしご”は本論の主要な部分と大きく関係するので、ここでその概略を示しておく。

最初の6段は、①エラトステネスによる地球の大きさの推定（159頁3.4.4参照）、②ヒッパルコスによる月までの距離の推定（160頁3.4.5参照）、③アリストテレスによる月と太陽の距離の比の推測、④コペルニクスによる地球公転軌道半径に対する惑星の軌道半径の計算（163頁5.1参照）、⑤遠い惑星までの距離の計算（ルヴェリエによる海王星（170頁6.7参照）、トンボーによる冥王星（176頁8.8参照）の発見）⑥年周視差を利用した三角測量による星までの距離（約300光年まで）の測定である。次の4段は、以下の四つの方法により本当の星の明るさを推定し、それを見かけの星の明るさと比較することでその星までの距離を求めるものである。⑦星の色と明るさの関係を示す主系列星（172頁8.2参照）に当てはめる（銀河の果ての10万光年程度までの測定が可能）。⑧変光周期と明るさの間に一定の関係のあるセファイド変光星（177頁8.10.3参照）を観測する（5,000万光年程度までの測定が可能）。⑨渦巻星雲の回転速度と本当の明るさの関係を示すタリーフィッシャー関係を利用する（3億光年程度までの測定が可能）。⑩明るさの変化、特に減光の速さと明るさに一定の関係があるIa型超新星を調べる（100億光年程度までの測定が可能）（188頁9.7参照）（18-105p, 19）。

現在地球から観測されている一番先のはしごが、一番遠くにある最古の宇宙である。それは、宇宙誕生後約38万年の、137億年ほど前に発せられた宇宙マイクロ波背景放射像である（184頁9.2参照）。宇宙は極小の世界からビッグバンで誕生しその後膨張を続けており、現在の宇宙の大きさは半径約465億光年と推測されている。以上述べたことは宇宙に関する現在の理解の一部であるが、そのようなことを未だ知らなかった過去の人々が空を眺

めどのような宇宙観を抱いたのか、また、それがどのような変遷を辿ったのかを時代を追いながら概観する。

2. 古代の宇宙観

2.1 宇宙に関する古代神話：古代の人々は天地がどのように創造されたかについて思いを巡らしていたはずである。いつから人々がそのようなことを始めたかは分からないが、世界各地の人々は天地創造、あるいは天地開闢の神話を持っている。それらは神あるいは神々が宇宙・世界・生命を創ったというものが多い。文字として記録されているインドの『リグ・ヴェーダ』（古代インドの聖典で紀元前12世紀頃、現在の形に編纂されたもので、その中に含まれるものは紀元前18世紀頃まで遡れるものもあると言われている）の中に宇宙開闢の歌がある。そこには「そのとき（太初において）無もなかりき、有もなかりき。空界もなかりき、その上の天もなかりき。何ものか発動せし、いずこに、誰の庇護の下に。深くして測るべからざる水は存在せりや。そのとき、死もなかりき、不死もなかりき。夜と昼の標識（日月・星辰）もなかりき。かの唯一物（中性の根本原理）は、自力により風なく呼吸せり（生存の兆候）。これよりほかに何ものも存在せざりき。（中略）この創造はいずこより起こりしや。そは（誰によりて）実行せられたりや、あるいはまたしからざりしや、— 最高天にありてこの（世界を）監視する者のみ実にこれを知る。あるいは彼もまた知らざるや」と歌われている（20）。古代のインドの人々はビックバンから始まり膨張し続ける現代の宇宙観とも重なる宇宙像を持っていたとも言える。

また、宇宙という語は、中国の戦国時代に書かれた諸子百家の一つの『尸子』（紀元前4世紀）や『淮南子』（紀元前2世紀）のなかで「往古來今これを宙といい、四方上下これを宇という」などと記され、漢語では宇宙は時空の広がりをもつものとして使われ始めたと言われている。これは現在の我々の宇宙観に通ずる。一方、英語の「cosmos」は、ギリシャ語の動詞cosmeo（整列させる、秩序立てるといった意味）からやがて世界・宇宙を表すようになったようである（18-13p, 21-12p）。それは、ギリシャでは天空を秩序立った完璧な世界と捉えたためと考えられている。

このような文字記録に残された宇宙観を我々の祖先がいつごろから抱くようになったか分かるすべはないが、具体的な天体観測の記録は文字が発達する以前に遡ることが出来る。

2.2 先史時代の天体観測

2.2.1 最古の月の満ち欠けの記録：人類は季節の移ろいを様々な兆から認識し、過酷な環境変化の中を生き延びてきたに違いない。特にホモ・サピエンスは厳しい寒さの氷河期を生き永らえる為に、天体観測や自然観察を行い季節毎の生活を営んでいたと、容易に想像出来る。しかし、一部の地域で文字が使用されるのはおよそ5,500年前であり、それ以前の様子は別の種類の遺物から探る他ない。月の満ち欠けを観察した絵と思われるもの、あるいはそれを記録したと思われる刻み目を骨の上に彫ったものが、フランスSergeacのAbri Blanchard、アフリカのコンゴ、フランスのGrotte du Taï から見つまっている。前二者⁸は3万～2.5万年前、後者は1.2万年前のものと推定されている（例えば、22参照）。

イスラエルのスフール遺跡からはホモ・サピエンスが作ったと思われる10～13.5万年前の首飾りにしていたと思われる貝殻のビーズが見つまっている（23）。そのようなものは数万年前から次第に増え3万年前頃になると、ヨーロッパのクロマニヨン人はショーベの洞窟壁画やヴィーナス等の“美術品”を作り始めていた。これらの遺物は、我々の祖先の知的な営為が数万年前に大きな飛躍をしたことを示していると考えられている（3参照）。

人類が何時ごろから天体観測をし、季節の移ろいを知ることが出来たかは分からないが、我々の祖先は少なくとも3万年前までには天体観測により季節を認識し、記録しようとしていたに違いない。3万年前といえば、ヨーロッパではクロマニヨン人（ホモ・サピエンス）とネアンデルタール人が、アフリカではホモ・サピエンスが狩猟採集生活をしていた時代である。当時の月の満ち欠けの観察の一つの効用は、季節の移ろいを知り食糧を確保するためであったろう。また、冬至・夏至・満月・新月あるいは日食や月食などを含め天体の動きを注視していたのは、そこに神秘的な力を感じそれらを信仰の対象にしていたと考えられる。例えば日が長くなり始める冬至を再び活力が戻る時と捉えるなど、季節の変わり目に宗教的な儀式を行っていたのではないかと、現在まで続く風習から想像することが出来る。

2.2.2 Nabta Playaの環状列石：アフリカの今のヌビア砂漠に位置するNabta Playa（カイロの南800km、

Abu Simbelの西100km）を含む地域には、現在、人は居住していない。しかし、そこからは1万年前頃から数千年前までの間に人々が暮らしていた遺跡が見つまっている。現在は年間を通してほとんど降雨がないが、1万年前頃には夏の間には多少雨が降っていたため人が住むことができたと考えられている。そこでは遊牧民がガゼルなどの狩猟を行う、あるいは牛の家畜化・ムギ耕作などをしながら土器を作り井戸を掘り季節的な定住生活を営んでいたことが分かっている（24）。そのナブタ新石器文化の最後の時期の紀元前4400年頃の遺跡からは、共同墓地や宗教的な儀式のための象徴、あるいは天文台としての役割を持っていた環状列石等が発見されている。埋葬のされ方を見ると、時として豪華な副葬品を伴う遺体もあるが、多くには差が見られないことから当時のナブタ社会には階層はなかったと思われる。また、菌の形を見ると地中海地方の民族とサブサハラ・アフリカの民族が混在しており、そこから発掘された遺物は、そこで盛んな交易が行われていたことも示している。

その環状列石は直径数mの輪に石が並んだもので、その石は北の方角⁹、夏至の日の出の方角と当時の輝く星の方向を示すように配列されていた。当時の人は1年の限られた時期だけそこで暮らし、季節毎に砂漠を移動する遊牧民であった。砂漠の海で方角を判断するためには、天体観測が欠かせなかったと考えられている。彼ら遊牧民にとって重要なものは「牛、水、死、地球、太陽、星」であったと言われている（25）。しかし、そこは次第に砂漠化が進み紀元前5千年紀の後半には天文台を作った人達の痕跡が消えてしまった。

2.3 ストーンヘンジ：ストーンヘンジはイギリス南部・ソールズベリーの近くにある円陣状に並んだ直立巨石とそれを囲む土塁からなる先史時代の遺跡である。そこでは紀元前8000年頃に柱を建てた跡も発掘されているが、その遺跡は主に紀元前3100年頃からおよそ1500年間に亘るものである。そこからは最大50トンに及ぶ巨石を使った環状列石などが発見された。そこで使われた80個程のブルーストーンという石は最大で高さ1.8m、重さは4トンである。それは珍しい石なのでどこで切り出されたかが調べられ、400kmも離れたウェールズのプレセリ山地で産出されたことが分かった。その巨石は川を利用し運ばれたと考えられているが、所々では海路や陸

⁸ その遺物は我々の祖先であるホモ・サピエンスのものと考えられる。それはホモ・サピエンスが抽象的な思考あるいは芸術的な表現の点でネアンデルタール人（2万数千年前に絶滅した）より優れていたとされているからである（3参照）。しかし、現在受け入れられている両者の違いは、現在活発に行われている遺伝情報の比較や遺物の研究により見直される可能性もある。ネアンデルタール人に関する研究の進展は2009年にまとめた（3）後に、大きく進展しており、何れ補いたいと思っている。

⁹ 地球の自転軸は約2万6千年周期の歳差運動（146頁1.6参照）をしているために。天の北極にある星は時代により違ってくる。当時は天の北極には星がなく、その周囲の星の動きから北を認識していたと考えられている（25）。

路も使われたと推測されている。当時の人々はカバやマツ、ハシバミの森を伐り拓いて土地を開墾し、農業や牧畜を営み、組織を作りこのような建造物を造ったと考えられている。当時の人が、巨石を長距離運ぶような苦勞をしながら何の為にストーンヘンジを造ったかは、文字の記録の無い時代のことであり分らない。しかし、そのような時代には全てのものは多重の意味をもっていたと考えられている。そこは太陽や月を信奉する神殿・天体の動きを写しとる暦・祖先の霊をまつる墓所・病気のけがの治療としての“癒し”を行う場所であったであろう。また、神殿に置かれた石は神々を象徴すると同時に、地位と権力をも表したはずである。このような新石器時代のイングランドで続いた巨石建造物の伝統は、ストーンヘンジで終わりを迎え、紀元前1500年頃から人々の足は遠のいてしまった(26)。

ストーンヘンジが“天文台”としても機能していたという説は、1740年に古物研究家のウィリアム・ステュークリー(1687～1765)が『ストーンヘンジ』という本の中で初めて主張した。彼は、ストーンヘンジのオーブリー・サークルの北北東の方向へ延びる約120mのアベニュー(そのほぼ中央にはヒール・ストーンと呼ばれる独立した石がある)の方向が「昼が最も長い日にはほぼ太陽の昇る方向」を指しているというヒントを示した。その後19世紀の終わりにフリンダース・ピートリ卿(1853～1942)、20世紀のはじめにノーマン・ロッキヤー卿(1836～1920、172頁8.2参照)(二人ともエジプトのピラミッドや寺院の方角が太陽や天体の動きと関連していることを研究していた)もストーンヘンジの石の配列と夏至の日の出の方角などについて研究を進めた(27-84-86p)。

しかし、そのことを実証するためには、ストーンヘンジが建設された当時の太陽や月の出没の位置と、多くの石や石にかけられた多数の穴を結ぶ方向との相関を調べる必要があった。ジェラルド・ホーキンス(1928～2003)は1963年に、紀元前の太陽、月、星や惑星の出没する位置と石などを結ぶ線が作る方向についての関係をIBM7090のコンピューターを使って調べた。その結果、太陽の方向とは1度以内の精度で10個の、月の方向とは1.5度以内の精度で14個の明らかな相関を示す線が各々存在することを発見した。例えば夏至の日にはストーンヘンジ全体の中心からヒール・ストーンの方角に太陽が上っていたことが分かった(27-68-79p, 28)。また、ストーンヘンジの公式地図ではSS-91, 92, 93, 94で示されるス

テーション・ストーン(91, 93だけが現存)を結ぶ線は、ほぼ完全な長方形をなし、その対角線はサーセン・ストーンを中心で交わっており、その対角線は夏の月の昇点の方向を、また一辺は夏至の日に太陽の昇る方向を、また他の一辺は冬至の日の日没の方向を示すことも明らかにされた。このような関係を示すステーション・ストーンが長方形を形成するのは、オックスフォードより南側、ボーンマスより北側の緯度の地域だけである。このことは、当時の人が天体観測を行い、ステーション・ストーンがつくる四角形の形が緯度により左右されることを知っており、長方形となるソールズベリーの近くに環状列石を築いたと考えられている(27-77-95p)。

先史時代の暮らしは文字記録が残っていないので、状況証拠から推測するしかない。しかし、上記の幾つかの遺物は先史時代の狩猟採集で暮らしていた旧石器時代の人々も、遊牧や農耕を営んでいた新石器時代の人々も、様々な思いで太陽・月・恒星・惑星の動きを見つめていたことを確かに示している。それらは食料を確保する、あるいは夜間涼しい時に砂漠を移動する際に方角を知るなど実用的な便宜のため、又は信仰の対象としたり、宗教的な儀式を執り行ったりするためであったろうと思われる。

2.4 古代エジプト・シュメール・バビロニアの天体観測・宇宙観

2.4.1 エジプトの天体観測と暦：エジプトでは毎年氾濫を起こすナイル川の流域に広がる肥沃な土地で農耕が盛んとなり、王朝が築かれた。紀元前4200年頃から原始王朝時代が始まった。古代エジプト時代は紀元前3100年頃に誕生した第一王朝から始まる。紀元前332年にはアレクサンドロス大王に征服されるが、紀元前305年にはプトレマイオス朝が成立し、紀元前30年に滅亡するまで古代エジプト時代が続いた。

そこでは、毎年起こる氾濫の時期を知るために天体観測により暦が作られたり、氾濫の後に耕地を再整備したりするための測量と幾何学が発達した。また、エジプトでは太陽神ラーへの信仰が篤く、天体に関する観察や占星術が重要であった。

古代エジプトでは紀元前3200年頃から神聖文字であるプロトタイプのヒエログリフが使われており、多くのことを知ることが出来る。記録によると、当時の人はナイル川の氾濫の時期を知るためにシリウス¹⁰の出没に注目していたことが分かる。太陽が昇る東の方角の地平線から日の出の直前に星が昇ることを日出直前出現とい

¹⁰ おおいぬ座のアルファ星で、地球からは太陽の次に明るく見える恒星である。太陽系からは5番目に近い恒星で地球から8.6光年の距離にある。

う。シリウスの日出直前出現が見られる時期は4500年前頃には現在とは違い、夏至に近い時期で丁度その頃にナイル川の氾濫が見られた。そこで、人々はそれをナイル川の氾濫の兆しと捉え準備をした。エジプト人はシリウスを生活全体の基盤となる星と捉え、1年の最初の日をシリウスの日出直前出現が見られる日とした。また、彼らは1年を365日とする太陽暦を編み出したと考えられている(29-46p)。

民間では1ヵ月を30日として、1年は12ヵ月と余分の5日を最後に加えた暦を用いていた。しかし、古代エジプト人は1年の長さは365日ではなくほぼ365.25日であることを知っていた。つまり当時の人は1年を365日とするエジプトの暦における1461年は本来の太陽年の1460年と同じであることも分かっており、1年365日の暦では次第に季節と日付のズレが生じるので、神官は、4年に1度の閏年に1日の閏日を加えた独自の暦を使っていた。民間の暦と神官の暦が統一され4年に1度、1日を増やす工夫を取り入れた「シリウス暦」が施行されたのは紀元前239年であった。また1日を24時間としたが、昼夜にそれぞれ12時間を割り当てたので、昼と夜の1時間の長さは昼夜あるいは季節で異なっていた(29-47p)。

また古代エジプトではピラミッドや神殿の方向が意図的に建設されていたようである¹¹。例えば、太陽神を祀るカルナック神殿の柱廊は夏至の日没線に合わせて建設されていたことも明らかにされた(29-48p)。このように当時エジプトの人が至点や春秋分点の太陽の方向を観測しそれらと関連付けて建造物を建設したことを指摘したのは、ノーマン・ロッキヤー卿に始まる¹²。彼はその後ストーンヘンジの天文台としての機能についても前述したように持論を展開した(27-85, 137p)。

2.4.2 古代エジプトの星座と宇宙観：古代エジプトでは、12ヶ月に相当する360日に対応するように、天空を10度毎に36に分けて、それらに一つずつ星のグループを割り当てた。紀元前30年頃に建造されたと言われているデンデラにあるイシス神殿の天井に黄道に沿う36の星のグループ(decans)が描かれている(29-46p)(本頁2.4.3参照)。

またエジプトでは、太陽神への信仰が強く、天空の動

きを太陽神中心に捉えていた。海に見立てた天空を太陽神が舟に乗って動き、日没になると太陽神は天空の女神であるヌーに食べられてしまい、翌朝再びその体から生まれてくると考えた。このように彼らにとって、天空の動きは神々のものであった。エジプト以外の多くの人々も、天空の世界は数多くの神々の世界であると信じていたと思われる。

2.4.3 メソポタミアの天体観測：メソポタミアの森と草原の狭間に住む人々は1万年以上前から野生のコムギを利用し始め、そこから人間にとって都合の良い栽培種を数千年かけて選別していった。さらに天水では農業を営めないチグリス・ユーフラテスの中下流域で灌漑をすることで生産量を増大させ都市国家を築き始めた。紀元前3500年頃にはシュメール文字が使われるようになり、印章も作られ始めた。また、彼らは宵の明星・明けの明星として知られるひときわ明るい金星をシュメール神話の女神イナンナとして崇拝していた。紀元前3300～3200年頃の印章には太陽・月・金星を表すと考えられる星が刻まれていた(30)。

そこではエジプト同様、農業を営むためあるいは信仰のために天体観測が行われていたと想像される。また、その地方では、都市の周りに遊牧民も多く暮らしており、彼らは移動のために星空を観察していたはずである。紀元前3000年頃になると、月の満ち欠けに基づいた太陰暦が使われるようになった。太陰暦の12ヵ月は太陽の動きに基づく1年にはならないので、3年に1度1月を加えていた(30)。

この地方には紀元前1900年頃にバビロン王朝が築かれ、シュメールの名残を留めながら新たな国家が栄え、天文学・科学が興った。そこでは、太陽・月・惑星などの天体の位置や動きなどから、人間・社会のあり方や吉凶を占う占星術も生まれた。また、星を幾つかのグループとして神話に登場する英雄や動物などとして見立てる星座という概念も作られた。人がいつ頃から星座を作り始めたかは定かではないが、最初の星座表は紀元前12世紀にバビロンで作られた『Three stars each』である(31)。それは天空を三つに分割し36の星座¹³を含むものであった。その後、紀元前686年に作られた『Mul Apin』には

¹¹ 中王国時代からプトレマイオス朝にわたって、多くの神殿などが建設された。

¹² 時代は下るが巨大な建造物が“天文台”としての役割を担っていた例としてマヤ文明の最大級の都市の一つのチチェン・イツァ(6～12世紀に栄えた)に建てられたククルカンの神殿もよく知られている。春分と秋分の日には太陽が沈む時に、真西から照らされて出来る影に残されて輝く部分が、ピラミッドの下部にある蛇の頭につながる胴体を形成する。それは、ククルカンの降臨と呼ばれている。

¹³ 現在は国際天文学連合が定めた88星座が一般的であるが、それはバビロンに始まり、ギリシャのプトレマイオスが著書『アルマゲスト』(160頁3.4.6参照)に著した48の星座を含んでいる。バビロンで名付けられた星座の名前にシュメール語に起源を持つものがある。星の名前や黄道12宮の星座名には砂漠を含む乾燥地帯で暮らしていた遊牧民の生活から生まれたものもあることなどから、星座の命名に遊牧民も関わっていたことを主張する人もいるが(32-1～2p)、定説とはなっていない(30)。

71の星座が登録されていた¹⁴。当時は黄道上に当てはめられた星座は12より多かったが、紀元前600年頃に現在占星術¹⁵でも使われている黄道12宮が定まった(31)(図2、152頁2.4.2参照)。

バビロニアの占星術は、洪水や旱魃や戦争などの到来についてあらかじめ警告を与えようとしたものであった(33-3-9p)。そこでは占星術の他にも生け贄にされた動物の肝臓の状態も凶事や災害の前兆を判断するために用いられていた(34-70p)。これらの占いは国家の運営に重要な役割を果たしていた。バビロニアの星座はホメロスが登場する紀元前8世紀頃にはギリシャ神話と混じり合い、紀元前3世紀にはギリシャの解釈にとって代わられていった(35-24P)。

バビロニアでは数学もまた発展した。彼らは日常生活には主に10進法を使っていたが、数学には60進法を用いた。我々が1時間を60分、1分を60秒とする、あるいは円の角度を360(6×60)度とすることはその時に始まっている(34-135p)。また、1日を24時間とするのは、エジプトで1年を12ヵ月に分けると共に、昼と夜をそれぞれ12に分けたことによっている(151頁2.4.1参照)。

当時、日食や月食を予測することは重要なことであった。バビロニアでは天体観測の結果、ほぼ同じ条件の日食あるいは月食が起こるサロス周期¹⁶が分かっていた。

太陽が黄道と白道(天球上における月の通り道)の交点から再び同じ交点に戻るまでの期間を1食年(346.62日)という。太陽がその交点を通過する頃に、月が新月(朔)であれば日食、満月(望)であれば月食となる。バビロニアで紀元前5世紀の初めには作られていた暦は太陰暦で、彼らはそれを補正するために、閏月を適宜入れていた(36-36p)。1朔望月(29.53059日)と1食年との間には $223 \text{ 朔望月} = 29.53059 \times 223 = 6,585.32 \text{ 日}$ 、 $19 \text{ 食年} = 346.62 \times 19 = 6,585.78 \text{ 日}$ という関係が使われていた(27-157p)。また、235朔望月が太陽暦の太陽年19年に相当することも分かっていた。つまり、 $235 = 12 \times 12 + 13 \times 7$ となり、19年の間に7回閏月をいれることで補正していた¹⁷。サロス周期も太陽暦と太陰暦の補正に用いられていた。

バビロニアの暦は、紀元前433年にアテナイの数学者メトンのメトン周期に引き継がれて行ったとされており

(3.2.4参照)、バビロニアで発達した天文学はギリシャに受け継がれていくことになった。

2.4.4 古代中国の天体観測：中国では殷王朝(紀元前17～11世紀)になると甲骨文が使われ、天体観測に関する記録も残っている。そこでは太陰太陽暦が用いられ、月の満ち欠けによる太陰暦を補正するために3年に1回閏月を置いたり、日付を表すのに十干十二支が使われたり、10進法と60進法が活用されていたと考えられている。また紀元前11世紀頃の周王朝時代には南中時の太陽がつくる影を測定する測景台とよばれる天文台(登封市告成鎮に現存する)が造られていた(29-38-41p)。

2.4.5 古代インドの天体観測：インドではサンスクリットによって書かれた紀元前1000～紀元前400年頃の『ヴェーダ』¹⁸が残っているが、そこには天文観測に関する記載は見られない。また暦法も確立されていなかったと考えられている。紀元前400年以降になると、バビロニアの影響を受けて暦法が作られた(29-38-41p)。

2.4.6 アメリカ先住民の天体観測：紀元300年頃から16世紀初めまで続いたマヤ文明は天体観測に優れており、13日の20サイクルの260日を一周期とする宗教的なカレンダー、更に360日を周期とする暦と、1年を365日とする太陽暦のカレンダーを併用していた。また天文学と関わりのある建造物がいくつも建てられていた(37-46p)(152頁脚注12参照)。しかし、その文明は11世紀頃には衰退してしまった(例えば、5参照)。

一方、西欧では日食・月食などを予測する天文学が古代から連綿と続いており、新大陸に向かったクリストファー・コロンブス(1451頃～1506)もその知識を習熟していた。彼は座礁したジャマイカで、現地人の助けを受けることが出来ず、食料危機に陥った。彼はその時、直後の1504年2月29日に月食が起きることを記した西欧天文学の集大成の一つであるレギオモンタヌス(162頁4.2参照)の暦をもっていた。そこで、食糧を供給してくれなければ、私たちの神が月を消してしまうだろうと告げた。その日に月は次第に姿を消した。現地人は恐怖におびえ月を返してくれと嘆願した。コロンブスは食糧提供を条件に彼らに月を返した(37-91, 92p)。当時ジャマイカに住み着いていた人々の祖先はマヤ文明の伝統に

¹⁴ その源泉は紀元前1000年頃に遡ることが出来ると言われている(31)。

¹⁵ 占星術は春分の日(春分の日)の黄道に見られるはずの星座からはじまる12の星座によっている。占星術が生まれた頃は、それは「おひつじ座」であった。しかし、地球の自転軸の歳差運動で次第にずれて、紀元元年の頃には「うお座」となり、現代は「みずがめ座」になろうとしている。占星術では誕生日の日の12時に真南に見える星座をその人の星座としている。現在では、その星座は紀元前600年頃とはずれているが、今なお当時の方法が用いられている(147頁図2参照)。

¹⁶ 日食や月食が起こる日を予測するのに用いられる周期で、1サロス周期は6585.3212日(約18年10日8時間)である。

¹⁷ 太陽年は365.242194日で19太陽年は6939.601686日である。また1朔望月は29.530589日で235朔望月は6939.688415日で、両者はほぼ等しい。このような精度で当時の人々は天体の観測を行っていた。

¹⁸ 主にリグ・ヴェーダ(149頁2.1参照)、サーマ・ヴェーダ、ヤジュル・ヴェーダ、アタルヴァ・ヴェーダの4つの宗教文書。

接する機会がなく、当時の原住民は暦についての理解が進んでいなかったと想像出来る。

また北米のニューメキシコ州のチャコ・キャニオンでは、紀元900年～1150年にかけてプエブロ文化が栄えた。そこからはグレートハウス遺跡が見つかる。これも当時の人々が天体観測を行い冬至の時に儀礼を行っていたことを示すものである。そこには星や月を描いた岩絵も残されている (37-10~14p)。

このように地域によって残されている証拠の年代は違うが、各地の人々が天体観測を行うことで暮らしを維持していたことは確かである。また、多くの地域で、日食や月食を予測出来るような正確な暦をつくり暮らしていたことも遺物や記録によって裏づけられている。

次に主に西欧において宇宙観・地球観がどのように変遷していったのかを、物質観についても折にふれ言及しながら概観する。

3. ギリシャの宇宙観・地球観・物質観

3.1 概略：エーゲ海では紀元前3000年頃から青銅器時代が始まり、紀元前1700年頃にはクレタのミノア文明が最盛期を迎えた。紀元前1600年頃にはギリシャ本土にミケーネ文明の中心地が建設され、紀元前1000年頃には、ギリシャ本土から小アジアの沿岸地方イオニアなどへの植民が始まった。紀元前776年には第一回のオリンピアの祭典が催されるなどギリシャは発展を続けた。紀元前8世紀末の吟遊詩人ホメロスは、『イーリアス』と『オデュッセイア』を残したとされている。また紀元前700年頃には、アテネの西北の寒村に住む農民詩人のヘシオドスが『仕事と日々』を著した (38-15~45p)。このような中で、ギリシャでは自然観察を含む哲学が隆盛を極め、アリストテレスを初め多くの知を愛する人々が輩出された。

ギリシャを中心とした科学的思考の発展は900年に亘る三つの時期に大別出来る。第一の時期は最も独創的かつ創造的であった紀元前600年からアリストテレスの死の紀元前322年までの科学の「英雄時代」であった (中でも紀元前400年～紀元前320年はプラトンとアリストテレスに代表される哲学の発展が注目され、論理学的術語が創作された「黄金時代」として特別に扱うことが多い)。第二の時期はアレクサンドリア市の建設 (紀元前332年) からキリスト紀元の初め頃のローマによる東方征服の完成までの「教科書の時代」で、プトレマイオス朝の庇護の下に科学の全部門が発展した。最後の時期はローマ

帝国の帝政への移行 (紀元前27年) 後の約300年である (33-38p)。最後の時期には科学の革新的な発展はなかったが、天文学では天動説を完成させたプトレマイオスが現れた。

3.2 初期「英雄時代」

3.2.1 ミレトス学派 (タレス・アナクシマン드로ス)：エジプトやバビロニアは灌漑設備・ピラミッド・神殿・王宮の造営を行う絶対的な権威を持つ中央政府により支配される社会であった。そのような社会を支えるために数学的天文学・暦・度量衡が発達したが、王権的な社会の宇宙観は“神話的”要素を多分に含んだものであった。エジプトは紀元前1000年頃には衰退期に入ったが、バビロニアの文化はその後も旺盛な成長を遂げた。一方、紀元前1000年頃からエーゲ海に面したアナトリア半島の南西部に古代ギリシャのイオニア人が住み始め、紀元前800年頃には都市国家ミレトスが造られた。そこでは政治権力は商業貴族の掌中にあり、実践的な技術の急速な発展が求められていた。そのためにミレトスで神話的な解釈から脱却した自然哲学が生まれた (33)。

ミレトスのタレス (BC624頃～BC546頃) は海を渡ってエジプトに行き、多くの知識を吸収した。彼は測量術を学ぶと共にバビロニアの天文学にも通じていった。エジプトでは地に落ちたピラミッドの影と自分の影・身長とを比較して、ピラミッドの高さを推定したと言われている。また、紀元前585年5月28日に起こったと考えられている日食を予言したとも伝えられている (37-60~61p)。

また、アナクシマン드로ス (BC610頃～BC546頃) は初めて世界地図を作った。このようにミレトスでは神話的な過去の遺産を引き継ぎながらも、商人が利用出来る航海術等の実利的技術を含めた自然哲学が誕生し、“神話的世界”からの脱却が始まった (33)。しかし、アナクシマン드로スの宇宙観は、地球は不動の「円盤状大地」で、それが宇宙に君臨し、その周りを全ての天体が同心円状に取り巻いているというものであった。このように、当時の人々は地球を「平らな大地」と見なしていた。しかし、当時の宇宙観は観察に基づくものではなく、あくまでも思弁的なもので、惑星の運動などについて数々の矛盾 (157頁3.3.2、158頁3.3.4、160頁3.4.8参照) を抱えていた (39-28p)。

彼らは物質の成り立ちについても考えていた。タレスは存在する全てのものは水から生成し、再び水へと消滅していく、即ち万物の根源 (アルケー) は水であると考えたと言われている¹⁹。一方、アナクシマン드로スは全

¹⁹ アリストテレスは哲学とは知を愛することであるとした。その中でも、ものごとのそもそもの始まり、つまり「アルケー」に関する知こそが最も根源的なもので、タレスはその「アルケー」について深い思索を最初に行なった智恵の愛求 (哲学) の始祖であると『形而上学 (上)』の中で高く評価している (40-32, 33p)。

ての事物の根源は水であるというタレスの考えに異議をさしはさみ、世界を構成しているのは四つの元素(土、水、火、霧)なのだから、なぜ全ての事物が土であっては、あるいは霧であっては、あるいは火であってはいけないのかと問うた。彼は、これら四つのものは互いに他のものに変わりうるので、それは全てに共通な或る「無規定的なもの」²⁰の四形態であると言った方が良かった(33-47p)。この他、アナクシメネス(BC585～BC525)は空気を、またヘラクレイトス(BC540頃～BC480頃)は火を万物の根源と考えた(33-49p)。

ミレトス派は「世界が何で出来ているか」について、それは擬人化された神の意志ではなく、物理現象であるとし、それを観察により解き明かそうと試みていた人々である。ギリシャの古典に精通したベンジャミン・ファリントン(1891～1974)は「当時の気風は技術者たることを名誉とするものであった。知恵または知識と訳されるギリシャ語「ソフィア」はその当時には技術的な巧みさ(えらさ)を意味しており、抽象的な思索・思弁を意味するものではなかった。あるいはむしろ、いまだなおこうした二義に区別されるに及ばなかった。(中略)そこでは存在の全領域にわたって合理的な思想の確固たる自覚ある運動が展開されていた」と要約している(33-116p)。

万物の根源についてはギリシャ以外でも人々の関心を集めていた。中国では「木・火・土・金・水」を「五行」とし、それに「陰陽」を加わえたものによって宇宙の全ての現象が現れると考えられていた。また、インドに始まる仏教では、ギリシャの人々と同じように万物の根源は「地・水・火・風」の「四大」であると考えられていた。

3.2.2 ピタゴラス派：エーゲ海の北東部、トルコ沿岸にあるギリシャのサモス島に生まれたピタゴラス(BC582～BC496)は、数学・音楽・哲学の研究を行い、現在の南イタリアのロクリスに本拠を置く宗教的結社のピタゴラス教団を作った。彼は月食の時に見られる地球の影の形から、地球が球形であると考えた(37-64p)。また彼らは諸天体が完全な球で、完全な円運動をすることとした。しかし、実際には、惑星の運動は不規則であった(急速にあるいは徐々に動く、また時には停留所と言われるところに立ちどまる)。このような惑星の動きは、天体が円環的で斉一的な運動をするという彼らの仮説に反する無秩序なものであり、許すべからずことであった。彼らの天文学は天体が神的なものであるという信仰に根ざした宗教的なものであり、「完全な」ということには数学的及び道徳的な「美しさ」という意味が含まれていた。そ

のような認識は物質の根源は「数」であるという彼らの信念から思弁的に導かれたもので、観察によったものではなかった。即ち、彼らは数学の諸命題を純粋な理性で質料から抽出して考察することにより、数学を基本的な諸原理の上に確立することに努力したといえる。ところが、惑星の動きは彼らの宇宙観では説明出来ず大きな課題として残り続けた(41-65, 98, 141～144p)。

ピタゴラス派のフィロラオス(BC470頃～BC385)は『自然論』²¹を著したが、宇宙についてはその中心に中心火と呼ばれるものがあり、球体である地球がその周りを回転しており、太陽は地球の更に外側を回っていると考えた。地球からは太陽は見えるが、宇宙の中心の火は、地球がその周りを1日で公転すると同時に、同じ周期で自転しているため、地球上の人に対して常に足の下(地球の裏側)に位置しており見えないとした(39-31, 32p)。フィロラオスの考え方は、当時の常識である地球が不動の宇宙の中心という考えに反しており、コペルニクスにより再発見されるまで顧みられることはなかった(29-60p)。

またピタゴラス派のエクパントス(BC4世紀)も、大地は球体であり、星空が回転して見えるのは地球が自転しているための見かけの動きであるとしたが、注目されなかった(18-27p)。

3.2.3 原子論：アナクサゴラス(BC500頃～BC428頃)は例えばパンを食べると、これが骨・肉・血・腱・皮膚・毛髪などになるが、それは小麦の粒子のうちにそのようなものになる微小な構成要素があるためだと考え、それを「種子」(spermata)と呼んだ(33-84p)。

デモクリトス(BC460頃～BC370頃)はアナクサゴラスやレウキッポス(BC440～BC430頃に活躍)の影響を受け原子論を主張した。それは、宇宙が原子と空虚から成り立っており、宇宙が作られる単位は数学的なものではなく物理的なものであるというものであった。彼の考えた原子は、微小ではあるが大きさを持っているので、空間的には可分的であるが、物理的には不可分なものであり不可入的であった。そのような形や大きさが異なる無数の原子が様々な結合・分離することにより感覚で捉えられる性質や生滅の現象が生じるとした(33-87～89p)。

しかし、ギリシャ時代は後にアリストテレスが発展させた「自然は空虚(真空)を嫌う」という概念が主流で、四大元素の考え方が受け入れられており、原子論は注目されなかった。

デモクリトスは天の川についてそれは乳のように見え

²⁰ 即ち彼にとってのアルケーは無規定的(あるいは無限なもの)なもの、アペイロンであった。

²¹ それはピタゴラス教団の取り決めに反し秘儀を漏らしたものと言われているが、プラトンはそれを読みピタゴラス派の考え方に精通したとされている。

るが、実際は無数の星からなっているもので、その光が弱く互いに近すぎるために見分けられないものであると主張した (35-28p)。

一方アナクサゴラスは宇宙について、太陽は燃え盛る巨大な石の塊で²²、月は太陽の光を反射して光っており、日食は月の影が大地に投影されることで生じ、月食は大地の影が月に投影されて起こるとした。しかし、彼の想定した大地はあくまでも円盤で「平面」であった (39-30p)。太陽を燃える石とした彼は太陽神を冒瀆する不敬の罪に問われ、アテナイを追われた (42-50p)。

3.2.4 メトン周期：アテナイ生まれのメトン (生年・没年は不詳) はギリシャで最初に正確な観測を行った天文学者の一人で、バビロニアの成果を参考に紀元前433年にメトン周期を発見したと言われている (152頁2.4.3参照)。彼は1太陽年を365日ちょうど、1朔望月=29.53日とし、19太陽年=235朔望月 ($29.5319 \text{日} \times 235$) =6,940日として計算していた。メトン周期に従うと19年間に7回の閏月を入れれば太陽年とのずれが解消される。しかし、19太陽年と235朔望月とは完全に一致しておらず、実際には19太陽年につき約0.0867日ずれてしまう。この差は219太陽年が経過すると、ほぼ1日のずれとなる。そこで、時々改暦を行い、ずれを矯正する必要があった。そこで、カリボス (BC370頃～BC300頃) は1太陽年を365.25日、19年は6,939.75日、これを4倍した76年を27,759日とした。即ち76年でメトン周期より1日減ったことになる。一方、朔望月の235月を4倍した940月を27,759日とした。即ち1朔望月は29.53091日ということであった。この76太陽年=940朔望月=27,759日のカリボス周期は紀元前330年に採用された。更に、ヒッパルコス (160頁3.4.5参照) はカリボス周期を4倍して1日引き、304年=3760月=111,035日とするヒッパルコス周期をつくった。これによれば1太陽年はおおよそ365.24671日、1朔望月はおおよそ29.530585日ということで、現在測定されている太陽年365.242194日、また1朔望月は29.530589日と比べて遜色がない。

3.3 黄金時代：黄金時代はソクラテス (BC469頃～BC399頃、デモクリトスと同時代)・プラトン (BC427～BC347年)・アリストテレス (BC384～BC322) が活躍した英雄時代の特別な一時期である。

3.3.1 プラトンらとミレトス学派の違い：ソクラテスは著述を行なっておらず、彼の考えは弟子のプラトンなどの著作により伝えられている。プラトンは天文学・生物学・数学・政治学・哲学について学び、紀元前387年に

は、アテナイ郊外に学園アカデメイア²³を設立し、そこでアリストテレスを含む多くの後進を育成した。

彼らとミレトス学派の思想の違いを主にベンジャミン・ファリントンによって要約したい。(33) (157頁3.3.3まで)。

ミレトス学派の自然哲学者たちは実証科学の理想と普遍的法則の支配を追求しようとした。彼らは単なる自然の観察者であっただけではなく、彼らの観察眼は当時の諸技術に刺激され鋭く活気づけられていた。これに対し、ソクラテスは「宇宙について思索したり、地下の一切をしらべ上げたり」しようという自然学者の面も持っていたが、問答による論理の構成という分野を強く推し進めた。即ち彼は、自然を実証科学として捉えるのではなく、「イデア説」を持ち出し、自然を目的論的に説明し、人間の歴史を神的摂理として説明しようとした。ソクラテスはミレトス学派とは考えを大きく異にしていた。

プラトンも師ソクラテスと同様ミレトス学派を批判した。彼は観察と思维の要素を持ったミレトス学派が「土と空気と火と水の四元素は全て自然と偶然によって存在していて、そのいずれも意図または摂理 (予見) によって存在するのではなく、諸元素の次に位する諸物体 (大地、太陽、月、星など) はその絶対的に無生命な諸元素によって作られたものであり、これらは相互の間に存在する或るなんらかの親近性に応じ、これらに内在する或る力によって動かされている。即ち火と水と土と空気とが万物の根本元素であり、これらが《自然》を構成しているのであって、靈魂はこれら根本元素からのちに形成される」と主張していると批判的に捉えた。更にプラトンは、ミレトス学派の実践的技術は人間が自分たちの利益幸福のために自然を知って自然と協働しようとする知的努力に基づいており、そこから彼らは「自然は可知的である」とみなしているとした。即ち、プラトンは、彼らの宇宙論は、物質の世界そのもののなかに一つの必然的秩序があり、人間の精神は、これがその必然的秩序をとらえている限りにおいて、世界の真理を認識しているものと考えたのである。またプラトンは、ミレトス学派が必然的秩序は技術を用いる人々の経験が必要な手懸りを与える感覚の明証によってのみ知ることが出来ると考えた、と把握した。ミレトス学派のこのような考えは以下に述べるプラトンの思想とは大きく違うものであった。

プラトンは、精神と物質とはあたかも主人と奴隷のような関係で、もし「自然」になんらかの規則正しさまたは美しさが存するとすれば、それは精神すなわち宇宙霊

²² エンペドクレス (BC490頃～BC430頃) も太陽は巨大な火の塊であるとした。

²³ 529年に東ローマ帝国皇帝ユスティニアヌス1世の非キリスト教的学校の閉鎖政策によって閉鎖されるまで、およそ900年間続いた (195頁11.4.1参照)。

魂が、それ自らでは本来無秩序な物質に秩序を与えているからだと考えた。彼は、我々をこの世界についての真の科学（真理認識）に導くものは、理性であって感覚の明証ではないとした。このようにプラトンの新見解は、以前のミレトス学派の自然哲学者たちの第一前提からの徹底的訣別を意味するものであった。即ち、プラトンにとっては、真の科学（真の認識）は目的論的で、現象をある目的に照らして解釈することであり、しかもその目的というのは、精神すなわち宇宙靈魂が万物を指導しようとして初めから目指しているところのもの（アイデア）であった。そして彼は、この目的は観察によって発見されるのではなく、理性によってのみ発見されるとしたのである。更に真理の発見は自然に働きかけることによってではなく、目的についての理性による議論によってだけなされるとした。

3.3.2 プラトンの宇宙観：このような考え方からプラトンは、この宇宙は、神が質料（ヒュレー）からアイデアを範型として制作したものであって、無から創られたものではなく、最高のアイデアは、善のアイデアであり、それは存在と知識を超える最高原理であるとした。更に、彼はピタゴラス派が旨とする神聖な数と調和と均斉のとれた数学の概念を引き継ぎ、宇宙の階層構造を正四面体の「火」、正八面体の「空気」、正二十面体の「水」と、正六面体の「土」の四大元素の組み合わせからなるものと捉え、正十二面体は王道12宮に対応するものとした。

このようにプラトンは、天体の見かけの上の運動がどうであろうと、宗教上の根拠から、それらの真実の運動は斉一的な速度で完全な円を描く回転運動であらねばならないと確信していた。しかし、実際に観察されていた姿はそのような斉一的な規則正しい円運動を示すものばかりではなかった。例えば、惑星は停止したり後退したりしてその速度が変わるように見えた。また月も惑星も、ともに黄道に近寄ったり遠ざかったりして、黄道との距離が一定していないように見えた。更に、太陽の速度さえ斉一的でなく、太陽が至（夏至・冬至）から分（春分・秋分）に、分から至に達する日数が違っていた²⁴（147頁1.7参照）。つまり、後進に残された課題は、プラトンの確信を証明するために「いかなる運動を想定すれば、惑星の運動の見かけの不規則性を救って、これを斉一的な秩序正しい運動として説明しうるか？」であった。

3.3.3 イオニアとギリシャの社会構造の違い：イオニアのミレトス学派とプラトンらの考え方の相違は、技術に支えられた商業国家のイオニアと奴隷制度に支えられていたアテネの違いに影響されたと考えられる。古いイ

オニアの自然哲学者たちは、技術の操作過程を成功させるために物質の規則正しい動きに注目した。彼らは自然を客観的な秩序があるものと捉え、客観的秩序としての自然の合法則性という観念を初めて持つようになった。彼らは、天体の運行の秩序正しさからではなくて、限りなく繰返された経験からそれぞれの事物にはそれぞれ自らの動き方があるということを悟った。また彼らは、自然を無限に多種多様な器用巧者であるとともに自分の法則については一歩も譲歩しない頑固なものとしても捉えた。そのような認識は物質に働きかけてこれを操作的に統制しようと試みる技術者たちの抱く自然概念であった。一方、ソクラテスに代表される自然観は、自然は自らに一定の目的を課していて、その意志を隷属者的ではあるが強情な物質の上に強行しようとする一つの力を持っているという新たな概念であった。それは、奴隷を支配する主人のいづく自然概念であったと言える。

黄金時代は、技術による自然支配が既に高い水準に達していたが、逆に奴隷所有の発達により新たな危機がもたらされた。即ち、少数のギリシャ人に文化的有閑生活の可能性が与えられたが、それと同時に彼らの地理的拡張は、弱小民族や後進民族を奴隷にする可能性も与えたのである。奴隷制は、初めは家内労働的であって酷使的ではなかったが、次第に運搬や採鉱やそのほか多くの農業的・工業的重労働を異民族の奴隷達に背負わせる組織的なものとなった。市民たる者の理想は、手を使う仕事に携わらない者であることであった。そこでは一つの都合のいい理論が生じた。それは人類のうちで彼ら以外の種族は市民（自由人）に適しておらず、手仕事しか出来ない種族であるように自然が意図してそう創ったというものであった。科学の多くの部門にとって技術の過程についての知識は本質的に重要であるにもかかわらず、ギリシャでは実践的な作業は奴隷のすべき仕事だとして技術が奴隷の手にゆだねられるという悪い結果を生み出した。その結果、科学の理想は、市民に代表される言葉の上のものであり、奴隷が関係する実践・行為とは関係のないものとされた。ギリシャ社会は富裕な市民と貧乏な市民とが奴隷による生産物を奪い合う闘技場になろうとしていた。そのような社会的条件のもとで、関心は自然科学から政治と倫理に移り変わったのである（156頁3.3.1からここまで主に33-2, 3, 52-60, 109, 128, 220, 221, 225, 226pによる）。

後のアリストテレスも「奴隷は生きた財産である。（中略）奴隷と家畜の用途には大差がない。なぜなら両方とも肉体によって人生に奉仕するのだから」と奴隷制度を

²⁴ プラトンの生まれたBC427年より数年前にメトン（前頁3.2.4参照）により確定されていた（41-109p）。

肯定した(43-38~42p)。アテナイの最盛期には自由市民の数倍の奴隷がいたともされているが、それほど多くはなかったとも言われており奴隷の数ははっきりしない。しかし、当時のギリシャが奴隷制度に支えられていたことは確かである(42-22~24p)。ここで紹介したファリントンの見方は一方的であるという批判もないことはない。しかし、彼のミレトス学派とソクラテスらの考え方の相異に対する見解は、本論の最後に「知」について考察する上で大いに参考となる重要なものである。

3.3.4 「同心天球説」: エウドクソス(BC407頃~BC355)はアカデメイアにおいてプラトンの代理を務めたり、医学と政治学を研究したりしていた。彼はプラトンの宇宙観に関して残した課題に答えるべく、天体の運動について地球を中心にした幾つもの同心円の天球から成り立つ「同心天球説」を唱えた。

それは恒星の出没を示す日周運動に対しては天の北極と南極を結ぶ線を軸として回転する天球を、太陽については、日周運動のための天球と、黄道が天の赤道に対して傾いていることを説明するための天球、更に太陽の運動の遅速をもたらすための天球の合計三つの天球を含んでいた。同様に月に対しても三つの天球が、更に5つの惑星(水星、金星、火星、木星、土星)については逆行を含む複雑な動きを説明するためにそれぞれ四つの天球が考えられ、その説は合計で27個の天球からなる複雑なものであった。しかし、それによって説明される惑星の動きは単純な「8の字運動」に過ぎず、実際の惑星運動とは程遠かった。また、金星や火星の明るさが変化することは地球との距離が変わっていることによるが、「同心天球説」はそれについても説明出来ない不完全なものであった。ところが当時の多くの天文学者は何ともしも同心球で宇宙の説明を完成させることに憂身をやつしていた(41-121p, 44-100, 101p)。

エウドクソスよりも半世紀以上前にメトン(156頁3.2.4参照)やエウクテモン(紀元前5世紀)は既に太陽が円軌道の二つの至と二つの分とで切られる四分円のそれぞれを通過する時間は同じでないという事実を発見していた(160頁3.4.8と147頁図2参照)。即ちエウドクソスは太陽の1年間の運動は完全に斉一的ではないという彼らの観測結果を無視して「同心天球説」を唱えたと考えられる(41-111p)。

3.3.5 支持されなかった異説: フィロラオスやエクパントスは天体が回転して見えることは、地球が自転している結果であると考えたが(155頁3.2.2参照)、当時は不動の大地の上を天体が回転しているということを多くの人が信じていたため「地動説」は異端であり、無視された。

そのような中でヘラクレイデス(BC387頃~BC312頃)

も、水星と金星は太陽の周りを回っており、そのように水星と金星を従えた太陽と火星等の外惑星が地球の回りをまわっているという説を提唱した。また、彼は地球の周囲を天が1日1回転するように見える見かけは、地球が自らの軸をめぐって1日に1回転するという仮定の上に立っても同じように説明出来るとした。しかし、彼の説の評価も芳しくなかった(39-51p, 41-111p)。

3.3.6 アリストテレス: アリストテレスはマケドニア王の侍医ニコマコスの息子としてマケドニアのスタゲイラに生まれ、後のアレクサンドロス大王となる王子の家庭教師を務めた。彼は長い間マケドニア勢力の庇護を受けたが、生涯の最後の年に反マケドニア感情の爆発したアテナイを退去しなければならなかった。アリストテレスにはソクラテスやプラトンのような偉大な国であるギリシャを祖国に持つ人の誇りや苦しみはなく、権力者を説得して政治改革を行わせようという熱意は持っていなかったと考えられている。一方、彼は小国の悲しみと困難を経験し、むしろ与えられた国家体制の中で現実的な生活の知恵を生かして賢明に生きる実際的な人であったと思われる(45-18, 20, 34p)。彼はプラトンの弟子で政治学・倫理学・心理学・文学理論などの人文系の学問から、天文学・気象学・化学・動物学・植物学などの自然科学系の諸科学あるいは論理学・科学方法論までを学び、それらを専門科学として分化させるきっかけをつくった(45-9p)。ローマの文筆家キケロ(BC106~BC43)は「自然はアリストテレス学派の人たちによって限なく探索され、天にも海にも陸にも彼らに見のがされたところは一つもなかった。さらにまた、彼らが万物の創成と宇宙の構造を取り扱うにあたって確立した教説の多くは、単なる蓋然的論議によるのではなくて、数学的証明によって結論づけられたものであり、彼ら自身の観察にもとづいて多量の資料が提供されたために、これまで知られずになっていたような事実が発見されるようなことになったのである」と評価した(45-37p)。

3.3.7 アリストテレスの宇宙観: 以下に紹介するアリストテレスの天動説は、その後プトレマイオスにより更に数学的完成度が高められ、長い間、世界を支配する宇宙観となった。地動説を唱えたガリレオは『太陽黒点に関する第二書簡』の末尾で「現代まで隠されていた予期せざる驚異からなにか収穫するには、今後、天空の実体についてアリストテレスとは違ったように考える賢明な哲学者たちに、耳を傾けるのがいいでしょう。アリストテレスその人であっても、現在の感覚的測定を知っていたら、彼らの考えとそう違いはしなかったでしょう。なぜなら彼は、自然の諸問題に関して結論づけることを可能にする方法として、明白な経験を認めたのみでなく、

それに第一の地位をあたえたのでした」と述べアリストテレスの認識方法を高く評価し、彼に深い敬意を示していた (46-125p)。アリストテレスの思索は革新的であったが、限界が無かったとは言えない。

アリストテレスの宇宙観は、世界の中心に不動の地球があり、その外側に55の同一中心の球があり、その上を月、水星、金星、太陽、その他の惑星などが動いているという階層構造から成るものであった。また彼は宇宙を月より下に存在する世界とその上に存在する天体に分けた。月から下の世界は、土・空気・水・火の四元素から成り、そこでは我々を含む事物は生成消滅・変化するものとした。更に、そこでの「自然的な」運動は上り下りの直線運動で、相互に混合し変形しうるものと捉えた。一方、月より上の天空の「自然的な」運動は永遠的な円運動であり、それはその天空が神的理性の統御のもとにある証拠であるとした。即ち、天体は生成消滅することなく変化しない不変のもので、月下の世界とは全く異なるものであるとしたのである。またその天空を構成している実体は土・空気・水・火の四元素ではなく、全く別の第五元素アイテルから成り立っているとした (33-147p)。また、空に見られる彗星・流星など変化するものは、月下の世界でおこる気象現象で、神的な天空の出来事では無いとした。

彼はまた天の川についても科学的に多くの可能性を論じた。天の川は金属を鑄造した時に出来るはぎ目や、球を皮で覆った時に出来る縫い目に似た裂け目ないしはつなぎ目が天球に出来たものであって、この世が創られた時に不手際があった証拠だという説をとった (35-28p)。

3.4 「教科書時代」とそれ以降

3.4.1 アレクサンドリア：ギリシャのマケドニア王であるアレクサンドロス大王 (BC356～BC323) は死去する直前にアレクサンドリア市を建設した。そこはその後、彼の部下のプトレマイオス1世 (BC367～BC282、古代エジプト最後の王朝となるプトレマイオス朝を起こした。在位：BC305～BC282) によりエジプトの首都とされた。そこには、紀元前300年頃に70万冊の蔵書を誇ったと言われる図書館が建てられ、世界各地から学者が集まった。アレクサンドリアは古代ギリシャの文化を継承し、それを発展させる学問の中心地として栄えた。

3.4.2 アリストタルコス (BC310～BC230頃)：古代ギリシャの天文学者アリストタルコスは夕刻に輝く半月と太陽のなす角度を三角測量の原理に基づいて測定した (図7)。地球－月－太陽のなす角度が90度の時、月－地球－

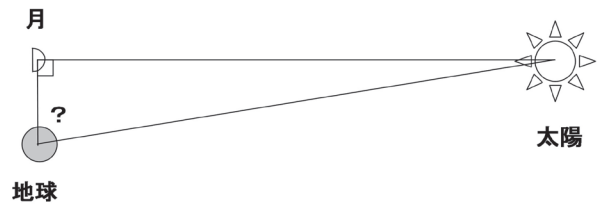


図7. アリストタルコスが太陽と地球の距離を求めた方法。
説明本文参照。

太陽のなす角度が87度で、地球と太陽の距離は地球と月の距離の19倍であるとした。実際には月－地球－太陽のなす角度は89度52分で、地球と太陽の距離は地球と月の距離の389倍である²⁵。彼はまた、月食の時に見ることが出来る地球の影の大きさから地球は月の約3倍で、太陽は月とほぼ同じ見かけの大きさを持っているから地球のおよそ6倍であると考え (146頁1.5参照)、「地球よりもはるかに大きな太陽が、より小さな地球に振り回されるがごとく、その周囲を公転していると考えるよりも、大きな太陽のまわりを小さな地球が巡っていると捉えた方が、はるかに理に叶っているのではないか」と本に著した。しかし、彼のこのような考えに対しアテネのストア派の学頭クレアンテス (BC330頃～BC231頃) はアリストタルコスを不敬罪で起訴すべきであると主張した。アリストタルコスは、恒星に視差 (148頁図6参照) が観察出来ないことから恒星はほぼ無限に遠い距離にあるとも考えていた。

アリストタルコスよりおよそ100年後のパピロニアの天文学者のセレウコス (BC190?～BC150年代) は彼の太陽中心の宇宙観を支持したが、それに従うものはおらずその宇宙観は忘れ去られた (39-55-59p, 41-113, 114p)。

3.4.3 アルキメデス (BC287～BC212)：ローマの文筆家キケロは「アルキメデスは、月や太陽や5つのさまよう星の公転の動きを球儀に取り入れ、速さの全く異なる幾つかの動きを管理していたのだ」と明言している。それはアルキメデスの住んでいたシラクサの戦利品の中に面白い天文学機器があったことを根拠にしたものであった。その天文機器がどのようなものであったかは分からないが、後述するロードス島で作られた天空の動きを再現するアンティキシラの歯車 (160頁3.4.7参照) に似ているものだったかもしれない (37-71p)。

3.4.4 エラトステネス (BC276頃～BC194頃)：エラトステネスは北回帰線に近いシエネで夏至の日に陽光が井戸の底まで届き南中高度が90度となる時に、シエネの

²⁵ 望遠鏡なしで正確に半月となる (太陽光が地球から見た月の正確に真横から照射している) 時間を見極め、太陽との角度を測定するのは不可能であったと考えられる (39-56p)。

北にあるアレクサンドリアでは太陽の南中高度（図8の $\angle CAB$ ）が82.8度になることを観測した。彼は人を雇い、シエネとアレクサンドリアの距離を測定しそれを5,000スタディオン（約890km）とし²⁶、その距離が地球の全周360度に対して7.2度を占めていることから地球の全周長を44,500kmとした（図8）（39-62p）。

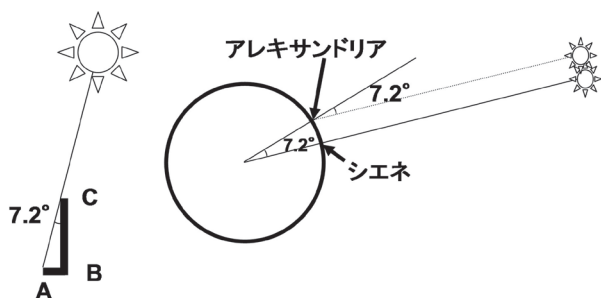


図8. エラトステネスが地球の全周を測定した方法。
説明本文参照。

3.4.5 ヒッパルコス：ヒッパルコス（BC190頃～BC120頃）はアレクサンドリアで紀元前2世紀に活躍した天文学者である。彼自身の著作は残されていないが、精密な天体観測から多くの成果を上げたとされている。彼は、①恒星を明るさに従って、目に見える最も明るい1等星から最も暗い6等星に分け（これは現在使用されている恒星の明るさを示す等級の基礎となっている）、②三角測量により地球から月までの距離を地球半径の59倍（正確には60倍）であるとした。また、③彼は自分の観測した星の位置が200年前のエウドクソス（158頁3.3.4参照）やティモカリス（BC320頃～BC260頃）らの記録と異なることから、歳差（146頁図1参照）を見つけたと言われている。

3.4.6 アポロニウスとプトレマイオスによる「離心円宇宙モデル」：ギリシャの天文学者ゲミノス（BC110頃～BC40頃）は『天文学序説』の中で、プラトンの時代から不思議に思われていた太陽の動きについて「春分から夏至までは94.5日、夏至から秋分までは92.5日、秋分から冬至までは88.125日、冬至から春分までは90.125日となっている。（中略）すなわちこの円の中心は黄道帯の円の中心と同心的でなく一方にずれている（すなわち離心的である）」とまとめた（41-208～211p）。

このように地球を円の中心から離す「離心円宇宙モデル」（本頁3.4.8参照）は、アポロニウス（BC262頃～BC190頃）に始まりアレクサンドリアで活躍したプトレマイオス（83頃～168頃）により完成された。その「離心

円宇宙モデル」は5つの惑星の順行・逆行を含む月・太陽・惑星などの運行速度や進行方向の変化を天動説に基づいて説明することに成功したものである。それはプトレマイオスの著書『アルマゲスト』²⁷に詳述された。それはその後千数百年に亘って天文学の標準的な教科書となった。

3.4.7 アンティキティラの歯車：アンティキティラの歯車は1901年にギリシャのクレタ島沖のアンティキティラの沈没船から回収された幾つもの歯車からなるもので、紀元前150～紀元前100年に製作されたと考えられているが、それは何のためのものか、長い間、分からなかった。最近ようやく、それは、メトン周期（156頁3.2.4参照）を基にした天体の動きを、導円・周転円と離心円を複雑な歯車機構に反映させ再現出来るようにした天文機器であることが明らかにされた（47）。

3.4.8 「離心円宇宙モデル」：プトレマイオスが完成した離心円宇宙モデルはエウドクソスの「同心天球」に導円・周転円とエカント（円の中心から離れた点）を新たに加えた天動モデルであった。

そのモデル（図9）では、①中心（C）から離れた所にエカント（E）が導入され、②地球（E'）はエカントとは反対側に中心からエカント点までの距離と同じ所に存在し、③太陽は導円の上をエカントからの角速度が一定となるように運行している。従って地球から見える太陽の運動の角速度は一定ではなく、最も遠ざかる遠地点（B）ではゆっくり移動しているように見える。逆に地球に最も近づく近地点（A）では速く動いているように見える。遠地点は春分点から夏至点の間にあり、近地点は秋分点から冬至点の間にあると考えた。そうすると春分から夏至までは94.5日、秋分から冬至までは88.125日などを説明することが出来た（本頁3.4.6参照）。

また、④惑星は同様のエカントを持つそれぞれ別の導円の上に中心を持つ周転円上を動くものとした。その結果、惑星の不規則な運行（順行・留・逆行）と惑星の光度変化を再現することが出来た。そのモデルでは、更に、⑤地球に最も近いところを月が周り、水星・金星の内惑星は太陽の導円の内側にある別々の導円の上を回る周転円上を、また火星・木星・土星の外惑星は太陽の導円の外側にある別々の導円の上を回る周転円上を運行し、恒星は一番外側の導円を運行しているものであるとした（39-64～85p）。このモデルは天球上の惑星・太陽・恒星などの動きを“数学的”に説明することを目的としたものであった。つまりそれは、ピタゴラスに始まる数学的な

²⁶ 1スタディオン＝178mとしたものである。その他180m,185mとする説もある。

²⁷ ウィーン大学は『アルマゲスト』を公開している（http://www.univie.ac.at/hwastro/rare/1515_ptolemae.htm）。

美に基づいて、プラトンらにより出された疑問を解消するものであったと言える。

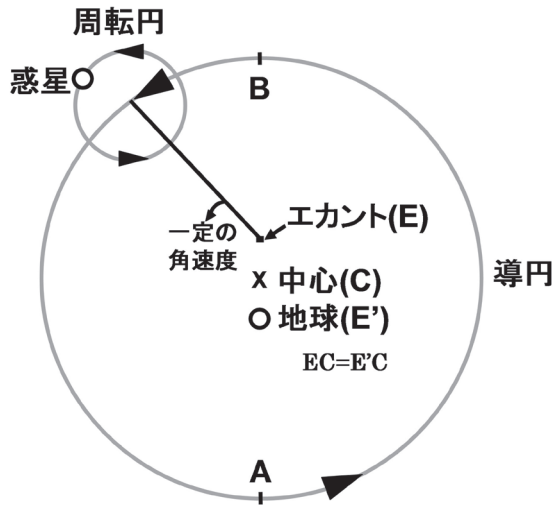


図9. プトレマイオスが完成した離心円宇宙モデル。図には導円は一つしか示していないが、モデルは幾つもの導円から成り立っている。説明本文参照。

プトレマイオスはこの他、星表の整備にも貢献した。星表は恒星の位置や明るさの等級あるいは星座を目録としたものである。彼は、古来より名付けられた星座を紀元前3世紀頃にティモカリス (160頁34.5参照) とアリストイルス (不詳) が西洋世界初の星表 (18星座)²⁸としてまとめたものや、ヒッパルコスの星表 (46星座) の成果に基づいて「プトレマイオスの48星座」とした。現在の88の星座のうち47星座はここに淵源を発している (39-83p) (152頁脚注13、162頁脚注30参照)。

4. 9～15世紀前半までの宇宙観

4.1 ヨーロッパ地域の停滞：紀元前4世紀にはアレクサンドロス大王による帝国の建設に伴い、文化・科学の中心はアレクサンドリアに移った。紀元前3～2世紀には、そこでエラトステネス・アポロニウス・ヒッパルコスらも活躍した。アレクサンドリアの繁栄を支えたプトレマイオス朝はクレオパトラ (BC70～BC30) と共に滅びたが、そこはローマ帝国の下でも科学・文化の中心の地位を保った。2世紀にはプトレマイオスがギリシャの英雄時代や黄金時代に始まった抽象的で思弁的な同心円的天動宇宙観を完成させた。それはその後、1400年もの長い間、ヨーロッパの支配的宇宙観として受け入れられ続けた。

一方、勢力をまし政治的な覇権を握ったローマ帝国で

は、道路・水道・都市整備など実践的・実用的な分野が重んじられ、ギリシャ的学問は大きく発展することはなかった。

権勢を極めたローマ帝国も次第に斜陽化し、ローマ皇帝テオドシウス (347～395、皇帝在位：379～395) は異教徒弾圧政策を敢行し失地回復を図った。その政策はアレクサンドリアにも及び、そこは391年には図書館を含め壊滅的な破壊を被った。その後、ローマ帝国は、395年の東西分裂そして476年の西ローマ帝国の滅亡と衰退の一途を辿った。

ローマ帝国の最盛期である2世紀頃の現在のヨーロッパ地域の人口はおよそ7,000万人であったが、その後、人口は減少し、西ローマ帝国の滅亡時には最盛期の6割ほどに減少していった。衰退はその後も続き、8世紀頃の人口は最盛期の4割程となった (48-97p)。その後、10世紀に始まる温暖期に人口は増え、社会は活気を取り戻し14世紀初めにはようやく2世紀頃の人口とほぼ同程度となった。しかし14世紀半ばには小氷期となり、社会は急増した人口を支えられず栄養不足の人が増えた。そこに黒死病が追い打ちを掛け、ヨーロッパ全体では30%程の人がその犠牲となったと言われている。社会は大きな打撃を受け、回復基調に入るのは16世紀に入ってからであった。

勿論、ヨーロッパ地域でも独自の文化は継続していた。例えば、8世紀にはカール大帝がカロリング朝を興し、アーヘン大聖堂を建設するなどの動きもあった。しかし、ビザンツ帝国やイスラム社会と比較するとヨーロッパ地域は低迷していたと言える。その間、ギリシャで発達した学問の伝統は西ローマ帝国の流れを汲むヨーロッパのキリスト教社会ではなく、東ローマ帝国の一時期を画すビザンツ帝国に受け継がれた。

また西アジアではモハメッドのイスラム教が社会に浸透し新たなイスラム社会が作られた。8世紀半ばにはイスラムの勢力範囲は、西はスペインから北アフリカ全域、北はコーカサス地方まで、東はペルシャからアフガニスタンまで、即ちスペインのトレドからアフガニスタンのカブールに至る広大な地域に及んでいた。

イスラム社会では伝統的なギリシャ文化の継承だけではなく、独自の文化が発展し、それがイスラム社会の隆盛とともに、トレドなどで大きく展開した。ビザンツ帝国はキリスト教に根ざしていたが、イスラム社会とも積極的な交流を行っていた。そのようにビザンツ帝国やイスラム社会に継承されたギリシャ文化と、その後主にイスラム社会で改良された天文学あるいは文化の成果が

²⁸ それはバビロニアの星座とギリシャ神話に基づく星座が混じり合ったものであった。

共に、ヨーロッパ社会へと時間をかけて伝授されていた。

4.2 イスラムを中心とした天文学：イスラムではプトレマイオスのエカントなどの宇宙観を批判する天文学者もいたが、独自の宇宙観を構築することはなかった。しかし、彼らは粘り強い観測を行い、新たな発見を加えていった。

現在のシリアで活躍したバッテリー（858～929）は直径5mの高度測定器を利用して489個の星の恒星表を作った。

現在のイラン（ペルシャ）のイスファハーンのアール・スーフイー（903～986）はプトレマイオスの『アルマゲスト』の研究と翻訳を行うほか、『星座の書』²⁹で恒星表を発展させた。彼は星の明るさや色の調査を詳細に行い、アンドロメダ星雲を「小さな雲」として歴史上初めて記載した。また、ペルセウス座の星の一つに“悪魔”の意味を持つアル・グールと名付けた。この星は現在のアルゴルで、アラビア語に由来する星名のひとつである³⁰。それはもう一つの暗い星に光をさえぎられるせいで、3日ごとに“ウィンク”することが現在では知られており、そのような変光星は近代天文学の新たな地平を切り拓いた（176頁8.10参照）。彼がその3日ごとの“ウィンク”に気が付いていたかどうかは分からない（37-83p）。

アブル・ワファール（940～998）はバグダッドの天文台で黄道傾斜角、歳差による分点・至点（146頁1.6参照）の移動量などを高い精度で測定した。それはイスラム天文学の測定の正確さを示すものであると言われている（49-187p）。

現在のスペインのトレドで活躍したアッザルカーリー（1028～1087）は太陽の遠地点の固有運動を歳差の運動と区別したり、太陽の遠地点の天球に対する年々の移動を正確に測定したり、天体運行表『トレド表』の作成に関わったりした。彼はまた独特の動きをする水星の運動を再現する機械装置であるエクアトリウムをつくった（49-175, 176, 188, 197p）。12世紀にはトレドを中心にアリストテレスの著作を含む多くのギリシャ・アラビアの学術文献がラテン語に翻訳され、それらがヨーロッパ社会に伝えられ、その後のヨーロッパ再生の大きな一要素となった（この点は重要なので195頁11.4以降で項を改めて取り上げる）。当時のトレドはイスラム教社会とキリスト教社会の一大接点であった。彼の著作もそのような文化交流の成果の一つである。彼の名は月のクレー

ターのArzachelとなり残されている。そのことは彼が西欧社会でも高く評価されていることを示している。

ペルシャの代表的な学者の一人であるウマル・ハイヤーム（1048～1131）は詩人として有名だが数学・天文学の分野でも活躍した。彼はかつてない正確さで1年の長さを測定しこれを基にジャラーリー暦を作成した。それは現行のグレゴリオ暦よりも精度が高いことで有名である（37-85p）³¹。

イベリア半島では8世紀の初めからキリスト教徒がイスラムから同地を取り戻す「国土の回復」（レコンキスタ）を始めた。その主導的役割を果たしたカスティーリャ王国は現在のスペインの中核となった。その国のアルフォンソ10世（1221～1284）はアルフォンソ天文表を作らせた。それは1272年頃に完成し（49-212p）、16世紀にコペルニクスの成果を生かした『プロイセン表』が作られるまで、ヨーロッパで最も一般的な天体運行表となった（次頁5.1参照）。

またモンゴルの軍閥の子孫で中央アジアのティムール朝の第4代君主のウルグ・ベク（1394～1449）は、1420年にサマルカンド郊外に直径50m、高さ37mの立派なウルグ・ベク天文台を建設した。そこには弧を下に四分円を形づくる四分儀が造られた。それは2本の細長い大理石が床の曲面に平行に並んだもので、そこに彫り込まれた数字を巨大な分度器とし、更に真向かいの壁の頂上部にはその巨大な分度器の中心点に合わせて小さな切れ込み穴があり、その穴と分度器を利用し天文学者は自分の目で星の位置を記録した（37-85～86p, 50）。

レコンキスタは1492年のグラナダの陥落により完成した。その間、キリスト教社会とイスラム教社会との間には長い宗教的な確執が続いたが、同時に文化的な交流も行われ、キリスト教社会にギリシャの伝統などが伝えられた（195頁11.4.2参照）。

一方、キリスト教のビザンツ帝国はイスラム圏とも“狡猾な外交”を行い、その文化を取り入れ繁栄していた。しかし、1453年にコンスタンティノーブルがイスラム軍の手に落ち、ビザンツ帝国が滅亡すると、コンスタンティノーブルの学者はプトレマイオスの『アルマゲスト』などの古代の知識が詰まった書物を持ってヨーロッパに逃げ延びた。そのような知識の流入により15世紀以降にヨーロッパでは天文学のルネッサンスが始まることになった（37-89p）。

ドイツの天文学者のレギオモンタヌス（1436～1476）

²⁹ World digital library (<http://www.wdl.org/en/item/2484/>) で色刷りの星座の絵を見ることが出来る。

³⁰ おうし座のアルバラン、わし座のアルタイル、こと座のヴェガもアラビア語由来である。

³¹ ジャラーリー暦は1年の長さを 365.24219858156 日とし、グレゴリオ暦は1年の長さを365.2425日としている。ジャラーリー暦の誤差は5000年ごとに1日で、グレゴリオ暦のそれは3300年に1日である。

はゲオルク・ボイルバッハ (1423～1461) の始めた『アルマゲスト』のギリシャ語からラテン語への翻訳を受け継いだ。彼は単にそれを訳すだけでなく独自に求めたより正確な三角法を駆使し、プトレマイオスの球面天文学・食・惑星理論を発展させ『アルマゲスト概要』を1462年から1463年に完成させた。またアルフォンソ表の間違いを見つけ独自の『暦』を1474年頃に出版した³²。そこには1473年から1530年までの日月食の予想の図も含まれていた。彼の著作は印刷により広められ、その成果は16世紀の天文学の発展にとって不可欠なものとなった。コペルニクスも『アルマゲスト概要』を精読し、自分の著作に利用した (49-218～228p)。

また、クリストファー・コロンブスが航海先で直面した困難をレギオモンタヌスの『暦』で回避したことは前述した (153頁2.4.6参照)。このように、過去の天文学の成果がイスラムを経由してヨーロッパに伝えられ新たな展開がはじまることとなった。ヨーロッパではその後天文学を始めとした科学革命が起こり、ヨーロッパが世界の覇権を握る新たな時代へ突入した。一方、権勢を極めたイスラム社会はその後、宗教勢力が頑固になり天文学を含む科学は停滞し、全体として衰退していった。

5. 天動説から地動説へ、そしてニュートンによる天体物理学の幕開け

5.1 コペルニクス：1473年にポーランドのトルンで生まれたニコラウス・コペルニクス (1543年没) は、ポーランド最古のクラクフ大学で天文学に触れ、その後イタリアのボローニャ大学やパトヴァ大学で法学を学ぶとともに、ドメニコ・ノヴァーラ (1454～1504) の家に寄宿し、彼からプトレマイオスの宇宙観の矛盾あるいは地球が太陽の周りを動いているという考えなどを学んだ (51-76p)。彼はポーランドに帰り、フロムボルクで残りの生涯を律修司祭として働きながら、天文の観測と研究を続けた。彼は占星術が盛んな時代にあって、星の方向や運動だけでなく、地球と太陽や惑星との距離も考えに入れ、新たな宇宙観を作っていた。

1510年代の『コンメンタリオルス』には、惑星の不規則な動きは太陽を中心とした惑星と地球の動きによるとする考えが盛り込まれていた。彼は古代ギリシャの天文学者は、一度に一つの惑星の軌道しか計算せず、他の惑星のことは一切考慮に入れていなかったとし、あたかも

「まるで違う場所から手と足と頭とほかの肢体をもってきたかのようだ。(中略) そうやってつなぎ合わせて出来たのは、人間というより怪物だ」と批判した。彼は、水星、木星、土星がそれぞれ地球と太陽の距離の3分の1、5倍、10倍の距離で太陽の周りを回っているとすると、太陽系が調和的な美しいものになると考えた (37-97～98p)。

彼の理論は弟子となったヴィッテンベルグ大学 (現在のドイツにある) の数学教授であったゲオルク・レティクス (1514～1574) の尽力により『天球の回転について』として、1543年に出版された。コペルニクスは校正刷りには目を通していたが、その年の12月に卒中で倒れてしまった。危篤状態の彼のもとに印刷された最後の頁と匿名の序文が届いたが、彼はその夜に息をひきとり、それに目を通すことはなかった。その時代は天動説が常識であったため、この本には、校正を務めた聖職者のアンドレアス・オジアンダー (1498～1552) により、地球が実際に太陽の周りを回っているというコペルニクスの確信を否定し、それは単なる都合の良い数学的趣向にすぎないと言明した序文が挿入された (37-100p)。例えばエラスムス・ラインハルト (1511～1553) はコペルニクスの理論に基づいた『プロイセン表』を1551年に公にしたが、彼は宇宙の中心が地球であるか太陽であるかについては関心を示さず、単に惑星の運行を予測することに最大の関心を払っていた。

このようにコペルニクスの考えは直ぐには受け入れられなかったが、天文学に関する研究がヴィッテンベルグを中心にコペンハーゲン、ヌレンベルグなど各地へ広がり、その後の発展へとつながっていった (51-163p)。

5.2 ティコ・ブラーエ (1546～1601)：彼は、デンマークで国王に大きな影響力を持っていた貴族家の一員で錬金術や天文学に精力を注いだ人である。彼の天体観測は肉眼によるものでは最も精度の高いものであったと言っても過言ではない。1572年11月11日にはカシオペア座に超新星 (SN1572、通称「ティコの新星」) を発見した (189頁10.1参照)。その星は14か月後には肉眼では見えなくなった³³。デンマーク王のフレゼリクはティコ³⁴を国にとどめておくために、彼がヴェーン島のステルネボルクに天文台を建設する時に多大の援助を行った。ティコはそこで1576年から1597年までに、四分儀や彼が考案した対角斜線副尺などを用いて多くの詳細な天体観測を行い、記録を残した。そこには3,000冊の蔵書を備えた図書室もあり、彼はその施設をウラニボルク (天の城とい

³² 1476年版を <http://www.univie.ac.at/hwastro/books/regioBWLlow.pdf> で見る事が出来る。

³³ SN 1572はI a型の超新星爆発で、地球からおよそ12,000光年離れた所にあることが現在では分かっている。爆発の残骸のかすかな星雲を現在高感度の望遠鏡で見ることが出来る。

³⁴ ティコ・ブラーエは一般にティコと呼ばれるのでそれに従った。

う意味)と呼んだ。彼は1577年の彗星についても詳しく観察し、彗星や新星のような奇妙な天体もアリストテレスがいうような月の下の世界で起こる“気象現象”ではなく、はるか彼方の天空で起こる独特な現象であると考えた。ところがフレゼリク王が1588年に死去し、クリスチャン4世が支配するようになると、国の歳入の1%程の巨額を彼への援助に割いていることに対する風当たりは次第に強くなっていった。1597年ついに彼はウラニボルクを去り、ドイツそしてプラハに向かった。そこでティコの詳細な観測、特に不規則な動きをする火星の記録がヨハネス・ケプラーに渡され、それがケプラーの法則を生み出す基になっていった。しかし、ティコ自身は天動説を信奉しており、惑星は太陽の周りを公転し、それら太陽を中心とした天体がさらに地球の周りを公転していると考えていた(37-102~127p)。

5.3 ヨハネス・ケプラー (1571～1630) :彼はドイツで生まれ、数学と天文学を学び、コペルニクスの「公転周期が大きな惑星ほど軌道半径も大きい」という考え方に感銘を受け、コペルニクス信奉者となっていった。1594年からはオーストリアのグラーツ大学で教職に就き1596年には『宇宙の神秘』を著した。その宇宙観は6個の惑星と5種類の正多面体(正四、正六、正八、正十二、正二十)を関連させたものであった。土星の天球の内部に正六面体を内接させ、その正六面体の内部に木星の天球を、更に木星の天球の内部に正四面体を順次内接させるという入れ子構造であったが、それは思い込みに基づいたものであった。彼はプロテスタントであったが、当時は宗教対立が激化した時代であり1598年にグラーツ大学の職を失った。ティコはケプラーの数学的才能を評価していた。一方、ケプラーはティコの詳細な記録が欲しかった。そのようなこともあり、ケプラーは1599年にティコの招きに応じて共に働くようになった。1601年ティコが死亡し、ケプラーは初めて火星の運行などを記載したティコの網羅的な記録を手にとることとなった。彼は特に複雑な動きをする火星の記録を参考に1609年に『新天文学』を著し、ケプラーの第一法則(惑星の軌道は楕円で、太陽がその焦点の一つとなっている)と第二法則(太陽と惑星を結ぶ動径が単位時間に掃く面積は一定である)を世に問うた。更に彼は1618年に第三法則(惑星の平均軌道半径の三乗と公転周期の二乗の比は、全惑星に共通である)を発表した。この頃はガリレオに対する最初の告発が行なわれた世であり(166頁参照)、ケプ

ラーの著作もローマ教会の叱責の対象となった。

当時は世俗的な権力を増す既存の教会勢力がそれを批判する勢力に対して、あるいは医学の世界では大学の権威のある男性教授が伝統的な薬草などを利用した民間療法を行う女性や産婆などに対して、攻撃をしかけた時代であった。魔女はそのような既存の権力階層の犠牲者であったといわれている³⁵。ケプラーの母も隣家の女が病気に掛かった時に、それはケプラーの母が自分を呪った為だと訴えられ魔女裁判にかけられていた。ケプラーは1620～21年にかけてプラハを離れ、故郷のヴェルテンベルグで母の無罪判決を得るために奔走した。

このように宗教界が混乱する時代にあってジョルダノ・ブルーノは地動説を擁護したために1600年に火刑に処せられた。

5.4 ジョルダノ・ブルーノ (1548～1600) :彼はティコとほぼ同時代を生きた修道士であった。16世紀のイタリア社会は、宗教に対する改革がなされルネサンスにより自由な批判精神が醸成される一方で、既存の世俗的な権威を維持しようとする教会勢力の権勢も依然強く、混沌としていった。そのような中、ブルーノは既存の聖職者教育に対抗するルネサンスのウマネジモ(ヒューマニズム)を標榜する学校で教育を受けた。以下のブルーノ生涯の要約は主に清水純一(1924～1988)に従った(53, 54)(165頁まで)。

彼の反時代精神は次第に彼を修道院の優等生から異端へ、更に逸脱へと向かわせた。1576年、彼はナポリで異端審問所の召喚を受けた。そこで彼はナポリを逃れローマ、更に、プロテスタントのローマと呼ばれたジュネーブ、そしてトルーズ、パリ、オックスフォード、フランクフルトへと遍歴を続けながら魔術・錬金術・自然科学に傾倒していった。彼は個別の事象の解明に満足することなく、自然全体の把握を目指した。彼はアヴェロエス(195頁11.4.3参照)を学ぶなど次第に唯物論に傾き、亡命生活の中でコペルニクスの宇宙観を知りそれを信奉するようになっていった。その頃はティコが新星や彗星を観測し、自然現象、天文への理解の情熱が膨らむ時代であった。彼はパリで著した『燈火を掲げる者』(1582)の中で「時は、全てを奪い、全てを与える。万物は変化する。ただ一つのみ、変わらぬもの、永遠なるものがある。永遠ににして同一なるものとして止まるものがある。この哲学によって、私の心は大きくなり、知性はすばらしいものとなる」と述べている。これは彼がヘラクレイトス的・

³⁵ 例えばジュール・ミシュレ(1798～1874)は『魔女』(1863)の中で「魔女はローマ教会の世界が生んだ深刻な絶望から生まれたのだ。私は、ためらうことなく、魔女はローマ教会の犯した犯罪であると断言する」と述べている(52-253p)。その本は19世紀においてカトリック教会から禁書にされた。

デモクリトス的・唯物論的変遷流転の世界観から、永遠なる一者の自覚に到達したことを示していると考えられている。

彼は観照的瞑想の結果、宇宙の無限性とそこに息づく生命の不思議さに感嘆した宇宙哲学を論じたのであって、観察事実による天文学を説いたのではなかった。彼の狙いは絶対化された中世的神学教義自身に致命的な攻撃を加えることにあったが、そのために彼は中世的神学教義の一端を担うアリストテレス・プトレマイオスの宇宙観にコペルニクスの宇宙観でもって風穴を開けようとした。無限なる宇宙は我々の目を真の無限者へと開かせ、そこに宇宙霊を直知させると考えた。彼にとっての宇宙霊は象徴的なもので、宇宙そのものは「ありうるもの全てを包み、しかもそれらに無関心」な一として存在しているとした。

彼はこのように思想的・地理的な遍歴をとげた後、再び1591年にイタリアのヴェネチアに辿り着いた。ブルーノは空席となっていたパトヴァ大学の数学教授職を求めたが、願いは叶わなかった。1592年にその職についたのはガリレオであった。ブルーノはヴェネチアの貴族であるモチェニゴ邸に住み個人教授をしていた。モチェニゴはブルーノに期待した記憶術の伝授の成果が上らないことへの意趣返しと、異端者をかくまった嫌疑を回避することを目論見、彼を異端質問所に告発した。その結果、ブルーノは1592年に捕えられた。ブルーノは一度はローマ教会の寛大さに望みを託したが、反宗教改革の弾圧が激しくなる中、ローマに移され神への冒瀆・不道徳な行為・教義神学に反する教説の罪に関する質問を受け続けた。しかし彼は、自説を撤回することを拒み、哲学的自由を守るために死を選んだ。1600年1月20日に処刑が宣告され、その年の2月17日にローマのサン・ピエトロ教会の近くのカムポ・ディ・フィオーリ（花の広場）で火あぶりの刑に処せられた。その時に彼は刑の執行官に対して「宣告を申し渡したあなた達のほうが私よりも真理の前で、恐怖にふるえている」と言い、司祭が差し出した十字架に侮蔑の一瞥を与え、顔を背け、死に際にはひと声も発さなかったと言われている（ここまで53, 54）。

このような時代の中、発明された望遠鏡をいち早く取り入れたガリレオが新たな宇宙観の構築に大きな役割を

担うことになっていった。

5.5 ガリレオ・ガリレイ (1564～1642)：ガリレオは1564年2月15日に生まれた³⁶。彼は1581年にピサ大学の医学部に入学し、その後、数学に転ずるも1585年には学資に事欠き退学してしまった。しかし、1583年には寺院で大きな青銅のランプの揺れる時間を自分の脈拍で測り、振り子の等時性（同じ長さの振り子は揺れ幅にかかわらず往復にかかる時間は一定である）に思い至ったとされている。その真偽のほどは定かではないが、この頃すでに彼は運動に興味を抱くようになっていたと言われている。1589年頃からは落体の実験を始め、1603～04年に斜面を転がる球体の速度を測定する実験を行った³⁷ (55-77p)。ガリレオはその後も物理の研究を続け多くの発見をし、現代物理学の基礎を築いた。それは①「仕事の原理」（滑車を使うと少ない力で物を持ち上げられるが、引っ張る距離は長くなり仕事としては同じことになる）、②アリストテレス以来信じられていた物体は力が加えられている時に運動し、力が加えられなくなると止まってしまうという概念の否定（後にニュートンにより確立される「慣性の法則」に通ずる概念）、③「止まっている電車でも動いている電車でも、その中でボールを落とすと真下に落ちる」というように、電車のような入れ物の中の運動を見ても、それが動いているか止まっているかを決定出来ないという「相対性原理」などであった (56-48, 49p)。それらは『レ・メカニケ』（1593～99年のパトヴァ大学における初期の講義録で1634年に仏訳がパリで出版された）、1632年の『天文対話』や1638年の『新科学対話』の中に記されている。

一方、天文学に関しては1597年にはケプラーにコペルニクスの「地動説」を支持するという手紙を書いていた。1604年の新星の出現から天文への関心が高まり、1609年にオランダのメガネ職人ハンス・リッペルハイ（1570～1619）が望遠鏡を発明したことを知り、自ら望遠鏡を作り天体観測を始めた。1610年には『星界の報告』を公にし、①月はアリストテレスが主張したような滑らかな球体ではなく、地球と同じように山脈と暗い平坦な海、大きなくぼみなどがある凸凹したものであること³⁸、②恒星は惑星や月のようには拡大されずその外観も異なっていること、③天の川は無数の星が集合した銀河である

³⁶ 同月18日にはミケランジェロが88歳で亡くなった。

³⁷ 成果は1638年の『新科学対話』に発表された。それは重力による加速度運動の発見とみなされている。しかし、14世紀初めにオックスフォードのマートン・カレッジの研究者により「平均速度定理」という重力加速度運動につながる概念が既に明らかにされていた。

³⁸ ヨハネス・ヘヴェリウス（1611～1687）は月面を詳しく観察し、1647年に『月面学』を著した。月は地球に対して常にほぼ同じ面を向けているが、秤動（月は地球から見るとゆっくり振動しているように見える）のために地球からは月の表面の半分より少し多い60%弱の面積を観察出来る。その本にはそのような精緻な月面地図が示されていたので、それは、長い間、月面地図の模範とされた。

こと、④木星が順行あるいは逆行する時にも、木星の周りには四つの天体が回転しており、更に、それら四つの天体の相互位置は移動していることを報告した (57)。

また、1610年末には金星が月のように満ち欠けをすることを特定の人に暗号で伝え、1611年にはその暗号の意味を明らかにした。金星が満ち欠けをし、三日月のように見えることは、コペルニクスの理論と一致しており、彼は金星が太陽の周りを公転しているということを確信するようになったと言われている。更に土星の脇には大きな衛星が見え、その姿が見えなくなるとかわりに2本の曲線が見えたことも報告している。それは土星の輪を観測していたのであろうが、当時の望遠鏡では実像を捉えることは出来なかった (37-144, 145p)。

更に、1613年に太陽には黒点があり、それが毎日位置を変えていることを報告した (1609年に見つけられたとされている)。彼は、黒点は太陽表面の現象であるとした (46)。一方、イエズス会士で戦闘的なクリストフ・シャイナー (1575～1650) は1611年に太陽の黒点を観測し、それを太陽の衛星であると考えた。その観測結果は1630年の著作の中で発表された。黒点発見の先取権を巡って、ガリレオとシャイナーの間で激しい争いが繰り広げられた。

ガリレオは『星界の報告』出版後、次第にコペルニクスの地動説を公然と擁護するようになった。1615年ドミニコ会士のロリーニ神父は正式告発者となり、ガリレオをローマの異端審問所に告発した。裁判を主催したロベルト・ベラルミーノは科学に対する見識もあり、望遠鏡で木星の衛星を見ているような人で、ガリレオには無罪を言い渡した。しかし、プロテスタントの革命などにより次第に地盤を侵されつつあったカトリック教会としては、ガリレオには「コペルニクスの思想を擁護も支持もしてはならない」という判決文を手渡し、今まで制限を加えていなかったコペルニクスの著書を発禁処分とした (37-146, 147p)。

1630年ガリレオは地動説を解説した『天文対話』を書き上げその出版の許可をローマの教会に求めた。これは地動説だけを扱うものではなく、3人の学者による天文に関する対話からなる著作で1631年にフィレンツェで出版された。しかし、黒点の発見を巡って対立していたシャイナーらの働きかけにより1632年には販売が停止され、ローマの異端審問所への出頭命令が下された。病気のため多少猶予されたが、1633年4月には第一回の訊問が行われた。ガリレオは1615年の裁判の無罪判決文

を提出し反論したが、担当判事のベラルミーノは既に他界しており、6月に下された最終判決にはガリレオの願いは届かなかった。結局ガリレオは、ひざまずいて地球が動くという説を放棄する異端誓絶文を読み上げた (37-146～155p)。

その後ガリレオは、フィレンツェ近くのアルチェトリに幽閉された。太陽などの天体観測に酷使した目は光を失ってしまった。支持者達の赦免の願いも拒絶される中、弟子に力学に関する研究を口述筆記させていたが、体調を崩し1642年に他界した。

ローマ教会は1965年のパウロ6世の時代にガリレオ裁判の見直しを始め、1633年の判決から300年以上経った1992年、ヨハネ・パウロ2世はガリレオ裁判が誤りであったことを認めた。

ガリレオの主張は当時の社会に受け入れられることはなかったが、望遠鏡による観測が従来の位置天文学に新たな頁を加えたことは確かなことである。

5.6 天文台・科学アカデミーの創設：17世紀には近代的な設備をもったコペンハーゲン (1637)、パリ (1672)、グリニッジ (1676)、ベルリン (1700) の天文台が出来た。パリ天文台の初代台長、ジョバンニ・カッシーニ (1625～1712) は1660～70年代に木星の自転、木星の衛星の運行を調べたり、土星の衛星イアペトゥス・レアを発見したり、土星の輪が複数の輪で構成されていることを明らかにしたりした。

イギリスは1588年にスペインの無敵艦隊を破り海洋覇権国家への道を歩み始めたが、船の航行に欠かせない経度の把握がうまく出来ず多発する海難事故が問題であった。そのような状況で、経度を知る³⁹ためにも天体観測が重要であることを主張していたジョン・フラムスティード (1646～1719) がチャールズ2世によりグリニッジの初代台長に指名された。

ニュートンは天体の動きを考察するためにフラムスティードの観測結果を求めた。しかし、その求めは直ぐには応じられず、またニュートンはその観測の正確さを疑うなど二人の間にはわだかまりがあったと言われている。

天文台の他に科学アカデミーがフィレンツェ (1657)、ロンドン (1662)、パリ (1666)、ベルリン (1700) に誕生し、自然科学は新たな展開を始めることとなっていくた。

5.7 アイザック・ニュートン (1642～1727)：ガリレオと入れ替わるように生まれたニュートンは、1661年にケンブリッジ大学のトリニティ・カレッジに入学し、ア

³⁹ 経度は1730年にジョン・ハリソンが船の上でも正しい時刻を刻むことが出来る航海用時計を発明したことにより測定が容易になった。それは、振り子の代わりに前後に揺れるおもりの付いた2本腕がばねでつながれているもので、1736年に実際の航海で使用された (37-178p)。

リストテレス・デカルト・ガリレオ・コペルニクス・ケプラーの著作に接するとともに、数学への興味をかきたてられていった。彼は既に10代で土星には環状の輪があることを見つけたり、振り子時計を実際に制作したりしていた。また物体の運動について研究していたクリスティアーン・ホイヘンス (1629～1695) の成果についても学んでいたが、特にデカルトの『哲学の原理』とガリレオの『新科学対話』に没頭していたことが残された彼のノートから分かっている。

1665～1666年には、ロンドンでペストが流行したためにケンブリッジ大学も閉鎖された。その時に彼は故郷のウールスワースで落ち着いた時間を過ごすとともに、有名な逸話となっている「リンゴの木から実が落ちるのを見て万有引力を思いついた」という発見に至ったと言われている。またこの時期に、彼は二項定理を発見し、更に微分積分⁴⁰の研究を開始するなど多くの成果を生み出した (58-18-25p, 37-160, 161p)。

ニュートンはプリズムを通過すると虹に分かれる様々な色の光と白色光についても実験と考察を始めた。1672年に王立協会の例会で「光と色についての新理論」を展開し、その後の光学論争のきっかけをつくった。最終的には白色光は複数の色の光が混合したものであることが明らかにされた。ニュートンの二大著書の『光学』は1704年に刊行された。一方、物体の運動については1687年に『自然哲学の数学的諸原理』として体系立てて発表された。それは、ニュートンの第一法則 (慣性の法則) : 力が働かなければ、物体の運動は変化しない。第二法則 (運動の法則) : 力が働くと、物体の運動は変化する。加速度は物体に加えた力に比例し、物体の質量に反比例する。第三法則 (作用・反作用の法則) : 二つの物体が相互に力を及ぼしあっている時、双方が受ける力の大きさは同じで向きは逆である。また万有引力の法則は、二つの物体の間には両者の質量の積に比例し両者の距離の二乗に反比例する引力が働く、というものである。

ロバート・フック (1635～1703) は1660年に弾性に関するフックの法則を発見したり、顕微鏡でノミを観察したり、1672年のニュートンの光の粒子説に対して波動説で応戦するなど活躍していた。彼はロバート・ボイル (171頁7.2参照) の助手をしていたが、1655年弱冠20歳

で王立協会会員に選ばれ、その後協会の中心人物の一人として手腕を発揮していった。1679年頃彼は、引力が距離の二乗に反比例するというニュートンの見解は自分の考えに従ったものであると、協会の書記としての立場を利用してニュートンへの批判を強めていった。

一方、エドモンド・ハレー (1656～1742) はニュートンの研究を高く評価しており、『自然哲学の数学的諸原理』の出版を勧め、フックとの間を周旋し、出版費用の全額を負担し1687年の出版にこぎつけた。ニュートンの成果を17世紀の間に最も見事に使ったのはハレーである。彼は過去の彗星の軌道をニュートン力学に従って計算し、1456, 1531, 1607, 1682年に現れた彗星は同一の天体であり、次に現れるのは1758年であると予言した。その予言は彼の死後の中し、現在ではその天体はハレー彗星⁴¹と呼ばれている (58-25-33p)。

このように周囲の学者も加わり、ニュートンによる新たな天体物理学の分野が始まり、ようやくコペルニクス、ケプラー、ガリレオの成果が一般に受け入れられた。

5.8 星の光行差：ジェームズ・ブラッドリー (1693～1762) は1728年に北天のりゅう座γ星の観測により星の光行差を発見し、地動説を証明した。

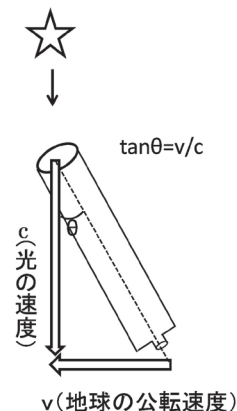


図10. 光行差。説明本文参照 (18-101pの図7を参考にした)。

雨が垂直に降っている時に静止している人は、傘を真上にさすが、歩く時には傘を少し前方に傾け濡れないようにする。同じように天頂にある星を測定する時に、地球が動いていると、それを見るために望遠鏡の筒を前方

⁴⁰ ゴットフリート・ライプニッツ (1646～1716) は1675年に微積分を考え付き1676年にはほぼ完成していた。その頃ニュートンはライプニッツに手紙で謎解きを迫り、自分の優越性を楽しんでいたようにも見える (58-21p, 59-283p)。現在では両者は独立に微積分を確立したとされている。また17世紀に日本の関孝和も微分にあたる和算を独自に確立した。

⁴¹ 1066年の征服王ウィリアムによるノルマン・コンクエストを表した刺繍画のバイユーのタペストリーにはハレー彗星が描かれている。そこではイングランドのハロルド王が、彗星は破滅の前兆であると告げられている (37-175p)。またドイツの数学者で宇宙誌家であったペトルス・アビアヌス (1495～1552) は1531年にハレー彗星の尾が常に太陽の反対側に流れていることに気付いていた (35-51p)。

に傾ける必要がある（図10）。その角度が光行差であり、光行差と光の速度⁴²と、地球の公転速度の間には $\tan \theta = v/c$ （ v = 地球の公転速度、 c = 光の速度）という一定の関係がある（図10）（18-101p）。

ブラッドリーはりゅう座 γ 星の光行差による θ が約20秒であることを観測した⁴³。それによって地球が公転していることが明らかとなった。

6. 18～19世紀中頃の宇宙観： 巨大望遠鏡による新たな発見

6.1 夜空はなぜ暗いか：フィリップ・シェザー（1718～1751）は、夜空はなぜ暗いのかということについて星を木に見立てて考えた。森の中で周囲を見渡すと、近くにある木々の間は見通せても、一番遠くにある木の幹は近くの木に邪魔されて見えない。これと同じように星のきらめく宇宙が無限に広がっているとすると、夜空のどこを見ても、視線の先には必ず星があり、夜空も明るくなるはずである。しかし、そうならないのは、星が宇宙にはまんべんなく散らばっているのではなく、星がない空間が存在するためか、あるいは星の光が空間に存在する微小な物質に吸収される結果、光が消えてしまうため⁴⁴であろうと考えた。彼はそのことを1744年に定式化した⁴⁵が、その後、1820年代にハインリヒ・オルバース（1758～1840）がこの問題を独自に取り上げた。その論文が有名になり、この問題はオルバースのパラドクスとして世にひろまった。

このパラドクスは、宇宙が無限で一様であると仮定すれば、星の見かけの表面積は距離の2乗に反比例して小さくなるが、距離が遠い星の数は距離の2乗で増えるはずで、その結果これら二つの要素は打ち消しあい、どの方向を見てもいずれかの星のまばゆい表面が見えるはずであるということから生じる。しかし、現在では宇宙は無限ではなく、また宇宙には多くの星が存在する銀河とボイドと呼ばれる銀河が存在しない領域が存在するこ

とが明らかにされおり、宇宙は一様でないという認識に至っている。即ち、オルバースの仮定した宇宙は無限で一様であるということは事実ではなく、夜空が暗くても不思議ではない（35-293-295p）。

6.2 メシエ天体カタログ：シャルル・メシエ（1730～1817）は多くの彗星を発見したが、その際に紛らわしい天体が多いことに難渋し天体のカタログを作り始めた。1771年に45の星団・星雲からなる天体カタログが作成された。彼の分類には大文字のMが付けられて、現在も利用されている。例えば、M31はアンドロメダ銀河である。そのカタログは、1784年にはその数を103に増やした。現在ではその後追認されたものも含めM1～M110の天体が一覧アップされている⁴⁵。彼の使った望遠鏡は口径5～7cmの小さなものであったと言われている。

6.3 ボーデの法則：ヨハン・ティティウス（1729～1796）は、1766年に太陽から惑星までの距離に関する公式を見つけた。それは後にヨハン・ボーデ（1747～1826）により世に広められ、ボーデの法則と呼ばれている。それは太陽から地球までの距離を10単位とすると、太陽から惑星までの距離 A は $A=4+3 \times 2^n$ という式で表せるというものである。 n は水星より外側にある惑星の順序を表す数とした。水星は4（実測値＝3.9）、金星は7（ $n=0$ 、実測値＝7.2）、地球は10（ $n=1$ ）、火星は16（ $n=2$ 、実測値＝15）、木星は52（ $n=4$ 、実測値＝52）、土星は100（ $n=5$ 、実測値＝96）、天王星は196（ $n=6$ 、実測値＝192）となり、火星と木星の間に $n=3$ の謎の天体があることが予想され、惑星探しが盛んに行われた。

1801年にジョゼッペ・ピアッツィ（1746～1826）はケレスと名付けた天体を火星と木星の間に見つけた。ウィリアム・ハーシェル（1738～1822）はそれを惑星ではなくアステロイド（小惑星）と呼んだ⁴⁶。

6.4 ウィリアム・ハーシェルと巨大望遠鏡：ガリレオが最初に使用した屈折望遠鏡（対物レンズは凸レンズで、接眼レンズは凹レンズ）の倍率は3倍であったが、彼は後に口径が数cmで倍率が30倍のものを使った。その後、

⁴² 1670年代にオーレ・レーマー（1644～1710）は光の速度を約22万km/秒と推定していた。

⁴³ 光の速度 c に対して地球の公転速度 v は遅く、 $c \gg v$ であるために、 θ は微小であり、 $\tan \theta = \theta$ と近似出来る。 $2\pi C : v = 360 \times 60 \times 60$ （秒）：20（秒）であり、 c を22万km/秒とすると、 $v=21.3$ km/秒となる。それは現在測定されている地球の公転の平均速度29.78 km/秒と比べて大差がない。

⁴⁴ ジョン・ハーシェル（1792～1871）は1848年にも星の光が何らかの物質に吸収されると、いずれその物質は熱を持ち、光を発するようになる。その結果、夜空が暗くなることはないはずだと疑問を呈した。彼はウィリアム・ハーシェルの息子で大小マゼラン雲が多くの星から成り立ち両者は星の流れでつながっていると主張した人でもある（35-265p）。

⁴⁵ M102は再確認されておらず欠番状態である。

⁴⁶ ケレスは長径960km程の小惑星である。現在、火星と木星の間には何十万もの小惑星が見つかった。直径100kmを超えるものは220個観測されており、ケレスは其中で最大である。太陽系の惑星は原始太陽系円盤の中で、微惑星が衝突合体することにより大きな原始惑星に、そして最終的に惑星に成長したと考えられている。火星と木星の間では、微惑星がある程度成長したが、その後、より激しい衝突が起こりばらばらになったために、惑星とならずに多くの小惑星が出来たと考えられている（191頁10.4.2参照）。

ケプラーは1611年に接眼レンズも凸レンズを用いることにより、視野の広いものを考案した。レンズの口径を大きくすると色収差が現れるので焦点距離を長くしその影響を抑えたが、せいぜい口径20cmのものを作るのが精一杯であった⁴⁷。一方、1663年にはジェームズ・グレゴリー (1638～1675) が反射望遠鏡を考案した。反射望遠鏡は凹面鏡などの反射鏡を組み合わせたもので、レンズを用いないので色収差が生まれず大口径の望遠鏡を作ることが可能であるという利点がある。その後、ニュートンが反射望遠鏡に改良を加え、ニュートン式反射望遠鏡が広まった。

ウィリアム・ハーシェルは音楽家として成功していたが、30代半ばから父親譲りの天文学への興味が強くなり、自作の望遠鏡で天体観測にいそしみ、1781年に天王星を発見した。彼はそれを当時の国王ジョージ3世にちなんで「ジョージの星」とした⁴⁸。彼は名声を博し、国王付きの天文官となり、天文学に専念出来るようになった (35-63～65p)。

彼は全天の星の地図作成を目指し観測を続け、数多くの発見をした。1789年には口径126cm、焦点距離12mの巨大反射望遠鏡⁴⁹を作り、妹のカロライン⁵⁰の献身的な手助けを受け、星のカatalog (The catalogue of nebula and clusters of stars) を作った。1802年の改訂版には2,500程の星が記載された。その仕事は息子のジョン・ハーシェルに引き継がれ、1888年のジョン・ドレイヤーの追補から成るNew General Catalogue (NGC) へと発展した。現在でもそれには多くの星雲などが追加され、NGCは汎用されている。

ウィリアム・ハーシェルは、1782年に惑星状星雲⁵¹であるNGC7009 (土星状星雲)、1783年にエリダヌス座40Bの白色矮星、1790年にNGC6543 (キャッツアイ星

雲、赤色巨星が白色矮星になろうとしている) (172頁8.2参照) など多くの天体を見つけた (35-171, 239p)。彼は全天の星を観察した結果、地球の属する天の川銀河⁵²は不規則な長細い楕円に似ており、その長径はおよそ6,000光年、厚さは1,000光年と見積もった (18-154p)。しかし、当時は星の距離を測定する手立てはなく、この見積もりは推測の域を超えていない。しかし、それは天の川銀河を初めて表した図として多くの人により度々再録されている。

また、彼は1800年には太陽光をプリズムで分光すると、赤よりも外側の目に見えない部分でも温度が上昇することを偶然見出した。これが赤外線の見出しである (18-118p)⁵³。

6.5 年周視差：年周視差 (図6) を測定出来れば、星までの距離が求められるので (148頁1.12参照)、多くの人がその測定を試みてきた。しかし、星は遙か彼方にあるために視差は僅かで、長い間その測定に成功することはなかった。

1837～40年にフリードリッヒ・シュトルーベ (1793～1864) は、こと座 α 星 (ヴェガ、地球から25光年) の年周視差が0.12～0.26秒であるとしたが、信用されなかった。1838年にフリードリッヒ・ベッセル (1784～1846) の測定した白鳥座61星 (地球から11.4光年) の年周視差0.32秒と1839年にトーマス・ヘンダーソン (1798～1844) の観測したケンタウルス座 α 星 (地球から4.4光年) の年周視差約1秒という結果は受け入れられ、星までの距離の測定に弾みがついた (18-104p, 149頁1.13参照)。

6.6 フラウンホーファー線：ヨゼフ・フラウンホーファー (1787～1826) は太陽の光をプリズムに通し赤から紫色に細かく分けて観測するとその中に何本も暗い線があることを1813年に発見した。それはフラウンホー

⁴⁷ その後、色収差を減らす材質の研究も行われ、19世紀末には口径1.02mの屈折望遠鏡が作られた。それは現在でもアメリカのヤーキス天文台で使用されている。

⁴⁸ その名前は一般的にはならず、ボーデが命名したウラノス (天王星) となった。

⁴⁹ 1840年代にはロス卿ウィリアム・パーソンズ (1800～1867) により口径183cmの“リヴァイサン (怪物)” のあだ名を持つニュートン式の反射望遠鏡が作られた。それは1917年にウィルソン天文台に口径254cmの望遠鏡が出来たまで数十年間世界最大の望遠鏡であった。

⁵⁰ 彼女も兄とともに天体観測に専念し、1786年に女性としてはじめて彗星を発見し、生涯で発見した彗星は14に上った (35-52p)。

⁵¹ 惑星状星雲はウィリアム・ハーシェルが命名した。それは、現在では質量が太陽の0.8～8倍の恒星の末期の姿であることが分かっている。そのような星は最期に、外層が膨張して赤色巨星となると伴に外層のガスは徐々に恒星の重力を逃れ周囲に放出され原始惑星状星雲となる。同時に中心核は自分自身の重力で収縮し高温高密度の白色矮星となる。それより大質量の恒星は、一生の最後には大規模な爆発を起こす。それが超新星である。様々な星の一生については174頁8.6に後述する。

⁵² 現在、天の川銀河は、直径が約10万光年、厚さは中心部でおよそ1万5,000光年程度、周縁部で約1,000光年の円盤状をしていることが分かっている。銀河の中央部はバルジと呼ばれ、円盤の外側より厚い。バルジを含んだ円盤の周囲は、空間密度の低い恒星や球状星団が存在するハローが取り巻いている。それらを含んだ全体の直径は約15万光年である (60-184, 185p) (179頁8.11.3参照)。

⁵³ 紫外線は1801年にヨハン・リッター (1776～1810) により、目には見えないが塩化銀と反応する光があることから存在が明らかにされた。

⁵⁴ ウィリアム・ウォラストン (1766～1828) は1802年に同様の暗線を認めていたが、フラウンホーファーの研究が体系だったためにその名前が付けられた。

ファー線⁵⁴と名付けられた。橙色の辺りには、特に目立つ太い2本の暗線があった。一方、ローベルト・ブンゼン(1811～1899)は分光学の研究を始めていたが1859年にはダスタフ・キルヒホフ(1824～1887)と共同で分光分析装置を作り、ナトリウム・リチウム・カリウムを火に入れると特有の色の光が生じることを見出した。ブラウンホーファーが見つけた橙色の領域の太い暗線はナトリウムを火にくべた時に発光する光と同じ波長であることが明らかにされた⁵⁵。それはナトリウムのD線と呼ばれている。

現在ではこのような原子による発光と吸光の仕組みが分かっている。原子の最外殻の電子にエネルギーが加えられると、その電子は高いエネルギーをもったものとなる(電子は「励起」されたという)。その電子はしばらくすると低いエネルギーの安定状態に戻る。そのエネルギー差が光となるのが発光である。一方、安定状態の電子を励起するために光エネルギーが吸収される現象が吸光である。励起されるエネルギーレベルと安定状態のエネルギーレベルはある特定の値しか取りえない為に、励起した状態と安定状態のエネルギー差は連続的ではなく不連続なものとなる。その結果、発光する光あるいは吸収される光は特定のエネルギーをもったもの、すなわち特定の波長の光となる。太陽光に見られる二つの強い暗線は、太陽の大気に含まれるナトリウム原子の電子を励起するために太陽光の特定の光が使われ、その波長の光が暗くなることで生じている。

このように星の光の色を詳しく調べることは、天文学を大きく発展させることになっていった。それは8.2(172頁)に詳述するが、例えば、①天体に含まれる元素の種類、②最初に誕生した星は主に水素とヘリウムだけで出来ていること、③太陽に存在する元素の種類が明らかにされたことである。更に、④星が地球から遠ざかったり、近づいたりするとドップラー効果により光の波長が変化することが見つかった。このことが、宇宙は不変なものであるという従来の概念を打ち破るエドウィン・ハッブルの膨張宇宙の発見へとつながっていくのである(179頁8.12参照)。

6.7 海王星の発見：1781年にウィリアム・ハーシェルは望遠鏡で天王星が惑星であることを明らかにした。1830年には天王星の軌道が正確に計算出来るようになり、この惑星の実際の動きが予想される軌道から外れて

いることが明らかとなった。それは未知の惑星が天王星の運行に影響を与えるためだと考えられた。そこでユルバン・ルヴェリエ(1811～1877)はその未知の惑星までの距離をボーデの法則(168頁6.3参照)により予測し、結果を1846年にヨハン・ガレ(1812～1910)に手紙で知らせた。ガレはその助言と最新の星図を使ってすぐに新たな天体、海王星を発見した⁵⁶(35-67p)。

7. 元素の発見

今回は宇宙観の変遷と宇宙の誕生・進化についてまとめているが、物質観についても考えている。それはものの元である元素の生成が宇宙の進化と大きく関係しているからである。

古代の人々はものの元は「水・地・火・風」あるいは「木・火・土・金・水」であると考えたが(154頁3.2.1参照)、現在ではものの元は元素であり、それは宇宙創成のビッグバン、恒星の内部あるいは星が死滅する時の爆発でつくられたことが分かっている。元素が宇宙のどこで、いつ、どのようにしてつくられたかは8.14(181頁)にまとめるが、先ずどのように元素が発見され、我々は現在元素をどのように認識しているかを簡単に振り返る。

7.1 単体の発見・錬金術：水は水素と酸素の二種類の元素から出来ている化合物である。一方、ダイヤモンドは炭素一種類だけから出来ている。そのように一種類の元素から成る物質を単体という。古代の人々も、炭素、金、銀、銅、硫黄、スズ、鉛、水銀、鉄などからなる単体を利用していた。例えば黄金に輝くツタンカーメン(BC1342頃～BC1324頃)のマスクは金の単体から作られた。つまり、それを作った人は元素を利用していたわけだが、元素を体系的に捉えることはなかった。

また冶金術も古代から進歩しており、例えばヒッタイトは鉄を利用し王国を興した(BC16世紀～BC12世紀)。その後、古代エジプト・ギリシャに始まるとされる卑金属から金などの貴金属を作る錬金術が始まり、中世のヨーロッパにおいては多くの試みがなされた。しかし、卑金属から貴金属を作ることはそもそも不可能な試みであった。またそれを求めた人々は試みを秘法として公にすることはなく、そこで得られた知は共有されなかった。しかし、そこで開発された蒸留・熱分解・沈殿・再結晶などの技術が次第に近代化学を生み出す基礎となっ

⁵⁵ トンネルの中で見かける橙色の光を出すランプはナトリウムランプである。それは電気エネルギーによりナトリウムの電子にエネルギーを与え電子を励起し、その励起された電子が元の安定状態に戻る時に出す光を利用しているものである。

⁵⁶ ジョン・アダムス(1819～1892)はルヴェリエらの発見が公になる8か月前に天王星の位置を正確に計算していたが、グリニッジ天文台の協力を得ることが出来ず、ルヴェリエとガレに海王星の発見では先を越されてしまった(35-67p)。現在でも特に巨大望遠鏡を使うためには、計画を申請し割り当ての使用時間を獲得する必要がある。

ていった。

7.2 近代の元素の発見：ロバート・ボイル (1627～1691) (ロバート・フックはボイルの弟子であった、166頁5.7参照) は温度が一定の場合、気体の体積は圧力に反比例するというボイルの法則の発見者であるが、元素とは「物質をそれ以上細かく分けられない最小の粒子」であると定義した人物でもある。それによって彼は化学の父と呼ばれている。18世紀になると多くの元素が発見された。発見当時の名前あるいは概念は現在のものと違っていた場合もあるが⁵⁷、水素 {1766年ヘンリー・キャベンディッシュ (1731～1810)}、窒素 {1772年ダニエル・ラザフォード (1749～1819)}、酸素 {1774年ジョゼフ・プリーストリー (1733～1804)} が発見された⁵⁸。アントワヌ・ラヴォアジエ (1743～1794) は1789年に当時見つかっていた33種の元素をまとめた。しかし、そこには熱素・光が含まれていたり、マグネシウムやアルミニウムを含む化合物も元素とされていたりしていた。

その後、元素についての理論的な基盤であるジョン・ドルトン (1766～1844) の「原子説」(1801～1808) やアメデオ・アボガドロ (1776～1856) の「アボガドロの法則」(1811) が発表されるとともに、多くの元素の発見が相次いだ。

ドミトリ・メンデーレエフ (1834～1907) は1860年代半ば以降、当時知られていた元素を原子の質量の順番に並べるとその性質が周期的に並ぶことを見つけ、それに改良を加えていった。1871年にはロータル・マイヤー (1830～1895) との討論を踏まえ、未知の元素を含む60余りの元素から成る元素を周期的に並べた周期表の改訂版が発表された。それらの研究により現在の元素の理解の基本が築かれた。

7.3 元素の現代的理解：2011年現在、118の元素⁵⁹が知られており、そのうち地球上に天然に存在するものは90種⁶⁰である。元素の原子番号は原子核の中に含まれる陽子の数である。原子核には陽子の他に中性子も含まれるが、両者を足し合わせたものを質量数という。同じ原子番号の元素に中性子の数が違うものが存在するが、それ

は同位体と呼ばれる。例えば水素の原子核には陽子が1個存在するが、中性子を0, 1, 2個持つ3種類の同位体が存在する。

一般的に元素はアルファベットの元素記号で表されるが、必ずしもなじみのあるものとは限らないので、本論では変則的ではあるが、例えば原子番号2で質量数4のヘリウムを $\frac{4}{2}\text{He}$ ではなく $\frac{4}{2}$ ヘリウムと表す。下の数字が陽子数(原子番号)を表し、上の数字が質量数である。以下、一方を省略する場合もある。

原子核はプラスの電荷を持つ陽子と電氣的に中性な中性子で形成され、その周りにマイナスの電荷をもつ電子が陽子と同じ数だけ存在し、原子は電氣的に中性となっている。原子核にプラスの電荷をもった複数の陽子が電氣的な反発に逆らって共に存在出来るのは大きなエネルギーによってプラスの電荷を持った陽子が一旦 10^{15}m という近距離まで近づくと、強い力(核力)が働いて陽子が共存する原子核が構成されるからである。

陽子の数が増えることにより、様々な元素が生成されるが、原子核の安定性はそれぞれの元素の原子核によって違っている。最も安定な原子核は原子番号26の鉄である(62-79p)。原子番号26の鉄までの元素は相対的に不安定な原子核が大きなエネルギーのもとで核融合を起こし、安定な原子核を形成することによって合成される。一方、鉄よりも原子番号の大きな元素は別の仕組みにより合成される。それらの仕組みを含む元素の合成過程については8.14(181頁以降)でまとめるが、ここでは、①ものの元となる元素が合成されるにはいくつかの過程があること、②宇宙には元素をつくった増殖が何種類もあること、③鉄の原子核が最も安定であることを指摘するだけに留めておく。

7.4 宇宙・地球・我々を構成する元素：宇宙や地球や人間がどのような元素から出来ているか(およその重量%)をまとめる。

人間を構成する元素は主に酸素(65%)、炭素(18%)、水素(10%)、窒素(3%)、カルシウム(1.5%)、リン(1%)で、その他硫黄、カリウム、ナトリウム、あるいは鉄、亜鉛、

⁵⁷ 例えばプリーストリーはものが燃えると、そのものの中に含まれていたフロギストンが逃げ去るというフロギストン説を信奉していた。そして、彼はものの燃焼やネズミの生存を助けるよい空気はフロギストンを含まないものであると考えた。プリーストリーはフロギストンを含まないよい空気を実験的に1774年に得た。それは酸素の直接の発見ではないが、一般的にはそれを酸素の発見としている。

⁵⁸ カール・シェーレ (1742～1786) は1772年に栓をした空ビンの中で黄リンを燃やした後に、ビンを逆さにして水の中に入れ栓を抜くと、水がビンの中に入り空気が減っていることと、残った空気の中では燃焼が起こらないことを見出した。今になれば減った「火の空気」が酸素であり、残った「有毒空気」が窒素であると考えられる。彼はこれらの成果を1777年に発表しているので、酸素の発見者とはなっていない(61-42,43p)。シェーレは錬金術の流れをくみ独自に研究室をつくり実験にいそむ少なからぬ人の一人で、多くの化学的な発見をした。

⁵⁹ 元素はものの元の性質を表す抽象的な概念であり、原子は具体的な物質的要素である。原子は原子核と電子から成り立っている。

⁶⁰ 原子番号43のテクネチウム(182頁8.14.7参照)と原子番号61のプロメチウムは殆ど存在していない。

銅、マンガン、コバルト、モリブデンなどが少量含まれる。

また、地球を構成する元素は鉄 (33%)、酸素 (30%)、ケイ素 (15%)、マグネシウム (13%)、ニッケル (2%) 等である。一方、天の川銀河では水素 (73%) とヘリウム (24%) が圧倒的に多く、次いで酸素 (1%)、炭素 (0.5%)、ネオン (0.1%)、鉄 (0.1%)、窒素 (0.1%) 等である (63-166p)。

宇宙全体でも水素・ヘリウムが圧倒的に多く、原子番号が増えるに従ってその存在量はでこぼこしながらも減少傾向にあるとされている (64~66参照)。

8. 19世紀後半～20世紀前半の宇宙観

19世紀後半以降、星の色と明るさを調べる研究が進み、宇宙が膨張していることが明らかにされていった。また、星のエネルギー源・元素の合成に関する探求から、宇宙は高温高压の火の玉として始まった（後にビッグバンと称される）という全く新たな概念が生まれ、斬新な宇宙観が展開した。

8.1 ヘリウムの発見：地球上では多くの元素が発見されていった。一方、前述したように星の光のスペクトルが原子の発光・吸光と関係していることが明らかにされ (169頁6.6参照)、太陽光のスペクトルに注目が集まった。しかし、太陽の光は強すぎるためその光のスペクトルを詳細に調べることは容易ではなかった。ノーマン・ロッキヤー (150頁2.3参照) とピエール・ジェンセン (1824～1907) は、それぞれ別々に1868年の皆既日食を利用して太陽の彩層を細かく観察した。彼らはナトリウムのD線 (169頁6.6参照) のそばに強い光があることに気づいた。それはナトリウムのD線とは重ならず、当時知られていたどの元素の発光スペクトルとも一致しなかった。ロッキヤーはその光を発する元素をギリシャ語の太陽を意味するヘリオスにちなんでヘリウムと命名した。地上でヘリウムの存在が確認されたのは1895年であった (35-149p)。

8.2 星の色と明るさ：太陽光のスペクトル (色の違い) の観察に刺激され、星のスペクトルと明るさの詳細な研究が始まった。ウィリアム・ハギンズ (1824～1910) は1860年代にオリオン星雲 (主にガスが広い範囲にまとまっている天体) は単純なスペクトルを持つが、アンドロメダ銀河⁶¹は恒星と同じような連続スペクトルを持つ

ていることを発見し、星雲と銀河を光のスペクトルの違いにより区別した。

またアンジェロ・セッキ (1818～1878) は1870年代に恒星をスペクトルの違いにより4つの型に分類した。それは①シリウスに似た青白い星 (水素による暗線はあるが、金属元素による吸収線は弱い)、②カペラなど太陽に似た星 (連続スペクトルは黄色の部分が最も強く、無数の暗線がある)、③ベテルギウスなどの赤い成分が多い星 (ミラのような変光星が多く、規則的な間隔のバンド状のスペクトル線を示す)、④更に赤い星 (スペクトル線は③と違い規則的ではない) であった。彼は実験室で加熱した金属の温度とそれが発するスペクトルの間に関係があるということを見出し、星のスペクトルの違いは星の温度の違いであると考えていた (18-122p)。

1874年にはヘルマン・フォーゲル (1841～1907) は、高温の青白い星は若い星でありそれが太陽のような低温の黄色星となり、更に老年になると赤い星となると考えた。即ち彼は、星が進化するという新たな概念を持つようになった。またロッキヤーは、星は星雲から出発し、ガス雲となり、初期の星が生まれ、更にそれは低温の赤色の星となり、次第に温度が上昇し、黄色、青と変わり、最後には温度が下がり再び赤色星となるとという別の星の進化経路を考えた⁶² (29-197~198p)。このように星が進化するという斬新な概念が生まれた。

更に、ヘンリー・ドレイパー (1837～1882) やアンドリュー・コンモン (1841～1903) らが天体写真撮影の技術進歩をもたらした。星の色と明るさの研究には弾みがついていた。

ハーバード大学天文台のエドワード・ピッカリング (1846～1919) はドレイパーの遺志をついで、ウィリアム・フレミング⁶³ (1857～1911)、ヘンリエッタ・リービット (1868～1921) {1912年に変光星の周期に関する重要な発見をした (177頁8.10.3参照)} はじめ多くの女性の手助けを受けながら多数の星のスペクトルを撮影し、星の明るさとスペクトル型を含むカタログをドレイパー星表として整備していった。1890年、1918年以降のドレイパー星表にはそれぞれ、1万個以上、22万個余りの星の性質が示された。この分類法はハーバート分類法と呼ばれており、色に従って星は以下の10種類に分けられた (カッコ内にその後明らかにされた表面温度K⁶⁴を示した)。O型：青 (29,000～60,000)、B型：青～青白 (10,000

⁶¹ アンドロメダ銀河が天の川銀河とは違う銀河であることが一般に認められるようになるのは20世紀に入ってからである (183頁8.15参照)。それは長い間アンドロメダ星雲と呼ばれてきた (178頁8.11.1参照)。

⁶² 現在考えられている星の進化については174頁8.6参照。

⁶³ 彼女は9年間に10,000個の星のスペクトル型を決め、更に多くのガス星雲、変光星、新星を発見した。

⁶⁴ 温度の単位ケルビンで、日常的に使う℃とは $K = ^\circ C + 273.15$ の関係がある。

～29,000)、A型：白 (7,500～10,000)、F型：黄白 (6,000～7,500)、G型：黄 (5,300～6,000)、K型：橙 (3,900～5,300)、M型：赤 (2,500～3,900)、L型：暗赤 (1,300～2,500)、T型：赤外線 (600～1,300)、Y型：赤外線 (600以下)。

これらの成果を基に1910年頃にアイナー・ヘルツシュプルング (1873～1967) とヘンリー・ラッセル (1877～1957) は横軸に星の色の種類 (あるいは温度)、縦軸に星の絶対的な明るさ (見かけの明るさと星の推定距離から求める) を取り多くの星を図上に表示した。その結果、多くの星は左上 (高温で青く、絶対等級⁶⁵が明るい星) から右下 (低温で赤く、絶対等級が暗い星) へ連続的に分布していることがわかった。それは主系列星とされた。また、そこから外れて左下には白いが、絶対等級で暗い星がいくつか見つかった。これは白色矮星⁶⁶である。その他、右上には赤くて、絶対等級で明るい星が主系列星とは別の一団をなしている。それは赤色巨星⁶⁷である。この図は現在では二人の名前をとってヘルツシュプルング・ラッセル (HR) 図として利用されている (図11)。

8.3 温度と放射の関係：1859年にダスタフ・キルヒホフ (169頁6.6参照) は物体の温度と放射の間には一定の関係があるという重要な発見をした。それにより、黒体 (外部から入射する光・電磁波による熱放射などを全波長に渡って完全に吸収し、放出出来る物体) の放射エネルギーは温度のみに依存することが明らかにされた。その後、マックス・プランク (1858～1947) は黒体の放射エネルギーと温度の関係について1900年に定式化した。それはプランクの法則と呼ばれるが、黒体から放射される全エネルギーは表面温度の4乗に比例することと、放射される電磁波で最大輝度を示す電磁波の波長は温度が上がるほど短くなることが示された。即ち、星の温度が高くなるに従って、星の色は赤、黄、青と波長の短い色に変化していくことが理論的に裏付けられた。

8.4 太陽の輝きの源：キルヒホフらの研究により、太陽は表面が6,000Kの高温で固体ではなくガスで出来ていることが分かり、そのエネルギー源は何かということと、そのエネルギー源はどのくらい長くもつのかということへの関心が高まった。1848年ユリウス・マイヤー (1814

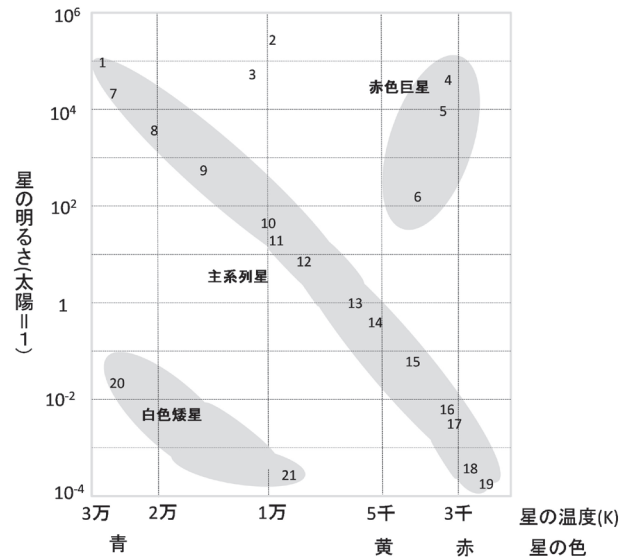


図11. ヘルツシュプルング・ラッセル (HR) 図。縦軸に星の絶対等級 (ここでは太陽に対する相対的なものとして表した)、横軸に星の温度 (色) を取ると、星は主系列星・赤色巨星・白色矮星に大きく分けられる。1: β ケンタウリ、2: デネブ、3: リゲル、4: ベテルギウス、5: アンタレス、6: アルデバラン、7: スピカ、8: ペラトリックス、9: アケルナル、10: ベガ、11: シリウスA、12: アルタイル、13: 太陽、14: α ケンタウリB、15: 61シグニB、16: グリーズ725B、17: バナーナード星、18: プロキシマ・ケンタウリ、19: DXケンタウリ、20: シリウスB、21: プロキオンB。

～1878) は太陽が仮に石炭を燃やしているとすると、数千年で燃え尽きてしまうはずで、そうでないのは、隕石や彗星が衝突しているからだと考えた。しかし実際にはそのようなことは起こっておらず、太陽のエネルギー源は明らかにされなかった。

1854年にヘルマン・ヘルムホルツ (1821～1894)、同じ頃にケルビン卿 (ウィリアム・トムソン) (1824～1907) は、太陽は自らの重力作用で収縮しその時にエネルギーが生まれると考えた。それでも太陽の寿命はせいぜい3,000万年程であり、従って地球の年齢も約2,000万年と見積もられた。それは当時考えられていた地球の地層の古さとは必ずしも一致しなかった。しかし他のアイデアがなかったために、その考えが20世紀初頭まで受け

⁶⁵ 星の明るさは見かけの等級と絶対等級で表す。見かけの等級はヒッパルコスにはじまるものであるが (160頁3.4.5参照)、1856年にノーマン・ボグソン (1829～1891) により5等級違うと100倍、1等級違うと約2.5倍見かけの明るさが違うと決められた。一方、絶対等級はその天体が地球から32.6光年 (10パーセク) (149頁1.13参照) 離れた所に存在すると仮定した時の明るさである。例えば太陽の見かけの等級はマイナス27等星 (マイナスの数が増えるほど明るい) で、絶対等級は4.8等星である。

⁶⁶ 温度の高い星で単位面積当たりの明るさは明るい星の表面積が小さいために全体としては暗く見える矮星である。

⁶⁷ 温度の低い星で単位面積当たりの明るさは暗いが星の表面積が大きいため全体としては明るく見える巨星である。

⁶⁸ ケルビン卿の説が発表された頃にダーウィンの進化論 (1859年) も公表された。それは、進化にはケルビン卿の説よりはるかに長い時間が必要であることを示していた。しかし、ケルビン卿の名声は高く、ダーウィンの進化論の旗色は悪いものであった (29-255p)。

入れられていた⁶⁸ (18-132p, 29-255p)。

8.5 核融合：1896年にアンリ・ベクレル (1852～1908) はウランが放出した放射線が写真乾板を露光させることを発見し、1901年にはピエール・キュリー (1859～1906) が放射性エネルギーの存在を明らかにした。これらのことは原子核が変化するという新たな概念を生み出した⁶⁹。

また1905年にアルベルト・アインシュタイン (1879～1955) (176頁8.9参照) は特殊相対性原理を発表し、質量とエネルギーの等価性原理 ($E=mc^2$) ⁷⁰を導いた。1919年にはジャン・ペラン (1870～1942) が、水素がより重い元素に変換する時にエネルギーを発生する可能性を指摘した。更に、1920年にフランシス・アストン (1877～1945) が $\frac{4}{2}$ ヘリウム原子の質量は4個の $\frac{1}{1}$ 水素原子の質量より1%ほど少ないことを実測した。それらを受けてアーサー・エディントン (1882～1944) は水素原子4個がヘリウム1個に変化する (核融合) 時に発生するエネルギーが恒星のエネルギーになると推測した。しかし、4個の水素が同時に衝突する確率はほとんどゼロと考えられており定説とはならなかった (18-133p)。

ところが、1928年にジョージ・ガモフ (1904～1968) は1,000万Kを超える太陽の中心部では水素からヘリウムへの変換が起こりうることを理論的に示した。その後、1938年にカール・フォン・ヴァイツェッカー (1912～2007)、1939年にハンス・ベーテ (1906～2005) が陽子同士の衝突 (陽子—陽子連鎖反応⁷¹) が起こること、あるいは炭素・窒素・酸素を触媒とした循環的な過程により陽子4個からヘリウム核が合成される過程 (CNOサイクル⁷²) を理論的に明らかにした (67, 68)。

現在、太陽では豊富にある水素を原料にした核融合反応⁷³がおこり、それがエネルギー源となり、太陽の寿命は約100億年であることが分かっている。また太陽は毎秒 5.8×10^8 トンのヘリウムを生成している。太陽には現在 5×10^{26} トンのヘリウムが存在しており、それだけのヘリウムが全て太陽で水素から合成されたとすると270億年かかると見積もられている。そのことは、ヘリウムの

多くは太陽の年齢46億年の間に太陽で合成されたものではないことを示している。太陽に含まれるヘリウムの大部分はビッグバンに由来するものであると考えられている (69-58p, 186頁9.4.4参照)。

研究の進展は多少前後するが、以下に太陽を含む恒星の誕生から死滅までの過程と星の色と明るさについて簡単にまとめる。

8.6 星の進化：星の誕生の第一段階は、宇宙に漂う水素などのガスが重力により次第に集まることである。その時の温度はせいぜい10～30K位の超低温である。それが成長すると回転する円盤となるが、その回転する円盤の中心の温度は数百Kとなり、そこに原始星が誕生する。その後も周囲のガスが原始星に集積し続け、重力により温度が次第に上昇し、原始星が完成する。星の進化はその質量の違いによって大きく異なる。質量別の星の進化を主に天文学者の蜂巢泉明の解説に従ってまとめる (70)。

8.6.1 恒星になれない星：太陽の質量の0.08倍よりも小さい星は、星の中心温度が1,000万Kよりも低い段階で重力による収縮が止まってしまい、水素の核融合反応が起こらず、恒星となることが出来ずに死に至る。ちなみに地球、木星の質量はそれぞれ太陽のおよそ 3×10^{-6} 、 1×10^{-3} である。

8.6.2 恒星となる星

8.6.2.1 概略：太陽質量の0.08倍以上の質量をもつ原始星では核融合反応が始まり主系列星 (173頁図11参照) となる。太陽程度の恒星は数千万年で原始星から主系列星になると言われている。主系列星となると、中心部での核融合反応が激しくなる。その結果、星は膨張し星全体の温度が下がり核融合反応は弱まる。逆に核融合反応が弱くなると星は収縮して温度が上がり、核融合反応は強まる。このように主系列星は核融合反応が調節されて温度、構造が比較的安定した星となる。どのような主系列星になり、どのような一生を過ごすかは恒星の質量の大きさにより決まっている。質量の大きな星は激しく輝きHR図の左上を占める。その寿命は短く、太陽の30倍

⁶⁹ 地球内部で放射性崩壊により発生した熱が地球の内部構造に対して重要な作用をしているなど、地球科学にも新たな視点を与えた。

⁷⁰ 1907年にこのような式に整理された。 E =エネルギー、 m =質量、 c =光速。例えば1gの物質が消失した時に発生するエネルギーはおおよそ20万トンの水を0℃から100℃に温める熱量に相当する膨大なものである。

⁷¹ 概略を示すと、まず、2個の陽子が反応し、陽子と中性子からなる $\frac{3}{2}$ 重水素が形成される。次に重水素と陽子が結合し、 $\frac{3}{2}$ ヘリウムが生成する。最後に2個の $\frac{3}{2}$ ヘリウムが結合し、陽子2個と $\frac{4}{2}$ ヘリウムが1個合成される。

⁷² $^{12}_6\text{C}$ と4つの ^1_1H から $^{12}_6\text{C}$ と $\frac{4}{2}\text{He}$ が合成される (それは以下の6つの部分反応から成り立っている。その概略を示すと、1) $^{12}_6\text{C} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^{13}_7\text{N}$ 、2) $^{13}_7\text{N} \rightarrow ^{13}_6\text{C} + e^+$ 、3) $^{13}_6\text{C} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^{14}_7\text{N}$ 、4) $^{14}_7\text{N} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^{15}_8\text{O}$ 、5) $^{15}_8\text{O} \rightarrow ^{15}_7\text{N} + e^+$ 、6) $^{15}_7\text{N} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^{12}_6\text{C} + \frac{4}{2}\text{He}$ である)。

⁷³ 太陽で起きている核融合反応は主に陽子—陽子連鎖反応 (太陽では1,000万～2,300万Kで起こる過程が主に起きている) でCNOサイクル (1,400万～3,000万Kの高温で起こる) はごくわずかである。

以上の重さの星の寿命は数百万年より短いと言われている。太陽は質量では軽い星のグループに、表面温度では上記のG型に属しており、色は黄～赤で、HR図ではほぼ中央辺りに属している。その寿命は約100億年と言われている（現在はその寿命の半分程が過ぎたところである）。更に軽い星の寿命は長くなり、太陽質量の半分程度になるとその寿命は1,700億年程度と見積もられている。

星はそれぞれの質量に応じた安定した主系列星の時代がおわると、やはりそれぞれの質量に応じた最期を迎える。

8.6.2.2 太陽質量の0.08～0.8倍の星：星の中心部で水素からヘリウムへの核融合が始まり、中心部にヘリウムが溜まる。やがて水素の外層は膨張し表面の温度が下がり赤色巨星となる。そこでは中心部の温度がヘリウムからほかの元素を合成する核融合反応を起こすほど高くはならず、ヘリウムからなる白色矮星が出来ると考えられている。このような星の寿命は数百億年以上である。現在この宇宙は誕生してから137億年経ったに過ぎず、このような星はまだ寿命を迎えていないためにHR図の右下の星として輝き続けている。

8.6.2.3 太陽質量の0.8～8倍の星：水素が核融合反応で枯渇する前に、質量が重いために中心部の温度は1億K程度となり、 ${}_2$ ヘリウムから ${}_6$ 炭素や ${}_8$ 酸素を生じる核融合反応が始まる。しかし、それ以上の元素合成反応は起こらず、次第に表面温度が下がり赤色巨星となる。太陽には鉄を始めとする多くの元素が含まれることが、ブラウンホーファー線の多くの暗線の存在から分かっている。即ち太陽を含むこのような星に含まれる原子番号が9以上の元素は、その星の内部で生成されたものではない。それらの元素は前世代の星が合成した元素で、その星が誕生した時にそれらを取り込んだものである。このように多くの星は前世代の星が爆発し、宇宙空間に撒き散らされた星屑を材料としてつくられるのである。また、太陽を含むこのような星が燃料として利用出来る元素はそれらに含まれる多くの元素のうちごく限られた種類の元素だけである。

太陽は寿命の最後に赤色巨星となるが、その大きさは、地球の公転軌道ほどの大きさとも言われている。外層のガスはガス状の星雲（惑星状星雲、169頁脚注51参照）となる。それは時間とともに宇宙空間に散逸し、中心部では炭素、酸素を多く含んだ白色矮星が出来ると考えられている。

これはその後次第に冷えて暗くなっていく。白色矮星は極めて高密度の天体で、例えば最初に発見された白色矮星のシリウスB⁷⁴の質量は太陽の1.06倍であるが、その直径は太陽の0.016倍とたいへん高密度であることが確かめられている。太陽の1.44倍以上の質量を持つ白色矮星は存在しない（チャンドラセガール限界⁷⁵）。

8.6.2.4 太陽の質量の8～20倍の重い星：太陽質量の8～10倍の恒星は中心部の温度が5億K以上となり、炭素を材料とした核融合反応（炭素燃焼、183頁脚注90参照）が起こり、 $_{10}$ ネオン・ $_{12}$ マグネシウムまでの元素が形成される。更に、太陽質量の10～20倍の星では中心部の温度は27億Kを超える超高温環境となり、 $_{14}$ ケイ素を材料にした核融合反応（ケイ素燃焼、183頁脚注90参照）が起こり、 $_{26}$ 鉄までの元素が作られる（181頁8.14参照）。このような星は赤色巨星を形成した後は、大爆発を起こす。その時に星が明るく輝くことからそれは超新星爆発と呼ばれている。

我々は今までに天の川銀河などで起きた超新星爆発をおよそ100～200年に一度、観察してきた⁷⁶。例えば、おうし座のカニ星雲は1054年に爆発した超新星爆発の残骸である。そのことを藤原定家は『明月記』の中に伝聞として記している。あるいは1572年にティコ・ブラーエはカシオペア座に超新星SN1572を見ていた（163頁5.2参照）。

このような超新星爆発では、中央部に重力崩壊で押しつぶされた直径10km程度の中心核が残る。その質量は太陽と同程度で、密度が高く極めて重力が強くなり、中性子星となる。中性子星は原子核に電子が吸収されほとんど中性子だけからなる星である（190頁10.2参照）。

8.6.2.5 太陽の質量の20倍以上の星：更に質量の大きな星では、超新星爆発後の重力崩壊が極度に進行し、極限的な非常に強い重力場が作られる。そこには光すら外に出ることが出来ないとされるブラックホールが出来ると考えられている（190頁10.3参照）。（ここまで主に70によった）。

次に19世紀終わりから20世紀初めにかけてなされた星に関する興味深い二つの観察とアインシュタインにより提出された新たな世界観を紹介する。

8.7 火星人：パーシヴァル・ローウェル（1855～1916）は私財を投じてローウェル天文台を建て、実業家から天文学者に転じた。彼は火星には人工的な運河が存在して

⁷⁴ 1910年代後半にウォルター・アダマス（1876～1956）は、シリウスAの伴星が白色矮星のシリウスBであることを明らかにした。

⁷⁵ 白色矮星は高密度の星であるが、更に密度が増すと星は重力に負けてつぶれてしまい白色矮星は出来ない。白色矮星の質量の上限は、スプラマニアン・チャンドラセガール（1910～1995）により1932年に理論的に明らかにされた。

⁷⁶ 現在では観測機器の進歩と関心の高さから超新星の探索がぐまくなされておられ、超新星は頻繁に見つかっている（71）。

おり、それを造った火星人がいると19世紀の終わりに主張した。ところが、近年の詳細な火星探査の結果により、彼が見たとするものは存在していなかったことが明らかにされている。しかし、彼が考えた火星における生物の存在は、今なお興味深い問題であり、そこに生物が存在していたか⁷⁷、あるいは現在も存在しているか⁷⁸の研究が続いている。

8.8 冥王星の発見：ローウェルは海王星の外側にも惑星が存在することを信じ、その探索にも励んだ。1915年に撮った写真にはそれが写っていたがはっきりとはしておらず彼はそれを見過ごしてしまった(37-192p)。その天文台を引き継いだヴェスト・スライファー(1875～1969)の指導のもとクライド・トンボー(1906～1997)は1930年にその未知の天体を発見した。それは冥王星⁷⁹と名付けられた。

8.9 アインシュタインの宇宙観：アインシュタインは1905年に特殊相対性理論(①特殊相対性原理：等速で動いていれば、その速さによらず、だれに対しても、自然の法則は同じように成り立つ、②光速不変の原理：光の速さはそれを測る人の運動速度にかかわらず常に一定である)(75-28, 29p)と1915～16年に一般相対性理論(①一般相対性原理：等速で動いている人にも、加速や減速をしている人にも、自然の法則は同じように成り立つ、②等価原理：加速による重さと重力による重さは同じものである)を発表した(56-14, 15p)。それは我々の世界観を大きく変えていくことになった。また、これらの理論からもたらされた重要な帰結であるエネルギーと質量が等価であること($E=mc^2$) (これが星のエネルギー源が核融合であるという認識につながったことは、174頁8.5参照)は各界に大きな影響を与えた。

また、彼は重い物の周りでは時空が歪むことを示し、そのように強い重力場で時空がゆがむことを考慮に入れて万有引力の法則を解いた方程式を1916年に発表した。それはアインシュタインの方程式と呼ばれている(180

頁8.13.1参照)。彼は次にその方程式を宇宙に適用したものを1917年に公表した。その時に彼は、宇宙は始まりも終わりもない不変の世界であり、天体が互いの重力に引かれて最終的に崩壊してしまうことがないように働く斥力があるはずだと、その方程式に斥力に相当する宇宙項と呼ばれるものを導入した(宇宙は不変ではなく、始まりがあり膨張し続けていることが分かった経緯については179頁8.12以降に述べる)。

アインシュタインは重力による時空の歪みは、通常の夜に見られる星の光を皆既日食の時に太陽の縁近くを通して曲がった後に地球に届いた光と比較することで実証出来るはずであると示唆していた。何度か観測が試みられたが悪天候などにより観測は成功しなかった。しかし、アーサー・エディントンらが1919年の皆既日食の時に光が1.98秒角(アインシュタインの予想の1.7秒角より僅かに大きかった)曲がることを、ヒアデス星団を利用して突き止めた⁸⁰。その観測結果が示され、一般相対性理論は脚光を浴びることになっていったが、アインシュタインの宇宙像に抵抗する勢力も根強く残っていた(76-231~236p)。

以下に再び星の明るさについて取り上げる。

8.10 変光星：変光星とは明るさが変化する星で、確証はないが昔から多くの人の注目を浴びてきたと考えられている。紀元前2世紀にはヒッパルコスが、更に16世紀までに何人かがミラ(くじら座 α 星で脈動変光星、以下参照)について言及していたとされている。また、10世紀にはアル・スーフィーがアルゴル(ペルセウス座 β 星で食変光星、177頁8.10.2参照)を観察していたとされている(162頁4.2参照)。

8.10.1 ミラ：変光星についての研究は16世紀末から本格的に始まった。ティコの弟子のダーヴィット・ファブリツィウス(1564～1617)は1596年にミラが3等級の明るさであったが、やがてまったく見えなくなり、13年後の1609年に再び3等級の明るさに戻っていることを見

⁷⁷ 1984年に南極大陸のアラン・ヒルズで隕石の破片ALH 84001が発見された。その隕石に含まれる気体の成分が火星の大気と似ていることから、それは火星起源であるとされた。そこから生命体の微細な化石らしきものが見つかったという報告がなされている(72)。しかし、それが生命体であったかどうかの結論は出ていない。

⁷⁸ 火星にはかつて磁場は存在していたが、現在では消滅したことが分かっている。磁場がないために現在の火星には高エネルギー粒子が降り注いでおり、水も乏しいことから火星の地上部は生物の生育には厳しい環境であると考えられている。しかし、地下には生物が存在している可能性が残っており、火星における生物探査の焦点は地下に向けられている(73)。

⁷⁹ 冥王星は長い間惑星の一つであった。しかし、ケレス(1801年に発見された168頁脚注46参照)の他に冥王星と同程度の大きさを持つエリスが太陽系の天体として2005年に発見され、惑星の定義が2006年の国際天文学連合で見直された。そこで決まった惑星の条件は以下の三つである。①直接太陽の周りを回り、②自己重力が固体強度を上まわってほぼ球形となり、③その軌道の近くから他の天体を排除しているもの。冥王星は③の条件を満たしていおらず、また遠日点は近日点の約1.7倍で離心率は0.254と大きく、軌道の傾斜角も17.1度と他の惑星とは大きく異なっているために惑星から外された。冥王星を含め、ケレス、エリス、ハウメア、マケマケなどが準惑星とされた(74)。

⁸⁰ 1919年の日食はヒアデス星団を背景に起こった。その星々の普段の位置関係とその時の恒星の位置の変位から光が曲がることを測定した(76-232p)。

つけた。1638年にヨハン・ホルワルド (1618～1651) はこの星が11ヶ月の周期で姿を消しては現れることを突き止めた。1642年にヨハネス・ヘヴェリウス (165頁脚注38参照) はこの星を「すばらしい」という意味のラテン語の「ミラ」と名付けた (35-167p)。現在ではミラは星が膨張と収縮を繰り返すことで明るさが変わる (2.0等級と10.1等級の間を約322日の周期で変光する) 脈動型変光星 (本頁脚注81参照) であることがわかっている。明るさは最も収縮した直後に極大となる。

8.10.2 アルゴル：1667年にはジェミニアーノ・モンタナリ (1633～1687) はペルセウス座 β 星もやはり周期的に明るさが変わることを見出した。この星は昔からアルゴル (悪魔の星、162頁4.2参照) とよばれ不思議がられていた。1782年にジョン・グッドリック (1764～1786) がその変化を記録した。それは普段は約2.1等級であるが、2867日に一度、急に3.3等級と暗くなることが分かった。アルゴルは、実際は一つの星ではなく、明るい星と暗い星が互いの周りを回っている連星であった。二つの星が重なっていない時には明るく見えるが、暗くて大きな星が明るく小さな星を隠すと、明るさはガクンと落ちる。逆に明るい星が暗い星の前に来ると幾分暗くなる (グッドリックは2番目の変化には気が付かなかった) (35-167～169p)。このように連星の食が原因となり光の強さが変わる星を食変光星と呼んでいる。

8.10.3 セファイド変光星：1784年にはエドワード・ピゴット (1753～1825) が鷲座 η 星 (7.18日周期で3.48～4.39等級まで変わる) について、更に同じ年にグッドリックがケフェウス座 δ 星 (5.37日周期で3.48～4.37等級まで変わる) について、それぞれ変光星であることを発見した。これらはセファイド変光星と呼ばれる脈動型変光星である。変光星にはこの他、突発的に明るくなる新星などもある。

19世紀後半にノーマン・ポグソンにより星の明るさが定義され (173頁脚注65参照)、その後20世紀前半にかけて星の色と明るさの研究が進んだ。中でもピッカリングが多くの女性達に無数の天体写真を見比べさせたことに

より大きな成果が得られた (172頁8.2参照)。

その一人のヘンリエッタ・リービットは1904年にセファイド変光星の変光周期と星の見かけの明るさに関係があることに注目し始め、1908年にはマゼラン星雲に含まれる1,777個の変光星の性質を報告した。その中で彼女は、16個の変光星に注目し明るい変光星ほど長い変光周期を持っていると言及した⁸¹ (77)。更に観測を進め1912年には小マゼラン雲の変光星の変光周期と見かけの明るさとの間に以下のような規則正しい関係を見出した。縦軸に見かけの最大の明るさ、あるいは最小の明るさの等級を取り、横軸に変光周期の対数を取ると、最大、最小の明るさについて、それぞれ明るい星ほど長い変光周期となる直線関係が見出された (78)。これは、見かけの明るさを指標にしたものであったが、観測対象の星は小マゼラン雲に属しており、地球からの距離は概ね同じであったために、見かけの明るさと真の明るさの関係は一定であるために、直線関係が得られたと考えられる。

次の大きな問題はセファイド変光星までの距離を明らかにし、絶対等級との関係を求めることであった。しかし、視差を測定し距離を求めることが出来るようなセファイド変光星はなかった。1914年にアイナー・ヘルツシュェブルングは、過去の星図を分析することにより、リービットの見つけた25の変光星のうち13個について、恒星の固有運動⁸²を調べた。彼はまた別のデータから、星が地球から遠ざかることにより星の色がより波長の長い赤い方にずれること (赤方偏移) から星の運動速度を検証した。彼はそれらを突き合わせてセファイド変光星の距離を大胆に見積もり、小マゼラン雲の距離を3万光年と推測した⁸³ (76-197p)。

8.10.4 赤方偏移：赤方偏移は光のドップラー効果である。クリスチャン・ドップラー (1803～1853) は1842年に「連星と単独の星の着色した色について」の論文中で、光は波の性質を持っており、光源が観測者に対して運動している時は、静止している時に比べて波長が変化するために違った色になるというドップラー効果を発表

⁸¹ セファイド変光星は太陽のおよそ5～20倍の質量をもつ星の進化がある特定の状態となったものである。主要な燃料の水素が燃え尽きると、しばらくの間 (約100万年) 次の燃料 (ヘリウム) を燃焼するのに適応するため不安定な状態となる。恒星が収縮すると内部の温度は上昇して明るくなるが、温度が上がりすぎると、膨張し温度が低く暗くなる。このような不安定な状態では、膨張収縮が規則的に繰り返される。このような星を脈動変光星と呼ぶ。明るく質量の大きいセファイド変光星は、暗く質量の小さいセファイド変光星よりゆっくり脈動する (76-162p)。

⁸² 1718年にエドモンド・ハレーはシリウス・アルクトゥルス・アルデバランの位置が、ヒッパルコスが約1850年前に記録した位置よりも0.5度以上動いていることに気付いた。それぞれの星は独立した運動をしていることが分かった。そのような運動を星の固有運動という。

⁸³ 彼が発表した本には3千光年と記されているが、彼は3万光年とするつもりであったと言われている (76-197p)。ヘンリー・ラッセル (172頁8.2参照) も独自に8万光年という概算を行った。これは現在測定されている21万光年に比べればはるかに小さいが、当時としては宇宙が驚嘆するほど大きなものであることを示すものであった (76-197p, 168頁6.4参照)。

した。1845年にはオランダでクリストフ・バロット(1817～1890)が動いている列車の上で演奏されたトランペットの音の音程が変わることを見出し、音のドップラー効果が確かめられた。

光のドップラー効果については、実際に測定されるまでには暫く時間がかかった。1848年にアルマン・フィゾー(1819～1896)も地球から遠ざかっている星の光がより赤い波長の方に延びることを指摘し、1860年代末からはウィリアム・ハギンズ(172頁8.2参照)らによりその実測も試みられた。それは、例えば、ナトリウムの発光スペクトルのD線の波長は決まっているが、その特徴を備えた光の波長のズレを調べるなどの方法であった。そのような研究は19世紀に著しく進歩した天体の分光学的研究により可能となった(172頁8.2参照)。その結果、19世紀末にはいわゆる赤方偏移が観察されるようになっていった。

8.11 宇宙の広さ

8.11.1 星団・星雲・島宇宙：トーマス・ライト(1711～1786)は1751年に、また哲学者のイマニエル・カント(1724～1804)は1755年に、アンドロメダ星雲と他星雲群は、我々の属する天の川銀河とはそれぞれ独立した“島宇宙”となっていると考えた。それは、これらの星雲が天の川銀河の中にあるという当時の常識とは全く違うものであった(29-161, 162p)。

アンドロメダ星雲については10世紀にアル・スーフィーが記載しているが(162頁4.2参照)、18世紀以降大きな望遠鏡が出来てから星雲の発見が相次いだ。ウィリアム・ハーシェルは1786年には1,000個の星団・星雲を、そして1802年には合計で2,500個の星団・星雲を報告した(29-174p)。ハーシェルは、それらは天の川銀河とは別なものであると初めは考えていた。しかし、1790年彼はかなりの範囲にかすかに輝く大気に包まれた8等星を発見し、恒星の周りの星雲は恒星とは性質が違い、それは星から出た物質が光っているものだと結論した。そしてそれらを惑星状星雲と名付けた。その結果彼は、星雲は天の川銀河に属するものと考え、“島宇宙”の考えを捨て、元の常識に戻った。

カントらの“島宇宙”の推論は観察ではなく思弁的なものであった。一方、ハーシェルの宇宙観は当時の最も優れた望遠鏡の観測に基づいたものであり、天文学者達はその考えを受け入れた(76-88p)。1840年代中頃には、ロス卿は“怪物”大望遠鏡で(169頁脚注49参照) M51とM99⁸⁴の星雲が渦巻きを作っていることを観察し、そのスケッチを残した。それを想像の産物と批判するものもいたが、それは天の川銀河の外に他の恒星系が存在するという“島宇宙”の存在を示すものと考えた人々も存在した(76-92p)。しかし、“島宇宙”の考えが一般に受け入れられることはなかった。

1864年にウィリアム・ハギンズはアンドロメダ星雲のスペクトルを観測し、それが連続スペクトルを放つ天体であることを発見していた。1899年にはユリウス・シャイナー(1858～1913)がアンドロメダ星雲の光のスペクトルを写真に撮り詳しく分析し、それはガス雲の単純なものとは違い、恒星と同様の複雑なものであることを確認した(172頁8.2参照)。1899年にはジェームズ・キーラー(1857～1900)もNGC891(地球から約3,000万光年の距離にある非棒渦巻銀河⁸⁵)の中心の渦巻きの周りに31個の星雲を見つけた(76-67p)。

アンドロメダ星雲などの星雲は遙か彼方に存在することが分かってきた。そのような中でヘンリエッタ・リービットがマゼラン雲の中に変光星を見出したのである。彼女の見出した関係から宇宙の大きさを明らかにするためには、マゼラン雲等までの距離を明らかにすることが重要となった。

アンドロメダ星雲は天の川銀河とは別に存在する銀河である。現在ではかつて星雲と呼ばれたものの多くが銀河であることが分かっており、それはアンドロメダ銀河と呼ぶべきである。しかし、本論ではその当時アンドロメダ星雲・マゼラン雲などと言われていた場合にはその名前を用いた。現在星雲と呼ばれるものは恒星が集まったものではなく、宇宙塵や星間ガスがある程度まとまっているものを指している。

8.11.2 星までの距離：1900年代初頭までには年周視差を利用した三角法で地球に近いおよそ100の星までの

⁸⁴ Mはメシエ番号(168頁6.2参照)。M51はりょうけん座の渦巻銀河で、小さな渦巻き銀河を従えていることから子持ち銀河とも呼ばれている。ロス卿の残したスケッチは子持ちであることがはっきりと示されていた。それは地球からは3,700万光年離れていることが現在では分かっている。M99は髪座にある渦巻銀河で5,500万光年かなたにある。

⁸⁵ 銀河は恒星・ガス状の星間物質・正体不明のダークマター(188頁9.6参照)・ブラックホール(190頁10.3参照)などが集まったものである。含まれる恒星の数が1000万程度の矮小銀河から、100兆程度の巨大銀河まで様々である。ハッブルは1936年に銀河をその形状から分類した。楕円形に見える銀河を「楕円銀河」とした。また、円盤構造を持つものの多くは渦巻きも見られた。その中で、棒状構造を持つものを「棒渦巻銀河」、棒状構造を持たないものを「渦巻銀河」とした(79)。現在ではそれらは更に幾つかのタイプに細分されている。非棒渦巻銀河は渦巻銀河の一タイプである。天の川銀河は棒渦巻銀河とされている。銀河がどのように進化するかは今後の研究を待たなければならないが、今のところ楕円銀河が進化の最終的な姿であると考えられている。

距離が求められていたが(80-52p)、遙か彼方の恒星や星雲までの距離を見積もることは困難であった。前述したように色の特徴からアイナー・ヘルツシュェブルグやヘンリー・ラッセルのHR図(173頁図11)を利用し恒星の絶対等級を決め、それと見かけの明るさは距離の二乗に反比例するという関係を組み合わせて、星までの距離を推定出来るようになった。また、彼らは星の固有運動も利用し星雲までの距離を大胆に見積もった。これらの方法以外にも星団あるいは星雲が平均すると同じ明るさを持つ、あるいは最も明るい星はどの星団・星雲でも同じであるという仮定に基づいて、近くの距離が分かっている星と比較することで星団・星雲までの距離の見積もりが盛んに行われるようになっていった。

ハーロー・シャプレー(1885~1972)は球状星団に注目し1910年代後半に精力的な研究を行った。彼は遠くの球状星団の一番明るい星は、近くの球状星団の一番明るい星と絶対等級は同じであると仮定したり、球状星団に見られたセファイド変光星の変光周期と明るさの関係についてヘンリエッタ・リービットの見つけた関係を利用したりして、数十の球状星団までの距離とその分布を明らかにした。球状星団までの距離は2~20万光年で、それは比較的小さな星団であり、球状星団は射手座(現在では天の川銀河の中心にあることが分かっている)付近のある特定の方向に存在していた。このことから彼は我々の宇宙、天の川銀河は30万光年の直径を持つ球状の広がりを持ち、太陽系はその中心から6.5万光年離れた所に位置しているという宇宙像を提出した(76-185~215p)。

彼の球状星団までの距離の見積もりは過大評価であった。それは彼が球状星団からの光が宇宙に漂う塵によって減光されること{ロバート・トランプラー(1886~1956)が1930年に明らかにした(81)}を考慮しなかったことと、彼が利用した変光星はリービットが見つけたものとは違うタイプであり、同じ変光周期を持っていたとしても絶対等級は1.5等ほど暗いものであることを知らなかったからである(183頁8.15参照)。

8.11.3 天の川銀河の大きさを巡る論争:18世紀にウィリアム・ハーシェルは天の川銀河は長径6,000光年、厚さは1,000光年の円盤状をしていると見積もった(168頁6.4参照)。フォン・ゼーリング(1849~1924)はハーシェルが仮定したように星の真の明るさは同じであるとし、1900年代初頭に天の川銀河の大きさは直径が2.3万光年、厚さは6,000光年であると見積もった。彼は更に、ヤコブス・カプタイン(1851~1922)が星の固有運動に基づいて、見かけの等級が近い隣接した星々の間の平均距離を求めていた結果も利用した。そのカプタ

インも独自に天の川銀河の大きさを直径5.5万光年、厚さ1.1万光年と推測していた。また太陽は中心から2,000光年離れた所に位置するとされた。これは“カプタイン宇宙”と呼ばれ、直径30万光年を持つハーロー・シャプレーの天の川銀河像とは大きく異なるものであった(29-274~277p)。

当時は天の川銀河の外に別の宇宙が存在するかどうかははっきりしていなかった。ヒーパー・カーチス(1872~1942)はジェームズ・キーラー(前頁8.11.1参照)の後を受けて渦巻き星雲について研究し、それらが遙か遠くにある別々の銀河であることの証拠を積み重ね、“カプタイン宇宙”の後継者となっていった。即ち“カプタイン宇宙”では天の川銀河の外に渦巻き星雲が別の銀河として存在するものであり、シャプレーの宇宙像では大きな天の川銀河の中に渦巻き星雲も含まれているというものであった。それはシャプレーの同僚のファン・マーネン(1884~1946)が1910年代後半に見つけた渦巻き星雲が回転しているということにも依拠していた。その星雲が遙か彼方にあればその回転運動の速度は光速を超えることになり、そのようなことはありえないと考えたのであった(76-249, 250, 255, 258p)。

1920年にシャプレーとカーチスの間で宇宙像に関する“大論争”が行われた。そこでは、シャプレーは天の川銀河系の大きさと構造に力点を置き、カーチスは渦巻き星雲に重点を置いたために二人の議論は必ずしもかみ合わず、はっきりした決着はつかなかった(76-238~265p)。

その後、エドウィン・ハッブルらによる渦巻き星雲の観測写真の再検討によりファン・マーネンが認めた渦巻き星雲の回転運動は存在しないという確定的な結果が1935年に公表された(76-342~348p)。現在の天の川銀河は長径10万光年、厚さは中央部で約1.5万光年、周縁部で1,000光年の円盤状をとり、太陽は中心から2.6万光年離れていることが分かっている(169頁脚注52参照)。今から見ると両者の宇宙像は、一部は正鵠を得ており一部は見誤ったものであったことが分かる。即ち、“カプタイン宇宙”ほど天の川銀河は小さくなく、シャプレーの主張とは異なり渦巻き星雲は天の川銀河には含まれていない別の銀河である。

8.12 膨張宇宙の発見:前述したようにドップラー効果により地球に近づく星の光のスペクトルは波長が短い方に(青方偏移)、一方、遠ざかる星の光は波長が長い方にずれる(赤方偏移)ことがわかり、1860年代からその研究が始まっていた(177頁8.10.4参照)。

8.12.1 ハッブル以前:1910年にウィリアム・キャムベル(1862~1938)は天体の移動速度について統計的に調べた結果、全ての星雲が、太陽系から遠ざかってい

ることを見出した。その後退運動はK項と呼ばれた。一方ヴェスト・スライファー (1875～1969) は、遠い星雲のスペクトル線が赤方偏移することを1912年に見出し、1925年までに41個の星雲の赤方偏移を観察していた。しかし、彼らは、そこから規則性を見出すことはなかった (29-278, 279)。一方、カール・ヴィルツ (1876～1939) は1922年に遠い星雲ほど速い速度で後退していることを見出していた (76-150p)。このような研究を進展させ、詳細な観測から宇宙が膨張していることを明らかにしたのはエドウィン・ハッブル (1889～1953) であった。

8.12.2 ハッブルの発見：ハッブルは1923年にアンドロメダ星雲を観察していた時に新星と思われるものを発見した。その後、過去に撮られた写真と見比べその中の一つが変光星であることを見つけた。1924年2月の晴れた夜に三晩連続でその星の明るさを調べ、その光度が2倍以上変化していることを見出した。その後、その星は急速に明るくなり最も明るい時には18等級となり、暗くなる時はゆっくり暗くなり19等級よりも少し暗くなること、その変光周期は31.415日であることを明らかにした。それはセファイド変光星 (177頁8.10.3参照) であった。彼はアンドロメダ星雲の距離をハーロー・シャプレーが導き出したセファイド変光星の周期・光度関係にあてはめ100万光年と算出し (76-312～318p)、1925年に公表した (76-331p, 82)。

1929年に彼は、ミルトン・ヒューメイソン (1891～1972) の観測 (83) にも支えられ、銀河の距離とその後退速度 (赤方偏移) の間に比例関係 (例えば、456万光年離れた天体は秒速745kmで地球から遠ざかっておりその半分の所にある天体はその半分の速度で遠ざかっている) があることを約650万光年彼方の銀河についてまで明らかにした (84)。

更に遠くの星まで観測を進め、1936年には2.4億光年離れたおおぐま座第二銀河団が秒速4.2万kmの速度で後退していることを明らかにした。その後退速度は光速の7分の1に達するものであった (85-180, 181p)。彼は前述のK項 (現在ではハッブル定数Hと呼ばれている) を530km/sec:Mpcと算出した (84)。これは1メガパーセク (約326万光年) あたりの後退速度を秒速で表したものである。

このように遠い星・遠い銀河ほど速い速度で運動していることを、時間を逆に遡って考えると、最終的には、かつて星・銀河は一か所に集まっていたということになる。その時間はハッブル時間と呼ばれており、それ

はハッブル定数の逆数である。

ハッブル定数の単位は距離/時間・距離であり、それは時間の逆数である。ハッブル定数が530であれば、ハッブル時間はおよそ18億年となる。この推定された宇宙年齢には、当時、放射性同位体を用いた岩石の年代測定から推測されていた地球の年齢30億年以上よりも宇宙の年齢が若くなってしまうという大きな問題があった (19-161p)。

その後、ハッブルが推測した銀河までの距離の推定は過小評価であったことが明らかにされた。それは、当時は変光星には明るさと変光周期の関係が異なる2種類のタイプがあることが分かっていたためである (183頁8.15参照)。更に観測精度も上がりハッブル定数は時代とともに変わり、1960年代には100km/sec:Mpcとなった。最近ではハッブル宇宙望遠鏡などの最新の観測機器によりその値は 70.5 ± 1.3 km/sec:Mpcとなっている (86, 87)。現在のハッブル定数から求めた宇宙年齢は138億年となる。ハッブル時間と宇宙の年齢は宇宙の膨張速度に加速も減速も起こらない場合に同じとなる。現在では、宇宙の膨張速度は必ずしも一定でないことが分かっている (188頁9.7参照)。しかし、膨張速度を一定としたハッブル定数から得られるハッブル時間の138億年は、現在多くの観測や理論から考えられている宇宙年齢137億年とほぼ同じである (87)。

8.13 膨張宇宙論

8.13.1 アインシュタイン方程式：ニュートン力学では水星の公転軌道が完全には説明出来ず、水星の内側にもう一つ未知の惑星があるという説を生み出していた。ところがアインシュタインの一般相対性理論に従うと、太陽の重力により水星の軌道近くの時空は歪む可能性が指摘された。そのことを考慮すれば水星の公転軌道が説明出来ることが分かった。そこで、アインシュタインの理論を宇宙に適用し、その方程式を解くことが重要となった。

カール・シュヴァルツシルト (1873～1916) ⁸⁶ は、①天体の質量を中心に限定しそれ以外には質量は存在しない、②空間は中心から球対称に存在するという単純な仮定のもとにアインシュタイン方程式の解を得た。1922年にはアレクサンドル・フリードマン (1888～1925) が平均すれば宇宙には特別な場所はなく (一様)、特別な方向もない (等方) という仮定を行い、空間の曲がり具合を表す曲率と空間の伸び縮みを表す要素を取り入れて宇宙についてその方程式を解いた。それによると宇宙は

⁸⁶ 彼はまた、銀河の中心の小さな空間に巨大な質量が存在すると、そこからは光さえ外に出られない状態がありうると、ブラックホールの存在につながる指摘をしたと言われている (35-179p)。

曲率の違いにより、①単純に膨張を続ける、②膨張はやがて止まり重力により収縮してしまう、③膨張は次第にゆっくりとなるが収縮には至らないという三つの可能性が存在することが示された。即ち宇宙は不変ではなくダイナミックに変化していることが示唆された。彼はまた一つの試算として宇宙の年齢を100億年とした。しかし彼の論文は、発表当時はほとんど注目されなかった。

8.13.2 ド・ジッター宇宙：ウィレム・ド・ジッター (1872～1934) は1917年にアインシュタインが導入した宇宙項 (176頁8.9参照) が正となるような解を得、膨張する“ド・ジッター宇宙”を提唱した。更にジョルジュ・ルメートル (1894～1966) は特異点から始まる膨張宇宙説を1927年にベルギーの雑誌に発表した。この論文もほとんど無視された。しかし、ルメートルはエドウィン・ハッブルの発見を受けて、以前は自分の説を無視したアーサー・エディントンに手紙を書いた。エディントンは過去の自分の不明を恥じ、その論文の重要性に気づき1930年にそれを紹介した (60-238-243p, 69-12,13p, 76-375, 380p)。1931年には英訳の論文も発表された (88参照)。しかし、それを取り上げたエディントンでさえ膨張宇宙の時間軸を逆さに巻戻した世界の始めについては恐れを抱き「現在の自然の秩序に始まりがあるという概念については私にとってはいまわしいものに思われる」と結論した (76-394p)。彼は急激な膨張ではなく、ごく緩やかな膨張を美しいものとして選んだ (69-24, 25p)。それに対してルメートルは「もし、私たちが時をさかのぼるなら (中略) 宇宙の全エネルギーがいくつかの、あるいは単一の量子の中に詰め込まれているのを見るだろう。もし、この着想が正しければ、世界の始まりは時空の始まりの少し前に起こったはずだ。世界のこのような始まりは現在の自然の秩序からはるかにかけ離れているが、それはまったく矛盾したことはないと考えられる。 (中略) 最初の宇宙は単一の原子の形をとり、その原子の重さが宇宙の全質量であると想像出来る。」と反論した。彼は今日の恒星と銀河は、この始めの超原子から吹き飛ばされた破片から構成されていると推測した (76-395p, 89)。

アインシュタインはド・ジッターやルメートルとは面識があったが、彼らの説は受け入れなかった。エディントンは「アインシュタインの宇宙には物質はあるが運動はなく、ド・ジッターの宇宙には運動はあるが物質はない」とよく口にしていたと言う (76-229p, 230p)。

アインシュタインもド・ジッターも無名のルメートルの考えには耳を傾けなかった (76-378, 379p)。アインシュタインはフリードマンやルメートルが作り出した運動し続ける宇宙観を退け、不動の宇宙観を取り続けた。しかし彼は、1931年にハッブルをウィルソン天文台

に訪ね、しばらくして、「遠くの星雲の赤方偏移は、私の古い宇宙構造をハンマーでたたき割るように粉碎した」とハッブルが解き明かした膨張する宇宙像を受け入れた (76-389～392p)。

銀河の内部には強い重力が存在するために銀河内の膨張は微々たるもので、膨張宇宙とは銀河と銀河の間に広がる壮大なスケールの空間が膨張しているのである (69-15p)。

8.14 ビッグバンと元素の合成

8.14.1 宇宙に存在する元素：セシリア・ペイン＝ガポーシュキン (1900～1979) は1925年に星に含まれる元素は水素が圧倒的に多く、ヘリウムがその数百分の1で、その他の元素は僅かしか存在しないことを見出した。当時の天文学の大御所のヘンリー・ラッセルは水素が金属元素よりも100万倍も多く存在するという彼女の研究結果はありえないと述べ、論文の修正を迫ったといわれている (18-136p)。現在では天の川銀河は主に、水素 (重量比で約73%)、とヘリウム (約24%) で構成されていることが分かっている (171頁7.4参照)。

8.14.2 核融合による元素合成：1920年頃から水素の核融合からヘリウムが生まれることが考え始められ、1930年代後半には陽子—陽子連鎖反応あるいはCNOサイクルによって新たに元素が生じることが示され始めた (174頁8.5参照)。一体元素はいつ・どこで・どのようにして作られたかを明らかにすることが重要となった。特にCNOサイクルが働くためには原子番号6、質量数12の炭素の存在が不可欠である。一方、水素は原子番号1、質量数1、ヘリウムは原子番号2、質量数4である。原子番号3～5の元素が殆ど存在していない中で炭素がどのように合成されたかが問題となったのである (次頁8.14.6に詳述する)。

8.14.3 ビッグバンの提唱：1946年にジョージ・ガモフは、宇宙が小さな熱い火の玉として誕生したという考えを発表した。1948年には高温・高密度の初期宇宙で起きた核融合反応により現在の宇宙にある全ての元素が作られたという仮説を提唱した (18-162p, 90, 91)。しかし、彼の提唱した仮説に従うと、急速に膨張し温度が急減する初期宇宙の中で、全ての元素を作る条件が保たれる時間はせいぜい10分程度しかなく、その間に全ての元素が合成される可能性はないと考えられた (92-205p)。ガモフの提唱した元素合成のシナリオは受け入れられなかったが、彼のもう一つのアイデアの“火の玉宇宙”は後に“ビッグバン”として広く受け入れられるようになり、現在に至っている。

一方、フレッド・ホイル (1915～2001) はジョルジュ・ルメートルに始まる宇宙が特異的な単一の原子から爆発

的に生まれたという考え方を受け入れず、宇宙は膨張しているが、新たな銀河が生まれ続け、宇宙の本質は変化せず常に定常状態が保たれているという定常宇宙論を主張した。ビッグバンという言葉は、ホイルが宇宙が爆発によって生まれたという考え方は馬鹿げているという揶揄の意味を込めて1949年のイギリスBBCラジオ番組の中で使ったのが始めである。

8.14.4 恒星内元素合成：ホイルとレイモンド・リトルトン (1911～1995) は恒星の中心の温度は従来アーサー・エディントンらが考えていたようなもの (星の成分は星が回転しているために混ざり合い、太陽よりも大きな質量を持つ恒星の中心温度も太陽の中心温度、千数百万 K と同程度でそれ以上高くならない) ではなく、恒星の中心では中心核の核燃料を次々使い果たすにつれて、恒星の組成がどんどん不均一になり、恒星の中心は高密度で高温となりうることを1940年までに明らかにしていた。(92-183-189, 205p)。そのような条件下では多くのプラスの電荷をもった原子核同士が電気的な反発力によって近づくことが可能となると考えられた。

8.14.5 星の種族と成分元素：星の色と明るさの研究は19世紀後半から始まり活発になっていった (172頁8.2参照)。1930年代後半から、恒星には様々な種類があることが明らかにされてきた。1944年にウォルター・バーデ (1893～1960) は星が二つの種族に大きく分けられることを見出した (29-278p)。1950年代に入るとこれらの二つの種族Ⅰと種族Ⅱの特徴が明らかにされ、元素の合成と宇宙の膨張 (次頁8.15参照) について新たな視点が加えられた。種族Ⅰは青っぽい若い星で、重い金属元素 (原子番号の大きい元素) を多く含んでおり、種族Ⅱの星は赤みがかった年老いた星で重い金属元素が少ないことが明らかにされた (93, 94)。その結果、第一世代の年老いた星には少ない重い元素がどこで作られ、その重い元素を若い第二世代以降の星がどのようにして持つようになったかを明らかにすることが重要となった (91-205-207p)。

8.14.6 炭素の合成：原子番号6の炭素以降の重元素がどのように作られたかを解明することが焦眉の問題であった。 $\frac{4}{2}$ ヘリウム二つから $\frac{8}{4}$ ベリリウムが生成されても、それは極めて不安定ですぐ壊れてしまうためにその先に反応が進むことはないと考えられていた。しかし、1952年にエドウィン・サルピーター (1924～2008) は、赤色巨星の中心核では、そのような寿命の短い不安定なベリリウムでも三番目のヘリウム核が衝突することで $\frac{12}{6}$ 炭素が、さらに $\frac{16}{8}$ 酸素や $\frac{20}{10}$ ネオンが生成される可能性

を示した (95)。

フレッド・ホイルはサルピーターの結果を受けて、不安定なベリリウムとヘリウムが衝突し炭素が生ずるといふそれまでは知られていない特殊な状態が存在する予想し、1953年にその考えをウィリー・ファウラー (1911～1995) に話した。ファウラーは1950年代初頭までに太陽のエネルギー源は主に陽子—陽子連鎖反応であって、CNOサイクルではないことを、原子核加速装置を用いて明らかにするなど多くの成果を上げていた。ファウラーはその装置を用い、ホイルの考えた特殊な状態が存在することをまもなく実験的に確かめた (92-149, 151, 207-220p)。即ち三つのヘリウムの原子核が次々にぶつかることによって炭素の原子核が合成されることが示された。これは現在トリプル・アルファ反応と呼ばれている。

8.14.7 中性子捕獲：一方、ポール・メルリ (1887～1961) は1952年に赤色巨星の中に $_{43}$ テクネチウムという珍しい元素のスペクトルを見出した。テクネチウムは極めて不安定な放射性元素で、もっとも寿命の長い同位体 (171頁7.3参照) の半減期⁸⁷は420万年である。地球は46億年前に星屑が集まって出来たものであり、その時にテクネチウムがあったとしてもそれは殆ど全て崩壊してなくなっており、地球には天然のテクネチウムは存在しない。赤色巨星は通常地球よりも年老いた星であり、そこにテクネチウムが存在するということはその星で新たにテクネチウムが作られているはずであるとアルステア・キャメロン (1925～2005) は考えた。テクネチウムは原子番号43であり、最も安定した原子核を持つ原子番号26の鉄より多くの陽子を持っており核融合によって合成されるとは考えられなかった (171頁7.3参照)。

中性子は電荷を持たないために原子核に比較的蓄積されやすい。中性子が核に付加された後に、ベータ崩壊 {中性子が電子 (ベータ粒子) とニュートリノを放出して陽子に変換される} が起こると、陽子が増え新たな元素が合成されることになる。そのような経路はカール・フォン・ヴァイツェッカーらにより1930年代後半から考えられていた。しかし自由中性子は寿命が短くその供給源を明らかにする必要がある。キャメロンはその供給源を提唱した (96, 92-222-226p)。この過程はゆっくり起こることからslow process (s過程) と呼ばれている。

s過程では中性子が捕獲され次に中性子が捕獲されるまでに長い時間があり、その間に中性子はベータ崩壊を起こしている。しかしその過程では $^{232}_{90}$ トリウムや $^{238}_{92}$ ウランのように中性子に富んだ元素を合成することは出

⁸⁷ 放射性元素は崩壊し続ける。元のものが半分減るまでの時間が半減期である。

来ない (92-229, 230p)。そこでフレッド・ホイルらは超新星爆発の際に速やかな中性子の捕獲が起こる可能性があると考えた。1937年に爆発した超新星IC4812の明るさの変化をウォルター・バーデが詳細に記録していた⁸⁸。それによると明るさは約55日毎に半分となっていた。ホイルらはこの明るさの変化は、超新星爆発の際に中性子の速やかな捕獲 (rapid process, r過程) により生成された放射性元素が崩壊することによって考えた⁸⁹ (92-231, 232p)。即ちこのように中性子の捕獲過程には大きく異なる二つの経路があることが分かった。

8.14.8 恒星内元素合成のまとめ：恒星における元素合成の研究を進めていたホイルは1957年にその研究の集大成をマーガレット・バービッジ (1919～)、ジェフリー・バービッジ (1925～2010) 夫妻とウィリー・ファウラーとともにまとめた (97)。これは、恒星内での元素合成を網羅的にまとめた歴史に残る論文で、B²FH論文と呼ばれている。

そこで明らかにされたことを含め恒星内での元素合成の8つの過程を以下にまとめる (97, 98)。^①水素燃焼：陽子—陽子連鎖反応 (174頁脚注71参照)、CNOサイクル (174頁脚注72参照)。^②ヘリウム燃焼：トリプルアルファ反応 (前頁8.14.6参照)。^③アルファ反応：⁴ヘリウムの原子核 (アルファ粒子) の整数倍である原子番号22以下の元素 (¹⁶酸素、²⁰ネオン、²⁴マグネシウム、²⁸ケイ素、³²イオウ、³⁶アルゴン、⁴⁰カルシウム、⁴⁴チタン) はアルファ粒子の捕獲によって合成されうる⁹⁰。^④e過程：太陽質量の10～20倍の質量を持つ恒星の中心部の温度は27億K以上の超高温となり、そこでは最も安定した原子核を持つ鉄までの元素が核融合により合成される (175頁8.6.2.4参照)。^⑤s過程：ゆっくりした中性子の捕獲に引き続くベータ崩壊で原子番号83までの重元素が生成される。太陽系を構成する重い元素の約半分は巨星の内部で起きたs過程で作られたとも言われているが、最終的な結論を得るためには更なる研究が必要である。^⑥r過程：中性子が捕獲された後にベータ崩壊する間もなく、多くの中性子が捕獲されて中性子を多く含む元素が合成され、その後捕獲された中性子がベータ崩壊を起こし原子番号の大きな元素が合成される。中性子の密度が高い条件は、大質量の恒星の末期に恒星核が重力崩壊を起こす超新星爆発の時にもたらされると考えられている。^⑦

p過程：陽子に富む原子核の合成過程として提唱された。現在では、ガンマ線が原子核に当たって中性子や陽子のはじき出される光崩壊過程あるいはガンマ過程と呼ばれる反応によって新たな元素が生成される過程とrp過程 (中性子星の連星系で降着の起きている片方の星のような特殊な条件下で陽子が捕獲され鉄以降の原子番号52のテルルまで合成される) があることが分かっている (99)。^⑧x過程：高エネルギーの宇宙線が核に衝突することで、陽子や中性子のはじき出されて²重水素・リチウム・ベリリウム・ホウ素が合成されることが論じられた (100)。その後、ベリリウムとホウ素はこのような過程でも生成されることが明らかにされた。重水素・リチウム⁹¹・ベリリウムはビッグバンの時にも生成されたこと、またビッグバンでは主に水素とヘリウムが合成されたことが現在では明らかにされている。しかし、ホウ素については分からないことが多い (92-243-245p, 98)。

このようにフレッド・ホイルらにより恒星内で様々な元素が合成されることが明らかにされた。ホイルはビッグバンから始まる宇宙観を否定していた。ジョージ・ガモフによるビッグバンが再び取り上げられ、実証されるのは1964年の宇宙マイクロ波背景放射の発見 (次頁9.2参照) を待たねばならなかった。その一大発見の前に、恒星が2種類に大別されるという知見から、宇宙の大きさに関する旧来の概念が打ち破られ、膨張宇宙論が確かなものとされていった。

8.15 変光星の新たな分類：エドウィン・ハッブルはハーロー・シャプレーが見つけた変光星の変光周期と星の明るさの関係からアンドロメダ星雲までの距離を100万年と見積もり、様々な距離の星の赤方偏移と合わせて宇宙が膨張し続けていることを明らかにした。しかし、それらの星の後退速度から見積もった宇宙の年齢は地球の年齢よりも短くなってしまうことが大きな問題であった (180頁8.12.2参照)。

ウォルター・バーデは星には二つの種族があることを見つけたが (前頁8.14.5参照)、彼は1952年には変光星にも二つの種族があることを見出した。種族Ⅱの変光星の明るさは同じ変光周期を持つ種族Ⅰの変光星に比べて1.5等級ほど暗いことが明らかにされた。ハッブルが用いたシャプレーの関係は、種族Ⅱのこの座RP型の変光星を用いて求められたものであった。一方、ハッブルが

⁸⁸ ウォルター・バーデとフリッツ・ツビッキー (1898～1974) が1931年に初めて超新星という言葉を使った。

⁸⁹ その後の研究で実際には半減期の異なる三つの元素が関係していた事が明らかにされた (92-251, 252p)。

⁹⁰ 以下の多くの燃焼反応も含まれる。 $^{12}_6\text{炭素} + ^{12}_6\text{炭素} \rightarrow ^{20}_{10}\text{ネオン} + ^4_2\text{ヘリウム}$ などの炭素燃焼反応。 $^{16}_8\text{酸素} + ^{16}_8\text{酸素} \rightarrow ^{28}_{14}\text{ケイ素} + ^4_2\text{ヘリウム}$ などの酸素燃焼反応。 $^{20}_{10}\text{ネオン} + ^{20}_{10}\text{ネオン} \rightarrow ^{16}_8\text{酸素} + ^{24}_{12}\text{マグネシウム}$ などのネオン燃焼反応。 $^{28}_{14}\text{ケイ素} + ^4_2\text{ヘリウム} \rightarrow ^{32}_{16}\text{イオウ}$ などのケイ素燃焼反応 (98)。

⁹¹ リチウムがビッグバンで合成されたことは確かであるが、その他の可能性についても検討が続いている (101)。

アンドロメダ星雲までの距離を推定した変光星は明るい種族Ⅰであり、彼は明るいタイプの星を暗いタイプの星の関係に当てはめてしまったのであった。星が1.5等級違うということは、明るさが4倍違うということである。明るさは距離の二乗に比例する。つまりハッブルは星の本来の明るさを実際の1/4に見積もったため、ハッブルの距離の見積もりは実際の半分となってしまった。この誤りを考慮した結果、アンドロメダ銀河までの距離は200万光年と訂正され、ハッブル定数も小さくなった。それにつれて宇宙年齢も古くなり、地球の年齢との矛盾は解消され、膨張宇宙論の支持が広がっていった。その後のハッブル定数の測定値については180頁8.12.2で触れた。

8.16 まとめ：定常宇宙を提唱するフレッド・ホイルらにより、①恒星の内部あるいは恒星が爆発する時に元素が合成されること、②星の死によりまき散らされた星屑から次の世代の星が作られること、③古い世代の星は水素やヘリウムに富んでいること、④第二世代以降の星には重い金属元素も含まれていることが明らかにされた。例えば、太陽では水素の核融合によりヘリウムが作られているが、100億年経つと中心部の水素は消費尽くされ、次にヘリウムから炭素や酸素が核融合により作られ、その段階で元素の合成は終わるとされている。太陽に存在する元素は質量比で水素が70.7%、ヘリウムが27.4%でそれらが主成分であるが、太陽にはフラウンホーファー線が示すように²⁶鉄・²⁹銅・³⁰亜鉛・⁹²ウランなど地球に存在する多くの元素が存在している。太陽に存在する多種類の元素の殆どは前世代の星で作られたものから成り立っている。地球も我々も同様に星屑から出来ているのである。地球の生命は、宇宙でつくられた元素を材料として宇宙空間あるいは地球で合成された有機物から生まれたと考えられている。このことについては次回まとめる。

9. 1960年代以降の宇宙観

9.1 ビッグバン後の宇宙マイクロ背景放射の予言：ジョージ・ガモフは“ビッグバン”を考えていた。ラルフ・アルファ（1921～2007）とロバート・ハーマン（1914～1997）はガモフとともに“ビッグバン”が起きていたとしたら、火の玉の爆発による熱放射が宇宙の膨張と

もに冷え、およそ30万年後にその温度は3,000Kとなり、自由電子が原子核に捉えられ、光子は自由電子に遮られず長距離を進めるようになると考えた。それは今では宇宙の晴れ上がりと言われている状態であるが、その時に発せられた光が波長1mmの宇宙マイクロ波（赤外線と電波の中間の電磁波）として観測されるはずであると彼らは予言した。また、彼らはその宇宙マイクロ波は宇宙を長い間旅するうちに5～10Kの温度の輻射となると計算していた。（69-78-82p, 91, 102）。しかし、彼らの説を信じる人は多くなかった。

9.2 ビッグバンを支持する宇宙マイクロ背景放射の発見：宇宙からやってくる電波の測定は1930年から始められていたが（本頁脚注92参照）、宇宙から届く電波は目には見えず微弱で研究の進展は遅かった。ところがこの分野の技術は戦争には重要であったため、戦時中に開発が進み、次第に活発となっていった。1946年以降いくつかのグループが宇宙マイクロ波背景放射の研究・観測を始めていた。またビッグバンがあったとすると理論的には熱放射の温度は3Kであるという予言もなされた（35-288-291p）。

米国のプリンストン大学のロバート・ディッケ（1916～1997）はそのような研究者の代表格でマイクロ波観測のためのレーダ装置の改良を行っていた。また、ジム・ピーブルズ（1935～）はディッケのもとで宇宙の元素の質量のおよそ25%を占めるヘリウムはビッグバンにより生成されたことと現在の宇宙の温度の関係について理論的に明らかにしていた。それは大量に存在するヘリウムが全て恒星の内部で合成されることはありえないという当時の謎に対する答えでもあった（103, 104-74p）。ピーブルズはガモフらと同じようにビッグバン後の輻射は10Kの温度の天体から放たれたものになると改めて予想した。そのような極低温から出される輻射の信号を様々な電波源のノイズから区別するためには工夫が必要であった。そこで彼らは人工電波源を液体ヘリウム温度（4K）に冷やしたもの（コールドロード）をつくり、それを比較の対象とする方法を開発した。

一方、プリンストン大学から50kmほど離れたベル研究所⁹²では人工衛星から反射してくる微弱な信号を拾うことで通信衛星を開発する研究が行われていた。アーノ・ペンジアス（1933～）とロバート・ウィルソン（1936～）は敏感な受信装置とアンテナを組み合わせ、雑音を排

⁹² ベル研究所は電話会社の研究所であるが、特にカール・ジャンスキー（1905～1950）を創始者とする電波天文学の分野で大きな貢献をしている。彼は1930年には宇宙からやってくる電波に目を向けた。しかし彼は時代の先を行き過ぎており、大恐慌時代に彼の電波天文学はとん挫せざるを得なかった。しかし電波天文学は、その後宇宙マイクロ波背景放射・電波銀河（次頁9.3参照）の発見等で、天文学に新たな展開を生み出した（69-153-160p）。

除することを試みていた。そのために彼らは、アンテナのホーンに住み着いた鳩を捕まえ遠くに運んだ後に放すことで鳩を追いかたり⁹³、鳩の糞⁹⁴を取り除くなどあらゆる工夫をしたりしていた。しかし、宇宙の至る所からやってくる微弱な雑音に悩まされ続けた。彼らも独自にコールドロードの開発もしていた。そのような工夫をした1964年の測定でも、絶対零度から僅かに高い3.5Kの物体から発せられると考えられる電磁波の信号が観測された。彼らは、それは50km離れた大都会ニューヨークからのものではないかと考えた。しかし、アンテナをニューヨークに向けてもその信号は強くなり、アンテナをどの方向に向けてもその信号は同じ強度で観測された。1965年にペンジアスは著名な電波天文学者に別の用件で電話をしたおりに、いらだたしい信号がどうしてもなくなることを話した。その時に彼はディッケらの研究のことを知らされた。そこで、ペンジアスは早速ディッケに電話をした。ディッケは話を聞くと、たちどころに彼らが観測したものの意味を理解した。即ち、それがラルフ・アルファーらの予測したビッグバンの後の宇宙の晴れ上がりの時に発せられた輻射であることを。

ディッケらは電話をもらった翌日にベル研究所を訪れた。彼らはペンジアスらの観測の意味を理解したが、ペンジアスらは宇宙論についてはあまり考えたこともなくジョージ・ガモフの研究も知らず、それがビッグバンからやってきたものだとなつてくるまでに1年程の時間がかかった。二つのグループは1965年にそれぞれの成果を同じ雑誌の相前後する頁に発表した (104-84~110p, 105, 106)。

ペンジアスらにより測定された電磁波は4,080メガサイクル/秒、即ち波長7.35cmの電磁波だけであった。ジム・ピーブルズはその一点だけのデータから3Kの黒体から放射される特有のこぶを持つ電磁波の曲線を大胆に描いた。一点だけのデータから電磁波の全体の曲線を描くような推論には多くの理解は得られなかった。しかしその後、別の波長の観測がなされ、それが3Kの黒体からの放射であることが裏付けられていった。1966年当時観測された空の全方向からの信号の違いは0.1%未満で、極めて均一であることも示された (104-121~127p)。

1989年にはNASAが宇宙背景放射探査衛星 (COBE) を打ち上げ、その成果が1992年に発表された。それは①背景放射の電磁波のピークは波長1.9mmにあること、②

そのスペクトルは平均温度2.73Kの黒体の示すものと一致していること、③全体の温度の揺らぎは僅かに10万分1と極めて小さいこと、④しかし確実に揺らぎがあるということなどであった (87, 107)。更に2001年には、その後継機のウィルキンソン・マイクロ波異方性探査機 (WMAP) が打ち上げられ詳細な観測が行われた。その結果、ビッグバンに始まる宇宙像が裏付けられ、多くの重要な情報が得られた (108) (187頁9.5参照)。

9.3 定常宇宙論の終焉：宇宙マイクロ背景放射の発見の他にもホイルらの主張する定常宇宙論を反駁する証拠が示された。定常宇宙論では、膨張する宇宙では新たな銀河が生まれ続け、宇宙における銀河の密度は一定となる。一方、ビッグバンに始まる宇宙像では昔の銀河は今の宇宙より密に詰まっているはずであった。しかし、そのようなことを区別する測定は容易ではなかった。1950年代に始まった電波望遠鏡による観測がその区別を可能にした。マーティン・ライル (1918~1984) らは、ビッグバン宇宙から予想されるように遠くて暗い銀河⁹⁵を多数見つけ、それをケンブリッジ大学の1C (1950年)、2C (1955年) という電波を出す天体のカタログとして発表した。しかし彼らが見出したものは新たな装置による人工的な信号による幻に違いないと言う反対論もあった (35-287p)。

そこで彼らは1965年に反駁の余地のない証拠とともに、遠くに暗い多くの電波銀河が存在することを4Cとして発表した。電波望遠鏡で観測可能な電波銀河は、概ね平均的な銀河よりも出来てからまもない銀河であると考えられている。定常宇宙論では、銀河は次々に生まれ宇宙に均一に分布していることになる。一方、ビッグバンモデルは出来たての銀河が存在したのはごく初期の宇宙だけで、それは遙か彼方だけにあることになる。出来たての銀河が遙か遠くの宇宙初期に主に存在するという彼らの観測結果は、多くの天文学者に受け入れられた (35-287p, 69-168, 169p)。

このライルの結果は、1960年代にライルとフレッド・ホイルの間で行われていた論争でホイルに大きなダメージを与えた。しかし、ホイルの定常宇宙論を完全にノックアウトしたのは続いて発表された宇宙背景放射の観測 (前述した) であったと言われている (104-103, 104p)。

9.4 ビッグバン宇宙像：ビッグバン宇宙について多少紹介したが、改めて現在考えられているビッグバン宇宙

⁹³ 50km離れた所で放したが、帰巢本能で戻ってきてしまい、殺さざるを得なかった (69-183p)。

⁹⁴ 糞も雑音を出す可能性が考えられた。

⁹⁵ 当初ライルは、電波源は星であると考えたが、実際は銀河であることが分かった。そのことを指摘したトマス・ゴールド (1920~2004) はホイルと共に定常宇宙論を主張していた。ライルは、ゴールドへの復讐の気持ちもあり、定常宇宙論を論破すべくその後の研究に取り組んだと言われている (69-166~168p)。

像を理論的な考察に従ってまとめておきたい（以下の記述は煩雑なので部分的に断定的にしてあるが、宇宙の晴れ上がり以前の姿は観測することは出来ず、未確定な点を含んでいる）。

9.4.1 宇宙創成直後：宇宙が生まれた直後の大きさは 10^{-35} m程で、それは原子核1個の大きさであるおよそ 10^{-15} mよりも圧倒的に小さく素人には想像出来ない世界である。宇宙誕生後 10^{-43} 秒後には温度が 10^{32} Kの超高温であったと言われている。

現在の世界は4つの力により支配されている。それは重力・電磁気力・強い力⁹⁶（原子核の大きさまでに働く力で核子（陽子・中性子）を結合している力）・弱い力（素粒子を結びつけている力）である。重力と電磁気力は無限遠まで作用するがそれは距離の二乗に反比例して弱くなる。強い力、弱い力の及ぶ範囲はそれぞれ 10^{-15} m、 10^{-18} mほどである。それぞれのおよその強さは重力を1とすると電磁気力、強い力、弱い力はそれぞれ $\sim 10^{36}$ 、 $\sim 10^{40}$ 、 $\sim 10^{15}$ と見積もられている（60-284p）。宇宙が始まった時にはこれらの四つの力の一つであり、それが時とともに分離したと考えられている。宇宙誕生後 10^{-43} 秒後に先ず重力が分離したと言われている（109）。

9.4.2 インフレーション：宇宙誕生後 10^{-36} 秒後～ 10^{-34} 秒後にはインフレーションが起こったとされている。それは光の速度よりも速い速度で宇宙が 10^{43} 倍になるというとても膨張（インフレーション）であったと計算されている（110-158p）。その時の温度は 10^{27} K程であったと言われている。このインフレーションという考え方は佐藤勝彦（1945～）とアラン・グース（1945～）により1981年に発表された（110-170～173p, 111, 112）。

9.4.3 四つの力の分離・陽子と中性子の誕生：インフレーションの時に強い力が分離され、 10^{-12} 秒後頃に電磁気力と弱い力が最後に分離し、現在の世界へと至る道が始まった。その頃の温度はまだ 10^{15} Kの超高温の世界であった。宇宙誕生後 10^{-6} 秒後になると温度は 10^{13} Kに低下し、粒子が衝突するエネルギーも1G（ギガ）eVと宇宙誕生後 10^{-43} 秒後の 10^{-19} 程になりクォーク⁹⁷は単独では存在出来なくなり、陽子や中性子が構成された。しかし、温度はまだ十分高く陽子や中性子は原子核を構成することはなかった。

9.4.4 原子核の誕生：宇宙誕生の約4秒後に物質と反物質の衝突で反物質が消滅し、物質だけが残った（次頁

9.4.7の④参照）。100秒～数分後に温度は 10^9 K位まで低下し核融合反応が始まり、 $\frac{4}{2}$ ヘリウムと僅かの $\frac{7}{3}$ リチウム、 $\frac{7}{4}$ ベリリウムが合成された。宇宙の温度が4,000K以上では水素はほぼ100%電離しており水素は陽子として存在し、宇宙空間は自由電子で満ち溢れていた。

ビッグバンの時につくられた陽子と中性子の数は7:1であったと考えられている。陽子14個と、中性子2個からは、 $\frac{1}{1}$ 水素の原子核（陽子）が12個と $\frac{4}{2}$ ヘリウムの原子核が1個作られる。その結果、水素とヘリウムの原子数の比は12:1、水素とヘリウムの重量比は3:1となる。これは現在の宇宙における両者の比とほぼ同じである。このことも、ビッグバンで宇宙が始まり、その時にこれらの元素がつくられたことを理論的に支持している（92-243p）。

9.4.5 宇宙の晴れ上がり：宇宙の温度が3,000K以下となると、水素の原子核は自由電子を捉え水素の電離度は0となり中性の水素原子が形成された。それは宇宙誕生後38万年頃であった。空間に自由電子が充満しているとそれが光子と反応し、光は長い距離を進むことが出来ない。しかし、相互作用する自由電子が少なくなると光子は長い距離を進むことが出来るようになった。これが宇宙の晴れ上がりと呼ばれる状況で、その時の残照が宇宙マイクロ波背景放射として現在観測されている。

9.4.6 星・銀河の誕生とその後：宇宙誕生後1～2億年経つと最初の星が生まれ、暫くすると銀河も形成され始めたと推測されている（60-251p）。宇宙誕生から、2億年後（113）4.8億年後（114）に生まれた銀河⁹⁸、10億年後の銀河団が見つかった（117）。天の川銀河から遠く離れた星や銀河はその赤方偏移からその天体が地球からどのくらい離れているか、即ちその光が今から何年前に発せられたものであるかを計算しその誕生の時期が推定されている。一方天の川銀河の中の星はそんなことがないのでそこに存在する放射性同位元素などの存在比⁹⁹からその星が生まれた時期を推定している。現在のところ天の川銀河の最も古いとされている星はHE 1523-0901でおよそ132億年前に出来たと推定されている（118）。

宇宙は誕生以来膨張を続けていたが、80億年ぐらいたつと宇宙の膨張速度に変化が生じ、加速し始めたことが最近の研究で明らかにされている（18-172p, 110-232p）（188頁9.7参照）。

⁹⁶ 核融合は原子核が近づいたときに強い力が働くために起こる。

⁹⁷ 陽子を構成する素粒子。

⁹⁸ 次々に宇宙誕生後の天体に関する新たな発見がなされている。最近ではビッグバン後2億年頃に形成されたと推定される別の銀河も見つかっており（115）、今後の研究により星や銀河の誕生が何時まで遡れるようになるかは分からない（116）。

⁹⁹ 半減期140億年の 232 トリウムや44.7億年の 238 ウランの放射性同位元素とその崩壊産物の存在比などを測定する。

これが、現在我々が抱えている宇宙の誕生・進化の概略である。以下にインフレーション・膨張宇宙の実態（現代的なフリードマン方程式の解）・星の進化の姿（白色矮星・超新星等々）・太陽系の姿をまとめる。

9.4.7 インフレーション理論が解いた宇宙の謎：1981年に提唱されたインフレーション理論（宇宙誕生後に起こった急速な膨張）は、ビッグバン宇宙像が抱える以下の幾つかの問題に解答を与えた。

①なぜ宇宙は熱い火の玉から始まったのか？ 空間には斥力として働く真空のエネルギーがあり、そのエネルギー密度は一定である。急速に膨張した宇宙では体積が増えた分だけ真空のエネルギーが増大し、急激な膨張が終わると、増大したそのエネルギーが潜熱として開放される。そのように生じた熱エネルギーが宇宙を高温・高密度の火の玉としたと考えられている（18-68p, 110-196-198p）。即ちインフレーション理論の主要な点は真空のエネルギーを強調したことである。②なぜ宇宙マイクロ波背景放射は全天で極めて一様に近い温度分布を示す（地平線問題¹⁰⁰）一方、宇宙には不均一な大規模構造が生じたのか？宇宙には銀河が数千集まった銀河群・銀河団があり、更にそれらが集まって超銀河団を形成している。その超銀河団はグレートウォールあるいは銀河フィラメントと呼ばれる巨大な壁を作るように分布しているが、その巨大な壁と壁の間には直径1億光年を超える光を発する天体がほとんど無いボイドと呼ばれる広大な領域がある。宇宙の大規模構造とは銀河フィラメントとボイドが複雑に入り組んだ構造である。即ち、宇宙の大規模構造は極めて不均一である。この謎はインフレーション理論により以下のように解かれている。例えば現在200億光年以上離れた二つの領域に強い類似性がある（宇宙マイクロ波背景放射の観測結果）のは、インフレーションが起こる以前に二つの領域は大変接近しており、相互に混ざり合うことが出来たためによく似たものとなった結果と考えられる。しかし、その後のインフレーションの激しい膨張により二つの領域は遠く引き離され、それ以降は関係を持つことが難しくなり、インフレーションの前に僅かに存在した揺らぎがインフレーション後に残ったと考えられる¹⁰¹（宇宙マイクロ波背景放射の観測は全天で10万分の1の揺らぎがあることを明らかにした）。そのような揺らぎには質量の多い所も含まれていたと考

えられる。質量の多いところには重力により次第に物質が集まり不均一性は拡大し、その不均一性は時間とともに増幅され、銀河団が構成されたと考えられる。一方で、質量の少なかった所はボイドとなり、宇宙の不均一な大規模構造が生み出されたとされている（18-166~168p, 69-236-237p, 110-194p）。③アインシュタインの一般相対性理論によれば、空間は平坦（曲率0）か内側に丸まっている（曲率正）かあるいは外側に広がっている（曲率負）かのいずれかであるが（60-242p）、宇宙はなぜ平坦に見えるのか（平坦性問題）？それは宇宙全体では曲率は正かもしれないし負かもしれないが、インフレーションで瞬時に大きくなった宇宙の中で我々が住んでいる範囲はその極く一部であり、見かけ上平坦に見えても不思議ではないと考えられている（110-194p）。④なぜ宇宙には粒子からなる物質だけが存在して反物質が存在しないのか？粒子と反粒子が衝突すると光となる対消滅が起こる。現在の宇宙に物質が存在するのは、最初の粒子と反粒子の個数に差があった、あるいは粒子と反粒子が出会わないようにそれが存在する領域がインフレーションにより極度に分離されたという二つの可能性が考えられているが、これについてはまだよく分かっていない（18-167p, 110-196p）。

9.4.8 ビッグバンとは：ビッグバンについて強調しておきたいことは、それは空間の中で何かが爆発したのではなく、空間が爆発したということである。同様に、ビッグバンは時間の中で何かが爆発したのではなく、時間が爆発したのである。空間と時間はどちらも、ビッグバンの瞬間に作られた（69-231p）。宇宙の誕生後 10^{-36} 秒後から短い間に起きた急速な空間の膨張であるインフレーションによりかなり大きな広がりを持った火の玉の宇宙が出来たと考えられている。

ビッグバンは宇宙誕生後の急速な膨張を表す言葉で、宇宙誕生の瞬間そのものだけを指すものではない。

9.5 フリードマン方程式の解：現在の宇宙の構成要素を表すフリードマン方程式は物質・放射・曲率・宇宙項の要素を足し合わせると1となるとされている。曲率は、宇宙はほぼ平坦であり0に近いと考えられている。また放射の密度は1に対して 4.7×10^{-5} 程度と見積もられておりこれもほとんど無視出来る。宇宙の重要な構成要素は物質と宇宙項ということになる。WMAP(184頁9.2参照)

¹⁰⁰ 地平線問題とは情報が光速より速くは伝わらないという前提から生じる問題である。地平線は光速と宇宙年齢から得られる距離である。地平線の彼方の遠く隔たっている宇宙空間の二つの領域は因果律的に関わりを持ち得ないはずである。しかし、宇宙が晴れ上がった時に地平線の彼方の世界が一様に見えるのはなぜかということが問題であった。ちなみに宇宙の晴れ上がりの時の地平線は現在の地平線の約1/3000で、それは現在の天球上の2度角に対応すると言われている（18-166p）。

¹⁰¹ ある広がりを持った領域が平均的に均一であっても、微細な領域同士をある瞬間に比べれば、僅かの違いはどんな場合にも見られる。このようなものが揺らぎである。

の7年間の観測等から、現在では物質が約27% {我々に馴染みのある質量をもつ物質（バリオン）が4.56%、正体不明であるが質量を持っているダークマターが22.7%}と宇宙項に当たるダークエネルギーが72.8%で宇宙が成り立っていることが推定されている（87）。

9.6 ダークマター

9.6.1 ミッシングマス：フリッツ・ツビッキーは1930年代に宇宙空間に存在する全ての物質の質量を網羅的に明らかにしようとした。1933年に地球に近い髪座銀河団の質量とその銀河団に属する銀河の速度を調べたところ、銀河が互いにひきつけ合う重力は星の明るさから求めた質量をはるかに超えていることを見出した（35-299p）。それは見ることが出来ない質量を持った物質が存在するためだと考えられ“ミッシングマス”の問題として捉えられた。その後、天の川銀河¹⁰²やその他の銀河で星があまりない外側の星の回転速度は、星が多くある内側の星の回転速度とほぼ同じであるか逆に早くなっていることが1970年代以降に観測された。このことは一般の予測に反していた。一般の予測とは、例えば、太陽系の惑星の公転速度（括弧内に示した）は水星（47.4km/秒）、地球（29.8km/秒）、木星（13km/秒）、海王星（5.4km/秒）（17-79p）と外側の天体ほど公転速度が遅くなっていることである。このような予測に反するのは、上述した銀河の外側には目には見えない物質（ダークマター）があり、それが星の運動に影響を与えているためと考えられた。

9.6.2 重力レンズ：1979年に一つのクエーサー（190頁10.3.2参照）が二つの別々の所に観測された。それは地球とそのクエーサーの間に巨大な質量を持つ見えない物質があり、それが光を曲げるレンズの働きをするた

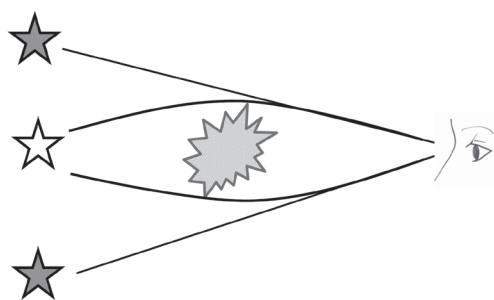


図12. 重力レンズ。本来の星（白色）の光は観測者と星の間にある目に見えないダークマター（図の中央に示してある）により曲げられる。その結果、観測者は二つの星（灰色）を観測することになる。

めであると推測された（120）。重力レンズは図12に示すような仕組みで作用すると考えられている。この観測もダークマターの存在を支持している。

また1980年代に高温のガスが飛び散らずに閉じ込められている銀河団の存在がx線による宇宙観測で初めて明らかにされた。このように高温のガスが散逸しないのもダークマターの重力によるものと考えられている。（35-301p, 60-263~275p）。

ダークマターとしては暗くて観測されていない星や小さなブラックホールあるいは暗い白色矮星（175頁8.6.2.3参照）や中性子星（190頁10.2参照）など幾つかの候補が考えられている。しかし、銀河の誕生など宇宙の進化に重要な働きをするダークマターの実態は謎に包まれており分からない。

9.7 ダークエネルギー：1998～99年にブライアン・シュミット（1967～）とアダム・リース（1969～）のグループとソール・パールマッター（1959～）のグループが、別々に様々な超新星Ia型（次頁10.1.1参照）について赤方偏移と明るさを観測した結果を発表した。超新星Ia型は、特殊な白色矮星の最期の姿である。その白色矮星は、白色矮星となれる上限の質量 {チャンドラセガール限界（175頁8.6.2.3参照）} に近く連星系を構成している。白色矮星はその連星からガスをどんどん吸上げ、密度が大きくなった果てに核融合の暴発が起こり、大爆発を起こす。このように、その爆発の仕組みが決まっているために、超新星Ia型の明るさは絶対等級が -19.3^{103} （太陽光度の約50億倍）と一定の明るさとなると考えられている（121）。彼らはそのような超新星Ia型の距離（赤方偏移の測定から求める）と明るさを測定した。遠方の超新星Iaほど（最も遠いものは今から60億年前）その明るさは予想よりも暗く見えた。彼らは、それは宇宙の膨張が加速しているために暗く見えると考え、宇宙の加速膨張を唱えた（122, 123）。

その宇宙の加速膨張という考え方は、従来の宇宙像である宇宙は次第にゆっくり減速膨張へと移行しているというものとは反対であり、大きな反響を生んだ。

一方、遠くの星は宇宙塵などにより減光する可能性があり、そのために暗く見えたのであって、宇宙は加速膨張していないという批判がなされた。しかし、その後1997年に観測されたSN1977ffの超新星Ia型の詳しい分析結果が2001年に発表された（124）。その超新星Iaは100億年ほど前に爆発した極めて遠方にあるものだが、

¹⁰² 天の川銀河の外側の星の運動には大小マゼラン雲の影響があり、従来考えられていたダークマターの寄与の程度を見直す必要があるという報告もなされている（119）。

¹⁰³ 現在では極超新星という太陽の40倍以上の質量をもつ恒星が重力崩壊を起こす場合には通常の超新星爆発の数十倍のエネルギーを放出し、中には -22.7 等級となるものも見つかっている（71）。

それは逆に予想よりも明るく見えた。即ち、更に遠い星が予想より明るく見えたということは宇宙塵で暗くなっている可能性はないことを示していた。更にこの観測結果は新たな宇宙像を提供する重要なものであった。

その新たな宇宙像とは、ビックバン・インフレーション・宇宙の晴れ上がり続く現在までの膨張宇宙の膨張速度が一旦減速し (SN1977ffのような更に遠い星が予想より明るく見えたことから明らかとなった)、その後今から60億年ほど前から加速膨張へと変わっていったというもの (60億年前の超新星が予想より暗く見えたことが示している) である。また宇宙が加速膨張しているということは物質が重力により集まろうとする力に逆らうダークエネルギー¹⁰⁴が存在することを確認なもととした。ダークエネルギーの正体は謎である。

以下に星の進化の産物である幾つかな特徴的な天体と太陽系の姿についてまとめる。

10. いくつかの天体の特徴

10.1 超新星：既に超新星については幾つかのことを述べたがここでは超新星の分類についてまとめた後に、1987年に観察された超新星SN1987Aの観察から分かったことを記す。

10.1.1 超新星の分類：超新星はスペクトルに水素の吸収線が見られないⅠ型とそれが見られるⅡ型に分類されている。

Ⅰ型は太陽の質量の3倍以内の恒星¹⁰⁵が次第に赤色巨星となり、水素で出来た外層部が宇宙空間に放出されガス状の惑星状星雲を形成するとともに、残った中心核が高密度の白色矮星となった後の姿である。こうした白色矮星が連星系を組んでいたり、その周囲に星間物質が豊富にあったりする場合に爆発を起こし、中心核は跡形もなくなるのがⅠ型の超新星である。

Ⅰ型は更にスペクトルの特徴からケイ素の吸収線が見られるⅠa型、ヘリウムの吸収線が見られるⅠb型、両方とも見られないⅠc型に分類されている。Ⅰa型は前述したようにその爆発の仕組みも特定されている (前頁9.7参照)。

Ⅱ型超新星は以下に述べるようなSN1987Aのように太陽質量の数倍以上の恒星が、最期を遂げ、中性子星が残るものである。

太陽の約40倍以上の質量をもつ更に大きな星が重力

崩壊を起こし極超新星として爆発すると、ブラックホールが出来るかあるいはブラックホールも出来ず跡形もなく吹き飛んでしまうとされている。このような爆発が起こった時には γ 線バーストも放出されると考えられている。 γ 線バーストは1960年代末に見つかった数秒から数時間にわたって閃光のように放出される宇宙観測では最も光度の明るい物理現象である。しかし、 γ 線バーストは中性子どうしの衝突の可能性もあるなどその発生機構の詳細は不明である (35-280-283p, 71, 125)。

10.1.2 SN1987A：SN1987Aは1987年にイアン・シェルトン (1957～) らにより大マゼラン雲の中に発見された超新星Ⅱ型である。その場所は長年に亘って多くの観測がなされていた所で、地球から16.8万光年ほど離れたタランチュラ星雲の外縁部であった。そこにはサンデューク・マイナス69度202と呼ばれる太陽の20倍ほどの質量を持つ並はずれて明るい青色超巨星¹⁰⁶が存在していた。長い間観測されていたことと、爆発後の測定から超新星の爆発の様子が克明に明らかにされた。

前述したようにフレッド・ホイルは元素が恒星の内部で合成されることを明らかにしたが (183頁8.14.8参照)、その中で様々なシナリオを考えていた。彼は太陽のおよそ25倍の質量を持つ星の一生を9段階の過程として示していた。以下に彼の考えに基づいて先ず6段階の核融合の材料と産物・温度・継続時間を列挙する。①水素からヘリウム・4,000万K・1,000万年、②ヘリウムから炭素 (トリプルアルファ反応)・2億K・100万年 (外側の層が膨張し太陽の何百倍の赤色巨星を形成、外側の層は失われ質量の四分の一を失い収縮に向かう。その時に失われた物質が1光年もの範囲に広がっており、それはその後起こる超新星爆発で放たれたX線にあぶられて、リング状に輝き続ける。その姿はハッブル望遠鏡で捉えられている)、③炭素からネオンとマグネシウム・6億K・600年 (青色巨星となる)、④ネオンから酸素とマグネシウム・12億K・1年、⑤酸素から硫黄とケイ素・15億K・6ヶ月、⑥ケイ素から鉄・27億K・1日。この後、引き続いて起こる3段階で最期を迎える。⑦中心部は鉄のコアを支えられず崩壊する (54億K・0.25秒)。⑧外層は反動で跳ばされてしまう (230億K・0.001秒)。⑨爆発が起こる (約10億K・10秒) (69-141p, 92-248-250p)。

実際に観察されたSN1987Aの姿は2月24日に爆発し、三か月後の5月20日に明るさのピークが訪れた。5月末には暗くなると予想されていたが、長いあいだ明るく輝

¹⁰⁴ ダークエネルギーという言葉はマイケル・ターナー (1949～) により1999年に初めて用いられたと言われている。

¹⁰⁵ 炭素や酸素を材料にした核融合反応へとは進まない (175頁8.6.2.3参照)。

¹⁰⁶ 青色超巨星は、直径が太陽の数倍以上、光度が太陽の1万倍以上の恒星で、HR図 (173頁図11) では左上に位置する。

いていた。その輝きは放射性的⁵⁶₂₈ ニッケル（半減期6日）が作られ、それから⁵⁶₂₇ コバルト（半減期77日）となり更に⁵⁶₂₆ 鉄（安定同位体）が生じたためであるという仮説が出された。明るさのピークが過ぎると⁵⁶₂₇ コバルトの崩壊周期に従って星は暗くなり、更に⁵⁶₂₇ コバルトに特有のガンマ線と光学的なスペクトル線が観測された。その特有なスペクトル線は次第に減っていった。それは宇宙で鉄が作られていく過程をつぶさに観察したことを意味している（92-251~252p）。爆発の中心では中性子星が誕生しているはずだが、今のところ見つかっていない（126）。

ここでもう一つ特筆すべきことは、この星の爆発により、太陽から遠い天体からのニュートリノ¹⁰⁷が初めて観測されたことである。

10.2 中性子星：1933年にウォルター・バーデとフリッツ・ツビッキーは中性子を主な成分とする中性子星の存在を予言したが、それは理論上のもので実際には存在しないと思われていた。電波天文学が進む中、アントニー・ヒューイッシュ（1924~）は遙か彼方のブラックホール（本頁10.3参照）で爆発しているクエーサー（本頁10.3.2参照）から発せられる電波の瞬きを捉える観測を1960年代に行っていた。彼の指導を受けていた大学院生のジョスリン・ベル（1943~）¹⁰⁸が、1967年に1.3秒おきの規則的な電波のパルスが天体の限られたところから発せられていることを見出した（127）。それは「pulsating radio star」を縮めたpulsar（パルサー）と呼ばれた。パルサーは回転する小さな星で、極めて安定した発光間隔をもっている。その電波のビームはまるで灯台から発せられるパルスの光のように地球を掃いて過ぎている。

現在では、中性子星がパルサーの正体であると考えられている。1967年にフランコ・パッシー（1939~2012）は1054年に現れた超新星のカニ星雲のエネルギー源として中性子星の存在を示唆した（128）。中性子星は太陽

程の質量を持つ直径10km程度の中性子を主成分とする超高密度の星で、質量の大きな星が超新星爆発を起こした後に形成されるとされている（35-175~177p）。

太陽質量の8倍以上の星¹⁰⁹は最後に超新星爆発を起こしその中心核の重さが太陽質量の0.1~0.2倍以上1.5~3.0倍以下の場合に中性子星となる。それ以上になるとブラックホールとなるとされている（本頁10.3.2参照）。

10.3 ブラックホール

10.3.1 概略：1783年にジョン・ミッチェル（1724~1793）は「重さが太陽の1億倍の物体があるとしたら、光はそこから出てこられない。それゆえ、おそらく宇宙で最も質量のある物体は私たちの目には見えないだろう」と語った（37-255p）。その後1910年頃カール・シュヴァルツシルト（180頁8.13.1参照）はアインシュタインが見出した重力により時空が歪むことに基づいて、天体の質量がかなり大きく体積がかなり小さいと、天体の表面から放たれた光は激しく曲がり天体の外に出ることは出来ずその天体は黒くなると考えた（35-179p）。シュヴァルツシルトによると例えば太陽の3倍の質量を持つブラックホールの半径（シュヴァルツシルト半径）は約9kmとなると計算された。

ブラックホールは見ることも出来ず、どのようなものかは分からないが、その存在を示す間接的な証拠は様々な天体観測から得られている。その天体はセイファート銀河・電波銀河・クエーサーである。それらは銀河中心の小さな領域から莫大なエネルギーが、電波・赤外線・可視光線・紫外線・X線・γ線とほぼ全ての波長域の電磁波として発せられている活動銀河核として統一的に理解されようとしている（例えば、130, 131）。

10.3.2 クエーサー：セイファート銀河は1940年代にカール・セイファート（1911~1960）が極端に明るい中心核を持つ銀河として分類したものである。その後強力な電波を出している電波銀河がケンブリッジ大学の

¹⁰⁷ ニュートリノは電荷を持たない質量の小さな素粒子で、1930年代からその存在が考えられており、1950年代にその存在が確かめられた。ニュートリノは太陽内部の核反応で膨大な数が作られるが、それは物質の中を素通りし周りに影響を与えないので検出することが難しい。日本のカミオカンデ（イタイタイ病の原因をつくった岐阜県にある神岡鉱山の地下1000mに作られたニュートリノの観測装置）を含め限られたところでもようやく少数のニュートリノが検出されている。小柴昌俊（1926~）らは1987年の超新星の爆発時に11個のニュートリノを検出した。それは超新星爆発時には多量のニュートリノが放出されると考えられていたことを裏付けた。彼は、太陽ニュートリノの検出装置を開発し、その研究を通してニュートリノ天文学を開いたレイモンド・デイビス・ジュニア（1914~2006）とともにノーベル賞を受賞した（35-207, 208, 229-233p）。特に紹介しなかったが本論で紹介した多くの人がノーベル賞を受賞している。

¹⁰⁸ ヒューイッシュはこの業績が認められ、電波天文学の先駆的な研究をしたマーティン・ライルとともに1974年のノーベル物理学賞を受賞した。ライルの宿敵のフレッド・ホイルはベルの業績が無視されたと強く非難した。ベルはノーベル賞を受賞することはなかったが、その後博士課程の研究に対する賞は指導教官と学生の双方に与えられることになった（35-176, 177p）。恒星内の元素合成の重要な研究に対する1983年のノーベル賞はホイルではなくウィリー・ファウラーに与えられた（69-152, 153p）。

¹⁰⁹ 太陽質量の8倍以下の星は赤色巨星段階で外層が失われ、中心核の質量がチャンドラセガール限界の太陽質量の1.44倍以下で白色矮星が作られる（129）。白色矮星のあるものは超新星Ia型の爆発を起こす（前頁10.1.1参照）。

グループにより1950年代にリストアップされていった(185頁9.3参照)。1959年に発表された第3版で3C 273と名付けられた天体がジェット(まっすぐな物質の流れ)のようなものを噴出していることが報告された(132)。更にその天体はそれまでに分かっているどの銀河よりも遠くにあることが1963年に明らかにされた(133)。また、その遠い銀河は長径が数光年と極端に小さなもので、恒星のような点光源に見えるということから準恒星状電波源(quasi-stellar radio source)、クエーサー(quasar)と呼ばれるようになった。しかし、それがどうして明るく輝いているのかが謎として残った(35-266~271p)。

また1971年に、はくちょう座の方角にあるHDE226868星系の青色超巨星である主星のガス成分が周囲に流出し、近くの何ものかに吸い込まれ、同時に極めて強いX線が放出されているのが観測された。そのX線の発生源は、はくちょう座X-1(約6,000光年の距離にある)と呼ばれ、ブラックホールの最有力候補の一つとなった(35-180~181p)。

ブラックホールの存在を示すクエーサーについて現在知られていることをまとめる。最初に見つかった3C 273は24億光年離れた所にあるが、最近見つかった最も遠いところにあるクエーサー(ULAS J1120+0641)は宇宙創成後7.7億年のものである(134)。その他宇宙創成後十数億年のものも数多く見つかるなど、クエーサーは遠くに存在し古いものが多い。それでも観測出来るということは極めて明るいことを意味しており、平均的な明るさは太陽の10兆倍であると言われている。

そのようなクエーサーはブラックホールをガスの円盤が取り巻いており、それが高速で回転する時に摩擦熱を持つ、あるいはガスが円盤からブラックホールに落ち込み圧力でつぶされて熱を持つことでX線が発せられ、更にそれにより円盤が熱せられ、強烈な紫外線や可視光線を発するものであると考えられている。クエーサーの中心にあるブラックホールには大量の塵やガスが落ち込み、その中心は超大質量ブラックホール(太陽質量の $10^5 \sim 10^{10}$ 程度の質量を持つ)であるとされている。最も明るいクエーサーでは毎年太陽の1,000倍程の質量をもつ物質が吸い込まれていると言われている。

クエーサーは中央のブラックホールや内側の熱い部分を囲むように、外側にトーラスと呼ばれる長径2~3光年のドーナツ型の不透明な塵やガスからなる円盤が回転しながら広がっており、中央からはジェットが吹き出していると考えられている。これを横から見ると内側部分がトーラスに隠れて見えず、セイファート銀河と分類される。一方、斜めから見ると中心から発せられるジェットを観察し、クエーサーとされる。即ち、クエーサーと

セイファート銀河は活動銀河核を別の方向から見たために、違うものとして捉えられたと考えられている(35-266~275p)。

ブラックホールは、太陽質量の20倍以上の超新星が爆発し、中心核の質量が太陽質量の1.5~3倍より大きい場合に、中性子星にならずに形成される(135)。その他ブラックホールは活動銀河核の中心にも存在していると考えられている。

現在ブラックホールの候補として上がっているもので最も重いものは太陽の180億倍の質量を持つOJ 287で、その半径はカール・シュヴァルツシルトに従えば約530億km、最も軽いものは太陽の3倍の質量を持つIGRJ17091-3624で、その半径はシュヴァルツシルトに従えば約9kmであると言われている。

10.3.3 天の川銀河のブラックホール：天の川銀河の中心には、射手座A*という電波源がある。しかし、それはクエーサーのように活動的ではなく、そこに何があるかは謎であった。しかし多くの探査が重ねられ、その中心には太陽の質量のおよそ400万倍のブラックホールがあることが推定されている(35-276~279p)。

クエーサーは初期の宇宙に多く見られる。射手座A*のブラックホールには現在では落下する物質が少なく、そこからはジェットが吹き出していない。それは既に周囲の物質が消費し尽くされ、かつてはクエーサーであったものが現在では比較的静かになっているのではないかと想像されている。

射手座A*を含めブラックホールについてはまだ分からないことが多いが、大小様々なブラックホールが存在することは確かだと考えられる。

10.4 太陽系

10.4.1 太陽系誕生の時期：地球に落ちた隕石は太陽系が形成された時に出来た小天体と考えられるが、それはおよそ46億年前に作られたことが分かっている(136)。また、月は地球が形成された直後に火星程の大きさの天体が地球に衝突し、飛散した物体が集積して形成されたと考えられている。アポロ15号(1971年)などが持ち帰った月の石を調べたところ、それがおよそ45億年前につくられたことも明らかにされている(137~139)。このようなことから太陽系は約46億年前に誕生したと考えられている。

10.4.2 太陽系誕生の仕組み：太陽系がどのように生まれたかについて、イマニエル・カントとピエール・ラプラス(1749~1827)は星雲から太陽・惑星・彗星が生まれたという考えをそれぞれ1755年、1796年の著作で発表した。それは思弁的なものであり、一般に認められている太陽系の起源論は、1970年代前半に林忠四郎

(1920～2010)らにより理論的に展開された。現在、太陽系は次の5つの過程を経て形成されたと考えられている。それは林らの理論に最近見つかった太陽系外惑星の知見も加えたものである(18-178-182p)。

①数百万年かけて星間分子雲が自己重力で収縮し、中心星である原始太陽とそれを取り巻いて回転する「原始太陽系円盤」が生まれ、②原始太陽系円盤は原始太陽を回りながら、重力と内部の乱流・粘性・重力により、太陽に近い内側ほど赤道面から厚さが薄い円盤を自然に構成してゆき、③円盤の中では星間塵が分子間力で相互に吸着成長しながら、重力のために赤道面に沈殿し、更にその沈殿した層はある濃度に達すると重力的に引き合って分裂し、数km前後の「微惑星」を無数に生成した。②と③の過程はほぼ100万年程度かかった。④次に微惑星はある程度大きいので重力により相互に引き合い、衝突・合体を繰り返して、100～1000万年かけて直径100km程度の「原始惑星」に成長し、⑤原始惑星はさらに近傍の原始星どうしの合体あるいは重力による跳ね飛ばしなどで公転軌道領域ごとに整理され、その領域で最も大きく支配的であった原始惑星が更に成長して、100万～1億年かけて現在の惑星となり、太陽系が出来上がった(140-195-197p)。

10.4.3 惑星・太陽系外縁天体・オールトの雲：太陽系の場合、木星軌道より内側の原始惑星系円盤内に氷粒子は存在出来ない。氷粒子が存在出来る境界を「雪境界線」と呼ぶが、その内側では氷が蒸発してしまうためにダストはケイ酸塩粒子を中心とする岩石コアとなり、地球型の小型岩石惑星が生まれた。

一方、「雪境界線」より外側では、大量の氷粒子が存在してケイ酸塩粒子とともに凝集するために速やかに大きな固体コアが形成された。それが強い重力で周りのガスを大量に集め「巨大ガス惑星」の木星と土星が出来上がった。一方、太陽から遠い天王星・海王星では固体コアの集積・形成に時間がかかり、その間に周囲のガスが散逸してしまいガスを集められるサイズになった時には周囲にガスがほとんど残っておらず「巨大氷・水惑星」となったと考えられている(140-204-208p)。

その他、火星と木星の間の小惑星(168頁6.3参照)・海王星軌道の外側には太陽系外縁天体(エッジワース・カイパーベルト¹¹⁰と海王星以遠天体をまとめたもの)がある。1977年に打ち上げられたボイジャー1号は2012年

現在、地球から182億km(121.6天文単位)の所、太陽風の届く限界に達している。そこは太陽系外縁天体の領域(約千天文単位辺りまでと考えられているが、詳しいことは分からない)の深遠部である(141, 142)。ボイジャー1, 2号の更なる宇宙探査が、太陽系の果てに関して新たな情報をもたらしてくれることが期待されている(141)。

エッジワース・カイパーベルトはオールトの雲¹¹¹と呼ばれる天体につながっているとされているが詳しいことは分かっていない(74-174-187p)。

10.5 太陽・天の川銀河の未来：太陽の寿命はおよそ100億年(174頁8.6.2.1参照)で、今はおよそ半分が過ぎた所である。太陽は最期の段階で赤色巨星となり、現在の直径の約100倍、地球の公転軌道ほどの大きさとなる。外層は次第に吹き飛ばされ質量を失った中心核が白色矮星となり、外縁部は惑星状星雲となると考えられている。しかし、そのようになる前に地球への放射量が増え、今から10億年後には地球は生命の生存には過酷な条件となると予想されている。

また、現在254万光年離れた所にあるアンドロメダ銀河と天の川銀河は秒速約109kmで互いに接近しており(青方偏移が見られる)、約40億年後には二つの銀河は衝突し新たな銀河が形成される、あるいはすり抜けていくなど幾つかのシナリオが考えられている(143～146)。何れにしても太陽系も他の天体と同じように数十億年後に死滅し、再び星屑となり新たな天体の材料となることは確かである。

10.6 太陽系外惑星：地球以外にも生命が存在するののかという興味もあり、太陽系外の惑星の探索が行われてきた。1940年代からバーナード星に惑星があるなどの報告がなされたが再確認されることはなかった。1965年以降観測技術が進歩し、特に1990年以降には多くの太陽系外惑星が見つかり、その数は2012年までに800個を超え、候補も入れるとその数は2000個以上に及んでいる。特に宇宙探査機ケプラーはその発見を主目的として2009年に打ち上げられた。大きなものの方が見つかりやすく地球質量の10倍前後のものが多く見つまっている(140-210-215p)。

2010年には太陽系から約20光年離れた、赤色矮星グリーゼ581の周囲を公転する太陽系外惑星、グリーゼ581gが観測され地球の3～4倍の質量を持ち地球に似た惑星で生命が存在する可能性があることが報告された

¹¹⁰1950年代にキース・エッジワース(1880～1972)とジェラルド・カイパー(1905～1973)により短周期型彗星の起源がある領域として名付けられた。海王星軌道より外側の黄道面付近に冥王星・エリス・ハウメア・マケマケなどが円盤状の領域に広がっている。これらは離心率の大きな長細い楕円軌道で太陽の周りを回っている(74-174-186p)。

¹¹¹1950年にヤン・オールト(1900～1992)が長周期彗星や非周期彗星の源がある領域として提唱した。現在では太陽からおよそ1万天文単位から10万天文単位まで球状に広がる領域で多数の天体が含まれていると考えられている(74)。

(147)。しかし、この惑星の存在を疑う報告(148)と疑いを晴らす報告も出されておりグリーゼ581gについては不明な点が多い(149参照)。最近、グリーゼ581gより更に地球に近い距離にある太陽系外惑星が見つかった。それは太陽系から約4光年の距離にあるケンタウルス座アルファ星Bから0.04天文単位離れた所を、3.236日の公転周期で回っている地球の約1.1倍の質量を持つ惑星である。しかし、その惑星は恒星に近すぎるために生命が存在出来る環境ではないと考えられている(150)。太陽系外惑星の研究はまだ始まったばかりであり、そこに生命が存在するかどうかは今後の興味ある研究テーマである。一方、地球外生命の存在については火星があくまで候補の一つとして残っている。2012年8月に火星の地上、特に地下の探査を始めたキュリオシティの成果が期待されている(151)(175頁8.7参照)。

11. 知は地球を救えるか

11.1 問題の所在：本シリーズの表題は「知は地球を救う」である。それは137億年前の宇宙の誕生から現在までの宇宙・地球・生命の進化を知ることから、現代の我々の抱える問題を解決するための視点を得ることが出来ると考えたからである。

今回は宇宙観の変遷を辿った。我々の宇宙に対する認識は大きく広がり続けている。古代ギリシャで大きく発展した宇宙観はミレトス学派に始まる「知」・アリストテレスの「哲学は知を愛する」という思想に支えられていた。多くの人は天動説に代表される古代の宇宙観を中世まで信奉していた。その後18世紀以降の科学革命と共に新たな宇宙観が行き渡り、我々の宇宙に対する認識の地平は今なお拡大の一端を辿っている。

しかし、新たな発見が既成の概念を押しつけて受け入れられるためには多くの時間が費やされる。例えば、アインシュタインは新たな世界像を示し人々の自然認識を根底から揺さぶった。ところが、彼の宇宙観の一部はギリシャ時代以来長く続いた「宇宙は不変で静的」であるというものであった。

筆者は素人で最先端の宇宙像を十分に理解することは出来ないが、それでも我々の宇宙が137億年前に極めて小さなところから始まり、今なお膨張し続けている極めて動的なものであることを知っている。それは、①天空を裸眼で眺めていた時代の認識、②初めて望遠鏡を使った観測結果、③天体からの可視光以外の様々な電磁波を地上からだけではなく宇宙空間に送った観測機器を通して測定した結果、④宇宙から持ち帰ったサンプルの調査結果、⑤コンピューターで多くの複雑な計算をした理論

的な考察など、長い間に得られた宇宙に関する多くの成果と深い認識を我々が共有出来たことからもたらされた。

ところが一方で、我々はそのように「知」の地平を押し開いている巨大化する科学の成果を素人が共有することの難しさを痛感している。また、我々の認識が範囲を限定したものであり「知」には限界があるという問題、あるいは「要素還元的な知」では「全体を把握」することが難しいという課題を抱えている。それについては、多少前報で考察した(2)。これらの問題は、①ソクラテスが問題とした「不知の知」・「無知の自覚」、あるいは②通底する価値観と知によって環境問題を乗り越えて持続可能な世界を構築出来るか、また③知と価値観に調和を見出せるかという視点から捉えることも出来る。特に③の問題は、中世ヨーロッパが抱えていた問題と通ずる。

ヨーロッパの中世にはアリストテレスの学説が復活し科学革命につながったが、その結果、「理性と信仰の離婚」が起こったと言われている。中世ヨーロッパは、温暖期の楽天的かつ開放的な膨張社会から、小氷期をきっかけに多くの対立を顕在化させ分裂・混乱する暴力的な社会へと移行したが、一方で、後の新たな世界への変貌を用意した時代でもあった。

現在我々は、70億の多様な人々が共通の祖先を持つ生物達とたった一つの「宇宙船地球号」の上で将来世代の取り分を残しながら暮らしているのかどうか、将来世代の取り分を侵食しているのではないかという環境倫理を含んだ大きな問題に直面している。また現代は豊かで平穏な暮らしと暴力的な自然破壊と途方もない格差が広がる混乱・分裂が同居する時代と見ることも出来る。そして、我々は「加速度的に巨大化する科学・知」と「感と観に支えられた思い」が引き裂かれた隘路にいる(詳細な議論は2,5参照)。このような混迷の中から新たな時代に向けたビジョンを構築するためにも哲学的思考の重要性はかくだんに増大している。

そこで、ソクラテスの主張の一端を振り返り、次にアリストテレスが中世のヨーロッパでどのように受け止められたかを糸口として、果たして「知は地球を救えるのか」ということを考察し、新たな時代を構築する手がかりを探したい。

11.2 ソクラテスの「無知の自覚」：ソクラテスは、自らは著作を行っていないが、その思想はアカデメイアを創設し古代ギリシャ哲学を大きく発展させた弟子のプラトンの著述により多くの人に知られている。ソクラテスの思想はミレトス学派の自然哲学者たちによる唯物論的な科学の兆しとなる考え方とは異なり、「神のみぞ知る」という神々への崇敬と人間の知性の限界(不知の知)を

前提としていた。即ち「無知の自覚」に基づき、「人間として分をわきまえつつ最大限善く生きようと努める」というものであった。それはソクラテスが知を愛し求めていた（哲学をしていた）からであった。彼は「傲慢な独断論」的な知を廃するとともに、全体を把握することの難しさを強く意識していた。

田中美知太郎（1902～1985）の『ソクラテス』（42）によれば、ソクラテスはこのような評価を受ける一方、当時の現実的なアテネ市民の目には「無駄話をするおよそ非実践的な空論家」に過ぎないと見られていた¹¹²。この皮肉な食い違いこそプラトンが繰り返し問題にしななければならないことであった。ソクラテスは「世にもすぐれた人よ、君はアテナイ¹¹³という、智力においても、武力においても、最も評判の高い、偉大な国都の人でありながら、ただ金銭を、出来るだけ多く自分のものにしたいというようなことに気を使っていて、恥ずかしくないのか。評判や地位のことは気にしても、思慮や真実には気を使わず、また自分の精神を、出来るだけすぐれたものにするということにも、気もつかわず、心配もしていないというのは」と語った。更に彼は「人が気を配らなければならないものは、ただ徳」であるとし、知は神のみに認めた。一方人間には、ただ愛知のみを許した。ソクラテスの知は、一般の理論的知識、あるいは科学的な知識と同じものではなかったと言われている。ソクラテスのいう無知とは、何も知らない、全くの無知というようなものではなく、それはかえって何でもないのである、何かであると思ひ、大切なことを何でもないと考える、一種の思い違いであり、間違った信念の如きものをさしたのである。

ソクラテスは、自分をアブにたとえて、自分は人々を目覚めさせるために、このアテナイという、図体は大きいがいぶところのある馬に、神によって附着せしめられたものだと言っていた。アテナイ市民は「眠りかけているところを起こされた人たちのように、腹を立てて」、彼を「国家の認める神々を認めず、他の新奇の神霊のたぐいを導入する罪と青年たちを墮落させている罪」に問い、死刑を宣告した（42）。

彼はその後、数日も経ず毒を仰ぎ死んだ（153-150p）。彼は死の前に「善き人には、生きている時も、死んでも、悪しきことはひとつもないのであって、その人は、

何に取り組んでいても、神々の配慮を受けないということはないのだ。（中略）わたしはこれから死ぬために、諸君はこれから生きるために。しかし我々の行く手にまっているものは、どちらがよいのか、だれにもはっきりはわからないのです。神でなければ」とメッセージを残した（154-84～85p）。

彼を逃がすために牢番が牢獄の鍵を開けていたが、彼は「単に生きるのではなく、善く生きる」ために死を選んだ（42-170p）。

ソクラテスは自身の死によって、まさに彼の思想「知を愛することは実践的なものである」を実行したのではないだろうか。プラトンは『パイドン』の終わりを「これが、我々の友の最後だったのです。かの人こそは、我々の知る限り、まさに当代随一の人と言うべく、とりわけ、その智慧と正義において、他に比類なき人だったのです」という言葉で結んでいる（42-213p）。田中美知太郎は、彼の生死は彼が万人に問いかけていたことの答えだったのであり、本当の哲学（愛智）というものは、そういうものだと思うと著している（42-214p）。

11.3 正義と知：ソクラテスやプラトンは、当時のソフィスト「知恵（ソフィア）のある人」が論理の力で無理やりに相手を打ち負かす詭弁の術を教えるだけで、「知恵」が深い関係を持っている肝心の「徳」について明らかにしなかったことを強く批判した（本頁脚注112参照）。ソフィスト達の正義は法律・慣習に基づくもので、例えば借りたものを返すことである。それに対してプラトンは『国家論』の中で正気の友人から武器を預かった後に、その友人が気が狂ってしまい返してくれと言った場合には返してならないことは自明であると反駁した。そして正義とは幸福につながる魂の調和であるとした（155, 156）。またアリストテレスは『政治学』の中で「正義とは国家のもとでの人間の紐帯である」と主張している（157）。即ち、彼は正義を個人としての完全性と同時に国家としての完全性という観点からも論じた。

現在の我々について考えると、我々はともすれば正義について語ることを躊躇する傾向が強い。しかし、巨大化・細分化する社会の中で困難な問題を解決するためには「善きこと」「衡平」について考えることが欠かせない。そのための手立ての一つは「知」の地平を広げることで

¹¹²ギリシャの喜劇作家アリストパネス（BC446頃～BC385頃）はソクラテスが46才の時に『雲』を書いた。その主人公ストレブシアデスは借金取りを追い返す為の詭弁を学ぶように自分の息子をソクラテスのもとにやった。彼は借金取りを追い返すことには成功するが、ソクラテスの教えを受けた自分の息子から暴力的な折檻を受けるに及びソクラテスに騙されたと怒りをぶちまけた（152-89～129p）。アリストパネスはソクラテスが非難したソフィストとソクラテスを十把一絡げにし、弁論術に明け暮れるもの達として嫌った。ソクラテスの評判は『雲』により著しく傷つけられた。プラトンはアリストパネスによる師ソクラテスへの揶揄を拭うためにも『ソクラテスの弁明』を著したと言われている。

¹¹³アテネの古名。

あると考えられる。しかし、「知」と「善きこと」・「衡平」あるいは「思い」の間に調和を見出すことは必ずしも容易なことではなく、「知は地球を救えるか」という問題が露呈してくる。

中世においてアリストテレスの思想が危険思想と見られる一方で、逆に新鮮なものとして再評価された。しかし、それは同時に「知」と「思い」の乖離を生み出していった。そのことを振り返ることは如何に「知」と「善きこと」・「衡平」あるいは「思い」の間に調和を見出すかということに一つの重要な視点を与えることになると考えられる。筆者の総括的な考察は201頁の12.まとめ以降に述べる。

11.4 中世におけるアリストテレスの復権と理性と信仰の離婚：リチャード・ルーベンスティン (1938～) は理性と信仰の調和が可能かという視点から中世における「知」と「思い」の乖離を「理性と信仰の離婚」と捉え『中世の覚醒』(158)を著した。以下多少長くなるが、主にその著作に従って、アリストテレスを巡って「理性と信仰の離婚」がどのように進んだのか振り返る(11.4.9、199頁まで)(158)。

11.4.1 ローマ帝国とその崩壊：ローマ帝国の支配下にあった西ヨーロッパの諸地域では、古典の学問は衰退する一方であった。旧来の教育を受けたローマ人は例外なく、ギリシャの思想家の著作をギリシャ語で学んでおり、ラテン語に翻訳する必要がなかった。ところがローマ帝国が衰退する中で、エリート層はギリシャ語を読めなくなっていた。

東ローマ帝国のユスティニアヌス一世(483～565、東ローマ帝国皇帝在位：527～565)は、哲学的思弁は異端の温床になるという理由で、アテナイのプラトンのアカデメイアを529年に閉鎖してしまった。ローマ帝国の権威が崩壊(476年の西ローマ帝国の滅亡)した後、西ヨーロッパにアリストテレスの著作の一部がかるうじて残っていたのは、主としてボエティウス(480～524/525)の努力の賜物だった。ボエティウスは「手に入るかぎりのアリストテレスの著作と、プラトンの対話篇全てをラテン語に翻訳しよう」と誓った。彼は、東ゴートのテオドリック王のもとで執政官として活躍したが政争に巻き込まれ、524年に投獄され1～2年で処刑された。しかし、彼は獄中で『哲学の慰め』を著すなど沈黙思考していた。彼が翻訳したアリストテレスの著作はカッシオドルス(485頃～585頃)により保管され、後に彼が創設した修道院に引き継がれた。そこでその後500年間は

ど繰り返し筆写され、アリストテレスの著作は後世に伝えられることとなった¹¹⁴。

11.4.2 イスラム社会とアリストテレス：7世紀にビザンツ帝国領土に侵入したアラブ人はアリストテレス科学の著作という知的財産を相続し、それらをペルシア語に翻訳した。そのビザンツ帝国では文化の覚醒が起こり、イスラムに栄光をもたらしていった。

一方、西ヨーロッパ世界は西ローマ帝国崩壊後、頻発する暴力沙汰や、貧困や、無秩序に苦しんでおり、ここではキリスト教徒は祈祷に埋没する、あるいは形式化した論争に明け暮れ、アリストテレスの思想はほとんど顧みられなかった。このいつ果てるとも知れない苦難の時代に、慰めと意味を求める人々が難解な哲学より信仰を心の拠りどころとしたことはさして驚くにあたらないことであった。

キリスト教徒とこれに抵抗するムスリムの戦いは、約800年間にわたって延々と続き、ムスリム勢力がスペインから完全に駆逐されたのは1492年のグラナダ陥落の時であった。しかし、1100年にはトレドやリスボンなどかつてのイスラム文化の中心地は、すでにキリスト教の支配下であり、ヨーロッパ中の学者がトレドに引き寄せられていた。異教徒に対する軍事行動の一方で、次第に文化の「相互浸透と統合の一大事業」が行われていった。

その事業によりイスラムを経由したアリストテレスの記述が中世のヨーロッパ社会に伝えられた。アリストテレスは自然の世界をより包括的かつ正確に説明しており、その記述には矛盾がなく、得心がいくものと捉えられた。その結果、ヨーロッパ社会にアリストテレスの自然観が再び紹介され始めた。しかしそれは、以下に見るようなキリスト教会による禁止など多くの障害に阻まれ、一筋縄にはいかなかった。

11.4.3 教会の世俗化と反教権運動：12世紀になるとピエール・アベラール(1079～1142)は、パリのノートルダム大聖堂付属学校で神学と哲学の教師となり「私たちは疑うことによって探求するようになり、探求することによって真理を把握しよう」と唱えた。多くの学生達はその思想の力の虜になり、議論の応酬に興奮し、伝統的に受け入れられてきた真理に異議を申し立てる論理的な推論に魅惑された。彼はその精神において教父たちよりアリストテレスに近かった。しかし、シトー会の指導者であったクレルヴオーのベルナルド(1090～1153)は1139～40年にかけてアベラールの学説を異端として弾劾する書簡を書いた。アベラールは理性によって神を完

¹¹⁴筆写されたアリストテレスの著作が中世の修道院でどのように扱われたかは、ウンベルト・エーコの小説『薔薇の名前』に描かれている。ショーン・コネリー主演により映画化されたものは、当時の様子を偲ぶことが出来る名作である。

全に理解出来ると思ひ込んでいたと告発された。一方、ベルナルは、信仰は信じることであつて論争することではないと信じていた。アベラールは異端とされた後、パリから離れた修道院に移りそこで息を引き取った。

同じ頃、シチリア王国を建設したシチリア伯ルッジェーロ二世（1095～1154、シチリア王在位：1130～1154）は、多くの古代ギリシャ語の写本をラテン語に翻訳させ、ギリシャ文化を継承していた。

当時のヨーロッパは温暖化・開墾・干拓により村は町に変容し、町は都市に成長する「偉大な進歩の時代」であった。教会そのものが大領主となり、修道院が広大な地所を支配するようになっていた。教会の行政機構を支える人々が増え、都市部では人口のおよそ10%に達する程であった。そのような中で教会の意味が問われ始めた。当時の改革主義者は、諸悪の根元は聖職者が世俗社会とあまりに親密な関係を築いたことであると考へた。教会の外では異端の反教権運動が、そして教会の中では強烈な教会改革運動が起きた。それらの運動が、その後、数世紀にわたってキリスト教世界の苦悩の源となったのである。

このような混乱の中、清貧や信徒による説教を強調する反教会の修道士アンリ（1145年逮捕・投獄され、獄死した）のような巡歴の福音伝道者が現れた。またリヨンの豪商ピエール・ワルド（1140頃～1217）はそのような大衆の改革運動を起した一人であり、異端派とされたワルド派やカタリ派が形成されていった。

1146年のローマのカトリックの総本山山層部の腐敗は急進主義者の想像をはるかに越えるものとなり、ローマ市民はプレシアのアルノルド（1100～1155）の指揮のもとにエウゲニウス三世（?～1153、ローマ教皇在位：1145～1153）をローマから追放した¹¹⁵。その後の三年間、ローマは民主制を敷き、選挙で選ばれた議員で構成される元老院がローマを統治した。その間、アルノルドは聖職者たちに、私有財産を捨てて使徒的生活を送るよう説得したり強制したりした。しかし、1148年復権を目指していたエウゲニウス三世は、この反抗的なロンバルディア人を破門した。アルノルドに敵対する陣営が元老院選挙で勝利をおさめ、アルノルドは1155年に逮捕され、ローマの絞首台にかけられた。

その頃、コルドバ生まれの偉大な思想家アヴェロエス（イブン・ルシュド（1126～1198））は時間を超越したイデアより個々の実体を重視するアリストテレスの立場を

再確認し、自然の宇宙は奇跡を起こす神の気まぐれや不可思議な決断によってではなく、自然の法則によって支配されているとするアリストテレスの主張を擁護した。そのような自然哲学の再興を図る動きも生まれていた。

11.4.4 大学の勃興・悪を巡る論争・十字軍：中世の温暖期であった1200年にフランス王がパリ大学に特許状を与えた。そのために、そこはたちまちヨーロッパの最高の神学研究センターとみなされるようになった。大学の活動は活発となり、まもなく一流大学の学芸学部ではアリストテレス哲学が盛んに研究されるようになっていった。

一方、世俗的な教会の汚職や墮落に反対する民衆運動として始まったカタリ派は次第に勢力を増していった。彼らはアリストテレスの考え方を取り入れ、フランスの王権から独立していたトゥールーズ伯など諸侯の庇護を受けて次第に勢力を伸ばした。カタリ派は悪の問題に目を向け、理路整然と「悪の原因は神」であると論証した。これは多くのキリスト教徒には受け入れがたいことであった。彼らは、聖アウグスティヌスが最初に示した「悪は神が創造したものではなく、そもそも実在するものでもなく、悪は神の存在が不十分なし欠如した状態である」という解釈を受け入れていたからである。

カタリ派が勢力を増してきたために1204年カルソヌでカトリックとカタリ派の討論会が開かれたが、両者の勝負は引き分けに終わった。カトリック教徒にとってはカタリ派の結論である二元的創造という概念は異端の説であった。しかし、一方でカトリック神学者の少なからぬ数の人々もカタリ派が応用しているアリストテレスに始まる合理主義的な方法を採用していた。それは彼らもカタリ派同様、宗教の教義は理にかなっていなければならないと確信していたからである。その後、アリストテレスの自然哲学に代表される理性とキリスト教の神の啓示を信じる信仰の乖離と確執が時間の経過とともに広がっていくことになった。

一方、1208年の春にカトリック教会のインノケンティウス三世（1161～1216、ローマ教皇在位：1198～1216）は異端の説を唱えるカタリ派を絶滅させるための十字軍を呼びかけた。その結果、ヨーロッパ南部では前代未聞の規模の軍隊「アルビジョア十字軍」が組織され、ローヌ渓谷を南下しカタリ派を保護する諸侯とカタリ派信徒を撃破した¹¹⁶。1229年にはカタリ派に対し異端審問制度が強められ、改宗を拒んだカタリ派信徒は火刑に処せ

¹¹⁵ 在位期間のほとんどを、各地に滞在して過ごした。

¹¹⁶ 最後のカタリ派がイタリアで火刑にされたのは1330年とされているが、その発祥の地であるバルカン地方では、それよりいくぶん長く生き延びた。

られた。

インノケンティウス三世が直面した三つの問題は、南フランスとイタリアに根を張ったカタリ派の運動と、西ヨーロッパ全域に広まった福音伝道的な反教権運動と、ヨーロッパに誕生したばかりの大学へのアリストテレス思想の「侵入」であった。彼はそれらの問題に別々に対応した。即ち、カタリ派には強硬策を取りその壊滅を図った。彼らに対しては、前述のカトリック教会を批判した修道士アンリやアルノルドを火刑にせず投獄したり絞首台に送ったりした対応とは異なり、火刑を行うなど苛烈な戦いを挑んだ。

一方、民衆の福音伝道運動に対しては教会組織へ吸収する道を選んだ。彼は多くの大衆を引きつけたアッシジのフランチェスコ (1182頃～1226) の伝道を公式に認めた。それは「小さき兄弟たちの修道会」(フランシスコ会) となり、グスマンのドミンゴ (1170頃～1221) が創設したドミニコ会とともに新たな勢力となっていった。

また、諸大学におけるアリストテレスの講義に対しては部分的な禁止を指示したが、以下に見るようにそのことは中世という時代を大きく突き動かしていく要因の一つとなっていった。

11.4.5 アリストテレスの講義の禁止：12世紀にパリ大学でアリストテレスの論理学がカリキュラムに組み入れられた際には大きな異論は出なかった。ところがその「自然哲学書」が登場するや、一気に軋轢が表面化した。1210年サンス大司教のkolbeのピエール (?～1222) が主催する司教会議で「パリ大学において、アリストテレスの自然哲学書やその註解書を公の場であれ、私的にであれ、講義することを禁じ、禁令に背いた者は破門に処する」ことが決定された。更に5年後の1215年には禁令の対象が拡大した。それは学芸学部でアリストテレスの論理学書を講じることは認めたが、「形而上学と自然科学関連の著作およびそれらの要約」の講義を禁止した。

1229年その禁令に反対する勢力によりパリ大学ではストライキが始まり、大学当局との間で二年間折衝が重ねられた末に大学に広範な自治が保証された。しかし、1231年にパリ大学が再開された時には、教皇グレゴリウス九世 (1143頃～1241、ローマ教皇在位：1227～1241) が1210年と1215年の禁令を更新しただけでなく、科学的な問題を大衆の言語で論ずることも処罰の対象にした。その結果、科学と信仰の間の溝は深まっていった。

当時のキャンパスにはアリストテレスの科学を信奉する学芸学部の教師とドミニコ会とフランシスコ会の修道士が混在していた。ドミニコ会とフランシスコ会の神学者は、今日的な「原理主義者」ではなかったが、彼らは伝

統主義の強烈な擁護者であった。彼らは長い目で見れば、ヨーロッパの覚醒は不可逆な現象であり、理性という道具はたとえ異教の哲学者が発展させたものであっても正統的宗教を利するように使うことが出来ると信じていた。そのことは、西ヨーロッパの知の歴史がきわめて重大な転機を迎えた時に、新しい知識の一番熱心な擁護者となったのは最も戦闘的で確信に満ちたドミニコ会やフランシスコ会の信仰の守護者達であったことから明らかである。そのような宗教的情熱と知的能力の強力な結びつきが、パリ大学における自然哲学と「科学的な神学」の受容を実現させたのであろう。

例えば「十三世紀最初の偉大な哲学者」と称されるオーベルニュのギョーム (1180頃～1249) は、アリストテレスが分析の対象にした自然の世界を聖書に記された善き創造と結びつけた。また、フランシスコ会の活動を指導する代表的な知識人であったロジャー・ベーコン (1219頃～1292頃) は、ドミニコ会の神学があまりに思弁的かつ「非実践的」に過ぎること、ドミニコ会が教会の権威中枢に近づきすぎていること、ドミニコ会士が大学と世間の現状に満足していることを非難しており、1240年代に30余年ぶりに学芸学部でアリストテレスの自然学の講義が復活する口火を切ったとされている。

11.4.6 アリストテレス革命：一方、ドミニコ会の巨頭トマス・アクィナス (1225頃～1274) は「アリストテレス革命」の先鋒となっていった。彼は1245年からパリ大学で学び始め、1248年にはケルンに戻ったが、1252年にパリ大学に戻り、1256年からはそこで神学を講ずるようになった。彼は「神の恩寵は自然を破壊せず、自然を完成する」即ち、創造主を愛することと創造主がつくったものを理解することの間には、いかなる矛盾も生じるはずがないとした。理性も自然も共に神に由来するものであり、彼は神と物質の統合という教義を再発見しアリストテレスを高く評価した。しかし、トマスはアリストテレス主義者である以上にキリスト教教義の擁護者であり、1259年ドミニコ会の仕事をするためにローマに戻った。

1260年代初期、パリ大学では科学と信仰の軋轢は表面的には弱まったように見えたが、それは見かけのもので実際には大きな変化が起こっていた。1260年代後半には急進的アリストテレス主義者のグループがパリ大学に登場した。その代表格であるシゲルス (1240頃～1281/84頃) は学芸学部の教師となり、1260年代後半から著作を公にし始めた。彼は、自然と人間の本性に関するアリストテレスの思想を伝統的なキリスト教の教義とすり合わせずにそのまま提示した。彼は世界と人類は永遠で、自然の事物の運動は自然に内在する法則によって

支配されており人間の自由意志は必然性によって限定されているとした。また、魂の不滅性は個人ではなく人間という集団の属性であると再定義し、人間の肉体と靈魂の一体性を保った。即ち、彼は人間が死んでも知性が生き続けるのは、知性が個々人においてはあたかもその個人に属しているかのように働くにもかかわらず、知性は個々人とは独立して別個に存在する能力だからであると考へた。つまり、「知性」は個々人に属さない人類共通の能力で、個々人はそれを生存中に行使するが、個々人が死んだ後も、その人物に属していた「知性」はただ一つの「(人間という)種に属する知性」の一部として、永遠に生き続けると主張したのである。

パリ大学から離れていたトマスは1269年から72年まで、ドミニコ会総長の命により神学教授として問題を孕むパリ大学に戻った。彼は前述のシゲルスらの知性単一説に対して、その誤謬はアヴェロエスによるアリストテレスの誤った解釈に端を発しているとし、『知性の単一性について—アヴェロエス主義者たちに対する論駁』(1270年)(159)を著し反対の闘いの火蓋を切った。知性単一説は個人の靈魂の不滅性を否定しており、それは個人が死後に賞罰を受けるという伝統的な教えも否定していることは一目瞭然だったからである。トマスは知性を質料と結合してのみ存在する通常の形相としてではなく、知性を質料とは独立して存在しうる実体的な形相として認識するというアリストテレスの本来の原理を採用して、肉体と靈魂が結合して一人の個人を形成すると主張した。人間は腐敗した卑しむべき肉体に靈魂が一時的に宿ったという存在ではなく、人間は靈魂と肉体が結合した存在であり、その靈魂は肉体の死後も生き続けると強調したのである。

しかし、保守派のパリ司教エティエンヌ・タンピエ(? ~ 1279)らにとってはトマスの主張も危険信号であった。タンピエは1270年12月にヨーロッパ最大のパリ大学で不穏な情勢に決着をつけるべく、実に50余年ぶりにアリストテレスとアヴェロエスの特定の学説の講義を禁止するという決定的な行動をとった。これはシゲルスら学芸学部急進的な教師たちに対する挑戦状であった。パリ大学ではしだいに保守派が勢力を強めていた。1272年学芸学部長の選挙が行われ、シゲルスの対立候補が当選した。しかし、シゲルスらの支持者たちは違法行為があったと訴え、独自の学部長を選出し、パリは嵐に襲われた。

トマスはその時には既にナポリの小修道院に戻っており嵐には巻き込まれなかった。彼は1273年に不思議な体験をし「私はこれ以上著述はしない」「もう書けないのだ。私に新たに啓示されたことに比べると、これまで書いたものはどれも藁くずのように思えるからだ」とし、『神学

大全』を未完のまま残して、1274年に49歳で科学と信仰が相克するこの世を去ってしまった。

11.4.7 アリストテレスの講義禁止の強化：教皇インノケンティウス三世は登位して以来、アリストテレス思想が各地の大学に浸透することに対してある程度寛容な姿勢をとってきた(196頁11.4.4参照)。ところがシゲルスらの急進派は「人間の理性が新たな知識と洞察を獲得するという実に驚嘆すべき可能性」に心を奪われ、「自然の世界に関する新しい知識の洪水」を前にして、「神学を何ら興味を引かないもの」と見なしていた。そのような彼らの教説が伝統的なキリスト教的価値を脅かしつつあることは明らかであった。そこで、1275年グレゴリウス十世(1210~1276、ローマ教皇在位：1271~1276年)の特使はパリ大学のシゲルスらと保守派の争いについて保守派に有利な裁定を下した。

そのような動きは加速し、1277年にはかつてパリ大学神学部で教鞭をとっていた教皇ヨハネス二十一世(1215~1277年、ローマ教皇在位：1276~77)はタンピエに書簡を送り、パリ大学で「信仰を損なう」説が教授されていることの調査を要請した。その結果、タンピエはアリストテレス的な胡散臭い命題をことごとく禁じるために、7年前のたった13箇条ではなく、実に219箇条の命題を禁止リストに載せる大きな網を張り、取締を強化した。特に問題とされたのは、最良の生活は哲学的観想の生活であるという自然哲学を神学より重く見ると解釈されるアリストテレスの学説だった。タンピエの目的は、伝統的なキリスト教の教義とものの見方を自然哲学に対して優越していることを重ねて主張することだった。その主張は必然的に、トマス・アクィナスの「自然神学」への攻撃に発展した。この禁令はアリストテレス革命を粉碎しようとする試みというより、むしろ信仰と理性が別々の軌道に飛び出すのを阻止する努力であったように思われる。

タンピエの禁令から二週間経たないうちに、オックスフォード大学では当時のカンタベリー大司教ロバート・キルウォードビー(1215頃~1279)によって20箇条以上の急進的な命題とともに、トマスの靈魂に関する教説が明確に断罪された。

フランシスコ会士の保守的な神学者ジョン・ペッカム(1230頃~1292)が1280年代にカンタベリー大司教に就任すると、これらの命題の有罪判決は更新され、さらなる命題が禁止リストに追加された。フランシスコ会の影響力は1280年代半ばに頂点に達した。一方、トマス神学を修道会付属学校のカリキュラムの基礎に据えたドミニコ会は、一時は敗北を喫した。

11.4.8 理性と信仰の相克：ボニファティウス八世

(1235～1303、ローマ教皇在位：1294～1303)は西暦1300年を聖年と定めた。そこで多くの人々がローマを訪れたが、当時の社会の実情は聖年祭とは裏腹のものであった。つまり、中世の温暖化のもとで200年以上に亘って続いた経済成長は不景気と停滞のうちに終わりを告げようとしていたのであった。教皇の威厳と宗教的統一という外見の下で、領主と農奴、大貴族と小貴族、傭兵と市民、都市の住人と農村の住人の間の衝突が激化し、社会はしだいに分裂し、混乱の度を深め、暴力的になっていた。中世盛期には楽天的かつ開放的で融和に向かっていった西ヨーロッパ共同体は、いまや「自然災害と社会的混乱」に対して無防備な社会に変貌しようとしていた。

1302年、四面楚歌となった教皇ボニファティウス八世は有名な大勅書「ウナム・サンクトム」を発し、教皇は不従順な王を退位させる権限を有すると主張するとともに、「ローマ教皇に対する服従は全人類の救済のために絶対的に必要であると、我々は断言し、主張し、明確に定める」と宣言した。しかし、ボニファティウス八世は実体を伴わなかった聖年の偽りの夜明けからわずか三年後にローマで永眠した。

ボニファティウス八世の後を継いだフランス人のクレメンス五世(1264～1314、ローマ教皇在位：1305～14)が1309年に教皇庁をアヴィニオンに移し、フランス王が教会の財政と政治を実質的に支配することを認めるに至り、ヨーロッパにおける聖俗の力の均衡が崩れる趨勢は明白になった。それは1378年にアヴィニオンとローマがそれぞれ教皇を擁立し、カトリック教会が「教会大分裂(シスマ)」(1378～1417)に入る前兆であった。

一方、理性と宗教についての論争は続いていた。14世紀になると、フランシスコ会士で卓越したスコラ学者のウィリアム・オッカム(1285頃～1347頃)が、トマス・アクィナスは「自然神学」を定式化しようとした点で過ちを犯したと批判し、科学と宗教は離婚した方が双方とも幸せになれると主張した。このように事物を単純化する傾向は「オッカムの剃刀」、すなわち、概念上の実体を必要なしに多数化してはならないという有名な定理で頂点に達した。その背後には自然科学と神学は別個の道を進むべきであるという彼の信念が隠されていた。自然から神秘性を取り除き、神にふたたび神秘性を付与するというのがオッカムの主張であった。それはトマスがアリストテレスのレンズを通して解釈した「宇宙は、それ自体が神の存在や、神の善性や、創造の意図を明白に物語っている」ことを否定するものであった。オッカムは人間が自然について真に理解するのは普遍的な概念ではなく、個々の事物であり、科学は宇宙を創造した神の意図を明らかにするものではない、神は理性ではなく信仰を

通じてのみ理解出来ると主張した。人間は自然や純然たる理性を通じては神をまったく理解出来ないという彼の主張は、カトリック教会上層部を戦慄させた。というのは、この主張を認めれば、思索することと信じることを離反させてしまうと思われたからだ。

オッカムが批判していたトマスも常に物議をかましていた。実際トマスは、死後の1277年にオックスフォードでその思想が断罪されていた。しかし彼は、それから50年も経たない1323年に、ローマ教会によって列聖された。一方、オッカムは同じ年にアヴィニオンの教皇庁に設けられた委員会に召還された。オッカムの思想は突き詰めると自然の探究者にとっての真理と、神学者および神を崇拝する者にとっての真理が並存するという結論であるとみなされた。そのような彼の思想は1327年に委員会により「異端」・「偽り」・「危険」・「誤謬」・「軽率」・「矛盾」であるとされ有罪判決が下された。

このような教会の動きはあったが、ひとたびヨーロッパ社会に放たれた自然哲学の真理を抑圧することは不可能であった。自然哲学の真理は神学上の真理と同等の関心と信頼を寄せるに値するという見方を押しとどめることは出来ず、キリスト教会上層部はやがて、新しい世界観によるキリスト教思想の変容を容認せざるを得なくなった。彼らはキリスト教神学とアリストテレス科学を結婚させることによって、西欧社会を合理的な真理の探求という価値体系に委ねた。

11.4.9 宗教戦争：理性と信仰の相克は続いていたが、イギリスのジョン・ウィクリフ(1320頃～1384)、ボヘミアのヤン・フス(1369頃～1415)そして最終的にドイツのマルティン・ルター(1483～1546)によって理性と信仰の分離という教会上層部の恐れは現実のものとなってしまった。

マルティン・ルターは教皇制度に心底幻滅し、更に大きな教会分裂の引き金を引くことになった。キリスト教会の一体性は終わりを告げ、ヨーロッパ大陸は宗教戦争の世紀に突入した。マルティン・ルターはスコラ学全般を嫌悪し、とりわけアリストテレスを毛嫌いしていた。彼はその思いを「一言でいうなら、アリストテレスと神の関係は、闇と光の関係に等しい」と簡潔に述べ、さらに、「アリストテレスぬきでは神学者になれないというのは、誤りである。それどころか、アリストテレスぬきではなれないのであれば、誰も神学者にはなれないのだ」と断じた。このようにルターの神学革命によって、理性と信仰の分離が実現した(ここまで主に158に従った)。

宗教的な確執はその後も継続し、修道士ブルーノが異端に問われ火刑に処されたのは1600年であった(164頁5.4参照)

11.4.10 まとめ：西欧における宗教を巡る確執は、フランス・ペーコン(1561～1626)とルネ・デカルト(1596～1650)が高らかに宣言した「科学革命」により新たな段階に突入した。それが近代的とみなしうような合理主義的で、現世主義的で、人間中心主義的で、経験主義的なものの見方を広め、西ヨーロッパ全域で文化戦争に火をつけ、旧来の文化の中核にあった伝統的な宗教心情や社会通念への挑戦を始めたものと捉えられている。そのような「科学革命」による挑戦あるいは信仰と理性の闘争はコペルニクス(1473～1543)の地球中心説への挑戦や、ガリレイ(1564～1642)の異端審問によって始まったというのが通説である。しかし、以上概観したことはそのような新たな動きは、通説とは異なり、12世紀から13世紀にかけてアリストテレスの思想をめぐって交わされた論争に端を発していたことを示している(158)。

そして、現在の我々も「知」と「価値」あるいは「思い」の確執に直面している。

11.4.11 現代との比較：リチャード・ルーベンスティンは、中世の敬虔なキリスト教徒がプラトンを「超俗的」で現世よりも善で真なる世界を求めているものと捉え、経験を重んじる現世主義的なアリストテレスと対比していたとまとめている。即ち彼はアリストテレスが重視される時代は、経済的な成長と、政治的な拡大主義と、文化的な楽観主義が知的な雰囲気彩っている時代であると考えた。一方、対照的に、プラトンが重視される時代は不安と渴望が渦巻いているとした。更に彼は「不安と渴望を生じさせるのは、世界が対立と矛盾で満ちているという直感的な認識である。こうした認識は、解決不能としか思えない個人的な争いや社会的な対立という形で現出する。社会は分断され、健全な社会を実現する道は、暴力的な争いによって断たれている。そして、社会の破綻した状態は個々人の精神に反映される。人々はたがいに分断されていると感じ、自分を支配しているのは理性ではなく、制御不能の本能と欲望に他ならないと感じている。宇宙は全体として悪ではないとしても、そのあるべき姿からかけ離れている。まるで、真の宇宙がどこか別の次元に存在するかのように。中世のプラトン主義者たちは、現実の世界と称されるものは少なくともその一部は幻想に過ぎないという直感的な認識につきまとわれていた。」とルーベンスティンはまとめている(158-87p)。

中世のヨーロッパは温暖期に開墾が進んだ。しかし、その後の小氷期には穀物の生産が打撃を受け、膨張した人口を栄養不足が襲い、蔓延したペストにより人口のおよそ30%が死亡したとも言われている。環境の収容量一杯に膨張した社会は気候変動などの環境変化に対しては脆弱であることを示していると思われる。そのような混

乱した社会の中で人々は新たな世界を模索していかざるを得なかったであろう。

我々の住む今の時代はプラトンあるいはアリストテレスのどちらを求めているのだろうか。

現代は、温暖な心地よい環境に支えられ一部の人はかつての王侯貴族のような暮らしを享受しているが、よく見ると薄氷の下には多くの混乱が渦巻いていることは明らかである。例えば、サブサハラ・アフリカでは小学校に行けない児童は1999年の42%から2008年には24%と改善されているが、まだ全員が小学校に行くことは程遠い。また、そこでは1日1ドル以下で暮らす人が2005年に51%で、それは1999年の58%から殆ど改善されておらず世界の格差は広がっている(160)。しかし、我々は細分化・巨大化する諸分野の全体を把握することが出来ず、問題の解決を図ることなく、日常の暮らしに忙殺されている。

中世の温暖期に一方的に進んだ森の開墾の後に、人々は小氷期に襲われ大きなダメージを受け、大きな犠牲を払いながらも次の時代を切り開いた。しかし、現在、我々は人口の三分の一を失うようなダメージを受けるわけにはいかない。現在はどうみても人々の間には格差が広がり、自然破壊が進み多くの生物や地球が悲鳴をあげていることは確かである(例えば1, 2, 4, 5参照)。それは我々が全体を見通せず、ソクラテスが指摘した「傲慢な独断論」的行為を継続していることからもたらされていると考えられる。

多様な宗教を信じる人々が住む現代の世界で「理性」あるいは「知」と「宗教」を調和させることは難しい。しかし、多様な「宗教」を信じる人の間にも「正義」と「衡平」を実現するという「価値」あるいは「思い」を通底させ、それらを「知」と調和させることで、我々の抱える多くの問題点を軽減させ「正義」と「衡平」を具現させた新たな世界を構築することは可能はずである。

正義あるいは衡平とはなんであるかは、考えつくせない重い問題を含んでいるが、ここでは、①正義とは公正であることを、また②衡平は人間について考えれば、将来世代の権利までを含み格差を少なくすること、あるいは公正な分配を行うこと、また全ての生物にまで広げた場合には、人間は共通の祖先を持つ生物の一員としての立場をわきまえ、慎ましく暮らすべきであることを含意した(環境倫理的な考察については5で多少触れた)。

現代の我々にはプラトンを始め膨大な数の人が考えた「価値」とアリストテレスら無数の人が切り拓き蓄積した「知」の両方が必要であり、さらにそれらを普遍化しなければならない。

この章で問題としようとした「知」と「宗教」あるいは

「目的」との関係については、次回、人間は「進化」の産物であるのか神の「創造」によるものかについてまとめる時に引き続き考察する。

12. まとめ

人類の祖先は狩猟採集をしていた時代から天空を仰ぎ、太陽・月・惑星・恒星の動きに注目していたはずである。古代インドの『リグ・ヴェーダ』の宇宙開闢の歌は無から宇宙が生まれたと、現代のビッグバン宇宙と同じ宇宙観をもっていたとも言える(149頁2.1参照)。古代バビロニア・エジプト・ギリシャの人々も空を眺め、不動の大地の上を巡る宇宙像を確立していった。アリストテレスは移りゆく地上界とは対照的に天界は永遠不滅で不変な世界であるとし、彗星や流れ星のように移りゆくものは月より下の地球との間で起こる気象現象であると考えた。プトレマイオスに代表される肉眼の観察による思弁的な天動説の宇宙観が長い間支配的であったが、ようやく16世紀にコペルニクスが太陽中心説を発表し、17世紀初めにはガリレオが望遠鏡により天空を観察し地動説を強く主張し、新たな宇宙観が生み出されていった。しかし、それらは当時の少数意見であった。その後、ニュートンによる万有引力の発見あるいは大型望遠鏡の観察により新たな宇宙像が作られ、20世紀に入ると宇宙は膨張し続けていること、そして宇宙はビッグバンにより始まったことが明らかにされた。

このような宇宙観は科学・技術の進歩によりもたらされた。肉眼による天空の観察から始まり、望遠鏡による目に見える世界の理解、物理学の発展による天体の運動の理解、目に見える光を成分に分解する研究、更に目に見えない像を電波で捉える技術、そして宇宙探査機による観測が行われた。そのような成果が広まり、専門家でなくてもビッグバンから始まる膨張する宇宙観を共有するようになった。

その宇宙観を要約すると以下のようになる。①宇宙は137億年前に極めて小さな点から始まった。そこでは全ての素粒子は質量を持たず自由に動き回っていたが、ヒッグス粒子¹¹⁷により質量が与えられ新たな世界が展開し始めた。そこは超高温・超高压の状態であったために特異的なことが起こっていた。その後、宇宙は急速な膨張であるインフレーションを起こした。これらの過程は宇宙創成から1秒の 10^{34} 分の1という極めて短時間に起こった。②その後 10^{-12} 秒までに、殆ど無の世界から重力

など、世界を構成する四つの力が分離した。その後の数分間で水素とヘリウムの原子核が出来上がり、多くの物質が生み出される基盤が出来上がった。③宇宙創成38万年後には宇宙の温度は3,000K位まで低下し宇宙が晴れ上がった(それを我々は宇宙マイクロ波背景放射として観測している)。④宇宙誕生後数億年経つと恒星が生まれ、星の内部で炭素から²⁶鉄までの元素が核融合によって作られた。⑤その他の元素は星が死を迎え爆発する時に急速に中性子を獲得することにより、あるいは星の内部でゆっくり中性子を獲得することなどで作られた。

その他、我々はこのようにして始まった我々の宇宙とは別の様々な宇宙が存在する可能性(例えば、162)、あるいは宇宙創成とその直後の世界を統一的に理解する試みのヒモ理論(例えば、163)など、門外漢の理解を超える宇宙に関する研究結果を伝え聞くことも出来る。

これらは巨大化する科学の成果である。筆者のような素人にとってはその細部を批判的に捉える、あるいは網羅的に正確に理解することはとても出来ない。同様に、原子力の利用を含む様々な分野で展開する最先端の研究がどのような範囲に限って真実に迫っているかも捉えることは出来ない。しかし全ての人は、ここで概観した宇宙像の成り立ちの経緯やその全体像の概要を知ることが出来るはずである。そのような「全体を把握する知」は未来を切り拓くために欠かすことが出来ない。またそれは素人を含む全ての人によって共有されなければならない。そのためには専門家には専門の研究を進めるだけでなく、“専門家のムラの言葉や価値観”を捨てて素人に全体像を正しく分かりやすく語りかけることが強く求められている。

宇宙の成り立ちについての我々の理解は大きく変わった。しかし一方、季節の移ろいを知り、暮らすために必要な暦は古代エジプト(151頁2.4.1参照)、古代バビロニア(152頁2.4.3参照)、古代ギリシャ(154頁3.参照)の時代から驚く程正確なものが作られていた。それらは、時に閏月、閏日を入れ、実際の1年と暦のズレを補正する、あるいは太陰暦と太陽暦を補完的に使うなどして日々の生活に支障が出ないようにするために工夫されたものであった。また、ナイル川の氾濫時期を知るための天文観察、氾濫後の土地整備を行うための測量術(151頁2.4.1参照)、あるいはミレトスでは航海を安全に行うための航海術が洗練されていった。このような当時の先端的な科学・技術は当時の暮らしの便益の向上に役立つために、厳密な天空の観察あるいは幾何学を究めた結果である。

¹¹⁷1964年にピーター・ヒッグス(1929～)によって提唱された。2012年にその実在を強く裏付ける観測結果が報告されている(161)。

天動說的宇宙観でも、正確な観測によって地球の運行からもたらされる時・季節の移ろいは正しく認識されており、その限りにおいて科学・技術は実利的な生活、あるいは人々の実感と齟齬はなかった。

現代の巨大化する科学・技術も我々の暮らしの向上に役立つ面を多く持っていることは確かであるが、その全体像を捉えることは容易ではない。また我々が切り拓く知の地平が全てを明らかに出来るかどうか分からない。そのような限定的な「知」を最大限に生かすためには、我々の日々の生活が根ざす「価値観」を再考し、「知」と「価値観」を共存させる必要がある。それは容易ではなく、疎かにされることが多いが、克服しなければならない課題である。「知」とは、例えば宮沢賢治が鉱物に始まり宇宙、生物、人の暮らしと多くの事象に目を向けたように、時空の中に広がる様々なことを理性的に理解することである。彼は雨にも負けずの中で「よく見聞し分かり」と言っている。

結語

繰り返しもあるが、強調したいことを最後にまとめる。

我々は、細部は理解出来ないまでも、①宇宙がある時に誕生し、膨張し続けていることを理解している。また我々は、②太陽・地球・我々を含む全てのものを構成する元素はビックバン・輝く星・星が死滅した時に作られたこと、即ち万物は、宇宙空間にまき散らされたガスあるいは星屑となったものが再び集まって生まれたものであることを知っている。これらのことは、我々が確かに星屑からなる循環する宇宙の一員であること、宇宙では星の誕生と死の繰り返しにより新たな宇宙・世界が造られていることを強く実感させてくれる。

更に、我々は、③地球が、宇宙に存在する1,700億程の銀河（一つの銀河には1000万～100兆個の恒星が存在する）の一つである天の川銀河に存在する一つの恒星である太陽の周りを回る惑星であることも理解している。加えて我々は、④その地球はたまたま生命が存在出来る条件が揃い、そこで我々は太陽のエネルギーに支えられて多くの仲間の生物たちと生きているということもはっきりと認識している。このような理解・実感・認識は我々が恵与された環境と命を引き継いで行かなければならないことを確信させてくれる。

この先、宇宙は膨張を続けるのかどうか、地球でいつまで生命が生存出来るのかも分からない。また宇宙を構成する主要なものであるダークマターやダークエネルギーについてはほとんど不明であるし、数億年先あるいは数万年先のことは想像さえ出来ない。

しかし、我々は引き継いだ命を、責任をもってリレーをする為に、最低でも100～200年程度先のことを射程に置くことは出来るはずである。

ギリシャ時代には「徳」あるいは「正義」と「知」の乖離が、そして中世ヨーロッパでは「理性と信仰の離婚」が起こった。そして、我々は急速に発展する科学・技術に支えられた社会にあって「ビジョンの欠如」・「正義を語ることへの躊躇」・「知の共有の不可能性」に苛まれている。しかしこの困難を克服するためには「巨大化・細分化する科学・技術・経済など多くの対象に対する限定的な知」を大きく捉え、「正義」・「平衡」（例えば1, 2, 4, 5参照）を強く意識し、ビジョンを構築する必要がある。

ソクラテスの言うように「知」は限定的なものにならざるを得ない。しかし、我々の営為はそのような「知」なしには成り立たない。我々に課されていることは、①「知」の限界を意識しながらも「個別の知」の地平を広げること、②その「個別の知」を「全体を把握する知」へ総合化すること、③そのような「全体を把握する知」の肝心なところを文化伝統の違う人々の間で共有出来るようにすること、④そして全ての人が協力して、ともすれば乖離しがちな「知」と「思い」を調和させたものとしての「全体的な知」に「思い」を統合したものを「叡智」として確立することであると考えられる。

「思い」とは、自ずと我々の心に浮かぶことや希望・願いを含むものである。例えば3・11の大震災の津波や原発の事故に際して我々が直知したようなこともその一つである。人間は考えてから行動するより、直感に従った方がより協力的な行動をとることが多いという調査結果も報告されている（164）。そのような直知的な「思い」あるいは「観と感」で「知」を補完することが重要である（詳しくは2参照）。例えば水俣病について考えれば、水俣病の原因はチッソの工場排水に含まれていた有機水銀が原因であるということが1959年には明らかにされていた。しかし、我々は経済の発展あるいは利便性を求める欲望の追求を優先してしまい、水俣でのチッソの生産活動を放置し被害を拡大させてしまった。その被害者である胎児性患者は今では50歳を過ぎ、支えてくれた家族が他界する中で苦しんでいるという悲惨な現実が続いている（詳しくは2参照）。このことは、1959年には「個別の知」として存在していたものを「全体的な知」、更に「叡智」とすることが出来なかったことを示している。そして今回の福島原発事故を考えた時に「個別の知」がどのように存在していたかは今後の検証を待たねばならないが、素人が直感出来ることは、筆者を含め多くの人が水俣病など過去の多くの事例が示していた「全体的な知」を考えることが重要であるという構造的教訓に学ばず、

今回も全体を深く考えず利便性を優先させたということである。

このような反省に立って、現在警告がなされている多くの問題をもう一度上述した観点から見直す必要がある。即ち、「個別の知」から「全体的な知」を作り、更にそれを「思い」と調和させた「叡智」の構築に果敢に取り組み、我々の生き様を選択する必要がある。「知」は地球を救う主要な礎で、「知は地球を救いうる」はずである。

謝 辞

高木信一さんには荒削りな草稿を読んでいただき広い視野から大変貴重なご助言を賜りました。多くの方々のご援助に心から感謝いたします。

文 献

(紙幅を節約する為に、Astrophysical Journal は *As J*、Nature は *N*、Proceedings of the National Academy of Sciences は *PNAS*、Science は *S* と省略した。)

1. 白田秀明. 2009. 知は地球を救う 1. はじめに — 豊かな生命と環境の世紀をめざして — 帝京大学文学部教育学部紀要 34 : 97-104.
2. 白田秀明. 2012. 知は地球を救う 5. 我々の暮らしと地球への負荷 — 目を閉じて全体を静かに心で見よう — 帝京大学文学部教育学部紀要 37 : 161-260.
3. 白田秀明. 2009. 知は地球を救う 2. 人類の進化 700万年 — 予断に捉われないことの難しさ — 帝京大学文学部教育学部紀要 34 : 105-144.
4. 白田秀明. 2010. 知は地球を救う 3. 作物の栽培化から遺伝子組み換え作物まで — 豊かさの広汎化と豊かな多様性・地域性の併存を目指して — 帝京大学文学部教育学部紀要 35 : 123-180.
5. 白田秀明. 2011. 知は地球を救う 4. 森と人 — 森と人の共生から多様な生命が集う生態系の保存をめざして — 帝京大学文学部教育学部紀要 36 : 79-152.
6. Wu L & Dickman JD. 2012. Neural correlates of a magnetic sense. *S*. 336: 1054-1057.
7. 国立天文台. <http://www.nao.ac.jp/QA/faq/a0404.html>
8. 大久保修平編. 2004. 日本測地学会. 『地球が丸いつてほんとうですか?』朝日新聞社.
9. Arbab I. 2009. The length of the day: A cosmological perspective. *Progress in Physics* 1: 8-11.
10. Wells JW. 1963. Coral growth and geochronometry. *N*. 197: 948-950.
11. Ishiura M, et al. 1998. Expression of a gene cluster kaiABC as a circadian feedback process in cyanobacteria. *S*. 281: 1519-1523.
12. Taniguchi Y, et al. 2010. Three major output pathways from the KaiABC-based oscillator cooperate to generate robust circadian kaiBC expression in cyanobacteria. *PNAS*. 107: 3263-3268.
13. Matthew J. Paul MJ & Schwartz WJ. Circadian Rhythms: How does a reindeer tell time? *Current Biology* 20: R280-R282. 2010.
14. Lu W, et al. 2010. A circadian clock is not required in an Arctic mammal. *Current Biology* 20: 533-537. 2010.
15. Bass J & Takahashi JS. 2010. Circadian integration of metabolism and energetics. *S*. 330: 1349-1354.
16. ミズン・スティーヴン. 1998. 『心の先史時代』青土社.
17. 国立天文台. 2011. 『平成24年理科年表』丸善出版.
18. 中村士. 2008. 『宇宙観の歴史と科学』放送大学教育振興会.
19. 杉山直. 2011. 宇宙の進化と運命. pp206-229. 『新訂 進化する宇宙』(海部宣男、吉岡一男.) 放送大学教育振興会.
20. 辻直四郎 訳. 1970. 『リグ・ヴェーダ賛歌』岩波書店. 1970.
21. 海部宣男、吉岡一男. 2011. 『新訂 進化する宇宙』放送大学教育振興会.
22. Marshack A. 1991. The Taï plaque and calendrical notation in the upper paleolithic. *Cambridge Archaeological J* 1: 25-61.
23. Vanhaeren M, et al. 2006. Middle paleolithic shell beads in Israel and Algeria. *S*. 312: 1785-1788.
24. 近藤二郎. 1985. ナイル川流域の新石器文化の展開 — ナブタ初期新石器文化を中心に —. *史観 (早稲田大学史学会)*. 113 : 70-84.
25. Malville JM, et al. 2007. Astronomy of Nabta Playa. *African skies/Cieux Africains*. 11: 2-7.
26. アレキサンダー・キャロライン. 沈黙の巨石ストーンヘンジの謎. *National Geographic (日本版)* 14(6) : 34-59. 2008
27. コーネル・ジェイムズ. 1986. 『天文学と文明の起源』白揚社.
28. Hawkins GS. 1963. Stoneheng decoded. *N*. 200: 306-308.

29. 桜井邦朋. 2007. 『新版 天文学史』筑摩書房.
30. Thompson GD. D: Early Mesopotamian constellations. <http://members.westnet.com.au/Gary-David-Thompson/page11-4.html>
31. Rogers JH. 1998. Origins of the ancient constellations: I. The Mesopotamian traditions. *J Br Astron Assoc.* 108: 9-28.
32. 前川光. 2000. 『星座の秘密』恒星社厚生閣.
33. ファリントン・B. 1955. 『ギリシヤ人の科学 (上)』岩波書店.
34. リュッタン・マルグリット. 1962. 『バビロニアの科学』白水社.
35. マーディン・ポール. 2012. 『宇宙の謎』岩波書店.
36. 中山茂. 1982. 『天文学史』恒星社.
37. クーパー・ヘザー、ヘンベスト・ナイジェル. 2008. 『天文学の歴史』東洋書林.
38. 桜井万里子、本村凌二『世界の歴史 5 ギリシアとローマ』中央公論社. 1997.
39. 青木満. 2009. 『それでも地球は回っている』ベレ出版.
40. アリストテレス. 1959. 『形而上学 (上)』岩波書店
41. ファリントン・B. 1955. 『ギリシヤ人の科学 (下)』岩波書店.
42. 田中美知太郎. 1957. 『ソクラテス』岩波書店.
43. アリストテレス. 1961. 『政治学』岩波書店.
44. 矢島道子、和田純夫. 2004. 『はじめての地学・天文学』ベレ出版.
45. 田中美知太郎『アリストテレスの思想と生涯』. 世界の名著8. アリストテレス. 中央公論社. 1972.
46. ガリレオ・ガリレイ. 1976. 『太陽黒点に関する第二書簡』岩波書店『星界の報告』他一篇に集録.
47. Freeth T, et al. 2006. Decoding the ancient Greek astronomical calculator known as the Antikythera Mechanism. *N.* 444: 587-591.
48. スリッヘル・ファン・バート. 1969. 『西ヨーロッパ農業発達史』日本評論社.
49. ウォーカ・クリストファー. 2008. 『望遠鏡以前の天文学』恒星社厚生閣.
50. Hobden H. 1999. Ulughbek and his observatory in Samarkand. <http://www.cosmicelk.net/UlughbekandhisObservatoryinSamarkand.pdf>
51. Westman RS. 2011. 『The Copernican question』University of California Press.
52. 高橋義人『魔女とヨーロッパ』岩波書店. 1995.
53. 清水純一. 1972. 『ルネサンスの偉大と頹廃』岩波書店.
54. 清水純一. 1970. 『ジョルダノー・ブルーノの研究』創文社.
55. ハレ、R. 1984. 『世界を変えた20の科学実験』産業図書.
56. 福江純、北原菜里子. 1994. 『ほくだってアインシュタイン1. 月とリンゴの法則』岩波書店.
57. ガリレオ・ガリレイ. 1976. 『星界の報告』岩波書店.
58. 河辺六男. 1971. 『ニュートンの十五枚の肖像画』世界の名著26 (編集 河辺六男). 中央公論社.
59. ニュートン・アイザック. 1971. 自然哲学の数学的諸原理. 世界の名著26 (編集 河辺六男). 中央公論社.
60. 海部宣男、吉岡一男. 2009. 『宇宙を読み解く』放送大学教育振興会.
61. 斎藤一夫. 1982. 『元素の話』培風館.
62. 宮本英昭、橘省吾、横山広美. 2009. 『鉄学 137億年の宇宙誌』岩波書店.
63. Crosswell K. 『The alchemy of the heavens』Anchor Books. New York. 1995. 166p
64. Suess HE, Urey HC. 1956. Abundances of the elements. *Rev Mod Phys* 28: 53-74.
65. Urey HC. 1967. The abundance of the elements with special reference to the problem of the iron abundance. *Q J Roy Astron Soc* 8: 23-47.
66. Anders E &, Ebihara M. 1982. Solar-system abundances of the elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 46: 2363-2380.
67. Bethe HA. 1939. Energy production in stars. *Physical Review* 55: 434-56.
68. Von Weizsäcker. 1938. Über Elementumwandlungen im Inneren der Sterne, II. *Physik. Z.* 39: 633-646.
69. シン・サイモン. 2006. 『ビッグバン宇宙論下』新潮社.
70. 蜂巢泉明. 2011. 超新星爆発と元素の進化. pp80-91. 『新訂 進化する宇宙』(海部宣男、吉岡一男.) 放送大学教育振興会.
71. Avishay G Y. Luminous Supernovae. *S.* 337: 927-932. 2012.
72. McKay D S, et al. 1996. Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001. *S.* 273: 924-930.
73. Eriita G. Jones, et al. 2011. An extensive phase space for the potential Martian biosphere. *Astrobiology* 11: 1017-1033.
74. 吉川真. 2010. 太陽系の果て. pp174-187. 『太陽系の科学』(海部宣男、吉岡一男.) 放送大学教育振興会.
75. 福江純、北原菜里子. 1994. 『ほくだってアインシュ

- タイン2. おくれる時計のふしぎ』岩波書店.
76. バトゥーシャク・マーシャ. 2011. 『膨張宇宙の発見』地人書館.
 77. Leavitt HS. 1908. 1777 Variables in the magellanic clouds. *Ann Harvard College Observatory* LX(IV). 87-110.
 78. Pickering EC. 1912. Periods of 25 variable stars in the small Magellanic cloud. *Harvard College Observatory Circular* 173: 1-3.¹¹⁸
 79. 谷口義明. 2011. 一般の銀河. pp120-133『新訂 進化する宇宙』(海部宣男、吉岡一男.) 放送大学教育振興会.
 80. Johnson G. 2005. 『Miss Leavitt's stars』Atlas Books. WW Norton & Company.
 81. Trumpler RJ. 1930. Absorption of light in the galactic system. *Astronomical Society of the Pacific* 42: 214-227.
 82. Hubble EP. 1925. Cepheids in spiral nebulae. *American Astronomical Society*. 5: 261-264.
 83. Humason M. 1929. The large radial velocity of N.G.C. 7619. *PNAS*. 15: 167-168.
 84. Hubble E. 1929. A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. *PNAS*. 15: 168-173.
 85. ハッブル. 1999. 『銀河の世界』岩波書店.
 86. John P. Huchra. The Hubble constant.
<https://www.cfa.harvard.edu/~dfabricant/huchra/hubble/>
 87. Jarosik N, et al. 2011. Seven-year Wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) observations: Sky maps, systematic errors, and basic results. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 192: 14-28.
 88. Livio M. 2011. Mystery of the missing text solved. *N*. 479: 171-173.
 89. Lemaitre G. 1931. The beginning of the world from the point of view of quantum theory. *N*. 127: 706.
 90. Alpher RA, et al. 1948. The origin of chemical elements. *Physical Rev.* 73: 803-804.
 91. Gamow G. 1948. The evolution of the universe. *N*. 162: 680-682.
 92. チャウン・マークス. 2000. 『僕らは星のかげら』無名舎.
 93. Chamberlain JW & Aller LH. 1951. The atmospheres of A-type subdwarfs and 95 Leonis. *As J.* 114: 52-72.
 94. Schwarzschild M, et al. 1951. On the difference in chemical composition between high- and low-velocity stars. *As J.* 114: 398-406.
 95. Salpeter EE. 1952. Nuclear reactions in stars without hydrogen. *As J.* 115: 326-328.
 96. Cameron AGW. 1955. Origin of anomalous abundances of the elements in giant stars. *As J.* 121: 144-160.
 97. Burbidge M, et al. 1957. Synthesis of elements in stars. *Rev Mod Phys* 29: 547-650.
 98. Wallerstein G, et al. 1997. Synthesis of the elements in stars: forty years of progress. *Rev Mod Phys* 69: 995-1084.
 99. Schatz H et al. 2001. End point of the rp process on accreting neutron stars. *Phys Rev Lett* 86: 3471-3474.
 100. Mitler HE. 1970. Cosmic-ray production of deuterium, He3, lithium, beryllium, and boron in galaxy. *SAO Special Report* #330.
 101. Howk JC, et al. 2012. Observation of interstellar lithium in the low-metallicity small Magellanic cloud. *N*. 489: 121-123.
 102. Alpher RA & Herman R. 1948. Evolution of the universe. *N*. 162: 774-775.
 103. Peebles PJE. 1966. Primeval helium abundance and the primeval fireball. *Phys Rev Lett* 16: 410-413.
 104. チャウン・マークス. 2011. 『宇宙誕生』筑摩書房.
 105. Dicke RH et al. 1965. Cosmic black-body radiation. *As J.* 142: 414-419.
 106. Penzias AA & Wilson RW. 1965. A measurement of excess antenna temperature at 4080Mc/s. *As J.* 142: 419-421.
 107. Bogges NW, et al. 1992. The COBE mission: Its design and performance two years after launch. *As J.* 397: 420-429.
 108. Seife C. 2003. Illuminating the dark universe. *S*. 302: 2038-2039.
 109. 杉山直. 2011. 宇宙の階層構造. pp194-205. 『新訂 進化する宇宙』(海部宣男、吉岡一男.) 放送大学教育振興会.
 110. 佐藤勝彦. 2010. 『宇宙137億年の歴史』角川学芸出版.
 111. Sato K. 1981. First-order phase transition of a vacuum and the expansion of the universe. *Mon*

¹¹⁸ リービットによってなされたと言頭に述べられている。

- Not R astr Soc* 195: 467-479.
112. Guth AH. 1981. Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems. *Phys Rev D* 23: 347-356.
 113. NASA. 2011. NASA telescopes help discover surprisingly young galaxy.
http://www.nasa.gov/home/hqnews/2011/apr/HQ_M11-109_Young_Galaxy.html
 114. Bouwens RJ, et al. 2011. A candidate redshift $z < 10$ galaxy and rapid changes in that population at an age of 500Myr. *N. 469*: 504-507.
 115. Zheng W, et al. 2012. A magnified young galaxy from about 500 million years after the Big Bang. *N. 489*: 406-408. 2012.
 116. http://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/science/xdh.html
 117. 国立天文. 2012. <http://www.nao.ac.jp/news/science/2012/20120424-subaru.html>
 118. Frebel A, et al. 2007. Discovery of HE 1523-0901, a strongly r-process-enhanced metal-poor star with detected uranium. *As J.* 660: L117.
 119. Weinberg MD & Blitz L. 2006. A Magellanic origin for the warp of the galaxy. *Astrophys J Lett* 641 : L33-L36.
 120. Walsh D, et al. 1979. 0957 + 561 A, B: twin quasistellar objects or gravitational lens? *N. 279*: 381-384.
 121. Hillebrandt W & Niemeyer JC 2000. Type IA supernova explosion models. *Annu Rev Astron Astr.* 38 : 191-230.
 122. Perlmutter S et al. 1999. Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae. *As J.* 517: 565-86.
 123. Riess AG et al. 1998. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. *Astron J.* 116: 1009-38.
 124. Riess AG et al. 2001. The faintest known supernova: support for an accelerating universe and a glimpse of the epoch of deceleration. *As J.* 560: 49-71.
 125. Gehrels N, Mészáros P. 2012. Gamma-ray bursts. *S.* 337: 932-936.
 126. <http://www.astroarts.co.jp/news/2007/02/23sn1987a/index-j.shtml>
 127. Hewish A. et al. 1968. Observation of a rapidly pulsating radio source. *N. 217*: 709-713.
 128. Pacini F. 1967. Energy emission from a neutron star. *N. 216*: 567-568.
 129. 蜂巢泉. 2011. 恒星の進化と終末. pp66-79. 『新訂 進化する宇宙』(海部宣男、吉岡一男.) 放送大学教育振興会.
 130. Fender R & Belloni T. 2012. Stellar-mass black holes and ultraluminous X-ray sources. *S.* 337: 540-544. 2012.
 131. M. Volonteri. 2012. The formation and evolution of massive black holes. *S.* 337: 544-547.
 132. Hazard C. et al. 1963. Investigation of the radio source 3C 273 by the method of lunar occultations *N. 197*: 1037-1039.
 133. Schmidt M. 1963. 3C 273: A Star-like object with large red-shift. *N. 197*: 1040.
 134. Mortlock DJ, et al. 2011. A luminous quasar at a redshift of $z = 7.085$. *N. 474*: 616-619.
 135. Bombaci I. 1996. The maximum mass of a neutron star. *Astron Astrophys.* 305: 871-877.
 136. 東京大学博物館. 隕石.
http://www.um.u-tokyo.ac.jp/DM_CD/DM_CONT/INSEKI/HOME.HTM
 137. Canup RM, Asphaug E. 2001. Origin of the moon in a giant impact near the end of the earth's formation. *N. 412*: 708-712.
 138. Cameron AGW & Ward WR. 1976. The origin of the moon. *Lunar Sci* 7: 120-122.
 139. Benz W, et al. 1986. The origin of the moon and the single-impact hypothesis I. *Icarus.* 66: 515-535.
 140. 海部宣男、吉岡一男. 2010. 『太陽系の科学』放送大学教育振興会.
 141. Cowen R. Voyager's long goodbye. 2012. *N. 489*: 20-21.
 142. Decker RB et al. 2012. No meridional plasma flow in the heliosheath transition region. *N. 489*: 124-127.
 143. Tully RB. 2012. Collision course. *N. 488*: 600-601.
 144. Sohn S T et al. 2012. The M31 velocity vector. I. Hubble space telescope proper motion measurements. *As J.* 753: 7.
 145. van der Marel RP et al. 2012. The M31 velocity vector. II. Radial orbit towards the milky way. *As J.* 753: 8.
 146. van der Marel RP et al. 2012. The M31 velocity vector. III. Future milky way-M31-M33. *As J.* 753: 9.
 147. Vogt SS, et al. 2010. The Lick-Carnegie exoplanet

- survey: A 3.1 M_{\oplus} planet in the habitable zone of the nearby M3V star Gliese 581.
http://www.ucolick.org/~vogt/ms_press-1.pdf
148. Forveille T, et al. 2011. The HARPS search for southern extra-solar planets. XXXII. Only 4 planets in the Gl 581 system. Submitted to Astronomy & Astrophysics arXiv: 1109.2505v1.
<http://arxiv.org/pdf/1109.2505v1.pdf>
149. Bhattacharjee Y. 2012. Data dispute revives exoplanet claim. *S.* 337: 398. 2012.
150. Dumusque X, et al. 2012. An Earth-mass planet orbiting α Centauri B. *N.* 491: 207-211.
151. NASA. http://www.nasa.gov/mission_pages/msl/index.html
152. アリストパネス『雲』世界古典文学全集12巻 89-129p. 筑摩書房. 1964.
153. デイオゲネス・ラエルティオス. 1984. 『ギリシア哲学者列伝 (上)』岩波書店.
154. プラトン. 2001. 『ソクラテスの弁明』中央公論新社.
155. 田中美智太郎. 1969. 「『国家』篇について」世界の名著7プラトンⅡ. 中央公論社.
156. プラトン. 1969. 『国家』世界の名著7プラトンⅡ. 中央公論社.
157. アリストテレス. 1961. 『政治学』岩波書店.
158. ルーベンス・リチャード. 2008. 『中世の覚醒』紀伊国屋書店.
159. トマス・アキナス. 1993. 『中世思想原典集成』, pp. 503-583. 平凡社.
160. UN. 2010. The millennium development Goals Report 2010.
161. The ATLAS collaboration. 2012. Observation of a new particle in the search for the standard model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. Submitted to Physics Letters B 31 Jul 2012 arXiv: 1207.7214v1
162. ブライアン・グリーン. 2011. 『隠れていた宇宙』早川書房.
163. ブライアン・グリーン. 2001. 『エレガントな宇宙』草思社.
164. Rand DG, et al. 2012. Spontaneous giving and calculated greed. *N.* 489: 427-430.