

我 等 を め ぐ る 宇 宙

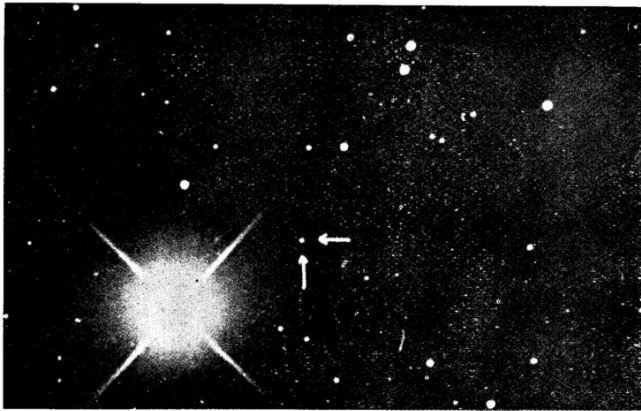
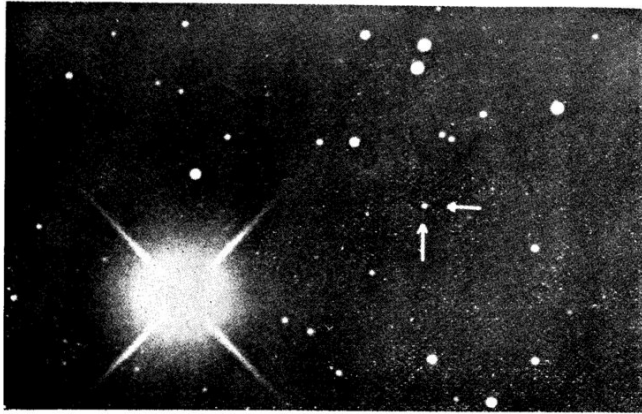
我等をめぐる宇宙

「E・ジーンズ」著

我 等 を め ぐ る 宇 宙

賀川 豊彦 譯
鍵田 研一 譯

我 等 を め ぐ る 宇 宙



ローエル天文臺

新遊星冥王星の發見

この二つの寫眞は、1930年3月2日及び3日の夜に、ローエル天文臺で撮影されたものである。矢で示した星は、前の夜・後の夜とでは非常に位置を變へてゐた。それに依つて、この星は遊星的性質を持つてゐることがわかつた。

下の左手隅のある輝かしい星は、双子座 δ 星である。

初版序文

本書は、近代天文学の観測的及び理論的研究の方法と結果を、單純な言葉で簡潔に書いたものである。宇宙創成論や進化に關する諸問題、宇宙の一般的構造などには、特別の注意を拂つて置いた。私の理想は、本書全體を、特殊な科學的知識のない読者にも納得出来るやうに書くことであつたが、多分さう出来ない部分もあつたらう。

本書の諸部分には、私が最近大學でした講義や、他の聴衆にした講義が、色々と取り入れてある。その中には昨年の秋やつたラヂオ演説も這入つてゐる。しかしこれ等は殆んど全部書き換へる必要があつたので、原形のまゝで取り入れた文章は極く稀である。尤も、私の講義やラヂオ演説を出版してくれと言つた人々が、讀んで見てもその實質はちゃんと本書に含まつてゐると思ふ。

一九二九年五月一日

ドーキングにて

ゼー・エイチ・ジーンズ

再版序文

再版の準備をするに當つて、私は、手紙をよこしたり、批評をしてくれた人々の意見を澤山利用した。それ等の人々にここで衷心から感謝したい。それからまた、新遊星冥王星や、銀河の自轉や宇宙の外観上の膨脹や、その他初版の出版以來重要になつて來た諸問題に關する議論も取りへれて本書が時代遅れにならないやうに努めた。

一九三〇年八月二日

ドーキングにて

ゼー・エイチ・ジョンス

我 等 を め ぐ る 宇 宙

序論 天文學の研究

一六二〇年一月七日、即ち人類にとつての運命的な夕べに、パドヴァ大學の數學教授ガリレオ・ガリレイは、自分の手で造つた望遠鏡の前に腰をおろした。

これより三世紀以上も前に、眼鏡の發明者ロガー・ベイコンは、望遠鏡をどんな構造にすれば『星々を思ひ通り近く見えるやうにする』ことができるかを説明した。レンズをどんな形にすれば遠い物象からその上に落ちて来る光線を悉く集め、それを屈曲させて一つの焦點に集中させ、瞳を通つて網膜に届かせることができるかを彼は示した。さういふ道具は人間の眼の力を増すであらう。丁度、耳筒が、大きな孔に落ちて来る音波を悉く集め、それを屈曲させ、それを耳の孔を通つて鼓室に届かせることに依つて、耳の力を増すやうに。

然も、最初の望遠鏡がフランダーズの眼鏡製造者リパーシェイに依つて組立てられたのは、やつと一六〇八年になつてからであつた。この道具のことを聞くと、ガリレオはその構造の諸原理を發見しようとして仕事に取りかかり、間もなく自分で最初のものよりも遙かにすぐれた望遠鏡を造つ

た。彼の造つたこの道具は、イタリアに少なからぬ人氣を起した。その道具の力が常のものではなかつたので、彼はそれをヴェニスへ持つて行つて總督と元老院に見せるやうに命じられたといふ噂までが擴がつた。ヴェニスの市民は、その時、元老院議員の中の一、二年長の者が、遠い海を走る、肉眼ではちつとも見えない船を、その望遠鏡で見つけようとして、一番高い鐘樓によぢ登るのを見た。その望遠鏡は肉眼の百倍ばかりも光を受けた。そして、ガリレオに従へば、それは五十哩も向うにある物象を只の五哩しか離れてゐない場合と同じほどはつきり見せた。

殊更言ふ必要もあるまいが、これは近代の道具の力と比べれば全く取るに足らぬ。カリフォルニアのネルソン山にある口径百吋の望遠鏡、現存する最大の望遠鏡は、ガリレオの小つぽけな道具の二千五百倍も光を受け、従つて肉眼の二十五萬倍も光を受ける。二百吋の望遠鏡がカリフォルニアにできるのも間もないことだらうと思ふ。これは、百吋の道具の**四百倍**、即ち肉眼の約百萬倍の光を受けるであらう。

新しい道具に非常な興味が湧いたので、ガリレオの心からは、彼が一度考へ抜いた問題が殆んど消えてしまつた。二千年以上も前に、ピタゴラスとフィロラウスは、地球は空間に固着してゐないで、二十四時間毎に自轉し、かくして晝と夜を交替させると教へたものであつた。恐らくギリシャの數學者たちの中で最も偉大であつたサモスのアリストアルクスは、更にかう主張した。地球は自轉

するばかりでなく、一年ばかりで太陽の周囲を運行する。これが四季の循環する原因である、と。

その時分、これらの教理は人々に嫌はれた。アリストテレスの如きは、それに反対して、地球は宇宙の一定の中心となつてゐると主張した。もつと後に、トレミイは、空をわたるもろくの遊星の進路、一つの複雑な週期及び周轉圓體系に従つて説明した。即ち、遊星は運動する點の周囲の圓形通路に於いて運動し、この點そのものは不動の地球の周囲の圓に於いて連動するといふのであつた。教會はこれらの教理に認可と活潑な支持とを與へた。實際、教會がそれ以外にどんな事をなしたかを見るのは困難であつた。といふのは、神の子自身が參與した、人間の墮落と贖罪といふ大戲曲が、宇宙の中心そのものより少しでも小さい舞臺で演じられたと想像するのは、殆んど不敵な事であるやうに思はれたからである。

然も、教會に於いてさへ、例の教理は皆が皆受け容れるものとはならなかつた。例へば、クサの主教ニコラスは、一四四〇年に次のやうに書いた。

『この地球は固着しないで、他の星々のやうに運動してゐる、と私は長い間考へてゐた。私の考へでは、地球は一晝夜毎に一度自轉する。』

もつと後の時代に、さういふ見解は教會から激しい敵對を受けた。そして一六〇〇年に、ジョルダノ・ブルーノは火刑に處せられた。彼に對して數へ上げられた罪の一つは、彼が『無數の世界』

を信じてゐることであつた。彼は次のやうに書いたのであつた。

『一つの有限世界を創造する神の善性と力は、それ以外にも別の世界を無限に造り出し得るとすれば、私にとつては無價値な事のやうに思はれた。そのために、私は地球に類似した特殊な世界が無限に存在すると言明した。ピタゴラスと共に、私は地球を一つの星と見做してゐる。そしてこれに類似してゐるのは、月や遊星やその他の星々である。そしてこれらの物體も悉く世界である。』

然しながら、正統派の教理に對する最も重大な攻撃が持ち出されたのは、神學者達に依つてでもなければ哲學者達に依つてでもなくて、實にポーランドの天文學者ニコラウス・コペルニクス（一四七三—一五四三年）に依つてであつた。自らの大著述 *De revolutionibus orbium coelestium* の中で、コペルニクスは次のやうに述べた。即ち、トレミイが念入りに作つた週期及び周轉圖の構造は不必要である、なぜなら、空をわたる遊星の進路は、全く簡単に、地球やまろくの遊星は悉く一つの固着した中心太陽の周圍で運動するなどと想像することに依つて證明され得るものではないからである、と。この著書が出版されてから六十六年の間、これらの學説は熱心に討論されたが、依然として説明されもしなければ反證を上げられもしなかつた。

ガリレオは自分の新しい望遠鏡が天文學上の諸學説を試験する一つ的手段となることを既に見出してゐた。彼がそれを天の河に向けるや否や、その性質と構造に關する多くの神話やお伽噺は一

つ残らず消えてしまつた。それは空の黒い背景の上に黄金色の塵のやうに散在してゐる微光星の群に外ならないことがわかつた。同じ望遠鏡で月を見ると、その眞の性質が現はれた。月の表面には影を投げる山々があり、従つて、ジョルダノ・ブルーノが主張したやうに、月も地球と同じやうな一つの世界であることがわかつた。地球は宇宙の中心となつてゐるといふ正統派の教理と、地球は蠟燭の焰に集まる蛾のやうに太陽の周囲を廻る多くの物體の一つにすぎないといふ新教理とのどちらが正しいかを、その同じ望遠鏡が何らかの仕方で證明し得るとしたら、どうであらうか？

ところで、ガリレオは、自分の望遠鏡の視野に木星を捉へて、四つの小さな物體がこの遊星の大きな塊の周囲を廻つてゐるのを見た——それは丁度蛾が蠟燭の焰のぐるりを飛び廻つてゐるやうであつた。彼が見たものは、コペルニクスが想像したやうな太陽系の正確な寫しであつた。そしてそれは、そういう系統は少なくとも宇宙の建築計画に縁のないものではないといふ直接の視覚的證明を提供した。一月三十日に、彼はベリサリオ・ヴィンクに宛てて次のやうに書き送つた。これらの小さな物體はそれよりも遙かに大きな木星の塊の周囲を廻つてゐる。『丁度、金星や水星、また恐らく他のものゝ遊星が、太陽の周囲を廻つてゐるやうに、』と。

ガリレオが自分の發見の意味について感じたかも知れないためらひ氣味の疑惑は、それから九ヶ月たつて、彼が金星の盈虧を観察した時に取り除かれた。金星は恐らく自己發光してゐるであらう。

その場合には、金星はいつも一つの完全な光圓に見えるであらう。若し金星が自己發光するのでなく、たゞトレミイ式周轉圓に於いて運動するのであつたら、トレミイが自ら指摘したやうに、金星の表面は決して半分以上光つて見える筈はない。他方で、太陽系に關するコペルニクスの見解に従へば、金星も水星も、月と同じやうな『盈虧』を示して、その光り輝く表面が、外見上、三日月形から半月を経て滿月に達し、それからまた半月を経て滿月に還らなければならなかつた。金星がさういふ盈虧を示さなかつたことは、實際、コペルニクス説に對する一つの反對論として主張されたのであつた。

ガリレオの望遠鏡に依ると、コペルニクスが既に豫言したやうに、金星は盈虧の循環期をすつかり經めぐる事がわかつた。そのために、ガリレオ自身の言葉で云へば、我々は『今日まで最大の智者たちが論じ合つて別々の結論に達した二つの非常に重大な問題について、最も明確な、そして我々の感官證據に訴へる、一つの決定を與えられる。問題の一つは、もろくの遊星は自己發光しないといふことである。もう一つは、金星も水星も、他の凡ての遊星と同じやうに、太陽の周圍を公轉するといふことである。これは實にピタゴラス學派やコペルニクスやケプラーに依つて信じられた一つの眞理ではあるが、しかし、金星と水星の場合のやうに、我々の感官證據に依つて證明されたことはないのである。』

ガリレオのこれらの發見に依つて、アリストテレスや、トレミイや、過去二千年に、これらの事柄について考へた人々の大多數は、全然誤つてゐたことが明かになつた。宇宙に於ける自己の地位を評價するに當つて、人間は今までは主に自分自身の欲望と自己尊敬に依つて導かれた。長い間無限の希望を食物にしてゐたので、人間は忍耐強い科學的思想に依つて提供される一層單純な食物を鼻先であしらつた。ところが、もろくの無常な事實は、今や人間を、自分で勝手に宇宙の中心に置いた地位から引きずりおろした。それ以後、彼は地球といふ一粒の塵の住民としての見すばらしい地位に甘んじて人間生活の意味に關する自分の諸見解をそれに従つて整理しなければならなくなつた。

整理は直ぐには行はれなかつた。教會の強權に依つて強いられた人間の虚榮に崇られて、宇宙に於ける地球の取るに足らぬ地位に人々の注意を引かうとした人々は、でこぼこ道を歩まなければならなかつた。ガリレオは自分の信念を誓絶するやうに強ひられた。十九世紀になつてさへ、古いパリ大學は、地球が太陽の周圍で運動するといふことは、便利ではあるが虚偽な假説であると教へ、もつと新しいアメリカのハーヴァード大學やエール大學さへ、トレミイとコペルニクスの天文學體系を、どちらも一樣に支持できるかのやうに、一緒に並べて教へたものである。然も人々は、自分の頭を永久に砂中に埋めておくわけには行かなかつた。そして遂にその十分の含蓄が受け容れられ

ると、一六一〇年一月七日に於けるガリレオの諸觀察に依つて火蓋が切られた思想の革命は、人類の歴史に最大の激變を起すものであることがわかつた。大激變は抽象的思想の領域に局限されはしなかつた。それ以後、人間の存在そのものが新しい光明の中に現はれることになり、人間の目的や抱負は一つの違つた立場から判斷された。

この何度も語られた物語をここでまた繰り返したのは、それが今日天文学に對して抱かれてゐる興味の幾分を説明するかも知れないと思つたからである。もつと現世的な諸科學は、生活の快適や快樂を増すことに依つて、又は苦痛や苦難を和らげることに依つて、その價值がわかる。しかし、天文学を研究すればどんな報ひが與へられるのか？ この質問は尤もである。天文学者は、遠方にあるので人間生活には大した影響を與へることのできない諸物體の構造や運動や變化を研究することに、なぜ勞苦の夜を捧げ、更に勞苦の書を捧げるのか？

部分的には、少なくとも、それに對する答へとして次のやうに言つていゝやうに思はれるであらう。多くの者は、今日の天文学は、ガリレオのそののやうに、人間生活は宇宙に對してどんな關係を持つてゐるかといふ重大問題について、また、人類の發端や意味や運命について、何か言ふべき事を持つてゐるかも知れないと考へはじめた、と。ビードの記録に依ると、十二世紀ばかり前、人間生活は、人々が楽しさうに宴會を催してゐる温かい大廣間から、外で荒れ狂つてゐる冬の嵐のま

つ真中へ飛び去つた一羽の小鳥に比較された。

『小鳥は暫くは大暴風雨から安全であるが、直ぐ冬から冬へと移つて行く。人間の生活も暫くはそんな風に見えるが、その後から何がやつて来るか、その前に何か起つたかといふことに就いては、我々は何一つ知らない。だから、若し新しい教理が我々に何か確實な事を告げるなら、それは當然遵奉されるべきものであるやうに思はれる。』

もとくキリスト教を辯護するために述べられたこれらの言葉は、今日天文学に關する主要な興味が恐らくどんなものであるかを述べたことにもなる。人間は

闇と闇の間に點される

生命の小さな燈火を知つてゐるに過ぎないのに

過去と未來へ、束の間の生涯が許すよりも一層遠く掘り入らうと願ふ。人間は、まだ人間があらはれない先に存在してゐたやうな宇宙、最後の人間が自分の出て來た闇の中へ再び這入つて行つた後に存在するやうな宇宙を見ようと願ふ。この願望は、單なる智的好奇心の中に生れるだけでもなければ、眼の前にある山脈の向うを見たいといふ慾望、自ら這入つて見ようと望むことは絶えてないかも知れない約束の國に過ぎないにしても、それを普く見おろし得る山頂に達したいといふ慾望の中に生ずるだけでもない。自分自身を理解し得る前に、人間は先づ自分の感官的知覺の源である

宇宙を理解しなければならない。人間は宇宙を空間と時間との双方に於いて探査しようと願ふ。なぜなら、人間は宇宙の一部分を形成し、宇宙は人間の一部分を形成してゐるからである。

科學は、現在では、人間の生存や運命に關する諸問題に對して終極的な事を述べることはできない、といふことは認めてよからう。しかしこれは、科學が提出しなければならない最善のものを認めない理由とはならない。科學に對して提出されるどんな疑問に對しても、科學が終極的な『然り』又は『否』といふ答へを與へることは實際稀である。この二つの答へのどちらかを與え得るやうな一定の形式で、我々が一つの疑問を提出し得る時には、我々は一般に既に自ら答へを與へる地位にゐるのである。科學が進歩するのは、むしろ、過去よりも一層正確な、しかし一層高い正確さを無限に持ち得る、眞理への相次ぐ近似を提供することに依つてである。『人間は宇宙の何處に立つてゐるか?』といふ疑問に對して、最初答へを與へようと試みたのは、近代に於いてはいづれにしてもトレミイの天文學であつた。『中心に』といふのが、それに對する答へであつた。ガリレオの望遠鏡は、次の、類を見ない程すぐれた近似を提供した。『空間に於ける人間の住所は、一つの巨大な中心太陽の周圍を公轉する多數の小物體の一つに過ぎない』といふのがそれであつた。十九世紀の天文學は同じ方向へ更に遠く振子をやつて、次のやうに言つた。『空には何百萬といふ星が存在してゐて、それぞれが太陽に類似し、それぞれ、わが太陽のやうに、生物がその太陽から受け

る光と熱で存在させられ得る一家族の遊星に依つて、疑ひもなく取り圍まれてゐる』と。二十世紀の天文學は、先へ行けばわかるやうに、十九世紀の天文學があまり遠くまで振子をやつたことを暗示した。生物は、今では、我々の先祖が考へたよりも、又は、自分の理智を自由に働かせたら考へたであらうよりも、一層稀であるやうに思はれる。

我々は今、二十世紀の天文學が提供した、かういふ眞理への近似を説明しようとしてゐるのである。疑ひもなく、それは終局的眞理ではないが、それに近づく一步ではある。そして我々が大きく誤謬に陥つてゐなければ、それは十九世紀の天文學の教へよりも非常に眞理に近い。それが眞理に一層近いのは、二十世紀の天文學者が十九世紀の天文學者よりも一層すぐれた推測力を持つてゐるからではなくて、比較にならないほど多數の事實を随意に處置してゐるからである。推測といふことは科學では流行はづれになつた。それはどんなによく見ても認識の代用物としては貧弱である。そして近代科學は、推測といふものを厳しく遠ざけて、ごく僅かの場合を除けば、確定的事實と、それらの事實からはつきり生ずる推理とに自分の領分を局限する。

勿論、天文學の全體の興味は、今述べた諸疑問に中心點を置くと主張するのは無益であらう。天文學はそれ以外に少なくとも三つの興味を提供する。それは功利的のものと科學的のものと美的のものである。

最初、天文學は、他の諸科學のやうに、主に功利的理由のために研究された。それは時間の測定を提供して、人類に季節の移り變りと調子を合せることを得させた。それは、誰も横切つたことのない沙漠を横切り、もつと後になると、誰も渡つたことのない大洋を横切る道を發見することを教えた。占星學といふ見せかけをもつて、それは人類にその未來を告げる希望を示した。これには固有の馬鹿げたものは一つもない。といふのは、今日でさへ天文學者は、人事に就いてではないにしても、天體の未來の運動を豫言することに熱心に従事してゐるからである——この著書の大部分は物質界の未來とその最後の終末とを豫言しようとする試みから成り立つであらう。占星學者たちの犯した誤謬は、地上の帝國や王や個人は、宇宙の圖式の中で、天體の運動が親しく彼等の運命と結びつけられ得るほど重要な箇條となつてゐると想像した點にあつた。人間が、微かにさへ、宇宙に於ける自分自身の無意味さを實感しはじめるや否や、占星學は自然に且つ避け難く滅びてしまつた。

天文學の功利的方面は、今までは非常に控へ目なものになつてゐた。國立天文臺は依然としてその日の時間を廣く知らせて、大洋を横切る船に案内の助けを與えへはする。しかも天文學的興味の中心は完全に位置を變えたので、もろくの星霧の中の一歩遠いものさへが、『時計星』とは比較にならないほど情熱をそそる。そして普通の天文學者は、その光が我々の許へ達するのに、何百年、何千年、又は何百萬年もかゝるほど遠い星々のためには、空間に於ける我々の一番近い隣、

即ち遊星を閑却する。

最近、天文學は、科學といふ一般的母體の必須要素としての地位を確立することによつて、新しい科學的興味を獲得した。さまざまの科學は最早別々のものとして取扱はれることはできない。科學的發見が進歩するのは、直徑が一寸の百萬分の一の、そのまた百萬分の一の何分の一かにすぎない電子から、直徑が一萬億哩の幾十萬倍もある星霧に至るまで途切れることなく延びてゐる一つの連續的な戰線に沿うてである。天文學的知識を得れば、物理學及び化學に關する我々の知識が増すかも知れないし、後者はまた前者をさうするかも知れない。星々が單なる光點として取扱はれなくなつたのは、もう久しい前のことである。それぞれの星は、今は、勇ましいほどの規模に於ける實驗、一つの高温度の坩堝と見做される。そこでは、自然そのものが、我々の實驗室で役立つものよりも遙かに範圍の廣い温度と壓力をもつて作用し、我々にその諸結果を見守ることを許す。それに依つて、我々は物質のもろもろの特質に逢着するかも知れない。それらの特質が地上の物理學者を避けてゐたのは、彼の意のまゝになる物理的條件が小範圍だつたからである。例へば、物質は、星霧に於いては、少なくとも我々が地球で接近し得る如何なる物よりも百萬倍も低い密度で存在し、また或る星々に於いては、ほとんど百萬倍も大きな密度で存在する。我々が自然界に知られてゐる密度の全範圍の一億萬分の一を支配し得るにすぎない實驗室の經驗から、どうして我々は物質の全

性質を理解する見込みがあらうか？

然も、天文學に純粹な科學的興味を感じる各人は、天文學の美的方面に心を惹かれる者を、恐らく十幾人も持つてゐるであらう。知識をそれ自體のために追求する者らの多數も、彼等自身と獸との根本的差別を提供するあの智的好奇心に驅られて、諸科學の中の、最も詩的なもの及び最も美的な満足を与えるものとしての天文學に、自分の主要な興味を見出してゐる。彼等が日常の些事から離れてゐる何物かに對して自分の能力と想像を働かせようと欲するのは、『人生の退屈さ』からの時折の休養を見出すためである。そして彼等は、外界の晴れやかな廣大さを觀照して自分の慾望を満足させる。多くの者にとつては、天文學は、それがなければ人々の滅びる幻影を幾分提供する。

近代の天文學者が空を見渡して得た諸結果を述べる前に、我々は天文學者の觀測が行はれる時の踏臺（訳者註、地球）をその適當な眺望に於いてよく調べて見よう。

もつと先へ行くとわかるやうに、地球は優に二十億年も前に太陽から生れた。それが生れたのは、海や河や、立派な植物や、溢れるやうな生物を持つてゐる今日の固形の地球をその中に認めるのがむづかしいほどの形態に於いてであつた。空間に於ける我々の住所は、非常に熱い瓦斯の球として生れたのであつて、その上では、どんな種類の生物も、足場を得ることもできず、保つこともできない。

漸次にこの瓦斯の球は冷却して、先ず液體状のものになり、それから成形的なものとなつた。最後に外殻が固まつて、岩や山がその以前の成形的形態の不規則性を永久に留めることになつた。蒸氣は凝結して液體となり、河や大洋が生れ、それと同時に『永久的な』瓦斯は大氣を形成した。漸次に地球は生物の降臨に適するやうな條件を帶び、遂に生物が現はれた。それが如何にして、何處から、又は何故現はれたかは、我々にはわからない。

生物が初めて地球に現はれて以來、どれだけの時がたつてゐるかを見積るのは、容易な事ではない。しかしそれはまる二十億年といふ地球の年齢のほんの一小部分を越える筈はなからう。最初の生物は全然水棲のものであつたらしいが、漸次に魚が爬虫類に變化し、爬虫類が哺乳動物に變化し、最後に人間が哺乳動物から現はれた。この最後の事件は約三十萬年前の事であつたらしい證據がある。かくして、生物は地球の上にその年齢の一小部分に相當する間だけ住んで來たのであり、人間はこの一小部分のそのまた一小部分に相當する間だけ住んで來たにすぎない。この事を前の仕方で述べれば、天文學上の時間尺は人間の時間尺とは比較にならないほど長い——人間のものろくの世代はもとより、人間の生存全體さへが、天文學者の時計の數秒にも足りないものである。

我々の類人猿めいた先祖と我々との中間に生存した人々も、一萬ばかりの世代の大部分に互つて、

彼等の動物的先祖とあまり違はない生活をしたに違ひない。狩獵や漁獵や戦争が彼等の生活を塞いだので、智的瞑想にとつては殆んど何の時間もなく機會もないほどであつた。すると、遂に、人間は自分の長い間の智的睡眠から醒めはじめ、文明が徐々に始まるに連れて、自分の肉體のための必要を感じはじめた。彼等は、人間の風雅さに、又は無數の微笑する海を照らす光に、無限の美の啓示を發見しはじめて、それを注意ぶかく彫刻した大理石又は微妙に選んだ言葉の中に永久化さうと試みた。彼は金屬や草木を實驗しはじめ、火や水の効果を實驗しはじめた。彼は天體の運動を注意しはじめて、これを理解しようと試みた。といふのは、空に書かれる文字を讀み得る者に對しては、恒星や遊星が夜毎に昇つたり沈んだりすることが、地球の境界のあなたに未知の宇宙が地球よりも遙かに壮大な規模で築かれてゐる證據を提供したからである。

かういふ仕方で、もろくの藝術や科學が地球上に現はれ、それらと共に天文學が現はれた。

我々はそれが何時であつたかを全く告げることができないが、人類の年齢と比較すれば、これらのものはつい昨日現はれたに過ぎず、地球の全體の年齢と比較すれば、それらのものの年齢は眼のしばたきにも足りない。

單なる星辰凝視と區別されるやうな科學的天文學が現はれてからも、恐らく三千年以上にはなつてゐまい。ピタゴラスや、アリストアルクスや、その他の者らが、地球は一つの固着した太陽の周圍

我等をめぐる宇宙

で運動してゐると説明してから後のこととすれば、それはこれよりも少ない。然も、我々の現在の目的のための實際に意味のある數字は、人々が宇宙の構造について推測を下しはじめてからの時間ではなくて、むしろ、彼等が確定的事實の助けを借りてその眞の構造を解釋しはじめてからの時間である。重要な時間の長さは、一六一〇年のあの夕べに、ガリレオが初めて自分の望遠鏡を木星に差し向けてから經過した長さである——それはたゞ三世紀そこいらである。

我々がこれらの端數なき數の見積りの眞の意味を把握し出したのは、我々がそれらを表式に書き換へた時である。それは次の通りである。

地球の年齢	．．．．．	約二十億年
地球上に於ける生物の年齢	．．．．．	約三億年
地球上に於ける人間の年齢	．．．．．	約三十萬年
天文科學の年齢	．．．．．	約三千年
望遠鏡天文學の年齢	．．．．．	約三百年

かうした形式でさまざまの數字を示すと、天文學といふものが實際極く最近の現象であることが

わかる。その全體の年齢は、人間の年齢の百分の一にすぎないし、生物が地球上に住んで來た時間の十萬分の一にすぎない。地球上の生物は、その年齢の十萬の中九萬九千九百九十九の部分の間は地球のかたにあるどんな事物についても殆んど關心しなかつたのである。しかし、天文學の過去は人間の時間尺に基いて測定されるべきものであるのに、その未來は天文學上の時間尺に基いて測定されるであらうと期待すべきあらゆる理由がある。人類の前に廣がつてゐる蓋然的未來については後章で論ずるであらう。差し當り次のやうに想像しても理由がないことはあるまい。この未來は恐らく天文學的諸原因によつて終結を與へられるであらう、そのために、その長さは天文學上の時間尺に基いて測定されるべきである、と。地球は既に二十億年も存在して來たのであるから、次のやうに想像するのは先天的に合理的である。それは少なくとも將來二十億年くらゐは存在し、人類及び天文學もそのくらゐは存在するであらう、と。實際に於いて、我々はそれがこれよりも遙かに長く續くのを期待するものゝ理由を見出すであらう。しかし、その未來の生涯は、どんな正確な仕方 に於いてであるにせよ、天文學上の時間尺に基いて見積られるべきであるといふことが一旦承認されたら、天文學が依然として存在しはじめたばかりのものであることがわかる。だからこそ、天文學の使命はどんな終極をも要求することができないのである——我々は人間の成熟した確信を記述するのではなくて、むしろ、いま眼を開いたばかりの赤ん坊の最初の印象を記述するのである。

しかし、さうではあつても、その眼は、赤ん坊が自分自身の周囲や自分自身から離れた場所を眺めることを知らない先に耽つてゐた役にも立たない内觀的な夢想よりはましである。

そこで、我々は天文学が我々の住んでゐる宇宙について何を告げなければならないかを知りはじめた。我々の研究はこの一つの科學に全く限られるやうなことはないであらう。觀測天文学の使命を解釋するに當つて、他の諸科學、即ち物理學や、化學や、地質學、並びに、もつと密接な關係のある天體物理學及び宇宙創世論のやうな科學にも、できれば助けを借りるであらう。我々が獲得する知識は斷片のものであらう。もしそれを何物かと比較しなければならぬとすれば、合せ繪判じ(jig-saw puzzle)を持つて來よう。若し我々が凡ての斷片を合せることができたなら、それは確かに一つの完全な繪になるであらう。しかしその多くは依然としてあるべき所に無い。我々が既に見つけた不完全な一續きの斷片が全體の繪になるであらうと望むのは無理である。しかし我々は少なくともそれらを一緒に集め、それらを何らかの方法的順序に配列し、紛れもなく相接近してゐるものゝ斷片を組み立てて差支へないし、また恐らく、その凡ての斷片が見つけられて最後の組立が行はれた時、完成された繪はどんなものになるかについて、敢て想像を加へて差支へない。

我 等 を め ぐ る 宇 宙

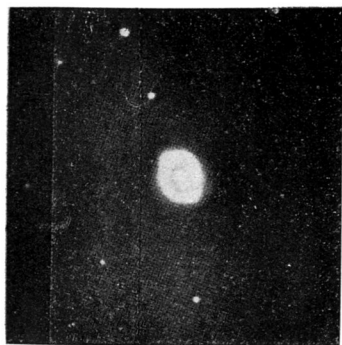
第一畫 南十字座附近に於ける天の河



フランクリン | アダムス星圖

我 等 の ぐ む 宇 宙

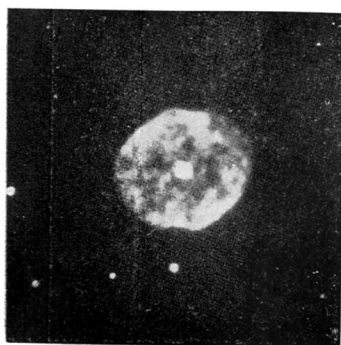
第二畫 星 型 星 霧



N.G.C. 2022



N.G.C. 6720



N.G.C. 1501



N.G.C. 7662

キルソン山天文臺

我 等 を め ぐ る 宇 宙

第三畫 白鳥座の星霧



キルソン山天文臺

我 等 を め ぐ る 宇 宙

第四畫 アンドロメダ座の大星霧 M31



ヤーキース天文臺

我 等 を め ぐ る 宇 宙

第五畫 刃形に見えるアンドロメダ座星霧 N.G.C.891



キルソン山天文臺

我 等 を め ぐ る 宇 宙

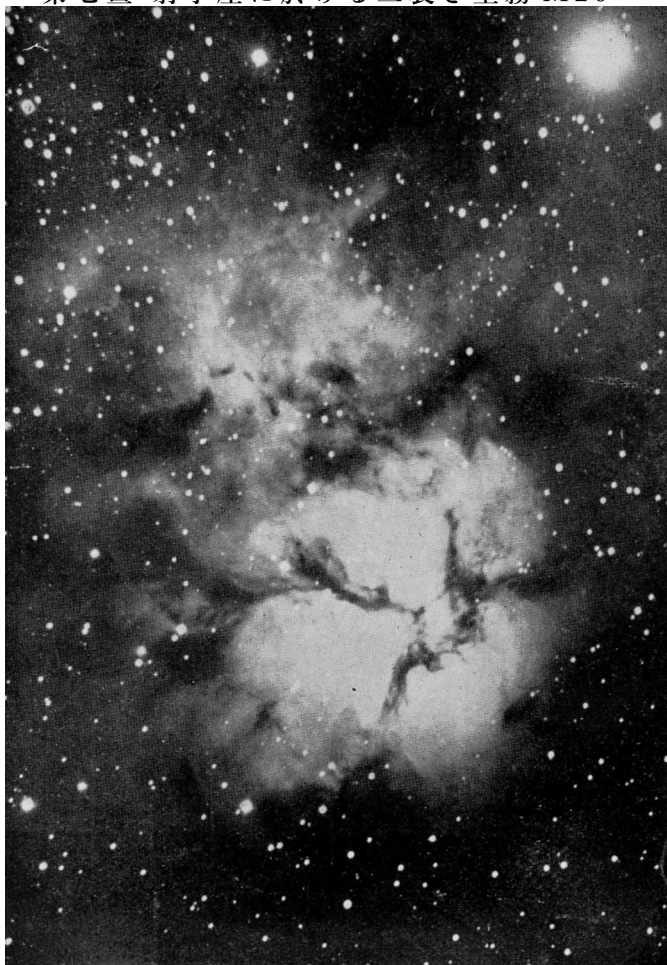
第六畫 オリオン座大星霧に於ける『馬の頭』



キルソン山天文臺

我 等 を め ぐ る 宇 宙

第七畫 射手座に於ける三裂き星霧 M20

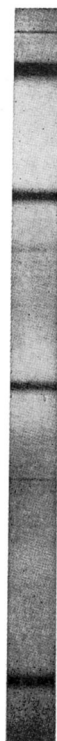


キルソン山天文臺

第八畫 星のスペクトル（左端の文字は分光型を示す）



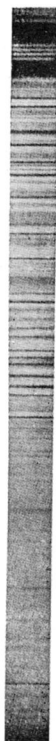
オリオン座ε星



シリウス



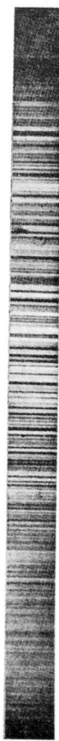
雙子座S星



カペラ



アークトゥルス



ベテルギウス

我 等 を め ぐ る 宇 宙

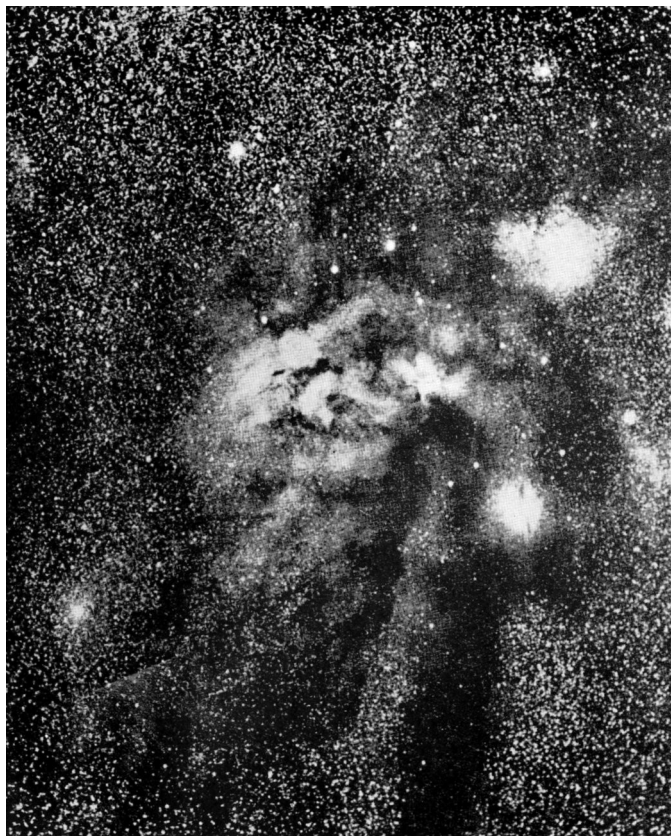
第九畫 ヘルクレス座に於ける球状星團 ~~M31~~ M13



ドミニオン天體物學天文臺

我等をめぐる宇宙

第十畫 蛇遣ひ座 ρ の區域



イー・イー・バアナアド

第十一畫 第四畫に全部示したアンドロメダ座大星霧 M31 の一部分(左手頂上の隅)の擴大



キルソン山天文臺

我 等 を め ぐ る 宇 宙

第十二畫 アンドロメダ座大星霧 M31 の中心區域の擴大



キルソン山天文臺

第一章 空間の探査

如何にして、人間は、三十萬年の間地球に住んだ後、最近の三百年——地球上に於けるその生涯の最近の千分の一——の間に、外界を研究する光學的手段を所有するに至つたかを、我々は既に見た。この章では、我々は人間が自分の新しく醒めた眼で形づくつた諸印象を記述して見るであらう。この記述は、非常に荒削りの年代記的順序に配列されるであらう。これは、望遠鏡の力を増加する、若しくはまた、空間を段々遠くまで見る順序でもある。そのために、我々の配列順序は、太陽からの距離を増加する順序と稱することもできよう。我々はどんな種類の連續的記録をも試みず、少數の陸標を擧げるといふで、人間の宇宙觀測に依つて領分が戦ひ取られ且つ併合された順序を極く大ざつばに示すであらう。

第一節 太陽系

我々は、便宜上、その構造がガリレオとその後繼者たちに依つてほぐされた太陽系から始めて差支へない。

太陽に屬する一家族の遊星は、おのづから特殊の群になつてゐる。太陽に近いのは、四つの小さな遊星、即ち水星と金星と地球と火星である。それよりも非常に遠い所には、四つの大きな遊星、即ち木星と土星と天王星と海王星がある。これら凡ての星の彼方には、新しく發見された遊星、冥王星がある。これは今までのところではわが太陽系の一番外側にゐる仲間である。

水星は凡ての中で太陽に一番近い。その次は金星である。この二つの遊星の軌道は地球の軌道と太陽との中間にある。地球から見ると、これらの遊星は太陽の周圍に相對的に小さな圓を描いてゐるやうに見えるので、太陽に近いやうに見えるのは必然的である。従つて、それらは、たゞく太陽の直ぐ前に昇れば早朝に見え、太陽の後から沈めば夕方に見えるだけである。昔の人々は、同一の遊星がどちらも朝夕の明星として現はれ得ることを全く認めなかつたので、同一の遊星が別々に現はれるやうに見えるまゝに、双方に別々の名前を附けた。暁の明星として、金星はギリシヤ人にはフォス・フォロスと呼ばれ、ローマ人にはルシファールと呼ばれた。宵の明星として、それは兩者か

らへスペルスと呼ばれた。

太陽から外側へ進んで空間の中へ這入つて行く順から云ふと、地球の直ぐ次に來るのが火星である。これで小さな遊星の群はお終ひである。火星と金星と水星は悉く地球より小さい。尤も、金星はほんの少し小さいだけである。

小さな遊星の中の最後のものである火星の軌道と、大きな遊星の最初のものである木星の軌道との間には、廣い隙間がある。これは空虚ではなくて、小遊星として知られてゐる何千といふ微小な遊星の軌道で占められてゐる。これらの小遊星の中には大きさが地球に近いものは一つもない。一番大きなセレスさへ、直徑四百八十哩にすぎない。そして百哩以上の直徑を持つてゐることがわかつてゐるのは、只の四つである。水星と金星と火星の三つの遊星は悉く大昔から知られてゐたのであるが、小遊星は十九世紀になつて天文学の中に這入つて來たにすぎない。その中の最初のものであり最も大きなものであるセレスは、一八〇一年一月一日にピアジに依つて發見されたのである。

小遊星を越えると、四つの大きな遊星、即ち木星と土星と天王星と海王星が來る。その凡ては地球よりも遙かに大きい。その中で一番大きな木星は、サンプルンに従へば、八萬八千六百四十哩の直徑を持つてゐる。これは地球の直徑の十一倍以上である。だから、木星の中には、地球の大きさを持つ物體を一千四百箇ほど詰め込んでもまだ餘地があるくらいである。順序の點でその次に來る

土星は、大きさの點ではひとり木星の次に位して、約七萬哩の直徑を持つてゐる。この二つは諸遊星の中で圖抜けて大きい。

天王星と海王星は、それぞれ、地球の約四倍の直徑を持ち、従つて地球の約四十四倍の容積を持つてゐる。冥王星の大きさはまだ正確にはわかつてゐないが、地球より大きい筈はなく、おそらくそれよりも非常に小さいであらう。

木星と土星は空に目立つてゐるので、必然的に一番早くから知られたが、天王星と海王星は比較的遅くなつて發見された。サー・ウィリアム・ハーシェルが、一七八一年に、空に何か面白いものを見つけたものだといふ動機だけで、自分の望遠鏡を覗いてゐる間に、全く偶然に天王星を發見したのである。これと對照して、海王星は、一八四六年に込み入つた數學的計算の結果として發見された。それは、その時代の多くの人々に依つて、いづれにしてもニュートンの時代以來、人間精神の最大の勝利と見做された。それは青年の勝利であつた。この名譽は、その當時僅か二十七歳で、それ以後ケンブリッジの天文學教授になつた、イギリス人ジョン・コーチ・アダムスと、彼より只の八歳年上だつた、年若いフランス天文學者ユルバン・ジェー・ジェー・ルヴェリエとの間に、ほど同等に分たれなければならない。二人とも、觀測された天王星の運動にあらはれる或る氣まぐれを一つの外遊星の引力に歸した。そして二人とも、これらの氣まぐれを説明するために、この想

像された外遊星が進行しなければならぬ軌道の計算に取りかゝつた。

アダムスの方が先に自分の諸計算を完成して、新遊星が存在すべき空の部分に關して、ケンプリッヂの觀測者たちに報告した。その結果、海王星は再び觀測された。尤も、それが求められる遊星と同一のものとされたのは直ぐの事ではなかつた。それがケンプリッヂで同一のものと決定されない先に、ルヴェリエが自分の諸計算を完成して、その結果をベルリンにある一助手ガレに通知した。ガレはこの遊星を求められる星と直ぐ同一のものとすることができた。といふのは、ベルリンには、問題になつてゐる空の區域の、ケンプリッヂで得られるよりも一層すぐれた星圖があつたからである。

漸次にわかつて來た事であるが、海王星の引力は天王星の諸運動に於ける凡ての氣まぐれを説明するに適しないものであり、同様の氣まぐれが海王星自體の運動にも現はれはじめた。この事は、更に別の遊星が、海王星よりもつと遠方に存在してゐることを示した。丁度アダムスとルヴェリエが以前の場合にやつたやうに、アリゾナ州、フラッグスタッフ天文臺のバーシヴァル・ローエルが、推測された新遊星、『遊星X』が運動すべき軌道を計算した。しかし、フラッグスタッフの觀測者たちが、ほとんど正確に、ローエルが十五年前に豫言した軌道に於いて運動してゐる遊星冥王星を發見したのは、つい最近（一九三〇年三月）のことであつた。

我 等 を め ぐ る 宇 宙

遠く一七七二年まで遡つて、ボーデはさまざまの遊星の太陽からの距離を結びつける一つの單純な數的關係を指摘した。これは次のやうにして得られる。先づ、

0 1 2 4 8 16 32 64 128 256

といふ數系列を書く。これを見ると、各數が、最初の二つは別として、直ぐ前の數の二倍になっている。この各數に三を乗ずる。すると、

0 3 6 12 24 48 96 192 384 768

が得られる。それから更に各數に四を加へると、

4 7 10 16 28 52 100 196 388 772

が得られる。

これらの數は、諸遊星の、太陽からの實際の距離に、非常によく比例してゐる。それは（地球の距離を10とすれば）次の通りである。

3.9	7.2	10.0	15.2	26.5	52.0	95.4	191.9	300.7	400.0
水星	金星	地球	火星	小遊星	木星	土星	天王星	海王星	冥王星

この法則は、天王星と小遊星とが發見されない先に記述されたのであるから、これらの星がその豫言された場所にこんなうまく當て嵌るのは、幾分注意すべき事である。他方で、この法則は海王星と今度發見された冥王星に對してはまんまと失敗に終つた。して見ると、それは恐らく合理的説明を基礎としない單なる符合であらう。

一番外側の遊星は太陽から非常に離れてゐる。冥王星の住民——若しそんなものが存在するとすれば——は、太陽から光と熱を地球の住民の千六百分の一ほど受けるにすぎないであらう。若し冥王星の表面がたゞ太陽の熱に依つて温められるだけであつたら、それは實際非常に温度が低くて、或る場所は攝氏零點下二百三十度の附近、又は華氏度盛の氷點下四百度以上であらう、と計算することができる。

望遠鏡といふものは光と同様に熱をも集める。大きな望遠鏡の、熱を集める力が、恐るべきものであるばかりでなく、極めて感應し易い道具がこの熱を測定するために工夫された。キルソン山にある百吋望遠鏡は、二千哩離れたミシシッピー河の堤に點された只一つの蠟燭から受ける熱を發見することができると思はれる。この大きな感應性は、單一の恒星や遊星から受ける無限少量の熱を測定することを可能にし、従つてその表面の温度を見積ることを可能にする。最近の測定に依ると、木星の表面は攝氏零點下約百五十度の温度であることがわかる。これは丁度太陽の熱だけで維持さ

れる温度と同じくらいである。同様の測定に依つて、土星と天王星はそれぞれ零點下百五十度及び零點下百七十度といふ温度を當てがはれた。そのどちらも、これらの遊星が太陽輻射以外にどんな熱源も持つてゐない場合の温度よりも寧ろ高い方である。しかし、どんな内熱源も全く小さいに違ひないといふこと、すべての大遊星は實際非常に冷たいといふことは、明白であるやうに思はれる。その表面には、水がすっかり凍つて氷になつてゐるに違ひないから、海も河も存在する筈はないし、その大氣の中には、雨も水蒸氣も存在する筈はない。既に暗示されたことがあるやうに、木星の表面を隠蔽してゐる雲は、凝結した二酸化炭素の分子か、又は、水の氷結點よりも遙かに低い温度に於いて沸騰する何か他の瓦斯であるかも知れない。

小さい方の遊星の物理的諸條件は、我々が地球の上で馴染んでゐるものに非常によく似てゐる。太陽から一層遠く離れてゐるために、火星は、地球よりも幾分冷くはあるが、おそろしく冷いことはない。火星の一日は二十四時間と三十七分であるが、これは、地球の一日よりほんの少し長いだけである。そのために、その表面に於いては、地球上に見られるのと同じやうな晝の温かさと夜の寒さが交替してゐるに違ひない。赤道區域に於いては、正午の温度はよく氷點以上に昇り、時折は華氏五十度又はそれ以上にさへ達する。しかし、ここでさへ日没の少し前から氷點以下に下り、その時から翌日遅くまで、氣候は随分寒いに違ひない。兩極地方は勿論それよりも更に寒く、兩極

を蔽うてゐる白頂峰の温度は、或る場所では、攝氏零點下七十度又は華氏零點下九十四度——氷點下百二十六度ばかりである！

もつと太陽に近い金星の平均温度は、地球よりも高いに違ひない。しかし、その晝と夜はそれぞれが地球時間の二三日間に相當するから、晝と夜の温度の差は地球に於いてよりも遙かに大きいに違ひない。そのために、その表面に於いては、晝間の熱と夜間の寒さとが極端に違つてゐるに違ひない。夜の湿度は、かなり一様に、攝氏零點下二十五度又は華氏零點下十三度ばかりに等しいやうに見える。この遊星の表面のどの點に於いても、かうした酷く寒い夜間温度を持つ週間が、焼くつくやうな晝間温度を持つ週間と交替してゐるに違ひない。

水星は太陽に非常に近いので、その平均温度は必然的に地球のそれよりも遙かに高い。それは太陽から受ける光と熱のほんの少しばかり——約十四分の一——を反射するにすぎない。その他は悉くその表面を熱するだけである。多くの考察に依つてさうもあらうと思はれるやうになつたのは、**この遊星がいつも同じ表面を太陽の方へ向けてゐることである。**それは丁度月が地球の方へいつも同じ表面を向けてゐるのと同じである。果してさうだとすれば、その表面の温められない方の半分は

2 1964年から1965年にかけて行われたレーダー観測で、水星の自転周期が59日であることが確認された。水星の公転周期と自転周期は2:1の共鳴関係にある。

非常に寒く、温められる方の半分は非常に熱いに違ひない。この場合には、温められる方の半球は攝氏約三百五十七度の温度を持つてゐなければならぬ、と計算することができる。若しこの遊星がどんな風にもかなり速く自轉してゐれば、その全體の表面はたゞ攝氏約百七十度の温度を持つてゐるにとどまるであらう。全く最近、プティトとニコルソンは、地球上でその温められる方の半球から受ける熱の量を測定して、その温度が攝氏三百五十度又は華氏六百六十二度ばかりでなければならぬことを發見し、かくして、この遊星がいつも同じ表面を太陽の方へ向けてゐることを確證した。その温かい方の半球は鉛を溶解するほどの温度になつてゐる。もう一方の半球は、永遠に暗く且つ温められないので、おそらく我々の想像し得るどんな物よりも冷いであらう。

木星は四つの衛星を持つてゐるといふガリレオの發見に續いて、あらゆる遊星は、軌道が地球の軌道の内側になつてゐる二つの遊星を除けば、幾つかの衛星に仕へられてゐるといふことが發見された。一六五五年に、ハイゲンスは土星の衛星の中一番大きなティタンを發見し、一六八四年までに、カシニはもう四つ發見した。それから、滿一世紀たつて、サー・ウィリアム・ハーシェルは、一七八四年に天王星の衛星を二つ發見し、一七八九年に土星の衛星をもう二つ發見した。遊星型衛星の全系統や、また太陽系に屬するもつと小さな諸物體——彗星や、隕星や、流星——のことは、もつと後の章で、それらのものが發生するに至つた時の仕方を取扱ふやうになつた時に詳しく論ず

我 等 を め ぐ る 宇 宙

る
で
あ
ら
う。

第二節 銀河系

我々のその次の陸標は、二人のハーシエル、即ち、父なるサー・キリアム・ハーシエル（一七三八—一八二二年）と、子なるサー・ジョン・ハーシエル（一七九二—一八七一年）に依る星の観測である。ガリレオが太陽系のためになし遂げたと同じ事を、二人のハーシエルは、わが太陽もその仲間となつてゐる、星の大家族——天の河に依つて境界を附けられてゐる『銀河』系——のためになし遂げにかかつたのであつた。

月のない晴夜には、天の河が、大きな微光アーチのやうに、地平線から地平線へ擴がつてゐるのが見える。これは、完全な光圓——銀河圈——の一部分にすぎないことがわかる。それは、地球の周圍に完全に擴がり、空を二つの相等的い半球に分けて、一種の天の『赤道』となつてゐる。天文學者たちは、それを參考にして空の緯度と經度を測定するのが常である。ガリレオの望遠鏡に依ると、それは一群の微光星から成り立ち、これらの星の各々はあまり鈍いので、望遠鏡の助けを借りなければ個々に見ることはできない（第一畫參照）。そして、おそらく豫期できたやうに、この大きな微光星帯についての適當な解釋は、宇宙の建築術を理解するに當つて根本的なものになること

がわかつた。

若し星々が無限の空間の中に一樣に散在してゐたら、我々が眼を向けるどんな方向に於いても、最後には一つの星に辿りつくであらう。そのために、空は堪え難い光の一樣な灼熱に見えるであらう。實際これが事實になるのは、光が或る距離を進行した後に鈍くなるか消えるかした場合であらう。しかし、その時でさへ、空は凡ての方向に於いて同一のものに見えるであらう、といふのは、空の一部分は星々のために別の部分よりもむやみに燦然と輝くべきだといふ理由はないだらうからである。かくして、天の河の存在に依つて、星辰系統は一樣に窮まりなく擴がつてゐるのではないことがわかる。それは一つの有限な構造を持つてゐるに違ひない。そして、サー・ネリナム・ハーシェルが自ら解釋しようとかゝつたのは、この構造の建築術であつた。彼が空の北半球のためになし遂げた仕事は、その後、彼の子サー・ジョン・ハーシェルに依つて、南半球にまで延長された。我々は先づ、空の凡ての星は本質的に類似した物象であると想像すれば、兩ハーシェルの使用した方法が最もよく理解できるであらう。各々の星はその時には同一量の光を放出するであらう。そのために、單に距離の結果として、一層近い星はきら／＼輝いて見え、一層遠い星は微かに見えるであらう。現視光輝が距離と共に減少する仕方は、勿論よく知られてゐる。この法則は『距離の逆自乗』の法則である。それが意味するのは、現視光輝は丁度その距離の自乗が増加するのと同じ

速さで減少するといふことである、星は、それに類似した第二の星の二倍離れてゐれば、たゞその四分のただけ輝いて見えるにすぎない、等々。かくして、若し凡ての星が同一量の光を放出するとすれば、我々は、空のどんな二つの星でもの相対的距離を兩者の相対的光輝から見積ることができ。さまざまの星の距離に比例した長さの針金を切り、これらの針金を、それぞれその關係する星の方向に向けることに依つて、我々は空の星の配列模型を形づくることができる。事實上、星辰系統の全構造が、その規模は別として、わかるであらう。天の河の微光星を表はすには、非常に長い針金が非常に澤山必要になるであらう。この模型に於いては、これらの針金は悉く天の河の相異なる部分の方へ向けられて、一つの扁平な車輪のやうな構造になるであらう。

サー・ネリアム・ハーシエルが直面した問題が、もつと本質的なものであつたのは、もろくの星は、相異なる距離にあると同様に、相異なる固有光輝を持つてゐること、双方の要因が結びついて現視光輝の相違を越すことを、彼が知つてゐたからである。兩ハーシエルと今日の天文學者の双方にとつての、天文學上に於ける主要な困難の一つは、この二つの要因はどんな明確な結論も得られない先に棄てられなければならないといふことである。

ハーシエルの發見に依ると、彼の望遠鏡視野に見える星の數は、空間に於ける方向を異にするに連れておそろしく變化した。それは望遠鏡が天の河の方へ向けられた時に勿論最大であり、望遠鏡

が天の河から離れるに連れて、絶えず且つ迅速に減少した。一般的に言へば、天の河から相等的い距離にあつた二つの望遠鏡視野は、ほとんど同数の星を含んでゐた。天文學上の熟語で云へば、星の数の大小は主に銀河緯度に依存してゐた。それは丁度、地球の氣候が主に地域緯度に依存して、經度にはあまり依存しないのと同じである。

天の河から相對なる距離にあるもろくの視野は、星の質に於いても、星の數に於いても同様に相異つてゐることがわかつた。すべての中で最も輝かしい星々は、すべての視野には均一に見出されることがわかり、それらの視野に於ける相違は、主に、微光星、殊に天の河に近づくに連れておそろしく殖える、すべての中で最も微かな星々から生ずるのであつた。

サー・フリナム・ハーシェルが、この事實を、次の事を示すものと解釋したのは、正しかつた。即ち、太陽を取巻いてゐる星辰系統は、彼の望遠鏡が届く距離の範圍内に於いて薄くなりはじめ、また、天の河から最も遠く離れてゐる方向に於いては最も迅速に薄くなりはじめるのである。彼は銀河系の一般的な形を、甘パン又はビスケット又は懷中時計のそれと同じだと想像した。星はそれの中心點の附近に一番濃く散らばり、その外域にはもつとまばらに見出される。天の河の平面は勿論この構造の中心面になつてゐた。天の河は空を二つの殆んど全く相等しい半球に分割してゐるといふ事實は、彼に對して、太陽は殆んどこの中心面の中にあるに違ひないといふことを暗示した。

そしてこれは、シーアスや、ヴァン・リーンや、その他の人々の最近の非常に精巧な研究に依つて確證された。天の河から相等しい距離にある空のもろくの部分はほど相等しく輝いて見えた、といふ事實から、ハーシェルは、太陽はこの系統の中心面に存在してゐるばかりでなく、その實際の中心點に非常に近いと推理した。この見解は、全く最近まで勢力を占めてゐたが、シヤプレイやその他の人々の探究に依つて、今ではそれを維持することができないことがわかつた（104頁參照）。

第一圖は、サー・キリアム・ハーシェルが銀河系に當てがつた一般的種類の構造の横斷面を示したものである。尤も、この圖に於ける詳細な星辰分布は、これよりも非常に後になつて（一九二二年）、カプタインが加へたところのものである。かういふ型の構造が如何にして空の一般的外觀を説明するかを知るのは容易である。すべての中で最も輝いて見える星々は、一般的に言へば、一番近い。星が眼に見えて薄くなるやうなことはこの距離の範圍内では起らないほど、それらは近い。かういふ理由で、非常に輝かしい星は凡ての方向に於いてほど相等しい數に見出される。非常に微かに見える星は、大抵非常に遠い。それは非常に遠いので、銀河面の内部又は附近のもろくの方向に於いて、この系統の大きな深みが邪魔するほどである。さういふ方向に於いては、ほとんど無限に後から後からと重なり合つてゐる星の層が、微光星の外觀的集中をもたらし、それを我々は天の河と呼ぶのである。

太陽系に關するコペルニクスの見解が最後になつて受け容れられたのは、ガリレオがそれと類似した木星系を發見したことに大部分基いてゐる。木星系は、空間の中に、地球上の觀測者が全體としてのそれに就いて一つの鳥瞰圖を得ることが出来るほどの地位を占めてゐる。我々が決して全體としての太陽系の鳥瞰圖を得ることができないのは、我々がそれを内側から見得るにすぎず、從つて、さういふ諸系統が存在し得る視覺的證明は、我々が外側から見得る他の同様な諸系統の發見から生じ得るに止まるからである。

サー・ネリアム・ハーシェルは、次のやうに信じた。自分は、銀河系の構造に關する自分自身の見解を、同様な諸系統を發見することに依つて、同じ仕方で確證した、と。彼が、さういふ諸系統の鳥瞰圖を得ることができたのは、それらが銀河には全く無關係だつたからである。彼はこれらの系統を『鳥宇宙』と稱して、それらを星の雲だと信じた。それらはもや／＼した星霧狀の外觀を呈してゐた。そしてそこに一つ一つの星を區別することはできなかったとしても、彼はかう信じた。十分な望遠鏡力があればこれも可能になるであらう、丁度、ガリレオがそれに依つて天の河に一つ一つの星を見ることができたやうに、と。直ぐ後で述べるこれらの物象は、一般にその位置から『銀河外星霧』として知られてゐる。尤も、それよりも簡單な『大星霧』といふ言葉を使用する方が便利であることも度々であらう。それらは非常に大きいので、さう呼ばれる資格が十分にあるの

我 等 を め ぐ る 宇 宙

である。

第三節 星霧

我 等 を め ぐ る 宇 宙

望遠鏡で見ると、遊星は感知できる大きさの平面面をしてゐる。そして六十倍に擴大する接眼レンズは、木星を月ぐらゐの大きさにして見せるであらう。然も、六十倍、又はそれ以上どんなに擴大する接眼レンズも、決して恒星を月ぐらゐの大きさにして見せることはできない。我々が力の眼り擴大しても、あらゆる恒星は單なる光點以外のものに見える氣遣ひはない。もろくの恒星は、勿論木星よりもおそろしく大きい。しかしまた、それよりもおそろしく遠い。そしてそれは征服できる距離である。

望遠鏡は、とはいへ、單なる光點よりも一層大きく見える物象を澤山見せてくれる。それらは、一般に、微かな、もや／＼した外觀を呈してゐるので、『星霧』といふ一般的名稱を授けられた。詳細に研究して見ると、これらは三つの別々の部門になつてゐることがわかる。

遊星型星霧

第一の部門は、一般に『遊星型星霧』と稱されてゐる。それらの星霧には、遊星のやうに、望遠

鏡で見ると一定の平圓面に見えるといふ事實以外には、遊星の性質は無い。これらの物象の中では、たゞ數百のものが知られてゐるだけであつて、その中の四つの典型的な實例が第二畫に示してある。それらは悉く銀河系に屬してゐる。それらの星の物理的構造に就いては、先へ行つて論ずるであらう。今はたゞ次のやうに言つて置くだけで十分である。それらは恐らく恒星の性質を持つてゐて、何らかの仕方で莫大な範圍の發光大氣に取圍まれるに至つた、と。果してさうだとすれば、それらは、云ふまでもなく、どんな恒星も決して望遠鏡の中に一つの光點以外のものには見えないといふ我々の一般的説明に反する。そこで遊星形星霧のためには例外を設けなければならない。

銀河星霧

第二の部門は一般に『銀河星霧』と稱されてゐる。その實例は、第三畫、第五畫及び第七畫に示してある。これらは全く形が不規則である。一般的外觀は巨大な白熱瓦斯の鬼火のやうであつて、星から星へと擴がつてゐる。そしてこれはかなり實際の形に近い。遊星形星霧のやうに、それらは全く銀河系の範圍内に存在してゐる。大急ぎに一覽しただけでも、それぞれの不規則な星霧の中に二三の星が絡まつてゐることがわかる。望遠鏡で詳細に試験して見ると、屢々星霧の諸次元は殆ん

3 現在では惑星状星雲は3000ほど知られている。

ど無限に延長してゐるので、單一の星霧の中に殆んど一星座の全體が包まれることがあるかも知れないほどである。

これらの星霧の物理的性質に關しては殆んど疑ひがない。星と星との間の空間は、全く物質を缺いてゐるのではなくて、一般に、殆んど口で言へないほど薄い瓦斯の霧で占められてゐる。あちらこちらでは、この霧は普通よりも厚いかも知れない。あちらこちらでは、また、それはその中にあゝる星々の輻射のために光つて白熱してゐるかも知れない。他の場所では、それは光に對しては全く不透明で、空にかかつた黒いカーテンのやうに見えるかも知れない。密度と不透明度と光度との變差が結びついて、我々が銀河星霧に見るやうな、すべての風變りな形や、さまざまの程度の光や影を造り出してゐるのである。

この同じ不透明度は、星々の一般的配列の中に見出される暗い斑點に責任がある。その目立つた實例は、天の河の、第一畫に示した部分に見出される。最初は星辰系統にある孔のやうに見える暗い斑點は、繪畫的に、『石炭袋』と稱されてゐる。空にあるこれらの黒い斑點は、實際の孔を表はしてゐる筈はない。なぜなら、こんなに澤山の空虚なトンネルが星々を貫いて、それが悉く正確に東方に向つてゐるとは考へられないからである。そのために、我々はそれらをその背後にある星々の光を鈍くし又は消す朦朧とした物質の幕と解釋せざるを得ない。

銀河外星霧

星霧の第三部門は、全く違つた性質を持つてゐる。その構成者たちは、大概一定の規則的な形をしてゐる。そしてそれ以外にもさまざまの特徴を示してゐるので、それら凡てを容易に同一視することが出来る。それらは、その放出する光の性質から『白色星霧』と呼ばれるのが常であつた。もつと後になつて、ロッセ卿の巨大な六呎望遠鏡のおかげで、その多くが渦巻形構造を持つてゐることがわかつた。これらは『渦巻形星霧』と呼ばれた。すべての渦巻形星霧の中で一番目立つてゐるのは、第四畫に示したアンドロメダ座大星霧M31である。それは辛うじて肉眼に見える。マリウスは、一六一二年に望遠鏡でそれを觀測して、『角の中から見える蠟燭の火のやう』だと云つた。第五畫は第二の實例を示したものである。それは恐らく前者に非常に類似した構造を持つてゐる。それは別の角度から眺められたので、殆んど全く刀形に見えるほどである。

かういふ型の星霧は凡て銀河系の外側に横はつてゐる、といふことは今は十分に證明されてゐる。そのために、『銀河外星霧』と名づけられたのは極めて妥當である。その大きさはすばらしい。第四畫と第五畫に示した寫眞のどちらも、有力な顕微鏡の下に於いてさへ、ヨローッパ全體の大きさにまで擴大しなければ、地球くらゐの大きさのある物體を、その中に見ることはできないであらう。

その一般的な形は、サー・ヤリアム・ハーシェルが銀河系に當てがつたものに類似してゐる。そして、最初彼を導いてそれらを銀河系に類似する『島宇宙』と見做さしめたのは、これであつた。もつと先へ行くと、彼の推測が最近の探求に依つてどこまで確證されたかがわかるであらう。

第四節 星の距離

一八三八年といふ年がその次の陸標を提供してくれた。それは星の距離が初めて測定された年である。

キリスト以後二世紀たつて、トレミイは次のやうに主張した。もし地球が空間の中を運動してゐたら、周囲を取巻く星々に對するその相對的位置は絶えず變化しなければならぬ、と。地球が太陽の周圍を廻つてゐる以上、地球の住民はぶらんこに乗つてゐる子供のやうな地位に置かれてゐるであらう。そしてぶらんこに乗つてゐる子供には、樹や人や家が、遠い丘や雲を背景として、律動的に揺れながら近づいて來るやうに見える。それと同様に、地球の住民にも、もろくの星が、一層遠い星を背景として、絶えず地位を變へながら近づいて來るやうに見えなければならぬ。然も、毎夜もろくの星座は同じままである、とトレミイは主張した。同一の星が永遠に同一の相對的位置に於いて極の周圍を廻轉し、大熊座の七つの星、プリアデス座、又はオリオン座のやうな目立つた星群も全く變化の徴候を示さなかつた。肉眼に見える限りでは、もろくの星は、背景をなす畫布に塗りつけられた發光繪具の點々のやうなもので、地球が不動の中軸となり、その周圍を全

體の構造が廻つてゐるのであつた。

これに反して、コペルニクスの學說に於いては、勿論次の事が必要であつた。即ち、地球が一年かかつて太陽の周圍を廻る以上、一層近い星々は一層遠い星々を背景として運動するやうに見えなければならぬ。然も何等さいうふ運動が発見されることなしに、次から次へと年が過ぎ、次から次へと世紀さへ過ぎた。地球は宇宙の不變の中心をなしてゐる、といふ昔のトレミイの議論は、若し次の事がなかつたら、恐らく以前の地位を取戻すところであつたらう。即ち、さまざまの線上に於ける證據に依つて、一番近い星々さへ必然的に非常に遠い、その外觀上に於ける運動の缺乏が何の驚きをも與へるに及ばないほど遠い、といふことがわかり始めたのである。ぶらんこに乗つてゐる子供は、若し彼の見得る一番近い對象が二十哩も離れてゐたら、自分の運動の視覺的證據を得ようと望むことはできない。

極く少數の恒星は一番輝かしい時の土星よりも一層輝いて見える。土星は、空の一番輝かしい星の中の十一番目のものである牽牛星くらゐに輝いて見える。然も、土星が輝くのは、太陽から反射する光に依つてのみであり、太陽からのその距離は非常に遠いので、太陽が放出する全體の光の約二十五億分の一を受けるにすぎない。そして、土星の表面はその受ける光の約五分の二を反射するにすぎないから、土星は太陽の光の六十億分の一をもつて輝いてゐるにすぎないことになる。も

し、ケプラーやその他の者らが主張したやうに、牽牛星が本質的に太陽に類似してみたら、それはおそらく太陽と同じくらゐの燭光を待つてゐるであらう。従つて土星の約六十億倍の光を出すであらう。牽牛星と土星は空で殆んど同等に輝いて見える、といふ事實は、牽牛星は土星の八萬倍ほど遠いといふことを意味し得るにすぎない。この論證は、ニュートンが、自分の著書『世界體系』の中で、牽牛星のやうな最も輝かしい星々さへが非常に遠くに違ひないことを示すために提供した論證と、本質的に同一である。

*といふのは、物象の現視光輝は、その距離の逆自乗に従つて減少し、八萬の自乗はほど六十億に等しいからである。

そしてかくの如きが事實であることがわかつた。地球の軌道運動から生ずる、もろくの星の外観上の廻轉運動——専門語で云へば、『視差運動』——を發見しようとする凡ての努力は一八三八年までは失敗に終つた。この年になつて、三人の天文學者、即ちベッセルとヘンダーソンとストルーエとが、殆んど時を同じくして、三つの星、即ち白鳥座六一と、センチウル座 α 星と、琴座 α 星のそれぞれの視差運動を發見した。それらの星の視差運動の量は、星々の距離を計算することを可能にした。そのために、地球の住民は、自分たちは太陽の周圍を廻つてゐるといふ一定の視覺的證明が得られる地位に置かれるばかりでなく、この廻轉の可視的結果から、一層近い星々の距

離を計算することもできた。計算された値は、近代の諸標準に依つて判断すると正確ではなかつたが、それでも、宇宙の規模の最初の明確な見積りを提供した。

我々は、ここでちよつと立止つて、この規模がどんな風に築かれてゐるかを考察しよう。最初の一步は、地球の表面に、長さ數哩にわたる一つの便利な基線を選んで、これを標準ヤード又はメートルで測定することである。この基線から出發して、測地學の見透しから、地球の表面に、どちらかと云へば眞北及び眞南に走る細長い線條を描く。次いで、この線條の兩端に於ける緯度の差を、天文學的方法に依つて、例へば、二つの場所に於ける極星の高度の差を注目することに依つて、測定する。線條の長さは既に哩でわかつてゐるから、これは即座に地球の諸次元を提供する。ヘイフオード（一九〇九年）に従へば、地球の赤道半徑は六三七八・三八八浬又は三九六三・三四浬であり、極半徑は六三五六・九〇九浬又は三九四九・九九浬である。

その次の一步は、太陽の大きさを地球の大きさに依つて決定することである。太陽が月のために蝕される場合、月が最初に太陽面を蔽ひはじめる時間は、地球の表面の位置に依つて違ふ。そして觀測された時間の差は、我々に、月の距離を地球の表面に於けるもろくの既知の距離に依つて測定することを得させる。かういふ仕方で、月の平均距離は三八四、四〇三浬又は二三八、八五七浬であることがわかる。同じ仕方で、遊星金星の太陽面通過は、太陽系の規模を地球の諸次元に依つ

て決定する機會を與へる。小遊星エロスは、それよりも更に良い機會を具へる。パリ會議（一九一一年）は、地球の太陽からの平均距離のための一番尤もらしい値として、一四九、四五〇、〇〇〇、〇〇〇哩又は九二、八七〇、〇〇〇哩を採用した。一八三八年に完成を見た、その次の且つ最後の一步は、地球の軌道の直徑を基線として使用して、星々の距離を決定することである。

標準ヤード又はメートルから地球の表面に於ける測定された基線へ移る最初の一步は、長さに於いて數千倍の増加を含んでゐる。この基線から地球の直徑へ移るその次の一步に含まれてゐる増加は、これまた幾千といふ増加である。それからまた、地球の直徑から地球の軌道のそれへ移るその次の一步も、幾千といふ増加を含んでゐる。しかし、地球の軌道から星々の距離へ移る最後の一步は、百萬倍といふ増加を含んでゐる。

最近の測定に依ると、一番近い恒星さへ殆んど全く一番近い遊星の距離の百萬倍であることがわかる。金星は、地球に最も近づいた時でも、二千六百萬哩離れてゐる。ところが、一番近い恒星、即ちセンタウル座プロクシマは、二十五萬億哩も離れてゐる。この後者は、南半球に於ける周知の明光星センタウル座 α 星の微光伴星である。一番近い時の遊星と一番近い恒星との距離を表にして示そう。

百萬といふ數を想像することは殆んど不可能であるから、恒星は遊星の百倍遠いといふ説明だけでは、太陽系を空間に於けるその一番近い隣から分け離す間隔の廣大さが、ほんの少しわかるにすぎない。おそらく、もろくの恒星の外観上の固着性は、もつと活々とした印象を與へるであらう。

地球が一年かかつて太陽の周圍を廻るのは、一秒に約十八哩二分の一の速力に於いてである。それは急行列車の約千二百倍である。太陽も、ほとんど同じ割合で——正確に云へば、急行列車の速力の約八百倍で、もろくの恒星の間を進んで行く。そして、大ざっぱに云へば、一層近い遊星や恒星の大多數も、同様な速力で運動する。すべての天文學的物體は、全く相等的速力、我々の考へを具體化して云へば、急行列車の速力の一千倍に等しい速力をもつて運動する、と想像しても、眞理に對して間違つた近づき方をするにはならないであらう。天文學的物象の距離は、今や、それが空を横切るやうに見える速力に依つて示される——その外観上の運動が遅ければ遅いほど、その距離は大きいし、その反對も本當である。ところで、遊星が空を横切るのは非常に速いので、夜から夜へかけての、また時間から時間へかけてさへのその運動を發見するのは、全く容易である。恒星が運動するのは非常に遅いので、望遠鏡の助けがなければ、世代から世代へかけての、又は時代から時代へかけてさへのどんな運動をも發見することはできない。大體に於いて一層近い星から

形づくられてゐる、もろくの際立つた星座さへ、もろくの歴史的時代の全體に亘つて、現在のやうな外觀を保つて來たのである。一時間毎に位置を變へる遊星と、一世紀かゝつても決して感知できるやうな變化を示さない恒星とを對照すれば、恒星が遊星よりもどんなに遠いかに就いて活々した印象が得られる。

恒星の實際の距離を具體化することは、それよりも遙かに困難である。恒星の中の一最近いものさへ二十五億萬哩離れてゐる、と言つて見たところで、我々の心には何の具體的な觀念も起らない位である。しかし、距離は四・二七光年であるといふ別の言ひ方をすれば、少しはましであらう——それは、即ち、一秒に十八萬六千哩進行する光が、四・二七年かかつて進行する距離である。

光が無線信號と同じ速力をもつて進行するのは、双方とも電氣攪亂の波だからである。偶然にもこの速力は丁度音響の速力の約百倍である。音響と電波との速力の莫大な差は、普通の放送過程に活々と現はれる。一人の演説家がロンドンから放送する時、彼の聲は、音波となつて彼の口からマイクロホンまで三呎ほど進行するのに、それが電波となつて遙々ベルリン又はミランへ五百六十哩進行するよりも一層長くかかる。オーストラリアにゐる無線の聴衆は、放送される演奏會の音楽を演奏室の裏にゐて音響のみに頼る普通の聴衆よりも早く聞くわけである。彼等がそれを聞くのは、それが演奏されて一秒の十五分の一たつてからである。然も、光、又は光と同じ速力で走る無線の

波が、一番近い恒星に達するのに四・二七年かゝるのである。そのために、セントウル座プロクシマの住民は、地球上の演奏會を聞くのが四年と四分の一以上遅れるであらう。そして早晚我々は、地球上の音楽が、ノルマン人のイギリス征服（譯者註、一六六〇年）以前、ピラミッドが築かれる以前、人間が地球上に現はれる以前にさへ、進行しはじめてもまだ届かない他のもつと遠くさへあるもろくの恒星について考察しなければならないであらう。

第五節 寫眞時代

もし我々が、天文学の進歩を見るに當つてもう一つの陸標を選ぶのを許されるだけだとすれば、十九世紀の末になつて天文学に寫眞を應用するやうになつたことを擧げてよからう。これは、望遠鏡の發明以來他の如何なるものがさうしたよりも一層徹底的に進歩の闢門を開いた。これまで、望遠鏡は、空から來る光線を集め且つ屈曲させた後、この集中した光線を、人間の眼の瞳を経て網膜に投射したものである。それ以後は、望遠鏡がそれを今までとは比較にならないほど感應し易い寫眞感光板に投射することになつた。眼は一秒の何分の一の間印象を留め得るにすぎない。ところが、寫眞感光板は、その受ける凡ての印象を、長時間又は幾日間も貯へて、それらを實際上永久に記録する。眼は、もろくの天文學的物議の間の距離を、十字針金や螺旋や副尺から成る複雑な機械装置の助けに依つて測定し得るにすぎない。ところが、寫眞感光板はもろくの距離を自動的に記録する。眼は、先入觀念、忍耐、又は希望のために裏切られて、考へ得べきあらゆる型の誤謬を犯すことができ、また犯す。ところが、カメラは嘘を吐くことができない。

そこで、もし我々が二十世紀の天文学に於ける陸標を拾ひ出さうとするなら、或る意味でそれは

たゞ陸標だけから成り立つてゐることがわかる。十九世紀の、遅々とした、骨の折れる征服方法は、一種の黄金狂に席を譲つて、そこではもうくゝの權利が奪ひ合ひされた。地面はひツかれ、今までよりも眼立つた金塊が集められ、切通しは放棄されて何かもつと見込みのあるものと代へられたが、凡ては非常に速く行はれたので、自分の地位を書き記さうとするどんな試みも、ほとんど印刷されない先に時代遅れになるほどであつた。我々はたゞ新領土に關する一般的印象を與へようと試み得るだけである。このために、舊領土に關する只一つの議論も、新知識の光明に照らして見れば解き難いほどこんぐらがつてゐるであらう。

第六節 星群と連星系

空を一瞥すれば、又は、もつと良い方法として、空の一斷片の寫眞を一瞥すれば、大體に於いて星は空に無茶苦茶に散在してゐることがわかる。尤も、微光星が、我々が既に考察した天の河の中に、またその方向に向つて、集中してゐるのは例外である。空のどんな小さな切れツ端も、明光星や微光星が胡椒瓶から當もなくばら撒かれた場合とあまり違つてゐるやうには見えない。

然も、これだけで事は終るのではない。あちらこちらに、際立つた星の群が見える筈である。それらは全く偶然に寄り集まつたものではあるまい。オリオンの帶、ブレアデス座、ペレニスの髪、さては大熊座そのものさへが、偶然物のやうには見えないし、また事實上偶然物ではない。星々を分割して星座とする根據となり、またさういふ分割を是認するのは、これらの自然的星群の存在である。もつと先へ行くと、星々の物理的特質がどういふ仕方で研究されるかを説明するであらう。今はたゞ次のやうに言つて置くだけで十分である。いま擧げたやうな星群は、一般的に云へば、星の眞の家族であつて、單なる偶然的集合ではない、といふ考へを物理的研究は確證する、と。どんな一群の星、例へばブレアデス座の如きも、同一の物理的特質を示してゐるばかりでなく、同一の空

間運動を持ち、かくして永久に空を相互社會となつて運行する。さういふ星群は、物理的に類似してもあるし、一塊になつたまゝ運行しもあるから、星の家族と稱するのが適當であらう。しかし天文學者はそれらを『進行星團』と呼ぶことにしてゐる。

これらの家族は殆んど凡ての大きさを持ち、その中の最も小さい最も一般的な型は、只二つの成員から成り立つてゐる。その次の最も一般的な型は三つの成員から成り立つてゐる。空間に於ける最も近い三つの隣、即ちセンタウル座プロクシマ、センタウル座αの二つの星は、さういふ三重系を形づくつてゐる。その次に來るのが、四つ、五つ、六つの成員から成る系統であつて、さうやつて無限に續くのである。

我々は、先ず、只二つの成員から成る家族——一般に『連星系』と呼ばれてゐるもの——に注意を向けよう。たとへ星は胡椒瓶から無茶苦茶に空に振り撒かれたにしても、偶然法則に従つて、幾つの場合には、對の星が甚だ密接して現はれることがあるであらう。そしてどんな星辰視野の寫眞を研究して見ても、さういふ密接した對が事實上非常に澤山存在してゐることがわかる。しかし、その數は、偶然法則のみに依つて説明し得るよりも一層多い。何對かの星は偶然に密接してゐるのかも知れないが、その他のものを説明するには物理的原因が必要である。我々は、數年の間隔を置いて同じ視野を寫眞に撮り、その中に含まれてゐる様々の結果を比較することに依つて、神秘を解

釋することができる。最初は密接した對のやうに見えてゐた星の幾つかが、絶えず運動して、互に離れ合つてゐることがわかるであらう。これらは、たとへ空では密接してゐるやうに見えても、空間に於いてはさうなつてゐない對の星である。一つの星が、たまたま、地球から見えるまゝの他の星と殆んど全く同じ線上に存在してゐたまでのことである。中には、時間が過ぎても別れない對がある。二つの構成者は、相互の相對的位置を變へることはあるが、全く別々になることは決して無い。すべての中の最も單純な場合に、一つの星が、他の星の周圍にほぼ圓形の軌道を描くことはあるかも知れない。それは丁度、地球が太陽の周圍で、月が地球の周圍でさうするのと同じであつて、理由も全く同じである。即ち、引力がそれらを一緒にさせて置くのである。

引力法則

クリケット球を手から離すと、それは地上に落ちる。我々は言ふ、この落下の原因は地球の引力にある、と。それと同様に、空中に投げられたクリケット球は、投げられた方向へ永久に進んで行きはしない。若しさうなつたら、それは永久に地球を離れて、空間の中へ遠ざかつて行くであらう。それを段々曳きずり落す地球の引力に依つて、それはこの運命から救はれて、再び地球へ落下する。我々がそれを遠く投げれば投げるほど、地球へ落下する前に遠くへ進んで行く。鐵砲から發射され

た同様の球も、地球へ引き戻される前に何哩も進んで行くであらう。

これら凡ての現象を支配する法則は、全く單純である。地球の引力は、すべての物體を一秒間に十六呎ほど**東方へ**落下させる、といふのがそれである。この事は、自由に落下する凡ての物體に就いて眞實であつて、それらがどんな風に運動するかはこの場合問題ではない。あらゆる物體は、何らかの仕方では引力に抵抗して支へられる場合を除けば、どの一秒の終りにも、引力がその一秒の間作用してゐなかつた場合にくらべて、十六呎ほど低くなつてゐる。

これが何を意味するかを例證するために、假に、第二圖に於ける大きな圓形曲線 ABC をもつて地球の表面を表はし、一つの彈丸が、高所 AA' の頂上 A から水平に發射されるとしよう。若し彈丸が引力に依つて東方へ牽引されなかつたら、それは AB 線に沿うて無限に空間の中へ進んで行くであらう。若し AB が、それがこれらの想像的條件の下で一秒に進行する距離であるとすれば、一秒間の實際の飛行の終りには、それは B には無くて、地球に十六呎近い一つの點にあるであらう。といふのは、引力がこれをその飛行中十六呎ほど引きずりおろしたからである。例へば、若し第二圖に於ける $B'B$ がたま／＼十六呎であつたとすれば、彈丸は正一秒の飛行の後地球を B' に於いて打つてあらう。

別の實例として、我々は次のやうに想像しよう。 B より十六呎下方への落下は、彈丸を地球へ曳

きずり落とさないで、たゞ p 點へ落す。 p 點は、地球の表面から A 點と全く同じ高さであり、この A 點に向つて彈丸は出發したのである、と。若し引力が作用してゐず、そのために彈丸が AB 線に沿うて進んで行つたとすれば、地球からのその高さは絶えず増加するであらう。實際に於いて、我々が今考察しつつある例に於いては、引力は、他の場合に起るべき高さの増加を相殺するほどの割合で彈丸を牽引するので、彈丸の高さは増加もせず減少もしない。それは空間の中へ飛び去りもしなければ地球へ落ちもしないで、地球の周圍に無限に圓を描きつづける。

一つの簡単な幾何學的計算に依ると、彈丸が一秒間に飛行する距離 AB は、二萬五千八百八十呎又は四・九〇哩でなければならぬことがわかる。かくして、若し我々が一秒四・九〇哩の速力をもつて水平に彈丸を發射することができたら、それは地球の周圍に無限の圓を描くであらう。といふのは、地球の引力が、彈丸の、直線 AB に沿うて飛行する自然的傾向を全く相殺するからである。

* C は地球の中心、 bCD は b を貫く直徑であるとしよう。すると、 $BA^2 = Bb \times BD$ となる。この場合、 Bb は十六呎に等しく、地球の直徑よりも十六呎多い BD は四千百九十萬呎に等しい。この計算から、我々はいつでも、 BA は二萬五千八百八十呎に等しいと算出することができる。この算出に於いては、勿論、 AA' なる丘の高さが、地球の直徑

との比較に依つて無視されてゐる。

一六五五年に、ニュートンは次のやうに疑ひはじめた。この同じ引力は、月が、一つの切線に於いて空間中へ走り去らないで、地球の周圍に圓形軌道を描く原因ではあるまいか、と。地球の中心からの△の距離は、二十三萬八千八百五十七哩、即ち地球の半徑の六〇・二七倍である。月は一ヶ月（二十七日四時間四十三分十一秒半）毎にこの大きさの圓を描くから、我々は、その軌道に於けるその速力は一時間に二千二百八十七哩と計算することができる。一秒の後には、それは三百五十呎ほど進行するであらう。そして若し月が嚴密な直線進路を保ちつづけるなら、これは月を地球から〇・〇〇四四呎ほど遠く運び去るであらう。かくして、地球の周圍に正確な圓形軌道を保つには、それは一秒に〇・〇〇四四呎ほど落下しなければならぬ。これは物體が地球の表面に於いて一秒に落下するよりも遙かに少ない。しかし、ニュートンは、重力は我々が地球の表面から遠ざかるに連れて弱まるに違ひないと推測した。實際に於いて、地球の表面に於ける物體は、月がその軌道に於いて東方へ落下するより三千六百三十二倍速く落下する。ところで、三六三二は六〇・二七の自乗（即ち $3632 = 60.27 \times 60.27$ ）である。そこで、ニュートンは知つた、若し重力が距離の逆自乗に従つて減少したら——言ひかへれば、若しそれが丁度距離の自乗が増加するのと同じ

速さで減少したら、月の落下も全く正量になるであらう、と。もつと先へ行くとわかるやうに、天文學的觀測はこの法則が本當のものであることを無數の仕方で確證する。これがニュートンを導いてあの有名な引力法則を提出させるに至つたのである。それに依れば、地球のやうな如何なる物體の引力も、この物體からの距離の自乗とは逆に減少する。

シー・ヴィー・ボイス教授や、その他の人々は、數噸の鉛が實驗室で働かず引力を測定した。そして、この知識をもつてすれば、地球が、その外側にある諸物體にその觀測された引力を及ぼすには幾噸の重量を含んでゐなければならぬかを計算するのは容易である。これに依ると、地球の重量は、丁度、6,000,000,000,000,000,000,000,000噸、すなはち、先へ行つて書き記すやうに、 6×10^{21} 噸であらねばならないことがわかつた。

一この著書全體を通じてもさうであるが、ここでも、我々は、百萬瓦又は二二〇四・五ポンドから成るフランス式又は測度用噸を使用する。二二四〇噸から成るイギリス式噸はフランス式噸の一・〇一六〇に等しい。

十 6×10^{21} といふ記數法は、六の後に二十一の零が続いた數を表はしたものである。この速記的記數法は、事柄を簡單にするために、天文學的數を論ずるには缺くべからざるものである。一百萬は 10^6 であり、一萬億は 10^{12} である、等々。

同様の記數法が、非常に小さな數を表はすのに必要である。 10^{-12} といふ表はし方が
 10^{12} 分の一の代りに使用される、等々。かくして、 6×10^6 は百萬分の六または
 0.000006 を表はす。

丁度、地球の引力が月をして地球の周圍に永久に圓を描かせるやうに、太陽の引力も地球やその他凡ての遊星をして太陽の周圍に圓を描かせる。どんな遊星でも太陽からの距離や、またその軌道に於けるその距離を知つて、我々はこの遊星が太陽の方へ一秒に墜落する距離を計算することが出来る。これに依つて、太陽の引力的牽引の量がわかる。そしてこの量から、我々は、太陽の重量は、地球重量の約三三二〇〇〇倍、即ち、殆んど全く 2×10^{25} 噸でなければならぬと計算することが出来る。もろくの遊星の中の何れを使用して見ても、太陽のために全くそれと同じ重量が得られる。これは我々の結果に對する確信を與へるばかりでなく、附隨的に、ニュートンの引力法則が本當のものであることの著しい確證をも提供する。といふのは、若しこの法則が不正確であるか本當のものでないとしたら、色々の遊星が悉く太陽の重量に關して全く同じ事を示すやうなことはないだらうからである。アインシュタインが最近證明したところに依ると、この法則は絶対に正確なのではないが、不正確の量は、最も近い遊星、即ち水星を除けば、感知できない。そして水星に於いてさへそれは非常に少ないので、我々は我々の現在の目的のためにはそれに就いて悩ま

れる必要はない。

我々は、太陽や地球の重量を、その引力的牽引に——又は、數學者が言ふやうに、『その引力範圍の中に』——拘束される物體の運動を研究することに依つて測り得る如く、自己の引力的吸引に依つて自己の周圍で第二の小物體に運動させてゐる、他のどんな物體の重量をも、測ることができる。木星のもろくの衛星の運動は、木星の重量を測ることを可能にする。その重量は、約 1.92×10^{24} 噸であることがわかる。それは地球のそのの三百十七倍であるが、太陽の重量の 10^{47} 分の一にすぎない。同じやうに、土星の重量は 5.71×10^{23} 又は地球のそのの約九四・九倍であることがわかる。

星の重量測定

ところで、今度は、今説明したばかりの諸原理の著しい適用を示さう——即ち、空に於いて相互の周圍に軌道を描いてゐる二つの星を觀測すれば、それらの星の重量を、その軌道の研究に依つて測り得るのである。一般には、この問題は全く我々が今論じたばかりの諸問題ほど簡單ではない。それを適當に扱ふには、もう一度ニュートンの數學的事業を振り返らなければならない。

我々が既に見たやうに、一秒に四・九〇哩の速力をもつて水平に發射された拋射物は、地球の周

圍に無限の圓を描くであらう。若しそれが何か他の方向に何か他の速力をもつて發射されたら、どんな事が起るであらうか？

これに對する答へをニュートンは提供した。彼が證明したところに依ると、小さな物體が大きな物體の引力的牽引の下で自由に運動することを許された時、若しその速力が或る臨界量を越えたら、それは一緒に走り去るであらう。この場合には、その軌道は雙曲線と呼ばれる曲線となる。

然し若しその速力がこの臨界量よりも少ないなら、その軌道は常に橢圓となるであらう——これは一種の引き延ばされた圓又は卵形曲線である（第四圖、八二頁）。これに先立つて、ケプラーは次の事を見出した。即ち、太陽の周圍に於ける諸遊星の實際の通路は、正確な圓ではなくて橢圓である。尤も、これは大概の場合あまり圓とは違はない橢圓である。これは數學者たちが『小偏心率を持つ橢圓』と呼ぶところのものである。この事は、ニュートンの引力法則に關する更により以上の確證を與へる。といふのは、若し引力の力が距離の逆自乗といふニュートンの法則以外のどんな仕方に於いてでも減少するなら、諸遊星の軌道は橢圓状にはならないだらうからである。

* 橢圓に關する最も簡單な定義は、かうである。即ち、それは一つの運動する點Pに依つて描かれる曲線であり、Pは、二つの不變の點S、Tからの距離PS、PTの距離の總和がいつも同じであるほどの仕方で運動する。實際に於いて我々が最も容易に橢圓を描き得るのば、一本の環状の糸

SPTSをして、製圖板に刺した二本の製圖用ピンS、Tの周圍を滑走させることに依つてである。先づ、絲を一本の鉛筆でPに於いてひつばる。そして絲を始終緊張させたまゝ鉛筆を廻せば、容易に橢圓が描かれるであらう。若し製圖板に於ける二つのピンS、Tが互に近づけて置かれたら、鉛筆Pに依つて描かれる曲線は殆ど圓形になる。距離STの、絲 $PS+PT$ の剩餘の長さに對する比が、橢圓の『偏心率』と呼ばれるのである。それは必然的に單位よりも少ない。なぜなら、三角形の二つの邊は共に第三の邊よりも大きいからである。

制限が附けられて偏心率が零になる場合には、橢圓は圓になる。若し偏心率が、殆んど單位ほどの大きさになるなら、橢圓は非常に延びる。偏心率の變化を0から1までにすれば、橢圓の色々な形が悉く得られる。そしてこれらは、一つの小さな物體が、引力のある重い塊の周圍に描き得る、軌道の色々な形を悉く表はしてゐる。點S、Tは橢圓の中心點と呼ばれ、吸引力のある大きな物體はいつも橢圓の二つの中心點の何れかを占める。

天文學者が、空の連星の諸運動を研究する時に一般に見出すのに、二つの構成者は相互の周圍に於ける圓に於いて運動しないで橢圓に於いて運動するといふことである。ここでもう一度ニュートンの法則が確證されて、我々は次のやうに推定する資格を與へられる。連星を結合したまゝにして

置く諸力は、月が地球から、又は遊星が太陽から走り去るのを防ぐのと同じ引力的諸力である、と。これらの楕圓の研究に依つて、星の重量を測るのが可能になるのである。若し二つの構成者の一方が他方よりも非常に重いなら、前者は、軽い方の構成者がその周圍に楕圓を描く間靜止してゐるであらう。この運動は本質的に太陽の周圍に於ける遊星のそれに類似してゐる。さういふ例が現實の連星に觀取されないのは、二つの構成者が一般に重量の點で匹敵してゐるからであつて、この事は問題に新しい複雑さを與へる。ここで數學上の詳細な議論に這入つて行く必要はない。たゞ、いづれの星も靜止してゐないと言つて置けば十分である。二つの構成者は相異なる大きさの楕圓を描く。そしてこの二つの楕圓の研究から、二つの構成者のどちらの重量をも決定することができるのである。

＊彼が實際に觀測したのは、空に於ける軌道の投射である。しかしこれば、楕圓の『投射』は常に楕圓であるといふ幾何學上の有名な定理である。

次の表は、かういふ仕方で、太陽に最も近い四つの連星系の重量を測つた結果であつて、太陽の重量が1とされてゐる。

星の重量（太陽に近い連星系）

これらの星の重量は、太陽のそれとあまり違いはないことがわかる。尤も、空間全體は、たま／＼太陽に近いこの表の四つの星よりも一層大きな範圍を提供する。しかし、空間全體に於いてさへ、重量が少しでも正確にわかつてゐるどんな星も、クルガア六〇B以下に少ない重量を持つてはゐない。尤も、宇宙の規模の他の涯には、この表の何れよりも遙かに多い重量を持つ星が多數に存在してゐる。重量がかなり正確にわかつてゐるもの／＼の星の中では、HD一三三七星（ビーアス星）が一番重くて、その二つの構成者はそれぞれ太陽の三六・三倍及び三三・八倍ほど重い。プラスケット星、BD六度帶一三〇九は、確かにそれよりも更に重くて、その構成者は、少なくとも太陽の七十五倍及び六十三倍、また恐らくそれ以上の重量がある。正確な重量は知られてゐない（九二頁参照）。大犬座二七系は四つの星から成り立つてゐる。それらを寄せ合せた重量は、現在役立つてゐる證據に依れば、少なくとも太陽のそのの九百四十倍であるやうに見える。しかし我々のひとつとして知られる。

4 Plaskett's Star, HD47129. いっかくじゅう座にある分光連星で、あわせて100太陽質量あり、最も重い連星

は、星の重量の普通の程度をこんなに越える數字を受け容れる場合には、現分警戒するのが妥當であらう。

上掲の非常に簡単な表に於ける普通の連星構成者は、太陽の重量の○・九四倍を持つてゐる。そのために、わが太陽の重量は平均重量よりも寧ろ多いやうに見える。そしてこの事は星の重量のものと大仕掛な研究に依つて確證される。

我々はおそらく先天的に、星々があらゆる種類の重量を持つてゐることを豫期したであらう。といふのは、太陽のその幾百萬倍の重量を持ち、又はたゞ地球のそれに等しいか、それよりも少ない重量を持つ星が存在してならない明白な理由はないからである。しかし實際に於いては、星々の重量は、かなり相等しいことがわかり、**太陽のそれと非常に違つた重量を持つてゐる星は甚だ少數である**。この事は、星といふものは一定種類の天文學的産物であつて、發光物質の當もない厚切ではないといことを示すやうに思はれる。

光度

八三頁にかゝげた表の最後の欄には、星の『光度』が示してある。これが意味するのは星の燭光であつて、太陽のそれが單位になつてゐる。例へば、シリウスのために二六・三と記載してある

のは、シリウスは、空間に於ける燈臺と見做される時、太陽の燭光の二六・三倍を持つてあるといふことを意味する。星々の光度は、重量よりも非常に大きな範圍を示してゐる。一般的に云へば、我々がおのづから豫期しなければならぬやうに、最も重い星は最も多く發光することがわかる。しかしその光度は重量に少しも比例してはゐない。シリウスの重い方の構成者は、軽い方の構成者の重量の二・九倍を持つてゐるにすぎないが、光度は一萬倍である。また、プロシオン系に於いては、重い方の構成者は、軽い方の構成者とくらべて重量は三・二倍であり、光度は十八萬倍である。一噸當りの燭光は、重い星に於いては、軽い星に於けるよりも遙かに大きい、といふのが普遍的法則であるやうに見える。この事は、天體物理學の、中心的事實の一つであり、最初の一見では、最も錯綜した事實の一つである。それは非常に根本的であり遍在的であるから、星の機構に關するどんな見解も、それを説明することができなければ受け容れられ得ない。

分 光 速 度

星の距離がわかると、空を渡るその運動は、我々がそれを見る線に對して直角をなす——言ひかへれば、視線を横切る——方向に於けるその速力を告げはするが、この線に沿うたその速力を發見する手段を提供しはしない。我々は、我々の方へまつ直ぐにやつて來る物體の運動を見ることは

できない。そして、全く視線に沿うた方向に於いて、一秒に百萬哩も運動しつゝある星は、依然として空に静止してゐるやうに見えるであらう。視線に沿うた速度を評價するために、天文學者は分光器の助けを借りる。

光といふものは、相異なる色の光の混合である。そして、ニュートンが、例の有名な分光鏡をもつて日光を虹の凡ての色に分析したやうに、分光器も、星から来る、又は實際どんな源からでも来る光を、それを構成するさまざまの色に分析する。この器具は、分析された光を擴げて、一條の連續的に段々のついた色の光にする。それは『スペクトル』と稱される。このスペクトルに於いては、もろくの色は、虹の場合と同一であり、また虹の場合と同じ順序に配列されてゐて、紫色から縁色及び橙色を経て赤色に至つてゐる。これには物理的理由はない。先へ行くとわかるやうに（一六七頁）、光といふものは、波の連續から成り立つてゐる——それは風が吹いて來て池の表面に生ずる小波のやうなものである——そして光の相異なる色は相異なる長さの波から生ずるのであつて、赤色の光は最も長い波に依つて造り出され、紫色の光は最も短い波に依つて造り出される。スペクトルに於けるもろくの色は、波長の順序になつてゐて、最も長いもの（赤色）から最も短いもの（紫色）に至つてゐる。典型的な星のスペクトルに於いては、先へ行つて（一八一頁）論するやうなもろくの理由で、或る短い節圍の色又は波長が一般に缺けてゐる。そのために、スペクトルは

多數の暗線又は帶に依つて横斷されてゐるやうに見え、かくして連續的な色の段々といふよりも寧ろ一つの模様になつてゐる。星のスペクトルの實例は第八畫に示してある。

星々を分類するには、星々の放出する分光型に依るのが便利である。星のスペクトルは、第一にその表面温度に依存することがわかる。従つて、星のスペクトルは、大體に於いて、單一の連續的な系列に配列することができる。そしてその普通の分類は、O、B、A、F、G、K、Mといふ文字の系列に依るのであつて、必要があればこれが更に十進細分され、温度は我々がこの系列を過ぎて行くに連れて低下する。そのために、O型の星は最も高い表面温度を持ち、M型の星は最も低い表面温度を持つてゐることになる。第八畫の左端には、もろくの分光型が示してある。

星から受けられる光が分光器に於いて分析される時、線又は帶の模様は何れかの方向へ具體的に移動することがわからう。若し移動がスペクトルの赤色の末端の方へ向つてゐるなら、この星の放出する光は、當然さうあるべき正常の状態に於いてよりも一層赤色になつて我々のもとへ届きつつあるのである。そして赤色の光は最も長い波長を持つてゐるから、これは、光のあらゆる波は正常の場合よりも一層長い——一層引き延ばされてゐる——ことを意味する。この星は我々から遠ざかりつつある、と我々は結論しよう。同様に、若し分光模様がスペクトルの紫色の末端の方へ移動するなら、この星は我々の方へ接近しつつあることがわかる。分光移動は、それを放出する物體の運

動から起るのであつて、一般に『ドブラー効果』と稱される。その量から我々は視線に沿うた星の實際の速力を計算することができ、この計算は驚くほど簡單である。若しスペクトルに於けるそれ〴〵の線又は帶が、いつもそれと結びついてゐる波長よりも一%の百分の一ほど長い波長を表はしてゐることがわかるなら、その時には、この星の後退速力は、光速度、即ち一秒に一八・六哩の一%の百分の一である——そして他の凡ての變位に取つても同様である。

分光連星

連星系の二つの構成者は一般に相異なる速力をもつて運動しつゝあるから、連星系の正常のスペクトルは二つの別々の重なり合つたスペクトルから成り立つてゐる。といふのは、二つのスペクトルは、二つの構成者の速力に相應した相異なる移動を示すからである。連星系の二つの構成者の觀測された軌道から、天文學者は更に進んで、これらの構成者がどんな速力をもつて視線の方向へ運動するかを計算することができよう。そしてその時には、若しこの系統から來る光が分光器で分析されたら、二つのスペクトルがどの程度に變位しなければならないかを豫言することができる。分光器は勿論彼の豫言を確證するであらう。

これとは反對の過程を想像することはもつと教訓的である。假に、一つの星から來る光を分析す

るに當つて、天文學者は一つの複合スペクトルを得たとし、またこのスペクトルに於いては、二つの別々のスペクトルが、その正常の位置を中心として、後方及び前方へ律動的に移動するとしよう。二つのスペクトルが存在するといふ事實に依つて、彼は連星系を取扱ひつゝあることがわかる。若し律動的移動が二年毎に繰り返されるなら、その軌道は二年かゝつて一廻りされることがわかる。彼はこの星を直視に依つて研究して、それは二つの構成者が二年毎に相互の周圍を一廻りし合ふ連星系であることを發見する。

彼は別のスペクトルを試験して、それが二年毎に律動的に移動することを知る。この星を直接に眺める時には、只一つの光點を見得るにすぎない。勿論、二つの星が存在してゐるに違ひないのであるが、兩者は只の二日といふ短い時間に相互の周圍を廻り合ふといふ單なる事實に依つて、兩者は互に非常に密接してゐるに違ひないことがわかる。そして彼は自分の望遠鏡が映像を二つの別々の光點に分ち得なかつたことに對して驚きを感じるには當らない。分光器に依れば連星であることがわかり、望遠鏡に依れば普通單一の光點であるにすぎないことがわかる此の種の系統は、『分光連星』と呼ばれてゐる。かういふ系統は一千以上知られてゐる。

第五圖 小軌道 AA' と大軌道 BB' とは、視線 CE に沿うて同一の速度を示す。

天文學者は若しさういふ系統の軌道を分光觀測からのみ構成しようとするなら、もろくの困難に陥つてしまふ。彼の觀測は、視線に沿うた速度を告げるだけであり、これらの速度は實際の速力と縮畫程度との双方に依存する。視線に對して殆んど直角をなす平面の大軌道からも、非常に縮畫した小軌道からも同一の速度が生ずるかも知れない。星々の現實の軌道又は重量を分光觀測のみから計算することは不可能である。

蝕連星

一つの例外がある。假に、星の光は量に於いて規則的な間隔を置いて減少し、それに次いでその最初の強度に還ることがわかるとしよう。光の減少に關する明白な解釋は、系統の一つの構成者がもう一つの構成者を蝕しつゝあるといふことである。そしてこれは、軌道が非常に縮畫されて、その平面が、地球を貫いて、又は少なくとも地球に甚だ密接して、通過する場合に起るだけである。さういふ場合には、全體の軌道を構成し換へ、それに依つて二つの構成者の重

第六圖 蝕連星の構成者と軌道

量を計算することができる。そればかりでなく、蝕が續く時間の長さに依つても二つの構成者の現實の大きさがわかり、そのためにこの系統の完全な畫像を描くことができる。二つの典型的な蝕連星の諸次元及び軌道に關する表圖が、第六圖に示してある。これらは同一の縮尺に描かれたものであり、この縮尺は太陽を表はす小圓に依つて示してある。

分光連星にどんな蝕も起らない時には、どれだけの縮畫を斟酌すべきであるか、それは我々にはわからない。しかし我々は縮畫の平均程度を假定することに依つて構成者の重量に關する一般的觀念を得ることができる。若し我々が相異なる縮畫程度を順々に假定するなら、計算された重量は軌道の平面が地球を貫いて通ると假定された時に——即ち、軌道が、この系統が蝕系統であるかのやうに計算された時に、最も少なくなることがわかるであらう。かくして我々は、非蝕連星の構成者の現實の重量を發見することはできないにしても、それが受けなければならない制限、即ちこの系統が蝕連星であるかのやうに計算された重量を常に告げることができる。かういふ仕方では、プラスケット星の二つの構成者は、太陽の重量の七十五倍及び六十三倍以上を持つてゐるに違ひないことがわかる。

第七節 變光星

星々の大多數は、全く不變の光をもつて輝いてゐるので、星は多數の燭光を持つてゐると言へる。例へば、太陽は 3.23×10^{31} 燭光の光を放出する。

我等をめぐる宇宙

然も、幾部門かの例外の星があつて、その光はさまざまに明滅する。或るものに於いては、光度變化は全く規則的であつて、星が時計代りに使用されるのが尤もであるほど正確に繰り返される。他のものに於いては、光度變化は、全く規則的ではないにしても、ほど規則的である。ところが、更に他のものが存在してゐて、その光度變化は現在には全く不規則であるやうに見える。尤も、これらのものに於ける諸變化が、相當經路を辿つて法則と秩序に立ち還るであらうことは疑ひない。我々の現在の議論にとつては、さまざまの型の不規則性變光星はあまり重要でない。

セフェイド變光星

本當に面白い星々は、或る部門の規則的變光星である。それらは、一般に、その原型セフェウス座 δ 星に従つて、『セフェイド分光星』と呼ばれてゐる。これらの星の物理的性質と、その光度

變化の機構は、依然として理解されてゐない。それに關して色々提出される學説は、この舞臺では論ずる必要のない領域に屬してゐる（三一頁參照）。

それらの星の機構は何であらうと、觀測に依ると、これらの星は或る一定の特質を持つてゐるこ
とがわかる。この特質は最高の價值を持つてゐる。果してさうだとすれば、我々は、それが如何な
る理由に依るかに就いて悩まされることなしに、喜んでそれを受け容れて差支へない。蝕連星の全
く規則的な光度變化は、たとへ我々はこれらの變化の背後にある機構を理解しないにしても、それ
らの星を時辰儀にふさはしいものにするであらう。同様に、セフエイド變光星の光度變化は、これ
らの變光星を、宇宙の遠い諸部分を觀測する時に必要な測量竿として役立たせるやうな一つの性質
を持つてゐる。簡単に云へば、この特質は、我々はこれらの星の固有光輝を、從つてその距離を、
その觀測された光度變化から歸納することができることである。

光度變化は、星々の發見を容易にするほど特殊のものである。光の迅速な増加に續いて徐々とし
た漸次的減退が起るかと思ふと、今度はまた、前と同じやうな迅速な増加と徐々とした減退とが來
る。それはまるで誰かが、全く規則的な間隔を置いて大篝火に幾抱へも薪をくべてゐるやうである。



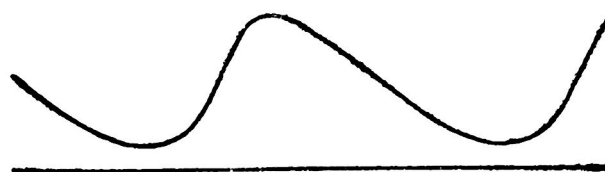
蝕連星の光度曲線 (駁者座 β)



不規則變光星の光度曲線 (蛇遣ひ座 RS)



セフエイド變光星の光度曲線 (蛇蜥座 ν)



長週期變光星の光度曲線 (鯨座 σ)

第七圖 相違なる部門に属する典型的な變光星の光度曲線

他のもう一部門の變光星、一般に『長週期變光星』として知られてゐるものも、それに幾分類似した光度變化を示す。しかし、二つの部門は、光度變化の週期が非常に違つてゐるので容易に區別できる。セフェイド變光星は、その循環期を一めぐりするのに、數時間、長くても數日間か數週間かかるにとどまつて、決して一ヶ月以上もかゝることはない。ところが、長週期變光星は一般に約一年を要する。

第七圖は、色々の部門に屬する典型的な變光星の光度曲線を示したものである。各圖表に於いて、時間の進行は左方から右方へ頁を横切る運動に依つて示してある。變化曲線がどんな瞬間にも水平線より高くなればなるほど、その瞬間に星はますます輝かしくなるのである。

銀河系の境界の近くに、小マゼラン雲として知られてゐる一つの星團がある⁵⁾ (第二十一書參照)

この星團の中には、セフェイド變光星が、澤山見出される。一九一二年に、ハーヴァードのミッス・リーヴィットは、この雲の中の一層輝かしいセフェイドの光は微かなものよりも一層徐々に變化することを發見した。どんなものでも、星の光をさまざまに變化させる原因となるべきものは、

⁵⁾ 小マゼラン雲は棒渦巻銀河で、銀河系の伴銀河。星団ではない。太陽系からの距離は20万光年。いっぽう天の川銀河のディスクの直径は約8~10万光年(もっと大きいかもしれない)。小マゼラン雲は銀河系の外にある。

弱い光に對しては、輝かしい光の場合よりも一層迅速に作用した。さまざまの距離にある多數のセフェイドの現視光輝は、勿論、たゞ部分的には、固有光輝又は燭光に依存するであらう。しかし、小マゼラン雲の中にあるもろくの星は、悉く、地球からほぼ同じ距離にある。かくして、この雲の中にあるもろくの星の現視光輝の差は、固有光輝の實際の差を表はすものでなければならぬ。そしてミス・リーヴィットの發見は、セフェイドの光度變化の週期はその燭光に依存するといふ形式で發表されることができた。これはたゞ小マゼラン雲の中にあるセフェイドのために證明されたにすぎないが、何處に存在しようと凡てのセフェイドにとつて、それは本當でなければならぬ。といふのは、我々は星の光を、單に我々からのその距離を變へることに依つて——事實上我々自身がそれから遠ざかることに依つて、一層徐々に又は一層迅速に變化させることができるとは考へられないからである。

ライデンのハーツスブルグ教授と、當時キルソン山天文臺にゐたシヤブレイ博士は、敏速にこの發見の持つ意味を把握した。若し、空の相異なる部分にある二つのセフェイドA、Bが、相等しい速さをもつて變化することがわかつたら、その時には兩者の固有の燭光は相等しくなければならぬ。かくして、兩者の現視光輝に於けるどんな差も、我々からの兩者の距離の差にまで遡ることができなければならない。若しAがBの百倍ほど輝いて見えるとすれば、BはAの距離の十倍でな

ければならない。同様に、第三のセフェイドCはBの距離の十倍であることがわかるかも知れない。そこで今やCはAの百倍遠いといふことがわかる。そして若しDがCの十倍離れてゐることがわかるなら、DはAの千倍遠いといふことがわかるわけである。そこで我々は更に進んで、我々の測量竿を組立てて、絶えずそれを延長することができる。我々が、殊のほか輝かしい星であるセフェイド變光星さへ薄れて見えなくなるほど大きな距離に達するまで、そこには何の制限もない。

ここまでは、もろ／＼のセフェイドの比較的距離を考察したただけであつた。然し、一層近いセフェイドの多數が持つ絶對的距離は、既に説明した視差方法に依つて——即ち、太陽をめぐる地球の運動から生ずる、空に於けるその外觀上の運動を測定することに依つて、決定された。これらの星のどの一つをでも原セフェイドAとすれば、我々は絶えず一つのセフェイドから他のセフェイドへ進むことができ、従つて空の凡てのセフェイド變光星の絶對的距離を計算することができる。

かういふ仕方では、セフェイド變光星の變光週期と光との間の觀測された關係——一般に『週期光度法則』として知られてゐるもの——は、一つの規模を提供し、それに基いて、セフェイドの絶對光度、即ち燭光が、直接にその光度變化の觀測された週期から判讀され得る。セフェイド變光星は、宇宙の遠い諸部分に設けられた燈臺と見做されて差支へない。丁度水夫が燈臺を認めるやうに、我々はそれらをその光の性質に依つて認めることができる。水夫が海軍省の海圖から燈臺の燭光を判讀

し得るのと同じほど容易に、我々はその燭光をその観測された光度變化の週期から判讀し得る。セフェイドの現視光輝は、我々からのその距離を告げる。

*例へば光度が四十時間といふ週期を経て變化するセフェイドは、ほぼ太陽のその二百五十倍の光度を持ち、従つてそれは 8×10^{30} 燭光である。十日の週期は、太陽のその一千六百倍の光度即ち 5.17×10^{30} 燭光を示す、等々。若し遠い天文學的物象の中の星が、十日の週期をもつて變化することが観測され、この變化の性質に依つてそれがセフェイド變光星であることがわかるなら、その實際の燭光は 5.17×10^{30} でなければならぬことがわかる。その現視光輝は、十六等星のそれであることが観測される。それは専門的用語から離れて云へば、我々は五百七十哩の距離にある只一本の蠟燭からと同じだけの光をそれから受けるといふことを意味する。一本の蠟燭と 5.17×10^{30} の蠟燭との相違は、従つて、五百七十哩と、件の物象の距離との相違に相當する。そこで、光は距離の逆自乗に従つて減少する以上、我々は次のやうに計算することができ。即ち、件の物象の距離は、

$$\sqrt{5.17 \times 10^{20} \times 570 \text{ パイル}}$$

又は約二二〇、〇〇〇光年でなければならぬ、と。

近代の天文科學にとつては、この事全體の重要性を過大評価することは困難であらう。これは、宇宙の全體ではないにしても、少なくともセフェイド變光星が見えるあのまろくの部分を観測するための方法が見出されたことを意味する。實際に於いて、この最後の制限は重要ではない。とい

ふのは、セフェイド變光星は空間に甚だ氣まゝに散在してゐるのである。自然の勢ひとして、この方法は宇宙の最も遠い諸部分の探查にとつては非常に價値がある。ここでは、それは他のものゝ方法が完全に失敗しても勝ち誇つた成功を見せる。視差方法は、我々が約百光年以上の距離を測量して見ようと試みると失敗しはじめる。このくらゐの距離にある星が、太陽をめぐる地球の運動の結果として空に描く外觀上の通路は、二哩先にあるピンの頭ほどの大きさである。洗練に洗練を重ねた近代の道具をもつてしても、こんな小さな運動を發見するのは全く困難であり、それを正確に測定することは實際上不可能である。『週期光度法則』に従へば、百萬光年までの遠さにある物の距離を測定することができる。それでゐて、誤差の割合は、百光年離れてゐるにすぎない星の視差測定に豫期されるより一層少ない。

第八節 空間測量

これだけで空間測量の近代的方法が盡きたわけでは決してない。容易に認められ、またどんな場所に見出されようと同一量の光を放出する、どんな標準型の天文學的物象も、天文學的距離を測定する明白な手段を提供する。といふのは、一旦さういふ物象の固有光度が決定されたら、そのあらゆる場合の距離をその現視光輝から測定し得るからである。

週期を割當てられたセフェイド變光星は、さういふ標準的物象の最も顯著な實例を提供するが、他の三つのものも有効である。尤も、この三つは一般にセフェイドと同じほど有用のものではない。第一に來るのは、別の型の變光星、既に擧げた『長週期變光星』である。これらは一般にセフェイドに似てゐるが、光度がそれよりも非常に徐々として變化することだけは別である。これらの星は本來セフェイドと比較してさへ遙かに多く發光し、その多くは太陽の一萬倍發光する。従つてそれらは非常に距離を隔てて見ることができ、最後には、セフェイドさへ没して見えなくなつてゐる空間の深みを測る手段を提供するかも知れない。

次に來るのは、*novae*、即ち新星である。時々空の普通の星が突然爆發して驚くべき光の灼熱とな

り、おそらく原光輝の千倍も輝くことがある。これらの激しい爆發の原因は今もなほ討論材料となつてゐて、徹底的に有力な説明はまだ提供されてゐない。しかし、比較的近い新星の研究は、普通の新星の、最も輝かしい時の光度に關する報告を提供した。そして、新星は、空のさまざまな部分に、わけても銀河外星霧の中に、現はれるから、それらは星や星霧の距離を測定する粗笨な手段を提供する。

青星は更に別の方法を提供する。これらは非常に多く發光し、固有光度の點では何れも殆んど違はない。更にまた、どんな特殊な星の光度も、一般に、我々が先へ行つて説明するやうなものゝ方法に依つて、それが放出する光の性質からかなり綿密に計算することができる。これは、青星の、従つて勿論それがその中に見出される天文學的物象の、距離を決定することを可能にする。

種類の違つた更に他の二つの方法にも簡單に言及して差支へない。キルソン山天文臺の指導者ダブリュー・エス・アダムスやその他の人々が見出したところに依ると、或る部門の星々のスペクトルに於ける或る明確な特色は、それを放出する星の固有光輝に關する報告を傳へる。この報告があれば、この星の距離をそのの現視光輝から見積ることは容易である。これは一般に分光視差方法と稱されてゐる。

最後に、太陽系外空間の至る所に擴がつてゐる星霧狀物質の散雲（六一頁）は、その中を進行

する光の性質に影響を及ぼすことがわかる。そのために、星のスペクトルは、この星の光が通過して來た雲の量についての暗示を與へ、これはまた銀河系の内側に於けるもろもろの距離を見積る粗笨な手段を提供する。

球状星團

セフエイド光度法則は最初ハーツスブルングに依つて小マゼラン雲の距離を見積るために使用された。その研究からこの法則が初めて發見されたのである。シャプレイは、その後、『球状星團』として知られてゐる、むしろ神秘的なもろゝの星團の距離を決定するためにそれを使用した。これらの星團の中の典型的な實例は、第九畫に示してある。これらの星團は百ばかり知られてゐる。それらは凡てかなり似てゐるやうに見えるが、外觀上の大きさの相違は別である。しかし、この相違さへ主に距離の相違にまで遡ることができる。そのために、もろゝの球状星團は恐らく殆んど同一の物象であり、第九畫は殆んどその中のどの一つでもの寫眞と見做すことができよう。それら凡ての星團には、セフエイド變光星が多い。

シャプレイは、最も近い球状星團、センタウル座 ω が、約二萬二千光年の距離にあり、最も遠いもの、NGC 7096は、その約十倍遠くて、二十二萬光年の距離にあることを見出した。さう

いふ距離に於いては、視差方法に依る距離測定は勿論全く失敗に歸するであらう。二十二萬光年の距離にある星の視差軌道は、ほとんど、四千哩先にかゝげられてゐるピンの頭ほどの大きさである。地球上のどんな望遠鏡も、そんな軌道を發見することはできないし、況んや測定することはできない。

二十二萬光年といふ數字を擧げただけでは、もろくの星團の中で我々に最も遠いこの星團の距離が實際にどんなであるかを殆んど傳へることはできない。しかし、次のやうに考へれば、それをもつとよく理解することができる。この星團の光は、最初の人間が地球上に現はれた時分に何處かで長い旅を始めて、やつと今我々のもとへ着いた、と。無數の世代に互る人々の子供時代、青年時代、老年時代を通じ、長い有史前のもろくの時代を通じ、文明の徐々とした黎明や、歴史に記録されてゐる時間の全體を通じ、もろくの王朝や帝國の興亡を通じて、この光は、一秒に十八萬六千哩の速力で、絶え間もなく自己の道路を走つてやつと今我々のもとへ届きつゝあるのである。然も、かういふ巨大な空間の擴がりも、我々に宇宙の限界を見せてはくれない。おそらくそれは辛うじて銀河系の限界を見せてくれたに過ぎないことが、今やわかるであらう。

シャプレイは、球状星團の全系統を精密に示して、それらが天の河の平面の兩側に存在する一つの長方形の區域を占め、約二十五萬光年といふその最大の直徑がこの平面の中に存在し、その

二つの横断直径はそれよりも非常に短いことを發見した。太陽はこの長方形の區域の中心によりも一層その縁に近い。この事は、ヒンクスが一九一一年に最初に認めたやうに、すべての球状星團が空の一半に現はれる理由を説明する。球状星團の一般的配列は第八圖に示してある。書物のページは天の河の平面を表はし、さまざまの斑點は、この平面に於ける、相異なる星團に最も近い點を表はしてゐる。そのために、この圖表は、空間の中で銀河面を『全面的に』見渡す觀測者の眼に見えるまゝの球状星團系を示してゐる。NGC七〇〇六を除く凡ての球状星團は、約十二萬五千年の半徑を持つ圓内に存在し、その中心は太陽から約五萬光年ほど離れてゐる。

銀河系の配列

この問題は長い間激しい論争の一つであつたにも拘らず、これらの球状星團に依つて精密に示された空間區域は、銀河系そのものに依つて占められてゐるものとほゞ一致することが、今や明白になりつゝある。ハーシエルとカプタインが、銀河系の中心は太陽に隣接すると想像したのは誤謬であつたやうである。多數に積み重ねられた證據に依ると、それは**蛇遣ひ座と蝎座の中にある一つの重い星雲の中に存在してゐる**ことがわかる。シャプレイ博士とミッス・スロープとは、ハーヴァー

の 現代の認識では、銀河系の中心は、地球から見て、いて座の方向に約三萬光年離れた所に位置している。へ

ド天文臺で、最近、この星雲の太陽からの距離を四萬七千年と決定した。この距離から判斷すると、この星雲は、ほとんど全く、第八圖に示したやうな球状星團系の中心に存在することになる。そこには、シャプレイが太陽を取巻くかなり輝かしい星の『地方系統』と稱するものが存在する。そしてこれを本銀河系と同一視することの誤謬は、これまで銀河の構造に關する問題を妨げてゐた混亂の大部分に對して、明かに責任があつた。この地方系統は本系統と同じ扁平な形をしてゐる。しかしこれはきつかり天の河の平面内に存在してゐるのではなく、それに對して約十二度の角度に傾いてゐる。太陽はこの系統の中心面の平面に甚だ近いやうに見える。最近の決定に依ると、それはこの平面の北方約百光年の所にある。第九圖は、今存在すると想像されてゐるまゝの批の系統の横斷面を示したものである。

第九圖

銀河系の横斷面の圖式

太陽は矢印の頭にある

びつかい座とさそり座の中と言っても大きな違いではない。

我々は既に銀河系の形を一つの車輪のそれに比較した。それを形成する星々が空間の中に靜止してゐたら、それは明かにこの形を保つことはできない。

といふのは、内星の引力が、最外星―車輪の縁―を内部へ落下させるので、この系統は、車輪の中心に近い何處かで星の混亂となつて終るだらうからである。一九一三年に、ソルボンヌ大學の數學教授ヘンリ・ポアンカレは、銀河『輪』は、若し自轉状態にあつたらこの運命を免れるかも知れないと暗示した。地球の運動が、地球が太陽の中へ落ち込むのを救ひ、月の運動が、月が地球の方へ落下するのを救つてゐるやうに、車輪の縁を形づくる星々も車輪全體の自轉運動に依つて、車輪の中心へ落下することから救はれるかも知れない、とポアンカレは暗示したのである。大ざつばな計算に依ると、この車輪は約五億光年毎に一度公轉する割合で自轉する必要がある。

自然の勢ひとして、こんなに遅い自轉を發見するのは簡単な事ではない。それは、最初次のやうな仕方で見出されはしないかと考へられた。廻し獨樂又は廻轉儀が迅速に自轉してゐる時、獨樂又は廻轉儀を空間の中で扭るには非常な力が要ることがわかる。これは、船を操縱するのに使用されるやうな廻轉儀羅針盤の原理である。廻轉儀、即ち一種の大きな鋼鐵の廻し獨樂は、揺れる船の中で樞軸をなしてゐる二つの端をもつて廻される。船がどちらへ振り向かうと、廻轉儀の運動は杵をいつも同じ方向へ向けさせ、この不變の方向の助けに依つて船は進路を何處までも進んで行く。と

ところで、太陽系は巨大な廻し獨樂が持つてゐるやうな特質を多數に持ち、もろくの遊星の公轉は獨樂の廻轉に相當する。この『廻し獨樂』に外側から押しつけられる扭りは存在しないから、その自轉軸はいつも同じ方向に向き、かくして空間に於ける我々の位置を示すべき一種の『廻轉儀羅針盤』を提供するに違ひない。

一九一三年に、シャルリエは次の事を發見したと信じた。即ち、この『廻轉儀羅針盤』は、天の河を遠い背景として、三億七千萬年毎に一度自轉する割合で廻轉しつゝある、といふのである。この週期はその後の測定で五億三千萬年にまで増加された。エディントンがそれに次いで次のやうに暗示した。廻轉してゐるのは、廻轉儀羅針盤よりも寧ろ背景であるかも知れない、といふのは、天の河は、實際に於いて、ポアンカレが想像したやうな仕方で、そして丁度ポアンカレが計算したくらゐの割合で、自轉しつゝあるからである、と。

オールトや、プラスチックや、リンドブラッドや、その他の者らに依つて行はれた最近の研究を見ると、疑ひもなく、さういふ自轉が實際に起ることがわかる。尤も、それは我々がこれまで論じたやうな單純な『車輪型』ではない。太陽系に於いては、最内遊星は最外のものよりも迅速に運動する。各遊星の運動が太陽の吸引を相殺することになるなら、それらは必然的にさうするに違ひない。同様に、若し銀河の自轉運動が、その最内星の引力的吸引を相殺することになるなら、その

内部の諸部分は最も外部の諸部分よりも迅速に自轉するに違ひない。かくして、太陽は、銀河輪の上に於いて、その外側にある星に追いつきつゝあると同時に、それ自體は内側にある星に追いつかれる筈である。さういふ追及運動を發見するのは、かなり容易である。觀測された星の諸運動を慎重に分析して見ると、さういふ運動があらはれて、全體としての銀河は全く今述べたやうな仕方で自轉し、**内部の諸部分が最も迅速に自轉しつゝあることがわかつた。**

この銀河輪の中心は、殆んど全く、シャプレイが球状星團の研究から銀河の中心に當てがつた方向に存在してゐる。まだ大して正確に決定することのできない、太陽からのその距離は、おそらく殆んど**三萬七千光年**⁸ばかりである。現在得られる正確さの限界内に於いては、これは銀河輪の中心を球状星團系統の中心に置く（第八圖を見よ）。太陽の附近に於いては、銀河輪は、約二億三千萬光年の期間に一回の公轉を仕遂げる。そしてこれは、太陽に近い星々に、銀河のみの自轉から起る、一秒に殆んど二百哩⁹の速力で行はれる空間通過運動を與へる。

⁸ 銀河系内の恒星は中心からの距離によらずほぼ同一の軌道速度で運行している。これは太陽系の公転運動（ケプラー運動）とは大きく異なる。

⁹ 現代の理解では、太陽は銀河中心から $7.9 \pm 0.42 \text{ kpc}$ 、約二萬五九〇〇光年のところに位置している。

⁹ 現代の觀測値では約二億二五〇〇万ないし二億五〇〇〇万年とされる。

10 217 km/s 、およそ一二五哩。

これらの材料があれば、銀河系の星々の重量を一纏めにして測ることができる。銀河系の中心から遠く誰れた個々の星は、全體としてのこの系統の引力的牽引、星々が空間の中に散在し去るのを防ぎ、従つて銀河系を存在させて置く牽引、の下で軌道を描いてゐるに違ひない。これらの軌道運動の總合が、我々が今論じたやうな銀河の一般的自轉を起すのである。そして今舉げた數字から、太陽の軌道の内側にある物質の總重量は、約二千四百億の太陽のそれ^二でなければならぬと計算することができる。これらの一部分は勿論太陽系外の塵又は瓦斯から生ずるかも知れない。とはいへ、普通の星の重量は太陽よりも非常に少ないから、銀河系に於ける星の總數は四千億^三といふ順位にあると見てよからう。この見積りは勿論暗星をも輝星をも込めた凡ての星を含んでゐるのであるが、暗星の數は比較的少ないと信ずるものゝ理由がある。

このほかにも銀河に於ける星の數の見積りは何度も行はれたが、一般に前の見積りよりも少なかった。例へば、リンドブラッドの行つた二度の見積りに依ると、銀河の總重量は、それぞれ一千一百億及び一千八百億の太陽に等しいことになる。

ここでまた、我々は、さういふ大きな數を具體化することの困難に直面する。月のない晴夜に完全

^二 現代では銀河系の全質量は太陽質量の約六〇〇〇億ないし三兆倍と見積もられている。

^三 現代では銀河系は約二千億ないし四千億個の恒星を含むと考えられている。

な視力をもつてすると、我々は、約三千の星を見ることが出来る。假に、これら三千の星の各々が三千の新星を空一杯に散布するとしよう。すると、我々は九百萬の星を數へることになる。それは依然として口径五時の望遠鏡で見える數にすぎない。我々は恐らく今の想像を再び働かせて同じ計略にかゝる筈はないが、たとへさうするやうに説きつけられたにしても、そしてこれら九百萬の星の各々が再び空一杯の空を(5.6)發生させると考へ得るにしても、我々は依然として自分の眼界内に二百七十億の星を得るにすぎない——それは銀河系に於ける星の總數のどんな許し得べき見積りよりも依然として遙かに少ない數である。或はまた、次のやうに考へて見よう。百吋望遠鏡で寫眞に取つた星の數、即ち十五億は、ほとんど世界中の男女と子供との數に等しい。地球上の各居住者——五大陸に住み又は七つの大洋を旅行してゐる各々の男女と子供は、自分自身の特別な星を選び取ることができ、次いで、銀河系の外側に出ることなしに、この手續を何十度も何百度も反復することができるのである。

これに次いで、我々は更に銀河系の外側を探索して、もつとく多數の星を見出すことができる。何億といふ星を持つてゐる銀河系が空間に於ける凡ての星を含んでゐないのは、一つの家が大ブリテンの凡ての住民を含んでゐないのと同じである。星にはそれ以外にも何百萬といふ家や何百萬といふ家族があるのである。

銀河外星霧

我々は、既に、ハーシエルが幾分推測的に『島宇宙』と稱した微かな雲霧状物象について語つた。これらが即ち、他の星の家族が見出される他の家々である。近代적望遠鏡の中の最も有力なものを差し向けて眺めると、それらは、少なくとも一部分は、巨大な星の霧で成り立つてゐることがわかる。有力な顕微鏡で見ると、ぷつと吹き出した巻煙草の煙は、見かけは連續してゐるに拘らず、微細な、しかし全く別々の粒子から成り立つてゐることがわかるやうに、有力な近代적望遠鏡も、これらの星霧の外域から來る光を別々の光點に分割する。星霧は、丁度天の河が三世紀前のガリレオの微小な望遠鏡でさうされたやうに、光り輝く粒子の霧に分解される。第十一畫がその一つの實例である。それは、既に第四畫に示した、アンドロメダ座大星霧M三一の頂上の左手の隅にある、小區域の擴大を表はしたものであつて、別々の光點への分解は紛れもない事實である。これらの光點の少なくとも幾つかは、星であることがわかる。なぜなら、我々はそれらをセフェイド變光星と認め、その光は、もつと故郷に近いよく知れ渡つたセフェイド變光星の、紛れもない特徴的變化を示してゐるからである。他の光り輝く諸粒子も同様な光輝を持つてゐて、セフェイドのその上下に互る光度範圍を示してゐる。それから推して、我々はそれらを普通の星と想像して差支へない。

いま挙げた小區域にあるセフェイド變光星の、觀測された變光週期から、いま説明した他の諸方法と結びついて、キルソン天文臺のハブル博士は、最近次の事を發見した。即ち、これらの星霧の中の最も近いもの、即ち第二十畫に示した星霧M三三さへ、その光が我々のもとへ届くのに約八十五萬光年かゝるほど遠いのである。アンドロメダ座大星霧M三一は、それよりも少し遠くて、約九十萬年の距離にある。この事は、これらの星霧が全く銀河系の外側に存在してゐることを十分に證明して『銀河外星霧』といふ言葉を正當のものにしてくれる。

人は、これらの星霧に於ける星の總數を、一つの選ばれた普通の小區域に見えるものを數へることに依つて見積らうと試みることもできようが、もつと精密な方法の方が有効である。丁度我々が銀河系に於ける最外星は、全體としての銀河の引力的吸引の下で軌道を描いてゐると想像したやうに、我々は、一の星霧に於ける最外星はこの星霧の中心に於ける引力的吸引の下で軌道を描いてゐると想像しなければならぬ。それらが星霧から走り去るのを防ぐ諸力は、地球をして太陽の周囲の軌道に於いて運動させる諸力に似てゐる。果してさうだとすれば、我々は太陽（七八頁）又は銀河系（一〇八頁）の重量を測るのと全く同じ仕方でもろくの星霧の重量を測ることができる。ハブル博士がかういふ仕方で見積つたところに依ると、第四畫に示した、アンドロメダ座大星霧M三一の重量は、太陽のその約三十五億倍でなければならない。同時に、第十五畫に示してある、

乙女座星霧NGC四五九四は、太陽の重量の約二十億倍を持つてゐなければならぬ。一般に尤もらしく思はれるのは、銀河外星霧の各々は約二十億の星を造るに足る物質を含んでゐるといふことである。

これは、各々の星霧は既に二十億の星を含んでゐると述べるのと同じ事ではない。これらの星霧の多くは、星の雲から成立つやうに見えるものゝ、その大部分は、どんな望遠鏡力もこれまで別々の粒子に分解することに成功しなかつた大きな中心區域をも含んでゐる。例へば、第十二畫は第十一畫に示した左手頂上の隅と同じ程度に擴大されたアンドロメダ座大星霧の中心區域を示したものである。そしてこれが第十一畫に示したまろくの外域と同じ仕方で個々の星に分解されてゐないことは明かである。第十五畫に示した、乙女座星霧NGC四五九四の全體も、別々の星に分解させることができない。もつと先へ行くと、これらの中心區域を、早晚星を形成するやうに運命づけられてゐる、しかしまだそこまで來てゐない瓦斯塊と解釋するまろくの理由が見つかるであらう。星霧は星の誕生場所であつて、各々の星霧は既に生れた星とまだ生れない星から成り立つてゐる、といふことが事實上わかるであらう。二十億の太陽を合計したものになるのは、既に生れた星と星を形成するやうに運命づけられてゐる物質との總重量である。

これらの銀河外星霧の中の約二百萬は、大きな百吋望遠鏡で見ることが出来る。一般に、それら

は空間の中かなり接近し合つて一様に散在してゐるやうに見え、その平均距離は優に二百萬光年の順位である。尤も、あちらこちらでこの一様性は星霧の雲や群に妨げられてゐる。例へば、乙女座や髮座あたりの空には星霧がすばらしく豊富である。ここでは、シャプレイに従へば、銀河系の諸次元の五倍から十倍を持つてゐるにすぎない、太陽から約一千萬光年の距離にある空間の範囲内に、約三百の星霧の雲が集まつてゐる。空のこの同じ區域は、それ以外にも三つのもつと遠い星を含んでゐるやうに見える。シャプレイが暗示したところに依ると、わが銀河系や、アンドロメダ座星霧や、その他の近い星霧も、それに類似した雲を構成してゐるかも知れない。

最も遠い空間の深み

ハブルが見積つたところに依ると百吋望遠鏡に依つて示された二百萬の星霧の中の最も遠いものは、我々から約一億四千萬光年ほど離れてゐるに遠ひない。¹³これは、これまで人間の眼で空間の中を見た最大の距離である。銀河系の直徑を形づくる二十二萬光年は、最初は驚くほど大きいやうに思はれたが、我々は今やそれ以上六百倍も大きい距離について語つてゐるのである。眼に見えるもろくの星霧の中のこの最も遠いものから發する光は、その長い旅行の殆んど五百分の一の間、

¹³ 1100八年にスピッツァー望遠鏡で見出された最遠の銀河までの距離は一二八億光年。

まだ人間が住んでゐない地球へ向つて旅行し、丁度それが到着しようとしてゐる時に、人間が地球上に現はれて、それを受ける望遠鏡を造つたのである。天文學的尺度に基いて觀察すれば、少なくともさう見える。然も、さういふ旅行の此の最後の五百分の一さへが、一萬世代の人々の生涯に跨つてゐる。その凡てを通じて、光は、その五百倍も長い時間に跨つてと同様に、一秒十八萬六千哩の速力で絶えず旅行を續けて來たのである。

百吋望遠鏡の視力の限界には、微光星霧が澤山あるので、それよりも更に大きな望遠鏡で見ればもつと多くが現はれて來ることは確かのように思はれる。間もなく造られる望みのある二百吋望遠鏡は、現代の百吋望遠鏡の二倍の口徑を持つてゐるので、空間の中に今までの二倍も遠く探り入る筈であり、従つて恐らく今までの約八倍即ち一千六百萬の星霧を示す見込みがあらう。これまでも望遠鏡力が増す毎に我々の視力は空間の中へ一層深く這入つて行き、空間は絶えず増加する割合をもつて擴大して行くやうに思はれた。この擴大は永久に進行するやうに運命づけられてゐるかどうか、空間の範圍には一體何らかの限界があるか、と我々が質問するのは尤もである。

一世代前に於いてさへ、大抵の科學者はこの後の質問に否定的に答へたであらうと思ふ。空間が制限され得るのは、空間でない或るものゝ出現に依つてのみである、と彼等は主張したであらう。我々が、或は寧ろ我々の想像が、空間の中を永久に進行して行くのを妨げられるのは、空間とは違

つた何物かから成る壁に向つて走つて行く場合だけである。そして、空間は永久に延長して行くと思像するのは困難であるにしても、空間とは違つた何物かから成る障壁があつて、それが、我々の想像が一層遠い向う側の空間の中へ這入つて行くのを妨げると想像するのは、それよりも遙かに困難である。

さういふ主張は健實なものではない。例へば、地球の表面は制限された範圍のものではあるが、それだからと云つて、我々が自分の思ふまゝに遠く旅行するのを妨げる障壁はない。地球の表面が圓いことを理解しない旅行者が、家を出てずん／＼旅行していけば、探検を待つてゐる新しい國を永久に開くことができると思ふのは自然であらう。然も、我々が知つてゐるやうに、彼は必然的に早晩自分自身の進路を繰り返すことになるであらう。地球の表面は、その曲率の結果として、たとへ制限されてはゐないにしても、範圍に於いては有限である。

第九節 相對性理論

アインシュタインは、自らの相對性理論に由つて、空間も、たとへ制限されてはゐないにしても、範圍に於いて有限であることを確立したと主張する。宇宙に於ける空間の總容積は、丁度地球の表面が有限量であるやうに、そしてそれと同じ理由で、有限量である。どちらも折れ曲つて塞がつてゐる。この類推が妥當であり有用であるのは、我々が慎重に空間の全體を地球の表面に比較して、地球の容積に比較しない間だけである。地球の容積も量に於いて有限ではあるが、理由が全く違ふ。地球の内部に一直線に孔を掘つてずん／＼進んで行く土龍は、早晚地球でない何物かに達するであらう——それは空中へ這入つて行くであらう。しかし我々は、地球の表面でないどんなものにも決して達することなしに、地球の表面をずん／＼進んで行くことができる。空間の諸特質は、地球の表面のそれであつて、地球の容積のそれではない。

空間が折れ曲つてゐる結果として、抛射物又は光線は、空間の外側に出て空間でない何物かの中へ這入つて行くやうなことをせずに、永久に進行することができる。然も、それは自らの進路を反復しなければ永久に進行することはできない。かういふ理由で、おそらく光は空間の全體をめぐつ

て再び出發點に歸つて來るであらう。そのために、若し我々が眞夜中の空に於ける正しい方向に十分有力な望遠鏡を向けたら、空間に於ける太陽とそのもろくの隣接物とが、宇宙を廻つて來た光に依つて見えるであらう。それらはそのあるがまゝには見えないで、幾百萬年以前のまゝに見えるであらう。それほど久しい前に太陽を去つた光は、ほとんど空間の全體を廻つて來たであらう。そして今にも圓を仕上げようとしてゐる時に、それは、第二の空間巡回旅行を始めるのを許されないで我々の望遠鏡に捉へられるであらう。

かういふ空間の曲率は、それが大規模になし遂げる、空間の總容積を制限するといふ機能以外に、もろくの機能を持つてゐる。アインシュタインの時代以前に、遊星やクリケット球や拋射物一般の通路の曲率は、悉く引力といふ『力』の牽引に歸せられた。相對性理論は、この想像された力を純粹な幻影として排斥して、あらゆる種類の拋射物の曲つた通路を、それらが曲つた空間の中に眞直ぐな進路を保たうとする努力に歸する。この曲つた空間は、實際、天文學者の普通の空間ではない。それは純粹に數學的な、そして多分全く擬制的な空間である。その中には、天文學者の空間と天文學者の時間とが、解け難く結びついて同等な協力者として入り込んでゐる。絶対に正確を期すれば、四つの同等な協力者がある。最初の三つは、普通の空間の三次元―幅と廣さと高さ、又は、南北と東西と上下とである。第四は普通の時間であつて、我々が我々の空間を測定する時の方法に

相當した方法で測定され（時間の一年は空間の一光年に相應する、等々）、然る後 $\sqrt{2}$ の自乗根を乗じたものである。この最後の $\sqrt{2}$ の自乗根を乗することは、勿論全體の事柄の著しい特徴である。といふのは、 $\sqrt{2}$ の自乗根は存在してはゐないからである。これは數學者が『虚』數と稱するものである。どんな實數も、それ自體を乗じられてその積が $\sqrt{2}$ になり得るものではない。然も、空間と時間との間に眞の同等な協力があるのは、時間が $\sqrt{2}$ （二年といふ虚單位に依つて測定される時だけである。これに依つて明かになるのは、同等な協力は純粹な形式的のものである——それは數學者の便宜上の擬制にほかならない——といふことである。實際、若しそれが何かそれ以上のものであつたら、時間は空間とは本質的に違つた或るものであるといふ我々の本能的確信は、經驗に根ざした基礎を持つことができず、従つて今までに消滅してゐたであらう。

ここで時間に關するこれらの複雑な問題に言及する必要はない。本質的な點は、アインシュタインの相對性理論が次のやうに教へることである。即ち、空間は終極的には地球の表面のやうに折れ曲つてゐるので、空間の總量は有限である、と。

アインシュタインの宇宙論

アインシュタインの相對性理論に従へば、空間の諸次元はそれが含んでゐる物質の量に依つて決

定される。物質が多ければ多いほど、空間は小さくならなければならないし、その逆も本當である。空間は、物質を少しも含んでゐない場合に初めて文字通り無限の範圍になり得るのである。空間の範圍を決定することの問題は、従つて、それがどれだけの物質を含んでゐるかを決定することの問題に歸着する。我々は、我々の望遠鏡の届く範圍内にある、空間のあの諸區域の外側に、どれだけの物質が存在し得るかを見積る手段を持つてはゐないが、これらの區域の内部に於いては、物質は銀河外星霧の形態で、かなり一様に分布されてゐるやうに思はれる。

これらのものの既に知られてゐる重量から、ハブルは次のやうに見積つた。物質の平均密度は水のその約 1.5×10^{-31} 倍でなければならぬ、と。物質は、我々の望遠鏡がまだ入り込んで行かない諸部分をも含む空間の全體に亘つてこの密度で分布されてゐる、といふ假定に基いて、我々は全く決定的に次のやうに計算することができる。空間の半径は、八百四十億光年、即ち最も遠い可視星霧の距離の六百倍である、と。空間をめぐる旅行は五千億光年かゝるであらう。そして若しいつか我々の望遠鏡が太陽系を背後から示してくれることがあつたら、それは五千億光年以前のまゝに見えるであらう。

かくして、アインシュタインの獨創的理論に従えば、我々が自分の望遠鏡を持つて遍歴し得る一億四千萬光年さへが、全空間のほんの一部分——十億分の一ぐらゐのものを形成するにすぎない。空

間には依然として探查を待つてゐる部分が澤山ある。それは恐らく驚くには當らない。地球上に現はれてから三十萬年になるのに、望遠鏡を發明してから僅か三百年にしかない人類が、そんな短時間に空間の全體を發見しようなどと望むのは殆んど不可能である。我々の天文探查家たちは、空間に於ける自らの住居を取り巻いてゐる、小群島の中の島から島へと移りつつあるが、依然として宇宙全體を週航し盡すことはできない。そして、最も初期の地理學者たちが、地球を週航しようと考へる久しい前に、その表面の小部分に於ける曲率から、地球の大きさを見積らうと試みたやうに、天文學者たちも、いま、今宇宙の大きさを、彼等が既に知つた部分の曲率から、漠然ながら見積らうとしてゐるのである。

一般相對性理論は、興味ある思索と見做される階段を通過してからもう長いことになる。それは以前ニュートンの引力法則が説明し損つた遊星運動を説明するばかりでなく、他の諸現象を豫言した―蝕時の太陽に近い星々の、その光が太陽の引力分野を通過する時に屈折するために起る現視變位や、星のスペクトルの、赤色の末端の方への或る變位がそれである。それらは、最初豫言された時は全く怪しまれたのであつたが、その後觀測に依つて十分に確證された。實際、この理論は今まで天文学の普通の作業道具の一つとして適した。それは、シリウスの伴星である小微光シリウスBの直徑を測定するためにも、『遊星型星霧』の中心にある星々の性質を論ずるためにも使用され

た。

とはいへ、一般相対的理論は、獨特な仕方では仕上げられたアインシュタインの宇宙論に到達してはしない。前者は眞であり後者は虚偽である、といふことは全くあり得べき事である。一般相対性理論は、宇宙のどんな小部分の屬性をも全く明確に決定しはするが、これらの小部分を結合して全體を形づくる二三の仕方の何れを選ぶべきかといふ問題は未決のままにして置く。そして實際幾年かの間、それは幾分不評判に陥つて、ライデンのド・ジッターが一九一七年に提出して幾分詳細に展開した別の宇宙論に取つて代られさうに見えた。

ド・ジッターの宇宙論

我々は先づこれら二つの宇宙論の本質的相違を理解するやうに試みよう。

アインシュタインの宇宙論に従へば、宇宙の大きさはそれが含む物質の量に依つて決定される。

若し、宇宙創造の時に、或る自然法則に従ふべき或る量の物質を含んでゐる宇宙を創造することに決められたら、その時には空間はきつかりこれだけの量の物質を含むのにふさはしい大きさに對して即座に適合したに違ひない。又は、若し宇宙の大きさと自然法則とが決められたとすれば、或る一定量の物質の創造は避け難い必然となつたのである。ド・ジッターの宇宙はそれほど單純ではな

い、又は、好んで別の云ひ方をすれば、その創造に於いてもつと選擇の自由を許される。自然法則が決定された後にも、依然として宇宙をどんな大きさにでもすることが可能であり、制限された範圍内でその中にどれだけの量の物質をも入れることが可能であつた。嚴密な科學的觀點からすれば、アインシュタインの宇宙は氣まゝさといふ一要素を下・ジッターの宇宙よりも少なく持つてゐる。そしてこの程度でそれは單純性といふ利益を持つことになるのである。

他方で、この單純性は一つの代價を拂つて得られたのである。相對性理論全體の根本的な隅の首石は、空間と時間との、既に説明したやうな意味に於ける同等な協力である。アインシュタインの宇宙論が單純性を得るのは、全體としての宇宙を觀察する時にはこの協力の同等性は消滅するといふ想像を代價とすることに依つてのみである。この宇宙論は次のやうに想像する。空間と時間とが（既に示したやうな、純粹に形式的な意味で）區別できるのは、自己の經驗を宇宙のほんの一小部分に制限されてゐる存在者に取つてのみである。兩者が全く別々のものになるのは、空間と時間との全體を限なく遍歴し得る存在者に取つてゐる、と。どれだけの重要性が、この反對論——若しそれが反對論であるとすれば——に歸せられなければならないかは、全く明瞭でない。現實の空間と現實の時間とは疑ひもなく別々のものである。たとへ我々は兩者の實在を否定するにしても、兩者は依然として知覺様式として區別できる。それでは、最後の手段として、宇宙が大規模に瞑想さ

れる時には、空間と時間とは本體の別々の型に分解される、といふことを認める宇宙論に對して、どんな非難を加へることができようか？ 我々が宇宙を大規模に瞑想しはじめる前に、どうしたのか我々はこの事を既に知つてゐたのである。

この最後の疑問に對する答へは何であるにしても、ド・ジッターの宇宙論は、宇宙の個々の部分に於いてばかりでなく、全體としての宇宙に亘つての、空間と時間の同等な協力を主張することに依つて、可能な非難を全く避けることができる。我々は依然として、既に説明したやうな純粹に形式的な意味に於ける平等な共同といふものに就いて語つてゐるのであつて、光年といふものがこの自乗根の年數と同じ立場に立つて宇宙論に這入つて来る、といふことは、勿論了解されるであらう。ド・ジッターの宇宙論さへが、一光年（九・四六萬億釐）は十二ヶ月と同じものであるなどと主張しはしない。

アインシュタインの相對性理論の中心は觀測に依つて十分に確證されたにしても、その宇宙論的部分は、直接の觀測的試驗を許されるやうなどんな特殊な特徴をも豫言しなかつた。他方で、ド・ジッターの宇宙論は、すべての遠い物象のスペクトルは、物象の距離に依存する量だけの、赤色の方への變位を示すに違ひないと豫言した。空間と時間との同等な協力は、どんな特殊な源に依つてでも放出される光波の、宇宙の近い部分に於いてよりも遠い部分に於いて一層遅い振動を生じ

させる。時間の流れは、我々がたまたま居合せる場所に於いては、他のどんな場所に於いてよりも一層迅速に進んで行く。これは最初は逆説的に響くが、試験して見るとさうではないことがわかる。ド・ジッターは我々に地球中心の宇宙に歸れと求めてゐるのではない。なぜなら、彼が示すところに依ると、遠い星の住民にも、地球の原子は彼自身の原子よりも一層遅い時間を守りつゝあるといふことがわかるだらうからである。空間と時間との凡ての尺度の相對性といふ概念に依つて、逆説は全く分解する。

單なる距離の結果として起る、赤色へのこの變位は、ド・ジッターの宇宙論に獨特なものである。それは、すべての宇宙論が一致するやうに、運動する物體のスペクトルが運動の結果として示すに違ひない變位に附加されたものであつて、この後者は物體が地球から遠ざかりつゝある場合に初めて赤色の方へ向かふのである。ジッターの宇宙論に基くと、これら二つの變位は全く獨立してゐるものではない。といふのは、近い物體は相互から離れて遠くへ進んで行く傾きがあるといふことが、この宇宙論の本質的特徴だからである。丁度水流の中へ一諸に投げ込まれた幾つかの蕁切れが、水流を漂ひ下りながら別々になる傾きがあるやうに、ド・ジッターの宇宙に於けるもろもろの物象も、時間の流れを漂ひ下りながら別々に遠くへ進んで行く。

かくして、ド・ジッターの理論に基くと、スペクトル線の、赤色の方への變位は、運動の證據

とも距離の證據とも解釋されることはできない。それは兩者の混合である。この事は、我々が銀河系に於ける星々の速度をそのスペクトル線の觀測された變位から演繹するのが全く間違つてゐたことを意味しはしない。どんな感知できる變位も距離のみに依つて起されるものではない、——この距離が宇宙半径の一つの感知できる部分を形づくらなければ。赤色の方への組織的變位は、實際、最も遠い星々のスペクトルの中に觀取されはするが、それらは何れも非常に少ない量である。我々がさういふ結果を感知できる強度に於いて觀取することを期待し得るのは、我々が遠い銀河系外星霧の方へ眼を向ける時だけである。

ところで、遠い星霧のスペクトルは一樣に赤色の方へ變位する、といふことは、長い間天文學上の解けない謎の一つとなつてゐた。觀測された變位は小さくない。速度として解釋すれば、それらの變位の多くは一秒一千哩以上の速力を表はすであらう。フマソンが發見したところに依ると、二つの微光星霧NGC四八六〇及び四八五三は、それぞれ、一秒四千九百哩及び四千六百哩といふ現視後退速力を示してゐる。二つはどちらも髮座にある星霧の雲の成員であり、この雲は恐らく約五千萬光年の距離にある。全く最近、大熊座に於ける別の非常に微かな星霧のスペクトルは、一秒七千二百哩といふ速力を持つ現視後退運動を示すことがわかつた。若しド・ジッターの理論が排斥されるとすれば、ほとんど凡ての銀河外星霧は、恐ろしい、ほとんど想像もできない速力をもつて

我々から走り去りつゝあらねばならない。そして遠く去れば去るほど、それはますます邁進的にその距離を増して行くことになる。然も我々は、ド・ジッターの理論を採用して、星霧の外観上の競走全體を質のものとして取扱ふことに依つては、おそらく單純性といふものを再び取り入れることはできない。なぜなら、この理論に従へば、星霧が、現實的事實に於いて、我々から遠ざかりつゝあつて、散在といふことがド・ジッターの宇宙に於けるもろくの物象の固有の特質となつても無理はないからである。

最も遠い星霧のスペクトルはこれらの大きな變位を示す、といふ事實は、ド・ジッターの宇宙論を眞實のものとするのに役立つ或る假定を提供する。これは少なくともそれらの變位を二度以上説明してゐるのに、他の宇宙論は少しも説明しない。若し我々がこの宇宙論を試験的に受け容れるなら、その時にはそれぞれの觀測された分光移動は、二つの部分の、即ち星霧の後退から普通の仕方で起るものと、單にその距離から起るものとの、總和と見做されなければならない。

ハブル博士の豫備研究が示したところに依ると、大體に於いて分光變位は最も遠い星霧の場合に最も大きく、その量は星霧の我々からの距離にぎつと比例する。若し我々が觀測された變位の全體を純粹に後退の證據と解釋すれば、我々は次のやうに計算することができる。宇宙の半徑は、約

二十億光年、即ち最も遠い可視星霧の距離の約十四倍である、と。¹⁴ 宇宙の半径がそれほど大きければ、遠い星霧さへの單なる距離から起るより以上の變位も顧みるに足りないし、従つて、もろくの變位は殆んど全く後退速度から生ずるといふ我々の假定は後天的證明を受けることになる。若し星霧のスペクトルの觀測された變位が嚴密に我々からのその距離に比例してゐたら、我々は次のやうに假定することに依つて、觀測された諸事實に對する條理一貫した説明を得たであらう。我々は約二十億光年の半径を持つド・ジッターの宇宙に住んでゐる、と。

膨脹しつつある宇宙

いつも次のやうに考へられたものである。アインシュタインの宇宙論とド・ジッターの宇宙論とは、互に對立したものである、なぜなら、一つの宇宙が同時にアインシュタインの宇宙とド・ジッターの宇宙となり得るものでないことは明白だからである、と。ベルギーの數學者、アペー・ジ・ルメイトルに依る最近の研究は、この問題の趣きを變へてしまつた。簡單に云へば、ルメイトルは、どんな宇宙もアインシュタインが考へたやうな状態に永久に留まり得るものではないといふことを示した。この状態に於ける宇宙は安定しない構造である。それは生れると直ぐ膨脹しはじめ

¹⁴ 現代では、可視宇宙の半径（宇宙光の地平面までの距離）は四六五億光年とされている。

るであらう。そしてド・ジッターの宇宙になるまでは膨脹をやめないであらう。かうなつた後でさへ、膨脹は續くであらう。しかしそれは、我々が既に考へたやうなド・ジッターの宇宙の普通の膨脹の中に今は呑み込まれるであらう。

これらの結果に照らして云へば、討議中の問題は、我々の宇宙はアインシュタインの宇宙であるか、それともド・ジッターの宇宙であるかといふことではなくて、むしろ、どこまでそれはアインシュタインの宇宙に始まつて、ド・ジッターの宇宙に終る道に沿うて走つたかといふにある。これに對する答へは何であらうと、我々は次のやうに想像させられる。時間が始まつた時には、もろくくの星霧は現在よりもつと互に近づき合つてゐた、その時以來、それらはその固有の散在傾向、或は寧ろ、それらを散在させようとする時間の流れの傾向に従つた、それらは、今も、それらの距離に比例する速力をもつて、我々から、そしてまた相互から離れ走りつゝある、と。これは、星霧の現視後退速力はその距離にざつと比例するといふハブルの結論と一致してゐる。ハブルの材料から、エディントンは、最初のアインシュタインの宇宙は約十二億光年の半徑を持つてゐたに違ひないと計算した。若し星霧の現視後退速力が嚴密にその距離に比例することがわかつてゐたら、我々は次のやうに想像することに依つて、あらゆる事柄を説明することができたのである。我々は膨脹しつゝある宇宙に住んでゐる、それは十二億光年の半徑を持つアインシュタインの宇宙として

出發し、今は優に二十億光年の半徑を持つまでに膨脹し、且つ永遠に膨脹しつゞけるやうに運命づけられてゐる、と。

これは宇宙に關する單純な寧ろ魅惑的な畫像を提供するが、それを本當のものであると想像することに對しては反對理由が多い。先づ第一に、若し我々が分光變位を速度の證據とのみ解釋するなら、星霧の速力は恐らく（いま述べた畫像が要求するやうに）我々からのその距離に正確に比例するところではあるまい。いづれも同距離にあつて約五千萬光年であると信じられてゐる二つの星霧も、速力に於いては一秒に殆んど二千哩の差があり、それを平均すると一秒に約五千哩となる。オールトは、非常に遠い星霧の速力の一般的傾向は嚴密にその距離に比例するものではないことを發見した。二千萬乃至四千萬光年に於いては、外觀上の差は平均して一秒に七百五十哩であるが、これらの差が單にこれらの遠い星霧の距離の不正確な見積りからどこまで生ずるものであるかは明白でない。

第二に、若し觀測された分光移動が單なる散在を表はすとすれば、我々はこの散在が始まつてからの時間を計算することができる。それは何十億といふ年數であることがわかる。さういふ時間の長さは莫大なものであるにしても、それでもまだ十分であるやうには見えない。もつと先へ行くと（第三章）、如何にして時間がその印や皺や白毛を星々の上に殘して置くかゞわかる。従つて我々

は星々の年齢をかなりよく推量することができ、これらの證據を見ると、星の生涯は、何十億年ではなく、何萬億年といふほど長いものであることがわかる。若し星霧の現在の運動が單なる散在に基くものであるなら、その時には星々はこの散在が始まらない先に、生涯の大部分を過ごしたに違ひない。さういふ假説は、いづれにしてもそれに代るものが現はれる餘地がある間は、あまりに人爲的で受け容れられないやうに思はれる。

勿論、我々は、星の年齢のかうした見積りは訂正を要することがわかるかも知れないといふことをあつさり認めなければならぬ。實際、それが計算されたのは、ド・ジッターの宇宙論が必要となるやうな型のどんな感知できる散在も起つたことがないといふ想像に基いてである。若し、星霧ばかりでなく、銀河系を構成する星々も、時間が始まつた時一緒にごちやくと詰め込まれたのであつたら、星々の生涯に關する我々の見積りは實質的に縮められなければならないであらう。そしてそれは我々が今考察したやうな種類の長さに歸することができ、といふことは、考へられはするが、私に非常に尤もらしくないと思ふ。若し最初の宇宙がエディントンの十二億光年といふ見積りに近い半徑を持つてゐたら、星々の生涯は確かにさういふ長さに歸せられることはできない。

とはいへ、ド・ジッター及びルメイトルの宇宙論は、疑ひもなく次のやうに主張する。今日の宇宙は膨脹しつゝあるに違ひない、もろくの星霧は、相互からも、我々からも、後退しつゝあるに

違ひない。そしてそのスペクトルは、一つの歸結として、赤色の方への變位を示すに違ひない、と。しかしこれらの變位を實際に觀察されたものと同一視することを我々に強ひるものは一つも無い。後退運動以外の多くの原因は、スペクトル線を赤色にすることができる。そしてこれらさまぐの他の原因に基く赤色化をすっかり控除した後に、我々は、初めてその剩餘は眞の後退運動を表はすと言ひ得るであらう。

全く最近、パサデナのツウイキイ博士は、空間の中に散在してゐる引力ある物質は、空間の中を通過する全體の光を赤色にするかも知れないと暗示した。彼はこの暗示のために幾つかの力學的理由を提供し、星霧から我々のもとへ届いて來る光の中に豫想される分光移動の量を計算して、それが觀測された移動の全體を實際的に説明することを發見した。觀測された星霧の光の赤色化の大部分は、この原因又はそれに類似した何らかの原因に基くかも知れないが、たゞ小部分は眞の後退運動を表はす、といふことはあり得べき事である。果してさうだとすれば、我々は宇宙の年齢を無限に延長することができ、また星々に、一般天文學の證據が要求するやうに思はれる非常に大きな年齢を自由に當てがふことができる。この事は第三章で十分に論ずるであらう。

かういふ宇宙論の、ド・ジッターの最初の形態に於いては、光が宇宙をめぐるには無限の時間がかゝるであらう。そしてこの事は、どんな物象でもが、長い道を廻つて來た見に依つて見えるのを

妨げるであらう。これは、ド・ジッターが、全く物質の缺けた宇宙といふ理想的な場合のみを考察したことから起るのである。宇宙の中に物質が少しあつてさへ、光線の通路は恐らく折れ曲つて、或る有限の時間の後に出發點に復歸するであらう。二つの微光星霧（h三四三三とM八三）は、實際には、空で我々に最も近い隣、M三三とM三一とであつて、空間を長い間廻つて來てやつと見えるのかも知れない、といふことが全く眞面目に暗示された。果してさうだとすれば、我々が、M三三とM三一とを眺める時には二つの物象の前面が見え、望遠鏡をそれと正反體の方向へ向けて、h三四三三とM三三とを眺める時には、同じ二つの物象の背部が見えるのである。疑ひもなく、これは一つの推測であり、おそらく寧ろ粗野な推測である。しかし、多くのものと驚くべき推測が天文學上で行はれて、後にそれらが本當であることがわかつたこともあるのである。

空間の構造に關する凡てこれらの議論は、勿論非常に思索的のものである。しかしそれらは次のやうな一般的結論を暗示することに於いて一致してゐる。即ち、我々はまだ空間の全體を見ることができないにしても、少なくともその感知できる一部分を見渡すことができる。わが天文探査者たちは、今までのところでは宇宙を周航し盡してゐないかも知れないが、彼等は恐らくアメリカを發見しつゝある。そして我々は次のやうに十分想像することができ。次の世代さへが空間の周航を完成してしまふであらう、そして、我々が地球の有限ではあるが無境界の表面について考へるの

我 等 を め ぐ る 宇 宙

と同じ仕方、同じ容易さで、有限ではあるが無境界の空間について考へるであらう、と。

第十節 宇宙の模型

最も近い恒星までの距離を構成する四光年四分の一を具體化することは、全く困難であることがわかつたので、我々が、この最後の何十億光年といふ距離、即ち推測された宇宙の圓周、を具體化さうと試みさへしないやうに忠告されても無理はない。然も、我々は、縮尺に描かれた模型の助けを借りて、これら凡ての距離を、相互に對して相對的な一つの適當な比例に於いて眺めようと試みても差支へあるまい。我々が想像もできないほど大きな距離を想像しようと試みる努力を避けることができるのは、縮尺を非常に小さくすることに依つてである。

急行列車の千二百倍の速さで旅行する地球は、毎年太陽をめぐる六億哩旅行する。我々はこの旅行を直徑に於いて一時の十六分の一であるピンの頭で表はさう。かうすれば我々の模型の縮尺が決定される。太陽は直徑に於いて一時の三千四百分の一である微細な一粒の塵に縮められたことになる。ところが、地球はそれよりも更に微細な一粒であつて、あまり小さいために最も有力な顕微鏡に於いてさへ見ることができない。この縮尺に基くと、空に於ける最も近い恒星、センタウル座プロクシマさへが、約二百二十五ヤードほど離れた所に置かれなければならない。そして空間に於

いてわが太陽に一番近い僅か百の恒星を取り入れるのにさへ、模型は高さ一哩、長さ一哩、幅一哩のものにされなければならない。

我々は更に模型の製作を進めて行かう。我々は星々を無差別に塵の粒と考へて差支へない。なぜなら、星々の大きさは殆んど塵の粒の大きさと同じやうに多様だからである。太陽の附近に我々は塵の粒を一哩の四分の一といふ平均距離に置かなければならない。空間の他の諸區域に於いては、それらは一般にそれ以上離れてさへゐる。といふのは、『地方星團』の現存のために、太陽の直ぐ隣はたま／＼空の寧ろ稠密部分だからである。我々は更にあらゆる方向に何百哩にも互つて模型の製作を進めて行かう。すると、若し我々が銀河面から十分誰れてゐる方向にこの製作を進めつゝあるものとすれば、塵の粒は薄くなりはじめ、我々は銀河の限界に近づいて行くことになる。銀河面そのものゝ中で、我々は、最も遠い球状星團に達する前に、約七千哩に互つて製作を續ける。それでもまだ我々は銀河系の内側にゐるのである。わが地球が太陽をめぐる長い一年がかりの旅行をピンの頭ぐらゐにしても、銀河系全體は殆んどアメリカ大陸の大きさになるほどである。心の中で行ふかうした模型製作を更に進めて行く前に、かうしてちよつて立止つてピンの頭とアメリカ大陸との相対的大きさを具體化して見ても差支へあるまい。

銀河系を仕上げた後、我々は模型の次の切れつ端を築きはじめる前に約三萬哩ほど進行しなければ

ばならない、いづれにしてもこの模型を縮尺のまゝにして置くならば。この距離に我々は星の次の家族を置かう。それは、おそらく實質的にはわが銀河家族よりも一層小さい、一層緻密な、しかし大きさに於いても數に於いてもそれと比較できる家族である。さういふ風に模型の製作を續けて行く――三萬哩そこいら毎に幾十億の星から成る一つの家族が出來上る――すると遂に我々はさういふ家族を二百萬も持つことになる。模型は今あらゆる方向に於いて約四百萬哩も擴がつてゐる。これは我々が望遠鏡をもつて空間を覗き得る限度を表はしてゐる。我々は、模型は更に進行すると想像することが出来る。しかしそれが如何にしてあるかはわからないし、何處へであるかはわからない――我々が知つてゐるのは、これまで製作された部分は宇宙のほんの一部分を表はすにすぎないといふことだけである。

銀河系も、島宇宙も、銀河外星霧も、それ々、何十億といふ星、又は、最後には何十億といふ星を形成するやうに運命づけられてゐる瓦斯狀物質を含んでゐる。そしてさういふ系統は二百萬も知られてゐる。すると、百吋望遠鏡が届く範圍内に、何萬億といふ星が存在するわけである。そしてこの數は、依然として探查されない宇宙の諸部分を斟酌すれば、更に増加されなければならない。控へ目に計算して見ても、宇宙に於ける星の總數は、ロンドンに於ける塵の粒の總數ぐらゐであるに違ひない。太陽を巨大な都市に於ける只一つの塵の粒よりも小さい或る物と考へ、地球をさうい

ふ塵の粒の百萬部の一よりも小さいと考へれば、空間に於ける我々の住所と宇宙のその他の部分との關係を實際に把握し得るほど活々して畫像が恐らく得られるであらう。

別の手續に依つても、ロンドンにおける塵の粒をすつかり手に入れて、それらを空間に於けるさまゝの星を表はすべき正しい距離に擴げることによつて、我々の縮尺模型を構成することができたであらう。ロンドンに於けるもろゝの塵の粒の間の實際距離は、平均して一時のほんの極く僅かである。我々の模型を正確な縮尺にするには、この距離は、空間に於ける太陽の周圍の稠密部分を表はす部分を造る時にさへ、一哩の約四分の一にまで倍加しなければならない。若し我々がかういふ仕方で模型を製作するなら、空間の空虚さについての活々した畫像が得られる。ウオータロー停車場から、六つの塵の粒だけ残して何も彼も取り除いたとしても、この停車場には、空間に星が群がつてゐるよりもつとゝ塵が群がつてゐる割合になる。これは銀河系の内側の比較的稠密した區域についてさへ本當である。星の一つの系統と次の系統との間にある廣大な空虚な擴がりと來たら、全くお話にならないほどである。模型の全體を通じて平均すると、一つの塵の粒の、その最も近い隣からの平均距離は、優に八十哩もあることがわかる。宇宙は大體に於いて星から成り立たないで、荒涼とした空虚——考へられないほど巨大な寂寞たる空間の擴がり——から成り立つてゐる。そこでは、星がたつた一つ存在してさへ珍しい例外的出來事である。

我々は想像の中で空間の中に何處か太陽に近い地位を占めて、急行列車の約一千倍の速力をもつて通り過ぎる星々を見守つて見よう。若し空間が實際に星で稠密してゐたら、我々の地位は、我々がレゼント街のまん中に坐つて通行人が通り過ぎるのを見守つてゐる場合のやうに、羨ましがられることはないであらう——我々の生涯はぞくぞくするほどではあつても極く短くなるであらう。然も正確な計算に依ると、星の通行人は非常に少ないので、一つの星が我々にぶつかるまでには、一萬億年の約百萬倍も待たなければならぬことがわかる。別の形式で説明すれば、どんな一つの星でも、第二の星と衝突するまでには、優に一萬億年の百萬倍も運動しなければならないことが計算に依つてわかる。星々は空間の中を盲目的に運動してゐても、星の目隠し遊びに於ける遊戲者は非常に少ないし、その上一人と一人との間は非常に遠いので、別の星に衝突する機會は殆んど無視していい。もつと先へ行くとわかるやうに、かういふ考へ方は宇宙に關する我々の解釋に於いて最も深い意義を持つてゐるのである。

第二章 原子の探査

これまで、我々の宇宙探査は、人間から、人間よりも一層大きな物への方向に向つてゐた。我々は空間に於ける人間とその住所とを小さく見えさせて全く取るに足らぬものにする空間の連りを探査して來た。然も、我々が探査したのは、宇宙の總區域の殆んど半分にすぎなかつた。それと殆んど等しい區域が無限に小さなものゝ方向に於いても探査されるのを待つてゐる。我々の見透しを物質の最小單位へと擴げて行くまでは、我々をめぐる世界の無限の豊かさの半分を鑑賞するにすぎない。この見透しは、最初は近代物理學の任務であつたが、今はその輝かしい業績となつた。

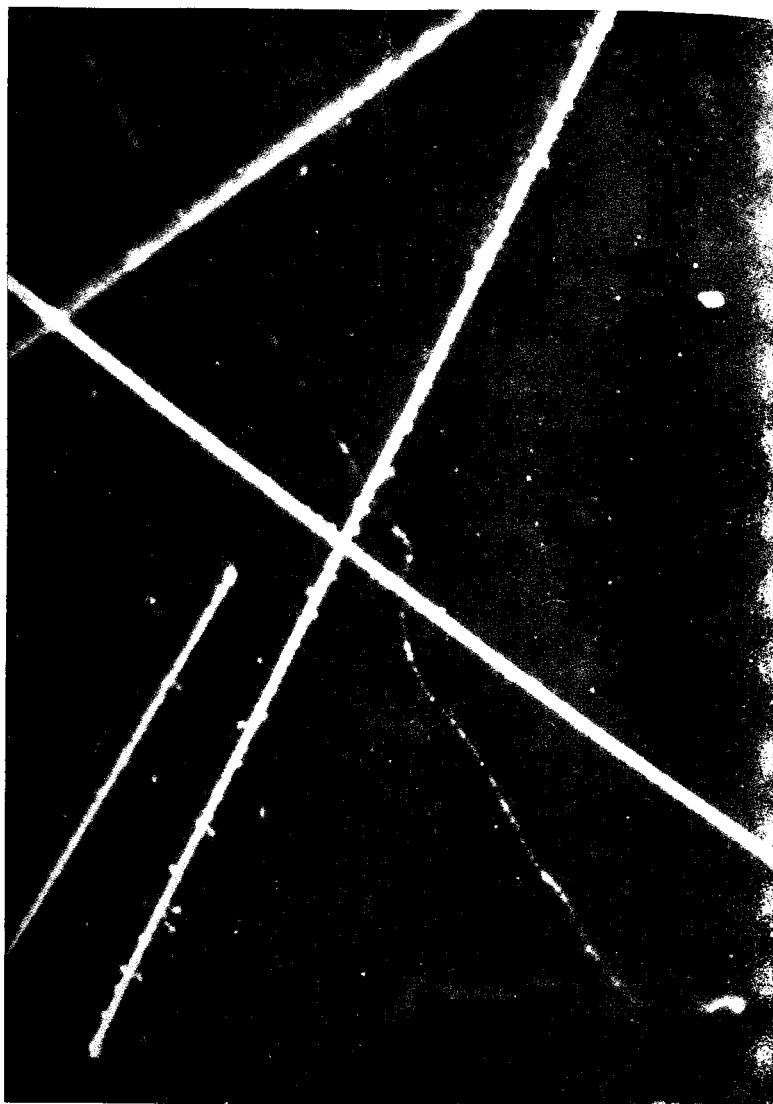
おそらく、かう質問されるかも知れない。近代天文學の記述が、なぜ宇宙の此のもう一つの末端に觸れなければならないか、と。これに對して我々は次のやうに答へよう。

星々は巨大な死塊以上の物である、それらは運轉してゐる機械であつて、我々が依つてもつてそれらを見る輻射を發生させ且つ放出してゐる、と。輻射が地球上で發生し且つ放出される仕方を研究すれば、星々の機構を一番よく理解することができであらう。そしてこれは我々をまつ近くに

近代の原子物理學の中心へ導いて行く。この著書に於いては、我々は當然この新しい知識分野の全體に這入つて行かうと試みることはできない。我々はたゞ天文學上のもろくの成果に關する解釋にとつて重要である部分のみに心を配るであらう。

我をめぐる宇宙

第十三畫 α 粒子及び β 粒子の進路

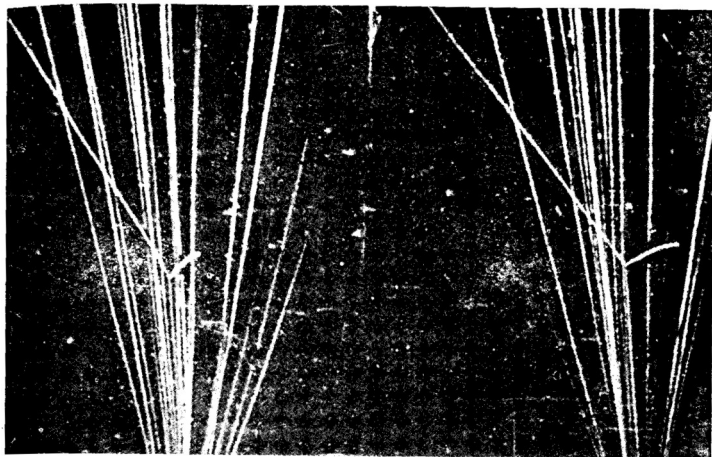


シール・テイ・アル・キルソン

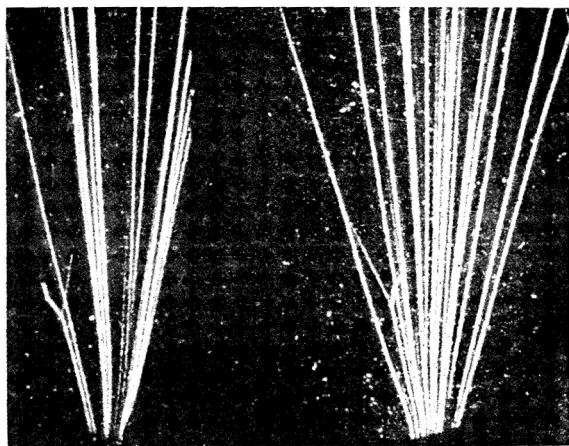
宇宙をめぐる我

第十四畫 α 粒子と窒素原子との衝突

第一圖に於いては、 α 粒子は單に窒素原子から撥ね返るのみである。
第二圖に於いては、それは陽子を驅逐し、然の後窒素原子に結びつく。



第一圖



第二圖

ビー・エム・एस・プラスチック

第一節 原子論

我等をめぐる宇宙

キリスト以前五世紀も遡つた時分に、ギリシャ哲學は次のやうな疑問に依つて非常な訓練を受けた。即ち、最後の手段として、宇宙の終局的實在は連續してゐるか連續してゐないか、といふのである。海岸に立つと、周圍一帯に砂の擴がりが見える。それは最初は構造に於いて連續してゐるやうに見えるが、もつと綿密に吟味すると、別々の硬い粒子又は粒から成り立つてゐることがわかる。前面には大洋が打ち寄せてゐる。それも最初は構造に於いて連續してゐるやうに見える。そしてこれは、どんな仕方をして、粒又は粒子に分割することができないことがわかる。我々はそれを雫に分割することはできる。しかしその時には各々の雫はもつと小さな雫に細分することができる。そして、物の表面を見ただけでは、この細分過程が永久に續いてはならない理由はないやうに思はれる。ギリシャの哲學者たちを騒がせた件の疑問は、結局、大洋の水又は海岸の砂は宇宙の實質の終極的構造に關する最も眞實な畫像を提供するかどうかといふにあつたのである。

デモクリトス學派や、レウキップスや、ルクレティウスは、物質の終極的非連續性を信じた。彼等は教へた。どんな實質も、何度か十分に細分された後は、それ以上の細分を許さない硬い別々の

粒子から成り立つてゐることがわかるであらう、と。彼等にとつては、砂は終極的構造なるものについて水よりも一層好い畫像を提供した。なぜなら、と彼等は考へた、十分に細分すれば、水も砂のやうに粒状の特質を表はすに至るであらうからである。そしてこの直觀的推測は近代科學に依つて十分に確證された。

件の疑問は、結局、一つの實質の薄い層がそれよりも少し厚い層と本質的に違つた性質を示すことがわかるや否や解決される。赤い床の上に一樣に敷きつめられた黄色い砂の層は、砂が少なくとも一粒の厚さのある層になつてゐれば、床全體を黄色くして見せるであらう。しかし、若し砂の量がその半分にすぎないなら、床の赤さがどうしても覗いて見えるであらう。砂を一樣に半粒だけの層に擴げることは不可能である。砂の層の諸特質に於けるこの突然の變化は、勿論、砂の粒狀構造の結果である。

同じやうな變化は、液體の薄い層の特質にも起ることがわかる。茶匙一杯のスープは、スープ皿の底を覆ふに足るであらうが、たつた一雫のスープは、ふしだらな飛沫を上げるにすぎないであらう。或る場合には、層の厚さがどれだけあれば液體の特質が變化しはじめるかを正確に測定することができる。一八九〇年にレーレイ卿が発見したところに依ると、水の上に浮んだオリヴ油の薄い膜は、膜の厚さが一耗の百萬分の一（又は一時の二千五百萬分の一）以下にせられるや否や、全

く特質が變化する。それに對する、無數の仕方で確證される明白な解釋は、かうである。即ち、オリヴ油は、別々の粒子——山の砂に於ける「粒」に似たもの——から成り立つてゐて、その各々は一時の二千五百萬分の一前後の直徑を持つてゐるのである。

あらゆる實質はさういふ「粒」から成り立つてゐる。それは分子と呼ばれる。そして物質のよく知れ渡つてゐる諸特質は、多くの分子を合せたほどの厚さのある層のそれである。只一つの分子の厚さよりも一層小さい層の諸特質は、實驗室の物理學者にわかつてゐるだけである。

第二節 分子

我々は如何にして一片の實質を破壊して、その終極的な粒、即ち分子にすることが出来るか？ 科學者にとつては、次のやうに言ふのは容易である。水を十分長い間細分すれば、それ以上分割することのできない粒に達するであらう、と。普通の人は、さういふ事が行はれるのを見たがであらう。

幸ひにも、さういふ過程は極めて單純な過程である。コップに水を入れて、その下に適度の熱を加へると、水は蒸發しはじめる。これは何を意味するか？ 水は破壊されて、その別々の終極的な粒又は分子にされつゝある、といふことを意味するのである。若しコップの水を十分感じ易い發條秤の上に置くことができたなら、蒸發過程は、連續的に、層また層と續くのではなく、痙攣的に、一分子づつ續くのであることがわかるであらう。水の重量は飛躍的に變化し、各々の飛躍は單一の分子の重量を表はすことかわかるであらう。コップはどんな整数の分子をも含み得るが、決して分數の分子を含み得るものではない——たとへ一分子を何分の一かに分けたものが存在してゐるとしても、それらはコップの水の蒸發に於いては用をなさない。

瓦斯状態

蒸發する時の水の表面から脱走する分子は瓦斯となる——それは水蒸氣又は濕氣である。瓦斯は莫大な数の分子から成り立ち、それらの分子は、相互から全く獨立して飛び廻つてゐる。しかし稀には例外もあつて、二つの分子が衝突し、従つて相互の運動に干涉することがある。分子と分子とが互に干涉し合ふ程度は、明かにその大きさに依存するに違ひない。分子が大きければ大きいほど、ますます衝突が繁くなり、ますます相互の運動に干涉し合ふであらう。實際に於いて、この干涉の程度は分子の大きさを見積る最善の手段を提供する。それは非常に小さくて、大概是直徑が一時の約一億分の一であることがわかる。そして一般的法則としては、我々が豫期しなければならぬやうに、小さな分子ほど小さな直徑を持つてゐる。水の分子は、一時の一・八億分の一(4.6×10^{-8} 吋)の直徑を持つてゐる。ところが、もつと單純な水素分子のそれは、丁度一時の一億分の一(2.7×10^{-8} 吋)強にすぎない。多くの色々の線上に於ける研究がこれらの分子に悉く同一の直徑を當てがふ、といふ事實は、それらの分子が實在してゐることを示すすぐれた證據である。

分子はそれほど非常に小さいから、それはまた非常に多數であるに違ひない。一パイント(譯者註、約三合一勺半)の水は 1.89×10^{25} の分子を含み、その各々の重量は 1.06×10^{-24} オンスであ

る。若しこれらの分子が横に置き並べられたら、地球を二億度以上も取巻くに足る一筋の鎖が出来上るであらう。若しこれらの分子が地球の表面の全陸地に散らばされたら、陸地の一時平方毎に殆ど一億の分子が存在することになるであらう。若し我々が分子を小さな種子と考へるなら、一時平方に一億の分子の割合で地球全體に撒くに要する種子の總量を一バイント瓶に入れることができる。

これらの分子は非常な高速力で運動してゐる。普通の部屋の空氣の中では、平均した分子速力は一秒に約五百ヤードである。これはざつと小銃彈の速力であり、むしろ音響速力以上である。我々は日常の経験からこの後者の速力をよく知つてゐるから、瓦斯中の分子速力について何らかの概念を形づくるのは容易である。分子速力が音響速力と比較できるのは、單なる偶然ではない。音響といふものは、一つの分子が他の分子と衝突したときに一方が他方へ傳へる攪亂である。それは寧ろ傳令が次から次へと代る代る口上を傳へるやうなものであり、又はギリシヤの松明持が次から次へと松明を渡すやうなものである。衝突と衝突との中間では、口上は分子が走るのと全く同じ速力で前方へ運ばれる。若し凡ての分子が全く同一速力で全く同一方向に進行したら、音響は勿論分子と同じ速力で進行するであらう。しかし、分子の多くは斜線進路を辿つて進行するので、普通の空氣の中に於ける個々の分子の平均速力は一秒に約五百ヤードであるに拘らず、音響の實際の前進速力は一秒に約三百七十ヤードにすぎない。

高温度の時には分子はそれ以上の大速度をさへ持ち得る。汽罐の中の湯氣の分子は一秒に一千ヤードの速力で運動し得る。

瓦斯の及ぼす大壓力を起すのは、高速力の分子運動である。瓦斯と接觸するどんな表面も、小銃弾ほどの速力で運動する分子の霞に曝される。例へば、運轉圓筒の中のピストンは一秒毎に約二×^{10²³}の分子に依つて砲撃される。無數の微小彈丸のかういふ絶え間もない一齊射撃が、圓筒の中でピストンを前進させ、それに依つて汽車を進行させるのである。我々が呼吸をする度に、一萬億の何百萬倍といふ分子の群が我々の肉體に入り込み、その各々が一秒に約五百ヤードの速力で運動する。そしてこれらの分子が我々の肺臓の壁を絶え間もなく打つてゐるからこそ、我々の胸腔は凹んだり何かしないのである。

おそらく我々が瓦斯といふものについて心の中に形づくり得る最善の一般的畫像は、あらゆる方向に無差別に飛んで、度々間を置いては互に衝突する、絶え回もない砲彈又は小銃彈の霞のそれである。普通の空氣の中では各分子は一秒毎に約三十億度も何か他の分子と衝突し、相次ぐ衝突と衝突の間では約十六萬分の一吋といふ平均距離を進んで行く。若し我々が瓦斯をもつと大きな密度に収縮するなら、與へられた空間の中にもつと多くの分子が集められるので、衝突はもつと度々になり、分子が衝突と衝突との間で進む距離はもつと短くなる。反對に、若し我々が瓦斯の壓力を減じ、

従つてその密度を小さくするなら、衝突の度数はもつと少なくなり、相次ぐ衝突と衝突との間に分子の進行距離——謂はゆる『自由通路』——は増加する。現在實驗室の中で得られる最低の真空内では、分子は他のどんな分子とも衝突することなしに百ヤード以上も進むことができる。尤も、一時立方に依然として六十億の分子が存在してはゐるが。

天文學的諸條件の下では、それ以上更に低い真空が見出され得る。或る星霧に於いては、瓦斯分子は衝突することなしに何百哩も進み得る。一つの與へられた空間容積にとつては、分子はそれほど少ないのである。

飛んでゐる分子は間もなくその相互の衝突に依つて休止するであらう、と考へられるかも知れない。小銃彈は疑ひもなくさうなるであらうが、瓦斯の分子彈はさうならない。それは今説明する諸理由からである。

エネルギー

小銃彈を發射するために使用される火藥装填の量は、彈丸に分け與へられる『運動エネルギー』の尺度となる。二倍の重量のある彈丸を發射するには、二倍の火藥を要する。なぜなら、一つの彈丸の、又は實に他の如何なる運動しつつある物體でも、運動エネルギーは、その重量に比例す

るからである。しかし、同じ弾丸を二倍の速力をもつて發射するには、單に火藥裝填を二倍にする必要があるばかりではない。更に四倍の火藥が必要である。なぜなら、運動しつつある物體の運動エネルギーは、その速力の自乗に比例するからである。經驗のある自動車運轉手はこの事をよく知つてゐる。若し我々の制動機が、我々の自動車を、一時間四十哩で走つてゐる時に二十フィートで止めるとすれば、一時間四十哩で走つてゐる時には四十フィートで止めることはできないであらう。その時には八十フィートを要する。二倍の速力は、自動車を止めるべき距離を四倍ほど必要とする。なぜなら、二倍の速力は四倍の運動エネルギーを表はすからである。一般に、どんな運動しつつある物體でも、運動エネルギーは、その物體の重量と速力の自乗との双方に比例する。

これは數學上の公式で表現されてゐる。即ち、 v の速力で運動しつつある m 重量の物體の運動エネルギーは、 $\frac{1}{2}mv^2$ となるのである。若し m がグラムで測定され、 v が一秒に何哩といふ割合で測定されるとすれば、物體の運動エネルギーは、 $\frac{1}{2}mv^2$ 『エルグ』であると云はれる。かくして、一『エルグ』は、一秒に一哩の速力で運動しつつある、二グラムの重量の物體の運動エネルギーである（それ故 $\frac{1}{2}mv^2 = 1$ ）。實例を挙げれば、三百噸の重量（ 3×10^6 ）があつて一時間六十哩（一秒に二六八二）で運動しつつある急行列車のエネルギーは、 1075×10^{14} エルグである。一噸の重量があつて一秒一五二〇呎で運動しつつある大砲彈又は破裂彈は、全くそれと同じエネルギーを持つてゐる。

十九世紀物理學の偉大な功績の一つは、『エネルギーの持續』として知られてゐる一般原理を確

立することにあつた。エネルギーは多くの形態で存在することができるし、ほとんど無限に一つの形態から別の形態へと變化することができ、決して全滅せしめられることはできない。運動しつつある物体のエネルギーは、この物体が休止せしめられる時でも全く無くなりはないで、何か別の形態を取るだけである。彈丸が、標的を打つことに依つて休止する時でも、その運動エネルギーの一部分は標的を熱し、一部分は彈丸を熱する、又は恐らく彈丸を溶解しきへする。熱といふ新しい姿に變つても、そこには彈丸の最初の運動に含まれてゐたのと同じだけのエネルギーが存在する。

同じ原理に従へば、エネルギーは創造されることはできない。すべての現存するエネルギーは、おそらくその現在の形態とは全く違つた或る形態に於いてではあるにしても、永遠の昔から存在してゐたに違ひない。例へば、火藥は化學的エネルギーといふ形態で貯へられた大量のエネルギーを含んでゐる。この瓶詰めにされたエネルギーが脱出して、それが含まれてゐる器物を爆發させるとか、側にある物を空中に蹴飛ばすとかして色々の損害を與へるのを防ぐには、我々は慎重に構へなければならぬ。小銃は、實際に於いては、一定量をもつて装填された火藥の中に含まれてゐるエネルギーを遊離させて、できるだけそれと同じだけのものを彈丸の運動エネルギーの形態の中に導き入れるために工夫されたものである。我々が彈丸を標的に向つて發射する時には、特定量のエネ

ルギイ（我々が使用した火薬の装填に依つて決定されたもの）は、火薬の中に存在する化學的エネルギーに變化して、先づ、彈丸の中に（少しは小銃の跳ね反りの中に）存在する運動エネルギーとなり、最後には、一部分は費された彈丸の中に、一部分は標的の中に存在する熱エネルギーとなる。ここには、迅速に相次いで三つの相異なる形態を取るエネルギーがあるわけである。宇宙の全生物は、エネルギーがさまざまな形態を装つて現はれたものと見做して差支へないし、宇宙に於ける凡ての變化は、エネルギーがこれらの形態の中の一つから他へと走り廻つてゐるものと見做して差支へないが、エネルギーの總量はいつも變らない。これが偉大なるエネルギー持續の法則である。

エネルギーのもつと一般的な諸形態の中には、飽和された蓄電池又は雷電のエネルギーに依つて例證できるやうな電気エネルギーもあるし、懷中時計の渦巻發條又は掛時計の吊り分銅の中に例證できるやうな機械エネルギーもあるし、火薬の中に、又は石炭や薪や石油の中に貯へられてゐるエネルギーに依つて例證できるやうな化學的エネルギーもあるし、彈丸の運動に依つて例證できるやうな運動エネルギーもあるし、最後に、我々が既に見たやうに、小銃彈の運動が妨げられた時に現はれる熱に依つて例證できる熱エネルギーもある。

熱

我々は更に進んでエネルギーのあり得べき形態としての熱を吟味しよう。部屋の中を温めたいと思ふ時には、我々は火を燃やして、石炭又は薪の中に貯へられてゐる化學的エネルギーを幾分か遊離させる。又は電熱器を捻つて、遠い發電所で石炭が燃えて遊離させられつゝあるエネルギーを電流に依つて送つて貰ふ。しかし、最後の手段として、熱とは何であるか、そしてそれは如何にしてエネルギーの様式になるか？

熱は、瓦斯、液體、又は固體の何れのものであるを問はず、單に個々の分子の運動エネルギーである。我々が部屋の空氣を熱するのは、たゞ空氣の分子を一層速く運動させるだけのことである。そして實質の全體の熱は、それを構成する凡ての分子の全體のエネルギーである。自動車のタイヤをふくらます時には、空氣入のピストンを、空氣入の内側にある、百萬を無數に寄せ集めたほどの空氣分子の壓著に抵抗して前方へ押しやる。抵抗する分子を跳ねのけて、ピストンは分子の運動速度を増加させる。分子の運動エネルギーに起る増加は、單に熱の増加にすぎない。我々は寒暖計を差し込むことに依つて、又は、もつとく簡単に、空氣入の上に手を置くことに依つて、これを證明することができる。即ち、それは熱さを感じる。

固體の分子はあまりエネルギーを持つてはゐないし、従つてあまり迅速に運動しない——むしろ非常に遅いので、減多に自己の相對的位置を變へず、隣接する分子がそれらをしつかり擱んでゐる

ので、その弱い運動エネルギーはそれらを遊離させることはできない。若し我々がこの固體を温めれば、分子は今まで以上のエネルギーを獲得して、今までも迅速に運動しはじめる。暫くすると、それらは非常な速力で運動して、隣接者からの抑制作用を輕蔑し得るほどになり、各分子は思ふまゝの場所へ行けるだけの運動エネルギーを持つ。そしてこゝに、孤立した單位として運動して、互に押し合つたり、互に後へ突きかけて進んだりする一群の分子が出来る。つまり、實質は液體狀態を帶びて來たわけである。これを具體的に説明すれば、氷が溶けて水となつた。氷結の把持力はゆるんで、諸分子は互に先を争つて勝手に流れて行く。各分子は依然として、隣接者に力を及ぼすが、隣接者は最早全體の運動を妨げるほど力強くはない。液體を更に熱し、かくして更に分子の運動エネルギーを増加させると、これらの分子はその霸制から全く脱出して、瓦斯又は水蒸氣を形成しなから空間の中を飛び廻る。若し我々が更に熱を加へれば、實質の全體は早晚瓦斯狀態を帶びるであらう。

瓦斯を更に一層熱することは、分子彈を一層迅速に飛ばせるだけのことである。これは分子彈の運動エネルギーを増加させる。

瓦斯の中の分子の平均した運動エネルギーは、瓦斯の温度に比例する——實際これは温度が決定される仕方である。しかし、温度は、普通の用法に於ける華氏又は攝氏の度盛に基いて測定されな

いで、『絶対』目盛と呼ばれるものに基いて測定されなければならない。それは攝氏零下二百七十度又は華氏零下四百六十九度を零點とするものである。この『絶対』零點は、それ以上熱を失ふことのない物體の温度であつて、あり得べき最低温度である。我々は實驗室の中でその約一度以内まで近づくことができる。そしてそれは、空氣を、水素を、また凡ての中で最も抵抗力の強い瓦斯であるヘリウムさへを、氷結させて固體とする。どんな星からも遠く離れて、太陽系外の空間に置かれた寒暖計は、おそらく絶対零度以上約四度にすぎない温度を示すであらう。ところが、銀河系の限界を越えると、それよりも非常に低い温度に達するに違ひない。

分子の衝突

我々は今や瓦斯の中の二つの分子彈の間の衝突を描かうと試みて差支へない。戦場で衝突し合ふ鉛の彈丸は、おそらくその運動エネルギーの大部分を熱エネルギーに變へるであらう。それらは一層熱くなり、又は恐らく溶けさへするであらう。しかし分子彈は如何にしてその運動エネルギーを熱エネルギーに變化させることができるか？ それらに取つては、熱と運動エネルギーとはエネルギーの二つの相異なる形態ではなく、全くの同一物である。總體のエネルギーは持續しなければならないし、それが帶び得る新しい假裝はない。それ故、二つの分子彈が衝突した時には、そこに起

り得る最高の出来事として、両者は或る量の運動エネルギーを交換するかも知れないといふことになる。若し衝突前の両者の運動エネルギーがそれぐ七と五であつたら、衝突後のエネルギーは、六と六、又は八と四、又は九と三、又はその他の加算すると十二になる組合せになるかも知れない。それはあらゆる衝突に於いて同じである。エネルギーは、無くすることもできなければ變化さすこともできず、従つて、分子の戦場に於ける彈丸は永久に飛びつゞけて、幸ひにも互に打ち合ふだけであり、打ち合ふ時にも互に害を加へ合ふことはない。それらの彈丸の運動エネルギーは、それらの彈丸が運のいゝ打ち合ひ又はその反對を行ふに連れて、あちらへ行つたりこちらへ行つたり、こちらへ行つたりあちらへ行つたりする。しかし、それらの彈丸が一番恐れなければならないのは、エネルギーの變動であつて、エネルギーの總體の喪失ではない。それらの彈丸の運動は永久的である。

第三節 原子

瓦斯狀態に於いては、各別々の分子は、それを發生させた固體狀又は液體狀實質の凡ての機械的特質を保つてゐる。例へば、蒸汽分子は鹽又は砂糖を濕らし、若しくは、生石灰又は加里鹽化物のやうな乾燥性實質と結合する。それは丁度水と同じである。

分子を更にそれ以上破壊することは可能であるか？ ルクレティウスやその先輩たちなら、勿論『否』と言つたであらう。しかし、全く彼等の手の届かなかつた簡単な實驗をやつて見ただけでも、彼等が間違つてゐたことは立ちどころにわかるであらう。

普通の電氣鈴の回線の二つの針金を、水の這入つたコップの中に、向ひ合せて入れて置くと、瓦斯の泡が二つの針金に集まることがわかるであらう。そして化學的試驗をして見ると、この二組の瓦斯は全く相異なる特質を持つてゐることがわかる。して見れば、両者はどちらも水蒸汽である筈はないし、また事實上どちらもさうではない。一方は水素であり、もう一方は酸素であることがわかる。水素は酸素の二倍ある。そこで我々は次のやうに結論する。電流は水の各々の分子を破壊して三分の二の水素と三分の一の酸素とにした、と。分子が破壊されて出來上るこれらの小さな單位

は『原子』と呼ばれる。水の各々の分子は水素（H）の二つの原子と酸素（O）の一つの原子から成り立つてゐる。これは H_2O といふ化學式で言ひ表はされる。

地球上に見出される無数の實質——靴、船、封蠟、甘藍、王様、大工、海象、牡蠣、我々が考へつくことのできるあらゆる物——は、いづれかの仕方で、それを構成する原子に分析することができ。次のやうに考へられるかも知れない。我々が地球上に見出す非常に多様な實質から、全く信じられないほど多數の相異なる原子の種類が現はれるであらう、と。しかし、實際に於いては原子の数は全く少ない。同一の諸原子が何度も何度も現はれる。そして我々が地球上に見出す非常に多様な實質は、その構成の中に這入つて行くどんな多様な原子からも生ずるのではなくて、僅かな原子型の非常に多様な結合の仕方から生ずるのである——それは丁度、色刷の時三つの色が結合されて我々が自然界に見出す殆んど凡ての色ばかりでなく、陸にも海にも決してないやうな不思議な混色をさへ形づくるのと同じである。

今までのところ、既に知られてゐる地球上の實質を悉く分析して見ても、九十の相異なる種類の原子が現はれたにすぎない。おそらく九十二は存在するであらう。もう二つほど、又はおそらくそれ以上さへが、更に發見されさうである、と考へる理由があるからである。既に知られてゐる九十でさへ、その大多數は非常に珍しいものである。そして最もありふれた實質は、約十四の相異なる

原子、即ち、水素(H)、炭素(C)、窒素(N)、酸素(O)、ソヂウム(Na)、マグネシウム(Mg)、アルミニウム(Al)、珪素(Si)、燐素(P)、硫黄(S)、鹽素(Cl)、ポタシウム(K)、カルシウム(Ca)、及び鐵(Fe)の結合から形成されてゐる。

かうして、全地球は、無限に相異なる實質を持つてはゐても、標準煉瓦――原子――で築かれた一つの建物であることがわかる。そしてそれらの原子の中では、ほんに少數の型、約十四のものが、この構造の中に豊かに見出されて、他は稀に現はれるだけである。

分光術

鈴を槌で叩くと獨特な調べを出すやうに、焰又は電弧又は放電管の中に入れられたあらゆる原子は、獨特な光を發する。ニュートンは、日光にプリズムの中を通過させて、それが虹の凡ての色の混合物であることを發見した。同じ仕方では、近代の分光學者は、今までよりも無限に精巧な道具をもつて、どんな光をも分析して、その組織の中に這入つてゐる凡ての色にすることができ。さうやつて造り出されたものゝ色の虹――『スペクトル』――は、天文學者が星の後退又は接近の速力を決定するのに利用する、光又は暗線又は帶の模様によつて横斷される。この模様の試験から、熟練した分光學者は、光の出る原子型を即座に告げることが出来る。この點から云つて、或る

實質の現存にとつての最も微妙な試験の一つは、分光試験である。

この分光的分析方法は、決して地球上の諸實質に限られはしない。一八一四年に、フラウンホーファーはニュートンの日光分析を反復して、そのスペクトルが、或る暗線、今もなほフラウンホーファー線として知られてゐるもの、に依つて横斷されることを發見した。分光學者は、この暗線の解釋上に困難を持つてはゐない。それらの暗線は、地上のありふれた原素、即ち水素やソヂウムやカルシウムや鐵が太陽の中に現存する證據である。先へ行くとわかるもろくの理由で、これらの實質の原子は、フラウンホーファー線に依つて太陽スペクトルに缺けてゐることがわかつた、あのもろくの色の光を呑み込んでゐる。このスペクトルは、今ではフラウンホーファーが考へたのとは比較にならないほど込み入つてゐることがわかつてゐるが、實際上から云つて、その中に見出される凡ての線は、地上で知られてゐる諸原子に當てがふことができる。そしてそれと同じ事は空の凡ての星のスペクトルについても本當である。それは、全宇宙は地球上に見出された九十又は九十二の原子型からのみ築かれてゐるといふ一般化へ飛躍しようと試みつゝあるが、現在のところ、これを是認する理由はない。我々が太陽や星々から受ける光は、その表面の最外層からのみ來るのであり、星々の内部に見出されるべき原子型については何の報告をも傳へない。實際我々はこの地球の内部にある原子型についてさへ、何の知るところもないのである。

原子の構造

全く最近まで、諸原子は全宇宙を築いてゐる耐久煉瓦と見做されてゐた。宇宙の凡ての變化は、永久不滅の原子の配列換へ以上に激しいものにはならないと想像されてゐた。子供の煉瓦箱のやうに、これらの變化が多くの建物を順々に建てて行くのであつた。二十世紀の物理學の物語は、何よりも先づ、かういふ概念を粉碎する物語である。

前世紀の末になつて、クルックスや、ルナールや、とりわけ、サー・ゼー・ゼー・トムソンが、先づ原子を破壊しはじめた。二千年以上も、宇宙の壊れ難い煉瓦と信じられてゐたものゝ構造は、幾つかの斷片を抜き取つても直ぐ感應することが急にわかつた。一八九五年には一つの哩標に達した。その時トムソンが示したところに依ると、これらの斷片は、どんな原子型から出て來たものであるにしても、同一であつた。それらは相等的い重量を持ち、相等的い量の陰電荷を帶びてゐた。この後者の特質のために、それらは『電子』と呼ばれた。しかし、**原子は電子以外のものから築かれることはできない**。といふのは、各電子は陰電荷を帶びてゐるから、電子以外の何物からも成り立つてゐない構造も陰電荷を帶びるであらう。二つの陰電荷は、二つの陽電荷と同じやうに、互に反撥するであらう。ところが、一方が陽電荷を帶び、他方が陰電荷を帶びてゐる場合には、互

に吸引する。この事は、如何なる物體又は構造物も、陽電荷を帯びてゐるか、陰電荷を帯びてゐるか、それともどちらをも全然帯びてゐないかを決定するのを容易にする。觀察して見ると、一つの完全原子は何の電荷をも全然帯びてゐないことがわかるので、原子の何處かには、すべての電子の寄せ合された陰電荷を中和するに足るだけの量の陽電荷が存在してゐるに違ひない。

一九一一年に、サー・エルネスト・ラザフォードとその他の者らの實驗で、原子の構が明かにされた。先へ行くとわかるやうに、自然そのものは、放射性實質から發射される α 粒子に於いて、陽電荷を帯びて非常な高速力をもつて運動する小粒子を無限に供給する。ラザフォードの方法は、簡單にこれらの α 粒子を諸原子の中に發射して、その結果を觀察することであつた。そして彼を得た驚くべき結果はどうであつたかと云ふに、これらの彈丸の大多數は、原子の中を、恰もそれが單に存在してゐないかのやうにまっすぐに通過した。それは幽靈に向つて發砲するやうなものであつた。

然も、原子は全く幽靈ではなかつた。それらの彈丸の中のほんの一小部分——おそらく一萬に一つ——は、何か非常に實質的なものに遭遇したかのやうに、自己の進路から曲折した。數學的計算に依ると、これらの障礙物は諸原子の行方不明の陽電荷であることがわかつた。

これらの拋射物の通路を詳細に研究して見ると、一つの原子の全體の陽電荷は只一つの非常に小

さな空間に集中されて、一時の百萬分の一の、そのまた百萬分の一にすぎない諸次元を持つてゐるに違ひないことがわかつた。かういふ仕方では、ラザフォードは、一般に彼の名と結びつけて呼ばれてゐる、原子の構造に關する見解を提出するに至つた。彼は想像した、原子の化學的諸特質及び性質は、重量のある、しかし非常に微細な、中心『核』の中に存在してゐる、それは陽電荷を帶びてゐて、その周囲には陰電荷を帶びた多數の電子が軌道を描いてゐる、と。勿論、電子は原子の中で運動してゐると想像する必要があつた。でなければ、陰電氣に對する陽電氣の吸引が直ぐ電子を中心核の中へ引き入れるであらう——それは丁度、地球の軌道がなかつたら、引力的吸引が地球を太陽の中へ落ち込ませるであらうと同じである。簡単に云へば、ラザフォードは、次のやうに想像したのである。原子は太陽系のやうに構成されてゐて、重い中心核が太陽の役割を演じ、電子が遊星の役割を演じてゐる、と。

これらの電子が自己の微小な軌道を飛び廻る速力は恐るべきものである。普通の電子は、自己の核の周回を、一秒に何百哩といふ速力をもつて、一秒毎に數千萬億度公轉する。かくして、電子の軌道の小さいことは、電子が、遊星よりも、又は恒星そのものさへよりも一層高い軌道速力をもつて運動するのを妨げはしない。

中心核の周圍にある空間を塞ぎ、従つて、他の電子がそれに近づき過ぎるのを妨げることに依つ

て、これらの電子は原子に大きさを與へる。電子に依つて塞がれた空間容積は、電子の總容積よりも非常に大きい。ざつと計算して見ると、双方の容積の比は彈丸に對する戰場の比と同じである。

約 2×10^{-8} 厘の半徑を持つ原子は、約 2×10^{-13} 厘にすぎない半徑を持つ單一の電子の、約十萬倍の直徑を持ち、従つて約一千萬億倍の容積を持つてゐる。核は、一般には原子の中にある凡ての電子を寄せ集めた重量の三千倍又は四千倍を持つてゐるにしても、大きさに於いてはせいぜい單一の電子と比較できるくらゐであるし、またそれよりも小さいことさへあるかも知れない。

我々は既に天文學的空間の極度の空虚さについて説明した。出鱈目に空間中の一つの點を選んだ場合、それが一つの星に依つて占められることは減多にあるまい。太陽系さへが壓倒的に空虚な空間から成り立つてゐる。太陽系の内側に出鱈目に一つの點を選んだ場合にも、やはりそれが遊星に依つて、又は彗星、流星、若しくは一層小さな物體に依つてさへ、占められることは減多にあるまい。そして今、この空虚さは物理學の空間にも延長してゐることがわかる。原子の内側に於いてさへ、出鱈目に一つの點を選んだ場合、そこにどんなものでも存在することは減多にあるまい。そんなことがあるのは、少なくとも、幾萬億度に一度ぐらゐのものである。ウォータロー停車場の内側にある六粒の塵が、如何にして、星が空間に群がつてゐる程度を表はすかを——或は寧ろ表はしすぎるかを——我々は既に見た。同様に、ウォータロー停車場の中で飛び廻つてゐる數匹の地蜂——

炭素原子にとつては六匹——は、電子が原子の中に群がつてゐる程度を表はすであらう——他の部分は悉く空虚なのである。我々が、宇宙の全體の構造を、巨大な星霧や、莫大な太陽系外及び星霧間の空間から、原子の微小な構造に至るまで、ずらりと見て行く場合、我々の心の凝視の前を過ぎて行くものは、空虚な空間以外には殆んど何物も無い。我々は陽炎のやうな宇宙に住んでゐるのである。模様や計畫や意匠はそこには澤山あるが、固體狀實質は稀である。

原子數

原子の中の軌道を飛び廻つてゐる電子の數は、原子の『原子數』と呼ばれる。一から九十二に至る凡ての原子數の原子は、今も見出されない二つの數、八十五¹⁵と八十七¹⁶とを除けば、既に見出された。しかし、既に述べたやうに、この二つも存在してゐること、九十二の『元素』があつて、その原子數は一から九十二までに至る原子數の全範圍を連續的に占めてゐることは、非常に尤もらしい。

原子數一の原子は勿論凡ての中で最も單純である。それは水素原子であつて、そのの中では、只

15 原子番号85アスタチン (At)。安定同位体は存在しない。

16 原子番号87フランシウム (Fr)。安定同位体は存在しない。

一つの電子が一つの核の周囲を公轉してゐる。この核の陽電荷は、たとへ記號に於いては相反してゐても、量に於いては、陰電子の電荷に全く等しい。

次にやつて來るのは、原子數二のヘリウム原子であつて、それの中では、二つの電子が一つの核の周囲を公轉してゐる。この核は水素核の重量の四倍を持つてゐる。尤も、その電荷は二倍にすぎない。その次にやつて來るのは、原子數三のリチウム原子であつて、それの中では、三つの電子が一つの核の周囲を公轉してゐる。この核は、六倍の重量と三倍の電荷とを持つてゐる。さういふ風に進んで行くと、遂にウラニウムに達する。これは地上で知られてゐる凡ての原子の中の最も重いものであつて、九十二の電子を持つてゐる。これらの電子は、水素核の重量の二百三十八倍を持つ一つの核の周囲に軌道を描いてゐる。

第四節 輻射能

物理科學は、原子をその構成要素に分割することに依然として從事してゐる間に、核そのものは永久的のものでもなければ不滅のものでもないといふことを發見しはじめた。一八九六年に、ベケレルは、ウラニウムを含むさまざまな實質は、その附近に寫眞感光板を持つて行くと自然に感應するといふ著しい特徴があることを見出した。この觀察は、物質の新しい特徴、即ち輻射の發見に到達した。次の數年に於ける輻射能研究から得られた凡ての成果は、整理されて『自然分解』といふ假説となつた。これは、一九〇三年にラザフォードとソッデイーとが提出したものであつた。現在のやうな形式に於ける此の假説に従へば、輻射能は放射性實質の原子の核の自然的破壊を示す。これらの原子は決して永久不滅のものではないので、その核は單に時間がたつただけでぼろぼろになる。従つて、一度はウラニウム原子の核であつたものが、十分な時間がたつと、鉛原子の核に變化する。變化の過程は瞬間的のものではない。それは漸次的に且つ別々の階段を辿つて進行する。この進行の間に、三つの型の生成物が放出される。α線、β線、及びγ線と稱されるものがそれである。これらがもとゝ線と稱されたのは、空氣、金屬、又はその他の實質の或る厚さを侵透する力を

持つてゐるからである。これらの線の眞の性質はもつと後になつて發見された。よく知られてゐるやうに、例へば磁石の兩極の間の空間に見出されるやうな磁力は、運動しつゝある荷電粒子を眞直ぐな進路から逸脱させる。それは、陽電荷を帶びてゐるか陰電荷を帶びてゐるかに依つて、一方の方向かもう一方の方向に逸脱する。

放射性實質に依つて放出されるさまさまの線に、有力な磁石の兩極の間の空間を通過させると、 α 線は、陽電荷を帶びてゐる粒子から成り立ち、 β 線は陰電荷を帶びてゐる粒子から成り立つてゐることがわかつた。しかし、その時使用された最も有力な磁力は、 γ 線の通路には少しの逸脱をも起させなかつた。そこで次のやうに結論された。 γ 線は全然物質的粒子でないか、それとも、若し物質的粒子であるなら、どんな電荷をも帶びてゐないか、そのどちらかである、と。これは前者が本當のものであることが後になつて證明された。

γ 粒子

γ 線を構成する、陽電荷を帶びてゐる粒子は、一般に γ 粒子と稱された。一九〇九年に、ラザフォードとロイツとは、 γ 粒子に一耗の厚さの百分の一以下の薄い硝子の壁を通過させて、もはや出られない室—— γ 粒子に對する一粒の捕鼠機——の中に入れた。彼等が見出したところに依ると、

器の中にある α 粒子の数が増加しつゞけてゐる間は、ヘリウムの蓄積が行はれてゐた。かういふ仕方では、陽電荷を帯びてゐる α 粒子は單にヘリウム原子の核であるにすぎないことが確立された。これらの粒子は絶大な速力をもつて運動し、この速力は、これらの粒子が發射された輻射性實質の性質に依存する。すべての中の最も速いもの、即ちトリウムCに依つて放出されるものは、一秒に一萬二千八百哩の速力をもつて運動する。一番遅いもの、即ちウラニウム1から放出されるものさへ、一秒に八千八百哩といふ速力を持つてゐる。これは空中に於ける普通の分子速度の約三萬倍である。これらの速力をもつて運動する粒子は、自己の進路から普通の分子を悉く叩き出してしまふ。この事は α 線の非常な侵透力を説明する。

β 粒子

α 線は、磁力の下に於けるその運動を試験することに依つて、陰電荷を帯びた電子から成り立つてゐることがわかつた。これらの電子は、あらゆる原子の中の軌道の上を廻つてゐるものに全く類似してゐる。一つの α 粒子は、量に於いて二つの電子のそれに等しい陽電荷を帯びてゐるから、一つの α 粒子を放逐した一つの原子には、陽電荷の不足が残る。又は、それと同じ事になるのであるが、二つの電子のそれに等しい陰電荷が残る。その結果、自然であり、また更に殆んど避け

難いのは、 α 粒子の放逐は陰電荷を帯びた電子の放逐と替るべきものであり、従つて原子に於ける陽電氣と陰電氣との均衡は維持され得るといふことである。 β 粒子は α 粒子よりも一層大きな速力をさへもつて運動し、その多くは光速速度（一秒に十八萬六千哩）の數パーセントの範圍内に接近する。

物理科學に知られてゐる最も美しい工夫の一つ、即ちシー・ティー・アール・キルソン教授の發明は、瓦斯の中を縫ふやうに進んで行つて、その途上にある瓦斯の分子と衝突する α 粒子及び β 粒子の運動を研究することを可能にする。粒子が通過させられる室には、水蒸氣を一杯入れる。それも、一つの荷電粒子が通過すると、その後、寫眞に取ることでできる凝結が尾を引くやうな條件に於いてある。實例をあげると、第十三畫はキルソン教授自身が撮つた寫眞を示したもので、そこには α 粒子と β 粒子との双方の尾が同一寫眞畫に現はれてゐる。 α 粒子は β 粒子の約七千四百倍の重量を持つてゐるから、 α 粒子の方が瓦斯の中に一層多くの攪亂を起し、従つて一層廣い一層際立つた進路を残すのは自然である。また、 α 粒子は比較的眞直ぐな進路を辿つて行くに反し、一層軽い β 粒子は、その出會す分子の多數に依つて自己の進路から逸らされる。寫眞畫には、四つの α 粒子進路と一つの（それよりも非常に微かな） β 線進路が示されてゐる。 α 線進路の一つに見られる瘤のやうな様子をした隆起物は、興味がある。これらは α 粒子の通過に依つて原子か

ら叩き出された電子の短い通路を表はしたものである*。

*これらはバムステッドに依つて α 線と呼ばれた。

γ線

γ線は全然物質的粒子ではない。それらは單に非常に特殊な種類の輻射であることがわかる。我々はそれに就いて今すぐ論ずるであらう。

第五節 輻射

池の表面をステッキで掻き廻すと、一續きの小波がそのステッキから起つて、一續きの絶えず膨脹する圓となつて、池の表面を進行する。水はステッキの運動に抵抗するから、我々は連續的に池を掻き廻さなければならない。この働きのエネルギーは、一部分は少なくとも、小波のエネルギーに變化する。小波はエネルギーを帶びてゐることを、我々は知ることができる。なぜなら、小波は漂流するコルクなり玩具ボートなりを地球の引力的牽引に抵抗して持ち上げるからである。かくして小波は、我々が運動するステッキの媒介に由つて池の中に入るエネルギーを池の表面に分布する一つの機構となる。

光や、他のあらゆる輻射形態は、水の小波又は波に似てゐる。波に依つてそれらはエネルギーを中心の源から四方へ分布する。太陽輻射は、太陽の内側に發生する莫大量のエネルギーを空間の中に分布する。光の中には何か實際の波動運動が存在してゐるかどうかは、我々には殆んどわからない。しかし、光も、他のあらゆる輻射型も、相次いで起る波のもろゝの特質を幾つか持つほどの形式で傳播することは、我々も知つてゐる。

我々が既に見たやうに、一緒に結びついて日光を構成する、光の相異なる色は、光にプリズムの中を通過させることに依つて別々のものにすることができる。それに代る道具、即ち廻折格子は、光をその構成要素である波長に分析し、これらの波長は虹の相異なる色に相當してゐることがわかる。この事は、光の相異なる色は相異なる波長を表はすと同時に、相異なる色の光の實際の波長を測定する手段を提供することを證明する。これらの波長は非常に微細なものであることがわかる。

我々が見得る最も赤色の光は、最も長い波長の光であるにかゝはらず、その波長は十萬分の三吋 ($7\frac{1}{2} \times 10^{-10}$ 厘) にすぎない。我々が見得る最も紫色の光は、僅かこの半分、即ち 0.000015 吋の波長を持つてゐるに過ぎない。すべての色の光は、一秒に十八萬六千哩、即ち 3×10^{10} 厘といふ同一の不變速力をもつて進行する。一秒に一定の點を通過する赤色の光の波は、従つて、四百萬億より少なくない。これは光の『度數』と呼ばれる。紫色の光はそれよりも更に高い八百萬億の度數を持つてゐる。我々が紫色の光を見る時には、一秒毎に八百萬億の光波が我々の眼に這入る。

* 小波系統に於ける波長は、一つの小波の峯から次の小波のそれに至るまでの距離である。そしてこの考へ方は波動性質を有する凡ての現象に適用して差支へない。

分析された日光のスペクトルは、限には、一つの末端に於ける赤色の光からもう一つの末端に於ける紫色の光に至るまで擴がつてゐるやうに見えるが、これはその本當の限界ではない。或る化學

鹽を可視スペクトルの紫色の末端を越えた所に置くと、それは活々と輝くので、ここでさへエネルギーは、たとへ不可視形態に於いてであるにしても、送られつつあることがわかる。

不可視輻射の區域は、可視スペクトルの兩端から無限に擴がつてゐる。一つの末端——赤色——から、我々は無線傳送に使用されるやうな型のもろくの波に連續的に移ることができる。これらの波は、何百ヤード、何千ヤードといふ波長を持つてゐる。紫色の末端からは、それよりも非常に短い波長のもろくの波——紫外輻射の凡ての多様な形態——を通過させることができる。可視光線の波長の約百分の一から千分の一までの波長に於いて、我々はよく知れ渡つてゐるX線に達する。これは我々の肉體に何時も侵透するので、我々は内側の骨をさへ寫眞に撮ることができる。これらのものをさへ遙かに越えると、 γ 線を構成する輻射型に達する。その波長は、百億分の一吋、即ち、可視光線の波長の約一萬分の一にすぎない。かくして、 γ 線は極めて短い波長を持つ不可視輻射と見做して差支へない。我々はもつと先へ行つて γ 線の務める正確な機能を論ずるであらう。

現在はいゞ次のやうに言つて置かう。先づ第一に、それはベケレル寫眞感光板を曇らすといふ極めて有用な機能を務め、かくして輻射性物質の特質を發見させてくれる、と。

かくして、輻射性原子の破壊は小銃の發射に比較して差支へないことがわかる。 α 粒子は發射された彈丸、 β 粒子は煙、 γ 線は閃光である。最後に残る鉛原子は、彈丸を技いた小銃であり、ウ

ラニウム等の、最初の放射性原子は、彈丸を込めた小銃である。そして放射性小銃の特有性は、それが自然に且つ自ら進んで發火したところにある。引金を引かうとするあらゆる試みは、これまでは失敗した、又は少なくとも、要領を得ない諸結果を起した。我々はたゞ待ちさへすればいい。小銃は早晚發火することがわかるであらう。

第六節 原子核

ポタシウム及びルビディウム（その原子数はそれぞれ十九及び三十七）といふあまり重要でない例外はあるが、輻射能といふ特質は、諸原子の中の最も複雑で重いものにのみ見出される。それは實に八十三以上の原子数を持つものに限られてゐる。然も、一層軽い原子は重い輻射性原子と同じ仕方で自然分解を起すことはないにかかはらず、その核は複合的構造を持つてゐて、人爲的手段に依つて破壊することができる。一九二〇年に、ラザフォードは、輻射性原子を小銃として使用して、 α 粒子を軽い原子に向けて發射した。そして直接の打撃がその核を破壊し得ることを發見した。しかし、重い輻射性原子の自然分解と、軽い原子の人爲的分解との間には、意味ぶかい相違があることがわかる。前の場合には、常に現存する γ 線と x 線は別として、 α 粒子のみが放逐される。ところが、後の場合には、 α 粒子は少しも放逐されないで、 α 粒子の重量の約四分の一を持つにとどまる粒子が放逐される。それらの粒子は水素原子の核と同一であることがわかつた。

原子の下界に於けるこれらの感動的な出來事は、既に説明したシー・ティー・アール・キルソン教授の凝結方法に依つて寫眞に撮ることができる。第十四畫に於いては、一つの α 粒子と一つの

窒素原子との二度の衝突が示してある。これはビー・エム・エス・ブラケット氏が寫眞に撮つたものである。直線は單に普通の α 粒子の全く平穩な進路であつて、既に第十三書に示したものに似てゐる。しかし各々の寫眞に於ける一つの α 粒子進路が突然分岐してゐるので、全體の形はY型になつてゐる。

第一回に於いて枝が出てゐるのは、 α 原子が一つの窒素原子と衝突したからである、といふことは殆んど疑ふ餘地がない。Yの軸は、衝突前に於ける α 粒子の進路である。二つの上部枝は、衝突後に於ける α 粒子と窒素原子との進路であつて、後者は今おそろしい速力で運動して、あらゆるものを自らの道から打ち出しつつある。この寫眞畫に示されてゐるやうに、直角をなす二つの方向で同時に寫眞を撮ることに依つて、ブラケット氏は衝突全體を再構成することができた。そして角度は力學理論がこの寫眞に關するかういふ解釋に基いて要求するものと正確に一致することがわかつた。

第二圖に撮影されてゐる出來事は、第一圖に見られるものとは違つた型のものである。といふのは、若しYの上部枝が第一圖に於けるやうに α 粒子と窒素原子の進路であつたら、角度が力學理論の要求するものと一致しないからである。Yの幹はやはり普通の α 粒子の進路であるが、長い微かな上部枝は、 α 粒子よりも小さな粒子、即ち核から發射された重量四分の一の粒子の進路であ

る。ところが、短い、はつきりした方の枝は、 α 粒子を捕へて、それと連れ立つて運動してゐる窒素原子のそれである。ブラケットが自分の撮つた寫眞に對するかういふ解釋を確立した時の見事な方法を十分に記述すると、場所を塞ぎすぎるであらう。しかし、第二圖に於いて、彼が實際に窒素原子の核の破壊を撮影することに成功したことは、ほとんど疑ふ餘地がない。

同位元素

二つの原子は、若し兩者の核の帶びてゐる陽電荷が同一であるなら、同一の化學的特質を持つてゐることになる。この電荷の量は核をめぐつて公轉し得る電子數を決定する。この數は勿論核の電氣界を中和するのに必要な數である。そして、これが今度は元素の原子數を決定する。しかし、アストン博士が示したところに依ると、同一の化學的元素、即ちネオンなり鹽素なりの原子が、相異なる重量の核を持ち得る。同一の化學的元素の諸原子が取り得るさまざまの形態は、同位元素として知られてゐる。それらは勿論その相異なる重量に依つて區別される。アストンは更に進んで非常に意味ぶかい發見をした。即ち、すべての原子の重量は、ほとんど、單一な一定重量の倍數であるといふのである。この單一重量は、水素原子の重量にほぼ等しいが、酸素原子の重量の十六分の一にはもつと等しい。この單位に依つて測定されたどんな原子型の重量も、原子の『原子量』と呼ば

れる。

陽子と電子

我 等 を め ぐ る 宇 宙

ラザフォードの行つた、原子核の人為的分解の諸結果と關聯して、アストンの得た諸結果は次のやうな假説を一般に受け容れさせることになつた。即ち、全宇宙は、僅か二種類の終極的煉瓦、即ち電子と陽子から築かれてゐるといふのである。各陽子は、電子の帶びてゐる陰電荷に量に於いて全く等しい陽電荷を帶びてゐるが、重量は電子の約千八百四十倍である。陽子は水素原子の核と同一であると想像されるが、その他の凡ての核は複合的構造であつて、陽子も電子もその中に一緒に詰め込まれてゐる。例へば、ヘリウム原子の核又は粒子は四つの陽子と二つの電子から成り立つて、これらのものが、水素原子のほゞ四倍の重量と、水素原子の核のその二倍に等しい合成電荷とをこれに與へてゐる¹⁾。

然も、物語はこれだけで盡きるのではない。果してさうだとすれば、あらゆる完全原子は、或る

1) ジェームズ・チャドウィックによる中性子の発見は本書原語改訂版出版後二年を経た1932年のことであつた。日本語訳刊行時にはすでに記述が誤つてゐることとなつてゐたのだが、訳注追記されることはなかつたようである。

N数の陽子と、N数の陽子の帶びてゐる電荷を中和するに足る電子、即ちN数の電子とを合せたものから成り立つことになるであらう。従つて、その成分はN数の水素原子のそれときつかり同一になるであらう。かくして、あらゆる原子の重量は水素原子の重量の正確な倍數となるであらう。しかし、實驗に依ると、これは事實でないことがわかる。

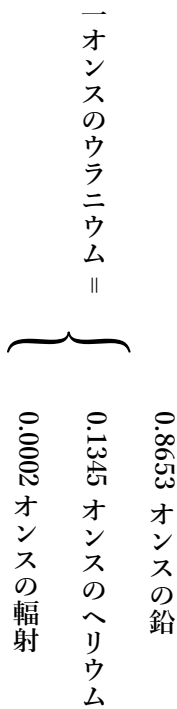
電磁氣エネルギー

全體の眞理に達するために、我々は次の事を認めなければならない。即ち、原子は、重要な電子と陽子を含んでゐる上に、更に我々が電磁氣エネルギーと稱して差支へない第三の成分を含んでゐる。我々はこれを罐詰にされた輻射と考へて差支へない。尤も、さういふ呼び方には絶對の科學的正確さは缺けてゐるが。

あらゆる種類の輻射は重量を伴つてゐる。あらゆる意味で一噸の石炭といふやうな重量と同じほど眞實な重量を伴つてゐる、といふことは近代の電磁氣説の日常話題である。光線といふものは、丁度水の噴出や、一陣の風や、一噸の石炭の落下のやうに、その落ちるどんな表面にも壓着を起す十分強い光をもつてすれば、消火水管から噴出する水をもつてと同じほど確實に、人間を打ち倒すこともできる。これは單なる理論的豫言ではない。一つの面に對する光の壓力は、直接の實驗に依

つて既に發見され且つ測定された。この實驗が異常に困難なのは、あらゆる普通の標準に依つて判斷すれば、輻射の帶びてゐる重量が非常に小さいからである。五十馬力の探照燈が一世紀の間照りつゞけて放出する輻射の全體は、一オンスの約二十分の一の重量を持つにすぎない。

そこで、輻射を放出しつとあるどんな實質も、それと同時に重量を失ひつゝあらねばならないといふことになる。殊に、どんな放射性實質の分解も、重量の減少を含んでゐなければならぬ。なぜなら、それは、線の形態に於ける輻射の放出を伴つてゐるからである。一オンスのウラニウムの終極的運命は、次のやうな方程式で言ひ表はして差支へない。



鉛とヘリウムは、共に、ウラニウムの最初の一オンスと同じだけの電子と陽子を含んでゐる。しかし、双方を合せた重量は、最初のウラニウムの重量に、約四十分の一ほど足りない。最初四千オンスの物質が存在してゐても、今残つてゐるのは三千九百九十九オンスにすぎない。無くなつた一オンスは輻射形態で消え去つたのである。

これに依つて明かになるのは、我々はさまざまの原子の重量を水素原子の重量の正確な倍数であるとして期待してはならないといふことである。さういふ期待は、原子がその構造を變へる時に輻射形態で空間の中へ遊離して消え去ることのできる、罐詰にされた電磁氣エネルギーの重量を無視することになるであらう。このエネルギーの重量は相對的に小さいので、諸原子の重量は、水素原子のそのほゞ完全な倍数になると期待して差支へない。そしてこの期待は確證されはするが、正確にさうなるとは云へないであらう。わが原子建築物の總重量は單にその凡ての煉瓦の總重量であるばかりではない。もろくの煉瓦を接合させて置く漆喰——電磁氣エネルギーの重量のために何物かがそれに附け加へられなければならない。

かくして、正常の原子は陽子と電子とエネルギーから成り立ち、各々は、その重量に何物かを貢獻する。原子が、自然的に、でなければ砲撃を受けて、自己調整すると、陽子と電子は物質的粒子（ α 線及び β 線）の形態で發射され得るし、エネルギーも輻射形態で遊離され得る。この輻射は、 γ 線の形態か、でなければ、間もなくわかるやうに、他の可視及び不可視輻射の諸形態を取り得る。原子の終極的重量は、その最初の重量から、すべての放逐された電子及び陽子の重量ばかりでなく、輻射として遊離した全體のエネルギーの重量をも控除することに依つて得られるであらう。

第七節 量子論

我々が今度取り上げようとする一系列の概念は、把握するのが困難であり、説明するのは更に一層困難である。それは、疑ひもなく、我々の心が、自然に關する我々の日常の經驗から何の助けをも受けないからである。そこで、主に類推や譬喩や模型に依つて語る必要が起つて來るのであるが、それらのものは終極的實在を表はすことはできない。實際、終極的實在が存在する方向に就いてさへ敢て推量を下すのは、向ふ見ずのやり方である。

* 天文學にのみ興味を持つてゐる讀者は、ここから直ぐ第三章へ移つても差支へない。

ほとんど十九世紀の終りまで流行してゐた電氣法則——あの有名なマクスエル及びファラデーの法則——に従へば、原子がエネルギーを輻射形態で廣く散らばらせ、従つてその残りが段々少なくなることに由つて、原子のエネルギーは連續的に減少しなければならなかつた。これらの同じ法則は、次のやうに豫言した。空間の中に遊離される全體のエネルギーは、迅速に變化して、ほとんど無限小の波長を持つ輻射となるであらう、と。然も、かうした事は簡單には起らないで、その頃流行してゐた電氣力學的諸法則が棄てられなければならないことを明かにした。

中空輻射

決定的な失敗の例は、『中空輻射』として知られてゐるものに依つて提供された。内部に中空のある物體は、白熱状態になるまで熱せられる。その外面が放出する光と熱は注意されないが、内部の中空に囚はれてゐる光は、小さな窓から出されて、分光器又は廻折格子に依つて、それを構成するもろくの色に分析される。『中空輻射』として知られてゐるのは、この輻射である。これは、最も完全な輻射形態、即ち、色が一つも無くならず、あらゆる色が全力をもつて現はれる輻射を表はす。既に知られてゐる實質で、その表面からさういふ完全な輻射を放出するものは一つもない。尤も、それに近い仕方をするものは多いが。我々はさういふ物體を『完全輻射體』と云ふ。

十九世紀の電磁氣法則は、次のやうに豫言した。完全輻射體に依つて又は中空から放出される輻射の全體は、その物體が熱せられた時の正確な温度とは關係なしに、スペクトルの紫色の末端に、又はそれを越えた所に、見出されなければならない。と。しかし、現實的事實に於いてはこの輻射は大抵スペクトルの正反對の末端に積み重なるのがわかる。そしてどんな場合にも、これは決して十九世紀の豫言に一致しないし、また一致しようと考へはじめさへしない。

一九〇〇年に、ベルリンのプランク教授は、『中空輻射』がスペクトルの相異なる色の間に分布される時の法則を實驗的に發見した。彼は更に進んで、彼の新しく發見した法則が、その頃流行してゐたものとは非常に感動的に違つてゐる電磁氣法則體系から如何にして理論的に演繹され得るかを示した。

プランクは想像した。あらゆる種類の輻射は、打たれると音響を發する音叉と同じやうに、刺戟を受けると光を發する振動器組織に依つて放出される、と。古い電氣力學的法則は、次のやうに豫言した。各々の振動は、音叉の振動と同じやうに、振動器が何らかの仕方で再び刺戟されるまで、漸次に休止して、然る後停止するであらう、と。これを全く排斥して、プランクは次のやうに想像した。振動器がそのエネルギーを變更し得るのは、不意の痙攣に依つてであつて、他のどんな仕方に於いてでもない、それは、一つ、二つ、三つ、四つの、又は如何なる整数でもエネルギー單位を持ち得るが、中間分數のそれは持ち得ない、そのために、エネルギーの漸次的變化は不可能になる、と。振動器は、謂はゞ、どんな小變化をも避けて、そのエネルギーを、後の残りが無くなるまで、一時に一シリングづつ支拂ひ得たとどまる。そればかりではない。それは全部のシリングを受け取る用意をしてゐたにかかはらず、小變化を受けるのをさへ拒絶したのである。かういふ考へ方は、多くの者がその當時考へたやうに、感動的であり、革命的であり、更に滑稽でさへある

が、中空輻射に於いて實際に觀察されたやうな色の分布に間違ひなく達することがわかつた。

一九一七年に、アインシュタインはかういふ考へ方を今流行してゐるものと精密な形式の中に引き入れた。以前コペンハーゲンのニールス・ボーア教授が提出した學說に従へば、原子又は分子の構造は、漸進的階段を経て、その對座を變更し、又は、そのエネルギーを消散させるものではない。漸進性は物理學から取り除けられて、不連續性がそれに代る。原子の構造は、全く別々のものになつて相互から離れてゐる多くのあり得べき状態又は對座を持つてゐる。それは丁度、梯子段の上に置かれた一つの重量が多くのあるべき位置を持つてゐるにすぎないやうなものである。三階上とか、四階上、五階上とかいふことはあらうが、三と四分の一階上とか、三と四分の三階上とかいふことはあり得ない。一つの位置から別の位置に至る變化は、一般には輻射を媒質として行はれる。組織は、その上に落ちる輻射からエネルギーを吸収することに依つて、二階へ押し上げられ得る。でなければ、一層低いエネルギーの状態に達するまで階下へ落ち、且つさうすることに於いてエネルギーを放出するかも知れない。状態の特殊な變化を遂げるとどんな理由でも持つてゐるのは、或る一定の道を持ち、従つて或る正確な波長を持つてゐる輻射のみである。原子組織を移動させることの問題は、一ペニ自動販賣機から一箱のマッチを引き出す時のやうなものである。これを引き出すことができるのは、特殊な道具、即ち一ペニ銅貨に依つてのみである。この銅貨は正しい大き

さと重量を持つてゐなければならぬ——小さすぎるか大きすぎるか、輕すぎるか重すぎるかする貨幣では、やりそこなふに決つてゐる。若し我々が原子に対して間違つた波長の輻射を注ぐなら、自由に使へる一ぺニ銅貨を持つてゐないばかりに全財産を投げ出しても一箱のマッチを手に入れることのできない百萬長者の喜劇を演ずるやうなことになるかも知れないし、また、ファージング銅貨や半ぺニ銅貨のみを貯へてゐるばかりにチョコレート板を手に入れることのできない子供の悲劇を演ずるやうなことになるかも知れないが、原子を攪亂することはないのであらう。混合輻射を一集めの原子に注ぐと、これらの原子は、自己の内部状態を變更するのに必要な波長を持つ輻射を吸収して、他のものを吸収しない。他の凡ての波長を持つ輻射は、影響を受けないで通りすぎる。

かういふ風に原子が選り好みをして輻射に働きかけることは、さまざまの仕方で證明される。それが最も簡単に示されるのは、おそらく太陽や星のスペクトルに於いてであらう。フラウンホーフアーが太陽スペクトルに觀取したものに似てゐる暗線が、實際上凡ての星のスペクトルに觀取される（第八畫參照）。そして我々は今やこれがなぜさうでなければならぬかを理解することができ。星の熱い内部からは、あらゆる可能な波長の光が流れ出て、その大氣を形成する諸原子を砲撃する。各原子は、自己にびつたり合ふ波長を持つ輻射を呑み込むが、他のものとはどんな種類の相互作用をも行はない。そのために、この星から最後に放出せられる輻射には、諸原子に適合する

特殊な波長が缺けることになる。かくして星は微細な諸線の吸収スペクトルを示す。スペクトルに於けるこれらの線の位置は星の諸原子がどんな型の輻射を吞み込んだかを示し、従つて、相異なる種類の原子が輻射に對して持つ趣味に關する我々の實驗室知識から諸原子の正體を確かめることを我々に得させる。しかし、原子が輻射のどんな型を吞み込み、どんな型を排斥するかを、終極的に決定するものは何か？

プランクが既に想像したやうに、各波長の輻射は、或る量のエネルギー、即ち『量子』と呼ばれるものと結びついてゐた。それは波長に依存して、他のどんなものにも依存しない。量子は『度数』即ち輻射の一秒幾らといふ振動數に比例する*と想像され、従つて輻射の波長に逆比例する——波長が短くなればなるほど、ますます量子のエネルギーは大きくなり、その反對も本當である。赤色の光は弱い量子を持ち、紫色の光は精力的な量子を持つてゐる、等々。

*正確に云へば、若し ν を輻射の度數とすれば、そのエネルギー量子は $h\nu$ である。この場合、 h は普遍的な自然常數であつて、プランク常數として知られてゐるものである。この常數はエネルギーの物理的性質に時間を乗じたものである。その數値は、

$$6.55 \times 10^{-27} \text{ エルグ} \times \text{秒}$$

である。

アインシュタインは今や次のやうに想像する。一つの輿へられた型の輻射が原子的又は分子的變化を遂げることができるのは、變化に要するエネルギーが輻射の單一の量子のそれに全く等しい場合である、と。これは一般にアインシュタイン法則として知られてゐる。これは、原子又は分子の
一ペニ自動販賣機の機構を運轉させるのに必要な正確な輻射型を決定する^{*}。

*それは、

$$E_1 - E_2 = h\nu$$

といふ方程式の形式に於いてである。この場合、 E_1 、 E_2 は變化以前及び以後の物質的組織のエネルギーであり、 ν は輻射の常數であり、 h は既に明記したプランク定數である。

一つの有力な量子を必要とする作業は、二つの、又は實際どんな數でもの、弱い量子に依つて行はれ得るものではない、といふことを我々は認める。少量の紫色の（高度數の）光は、どんな量でもの赤色の（低度數の）光が果すことができない事をなし遂げることができる——これはあらゆる寫眞師が骨折つて知るに至つた事情である。我々は赤色の光を思ひのまゝに取り入れてもどんな害も受けることはないが、紫色の光はほんの少し取り入れても感光板を傷つける。

法則は、一つの石で二羽の鳥を殺すことをも、二つの石で一羽の鳥を殺すことをも禁ずる。變化

を遂げるには全體の量子が使ひ盡されるので、この特殊な量子から出るエネルギーは、それ以上の變化に貢獻するほど残されすぎるやうなことはない。問題のこの方面は、アインシュタインの次のやうな光化學法則に依つて明かにされる。『光の投射に依つて起されるどんな化學的反作用に於いても、影響を受ける分子數は吸収される光の量子數に等しい。』一ペニ自動販賣機の管理者は、これに似た法則をよく知つてゐる。即ち、『賣られる品物の數は、販賣機の中に入れられた貨幣の數に全く等しい』のである。

若し我々がエネルギーの、害を加へる能力の方面を考へるなら、短波長の輻射は、原子の構造に長波長の輻射よりも多くの破壊を與へ得ることがわかる。十分短い波長を持つ輻射は、分子又は原子を調整し得るかも知れないばかりではない。それは、どんな原子の上に落ちてても、光電氣作用として知られてゐるものを起しながら、電子の一つを發射することに依つて、この原子を破壊し得る。また度數には一定の限界があるので、この限界以下の度數を持つ光は、それがどんなに強度のものであらうと、どんな結果をも起すことはない。ところが、我々がこの限界以上の度數に移つて行くや否や、最も弱い強度の光さへ即座に光電氣作用を始める。また、一つの量子の吸収は、一つの原子を破壊するにすぎず、更に進んで、この原子から一つの電子を放逐するにすぎない。輻射がこの限界以上の度數を持ち、従つてその量子が原子から只一つの電子を取り除くのに必要な最少量よ

りも一層多いエネルギーを持つにしても、依然として全體の量子が吸収され、過度のエネルギーは放逐された電子に運動を與へることに使用される。

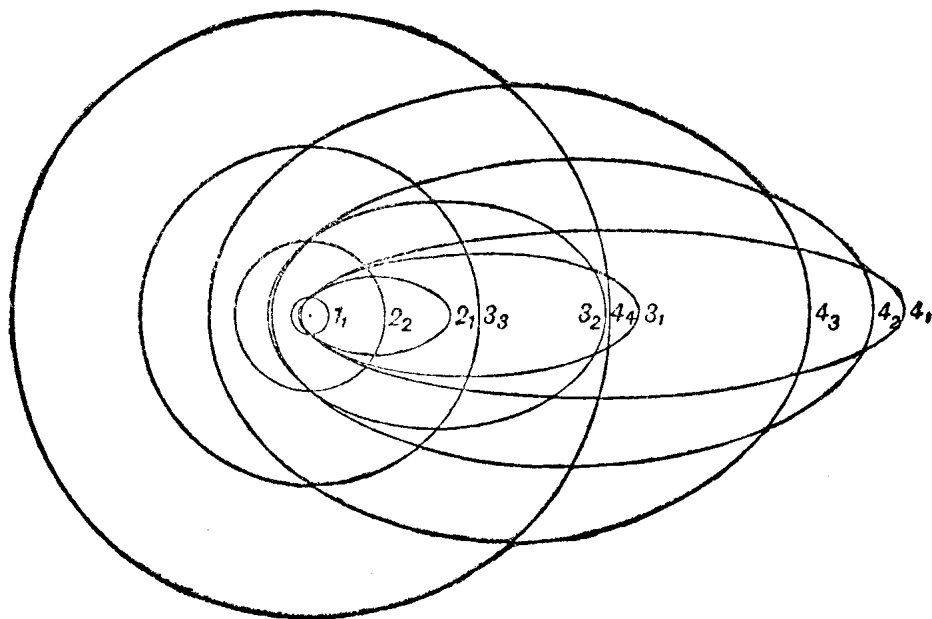
電子軌道

これらの概念は、ボーアの次のやうな想像に基いてゐる。即ち、原子の中の電子に許されるのは、或る限られた數の軌道だけであつて、他のものは我々が今もなほ十分に理解してゐない理由で禁じられてゐる、そして電子といふものは輻射の刺激を受けると一つの許された軌道から別の軌道へ自由に移ることができる、といふのである。ボーアその人は、さまざまの許された軌道が配列される時の仕方を研究した。近代の諸研究に依つて、彼の單純な諸概念は多大の訂正を要することが明かになつたが、我々はこれらの考へ方を幾分詳細に論ずるであらう。それは、一方では、原子に關するボーアの畫像が、我々の持つてゐる、最善の作業機構模型を今もなほ提供するからであり、一方では、彼の單純な理論に對する理解が、それと置き代へられ出した、今までよりも遙かに込み入つた諸學說の理解にとつて、絶対に缺くべからざるものだからである。

水素原子は、我々が既に見たやうに、中心核としての單一の陽子と、それをめぐつて公轉する單一の電子から成り立つてゐる。核は、電子の重量の約千八百四十倍を持つてゐて、後者の運動に攪

亂されずに事實上休止してゐる。それは丁度、太陽がその周圍をめぐる地球の運動に事實上攪亂されないでゐるのと同じである。核及び電子は、陽電荷及び陰電荷を帯びてゐるから、互に吸引し合ふ。だからこそ、電子は、またも地球と太陽のやうに、直線上を飛び去ることなしに軌道を描くのである。更にまた、相反する記號、即ち陽と陰との電荷の間に於ける吸引は、偶然ながら、引力と全く同じ法則に従つてゐるので、吸引は二つの電荷の間の距離の逆自乗に従つて減少する。かくして、核電子組織は凡ての點で太陽遊星系に類似し、電子が中心核の周圍に描き得る軌道は、遊星が中心太陽の周圍に描き得るものと全く同一である。それはそれぞれ一つの焦點に核を持つてゐる楕圓系統から成り立つてゐる。

然も、量子力學の一般概念は、電子が無差別にこれら凡ての軌道に於いて運動するのを禁ずる。ボーアに従へば、水素原子の電子は、或る數の圓形軌道に於いて運動することができ、その直径は、一、四、九、十六、二十五、等々のやうな自然數の自乗に比例する。それはまた一系列の楕圓軌道に於いて運動することができ、その最大の直径は、それぞれ、幾つかのあり得べき圓形軌道の直径に等しい。尤も、これらの楕圓軌道は、更に進んで、偏心率が或る一定値を持たなければならぬといふ條件に依つて制限される。他の凡ての軌道は何らかの仕方で禁じられてゐる。



第十圖 水素原子に於ける電子軌道の配列 (ボーア模型)

電子が水素原子の中に描き得る最小の諸軌道は、第十圖に示してある。すべての中の最小の軌道即ち直徑1のものには、11といふ印が附けてある。これを越えると、直徑4の軌道が二つ來て、2122といふ印が附けてある。その次に直徑の軌道が三つ來て、313233といふ印が附けてある。

それから、直徑16の軌道が四つ來て、41' 42 43 44といふ印が附けてある。餘白がないので圖表はここで止つてゐるが、有効な軌道はさうやつて無限に進んで行くのである。實驗室の諸條件の下に於いてさへ、電子は11といふ印の附いた軌道の直徑を百倍したほどの軌道に於いて運動し得る。もつと稀薄な星の大氣の下では、水素原子はもつと大きくさへある諸次元にまで膨脹し得る。そして星のスペクトルは、11の軌道の諸次元を千倍したほどの軌道が存在してゐる證據を提供する。さういふ軌道は、第十圖に於いては、直徑四ヤードの圓に依つて表はされるであらう。

すべての軌道は、楕圓のものであらうと圓形のものであらうと、直徑が同じなら、その持つエネルギーも同じである。しかし、エネルギーは、一つの電子がどんな軌道からでも他の違つた直徑の軌道へ移つて行くと變化する。かくして、或る限られた程度に、原子はエネルギーの貯藏所となる。それが持つエネルギーの變化は容易に計算される。例へば、水素原子に於ける、最小の直徑を持つ二つの軌道は、エネルギーに於いては 16×10^{-12} エルグの差がある。若し我々が、電子が凡ての中の最小の軌道を描きつつある原子に向つて適當な波長の輻射を注ぐなら、それは次の軌道に移り、

この過程に於いて 16×10^{-12} エルグのエネルギーを吸収し、従つて、一時的に、 16×10^{-12} エルグのエネルギーを保つ貯蔵所となる。若し原子がどんな仕方でも外部から攪亂されるなら、それは勿論エネルギーをどんな時でも遊離するかも知れない。又は、更により以上のエネルギーを吸収して、貯へを増すかも知れない。

若し我々がどんな型の原子にも適する凡ての軌道を知つてゐるなら、それらの軌道間のさまざまの移轉に含まれるエネルギーの變化を計算するのは容易である。各々の移轉は、全く一つのエネルギー量子を吸収し又は遊離するので、我々はこれらの移轉に於いて放出され又は吸収される光の度数を即座に演繹することができる。簡単に云へば、原子のもろくの軌道の配列が與へられてゐれば、我々は原子のスペクトルを計算することができる。實際に於いては、問題は勿論これとは逆の形式を取る。即ち、スペクトルが與へられてゐれば、それを放出する原子の構造を見出し得るのである。ボーアが提出した水素原子の模型は、少なくとも次のやうな程度に良き模型である——即ち、それが放出するスペクトルは、ほとんど正確に水素スペクトルを再現するのである。然も、この一致は全く完全なものではない。そして、ボーアの提出した軌道圖式は實際のスペクトルを説明するには不適當である、といふことは今や一般に受け容れられた。我々がボーア圖式を續けて論ずるのは、原子が實際にさういふ仕方では築かれてゐるからではなく、それが我々の現在の目的のために一

つの良い作業模型を提供するからである。

全體の理論の本質的な特徴は、たとへ最初の一見では幾分豫期されないものではあるにしても、次の通りである。即ち、 16×10^{-12} エルグのエネルギーを飽和されてゐる水素原子は、たとへ全く攪亂されないで置かれたにしても、電子は、暫くの後には、自己の最初の一層小さな軌道に自然に後戻りし、さうするに當つて自己の 16×10^{-12} エルグのエネルギーを輻射形態で放逐する。アインシュタインが證明したところに依ると、若しこれがさうでなかつたら、その時にはプランクの巧みに確立された『中空輻射』法則も本當のものではあり得ない。かくして、電子が最小可能の軌道よりも一層大きな軌道を描いてゐる水素原子の集合は、ウラニウム又は他の輻射性原子の集合に類似する。それは、水素原子が單に時間の経過の結果として一層低いエネルギーの状態に自然に後戻りする點に於いてである。

もつと複雑な原子に於ける電子軌道は、水素原子に於いてと同じ一般的配列を保つてゐるが、大きさの點では違つてゐる。水素原子に於いては、電子は普通、十分に時間がたつと、最低のエネルギーを持つ軌道に落ちて、そこに留まる。類推に依つて次のやうに考へられるかも知れない。二三の電子が軌道を描きつつある、もつと複雑な原子に於いては、すべての電子に早晚最低のエネルギーを持つ軌道に落ち込んで、そこに留まるであらう、と。しかしこれは事實でないことがわかる。

一つ以上の電子を入れる餘地が、同一の軌道に決して存在するものではない。これは物理學全體を支配するやうに見える一般原理の特殊な方面である。それは一つの名稱——『排他原理』——を持つてゐるか、これは今までのところでは先づそれくらゐのものである。我々はそれをやつと理解しかけたばかりである。それが持つ特殊な諸方面の中の別の方面に於いては、それは科學上に於けるあの古くよく知れ渡つた隅の首石と同一になる。物質の二つの相異なる小片は同時に同一の空間を占め得るものではない、といふ主張がそれである。基礎原理を理解することなしに、我々は次の事實を受け容れることができる。即ち、二つの電子は同一の空間を占めることができないばかりでなく、同一の軌道をさへ占めることができないのである。それは丁度、何らかの仕方で電子が自己の軌道の全體を占めるほどに擴がつて、他のものに對しては餘地を残して置かないかのやうである。疑ひもなく、これは事物の文字通りの畫像として受け容れられてはならない。然も、水素原子に於ける、最低エネルギーを持つ軌道が、あり得べき軌道であるのは、まさしく電子がそれを全く塞ぎ得るからであるといふこと、それに近い軌道があり得ないのは、電子がそれを四分の三又は一と二分の一倍以上塞ぐであらうからであつて、もつと複雑な原子にとつても同様であるといふことは尤もらしく思はれる。これに關聯して恐らく意義があるのは、物理學上の既知の現象で、次のやうに言ふのを可能にするものは一つもないといふことである。一つの與へられた瞬間に、電子は、これ

これらの點に於いては最低エネルギーを持つ軌道にある、と。さういふ説明は全く無意味のやうに見える。そして次のやうに言へば、すべてのあり得べき正確さをもつて、原子といふものの條件を外觀的には明白に述べたことになる。一つの與へられた瞬間に電子がさういふ軌道にあるのは、例へばその電子が一つの環の中に擴がつた場合と同じであらう、と。我々は他のよろゝの軌道に就いてこれと同じ事を言ふことはできない。一層高いエネルギーを持ち、従つて一層大きな直径を持つ軌道へ移つて行くに連れて、未決定性は漸次に別の形態を取つて、最後には殆んど重要でなくなる。電子が、核の近くに小さな軌道を描きつゝある間にどんな形態を取らうと、それが非常に大きな軌道を描きつゝある時には、既に普通の物質的荷電粒子になつてしまつてゐるのである。

かくして、理由はどうであらうと、同一の原子の中に軌道を描きつゝあるよろゝの電子は、凡て別々の軌道に存在しなければならない。軌道上の電子は、梯子の上にある人々のやうなものである。二人の人が、同じ階段に立つことはできないやうに、二つの電子が互に後を追ひながら同じ軌道を廻ることはできない。例へば、十の電子を持つてゐるネオン原子は、十の電子が、それぞれ、最低エネルギーを持つ十の軌道の中の一つを占めた時に、最低エネルギーを持つ正常な状態に入るのである。量子説が遂に説明することに成功したよろゝの理由で、あらゆる原子には、二つの軌道がある。これら二つの軌道に於いては、エネルギーは相等しい上に、他のどんな軌道に於いてよ

りも一層低い。この後に来るのが、相等しくはあるが實質的に一層高いエネルギーを持つ八つの軌道、相等しくはあるがそれよりも更に高いエネルギーを持つ十八の軌道、等々である。これらさまざまな軌道群の各々に於ける電子は、悉く相等しいエネルギーを持つてゐるから、それらは一般に繪畫的な、しかし、間違つた句法をもつて、電子環と云はれる。即ち、K環、L環、M環、等々と稱される。核に一番近いK環は、僅に二つの電子を入れる餘地を持つてゐるのみである。それ以上の電子はL環の中へ押し込まれる。これは八つの電子を入れる餘地を持つてゐて、それらが悉く別々の、しかしエネルギーの相等しい軌道を描きつつある。更にそれ以上の電子が残つてゐて、それらが始末されなければならない場合には、それらはM環の中へ這入つて行かなければならない、等々。

正常な状態に於いては、水素原子はK環の中に一つの電子を持つてゐるに反し、ヘリウム原子は二つ持つてゐて、L環や、M環や、それ以上高い環は占められてゐない。その次に複雑な原子、即ちリチウム原子は、三つの電子を持つてゐるが、そのK環の中には二つしか収容されないから、一つはその直ぐ外側のL環の空間をさまよひ廻らなければならない。四つの電子を持つベリリウムに於いては、二つはL環の中へ追ひ出される。さういふ風に進んで行つて、遂に我々は十の電子を持つネオンに達する。こゝでは、L環も内部のK環も満員になつてゐる。次の原子、ソヂウムに於

いては、十一の電子の中一つはそれよりも更に遠いM環の中へ追ひ出される、等々。若し電子が輻射又は他の刺戟物に依つて刺戟されない場合には、各原子は、そのもろくの電子が最低エネルギーを持つ軌道の一つづつ占めてゐる状態に早晩落ちて行く。

我々の経験の範圍内に於いては、原子といふものは、この状態に達するや否や、眞の無窮な運動機械となつて、そのもろくの電子は自己の軌道に於いて運動しつゞけるが、（いづれにしてもボーアの説に基づけば）これらの電子の運動エネルギーは、輻射形態に於いても他の仕方になつても、少しも消散させられない。さういふ状態に於ける原子は自己のエネルギーを放棄することではきない、といふことは驚くべき事であり、全く理解できないやうに思はれるが、我々の経験の範圍内に於いては、決してさうは思はれない。そしてこの特質こそ、たとへ我々はそれを殆んど理解してゐないにしても、最後の手段として、宇宙を存在させて置くのである。若しかういふ種類の制限が加へられなかつたら、宇宙の物質的エネルギー全體は、輻射形態で一秒の十億分の二か三の間に消えてしまふであらう。若し正常な水素原子が、十九世紀の物理學法則が要求する仕方で輻射を放出することができたら、それは、この輻射放出の直接の結果として、一秒に一メートル以上の割合で収縮しはじめて、その電子はエネルギーが段々低くなる軌道へ絶えず落ちて行くであらう。一秒の約十億分の一の後には、核と電子は互に衝突するであらうし、原子は恐らく一閃の輻射となつ

てすっかり消えるであらう。輻射の放出を完全量子に依る以外には禁ずることに依つて、また、消散に役立つ量子が存在しない時には放出を全く禁ずることに依つて、量子説は、宇宙を活動中の構造物として存在させて置くことに成功する。

これら凡ての現象の基礎となつてゐるもろもろの實在に就いて、最も縁遠い概念をさへ形づくるのは困難である。『波動力學』として知られてゐる、物理学の最近の部門は、今やたらに一つの理解を探し廻つてゐる。しかしこれまで進歩があつたのは、實在に達するといふよりも、むしろ觀測された諸現象を組織立てるといふ方向に於いてであつた。實際我々がいつか終局的實在を理解することがあるかどうかは疑はしいかも知れない。實在が、人間の心では掴めないほど根本的なものであるのは尤もであらう。

近代の理論物理学が、非常に説明困難のものであり、非常に理解困難のものであるのは、まさしくかういふ理由からである。太陽系に於ける、太陽の周圍をめぐる地球の運動を説明するのは容易である。太陽は空に見え。地球は我々の足の下にあるやうな氣がし、運動概念は日常の經驗から我々がよく知つてゐるところである。しかし、それに類似した、水素原子に於ける陽子の周圍をめぐる電子の運動を説明しようとする時には、それとは何と違ふことであらう！ 誰も彼も、電子に就いても陽子に就いても直接の經驗を持つてはゐないし、これらが實際にどんなものであるかに就

いては、誰も今までのところ何の暗示をも與へられてゐない。そこで我々は心を合せて一種の模型を造る。電子と陽子は、我々の知つてゐる最も簡単な事物、即ち微小な硬い球に依つて表はされる。この模型は暫くの間十分な働きをして、然る後突然我々の手の中で壊れる。波動力學の新しい光に照らすと、硬い球は電子を表はすには絶対に不適當であることがわかる。硬い球はいつも空間の中に一定の位置を保つてゐる。電子は外觀的にはそれを保つてゐない。硬い球は非常に限定された場所を占めてゐるのに、電子は——いや、電子がどれだけの場所を占めてゐるかを論ずるのは、おそらく、恐怖、心配、又は不安といふのがどれだけの場所を占めてゐるかを論ずると同じほど無意味であらう。しかし、若し我々が、電子はどれだけの場所を占めてゐるかを言へと強ひられたら、おそらく、それは空間全體を占めてゐると言ふのが一番いい答へになるであらう。硬い球は一つの點から次の點へ移つて行く。我々の模型電子は、模型の水素原子の中で軌道から軌道へと飛びながらも、確かに、我々の覺醒中の經驗のどんな硬い球に似た作用をも行はない。そして、現實の電子は——若し原子の中に現實の電子のやうなものがあるとすれば——おそらくそれ以下でさへある。然も、我々の心はこれまでは原子に就いてこの非常に不完全な模型よりもすぐれた畫像を考へ出すことはできなかったのであるから、我々はそれに従つて諸現象を記述することに依つてのみ先へ進み得るのである。

第八節 輻射の機械的諸効果

電子の構造が緻密になればなるほど、それを攪亂するのに必要なエネルギー量はますます大きくなる。そして、このエネルギーは單一の量子の形態で供給されなければならないから、量子のエネルギーはますます大きくならなければならない、輻射の波長はますます短くならなければならない。非常に緻密な構造は、非常に短い波長の輻射に依つて攪亂され得るのみである。

荒海の中へ進んで行く船が、最も多く損害を受ける危険があり、その乗客が最も不愉快な目に遭ふ危険があるのは、船の長さが波の長さに殆んど等しい時である。短い波は短い船を、長い波は長い船を動揺させるが、長いうねり波はどちらにも殆んど害を與へない。しかし、これは輻射の諸効果に對する實際の類似を提供しはしない。なぜなら、電子の構造を破壊する輻射の波長は、この構造の大きさの何百倍もあるからである。航海がさういふ輻射に類似してゐるのは、非常に長いうねり波の場合である。大體の作業目標として、我々は次のやうに言つて差支へない。電子の構造は、この構造の諸次元の約八百六十倍に等しい波長を持つ輻射に依つて初めて攪亂され、この限界の波長を持つ輻射に依つて破壊されるであらう、と。簡単に云へば、青色の光は寫眞感光板に影響する

のに、赤色の光は影響しない理由は、次の點にある。即ち、青色の光の波長は、臭化銀分子の直径の八百六十倍よりも小さく、赤色の光の波長はそれよりも大きいからである。『八六〇限界』以下に達しなければ、どんな事も起りはじめはしない。

* 數學者にはいつでもこの法則の理由がわかるであらう。簡単に云へば、それは次の通りである。即ち、二つの電荷、 $+e$ と $-e$ とを、 r の距離に分け離すのに必要なエネルギーは、 $\frac{e^2}{r}$ であり、諸次元 r の電子及び陽子から成る構造を、調整し又は破壊するのに必要なエネルギーは、一般にこれと比較できるであらう。若し λ を必要な輻射の波長とすれば、この輻射の吸収に依つて有効にされるエネルギーは、 hC/λ 量子である。これを、 h の値はほゞ $860 \text{ eV} \cdot \text{\AA}$ であるといふ事情と結びつけると、必要な輻射の波長は、破壊せられるべき構造の諸次元の約八百六十倍である。

原子が自己の貯藏所に貯へられてゐるエネルギーを遊離する時、それが放出する光は、必然的にそれが最初このエネルギーを貯へる時に吸収した光と同一の波長を持つてゐる。二つのエネルギー量子は相等的いから、兩者の波長も同一である。そこでどんな電氣構造に依つて放出される光も、これまた、この構造の諸次元の約八百六十倍の波長を持つてゐることになる。普通の可視光線は、主に原子に依つて放出され、従つて原子の直径の約八百六十倍に等しい波長を持つてゐる。實際、光が我々の網膜に働きかけ、従つて我々の眼に見えるのは、まさしくこの波長を持つてゐるからである。

この波長の輻射は原子に於ける最外電子を攪亂するだけであるが、それよりも更に短い波長の輻射はそれよりも更に破壊的な諸効果を與へ得る。例へば、X 輻射は、原子構造に於ける、遙かに緻密な電子の内環、即ち K 環、L 環、等々を破壊し得る。それよりも更に短い波長の輻射は、核の陽子及び電子を攪亂しさへし得る。といふのは、核は電子そのもののやうに、陽電荷及び陰電荷を持つ構造であり、従つて、核に落ちる輻射に關しても、原子と同様な作用をするに違ひない。尤も、輻射の波長に於ける廣汎な相違は別である。エリスやその他の者らが見出したところに依ると、放射性元素ラヂウム B の原子の分解中に放出される γ 輻射は、三、五二、四、二〇、四・八〇、五、一三、及び 23×10^{-10} 厘の波長を持つてゐる。これらの波長は、可視光線の波長の約十萬分の一にすぎない。なぜなら、原子核は完全原子の諸次元の約十萬分の一を持つにすぎないからである。さういふ波長の輻射が、ラヂウム B の核を調整する効果があるのは、それより十萬倍も長い波長の輻射が水素原子を調整する効果があるのと同じである。

原子が吸収し又は放出する輻射の波長はエネルギー量子に逆比例する以上、原子核を『運轉さす』のに必要な量子は、原子を『運轉さす』のに必要な量子のエネルギーの十萬倍を持つてゐなければならぬ。若し水素原子が一ペニ自動販賣機であるとするれば、放射性原子の核を運轉さすには五百ポンド紙幣と等しいほどのものを要するであらう。

放射性核は、窒素や酸素のそののやうに、おそらく十分強い砲撃に依つて破壊され得る。尤も、この點に關する實驗的證據はあまり明確なものではない。しかし、果してさうだとすれば、砲撃する各粒子は、少なくとも核の放射の一量子のそれに等しい運動エネルギーを攻撃に参加させなければならぬであらう。このエネルギーは粒子に非常な高速力で運動することを要求する。十分な高温にある物質は、高いエネルギー量子をも、高速力で運動する粒子をも、豊かに供給する。

温度放射

我々が日常生活でよく口にする赤熱又は白熱なるものは、一つの實質が赤色又は白色の光を放出するまでに高められた熱を意味する。炭素線條ランプの中の線條は、赤熱にまで高められると云はれ、瓦斯入りランプに於けるそれは黄熱にまで高められると云はれる。我々が取扱ふ實質を特殊化す必要はない。若し炭素が三千度の温度に於いて赤光を發するとすれば、その時にはタングステン又は他のどんな實質でも、これと同じ温度に高められると、炭素と全く同じ赤光を發するであらう。そしてこれと同じ事は放射の他の色に取つても本當である。かくして、放射の各々の色、從つて各々の波長は、一定の温度と結びついてゐることになり、この温度は、この特殊な色が、熱い物體の發する光のスペクトルの分析に最も豊かに現はれる温度である。この特殊な温度に近づきはじめ

るや否や——それ以前にはさうでもないが——それに相當した波長を持つ輻射が多くなる。それよりずつと低い温度に於いては、それは全く感知することができない*。

・ 輻射の波長 λ と、それに相當する温度 T （攝氏絶對度盛で測定されたもの）とが結びついてゐるのは、次のやうな周知の關係に由つてである。

$$\lambda T = 0.2885 \text{ 厘米}$$

我々が赤熱又は白熱に就いて語る事は、そのまゝX線熱又は γ 線熱に當て嵌めても全く正常である——尤も、我々が實際にそんな事をするのではない。輻射の波長が短くなればなるほど、特別にそれと結びついてゐる温度は高くなる。かくして、我々が一つの實質を段々熱するに連れて、それは段々短くなる波長の光を發して、繼續的に、全體の色の虹——赤、橙色、黄、緑、青、藍色、紫——を通過する。我々は實驗室の中で廣範圍の温度を左右して完全な實驗を行つて見ることはできないが、自然は星々に於いてそれを行つて見せる。

熱の諸効果

我々が既に見たやうに、小さな諸次元を持つ電氣構造を破壊するには短波長の輻射が必要である。短波長は高温と結びついてゐるから、今や次の事が明かになる。即ち、電氣構造が小さくなれば

なるほど、それを破壊するのに必要な熱は大きくなる。そして我々は、與へられた諸次元の電氣構造が熱の影響を受けて初めて壞れはじめる時の温度を計算することができる*。

* 今示したばかりのTと γ の關係を、『八六〇限界』といふ大體の法則の中に含まれたものと結びつけると、r 糧の諸次元を持つ構造は、温度が初めて「3000° 度」に近づいた時に温度輻射に依つて破壊されはじめるであらうといふことがわかる。

例へば、約 4×10^8 ㎞ 程の直径を持つ普通の原子は、何千度といふ温度に於いて初めて破壊されるであらう。一定の實例を挙げれば、 0.000006 ㎞程の波長を持つ黄光は、特に四千八百度の温度と結びついてゐる。この温度は普通の『黄熱』を表はしてゐる。これよりもずっと低い温度に於いては、黄色の光は、人爲的に造り出される時に現はれるだけである。しかし、星や他の凡ての物體は、四百八十度の温度に於いて、自然に黄光を放出して、スペクトルの黄色區域にもろくの線を示す。なぜなら、光はカルシウムやそれに類似した諸元素の原子から最外電子を取り除くからである。カルシウム原子に於ける電子は、四千八百度の温度に近づきはじめると攪亂されはじめるが、それ以前にはそんなことはない。この温度には（電弧や他の人爲的條件の場合を除けば）地球上では近づけない。そのために、地球上のカルシウム原子は一般に最低エネルギーの状態で休息してゐる。

別の例を取れば、ウラニウムの變化の時に放出される輻射の最も短い波長は、 0.5×10^{-10} 厘米であり、これは五十八億度といふ非常な高温度に相當する。何かさういふ温度に近づきはじめると――それ以前にはさうでもないが――輻射性核のもろくの成分は自己調整を行ひはじめる筈である。それは丁度、カルシウム原子の成分が、四千八百度の温度に達するとさうするのと同じである*。これは、勿論、我々が地球上で左右し得る温度が、輻射性分解を促進し又は抑制するに當つて、何故どんな効果をも示さないかを説明する。

*若し我々が、電氣構造の調整も、物質的粒子をもつて、それを砲撃することに依つて果され得ると想像するなら、電子、核、又は分子に依る砲撃が初めて有効になる時の温度は、ほとんど、有効な波長を持つ輻射が初めて感知できはじめる時の温度と同一である。二つの過程はほど同一の温度に於いて始まる。

二〇四頁の表は、さまざまの原子變化を行ふのに必要な輻射の波長を示したものである。最後の二つの欄は、對應温度と、我々が知る範圍内での、この温度が見出されるべき場所の種類とを示したものであり、この後者は、第五章で詳細に説明する或る諸結果に先鞭を附けたのである。温度が最後の一つ手前の欄に挙げたものよりも遙かに低い場所に於いては、變化は熱の影響を受けることがなく、従つて自然に起るのみである。それは全く片道の過程である。有効な輻射は原子の自動販

賣機を運轉させるに足るほど短い波長のものではないから、原子は周圍を取巻く輻射からはエネルギーを吸収せず、従つて絶えず一層低いエネルギー——若しそんなものが存在するとすれば——の状態に落ちて行く。

第九節 高度侵透性輻射

我々がこれまで論じて來た最も短い波長は、マ線のそれであるが、件の表の最後の行には、もろもろのマ線の中の最も短いものゝ波長の約四百分の一にすぎない波長を持つ輻射が擧げてある。

一九〇二年以來、さまざまの研究者、即ちラザフォードや、クックや、マクルナンや、バートンや、コルヘルスターや、特にミリカンは、地球の大氣が、どんな既知のマ線よりも恐ろしく高度に侵透する力を持つてゐる輻射に依つて絶えず横斷されつゝあることを發見した。非常に高い所まで輕氣球を上げることに依つて、ヘッスや、コルヘルスターや、後にはミリカンやボーエンは、この輻射は非常に高い所ではもつと際立つて強いことを示し、かくしてそれが外側から地球の大氣中へ這入つて來ることを證明した。若しこの輻射が太陽や星々に起源を持つてゐるとすれば、地球上で受けられるこの輻射の大部分は太陽から來るであらう。そしてこの輻射は晝間は夜間よりも一層強くなるであらう。しかしこれは事實でないことがわかつたので、この輻射は星からも來る筈はなく、從つて星以外の星霧又は宇宙的集團に源を發するものと見なければならぬ。ミリカンの確信するところに依れば、源は銀河系の外側にある。

この輻射の量は大變なものである。それが一番少ない海面に於いてでさへ、ミリカンやカメロンは、それは各一秒に各一粒立方の空氣の中で約一・四の原子を破壊することを發見した。それは我々の肉體の各々に於いて一秒毎に何百萬といふ原子を破壊するに違ひない。そして我々はその生理的諸効果が何で得るかを知らない。地球上で受けるこの輻射の總體のエネルギーは、すべての星から受けられる、光と熱を合せた輻射の總體の約十分の一である。この事は、光と熱は全體としての宇宙に於けるこの輻射の十倍ほど多いことを意味しはしない。といふのは、若しこの輻射が銀河外の區域に生ずるなら、その時には、我々のもとへ光と熱を送る星々は比較的近くに反し、高度侵透性輻射の源はそれよりも遙かに遠いからである。星霧間の莫大な擴がりをも含む空間全體を通じて平均すると、高度侵透性輻射は、星の光や熱よりも遙かに多く、従つて全體の宇宙に於ける最も豊かな輻射形態である、といふことは尤もらしく思はれる。

それは既知の最も多く侵透する輻射形態である。普通の光は殆んど金屬又は固形實質を通過せず、金箔の最も薄いものにさへほんの少し射し込むだけである。X線は、波長がもつと短く、従つてエネルギー量子がもつと多いために、金又は鉛の數耗の厚さのある箔を通過するであらう。ラヂウムBから出る、最も高度に侵透する線は、何時といふ鉛を通過するであらう。我々が今論じたばかりの輻射は、さまざまの侵透力を持つてゐる。その最も多く侵透する部分は、一六呎の鉛を通過す

るであらう。

この輻射は、非常に短い λ 輻射の性質を持つてゐるか、それとも ∞ 輻射のやうに微粒子的性質を持つてゐるかは、全く明白でない。その侵透力はどうな既知の ∞ 輻射のそれをも遙かに越えてゐるので、若しそれが微粒子的のものであるなら、この微粒子は殆んど光速度をもつて運動しつつあるに違ひない。

それよりも遙かに尤もらしく思はれるのであるが、若しこの輻射が、少なくとも部分的に、 λ 輻射の性質を持つてゐるなら、その侵透力からその波長を決定することが可能でなければならぬ。全く最近まで、兩者の關係に關するさまざまの學說が持ち出されてゐた。すべての中の最も最近の學說、即ちクライン及びニシナのそれは、以前の諸學說の何れよりも一層完全なもので、この輻射の最も多く侵透する部分に、二〇四頁の表に示したやうに、 1.3×10^{-13} 厘といふ驚くほど短い波長を當てがつた。

若し例の八六〇法則を適用すれば、これが何を意味するかに就いて、おそらく最も明瞭な概念が得られるであらう。これに依れば、この輻射は約 10^{15} 厘にすぎない諸次元を持つ電氣構造を破壊するであらうといふことがわかる。電子及び陽子から形成されたどんな構造も、これと同じほど小

∞ クライン・仁科の公式は、量子電磁力学で最小単位の単電子からくる光子の散乱の反応断面積に關する公式。本書初版と同じ1959年にオスカル・クラインと仁科芳雄が導いた。本書が書かれたときの最新の理論である。

さくなり得るものではない。といふのは、單一の電子の半径は約 2×10^{-13} 厘だからである。この輻射は、ほとんど、陽子そのもの、即ち科學上に知られてゐる最も小さな最も緻密な構造、を破壊するのに必要な波長を持つてゐる。

別の角度から問題に近づいて行けば、既に示した數的諸關係に依つて、この波長を持つ輻射の量子は、 0.0015 エルグに等しいエネルギーを持つてゐなければならず、従つて約 1.66×10^{-24} グラムの重量を持つてゐなければならぬことがわかる。あらゆる物理學者は、この重量を即座に容認する。といふのは、最善の決定に従へば、水素原子の重量が 1.632×10^{-24} グラムとなつてゐるからである。そこで、高度侵透性輻射の量子は、急に絶滅されてそのエネルギーが悉く輻射として遊離される一つの完全な水素原子から生ずるくらゐの重量とエネルギーを持つてゐるわけである。

地球上で受けられる高度侵透性輻射は水素原子の絶滅に起源を持つてゐる、と想像することは殆んどできない。たとへそれ以外の理由はないとしても、宇宙にはさういふ假説を維持するに足るほどの水素原子は恐らく存在しない。水素原子は一つの陽子と一つの電子から成り立ち、その重量は、宇宙のどんな原子からでも選擇した一つの陽子と一つの電子との重量を合せたものと大體同じである。従つて、高度侵透性輻射の量子は、互に合體したり絶滅し合つたりするどんな原子の陽子

及び電子からでも生ずるやうな波長とエネルギーを持つてゐるといふことは殆んど正確である。

我々が既に見たやうに、相異なる既知の原子型の重量は、水素原子の重量の整数倍量に近い、又は、もつと精密に云へば、ほとんど全く相等しい階段くらゐの相異があつて、その各々は殆ど水素原子の重量に等しい。高度侵透性輻射の量子の重量は、単一の階段に依つて表はされる重量變化に等しいので、この量子は原子の重量を単一の階段だけ下げるとどんな變化に依つても造り出される得る。あり得べき最も一般的な場合には、かうした重量の低下は、我々が見得る限りでは、陽子と電子とが合體し、その結果起る兩者の絶滅から生ずるに違ひない。

これはこの輻射の遙かに尤もらしい源であるやうに思はれはするが、唯一の考へ得べき源ではない。例へば、原子數五十四及び原子量百二十九を持つ、最も豊かなキセノンの同位元素は、百二十九の陽子と、七十五の核電子と、五十四の軌道電子とから築かれてゐる¹⁹。さういふ原子が百二十九の陽子と百二十九の電子から突然築き上げられると、ほとんど水素原子の重量に等しいほどの重量が失はれるであらう。若しこの建築が絶対に同時に起り、従つて、遊離するエネルギーの全體が單一の量子として終極的に放出されたら、この量子は、觀測された高度侵透力を持つてであらう。少

19 中性子発見以前の記述であるがゆゑの誤り。原子番号86のキセノンは、9種類の安定同位体がある。ここで取り上げられてゐる¹²⁹Xeは存在比26.4%。原子核は54個の陽子と75個の中性子からなる。キセノンの同位体で自然界に最も豊富に存在するのは¹³²Xeで、26.9%。

し前、ミリカンは、此の複雑な諸原子が、この輻射のあり得べき源としての一層單純な成分から形成されることを暗示した。しかし、彼の提出した圖式は、十分短い波長を持つ輻射を生じさせはしないであらうといふことが今は明白である。いづれにしても近代のクライン^{II}ニシナ説が正しいとすれば。

物理的證據にのみ基づいて云へば、さういふ圖式は、不可能のものとして排斥することはできないが、その非常な非蓋然性のために疑はしいものとして取扱はれなければならない。二百五十八の構成部分を持つキセノン原子は、一つの非常に複雑な構造である。そして、これら二百五十八の部分は、單一の瞬間的行爲に依つて、一つの完全に形成された原子の中へ悉く打ち込まれ、それに續いて只一つの輻射量子の激變的放出が起る、と信ずることは非常に困難である。若し原子がもつと單純な成分から築かれることがあるとすれば——こんな過程が自然界に起ることがある證據はないが——聚合は別々の階段を経て起るであらうといふこと、件の輻射は一つの大きな量子に於いてよりも寧ろ多數の小さな量子に於いて放出されるであらうといふことの方が、更に一層尤もらしく思はれる。更にまた、さういふ假説のどんなものも、件の觀測された輻射量子の計算された重量と、既に知られてゐる水素原子の重量との數的一致を、純粹な符合として説明しなければならなくなる。そればかりではない。我々は更に次のやうに想像しなければならなくなる。キセノン原子や、また

恐らくそれとほゞ同じ原子量を持つ他の原子が、他の原子量を持つ原子よりも遙かに度々形成される、と。實際、地球上で受けられる高度侵透性輻射の量は非常に大きいので、若しそれがキセノン創造の證據であつたら、宇宙の大部分は、ほとんど相等しい原子量を持つ諸元素と混合されたキセノンから既に成り立つてゐなければならぬことになる。これは事實であるどころか、キセノンと、原子量の表に於けるそのもろくの隣接者とは、諸原子の中の最も稀なものゝ中に入れられてゐる。これらの理由で、科學上に於いては一層單純な一層自然的な假説の方がいつも優先權を與へられるべきだといふ一般的原理に基いて、我々は次のやうに言つて差支へない。電子及び陽子の絶滅が、觀測された高度侵透性輻射にとつての、一層尤もらしい一層受け容れられ易い起源である、と。

我々はこの問題を今のところではこんな不確實な状態のまゝにして置いて差支へない。なぜなら、天文學はこの疑問について提供すべき何らかの證據を持つてゐることが、もつと先へ行くと明かなるからである。

第三章 時間に於ける探査

我々は空間を望遠鏡が探り得る最も遠い深みに至るまで探査した。我々は、全物質界を形成してゐる、我々が原子と呼ぶ微細な構造の複雑さを探査した。我々は今度は時間に於いて探査を続けたい。人間の個人的生涯と、また實に我々の歴史的記録に蔽はれてゐる時間の全體——せいぜい數千年ばかり——とは、どちらも非常に短いので、我々の現在の目的にとつては何の役にも立たない。我々は、過去の深みを測り、未來に探りを入れるための、それよりも遙かに長い測量竿を見いださなければならない。

我々の一般的方法是、地質學の研究が既に普及させてゐる方法であらう。直接の歴史的證據が無くても困ることなしに、地質學者は次のやうに主張する。生物は既に何百萬年といふ間地球上に生存してゐる、なぜなら、化石した生物の遺物が、何百萬年もかゝつて——と地質學者は見積る——蓄積したに違ひない沈澱物の下に出て來るからである、と。次から次へと相違なる地層を掘り下げて行く時、地質學者は時間に於いて探査をしてゐるのである。そ

れは丁度、地球の表面を旅行する地理學者が、空間に於いて探查をしてゐるのと同じである。同様な方法を天文學者も使用することができる。砂時計の底又は頂上の半分にある砂のやうに、連續的蓄積又は現象を示すところの何らかの天文學的效果、性質、または特質を我々は發見する。我々はこの増加又は現象が現在の瞬間に起こりつつある割合を見積り、また、若しできれば、過去に勢力を占めてゐた色々の條件の下でそれが起こつたに違ひない割合を見積る。そこで、過程が最初始まつて以來經過したに違ひない時間を見積ることは、おそらく單なる算術上の問題となる。尤も、一層複雑な數學上の問題となり得ることもないことはない。

第一節 地球の年齢

件の方法は、地球の年齢と言ふ比較的簡単な問題に於いてよく例示することができる。

地球の年齢を決定する最初の科學的試みは、一七一五年に、天文學者ハレイに依つて行はれた。毎日河は或る量の水を海へ運んで行く。そしてこれは溶解した鹽を少量含んでゐる。

水は蒸發して、適當の經路を辿つて再び河へ還るが、鹽はそれをしない。その結果、もろ

くの大洋に於ける鹽の量は増加しつづける。毎日大洋は前の日より少し餘計の鹽を含み、大洋の現在の鹽分は鹽が蓄積して來た時間の長さを示す。『我々はかくして凡ての事物の繼續期間を見積るための論證を與へられる。』とハレイは幾分樂觀的に言つた。

かういふ論證の仕方では地球の年齢をかなり正確に見積ることはできない。しかし、近代の諸材料に基づく計算に従へば、それは何億年かに違ひないことが暗示される。

もつと価値のある報告が、雨に洗い流される沈殿物の蓄積から得られる。一年たつ毎に、地球の表面の地均しが見られる。去年丘や山の斜面に高く重なつていた土は、今は既に雨のために泥河の底に洗ひ流されて、絶えず海へ運ばれて行く。テームス河だけでも毎年一百萬

噸から二百萬噸の土を海へ運んでゐる。どれくらゐの間イギリスの全地はこの割合で續くであらうか、またどれくらいの間既に續いて來たであらうか？ 自分の生涯の間に、我々は海岸をめぐる大きな陸地の塊が地上がりを起して、すっかり海の中へ落ち込むか、海面の方へ段々辻り落ちて行くかするのを見た。ニードル諸島（譯者註、イギリス海峡にある尖り岩の群）のやうな際立つた陸標や、また更にワイト島（譯者註、これもイギリス海峡にある小島）の南海岸の大部分は、我々が見てゐる前で消滅しつつある。地質學者は、これらの過程やそれに似た過程が起りつゝある速さを見積ることができ、従つて、觀測された地質層の厚さを造りだすにはどれくらゐの間沈澱が進行して來たかを見積ることができる。

これらの厚さは非常に大きい。アーサー・ホルムス教授の示した、觀測された最大の厚さは次の通りである。

前	古	中	新
キャンブリア時代	生代	生代	生代
	（古代生活）	（中世生活）	（近代生活）
少なくとも	一八〇、〇〇〇呎	一八五、〇〇〇呎	九一、〇〇〇呎
			七三、〇〇〇呎

我々は、これらの沈澱物が堆積した割合について一般的觀念を形づくることができる。三千年以上も前エヂプトに君臨してゐたラメセス二世以來、四百年又は五百年毎に一呎の割合でメムフィスに沈澱物が堆積した。發掘者は、ラメセス二世が王になつてゐた頃のエヂプトの地表に達するには六・七呎掘り下げなければならない。北アメリカに於ける現在の磨剥率は、八千六百年に一呎であるといふ積られてゐる。大ブリテンのための同様な見積りは、三千年に一呎の割合である。一千年に一呎といふ平均率で堆積した地質層をもつてすれば、前に列擧した總計五萬二千九百呎の地層は、その堆積に五億年以上を要するであらう。四千年に一呎の割合とすれば、その時間は約二十一億年となるであらう。

*地球の年齢を論ずるに當つて、私はホルムス教授の著書『地球の年齢』から廣汎に亘つて借用するところがあつた。

地質學的時間を見積るかういふ方法は、『地質學的砂時計』と稱された。どれだけの砂が既に走り落ちたかがわかり、どれだけの速さでそれが今走り落ちつゝあるかがわかれば、それが最初走り落ちはじめてからどれだけの間になるかを計算することができる。この方法の缺陷は、砂がいつも一樣な割合で走り落ちるといふ保證はないといふ砂時計の普通の缺陷か

ら来る。地質學的方法是、地球の年齢は幾億年であるに違ひないことを示せば足りる。しかし、地球の年齢のもつと決定的な見積りを得るためには、もつと精密な物理學や天文學の方法が採用されなければならない。幸ひにも、前章で論じた輻射性原子が一つの完全な時計組織を提供する。その差率は、我々の知る限り、一つの時代から別の時代に至るまでに一筋の髪の毛の幅ほどの變化しない。

我々が既に見たやうに、十分な時がたつと、一オンスのウラニウムは、 0.865 オンスの鉛と 0.135 オンスのヘリウムに分解する。分解過程は絶対に自然的である。全宇宙で知られてゐるどんな物理的作因も、それを最小度に抑制することも促進することもできない。次の表を見ると、それが進行する割合がわかる。

我 等 を め ぐ る 宇 宙

ウラニウム—オンスの歴史			
最初	1	鉛なし	
一億年後	0.995	5.013	オンスの鉛
十億年後	0.865	0.116	オンスの鉛
二十億年後	0.747	0.219	オンスの鉛
三十億年後	0.646	0.306	オンスの鉛

等々。かくして、少量のウラニウムは、これが形成した鉛の量と、なほも残存するウラニウムの量とを、いつでも我々の欲する時に測定することができれば、一つの時計の完全な代用になるわけである。地球が最初固結した時、ウラニウムの多くの断片が地球の岩石の中に密閉されて、いま地球の年齢を示すのに使用され得る。我々は次のやうに假定する資格はない。ウラニウムと結合してゐることがわかる鉛の凡ては、放射性集結に依つて形成された、と。しかし、幸ひにも、ウラニウムの分解に依つて形成された鉛は、普通の鉛とはほんの少し違つてゐる。後者は二〇七・二といふ原子量を持つてゐるのに、前者の原子量は二〇六・

○に過ぎない。かくして、放射性岩石のどんな見本に化学的分析を加へても、現存する鉛のどれだけが普通の鉛であり、どれだけが放射性分解に依つて形成されたかが正確にわかる。この後の種類の鉛の量の、なほも現存するウラニウムの量に對する比例は、分解過程がどれだけの間進行して來たかを正確に告げる。

一般に、試験される岩石の凡ての見本がこれと同じ事を告げる。そして放射性時計は、地球が固結してからの時間を十四億年以上に決定することがわかる。この時計は、これ以前にどれだけの間地球が成形的又は流動的狀態で存在してゐたかを告げることはできない。なぜなら、この初期の状態に於いては、分解の諸産物は互に別々のものになり易かつたからである。

アストンは、最近、ウラニウムの新しい同位元素、アクチノⅡウラニウムと呼ばれるものを發見した。ウラニウムとその同位元素は色々の頽廢期間を持つてゐるから、その二つの相對的豊富さは絶えず變化しつゝある。地球上に今殘存してゐるこれらの實質の量の割合から、ラザフォードは次のやうに計算した。地球の年齢は三十四億年を越える筈はなく、恐らく實質的にはそれよりも少ない、と。

地球が固結してから經過した時間の、これら二つの物理的見積りは、次の通りである。

放射性時計に依る地球の年齢

一、放射性岩石に於ける鉛 $\parallel$ ウラニウムの比から

—— 十四億年以上

二、ウラニウム及びアクチノ $\parallel$ ウラニウムの相対的豊富さから —— 三十四億年以下

さまざまの天文学的方法も、太陽系が生れてからの時間を決定するのに役立つ。ここでは『時計』はさまざまの遊星や衛星の軌道の形に依つて提供される。それらの軌道は一様な割合で變化しはしない。しかしその變化は既知の諸法則に依つて決定される。そのために、數學者は變化といふものが過去の諸條件の下で起つた割合を計算することができ、従つて、合計を出すことに依つて、現在の諸條件を確立するのに必要な時間を演繹することができる。次の二つの見積りはどちらもエッチ・ゼフレイ博士に負ふところがある。

天文学的時計に依る太陽系の年齢

一 水星の軌道から……十億年から百億年まで

二、月の軌道から…ざつと四十億年ばかり

これらさまざまな數字は、地球の年齢のあまり正確な見積りを許さないと同時に、その凡ては地球の年齢が何十億年といふ數字で測定されなければならないことを示してゐる。若し我々が一つの整數に基いて我々の考へを決定しようと欲するなら、恐らく二十億年といふ數字を選ぶのが一番いゝであらう。

第二節 恒星の年齢

我々は、今度は、恒星の年齢の決定といふ、今までよりも遙かに困難な問題に向つて行かう。

我々はそれに直接の正面攻撃に依つて近づかないで、我々の實際の目的點から一先づ遠く離れて行くであらう。我々は事實上宇宙のもう一つの極度の果に向つて出發して、瓦斯の諸特質に今までよりも少し深く探りを入れよう。

我等をめぐる宇宙

瓦斯に於けるエネルギー等分

我々は瓦斯といふものを分子彈の滅茶々々の飛行として描いた。これらの分子彈はあらゆる方向に一樣に飛んで、時折は互に粉碎し合ひ、且つさうするに當つて飛行の速力をも方向をも變へる。我々が既に見たやうに、總體の運動エネルギーは、さういふ衝突が起つても少しも減少しない。衝突に參與する分子の一つが自己の速力を妨げられた場合には、一つの分子の失つたエネルギーがもう一つの分子に依つて取得されるほどの量だけ、他のものが自己

の速力を増したのである。總體の運動エネルギーは『持續』する。

かういふ無茶苦茶な小彈の霰の中へ、假に我々はそれよりも遙かに重い抛射物を投げ込むとしよう。我々はそれを砲彈と呼んで差支へないし、その速力は小彈の平均速力に殆んど等しい。さまざまの抛射物のエネルギーはその重量にもその速力の自乗にも比例するので、速力が全く同一である現在の場合には、大きな方の抛射物は、その重量が一層大きいといふだけで、小彈よりも多くのでエネルギーを待つてゐる。若しその重量が一千の小彈と同一だとすれば、それは各々の單獨な小彈の一千倍のエネルギーを待つてゐるわけである。

然も、重い抛射物は、一千倍といふ公平なエネルギーの分前を待つたまゝで、小さな伴侶たちの中を長い間大威張りで通過することができないものではない。その最初の経験は、小彈の霰を胸に受けることである。その脊を打つ小彈は非常に少ない。といふのは、小彈は殆んどそれ自體の速力で運動してゐるだけであり、従つて背後からそれに追ひつくことは殆んどできないからである。更にまた、たとへさうすることができないにしても、その脊に與へる打撃は非常に弱い。なぜなら、小彈は殆んどそれよりも速く運動してはゐないからである。しかしその胸に與へる打撃の雨は重大である。打撃を受ける毎にその速力は妨げられ、従つてその速力は小さくなる。そして、總體の運動エネルギーは衝突毎に保存される

のであるから、大きな抛射物は始終エネルギーを失ひつつあるのに、小さなものはそれを犠牲にしてエネルギーを取得しつゝあらねばならないといふことになる。

どのくらゐの間かうしたエネルギーの交替は續くであらうか？ 例へば、大きな抛射物が自己のエネルギーをすっかり失つて、完全に休止するまで續くであらうか？ 問題は數學者のものである。そしてそれは全く正確な數學的解決を許し、その解決をマクスエルが早くも一八五九年に提供した。大きな抛射物は自己のエネルギーを悉く奪はれはしない。その速度が漸次に減少するに連れて、あらゆる種類の仕方で諸條件が變化する。かういふ諸條件の變化を斟酌すると、大きな抛射物のエネルギーが減少しつづけるのは、それが自己のエネルギーをすっかり失ふに至るまでではなくて、普通の小弾と等しいエネルギーを持つに至るまでであることがわかる。この階段に達すると、小弾の與へる打撃が大きな抛射物のエネルギーを増すのはそれを減ずるのと恐らく平均してゐる。そのために、これは小さな抛射物の平均エネルギーに等しい量のあたりを上下することに依つて終る。

マクスエルや、彼の後繼者らが、更に進んで示したところに依ると、瓦斯の中にはどれだけの種類の分子が一緒に混合してゐようと、それらの分子の重量が互にどれほど廣汎に違つてゐようと、それらの分子が繰り返す衝突は、終極的には、大きな分子も小さい分子も、輕

い分子も重い分子も、悉く同一の平均エネルギーを持つやうな事態になるに違ひない。これはエネルギー等分の定理として知られてゐる。それが意味するのは、どんな單一の瞬間にも凡ての分子は全く同一のエネルギーを持つゐるといふことではない。明かにさういふ事態は一瞬間も續くことはできない。なぜなら、どんな一對の分子間の衝突もそれを直ぐ覆すだらうからである。しかし、十分長い期間、謂はゞ一秒——それは分子の生涯に於いては實に非常に長い時間である、といふのは、それだけの時間に少なくとも一億度の衝突が起るからである——に亘つて各分子のエネルギーを平均すると、すべての分子の平均エネルギーは、その重量は無視するとして、同一であるといふことがわかるであらう。

この同じ定理はほんの少し違つた形式で述べることが出来る。空氣は、種類も違ひ重量も違ふもろゝの分子——非常に軽いヘリウム分子や、それよりも遙かに重くて、それぞれ七つのヘリウム分子と同じだけの重量を持つてゐる窒素分子や、それよりも更に重くて、それぞれ八つのヘリウム分子と同じ重量を持つてゐる酸素分子——の混合から成り立つてゐる。そこで、別の形式に於いて、件の定理は次の事を告げる。即ち、どんな瞬間にも、すべてのヘリウム分子の平均エネルギーは、その重量は軽いにも拘らず、窒素分子の平均エネルギーに全く等しく、また窒素分子の各々は酸素分子の平均エネルギーに全く等しいのである。

軽い分子型は自己の小さな重量を自己の高い運動速力に依つて補ふ。同様な説明は勿論他のどんな瓦斯の混合に取つても本當である。

この定理が本當であることは、非常にさまざまな仕方で觀測的に確證される。一八四六年にグラハムは瓦斯の相違なる種類の分子が運動する時の相對的速力を測定した。これは、それらの分子が一つの孔を通つて眞空の中へ流れ込む割合を觀察することに依つてであつた。これらの割合は、さまざまな分子型の平均エネルギーが互に全く等しいほどのものであることがわかつた。これより前にさへ、レスリイやその他の者らは、基礎理論を十分理解することなしにはあつたが、相異なる分子の相對的重量を決定するためにこの方法を使用した。かくして、どんな分子も自己の仲間以上のエネルギーを永久に保つことは許されないといふことが、十分に確立された自然法則として受け容れられて差支へない。分子のエネルギーの點で、瓦斯は完全に組織された共產主義的狀態を形づくる。この狀態に於いては、それらの分子の避け得ない一つの法則が、それらの分子を強制して自己のエネルギーを平等公平に分け與へさせる。

或る少しの修正を加へると、この同じ法則は液體や固體にも當て嵌る。液體や瓦斯に於いても、我々は例の想像上の砲彈を分子彈の霰の中へ投げ込むのに似た實驗を實際に行つて、

もろくの出来事を見守ることができる。我々は、非常に微細な粉末、例へば、粉にした藤黄、又は石松の種子を數粒取つて、これらのものに、瓦斯又は液體の普通の分子の中で超分子の役割を果させることができる。有力な顕微鏡で見ると、これらの超分子は全く休止させられないで、一層小さい、全く眼に見えない眞の分子に依つて絶えず打ち廻されながら、或る活々した運動を續けることがわかる。それはどう見ても慢性的な舞蹈病に襲はれたかのやうに見えて、時間がたつても減少する印を見せない。これらの運動は、植物學者ロバート・ブラウンの名を取つて『ブラウン運動』と呼ばれた。といふのは、彼が最初にそれらの運動を植物の樹液の中で觀察したからである。ブラウンは最初それらの運動を小さな粒子に於ける實際の生活がそれらの分子に影響される證據と解釋した。しかし後に蠟の粒子も同じ運動を示すことを發見すると、彼はこの解釋を放棄しなければならなくなつた。驚くほど微妙な一續きの實驗に於いて、ペリンは、空氣やその他の瓦斯の分子に依つて打ち廻される時の、小さな固體粒子のブラウン運動を、觀察したばかりでなく、測定しました。そしてこれらの瓦斯の重量を非常に正確に演繹した。

星のエネルギー等分

我々は今や星に後戻りすることができる。エネルギー等分の定理は、瓦斯の分子や、固體の分子や、液體の分子に就いて本當であるばかりではない。それは空の星に於いても本當である。數學上の諸過程は、非常に大きなものにも、非常に小さなものにも同じやうに適用することができる。そして諸原子の中の最も微細なものに取つて本當であることがわかる定理は、星々の中の最もすばらしいものに取つても等しく本當である。勿論、それは、その基礎となつてゐる前提が依然として本當で、小さなものから宇宙の大きな果へ移つて行つても害を受けない場合のことである。

ところで、エネルギー配分の定理が本當のものになるために必要とせられる諸條件は、たまく驚くほど單純である。實際、さういふ廣汎な諸結果がさういふ單純な諸條件から生じ得るなどとは信じ難いほどである。その諸條件とは實際上連續律及び因果律にほかならない。他の言葉で云へば、どんな瞬間に於ける組織の状態も、それに先立つ瞬間に於ける状態から不可避免的に生ずるであらうといふこと、又は、我々が今論じてゐるやうな運動をする、分子又は星又はその他の物體の中には自由意志は存在しないであらうといふことである。物理學の根本的法則に關する現在のやうな騒ぎの中では、これらの非常に單純な條件が分子問題に於いて何處まで成就されるかに就いては、全く確實だといふところまでは行けない。尤も、

豊富な觀察的證據に依ると、等分法則は、普通の瓦斯に於いては、いづれにしても殆んど完全に當て嵌ることが明かになる。

他方で、何が星々の運動を決定するかに就いては、少しの疑ひもない。それは引力法則であつて、あらゆる星は、他のあらゆる星を、兩者の距離の自乗に従つて逆乗する力をもつて吸引する。これは、この法則に關するニュートンの形式であるが、我々がニュートンの形式に於ける法則を使用しようとアインシュタインの形式に於けるそれを使用しようと、我々の現在の目的に取つてはそれは全くどうでもいい問題である。星の諸問題に取つては、この二つは實際上では區別することができないし、どちらのためにも、特に連星の觀測された軌道から得られた證據が多い。本質的な點は次の通りである。即ち、星々の運動は、これらの引力法則のいづれかに依つて——又は、全く類似してゐない他の法則に依つて——支配される、といふ單一の想像から、我々はエネルギー等分の定理がこれらの運動に取つて本當のものであることを證明することができるのである。正確な諸條件を細々と述べる必要はない。單なる引力法則と、星々はそれに従はうか従ふまいかといふことに就いて自由な思考を働かせることはできないといふ想像とがあれば十分である。

この定理は、星々に適用される時にはまさしく何を主張するか、といふことを全く明瞭に

理解することが重要である。それは勿論、空の凡ての星は相等しいエネルギーを持つてゐると主張しはしない。重量の重い星は、平均して、重量の軽い星と同じエネルギーを持つてゐる、と主張さへしない。それは次のやうに主張するのである。若し我々が數種の星を空間の中に置いたとすれば、それらが十分長い時間亘つて（これが本質的な點である）互に交互作用をした後、初めエネルギーの公平な分前以上のものを與へられてゐたものは、この超過分を一層少ないエネルギーを持つてゐる星に渡さざるを得なくなつたであらう、そのために、星の凡ての相異なる型の平均エネルギーは結局は必然的に相等しくならなければならない、と。

分子問題に於いては、分子と分子との交互作用は衝突を媒質として起る。そしてエネルギーの等分が、ほとんど正確に確立されるのは、八回か十回ばかりの衝突が各分子に起つてからである。普通の空氣中では、これは一秒の約一億分の一に過ぎない期間を必要とする。

星の問題に於いては、我々はそれとは非常に違つた時間の長さを取扱ふことになる。衝突はたゞ幾千萬億年も間を置いて起るにすぎない。若し星々が實際の衝突が起つた時初めて自己のエネルギーを再分配するのであつたら、我々は次のやうに推察して差支へない。エネルギー等分への密接な接近は、各々の星が八回か十回目の衝突を経験するまでは行はれないで

あらう、そしてこれは真にすばらしい長さの時間を必要とするであらう、と。しかし、實際に於いてそんな長い時間が必要でないのは、多數の引力的牽引、非常に離れてゐる星と星との間に於いてさへのそれが、非常に稀な直接の打撃よりも遙かに有効に且つ迅速にエネルギーを等分するからである。二つの星が放浪中にたま／＼相互のかなり近くをさへ通り過ぎる毎に、各々は他をその進路から少し牽引する。そして双方の星の運動の方向及び速度が變化する——二つの星が相互の極く近くを通り過ぎるか、實質的な距離を保つてゐるかに依つて、多かれ少なかれ變化する。簡単に云へば、星々が接近し合ふ毎にエネルギーの交換が起り、十分な時間がたつた後、これらの反復されるエネルギーの交換は、平均して、星と星との間に於ける——その重量の相違は無視するとして——總體のエネルギーの等分となつて終る。

ところで、すべてこの事が次第に引き起して來た局面の難點は、次の事にある。即ち、觀測に依ると、相違なる重量の星は相違なる平均速度をもつて運動しつつあつて、これらの平均速度は、エネルギー配分が、星々の間に、絶対に正確にはないにしても、かなり正確に、既に行はれてゐるほどのものであることがわかるのである。

星々はさういふ状態に達するにはどれくらゐの間交互作用をしたに違ひないか、といふ疑問は、今や絶対に根本的な重要性を持つものとなる。といふのは、それに對する答へは我々

に星の年齢を告げるからである。

星の速度

連星系を形づくる星の重量は、如何にして測定され得るかを、我々は既に見た。さういふ測定は、太陽の重量の約百倍から、太陽の重量の僅か五分の一に至るまでの範圍を示す。連星系の運動速力も、單獨の星の速力と全く同じ仕方 で測定することができる。早くも一九一一年に、ハルムは、さういふ測定を澤山目の前に置いて、最も重い星が最も徐々に運動することを指摘した。平均すると、既知の星々の中の最も重いものは、最も軽いものと同じ運動エネルギーを持つてゐて、後者の高速力はその重量の小ささを殆んど補つてゐる、といふことを彼は見出して、次の事を暗示した。即ち、星々の速度は、瓦斯分子のそのやうに、エネルギー等分の法則を確證することがわかるかも知れない。それはすばらしい規模に於けるブラウン運動の場合であるやうに見える。

その時以來、今までよりも非常に觀測的な證據が積み重ねられた。そして一九二二年にキルソン山のシーマス博士が行つた徹底的研究に依つて、星の運動が、エネルギー等分への實際のかなり密接な接近を示すことは、殆んど疑ふ餘地が無くなつた。次の頁に出てゐる表は、

シアスの議論の最後の結果を示したものである。

星々は、先づ、その光が分光器で分析された時に示す相異なる分光型に従つて分類してある。

星の運動におけるエネルギー等分

これらの相異なる星の型は、非常に相異なる平均重量を持つてゐる。この表の第二欄を見ると、それらは十九乃至一以上の範圍を示してゐる。これらの相異なる星の型の平均速力を示す第三欄を見ると、最も重い星が最も徐々に運動し、最も軽い星が大體に於いて最も迅速に運動することがわかる。その次の欄には、相異なる星の型の平均した運動エネルギーが示してある。これを見ると、もろくの速力に於ける二均差は、ほとんど、星のあらゆる型の平均エネルギーを相等しくするのに必要なものであることがわかる。最初の二つの行は確かに例外である。この二つの行には、すべての中の最も重い星が擧げてある。これらは別として、残りの十行は重量に於いて一に對する十の比を示してゐる。ところが、エネルギーの、平均数からの平均變差は、九%にすぎない。

これに依つてわかるのは、星々の運動は、エネルギー等分への、實際の接近を、かなり密

接な接近さへを、示すといふことである。おのづから頭をもたげる疑問は、エネルギーのこの大凡その同等は、星々の間の長く續いた引力的交互作用以外の原因に歸することができるかどうかといふことである。この引力的交互作用は疑ひもなくそれを引き起すが、それ以外のどんなものが同様の結果を引き起すことができるか？ 前の表の最後の欄にそれに對する答へが出てゐる。これは、瓦斯分子の各々に相異なる星の型と同じエネルギーを持たせるために、瓦斯がそこまで高められなければならない温度を示したものである。これが馬鹿げた計算のやうに思はれるのは尤もである。一萬億噸を何百萬倍もしたほどの重量を持つ星が、一時間に約百萬哩の速力で空間の中を鳴動しながら進んで行く。瓦斯の微小な分子の一つ一つが、この星と同じ運動エネルギー、同じ破壊力——といふのは運動エネルギーは事實上破壊力にもなるからである——を持つためには、瓦斯がどれぐらゐの熱さにならなければならぬかを、我々は眞面目に研究しはじめてゐるのか？ 件の計算は疑ひもなく馬鹿げてゐるし、また初めから馬鹿げたものにする積りでもあつたのである。なぜなら、それは歸謬法を引き起しつつあるからである。若し觀測されたエネルギー等分が、輻射壓とか、分子、又は原子、又は高速力の電子に依る砲撃とかのやうな物理的作因に依つて引き起されたら、この作因は、最後の欄に示したものと同一順位の温度にならなければならないであらう。又は、

さういふ温度に於ける物質と均衡を保たなければならぬであらう。最後の欄に示したものは、 10^3 度といふ順位の温度である。さういふ温度が自然界に存在しないことはかなり確實である。そこで、我々の論證は次のやうになる。即ち、觀測されたエネルギー等分は、物理的作因に依つて引き起される筈はなく、従つて星々の間の引力的交互作用の結果でなければならぬ。そこで、星の年齢は、單に、引力的諸力が、エネルギー等分への、觀測されると同じほどの正しい接近を、引き起すのに要する時間の長さに等しいといふことになる。

かういふ時間の長さの計算は、一つの複雑ではあるが決して扱ひ難くない問題を持ち出す。すべての必要な材料は有効である。そして計算方法は瓦斯説に於ける先程の經驗からよく理解されてゐるから、數學者は、我々が求めれば、信賴すべき合理的に正確な答へを與へてくれるものと信用されて差支へない。しかし、數學者の助けが無くてさへ、我々は件の時間が非常に長いものであるに違ひないことを知ることができる。

實際の數字は、しばらく取り上げないで、第一章で築き上げた縮尺模型に従つて考へる方が容易であることがわかる。我々は、星々が微小な塵の粒に歸せられるほど小さい縮尺を使用した。そして、空間に群がつてゐる星は、我々の模型に於いては、塵の粒が二百ヤード以上離れて置かれなければならないほど少數であつた。これを一つの具體的な形式で述べれば、

僅か六粒の塵が残されただけのウォータロー停車場さへ、星が空間に群がつてゐるよりも一層塵が多すぎる割合であつた。今この模型を再び復活させて、星々の運動を表はすことにしよう。比例を正しいものにして置くには、星々の速力が模型の線次元と同一の割合にせられなければならないことは云ふまでもない。ここでは、地球が太陽をめぐる一年がかりの旅行六億哩は、直徑に於いて一時の十六分の一、又は、圓周に於いて一時の五分の一に當るピンの頭にせられた。星々は地球の軌道運動と大體同じ速力をもつて空間の中を運動するから、我々の模型に於ける各々の塵の拡の一年がかりの旅行も一時の約五分の一であると想像して差支へない。かくして、各々の塵の粒は、五年に約一時、千年にざつと一六呎——又は蝸牛の歩み方の一千萬分の一——ほど運動するであらう。たとへ二つの粒が直接に向ひ合つて進みはじめたことにしても、双方が出會すまでには約二萬年かかるであらう。ウォータロー停車場で盲目的に飛び廻つてゐる六粒の塵の各々が、他の粒とびつたり出會して、自己の運動エネルギーを全く再分配するまでには、かういふ歩み方でどれくらゐの間運動しなければならぬか？

數學者は、星々の實際の重量や速力や距離に關する正確な計算を行つて、次の事を發見する。即ち、**エネルギー等分への、觀測された程度の接近を見ると、引力的交互作用は、幾萬**

億年に亘つて—恐らく五乃至十萬億年の間、繼續したに違ひないのである。して見ると、これが星々の生涯の長さでなければならぬ²⁰。

それはすばらしい時間の長さである。そして終極的にそれを受け容れる前に、我々が他の資料から確證を求めるのは尤もであらう。地球の年齢を見積るに當つて、我々は、あらゆる種類の時計、天文學的、地質學的、物理學的時計から助けを借りることができた。幸ひにも、それらは悉く同じ事を告げた。現在の問題に於いては、天文學の時計だけが有効であるが、幸ひにもそれは三つを下らないし、ここでも三つが三つとも同じ事を告げる。

連星系の軌道

我々が既に見たやうに、連星系の二つの構成者はどちらもその伴侶の引力的把握から逃れることができないために、相互の周回に、それぞれ密接した橢円軌道を永久に描く。エネルギーは、これらの系統の軌道運動にも、これらの系統の空間通過運動の場合と同じやうに存在し得る。そして、嚴密な數學的分析に依つて、通りかかった星々からの、長い間相次いで起る引力的牽引は、最後には、空間を通過する一つの系統と他の系統との運動エネルギーの²⁰ 現在では、宇宙の年齢は約137億年と考えられている。

間に於いてばかりでなく、各連星系が行ひ得るさまざまの軌道運動の間に於いても、エネルギーの等分となつて終る。かういふ最後の等分状態に到達すると、諸系統の軌道は悉く同様のものになりはしないにしても、諸系統の形は一つの全く單純な統計學的法則に従つて分布されるであらうといふことがわかる。現實の諸系統の軌道はこの法則に一致しないことがわかるから、明かに星々の年齢はまだその軌道運動の點でエネルギーの等分に達するほど長いものになつてゐない。それらは、自己の出發した一點又は諸點を知らないまゝ等分への道をどれだけ進行したか、それを論ずるのは不可能である。

* 軌道 e の離心率は、 $e=0$ の、 $e=1$ から $e=1$ に至る凡ての値が、一様に蓋然的のものであるほどの仕方 distributes される。

連星系の起源に關する問題は、次の章でもつと十分に論ずるであらう。差し當り、それらは二つの別々の仕方 で生れるに至つたやうに見えると言つて置いて差支へない。

實際に於いて、すべての天文學的物體は自轉状態にある。地球は二十四時間毎に一度自轉し、木星は、その表面にある赤色の斑點やその他の符牒の運動を見るとわかるやうに、十

時間毎に一度自轉する。太陽の表面は二十六日そこいら毎に自轉する。我々がその自轉を辿り得るのは、その赤道をぐるぐる廻る太陽黒點や、白斑や、その他の特徴を見守ることに依つてである。太陽の中心核はこれよりも非常に速く自轉して、おそらく比較的僅かの日數で一回の目轉を仕上げると想像していい理論的根拠がある。そして恐らく、他の凡ての星も、或るものは迅速に、或るものは徐々に自轉してゐるであらう。もつと先へ行くとわかるやうに、星といふものは、年を取ると共に、恐らく大きさが収縮するであらう。そしてこの収縮は一般にその自轉速力を増加させる。ところで、數學的學說に依ると、安全に越えることのできない臨界自轉速力があることがわかる。若し星があまりに速く自轉して安全域を越えるなら、それは破裂して二つになる。これは丁度、自轉しつつある整速輪が、あまり高速力で驅り立てられると破裂することがあるのと同じである。連星の一つの部門が生れたのは、かういふ仕方に於いてである。少數の例外はあるが、この部門は第一章で述べた分光連星の部門と同じである。二つの構成星は一般に密接しすぎてゐるので、望遠鏡には**別々の光點となつて現はれるが(sic)**、分光證據に依ると、二つの別々の物體であることが初めてわかる。

連星のもう一つの部門、即ち望遠鏡の中に全く明確に一對の光點として現はれる可視連星

は、恐らくそれとは違つた起源を持つてゐる。もつと先へ行くとわかるやうに、星々は最初星霧瓦斯の凝結體として出現したもので、單一の大きな星霧が壊れた時に全體の群が生れたのである。相隣接するもろくの凝結體が非常に近くて、相互の引力的把握を避けることができない、といふやうなことは度々起るに違ひない。早晚これらのものは収縮して普通の星となるが、引力的諸力はやはり前と同じやうに強い。そして後には一對の星が残り、兩者は二重裝置となつて永久に空間の間を運行するに違ひない。なぜなら、相互の引力的把握から免れるに足るほどの運動エネルギーを持つてゐないからである。かういふ機構が連星の一部門を造り出すのである。それは單一の星の破壊に依つて形成されたものに全く類似してゐるが、規模の點に於ける莫大な相違は別である。さういふ系統の二つの構成者の間の距離は、これらの星の生れ出た原星霧に於ける別々の凝結體の間の距離と比較できるに違ひない。従つて、粉々に壊れた普通の星の直徑と比較できるとどまる、分光連星に於ける距離よりも恐ろしく大きいわけである。この事は、もろくの可視連星はそれぞれ一對の光點となつて現はれるのに、分光連星はさうなつて現はれない理由を説明する。

エネルギー等分の最後の状態に於いては、諸軌道の形は、我々が既に見たやうに、一定の統計學的法則に従つて分布されるであらう。この分布法則はあらゆる大きさの軌道に取つて

同一である。他方で、エネルギー等分がこの法則を引き起すのに要する時間は、あらゆる大きさの軌道に取つて同一ではない。それは、分光連星のこじんまりとした軌道に取つては、可視連星の一層廣々とした軌道に取つてよりも遙かに大きい。これはなぜかと云へば、軌道の形に生ずる諸變化は、單に、連星の二つの構成者に對する、一つの通りかかつた星の引力の相違に依つて起されるにすぎないからである。若し二つの構成者が非常に密接してゐるなら、通りかかつた星は實際上双方に對して同一の力を及ぼす。これらの力は二つの構成者に全く同じ仕方で影響し、その結果、全體としての連星系の空間通過運動は變化するが、軌道の形は依然として變化しない。通りかかつた星は、全體としての連星の運動を把握するのであつて、その構成者の軌道を把握するのではない。他方で、二つの構成者が非常に離れ合つてゐる時には、この二つに働きかける引力的諸力は非常に相異なるかも知れない。そのため、軌道の形に生ずる實質的變化が起るかも知れない。たとへ邂逅はあまり密接なものではないにしても。二つの構成者が普通何億哩も離れ合つてゐる可視連星に於いては、楕円軌道の形が依つてもつて測定される『離心率』の最後の分布を確立するのに必要な時間は、またしても幾萬億年といふ順位のものであることがわかるが、それよりも遙かにこじんまりとした分光連星に取つては、それは優にこれの百倍も大きい。

リック天文臺のエイトケン博士の提供した材料から編纂した次の表は、正確な報告の役立つもろもろの連星の軌道に於ける観測された離心率の分布を示したものである。

我々は先づ分光連星を見よう。観測された諸軌道に於いては、低度の離心率が優勢であつて、五分の一以下の離心率を持つてゐるものが百十九の中七十八を下らないことがわかる。他の言葉で云へば、大抵の分光連星は殆んど同形の軌道を持つてゐる。理論と観測との双方に依ると、一つの星が二つに分れて一つの分光連星となつた時には、二つの構成者の軌道は殆んど同形であるに違ひないことがわかる。そのために、観測された諸軌道の表は、全體としての軌道に於ける、形のどんな漸進的變化に就いての證據をも殆んど提供しない。これと對照して、表の最後の欄は、エネルギー等分にいつか最後に達することがある場合に期待される、離心率の相異なる諸軌道の比例を示したものである。ここでは、非常に延長された軌道を表はす高い離心率が優勢である。ほとんど圓形で五分の一以下の離心率を持つてゐる軌道は、二十五に一つの割合にすぎない。

一般には、第二回に示してある観測された數は、第四欄に示してある理論上の數とは少しも類似してゐない。他の言葉で云へば、分光連星は以後の状態へのどんな接近をも暗示せず、その大部分は最初の出發點と同一の低い軌道離心率を保つてゐる。我々がこれを豫測するの

は自然である。なぜなら、我々が既に見たやうに、これらの軌道が最後の等分状態に達するには、一萬億年の幾百倍も又は幾千倍さへを要するだらうからである。星々はこんなに老ひてゐる筈はない。といふのは、若しこんなに老ひてゐるなら、星々の空間通過運動は、絶対に完全な等分を示してゐなければならぬが、確かにそれを示してゐないからである。

今度は、第三欄に向つて行かう。これで見ると、もろくの可視連星は理論上の最後の状態に十分接近して、約〇・六の離心率に達してゐるが、それを越えてはゐない。高い離心率を持つ軌道が不足してゐることは、引力的諸力が凡ての中の最高の離心率を起すに足るほどの時間を持つてゐなかつたことを意味するかも知れない。しかし、この不足の一部分、また恐らく全部は、高い離心率を持つ軌道は、観測的に發見し、正確に測定するのが非常に困難であるといふ單純な事實に歸せられなければならない。

そこで、明かに軌道運動の研究は、空間通過運動の研究のやうに、幾萬億年にも跨る引力作用に向つて行くことになる。各々の場合に『規則を證明す』べき例外がある。我々が今しがた考察した場合に於いては、それはもろくの分光連星に依つて提供される。それらは非常にこじんまりとし てゐるので、その構成者は引力の引き離し作用を無視することができ る。前の場合に於いては、それはB型星に依つて提供された。これらの星は非常に重いし、

また恐らく非常に若いので、重量の一番小さい星々からの引力的諸力は、まだその運動にあまり影響を及ぼしてゐない。

これら二つの線上に於ける證據を詳細に論ずると、双方は一致して次の事を暗示する。即ち、**恒星の一般的年齢は、既に述べた通りのもので、約五乃至十萬億年である。**

進行星団

第三の線上に於ける證據も、全く同じ事を告げるので、これに簡単に言及してよからう。大熊座や、プレアデスや、オリオンの帶のやうな、際立つた明光星の群は、大抵は非常に重い星々から成り立つてゐて、細い星々が亂れ立つた中を規則的な秩序正しい隊形で運動してゐる。それは丁度、白嘴鴉や椋鳥が群れ亂れた中を白鳥たちが飛んでゐるやうである。白鳥たちは絶えず飛翔を整へるので、いつまでもその隊形を保つことができる。星々はさうすることができないので、秩序正しい隊形は、早晚他の星々の引力に依つて破られるに違ひない。一層軽い星が自然に先づ隊形から叩き出されるが、一番重い星々は一番長い間その隊形を保つ。觀測が暗示するところに依ると、かういふ事が進行星團に實際に起こるのである。いづれにしても、隊形の中に残る星々は一般に遙か平均以上の重量を持つてゐる。そして、一層

軽い星を叩き出すのに必要な時間を計算することができれば、即座に、後に残つた星の年齢を演繹することができる。

もつと先へ行つて言及する、別の線上に於ける研究も、同様の年齢を示す。

この年齢は地球の年齢よりも非常に長いことがわかる、といふことは恐らく少々驚くべき事である。尤も、地球は恒星の生涯の最後の二三瞬間に生れてはならなかつたといふ實證的理由がないことは云ふまでもない。それは、ド・ジッターやルメイトルの宇宙論に依つて、非常に漠然とではあるが暗示された年齢よりも非常に長いことがわかる、といふことも恐らく少々驚くべき事である。若し我々が最も遠い星霧の現視後退速度を現實のものとして受け容れるなら、それらの星霧の現在の速力に於ける幾十億年にも亘る運動は、我々からのその現在の距離を殆んど説明するであらう。そのために、幾十億年以前には、それらの星霧は現在よりも遙かに込み合つてゐたに違ひない。これは、勿論、次のやうに言ふのとは非常に違ふ。それらの星霧が創造されてから經過した時間は、僅か數十億年であり得るにすぎない、と。然も我々が、先天的に、二つの期間は少なくとも比較できるであらうと期待したのは、恐らく合理的であらう。

困難を少し違つた形式で述べれば、二十億年といふ期間は地球に多大の相違を與へたやう

に思はれる。そして若し星霧運動の現視速力が現實のものであつたら、この期間は、もろくの大星霧の、空間に於ける一般的配列にも、多大な相違を與へたわけである。従つて、この期間は星々には殆んど相違を與へてはならないことになるので、我々は星々の現在の状態を説明し得ない先に一千倍も大きな年齢を假定する必要があるといふのはおかしな事である。

これらの考察は、星の年齢に就いて今しがた行つた見積りが、慎重に、また恐らく疑ひをもつてさへ、受け容れられなければならないことを暗示するやうに思はれるかも知れない。然も、芳し我々がこの見積りを棄てるなら、天文學の多數の事實が何の説明も加へられずに放任されてしまひ、また天文學の構造の大部分が無秩序状態に陥るので（二四七頁参照）、我々はこれを受け容れて次のやうに想像するほかはない。もろくの恒星は實際に於いて幾萬億年といふ時間に亘つて生きながらへて來た、と。

第三節 太陽輻射

何かさういふ絶大な期間の全體に亘つて、太陽は恐らく光と熱を少なくとも現在と同じほど豊かに注ぎつづけて來たのである。實際、我々がもつと先へ行つて再び取り上げる多くの證據に依ると、若い星は老ひた星よりも餘計に輻射を放出してゐることがわかるので、太陽は、その長い生涯の大部分に亘つて、現在よりも一層大まかにさへエネルギーを注ぎつづけて來たに違ひない。

我々の先祖がこの問題に就いて多少考へたにしても、彼等は恐らくかういふ光と熱の豊かな放出に何一つ注意すべきものを見なかつたであらう。彼等はそれが續いた間のすばらしい時間の長さに就いて何の考へをも持つてゐなかつたのであるから、尚更さうである。太陽エネルギーの源が、實際に第一級の困難を持つ科學上の謎であることがわかつたのは、前世紀の中頃、エネルギー持續の原理が初めて明瞭に理解されはじめた時に過ぎない。太陽輻射は明かに太陽に取つてはエネルギーの喪失を意味した。そして、持續原理に従つてエネルギーは無から生ずることはできないことがわかつたのであるから、このエネルギーは、必然的に、

非常に長い期間に亘つて莫大なエネルギーを供給するのに適する何らかの源又は貯蔵所から来たわけである。何處にさういふ貯蔵所が見出されることになったか？

太陽は現在非常な割合で輻射を注ぎ出してゐるので、若し必要なエネルギーが太陽の外側にある發電所で造り出されるとすれば、この發電所は一秒に幾千萬億噸の割合で石炭を焚かなければならないであらう。そんな發電所が存在しないことは勿論である。太陽は全くそれ自體の資源に依存してゐる。それは空虚な空間に浮んだ一艘の船である。そして若し、さういふ船のやうに、太陽がそれ自體の石炭の貯蔵をしてゐるとすれば、又は、カントが想像したやうに、太陽の全體の實質が石炭の貯蔵であつて、その光と熱がそれ自體の燃焼から生ずるほどであるとすれば、せいぜい數千年のうちにその全體が燃えて灰と燃滓になるであらう。

科學の歴史には、太陽エネルギーを外部から入り込んでくるものと説明しようとする試みが只一つ記録されてゐる。我々が既に見たやうに、小彈の運動エネルギーは、小彈の速力が妨げられると熱に変化する。これと同じ結果を持つ天文學上の實例が、お馴染みの流星現象に依つて與へられる。流星は外部の空間から地球の大氣の中へ落ち込んで来る小彈めいた物體である。さういふ物體が空虚な空間の中を進行している間、地球に向かつてのその落下は

連續的に速力を増加する。しかし、それが地球の大氣の中へ這入ると、その速力は空氣抵抗に依つて妨げられ、その運動エネルギーは漸次に變化して熱となる。流星は最初熱くなり、然る後白熱状態になつて、我々が依つてもつてそれを認める輝かしい光を發する。最後に、熱は全くそれを蒸發させ、それは視界から消えて瞬間的な發光瓦斯の尾だけが後に残る。流星の最初の運動エネルギーは光と熱とに變じたのである——我々が依つてもつてそれを見る光と、それを終極的に蒸發させた熱とに。

一八四九年に、ロバート・メーヤーは次の事を暗示した。即ち、太陽が輻射として放出したエネルギーは、流星又はそれに類似した物體の太陽大氣中への連續的落下から、太陽に加はるのかも知れないといふのである。この暗示は維持できない。なぜなら、地球全體の重量に等しいさういふ物體の一塊を持つて來ても、太陽の輻射を殆んど一世紀の間も維持することはできないであらうし、三千萬年の間太陽の輻射を維持するに要する内部落下さへ、太陽の量を二倍にするであらう、といふことが簡單な計算に依つてわかるからである。太陽の重量はそんな割合で増加しつづけることができる、といふことを認めることは全く困難であるから、メーヤーの假説は放棄されなければならない。

一八五二年に、ヘルムホルツは、それによく似た學說、例の有名な『收縮説』を提出した。

それに従へば、太陽自體の收縮分が、最後に輻射として現はれるエネルギーを遊離させる。若し、太陽の半径が一哩ほど收縮したら、その外部大氣は一哩の高さだけ落下する。そして、さうするに當つて、一哩だけ落下して自己の運動を妨げられる流星の相等しい重量に依つて造り出されるのと同じだけのエネルギーを遊離させる。ヘルムホルツ説に基くと、太陽自身の身體の相違なる部分が、メーヤーが外側から落下して來る流星に當てがつたやうな役割を演ずるのであつた。それらの部分は何度も何度もこの同じ役割を演ずるので、最後には太陽はこれ以上收縮することはできないといふところまで收縮するのであつた。然も、ヘルムホルツ説は、メーヤーのそのやうに、數的計算といふ試金石に堪えることができなかった。一八六二年にケルヴィン卿が計算したところに依ると、太陽の、その現在の大きさに至るまでの收縮量さへ、過去に於ける約五千萬年以上の輻射エネルギーを提供することは殆んどできない。ところが、既に述べた地質學的證據に依ると、太陽はこれよりも恐ろしく長い期間に亘つて輝きつづけて來たに違ひないことがわかる。

成功の希望を抱いて太陽エネルギーの現實の源を探し出すには、憶測を棄てて新しい方向から問題に近づいて行かなければならない。我々が既に見たやうに、輻射といふものは重量を帶びてゐるので、輻射を放出しつつあるどんな物體も必然的に重量を失ひつつあるわけで

ある。五馬力の探照燈に依つて放出される輻射は、我々が既に見たやうに、一世紀に一オンスの約二十分の一の割合で重量を運び去るであらう。ところで、太陽の表面の各一時平方は、實際に於いて丁度五馬力ばかりの探照燈に相當する。そこで我々は次のやうに結論する。太陽の表面の各一時平方から、一世紀に一オンスの約二十分の一の割合で重量が流れ出つつある、と。さういふ重量の喪失は全く些細の事のやうに思はれるが、太陽の全體の表面を構成する平方時の總數をそれに乗ずるとどうであらうか？ その時には、全體としての太陽は、寧ろ一秒に四百萬噸、即ち一分に約二億五千萬噸——水がナイアガラを流れつつある割合の優に六百五十倍——の割合で重量を失ひつつあることが明かになるのである。

太陽及び星々の過去の歴史

我々はこの掛算を續けて行かう。一分に二億五千萬噸は、一日に三千六千億噸(sic)である。かくして太陽の重量は昨日のこの時間には現在より三千六百億噸ほど多かつたに違ひないし、明日のこの時間には三千六百億噸ほど少なくなるであらう。そして一日に三千六百萬噸(sic)は、一年に一萬億噸の百三十一倍である。我々はかういふ仕方で過去へ好きだけ入り込んで行くことができるし、未來を好きなだけ探ることができる。しかし間もなく我々は

限界内になりさうなことを告げることができる。例へば、重量が殆んど太陽に等しい大部分の星は、太陽と殆ど同じ光度を持つてゐることがわかる。一般には、恐らく豫期できるやうに、重量の軽い星が輻射を放出するのは重い星よりも少ない。しかしまた――そしてこれは發見できなかったのであるが――兩者の輻射に於ける相違は兩者の重量に於ける相違よりも遙かに大きい。我々が既に太陽の附近にある少數の星に當て嵌ると述べて置いた法則、幾分違つた意味に於いてではあるが、全體としての星々に取つて本當である――一噸當りの燭光は最も重い星々に於いて最も大きい。例へば、普通の星は、重量は太陽の半分であつても、エネルギーは太陽の半分ほどを放射するものではない。その割合は八分の一あまりである。この考察に従へば、太陽の、また實に凡ての星の、未來の生涯は、殆んど無限に長くなる。一種の吝嗇が老年になつた星々に忍び寄つて來るやうに思はれる。浪費すべき重量を澤山持つてゐる間は、星々はそれを大まかに浪費するが、残りが殆んど無くなると、消費の目盛を縮める。残りが殆んど無くなると、砂時計の中の砂はゆるく走り出す。

同様に、太陽の重量の二倍を持つ普通の星も、エネルギーを單に太陽の二倍放射するだけではない。それは八倍放射する。我々は、太陽の過去の生涯を見積るに當つてこの事を考へに入れて置かなければならない。それが太陽の過去の生涯を短くするのは、反對の結果がそ

の未來の生涯を長くするのと同じほど確かである。一定の重量を持つ普通の星が自己の重量を輻射形態で消費する時の割合が、觀測して見るとわかる。そして、太陽はそれ自體の過去の歴史の相當の階段に於いてこの典型的な普通星のやうな作用をしたといふ想像に基いて、我々はこの表を書き上げることができる。それは太陽の生涯の進行に連れて起るその重量の漸次的變化を示したものである。この表から抜粋したよろゝの記入數字は幾分次のやうであらう。

我 等 を め ぐ る 宇 宙

七、 五〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇	七、 四〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇	七、 一〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇	五、 七〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇	二、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇	一、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇	二、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇、 〇〇〇
同	同	同	同	同	同	の 年以前、 太陽はその現在の重量
二〇倍	八倍	四倍	二倍	一・一六倍	一・〇七倍	一・〇〇〇一三倍
同	同	同	同	同	同	を持つてゐた。

○

七、六〇〇、〇〇〇、〇〇〇、〇〇〇、〇〇 同

○

一〇〇倍

同

第一番目の數字は、大體、地球が生れてからの時間を表はしてゐる。過去に於ける地域の全生涯の間に、太陽の重量は、全體の中のほんの目立たぬ部分だけ變化した、といふことをそれは示してゐる。その結果、次の事は、おのづから確實ではないにしても、尤もらしいやうに思はれる。即ち、地球が生れた時、太陽は現在と全く同一であり、また、凡ての本質的な點で、地球の全生涯に亘つて同一だつたのである。

目立つほど違つてゐる状態に達するには、地球の誕生時を遙かに越えて遠い永劫の昔に遡らなければならぬ。我々は勝手にさうすることができるといふのは、我々が既に見たやうに、地球の全生涯は恒星の生涯に於けるほんの一瞬間に過ぎないからである。我々は後者を優に五乃至十萬億年ぐらゐの順位であると見積つた。そしてこれらの長い期間の目立つほどの部分を遡つた時、初めて太陽の重量はその現在の重量と目立つほど違つてゐることがわ

かるのである。例へば、太陽がその現在の重量の二倍を持つてゐるのを知るには、五萬億年以上遡らなければならない。これよりもつとく遡ると二つの新しい現象が現はれる。我々が假定した過去の太陽の重量は、飛躍的に上昇しはじめる。早晩それは一千億年毎に二倍になりはじめ、二倍以上になりはじめる。そして我々は、全く不可能なほど高い重量を持つた一つの太陽を假定しなければ、八萬億年の昔に遡ることはできない。そこで太陽は、過去八萬億年以内の或る時に生れたに違ひないといふことになる。

前の表の正確な數字は疑ひを受け易いかも知れない。しかし一般的觀察事實として、非常に重い星が、異常な速度をもつて、自己のエネルギーを、それ故また自己の重量を放射し去ることは疑ひない。實際、この過程は非常に速いので、我々は、星の生涯に於ける、太陽の重量の約十倍以上を持つてゐるあの部分をすっかり無視して差支へない——この部分は瞬間に過ぎるのである。すべての詳細な計算は別として、この一般的原理は、太陽ばかりでなく、他のあらゆる恒星の年齢に對して一定の限界を定める。太陽の年齢に取つての上部限界は、確かに八萬億年の附近の何處かにある。

これは、他の諸計算が、一般の恒星に當てがつた五乃至十萬億年といふ一般的年齢とよく一致する。もろくの計算はかくして互に補強し合ふ。そして合せ繪判じの諸斷片の少なく

とも二つは満足に合ひはじめたやうに見える。若し空の凡ての星が太陽に似てゐたら、我々は、我々の到達したよろゝの結論に多大の確信を感じて差支へない。

不幸にも、現在太陽の重量の幾倍かを持つてゐる星々の年齢を論ずるや否や、よろゝの困難があらはれる。二二九頁の表を見ると、太陽の重量の六倍を持つてゐる一部門の恒星（分光型A O）は、エネルギー等分の法則とよく一致した空間運動を持つてゐることがわかる。これが純粹の符合でなければ（そしてこれはほんの少し重量の少ない他の群も同様によく一致するといふ事實を考へると、純粹の一致らしくはない）、我々はこれらの非常に重い星に五乃至十萬億年といふ年齢を當てがはなければならない。然も、この重量を持つ普通の星は太陽の約百倍の輻射を放出しつつある。この事が意味するのは、それは一千五百億年毎に自己の重量を半減するといふことである。明かに、この過程は優に五乃至十萬億年の間を繼續した筈はない。

それより更に多く發光する星々は、問題を一層鋭くさへある形式で持ち出す。小マゼラン雲に於ける旗魚座S星²は、現在太陽の三十萬倍の輻射を放出しつつある。太陽は自己の重量を空間中へナイアガラ³の六百五十倍の割合で注ぎ出しつつあるのに、旗魚座S星はナイア

2 かじき座S星は大マゼラン銀河内（小マゼラン雲ではない）にある高輝度青色変色星（かじき座S型変光星）。寿命は百万年から二百万年程度と考えられている。

ガラの二億倍の割合で注ぎ出しつつある。五千萬年毎にそれは太陽の總重量に等しい重量を失ふ。この星は幾萬億年の間この割合で重量を失ひつづけて來た筈だ、と想像するのは明かに馬鹿げてゐる。

旗魚座S星のやうな星に取つては、二つの掛替があるだけのやうに思はれる。それは全く最近（天文學上の時間尺に基いて）創造され、従つて今もなほ道樂な青年時代を始めたばかりのところであるか、それとも、その生涯の大部分に亘つて何らかの仕方で重量の喪失を禁じられて來たか、そのどちらかである。多數の論證は最近の創造といふ假説に反對する。この星はほど相等的な年齢の成員から成り立つと考へて差支へない星霧の一つの成員である。

それは、星々が依然として生れつつある印の存在しない空間區域にある。そして、たとへ我々がこの特殊な星のために最近の創造といふ假説を受け容れるにしても、我々にやはり次の事を説明するのに惑ふ。即ち、二二九頁の表に現はれる他の重い星々は、如何にして、エネルギー等分が既に確立されるに至つたほど老ひることができたか？

これらの高度に發光する非常に重い星々は、生涯の大部分に亘つて、何らかの仕方で、精力的な輻射、従つて迅速な重量浪費から救はれた、と想像することは、多くの理由で好ましいやうに思はれ、また實に殆んど避け難いやうに思はれる。簡単に云へば、それらは發育阻

止の例であつて、その重量も一般的外觀も一樣にその眞の年齢を偽ることになると思ふ。もつと先へ行くと、かういふ事がどうして起り得るかを甚だ簡単に且つ自然的に説明する一つの物理的構造が出て來るであらう。

若しこの假説が受け容れられ得るなら、それは局面をすつかり明白にする。それを受け容れるや否や、我々は星々に自分の思ふまゝの年齢を自由に當てがふことができるやうになる。そしてエネルギー等分の法則に依つて示された年齢を、いづれにしてもこの法則に一致することがわかる諸部門の星のために選擇しても自然になる。

我々が今論じたばかりの、法外に發光する星々は、空に於ける比較的稀な物象である。大多數の星は、太陽と比較できる、又は明かにそれ以下の、光度と重量を持つてゐる。そしてこれらのものに取つては困難は存在しない。實際、發育阻止の假説は、若し我々が多くの星のためにその助けを借りなければならぬとすれば、それ自體の重みで壞れてしまふであらう。それが維持できるのはまさしく我々がそれを減多に使用する必要がないからである。太陽の過去の歴史をかなり正確に提供し、かくしてその年齢を凡そ八萬億年以下に定めるものとして、我々は二九〇頁の表を受け容れて差支へない。そして、一般的にそれと似通つた表も空の星々の大部分に當て嵌るであらう。

第四節 星のエネルギー源

我々が恒星に當てがふに至つた五萬億年以上の年齢は、太陽は生れた時に現在の重量の少なくとも二倍、恐らく二三倍を持つてゐたに違ひないことを意味する。誕生時の太陽に存在してゐた各一噸に對して、今日ではたゞ數ハンドレッドウェイト（譯者註、一ハンドレッドウェイトは一噸の二十分の一で、百十二ポンドに相當する）残つてゐるだけである。その他のものは變形して輻射となり、空間の中へ流れ去つて永久に太陽を去つたのである。

前章で、我々は、放射性原子の自然分解に伴う、重量の輻射への變形を論ずる機會を與へられた。地球上で知られてゐるこの現象の最も精力的な實例は、ウラニウムの鉛への變形である。そこでは總重量の約四千分の一が輻射に變形する。太陽に於いては、それに相當する分數は、半分であり、十分の九であり、又は九十九%でさへあるかも知れない。しかし、何れであるにせよ、それは確かに四千分の一を越えてゐる。かくして太陽が光と熱を發生する過程は、地球上で知られてゐるどんな過程よりも遙かに精力的な、物質的重量の輻射への變形を含んでゐなければならない。

ペリン及びエディントンが、或る時暗示したところに依ると、この過程は、陽子及び電子から複雑な原子核を造り上げることであるかも知れない。特にエディントンが考察した、この過程の最も單純な、最も好都合な實例は、ヘリウム核の造り上げに見出される筈である。ヘリウム原子のもろもろの成分は、四つの水素原子のそれ、即ち四つの電子と四つの陽子と全く同一である。若しこれらの成分が、物質的重量の輻射への變形なしに調整され得たら、ヘリウム原子は水素原子の重量のきつかり四倍を持つであらう。現實的事實に於いて、アストンはその重量の比が只の三・九七〇であることを見出した。これと四・〇〇〇との相違は、ヘリウム原子が四つの水素原子の結合に依つて造り上げられることがあるとすれば、その時去つて行く輻射の重量を表すに違ひない。百三十分の一といふ重量の喪失は、輻射性變形に起るよりも非常に大きい。然しさうであつてさへ、それは星々のための適當な生涯を提供しない。最初純粹な水素から成り立つてゐた太陽の、全くヘリウムから成り立つ太陽への變形は、約一千億年に亘つて、太陽の現在の輻射率で輻射を提供するにすぎないであらう。そして、エネルギー等分などのやうな力學的證據は、もつと先へ行つて考察する他の證據と同様に、星々のためにこれよりも遙かに長い生涯を要求する。

物質の絶滅

近代物理学は、輻射を發する星のために十分長い生涯を提供し得る一つの過程を暗示し得るだけである。それは、物質の現實的絶滅といふことである。さまざまの線上に於ける證據に依ると、非常に重い星々の諸原子は、大概、それほど重くない星々の諸原子と根本的に違つてはゐない。かくして、重い星と軽い星との間に於ける重量相違の第一原因は、原子の質に於ける相違ではない。それは原子の數に於ける相違である。重い星は諸原子の實際の消滅を経て初めて軽い星に変化し得る。これらの原子は絶滅されるに違ひないし、その重量は輻射に變形するに違ひない。

一九〇四年に私が最初に世人の注意を促したのは、大きな量のエネルギーが物質の絶滅に依つて遊離されることに對してであつた。即ち、陽電荷と陰電荷とは、共に突進し、互に絶滅し合つて、自己のエネルギーを輻射として空間に遊離させるのである。翌年アインシュタインの相對性理論は一定量の物質の絶滅に依つて造り出されるエネルギーを計算する一つの手段を提供した。それに依ると、絶滅される實質の性質又は條件は無視するとして、一グラムに付き 9×10^{10} エルグの割合でエネルギーは遊離することがわかつた。私はその後この

エネルギーの源が星々に許す生涯の長さを計算した。しかし、計算された幾萬億年といふ生涯は、その頃有効であつた天文學的證據に依つて、必要とされるものよりも一層大きいやうに思はれた。その時以來、絶えず積み上げられた新しい證據、殊に現在の章で論ずるものは、全くこれらの長さを持つ星の生涯を要求することがわかつた。その結果、大多數の天文學者は、今は物質の絶滅といふことを星のエネルギーの最も蓋然的な源と見做すに至つた。

今述べたばかりの考察に加へて、他のもろもろの考察も、物質の絶滅が星々の中で進行してゐる根本的過程であることを示す。若し物質の絶滅といふことがなかつたら、星は自己の重量を、全體のほんの小部分だけ變更し得るにとどまる。例へば、放射性分解を伴ふ例の四十分の一とか、水素からヘリウム原子が造り上げられる時に生ずる例の百三十分の一とかのやうに。星の重量は實際上一生涯を通じて不變のまゝに保たれることはないであらう。これは勿論必然的に、我々が信ずるよりも遙かに短い生涯を星々に當てがふであらう。といふのは、太陽は毎日輻射に於いて三千六百億噸の重量を失つてゐるといふ事實を、何物も變へることはできず、従つて、若し太陽の重量があまり變化し得ないとすれば、それは長い間輻射を放出した筈はないからである。

我々が既に見たやうに、現在の宇宙に於いては、星の光度は主にその重量に依存する。若し我々が、それと同じ事態がいつも勢力を占めてゐたと想像するなら、その時には、一生涯を通じて同一

の重量を保つてゐる星々は、いづれにしても輻射能力が盡きるまでは、ほど同一の光度を保たなければならぬであらう。でなければ、観測とはあべこべに、太陽に等しい重量を持つ星々が凡てのあり得べき光度を持つことになるであらう。かくして、若し我々が物質の絶滅といふ假説を棄てるなら、何らかの支配機構を想像する必要が起つて来る。それは、太陽と同じ重量を持つ星々に、少なくとも絶對的消耗のために最早輻射を放出することができなくなるまで、ほとんど太陽と同じ割合でいつも輻射を放出させ、他のあらゆる重量を持つ星々に對しても同様の事をするやうな種類のものでなければならぬ。

さういふ支配機構が存在すると想像することに對しては、どんな一般的反對論も存在するやうに思はれない。そして實際さういふ機構はラッセル及びエディントンに依つて主張された。しかしさういふ機構を詳細に考察すると、我々は第五章で考察する様々の反對論に出會す。この中の第一位のものは、それに依つて支配される星々は、我々が見得る限り、非常な爆發状態にあるだらうといふことでのる。そして、我々がさういふ支配機構の假説を放棄するや否や、光度は密接に重量に依存するといふ觀測に基いて、星の重量はその光度が減少するに従つて減少すると想像しなければならなくなる。これは我々を即座に物質の絶滅といふことへ連れ戻す。

同じ方向に向ふそれ以上の考察をここに擧げることができる。我々が既に見たやうに、『重量の

『一噸當り燭光』は一層重い星に於いて最も大きい。その直接の結果として、一噸當りの重量喪失は最も重い星に於いて最も大きいことになる。重い星は一噸に付き一ハンドレッドウェイトを失ふのに、軽い重量の星は一噸に付き僅か數ポンドほど失ふにすぎないかも知れない。その結果、時間の経過は星々の重量を同等にする傾きがあることになる。この原理は疑ひもなく現在の星々が餘り大きな重量範圍を示さない理由を大部分説明する。連星系の二つの構成員に適用すると、この原理はまた幾つかの興味ある結果を引き起す。この原理に依ると、連星系が老ひるに連れて、その二つの構成員は絶えず重量に於いて一層同等にならねばならないことがわかる。かくして、二つの構成員の重量の相違は、老ひた連星に於いては若い連星に於いてよりも一層少なくならなければならない。

この最後の結論は觀測的に試験することができる。分光連星に關して、エイトケンは次の事を見出した。即ち、連星の二つの構成員の重量比は、大きな重量を持つ若い系統のための約〇・七〇から、その構成員が殆んど太陽と同様になる老いた系統のための〇・九〇にまで増加する。變化方向は理論に依つて預言された通りのものである。變化量は、今云つた二つの状態の間に於いて幾萬億年といふ時程を示す。他の天文學者たちも、蝕連星及び可視連星に依つて持ち出された、これに相應する諸問題を研究して、殆んど同一の結論に達した。理

論に基く豫言は、連星系のそれぞれの型に依つて別々に確證されるやうに思はれた。

大體に於いて、我々が物質絶滅の假説からどの方向へ逃れようとしても、我々がもろもろの事實を説明するために設ける他の假説が、早晚物質の絶滅といふことに還つて行くやうに思はれる。

我々はこの假説が物理科學の中に引き入れる變化の革命的性質を看過してはならない。十九世紀物理學の二つの根本的な隅の首石、即ち物質の持續及びエネルギーの持續といふことは、物質にもなりエネルギーにもなり得る單一の本體の持續といふことに依つて、双方とも排除される。或いは寧ろ、それと置き代へられる。物質及びエネルギーは、不滅のものではなくなつて、一グラムに付き 9×10^{10} エルグといふ一定の交換率に従つて、交換できるやうになる。

然も、別の角度から眺めれば、件の假説を受け容れても物理學は既に過去に於いて踏んだ道を一階段だけ前進し得るに過ぎない。熱、光、電氣は、すべて順々にエネルギーの形態であることがわかつた。物質絶滅の假説は、この目録に別のものを附け加へようと企てるに過ぎず、物質そのものもエネルギーの形態となる。

この假説に従へば、地球上の生活を可能にする全體のエネルギー、即ち、地球を温めたり

我々の食物を生長させたりする光や熱、我々が焚く石炭や薪の中に貯蔵されてゐる日光は、我々が十分遠く廻つて行けば、太陽に於ける電子及び陽子の絶滅から生ずることがわかる。太陽は自己の實質を破壊しつつけて、我々を生きさせてくれる。又は、恐らく、その結果我々は生きることができると言つた方がよからう。太陽や星々の諸原子は、結局エネルギー入りの瓶であつて、瓶の各々は宇宙の至る所に光や熱の形態でそのエネルギーを壊したり振り落したりすることができ。太陽や星々が自らの生涯を始めた時に持つてゐた諸原子の大部分は、既にこの運命に遭遇した。残りのものも早晚同じ運命にすることになるのは疑ひない。半世紀前の科學上の著作家たちは、石炭は『瓶詰の日光』であるといふ繪畫的敘述を喜んだ。彼等は我々に次のやうに考へることを求めた。日光は古代の未開墾地の植物の上に落ちた時瓶詰にされて、幾百萬年の後、我々の竈で使用するために貯蔵された、と。近代の見解に基くと、我々はそれを、瓶詰にし直された日光、或は寧ろ瓶詰にし直されたエネルギーと考へなければならぬ。最初瓶詰にされたのは、幾萬億年も前のことで、太陽も地球もまだ存在してゐず、エネルギーが初めて陽子及び電子の中に閉ぢ込められた時であつた。わが太陽を平凡に諸原子の單なる集合と考へる代りに、我々はそれを暫くの間、既に幾萬億年の間貯蔵されて來たエネルギー入りの瓶の巨大な金庫と考へよう。太陽がこれらの瓶を供給

するのは大した数であり、その各々に貯へられてゐるエネルギー量は非常に大きいので、七、八萬億年の間光と熱を放射した後でさへ、依然として來るべき七、八萬億年の間光と熱を供給するに足るほどの残り物がある。

二つの量的考察が、これらの過程をもつと明るい光に照らして示す助けとなるかも知れない。我々が既に見たやうに、太陽が現在貯藏してゐる原子は、現在のやうな破壊率で、十五萬億年の間續くであらう。これが意味するのは、毎年十五萬億に一つの割合で原子が破壊されるといふことである。それは、太陽の莫大な連續的なエネルギー放出を起すには馬鹿げたほど小さいやうに思はれるかも知れない分數である。しかし、我々は次の事を反省して見よう。即ち、太陽の表面から一時平方に付き**約五十馬力**の割合で絶えず注ぎ出てゐるエネルギーは、太陽の身體の巨大な内部に限なく發生するのであり、一時平方の表面から出るエネルギーの流れは、斷面一時平方の、しかし深さ四十三萬三千哩の圓錐形の中に發生する全エネルギーの集中である。さういふ圓錐形は約 10^{23} の原子を含んでゐる。そして毎年十五億に一つの割合で破壊されるに過ぎないにしても、依然として一秒毎に約二萬億破壊されるに足るほどの原子が存在する。

さうであつてさへ、物質の絶滅に依つて遊離させられるエネルギー量は寧ろ驚くほどであ

る。それは他のどんな處置に依つて有効にされるものとも全く違つた順位の大きさである。

一噸の最良石炭を純粹酸素の中で燃燒すると、約 5×10^{16} エルグのエネルギーが遊離する。

一噸の石炭を絶滅すると、 9×10^{26} エルグほど遊離する。それは前者の百八十億倍である。石炭の普通の燃燒に於いては、石炭に含まれてゐるエネルギーの最頂上の上皮をしやくり棄てるだけのことである。その結果總重量の九九・九九九九九九四％は、煙、燃殻、又は灰の形態で後に残る。絶滅は後に何物も残さない。それは完全な燃燒であるから、煙も灰も燃殻も残らない。若し我々が地球上で石炭をこれほど完全に燃やすなら、只の一ポンドで、全ブリテン國民に、二週間にも亘つて、家々の竈や、工場や、汽車や、發電所や、船や、その他凡てのものを維持して行かすことができるであらう。一粒の豌豆よりも小さい一片の石炭で、マウレタニヤ丸に、大西洋を往復させることができるであらう。

純粹の天文學的證據は、太陽や星々に於いて、原子が絶えず絶滅されつつあるといふ結論に達した。ここに合せ繪判じの一斷片がある。それは我々が前章で試験的に合せて見たものに完全に合致する。我々が前章で見たやうに、數學的物理学に於ける最近の諸研究は、地球で受けられる高度侵透性輻射は空間に於ける物質の絶滅に起源を持つてゐることを暗示する。そして地球で受けられるこの輻射の量は非常に大きいので、我々は根底に横はる物質の絶滅

を宇宙の根本的諸過程の一つと想像しなければならなかつた。我々は今や發見する。それは恐らく太陽や星々を輝かせ宇宙を生かして置く過程であることを。

物理的解釋

この物質絶滅といふ過程の物理的性質に、更にもう一階段探りを入れようと試みるのは、恐らくやり甲斐のある事である。尤も、その後に續くものは、どんな直接の觀測的確認も現在に役立たないといふ意味で思索的のものである、といふことを前もつて言つて置かなければならない。

我々が既に見たやうに、前世紀に流行した電力学の理論に基くと、水素原子の核と電子は時間の経過だけで互にますます接近し合つて、最後には共に突進して合體しなければならぬ。これが起ると、電子の陰電荷と核の陽電荷とは互に中和するであらう。そして兩者のエネルギーは一閃の輻射となつて消えるであらう。それは二つの相對立する雷雲に於ける陰電荷と陽電荷とがめぐり遭つて互に中和する時の電光の閃きに似てゐる。

もつと最近の量子説は、核と電子とが相互から 0.53×10^{-8} 厘米以内の距離に近づくや否や、この運動に停止を求める。そしてさうすることに依つて、宇宙を活動中の構造物として存在

させて置く。

その他の停止も、この距離の四倍、六倍、十六倍に於いて確立される。しかしここでは、それ以上の進行に對する禁止も絶対のものではない。これらの一層長い距離に於いて、量子説の『ここまででは進み、これ以上は進むべからず』といふ要求は『長い時間を経るまではこれ以上進むべからず』といふ要求と置き代へられるやうに思はれる。そして今や、一層短い距離に於ける禁止も絶対のものでないかも知れないことが、天文學的證據に基いて可能であるやうに思はれる。物理學的目的からすれば、何事も確實にわかるものではないにせよ、ここでもまた、さういふ絶対的禁止が水素原子のためか他のもつと複雑な原子のために存在すべきであることは、波動力學に具體化されてゐるやうな、物理學の一層新しい諸概念に反してゐるやうに思はれる。恐らく核に最も近い軌道に於いて長い間待つた後、電子は進行することを許される。又は、進行するやうに勵まされ若しくは餘儀なくされさへする。それは自ら核の中に這入る。そして一閃の輻射が星に生れる。これは、電子及び陽子の絶滅のための、天文學的確證が要求するやうに思はれる最も明白な機構を提供する。しかし、これが件の機構に關する純粹の憶測的概念であることは明かに理解されるであらう。第五章でこの非常に込み入った問題に關するこれ以上の考察に還つて行くであらう。

若しこの臆測が健實なものであることがわかつたら、星の光と熱を提供する諸原子ばかりでなく宇宙に於けるあらゆる原子が、破滅の悲運に陥つて、早晚輻射に於いて分解し去るに違ひない。固形の大地や永遠の丘が、星々と同じほど迅速にはならないにしても、それらと同じほど確實に、溶け去るであらう。

雲を頂いた塔、華麗な宮殿、

嚴かな寺院、大宇宙そのもの、

然り、それが受け續いだ凡てのものは分解して、

．．．後には片雲も残らないであらう。

そして若し宇宙がこれ以上のものにならないなら、我々はこの引用を續けて、

我々は夢が作り出される材料見たいなものであり、

我々の小さな生命は眠りに取り巻かれてゐる。

と言つたものであらうか——それとも言ふまいか？

第四章 宇宙の開拓

我々は既に空間の驚くべき空虚さに就いて説明した。ウォータロー停車場に於ける六粒の塵は、空間がその最も稠密な部分を星に占められてゐる割合を表はしてゐる。これは別の形式で説明してもよからう。六粒の塵は一千萬億の分子を含んでゐる、と我々は言はう。我々の空間模型が空虚なのは、この非常に多數の分子がたゞ僅か六つの塊の中に悉く集合してゐるからである。現實の空間に於いては、集合の単位は星であり、普通の星は約 10^{30} の分子を含んでゐる——これは非常に大きな數で、それを想像しようと試みても全く無益である。空間の空虚さはどんなに僅少な分子からも生じない。それは次の事情から生ずるのである。即ち、星から星へと擴がつてゐる稀薄な瓦斯の雲を形づくるものは別として、分子は我々が星と呼ぶものゝ巨大な植民地に集合して、その各々に約 10^{24} の成員がある。なぜ空間に於ける分子はかういふ仕方成群がらなければならないか、我々が字を書いたり書物を讀んだりしてゐる部屋々々の分子はさうしてゐないのに？

十分に試された一つの科學的方法に従へば、我々はこれらの集合體が出来上つた理由を發見しようと試みる事ができる。それは、先づ、それらが既に出来上つた今、何がその一つを一連のまゝにして置くかを吟味することに依つてである。地球の大氣は約 10^{21} の分子から成り立つてゐる。なぜそれらは空間の中に擴がらないで、大氣の中に壓し下げられてゐるのか？ それに對する答へは勿論地球の引力に依つて與へられる。地球の表面から一秒に六・九三哩以上の速力で發射された小彈は、空間の中へ飛び去るであらう。なぜなら、地球の引力的牽引は、それがそれほど的高速力で運動するのを後へ引き戻すのに適しないからである。しかし、一秒に六・九三哩以下の速力で發射された小彈は、地球を離れない。この速力はそれを地球の牽引から脱出させるのに適しない。かくして、地球の大氣を形成してゐる分子の小彈は、一秒に一哩の三分の一以下の速力で飛んでゐるので、逃げ去る機會が全く無い。地球の引力は絶えずそれらを地球の方へ引き戻すので、地球は空氣の外被をかぶつたまゝであるのである。

時たま、一つの分子が他の諸分子との法外に好運な衝突を相次いで經驗し、從つて一秒に六・九三哩以上の速力に達することがあるかも知れない。さういふ速力で地球の大氣の外側に達する分子は、地球を全く離れて、太陽系外の漂流分子の群に仲間入りするであらう。地

球は絶えずかういふ仕方で自己の大氣を流しつつある。しかし計算して見ると、この喪失は幾萬億年にさへ全く些細なものであることがわかるから、我々は地球の大氣を永久のものと見做して差支へない。

太陽の場合にも同じである。太陽熱は太陽大氣の分子を破壊してその構成原子とした。そしてこれらの原子は一秒に約二哩といふ平均速力で運動する。しかし、原子の小弾は、太陽から全く逃れるには一秒に約三百八十哩の速力で運動しなければならないであらう。そのために太陽原子は依然として大氣を形成する。若し普通の部屋にある空氣分子が悉く部屋の中に集められて一塊になつたら、さうやつて形成された空氣の球は、勿論、その最外分子に、地球や太陽が自己の大氣分子に加へるのと同じ種類の引力的牽引を加へるであらう。しかし、この空氣の球の重量は非常に小さいから、その引力的牽引の強度も小さいであらう。實際、それは非常に弱いので、最外分子をそれから取り除くには一世紀に約一ヤードの速力で十分であらう。普通の空氣の分子は一秒に約五百ヤードの速力で運動してゐるから、さういふ空氣の球は直ぐ部屋中に散らばるであらう。他方で、若し部屋が太陽を容れるに足るほど大きかつたら、太陽の凡ての分子は、丁度太陽の中にさうしてゐるやうに、中心にある球の中に留まることができる。最外分子は、逃避するには一秒に少なくとも三百八十哩の速力

を要するであらう。そのために、一秒に五百ヤードそこいらといふ實際の速力では何の役にも立たないであらう。

遊星大氣

一般には、逃避するとかしないとかいふ問題は、最外分子の分子速力と、塊の残りの部分がそれらに加へる引力的把握の強度との間に於ける戦ひの結果に依存する。太陽系はこれに就いての實例を澤山提供する。月は大氣の分子に對して引力的把握を地球の六分の一ほど加へるに過ぎない。その結果、月が曾て持つてゐたかも知れないどんな大氣も、今までに逃避したわけである。水星は地球の引力的把握の五分の二を持つてゐるに過ぎないが、太陽に近いかかげで、太陽の方へ向いたその表面は非常に熱い。その結果、その大氣も逃避した。火星が自己の分子に加へる引力的把握は地球の五分の一に過ぎないが、その表面は一層冷たい。計算して見ると、水蒸氣や一層重い分子は残る筈であるのに、一層軽いヘリウムや水素の分子は逃避した筈であることがわかる。土星の最大衛星と、木星の二つの最大衛星は、月と殆んど同じ引力的把握を働かすであらう。しかしそれらの表面は月の表面よりも恐ろしく冷いので、それらは大氣を保ち得る筈である。幾人かの觀測者はこの三つの衛星に何れも大

氣が存在する印を見たと言張する。四つの大遊星は悉く自己の分子に對して地球よりも一層強い引力的把握を加へ、従つて容易に自己の大氣を保つ。ところが、金星も、その引力的把握は地球とほゞ同じであるが、これまた大氣を保つてゐる。

これらの考察は、なぜ星々の分子は、集合體が一度形成された以上、必然的に集合したまゝ續いて行かなければならないかを廣汎に説明する。しかし、これらの集合體が如何にして且つ何故先づ第一に出來上つたかといふ疑問は、それよりも遙かに複雑である。例へば、各々の星に、 10^{54} 又は 10^{58} よりも寧ろ約 10^{56} の分子が存在しなければならぬやうに何物が決定したか？

第一節 引力的不安定

現在星を一塊のまゝにして置く諸力は、それが先づ第一に一塊のまゝ落下するのに對しても責任がなかつたであらうかどうか、といふことを研究するのは自然である。これを研究するには、引力の集合力を幾らか詳細に研究しなければならない。

ニュートンが自らの引力法則を公にしてから五年たつて、トリニチイ・カレッジの校長ベントレイは、彼に手紙を書き送つて、新しく發見された引力の力は物質が集合して星になることを説明しないであらうかどうかといふ問題を提起した。これに對して、ニュートンは、一六九二年十二月十日附の手紙で次のやうに答へた。

『私には次のやうに思はれる。即ち、若し我が太陽ともろくの遊星の物質、宇宙の全物質が、天の至る所に一樣に散在してゐたら、そしてあらゆる粒子が他の凡てのものの方へ向ふ固有の重力を持つてゐたら、そしてこの物質の散在してゐる全體の空間が有限であつたら、この空間の外側にある物質は、自己の重力に依つて、内側にある全體の物質の方へ向ふであらう。その結果全體の空間の中央に落下して、そこで一つの大きな球状の塊となるであ

らう。しかし、若しこの物質が無限の空間の至る所に一樣に配列されてゐたら、それは決して集合して一つの塊になることはできない。しかしその中の幾分は集合して一つの塊になり、幾分は別の塊になつて、無限数の大塊となり、それらが無限の空間の至る所に非常に離れ合つて散在するであらう。かくして太陽や恒星が構成され得たのである——物質は透明な性質のものであると想像すれば。』

私が一九〇一年に行つた正確な數學的研究は、一般的な言葉で述べられたニュートンのこの憶測を確證するばかりでなく、どんな大きさの集合體が引力作用の下で形成されるであらうかを計算するための方法をも提供する。

凝結の形成

部屋のまん中に立つて手を打つ。一般的な言葉で云へば、これは音を立てることである。

しかし、物理學者は、その専門的資格に於いて、音波を造り出すことだと言ふであらう。兩手は、互に接近すると、中間にある空氣分子を驅逐する。空氣分子は驚いて逃げて空氣の外層分子と衝突し、今度はそれらが驅逐されて、更に遠い層と衝突する。最初兩手の運動に依つて起された攪亂が、波の形態で先へ先へと運ばれて行く。個々の分子は一秒に五百ヤード

といふ平均速力を持つてゐるにしても、その運動のジグザグの性質は、攪亂の速力を、我々が既に見たやうに、一秒に約三百七十ヤードに減ずる——これは普通の音響速度である。攪亂がどんな一點に達して、そこにある分子の数は異常に高くなる。といふのは、驚いて逃げる分子がその一點にある正常な分子の分前を増すからである。これは勿論速力の超過を起す。私の脳髓に感覺を傳へて、諸君が兩手を打った時の音を聞えさせるのは、私の鼓室に作用するこの超過壓力である。

この壓力超過は、勿論長い間持續することはできないので、それを起こす分子の超過は迅速に消散するに違ひない。波が傳はつて行くのはさういふ風にしてである。然も、そこにはその消散と抵抗する一つの要因がある。各分子は自己の凡ての隣接者に引力的牽引を及ぼすので、分子の超過が存在する場所には、引力の超過も存在する。普通の音波に於いては、この超過は絶対に感知できないほどの量である。然もそれは、大した事でもないが、それら分子を抑制して、他の場合には自由に離散するのを妨げる一つの微小な力を提供する。これと同じ現象が天文學的規模に於いて起ると、それに相當する諸力は壓倒的な重要性を持ったものになるかも知れない。

どんな空間區域の瓦斯でも、そこに存在する分子の数が、それを取り巻いてゐる空間の平

均數以上だとすれば、共々はそれを『凝結』と名づけていい。すると次の事を證明することができる。即ち、若し凝結が十分な程度のものであるなら、引力の超過は離散を全く禁ずるに足るかも知れない。さういふ場合には、凝結は外側から分子を引き入れることに由つて絶えず増大するかも知れず、その分子速力はその時には分子を再び運び去るのに適しない。

かういふ事が起るかどうかは、勿論、凝結の大きさに依存すると同様に、瓦斯に於ける分子運動の速力に依存するであらう。しかしそれは凝結過程が進行した程度には全く依存しないであらう。どんな凝結に於いても、その中にある分子の超過數を二倍にすれば、凝結が行した程度も二倍になる。すると、凝結を増加する傾きのある引力的牽引も二倍になるが、またそれを消散する傾きのある超過壓力も二倍になる。すると、秤の兩側に於ける重量が二倍になるが、秤は依然として同じ方向に揺れる。若し一旦諸條件が凝結の増大に好都合になつたら、凝結はその吸収する分子が最早残らなくなるまで自動的に増大しつづける。

凝結の空間範圍が大きくなればなるほど、その連續的増大に取つて諸條件がますます好都合になる。他のものも同様だとすれば、直径二百萬哩の凝結は直径一百萬哩の凝結の二倍の引力を働かせるであらう。しかし超過壓力は双方の場合に同一である。かくして、凝結が大きくなればなるほど、それはますます増大しつづける見込みがある。そして想像上で、

段々大きくなる凝結に移ることに依つて、我々は早晩、相次いで増大しつづけるほどの大きさを持つ凝結に達する。自然法則はここでは無制限に競争をする法則である。一事に成功すればまた他事に成功する。従つて、初めから大きな凝結は、更にそれ以上増加する能力を持つのに、小さな凝結は單に消散するだけであることがわかる。

假に今、一樣な瓦斯の巨大な塊が、空間の中であらゆる方向に幾百萬億哩も擴がつてゐるとしよのう。すると、その一樣性を破壊するどんな攪亂も、あらゆる考へ得べき大きさの凝結を生じさせると見做して差支えない。

この事は最初は明白であるやうに思はれないかも知れない。小範圍の瓦斯に影響するにすぎない攪亂は、小範圍の凝結を起すにすぎない、と考へられるかも知れない。さういふ論争は、小物體の引力的牽引が宇宙隈なく作用する時の仕方を看過する。月は遠い地球の上に潮汐を起すが、また、比較にならないほど少ないにもせよ、星々の中の最も遠いものの上にも潮汐を起す。子供が乳母車から自分の玩具を投げ出す度に、それは宇宙に於けるあらゆる星のエネルギーを攪亂する。引力が作用してゐる間は、攪亂は宇宙全體よりも一層小さなどんな區域にも局限されることはできない。凝結を起す攪亂が激しいほど、凝結は先づ第一にますます強度になるであらう。しかし最小の攪亂さへ凝結を生じさせるに違ひない。

尤も、これらの凝結の強度は極めて弱いかも知れないが。そして、我々が既に見たやうに、凝結の運命はその強度に依つて決定されないで、その大きさに依つて決定される。最初の強度はどんなに弱かつたにしても、大きな凝結は増大しつづけ、小さな凝結は消滅する。早晩、大きな凝結の集合以外には何物も残らなくなる。既に言及した數學的分析に依ると、一定の最小重量といふものが存在して、この重量以下の凡ての凝結は單に空間の中へ消散し去るだけであることがわかる。この最小重量は、若し瓦斯のこの重量の十分の一が空間の中に孤立して、殘餘のものがすっかり絶滅されたら、その表面から分子は全く逃避することができなくなるほどのものである、といふことは我々の現在の目的に取つては殆んど正確である。

* これは殆んど正確ではあるが、絶対に正確であるとは云へない。正確な數學的分析に依ると、最小凝結の重量Mは、

$$M = \left(\frac{1}{3} \pi k\right)^{\frac{3}{2}} \frac{c^3}{\gamma^{\frac{3}{2}} \rho^{\frac{1}{2}}}$$

に依つて興へられる事がわかる。この場合、 c 、 μ 、 σ 、 k は、分子速度、引力常数、最初の密度、及び比熱の比である。だから、速度 c をもつて運動する分子が全く逃避することのできない件の重量は、

$$M = \frac{3}{4\pi} \frac{c^3}{\gamma^{\frac{3}{2}} \rho^{\frac{1}{2}}}$$

に依つて與へられる²²⁾。
 $\kappa = 1/2^{1/3}$ とすれば最小重量の凝結は、丁度分子を保つに適する重量の九・八倍である。

我々は次のやうに言つて差支へない。最初の一樣に分布された瓦斯塊が『不安定』だつたのは、どんなに微かな攪亂も、その對座を全く變更させるからである、と。それは、切實で立つて均衡を保つてゐる棒とか、今に裂けようとする石鹼泡とかが持つてゐるやうな力學的屬性を持つてゐたのである。

原子混沌

23 これが後に本書の著者ジェームズ・ジーンズの名を冠してジーンズ不安定性と呼ばれるようになった理論で、この質量はジーンズ質量と呼ばれる。

これらの一般的な理論的諸結果は、今は我々の思ひ通りにどんな塊の瓦斯にも當て嵌めることができる。我々は先づそれらをニュートンが假定した『無限の空間の至る所に一様に配列された物質』に當て嵌めて見よう。我々は想像上で、現在の星々や星霧の實質が悉く空間の至る所に一様に擴がつた時代に還つて行く。簡単に云へば、宇宙創成に關する大抵の科學的理論が出發點とした原始混沌から出發する。ハッブルが見積つたところに依ると、若し宇宙の我々が知つてゐる部分に於ける物質の全體が空間の至る所に一様に再分布されたら、さうやつて形成された瓦斯は氷の密度の約 1.4×10^{-31} 倍を持つに過ぎないであらう。この見積りは、現在の状態を表はすものとしてさへ、殆んど確かに低い方である。そして、原始瓦斯を構成し換へようとするに當つて、我々は中間時期に溶け去つて輻射となつた分子や原子を差引いて何物かを附け加へなければならぬ。大體に於いて、恐らく 10^{-30} といふ數字は假説上の原始瓦斯に當てがふべき合理的密度ではあるまい。それは殆んど考へられないほど低い。水の八百分の一の密度である普通の空氣に於いては、相隣接した分子間の平均距離は一吋の約八百萬分の一である。我々か今述べつつある原始瓦斯に於いては、それに相當する距離は二、三ヤードである。この對照は再び空間の極度の空虚さといふことに還つて行く。

この原始瓦斯の中に持續する、凝結の最小重量はどれだけであるか？

計算して見ると、若し普通の空間がこの異常な程度にまで稀薄になつたら、どんな凝縮も、少なくとも太陽の重量の六千二百五十萬倍を持つてゐなければ、持續して増大しつづけることはできないことがわかる。それよりも少ない重量の瓦斯が、その最外分子に加へる引力的牽引は非常に微かであるから、それらの分子の、一秒に五百ヤードといふ普通の分子速力は、凝結全體の敏速な消散を起すであらう。

他の假定された瓦斯密度や、他の分子速度に關しても、同様の計算を續行することができ。次の表は、最初の欄に示した密度と、その他の欄の劈頭に擧げたさまざまな分子速度とを持つてゐる、原始の混沌瓦斯塊の中に形成される凝結の重量を示したものである。各々の場合に、凝結の重量は太陽の重量が單位にしてある。

水を單位とした 密度	一秒五百ヤードの 分子速度	一秒千ヤードの 分子速度	一秒二千ヤードの 分子速度	一秒三千ヤードの 分子速度
10^{-29}	25,000,000.00	200,000,000.00	1,500,000,000.00	5,000,000,000.00
10^{-30}	62,500,000.00	500,000,000.00	4,000,000,000.00	13,000,000,000.00
1.5×10^{-31}	160,000,000.00	1,300,000,000.00	10,000,000,000.00	30,000,000,000.00

あらゆる既知の星は、太陽のそれと比較できる重量を持つてゐる。かくして、若し、

ニュートンが推測したやうに、星々がかうした種類の凝結として生れたとすれば、この表に於けるもろくの記入は、單位と比較できるものでなければならぬ。我々が今考察したやうな形式に於けるニュートンの推測は、すべての計算された重量は太陽のその幾百萬倍である以上、明かに維持することができない。我々が今考察しつつあるやうな種類の原始混沌が曾て存在してゐたとすれば、それは凝結しても星とはならないで、それよりも恐ろしく重い凝結となり、その各々は幾百萬の星を合せたほどの重量を持つてあらう。

第二節 大星霧の誕生

ところで、意味深いのは、空間に於ける諸物體が、今しがた計算されたもの、即ち大きな銀河外星霧に匹敵した重量を持つてゐることである。重量がかなり正確に決定され得る星霧が二つある。即ち、アンドロメダ座大星霧（第四畫）と乙女座星霧NGC 4594（第十五畫）とである。ハッブルはこの二つを次のやうに見積つた。

星霧M三一の重量 太陽の三十五億倍

星霧NGC 4594の重量 太陽の二十億倍

これらの見積りは、ここでもまた恐らくどちらも低い方である。しかし双方の一般的光度順は、次の事を暗示するほどのものである。即ち、最初原始星霧から形成された凝結は、大きな銀河外星霧であつて、單なる星ではなかつたに違ひない。大星霧はかういふ仕方で形成された、といふことは勿論どんなによく見ても一つの推測に過ぎない——假説上の原始星霧が存在しさへしたかどうかを決して知ることができない理由は他に無いとしても。しかしそれは、現在のものゝ星霧が存在してゐる事實を説明するために我々が組立て得る最も合

理的な假説であるやうに思はれる。これらの星霧は一般に互に類似してゐるので、それらは悉く同一の作因に依つて造り出されたに違ひないといふことは尤もらしく思はれる。そして我々が今考察したばかりの事柄は、連續する原始星霧の假定的存在は別として、眞實の原因に基く一つの合理的説明を提供する。

もろくの大星霧は勿論正確に類似し合つてはゐない。そして我々の次の研究はそれらの持つ相違の起源に關したものでなければならぬ。

若し原始瓦斯星霧に於ける凝結が、絶対に規則的な仕方であらうとすれば、最後の結果として、全く相等的な類似したもろくの瓦斯塊が、全く規則的に間隔を置いて配列されることになるであらう。しかし、自然は減多にこれほど規則的になるものではない。そして、觀測された星霧の配列が一樣の間隔を置いてゐないからと云つて、又は、それのもろくの成員が重量に於いても相等しくなく、鈞介よく配列されてゐないからと云つて、驚くには當らない。原始瓦斯に於ける最初の凝結が収縮した時、それらの凝結は、潮流を起したに違ひない。そして、これらの潮流は絶対に鈞合の取れたものになる見込みは殆んどないであらう。若し、凝結しつつある瓦斯塊の各々に於ける運動が、あらゆる點で直接に凝結の中心に向つてゐたら、最後の結果として、全く運動を缺いた球状星霧が出來上つたで

あらう。しかし釣合の少ないどんな潮流系統も、収縮しつつある塊の各々に廻轉を與へることになつたであらう。この廻轉は疑ひもなく最初は非常に遅いであらう。しかし『角惰力の持續』といふ周知の原理に基けば、廻轉しつつある物體が収縮すると、その廻轉率は増加しなければならぬ。かくして凝結過程が完成すると、最後の結果として、相異なる率で自轉する一續きの星霧が出来るであらう。

星霧の自轉

そしてこれは全く觀測と一致する。我々の證據が役立つ範圍内に於いてもろくの星霧は自轉し、その率は異ななつてゐる。自轉しつつある塊の表面のさまざまな部分は、必然的に空間の中で相異なる速力を持つことになる。例へば、太陽は一つの方に自轉してゐるので、我々に見える大府はいつも東から西へ進行する。その結果、東縁はいつも地球の方へ進行しつつあるのに、西縁は我々から遠ざかりつつある。即座に相次いで太陽の表面の相異なる部分に分光器を向けると、これらの速力差がわかる。それは太陽の自轉を確かめるばかりでなく、その量を測定することをも可能にする。星霧もこれと同じ仕方で行験することができ、そして試験して見ると、その多數は、固體——例へば廻し獨樂——のやうな全く規則的

な運動をもつて自轉しつゝあることがわかる。地球的標準に依つて測定すれば、その自轉率は異常に遅いやうに思はれる。例へば、アンドロメダ座大星霧M三一は、一回の自轉を終るのに約一千九百萬年を要する。しかしこの外見的の遅さは、この星霧の巨大な大きさの不可避的結果である。一千九百萬年かかつて一度廻るのにさへ、この星霧の外部の諸部分は一秒に幾百哩といふ速力をもつて運動しなければならない。

もろくの星霧の中の少數は全く形が不規則であるが、大多數は規則正しい形を持つてゐる。そして非常に意味深いのは、これらの形が、自轉する瓦斯塊の示す形と全く同じであることである。この事は數學的に計算することができる。實際に於いて、もろくの星霧は自轉する瓦斯塊であるといふ想像に取つては、これよりも遙かに有力な例がある。表面光度やその他の特徴のやうな純粹の觀測的證據から、ハッブルは次の事を發見した。即ち、これらの星霧の殆んど凡ては單一の線系列に配列することができる——一本の糸に並んだ珠數玉のやうに、順々に配列することができる。そしてこの順序は、漸次に増加する速力率をもつて自轉する瓦斯塊の對座のために、以前純粹の理論的方法に依つて計算された系列と實際上同一であることがわかつた。

我々はこの現論的對座の系列をその自然的順序に於いて吟味しよう。

全く自轉してゐない瓦斯塊は、勿論それ自體の引力の下で圓形を取るであらう。全く圓形な星霧は澤山知られてゐる。第十六畫の第一圖はその典型的な實例である。少し自轉してさへ、塊は地球や木星のやうに、少し扁平になつた橙の形を取る。この形を持つた星霧も澤山知られてゐる。同じ寫眞畫がその一例である。

自轉程度が高くなると、扁平化の程度が増加する。しかし理論的計算に依ると、橙の形から間もなく離れることがわかる。赤道が先づ顕著な膨みを示しはじめて、最後には、十分に自轉しながらこれが鋭い縁になり、この自轉する塊は今二重凸レンズのやうな形になる。この理論的豫言は觀測に依つて十分に確證された。といふのは、これらのレンズ形星霧は空に澤山觀取されるからである。第十六畫の第三圖はその一例である。

次の段階は幾分感動的である。即ち、それ以上の自轉は、豫期できるやうに、更にそれ以上の扁平化を生じさせはしない。今までは、自轉が増加する毎に赤道の脹みが一層鋭くなつたが、これ以上鋭くなる可能性はない。理論的證明に依ると、扁平化も最高可能の限界に達したのである。そして次の段階は、物質が赤道の鋭い縁から放逐されて、赤道面の至る所に擴がることでなければならぬ。ここでもまた觀測が理論を確證する。第四圖及び五圖（第六圖）は實際に觀測された星霧の典型を示したもので、前者は我々が既に論じて來た乙女座

星霧である。

いま赤道面に存在する比較的薄い瓦斯層は、少なくとも一つの點では、『無限の空間の至る所に一樣に配列された』ニュートンの物質に類似してゐる。さまざまの仕方でその中に攪亂を起すことができる。そして、どんな攪亂も、どんなに微かなものであらうと、一系列の凝結の創造となつて終るに違ひない。以前のやうに、或る大きさの限界以下のものはおのづから消滅する。ところが、この限界以上のものは、赤道面にある瓦斯をすつかり吸収するまでは、絶えず強度を増加する。ここでまた、假説上の原始混沌の場合のやうに、我々は永久的存在を續ける見込みのある凝結の最小の大きさを計算することができるとして、一度結果は非常に意味ぶかいことがわかる。

二つの目立つた星霧の總重量に關するハッブルの見積りは既に示した。この二つの星霧の距離、從つてまた大きさはわかつてゐるから、星霧全體を通じての瓦斯の平均密度を計算するのは容易である。M三一に於ける平均密度は、水のその約 5×10^{-22} であることがわかり、NGC 四五四の、それに相當する數は、 2×10^{-21} である。これらの數字はもろくの星霧の外域に於ける物質の密度に關する何らかの觀念を提供する。これらの密度は、最初の原始星霧の見積られた空間密度の約一億倍であるにしても、依然として殆んど考へられないほど

低い。依然として一吋立方に一つばかりの分子が存在してゐるに過ぎない。そして蠅の肺臓から吐き出される只一度の呼吸さへ、大きな大伽藍にこの密度の空氣を一杯充たすことができる。

更に進んで、この低い密度の瓦斯の中に出来上がつて持續し得る最小凝結の重量を計算すると、次の表に示したやうな結果が得られる。瓦斯が星霧の赤道面に擴がつた時に起るに違ひない冷却を斟酌して、分子速度は寧ろ低くしてある。

また、凝結の重量は、太陽の重量を單位として示してある。そしてこの表に於ける記入の大部分が、太陽のそれと比較できる重量を表はしてゐるのは意味深い。最後の欄には星の重量が擧げてある。大星霧の外域に出来上るに違ひない凝結は、星のそれと比較できる重量を持つであらう。

水を單位とした 密度	一秒百ヤードの 分子速度	一秒三百ヤードの 分子速度	一秒五百ヤードの 分子速度
10^{-21}	1.7	36	220
10^{-22}	5	130	625

我 等 を め ぐ る 宇 宙

10 ²³	17	360	2,200
------------------	----	-----	-------

第三節 星の誕生

そして實際、ほとんど疑ふことができないのは、我々が今考察した過程は星の誕生の過程であるといふことである。星霧の寫眞を不注意に一瞥しただけでも、星霧の赤道面の中に放逐された物質は、この平面に一樣に擴がつて存在するものではないことがわかる。それは瘤や結節や凝結になつたことがわかる。これらのものは、既に示した星霧の寫眞の多數に十分に現はれてゐるが、殆んど全面的に眺めることのできた星霧、例へば、第十七畫と十八畫に示した二つのすばらしい星霧に於いては、更に一層明白に現はれてゐる。

これらの瘤は相變らずあまりに大きいので、單獨星と解釋することはできない。それらは恐らく星群である。最大の望遠鏡に於いては、それらは既に第十一畫に示したやうな仕方では別々に分れて多數の光點となる。これらの光點を實際の星と見做さざるを得ない幾つかの理由は既に擧げたが、その中の主な理由は、それらの光點の幾つかはセフェイド變光星のやうな特徴的な光度變化を示すことである。星々は直接に星霧の赤道面に於ける凝結として形成されるのか、それとも、大きな凝結、即ち星霧の寫眞の中に觀取できる瘤が先づ出來上つて、それが後に小さな凝結、即ち星を形成

するのか、それは全く明白ではない。大體に於いて尤らしく思はれるのは、そこには二つの過程が含まれてゐるといふことである——先づ、星霧物質が別々に分れて幾つかの大凝結になり、然る後、これらの大凝結が別々に分れて星になるのである。さういふ過程の繼起が物質の漸次的冷却に伴ふのは尤もである。そしてそこに二つ以上の過程さへ含まれることがあるのは勿論あり得べき事である。これに就いては、いま最後の意見を下す必要はない。それはどう見ても主要な論證の進行に取つては本質的のものでないからである。

星霧の寫眞の蒐集を見ると、我々は星霧進化を追つて行くことができる。これは、第十六畫に示したやうな最も初期の階段から、第十七畫に示したやうな粒状瘤の最初の出現や、第十八畫に示したやうな星々の最初の出現を経て、第十九畫及び第二十畫に示したやうな後期の階段に至つてゐる。この階段に於いては、星霧はほとんど星の雲以上のものではないやうに見える。ハッブルは、この系列をもつと先の方まで追うて行くのが可能であることを發見して、この最後の型の星霧から第二十一畫に示した大小マゼラン雲のやうな純粹な星の雲に至るまでの連續的推移を辿ることができた。かくして、星々は、我々が推測したのと同じ仕方では生れたやうに見える。つまり、彼等の兩親である大星霧は、一般に『引力的不安定』として知られてゐるものの作因に由つて彼等よりも以前に生れたのである。この作因は、どんな混沌瓦斯の塊をも破壊して別々の凝結にする。そして、最初

の瓦斯が薄ければ薄いほど、それから形成される凝結の重量は大きくなる。最初の原始星霧は非常に低い密度だったので、その中に形成された凝結は太陽の何十億倍といふ重量があつた。これらの星霧は、収縮するに當つて密度を非常に増加したので、その自轉のために瓦斯物質が驅逐された時、この物質は凝結して星の重量を持つ塊となつた。我々はそれらを實際に星と信じてゐる。

我々が前の過程に就いて持つてゐる確實な知識は、後の過程に就いて持つてゐるものよりも少ない。前の過程が起つたことがあると考へる我々の唯一の理由は、銀河外星霧が今存在してゐることである。原始混沌の星霧が會て存在したことがあるといふ證據は、それが以前存在してゐたといふ假説が、現在のもろくの星霧が今の通りに存在してゐることに就いての非常に満足な説明をもたらずといふ事實以外には一つもない。他方で、我々は星々が存在してゐることを知つてゐるばかりでなく、瓦斯塊が存在してゐることも知つてゐる。理論に依るとその中から必然的に星が生れなければならぬことがわかる。それらの瓦斯塊は、大星霧の薄い赤道縁である。望遠鏡には、星霧縁と星との双方が見える。そして我々は殆んど實際の誕生過程を研究することができる。

銀河系

若しこれが星々の誕生の本當の記述だとすれば、空間に於けるわが太陽とその伴星は一つの自轉

する星霧から生れたに違ひない。兩ハーシエルの時代以來、次の事が、累々説明題目となつた。即ち、銀河系は、銀河外星霧のやうな一般形を持ち、銀河面は勿論原星霧の赤道面を表はしてゐる。純粹の觀測的根據に基くと、今日の天文學思想は、銀河系全體を、一つの自轉する星霧か、その殘物と見做す方へ迅速に進みつつある。これは、まだ凝結して星になつてゐない一つの中心區域を依然として保つてゐるかも知れない、といふことはあり得べき事でさへある。蠍座や蛇遣ひ座の方向には幾つかの暗星がある。それらは、銀河系の中心を蔽うてゐるか、それとも中心そのものであるか、その何れかであり得る。

一九〇四年に、カプタインは、太陽の附近にある星々の運動方向は無茶苦茶に分布されたものではないことを發見した。星々は、他の方向よりも寧ろ銀河面に於ける或る方向——彼の謂はゆる『星流』——に沿うて、あちらこちらへ運動したがるやうに見える。星々の運動に於けるこの特質は、その起源に就いて何らかの光明を投ずるものと期待していい。

各々の星は、銀河系の他の凡ての星の引力的吸引の下で一つの複雑な軌道を進行する。この軌道を詳細に計算するのは不可能である。太陽をめぐる遊星の軌道が容易に計算できるのは、二つの物體、即ち遊星と太陽が含まれてゐるだけからである。しかし、三つの物體が含まれてゐる時でさへ、各々が他の二つの共同の吸引を受けながら描く軌道を計算するのは不可能である。これは有名

な三體問題であつて、まだ解決されてゐない。銀河系に於いてのやうに、何十億といふ星が含まれてゐる時には、各々の星の軌道を計算しようと試みることは、おのづから無益である——それは瓦斯中の各分子の追跡を計算しようと試みるのと同じやうに無駄であらう。

然も、瓦斯の諸特質に關して我々に有用な報告を與へる同じ統計學的方法を、星々の運動の研究にも應用して差支へない。星の數は非常に多いので、我々は、その個々については少しも煩はされずに、それら凡てを一緒に一つの群として取扱ふ。それらを個々のものとして取扱ふことは、鐵道會社が、ロンドンからブライトンまでの銀行休業日輸送を、各個々のロンドン人の財政や習慣や心理を考察することに依つて豫想しようと試みるやうなものであらう。

個々の細部には這入つて行かないで、我々は次の事を知ることができる。即ち、各々の星は、銀河の大部分を廻つた後、その出發點に近い何處かに復歸する一つの軌道を描くに違ひない。計算して見ると、さういふ巡行を一回仕上げるには何億年にもかゝるに違ひないことがわかる。たとへさうであつても、星々は、大抵、地球が生れて以來二三度は完全に巡行を仕遂げたであらう。そして若し我々が星々の年齢を幾萬億年も想像するのが正しいとすれば、各々の星は銀河を二三千度もめぐつたに違ひない。従つて我々は、銀河は今までに一定の永久的な形を帶びたものと考へなければならぬ。銀河の色々な部分に於ける星の分布は、もう不變のものになつた筈であり、星々は不變の

運動状態に近い状態に落ちついた筈である。

統計學的研究方法に依つて、不變状態に達するに足るほど長く生きながらへて來た星辰系統に取つては、あり得べき配列は澤山は存在しないことがわかる。若し全體としての系統が少しも自轉しないなら、一つの配列が存在するだけであり、星々は凡ての方向に於いて完全な釣合を保ちながら一つの球状の塊となる。觀測された球状星團（第九畫）はかういふ型の隊形に殆んどなりかけてゐる。尤も、シャプレイが見出したところに依ると、大多數は形の點で絶對の球状をしてはゐない。若し全體としての系統が自轉を與へられてゐるなら、あり得べき對座は、悉く、貨幣、時計、又は圓いバスケットのやうに、扁平な釣合のある形をするわけである——他の言葉で云へば、自轉する星辰系統は、ほゞ、銀河と同じやうな形をするに違ひない。更に、これらの星の運動は、まさしくカプティンが発見したやうな種類の『星流』を示すに違ひない。

かくして、銀河の形と、その星々の運動の特質との双方は、全體としての銀河系が自轉状態にあるに違ひないことを示してゐる。そして、我々が既に見たやうに、オールトや、プラスチックや、その他の人々が行つた最近の觀測的探求に従へば、理論の要求する自轉が現實的事實であることはかなり確實である。星々の運動を見ると、銀河系全體は、區域毎に變化する割合で自轉しつつあつて、太陽の附近は二億三千萬年毎に約一度公轉することがわかる。そして、この巨大な車輪の中心

は、シャプレーが以前球状星團の分布に關する自分の探求から銀河系の幾何學的中心と定めた場所と甚だ緻密に一致してゐる。

かくして、自轉といふものが無から發生し得ない以上、すべての現象は、銀河系が一つの自轉する物體から生れたに違ひないことを示す點で一致する。我々は、銀河になるほどの大きさを持つてゐる天文學的物體の型を一つだけ知つてゐる。それは大星霧である。そしてこれらの星霧の大多數は自轉してゐると信じられ、或るものは自轉してゐることが確實にわかつてゐるから、銀河系は一つの星霧から生れたに違ひないと結論しても合理的であるやうに思はれる。尤も、これは、銀河の構造が、我々が他の大星霧を見る時ほどの大きな距離を置いて眺めたら、今でさへそれを星霧と稱さなければならぬほどのものでない場合のことである。銀河系の觀測された自轉週期二億三千萬年は、實質的には、もろくの星霧の中の如何なるものの週期、既に認められ又は半ば認められてゐる週期よりも一層長いが、銀河系の諸次元もどんな既知の星霧のそれよりも一層大きい。そしてこの二つの事實は固く結びついてゐる。また、銀河系に於ける星の數は、恐らく實質的には如何なる星霧に於けるよりも一層高い。これらの星の總重量もやはりさうである。これら凡ての事に依つて明瞭になるのは、若し銀河が、大星霧の一つであるなら、又は一つであつたことがあるなら、それは異常の大きさと重量を持つものであつたに違ひないといふことである。

※ つぎのやうな見積りは既に示して置いた。²³

太陽を單位とする銀河の重量

二四〇、〇〇〇、〇〇〇、〇〇〇

太陽を單位とする星霧M三一の重量

三、五〇〇、〇〇〇、〇〇〇

太陽を單位とするNGC四五九四○重量

二、〇〇〇、〇〇〇、〇〇〇

我々が既に見たやうに、太陽と凡ての星は輻射放出の結果として絶えず重量を失ひつつある。そこで銀河系の總重量は絶えず減少しつつあることになり、その結果、銀河系がそれを構成する星々に加へる引力的把握は絶えず弱まりつつあるわけである。若しこの引力的把握が突然全く消滅することになつたら、各々の星が現在辿つてゐる曲つた進路は完全な直線と入れ代り、この直線に沿つて、各々の星は、他の星々からのどんな引力的諸力に依つても逸らされることなしに、現在の速力

²³ 銀河質量は現在でも確実な精度では得られていないが、我々の銀河がアンドロメダ銀河やソングレロ銀河にくらべて桁

違いに大きい、というものではないようである。

銀河系の全質量は太陽の約6,000億ないし3兆太陽質量

NGC4594 (M104) (ソングレロ銀河)の全質量は約8,000億太陽質量

で運行するであらう。そのために、いま銀河系を構成してゐる星々は間もなく宇宙全體に離散するであらう。簡単にいへば、若し星々の引力的牽引が突然除かれたら、銀河は非常な割合で膨脹しはじめるであらう。

こんな事は起りさうでないにしても、星々の重量が輻射に變化するに連れて、星々の引力的牽引が漸次に除かれると、銀河は遅々とした割合で始終膨脹するに違ひない。計算が暗示するところに依ると、その現在の膨脹率は約三十萬億年にその大きさを二倍にするであらう。星々が若々しい元氣に充ちて、自己の實質を現在よりも一層大まかに浪費してゐた過去に於いては、膨脹は現在よりも遙かに迅速だつたに違ひない。そのために銀河系は過去に於いては現在よりも實質的に一層小さく且つ一層緻密であつたやうに思はれ、原星霧は恐らく現在よりも更に一層小さかつたやうに思はれる。

我々が既に見たやうに、大星霧の中の星々は集合して星群又は星團になつてゐるやうに見える。銀河系に於ける球状星團は、他の星群に攪亂されないで濟んだ、従つて、丁度瓦斯塊がさうするやうに、それ自體の吸引の下で球状形態を帶びた、同一の一般型を持つ星群であるかも知れない。シャプレイが発見したところに依ると、これらの星團は幾分銀河面の外側に存在してゐる。それらは他の星に出會すことのある此の面を運行するに當つて、解散し又は解體したかのやうに見える。

これと對照すれば、一般に進行星團と稱されてゐる型の星群——プレアデスや、ヒアデスや、大熊座の星々や、それらと道連れになつて空間の中を航海してゐる他の星の群——は、一般に銀河面の中を運動してゐることがわかる。これらは、恐らく、他の星々、隊形から叩き出された最も重い星を除く凡てのもの、との交互作用に依つて解散させられた球状星團の最後の面影を示してゐるかも知れない。數學的分析に依ると、さういふ進行星團の星々と、銀河面に於ける他の星々との間の交互作用は、各星團に、その厚さの二倍半の直徑を持つ、扁平なディスク又は懷中時計のやうな形を帶びさせるであらうことがわかる。進行星團の大多數は、かうした種類の扁平化を示し、その量は計算された値とかなりよく一致する、といふことは意味ぶかい。太陽を取巻いてゐる『地方星團』には、さういふ星群の殘物であるかも知れない、と考へることさへできる。

これらの星團の運動は、また、この運動に垂直をなす方向に於いて、一層の扁平化を起すことがあるかも知れない。中には、既に一層の扁平化を示してゐる星團もある。大熊星團がその著しい實例である。

第四節 連星系の誕生

もろくの星霧が、混沌の中から生れ得たその生れ方を論ずるに當つて、我々は次のやうに述べた。原媒質に於ける潮流の存在が、出来上る星霧にさまざまの自轉量を與へるであらう、と。同じ理由で、星霧の子供、即ち星々は、これまたその誕生時に自轉を與へられるに違ひない。さういふ自轉に取つてはそれ以上の理由が一つある。『角惰力の持續』といふ一般原理に従へば、自轉はエネルギーのやうに全然消滅し得るものではない。その總量は持續するので、星霧が分裂して幾つかの星になると、この星霧の最初の自轉はそれらの星の自縛の中に持續しなければならぬ。かくして、星々は、生れるや否や、凝結過程の中に起つた潮流から生ずる自轉に附け加へて、親たる星霧から傳はる自轉を與へられる。

重量の連續的喪失は、星々の物理的諸條件を變化させる。そして、次の章へ行くと、この變化は一般に星の直徑の收縮を含んでゐることがわかるであらう。『角惰力の持續』といふ同じ原理に従へば、星が收縮するに連れて、その自轉速力は増加するであらう。簡単に云へば、星が老ひるに連れて、それはますます迅速に廻ることになる。

ところで、自轉は星々が親たる星霧から生れる時の本質的要因である。全く自轉しない星霧は、我々の見得る限り、分裂して星になることはないであらう。そしてこの理論的豫言は、觀測に依つて確證されるやうに見える。なぜなら、第十六畫第一圖に示したやうな完全な圓形型の星霧は、望遠鏡で見る時一つ一つの星に分解されることはないからである。他方で、我々が既に見たやうに、最初自轉を與へた星霧は、収縮しながら連續的に自轉速力を増加し、遂に自轉が星霧を分裂させて各々から一族の星を造るであらう。そこで今はつきり持ち上つて來るのは、星々の自轉速力が増加するに連れて、これらの星が今度は分裂して、今に天文學的物體の三代目を造り出す見込みがあるかどうかといふ疑問である。また、我々は、數學的分析が、大きな物體にも小さな物體にも、その規模には關係なしに等しく當て嵌ることを期待することができよう。そして、問題を詳細に吟味して見ると、現實的事実に於いて、我々が今まで考察した過程は、物理的諸條件が適當に備はりさへすれば、反復されてもつと小さな物體のもう一つ先の代を造り出すことがわかる。

しかし、物理的諸條件は適當でないことがわかる。それらは確かに少なくとも一つの點で缺けるところがある。自轉する星はその赤道面に於いて瓦斯物質を放逐するにしても、この全過程は星霧に於いてよりも非常に小さな規模であらう。我々は、放逐された物質が以前のやうに凝結を形づくることを期待することができよう。しかし計算に依ると、分子速度が異常に低い場合を除けば、ど

んな凝結も星の全重量より非常に大きな重量を持つてゐなければ残存することができないことがわかる。これが意味するのは、どんな合理的な分子速度をもつてしても、放逐された瓦斯は少しも凝結を形づくらないであらうといふことである。それは單に周圍の空間中に離散して、どんな明瞭な凝結をも持たない大氣となるであらう。

星々が、それ以前の星霧のやうに、純粹な瓦斯塊として取扱はれる場合の自然の成行きは、以上の通りである。しかし、これに代る場合も考へられるに違ひない。

液體星の分裂生殖

我々が既に見たやうに、自轉しない瓦斯星霧は、それ自體の引力的吸引のために嚴密な圓形を帯びるであらう。ところが、少し自轉しても、地球のやうに、それは扁平になつて楕形になるであらう。地球も自己の自轉のためにかういふ形を帯びたのである。尤も、地球の内部的構造は瓦斯星霧のそれとは非常に違ふ。

嚴密な數學的研究に依ると、この扁平な楕形は、その内部的構成は顧みないとして、すべての徐々に自轉する物體に共通してゐなければならないことがわかる。瓦斯も液體も成形物にも、等しくさういふ形を帯びる。しかし、迅速に自縛する物體の形は、その内部的配列及び構成に甚だ依

存し、殊に、物體の重量がその中心の近くに集中する程度に依つて影響されるに違ひない。

瓦斯の高い壓縮力の結果として、重量のかうした中央集中は、純粹な瓦斯塊に於いて極限に達する。反對の極點に達するのは、水の如き、一樣な、壓縮不可能な液體の塊に於いてである。そこには中央集中は少しもあり得ない。この後者のやうな型の塊に於いては、自轉速度が増加しても、少し扁平な楕形が、もつと扁平な楕形に席をゆづるだけのことである。瓦斯塊が赤道のあたりに鋭い縁を形づくるやうな傾向は全く缺けてゐるし、形象の横斷面は全く橢圓形のまゝで續いて行く。更に高い自轉速度に於いては、赤道は同形でなくなつて、これも橢圓形になる。形状は今では三つの不同の直径を持つことになるが、あらゆる横斷面は嚴密に橢圓形である。形象は一つの『橢圓體』である。これに續いて、その最長の直径は長くなり始めて、遂に塊は、形に於いては依然として橢圓體であるが、その最短の直径の殆んど三倍の長さを持つ葉巻形の形象を形づくるに至る。

一續きの新しい出來事がここで始まる。液體の塊は、その最長の直径上にある約二つの別々の點に漸次に集中して、一つの腰又は溝がその中程に出來上る。この溝はますます深くなつて、遂に物體を二つの別々に離れた塊に切り離す。この二つは今では相互の周圍を軌道運動に於いて自轉して、連星を形づくる。かういふ出來事の系列は第十一圖に示してある。實際の連星に依つて表はされるやうな最後の段階の圖表は、既に九十一頁に示して置いた。

比較のために、一つの自轉する瓦斯塊が帶びる形の系列は、第十二圖に示してある。これは、實際に觀測されて第十六畫に寫眞にして示してある、觀測された星霧形の系列と同一である。

第十一圖及び第十二圖に示してある二連鎖の對座は、二つの極端な場合、即ち、實質が全く一樣に分布されて自轉してゐる物體と、實質がその中心の方へ甚だ高度に凝結して自轉してゐる物體とを表はしてゐる。この事は記憶して貰ひたい。實際の天文學的物體の構成は、この兩極端の間の何處かに位してゐるに違ひないから、我々が次の事を期待するのは自然であらう。即ち、さういふ物體は、第十一圖及び第十二圖に示した二つの系列の間に介在する對座系列を辿つて行くのである。

しかし理論に依ると、事實上はさうでないことがわかる。中央凝結の或る臨界程度以下を持つてゐる凡ての物體は、第十一圖に示した系列、又はこれとあまり違はない系列を辿る。中央凝結のさういふ臨界量以上を持つてゐる凡ての物體は、第十二圖に示した系列を辿る。かくして、中央凝結のさういふ臨界程度に達すると、第十一圖から第十二圖への突然の移動が起る。簡単に云へば、すべての自轉する物體は、それが純粹の液體である場合のやうに、でなければ純粹に瓦斯體である場合のやうに、收縮する。兩者の中間の場合は考へられない。

觀測天文学に従へば、多數の星は、おそらく凡ての星さへが、第十一圖に示した系列を辿りはしないかと疑ふ餘地はない。他のどんな機構も、我々の知る限り、二つの構成者が相互の周圍に小軌

道を描いてある多くの分光連星系の形成に取つては有効でない。そこで、これらの星に於いては、塊の中央凝結は、いま述べた臨界量以下でなければならぬ。この程度では、これらの星は瓦斯よりも寧ろ液體のやうな作用をする。

我々は、いま述べた分裂生殖過程の細部をどこまでも辿るに當つて、全く數學的分析に頼つた。

そして我々は、我々の理論的諸結果を觀測に依つて全く阻止し得るものではない。空には、我々が次のやうに言い得る星は只の一つも存在しない。確かに分裂生殖に依つて分裂しはじめて、確かに一つの連星系となる星が、ここに一つ存在する、と。これはまんざら驚くには當らないであらう。分裂過程は、大概、星々の生涯と比較すれば非常に短い期間である。そのために、どんな場合にも我々は分裂して二つになりにかけてゐる星を捉へるまでには、多數の星を研究しなければならないであらう。

他方で、現に分裂しつつある星は、普通の星とは甚だ容易に區別がつく筈である。數學的分析に依ると、その内部は非常な動揺状態にあるので、この星は不變の光をもつて輝く見込みは殆んどないことがわかる。それは『變光』星であらう。更に、この星の状態は漸進的變化を示す筈である。尤も、これが數年の觀測で發見されるほど迅速であるかどうかは未決の問題である。最後に、若し星のどんな群又は部門でも、分裂生殖過程にある星ではないかと思はれたら、それらの星は、分裂

生殖過程が進行した程度に相應する順序に配列することができるとする筈である。そして、さうやつて形づくられた系列は、新しく出来上つた連星の物理的條件に於ける星々をもつて終る筈である。

私は最近次のやうに提議した。**セフェイド變光星は――その未知の光變差機構は天文學者に對しては非常に貴重な働きをするのであるが――單に分裂生殖しかけてゐる星にすぎない²⁴**と。餘白がないので、それらは數學的分析が分裂生殖過程にある星々に要求する特質をどこまで示すかといふ

込み入つた問題にここで這入つて行くことはできない。しかし、それらが以上に略述した三つの簡単な試験を満足させることは容易にわかる。それらは確かに變光星である。そして相異なる星の光變差が非常に類似してゐるので、それらは悉く同一原因から生れたものであるらしい。多數のセフェイドの週期は變化するやうに思はれる。そしてハーツスブルグが見積つたところに依ると、今まで百二十五年の間觀測された原型星セフェイド²⁵は、光度變化の週期が、一年に約一秒の十分の一の割合で減少しつつある。かくして、百萬年もたてば、この星の現在の五日三分の一といふ週期は一日以上減少することにならう。最後に、オットー・ストルーエ博士は、セフェイドの系列が新しく出来上つた連星のそれに殆んど完全に適合することを發見した。かくして、**セフェイド變光星の『分裂生殖説』**は將來有望であるやうに思はれる。しかし、この學説も、受け容れられる前に²⁶現在では、セフェイド變光星は、イオン化したヘリウムガスが膨張・収縮を繰り返すために變光していると考えられてゐる。

徹底的に試験しなければならない。そしてそれはこれまで徹底的に試験されたこともないし、廣汎に受け容れられたこともないのである。

最初ブランマー及びシャプレイが提出した別の見解に従へば、セフェイド變光星は脈動する瓦斯球と見做された。さういふ瓦斯塊の作用は、エディントンやその他の人々に依つて數學的に研究された。しかしそれは觀測されたセフェイド變光星の作用と一致し得るやうには見えない。²⁵

25 1953年にZhevakinによつてセフェイド變光星のイオン化したヘリウムガスが熱機関におけるバルブの役割を果たしていることを見出すまでは、エディントンの1917年の學説は支持されなかつた。

第五節 連星系の發達

連星系の形成過程は何であらうと、我々は、さういふ系統のその後の發達をどこまでも辿らうと試みるに當つて、かなり容易に進行することができる。三つの要因が同時に作用してゐる。

潮汐摩擦

これら三つの要因の最初のもものは、ごく短期間のものであつて、サー・ジョージ・ダーキンはそれを『潮汐摩擦』と名づけた。彼は、それに人々の注意を惹いてその作用の様式を研究した最初の人である。最初、一つの自轉する塊が分裂して連星系を形づくる時、二つの構成者は非常に接近してゐるので、兩者は必然的に相互の表面に恐るべき潮汐を起す。ダーキンは證明したところに依ると、この潮汐は二つの物體を押し離し、且つさうするに當つて兩者の自轉率を相等しくする。この過程が幾百萬年も繼續した後、二つの物體の自轉率と、兩者が相互の周圍を廻る公轉率とは、悉く相等しくなるに違ひないので、各物體はその同伴者の方へ永久に同一表面を向けることになり、兩者は見えない腕で結びつけられた亜鈴の二つの塊のやうに、相互の周圍で自轉する。

太陽と遊星とは、嚴密な専門的意味に於ける連星系を形づくりはしないにしても、必然的に眞の連星系と同一の諸力に従ふ。かくして、我々は、**水星はいつも太陽の方へ同一の表面を向けてゐるといふ事實**²⁶、金星は甚だ徐々に自轉してゐるので、毎日、また恐らく毎週、太陽の方へ同一の表面を向けてゐるといふ事實に、潮汐摩擦の作用を見ることが出来る。我々が空間の中へ一層遠く這入つて行くに連れて、潮汐摩擦の諸結果は迅速に減少する。しかし、近い遊星、地球や火星は、それぞれ約二十四時間の日を持つてゐるのに、遠い遊星、木星や土星や天王星は、それぞれ約十時間にすぎない日を持つてゐる、といふことは恐らく意味深い。海王星及び冥王星の自轉週期は今も不明である。²⁷これらは別として、我々が一般的な仕方で見つけたところに依ると、我々が太陽から遠ざかれば遠ざかるほど、もろくの遊星はますます迅速に自轉する。それはまさしく潮汐摩擦に依つて起されるべき結果である。

同様に、潮汐摩擦は恐らく地球と月系統の現在の對座に大體の責任がある。即ち、それは月を地球からの現在の距離にまで押し離して、いつも同一の表面を我々の方へ向けさせるに至つたのである。潮汐摩擦は、勿論、今もなほ作用してゐるに違ひない。地球のもろくの大洋に起る潮汐の大

²⁶ 1964年から1965年にかけて行われたレーダー観測で、水星の自轉周期が59日であることが確認された。
水星の公転周期と自轉周期は2:3の共鳴關係にある。

²⁷ 海王星の自轉周期は0.67日。冥王星の自轉周期は6.39日。

部分は月のせるである。この潮汐は、固形の地球に牽引を及ぼすので、その自轉速力を遅くする。その結果、晝は絶えず長くなる。そして、地球と月とが完全に一致して自轉と公轉を行ふやうになるまで、さうなりつづけるであらう。若しいつかさういふ時がやつて來るとすれば、地球は月の方へ絶へず同一の面を向けることになり、そのために地球のどちらかの半球の住民は日を少しも見る事がなくなるに反し、もう一方の側は毎夜月に照らされるであらう。この時には、日の長さと月の長さが同一になつて、それぞれ、我々の現在の日で計算して、約四十七日になるであらう。ゼフレイスが計算したところに依ると、約五百億年後にはかうした事態に達しさうである。

かうなつてから後は、潮汐摩擦は、最早、月を地球から一層押し離すといふ意味では作用しなくなるであらう。太陽及び太陰潮汐の共同的効果は、地球の自轉を更に一層遅くすることになり、それと同時に月の地球からの距離も漸次に少なくなるであらう。考へられもしない年數を経た後、月が最後に地球から約一萬二千哩以内に引き寄せられると、地球が月の固體の中に起す潮汐は、月を切々に破碎するであらう。それは、土星環の分子が土星の周圍を公轉し、又は小遊星が太陽の周圍を公轉するのと同じ仕方で地球の周圍を公轉する小衛星系となるであらう。

我々が既に論じたやうに、地球Ⅱ月系統の現在の配列は、我々に地球の年齢を計算することを得させる。ゼフレイスの計算に依ると、この系統が現在の對座に達するには、優に四十億年かつた

に違ひない。

地球的標準に依つて判斷すると非常に長いやうに思はれるかういふ期間も、星の生涯に於いては一瞬間にすぎない。眞の連星の構成者は生涯のほんの一小部分がたつうちに地球Ⅱ月系統のそのやうな對座に達し、更に進むと、早晚、各々が他の方へ永久に同一の表面を向けるやうな對座に達する。今までは、潮汐摩擦は二つの塊を絶えず一層押し離して來たが、この階段に達するや否や、潮汐は双方の構成者の上に靜止するに至るから、潮汐摩擦の作用は消える。かくして、潮汐摩擦に依つて起される分離は、今やその限界に達する。そして、潮汐摩擦に關する限り、二つの物體は、永久に、いま述べたやうな仕方で自轉することができよう。

重量の喪失

潮汐摩擦が作用しなくなると、一つの新しい作因が現はれる。我々が既に計算したやうに、太陽は今も一分に二億五千萬噸の割合で重量を失ひつつある。そしてこれまでも幾萬億年の間、この割合が、それに比較できる割合で重量を失つて來たし、これから幾萬億年の間さうしつづけるであらう。地球が太陽から現在のやうな距離にあるのは、この距離が太陽の現在の重量に正確に相應してゐるからである。若し太陽の重量が突然半分に減じたら、地球に對するその引力的牽引も半分

に減ずるであらう。そして地球は太陽からのもつと大きな距離へ移動して行くであらう。

*細部は重要ではないにしても、實際の成行きは次のやうになるであらう。即ち、地球は太陽の周圍に圓形軌道でなしに楕回軌道を描きはじめ、地球の平均距離は今よりも一層大きくなるであらう。

太陽の重量は、突然半分に減ずるやうなことはなさうではあるが、しかし直ぐ前の四分間に十億噸ほど減少した。その結果、太陽が地球に加へる引力的把持は弱められて、地球は、一層廣い軌道に移つて行つた。この瞬間に、地球の軌道の半径は四分間前よりも一層大きくなる。細部も完全な正確さをもつて數學的にどこまでも辿つて行くことができる。太陽をめぐる地球の軌道は、小さな離心率を持つ圓形又は楕圓形でさへないやうに見える。それは螺旋曲線であつて、ほどかれた時計の發條のやうである。毎年地球はほんの少しづつ進んで外部の寒氣及び闇の中へ這入つて行く。正確に計算すると、太陽からのその平均距離は一世紀に約一メートル(三九・三七吋)の割合で増加することがわかる。この結果は、勿論、星々の重量の喪失に依つて銀河系に引き起されるに違ひないことがわかつたのと全く同じ種類のものである。唯一の相違は次の點にある。即ち、銀河に於いては幾億といふ星から成る一つの系統が膨脹しつつあるのに、太陽||地球系統は只二つの成員か

ら成り立つてゐるのである。

連星の二つの構成者に於いても、全く同様な諸結果が重量の喪失に依つて起されるに違ひない。ここでは双方の構成者がエネルギーを放射し去り、それと同時に重量を失ひつつある。詳細に計算すると、兩者は相互から絶えず遠ざかるに違ひないこと、しかし兩者の軌道の形は何の變化も受けないであらうことがわかる。

いま述べた二つの結果は、別々にして見ても一緒にして見ても、全體としての連星の觀測された軌道の形と大きさをどちらも説明しない。これらの事を解釋するには、更に第三の作因、即ち通りかかつた星からの引力的諸力を求めなければならない。我々が既に見たやうに、これらの諸力は實際に觀測される諸軌道の統計的分布を説明する。

三つの作因、即ち幾百萬年に跨る潮汐摩擦と、同じく幾百萬年に跨る重量喪失と、同様の期間に跨る、通りかかつた星からの攪亂とが結びついて、それが連星系を進化させる。それら三つのものの集合的結果は、二つの星の間の距離を擴大し、それと同時に軌道の形を曲げることである。

再分

これらの變化が連星系の軌道配置に進行してゐる間、二つの構成者は不斷の重量喪失のために自

己の物理的條件を變へる。そして、親星の場合のやうに、この重量喪失は一般に星の大きさを收縮させるであらう。連星系のどちらの構成者が收縮しても、その形は我々が既に列擧したやうな對座系列を通過することになる。そして若し收縮が十分長い間續くなら、その構成者は更に分れて二つの別々の塊になるかも知れない。連星系の構成者のどちらかが、又はどちらとも、かういふ仕方で再び分れて連星副系統になり、そこに三つか四つの星から或る系統が出來上るかも知れない。エイチ・エヌ・ラッセルが數學的に證明したところに依ると、先づ、一つの連星系PQがある。Qが、分裂して二つの構成者 q 、 q になつたために、この連星系が、三重星P、 q 、 q になると、 q と q の間の距離は、元の距離PQの約五分の一以上になることはできない。この理論的法則は觀副に依つてよく確證される。第十三圖は、典型的な重星系を示したものである。そして我々は、さまざまの副系統の各々に於ける分離は、本系轉のそれと比較すれば、いづれも全く小さいことに氣づく。

假説上の原始混沌の發達は、今は天文學的物體の五代を経て辿ることができたわけである。それは次の通りである。

混沌 — 星霧 — 恒星 — 連星系 — 副系統

若し副系統の星々が、更に分裂生殖して、例へば、第十三圖に示した星のやうな場合が起るとすれば、これに第六代を附け加へなければならぬ。星の系圖は、全空間を塞ぐ一つの巨大な薄い星霧をもつて始まり、以後の代は、小さな、収縮した、死にかけた、最早再分能力のない星々から成り立つ。この系圖をどこまでも辿ることができたのは、元々、理論的根據に基いてのことにすぎない。しかし我々は、その一般的正確さに就いては何の疑惑をも抱く必要はない。なぜなら、觀測に依つて、それは何度、ほとんど一歩進む毎に確證されるからである。實際、次のやうに言つても恐らく言ひ過ぎではあるまい。進化系列は、觀測的證據に依るだけでも殆んど以上と同様に發見することができた、と。尤も、假説上の原始混沌は例外である。それに就いては、事實の性質上、觀測は何の貢獻もしない。

第六節 太陽系の起源

殆んど凡ての觀測された天文學的形成物は、我々が今述べたばかりの進化系列の中に、かなり正確に、でなければ合理的な尤もらしさをもつて、置くことができる。然し一つの圖抜けた例外がある——それは太陽系である。宇宙創成論が生れたのは、太陽系の起源を發見しようとする企てとしてであつた。この努力がこの特殊な問題に局限された理由は年代的のものである。宇宙創成論の初期に於いては、太陽系の外側にあるものは天文學の中に殆んど何一つの這入つて來なかつた。近代の科學的宇宙創成論の諸發見について今述べた概略は、次の點で注意すべきものであつた。即ち、それが示した宇宙創成論は、全宇宙をめぐる旅行に我々を伴ひ、この旅行中に我々が出會すあらゆる物象の起源と生涯物語とを説明し、然る後再び家へ歸つて、自らの誕生場所である太陽系に直面すると、無言になつてしまふのである。

ラプラスの星霧説

最初の眞面目な科學的宇宙創成論は、ラプラスの有名な星霧説の中に具體化されたそれであつた。

一七九五年に、カントは、原始混沌が凝結してろもろの廻轉する星霧になる有様を描いた。そして、これらの星霧の一つを太陽と同一視して、もろくの遊星は、我々の想像した、星々が生れるやうな仕方、星霧から流れ出る瓦斯塊の固結に依つて形成されると考へた。一七九六年に、ラプラスは、これと同様な考へを提供して、全くカントの能力以上の數學的正確さをもつて、それを詳細に展開した。彼が示したところに依ると、自轉する瓦斯塊は、收縮のためにますます速く廻轉するに連れてどこまでも扁平になり、我々が既に論じたやうなレンズ状態（第十六畫、第三圖）を展開し、然る後更に進んで、赤道面に於いて物質を放逐するであらう。又は寧ろ、主塊の收縮が繼續すれば、それを置いてきぼりにするであらう。この階段に於いては、それは幾分第十六畫の第四圖及び五圖に示した星霧のやうに見えるであらう。尤も、ラプラスは、かういふ型の星霧を知つてはゐなかつたので、環に取巻かれてゐる土星を、この階段に於いて期待される形成物の實例として引證した（第二十四畫）。ラプラスの想像に従へば、放棄された瓦斯の縁はその時凝結して一つの遊星となつた。主塊が更に收縮すると、一層多數の瓦斯が赤道面に於いて放棄された。それは適當の進路を辿りながら凝結して別の遊星になつた。かくして遂に太陽は收縮をやめたので、それ以上の遊星は生れなくなつた。それと同じ過程が、それよりも遙かに小さな規模で繰り返されて、もろくの遊星から衛星が生れた。

この仮説が一見して尤もらしいことは、それが眞面目な反對を受ける前に殆んど一世紀の間も存続して、一般に受け容れられたことから推して明白である。最近、これに對する批判が山ほど積み上げられた。それらは、この假説が放棄されなければならないことを明らかにするほどの致命的性質を持つてゐる。

太陽は、ラプラスに従へば、過度の自轉のために分裂して幾つかの遊星を生んだ。しかし、理論に依つても觀測に依つても、餘りに速く自轉して安全を保つことのできない星のまさに來らんとする運命は、全く明白である。それは家族を設けないで、酷使される攝動輪のやうに、單に破裂して殆んど大きな相等的い幾つかの部分になるだけである。分光連星や重星系は、過度の自轉のために分裂した星の殘物であつて、少しも太陽系に似てゐない。

また、『角愔力の持續』の原理に従へば、原始太陽の自轉は、現在の太陽の自轉と、それを取巻く遊星の公轉との中に持續すべきである。これら凡てからの貢獻を加算すると、原始太陽の角愔力を表はす筈の總計が得られる。嚴密にいへば、太陽がもろくの遊星の誕生以來放出した全部の輻射のために、もう一つの貢獻が加算されなければならない。我々は、この貢獻の量を計算することができる。なぜなら、我々は地球の年齢を知つてゐるからである。しかしそれは全く取るに足らぬものであることがわかる。

原始太陽の總體の角楕力は、非常に正確に計算することができる。なぜなら、現在の太陽系の總體の角楕力の九十五%以上のものが木星の軌道運動に存在してゐるからである。この貢獻は甚だ正確に計算することができるので、残りの五%を補ふ小さな貢獻の幾分かの不確かさは、總體に對しては殆んど影響を及ぼすことができない。

この總體を計算して見ると、驚くべき事實が現はれて来る。即ち、原始太陽は分裂を起すに足るほど自轉してゐた筈はないのである。明かに太陽はその現在の自轉に依つては決して分裂しない。形状の扁平化が分裂への第一歩である。そして太陽の形状はその現在の自轉に依つては殆んど扁平にならないので、最も精巧な測定さへこれまではどんな扁平化をも發見することができなかった。木星と、太陽系のその他凡ての成員との運動の中に現に示されてゐるそれ以上の角楕力を加算すると、一つの原始太陽が得られる。それは、木星が今自轉してゐるのと殆んど同じ速さで自轉して、木星と殆んど同じ程度に形状の扁平化を示してゐる——この扁平化は、望遠鏡で全く容易に測定するに足るほどのものであり、又は肉眼で發見するに足るほどのものでさへあるが、分裂を起すに足るほどのものではない。

太陽は、太陽のもろくの遊星が生れて以來、あまり變化したやうに思はれない。といふのは、それ以來經過した二十億年そこれらの長さは、太陽の全生涯のほんの一小部分を表はすに過ぎない

からである。しかし、若し我々がこの期間中に太陽は目立つほど収縮したと想像するなら、その時には、有効な角動力量は、現在の収縮した太陽を分裂させることができない以上にさへ、大きな原始太陽を分裂させることはできなかつたであらう。どの方面から眺めても、我々は次のやうな結論に達する。即ち、太陽は、ラプラスが想像したやうに、過度の自轉のために分裂した筈はないのである。實際、太陽が持つてゐた自轉量は、それを分裂させるに必要な量をちよつぱりも越えた筈はないのである。

第三の反對論は、以上とは幾分違つた性質のものである。ラプラスは甚だ偉大な數學者であつた。そして彼の抽象的數學理論には、この理論に關する限り、何の缺點もなかつた。もつと精巧な近代的分析が一步毎にそれを確證した。そして自轉する星霧の寫眞（第十六畫）が證明するやうに、觀測も同じ事を示した。これらの寫眞は我々の眼の前で起る一つの過程を示してゐる。それはラプラスが想像したものと本質的に同一であるが、規模の巨大な相違は別である。あらゆる出來事が性質上ではラプラスの想像した通りであるが、その規模は彼が夢見たのとは比較にならないほど大きい。これらの寫眞に於いては、原始星霧は生成中の單一の太陽ではなくて、何億といふ太陽を形成するに足るほどの實質を含んでゐる。もろくの凝結は、わが地球の大きさをくらゐの弱小な遊星とはならないで、それ自體太陽である。數に於いても八つそこいらではなくて、何百萬と云つて數へられ

るに違ひない。

これと同じ事が、なぜラプラスの想像したやうなもつと小さな規模に於いて持ち上ることができないか、と我々は質問して差支へない——といふのは、數學上の諸結論は、我々が今取扱つてゐる物體（太陽）の大きさから離れては適用できなくなるのか？　これに對する答へは、事實上既に提供して置いた。もつと大きな規模に於いても、計畫通りにあらゆる事が持ち上るが、それは、凝結の形成に達するまでのことである。ここでは、規模の問題が重大であることがわかる。我々が既に見たやうに、太陽を形成する分子が凝結して星になつたのは、その數が多かつたからである。室内の分子が凝結して何物かになるやうなことがないのは、その數があまりに少ないからである。同様に、太陽の徐々とした収縮に依つて置いてきぼりにされる分子は（これは暫くの間分子を置いてきぼりにするに足るほど迅速に自轉すると假定して）凝結しないであらう。なぜなら、どんな瞬間にも凝結に役立つ分子は、あまりに少ないだらうからである。分子は少量づつ發射されるであらうし、少量の瓦斯は凝結しないで空間の中に離散するであらう。數學的計算は明確に問題を解決し、この解決はラプラスの假説とは全く逆である。こまごました部分は別としてラプラスの想像した過程は、太陽が星霧から生れることを説明しはするが、遊星が太陽から生れることを説明することはできない。

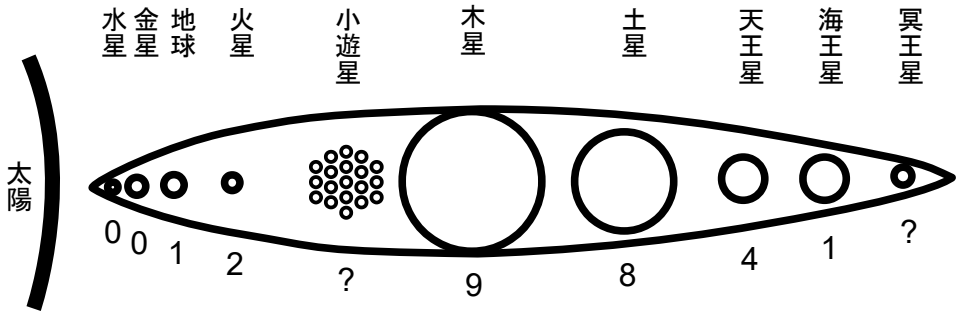
第二物體説

ラプラスは、自分の太陽は空間の中に存在してゐて、その最も近い隣さへがあまり遠ざかつてゐるので、どんな仕方でもそれに影響を及ぼすことはできないと想像した。それは自然的な想像であつた。我々が既に述べたやうに、二つの星が互に影響を及ぼし合ふほど接近するなどいふことは、非常に稀な出来事でなければならない。然も、空間の中に單獨のままでゐる星のどんなあり得べき進化様式も、太陽系の起源を説明し得るやうには思はれない。早くも一七五〇年に、ビュッフォン[※]は次の事を暗示した。即ち、太陽系は恐らく別の物體が太陽を分裂させたことに由つて造り出されたのであらうといふのである。この別の物體を彼は『彗星』と稱した。自らの星霧説を提出するに當つて、ラプラスはビュッフォンの觀念に言及しはしたが、幾分無愛想な調子でそれを排斥した。これは遊星の殆んど圓形の軌道を説明することは不可能であるやうに思はれる、といふのがその根據であつた。これが基礎の弱い反體論であることは、間もなくわかるであらう。然も、單獨な星が獨りで太陽系を生れさすことができるものでないことがわかれば、一つの星の進化が第二の星の接近に依つて他の方向へ向けられる稀な場合にどんな事が持ち上るかを研究しても不自然で

28 Georges-Louis Leclerc, Comte de Buffon 1707-1788 フランスの博物学者、数学者、植物学者。自然の諸時期 *Les Epoques la Nature*』太陽系の起源について考察し、惑星は、太陽に彗星が衝突して形成されたといふ説を述べた。

なくなる。

一八八〇年に、ニュージーランドのビッカートンは、ビュッフォンの考へを復活させて、太陽系は太陽と別の星との衝突に依つて形成されたと想像した。彼は、この衝突の破壊物が、第三の星霧物體、即ち凝結を形成して、その中に遊星が出来上つたと想像した。彼は次のやうに證明した。**が**、周圍を取巻く星霧の中を進んで行く時に受ける抵抗は、遊星の軌道を漸次に圓形のものにし、従つてこの現在の殆んど圓い形を説明するであらう、と。それより十年前、イギリスの著作家、アー・ルー・エー・プロクターは、それほど正確なものではなかつたが、これと同様な考へを提出した。一九〇五年に、シカゴのチェンバリン及びモールトンの兩教授は、『微遊星說』といふ名前で、これと同一の考へを修正したものを提出した。物質的衝突といふ觀念を無視して、彼等は次のやうに想像した。一つの通りかかつた星が、太陽に強力な潮汐作用を及ぼし、その結果、普通の太陽紅焰が一時異常に攪亂される、と。この場合、放逐された物質は非常に高い所まで昇り、それが凝結して、幾つかの小固體、『微遊星體』になり、それが集合して最後に遊星が形成されると想像されたのである。これ等さまざまの學説は悉く純粹に思索的のものであつた。それらは、數學的分析の酸化試験に耐えるだけの能力も、太陽系のもつと際立つた諸特徴を説明する能力も、ほとんど示さなかつた。例へば、それらの中には、太陽系に於ける大遊星がなぜ衛星家族を伴つてゐるかを説明するも



第十四圖 もろもろの遊星の、葉巻型瓦斯線條からの誕生を示す圖式。衛星の数は、各遊星の下に示してある(336頁参照)。

のは一つもなかった。

チェンバリン及びモールトンがその微遊星説を提出する三年前に、私は、潮汐力が一つの星を分裂させて太陽系を發生させる可能性に就いて思索した。一九一六年に、私は一つの星が別の星に激しい潮汐力を與へた時、實際にどんな事が持ち上るかを數學的に研究した。私が得た諸結果は、私にはチェンバリン及びモールトンの微遊星説を覆すやうに思はれた。これは私を今日の『潮汐説』の方へひつぱつて行つた。天文學者の大部分は太陽系の最も蓋然的な起源を提供するものとして今それを受け容れてゐる、と私は信ずる。勿論それは終極性又は確實性を持つことはできない。

潮汐説

二つの星又は他の二物體が、互に接近して、衝突す

ることなしに通過すると、第一の結果として各々は他のものに潮汐を起すに違ひない。接近が近くなればなるほど、潮汐一般はますます高くなる。尤も、二つの物體が互に接近して通過する時の速力にも何か依存するものがあるに違ひない。なぜなら、これは二つの物體が互に影響を及ぼし合ふ時間の長さを決定するからである。

恐らく、渦巻形星霧にその名稱と特徴的な外觀を與へてゐる二つの渦巻形の腕の起りは、幾分それと同様な潮汐作用に基いてゐるかも知れない。諸條件はここでは次の點で違ふ。即ち、この星霧の自轉は、どんな場合にもその赤道面に於いて物質を放出させるので、小さな潮汐力さへその時の物質を二つの釣合の取れた腕に集中させるであらう。星の條件の下では、星から物質を引き出すには、それよりも遙かに密接な接近が必要である。そしてその時には、おそく、二つの不同な類似しない腕又は只一つの腕が出來上がるであらう。

若し接近が非常に密接であつたら、潮汐は太陽と月が地球のもろゝの大洋に起す強い潮汐とは全く違つた方面を帯びるかも知れない。それは星の表面で運動する高い物質の山のやうな並外れて大きな形態を取るかも知れない。それよりも密接でさへある接近は、これらの山を星の身體から引き出される長い瓦斯の腕に變ずるかも知れない。若し、一般にさうであるやうに、二つの星が相等しくない重量を持つてゐたら、小さな方は一般に重い方よりも餘計に攪亂を受けるであらう。

遊星の誕生

一つの恒星から潮汐作用に依つて引き出される物質の長い腕又は線條は、最初はその構造に於いて連續してゐる。しかし分析して見ると、これは我々が『引力的不安定』と呼んだものの作用のために一つの適當な題目を提供することがわかる。既に述べたやうな仕方では、この長い瓦斯の腕の中に、凝結ができはじめる。以前のやうに、小さな凝結は消散するが、大きな分は強度を増して、遂に線條は多數の別々の塊になる——小さな恒星から遊星が生れたのである。第二十二畫と二十三畫の上半とに示した一對の星霧は、おそらく相互に潮汐作用を及ぼし合つてゐて、我々が今考察してゐる過程の一般的性質を暗示するのに役立つかも知れない。尤も、ここに起るどんな事も太陽系のそれよりは非常に大きな規模であることを記憶しなければならない——若しさうでなかつたら、望遠鏡も我々にそれを示すことは全く不可能であらう。

新しく生れたものゝ遊星が、別々の獨立した物體として運動しはじめると、それらは双方の恒星の引力的牽引を受けて、非常に込み入つた軌道を描く。大きな方の恒星は漸次に遠ざかつて、遂にその引力的効果は取るに足らぬものになる。そして遊星は小さな方の恒星のみの周圍に軌道を描くまゝにして置かれる。若し遊星が空虚な空間の邪魔物のない分野で運動したら、これらの軌

道は正確な楕圓形になるであらう。しかし、いま起つたばかりの大激變は、あらゆる種類の破片を取り残したに違ひない。今も太陽系に残存してゐる、彗星や隕星やその他の小物體は、その小部分を示してゐるのかも知れない。しかし恐らくその主要部分は、塵又はワスの形態のまゝにして置かれたので、新しく生れた遊星は、最初は、その運動に何らかの抵抗を示す媒質の中を進んで行かなければならなかつた。これらの事情の下ではその軌道は嚴密な楕圓形にはならないであらう。さういふ種類の抵抗は軌道の形を變へるであらう、そして時間の進行と共にそれは段々圓形になつて、最後には、若し媒質が十分長く存続すべきものであるなら、絶對の圓形になるであらう、といふことは證明することができる。

しかし、瓦斯や塵の破片は、遊星のために絶えず掃蕩されて、早晚全く消滅し、後には恐らく絶對の圓形とまでは行かない遊星軌道が残るであらう。假にかういふ事が太陽系に起つたとすれば、最初の破片で今も残つてゐるものは非常に僅かであつて、その最後の名残は、恐らく、黄道光を起す塵の粒子に見られるくらいのものであらう。とはいへ、抵抗する媒質は、遊星とその衛星との双方の軌道を、大概是殆んど圓形にするに足るほど長い間存在したやうに見える。

例外の場合も、一致の場合と同じほど十分に意義がある。比較的延長された軌道が依然として存在するのは、まさしく、原始の抵抗する媒質が空間の中に一番まばらに擴がつてゐるに思はれる

區域、即ち太陽系及びさまざまの衛星系の一番外側の限界に於いてである。すべての中で一番外側の遊星冥王星は、他のどんな遊星よりも一層延長された軌道を持つてゐる。また、木星や土星の系統に於いては、最も長い軌道を持つ衛星は、本遊星から一番遠く離れてゐる衛星である。おまけに、延長された軌道が、遊星に於いてもその衛星に於いても、小さな重量と結びつかうとする一般的傾向を認めることができる。地球の重量の二十五分の一を持つに過ぎない水星は、すっかり延長された軌道を持ち、地球の重量の九分の一を持つてゐる火星も、程度は劣るが同じくさうである。これに關する一つの説明が、ゼフレイスに依つて暗示された。木星や土星のやうな重い遊星は、抵抗する媒質を自己の周圍に多量に集めて、それを廣範圍の被覆のやうにして空間の中を進行したに違ひない。重い遊星の運動は、この大きな被覆全體と媒質の殘餘のものとの相互作用に依つて妨げられたであらう。従つて、非常に小さな諸次元を持つ被覆が積み重なつてゐる一層軽い遊星よりも一層迅速に圓形軌道に達するであらう。そしてこれと同じ事は、適當な修正を施せば、もろくの衛星系についても本當である。

ゼフレイスは、遊星軌道がこの抵抗する媒質の作用を受けて形を變へる割合を計算した。問題の證據は必然的に不確定であり、この不確定が彼のもろくの結論に影響するのは自然である。しかし彼の研究は、遊星が生れて以來經過した時間の長さの他の見積りについて、一つの貴重な確證を

與へた。

我々は、今度は現在もさまざまな遊星に影響しつつあるに違ひない物理的變化に我々の注意を向けて差支へない。太陽から引き出される長い物質線條は、その中央部分に於いて最も物質に富んでゐたらしい。といふのは、これらの部分が引き出されたのは第二の恒星が最も接近して、その引力的牽引が最も強い時だつたからである。少なくとも圖表的に、我々は次のやうに考へて差支へない。この線條は葉卷のやうな形をしてゐる、その中央附近は厚く、兩端は薄い、と。そのために、凝結が出来はじめると、中央に近いものは、兩端に於けるものよりも一層物質に富むことになるらしい。これはおそらく、二つの最も重い星、即ち木星と土星とが、なぜ遊星系列に於いて中央の位置を占めてゐるかを説明するであらう。

第十四圖は、太陽からの距離の順序に配列した、ざつと縮尺に描いた大きさを持つるくの遊星を示したものである。その軌道が今火星と木星との軌道の間にある空間を塞いでゐる何千といふ小遊星は、單一の遊星として表はしてある。といふのは、これらの小遊星は、最初單一の遊星であつたものが、間もなく我々の述べるやうな仕方で分裂して形成されたと一般に想像されてゐるからである。

この圖表に於けるやうに、もろくの遊星を一つの連續した外線で取圍んだら、我々はそれらの

遊星が造り出された葉巻形線條を想像の中に描くことができる。そして物質の最も豊かであつた場所にも最も大きな遊星が造り出されたことが即座にわかる。

これら凡ての特徴を豫言する潮汐説が提出されて、そのもろくの結論が完成されたのは、新遊星冥王星が発見されるよりも多年の前であつた。冥王星はあらゆる仕方で潮汐説の必要條件に従つて作用してゐる、といふ事情の中に此の學説のための貴重な支柱が見出されるかも知れない。

衛星の誕生

我々が既に述べたやうに、太陽と遊星との間に於ける重量の大きな相違は、太陽と遊星の形成を正常な連星のそれと區別し、従つてこの二つの形成のために全く相異なる起源を暗示する。それと全く同一の相違は、遊星と衛星系に於いても繰り返される。親である太陽はその子供である遊星よりも非常に重いやうに、これらの系統もその子供である衛星よりは遙かに重い。太陽は、最も重い遊星の重量の一千四十七倍を持ち、最も小さなものの重量の何百萬倍を持つてゐる。土星系に於いては、それに相當する數字は四一五〇に對する約一六、〇〇〇、〇〇〇である。重量の等しさに一番近づいてゐるのは、地球と月系統であつて、地球は月の重量の八十一倍を持つてゐるにすぎない。そして、太陽の遊星系のやうに、土星の衛星系の一般的傾向は、さまざまの衛星の重量が、この遊

星から外側へ移つて行くに連れて最大量にまで増加し、然る後再び減少することである。木星の衛星系の場合ももつと小さな程度にさうである。これに依つても、物質が中央附近に最も豊かに存在する葉巻形線條からの形成といふことが察せられる。本遊星と衛星との間にも重量の大きな相違が見られるところから、これは次の事を甚だ有力に證明する。即ち、もろくの遊星の衛星は、以前その親である遊星を誕生させることになつたのと同じ型の過程を辿つて生れたに違ひないのである。

我々はこの過程を一般的な仕方では想像することが出来る。遊星は生れると直ぐ冷却しはじめるに違ひない。最大の遊星、木星と土星が、最も徐々に冷却し、最小のものが最も迅速に冷却するのは自然である。後者は、非常に速く熱を失ふので、殆んど誕生直後に液體化し、また恐らく固體化しさへする。これらの出来事が進行する間も、もろくの遊星は依然として幾分不規則な軌道を追うて行き、且つさういふ軌道を描くに當つて太陽の近くを通ることがあるので、第二系列の潮汐破裂が起る。これらの破裂に於いて、太陽は、最初の時空間から通りかかつた恒星が演じたやうな役割を演じ、遊星は、最初の時太陽が演じたやうな役割を演ずる。太陽は今では遊星の表面から長い物質線條を裂き離すかも知れない。そして、これらの線條は、凝結となつて、更に別の代の天文學的物體、即ち遊星の衛星を誕生させるかも知れない。潮汐説は、何かさういふ仕方では遊星の衛星が生れたと想像するのである。

數學的研究に依ると、誕生時の遊星は液體状であればあるほど、依然として瓦斯状をしてゐる太陽に依つて破壊される見込みが少ないことがわかる。しかし、若しさういふ破壊が起つたら、本遊星と衛星との重量は、遊星が一層瓦斯状であつた場合よりも一層相等しくなるであらう。かくして、全く瓦斯状の遊星から、誕生時に又は誕生直後に液體化した遊星へ移つて行くと、先づ、多數の相對的に小さな衛星を伴ふ遊星を見出す見込みがあり、次いで、少數の比較的大きな衛星を伴ふ遊星の境界線状態を通過した後、衛星を一つも伴はない遊星に達する見込みがある。

我々が既に見たやうに、大きな中心遊星、木星と土星は、一番長い間瓦斯のまゝで存續すべき筈であり、小さな遊星は一番早く液體化すべき筈である。今や、この理論的豫言は、太陽系に實際に見出される事實と正確に一致することがわかる。一番目に木星と土星とが來て、どちらも九つの相對的に小さな衛星を伴つてゐる。その次に來るのが、僅か二つの衛星を伴ふ火星である。その次に來るのが、一つの相對的に大きな衛星を伴ふ地球であり、それに續くのが金星と水星である。この二つは衛星を一つも伴つてゐない。もう一つの方角に進んで行くと、九つづつの微小な衛星を伴ふ木星と土星とがやはり一番目に來る。それに續くのが、四つの小衛星を伴ふ天王星と、一つの比較的大きな衛星を伴ふ海王星とである。²⁹ 第十四圖の各遊星の下に書き入れてある數字は、衛星の數

29 1949年にネレイドが発見された。2009年現在、海王星は13個の衛星を有している。

である。かういふ仕方では、衛星系の配列に於ける法則と順序とが非常にはつきりして来る。そしてこの配列は、全く潮汐説の豫言に一致することがわかる。葉巻形配列は、もろくの遊星の大きさに常て嵌るばかりでなく、當然の事ながら、その衛星の数にも當て嵌る。

僅か一つづつの、比較的大きな衛星を伴ふ地球と海王星は、最初液體状であつた遊星と、最初瓦斯状であつた遊星との間の明白な境界を示してゐる。この事は我々に次の事を推測させる。水星と金星とは誕生直後に液體状又は固體状になつたに違ひないこと、地球と海王星は一部分液體状で一部分瓦斯状であつたこと、火星と木星と土星と海王星は生れながら瓦斯状で、少なくとも衛星家族の誕生後までは瓦斯状のまゝで續いたことを。

火星及び天王星の重量は、遊星系に於けるその位置の割合に異常に小さい、といふ事情の中に我々は恐らく潮汐説を確證するもう一つの證據を見出すことができる。我々が想像したやうに、若し遊星が凡て一つの連續した物質線條から生れたものとすれば、誕生時に於ける火星の重量は恐らく地球と木星とのその中間であり、天王星の重量は海王星と土星とのその中間であつたであらう。しかし若し、我々が既に想像したやうに、二つの變則遊星、火星と天王星とが、瓦斯状態で生れた二つの最小の遊星であつたら、兩者が自己の實質を失ふ量は、他の遊星がその最外分子層から、冷却して液體状態になる前に空間の中へ消散させるよりも恐らく一層多いであらう。若し火星

と天王星とが、最初は今よりも遙かに重かつた遊星の單なる殘物であると想像されるなら、變則は消滅しはじめ、合せ繪判じの諸斷片は非常に満足な仕方で合致しはじめる。

軌道面

すべての自轉する塊は、瓦斯狀であらうと、液體狀であらうと、又は固體狀であらうと、一定の自轉軸を持ち、また、これと垂直に、一定の赤道面を持つてゐる。赤道面は塊を對稱的に分割して、二つの全く相等しい半球にしてゐる。一つの塊がそれ自體の自轉で分裂しても、赤道面と對稱とは依然として持續する。この實例は、自轉する星霧のどんな一組の寫眞にも見出すことができる。例へば、第十五畫及び十六畫に示したのがそれである。もつと微賤な生活に於いては、廻轉する自轉車の車に跳ね上げられる泥土の飛沫に、同じ實例が見られる。それは車が廻りつつある面に悉く留まる。

若し太陽の赤道面が、太陽系のための對稱面であり、従つて太陽系全體がこの面の二つの側に同様に配列されてゐることがわかつたら、おそらく太陽系を自轉に依る分裂の結果として説明することができたであらう。しかし太陽の赤道面は對稱面ではない。もろくの遊星はそれの中で運動しないで、大部分はそれと五度又は六度の直角をなす面で運動してゐる。今の微賤な類推で云ふと、

泥土の飛沫は自轉車の車が廻りつつある面で飛び廻つてはゐない。

遊星は太陽の自轉分裂に依つて生れた、といふ仮説は、かういふ事實に直面すると全く水泡に歸する。しかし潮汐説はそれに就いての一つの單純な説明を即座に提供する。太陽は依然として遊星が生れる前と同じやうに自轉しつつあるので、自己の最初の赤道面をそのまゝ保つてゐる。それは全く違つた面で、又はそれに楕く接近して、もろくの遊星は軌道を描いてゐるのであるが、この面は明かに最初通りかかつた恒星に依つて長い潮汐線條が引き出された面でなければならぬ。かくして、外遊星が今運動してゐる面は、二つの恒星、即ち太陽と、太陽の子供たちの第二の親である漂流星とが、二十億年前に相互の周圍に軌道を描いてゐた面の位置を示すに違ひない。これは件の漂流星を突きとめる唯一の手がかりであるが、勿論あまりに微かであるから、こんな長い時間がたつた後では、容易に突きとめることはできない。

要約すれば、宇宙の大部分を開拓する手がかりとなつた正常な機構は、『引力的不安定』の作用に由る、代々の天文學的物體の誕生であることがわかつたわけである。正常な系圖は、幾分次の通りである。

混沌 — 星霧 — 恒星 — 連星系 — 副系統

しかし、凡ての恒星が最後の二代まで進んで行つたと言ふのではない。自轉量が少ない場合には、恒星がもはや再分を行はないで全生涯を終つたところで無理はない。わが太陽は、若し第二の星の密接な接近といふ稀な出來事がなかつたら、この事の實例を示したであらう。この兩者の相互作用から、他の二つの代が現はれた。これもやはり引力的不安定の機構に由るのである。わが太陽系にとつては、空に存在し得る他の同様な系統の場合のやうに、系圖は次の通りである。

混沌 — 星霧 — 太陽 — 遊星 — 衛星

以上二つの系圖型はどちらも五代を示し、各々は自分の親から引力的不安定の作用に由つて生れたのである。そして二つの系圖には、我々がよく知つてゐる大型の天文學的物體が實際上悉く含まれてゐる。して見ると、次のやうに言つても公平である。『引力的不安定』は、宇宙の本建築に第一の責任がある作因であるやうに見える、と。

ローシュ限界

引力的不安定の君臨は遊星の衛星の誕生をもつて終るに違ひない。これらの衛星よりも一層重量の少ない瓦斯物體は接合してゐることが出来ないからである。最も好都合な事情の下に於いてさへ、さういふ瓦斯物體の弱い引力的牽引は、その最外分子が逃避するのを制することはできないであらう。そのために、全體の塊が見る間に空間の中へ離散するであらう。然も、天文學はそれよりも小さい物體の實例を澤山提供する。小遊星、隕星又は流星、土星環の粒子のことは既に述べた。これら凡てはあまりに小さくて瓦斯状態のまゝで生れることはできなかったほどであるから、我々はそれらをもつと大きな塊の破片であると想像しなければならぬ。この事は、これらの小物體は概して個々のまゝでなく群をなして見出されるといふ事情と一致する。

小遊星は單一の群として見出される。若しこれらが太陽系に限なく散在してゐることがわかつたら、その起源は一つの困難な問題とならう。しかし事實はさうでないから、小遊星の全群は、全く單純に、一つの原始遊星の破片として説明することができる。³⁰ 土星環も、土星の月が以前破砕された時にできた斷片として自然に説明することができる。これまでは殆んど言及する機會のなかつた彗星も、おそらく微細な物體の群である。それらは、相互の引力的吸引に依つて、空間の中に普通の軌道を描くに足るほど結合してゐる。ハレイ彗星は、一九〇九年に現はれた時に、太陽の光を、

30 單一の惑星が破砕されて小惑星ができたという説は現在ではほぼ否定されている。

直徑二十五哩の單一物體と同じほど反射すると見積られた。然も、その外見上の表面は、さういふ物體のその三十萬倍であつて、全く透明であつた。この彗星は廣汎な空間に跨つた小物體の群から成り立つてゐたといふ結論に反對するのは困難である。そしてさういふ群も簡単に單一な塊の破片であると説明することができる。

流星、又は隕星も、群になつて出て来る。もつと先へ行くとわかるやうに、これらの群の多數が行ふ運動を見ると、それらが分裂した彗星と同一であることがわかる。かくして、一つの彗星を構成する破片は、地球の大氣の中に入り込むと流星となつて現はれる隕星と同一である。シャプレイが見積つたところに依ると、地球の大氣は毎日何十億といふ流星を捉へるに違ひない。その中で、肉眼に見えるほど輝いてゐるのは、せいぜい百に一つくらゐのものである。一般にそれらは地球の表面に達する前に分解して蒸氣となる。時折は非常に大きなのがあつて、地球の大氣もそれを全く消散させることはできず、その残りは一つの固體——隕石——となつて地球を打つ。あらゆる流星及び隕石は、只一つの斷片から成り立つ微細な彗星と見做されて差支へない。時々ほんの僅かな距離を置いて平行通路を進行する斷片の全群が、地球の大氣を打つて、『火球』となつて現はれることがあり得る。一般的に云へば、太陽系に屬する凡てのやくざ物は群になつて運動してゐるから、おのづから大物體の破片と解釋することができる。

若し隕石が、太陽から遊星と同時に生れた物體の破片であるとすれば、それらは、殆んど地球と同じ頃、約二十億年前の時代に、固結したに違ひない。しかし、若しそれらが何か他の恒星から生れたのであつたら、それらが固結した時期は、おそらく幾萬億年以前の何處かであつたらう。

パネス教授と、ケニグスベルグの二人の同僚とは、最近、地球の年齢を定めるために使用されたものと同様な方法で、様々の隕石の年齢を見積つた。それは數百萬年から二十九億年までの範圍に跨つてゐるが、この後の數字を越えるものは一つもない。幾萬億年に近い年齢を暗示する隕石は、只の一つもない。この事は、これらの石が地球を造り出したのと同じ大激變の產物であることの非常に力強い證據となり、それに附隨して、地球の年齢に關する我々の以前の見積りのための一つの貴重な確證となる。

大きな物體が如何にして分裂して隕星の群になり得るかを、我々は容易に見ることができる。太陽は、通りかかつた星の潮汐的牽引に依つて、少なくとも一家族の遊星を放逐する程度に破壊されたと我々は想像した。この通りかかつた星が通り過ぎないで停止するに至つたら、どんな事が持ち上つたであらうか？　それが太陽の或る距離の範圍内に留まつてゐる間、その潮汐力は太陽を牽引して切々にしつゝあつたわけである。この星の訪問がもつと長い間續いたら、太陽にもつと大きな隆起が出来上つて、もつと大家族の遊星が生れたであらう、といふことを我々は想像することが

できる。最後に、無制限に續く訪問は太陽を破碎して切々にしたであらう。

一八五〇年に、ローシュはかういふ潮汐分裂の過程に關する一つの數學的研究を提出した。彼の議論は固體又は液體を取扱つただけであつたが、その基礎となつてゐる機構は、物體が固體であらうと、液體であらうと、又は瓦斯状であらうと同一である。我々が既に見たやうに、二つの物體が同時に潮汐作用を受ける場合には、小さな方が餘計に受難する。ローシュは、一つの物體がもう一つの物體と比較して非常に小さい場合を取扱つただけであつた。さういふ場合には、小さな物體は完全に破壊されるのに、大きな方は何の害をも受けない。ローシュは、小さな物體は大きさの漸次に減少する軌道を大きな物體の周圍に描くと想像した。彼は次のやうに計算した。若し二つの物體の密度が相等しかつたら、小さな物體はその軌道の半徑が大きな物體の半徑の二・四五倍になるや否や破壊されるであらう、と。若し二つの物體の密度が相異なつてゐたら、問題はもう少し込み入つて来る。我々は次のやうに想像しなければならぬ。大きな方の物體は、小さな方の物體と同一の平均密度を保つまでは膨脹し又は収縮する、と。臨界距離は、膨脹し又は収縮した状態にあると想像される大きな方の物體の二・四五倍の半徑である。

この距離は一般にローシュ限界として知られてゐる。衛星が本遊星の周圍に安全に圓形軌道を描くことができるのは、この軌道がローシュ限界の彼方にある間だけである。しかしこの限界内に侵

入するや否や、それは破壊されて切々になる。次の数字はローシュの數學的分析を確證する。

土星の最外環の半徑……………土星の半徑の二・三〇倍

ローシュ限界……………本遊星の半徑の二・四五倍

土星の最内衛星の軌道半徑……………土星の半徑の三・一一倍

木星の最内衛星の軌道半徑……………木星の半徑の二・五四倍

火星の最内衛星の軌道半徑……………火星の半徑の二・九九倍

同時に、これらの数字は、土星環が、ローシュ限界に依つて指定された危険帯に敢て入り込む以前の衛星の破片であることを、甚だ力強く暗示する。我々が既に見たやうに、わが月は、早晚自己の軌道を収縮させて、遂に地球を取圍むローシュ限界内に引き入れられて切々に破壊される運命にある。さうなつてから後は、地球は月を持たなくなつて、土星のやうに環に取圍まれるであらう。

我々は土星環を複數と呼ぶ。なぜなら二つの別々になつた圓形の空隙が三つの別々の環のやうな外觀を示してゐるからである。環は三つの別々の衛星の破砕された殘物である、といふ性急な推理へ飛躍する傾向があるが、これは誤りである。ゴールツブローが證明したところに依ると、土星をめぐる一定の軌道が、土星の一層大きな衛星の運動に依つて不安定にされるので、さういふ軌道に於いてはどんな分子も永久に存續し得るものではない。彼はこれらの不安定な軌道のための位置を

計算した。そしてこれらは環と環との間の觀測された劃線の位置と正確に一致することがわかる。かくして、土星環は恐らく單一の衛星の破損物に依つて造り出されたのである。わが月が最後に地球の周圍に形成するであらう小衛星の環は、劃線を含まないであらう。なぜなら、地球には一定の軌道を不安定にさせる他の月を持つてゐないからである。

ローシュの根本的觀念は、多くの方向に敷衍することができ、また様々に應用することもできる。例へば、太陽の周圍には、ローシュ限界に依つて定められた一つの危険帯が存在しなければならぬ。この危険帯の太陽からの距離は、それを危険にする物體の密度に依存する。彗星のやうな低い密度を持つてゐる物體にとつては、距離は實際非常に大きくなるであらう。彗星は、その危険帯の距離はどれほどであらうと、時折は危険帯を通過し、且つさうすることに依つて破壊されるに至る。二つの彗星、即ちビーラ彗星（一八四六年）とテイラー彗星（一九一六年）は、地球の太陽からの距離と同じくらゐになつた際、事實上二つに割れたのが觀取された。そして一八八二年に一つの彗星は四つの部分に分れたのが見えた。ビーラ彗星が適當な進路を辿つて復歸した時には（一八五二年）、百五十萬哩離れた二つの別々の彗星のやうな形態になつてゐた。その時以來、元の彗星のどちらの部分も二度とは見られなくなつた。この彗星の軌道は、アンドロメダ座隕星のそれと同

一であつた。これらの隕星は、十一月二十七日に流星を地球の大氣中に出現させる^三。この點から見て、これらの流星は恐らくビーラ彗星の破片物であらう。他の際立つた流星群も、彗星の進路に於いて運動してゐる——三十三年毎に莊嚴な美觀を呈するのを常とする獅子座流星群は、彗星一八六六の進路に於いて、ペルセウス座流星群は、別の彗星（一八六二）の進路に於いて、水瓶座流星群は有名なハレイ彗星の進路に於いて、運動してゐる。その各々の場合に、流星が彗星の離散片であることは殆んど疑ふことができない。このほかにも彗星の家族が二つ三つある。その成員たちは、最初は單一の塊を形づくつてゐたかのやうに、互に後を追つて同一の軌道をぐるぐる廻つてゐる。

同様に、ローシュ限界は遊星である木星をも取巻いてゐるに違ひない。そのために、彗星や他の諸物體は、この限界に依つて定められた危険帶の中へ入り込んで破壊されることがあるかも知れない。木星の最内衛星は、既に危険なほどそれに近づいてゐる。しかし、この特殊な危険帶に就いての最大の興味は、それが恐らく小遊星の存在を説明することである。太陽系の初期の時代、もろもろの遊星の軌道が現在よりも一層圓形に近くなかつた時には、火星と木星との間の原始遊星が、そ

31 1892年を最後に、アンドロメダ座流星群の活動は見られていない。ピエラ彗星は完全に分解し消滅したものと考えられてゐる。

れを木星の危険帯の範囲内に度々引き入れるほど延長された軌道を描いてゐたのは尤もである。果してさうであるなら、我々は小遊星の起源をこれ以上求める必要はない。すべての小遊星の平均軌道はボーデ法則が火星と木星との間に存在させる遊星のそれと殆んど正確に一致してゐるといふことは意味深い。

第五章 恒星

我々が前章で考察した宇宙開拓の過程は、普通、一つの單純な恒星をもつて終る。尤も、特別な出來事があれば他の諸結果が生ずるかも知れない。他の恒星との密接な接近の結果として、恒星の總數のほんの一小部分、おそらく十萬に約一つの恒星は、遊星といふ從者に附き添はれることになるかも知れない。それより遙かに大きいにしても、やはり小さい別の小部分は、過度な自轉の結果として分裂して、連星系又は恐らく重星系を形づくつたやうに見える。しかし、恒星の大多數の運命は、ひとりで分裂することもなく、他の星に破壊されることもなしに、自己の通路を辿つて、單獨に空間の中を運行することである。さういふ恒星が外界と保つ唯一の接觸は、空間の中へ絶えず輻射を注ぎ出すことである。かうした輻射の放出は、ほとんど全く片道の過程であつて、一つの星が他の星から受け得るどんな輻射も、それ自體が放出しつつかある量と比較すれば、全く感知できない。輻射には重量の喪失が伴ふ。そしてこれがまた、與へるだけで貰ふことがなく、星が空間から掃き寄せる漂流物質の重量は、それが受ける輻射のそのやうに、輻射に依つて失ふ重量と比較す

れば、全く感知できない。空の正常な物象を、ひとり無限の空間の中で絶えず輻射を注ぎ出しながらもその代償を受けることのない孤獨な物體に理想化しても、事實を不當に曲げることはなるまい。

この章では、さういふ星が一生涯の間に經驗しさうに思はれる變化系列を考察するであらう。恒星が起すことのある機械的出來事、即ち、自轉に依る分裂生殖と、通りかかった星の潮汐作用による分裂とは、既に論じたので、今度は、すべての出來事を免れて遂に單なる老衰のために消滅するに至る普通の星の生涯を考察することにしよう。

まづ第一に、空に觀取される様々の恒星型の物理的狀態を述べる必要があらう。そしてこれに對する設備として、天文學者の觀測は如何にして恒星の狀態に關する直接の知識を與へる形態に翻譯されるかを説明しなければならない。

表面温度

我々が第二章で見たやうに、輻射の光又は波長のそれぞれの色は、特別の温度と結びついてゐて、物體が一定の温度にまで熱せられると、この色の光が優勢になる。例へば、我々が赤熱と呼ぶものにまで高められた物體は、赤色の光を、他のどんな色の光よりも餘計に放出するので、我々の眼に

赤く見えるのである。

かくして、若し一つの星が赤色に見えるなら、その表面は我々が赤熱と稱する温度になつてゐると推理するのが正當である。若し別の星がアーク燈の炭素のやうな色を持つてゐるなら、その表面はアーク燈と殆んど同一の温度になつてゐると結論して差支へない。かういふ仕方では、我々は恒星の表面温度を見積ることができ。

實際上では、この手續は今述べた事柄が暗示するやうに思はれるほど粗雑ではない。天文學者は恒星から来る光に分光器を通過させて、それを相對なる色に分析する。正確な測定過程に依つて、彼はその時光の相異なる色が占める比例を決定する。この比例を見ると、光の何れの色がその恒星のスペクトルの中に一番多いかが即座にわかる。この比例か、でなければ色の一般的分布から、彼はその恒星の表面温度を演繹することができる。

我々が既に見たやうに、プランクは、完全輻射體の放出する輻射が、スペクトルの相異なる色又は波長の間に、依つてもつて分布される法則を發見した。第十五圖に示した四つの曲線は、四つの温度、即ち三千度、四千度、五千度、及び六千度に熱せられた表面から放出される輻射の理論的分布を表はしたものである。光の相異なる波長は、水平軸の上にある點をもつて表はされ、印のある波長は、普通アングストロムと呼ばれる、一糎の一億分の一の單位で測定されてゐる。さういふ點

の上方にある曲線の高さは、該當する波長の帽射が豊富なことを表はしてゐる。

星の温度を決定する二つの方法は、これらの曲線を参照すれば容易にわかるであらう。六千度の曲線は、四千八百アングストロムの波長の所で最大の高さに達してゐるので、若し四千八百アングストロムの波長の光がどんな星のスペクトルに於いても一番多いことがわかつたら、この星の表面は六千度の温度を持つてゐることになる。第二の方法は、觀測された曲線が、第十五圖に示した理論的曲線の何れに最も密接に適合し得るかを吟味することに成り立つにすぎない。

この二つの方法のどちらに依つても、太陽の表面温度は絶對度盛の約六千度であつて、電弧の最も熱い部分の温度の殆んど二倍であることがわかる。地球上で太陽から受けられる光と熱の總量に依つて、太陽輻射は、全くではないにしても、『完全温度輻射』であるに違ひないことがわかる。この事は、また、太陽輻射が、第十五圖に示した六千度の完全輻射體のための理論的曲線に甚だよく一致する一つの仕方で、さまざまの色の間に分布されるのを見てもわかる。

星の表面温度もその分光型から見積ることができる。星のスペクトルに於ける線の多數は、一つ以上の電子がこの星の大氣の熱に依つて剥ぎ取られた原子の放出するものである。我々は件の電子が最初に原子から剥ぎ取られる時の温度を知つて、その星の温度を演繹することができる。

第八畫に示したやうな星のスペクトルの相異なる型に相應する温度は、ほゞ上の表の通りである。

この表に於ける最後の三つは、太陽のそれと比較できる直徑を持つ普通の星に當て嵌るだけである。先へ行くとわかるやうに、恒星の第二部門（巨星）が存在してゐて、その直徑は太陽のそれよりも非常に大きい。これらは上に示すやうな實質的に一層低い温度を持つてゐる。

星の構造及び機構を研究するに當つて、我々は、星の表面の、その温度に依つて測定される熱を、それが一時平方に付き放出する輻射量ほどは問題にしない。

これは勿論温度に依存する。表面が熱ければ熱いほど、それが放出する輻射は多いわけである。しかし、温度は放出される輻射量の尺度にはならない。若し表面温度を二倍にすれば、それは以前の輻射量の二倍でなしに十六倍を放出する。表面の各一時平方から放出される輻射は、温度の四乗に従つて變化する。その結果、**三百度の表面温度、即ち太陽のその半分を持つてゐる星は**、一時平方に付き太陽の十六分の一の輻射を放出するにすぎない。各々の星の輻射は、光と熱と紫外輻射との合成物であり、これらのものの比例は相異なる星に於いて同一ではない。星の表面が冷えれば冷えるほど、熱として放出されるその輻射の分數は大きくなる。かくして、三百度の星は、一時平方に付き太陽光の十六分の一を放出しないで、太陽熱の十六分の一以上を放出するであらう。

* これも第十五圖に示してあつて、三千度曲線の面積は六千度曲線の面積の十六分の一にすぎない。

これに依ると、星の總體の輻射量は、その實視光輝のみから見積することはできないことがわかる。不可視輻射、即ちスペクトルの赤色の末端に於ける不可視熱と、もう一つの末端に於ける不可視紫外輻射との双方のために、いつも實質上の斟酌を行はなければならない。これらの訂正の重要性は第十六圖に示してある。四つの濃い曲線は、既に第十五圖に示したものと同一であつて、一定の表面温度を持つ星から放出される輻射がどんな風に相異なる波長の上に分布されるかを示したものである。どんな温度に於いても放出される輻射の總體は、勿論、對應する曲線と水平軸との間に取圍まれてゐる面積全體に依つて表はされてゐる。我々の眼は、三千七百五十アングストロムと七千五百アングストロムとの間にある波長の輻射を感受するにすぎないので、この全體の輻射の中で眼に見えるのは、影をつけた細長い帯の部分だけであり、残りの部分は悉く不可視輻射を表はしてゐる。

六千度の星が放出する輻射は、かなりの割合で可視範圍に這入つて來るが、三千度の星が放出する輻射はほんの一小分さうなるにすぎない、といふことは即座にわかる。星々を全體として考へれば、星の光は星々の總體の輻射の一小部分を形づくるにすぎない。

若し我々の眼が突然あらゆる種類の輻射に感應し易くなつて、實視光線のみにさうしなくなつたら、空の外観は不思議な變状を示すであらう。赤星ベテルギウス及びアンタレスは、現在では光度

順に於いて第十二及び第十六にすぎないが、空の二つの最も輝かしい星として閃き出るであらう。ところが、現在凡ての中で最も輝かしいシリウスは、第三番目になるであらう。非常に不分明なヘルクレス座に於ける一つの星は、第六の最も輝かしい星に見えるであらう。それは現在二百五十の星よりも圖抜けて輝いてゐるヘルクレス座の星である。この星は、二千六百五十度といふ極端な低温度の結果として、その輻射を殆んど全く不可視熱の形態で放出してゐる。例へば、それは約二萬度の温度を持つ馭者座の青星の六十倍の熱を放出してゐるが、光はその五分の四を放出してゐるにすぎない。

この著書に於いて言及する凡ての計算に於いては、不可視輻射は差引いて置いた。尤も、この事はその時その時にわざわざ述べる必要はないと思ふ。

星の直徑

遊星の直徑を測定するのは容易である。なぜなら、これは望遠鏡には有限の大きさを持つ平圓面として現はれるからである。しかし恒星はあまりに遠いので、その直徑を同様の仕方では測定することはできない。空には六哩の距離を置いてかかげたピンの頭ほどの大きさを持つ恒星は一つも見えない。そして望遠鏡もまだこの大きさの物象を一つの平圓面として示すことはできない。すべて

の恒星は、最も近く最も大きなものさへ、單なる光點に見えるので、その直徑は迂回方法に依つて初めて測定できるのである。

*口繪に示した大きな圓い恒星像は、單に曝し過ぎからさうなつたのであつて、恒星の大きさには何の關係もない。

恒星の距離がわかると、我々は、その光度をその現視光輝から告げることができる。この現視光輝から、我々は、不可視輻射を斟酌した後、この恒星のエネルギー放出の總體を演繹することができる——百萬億馬力の幾百萬倍といふ風に。我々はまたそれが表面の一時平方に付き放出するエネルギー量をも知ることができる。なぜなら、これは我々が直接に分光觀察から演繹するその表面温度にのみ依存するからである。これら二つの材料がわかると、この恒星の表面を構成する平方時の數を計算することは簡単な除方の問題にすぎなくなり、これに依つてすぐこの恒星の直徑を知ることができる。

法外に大きな恒星の直徑は、もつと直接に、干涉計として知られてゐる道具に依つて測定できる。我々が一つの恒星に望遠鏡の焦點を合せた時、我々の眼に見えるのは、嚴密に云へば、一つの光點ではなくて、むしろ精巧に出來た環系統に取圖まれてゐる光臨である。この環系統は光と闇とが交互になつたもので、廻折模様と呼ばれる。これらの環の大きさを見ればその星の大きさがわかるで

あらう、と考へられるかも知れない。しかし兩者の間には何の關係もないのである。環は單に道具の缺陷を示すだけであつて、その大きさはたゞ望遠鏡の大きさと視覺装置とに依存するにすぎない。一八六八年にフィゾーが提出した一つの方法に従つて、マイケルソンは、この缺陷さへが如何にして有用な目的に向けられ得るかを示した。そしてその助けに依つて、おそらく近代天文孝に役立つ最も巧妙で人氣のある道具——干涉計を造り出した。實に、この道具は、同一の星の二つの別々の廻折模様を重ねて、それらを造り出す星の大きさを現はすやうな仕方で一方を他方に對照させるやうになつてゐる。最大恒星の少數が持つ直徑は、かういふ仕方で測定されたので、我々はこれらの星の大きさを直接の觀測から知つてゐると言つて差支へない。あらゆる場合に、直接に測定された直徑は、既に説明した仕方で間接に計算されたものと、完全にではないにしてもかなりよく一致する。もろくの相違は、大したものではないが、赤星が前に説明したやうな意味での正確な『完全輻射體』でないことから生ずるやうに見える。

干涉計方法は最大の恒星に役立つだけであるが、規模のもう一つの極點に於いては、相對性原理が役立つた。アインシュタインが證明したところに依ると、一つの星のスペクトルが、この星の重量と直徑との双方に依存する量だけ赤色の末端へ移動すべきであることは、相對性原理の必然的歸結である。そこで、若し星の重量がわかつたら、觀測された分光移動はその星の直徑を即座に告げ

る筈である。この分光移動は、最近、シリウスの伴星から受けられる光の中に観取された。そしてその量の測定は、この星の直徑に取つての値を示し、この値はこの星の光度から計算されたものと正確に一致する。かくして、規模の兩端、即ち恒星の最大のもの並びに最小のものに於いて、直接の観測は恒星の直徑のために計算された値を確認する。

その結果、我々は凡ての恒星の計算された直徑にあらゆる確信を感じて差支へない。これらの直徑が直接の測定に依つて妨げられ得ない時には尚更さうである。實際、眞の直徑と計算された直徑との間の相違は一つの仕方で生じ得るだけであつた。直徑が計算されるのは、恒星はその完全温度輻射を放出するといふ假定に基いてである。若し恒星が一部分星霧のやうに透明であり、又は月のやうな固體であつたら、この假定は虚偽であつたらう。そしてそれが虚偽であることは、恒星の計算された直徑と測定された直徑との間の喰違ひを見ると即座にわかつたであらう。大きな喰違ひは一つも現はれないといふ事實は、次の事を暗示する。即ち、恒星は、最大のものから最小のものに至る大きさの全範圍に亘つて、ほとんど完全温度輻射を放出してゐるのである。

第一節 恒星の種々

觀測して見ると、もろくの恒星の物理的特徴には相違があることがわかる。そのために、間もなく述べるやうに、極端と極端とを對照させて、最も輝かしいものと最も微かなもの、最も大きなものと最も小さなもの、等々といふやうな比較をするとなく面白い。しかし、これは、空の住民に就いての非常に不公平な印象を與へるであらう。それは、見世物師の天幕の中に曝し物にされてゐる巨人と一寸法師、強人と斷食者とを見て、一國民を判斷するやうなものであらう。

全體としての恒星の示す實際の相違程度についてもつと公平な印象が得られるのは、我々が太陽に最も近い星々の物理的狀態を考察する場合である。これらの星を正確にその順に従つて取り上げれば、脇道に逸れて星々を單に奇怪なものであるとか例外なものであるとか云つて紹介するやうな恐れはなくなる。かういふ仕方で得られた小さな星群は、空の星の公平な見本となると考へて差支へない。尤も、これは勿論極端なものを含むに足るほど大きな見本ではないであらう。太陽そのものは詳細に論ずる必要はない。なぜなら、太陽は色々の比較をする時の標準星として示すことになるからである。

セ centa ウル 座 α 系

この系統は三つの星から成り立つてゐる。それらは空間の中で我々に最も近い恒星と信じられてゐる。

最も輝かしいもの、セ centa ウル 座 α 星 A は、太陽に甚だ類似してゐる。これは太陽と同一の色と分光型を持つてゐるが、重量は十四%多く、光度は約十二%多い。太陽と同一の色をしてゐるので、一時平方に付き放出する輻射量も同一である。その十二%ほど大きい光度を見ると、太陽よりも十二%大きい表面を持ち、従つて六%大きい直徑を持つてゐるに違ひないことがわかる。

第二の構成者、セ centa ウル 座 α 星 B は、太陽よりも非常に赤く、その表面温度は、太陽の六千度そこいらに對して、約四千四百度にすぎない。重量は太陽の九十七%であるが、光度は約三分の一にすぎない。然も、低温度の結果として、それは太陽が太陽輻射の三分の一を發射する場合よりも五十%ど多い面積を必要とする。この點から云つて、この星の直徑は太陽のそれよりも二十二%だけ大きい。セ centa ウル 座 α 星 A 及びセ centa ウル 座 α 星 B は一緒になつて一つの實視連星を形づくり、この二つの構成者は七十九年を週期として相互の周圍を廻轉してゐる。

これら二つの構成者のどちらも、太陽とあまり違つてはゐないが、この系統の三番目の星、セン

タウル座プロクシマは、全く違った型をしてゐる。その色は赤く、表面温度は約三千度にすぎない。それは非常に微かで、太陽の一萬分の一の光を持つてゐるにすぎず、太陽の直径の十四分の一を持つてゐるにすぎない。

この系統の三つの星の大きさは、太陽のそれと比較すれば、第十七圖に示した通りのものになる。

ミニク一五〇四〇³²

これは單獨の微光星であつて、まだ殆んど知られてゐない。その表面は赤く、温度は恐らく二千五百度を殆んど越えてはゐまい。それが放出する光は太陽の二千五百分の一にすぎない。

ヲルフ三五九³³

これは今まで發見された最も微かな星であるが、この事以外には、この星のことは殆んど知られてゐない。それは赤色をしてゐて、太陽の光の約五萬分の一を放出するにすぎない。

- 32 へびつかい座にある恒星で、バーナード星と呼ばれている。1916年にアメリカの天文学者であるエドワード・エマーソン・バーナードにより發見された。実視等級は9.5等。伴星を考えに入れないならば、太陽、アルファ・ケンタウリに次いで、3番目に地球に近い恒星である。表面温度は約3,000°C。
- 33 Wolf 359 はしし座の黄道近くにある13.5等の赤色矮星で、太陽から7.74光年の位置にある。アルファ・ケンタウリとバーナード星について太陽系に近い。太陽質量の10分の1。

ラランド二一一八五³⁴

別の微光赤星であつて、太陽の光の二百分の一を放出してゐる。

シリウス系

これは二つの非常に違つた星から成り立ち、第三の星も存在してはゐないかと考へられる。主星シリウスAは、空で最も輝かしい星（狼星）である。その色は白色で、表面温度は約一萬一千度である。これは殆んど太陽温度の二倍であるから、シリウスAは一時平方に付き殆んど太陽の十六倍の輻射を放出してゐるわけである。光度は太陽のその約二十六倍である。これから割り出すと、この星の直径は太陽のそれよりも五十八%大きくなければならない。容積は太陽のその殆んど四倍である。しかし重量は二・四五倍にすぎないので、シリウスAには物質が太陽の場合ほど緻密に詰つてゐないわけである。太陽は一米立方に平均一・四二噸を含んでゐるが、シリウスAの場合には〇・九三倍にすぎない。

微光伴星シリウスBは、空で最も興味のある星の一つである。これはシリウスAと殆んど同一の

34 Lalande 21185. おおぐま座にある赤色矮星。視等級は7.4等。太陽系から8.3光年の位置にあり、Wolf 359 に比べて太陽に近。BD+362147, Gliese 411, HD 95735 など記号を与えられている。太陽質量の約半分、輻射の大半は赤外領域。

色と分光型を持つてゐるが、光はそれの一萬分の一を放出するにすぎない。表面温度に於ける少しの相違を斟酌すると、この星の表面はシリウスAのそのの二千五百分の一、直径は五十分の一にすぎないことがわかる。然もシリウスAの重量はシリウスBの三倍にすぎない。尤も、容積は十二萬五千倍である。注目してゐるのは、シリウスAではなくてシリウスBである。後者に於ける物質の平均密度は水のそのの約六萬倍であつて、平均一吋立方に殆んど一噸の物質が含まれてゐる。第十八圖は、第十七圖と同じ縮尺に描いたシリウスの二つの構成者の大きさを示したものである。

B D 十二度帶四五二三及びインネンス十一時帶十二等七五二度星

この二つの星の物理的状态については、二つとも非常に微かで、それぞれ太陽の光の千四百分の一及び一萬分の一を放出してゐるといふこと以外には、何事も知られてゐない。

ゴールドバ五時帶三四三及び鯨座T星

二つの微光星であつて、どちらも赤みがかつた色をし、それぞれ太陽の光の六百分の一及び三分の一を放出してゐる。

プロシオン系

これは連星系であつて、多くの點でシリウスに類似してゐる。主星、プロシオンAは、太陽と同一の一般型をしてゐるが、重星は二十四%多く、光は五倍二分の一を放出してゐる。微光伴星、プロシオンBは、非常に微かであるから、その物理的狀態については、太陽の光の三萬分の一を放出してゐるにすぎないといふこと以外には、何事も知られてゐない。重量は、太陽の重量の三十九%である。

第十九圖は、前と同じ縮尺に基いて、プロシオンの二つの構成星の大きさを示したものである。太陽から遠ざかる時の順で次に來るのは、八つの非常に不分明な星である。その一つは、太陽より一層赤く且つ微かであつて、五千度より高い表面温度を持つてゐるものではなく、太陽の光の四分の一以上を放出してゐるものはない。次に來るのは、

クルガア六〇系

である。これは連星系であつて、どちらの構成者も、小さくて、赤くて、微かである。輝かしい方の構成者、クルガア六〇Aは、三千二百度の表面温度を持ち、太陽の光の四百分の一を放出して

ある、直径は太陽の三分の一であり、重量は四分の一である。そのために、この星の實質は、太陽のその約七倍ほど緻密に詰つてゐるに違ひない。

微かな方の構成者、クルガア六〇Bも、同様の表面温度を持つてゐるが、それでゐて太陽の光の一萬四千分の一を放出してゐるにすぎない。直径は太陽の六分の一であり、重量は五分の一である。そのために、この星の實質は太陽のその四十倍ほど緻密に詰つてゐるに違ひない。この系統のことは第二十圖に圖解してある。

ヴァン・マーン系

別の非常に微かな星で、七千度といふ高い表面温度を持つてゐる。それにも拘らず、太陽の光の六千分の一を放出するにすぎない。その結果、直径は太陽の百十分の一にすぎないので、この星はむしろ地球よりも小さい。重量は不明であるが、實質は恐らくシリウスBの場合よりも一層緻密にさへ詰つてゐるであらう。

恒星のかういふ見本に關する議論は、空間に於ける恒星の大多數に太陽よりも小さくて、冷くて、微かであることを暗示する。太陽より遙かに輝かしい恒星も存在してはゐるが、それは例外であつて、空の普通の恒星は、わが太陽と比較すれば、小さい鈍い微かな物である。

眼の前の空にかういふ見本があれば、我々は更に進んで、極端なものに言及するのを恐れることなしに、組織的な仕方様々の恒星の特徴を論ずることができる。先づ重量から始めよう。

星の重量

空全體に、最小の既知の重量を持つ恒星は二つある。それは今述べたクルガア六〇の微かな方の構成者と、三重系であるエリダン座〇¹星の最も微かな構成者である。この三重系の各々は太陽の重量の五分の一を持つてゐる。しかし重量の知られてゐる恒星は非常に少ないので、これらを恒星界全體に見出される最小重量であると想像する正常な理由はあり得ない。先へ行つて示す諸線に於いて、局面を一般的に見渡して見ると、それよりも一層小さな重量を持つ恒星が澤山存在するかも知れないこと、しかしそれよりも恐ろしく小さな重量を持つものは恐らく非常に少ないことが察せられる。太陽の重量の十分の一といふほど少ない重量を持つ恒星は、恐らく非常に少數であらう。

恒星の大多數は、太陽の重量の十分の一と十倍との中間の重量を持つてゐる。太陽の三倍の重量を持つ恒星さへ稀であり、十倍の重量を持つものは更に稀であつて、恐らく約十萬に一つの恒星が太陽の重量の十倍を持つにすぎないであらう。もつと高い重量は疑ひもなく見出されることは見出される。その實例として我々は既にプラスチック星を擧げた。この連星の二つの構成者はそれぞれ

太陽の重量の七十五倍及び六十三倍以上を持つてゐる。また、四重系、大犬座二七を擧げた。それは見たところ太陽の九百四十倍の重量を持つてゐる。しかしかういふ實例は非常に稀である。我々は次のやうに言つて差支へない。一般的法則として、恒星の重量は太陽の十分の一から十倍までの範圍内にある、と。そして、 $\sim$ の恒星は重量の點では他の物理的特徴の大部分に於けるほど違つてはゐないことがわかるであらう。

光度

それよりも遙かに大きな範圍は、例へば、恒星の光度の點で——太陽の燭光を單位として測定した恒星の燭光の點で、示される。既知の最高輝星は、既に擧げた旗魚座S星である。これは太陽の光度の三十萬倍を持つてゐる。最低輝星はラルフ三五九であつて、これは太陽の光度の五萬分の一を持つてゐるにすぎない。星の光度の範圍も、星の重量の場合のやうに、太陽の兩側に、殆んど等しく跨つてゐるので、太陽はどちらかと云へば重量の點でも光度の點でも中間星である。

太陽が中間にあるのは、兩極端の間の殆んど中間にあるといふ意味に於いてであるが、それ以下にも以上にもつと澤山の星が存在することは、我々が既に見たところである。

星の重量の非常に中庸を得た範圍に比較すれば、光度の範圍は絶大である。太陽を普通の蠟燭と

すれば、旗魚座S星は燈臺であり、アルファ三五九は螢よりも小さいくらゐである。若し太陽が突然旗魚座S星ほどの光と熱を放出しはじめたら、地球とその上にあるあらゆる物の温度は、約七千度に昇るであらう。そのために、我々も固形の地球も消滅して蒸氣の雲になつてしまふであらう。他方で、若し太陽の光及び熱の放出量が突然アルファ三五九と同じになつたら、地球の赤道にゐる人々は、この新しい太陽が晝間でも一哩先の石炭の火と同じほどの光と熱を提供するにすぎないことを見出すであらう。その時には、我々は一人残らず凍りついて固體となり、それと同時に地球の大氣は液體空氣の大洋の形態で我々を取圍むであらう。我々が知る限り、太陽が突然旗魚座S星のやうな作用をしはじめる可能性はない。しかし、もつと先へ行くとわかるやうに、太陽がアルファ三五九のやうな作用をしはじめる可能性はまんざら架空の夢ではないのである。

表面温度と輻射

シリウスは太陽に近い凡ての恒星の中で最高の表面温度を持つてゐることがわかつた。それは約一萬一千度、即ち太陽のその殆んど二倍である。もつと遠くへ進んで行くと、それよりも遙かに高い表面温度を持つてゐる恒星を澤山見出すことができる。例へば、プラスチック星は二萬八千度の温度を持つてゐると信じられてゐる。尤も、非常に高い星の温度のあらゆる見積りの中に、實質

的な不確定要素が入り込むことは認めなければならない。

もう一つの極點に於いては、星の温度が約二千五百度に及ぶ場合は比較的ありふれてゐる。凡ての中の最低温度は、非常に特別な型の變光星（長週期變光星）に限られてゐる。これらの變光星に於いては、光變差は、星の表面の温度の變差に伴ひ、また主に温度の變差から生ずる。これらの星の温度は、最も低い時には、千六百五十度に及ぶ。それは殆んど普通の石炭火の温度以上ではない。これらの星の多數に於いては、温度の差は廣範圍に亘つてゐるが、星が全く見えなくなるほど低くなることは決して無い。かくして、約二千五百度以下にも温度範圍がある。この範圍には、時々その中に入り込むにとどまる長週期變光星を除けば、一つの星も見出されない。この事は、空にある絶對暗星の數が相對的に小さいことを暗示するやうに思はれるであらう。他のもろくの線上に於ける證據も同一の結論に達する。たとへ星が輝くのをやめても、その引力的牽引に依つてやはりその存在がわかるであらう。我々はいふ仕方では只一つの暗星をも發見することはできなかつたにしても、我々は多くの暗星を發見することができた。若し星の大部分が暗星であつたら、我々は恐らく暗星の存在に、それらが他の星の運動に及ぼす諸結果から氣づくであらう。従つて、一般的な引力的考察に依ると、多數の暗星が存在するものではないことがわかる。

我々の現在の知識が届く限りでは、星の表面温度は、大體に於いて、約三萬度から約二千五百度

までに跨つてゐる。それよりも低い限界は、長週期變光星の最低温度の場合に約千六百五十度にまで延長される。

長週期變光星は別として、これは十二から一までの範圍にすぎないので、恒星の温度は光度又は重量の何れよりもつと一樣であることになる。しかし、我々は次の事を記憶しなければならない。即ち、星の一時平方當りの輻射は、表面温度よりも遙かに根本的なものであつて、後者に於ける十二乃至一の範圍は、前者に於いては二萬乃至一以上の範圍を含むことになるのである。若し長週期變光星をも含めることにすれば、一時平方當りの輻射放出量には、約十一萬乃至一の範圍が存在することになる。馬力をもつて言ひ表はせば、太陽は一時平方に付き五十馬力の割合でエネルギーを放出し、表面温度千六百五十度の星は、一時平方に付き〇・三五馬力を放出するにすぎない。ところが、表面温度二萬八千度のプラズケット星は、一時平方に付き約二萬八千馬力を放出する。平易な言葉で云へば、この最後の星の各一時平方は、大西洋定期船を、毎時間、世紀に世紀を次いで、全速力で航行させるに足るエネルギーを注ぎ出すわけである。そして様々の星の表面から放出される一時平方當りのエネルギーは、定期船の力から橈舟に乗つてゐる人間の力に至る全範圍に跨るほどである。

大きさ

既知の直径の最大のものを持つ恒星は四つあつて、上掲の表の通りである。

凡てこれらの直径は直接に干渉計に依つて測定されたものである。太陽が約六ペニ銅貨の大きさになつてゐる、第十七圖乃至二十圖に於いて使用された縮尺に基づけば、鯨座O星を表はすのに必要な圖は、十分大きな室の床くらゐの大きさになるであらう。ところが、この系統の第二星（といふのは、鯨座O星は連星である）は、一粒の砂くらゐの大きさになるであらう。次のやうに言へば、これらの星の絶大な大きさについて何らかの觀念が得られるかも知れない。それらの星の直径はいづれも地球の軌道より大きいので、若し太陽がその中の何れでもの大きさになで膨脹することになつたら、我々はその内側に包まれてしまふであらう、と。

これらの星は非常に稀薄であるに違ひない。例へば、アンタレスは太陽の九千萬倍の空間を占めてゐるので、若しこの星の實質が太陽と同じほど緻密に詰つてゐるなら、その重量は太陽の九千萬倍になるであらう。然も、現實的事實に於いては、それは恐らく太陽の重量の約四十倍又は五十倍を持つてゐるにすぎない。この數字と九千萬との差は、アンタレスと太陽との密度の差から生ずるのである。平均すると、太陽に於ける一噸の物質は一ヤード立方よりも非常に少ない空間を占め

てゐるだけである。ところが、アンタレスに於いては、同じ一噸の物質がむしろ聖パウロ大伽藍の内部よりも餘計な空間を占めてゐる。しかし、星の内部を詳細に研究して見ると、この種の平均には殆んど意味を附することができないことがわかる。アンタレスの中心に於ける物質は、殆んど（全くではないが）太陽の中心に於ける物質と同じほど緻密に詰つてゐるといふことは全く尤もらしい。アンタレスの大きさが絶大なのは、主に、非常に稀薄な瓦斯の恐ろしく範圍の廣い大氣のためであらう。そしてかういふ大氣と、この星の中心に於ける緻密な物質との間には、平均を割り出すべき手がかりがあまり無いのである。

遊星型星霧として知られてゐる神秘的な物象——その實例は第二畫に示して置いた——は、多分、それよりも更に大きな直徑を持つ星と見做されなければならない。これらの星霧の各々の中心には、望遠鏡で見ると、極めて高い表面温度を持つ比較的微かな星が存在してゐる。これを取巻いてゐるのが霧狀體であつて、これらの物象の幾分不適切な名稱はそれから來たのである。これは恐らく單に先刻の表の四つの星を取巻いてゐるものよりも一層廣範圍でさへある大氣にすぎない。ヴァン・マーンは、琴座の環狀星霧（第二畫第二圖）の霧狀體の直徑を、地球の軌道のそのの五百七十倍、即ち約一千六十億哩であると見積つた。しかし、この霧狀體は、殆んど透明だといふ點で普通の星の大氣とは違つてゐる。我々は今云つた環狀星霧を一千六十億哩も見透すことができるが、普通の

星の場合には、數十又は數百哩を見透し得るにすぎない。

大きなもう一つの極點に於いては、最小の既知の恒星、即ちヴァン・マーン星が殆んど地球くらゐの大きさである。さういふ星は、太陽の内側に一百万以上詰め込んでも、まだ餘地があるくらゐである。然も、重量は恐らく地球のそれと比較すべきでなくて、太陽のそれと比較すべきである。當推量で云ふと、それは太陽の重量の約五分の一を持つてゐるかも知れない。地球の大きさほどの球の中に太陽の實質の五分の一を詰めるには、平均一噸の物質を一つの小さな櫻の實の大ききくらゐの空間に詰め込まなければならぬ——これは一時立方に十噸そこいらの割合である。地球の固さは、地球の原子がかなり緻密に詰つてゐなければならぬことを暗示するが、ヴァン・マーン星の原子はそれの六萬六千倍も緻密に詰つてゐなければならぬ。

それはどんな風にして行はれるか？ もう少し先へ行くとわかるやうに、それに對する答へは只一つあり得るのみである。原子といふものは大部分空虚から成り立つてゐる——我々は炭素原子をウォータロー停車場の中をぶぶん飛び廻つてゐる六匹の地蜂に比較した。我々は原子を破壊してその構成部分とし、これらをできるだけ緻密に詰めて見よう。すると、ヴァン・マーン星の中に物質がどんな風に詰つてゐるかがわかる。六匹の地蜂は、ウォータロー停車場全體を隈なく徘徊し得るに拘らず、一つの非常に小さな箱の中に詰め込むことさへできるのである。

巨星と矮星

我々が述べた兩極端をなす重量の限界の間には、連續した一系列の恒星が存在してゐるが、同じ事は温度（從つて色）及び大きさの限界についても本當である。

これらの明白な限界内で、私は諸君の好むどんな重量の、どんな色の、又はどんな大きさの星でも見出すことができる。しかし、この事は、諸君は自分の欲する星の重量と色と大きさを特定して差支へないといふこと、私は諸君のためにそれを見出さうと企てようといふことを意味しはしない。若し重量が正しければ、色は間違つてゐるかも知れない、等々である。例へば、若し赤星を求めるなら、私は諸君のために非常に重いもの又は非常に軽いものを見出すことができる。しかし中間重量のものを求めても駄目である。我々が知る限り、中間重量の赤星が簡單に存在するものではない。同じ事は大きさにについても本當である——中間の大きさの赤星が存在するものではない。ハーツスプルングは一九〇五年に次のやうに述べた。赤星は、大きさの大小に依つて區別できる二つの別々の部門にきつかり分割することができる、と。彼はこの二部門を巨星及び矮星と呼んだ。ラッセルは、一九十三年にこの問題を更に研究して、ハーツスプルングの以前の結論を確證した。そして巨星は矮の分割が赤色以外の色の星にも及んでゐることを示した。

假に、一系列の彩色した梯子、即ち星の各々の色——赤、橙、等々——のために一つづつの梯子があるでしょう。すべての赤星を取つて、それらを（想像の中で）赤色の梯子の相異なる横木の上に立たせよう。たゞ無茶苦茶にさうするのではなく、光度順に配列して、光度の一番高いものを一番上に置かう。更に二三の星を、光度が殆んど相等的いなら、同一の横木の上に立たせよう。配列を一定のものにするために、この梯子の各々の横木に、その直ぐ下の横木よりも五倍ほど高い光度を表はさせて、各々の横木が一定の光度と結びつくやうにしよう。

*純粹な實際的理由の爲に、高さは光度に比例させないでその對數に比例させてある。何かかうした工夫をしなければ、觀測された赤星の光度に於ける百萬乃至一以上の範圍を表はすことは不可能であらう。

かういふ配列が出来上ると、我々はもういつでも先へ進むことができる。そこで赤星を取つて、各々を赤色の梯子の對應する横木の上に置き、他の各々の色ののためにも順々にさうする。結果は第二十一圖に圖解した通りのものになり、相異なる星は十字に依つて示してある。

赤星はこの圖表の右側に於いてのやうに存在することがわかるであらう。これを見ると、ハーツスプリングが巨星及び矮星に分割したことが非常にはつきり際立つてゐる。橙色の星は中央の梯子に於いてのやうに存在してゐる。ラッセルが見出したやうに、件の分割はここにも現はれてゐるが、

前ほど際立つてはゐない。

ラッセル表

我々はこの種の梯子圖表を星の各々の色のために設け、それらを適當な順序に並べて、すべてのあり得べき色の星を表はすやうにしよう。すると、第二十二圖に示したやうな種類の圖表が得られる。この型の圖表は、一九一三年にラッセルに依つて紹介されたもので、今では一般にラッセル表として知られてゐる。

圖表の頂上にある文字は星の分光型を表はしてゐる。なぜなら、これらは色の名稱よりも一層好い一層正確な作業分類を提供するからである。様々の分光型にほど一致する色は、圖表の下邊に示してある。

この圖表には甚だ少數の見本星が示されてゐるだけであるが、すべての既知の星は、これら少數の典型的な星の位置の周圍に集中してゐることがわかる。概括的に云へば、星々の占めてゐる、二つの、別々になつた、連絡のない區域がある。第一はどちらかと云へば y を逆にしたやうな形をした區域であつて、この區域の方が第二の區域よりも重要である。この區域の中心線は、一つの連續した濃い線で示され、その位置はレッドマンが決定したものである。第二の區域は、圖表の左手の

下邊の隅に近い所にあつて、第一の區域よりも小さい。この區域を占めてゐる星々は非常に微かであつて、他の同様な光度の星よりも遙かに高い表面温度を持つてゐる。

我々が既に見たやうに、星の直径はその表面温度及び光度から計算することができる。これは次のやうに言ふのと同じ事になる。ラッセル表に於いて同一の地位を占めてゐる二つの星は、同一の直径を持つてゐるに違ひない、と。かくして、この圖表に於いては、各線と結びついて一定の直径がある。そして我々は、この圖表に於ける星の直径を『等高線』系統に依つて精密に示すことができる。それは丁度、地理圖に於ける海拔の高さを『等高線』系統に依つて精密に示し得るのと同じである。現在の場合には、『等高線』は、ほとんど平行した曲線の系統であることがわかる。これらの等高線は、ざつと第二十二圖に折線で示された通りになつてゐて、どの線上に存在する星も悉く同一の直径を持つてゐる。

この圖表は星の直径に關する一般問題におびたゞしい光明を投ずる。最大の直径——太陽の直径の百倍以上——の星は、必然的に高い光度の赤星でなければならないといふことが即座にわかる。そして、現實的事實に於いて、三六八頁の表に示したやうな大きな直径の星は悉く赤色で、非常に高い光度を持つてゐる。それらは赤色巨星である。

空の星の大多數は、第二十二圖の圖表を左手の頂上から下邊の右手へと横切つてゐる帶の中に存

在してゐる。これは『主列』として知られてゐる。直徑の『等高線』に對する此の帶の位置を見ると、主列星が中庸の直徑を持つてゐることがわかる。すべての中の最も輝かしいものは太陽の直徑の二十倍を持つてゐるかも知れない。ところが、最も微かなものは太陽の直徑の約二十分の一を持つてすぎないかも知れない。しかしそれら凡ては、少なくとも太陽のそれと比較できる直徑を持つてゐる。我々が既に論じた、太陽の近くから取つた恒星の見本は、主列星の多くの實例を見せる。

次の表は、それらを光度減少の順で配列したものである。

この表は、我々が主列を下つて行くに連れて星の光度と直徑とが共に減少して行くことを示したものである。

第二十二圖に於ける、主列以外の星群、下邊の左手の隅にあるものは、一般に白色矮星として知られてゐる。圖表に於けるその位置を見ると、その直徑が非常に小さいに違ひないことがわかる。太陽の附近には、この部門の星の實例が三つある。それは次表に示した通りである。

これらに附け加へて、鯨座O星の微光伴星も確かに白色矮星である。同時に、プロシオンBもさうかも知れない。これらは白色矮星の唯一の既知の實例である。しかしこれらの星は極端に微かであるために、發見するのが非常に困難である。それらは恐らく空間にかなり累々現はれる物象であらう。

三七七頁の表では、主列星を光度順に配列して置いた積りであるが、これはたゞゝ重量順にもなつてゐる。これらの星の中の三つは重量がまだ知られてゐないが、あとの七つの星の重量は次の通りである。

光度のやうに、重量も、我々が主列を下つて行くに連れて不斷に減少して行く。尤も、既に述べたやうに、重量は光度ほど迅速に減少しはしない。

重量が直接に測定される唯一の恒星は、連星系の構成者であり、これらは數に於いては、相對的に小さい。しかし、シーアスが見出したところに依ると、連星系の重量は、既に第三章で説明したエネルギー等分の法則に一致してゐるので、連星でない他の星々も恐らくそれに一致するであらうといふのは、連星系が他の星々よりも早く等分状態に達すべきどんな理由をも想像するのは、困難だからである。この状態は、星の重量と運動速力とを結びつける純粹な統計學的法則に依つて決定される、といふことを記憶してもらひたい。そのために、一つの星の系統がこの状態に達したといふ事實は、速力の知られてゐる一個の星の重量については何の報道をも與へることができない。しかしそれは、どんな星群の平均重量をもその平均運動速力に依つて決定することを可能にする。かういふ仕方では、シーアスは、相異なる光度と分光型とを當てがはれたものゝ星の平均重量——他の言葉で云へば、第二十二圖の圖表に於けるさまざまの點に依つて示された星々の平均重量——を

決定した。彼の得た諸結果は、第二十三圖の濃い曲線に依つて示してある。これらの曲線の配列は、我々が少數の選ばれた星に依つて下した推測を確證する。主列星の重量は、我々がこの系列の高い光度から低い光度へと下つて行くに連れて不斷に減少する。

これらの曲線を見ると、ラッセル表の各點に依つて示された星々の平均重量が、はつきりとわかる。そして直徑は既に第二十二圖で知られてゐる。これら二つの論據から星の平均密度を計算することができるのは勿論である。シーアスが計算した通りの平均密度は、第二十三圖の折線を見るとわかる。

これを加へると我々の觀測的材料の蒐集は全きものになる。我々は今度はそれが何を意味するかを論じよう。しかし、これは前よりも遙かに困難な問題である。ここで我々は、確定的事實に基く確乎たる根據を離れて、推測と假説と思索との影のやうな沼地に這入つて行く。我々の論すべき諸問題は、天文學全體に於いて最も興味のあるものである。科學はこれまでそれに對する歎かほしいほど無価値な答へを得たにすぎない、といふことを認めなければならない。確實な事を知りたい讀者は、この章の残りの部分以外に何か別のものを讀んで差支へない。

第二節 恒星の物理的條件

觀測的材料のこれまでの蒐集は、或る特殊な星は全く存在しないといふ證據を澤山提供した。これと同じ事を別の仕方で述べれば、ラッセル表には、星々に全く占められてゐない或る區域がある。すべての中で、最も際立つた實例を取れば、ラッセル表（第二十二圖）に於ける主列の左方には、全く別になつた白色矮星群の所へ來るまでは、一つの星も存在しない。中間條件の星は何故一つも存在しないか？ もつと具體的に述べれば、シリウスと同じ色の、しかしその光度の十分の一を持つにとどまる星は、なぜ一つも存在しないか？ なぜ我々は、色の點でシリウスに匹敵する星を見出す前に、シリウスの一萬分の一にすぎない光度を持つ白色矮星、エリダン座O₈星Bまで下つて行かなければならないのか？

おのづから心に浮んで來る一つの假説は、主列星と白色矮星とは、双方の年齢が全く違ふところから、別々の群をなしてゐるのがも知れない——兩者は別々に創造されたものを代表してゐるのかも知れない——といふことである。星が老ひるに連れて、その重量と光度は減少するので、白色矮星の小さな重量と極めて低い光度とを普通的主列星の年齢よりも遙かに大きな證據と解釋するの

は自然である。然も、この假説は維持されさうにない。

ヴァン・マアネン星だけは例外であるが、白色矮星であることがわかつてゐるか、又はさうではないかと考へられるあらゆる恒星は、連星系の一つの構成者となつてゐる。そして、あらゆる場合に、その伴星は主列星又は（鯨座O星の場合には）赤色巨星である。我々が既に見たやうに、二つの星が空間の中で互に接近し合ふのは稀である。元來獨立した物體として運動してゐる二つの恒星が、勝手な流浪中に互に出會して、大きな方が小さな方を『捕虜にし』、それ以後双方が一緒に空間の中を運行するといふやうなことは殆んど考へられないほど稀な出来事であるに違ひない。さういふ出来事が起るためには、密接な接近以外に何か別のものが必要である。更に第三の星が出現して、そのまん前で密接な接近が持ち上らなければならぬ。従つて、三つより少なくない星が、巨大な空間の中をさまよつてゐる間に、たま／＼時を同じうして互に近づき合はなければならぬ。こんな事が只一つの場合に持ち上らうなどとは殆んど考へられない。しかし、次のやうに想像することもあまり遠くへ行きすぎる。さういふ接近は、一つだけ除いてあらゆる單獨な既知の白色矮星の場合に持ち上つた、と。かくして我々は次のやうに想像しなければならない。もろ／＼の白色矮星とその一層正常な伴星とは、誕生以來一緒になつてゐたのであり、従つて同じ星霧から同じ時に生れたのである、と。

して見ると、白色矮星と主列星との相違は、單なる年齢の相違である筈はない。そして中間條件の星が存在するのを證明する何らかの物理的理由があるかのやうに思はれるであらう。この問題についてもつと一般的な見解を取れば、或る特殊な星が存在しないことは、さういふ星が自然の提供し得ない物理的特質を必要とすることに歸することができかどうかを研究することになる。これは直接に恒星の構造及び機構に關する一般問題に這入つて行く。

第三節 恒星の内部構成

これまで、恒星の構造に關する大抵の研究は、恒星の内部は至る所瓦斯状であるといふ想像に基いて進められた。この想像を終極的眞理として受け容れさへしなければ、我々は暫くの間これを採用して差支へない。それも、この想像は非常に困難な問題への最も便利な接近線を提供するといふ純粹の臨機應變的理由のためである。

一般にポアンカレ定理として知られてゐる數學的定理は、瓦斯状恒星の内部状態を論ずるに當つてこの上もなく役に立つことがわかる。ヘルムホルツが次のやうに考へたことは、我々の既に見たところである。太陽輻射は太陽の收縮から來るのであつて、各層は、次の内部層が收縮すると、その上に落ち込んで、この落下に依つて遊離されるエネルギーを光と熱に變へるのかも知れない、と。この種の收縮に依つてどれだけのエネルギーが遊離されるかを見積るのは容易である。例へば、ケルヴィン卿は次のやうに計算した。太陽の收縮は、無限の大きさから八十六萬五千哩といふ現在の直徑にまで收縮した時、現在の太陽が五千萬年の間に放射するのと殆んど同じだけのエネルギーを遊離するであらう、と。エルグで言ひ表はせば、太陽の收縮は 6×10^{28} エルグのエネルギーを遊離す

るであらう。

ポアンカレ定理に従へば、どんな瓦斯状の星に於いても、その凡ての分子の總體の運動エネルギーは、この星が現在の大きさにまで収縮するに當つて遊離した總體のエネルギーのきつかり半分に等しい。この定理は、星がそれほど収縮したことがあるかどうかといふことから全く離れて考へれば本當である。星のり現在の状態以外には、何一つ取り入れられてはゐないのである。

一つの面白い結論は、瓦斯状の星は収縮すればするほど高熱になるといふことである。若し一つの星が現在の大きさの半分に収縮するとすれば、無限の大きさから収縮することに依つて遊離される總體のエネルギーは二倍になり、その結果その分子の總體の運動エネルギーも二倍になり、その平均温度も二倍になる。これは一般にレーン法則として知られてゐるものゝ特別な例である。

我々は既に太陽といふ特別な例のために我々の計算を續けて行かう。ポアンカレ定理に従へば、若し太陽が瓦斯状であるなら、その凡ての分子の總體の運動エネルギーは 3×10^{48} エルグである。

その次に我々が知りたいのは、太陽の中にはどれほどの分子が存在するかといふことである。太陽の重量は 2×10^{33} グラムであるが、そこには一グラムにいくらの分子があるか？ これに對する答へは勿論分子の型に懸つてゐる。一グラムの水素には 3×10^{23} の分子があり、一グラムの空氣には 2×10^{22} の分子があるが、一グラムのウラニウムには 2.5×10^{21} の分子があるにすぎない。

若し我々が、太陽は空氣から造られてゐると想像するなら、太陽は 4×10^{25} の分子から成り立つてゐなければならない。従つて、各分子の運動エネルギーは平均して 7.5×10^{-18} エルグでなければならぬ。そしてこれは、太陽の内部のための、三億七千五百萬度といふ平均温度を示す。一九〇七年に、エムデンは、別の計算に依つて、若し太陽が空氣から造られてゐたら、太陽の中心に於ける温度は四億五千五百萬度であらうと計算した。詳細な事は別として、明かに、空氣から造られてゐる太陽といふものの内部温度は何億度といふ温度であらう。

これまで、星の内部に關する凡ての研究は、もろくの恒星は完全原子又は分子から形成されてゐるといふ想像に基いて進められた。一九一七年に、私は、既に二〇〇頁に説明したやうな型の簡單な計算を行つた。そして、さういふ温度に於いて飛び廻つてゐる輻射量子は、空氣分子を破壊して原子にするばかりでなく、それらの原子から、凡ての又は殆んど凡ての電子を剥ぎ取るに足るほど精力的であらうといふことを發見した。さういふ温度に於いては、各々の空氣分子は、暑い日に氷の塊が解けて、その構成成分になるのと同じほど確實に、分解してその構成核及び分子になるであらう。もつと靜かな環境に於いては、分子及び核を結合して、最初は原子に、然る後完全分子にするであらう電力も、迅速に運動する拋射物の絶え間もない霰や、高いエネルギーの量子が與へる破壊的打撃に對しては無力になる。それは颶風の中でカルタの家を造らうとするやうなものであらう。

空氣分子から成り立つてゐる太陽なるものは、一つの矛盾、一つの撞着であることがわかる。我々の假説は水泡に歸したのである。我々は再び初めから出發し直さなければならぬ。

我々はどこでも自分の好きな場所から出發し直して差支へないが、我々が最後に到達しなければならぬ結論は、太陽がどんな種類の分子から成り立つてゐようと、太陽の中心に於ける熱は、完全に、でなければ殆ど完全に、それらを破壊して、その構成核及び電子にするであらうといふことである。これと同じ事は他の凡ての星に取つても本當である。そしてこの事は、恒星の内部構成に關する問題を極めて簡單なものにする。分子の性質を知らなければ、一グラムに幾らの完全分子が存在してゐるかを告げることはできない。しかし、一旦これらの分子を破壊してその構成部分にしてしまつたら、一グラム當りの構成部分、核と電子の總數は即座にわかる。といふのは、水素を除く凡ての原素の原子量は、その原子數の殆んど二倍だからである。そこで、エディントンが先づ指摘したやうに、水素を除けば、どんな實質でも、十分に破壊された原子に於ける核及び陽子の總數は、その原子の原子量の約半分に等しくなければならない。おそらく、星といふものがどういふ大きな程度にでも水素から成り立つ見込みはない。果してさうであるなら、十分に破壊された星の物質の一グラムに於ける構成部分の數は、これらの部分が生れた分子型は顧みないとして、約 3×10^{23} でなければならない。そして、どんな星でもこのさういふ部分の總數がわかれば、いま述べた

ポアンカレ定理からでも、他の方法に依つてでも、その星の内部の温度を計算するのは容易である。その温度は、その星が破壊されてゐない水素分子から造られてゐる場合と同一であらう。

エムデンは、一九〇七年に、この種の太陽の中心温度は約三千百五十萬度であらうと計算した。もつと後にエディントンの行つたもつと精細な計算も、ほとんど同一の温度に達した。しかし、それよりも更に後になつて私自身が行つた幾つかの計算は、實質的に一層高い五千五百萬度といふ數字を示した。現在のところでは、これらの數字のいづれが眞理に一番近いかを論ずる必要はない。これらの數字の差異を見ると、どんな種類の不確定度がかういふ型の凡ての計算に附着するかがわかるであらう。

かういふ高温度にとつての物理的必然を見るのは容易である。太陽の表面から流れ去る熱は、最初はその内部からそこへ持つて來られたものに違ひない。熱は熱い場所から冷い場所へ流れるのみであり、旺盛な熱の流れが起るのは險しい温度勾配がある證據である。太陽の表面からその中心に向つて進んで行くに連れて、温度はきびしく上昇するに違ひない。そしてこの上昇は、中心までの四十三萬三千哩全體に互つて繼續して、いよく中心に達すると非常な高温度となつて終るに違ひない。

三千萬乃至六千萬度といふ計算された中心温度は、非常に我々の經驗を越えてゐるので、それが

何を意味するかを實感するのは困難である。想像の中で、普通の物質の一耗立方——普通のピンの頭の穴きさのある一片——を、五千萬度といふ温度、即ち太陽の中心に近い温度の中に置いて見よう。信じられないと思はれるかも知れないが、このピンの頭くらゐの物質をさういふ温度に於いて維持する——言ひ換へれば、それが輻射に依つて六面から失ふエネルギーを補充する——だけでも、一萬億馬力の三千倍を持つ一つの機關から發生する凡てのエネルギーが必要であらう。このピンの頭くらゐの物質は、誰がその一千哩の範圍内に入り込んで來ても焼き殺すに足るほどの熱を放出するであらう。

この温度はそれほど高いに拘らず、計算に依ると、それでも星の分子を完全に破壊するに足りないであらうことがわかる。それは諸原子からK環までは凡ての電子を剥ぎ取るであらうが、K環は害を受けないであらう。原子の核からK環電子を剥ぎ取るには、我々が今考察してゐるよりもつと高くさへある温度が必要である。かういふ結果は、太陽の中心温度が恐らく位してゐる約三千萬乃至六千萬の範圍全體に當て嵌る。そしてこれは、太陽を組み立ててゐると想像される諸原子の原子量又は原子數には殆んど關係なしにさうなのである。

かくして、若し太陽が全く瓦斯状であるなら、その中心部分は、K環までの、瓦斯分子のやうに殆んど獨立して飛び廻つてゐる、電子を剥ぎ取られた原子の集合と、最初はそれらの原子のL環、

M環、等々を形成してゐた、やはり瓦斯分子のやうに飛び廻つてゐる、すべての剥ぎ取られた電子とから成り立つてゐて、全體は三千萬度と六千萬度との間の何處かに位する温度になつてゐるに違ひない。太陽の表面に向つて出て行くに連れて、温度は低くなる。そしてさういふ温度に於いては、諸原子は前ほど完全に破壊されてはゐない。最後に、太陽の表面に近づく、完全原子に出會すかも知れない。尤も、その最外電子の一つ二つは恐らく例外である。すべての中で最も冷却してゐる星の表面には、完全分子が見つかりさへする。例へば、赤星のスペクトルの中に姿を見せる、チタン酸化物やマグネシウム水素化物の分子がそれである。

他の恒星の内部構成をも同じ仕方で研究して見ると、すべての主列星は太陽と殆んど同一の中心温度を持つてゐることがわかる。更にまた、これはそれらの星が共有する唯一の特質ではない。星の平均密度に關するシーアスの計算を示した第二十三圖を見ると、主列星の平均密度は、兩極點に於ける比較的小さな變差を除けば、すべてほど同一であることがわかる。

太陽の平均密度は一・四である。それが意味するのは、太陽に於ける一米立方は平均して一・四噸の物質を含んでゐるといふことである。太陽の中心に於いては、密度は、これの約百倍であるから、この區域に於ける一米立方は約百四十噸の物質を含んでゐることになる。これと比較すれば、一米立方の鉛は約十一噸の物質を含んでゐるにすぎない。若し凡ての星が太陽と同じ雛形に基いて

築かれてゐたら、どんな二つの星も、兩者の平均密度が同一であれば、兩者の中心に於ける密度も等しいであらう。しかし、太陽の重量の二、三倍を特つ星に於いては、一つの新しい要因、即ち輻射壓が作用する——これは輻射に伴ふ重量が及ぼす壓力である。大抵の星に於いては、この壓力は物質的原子及び電子の壓著に依つて起される壓力と比較すれば取るに取らぬものである。しかし、非常に重い星に於いては、それは星の構造に影響を及ぼすに足るほど大きい。三六八頁に直徑を表にして示して置いた非常に重い星が、異常に大きな大きさを持つてゐるのはこのためである。非常に重い星の重量が、その中心區域に、軽い星のそれよりも遙かに多く集中してゐるのは、輻射壓の攪亂的效果の一般的歸結である。そのために、若し軽い星と重い星とが同一の平均密度を持つてゐたら、後者の中心に於ける密度は遙かに高くなるであらう。攪亂を起す此の要因を斟酌すると、主列の上部に於ける凡ての星は、中心區域に於いては、ほど同一の密度を持つてゐることがわかる。これは太陽の中心に於けるそれに殆んど等しい密度であつて、一米立方に百四十噸と見積つて差支へない。そして我々が既に見たやうに、これらの星の中心區域も、太陽の中心とほど同一の温度を持つてゐる。そこで、これらの星の物理的條件は悉く實質的に同一であるといふことになる。かくして、これら凡ての星の中心區域に於ける原子は、太陽の中心區域に於ける原子と同じ程度に破壊されるに違ひない。電子のK環は害を受けないで残存するが、外部の環は獨立分子のやうに飛び廻

る電子の霰に變へられる。

主列に於ける凡ての星は、恐らくその極めて低い末端にあるものを除けば、同一の物理的條件を持つてゐると想像しても、我々の現在の目的にとつては十分正確であらう。かういふ特質のために、主列は一つのすてきな基線となつてゐる。この基線から、星の内部の物理的條件に關して、ラッセル表の見透しを成就することができる。

第二十二圖を見ると、主列の右方の星は、それと同じ重量の主列星よりも非常に大きな直径を持つてゐることがわかる。その結果、この星がその現在の直径にまで収縮するに當つて放出するであらうエネルギーは一層少なく、従つてその分子の運動エネルギーも一層少ない（ポアンカレ定理に依つて）。この結果、その内部温度も一層低く、その原子の破壊も一層完全でないことになる。アンタレスのやうな赤色巨星は百萬度から五百萬度までの中心温度を持つてゐるにすぎないことがわかる。そしてその諸原子は、おそらく、電子のK環ばかりでなく、L環をも、また少なくともM環の一部分をも、害されずに保つてゐるであらう。

主列の左方には、もろくの星が――若しそれが見出せるとすれば――一層収縮し、従つて一層高い温度と一層徹底的に破壊された原子とを持つてあらう一區域がある。しかし實際には、白色矮星のところへ來るまではどんな星にも出會さない。計算して見ると、これらの星の中心温度は、少

なくとも幾億度でなければならず、その原子は核のところまで電子を剥ぎ取られてゐなければならぬことがわかる。この一般的運命を免れたかも知れない少數の原子は別として、星の物質は、ここでは、電子を剥ぎ取られて絶體の裸にされた核と、星の中を獨立して飛び抜けつつある遊離電子とから成り立つてゐなければならぬ。これらの星の高い密度は、かういふ結果が正確なものであることを有力に證明する。シリウスBの平均密度は、確かに五〇、〇〇〇以上であり、ヴァン・マアネン星のそれは恐らく三〇〇、〇〇〇以上である。原子から電子をその裸核のところまで剥ぎ取る方法以外には、物質をこれほど緻密に詰め込み得る方法はない。

我々が物理的條件の方面からラッセル表について形づくり得る最も明瞭な一般的印象は、おそらく次のやうにして得られるであらう。――先づ、二つの別々になつた星の帶を想像する。その一つは白色矮星群である。これを形づくる星々に於いては、すべての電子が原子から剥ぎ取られてゐる。もう一つは主列であつて、これを形づくる星々に於いては、諸原子は依然として電子のK環に依つて取圍まれてゐるが、外環は剥ぎ取られてしまつてゐる。主列の中央あたりから、赤色巨星に達する支線が出てゐる。これは第二十二圖に示した通りである。これに沿うて進んで行くと、星々の内部温度は減少する。そのために、星の原子は主列星の場合ほど破壊されはしない。極度の端にある赤色巨星に於いては、M環電子さへが依然として存續してゐるかも知れない。

第四節　ラッセル説

星のかういふ分布について、二つの全然相異なる説明が持ち出された。一九二五年に、ラッセルは一つの學説を提出した。それは、第一に、主列星の中心に於ける温度は凡て殆んど相等しいといふ事實に中心點を置いたものであつた。我々は暫く次のやうに想像して局面を簡單にしよう。すべての恒星の中心に於ける温度はきつかり同一であること、つまり三千二百萬度であることは、確定的事實である、と。若しこれが確實な事實であつたら、次のやうに推測しても自然であらう。星々は何らかの種類の支配機構を持つてゐる、それに依つて星々は自己の中心温度を絶えずこの確かな數字に適合させるので、若しいつか温度が三千二百萬度以下に下ることがあつたら、この機構が作用しはじめて、温度をきつかり此の量にまで高めるであらう。ところが、若しそれがこの數字以上に増加したら、同じくこの機構が作用しはじめて、それを引き下げるであらう、と。さういふ支配機構は機關操作上にはありふれてゐる。例へば、汽罐の壓力をいつも一樣にして置く安全瓣や、機關をいつも同じ速度で運轉させるワット檢速器や、室の温度を一定する調温器などがそれである。

星の中心に於ける温度を高めるための機構は既に知られてゐる。若し星の内部に於いて、物質の

絶滅か又はその他の事情に依つて、少しもエネルギーが発生してゐなかつたら、輻射の放出がこの星を収縮させる。そしてこれは、我々が既に見たやうに、この星の温度を上昇させる。かくして、星の中心温度を三千二百萬度に保つのは容易になる。それは、中心に於ける温度が三千二百萬度以下である間は、エネルギーを發主させないやうに裝置することに依つてである。そしてこれはラッセル説の基礎となつてゐる主要假説である。彼は次のやうに想像する。三千二百萬度以下の温度にある物質に依つては、エネルギーは少しも發生しない、しかし、この温度に達するや否や、星の輻射の準備をするに足るほどの量で絶滅が行はれはじめる、と。

この學説にとつての困難は、もう一つの端から温度を調節するのが不可能であるやうに思はれることである。中心温度が三千二百萬以下になつてゐる星は、熱を發生させることなしに収縮しつつあるに違ひない。収縮は臨界温度に達した瞬間にも全く停りはしないであらう。中心温度が三千二百萬度を實質的に越えるまで、その運動量がそれを繼續させるであらう。温度が中心に於いて三千二百萬度を由々しく越えるや否や、星の實質的部分のそれは三千二百萬度以上になるであらう。この物質全體の絶滅は、おびただしい熱を起すに違ひない。それは星の温度を更に一層高めて、ますます物質を絶滅させ、遂には星全體が一閃の輻射となつて消滅するであらう。實際、ラッセル説に従へば、三千二百萬度に於ける物質は、引火點にある火薬と同様な状態にある。そこで、數學的

分析に依ると、中心が三千二百萬度の温度になつてゐる星は、中心で火花を散らしてゐる火葉桶のやうな状態にあらう。そして——ちうだ、"ohne hast, ohne rast"といふ言葉でそれ以後の出来事が辛うじて描かれる。

エディントンは次のやうに暗示した。星々の安定は、物質が絶滅に必要な臨界温度に達した瞬間と、この絶滅の起つた瞬間との間に於ける時間遲滯量を想像することに依つて救はれるかも知れない、と。かういふ救治法が有効なものにされ得るかどうかは、まだ證明されたことがない。しかしたとへ有効なものにされ得るにしても、他の諸困難が残つてゐる。正常な星は主列に存在してゐるのであるから、ラッセルは、約三千二百萬度の温度、即ち凡ての主列星が持つてゐると想像される一様な中心温度に於いて絶滅を行ふのが正常な物質の特質だと想像した。すると、白色矮星の光度と、赤色巨星支線の上にある星々の光度とを説明するために、更に特別な諸假定を導き入れる必要が起つて来る。赤色巨星支線の上にある星々の中心は、三千二百萬度とは非常に違つた温度にある。彼はそこで次のやうに想像した。さういふ星々は、三千二百萬度以上の温度に於いても以下の温度に於いても分解して輻射となる他の物質型を含んでゐる、と。たとへ安定の困難を克服することができたにしても、この後の一系列の假定は、私には、この面白い學説の放棄を餘儀なくするほど人爲的のものであるやうに思はれる。

ラッセル説の諸困難に關する議論に導かれて、私は、恒星一般の安定に關する數學的研究を企てた。そしてこの企ては、他の方法では理解することのできない、ラッセル表に於ける星の分布に關して、一つの單純な、幾分豫期しなかつた説明を提供することがわかつた。それは、簡單に云へば、この表に於ける空白區域は不安定状態にある星々を表はしてゐるといふことである。天文學者の何割がこの説明を受け容れるかは、私にはわからない。幾人かは、私は彼等の意見を尊重してゐるのであるが、受け容れない。今までこの著書に書いて來た多くの事柄は、すぐれた批評家たちから本氣の挑戦を受けようとは思はれない。しかしここまで來ると、我々は論争舞臺に這入ることになるのである。

第五節 液體星説

我 等 を め ぐ る 宇 宙

我々は、まづ、すべての可能な計畫に基いて、あらゆる種類の實質から築かれてゐる莫大な數の恒星を想像して見よう。數學的研究に依ると、これらの星の中には、二つの理由のどちらかのために、又はその双方のために、不變の光をもつて輝き得ないものがあるかも知れない——その二つの理由とは何かと云へば、第一に、それらは熱せられた火藥桶のやうに爆發するかも知れない。第二に、それらは無制限に収縮し又は膨脹する固有の傾向を持つてゐるかも知れない。恒星が第一の落とし穴を避けるかどうかは、主に、それを築いてゐる實質の特質如何にある。第二の落とし穴を避けるかどうかは主にその築かれ方如何にある。二つの落とし穴は全く別々のものではない。そして、非常に大きな重量を持つ全く瓦斯状をした星々の安定について考察すれば、通路の兩側にある穴が合併して一つになり、又はせいぜい一片の細長い安全區域が、兩者の間に残るにすぎないことがわかる。とは云へ、非常に大きな重量を持つ星々が存在して、不變に輝きつづけてゐることが知られてゐる。そこで、若しこれらの星が全く瓦斯状であるとすれば、それらは二つの穴の間にある一つの安全地點を占めてゐなければならぬ。そしてこの事は、それらの星の築かれ方を、それらの星

を築いてゐる實質の諸特質をも我々に告げる。

さういふ星々が双方の落し穴を避けるのは、その實質の諸特質が、非常に尤もらしくない上に、我々が物理學で經驗し又は認識してゐるどんな物にも反するやうに見える場合のみであることがわかる。簡単に云へば、さういふ星が安定を保つて行くには、その物質の絶滅が、温度に依存する割合で進行しなければならない。さういふ特質は、あらゆる方面で、第二章に説明した物理的諸原理に反すると同様に、原子作用に對する我々のすべての期待に反するやうに思はれる。物質の絶滅は單なる放射性分解よりも遙かに激しい變化であり、それよりも遙かに高いエネルギーの量子を含んでゐる。そして後者の過程は温度變化の影響を受けないから、絶滅の過程が、いづれにしても二〇四頁の表に示した二萬二千億度といふ順位の温度に達するまでに、温度變化の影響を受けるなどといふことは、ほとんどあり得べき事でないやうに思はれる。

*これはラッセル説に對するもう一つの反對論である。混亂を避けるために、三九五頁ではそれに言及しなかつた。

しかし、我々が既に見出したやうに、恒星は純粹の瓦斯状ではないらしい徴候がある。といふのは、純粹の瓦斯塊は分光星の場合に觀取されるやうな型の密接な連星系を形成することはできないからである。さういふ系統は、瓦斯の特質よりもむしろ液體の特質を刺戟する塊から形成されるの

みである。この塊は全然液體状である必要はないが、いづれにしてもその中心區域に於いては、純粹瓦斯の状態とは非常に違つてゐるに違ひない。それと同じ意味になる特別な證據も、もつと先へ行つて出て來るであらう。

星の内部は完全な瓦斯状態になつてゐる必要はない、といふことを認めるや否や、局面はすつかり變つて、瓦斯状態からの少しの離脱さへが星に特別の安定を豊かに與へることがわかる。若し大きな重量を持つ星の構造が純粹に瓦斯状であるなら、二つの落し穴の間にある安定區域は一片の細長いものになる。そしてこれを辿ることに依つて、初めて星は爆發の運命をも崩壞の運命をも避け得るのである。しかし若し星が、液體状の、又は一部分液體状の中心を持つてゐるなら、この細長い安全地は非常に廣くなるので、安定性と一致して、星の材料は、我々が先天的に見出す見込みのある特質を持つかも知れない。それは何かと云へば、この材料の絶滅は、輻射性分解のやうに、あらゆる温度に於いて同じ割合で進行するといふことである。若し星の實質がかういふ特質を持つてゐるなら、その星は爆發する危険はない。といふのは、ウラニウム又はラヂウムの塊は、どんな事をしても爆發しないからである。そして數學的分析に依つて、若し星の中心が液體状であるか、それとも一部分さうであるなら、崩壞の危険はないことがわかる。液體状の中心は、崩壞を不可能にするほど強固な基礎を星に與へる。

これらの考察は、二つの相補足し合ふ假説を暗示する。

一、星の物質の絶滅は、星の温度に影響されずに、自然に進行する。

二、星々の中心区域は、純粹の瓦斯状態ではない。中心区域の原子と核と電子は非常に緻密に詰つてゐるから、瓦斯に於けるやうに、自由に後を追ひ合つて運動することはできず、むしろ液體の分子のやうに互に衝突し合ふ。

若し我々が、地球大氣の中に觀測された高度侵透性輻射を遠方の天文學的諸物體に於ける物質の絶滅に歸したのが正しかつたら、その時には、第一の假説が確證されるわけである。といふのは、この輻射は、既に非常な厚みのある物質に侵透した場合には、その觀測された高度侵透力を保つことができないからである。物質の中を通り抜けようとする**ものが**きは、あらゆる種類の輻射の波長を短くし（量子は始終弱くなる）、従つてその侵透力を減少させる。かくして、どんな場所に高度侵透性輻射が生じても、それは大してもがきもせず空虚な空間の中に入り込んだに違ひない。そしてこれは次のやうに言ふのと同じである。それは比較的低い温度にある物質の中に生じたに違ひない、と。かくして、高度侵透性輻射が存在することは、物質が全く低い温度に於いて大量に絶滅

され得る證據である。星の内部の高温度は、ラッセル説が主張するやうに、絶滅が起るのを必要としない。

地球の實質には感知できるほどの絶滅はあり得ない、といふことは一つの簡単な計算でわかる。太陽に於いては、約 0.15 毎に一つの原子が一分毎に絶滅されてゐる。これだけの原子の一萬分の一が地球の中で絶滅されてゐるだけでも、地球の表面は人間が住むには熱すぎる程になるであらう。我々は最早この事を次のやうに言ふことに依つて説明することはできない。太陽は熱く地球は冷いので、絶滅は前者に於いては進行してゐるが、後者に於いては進行してゐない、と。我々は、むしろ、太陽に於ける原子は地球上のそれとは違つた型のものであると想像しなければならない。太陽原子は自然に絶滅するが、地球原子は絶滅しない。又は少なくとも感知できるほどの程度に絶滅しない。

我々の假説の第二のもの、即ち、星々の中心區域は瓦斯よりも一層液體のやうであるといふことは、我々が既に見たやうに、第一の假説の必然的歸結であるが、そのための獨立した證據は、分裂生殖に依る連星系の形成に見出される。といふのは、第四章で我々が見たやうに、星といふものは、若し液體狀の、又は殆んど液體狀の中心を持つてゐたら、分裂生殖に依つて分裂し得るにすぎないからである。

第六節 星の構造の安定

差當り、我々は、星のエネルギーの發生は輻射性原子の分解のやうに自然に起るといふ假説を試験的に受け容れて置かう。星々の光と熱に責任のある諸原子は、超輻射性原子と見做して差支へない。それらは自然に絶滅して、その實質を輻射に變ずる。

我々が既に見たやうに、星のエネルギーの發生機構に關するかういふ見解に基くと、星といふものは、中心區域が純粹の瓦斯状態になつてゐない場合に、初めて不變に輝きつづけることができるのである。高度壓縮性瓦斯を土臺として築かれた星は、砂上に建てられた家屋とほゞ同じ運命に遭遇する。即ち、それは崩壊する。純粹の瓦斯星は、力學的に不安定な構造である。そして、その中心區域に於ける諸原子が非常に緻密に詰つて來て、その状態が最早瓦斯と見做すことができないほどになるまでは、連續的に収縮するに違ひない。星が安定のある構造として永久に存在し得るのは、その時であり、またその時だけである。かくして、實際に永久的な星、例へば太陽の中心區域は、事柄を簡單にするために我々が液體と呼んで差支へない状態にあるに違ひない。

ところで、假に太陽が現在の直徑の十倍にまで膨脹されたとしよう。すると太陽の密度は元の値

の千分の一にまで減少するであらう。現實の太陽は水よりも四十%だけ多い密度であるが、膨脹した太陽は普通の空氣と同じ密度にすぎないであらう。もろくの原子及び電子は、互に今までの十倍ほど離れ合つたので、相互から非常に遠くなり、従つて新しい太陽は全くの瓦斯状と見做すことができよう。かくしてそれは力學的に不安定になるから、全くの瓦斯状態に於いては存続することができなくなる。

我々の想像上に於ける、膨脹した太陽が、最早ラッセル表に於ける主列星でないことは勿論である。太陽をその現在の大きさの十倍にまで膨脹するに當つて、我々は、それを主列から離して、全く星の缺けた區域に——事實上、赤色巨星と赤色矮星との間にある大きな淵に——移したのである（第二十二圖參照）。かくして、たとへ我々が一つの星をこの區域に置いたにしても、それはここに留まらないで即座に収縮し、遂に主列まで進んで行くことが明かになる。この事は、件の區域になぜ星々が存在しないかを説明しはすまいか？

次に、太陽はその現在の直徑の十分の一に収縮し、従つてそのもろくの原子及び電子は互に今までの十倍だけ近づき合つたと想像しよう。すると太陽の平均密度は次のその一・四倍から千四百倍にまで増加し、中心密度は約百四十倍から十四萬倍にまで増加する。諸君はこゝで私を遮つて次のやうに言ふかも知れない。若し太陽が既に液體状態になつてゐたら、そんな程度に壓縮され

することはできない——液體の密度は普通一千倍も増加され得るものではない、と。しかし、我々が既に述べたやうに、星の直徑を等分すれば、その温度は至る所二倍になる。同様、星の直徑を十分の一に減ずれば、その温度は十倍に増加する。そのために、太陽の中心温度は、五千萬度から五億度にまで増加するであらう。そしてこの後の温度に於いては、諸原子は殆んど最早そのまゝでは存在しない——星の物質が成り立つてゐるのは殆んど全く遊離電子及び核からである。そしてこれらは非常に微細であるから、太陽の平均密度の、水の密度の一・四倍から千四百倍への増加は可能であるばかりでなく、太陽の實質を、瓦斯状と呼ぶのが最もいい状態のまゝにして置く。そこで、またしても、新しい太陽は力學的に不安定になる。それは、主列のかなり左方に當る、主列と白色矮星との間の空白區域の中央に近い、一つの點に依つて表はされるであらう。しかし、それは不安定であるから、ここにその位置を維持することはできない。たとへこの區域に星を置いて、それはそこに留まることができないことがわかる。そして、再び——この區域が空白になつてゐるのは、それが不安定の星を表はしてゐるからではあるまいか？

またしても諸君は私を遮るかも知れない。若し私がなほも意地を張つたとすれば、それは収縮に伴ふ温度の上昇の助けに依つてだつたのである。太陽の膨脹を想像した時、我々は膨脹に伴ふ温度の降下を考へるべきではなかつたか？ 勿論考へるべきであつた、と答へていいが、しかし考へた

ところで同じ事だつたらう。温度を下げると、電子の多數のL環が、また恐らくM環が、再形成されるであらう、そのために、新しい原子は今まで以上の大きさになることはなからうが、太陽を安定させるに足るほど運動の自由を失ひはしないであらう。若し我々が太陽の重量の十倍又は五十倍を持つ星を論じてゐるのであつたら、事情は違つて来るであらう。その時には、次の事を證明することが出来る。即ち、K環及びL環の再形成は一系列の安定した對座を造り出したであらう。そしてラッセル表に於ける例の突出支線は、丁度さういふ星々のための住家を提供するために存在することになる。

全體の問題はあまりに込み入つてゐるので、かういふ斷片的な仕方で満足に論ずることはできない。それを適當に論ずるとなると、非常に込み入つた數學的分析が必要になつて来る。數學的論議に依ると、ラッセル表は、第二十四圖に示したやうな仕方で、安定した對座と不安定な對座とを表はす二つの區域に分割できることがわかる。

不安定區域は非常に際立つてゐる。残りの區域は安定してゐる。表の一種の背景となつてゐる點々は、二千百の星を表はしたものである。これらの星の絶對光度は、牛ルソン山で分光的に決定された視差に由つて知られてゐる。觀測材料は完全ではない。といふのは、多大の不確定がB型星のすべての分光視差に附著してゐるからである。そしてA型星が殆んど表はされてゐないのは、分

光方法に依るつてその視差を得るのが、實際上不可能だからである。もろもろの理論的曲線はおそらくそれよりも更に不完全である。然も、それらは、粗末なものではあるが、次の事を非常に強く暗示するやうに思はれる。即ち、星の占めてゐる區域と占めない區域は、安定した對座と不安定な對座とを表はす區域と一致してゐる。理論上及び觀測上の不完全を悉く差引いた後でも、あまりに多くの一致が残るので、單なる符合として説明し去ることはできない。

かくして、數學的論議が到達するやうに思はれる結論は、次の通りである。即ち、ラッセル表に於ける、星の占めてゐる諸區域は、液體狀の、又は殆んど液體狀の状態になつてゐる星々を表はすのである。他の凡ての星は不安定であるから、ラッセル表に於ける、それらに相當する諸區域は、必然的に空白になつてゐる。もつと専門的でない言葉で述べれば、空の凡ての恒星は液體狀の又は殆んど液體狀の中心を持つてゐるに違ひないといふことになる。

ここにも合せ繪判じの一つの斷片がある。それは我々が第四章で見つけた斷片に合ふやうに思はれる。第四章で我々が發見したのは、星といふものは、液體狀の、又は殆んど液體狀の中心を持つてゐる場合に初めて分裂生殖に依つて分裂し得るといふことであつた。恒星は瓦斯狀の中心よりもむしろ液體狀の中心を持つてゐるといふ證據は山ほどある。前述の假説——一般に『液體星』說と稱されてゐるもの——に對する批判は主に次のやうな形式を取つた。即ち、諸原子のK環の直徑は

非常に小さいので、太陽の中心區域に於けるK環原子は瓦斯星からの實質的離脱を含むに足るほど緻密に詰め込まれることはできないといふのである。これらのK環原子の正確な直径を知らなければ、この批判を論ずることは困難であり、この批判に應戦することは尚更さうである。我々は、勿論、ボーア説に依つてK環に當てがはれた直径を知つてゐる。しかし、この説が原子の眞の畫像を提供すると主張する者は、最早一人もない。それは諸限界の範圍内で一つの立派な作業模型を提供しはするが、この諸限界がどこで終るかはわからない。我々がK環原子について持つてゐる唯一の實際的經驗は、ヘリウム原子の場合である。ボーア説に従へば、ヘリウム原子の直径は 0.54×10^{-8} 糎である。然も、固體及び液體ヘリウムは、ヘリウム原子がどんな緻密さに詰め込まれ得るかに就いての實際的な例證を提供する。これらのものに於いては、各原子は $\frac{1}{2} \times 10^{-8}$ 糎の直径を持つ一つの球、即ちボーア説に依つて當てがはれる空間の四百倍以上を占める。我々は電子のK環の諸次元に關する一定の認識からは依然として遠ざかつてゐるかのやうに見える。

シュレディンガーの新しい波動力學は、原子の内部に關して、一層單純なボーア説とは非常に違つた畫像を描いて、それに迅速に取つて代りつつある。電子さへボーアの舊學説の電子とは非常に違つた或る物である。核から無限の距離にある時、それは初めて舊式の電子となるのである。この核に段々近づいて行くと、それは一種の變狀を蒙るが、誰もまだこの變狀がどんなものであるかを

説明し得た者はない。そしてまた、それが『K環軌道を描く』と我々の呼ぶ事柄を行ふやうになるまで、それがどんな形態を帯びたであらうかを述べることも全く不可能である。我々がK環軌道について知つてゐるのは、そのエネルギーだけである。そして、さういふ軌道に依つて占められる空間量を預言することは、我々がそれを描きつつある物についてもつと好い知識を持つまでは不可能のやうに思はれる。

我々は勿論次の事を認めなければならない。即ち、物理的證據は、粗末なものではあるが、K環原子が液體星說の場合よりも一層實質的に小さいことを示すやうに思はれる。しかし、天文學的證據はもつと力強い、もつと信頼すべきものであつて、全く反對の方向を指してゐるやうに私には思はれる。そしてここで我々は、これ以上の斷片が現はれるまで合せ繪判じをそのままにして置かなければならない。

特殊な星を構成してゐるやうな種類の諸原子を知るまで、我々はそれらが星の温度に依つて破壊される程度を計算することはできない。その結果、安定した對座と不安定な對座との間にある理論的境界曲線は、星の諸原子に取つて一定の原子數を假定しなければ計算することができない。

第二十四圖に示した曲線は、約九十五の原子數のために引いたものであつて、これはウラニウムの原子數九十二より少し高い。この原子數を選んだのは、それが理論と觀測との最善の一致を起す

我 等 を め ぐ る 宇 宙

ことがわかつたからである。しかし、他の考察も我々のこの選擇を正當なものとすることが間もなくわかるであらう。

第七節 星の構造

我 等 を め ぐ る 宇 宙

星といふものは、家屋又は砂山と同じやうに、各層が、次の内部層から来る壓力で重力に對して支へられてゐなければ、それ自體の重量で崩壊するやうな構造である。この壓力は、普通の瓦斯壓力のやうに、完全分子の壓著の結果ではない。それが起されるのは、一部分は、電子を殆んど又は全く核のところまで奪はれた或る數の原子の壓著に依つてであるが、それよりも遙かに大きな程度に、遊離電子の壓著に依つてである。重い星々に於いては、特別の壓力が輻射の壓著に依つて起される。輻射の壓著は、我々が既に見たやうに、重量を帶びてゐるので、その出會すどんな障礙物にも壓力を及ぼす。遊離電子と原子（又は裸核）と輻射との壓著が一緒になつて、星がそれ自體の引力で陥没するのを防ぐのである。

これは星の構造についての合理的にすぐれた早取寫眞である。その機構についての畫像は、核を α 線粒子、遊離電子を γ 線粒子、輻射を ν 線と考へることに依つて得られる（尤も、大抵の星に於いては輻射の大部分はX線の波長を持つてゐる）。凡てこれらは星の中を縫ふやうに進んで行く。そして、まさしく實驗室作業に於いてのやうに、 α 線は α 線よりも餘計に侵透し、 ν 線はそ

のどちらよりも餘計に侵透する。

星に於けるエネルギー輸送

我々が既に見たやうに、瓦斯の熱は單にその分子運動のエネルギーにすぎない。瓦斯に於ける熱の傳導を研究する場合には、普通、各分子がエネルギー輸送者と見做される。それが第二の分子と衝突する時、二つの相衝突する分子のエネルギーは兩者の間に分配し換へられる。そしてかういふ仕方では熱は一層熱い區域から一層冷い區域へ輸送されるのである。各分子は、その運動エネルギーと、運動速度と、『自由通路』——それが相次ぐ衝突と衝突との間で進んで行く距離——とに連帶的に比例する輸送力を持つてゐる。

星の内部には、作用の輸送者に三つの別々の型がある——それは原子（又は裸核）と遊離電子と輻射とである。我々は、これら三つのものの輸送者としての能力を、各々のエネルギーと速度と自由通路とを乗ずることに依つて比較することができる。この目的のために、輻射の『自由通路』は輻射が、三十七%だけ吸収される前に進行する距離と解釋して差支へない。なぜなら、これはそれが自己のエネルギーを運ぶ平均距離であることがわかるからである。計算を終りまで行ふと、核と電子との双方の輸送能力は輻射のそれと比較すれば取るに足らぬものであることがわかる。核及び

電子は、輸送すべきエネルギーを一層多量に持ち得るが、侵透力が一層弱いために、それを輸送して行く距離、即ち自由通路が、輻射のそれよりも遙かに小さい。また輸送速度も一層小さい。なぜなら、輻射は光速速度をもつて自己のエネルギーを輸送するからである。かういふ仕方では、星の内部から表面へのエネルギー輸送の全體は、實際上輻射の媒介に依るのである。

この一般的原理は、一八九四年にサンプソンに依つて初めて明瞭に述べられた。彼はまた、星の内部のどんな小片の温度も、それが放出するだけの輻射を受けるといふ條件に依つて決定されるに違ひないことを證明した。しかし、彼の詳細なもろくの應用は、彼が一つの誤つた輻射法則を使用したために損はれた。それから十二年後に、シワルツシルドがそれとは無關係に同じ考へを提出して、それを『輻射均衡』の數學的方程式で言ひ表はした。これはこの問題に關するその後のあらゆる議論の基礎となつた。

輻射は星の内部から表面へエネルギーを運ぶに當つて原子と電子に全く先んずるところから、星の構造はその内部に於ける物質の不透明度に依つて決定されるに違ひないことになる。若しこれが變化すれば、輻射の輸送力も變化する。そしてこれは星の全構造に影響する。内部がすっかり透明になつてゐる星は、少しも熱を保つことができない。さういふ星の内部全體は非常に低い温度になり、さういふ星は恐ろしい廣さになるであらう。他方で、非常に不透明な星に於いては、すべて

のエネルギーは、發生した場所に積み重なつたまゝで續くであらう。そのために、内部温度は非常に高くなり、星の直徑はそれに應じて小さくなるであらう。實際に興味があるのは勿論中間の場合であるが、今述べた極端な例を見ると、星の構造は不透明度に依存することがわかる。

不幸にも、星の物質の不透明度については、どんな種類の直接測定をも得ることができない。

我々は星の諸條件の下では、地球物質の不透明度を測定することさへできない。なぜなら、星々の内部は實驗室で役立つどんな温度とも比較にならないほど高い温度になつてゐるからである。しかし、星の物質が不透明なのは、それを構成する原子と核と遊離電子とが、輻射の前進を妨げるためである。そして我々は星の物質の見本を得ることはできないにしても、さういふ見本がどれだけの原子と核と電子を含むであらうかをかなり明確に知つてゐる。かくして、その不透明度を決定することは理論的計算の問題となる。

さういふ計算は、一九二三年にコペンハーゲンのクラマース博士に依つて果されて、彼の得た諸結果は一般に受け容れられた。全く最近、ケンブリッジのガウント氏は、それよりも非常に精巧な計算を行つて、最初クラマースの提供したものと甚だ密接に一致する諸結果を得た。これらの結果は、實驗室で試験し得る限りに於いて、觀測とよく一致する。そして、實驗室の諸條件と星の諸條件との間には一つの大きな間隙があるにしても、クラマースの公式がどうして星々の場合に水泡に

歸するかを知るのは困難である。

この公式から、我々は星々の構造を完全に決定することができる。又は、假に星の構造が知られてゐるとすれば、クラマースの公式に依つて、エネルギーが星の表面へ流れて行く割合（これは全く星の實質の不透明度に依存する）がわかる。そしてこれがわかると、今度は、エネルギーはどんな割合で星の内部に發生すれば件の對座の中に均衝を保つて存續し得るかがわかる。恐らく豫期できるやうに、直徑の相異なる對座は、相異なるエネルギー發生率を必要とすることがわかる。自然界に於いては、星は、自己の直徑を、自己のエネルギー發生率に適合するやうに整へるに違ひない。さうするに當つて、星は自己の直徑を定めるばかりでなく、表面温度や色や分光型をも定める。若し星のエネルギー發生率が突然變化することになったら、星は膨脹するか収縮するかして、新しいエネルギー發生率に適合する半徑と温度を帯びるに至るであらう。

詳細な計算に依ると、全くの瓦斯星に於いては、大きな直徑がエネルギーの弱々しい發生に相應し、その反對の場合も本當であることがわかる。かくして、若し星々が全く瓦斯状であつたら、赤色巨星は同じ重量の主列星ほど發光しはしないであらう。第二十三圖に書き換へて示したシーアス表に依ると、實際にはこの反對が事實であつて、赤色巨星は總體の輻射を、同じ重さの主列星の十倍から二十倍まで放出しつつあることがわかる。この事は、星々が全く瓦斯状であることに對する

反證である。しかし、これよりも一層有力な證據はない。全くの瓦斯星にとつては、シアス表に示した濃い線は、左方の上部へ走る直斜線となるであらう。さういふ斜線系統と、同じく第二十三圖に示した曲線との間に於ける廣汎な相違を見ると、星の物質の條件が純粹の瓦斯状態とは違ふ程度を知る何らかの手がかりが得られる。

クラマース説に従へば、物質の不透明度は、それを築いてゐる諸原子の原子數及び原子量に依存し、一つの重い原子核の形態に於ける大きな物質塊は、輻射を吸収するに當つて、同一の總重量を持つ多數の小さな塊よりも遙かに有効である。地球上の日常の經驗に依つても、その通りであることがわかる。物理學者と外科醫が、双方とも、X線装置を圍ふための材料として鉛を選ぶのは、かういふ理由からである。彼等の經驗に依ると、一噸の鉛は、不必要なX線を遮るに當つて、一噸の木材又は鐵よりも遙かに有効である。若しX線装置の強度と、それを取巻いてゐる防禦材料の總重量とがわかつたら、我々は、防禦材料の原子量を、その中を通つて逃げるX輻射の量を測定することに依つて甚だ公平に見積ることができるといふことができる。

星々を構成する諸原子の原子量を決定する時にも、これに非常に類似した方法を使用することができる。星は結局巨大なX線装置にはかならない。我々は多數の星の重量を知つてゐる。そしてそれらがX線を發生させつつある割合は、單に、それらが空間の中へエネルギーを放射しつつある割

合にすぎない。若し星の各原子核を眞二つに切ることができたら、星の不透明度は半分になるであらう。そのために、輻射は星の中を吸収されるまでに今までの二倍ほど餘計に進行するであらう。若し星が全く瓦斯状であつたら、これは星を元の直径の四倍に膨脹させ、その表面温度を半分にすることになるであらう。その結果、我々は星を構成する諸原子の原子量を、星の重量、光度、及び表面温度から計算し得ることになる。

多數の星の原子量は、私がそれらの星は全く瓦斯状であるといふ想像に基いて計算したところに依ると、實際上あらゆる場合に、地球上で知られてゐる最も重いウラニウムのそれよりも一層高かつた。一層高いばかりでなく、恐ろしく高いことがわかつた。實に、全くありさうに思はれないほど高かつた。また、この事に對する説明は、もろくの星は全く瓦斯状ではないといふことにあるやうに思はれる。星の内部は一部分液體状であると想像されるや否や、計算された原子量は恐ろしく減少することになる。それらをこれ以上正確に決定することはできないが、我々がラッセル表に對する一つの考察から得た約九十五といふ原子数は、すべての既知の事實と全く一致するやうに思はれる。

實際、他のもろくの考察も、星の諸原子の原子数が九十二よりも高くなければならないことを暗示するやうに思はれる。先天的な星の輻射は、地球上で知られてゐるもろくの物質型か、でな

ければ他の未知の物質型に生ずることができよう。高い温度と密度は普通の物質に依る輻射發生を抄らすのに何の役目も果たすることができない、といふことが一旦認められると、星の輻射は地球上で知られてゐるもろくの物質型に生ずることはできないことが明かになる。他の物質型も存在するに違ひない。そして、二つの例外はあるが、九十二（ウラニウム）に至るまでの凡ての原子数は、既に地球の諸元素に依つて占領されてゐるから、恐らくこれらの他の型はウラニウムよりも一層高い原子量を持つ元素でなければならぬやうに思はれる。

これらの過度に重い原子が、星のスペクトルに現はれると考へられてはならない。といふのは、これらのものは我々に星々の大氣の構成を知らずに過ぎないからである。そして一層軽い諸原子は頂上まで浮び上るから、星のスペクトルに現はれるのは大體に於いてこれらである。若し太陽大氣が、もろくの遊星が生れた時に、過度に重い原子を多數に含んでゐたとすれば、それらの中の或るものは依然として地球上に存在しなければならない。それは多數に存在する筈はない。でなければ、それらは高度にエネルギーを發生するところから見て、それらの存在がわからない筈はないであらう。最も單純な見解は次の通りであるやうに思はれる。即ち、**軽い諸原子**は星々の中心に沈んで行つたのであり、地球が形成されたのは、主に又は専ら、太陽の表面へ浮び出た軽い諸原子からである。

第八節 星の進化

我々が既に想像したやうに、星々は最初渦巻形星霧の外縁に於ける凝結として生れた。これらの凝結は、その形成の様式から、必然的にあらゆる種類の大きさを持つであらう。そして、その中には重量の或る限界以下になり得るものはないといふ唯一の制限に従ふにすぎないであらう。かくして、我々は、星々が誕生の時にもその後にも悉く同一の大きさ又は重量になり、又は悉く同一の物理的條件になると考へてはならない。星々はラッセル表に於ける相異なる點に於いて存在しはじめるであらう。しかし、我々は次のやうに想像して差支へない。星々の最初の位置は、この圖表の、星に占められてゐない諸部分に制限されてゐる、と——それは、液體星説が暗示するやうに、これらが唯一の安定した對座であるためか、でなければ、今までまだ發見されたことのない何か他の理由のためである。毎年、星は重量を或る量だけ失ふ。そして、それがエネルギーを發生させる割合、従つてまたその光度は、それに應じて減少する。その結果、それは件の圖表に於ける新しい位置へ移つて行く。前に示した、星の重量に關するシーアスの圖表を見て、我々は次のやうに考へて差支へない。重量の相等しいもろくの曲線は、一續きの階段——實際、非常に不同な階段であつて、

各々は直ぐ上の階段よりも一層低い重量を表はしてゐる、と。星の進化はどんなであらうと、肝要なのは、それはいつも階段を降りるであらうといふことである。上の階段へ上るのは不可能である。我々は、ラッセル表の中に、星に占められてゐない諸區域に入り込むことなしに、星の進化の二つの可能な通路——星群が自らの實質を輻射に變じながら行進して行く二つの道路——を辿ることができる。第一は勿論『主列』である。それが星群行進の主線であることは、多數の考察に依つて暗示された。ラッセル表に於ける、赤色巨星から出てゐる枝線は、第二の可能な行進線を表はしてゐる。或る數の星は、この枝線に沿うて進行して、遂に、青星又は白星となつて主列に達し、然る後、主列の下半を降つて、最後の消滅へと進む微光赤星となつて終る。

これらの道路の各々に沿うた進行は、星の大きさが絶えず収縮して、その直徑が不斷に減少する結果である。これは、星の密度は絶えず増加すると述べるのと同じではない。といふのは、星の重量は絶えず減少するので、たとへ密度は同じまゝであつても、直徑は減少するだらうからである。とはいへ、例の第二十三圖に示したやうな、シーアスの行つた平均密度の決定を研究して見ると、密度が不斷に増加することが暗示される。尤も、これは主列の中央區域に於いては非常に微かになる。

これまで提出された、星の進化に關する實際上のあらゆる學說に従へば、星軍の行進は、今述べ

たものと同一の一般型を持つてゐた。尤も、今日の意見に従へば恐らく主列が行進主線として取扱はれる傾きがある。ところが、以前の諸學説に於いては、最も若い星は専ら赤色巨星枝線に沿うて行進して、中年になつて初めて主列に結びつくと思像されたものである。凡ての中の最初の眞面目な學説、即ちロキアのそれは、上下する温度のもろくの枝線に依つて言ひ表され、これらの枝線は、ラッセル表に於ける、最後に擧げた行進線を形づくつた。ラッセルが一九一三年に提出した一學説に於いては、再び、今述べた行進線が、星々に當てがはれた。この學説に於いては、星々はなぜ他の通路よりも寧ろこれらの特殊な通路を辿るかといふことについても、一つの物理説明が企てられたが、これはその後放棄された。彼のもつと最近の學説、即ち一九二五年のものは、星々はなぜこれらの特殊な通路を辿るかといふことに關する、我々が既に第四節『ラッセル説』の中で論じた新しい説明を提供する點で彼の以前の學説と違つてゐるにすぎなかつた。

現在では、次のやうに言つても多分公平であらう。ほとんど凡ての、そして恐らく文字通り凡ての天文學者は、星々の進化通路が我々の述べたやうな一般型のものであることに同意する、と。星星の中には、赤色巨星として出發したものあれば、青色巨星として出發したものもあり、また恐らく中間條件に於いて出發したものもある。老ひるに逐れて、すべての星はラッセル表に於いて下方へ移動し、それらの星のさまざまな通路は、第二十二圖に示したやうな、逆にしたyの叉にある

一つの點に寄り集まる。そしてこの點を通過した後、主列を降つて行く。ところが、これらの通路に當てがはれるべき物理的解釋については、最も廣汎な意見の相違がある。大抵の天文學者は、相矛盾する學說に解決を與へるために何か一定の觀測的證據が得られるまでは、おそらく判斷を下すのを見合せる。

星々は、最初廻轉する星霧から投げ散らされた焰の飛沫の點々として生れた時は、あらゆる種類の原子の混合から成り立つてあらう。それらの原子の中には、おそらく非常に短命で、ほとんど即座に輻射に變化したものもあり、また永久的と稱して差支へないほど長い生涯を與へられたものもあつたであらう。少數の輻射性原子を除けば、地球は全くこの後者のやうな型の諸原子から成り立つてゐるに違ひない。計算して見るとわかるやうに、地球原子は普通の星の原子よりも恐らく長い生涯を持つてゐるに違ひない。でなければ、原子の自己絶滅が地球を熱過ぎて住めないものにするであらう。星の永久原子は、星のエネルギー發生能力に對しては殆んど何の貢獻もせず、従つて單にその重量を増すにすぎない。すべての中で最も短命の原子は、星のエネルギー發生に貢獻するところは多いが、その重量を増すことは殆んど無い。一般に、どんな原子型でもの生涯が短かければ短いほど、一年に絶滅されるその數の比例はますます大きくなり、従つてそれが一噸の重量に付き發生させるエネルギー量はますます大きくなる。

星は短命の原子を澤山持ったまゝ生涯を始め、從つて最初は猛烈にエネルギーを發生させる。星が老ひるに連れて、短命の原子はまづ先に消滅し、且つさうするに當つて、星の平均一噸當りのエネルギー發生量を減少させる。そのために星の重量は減少するから、一噸當りのエネルギー發生率も減少するに違ひない。最後に、多くのエネルギー發生能力を備へてゐる原子は悉く消滅して、星は、輻射を發生させる能力の非常に少ない、収縮し減少した原子の塊のまゝにして置かれる。

これと同じ事を別の仕方で述べれば、星が一噸に付きエネルギーを發生させる割合は、星の原子人口の死亡率に比例する。シリウスはエネルギーを一噸に付き太陽の十六倍ほど發生させると述べることは、別の仕方で次のやうに述べることに過ぎない。シリウスに於ける普通の原子は、太陽原子の平均壽命の十六分の一を持つにすぎない、太陽原子の死亡率は十六倍ほど高い、と。最高死亡率を持つてゐるあのまゝの原子型は、どんな星に於いても漸次に死滅するから、人口の平均死亡率は減少する。又は、別の言葉で云へば、星が老ひるに連れて、その一噸當りエネルギー發生能力は減少する。

これは觀測天文学の諸發見と一致する。最も重い星々は、どんな場合にもさうと期待されるやうに、エネルギーをそんなに重くない星々よりも一層餘計に發生させるばかりではない。それらは又一噸當りのエネルギーをも恐ろしく餘計に發生させる。この事は次の主列星の表に例證してある。

星	重量(單位は太陽)	エネルギー発生量(一グラム當りエルグ)
ビーアス星 A	36.3	15000
鱈座 V 星 A	19.2	1000
シリウス A	2.45	29
太陽	1.00	1.90
エリダン座 ε 星	(0.45)	0.26
クルガア GOB	0.20	0.021

星の重量に關するシーアス表に依ると、これは星々の一般的特質であることがわかる。以前の比喩を繰り返せば、星々は青年時代には自己の實質を大まかに浪費する。その時分には消費すべきものが澤山残つてゐるが、年が寄ると吝嗇になる。理論的考察が、今この現象に對する一つの説明を提供したのである。

例の同じ圖表を見ると、同一の重量を持つ二つの星は普通同一の光度を持つてゐないことがわかる。一般に、赤色巨星の方へ延びてゐる突出枝線上のもろくの巨星は、等しい重量の主列星よりも實質的に一層高い光度を持つてゐる。我々が既に述べたやうに、赤色巨星は、重さの等しい主列星の輻射の十倍又は二十倍を放出し得る。主列星から白色矮星へ移つて行つても、これと同じ事が

繰り返される。主列星は重量の等しい白色矮星よりも恐ろしく多量に——優に五百倍以上も——幅射を放出する。この事は次の三つの白色矮星に依つて例證し得る。この三つは前の表の最後の三つの星と比較することができる。

星	重量(單位は太陽)	エネルギー発生量(一グラム當りエルグ)
シリウスB	0.85	0.0027
エリダン座O ₃ 星B	0.44	0.002
ヴァン・マアネン星	(0.20)	(0.00055)

我々は、これまで、エネルギー発生は自然的であり、従つて物理的條件の變化に影響されないと想像した。然も、いま述べた諸事實は、これは殆んど件の問題に關する全體の眞理ではあり得ないことを暗示するやうに思はれる。一つの具體的な實例を引いて反對論を述べれば、シリウスAとその白色の矮小な伴星シリウスBは、おそらく、同一の星霧から同時に生れたに違ひない。それでゐて前者は一噸當りエネルギーを後者の四千倍発生させる。こんなに大きな相違を原子型の相違に歸することはできさうにもない。この二つの星の共通起源は殆んどこれを妨げる。我々が知つてゐるやうに、この二つの星に於いては諸原子が相異なる物理的狀態にある。シリウスAに於いては、原

子のK環は害せられないで保たれてゐるのに、白色矮星のシリウスBに於いては、原子は完全に破壊されて、裸核と遊離電子とにせられてゐる。若しシリウスの二つの構成者が、本質的に同一の原子型から成り立つてゐるなら、兩者の共通起源から推して想像できるやうに、これらの原子がエネルギーを發生させる割合の莫大な差は、双方の原子の相異なる物理的條件に依存するやうに思はれるであらう。

第三章で提出したもう一つの考察に従へば、星のエネルギー發生率は星の諸原子の物理的條件に依存することが非常に尤もらしくなる。我々は、その同じ第三章で、星のエネルギーは電子と陽子との合體から起ると想像した。陽子は原子核の中にのみ存在する。そして純粹の物理的考察は、我々に次のやうに推測させた。即ち、一つの特殊な陽子と合體し得る唯一の電子は、この陽子の内在する核の周圍に瞬間的に軌道を描きつつある電子である、と。星の構造に關する一つの研究は、この假説を支持する。といふのは、若しエネルギーが核の中に落ち込む遊離電子に依つて發生させられ得るなら、星全體が不安定になり、その上爆發して一閃の輻射となるであらうことが證明できるからである。この假説に基くと、少數の原子に伴ふ電子だけが後に残つて軌道運動をしてゐる星は、勿論僅かのエネルギーを發生させ得るにすぎない。この事は即座に白色矮星の弱々しいエネルギー發生力を説明する。そしてまた、電子のL環及びM環が残存してゐる赤色巨星が、なぜ重量の等し

い主列星よりも餘計にエネルギーを發生させるかについての暗示を與へる。

星が老ひてその重量が減少するに連れて、それは絶えず自己のエネルギー放出量を内部のエネルギー發生率に等しくさせるやうな新しい對座を選ばなければならない。同一の星が、順々に赤色巨星や主列星や白色矮星になることができる。専門的用語を剥ぎ取つて述べれば、この事は、星は絶えず自己の直徑を整へてさまざまなエネルギー發生率に適合させるといふことを意味する。

いま考察した假説に基くと、星は自己の直徑を變化させる際にはエネルギーの放出量と發生量の双方を變化させる。あらゆる瞬間に、星はこの二つが正確に均衡を保つやうな直徑を選ばなければならない。星は、軌道運動に残されてゐる電子が少ないか多いかに依つて、エネルギー發生率の非常に大きな範圍を持つから、いつも均衡のある對座を見出すことができさうなものである。いづれにしても、空の凡ての星はそれを見出したやうに見える。尤も、長週期變光星だけは例外である。これらは、エネルギーの收入と支出とが均衡を保つほどの直徑に出會うことができないかのやうに絶えず膨脹したり収縮したりしてゐる。

この同じ假説に従へば、銀河系の非常に多様な星々は悉くほど同一の年齢であり、従つて悉く同一の星霧から生れたといふことが、即座にあり得べき事になる。最も多く發光する銀河星さへ、約一千億年以上の間、現在の割合でエネルギーを發生させつづけた筈はあるまい——どんな長い年齢

も最初は不可能なほど高い重量を必要とするであらう。然も、星々の運動を見ると、これらの高度に發光する星々さへが、この期間の少なくとも五十倍に亙つて存在して來たに違ひないことがわかる。若し我々が次の事を認めれば、外見上の矛盾は消える。即ち、最も輝かしい星々の極端な光度は、最近に現はれたものであるかも知れず、さういふ星が、その生涯の恐らく九十八%の間、僅かのエネルギーを失つただけだつたのは、この星の原子の大部分が、電子を剥ぎ取られて裸にされ、従つて絶滅を免れたからである。九十八%といふ必須の比例は怪しいほど大きなものに思はれるかも知れないが、我々は極端な場合を述べたのである。非常に稀な星の型の場合にのみこんな大きな比例が必要なのである。さういふ型の星は、おそらく一千萬に一つ以上はあるまい。

今それほど發光してゐるこれらの星は、初期の睡眠状態に於いては、事實上莫大な重量を持つ白色矮星であつたらう。觀測天文学は、さういふ星々が存在する證據を提供しはしないが、さういふ星は存在しないといふ證據も確かに無い。非常に重い星々は非常に稀な物象であることがわかつてゐるので、おそらく我々は太陽から非常に遠ざかつて行かなければさういふ星を見出すことはできないであらう。して見ると、それは地球からは見えなほほど遠いかも知れない。どんな場合にも、弱い光度を持つ非常に遠い星はなかく發見されさうにないであらう。しかし、それだからと云つて、まだ一つも見出されたことがないといふ事實から、さういふ星は存在しないと推理することは

できない。

更にまた、さういふ星は見出されることがないといふことも絶対に確實だとは云へない。非常に重い白色矮星は、重い主列星と、既に知られてゐる、悉く重量の小さい白色矮星との何れよりも、一層高い表面温度を持つてゐる筈である。そのスペクトルが非常に高温度を示す一つの星群が全部知られてゐる——それはO型星である。これらは普通莫大な距離にあつて莫大な光度を持つ星々と解釋されるか、おそらくその中の少なくとも幾つかは適度の距離にあつて弱い光度を持つてゐる星かも知れない。殊に、遊星形星雲の中心星はO型及びB型のものである。しかし、これらの分光型を持つ正常な主列星は一般に太陽の千倍發光するから、遊星形星霧の中心星は太陽よりも非常に少なく發光することがわかる。ゲラシモヴィク博士が最近示したところに依ると、これらの星の中五十二だけは太陽のその約三分の二にすぎない平均光度を持つてゐる。他の觀測者たちは、一層低くさへある光度を見出した。これらの星の表面温度は三萬度といふ順位であるから、その大きさは微細であるに違ひない。實際、一つの簡単な計算に依つて、それらは殆んど太陽半径の十分の一以上を持つことはできないことがわかる。

それらは大きさが小さいばかりでなく、その上更に、大きな重量を持つてゐるといふ印がある。分光證據に依ると、多くの場合、周圍を取巻く星霧は自轉してゐることがわかる。そして、丁度銀

起つたとすれば、観測されたもろくの速力の中の最も高いものは、もろくの遊星形星霧を運び去つて銀河から全く取除くに足るであらう。それらの星霧はわが星辰系の中を無茶苦茶に運行するであらう。ところが、それらの星霧の、銀河面附近への秩序立つた配列と集中とは、それらが銀河面の永久的成員であることを甚だ有力に暗示する。かくして、スペクトル線の観測された大移動は殆んど空間に於ける大速力を示すことはできない。何か他の解釋が見出されなければならない。ペリン教授は次のやうに考へた。それは大體に於いてそれらの星霧の内部運動、収縮、膨脹、及び自轉から生ずる、と。果してさうであるなら、空間に於ける諸運動は、決定されることはできないにしても、少なくとも最早どんな困難をも示さない。若しこれらの星が、我々の假説が要求するやうに、非常に大きな重量と小さな半径とを持つ白色矮星であるなら、そのスペクトルは、シリウスBに實際に観測されたものと同じ型の、赤色の方への相對的變位を示す筈である。これは一つの一層重大な困難を示すことがわかるかも知れない、といふことはあり得べき事である。尤も、それはまた、大きな観測された變位の中に現はれることがわかるかも知れないといふこともあり得べき事である。

凡てこれを考へに入れると、遊星形星霧も、他の光度の弱いO型又はB型星も、件の假説に依つて考へたやうな睡眠状態にある非常に重い星であるかも知れない、といふことも全くあり得べき事

のやうに思はれる。簡単に云へば、重い星は幾萬億年の間遊星形星霧又は矮小なO型星として存在することに由つて自己の重量を保存され、然る後、極めて若いやうな見せかけをもつて突然現はれるのかも知れない、と我々は想像する。しかし、現在に於いては、さういふ假説を肯定するにしても否定するにしても、觀測的證據は不十分である。合せ繪判じの幾つかの斷片は行方不明である。そして我々はそれらが現はれるまで待つてゐるほかはない。

白色矮星

これらの假説上の重い白色矮星は別として、天文學者たちは一般に普通の白色矮星を星の進化の最後の段階と見做してゐる。それらは、諸原子が電子をすっかり剥ぎ取られるほど高い中心温度を持つてゐる星である、といふ點では一般に一致してゐるが、星々はなぜこの状態にまで収縮するかといふことについては、意見の一般的一致はない。

液體星説に基くと、ラッセル表に於ける空白區域は不安定な對座を表はしてゐる。普通、星は、少しばかり重量を失つた場合には、この圖表に於いて、古い位置に隣合せた新しい位置に移動して行くだけである。しかし、時には、この少しばかりの移動がたまくその星をこの圖表の不安定區域へ運んで行くことがあるかも知れない。さういふ場合には、それは急いでこの區域を横斷して、遂

に何處か全く違つた安定せる對座に入り込むであらう。

液體星説は、全く簡單に、白色矮星状態を終極的状态と説明する。星が大激變を起してこの終極的状态にまで収縮するのは、そのエネルギー發生量が最早それを主列の中に留まらせて置くに足りなくなつた時である。この状態に於いては、星は非常に僅かのエネルギーを放射するだけであるから、絶滅と衰頽は殆んど全く阻止される。我々が既に見たやうに、若し太陽が十五萬億年の間現在の割合で輻射を放出しつづけたら、その全體の重量は輻射に變るであらう。これと對照すれば、ヴァン・マアネン星は、その現在の重量の約千分の一以上を失ふことなしに、十五萬億年の間現在の割合で輻射を放出しつづけることができるし、また恐らく放出しつづけるであらう。我々は白色矮星状態を一つの終極的状态と考へて差支へない。この状態からは、變化と衰頽は殆んど無くなつてしまふので、この状態にまで収縮する星は、幾百萬年の幾百萬倍の、そのまた幾千倍にも互る新生活に這入る——それは何の目的のためか、我々はたゞ驚くほかはない。

第六章 始まりと終り

我々が既に見たやうに、物質界の固形實質は絶えず分解して觸知し難い輻射となりつつある。太陽の重量は昨日は今日よりも三千六百億噸多かつた。この相違は二十四時間にわたる輻射放出の重量である。それは今は空間の中を進行しつつあつて、直接の觀察が屈く限り、時間の終末まで空間の中を旅行し續けるやうに運命づけられてゐる。それと同一の、物質的重量の輻射への變形は、すべての星に於いて進行し、地球上でも、程度は劣るが進行してゐる。地球に於いては、ウラニウムのやうな複合原子が一層單純な鉛やヘリウムの原子に絶えず變化して、この過程で輻射を遊離させつつある。しかし、太陽が日々重量を三千六百億噸ほど失ふのに對して、地球はかういふ原因から一日に約九十ポンドの割合で重量を失ひつつあるにすぎない。

循環過程

次のやうに質問するのは自然である。全體としての宇宙を研究すれば、これらの過程は圍繞され

た循環期の只の一部分にすぎないことがわかり、従つて、我々が太陽や星々や地球上に見る消費物は他の場所で償はれるかどうか、と。河の堤に立つて、流れが絶えず水を海へ運んで行くのを見つめると、この水は相當の經路を辿つて霧と雨に變じ、それが再び河を充たすことがわかる。物理界もそれと同様な循環系統であるか、それとも、むしろ、補充の源がなくてひとりでに消えた後は流れるのをやめるに違ひない水流に比較しなければならぬか？

第一節 熱力学

この疑問に對して、熱力学の第二法則として知られてゐる廣汎な科學的原理が、非常に一般的な言葉で一つの答へを與へる。若し我々がこの世界で我々の周圍に見える凡ての多様な生氣の基礎的原因は何かと質問するなら、あらゆる場合に、それはエネルギーだと答へることができる——我々の船舶や汽車や自動車を運轉させる燃料、又は我々の肉體を生かして置いたり筋肉的努力に使用されたりする食物の化學的エネルギー、晝と夜、夏と冬、満潮と干潮を交替させる地球の運動の機械的エネルギー、我々の作物を生長させたり風や雨を與へたりする太陽の熱エネルギー。

『エネルギー持續』の原理を具象する、熱力学の第一法則に従へば、エネルギーは不滅である。それは一つの形態から別の形態に變化することはあるかも知れないが、その総重量は、これら凡ての變化を受けても依然として變らない。そのために、宇宙の總體のエネルギーはいつも同じまゝである。宇宙の全生活の原因であるエネルギーは不滅であるから、この生活は量に於いて減少しないで永久に續いて行くことができると考へられよう。

エネルギーの有効性

しかし、熱力学の第二法則に従へば、そんな事は決してあり得べきでない。エネルギーは、量に於いては不滅であるが、形態に於いては絶えず變化する。そして一般的に云へば、變化といふものには上向きの方角と下向きの方角とがある。よく言はれるやうに、下向きの旅行は容易であるが、上向きの旅行は、困難か不可能か、そのどちらかである。その結果、下向きの方角には上向きの方角よりも餘計にエネルギーが行く。例へば、光と熱はどちらもエネルギーの形態であり、百萬エルグの光エネルギーは、この上もなく容易に、百萬エルグの熱に變化させることができる。光を、冷い黒い面に落ちさせると、その通りの變化が行はれる。しかし、それと逆の變化は不可能である。一度熱の形態を取つてゐた百萬エルグは、決して再び百萬エルグの光の形態を取ることはできない。これは、次のやうな一般原理の特別な實例である。即ち、輻射エネルギーは、いつも、一層短い波長でなしに、一層長い波長を持つ形態に變化する傾きがあるのである。例へば、一般に、螢光性は光の波長を増加させる。それは青い光を、綠色、黄色、又は赤色の光に變化させるが、赤い光を、黄色、綠色、又は青色の光に變化させはしない。この一般原理には幾つかの例外があることが知られてゐるが、それらは特別な説明を許す特別な型のものであつて、一般原理には影響しない。

次のやうに反對されるかも知れない。火をつけるといふ日常行爲は、この事の反論になる、と。

太陽熱は我々が燃やす石炭の中に貯へられてゐるではないか、そして我々は石炭を燃やすことに依つて光を造り出すことができるではないか？ しかし、これに對する答へはかうである。即ち、太陽輻射は、光と熱との双方の、また實にあらゆる波長の輻射の、混合物である。石炭の中に貯へられてゐるものは、元來、太陽の光と、それよりも更に波長の短い他の輻射とである。石炭を燃やすといくらかの光が得られるが、これは太陽が最初石炭の中に入れただけの量ではない。また、いくらかの熱も得られるが、これは最初入れられた熱の量よりも多い。差引勘定すると、光の或る量が熱の或る量に變化したといふのが正味の結果である。

これを見ると、我々は、エネルギーを量に於いてだけでなく質に於いても考へることを學ばなければならぬことがわかる。エネルギーの総量はいつも同一である。これは熱力學の第一法則である。しかし、その質は變化する傾きがある。エネルギーの相異なる質の間には關木が設けられてゐる。一方の方向へ行くのは容易であるが、もう一つの方向へ行くのは不可能である。人間の群集なら關木を飛び越えることなしに廻り道を見つげようと圖るかも知れないが、自然界には廻り道はない。これは熱力學の第二法則である。水が下り坂を流れるのと同じほど確實に、エネルギーはいつも同一の方向に流れる。

下向通路の一部分は、我々が既に見たやうに、短波長の輻射から長波長の輻射への推移から成り立つてゐる。量子に依つて言ひ表はせば、この推移は少數の高いエネルギー量子から多數のエネルギー量子へであつて、エネルギーの総量は勿論變らない。従つて、エネルギーの落下は、その量子が破壊されて一層小さな單位になることに成り立つてゐる。そして、一旦落下と破壊が起ると、元の大きな量子を再び構成することは、ふとつちよが壁の上に仰向きになると同じほど不可能である。

これは下向通路の主要部分ではあるにしても、その全體ではない。熱力學が教へるところに依ると、エネルギーの相異なる形態は悉く『有効性』の相異なる程度を持ち、下向通路はいつも一層高い有効性から一層低い有効性へ向つて行く。

ここで我々は、この章の初めに持ち出した疑問に立ち還つて差支へない。即ち、『宇宙の多様な生活を進行させるものは何であるか？』これに對する我々の最初の答へ、『それはエネルギーである』といふ事は、今や不完全であることがわかる。エネルギーが本質的なものであることは疑ひないが、實際の完全な答へは次の通りである。即ち、それはエネルギーの、一層有効な形態からそれほど有効でない形態への變化である。それはエネルギーの下り坂疾走である。宇宙の總體のエネルギーは減少することができず、それ故宇宙は永久に進行するに違ひない、と主張することは、時計

の重量は減少することができないから、時計の針は永久にぐるぐる廻るに違ひないと主張するやうなものである。

第二節 宇宙の最後の結末

エネルギーは永久に下り坂を走り得るものではない。そして時計の重量のやうに、それは最後には底に達するに違ひない。それ故、宇宙は永久に進行し得るものではない。早かれ晩かれ、エネルギーの最後のエルグが、有効性を降つて行く梯子の最低の横木に達する時が来るに違ひない。そしてこの瞬間に宇宙の活潑な生活は停止するに違ひない。エネルギーはその時でも依然として存在してはゐるが、變化能力をすっかり失つてゐる。不活潑な池が水車を廻すことができないのと同じやうに、それは殆んど宇宙を運轉させることはできない。温みはあるが死んだ宇宙が後に残る——これは『熱死』である。

以上が近代の熱力學の教へるところである。それを疑ひ又はそれに挑戦する理由はない。そして實際、それは我々の地上の經驗の全體に依つて十分に確證されてゐるので、どの點からそれに攻撃を加へることができるかを見るのは困難である。それはどんな循環宇宙をも否定するから、我々に見える出來事は河の水が海へ注ぐことだけであつて、我々に見えない出來事がこの水を再び河へ取り戻すなどとは云へない。河の水がかういふ仕方でぐるぐる廻ることができるのは、それが宇宙の

全體ではないからである。何の循環に關係のない何物かが、それを絶えず運動させてゐるのである——それは太陽熱である。しかし、全體としての宇宙はぐるぐる廻ることはできない。宇宙の外側からの連續的作用——これが何を意味するにしても——を假定しなければ、宇宙のエネルギーは絶えず有効性を失ふに違ひない。エネルギーが最早失ふべき有効性を持つてゐない宇宙は、既に死んでゐるであらう。變化は、熱死に至る一つの方向に起り得るのみである。宇宙の場合にも人間の場合にも、唯一の可能な生活は墓への進行である。

我々が眞の循環運動の明白な例として選んだ、海に注ぐ河の水流さへが、關係する凡ての要因を勘定に入れるや否や、この事の例證になることがわかる。河が大瀧や小瀧を越えて海の方へ注ぐ時、水の轉落は熱を發生させる。それは最後には熱輻射の形態で空間の中へ去る。しかし河を海の方へ注がせるエネルギーは、終極的には、主に光の形態で太陽から来る。太陽輻射を塞ぐと、河は間もなく流れるのをやめるであらう。河が流れるのは、絶えず光エネルギーを熱エネルギーに變化させることに依つてのみである。そして冷却しつつある太陽が、十分高い有効性を持つエネルギーを供給しなくなるや否や、流れはとまるに違ひない。

それと同じ一般原理は、天文學的宇宙にも適用されて差支へない。エネルギーがここで下方へ走る仕方については、何の疑問もない。それは最初星の熱い内部で、極めて短い波長と過度に高いエ

ネルギイとを持つ量子の形態で遊離する。この輻射エネルギーが星の表面へ出ようとかがく時、それは、反復される吸収と再放出とに由つて、この星の、それが通過して行く部分の温度に、絶えず適合する。一層長い波長は一層低い温度と結びついてゐるから、輻射の波長は絶えず長くなる。少數の精力的な量子が多數の弱い量子に變化する。一旦これらが空間の中に遊離すると、それらは變化せずに進行して、遂に塵粒子、漂流原子、遊離電子、又は、星間物質の何か他の形態に遭遇する。この物質は星々の表面よりも一層高い温度にあるといふ非常にありさうもない場合を除けば、これらの邂逅は輻射の波長を更に一層増加させ、無數の邂逅の最後の結果として、非常に大きな波長を持つ輻射が出來上る。量子は數に於いて恐ろしく増加したが、この増加に相當する代償として、量子の個々の力は減少した。おそらく、元の非常に精力的な量子は陽子及び電子の絶滅から生じたのであるから、宇宙の本過程は、電子及び陽子の中に詰め込まれてゐる、有効性の非常に高いエネルギーが、有効性の最も低い熱エネルギーに變形することに成り立つ。

多くの人々は、空想を逞しうして次のやうに思索した。この低い熱エネルギーは相當の經路を辿つて再び新しい電子及び陽子になるかも知れない、と。現存の宇宙が分解して輻射になると、彼等の想像では、新しい天と新しい大地とが古いものの灰の中から生れる。しかし科學はさういふ空想に支柱を與へることはできない。おそらくそれも悪くはあるまいが、同じ主題の永遠の反復から、

又はその無限の變化からさへ、どんな利益が生じ得るかを見るのは困難である。

そこで、宇宙の最後の状態に達するのは、絶滅し得るあらゆる原子が絶滅し、そのエネルギーが永久に空間をさまよひ廻る熱エネルギーに變化した時であり、輻射に變化した時であらう。

我々が既に擧げたハップルの見積りに従へば、物質は一糎立方に 1.5×10^{-31} グラムといふ平均率で空間に分布されてゐる。物質の一グラムの絶滅は、 9×10^{30} エルグのエネルギーを遊離し、従つて、物質の 1.5×10^{-31} グラムの絶滅は、 1.35×10^{10} エルグのエネルギーを遊離する。そこで、現存の宇宙の凡ての物質の總體の絶滅は、一糎立方に付き 1.35×10^{10} エルグといふ割合のエネルギーで空間を塞ぐにすぎないであらう。このエネルギー量は、空間の温度を絶対零度から液體空氣のそれよりも遙かに低い温度にまで高めるに足るだけである。それは地球の表面の温度を攝氏一度の六千分の一だけ高めるにすぎないであらう。全宇宙を絶滅した時の効果がそれほど少ないのは、勿論、空間がそれほど物質に缺けてゐるからである。空間を、その中にある凡ての物質を絶滅することに依つて温めようとすることは、部屋の中を、こちらに一粒、あちらに一粒あるにすぎない塵を燃やすことに依つて温めようとするやうなものである。空間の容積は、その中に注がれ得るどんな量の輻射と比較しても、底のない穴と同じである。實際、科學的観測が届く限り、次の事は全くあり得べき事である。即ち、我々は考へて見たこともないが、今でさへ幾千の死んだ宇宙の輻射が空間をさまよ

ひ廻つてゐるかも知れないのである。

かくの如きが事物の最後の結末である。現在の科學が見得る限り、物質界はいつか遠い時代にどうしてもさういふ結末に達するに違ひない——若しその間に自然の成行きが變らないとすれば。

我々は今度は大昔へ遡つて事物の始まりを窺つて見よう。

第三節 宇宙の始まり

我々が時間の中を前進するに連れて、物質的重量は絶えず輻射に變化する。反対に、時間の中を後戻りするに連れて、宇宙の總體の物質的重量は絶えず増加するに違ひない。我々が既に見たやうに、星々の現在の重量は、それらが約五又は十萬億年以上の間存在してゐたことと一致せず、それらがその現在の配列と運動の示す或る年齢記號を帶びるには、ほどかういふ莫大な期間の全體を必要とするであらう。

巨大な銀河外星霧の破壊が星々の誕生になつたに違ひないといふことは、我々の既に見たところである。そして銀河系の起源に關する最も條理一貫した説明は、この系統全體は約五乃至十萬億年前單一の巨大な星雲の破壊から生じたといふ想像に依つて提供されるといふことも、我々の既に見たところである。

我々は暫く立ちどまつて、この想像を別の假説と比較して見よう。それは幾人かの天文學者が愛したもので、星々は始終創造されつつあるといふのである。この假説に基くと、星々は創造から消滅への涯はてしもない不變の流れの中を進んで行く。それは丁度、人々が搖籃から墓場への涯はてしもない不

變の流れの中を進んで行つて、新しい世代が次々に現はれて古い世代の空けた場所に歩み入るやうなものである。この見解に基くと、太陽の重量の約百倍を持つプラスケット星は、最近創造されたものに違ひない。ところが、太陽の重量の何分の一かを持つてゐるにすぎないクルガア六〇は、非常に非常に老ひてゐるであらう——おそらくプラスケット星より百萬億年も老ひてゐるであらう。

現在では、直接の觀測は、この二つの相矛盾する仮説に一定の解決を與へることはできない。しかし、どちらかと云へば、それは星々の『不變の流れ』といふ見解を排斥する。不變の人口に於いては、どんな一定の状態に於ける人々の數も、この状態を通過するのに要する時間に正比例する。例へば、仮に、人間が幼年齒を持つてゐるのは成年齒を持つてゐる長さの四分の一であるとしよう。若し人々の齒を調べて見て、成年齒を持つてゐる者が幼年齒を持つてゐる者の四倍であることがわかつたら、これは、一見したところ、我々は不變の人口を取扱つてゐるといふ期待を起すであらう。反対に、若し成年齒を持つてゐる者が幼年齒を持つてゐる者の百倍であることがわかつたら、我々是不變の人口を取扱つてゐるのではないことがわかるであらう。若し他の證據に依つて、人口の凡てがほぼ同一の年齢であることがわかつたら、我々はこれを受け容れて、幼年齒の場合の一分を發育阻止の場合と見做す氣になるであらう。

我々が星々の年齢を判斷するのは、齒に依つてでなく、重量と光度に依つてである。そして星々

の光度は、星の不変人口の中に勢力を占めてゐる統計學的諸法則に一致しないことがわかる。中年星が非常に多く、幼年星や老年星は非常に少ないので、不変の連續的創造といふ假説は殆んど維持することができない。實際、わが太陽が生れた頃に特別に星々が創造されたことを示す明確な證據がある。これは再び全く自然に次の見解に還つて行く。即ち、銀河系は一つの渦卷形星霧から生れたのであつて、この星雲の、星々の親としての主活動は、約五乃至十萬億年前に起つたのである。

星以前の存在物

大體に於いて、五乃至十萬億年といふ年齢を銀河系の星々の大部分又は凡てに當てがはなければならぬことは尤もらしく思はれる。これは我々が合理的な尤もらしさをもつて過去の時間の中に探り入る限りに於いてである。いま太陽と星を形成してゐる諸原子は、疑ひもなく、以前は星霧の原子として存在してゐたに違ひないが、この存在期間がどれだけであつたかを告げることができない。渦卷形星霧の中心に於ける温度は、非常に高いかも知れないし、また恐らく非常に高いので、諸原子は電子を剥ぎ取られて裸にされ、従つて絶滅から庇はれてゐる。我々は、事實上、星霧の瓦斯状中心を、巨大な規模の上に築かれた一種の『白色矮星』と見做して差支へない。これは次の事實に合致する。即ち、星霧のエネルギー發生量は重量の割合に非常に少なく、従つてその光輝も

非常に弱い。

我々が既に見たやうに、二つの銀河外星霧の重量は合理的な仕方で正確に見積ることができる。大アンドロメダ座星霧M三一は、太陽を三十五億合せたほどの重量を持ち、その總體の光度は太陽を六億六千萬合せたほどのものである。NGC四五九四星霧は、太陽を二十億合せたほどの重量と、太陽を二億六千萬合せたほどの光度を持つてゐる。簡単な計算に依つて、このアンドロメダ座星霧は、八十萬億年といふ平均壽命を持ち、NGC四五九四の平均壽命は百十五萬億年であることがわかる。これら二つの實例から、我々は次のやうに推量して差支へない。さういふ星霧に於ける諸原子の、絶滅までの平均生涯は、百萬億年といふ順位であるに違ひない、と。この計算は非常に有力であるとも非常に正確であるとも主張することはできないが、星霧状態に於ける物質の蓋然的な生涯の長さに關して、それは現在のところ唯一の有効な證據を與へる。我々は次のやうに言ふことができる。星々はかくの如きものとして五乃至十萬億年の間存在してゐた、そして星々の諸原子は、以前は少なくともそれに匹敵する、また恐らくそれよりも非常に長い時間に亘つて、星霧の中に存在してゐたかも知れない、と。

しかし、詳細な數字は別として、我々が時間の中を永久に逆戻りし得るものでないことは明白である。時間の中を一步遡る毎に、宇宙の物質の總重量は増加する。そして、個々の星の場合のやう

に、我々はこの総重量が無限になるほど時間の中を廻り得るものではない。實際、我々が既に述べた諸考察に依つて、全く一つの限界を設けることができる。宇宙に現存する全圖の物質の完全な絶滅は、地球面の温度を一度の六千分の一だけ高めるであらう。その百萬倍の物質の絶滅は、それを百六十度だけ高めるであらう。我々はこれだけの輻射が空間をさまよひ廻り得ることを認めることはできない。地球の温度は、地球が太陽から受ける輻射量に依つて決定される。地球は自己の温度を調節するために太陽から受けるだけのエネルギーを放射してしまふ。地球自身の輻射能のためには少しの訂正が必要であるが、これは我々を煩はすには及ばない。我々を煩はし、また實に均衡を全く覆すのは、百萬の死せる宇宙の輻射が、空間の中から我々の方へ永久に流れて來る場合であらう。この出來事に於いて、地球面は、それが受ける輻射と放出する輻射との間の均衡を回復することができない先に、沸騰する水のそれよりもかなり高い温度にまで高まるであらう。一口に云へば、百萬の死せる宇宙の輻射は、我々の海や河や我々自身を沸騰させるであらう。

物質の創造

これに依つて明瞭になるのは、宇宙の現在の物質は永久に存在した筈はないといふことである。實際、我々は恐らく宇宙の年齢に一つの上界限を當てがふことができる。それは二百萬億年くら

みの整数である。そして、我々が、それをどこに置くにしても、廻つた時間の中で我々がその次に考へなければならぬのは、無限に遠くはない或る時代に起つた、物質創造といふ一定の出来事、又は一系列の出来事、又は連續的過程である。何らかの仕方、以前には存在しなかつた物質が生じたのである。又は生じさせられたのである。

若し我々がこの物質創造に對する自然主義的解釋を求めるなら、 1.3×10^{13} 厘米以下でない波長の輻射エネルギーが空虚な空間の中に注がれてゐると想像して差支へない。これは現在の宇宙で知られてゐるどんなエネルギーよりも一層高い『有効性』を持つエネルギーである。そしてさういふエネルギーの下向疾走が我々自身の宇宙に似た宇宙を創造しても無理はない。二〇二頁の表を見ると、いま述べたやうな波長を持つ輻射は、結晶して電子及び陽子となり、最後に原子を形づくると考へることができよう。若し我々がさういふ創造に關する一つの具體的な畫像を求めるなら、神の指がエーテルを攪亂すると考へて差支へない。

我々がこの種の未熟な想像を避け得るのは、次のやうに主張することに依つてである。空間と時間と物質は、單一の體系として、一緒に且つ不可分に取扱ふべきものである、と。従つて、物質が存在する前に空間と時間は存在してゐたなどと言ふのは無意味である。さういふ見解は、昔の形而上學的學說と一致するばかりでなく、近代の相對性理論とも一致する。宇宙は今や一つの有限の繪

となり、その次元は或る量の空間と或る量の時間である。陽子と電子は、空間＝時間を背景として繪の輪廓をはつきりさせる繪具の條痕である。時間の中を出来るだけ遠く遡つて行くと、我々はこの繪の創造に到達しないで、その縁に到達する。この繪の創造が繪の外側にあるのは、藝術家が自分の畫布の外側にゐるのと同じである。この見解に基くと、宇宙の創造を時間及び空間に従つて論ずるのは、繪の縁へ出ることによつて藝術家と描寫行爲とを發見しようと試みるやうなものである。これは、宇宙をその創造主の心にある思想と見做すことに依つて、物質的創造に關する議論を全く無益にするあのまろ／＼の哲學的體系に、我々を非常に接近させる。

これらの觀點はどちらも難攻不落である。しかし、人間の心が宇宙の全部の計畫を理解し得ないことを認めて、自分自身の努力を物質創造のこちら側でやめてしまはうと決心する率直な人間の觀點も同じくさうである。この最後の觀點は、純粹の哲學的立場からすれば、おそらく凡ての中で最も正當なものである。物理科學が、大部分**ポアカレ**に導かれながら、諸現象を説明しようと試みるのをやめて、單にそれらを最も單純な仕方で敘述することに甘んずるやうになつてから、もう二十年になる。最も簡單な例證を挙げれば、ヴィクトリア時代の科學者は、光を機械的エーテルの中に起る波の運動と『説明する』必要があると考へて、それを絶えずジェリイや廻轉儀から構成しようとした。今日の科學者は、幸ひにも正氣であるために、さういふ企てを放棄した。彼等は、光

が特殊な諸條件の下で行ふ事を豫言する一つの數學的公式を得ることができれば、すっかり満足する。その公式は機械的説明を許すかどうか、それとも、さういふ説明はどんな終極的實在にも一致するかどうか、といふことはあまり問題ではない。近代科學の諸公式は、全くではないにしても、主として、單純性と正確性と完全性をもつて自然現象を敘述する能力を持つてゐるかゝらないかに依つて判斷される。例へば、エーテルが科學上から姿を消したのは、全體としての科學者たちが、そんなものは存在しないといふ推理的判斷を下したからではなくて、それがなくても自然現象を全く完全に敘述し得ることがわかつたからである。それは單に繪を傷つけるだけであるから、彼等はそれを棄てたのである。若し將來それが必要であることがわかつたら、彼等は再びそれを取り返すであらう。

これは決して科學の標準又は理想のどんな低下をも意味しはしない。それは單に一つの段々大きな確信を意味するだけである。即ち、宇宙の終極的實在は、現在では全く科學の範圍外にあつて、永久に人間の心の理解を越えてゐるかも知れないし、また恐らく越えてゐる、といふのがそれである。藝術家だけが自分の描いた繪の十分の意味を理解し得ること、これは畫布に塗られた僅かの繪具の點々に取つては永久に不可能であらうといふことは、先天的に尤もらしい。第二章に於いてのやうに、我々が原子の終極的構造を論じようと試みる時、直喩や譬話をもつて語らなければな

らないのは、この種の理由からである。外見上の諸矛盾については、あまり心配する必要はない。終極的實在の一層高い統一が、疑ひもなくそれらを融和するに違ひない。尤も、この一層高い統一が我々の理解の範囲内にあるかどうかは、研究しなければならない。それは兎に角として、矛盾といふものが我々を煩はすのは、まだ説明されない事實と同じほどではあるが、おそらくそれ以上ではあるまい。科學が進歩するうちに、それは消滅するかも知れないし、しないかも知れない。

若し何かさういふ思想連鎖が、宇宙の最も微細な諸過程を理解しようとする我々の努力に適用されて差支へないとすれば（そしてそれはこの分野で働いてゐる人々のありふれた日常の思想連鎖である）、それは確かに全體としての宇宙を理解しようとする我々の努力にも更にそれ以上適用できるに違ひない。諸現象は時間及び空間といふ骨格の中に隠れて我々のもとへやつて来る。それらは暗號で書かれた音信のやうなものであつて、我々が時間空間といふ覆ひを取り除いてそれらを普通の文字に翻譯する方法を発見するまでは、終極的意義は理解できないであらう。物質の最も微細な諸部分の終極的構造に關する、最近我々の受け取つた難解な音信を、普通の文字に翻譯すべき我々の才能について、どんな事が考へられようと、全體としての宇宙の構造に關する音信、殊にその始まりと終りに關する音信について、我々が幾分の危懼を感じるのは自然のやうに思はれる。全く度々音信そのものが我々を助けて、それが我々のもとへ届く時の暗號を発見させるかも知れない――

十分の熟練さをもつて我々は屢々それを發見することができる——しかし我々が今語つてゐるのは、何時、誰に依つて、そして何の目的でその暗號が工夫されたかといふ問題についてである。暗號音信なるものがこの事にどんな光明をも投ずべき理由は無い。

天文學者は、この段階で問題を棄てなければならない。天文學の音信は明かに哲學や宗教や人道一般に關したものであるが、それを普通の文字に翻譯するのは天文學者の仕事ではない。觀測天文學者は、音信を傳へる針の點や線を見守つて記録し、理論天文學者はこれらを言葉に翻譯する——それらが既知の條理一貫した言葉を形づくつてゐるかどうかに依つて、彼の仕事が行はれたか下手に行はれたかがわかる——しかし彼の書き下した言葉の、終極的な、普通の文字に翻譯された意味を理解し且つ説明しようとするのは、他の人々の役目である。

第四節 生物と宇宙

全體としての宇宙を理解しようとする努力を放棄して、我々は生物と我々の知つてゐる宇宙との關係をちよつと一瞥しよう。

空のあらゆる光臨は生物の住み得る住所を表はしてゐる、といふ昔の見解は近代天文學には全く縁がない。恒星そのものは千六百五十度乃至三萬度以上の表面温度を持つてゐる。そしてその内部の温度は、勿論これよりも遙かに高い。宇宙の物質の大部分は幾百萬度の温度になつてゐるので、その分子は破壊されて原子になり、原子は、少なくとも一部分破壊されて、その構成部分になる。ところで生物といふ概念そのものは時間の繼續を意味する。原子が自己の構造を一秒に幾百萬度も變へて、一對の原子が結びついたままであることのできない場所には、生物は存在し得ない。それは又空間に於ける或る可動性を意味する。そしてこれら二つの含蓄に従へば、生物は、液體狀態の生じ得る、物理的諸條件を持つ小區域に束縛される。宇宙に對する我々の見透しに依つて、この區域は全體としての宇宙に依つて示されるものと比較すればどんなに小さいかが明かになつた。それは恒星にも見出されず、恒星が生れ出た星霧にも見出されない。我々は、太陽の周圍を公轉す

る地球のやうな遊星を除けば、生物に好都合な諸條件の備はつたどんな型の天文學的物體をも知らない。

ところで、我々の現在の知識が及ぶ限りでは、遊星は非常に稀である。我々が既に見たやうに、單一の恒星がひとりで惑星を造り出し得るものではない。遊星の家族は兩親を持つてゐなければならぬ。二つの恒星の密接な接近の結果として初めてそれは生れる。そして恒星は空間の中に非常にまばらに散在してゐるので、一つの恒星が別の恒星の近くを通過するなどといふことは、考へられないほど稀な出來事である。三三三頁で説明した潮汐説に基くと、遊星は、二つの恒星が相互の約三直徑の範圍内を通過する時でなければ、生れることができない。恒星が空間の中にどんな風に散在してゐるかがわかつてゐるから、二つの恒星が相互のかういふ距離の範圍内に接近する度数がどれくらゐであるかを、かなり綿密に見積ることができる。計算に依ると、一つの恒星が幾萬億年といふ生涯を送つた後でさへ、それが遊星に取巻かれた太陽のやうになる機會は、依然として十萬遍に一遍ぐらゐのものである。

まさにその通りとすれば、生物が足場を得ることになつた場合には、遊星は熱過ぎてもいけないれば冷過ぎてもいけない。例へば、太陽系に於いては、我々は生物が水星又は海王星に生存してゐると想像することはできない。もろくの液體が前者に於いては沸騰し、後者に於いては固く凍つて

ある。これらの遊星が生物に適しないのは、太陽に近過ぎ又は太陽から遠過ぎるからである。他の遊星も同じく生物に適しないと想像できるのは、その實質そのものが居住を不適當にするほどの割合でエネルギーを發生させてゐるからである。わが地球を形成する不活潑な原子は、長く連續する原子變化の最終産物、宇宙の燃焼から起る最後の灰見たいもののやうに思はれる。我々が既に見たやうに、さういふ原子は、重量が最高のものであるから、あらゆる星の場合におそらくその頂上まで浮び上るであらう。しかし、すべての遊星は不活潑な原子以外のものからは成り立たず、從つて生物がそこに足場を得るやうになるまで冷却するであらうといふことは、決して豫定結論ではない。わが地球の場合にはさうなつたが、幾つの遊星及び遊星系がさうならないために生物に適し得ないかは不明である。

これは次の事を暗示する。即ち、少しでも生物の住所となるのに適するのは、宇宙の無限小の一隅に過ぎない。原物質が生物の生存し得る微細量の死灰を造り出すには、それが幾百萬億年の間輻射に變化しつづけなければならない。然る後、殆んど信じられないほどの出來事に依つて、他のものでなしに、この灰が、それを造り出した太陽から裂き取られて、凝結して遊星とならなければならぬ。その時でさへ、この灰の滓は熱過ぎても冷過ぎてもいけない。でなければ生活が不可能であらう。

最後に、これらの條件が、悉く充たされた後、生物は現はれるであらうか、現はれないであらうか？ 或る時代に方々で受け容れられた次のやうな見解を、我々は恐らく棄てなければならぬ。即ち、一旦生物がどんな仕方でも宇宙に現はれた以上、それは迅速に遊星から遊星に擴がり、一つの遊星系から他の遊星系に擴がつて、遂に宇宙全體は、生物で一杯になるであらうといふのである。空間は今冷過ぎるやうに思はれ、もろくの遊星系はあまり遠ざかり合つてゐるやうに思はれる。わが地上生物は恐らく地球そのものの上に生じたに違ひない。我々が知りたいのは、それは更に別の驚くべき出來事又は同時に相次ぐ出來事の結果として生じたか、それとも、物理的環境が適すれば、無生物質が相當の經路を辿つて生物を造り出すのは正常の事件であるかといふことである。

我々はこれに對する答へを生物學者に期待してゐるが、今までのところ生物學者もそれを提出することはできなかつた。

天文學者は、何か他の遊星に生物が生存する證據を見出すことができたなら、部分的解答を與へ得るかも知れない。といふのは、少なくともその時には、生物が宇宙の歴史の中に一度以上生じたことがわかるだらうからである。しかしこれまではそれに關するどんな有力な證據も現はれたことはない。或る天文學者たちは、火星に見られる或る模様を運河と解釋して、それらは聰明な存在者の手細工だと信じてゐる。しかし、この解釋は一般に受け容れられるものとはなつてゐない。また、

火星には地球のやうに季節の變化も必然的に起り、或る諸現象がこれらの變化に伴ふ。多くの天文學者はそれらの現象を植物の生長や凋落に歸したがる。尤も、それらは沙漠に降りそぐ雨以上のものを表はしてはゐないかも知れない。火星には生物があるといふ明確な證據はないし、意識的生物に關する證據が無いことは確實である——宇宙の他のどんな場所にもさうである。

地球大氣の中には酸素が澤山現はれて、いつでも他の實質との化學的結合を行はうとしてゐることは、最初は幾分驚くべき事のやうに思はれる。しかし、我々は植物が大氣の中へ絶えず酸素を吐き出しつつあることを知つてゐる。そして地球大氣の酸素は、主に又は全く植物から生じたものであるかも知れないことは、度々暗示された。果してさうであるなら、他の遊星の大氣中に酸素があるか無いかは、我々が地球上に持つてゐるものに類似した植物が、これらの遊星に存在してゐるかどうかを示すであらう。

火星大氣の中には確かに、酸素が存在してゐるが、その量は小さい。アダムスとセント・ジョンは、一哩平方に付き地球の十五%以上存在する筈はないと見積つた。他方で、金星大氣の中には、それは全然缺けてゐるか、又は存在してゐても取るに足らぬほどの量である。若し存在してゐるとすれば、金星の表面を覆うてゐる雲の上部にあるその量は、地球上の量の〇・一%以下にすぎない、とセント・ジョンは見積つた。證據が暗示するところに依ると、太陽系に於ける、火星と地球

以外の、生物の生存し得る唯一の遊星である金星には、植物もなければ、生物の高等形態が呼吸すべき酸素もない。

地球上に生物が存在してゐるといふ確實な知識は別として、我々は、生物は宇宙のほんの一小部分に制限されてゐるに違ひないといふこと以外には、どんな明確な知識をも持つてゐない。生物を維持しない星は、幾百萬億も存在してゐる。それらの星はこれまでも生物を維持したことはないし、これからさうすることはないであらう。空の稀な遊星系の中で、その多くには全く生物がゐないに違ひないし、他のものに於いては、生物は、若し存在してゐるとすれば、おそらく少數の遊星に限られてゐる。ジョルダノ・ブルーノが、無數の世界が存在するといふ自分の信念を言ひ表はしてから、もう三世紀以上になるが、その間に我々の宇宙觀は殆んど名状できないほど變化した。しかしそれでゐて我々は、生物と宇宙との關係に對する理解に、それまでと比較してあまり目立つほど接近してゐない。我々は依然として、それほど稀なこの生物の意味に關しては、たゞ推測を下し得るだけである。それは最後の頂點であつて、宇宙萬物はそれの方へ進んで行き、幾百萬億年に亘る、生物の住んでゐない星や星霧に於ける物質の變化、荒涼とした空間に於ける輻射の浪費は、そのための信じられないほど贅澤な準備にすぎなかつたのか？ 又は、それは自然的諸過程の、單に偶然的な、全く取るに足らぬ副産物であつて、何か別のもつとすばらしい目的が考へられてゐるのか？

又は、それよりも更に控へ目な思想系統を一瞥すれば、それは疾病の性質のやうなものであつて、高度數輻射を發生させる高温と能力——それをもつて若い元氣な物質は即座に生物を破滅させる——を失つた老年の物質を襲ふものと見做さなければならぬか？ 又は、控へ目などは投げ棄てて於て次のやうに想像したものであらうか？ それは唯一の實在であつて、巨大な星や星霧は、殆ど考へられないほど長い天文學的時間に依つて創造されるのではなく、あべこべにそれらを創造する、と。

また、これらの推量をいづれか一つ選ぶのは、天文學者の役目ではない。天文學の音信を傳へれば天文學者の任務は終る。この音信が暗示するものゝ疑問を公式化することさへ、天文學者にとつては恐らく度を越えた向う見ずであらう。

第五節 地球とその將來の展望

我々はこれらの寧ろ抽象的な思想區域を棄てて、地上へ下らう。我々は足下に固い大地を感じ、頭上に太陽の光線を感じる。どうやら生物もここには存在するが、如何にして又は何故といふことはわからない。我々自身もその一部分である。そして、天文學がその將來の展望について何を告げなければならぬかを研究しても自然である。

全體の局面を支配する中心事實は、我々は太陽の光と熱に頼つてゐるといふこと、これらは永久に今のままで存続することはできないといふことである。我々が現在見得る限り、太陽の諸條件は地球が生れて以來殆んどあまり變化してゐない。地球の二十億年は太陽の全生涯のほんの一小部分に相當するにすぎず、従つて太陽はその間ぢつと靜止してゐたと想像していいくらいである。この事がおのづから暗示するのは、天文學的要因に關する限り、生物は地球の過去の年齢の總體よりも遙かに長い間地球の上に住むことができさうだといふことである。

熱い瓦斯塊として生活を始めた地球は、漸次に冷却して、今では殆んど底に達したので、太陽から受ける熱以外には殆んど何の熱をも持つてゐない。これは空間の中に放射し去る量と殆んど均衡

を保つてゐるので、地球は、外部の状態が變化しなければ、永久に現在の温度のままで存続するであらう。そして、地球の状態に變化が起るのは、外部に起る變化に強ひられる時だけであらう。³⁶

これらの外部的變化は種類が多いかも知れない。太陽の重量喪失は地球を一世紀に約一ヤードの割合で太陽から遠ざからせるので、百萬億年の後には、地球は、光と生命の源である太陽から、現在の十%遠ざかるであらう。従つて、たとへ太陽がその時光と熱を現在と同じほど放射するにしても、地球はこの輻射を二十%ほど少なく受けることになり、地球の平均温度は現在よりも攝氏の十五度そこいら低くなるであらう。しかし、百萬億年の後には、太陽は光と熱を今と同じほど放射しはしないであらう。太陽は輻射に由つて現在の重量の六%ばかりを失つてしまつてゐるであらう。そして、他の星々から判斷して、この喪失は恐らく太陽のエネルギー發生能力を約二十%ほど減ずるであらう。これは地球の温度を更に十五度ばかり減ずるであらう。そのために、百萬億年の後には、避け難い自然の成行きが、地球の温度を攝氏の約三十度ほど減じてしまふであらう。

温度のさういふ降下が、地球の生物、殊に人間にどんな影響を與へ得るかを豫言しようと試みるのは、向う見ずであらう。十分な時間を與へると、生物は環境に適應する莫大な能力を持つので、温度が現在より攝氏の三十度ほど低くなつてさへ、生物は依然として地球上に今後百萬億年の間生

36 炭酸ガスの増加による温室効果の増大、という「現代の常識」はまだ認識されていなかった。

存するかも知れない、といふことはあり得べき事のやうに思はれる。果してさうだとすれば、私がこの遙かに遠い將來に生れ合せなかつたことは喜ばしい。我々の現在の生活の最も激しい快樂を幾つか與へてゐる山や海は、遠い、殆んど信じられないほどの過去から傳へられた傳説として存在するにすぎなくなるであらう³⁷。百萬億年の間侵蝕されると、山は殆んど平原になり、海や河は固い氷で閉ざされるであらう。人間は現在よりも無限に多い知識を持つであらう、と想像してよからうが、新しい知識の領野を開く開拓者のぞくぞくするやうな快樂は、もはや味はれなくなるであらう。疾病は、そして恐らく死は、征服されてしまふであらう。そして生活は疑ひもなく現在より一層安全になり、現在とは比較できないほど秩序正しくなるであらう。人々が、未探檢の國を横切つたり、これまで誰も登つたことのない峯に登つたり、楽しみ半分に野獸と戦つたりするに當つて、自分の生命を危険にさらし又は失つた時代があつた、といふことは信じられない事のやうに思はれるであらう。生活は現在よりも餘計にお決り仕事になつて、冒險が少なくなるであらう。それはまた一層目的のないものになるであらう。といふのは、一定の時間内に、避け難い滅亡と、希望や努力や業績の永遠の破滅とに直面しなければならぬといふことを、人類は知つてゐる筈だからである。

³⁷ 第3章第1節で著者はアーサー・ホームズ教授の著書に言及している。ホームズ教授は1929年にマントル対流説を提唱しているで、その學説を参照していたならばこうは書かなかつたのではないか？ 1930年代は大陸移動説は受け入れられておらず、プレートテクトニクスが學説として完成し定着したのは、この本の出版後約30年経つてからのことであつた。

百萬億年後の生活に關するこれらの夢幻的な概念に重きを置きすぎることなしに、我々はこれを太陽の重量の避け難い浪費が恐らく地球から生物を驅逐するまでの大凡その期間と考へて差支へない。地球よりも約六十度高い平均温度を持つ金星は、おそらく現在では生物には寧ろ熱すぎるであらう。しかし、百萬億年の後には、金星の温度は四十度下るであらう。そして今後百萬億年と二百萬億年との間の何處かで、金星は現在の地球のやうになるであらう。その時金星に生物が住むことになるかどうかは、我々にはわからないし、それを推量しても無益であらう。しかし少なくとも、地球が駄目になると金星がそれに代り得る機會はある。おそらく水星が相當の經路を辿つて金星の後にづくかも知れない。しかし現在の證據に依れば、水星には大氣が缺けてゐるので、それを今地球に住んでゐるやうな生物の住所と考へることは困難である。

これまで、我々は、正常な自然の成行きだけを考察した。さまざまの出來事が、百萬億年後よりも久しい前に人類を破滅させるかも知れない。あり得べき天文學的事件だけを挙げれば、太陽が別の星に衝突することがあるかも知れず、一つの小遊星が他の小遊星に突き當つて、その結果、自己の通路から逸れて地球に衝突することがあるかも知れない。また、空間に於ける恒星の何れでもが太陽系の中にさまよひ込み、その結果、すべての遊星軌道を覆して、地球は生物の住所にならなくなるかも知れない。これらの事件の蓋然量を見積ることは困難であつて、その凡てが非常に尤もら

しくないやうに思はれる。最初のもものと最後のものは殊にさうである。我々はそれらを悉く無視していい。

しかし、さう軽々しく斥けられない一つの危険が残る。我々は先づそれを専門語で述べよう。太陽は一つの主列星であり、その上ラッセル表に於ける主列の左手の縁に非常に近い。この縁を越えると、この圖表に、星が全く存在しない一區域がある。我々がこの區域には星が存在しないと想像したのは、それが表はす星の對座が不安定であらうからである。星々は迅速にそれの中を通過して、遂に安定した對座を發見し、従つて、永久に星々の存在し得る區域に落ちつく。ところで、この區域を越えて直ぐ次にある安定した對座は、白色矮星のそれである。そしてこれらは一部門としては主列星ほど重くはないから、星の進化の一般的傾向は、主列星から白色矮星へ向ふやうに見える。この見解に基くと、白色矮星は以前は主列星であつて、安定した對座帶の左手の縁を横切り、然る後不安定區域を通過して、遂に白色矮星として安定を回復したものに違ひない。

太陽は主列の左手の縁に既にきほどく近づいてゐる、といふ事實に危険はあるのである。おそらく現在最も頼りになるレッドマン氏の諸決定に従へば、太陽と同じ型（GO）の星々にとつての、主列の安定した對座帶は、ざつと星の絶對光度四・八八と三・五四との間に擴がつてゐて、前者は危険な左手の縁に相當してゐる。太陽の現在の絶對光度は四・八五と見積られてゐる。かくして、

若し太陽の光度が現在よりも〇・〇三ほど微かになつたら——これは光度に於ける只の三%の減少を表はす——太陽はきつかり主列の件の縁に達するであらう。そして大急ぎに収縮して白色矮星状態になるであらう。さうなるに當つて、太陽の光と熱は非常に減少するので、地球から生物は驅逐されるであらう。太陽がその時一番よく似る既知の白色矮星は、シリウスの伴星であつて、これは光と熱を太陽の四百分の一ほど放出してゐるにすぎない。

専門的でない言葉で同じ事を述べれば、太陽は不安な状態にある。又は、不安な状態から遠くない。さういふ状態にある星々は収縮しはじめ易く、且つさうするに當つて、その輻射を現在太陽が放出してゐるそのほんの一小部分に相當するところまで減少させる。太陽がかういふ状態にまで収縮すると、我々の大洋は氷になり、我々の大氣は液體空氣になるであらう。その時は、地球の生物が生きながらへるのとは不可能のやうに思はれる。空の巨大な博物館には、ほとんど確實に、かういふ型の収縮した太陽の見本が幾つもある。わが地球のやうな遊星がその周回を公轉してゐるに違ひない。これらの遊星が、曾ては現在の地球上の生物ほど活動してゐた生物の凍りついた遺骸を持つてゐるかどうかは、ほとんど推察することさへできない。

これは地球にとつての驚くべき展望を示すと考へられるかも知れない。しかし我々は二三の理由で勇氣を起すことができる。まづ第一に、太陽の光度の三%の減少は、恐らく、約千五百億年以内

に起ることはできない。これだけでも悪過ぎるやうなことはないが、次の事を考へ合はせると、展望はそれよりも非常に有望になつて来る。即ち、太陽をも含む星々の進化は、主列の縁に殆んど平行する方向に起る。太陽は斷崖へ向つて進んではゐず、従つて斷崖の縁に沿うて進むほどにはならない。太陽が縁に近づきつつあつて、最後にはそこから墜落するやうに運命づけられてゐるかどうかは、我々にはわからない。しかし、どんな場合にも次の百萬億年以内に縁に達する見込みはない。最後に、主列の縁からの太陽の距離は、前述の計算に於けると同じほど正確に見積することはできない。○・○三といふ數字は、二つの非常に大きな数の差として現はれるのである。そして、これらの數はどちらもかなり正確に見積ることができにしても、兩者の○・○三といふ小さな差を正確なものとして取扱つて差支へないほど正確に見積することはできない。我々が言ひ得るのは、太陽は例の危険な縁にかなり近づいてゐるといふこと、しかしこの縁の方へのどんな目立つた進行さへ幾百萬億年もかかるといふことだけである。

別の危険も、もつと思索的な種類のものではあるが、言つて置かなければならない。我々が既に見たやうに、時折新星が空に現はれて、暫くの間恐ろしいほど輝いて、然る後全く消えてしまふか、又は普通の星として輝きつづける。これらの幽霊は“novae”——新星——として知られてゐる。多くの場合に新星は普通の恒星であることがわかつた。それは、新星として現はれて、短い生涯の間き

らくと閃いて、然る後元の平凡な状態に陥る前には、非常に微かな星として見えてゐたものである。そして、すべての新星はかういふ種類のものであると想像することは合理的であるやうに思はれる。尤も、この星は輝かしい新星状態になるまでは眼につかないことが度々ある。これらの幽霊は決して稀ではない。銀河系にだけでも毎年六つも現はれる。ところで、若し我々が、銀河系は三千億の星から成り立つてゐると想像するなら、これは、平均すると各々の星は五百億年毎に一度新星になるといふことを意味する。我々が知りたいのは、わが太陽は新星になる危険に陥つてゐるかどうかといふことである。といふのは、若しあらゆる種類の星が一樣に危険を冒すものとすれば、太陽も次の百萬億年の間に二十度ばかり新星になる見込みがあるからである。

これまで、天文學者たちの間には、普通の恒星を新星に變ずる物理的諸原因についても、新星の中に勢力を占めてゐる物理的諸條件についても、一致がなかつた。さまざまの暗示は持ち出されたが、一般的に受け容れられたものは一つもない。若しわが太陽が突然新星になつたら、それが放出する光と熱は地球上の生物をすつかり焙り殺すほど増加するであらう、といふことはかなり確實のやうに思はれる。しかし、わが太陽は新星状態に入るほどの危険を冒すかどうかといふことについては、我々は全く闇中模索である。若し太陽がさういふ危険を冒すとすれば、これは恐らく地球上

の生物が曝されるあらゆる危険の中の最大のものである。

もうくの事變は別として、若し太陽系が自然的進化經路を辿るままにして置かれたら、地球は依然として今後も優に百萬億年の間生物の住所となり得る見込みがある、といふことは既に我々の見たところである。

これは地球の過去の年齢の五百倍ばかりであり、人類がこれまで地球上で生存して來た期間の三百萬倍以上である。我々は、更に別の單純な模型の助けを借りて、これらの期間をその適當な比例に於いて見て見よう。一枚の郵便切手を取つて、それを一ペニ銅貨に貼りつける。それから方尖塔に登つて、その頂上に、郵便切手が一番上になるやうにして一ペニ銅貨を置く。この建物全部の高さは、地球が生れて以來經過した時間を表はすものと解釋して差支へない。この縮尺に基づくと、一ペニ銅貨と郵便切手とを一緒に合せただけの厚さは、人間が地球上に生きながらへて來た時間を表はすことになる。郵便切手の厚さは、人間が文明状態に入つてから經過した時間を表はし、一ペニ銅貨の厚さは、人間が非文明状態に生きながらへた時間を表はす。ところで、別の郵便切手を、最初の郵便切手の上に貼つて、次の五千年の文明を表はさせることにする。さういふ風に次から次へ郵便切手を貼りつづけて、遂にブランク山（譯者註、ヨーロッパの最高の山で、一萬五千七百八十六呎ある）ほどの高さのある堆積にする。かうしてさへ、この高さは、未來の長さ——天文學に

依つて知り得る限り、途中で偶然の出来事に切斷されなければ恐らく文明的人類の眼の前に續いて行く未來の長さ——を表はすものとしては不適當である。最初の郵便切手は文明の過去であつた。

ブランク山よりも高い柱はそれの未來である。又は、別の仕方でこれを眺めれば、最初の郵便切手は人間が既に成就したものを表はし、ブランク山よりも高い堆積は彼が成就するかも知れないものを表はす——若し彼の未來の業績が地球上に於ける彼の時間に比例するとすれば。

然も、我々が既に見たやうに、我々はさういふ未來の長さを確實に數へ續けることはできない。もろくの出来事が人類にも個人の場合と同じやうに持ち上るかも知れない。天體の衝突が起るかも知れない。太陽が白色矮星にまで収縮して、地球上の生物を凍死させるかも知れない。突然新星になつて、それは人類を焙り殺すかも知れない。偶然の出来事のために、郵便切手のブランク山がブランク山の高さの何分の一かにすぎない截頭柱と入れ代るかも知れない。しかし、さうなつてさへ、人類の限前には幾百億年といふ展望がある。そして、數學者の心は別として、人間の心は、こんな期間と、もろくの出来事が我々を襲はなければ期待して差支へない百萬億年とを、はつきり區別することは殆んどできない。實際的な目的のために云へば、眞實の意味を傳へる唯一の説明は次の通りである。即ち、人類は、我々が想像し得るどんな時間とも比較にならないほど長い時間に亘つて地球を占領する見込みがあるのである。

空間の點から眺めると、天文学の音信はせいぜい陰鬱な莊嚴さと壓迫的な巨大さとを傳へるに過ぎない。時間の點から眺めると、それは殆んど無限の可能性と希望とを傳へるものになる。宇宙の市民としての我々は、その始まりよりも寧ろ結末に近い所に生きてゐるかも知れない。といふのは、宇宙の大部分が、我々が出場しない先に溶解して輻射になつたことは尤もらしく思はれるからである。しかし、地球の住民としての我々は、時間が始まつたばかりの所に生きてゐる。我々はすがすがしい黎明の輝きの中に生れた。そして、ほとんど考へられないほど長い晝が我々の前に擴がつて、想像もできないやうな成功の機會を提供する。遠い先の時代の我々の子孫は、別の端からこの長い時間を見おろしながら、我々の現在の時代を世界の歴史の霧ぶかい朝と考へるであらう。

我々と時代を同じうする今日の人々は、眞理を發見したり、自然の諸力を利用したり、人類の住む値打のある世界を造つたりするために、無智や誤謬や迷信の下生えの中を戦ひ進んで行つた、おぼろげな英雄肖像畫として現はれるであらう。我々は依然として灰色の朝霧の中に呑み込まれてゐるので、我々のこの世界が、我々の後から來て、それを眞晝の光に照らして見る人々にどんなに見えるかを、漠然と想像することさへできない。しかし、我々が今持つてゐる光に依つて、我々は次の事を識別し得るやうに思はれる。即ち、天文学の主要な音信は、人類に対しては希望の音信であり、個人に対しては責任の音信である——それが責任の音信であるのは、我々が自分の想像し得るより

我 等 を め ぐ る 宇 宙

も一層長い未来のために下圖を引き、礎を置きつつあるからである。

我 等 を め ぐ る 宇 宙

赤字: 原書または翻訳での誤記・誤訳・誤植と思われる箇所

紫字: 現在では正しくないと理解されている記述

The Universe Around Us

by Sir James Jeans, Revised Edition, 1930

Japanese Edition 1934

This copy is for academic and private use only. Distribution on commercial basis is not permitted. Due to the historic nature of the original article, this document contains descriptions which are now considered to be incorrect or inaccurate, in addition to the errors introduced during the digitization process.

Digitization and footnotes by NoobowSystems Lab. Tomioka, Japan 2009, 2010, 2011, 2016, 2022.

<https://www.noobowsystems.org/>

我 等 を め ぐ る 宇 宙

Revision History

Revision 1.0 Nov. 16, 2009
Revision 1.1 Nov. 21, 2009
Revision 1.1.1 Nov. 25, 2009
Revision 1.2.0 Dec. 05, 2009
Revision 1.2.1 Dec. 24, 2009
Revision 1.2.2 Dec. 27, 2009
Revision 1.3.0 Dec. 31, 2009
Revision 1.3.1 Dec. 31, 2009
Revision 1.3.2 Jan. 03, 2010
Revision 1.3.3 Jan. 04, 2010
Revision 1.4.0 Jan. 05, 2010
Revision 1.4.1 Jan. 15, 2010
Revision 1.4.2 Jan. 16, 2010
Revision 1.5.0 Jan. 22, 2010
Revision 1.5.1 Jan. 24, 2010
Revision 1.5.2 Jan. 24, 2010
Revision 1.5.3 Jan. 26, 2010
Revision 1.5.4 Feb. 04, 2010
Revision 1.5.5 Feb. 12, 2010
Revision 1.6.0 Feb. 18, 2010
Revision 1.6.1 Feb. 18, 2010
Revision 1.6.2 Feb. 19, 2010
Revision 1.6.3 Feb. 20, 2010
Revision 1.6.4 Mar. 04, 2010
Revision 1.6.5 Apr. 18, 2010
Revision 1.7.0 Aug. 14, 2010 Added Pic01 - Pic.12.
Revision 1.7.1 Aug. 16, 2010 Corrected location of Fig.14.
Revision 1.7.2 Aug. 17, 2010 Added pluto photo
Revision 1.7.3 Aug. 23, 2010 Added Fig.7, footnotes on Cepheids.
Revision 1.7.4 Mar. 08, 2011
Revision 1.7.5 Jun. 17, 2016 Corrected typo. [Noobow9100D @ L1]
Revision 1.7.6 Jul. 07, 2022 Changed text font to Yu Mincho Demibold. [Noobow9200A @ L3]