「被造物管理の神学」の講演集 2 冊目の刊行にあたって

大野キリスト教会宣教牧師　中澤啓介

これまで、三冊の講演集を発刊した。一冊目のタイトルは、「聞きたかった、聖書の本当の教え」である。キリスト者が豊かな信仰生活を送る秘訣を扱ったもので、4 つの講演が含まれている。それはいずれも、大野キリスト教会の教育セミナーで語ったものである。人間理解のための OS 理論、御心症候群からの解放、教派の違いの受け止め方、枝葉末節にこだわらない思考方法など、興味深いテーマを扱った。

二冊目は、東日本大震災をきっかけに講演したものである。いずれも、大野キリスト教会の教育セミナーで語ったものであるが、その後福音派の神学校や超教派の講演会で話したものである。タイトルは「聞きたかった、隠されていた聖書の奥義」で、やはり 4 つの講演が含まれている。ヘブル人への手紙 2 章の新しい解釈やリスボン大震災をめぐる啓蒙主義者たちの論争を紹介しながら、神学のパラダイムシフトの必要性を訴えた。福音派の神学によって起こっている多くの認知的不協和を解消したかったからである。

三冊目は、「被造物管理の神学（自然1,2,3編）」である。二冊目の講演集で、私は「現代のキリスト教はパラダイムシフトが必要である」と問題提起をした。そう提唱した以上、新パラダイムの神学を明らかにする責任がある。そこで、その新しい神学を「被造物管理の神学」と名づけ、八つの分野におけるさまざまな問題を神学的に展開することにした。その一冊目として、古代、中世、近代までの宇宙観を概観し、現代科学が到達した「ビッグバン理論」について解説した。

これらの講演の中には、これまでキリスト教神学が取り扱ってこなかったテーマや切り口がたくさん含まれている。というより、ほとんどが目新しいといってもよい。いわゆる神学の教科書で扱われている内容とは、かなり異なっている。仮に同じようなテーマを扱っているように見えても、その取り上げ方、方向性、結論は、相当違うはずである。神学は、個人的な信仰体験、聖書の知識、教派的な背景が深く関わっている。加えて、時代の流れや人々の意識、生活環境や生き方そのものの変化に大きく左右される。

ただ、神学は個人のものであるが、といっても独りよがりのものであっていい、というわけではない。神の国共同体を豊かにする神学でなければならない。一人のキリスト者としての神学であれば、個人的なもので終わるのが普通である。しかし、牧師が提唱している神学となれば、個人的なものでは済まされない。牧師とは公人である。教会の将来に大きな影響を与える。牧師の神学は、普遍的であることを求められ、神の国の共有財産となることが期待されている。そのためには、牧師の神学は公開されねばならない。新しいものは、どのような神学であれ、厳しい論争のテーブルに載せられねばならない。当然のことである。

戦後の日本の福音派は、正統的な教義を継承することで精いっぱいだった。教義に付随する問題、時代の流れの中で生じた課題、宣教学的なテーマは扱われたが、パラダイムを転換させねばならないほどの危機意識はなかった。これには、二つの理由がある。一つは、神学を信仰や教義から切り離すという考えが出来なかったからである。もう一つは、護教的な姿勢が染みついており、神学的なディベートに慣れていなかったからである。

私は、福音主義神学会の創立時からメンバーだった。学会にはほとんど出席してきたし、話す機会もたくさんあった。しかし、神学的なディベートをしたという記憶はほとんどない。否、一度だけあったが、それは後味の悪いものとなってしまった。それは、福音主義神学会の性格上やむを得ない面もあった。だが、学会としては寂しい限りである。世の中全体も冷戦構造の中にあり、福音派も対立構造において力をつけた時代である。仕方がなかったのかもしれない。しかし今や、時代も共存共栄の時代である。すべての分野でグローバルな視点を求められている。日本の福音派にも、過去にとらわれない新しい世代が台頭してきている。彼らは、とても優秀である。日本社会の中で切磋琢磨して、世界のキリスト教界に大きな貢献を果たせる人々である。

神学の貧しさは、教会の貧しさである。教会の貧しさは神の国の貧しさとなる。教会は必ず、20 年後、30 年後に

その実を刈り取る。教会は、神学によって立ちもするし、倒れもする。今や、キリスト教村社会（カトリックからカリスマまで）を根底から問い直す神学が求められている。福音派よ、立ち上がれ。日本福音同盟よ、日本福音主義神学会よ、福音派の牧師や神学者たちよ、立ち上がってこの責務を果していただきたい。

そんなことを思いめぐらしながら、昨年暮れ、私の講演集を同労の先生方、友人牧師たちに送らせていただいた。私は、ただの一介の牧師に過ぎないが、恥を忍んで自分の考えを公表した。新しい時代を切り開いていただくための、捨て石にでもしていただきたかったからである。

送らせていただいた主にある多くの同労者から、数多くのレスポンスをいただいた。とてもうれしかった。特に、問題点を鋭く指摘してくださった友には、心から感謝している。指摘された一つ一つの問題点については、今後の講演の中で対応させていただきたいと思っている。神学の構築は、多くのキリスト者の共同作業でもあるのだから。といっても、現時点ではっきりさせておかねばならないこともある。特に、次の 4 点である。既に講演でふれてはいるが、説明が不十分だったかもしれない。重要なことばかりなので、繰り返しを恐れず、コメントしておきたい。

一つは、「信仰」と「教理」と「神学」とを区別することに関してである。この三つはいずれも、多かれ少なかれ、理性的な働きを含んでいる。従って、三つを区別することは、実際問題として不可能なことではないか、との疑問である。鋭い指摘である。確かにこの三つは、簡単に区別できるわけではない。それゆえキリスト教神学は、伝統的に区別してこなかった。まさに、ご指摘のとおりである。

言うまでもなく、人間理性は、信仰と神学と教理の三つのいずれにおいても、深く関わっている。しかし、その量と意味合いは、かなり異なる。「信仰」においては、信じることが優先される。理性は信じたことを整理するために関わってくる。その信仰とは、イエスへの信仰である。神の啓示や聖霊のお働きがあって、イエスを信じることができる。イエスを信じた途端、そのイエスを理性で理解しなければならないのが人間である。「信仰」といえども、宗教的体験や感情の満足で終わらない。最低の理性的な認識は不可避である。私の言う「信仰」の中には、2 世紀半ばには普及していた「使徒信条」程度の信仰告白は含まれる、と考えていただければよいと思っている。

次に「教理」では、人間理性は、聖書をどのように解釈したらよいのか、それをどのように体系化したらよいのか、ということに関係する。その際、自分の所属する教会や教派の聖書解釈や体系化は、そのキリスト者の教理形成に決定的な影響を与える。教会では、その教会（教派）が受け継いできた信仰告白、あるいは教理問答などを用いて信徒教育をするのが普通である。その教理は、キリスト者がその教会に所属して信仰生活を送っている限り、問題にしなければならないようなことは起こらない。

しかし、ほとんどのキリスト者は、自分の所属する教会内でだけ生活しているわけではない。それ以外の場で生活することを余儀なくされている。そこでは、教会が説く教理だけでは間に合わない。そのようなとき、その問題について聖書はどのように教えているのか、神はその問題に対しどのように考えておられるのか、そういう問がキリスト者の頭の中を駆け巡る。自分の責任で、待ったなしに対応せざるを得ない。牧師が正確な答えを聖書から出してくれるわけではない。キリスト者個人が、自分の理性を働かせ、問題を解決していく以外にないのである。私は、それをその人の神学と考えている。

自分には、この三つはどうしても区別できない、そう言われるキリスト者もおられるだろう。そういう方は、それで一向にかまわない。どちらの神学理解が正しいのか、そんなことを争う必要はない。それは真理の問題ではない。どちらが、信仰生活により役立つか、という問題である。私自身は、三つは区別した方が便利だ、そう考えている。そう区別すると不都合が生じる、そういうことも何一つない。

実際は反対だ。もし区別するなら、一人一人のキリスト者は、もっともっと自由になる。教派や教会に縛られずに、自由な精神で神にお仕えできる。信仰の認知的不協和の解消にもつながる。クリスチャンではない人々とのコミュニケーションも道が開かれる。教会内で起こる諍いも、かなりの部分は避けることができる。エキュメニズム運動も大きく進展させることができる。その論理的根拠をすっきりさせることができるからだ。社会問題に対する対応能力も格段と進歩する。

従って、この三つを区別する方が、一緒くたに扱うよりはるかによい。ただ、こういう考え方をすると、伝統的な神学を標榜する人々からは、神学的相対主義とか、神学的多元主義などという批判を受けるだろう。批判されたくない、そう思うと、新しいことは何もできない。神学は神がしていることではない。キリスト者お互いが、人間としてしていることである。相対的で、多元的なのは当たり前のことである。以前、中澤神学はポストモダン的だと批判された

ことがある。現代に生きるとは、ポストモダンの社会に生きることである。ポストモダンの神学でない限り、現代人には通じない。そのような批判は、福音派のごく一部の村社会でのみ起こることである。気にする必要など、全くない。神学の絶対主義や画一主義こそ、教会がこの世界に切り込んでいく活力を失わせているものだからである。

二つ目の疑問は、ヘブル人への手紙2章を、「キリストの死は、人間の創造時に与えられ、堕落によって失われた被造物の管理権を回復した」と理解することに対してである。多くの友人が、自分もそのように考えていた、そのように述べている書物は他にもあると思う、と指摘してくださった。

まず、これまでそのように考えてこられたというのであれば、これほどうれしいことはない。被造物管理の神学とは、実はコロンブスの卵のような話である。キリスト者であれば、そう考えるのが当然だし、それ以外に考えようがないことを言っただけである。言われてみれば全くそのとおりで、誰でも、自分もそう思っていたと感じるような考え方である。ただ、従来の贖罪論、キリスト論、福音論、被造物論、キリスト者の生活論などおいて、この当たり前のことが論じられてこなかった、ということは確かだと思う。

むろん、キリストが復活後に全被造物の主権性（王権）を確立されたことは、誰でも信じている。また、やがて全被造物が贖われる時が来ることも、誰でも同じように信じている。ただ、ここでの論点は、そのようなことではない。現に生きているキリスト者が、現在の被造物に対する管理権を回復されているのか、ということを問題にしているのである。それは、キリスト者が現在受けている救いの中身、あるいはキリストの福音の中身に関わることである。もしその点を述べている書物があるなら、ぜひ教えていただきたい、そう言っているだけである。もしそのような書物を指摘してくださるなら、私は喜んで、この講演集で公開したい。学者であれば、オリジナリティーに喜びを感じるかもしれないが、私は牧師である。オリジナリティーには何の興味もない。価値を見出してもいない。

三つ目は、自然災害に対しての私の説明では、納得できないという批判である。たぶん、この批判は多くの方々が抱かれているものだと思う。残念だが、今の私には、そのように感じる方々を満足させるような説明ができない。しかし、もう一度、問題点を整理してみよう。

神は、被造物のすべてを、自由と法則性の両方を備えるものとして創造された。それは、自然界、人間社会、霊的世界、そのいずれにおいても言い得る。例外はない。（我々人間にとって自然災害に見える）現象は、自然界という複雑系のメカニズムの中で、二律背反とも言うべき「自由と法則性」の中で生じる。宇宙は、創生以来今日まで、そのような「自由と法則性」の中で生成過程を繰り返してきている。従って、（今日の我々にとって）自然災害と言われる現象が起こらなければ、この宇宙も、今のような地球も、存在し得ないわけである。

問題は、人間が、そのような自然的な現象に直面せざるを得ない状況に置かれているという現実にある。人間がそこに存在しなければ、地震が起ころうと、火山が噴火しようと、雷が落ちようと、ハリケーンや台風が来ようと、山火事が起ころうと、大雨が降ろうと、干ばつが続こうと、温暖化になろうと、冷却期に入ろうと、そのようなことは何の問題にもならない。そのようなことは、地球 46 億年の歴史の中で、繰り返し起こってきたことである。特筆すべきことでも何でもない。問題は、人間が住んでいるその場所に、そのような人間にとって不都合な現象がどうして起こるのかということにある。神を信じない人にとっては、このことは問題にならない。そういう現象に出会った人たちは運が悪かっただけである。しかし、キリスト者にとってはそういうだけでは済まされない。自分が住んでいる場所に導かれたのは神であると信じているし、神が愛であるなら、キリスト者の住んでいるところに、その生存を脅かすような自然災害をどうして起こされたのか、留めてくださらなかったのか、そういう疑問が起こるのは当然なのである。

正直に言おう。私もそう思う。いろいろ説明をしてみても、自分で納得できているわけではない。神はもっと祈りに答えてくださったらいいのに、と思う。不公平だとも、理不尽だとも感じる。すべては自分中心からの発想だと分かっているが、神はどうして自然法則に干渉されないのだろうか、そういう気持ちは消えない。あるいは神は、我々の知らないところでたくさん干渉されている、と言う人もいよう。実際神は、我々が想像できないほどの微調整を、この地球に施している。我々は、その事実をよく知っている。その上でなお、Why God？ と叫びたくなる。

ここまでくると、人間の考えの限界を認めざるを得ない。神の絶対主権に服して歩む以外にない。人間の理性や論理では間に合わない。軽々しく言うことは避けなければならないが、それらは神の神秘の世界に属する。それはごまかしだ、そんな主張には満足できない、そう反論されたら、返す言葉はない。ただ、このように考える以外に、他の説明方法はあるだろうか、逆に問い返さざるを得ない。

四つ目は、人間に対する評価が高すぎるのではないか、という批判である。人間は、神に対して反逆した結果、「神のかたち」は完全に失われてしまった、よきものはもはや何もない、多くのキリスト者はそう考えている。実は、

私もそう教わってきたし、そう説いてきた。

しかし、信仰生活を送っていく中で、このような人間理解は本当に正しいのだろうか、そんな疑問が次第次第に大きくなってきた。目を覆いたくなるような悪の現実が覆いかぶさってくる。でも、人間って捨てたものではない、そう思える時もしばしばである。人は、神の救いを受けるには全く無価値な存在である。しかし、「神のかたち」をすべて失い、被造物の管理責任を全く果しえない者になってしまったというのは、間違いではないだろうか、そんな風に感じてきたのである。学問に、教育に、芸術に、スポーツに価値を見出すことと、全的堕落の教理の間に認知的不協和を感じたということである。

もし私の人間に対する評価が高すぎるというのであれば、私の感じる認知的不協和をどのように解決したらよいのか、教えていただければと思う。私には、多くのキリスト者が、神学的には全的堕落を標榜しながら、現実的には人間を肯定して生きているように見える。

以上で、私の応答は終わりたいと思う。どのような方々であっても、引き続き、遠慮なく対話を試みてくださるようにと願っている。私自身は、自分の考えや神学に固執する気持ちは全くない。多くの不十分なところがあると思うので、ぜひ教えていただきたい。対話がなければ、発展はない。ご指導をよろしくお願いしたい。

さてここに、四冊目（被造物管理の神学としては二冊目）の講演集を発刊でき、主に心より感謝する。この冊子には、四つの講演が含まれている。いずれも、毎週水曜日東京のお茶の水クリスチャンセンターで開かれているJWTCというクラスにおいて講演したものである。

一つ目は、太陽系の話である。我々が住む地球を取り巻いている太陽系は、実にうまくできている。この様相をじっくり考え、我々の考えや気持ちを大きく広げてもらいたい、そんな風に願って講演したものである。

二つ目は、太陽系からさらに銀河系へ、そこから銀河群へ、銀河団へ、超銀河団へ、そして最後に宇宙の大規模構造にまで広げてみた。太陽系でさえ宇宙のほんの一部に過ぎないことを知り、神が創造された宇宙の広大さに目をとめていただこうと、講演したものである。

三つ目の講演は、現代の天文学及び物理学が取り組んでいる解決困難な問題を扱った。暗黒物質、暗黒エネルギー、ブラックホールなどである。被造物管理の神学は、管理という言葉が使われている以上、未解決の問題にも真剣に取り組まねばならない。そのようなことを知っていただこうと、講演したものである。

四つ目は、現代の量子力学が模索している超ひも理論、多宇宙、人間原理などという問題を紹介してみた。このへんの話になると、科学というよりかなりSF的で、宗教的な問題意識が入り込んでくる。キリスト者にとっては、聖書の世界への入り口になるテーマである。そんな確信を基にして、講演したものである。

私の講演スケジュールでは、これらの自然に関する講演はすべて、この次に講演する「神はなぜ人を造られたのか―創世記 1 章を読む」の序論に過ぎない。

私は、高校 1 年の時にキリスト者になった。3 代目のキリスト者家庭である。以来この 55 年間、神の恵みに圧倒される日々を過ごしてきた。キリスト者であるとは、教会とは、本当に素晴らしいところである。掛け値なしに、私はそう告白できる。と同時にその間ずっと、キリスト教への認知的不協和を感じてきた。私の科学的思考パターンがキリスト教の聖書理解と、なかなかマッチしないのである。神の存在、神による万物の創造、イエスの奇跡、贖いの死、復活、神性、神の御霊のお働き、聖書の啓示性、そういう事柄については、私にとって全く抵抗はない。不協和を感じてきたのは、そういうことではなく、これまでキリスト教が説いてきた聖書の解釈に関してである。

考えてみれば、これまでの信仰の旅は、聖書が本当に言いたいことは何なのか、それを知りたい、本当のことを信じて歩みたい、そのことに尽きるように思う。

この次の講演は、大野キリスト教会の新会堂完成記念の感謝講演会（2014 年 4 月 16 日）に予定されている。広く一般公開されるので、ご出席いただければと思う。そこで私は、正統的、福音的、聖書信仰的な立場を明確にしながら、科学的研究の成果、聖書批評学、ユダヤ教の解釈、古代オリエントの文献を駆使した「創造論」を展開する。誰も語らなかったような解釈ではあるが、お聞きになれば、誰でも納得していただける解釈になると思う。ぜひ、期待してお出かけいただきたいと思う。

（本冊子中の図、写真、表などの多くは、インターネット上に公開されているものから引用させていただいた。）

被造物管理の神学講演　4　(A－4)

2014 年 1 月 8 日
JWTC 春の特別セミナー(1)

A. 自然

4. 太陽系

(太陽、惑星、系外惑星)

はじめに

本日の JWTC 春の特別セミナーにご出席くださり、たいへんうれしく思う。これから 4 回にわたり、このお茶の水クリスチャンセンターにおいて、「被造物管理の神学」の自然篇について講演する予定である。広大な宇宙の話ではあるが、楽しみながらお聞きいただきたいと思う。

ところで、この講演の準備をしているときに、朝日新聞 2013 年 8 月 3 日の夕刊が届けられた。そこには、とても興味深い 2 枚の写真が掲載されていた。一枚は、1990 年に探査機「ボイジャー」が海王星のかなた、地球から約 46 億km離れたところより写した「地球」である。たくさんの天の川のような星の中に、白い1点の星が浮かんでいる。もう一枚は、土星を周回観測している探査機「カッシーニ」が、約 15 億km離れた場所から、最近撮った「地球」である。そこでも、同じような白い 1 点の星として写っている。
この 1 点の上に、72 億人の人間が住んでいる。喜んだり、悲しんだり、悩んだり、争ったり、愛し合ったりしながら生きている。この宇宙に浮かぶ小さな小さな星、何の変哲もない、ごく普通のありふれた天体の一つに。

だが、それだけではない。近づいてみると、不思議に満ちている。人が地球上で暮らせるのは、決して当たり前のことではない。太陽はちょうど良い場所で輝いている。だから適度な温度を注いでいる。適度な大気もあるので、生命が生存可能となっている。明るい昼があるのは、地球が自転し、太陽と大気がほどよい関係を保っているからである。もし月であれば、昼でも暗い。大気が太陽の光を適度に散らばしてくれないからである。地球が夜暗いのは、星の光がほとんど届いてこない位置にあるからである。もし太陽系が、星のたくさん集まる「星団」に置かれていたなら、我々が夜眠れる環境にはならなかった。

すべては偶然である、そう考える人もいよう。こういう地球環境だからそれにあった生命や人類が誕生した、ただそれだけのことである、そう思う人もいよう。私も長い間そう考えてきた。しかし今はそのようには思っていない。そういう考えも皆、一種の信仰である。そのように信じるには、創造者を信じるより大きな信仰を要する。私には、神が預言者イザヤを通して語られた言葉を、そのまま受けとめる方がぴったりくる。

> このわたしが地を造り、その上に人間を創造した。わたしはわたしの手で天を引き延べ、その万象に命じた。・・・天を創造した方、すなわち神、地を形造り、これを仕上げた方、すなわちこれを堅く立てた方、これを茫漠としたものに創造せず、人の住みかにこれを形造った方、まことに、この主がこう仰せられる。「わたしが主である。ほかにはいない。」(イザヤ 45:12、18)

Ⅰ. 太陽系の世界

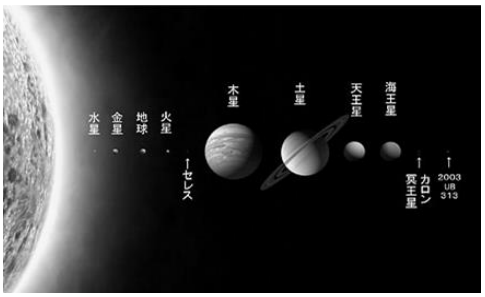
我々の住む地球はこの宇宙の中心にある。そして、遠い空のかなたにまで空は広がり、たくさんの星が輝いている。長い間人類は、そんな風に考えてきた。いわゆる天動説の世界である。ところが、近代の科学はそのような宇宙観を打ち砕いた。この地球は、太陽の周りを回っている多くの惑星の一つに過ぎない。ごくありふれた天体の一つで、特別変わったものではない。それが近代以降の科学が説く地球である。

そのような理解は、ある意味で間違いではない。そこから出発するのがよいとも思う。だが、本当にそう割り切ってしまっていいのだろうか。私には、どうしてもそうは思えない。やはり、地球には何か特別なものがあるのではないだろうか。そのへんのところは、次の「生命」に関する講演シリーズで取り上げる。現在の一連の講演では、宇宙にフォーカスをあてているので、本格的な論議は、もう少しお待ちいただきたい。

ではまず、太陽系の全体像、その形成過程と形成時期などについて考えてみよう。

1. 太陽系の全体像

太陽系とは、太陽がその重力で拘束している天体群、あるいはそれらの天体が存在する範囲を指す。それは、太陽を中心に、惑星、惑星になりかけたもののそこまで成長できなかった準惑星、小天体群、衛星、それに広大な空間に存在する惑星間塵や主に太陽から放出されるプラズマ、高エネルギー粒子などによって構成されている。その質量の 99%は、太陽が担っている。惑星を含めた他の天体すべてを合わせても太陽の質量の 100 分の 1 にも満たない。



太陽系

太陽系の果てとはどこになるのか。ひと言でいえば、太陽がその重力の影響を保ち得る範囲ということになる。ある天体を、他の恒星の重力に打ち勝って自分の重力圏内に留めておける領域である。惑星が存在する黄道面付近の延長線上で考えてみよう。海王星の軌道を超えた付近に1,000 個を上回る小天体がある。それらは、「太陽系外縁天体（TNO）」と呼ばれている。さらにその外側に、「オールトの雲」と呼ばれる、太陽系全体を球殻のように覆っている一段の天体があると予測されている。未だその存在は観測によって確認されてはいないが、その「オールトの雲」あたりまでが太陽系に含まれる。

太陽系の中では、自分で光を出す「恒星」は太陽のみである。「恒星」とは、地球から見て、星の位置関係が変わらないところから「恒にある星」という意味が込められ、命名された。これに対し「惑星」は、地球からはその動向が「惑っているように見える星」ということで、命名された。地球にとって、太陽の次に近い恒星は「ケンタウルス座プロキシマ星」で、4.2 光年離れている。太陽から約 30 光年の範囲内には、太陽ぐらいの星は 20 個ほど、太陽よりずっと軽い星を含めると 300 個ほどある。

昔から人類が楽しんできた星座を形づくっている明るい星は、皆数光年から約 1,000 光年ほどの距離にある。人の眼に見えるのは、せいぜいその程度の範囲である。なお、現在我々が確認できている太陽系の中で一番大きな恒星は、「アルニラム」という星である。それは、太陽質量の 40 倍もあり、太陽の何十万倍も明るく輝いている。

太陽系の主要天体比較

名　前		直径（km）	大きさ比較	質量（kg）	軌道傾斜角（度）	表面重力	公転周期（年）	自転周期（日）	衛星（個）
太陽		1,392,038.0	大玉	1.989×10^{30}	—	274	—	27.275 (2)	—
1	水星	4,879.4	仁丹	3.302×10^{23}	7.004	3.70	0	58.65	0
2	金星	12,103.6	ビー玉	4.869×10^{24}	3.39471	8.87	0.615	243.0187 (3)	0
3	地球	12,756.3	ビー玉	5.974×10^{24}	0.00005	9.78	1.000	0.997271	1
4	火星	6,794.4	BB弾	6.419×10^{23}	1.85061	3.71	1.881	1.02595	2
5	木星	142,984.0	砲丸	1.899×10^{27}	1.30530	24.79	11.86	0.4135	63 (4)
6	土星	120,536.0	ｿﾌﾄﾎﾞｰﾙ	5.688×10^{26}	2.48446	8.96	29.48	0.4264 (2)	64 (4)
7	天王星	51,118.0	ﾋﾟﾝﾎﾟﾝ玉	8.683×10^{25}	0.774	7.77	84.01	0.7181 (3)	27
8	海王星	49,572.0	ﾋﾟﾝﾎﾟﾝ玉	1.024×10^{26}	1.76917	11.0	164.79	0.6712	13

ただし、1,300 光年も離れているので、全天で明るさ第 30 位の星とされている。

太陽を回っている「惑星」は 8 つある。太陽系内の天体の距離は、太陽と地球との距離を「1 天文単位」として考える。すると、水星の軌道半径は 0.387 天文単位となる。金星は 0.728、地球は 1.0、火星は 1.522、木星は 5.2、土星は 9.6、天王星は 19.2、海王星は 30.1 となる。惑星間の軌道間隔は外側ほど大きい。また、地球の軌道面を黄道面と呼ぶ。ほとんどの惑星の軌道面は、黄道面からの傾きが 10 度未満になっている。このような構造になっ

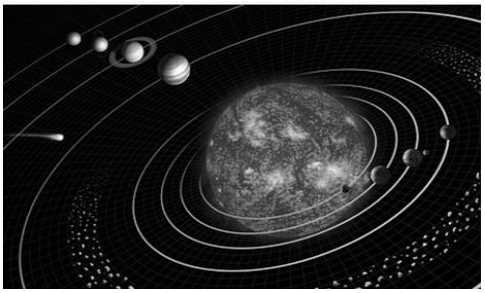
たのは、太陽系の形成シナリオを反映している。

惑星の中には「衛星」をもつものもある。「衛星」は惑星や小天体の周りを回っている。その母天体に対しては小さいため、その重力圏を離れるだけのエネルギーをもたない。太陽系には、小さな砂塵やチリが黄道面を中心に多数存在する。それは「惑星間塵」と呼ばれ、太陽のまわりを公転している。「惑星間塵」はとても小さく、重力以外の太陽からの放射圧（光の圧力）や電磁気的な力の影響を強く受ける。その結果、軌道は次第に小さくなり、太陽に近づき、最終的には溶けてしまう。なお、惑星、恒星、銀河などの天体においては、電子が回転活動をしており、天体内部で電気が起こって磁石のように振舞う。この現象を電磁気的な力という。

太陽系空間には、常に太陽から吹きつける太陽風と呼ばれるプラズマの嵐が吹いている。「プラズマ」とは、気体をつくる分子が高温状態のため陽イオンと電子とに分かれ、それぞれが電荷を帯びて飛び交っている状態をいう。物質は普通、気体・液体・固体の三態に分けられるが、プラズマは電離しているために、気体とは性質が異なり、「物質の第四態」とも呼ばれている。身近な例としては、蛍光灯の中に水銀のガスがプラズマ状になっているものを挙げることができる。このようなプラズマ状の太陽風が星間空間の電磁気的な風（星間風）とせめぎ合う範囲を「太陽圏」と呼ぶ。その境界面は「ヘリオポーズ」と呼ばれ、太陽の活動状況によって変動する。通常は、太陽からおよそ 90 億kmから 150 億kmあたりになる。

2. 太陽系の形成過程

20 世紀半ばまでは、太陽系の惑星は太陽から噴出されたガスによってできたと考えられていた。しかし、1960 年代から80年代にかけ惑星の観測が進み、そのような考えは修正を迫られた。今日では、太陽系は次のような過程を経て形成された、と考えられている。



まず、我々が住む銀河系にたくさんの星間ガスやチリが漂っていた。その中心部の密度の高い部分が、自らの重力で収縮し始め、原始太陽ができた。その時、原始太陽になりきれなかったガスやチリが残っていた。これらの残された巨大なガスやチリは、次第に原始太陽の周りを回転し始めた。そのガス雲全体の回転運動の遠心力が回転軸に垂直に働き、回転軸に垂直な円盤状になっていった。これは「原始惑星系円盤」と呼ばれ、その組成成分は基本的に太陽と同じだった。つまり、水素とヘリウムがおよそ 98%、炭素、窒素、酸素などのより重い揮発性の元素は約 1.5%、岩石をつくるケイ素やマグネシウム、鉄などのいわゆる重元素は約 0.5%だった。

太陽ではこれらすべての成分がガス化していた。太陽から少し離れたところでは、凝結温度（ガスから鉱物粒子が析出する温度）の高い岩石をつくる鉱物粒子がたくさん集まった。その結果、ケイ酸塩、鉄、氷などの成分が凝縮して次第に小さな個体の微粒子として増えていった。微粒子はさらに成長・合体して、ついに直径 1km～10kmほどの「微惑星」を形成する。この微惑星は太陽の近くでは多数できるが、密度の低い外側では少なかった。通常、少しでも大きな微惑星は小さな微惑星をどんどん吸収していく。そのような微惑星同士の衝突・合体が繰り返され、「原始惑星」が形作られた。以上のようなプロセスを経ながら、「地球型惑星」、つまり水星、金星、地球、火星などが形成された。

一方、太陽から 3 天文単位以上離れた場所では、円盤の温度はさらに低くなった。その結果、円盤ガスからの水分が氷として凝縮してダスト量が急速に増え、微惑星量も増えた。その結果、質量が地球の 10 倍以上にもなる「氷惑星」ができあがった。そうなると重力が大きくなり、周囲の円盤ガスを取り込み、氷惑星が「巨大ガス惑星」へと変身した。以上が木星や土星の形成過程である。

太陽からさらに遠いところでは、温度はさらに低くなり、微惑星も少なくなっていた。回転運動もゆっくりとなり、衝突頻度は落ちてきた。質量が地球の 10 倍になる頃には、円盤ガスのかなりの部分は拡散によって中心星に流れ込み、100 万年から 1,000 万年も経つと消えてしまうのが普通だった。その結果、この領域では「巨大ガス惑星」は形成されず、氷の微惑星が集まる「巨大氷惑星」が誕生した。これが天王星や海王星の形成プロセスである。

以上が、現在の科学者が描いている太陽と惑星の形成過程である。むろん、未だ仮説の域を出ない。しかし、このように考えると、太陽系の次のような特徴のすべてを矛盾なく説明できる。その特徴とは、①太陽系の惑星が内側から地球型惑星、巨大ガス惑星、巨大氷惑星の順に並んでいること、②最大の惑星である木星も太陽の 1,000 分の 1 の質量しかなく、円盤全体の質量も太陽の 100 分の 1 にしかならないこと、③惑星の組成成分が太陽と同じであること、④惑星の軌道面はほぼ同一平面内にあること、⑤すべての惑星の公転軸は太陽の自転軸の向きと一致していること、⑥惑星軌道がほぼ円軌道であること、⑦惑星軌道の間隔が外側にいくほど広くなること、の 7 つである。

提唱されている仮設は 7 つのすべての点を矛盾なく説明できると述べたが、これは厳密な言い方ではない。正確に言えば、7 つのすべての点を満足させることができるような仮説を考え出した、ということである。従って、この種の仮説は、一つ一つ実験・観測によって裏打ちされねばならない。このようにして、天文学は発展していく。

3. 太陽系の形成時期

では、この太陽系はいつ頃誕生したのか。現代のほとんどの学者は、今から 46 億年ほど前と推定している。むろんこれも仮説ではあるが、かなりの証拠がそろっている。

その一つは、太陽系の惑星にたくさん残されている隕石跡である。それは地球にも降ってきている。そのような隕石は、45 億年ほど前のものまではたくさん見つかっているが、それ以前のものは見つかっていない。例えば、1969 年、メキシコ北部のチワワ州アエンデ村付近一帯に、隕石シャワー（隕石雨）と呼ばれる無数の隕石片が落ちた。そこからある一定の方向に、隕石のサイズが大きいものから小さくなるような形で、長さ 100km、幅 10kmにわたってほぼ一直線に分布している。一番大きな隕石片の重さは約 12 キロもあった。このアエンデ隕石に含まれている化学元素の量は太陽の大気に含まれる化学元素の量に一致している（むろん、水素とかヘリウムというガスが隕石には少量しか含まれていないのは当然である）。ということは、アエンデ隕石は、太陽大気が冷やされた結果生じた天体の一部だったことを示唆する。この隕石は 45 億年前のものであることが確認されている。

もし、この太陽系の中に、46 億年以上昔の隕石、もしくは物質が一つでも見つかるなら、太陽系の天体の形成年代はそれより遡らなければならない。これを学問における「反証の論理」という。ときどき、反証の事実には目をつむり、賛成意見をたくさん集めて物事が証明されたかのように吹聴する人がいる。宗教の世界であれば、それでも通用しよう。しかし、科学の仮説ではそうはいかない。一つでも明らかな反証の事実が指摘されれば、その仮説は放棄されねばならない。科学とは、そういうものなのである。

太陽系は、これまで見てきたとおり、「原始惑星系円盤」と呼ばれる「ガス円盤」から形成されたと思われる。それが固体天体になるまでには 1 億年近くかかったことだろう。すると、太陽系の誕生は 46 億年ぐらい前と考えられる。月や地球の形成年代も、この年代を想定すると、すべての話のつじつまがあう。この宇宙が誕生したのは、137 億年前だった。それから 90 億年程経過してからこの太陽系ができたことになる。我々の太陽系は、宇宙創生以来 3 分の 2 の間は存在しなかった。

Ⅱ. 太陽、地球、月

以上で、太陽系全体のイメージをつかんでいただけただろうか。では次に、太陽系の中でも、我々にとって最も重要な太陽、地球、そして月を取り上げよう。地球はむろん、我々にとって特別な存在である。従って別の機会に詳しく取りあげる。ここでは、太陽系の一つの惑星として紹介するにとどめておく。

1. 太陽

太陽系の中心は太陽である。太陽系内の天体はすべて、太陽の影響下で存在している。地球もその一つである。地球上の生命のエネルギー源のすべてを、太陽から受けている。太陽の恵みなくして、我々は、一瞬たりとも存在し得ない。多くの人々が、太陽を信仰の対象にしてきたのも理解できる。目に見えない神を別にすれば、太陽は人間にとって最大の存在なのだから。

地球から見ると、太陽は特別な存在である。しかし、この宇宙全体を眺めるなら、太陽はたくさんある恒星の一つに過ぎない。とはいえ、太陽の次に近い恒星は、太陽より 27 万倍ほども遠いところに存在する。もし太陽を地球

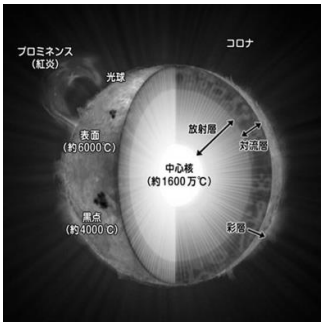
から50光年離れたところから見るなら、肉眼でかろうじて見えるほどの小さな暗い星である。50光年というのは、現在より320万倍ほども遠く離れた位置になる。ところが天文学の世界では、比較的短い距離で、太陽のご近所と言ってよい。もしその1,000倍の5万光年離れると、大型望遠鏡を使ってやっと見える程度である。5万光年になるとさすがに遠いが、それでもまだ銀河系内の話である。もし200万光年離れると、太陽は暗すぎてとても探知できない。200万光年とは、隣の大型銀河までの距離である。太陽は、宇宙にあるたくさんの星の中で特別な星である、というわけではない。太陽が我々にとって特別な存在であるのは、地球の近くにあるという点にある。

皆既日食

太陽は、時折月に隠され、光を失うことがある。いわゆる皆既日食である。古代の人々の中には、太陽が消滅したと勘違いし、恐怖に襲われる人もいた。世の終わりを予感した人々もいた。というわけで、皆既日食や金環日食、部分日食などは、正確に記述・保存されるようになった。その結果、月・地球・太陽の位置関係が理解され、日食や月食の起こる周期（サロス周期）は約18年10日と1/3日であることも、次第に知られるようになった。この点について、今日記録文書として辿れるのは紀元前7世紀頃までである。しかし、それ以前から農耕民族の間でこの種の記録が伝承されていたことは間違いない。

星は暗黒星雲の中で生まれる。太陽もまた、かつて46億年前に暗黒星雲の中で生まれた。生まれたばかりの太陽（原始太陽）は、現在の10倍以上も明るく輝いていた。この段階の太陽は単に明るいだけでなく、巨大なフレアなどの激しい爆発現象を頻繁に起こし、原始惑星系円盤や惑星形成に大きな影響を与えた。

原始太陽はゆっくり光度を下げ、T Tauri型星という段階（1,000万年程度）を経て、主系列星となった。主系列星になりたての太陽は現在より少し（数十％程度）暗く、当時の地球は全球凍結するくらい寒かったはずである。ただし、そのような痕跡は、地学的には現在のところ確証されていない。



太陽の内部

太陽の半径は約70万km、地球の100倍以上もある。その大きさは、月の軌道が2つくらい入るほど巨大である。体積は100×100×100＝100万倍ほどになる。質量は地球の33万倍。太陽は、自分自身の重力と内部のガス圧力とのバランスがとれていて、このような大きさを保つことができている。密度は水よりちょっと大きいくらいで、1立方センチメートルあたり1.5グラム。重力は地球の28倍。表面気圧は約10分の1気圧である。

太陽は、中心から「中心核（コア）」、「放射層」、「対流層」、「光球（太陽表面）」、「彩層」、「コロナ」と6つの層からできている。中心温度は1,000万から1,500万Kにもなっている（Kはケルビンの略で、絶対温度を表わす。絶対零度は273.15度C）。内部の平均は100万Kぐらいであるが、光球表面は約6,000Kになる。彩層では4,000Kから3万K, コロナ層最下部では100万Kとなり、太陽半径の200倍の位置でもまだ20万Kある。このように太陽の温度が高いのは、太陽が重いことにある。もし温度が下がると、太陽は重さに耐えられなくなり、小さく潰れてしまう。なお、圧力分布は、中心は2,500億気圧もあり、中心核の表面は10万気圧、放射層と対流層の境界線あたりで1万気圧、光球表面は0.1気圧、彩層からコロナ層では0.002気圧である。

「中心核」は、太陽の中心から半径10％から30％程度の領域を指す。その温度は1,000万Kを超え、主に水素とヘリウムガスからできている。そこでは水素原子核の陽子が4個結合してヘリウム原子核をつくる。4個の水素原子核の質量は1個のヘリウム原子核より少し大きい。この核融合反応の結果、減少した質量の分だけエネルギーが中心部から外側に向かって放たれる。それが太陽の明るさの源になっている。

太陽は秒あたり420万トンの割合で水素を消費している。1グラムの水素からは石炭20トンを燃やした場合と同等のエネルギーが得られる。まさに想像を絶するものである。太陽の中心における核融合によって生じたエネルギーが太陽表面にまで届くのに、何と10万年～100万年以上の時間を要する。太陽の半径が約70万kmなので、光の速さなら2秒ぐらいしかかからないはずなのに、なぜそれほどの時間を要するのか？　それは、「放射層」及び「対流層」の中で次のようなプロセスが繰り返されるからである。

①太陽中心部で水素の核融合により、放射線の一種であるガンマ線が発生する。

②ガンマ線は真空中では直進するが、太陽内部のように約 1,000 万度という高温では、電子や陽子によって行く手が阻まれる。
③直進できないガンマ線は、近くのガスに吸収され、X 線として放出される。
④放出された X 線は、ガスへの吸収と放出を繰り返し、温度が低くなる。
⑤その温度が直進できるほどまで下がると、X線は表面付近に到着し、可視光線や赤外線、紫外線になる。
⑥これらの可視光線・赤外線・紫外線が太陽光として放射される。

太陽の元素組成（質量比）は、光球では水素が 73%、ヘリウムが 25%である。中心部では水素が約 33%、ヘリウムが 65%と推定される。約 46 億年前、太陽の誕生時には、水素は全体の 70%を占めていた。とすれば、現在までに半分の水素が消費されたことになる。太陽は、核反応を起こす陽子のある限り輝き続ける。残りの水素の質量全部がヘリウムに変換されるのに、同じだけの約 50 億年かかる。すると、太陽の寿命は 100 億年。誕生から既に 50 億年が経過し、今後 50 億年ほどで消滅する、と予測される。

太陽の中心核の外側は、「放射層」と呼ばれている。それは、中心核の外側から太陽半径 70%ぐらいまでである。ここでは核融合で生じたエネルギーが放射で運ばれるところから「放射層」と名づけられた。

さらに、その「放射層」の外側から太陽表面までの 30%の部分は、「対流層」と呼ばれる。そこではガスなどが対流している。また、先のエネルギーも対流で太陽表面の光球まで運ばれるところから「対流層」と名づけられた。なおそこは、乱流状態で音波を発生し、太陽全体をいつも振動させている。1960 年代後半にロバート・レイトンは、この音波を解析し、太陽内部の物質分布、温度分布、回転角度分布などを明らかにした。このような研究は「日震学」と呼ばれている。この研究がさらに進めば、太陽内部の磁場分布も検出されるだろう。

対流層の外側は、順に「光球」、「彩層」、「コロナ」と呼ばれる層に分けられる。我々が普通「太陽」と呼んでいるのは太陽の表面で「光球」と呼んでいる部分のことである。この光球は、対流層の上を覆っている大気のことである。今日、さまざまな観測結果と理論の組み合わせにより、太陽大気の温度や密度の構造が明らかになってきている。太陽大気の温度は、光球では約 6,000K。高度が上がるにつれ、その温度は下がる。光球から 500kmほどの領域では、約 4,000Kになる。そのあたりが太陽大気の中で最も温度が低く、分子が存在できる唯一の場所である。この箇所以外の領域では、物質はすべてプラズマ状態で存在する。
（原子核はプラスの電気をもち、電子はマイナスの電気をもっている。従って、通常であれば両者はくっついて存在している。ところが、温度が高い時は、原子核は電子とくっつかず、それぞれが自由に飛び交っている。このような状態を「プラズマ状態」という。）

太陽の光球の表面には、「黒点」と呼ばれる暗い斑点状の模様が観測されている。大きな黒点ほど、磁場の強い傾向がある。黒点は、白色光で見た形や大きさ、磁場の配置、成長や消滅過程などによって分類される。いずれの黒点も中心部は暗いが、その周辺はやや明るく、放射状に明暗の筋状構造が並び、半暗部となっている。黒点が暗く見えるのは、周囲の光球の温度が約 6,000Kであるのに比べ、約 4,000Kと低いためである。

太陽黒点の数は約 11 年の周期で増減を繰り返す。ただしその増減は一定ではない。例えば 1645 年から 1715 年ごろは、太陽黒点が極端に少ない時期だった。同じ頃地球全体は寒冷化している（ミニ氷河期や小氷河期）。このことから、太陽活動と地球気候とには相関関係があると考えられている。

光球からさらに高度を上げ、2,000kmほどの領域あたりを「彩層」と呼んでいる。この彩層では、温度は 4,000K から約 3 万Kに上がっていく。なぜこのように高温になるのか、その理由は未だ分かっていない。

彩層からさらに高度を上げると「コロナ」につながる。「コロナ」は、光球と彩層の上に広がるうすい高温のガス層のことである。コロナ層最下部の温度は 100 万Kもあり、高度を上げると 200 万Kまで上昇する。「コロナ」が 200 万Kもの高温状態になっている理由はいまだ分からない。

コロナは、皆既日食のときにしか見えない太陽の周りの広い光の輪である。その光度は、光球の光度の 100 万分の 1 ほどで、外に行くにつれて暗くなる。放射される光は大気の温度によって大きく異なる。かくしてその光は、

地球にも届けられる。そのエネルギーは、全人類が一日に消費する総量の 80 兆倍にも及ぶ。太陽コロナの先端は 30 天文単位先、海王星あたりまで達している。

人工衛星のX線による太陽観測は 1960 年代に始まった。その結果、「コロナ」に関して多くのことが明らかにされた。X線画像によれば、「コロナ」はループ状構造をしている。明るさは一様ではなく、磁場が強い活動領域では明るいが、弱い領域では暗い。黒点の見られる活動領域周辺では特に明るく、北極と南極付近では特に暗い。この北極と南極付近の暗い領域は「コロナホール」と呼ばれる。「コロナホール」は磁力線が惑星空間に開いているため、プラズマが太陽風として逃げ出しており、密度が周囲より低くなっている。またコロナホールは、極域だけでなく、低緯度域にもしばしば現れる。

100 万Kから 200 万Kとなる高温のコロナプラズマは、太陽重力を振り切り、毎秒 300～800kmもの超高速で、惑星間空間へと噴出されている。このプラズマの流れは「太陽風」と呼ばれ、有害である。地球は、地磁気などによって太陽風から守られている。しかし、太陽風がないと、地球は「銀河宇宙線」や「星間物質」に取り巻かれ、その害を受ける。「銀河宇宙線」は超新星爆発などによって発生する。それは、太陽風よりも中性子や重粒子が多い。従って、生物がたくさん浴びると癌や遺伝子異常が起こり、死に至る危険がある。

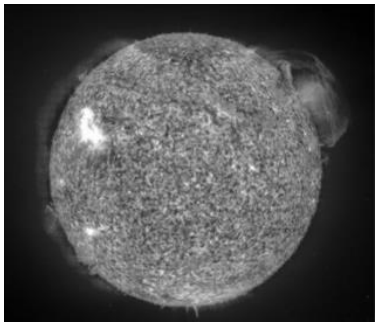
太陽風は、地球の磁場や大気と共に、銀河宇宙線や星間物質が地球に降り注ぐのを防ぐ役目を果たしている。ここまで太陽活動が活発だと太陽系全体の磁場のバリアーが強くなり、宇宙線が地上に届くのを妨げる。逆に太陽活動が静穏だと、地上に到達する宇宙線は増加する。宇宙線は地球大気と衝突する際に炭素 14（炭素の放射性同位体）を生み出し、それが樹木に取り込まれて木の中に記録として残る。つまり大気の年輪中に含まれる炭素 14 の量を測定すると、年ごとの宇宙線の量、すなわち太陽活動（黒点数）をおおよそ知ることができる。太陽活動が活発な時期の地球の気温は上昇する。

太陽の表面では様々な規模の活動現象が起きている。その中で最大のものが「太陽フレア（太陽面爆発）」である。フレアが発生すると、電波からガンマ線に至るあらゆる波長域で、電磁波の強度が突発的に増加する。フレアは黒点の近くで発生することが多い。このことから、フレアのエネルギー源は黒点近くの太陽大気中に蓄えられた磁気エネルギーであることが明らかになった。

太陽フレアの大きさは大小さまざまである。大きいものでは、10 万km四方もの巨大な空間で発生する。大きなフレアが発生すると、1～3 日後に地球で磁気嵐が発生する。フレアにともなう大量のプラズマや磁場が惑星間空間に放出され、地球方向に飛来し、それらが地球周辺の地場・プラズマ環境を大きく乱す。

なお、これまで述べてきた「彩層」、「コロナ」、「黒点」、「太陽風」、「太陽フレア」、「太陽の活動周期」、「磁場活動」などの現象は、太陽に限られるものではない。このような現象は、基本的には、太陽と同じような恒星であれば、どこででも見られるはずである。

最後に、この太陽は今後どのような歩みをするのか。中心核の核融合の水素の残存量から、今後 50 億年ほどで消滅すると予測されることは既に述べた。その後どうなるのかは誰も分からないが、おそらく超新星爆発などの例から、次のようなストーリーになると予測される。



太陽は、今後 50 億年ぐらい経つと半径を増し、巨星となる。巨星の半径は、最大に見積もると、現在の太陽半径の 100 倍以上にもなる。この段階を「赤色超巨星」という。この時点で、地球は太陽に飲み込まれ、蒸発して消滅するだろう。赤色超巨星となった太陽はその後、膨れ上がった外装をすべて放出し、惑星状星雲となる。そして最後に、赤色超巨星の中心部分が残り「白色矮星」になる。白色矮星は熱く、密度も高い。直径は 1 万kmから 1.2 万kmと地球とほぼ同じ大きさになるが、質量は 30 万倍にもなる。その後はゆっくり冷え、「暗黒矮星」となる。

2. 地球

地球　アポロ 17 号

我々の住むこの地球は、太陽から数えて3番目に位置する惑星である。地球は、他の惑星同様、太陽系の天体が形成されていく過程で、「原始惑星系円盤」から生まれた。地球形成学とか地球物理学などの学問は、最近ではとても盛んになっている。宇宙からの連携プレーもあり、調査方法の研究や観測技術も驚くほど発達している。その結果、地球の内部構造や周囲の環境、さまざまの特徴については、他の惑星に比べかなり詳しく分かるようになってきた。

地球は、太陽から光の速度で 8 分 20 秒ほどの所にある。距離にすると約 1 億 5,000 万 km である。地球は、1 年かけ太陽の周りを回っている。その軌道は完全な円ではなく、円からのゆがみ具合（離心率）が 0.017 という楕円軌道を描いている。従って、太陽から一番離れているときと近いときとでは約 500 万kmの差がある。通常、地球が最も太陽に近づくのは新年の 1 月 4 日ごろ、遠くなるのは 7 月 6 日ごろである。

地球の直径は約 12,756km。地球の公転周期は、365.2422 日である。端数の 0.2422 を 4 倍すると 1 に近くなるので、4 年に 1 度「うるう年」を設け、2 月 29 日を挿入して調整している。しかし、厳密には 1 にはならず 0.9644 となるので、端数を積算すると、100 年で 1 日程度ずれる。これを調整するため、400 年に 3 回うるう年を抜いている。つまり、400 で割り切れる 1600 年とか 2,000 年をうるう年とし、残りの 100 で割り切れる年はうるう年にしない（1700 年、1800 年、1900 年、2100 年はうるう年ではない）。

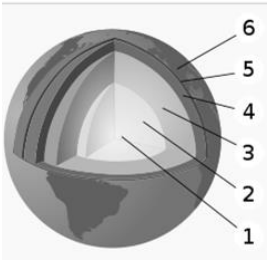
地球は 1 日かけて自転している。地球の自転はわずかづつ減速している。海が「潮汐（ちょうせき―潮の満ち干のこと）」で盛り上がると大陸にぶつかり、一種の抵抗力になって地球の自転を遅らせるからである。この遅れを放置すると基準になる時刻と昼夜とが次第に合わなくなる。そこで、ときどき「うるう秒」を入れ、調整している。自転方向は、他の惑星同様（金星だけは例外）、北極から見て反時計回りである。この自転方向は、その惑星の最終段階における様子によって決まる。地球の場合は、10 個ほどの小型惑星の衝突・合体を繰り返し、最後に月が衝突して弾き飛ばされ、自転方向が決まった。

地球の現在の自転軸は、公転軌道面（赤道面）に対して 23.4 度傾いている。自転軸の傾き角度がそれほど大きくないのは、地球と衝突・合体した小型惑星の多くが「原始惑星円盤」の流れの中でできたものだったからである。緯度による太陽光を受ける量の違いは、この地軸の傾きによる。この傾きが四季をもたらし、我々を楽しませてくれている。

地球が自転する際、自転軸自身もゆっくり首を振っている。それは、コマがゆっくり回っているとき、中心の軸棒そのものも首を振っている状態に似ている。このような軸の首ふり運動は、自転する物体では必ず起こる。地球も例外ではない。この首ふり運動は「歳差（さいさ）」と呼ばれ、地球ではおよそ 2 万 6,000 年周期となっている。

地球の内部は、外側から軽い岩石成分でできた「地殻」、やや重い岩石成分でで き流動している「マントル」、高温で溶けている鉄分などを含んだ金属質の「核（コア）」の三つに大別される。「地殻」の一部は、大陸をつくる「プレート」と呼ばれる板状のものに分かれている。その「プレート」は、下部の「マントル」の対流などによって少しずつ動いている。これが「プレート運動」と呼ばれているもので、大陸の移動の原因になっている。

地球の構造

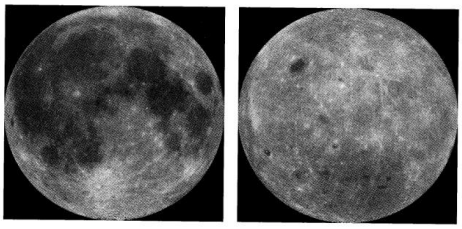


１：内核、２：外核
３：下部マントル
４：上部マントル
５：地殻、６：地表

このような地質学的な活動は、地球内部の放射性元素の崩壊による熱に基づいている。この内部流動によって地球の大気の成分は、窒素が火山活動や地震が起こる。それだけでなく、地球に磁場が生まれ（地表での強さは 0.5 ガウス）、その磁場によって地球の周囲に磁気圏を生み出し（これは上空何万キロもの宇宙空間にまで及んでいる）、太陽風や高エネルギーの宇宙線などが直接地上に到達するのを防いでいる。南極や北極のオーロラも、この地磁気によって生じる。

78％で酸素が21％である。これは生命活動にとっては最適の状態である。この大気成分のうち、酸素は活性が強く、通常は岩石などと容易に結びつく。ところがこの

地球では、酸素は生命活動のために絶えず供給され、大気としての主要な役割を果たしている。


月の表　　月の裏

地球の表面の 70%は、海に覆われている。ところが、地球は太陽から程よい距離にあるため、水の温度は①気体としての水蒸気、②液体としての水、③固体としての氷、という三つの状態を実現させる。そのため、水が蒸発して水蒸気となり、大気中で雨となって陸地に降り注ぎ、それが川になって海に流れるという見事な循環が見られる。これらの気象現象が起こる領域は、地表から十数km までで、これを「対流圏」と呼ぶ。その上に、薄い大気が層状に流れている「成層圏」、そして「中間圏」、「熱圏」と続いている。ちなみにオーロラや流星は「中間圏」で起こる現象である。

ここでちょっと遊び心を出し、オーロラの世界に足を踏み込んでみよう。

我々は、オーロラはある時突然現れ、すぐに消えてしまうというイメージをもっている。ところが実は、北極と南極を取り巻くように輪のような形で常に存在している。オーロラは地球上で起こる現象であるが、地球だけで引き起こしているわけではなく、太陽がないとできない。太陽の周りには、希薄な大気が彩層とコロナ層を取り巻いている。一番外側にあるコロナ層は、太陽半径の数倍の距離にまで達している。その中身はプラズマ粒子のガスである。太陽から離れるほど、太陽の重力や磁場の影響は弱くなる。従って、コロナの外側にあるプラズマガスは、太陽から離れて宇宙空間に放出される。このガスは、太陽風と呼ばれる。

太陽風としてやって来たプラズマ粒子が地球の磁力線の近くを流れるとき、その一部がプラズマシートと呼ばれる部分に溜め込まれ、北極や南極周辺にやってくる。プラズマ粒子は、電荷を帯びているので、地球大気と衝突したときに、緑、ピンクなどの色を発生させる。オーロラがカーテンのような形をしているのは、プラズマ粒子が磁力線に沿って流れてきて大気を光らせるからである。磁力線は、直接目に見えないが、地球の大気と太陽風のおかげで、オーロラとして見ることができる。

オーロラへの寄り道はこれぐらいにして元に戻ろう。

この地球は、永遠に存在するわけではない。太陽は、そのエネルギー源の水素が足りなくなると膨張が始まり「赤色巨星」になる。すると地球もその影響を受け、次第にスピードを失い、太陽に飲み込まれていく。あるいは「黒色矮星」となった太陽の周りを、岩石の塊として回るようになるかもしれない。むろん、太陽が「赤色巨星」になるのは今から50億年後である。というわけで、地球の寿命の話も50億年後のことである。それよりずっと前、今より10 億年後には、太陽光度は 10%ほど強くなることが予測される。すると地球の海は蒸発し始め、水のない天体になってしまう。そうなると、生命は生きることはできない。

地球について言わなければならないことが山ほどある。「地を支配せよ」という命令を基盤にしている被造物管理の神学においては、地球に関わるすべてがその対象になる。従って、地球については、改めて講演することにする。今は、この辺で留めておこう。

3. 月

月は地球の周りを回っている唯一の「衛星」である。日本人にとって、月ほどロマンをかきたてられた天体はない。月にウサギを見たり、かぐや姫の話など、・・・。このことは日本に限らない。ローマ神話では「ルナ」、ギリシャ神話では「セレーネ」とか「アルテミス」と呼ばれ、信仰の対象でもあった。だが、アポロ宇宙船の月探査以降、月のイメージはすっかり変わった。科学的調査にとって興味の尽きない天体になった。

月の直径は、地球の約 3.7 分の 1 で 3475km。重力はおよそ 6 分の 1、大気はほとんどなく、気圧はゼロ。最高表面温度は 123 度C、最低はマイナス 233 度Cと差が激しく、平均はマイナス 23 度 C である。月は、地球から平均して 38 万kmのところを、約 27 日かけて公転している。自転周期は公転周期に一致している（自転と公転が同期している）。月の表側は裏側よりやや重い。そのため、月は常に表側を地球に引っ張られている。地球上の我々は、常に月の表側を見ているわけである。1959 年 10 月に打ち上げられたロシアのルナ 3 号が月の裏側を始めて我々に知らせてくれた。

月の表側は、高地あるいは山岳地帯と呼ばれる、天体との衝突による破片に覆われた明るい領域が多い。そこには無数のクレーターがあり、大きなクレーターでは、衝突時に飛び出した噴出物が再び月面に落下し、副次的なクレーターをつくっている。満月が近づくと、そのクレーターの列が四方八方に光の筋として伸びているのが見える。また、巨大なクレーターの底には、内部から溶岩が流れ出た「海」と呼ばれるところがある。この滑らかな海のように見える部分は暗く見える。こうした明暗の地形が肉眼でも見え、日本ではウサギの餅つきに見立てられてきた。一方、月の裏側は海が少なく、白っぽく見える「高地」が多い。アポロの探査により、この高地と言われる部分の方が海より年齢の古いことが明らかになった。

月はほとんどが岩石でできている。その密度は内部に行くほど高い。マントルと地殻の存在は確認されているが、核(コア)の存在については長い間分からなかった。しかし、1998 年に打ち上げられたアメリカの月探査機ルナ・プロスペクターの観測によって、月の核は全質量の 2%ほどであることが判明した(地球の場合は、核の質量は全質量の 30%)。なお、月の極地には氷の形で水が存在しているが、液体の水や風はない。従って、浸食作用は見られない。

天文学者たちは月の生成過程を究明するため、①ロシアのルナ計画が持ち帰った 300 グラムの岩石、②アメリカのアポロ計画が持ち帰った 400 キログラムの岩石(今日では、月の特殊な位置から採取されたものと分かり、月全体について論じるには慎重さが求められている)、③月から地球に飛来した 100 個ほどの総重量 38 キログラムの隕石(月の 56 か所の異なる地点から飛来したことが判明している)などを分析した。
その結果、これらの岩石は、①「鉄に富む斜長岩(45-44 億年前)」、②「マグネシウムに富む岩石(44-40 億年前)」、③「アルカリに富む岩石(44-40 億年前)」、④「カリウム、希土類元素、リンが高濃度で集まっている岩石(39 億年前)」の 4 種類に分けられる。そこから、かつての月の表面はマグマの大洋に覆われていたが、そこにカリウムやリン、希土類元素が集まって固化し、現在のような月が形成された、と推測される。

これらのデータは、月の誕生が地球と同じ 45 億年ほど前であることを示している。たぶん、誕生間もない原始地球に、地球の 10 分の 1(火星サイズ)ほどの天体が衝突し、地球のマントルが吹き飛ばされてバラバラになった物質が合わさって月が形成された(ジャイアント・インパクト説)と思われる。このように考えると、①月の平均密度が地球に比べて低いこと(5.515 対 3.340)、②地球と月が同じ酸素同位体比をもつこと(酸素には 16、17、18 の三つ質量数があり、その存在比が同じであること)、③月の岩石はカルシウムやアルミニウムのような蒸発しにくい物質を多く含んでいる一方、蒸発しやすい元素の量は少ないこと(衝突時の特別な高温・高圧のエネルギーにより揮発性の高い物質は蒸発してしまったと考えられる)など、すべてのことがうまく説明できる。

一方、月の岩石に含まれるガラス(丸い溶融ガラスの粒)は、「アルゴン一アルゴン年代測定法(アルゴン元素の同位体を比較して岩石の年代を明らかにする方法)」によって、そのほとんどが 39 億年前のものと分かった。月には多くのクレーターがあり、それらの年代も 39 億年前を示している。これらのことから月が形成されて 6 億年後(約 39 億年前)に太陽系に大変動(隕石の重爆撃期)があり、無数の天体が月に衝突したと考えられている。

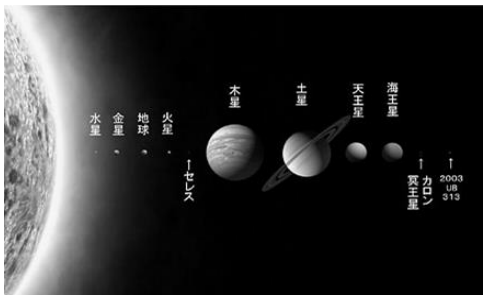
人は月に住むことができるのか。もし水、空気、食料、適温の四つが確保されるなら、それは可能である。短期間ということであれば、それらは何とかなるだろう。しかし長期になると、その一つ一つがネックになってくる。むろん、何のために定住するのかということは、より根本的な問題である。月面天文台でも組み立て、安定した宇宙ステーションをつくりたいというような目的でもあれば、定住する意味もある。そうでもない限り、月は地球から眺めていた方がずっとよい。

アポロ 11 号　月面着陸

Ⅲ. 太陽系の惑星

太陽の周りを回っている惑星は、地球を入れて 8 つある。しかし、太陽系の惑星を「水・金・地・火・木・土・天・海・冥」と覚えた人は多いだろう。とすると、惑星は 9 つあったことになる。ところが最近、最後の「冥王星」は惑星としては数えられなくなった。その辺のいきさつから話を進めていこう。

惑星とは、恒星（核融合のエネルギーで自ら光り輝いている星）の周りを回る「光を発しない天体」と、一般には理解されてきた。太陽系で言えば、太陽の周りを回っている天体である。ごく最近まで、その定義について議論されることはなかった。太陽系の惑星のうち、土星までの 6 つは古代からよく知られていた。そして、観測技術の発達と共に、1781 年に天王星が、1846 年に海王星が発見された。冥王星は、海王星や天王星の軌道の乱れから、1913 年にローウェルによってその存在が予測された。実際には、1930 年に彼の助手だったトンボーが観測によって発見し、第 9 番目の惑星とされた。



冥王星は、発見された当初は地球ぐらいの大きさがあると推測されていた。ところがその後の観測により、直径は月の 3 分の 2 ほどしかなく、内部構造も厚い氷の層が岩石の核を取り巻いていることが分かった。さらに、他の惑星の公転軌道はほぼ円形であるのに、冥王星は楕円形で、軌道自体が他の惑星の軌道平面上から17 度傾いていた。このように、冥王星の姿が詳しく分かってくると、冥王星をこのまま惑星に数えておいてよいのかという議論が湧き上がった。しかし、惑星の一つに認められたという歴史的な経緯が尊重され、ごく最近まで惑星として位置づけられてきた。

20 世紀後半の光学機械は、驚くほどの進歩を遂げた。太陽系の調査はかってないほどのスピードで進んだ。特に 1992 年に発見された小惑星 1992QB1 は、海王星の外側を回っており、冥王星とよく似た特徴をもっていた。そのとき以降、海王星よりも遠い太陽系の外縁部に、たくさんの小天体が次々発見されるようになった。現在では、その数は 1,000 個以上に及んでいる。特に、冥王星のサイズに近い「エリス」や「セドナ」、「クワオア」のような天体も見つかり、「惑星としての資質は何か」という問題が、改めて持ち上がった。

国際天文学連合は、冥王星を惑星として、70 年以上も認めてきた。それをいきなり惑星から外してもいいものかという声もあり、簡単には答えを出せなかった。1998 年には、冥王星は惑星としたままで、小惑星としての番号をも割り振ってはどうか、という妥協案が提出された。しかし、それは理解が得られず、頓挫した。そこで、2 つの委員会が招集された。そこで 3 年間にわたって慎重に検討され、2006 年の総会で決定されることになった。

2006 年 8 月、第 26 回国際天文学連合総会がチェコのプラハで開かれた。そこで、それまで曖昧だった惑星の定義を次の条件を満たすもの、と決められた。①太陽の周りを回っている、②質量が大きいため自己の万有引力で強くまとまり、ほぼ球形になっている、③その軌道の領域で他の天体を力学的に一掃している、の三つである。続いて、冥王星を惑星として残すかどうかが審議された。そして会員の投票の結果、冥王星は惑星ではなく、「準惑星」と決定された。天王星は、準惑星の通し番号 134340 が割り振られ、第二の人生を歩み出すことになった。

そのとき「ケレス（小惑星帯にある）」及び「エリス（冥王星の近くにある）」も「準惑星」として認められた。さらに、2 年後の 2008 年 7 月には「マケマケ（冥王星の近くにある）」が、9 月には「ハウメア（冥王星の近くにある）」が追加された。従って、現在は 5 つが「準惑星」に登録されている。なお、「準惑星」の定義はあいまいで、類似した天体が現在多数発見されている。今後さらに多くの準惑星が追加されることが予想される。

以上のような歴史的経緯より、冥王星は、次項の「惑星未満の小天体」において扱う。ここでは、8 つの惑星のうち、既に述べた地球を除いた 7 つの惑星について解説しよう。

1. 水星

水星

水星は太陽に最も近い軌道(0.39 天文単位)を回っている。ローマ神話では、商業と盗賊の守護神「マーキュリー」の名がつけられた。ギリシャ神話では、神々の伝令者「ヘルメス」の名で呼ばれている。

地球より内側を巡る水星や金星を「内惑星」、外側を巡る火星以遠の惑星を「外惑星」という。外惑星は、適切な時期になると、太陽と反対方向の夜空に輝く。しかし内惑星は、地球から見ると太陽の傍から大きく離れることはない。従って、夕方か明け方しか見えない。

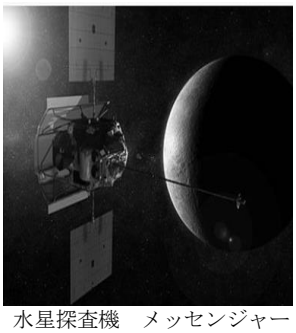
水星は太陽系の惑星では最も小さく、直径は 4,870km。月より少々大きく、地球の 5 分の 2 ほどである。重力は地球の 3 分の 1 程度。質量の約 70%が金属で、特に鉄が多く、中心部には鉄とニッケルの合金の核(コア)がある。そのコアが直径の 4 分の 3 近くを占め、残りは岩石である。普通コアができるときは、重いものが中に沈み、熱が発生して膨張する。ところが水星の場合は、その期間は短く、誕生直後から冷却され、収縮が起こった。公転周期は太陽に近いので大変早く、約 88 日。自転周期は比較的ゆっくりでおよそ 59 日、公転周期の 3 分の 2 である。

水星は、他の惑星同様、太陽を焦点とする楕円軌道を描いている。この楕円軌道で最も太陽に近くなるところを近日点という。よく観察すると、水星の近日点は少しづつずれていくことが分かった。他の惑星からの影響をすべて考慮しても、この水星の近日点のずれを説明することはできなかった。ところがアインシュタインは、一般相対性理論により、この未知の影響を「太陽の重力によって時空が歪んだ結果である」と説明した。水星は太陽系の中で最も小さな惑星だが、アインシュタインの相対性理論を実証する偉大な立役者になったわけである。

水星探査機　マリナ―10 号

水星は太陽に近いので観測がとても難しい。長い間詳しい情報は得られなかった。しかし、アメリカの探査機マリナー10 号(1973 年～75 年)とメッセンジャー(2004 年～12 年)が水星に接近し、これまで分からなかった情報を数多く届けてくれた。また、2015 年以降ではあるが、日本とヨーロッパの共同で、探査機ベピ・コロンボが打ち上げられる予定である。

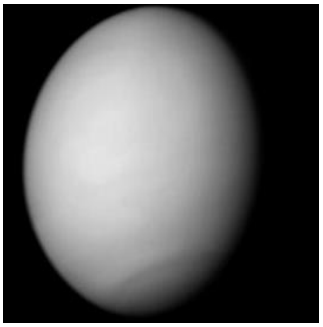
これまでの調査結果によると、地表には、月同様、クレーターが浸食作用を受けずに残っている。大小のクレーターに混じって、巨大なカロリス盆地(直径 1300km)がある。それは、小惑星の衝突による溶岩流出によって形成された。その盆地の正反対の部分(対極点)には、多くの直線状の丘陵が複雑に錯綜している。これは、衝突の衝撃が水星の内部を伝わって、ちょうど正反対の場所に集中したことを示している。またところどころに「リンクル・リッジ」と呼ばれる崖のような地形が見られる。水星が収縮した時にできたものであろう。


水星探査機　メッセンジャー

水星の表面には、「エンスタタイト(酸化マグネシウムとケイ酸からできている輝石)」という物質が存在する。水星には磁場はあるが、衛星や環はない。水星の周囲には希薄なガス層があり、太陽風が強く吹きつけている。その地表からは酸素やナトリウム、ヘリウム、カリウム、水素、カルシウムなどが吹き上げられ、漂っている。しかし、気圧は実質的にゼロに近く、大気と言えるほどのものはない。表面温度は、太陽に照射されている面は320から450度Cと高いが、夜間はマイナス 170 度Cまで下がる。平均は 167 度Cである。

水星の起源については、三通りの説がある。第一は、微惑星が集まるとき、鉄は集まりやすいので先に集まって核となり、その後岩石に富むものが集まったという「選択的集積説」。第二は、激しい太陽の活動期に、岩石などの表面物質が蒸発した結果、鉄が多く残ってその鉄を中心に惑星が生じたという「蒸発説」。第三は、水星のもとになるような塊に別の天体が衝突し、その中心核同士が合体して大きくなったという「ジャイアント・インパクト説」

である。最近の多くの科学者は、三番目の説に傾いているが、今のところ決定的な証拠はない。


金星

2. 金星

金星は太陽から二番目に近い惑星で、水星と地球の間を回っている。古くから愛と美の女神「ヴィーナス」の名で呼ばれている。

赤道面での直径は 12,104km、地球よりやや小さい。地球に比べ、質量は80%、重力は90%、平均密度は95%と、地球に近い形態なので、「地球の兄弟星」と見られることが多い。しかし、地表環境はかなり異なる。

金星の公転周期は225日で、他の惑星同様、北極から見ると反時計回りである。それに対し自転の周期は243日で、極めてゆっくりである。しかも、太陽系の他の惑星と違い、北極から見て時計回りである。惑星の公転軌道や速度は、万有引力によって決まる。しかし、自転についてはこのような制約はなく、それぞれの惑星の形成過程によって決まる。他の惑星がすべて公転運動と同じ方向に自転しているのは、そうなりやすいよう「ガス惑星円盤」が動いていたからである。それに対し、金星の場合は、その形成の最終段階において、一つの小型惑星がたまたま逆回転の向きで衝突し、金星の自転方向を変えてしまったと考えられる。

金星には衛星もなく、磁場もない。地表環境は他の惑星とは大きく違い、厚い雲が全面を覆っている。従って、表面を観測することはできない。可視光では地表は見えないので、波長が 1メートルから10メートルぐらいのレーダーを使って観察する。大気圧は92気圧もあり、しかも地球のように水や氷ではなく、硫酸でできた分厚い雲に覆われている。その雲の下は灼熱地獄のようで、表面の温度は753Kある。そのため、硫酸の雲から落下する硫酸の雨は、途中で蒸発してしまい、金星表面までは届かない。これだけ熱いのは、金星の大気の大部分を占める二酸化炭素が、温暖化ガスとして温室効果現象を引き起こすからである。

この厚い雲は太陽の光を効率よく反射している。この雲の反射率は 0.78（入ってくる光の 78%を反射している）で、太陽系の惑星の中では天王星に次いで2番目に高い。地球に近いので、金星は太陽と月に次いで3番目に明るく見える。しかし、水星と同じく内惑星なので、せいぜい日の出 3 時間前からか、あるいは日没3時間後までしか見えない。日の出のときに東に現れる金星を「明けの明星」、日没の時に西に現れるのを「宵の明星」と呼ぶ。

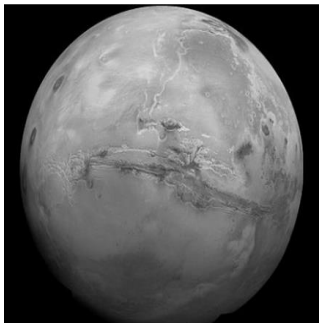
探査機　マゼラン

金星は表面が厚い雲に覆われているため、長い間表面のようすは分からなかった。しかし、1990 年にアメリカのマゼラン探査機が金星に到着し、貴重なデータを送ってきた。それによると、金星の地表は非常になめらかで、平らなところが多い。しかし、広大な高地や火山活動によると思われる火山や溶岩地形も見られる。特に直径2,200kmもある「アルテミス渓谷」と呼ばれる外堀状の環状地形は、「コロナ」と呼ばれている。高さ8kmの火山「マート山」には、地球の楯状火山に似た長大な溶岩流の痕跡が認められる。直径が数十km程度の小規模の火山では、ドームと呼ばれる地形や、コーンと呼ばれる小さな噴火口地形もある。金星の火山活動は地球に似ているが、現在も続いているかどうかは、はっきりしない。

金星には 940 個のクレーターがあり、全域にまんべんなく分布している。月や水星のように大気がないと小さなクレーターもできるが、大気があるので、小さな隕石は大気との摩擦で燃え尽きてしまう。従って、金星には直径2km 以下のクレーターはない。しかも金星のクレーターは、月や火星のものに比べ底が浅い。地表付近は風が弱いので風化せず、水による浸食もない。保存状態がよかったので、最初の構造をほぼそのまま留めている。

クレーター、地殻変動の地形、火山などはまんべんなく分布している。その形成過程において、全マントル規模の運動が活発に行われ、溶岩が噴出し、全球的に地表を更新するような事態が生じた。その結果、高地と高地の間はすべて溶岩平原によって埋め尽くされ、標高の高い部分のみ埋もれずにそのまま高地として残った。マントル物質が噴き出たところには火山やコロナが生まれ、その周辺の地表には亀裂や地溝帯ができた。その後マン

トルの活動が落ち着くと、一転して上昇したマントル物質が沈下し、これに伴って圧縮した地形が生まれた。金星ではおそらく、惑星誕生以来このようなプロセスが何度も繰り返されたと思われる。


火星

3. 火星

火星は、太陽から四番目、地球のすぐ外側を回っている惑星である。肉眼では不気味なほど赤く見えるため、血の色を連想させ、ローマ神話の軍神「マルス」の名前がつけられた。

火星の直径は地球のおよそ半分で6,787km。重力は3分の1。火星の自転周期は 24 時間でほぼ地球に等しく、自転軸の傾きも約 25 度でほとんど変わらない。地球に似て四季もあるが、一年の長さは 687 日とほぼ倍に近く、地表面の環境はそれほど似ていない。火星は楕円形で、20km 程度極方向に縮んでいる。南半球は高地で玄武岩に覆われているが、北半球は低地で安山岩が多い。平均すると北極が約 3 キロ低く、南極は約 3 キロ高い。

火星の公転運動は、かなりの楕円軌道を描いている。太陽に近い近日点と太陽から離れている遠日点とでは、太陽から受けるエネルギー量は大きく違う。地球の場合はほぼ円軌道なので 3%ほどの違いだが、火星の場合は40%以上の差がある。この差が火星の北半球と南半球の気候に大きな違いをもたらしている。南半球は北半球に比べ、春と夏は短くて暑く、秋と冬は長くて寒い。最高気温は夏の赤道付近でようやく 20 度 C、冬は南北の極冠に氷の層ができる。

火星に磁場はない。しかし、南半球の古い形成年代の地殻や古い岩石の中には、強い磁気異常が見られる。火星が誕生した頃、核は十分に熱く、ダイナモ作用による磁場が発生し、溶岩が噴出して帯磁した岩石になったのであろう。火星の南半球の高地には、「磁気ベクトルが逆方向を向いているためにできる地磁気の縞模様」が見られる。これは、地球の海底にも多く見られるもので、地球のプレート・テクトニクスに似た運動がかつての火星にもあったと推定される。

火星でも、地球と同じような大気の運動が確認されている。しかし、火星の重力が小さいので、大気の相当量が宇宙に逃げてしまい、地球の 100 分の 1 以下の大気圧しかない。火星の大気の 95%は二酸化炭素であるが、他に窒素 3%、アルゴン 1.6%、微量の水蒸気などが含まれている。この二酸化炭素を主とする薄い大気は、鉄さびを含んだ赤い土(このため火星は赤く見える)や砂を巻き上げる砂風を起す。

この砂風は、局地的には年に 100 回ほど起きるが、ときには全球を覆ってしまうほどになる。これは火星の大気が薄く、水蒸気も極端に少ないために起こる。一度強い砂風が起こると、巻き上げられたチリが太陽の熱を吸収して上昇気流を加速し、どんどん大規模になっていく。地球の場合は大量に水蒸気が含まれているので、雨になって上昇気流のエネルギーが吸収される。しかし火星の場合は、水蒸気が 0.1%以下なので、雨は降らない。そのためいったん砂嵐が大きくなると、とめどなく大規模になる。

火星は地球に近いので多くの探査機が送られ、太陽系の中でも最も調査が進んでいる。経度 250 度の赤道付近には「タルシス」と呼ばれる火星最大の火山地域(直径数千 km)がある。中でもオリンポス山は、周囲の地表より27,000メートルも高く、非常に大きな火山である。さらにその傍には、アルシア山、パヴォニス山、アレクレウス山などの有名な三山があり、北方の裾野にはアルパ・パテラ山などがある。また、この「タルシス」の東側には、赤道に沿って東西に 4,000km(火星の 3 分の 1 に及ぶ)、深さ 7,000 メートル、幅は最大で 200km の「マリネリス渓谷」がある。このマリネリス渓谷の北側には、「チャネル」と呼ばれる流水地形が多くみられる。高地に降った水が流れ、支流が集まって本流をつくっていくような感じで、地球の川によく似ている。クレーターもたくさん残されている。

探査機　フェニックス

火星地表の地質は、「ノアキノン期(41-36 億年前)」、「ヘスペリ

アン期（33-29 億年期）」、「アマゾニアン期（29 億年以降）の三つの時期を経過して形成された。堆積岩の発見などから、火星が湿潤だったのは 40 億年前のノアキノン期で、それ以降は今日のように乾燥した気候に変化したようである。さらに、その頃のクレーターが火星にも多数発見されているので、月に 39 億年ほど前に「隕石の重爆撃期」があったように、火星にも同じような出来事が起こったと考えられる。

地球と火星は隣同士の惑星で、26 か月ごとに接近する。火星がかなりの楕円軌道を描くため、地球に近いときと遠いときとでは距離が倍ほども違う。火星の大きさはかなり違って見える。地球と火星は、15 年か 17 年に一度大接近する。2003 年には 5,600 万 km と、6 万年に 1 回しか起こらないほど近づいた。

火星に生命は存在していたのか。世界中の学者がこの問題に取り組んでいるが、いまだ答えは出ていない。生命が存在するためには、有機物、水、エネルギーの 3 つが必要である。まず有機物については、大気中にメタンが存在していることが、最近になって報告されている。地球のメタンの多くは生物活動によって生じるので、火星にもメタン生成細菌がいるかもしれない。でも、今のところ分からない。
もしアミノ酸など有機化合物が見つかれば、生命存在の直接の証拠になる。今のところは発見されていないが。米航空宇宙局（NASA）の探査機キュリオシティは、火星の岩石から、生命活動に欠かせない硫黄、窒素、水素、酸素、リン、炭素の 6 元素を確認している。しかしその試料は、強い紫外線や放射線に絶えず曝されてきた表面土壌なので、有機物は分解されている。地中数メートル以下の土壌を調査しないと、本当のところは分からない。

次に水はどうか。現在の火星では、表面に海は見当たらない。2001 年に打ち上げられたNASAの「マーズ・オデッセイ」や 2003 年にヨーロッパ宇宙機構の火星探査機「マーズ・エクスプレス」などの観測により、極冠には氷の存在が確認されている。さらに 2003 年に打ち上げられた「スピリット」と 2004 年 1 月に火星に着陸した「オポチュニティ」は、火星の岩石や地層構造より、過去に大量の水があった証拠を明らかにした。2007 年 8 月にアメリカが打ち上げた着陸型火星探査機「フェニックス」は、火星の北極域の地表のすぐ下に水の存在を確認した。

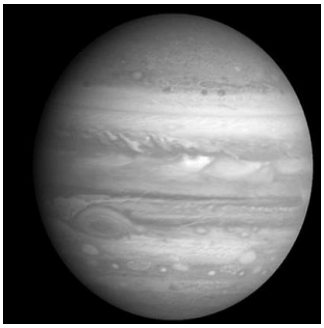
またエネルギーについてであるが、現在の火星ではマグマなどの内部活動はほとんど見られない。しかし、誕生後間もない頃であれば、活発な活動があり、生命を誕生させるのに十分なエネルギーが供給されていた可能性はあった。以上のようなことから、今から 30 億年～40 億年昔には、何らかの生命活動が見られた可能性はあろう。現時点では、それ以上のことは言えない。

現在 NASA やその周辺では、20 年後に火星に居住する可能性を検討している。現在の火星は大気が少なく、表面温度はマイナス 60 度 C である。火星の大気中の二酸化炭素を増やして温暖化を図って適温にするとか、地表近くの凍土を溶かして水を得ることが可能になるなら、移住できる可能性は高くなる。とはいえ、すべてが都合よく進んだとしても、20 年後は無理だろう。たぶん 50 年か 100 年先の話になろう。

4. 木星

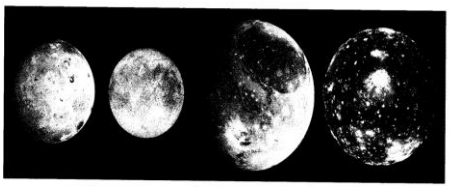
木星は、太陽から数えて 5 番目の惑星である。太陽からかなり離れているが、金星に次いで明るく、どっしり輝いている。風格高い星として、ローマ神話の最高神「ユピテル（ジュピター）」と命名されている。木星は約 12 年かけて太陽を公転している。地球から見た木星の位置は、黄道上を 1 年に約 30 度ずつ、東へ進んでいる。黄道上には 12 の星座があり、黄道十二宮と呼ばれていて、ほぼ 30 度ごとに並んでいるため、木星はこれらの星座を 1 年ごとに巡ることになる。

木星から外側の 4 つの惑星（木星、土星、天王星、海王星）は、これまで述べてきた内側の岩石質の惑星とは性質が異なっている。固い地面がなく、巨大で、表面はガスが熱く層をつくっているので、これらはまとめて「木星型惑星」と呼ばれている。特に木星と土星は水素やヘリウムが多く、太陽の成分と似ていること、氷や岩石の中心核が比較的小さいことから「巨大ガス惑星」と呼ばれている。


木星

木星は、太陽系最大の惑星である。直径は 142,800km と地球の 11 倍。質量は太陽のほぼ 1,000 分の 1 であるが、地球の 318 倍もある。木星の成分は水素が多いので、もし現在の重さの 50 倍から 100 倍ほどの質量があれば、中心部で

核融合が起こり、もう一つの太陽（恒星）になっていたかもしれない。体積は地球の1,300倍、重力は2.36倍。木星はこれほど巨大な惑星でありながら、わずか10時間ほどで自転している。


左からイオ、エウロパ、ガニメデ、カリスト

木星の中心部には重い鉄と岩石などの成分からなる核（コア）がある。その周りには、厚い液体金属水素の層がとりまいている。これらの中心部からは、まだ相当量の熱が発生している。従って、木星は赤道も極もほとんど温度が変わらない。これは、地球型惑星の表面温度が太陽光に支配されているのと対照的である。

木星の大気層の底部の気圧は、およそ1,000気圧にもなる。気温は、ガス層上空の1気圧相当部分の場所でマイナス108度C。大気の組成成分は、ガス層上部で水素が約90%、ヘリウムが約10%、メタン、アンモニア、水蒸気などが微量成分としてわずかに存在する。水素やヘリウムは無色透明だからその存在は見えない。木星の写真に複雑な色が見られるのは、大気中のメタン、アンモニア、水がいろいろな色の雲をつくっているからである（赤っぽい色はリン酸系化合物、白っぽいのは水蒸気）。ガスの雲をつくる温度はその種類によって違うので、色の違いは温度の違いを反映している。その表面の温度は大気の運動によって引き起こされる。

特に、赤道付近では秒速約100メートルの西風が吹き、中緯度になるにつれ西風と東風が交互に吹くようになる。それが木星の高速自転によって、木星特有の縞模様（暗く見える部分を「縞」、明るい部分を「帯」と呼ぶ）や「赤斑」とか「白班」と呼ばれる渦をつくる。このような激しい大気運動の原動力は、太陽から受け取るエネルギーというより、内部から放出されるエネルギーである。そのエネルギーは、木星ができたときの衝突エネルギーが熱として蓄積され、それが今も表面に流れ出ているのではないかと思われる。

特に、木星の南半球には、地球が2個すっぽり入るほどの大きな「大赤班」がある。東西26,000km、南北14,000kmもある巨大な楕円形の模様で、周期約6日で回転する大気の渦である。それは、17世紀に発見されて以来、色の濃淡や大きさ、形を変化させながら、300年以上存在し続けている。なおハッブル望遠鏡は、2006年4月に「大赤班」の南に新たな「赤班」が出現したことを突き止めた。その直径は「大赤班」の半分ほど（地球とほぼ同じ）で、「ジュニア」と名づけられた。

木星は、太陽を除いて太陽系最大の強力な電波源をもっている。その原因は地球より数十倍も強力な磁場にある。この磁場がつくる磁気圏の中に、後述する活火山をもつ衛星「イオ」が公転している。イオから放出されるガスが磁力線を横切ることによって、巨大な電流が発生している。その発電量は10億KWとも推定されている。その電流が粒子として木星の極地方に衝突し、オーロラが発生する。また同時に、強い電波を発生させている。

木星の極地方には（土星も同じ）、さまざまな色や形をした神秘的なオーロラが観測される。オーロラは、太陽からの高エネルギーをもつ荷電粒子（太陽風）が惑星の磁気圏にとらえられ、南北の磁極に向けてらせん状に落ちていくときに、大気中の上昇分子と衝突し、発光することによってつくられる。木星のオーロラ発生のメカニズムは、地球や土星とは違い、イオ、ガニメデ、アウロバの三衛星が関係している。特にイオの活火山から噴出された酸素や硫黄の影響が大きく、地球のオーロラより千倍も高いエネルギーをもち、複雑な構造をつくり出している。

木星、天王星、海王星などの木星型惑星にも、規模の違いはあるものの、環が存在する。しかし、いずれも土星の環ほど明るくないので、天体望遠鏡で確認することは難しい。宇宙探査機に頼らざるを得ない。木星の環の幅は6,400km、木星半径の1.72倍から1.81倍ほどで狭い。この環の近くには2つの小さな衛星（J15アドラステアとJ16 メティス）があり、その重力作用によって小さな粒子が広がらないように保たれている。これらの衛星は、環の粒子を羊に見立て、それが散らばらないように見張っているところから「羊飼い衛星」とも呼ばれている。

木星の衛星は、これまで観測されたものだけでも65個確認されている。今後より詳細に観測されれば、さらにその数は増えるだろう。一般に木星や土星は多数の衛星をもつが、共通の特徴がある。母惑星に近い衛星群はサイズも大きく、その赤道面付近に軌道面をもち、母惑星の自転方向の向きに公転している。これに対して、母惑星から離れた衛星群はサイズが小さく、軌道面もバラバラで、逆行しているものが多い。こうしたことから、内側の衛星群を「規則衛星」、外側を「不規則衛星」と呼ぶことがある。

木星の衛星の中では、「ガリレオ衛星」が有名である。1610年にガリレオによって発見された4つの衛星である。

「ガニメデ」は、太陽系の中で最大の衛星で水星よりも大きく、氷と岩石が半々ぐらいの割合でできている。「カリスト」は、水星と同じぐらいの大きさで、地質活動の痕跡はなく、他の衛星とかなり様相が異なっている。「イオ」は、月より少し大きく、唯一地球以外にたくさんの活火山をもっている。「エウロパ」は、月より少し小さく、表面の氷層の下に氷が溶けた状態の海があり、生命の可能性が指摘されている。

5. 土星

土星は、木星に次いで太陽系で二番目に大きな惑星である。赤道面での直径は 120,536km で地球のおよそ 9.4 倍。質量は 95 倍もある。平均密度は 0.70（1 ㎤あたり 0.7g）で、太陽系の惑星の中では一番低い。赤道面に比べ南北方向の極の直径は 10%ほど短いため（土星の扁平率は 0.108）、上下に潰されたように見える。自転は 10 時間 39.4 分と速く、自転軸は 27 度傾いているので、四季がある。公転周期は約 29.5 年である。

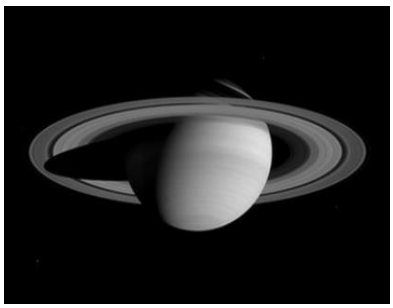
大気成分は、水素 96%（質量比 75%）、ヘリウム 3%（質量比 24%）、残りの 1%は水蒸気、メタン、アンモニアである。大気層の下には液状の金属水素の層があり、中心部には岩石からなる核がある。平均温度はマイナス 140 度Cと低いが、表面は厚い雲が覆っている。そのため、木星に見られるような縞模様は観測できず、土星の輪郭自体もはっきりしない。それでも木星同様、明るい部分を「ゾーン（帯）」、暗い部分を「ベルト（綿）」と区別できる。木星は 30 度の低い緯度までしかゾーンとベルトが見られないのに対し、土星ではもう少し高緯度まで見られる。

赤道付近の雲は秒速 480 メートルという猛烈な速さで東に向かって動いている。これは木星の雲の流れの 4 倍の速さであるが、なぜこのような現象が起きているのかは分からない。大気層の多くを占めているのは分子状の水素である。内部に向かってその圧力が高くなると、金属水素になる。実は土星内部では、木星同様かなりの熱を出している。大気中のヘリウムがこの金属水素の中にどんどん取り込まれ、雨のように液滴となり、エネルギーが解放されるからである。

太陽系が誕生した頃、微惑星（小型の惑星）が太陽の周りをたくさんまわっていた。土星の元になった惑星もその一つだったが、より小さな惑星の中には土星と正面衝突したり、吸収されて土星の一部になっていった。しかし、中心が少しずれて衝突したものは合体せず、土星のかなり近くを回り始め、「環（リング）」や衛星になった。

土星の最大の特徴は「環」である。数十年前までは「複数の環が存在するようだが、成因は不明」という程度の知識しかなかった。その後 1980 年頃までに 4 つの「環」が確認され、A 環からD 環と名づけられた（AからDというのは、発見順による）。1981 年のボイジャーの観測により、さらに 3 つの「環」が発見され（E 環から G 環）、合計 7 つの「環」があることが判明した。その順番は、土星の近くから、D 環、C 環、B 環、A 環、F 環、G 環、E 環となる。

土星の環は、細かい米粒大から直径 10 メートルぐらいの氷のかたまりである。環の厚さはわずか数十メートルから 200 メートルぐらいであるが、直径は 25 万 km 以上ある（最遠の環は 60 万 km）。レコードの溝のように同心円状になった無数の環は、土星やその衛星の重力が絶妙に働くことで保たれている。それがどのようにして出来上がったのかは、個々の環によって異なる。2009 年 2 月には、環が一直線上に並び、4 つの衛星とその影が土星表面に勢ぞろいするという、極めて珍しい現象が観測された。


土星

土星には 60 個以上の衛星がある。これらの衛星のうち 16 個の衛星は、環の範囲の中で環と共存しながら土星を回っている。その中で、1665 年天文学者ホイヘンスによって発見された「タイタン」がとくに有名である。水星より大きく、窒素を主成分とする濃厚な大気があり（気圧は 1.5 から 2 気圧）、地球と同じように雨が降り、湖や海をつくるという循環系がある。メタンの分解によってアセチレンと水素が豊富に存在するので、それらを食料とするメタン菌が存在するのではないかと注目されている。もう一つ注目されている衛星は、1789 年にハーシェルが発見した「エンセラダス」である。大きさは月の 8 分の 1 ぐらい。表面の

土星に接近するカッシーニ

氷殻の下には水の海が存在するので、生命が存在するのではないかと期待されている。

ウィリアム・ハーシェル

6. 天王星

天王星は太陽から数えて 7 番目（約 19.2 天文単位）の惑星である。肉眼では見えなかったが、1781 年に初めてイギリスの天文学者ウィリアム・ハーシェルによって発見された。その名前「ウラヌス」は、ギリシャ神話の「ゼウス神」の祖父にあたる。

天王星の直径は 51,118km で地球の 4 倍ほど。木星、土星に次いで、太陽系では 3 番目に大きい。地球に比べ質量は約 14 倍、平均密度は 4 分の 1 程度、重力は少し小さい。惑星内部は元素に富み、岩石のほかに酸素、炭素、窒素から成っている。太陽からの平均距離は約 30 億 km と遠く離れているが、反射率は 0.51 で比較的明るい。

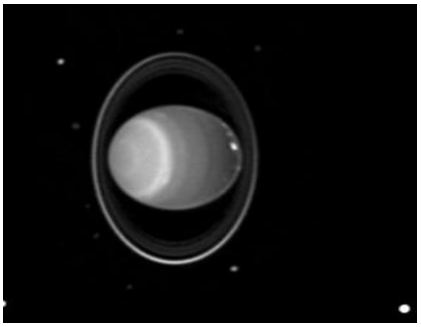
自転周期は 1 日 17 時間 12 分で、逆行自転している。その自転軸は軌道面に対して約 98 度も傾いている。つまり、ほぼ横倒しの形で公転していることになる。天王星が形成されて間もないころ、地球ぐらいの大きさの天体が斜めに衝突し、自転軸が大きく傾いたと思われる。天王星にも磁場があり、その強さは地球とほとんど同じ。普通、自転軸と磁軸とは一致しているが、天王星の磁軸は自転軸に対して 60 度傾いており、磁軸の方が軌道平面に垂直に近い。

天王星は 84 年かけて太陽の周りを回っている。自転軸の傾きでほぼ横倒し状態で回っているので、ある時期には南極、別の時期は北極を太陽に向け続けて周回している。つまり、北極や南極では、昼夜が 42 年間続くことになる。それに伴い、環も衛星の軌道も公転面に対してほぼ直角になる。環と本体に近い規則衛星群はどちらも王星の赤道面に沿っているので、地球から見るとほぼ垂直に回っているように見える。

天王星は、主にガスと多様な氷から成り立っている。大気の組成は水素が約 83%、ヘリウムが 15%、残りの 2% はメタンである。天王星は、大気に含まれるメタンが赤色光を吸収するため、青緑色に見える。メタン雲は、緯度の低い場所では相当早い速度で運動している。天王星の内部には熱源がないので、メタン雲は太陽から受け取るエネルギーによって運動しているはずである。ところが、極付近と赤道付近とではそれほどの温度差はなく、太陽からのエネルギーは均等に分配されている。従って、どのようなメカニズムでメタン雲が動いているのかは、今のところはっきりしない。

天王星には、現在 13 本の環が見つかっている。どれも数十メートルと細く、土星と比べ環同士の間隔は広い。また土星の環は主に氷でできているが、天王星の環は岩石や炭素質の物質が多く、光をあまり反射せず、暗くてよく見えない。天王星の環も、地球から見える形は、土星同様季節によって変化する。2007 年にはハッブル望遠鏡によって、環が地球に対して真横を向き、直線状になった現象が撮影された。これは 42 年に一度しか起こらない現象である。

環の中でも、天王星の最も外側にあるE環はとりわけ細いもので構成されている。大小の氷や岩のかけらは砂粒ほどの小さな粒子で、長い年月の間にはお互いに衝突を繰り返し、幅は自然に広がってしまう。ところが、E環のすぐ外側にある「コーデリア」と内側にある「オフェーリア」という二つのほぼ同じぐらいの大きさの衛星が、その間にある環の粒子が広がらないよう重力作用を及ぼしている。中間に挟まれた環をこのように細いまま保つ役割を担っている衛星を「羊飼い衛星」と呼ぶ。それは、土星のF環でも見られた（「パンドラ」と「プロメテウス」のケース）。この種の衛星は、他にもたくさんあると推定される。


天王星の環と衛星

天王星には、2010 年の時点で 27 個の衛星が発見されている。その内の「ミランダ」、「アリエル」、「ウンブリエル」、「タイタニア」、「オベロン」などが大きな衛星で、有名である。一つ一つを紹介する時間的余裕はないが、そのようすは最近かなりよく分かってきたことだけは伝えておこう。

7. 海王星

海王星は、太陽から一番離れた 8 番目の氷惑星（約 30.1 天文単位）である。海王星の名となった「ネプチューン」はローマ神話の「海の神」を指し、ギリシャ神話の「ポセイドン」に相当する。

ヨハン・ガレ

この海王星には、発見にまつわる興味深い話がある。1781 年に天王星が発見されたが、その天王星の軌道の観測結果を分析したところ、軌道が外側にずれていた。1846 年にイギリスのジョン・アダムスとフランスのユルバン・ルヴェリエという二人の天文学者が、そのずれは他に未知の惑星があり、それが影響を与えているはずだと考え、計算をした。その計算結果を基に、ベルリン天文台の天文学者ヨハン・ガレが観測したところ、海王星を発見した。この星の明るさは約 8 等級で、天王星よりも暗く、天体望遠鏡でしか見ることができない。

赤道面の直径は 49,528km で地球の約 4 倍、太陽系では 4 番目の大きさである。質量は 17 倍、平均密度は約 3 分の 1 で、重力は地球より少し大きい。太陽からの距離は約 45 億 km と遠く、164.8 年かけて公転している。ということは、現在は発見されてからやっと一周したことになる。太陽から遠く、わずかな熱しか受けていないため、季節の変化は少ない。しかし、海王星では超音速の風が吹き、激しい気象の変化が起きている。自転周期は 16 時間 6 分。磁場は双極子磁場で、自転軸に対して 46.8 度傾いている。

海王星は、氷に覆われた岩石の核でできており、分厚い大気によって包まれている。大気の組成成分は、水素約 80%、ヘリウム約 19%、メタンが 1.5%で、他にごく微量のエタンなどが含まれている。大気に含まれているメタンの量は天王星より多く、より多くの赤い光が吸収されるため、全体として天王星より青く見える。

海王星表面の平均温度は、およそマイナス 218 度 C で、天王星とほぼ同じである。地球や金星のように温室効果はないので、太陽から受ける熱量の約 2 倍の熱を、内部から重力収縮によって発生している。このような現象は木星や土星にも見られるが、天王星にはない。この内部熱による大気運動は大変活発で、南緯 54 度付近では自転より速く、南緯 22 度付近では自転より遅い。そのために、海王星の縞模様が生み出されている。南緯 20 度付近には、木星の大赤班に相当する「大暗班（グレート・ダーク・スポット）」と呼ばれるものがあり、16 日ぐらいの周期で反時計回りに自転している。

海王星には 13 個の衛星が発見されている。そのほとんどが数十から数百 km の直径である。しかし、衛星「トリトン」は例外で、直径 2,700km と群を抜いて大きい。この「トリトン」は、惑星の自転とは逆の方向に自転する「逆行衛星」である。最新の研究では、「トリトン」はもともと数千 km の直径の他の天体と共に存在していた。ところが、たまたま海王星の近くを通り過ぎたとき、海王星に捕獲されてしまった、と考えられている。この「トリトン」は海王星の重力の影響を大きく受け、次第に公転速度が遅くなり、より海王星に近づいている。おそらく 1 億年後には海王星に近づきすぎてバラバラに破壊され、海王星の環になる運命にあるだろう。なお、海王星の他の衛星の中には、不規則衛星のものが多い。そのほとんどは、日本の「すばる望遠鏡」によって発見された。

日本のすばる望遠鏡

また、海王星にも薄い 5 本の完全な環があることが明らかになっている。環はほぼ円形で、粒子はいずれも赤道方向を順行し、惑星と同じ方向に回っている。13 個の衛星のうち 4 つの衛星は、この環の中を周回している。

8. 未知の惑星が存在？

2008 年 3 月、神戸大学の向井正教授が率いるグループは、太陽系外縁部分に「未知の惑星X」が存在するかもしれないと予測した。長年の「冥王星問題」に決着がついて、惑星は 8 つであると決着したばかりの 2 年後のことである。水星から海王星までの 8 つの惑星は同じ面を向け、ほぼ円に近い軌道で回っている。一方、ほとんどが水とチリでできているTNOの天体群は楕円軌道をしており、軌道面も傾いている。向井氏のグループは、この違

いは惑星系の形成理論からだけでは説明できない、もし未知の惑星Xを想定すればTNOの軌道が現在のようになっている理由をうまく説明できる、と主張している。

このグループによれば、未知の惑星Xは、その軌道は太陽に最接近する近日点が 120 億kmよりも遠くあり、軌道の長半径は 150 億～262 億 5,000 万km、軌道面は他の惑星よりも 20～40 度傾いている。質量は地球の 0.3～0.7 倍ぐらいで、大きさは地球より少々小さいのではないかと推測されている。

もし存在するなら、今後数年以内に発見される可能性がある。

Ⅳ. 惑星未満の太陽系天体

太陽系の終わりをどこに定めるのか。これは簡単なように見えるが、意外に難しい。太陽系と言えば、すぐに惑星を思い出す。従って、一番外側を回る惑星が太陽系の端と考えるのが普通かもしれない。すると、現在では海王星ということになり、太陽から 45 億kmの距離となる。しかし、そんなふうに簡単に考えて済む話ではない。この辺から、話を始めていこう。

1. 太陽系の範囲とは

1940 年代には、アイルランドのケネス・エッジワースやアメリカのジェラルド・カイパーという天文学者たちが、海王星よりも遠くに氷でできた小天体のベルトがあり、それが彗星の元になっているという考えを表明していた。そして、太陽から見て海王星よりも遠くで、円盤のような形で太陽の公転軌道を回っている天体を「エッジワース・カイパーベルト天体（EKBO）」と呼んでいた。ただし、EKBOは予言されていたが、実際に観測されたのは1992年の小惑星 1992QB1 が始めてだった。それ以降、およそ 1,000 個の天体が見つかっている。

ジェラルド・カイパー

その後ある天文学者たちは、同じような天体を指すのに「太陽系外縁天体（TNO―トランス・ネプチュニアン・オブジェクトの略）」という言葉を使っていた。国際天文学連合は、複数の名前があると混乱を招くので、「太陽系外縁天体」の方を正式名称に採用した。そして、かつては惑星だった「天王星」を準惑星とし、TNOの一つに位置づけた。

冥王星が惑星から外されたので、太陽系の概念が小さくなってしまったという印象をもつかもしれない。しかし事実は逆である。冥王星がTNOの仲間入りしたことは、太陽系のイメージは大きく広がった、ということに他ならない。現在、観測されている太陽系の天体の中で最も遠い場所にある天体は、2003 年に発見された「セドナ」である。このセドナは楕円軌道をしており、太陽から一番離れるときは太陽から地球までの距離の約 850 倍（1300 億kmほど）である。

ヤン・オールト

太陽系の範囲は、そこで終わっているわけではない。1960 年ごろ、オランダの天体物理学者ヤン・オールトは、太陽の重力作用を計算し、TNOよりさらに遠い場所に太陽系に関係する天体があると予測した。そして長周期衛星のもととなる氷でできた小天体群が、太陽から 1 兆 5,000 億～15 兆kmほど離れた場所で太陽系を取り囲むように存在している、と推測した。その天体は太陽系を覆うように球状に広がっていると考えられ、「オールトの雲」と呼ばれている。ただし、今までのところは、実際に観測されているわけではない。

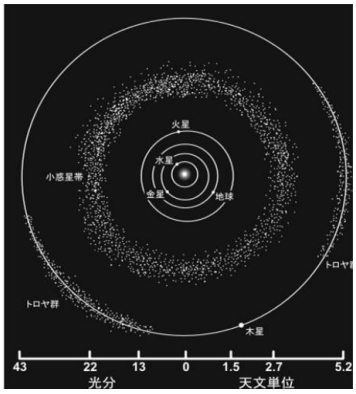
もし太陽系の端を太陽の影響が及ぶ範囲と考えるのであれば、太陽系の大きさは太陽から 15 兆kmも離れたところに設定することになる。もう少し観察結果を待ってから決めてもよさそうである。

2. 小惑星と小惑星帯

太陽には 8 つの惑星がある。その 4 つ目の火星と 5 つ目の木星の軌道の間（2.1 から 3.3 天文単位）には、たくさんの小惑星が分布している。そこは、固体を核にもつ「地球型惑星」の存在領域と巨大ガスを構成要素にしている「木星型惑星」の存在領域の中間地帯で、「小惑星帯」と呼ばれている。比較的大きな小惑星は 1800 年代初めから発見されていた。ところが、普通規模の小惑星の発見は、最近の高性能化した地上望遠鏡や宇宙望遠鏡を

待たなければならなかった。

国際天文学連合（IAU）と小惑星センター（MPC）は、発見された小天体の名前を統括している。発見者は、MPCが出している「仮符号」という書類によって、発見年・発見時期・発見時期の中の発見順などを報告する。すると、まず「天体の仮の名前」がつけられる。そして軌道が確定されると、小惑星番号あるいは彗星番号などが与えられる。その後さまざまな規則に従って正式名称が決定される。2008 年 1 月現在、仮符号によって登録された小天体は約 40 万個、軌道が確定して小惑星番号がつけられている小天体は 17 万個を超えている。命名された小天体は約 14,000 個以上に上っている。

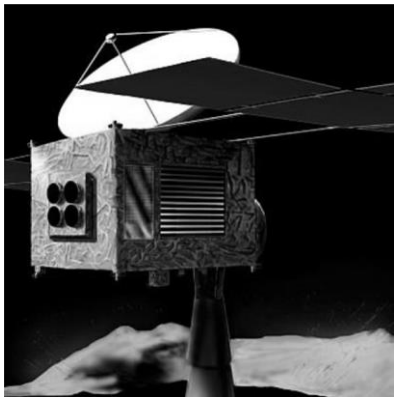


小惑星帯

以下、直径の大きなものから順番に、発見年とともに 10 ほど紹介しておこう。一番大きいのはケレス（直径 952km、1801 年）、2 番目はパラス（531km、1802 年）、3 番目からはベスタ（529km、1807 年）、ヒギエア（407km、1849 年）、ダビデ（326km、1903 年）、インテラムニア（317km、1910 年）、エウロパ（301km、1858 年）、シルビア（286km、1866 年）、ヘクトール（269km、1907 年）、エウフロシネ（256km、1854 年）、エウノミア（255km、1851 年）と続く。

このような小惑星は、主に岩石質からできている。おそらく、衝突などで飛び散った破片が重力によって引き合い、集積してできたのだろう。その内部は、隙間がたくさんある「ラブラバイル（瓦礫の寄せ集め）」と言われる構造をしている。

これらの小惑星は、いずれも小惑星帯に存在している。この小惑星帯以外にも、小惑星は存在する。例えば、木星の軌道上（5.2 天文単位）の重力的に安定しているところに群れている小惑星は、「木星のトロヤ群小惑星」と呼ばれている。同じように海王星の軌道上にも「海王星のトロヤ群小惑星」がある。さらに、小惑星帯より内側を公転している小惑星もある。それらは地球に接近するので、「地球近傍小天体（NEO―Near Earth Object の略）とか、「地球近傍小惑星（NEA―Near Earth Asteroid の略）」などと呼ばれている。これらは太陽に近い軌道順に、「アポロ群」、「アモール群」、「アテン群」などに分類されている。


小惑星探査機　はやぶさ

現在小惑星については、探査が急ピッチで進んでいる。地球をはじめとする他の惑星は、微惑星の衝突・合体によりいったん溶融し、その後今日の状態に至った。従って、太陽系を形成するに至った元々の物質情報は失われている。ところがこれらの小惑星は溶融されていないので、太陽系形成時のままの状態が保持されている。小惑星のさまざまな物質や微粒子を分析すれば、太陽系の起源について解明されるかもしれない。

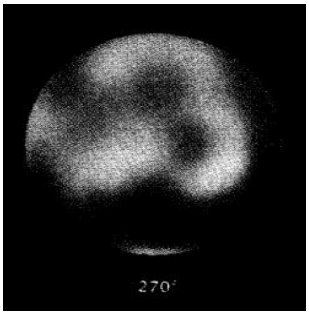
私たちが住む相模原市には、JAXA相模原キャンパスや博物館がある。そこには、2003年5月に打ち上げられた「はやぶさ」が 2005 年 11 月に小惑星「イトカワ」に軟着陸し、2010 年 6 月に地球に持ち帰った「イトカワ」の表面のかけらが展示されている。教会の子どもたちは、今年の夏季学校において、そのかけらを顕微鏡でのぞき、宇宙に思いを寄せていた。彼らは、来年打ち上げられる予定の「はやぶさ 2」の話を真剣なまなざしで聞いていた。小さなときから科学的な学問方法論をしっかり身につけ、宇宙大の創造者への信仰をもってもらいたいと心から願っている。

3. 冥王星

長い間惑星の一つとされてきた冥王星は、大変遠い位置にあり、21 世紀に入るまで探査機が送り込まれていない唯一の惑星だった。2006 年 1 月、アメリカの NASA はニューホライゾンズ探査機を冥王星に向かって打ち上げた。それは、冥王星とその衛星の「カロン」、「ニクス」、「ヒドラ」などを観測するためである。2015 年になると冥王星の大気はすべて氷結し、冬が 62 年間続く。その前に到着するため、平均時速 5.8 万kmの超高速で今も飛行を続けているのである。

冥王星の直径は地球の 5 分の 1 で、月よりも小さい。質量は 500 分の 1、重力は 15 分の 1。約 248 年かけて太陽を公転し、6.4 日で自転している。表面温度はマイナス 198 度Cで寒く、地表は一酸化炭素・メタン・窒素の氷と岩石で構成されている。冥王星の大気は窒素とメタンである。冥王星が太陽から離れたときに地表で凝固した窒素・メタン・一酸化炭素の氷が、太陽に近づくと昇華して希薄な気体になったと思われる。詳細な点は、現時点では分かっていない。

冥王星の特徴は、その軌道にある。離心率が 0.25 とかなり大きく、細長い軌道になっている。自転軸の傾きは 120 度と大きく、自転の向きは公転の向きに逆転している。



冥王星

2005 年ハッブル望遠鏡は新たに冥王星の 2 つの衛星「ニクス」と「ヒドラ」を観測した。これで、冥王星の衛星の数は 1978 年に見つかった「カロン」と合わせ 3 個になった。冥王星は赤みを帯びているが、観測された 3 つの衛星の色はいずれもほぼ同じである。そのことは、今から何十億年も前に、冥王星に他の天体が大衝突した際、大破片（カロン）と小破片（ニクスとヒドラ）が飛び散り、三つの衛星になったことを示唆する。

4. 冥王星付近の諸天体

2006 年に国際天文学連合が海王星軌道より外側に位置する天体を「太陽系外縁天体」と呼ぶことを定めた。その領域には、その前後からたくさんの天体が発見されるようになったからである。ここでは、カリフォルニア州パサディナにあるパロマー天文台のサミュエル・オースチン反射望遠鏡によって発見された三つの代表的な天体を紹介しておこう。

まず、「エリス」である。エリスは 2003 年の 10 月の通常撮影された写真に写っていた。ところが、2005 年の 1 月の同じ場所の写真を比較すると、背景の星空に対しゆっくり移動していることが判明した。その後追加観測を行い、おおよその軌道とサイズが見積もられた。その結果、国際天文学連合は 2006 年に「準惑星」に指定した。

エリスは、直径約 3,000kmで冥王星より 25%ほど大きい。黄道面からかなり傾いた楕円軌道を約 560 年かけて公転している。発見当時は太陽から 97 天文単位離れたところにいた。また、エリスは衛星を持っていることが分かり、「ディスノミア」と名づけられた。エリスの 10 分の 1 ほどの直径で、2 週間ほどでエリスを周回している。

二番目は「セドナ」である。セドナは、2003 年 11 月に始めて観測された。その後数日内に、チリ、スペイン、アリゾナ、ハワイの望遠鏡などでも確認された。セドナの直径は約 1,700kmで、冥王星の 4 分の 3。軌道は長楕円形で太陽から最も遠い軌道にある。近日点は 76 天文単位であるが、遠日点は約 900 天文単位で、公転周期は何と1万年以上になる。前回の近日点到達は紀元前 9,000 年頃だったので、次は 2076 年と言われている。セドナの名前は、極北地方に住む原住民族「カナダのイヌイットの女神セドナ」にちなんで命名された。その表面温度がマイナス 240 度C以下と低く、極冷の天体と考えられたからである。

「クワオア」は、カリフォルニア工科大学の天文学者チャドウィック・トルヒージョとマイケル・ブラウンによって、2002 年 6 月の画像から発見された。その名前は、アメリカの先住民に伝わる神話の歌と踊りで神々と生物をつくった「創世神クワオア」にちなんでつけられた。当時、冥王星以降に発見された最大の天体だったが、1 年余りの内にセドナ、そしてエリスにその座を明け渡した。クワオアは、太陽からおよそ 60 億 km の距離にある。直径は約 1,250km と推定され、ほぼ円軌道で、約 290 年周期で公転している。

5. 彗星

太陽系の外側には、無数の暗い氷状の天体があり、ときどき「彗星」として太陽の近くに舞い戻ってきて輝く。ただし、この彗星の母天体は小さくて暗いため、直接観測できていない。太陽系外の 10 光年の距離にある天体状況は、現在の世界最大の望遠鏡でも見ることはできない。

「彗星」とは、質量放出の兆候が観測される小天体をさす。つまり彗星は、太陽に近づくにつれ、その周囲にチリやガスで構成される「コマ」や、その物質が流出した「尾（テイル）」を生じる。彗星に太陽風が衝突して発生する熱で彗星物質が昇華してガスやチリが放出され、太陽風で吹き飛ばされたのが、「尾」である。ガスは、太陽風によって、太陽の正反対側にほぼ直線状に伸びる。一方チリは、イオンテイルより少し遅れて、たなびくように曲線

状に伸びている。

彗星と小惑星は、「コマ」や「尾」の有無によって区別される。コマや尾は太陽からおおよそ 3 天文単位以内に近づいて、初めて観測される。従って、それより遠方にあるうちは区別できない。彗星については、さらに次のような特色がある。①公転の周期がきわめて長いか、太陽系を飛び出して再び戻ってこない、②公転軌道の離心率が大きい、③軌道が、質量の大きな惑星などの重力による影響を受けやすい、④彗星の構成物質が周回中に失われ、質量の減少による軌道の変化予測が難しい、などである。

彗星は、公転周期をもつ「周期彗星」と、公転周期を持たない（2 度と戻ってこない）「非周期彗星」とに分けられる。周期彗星が太陽の近くに戻ってくることを「回帰」と言い、回帰するかどうかが彗星の一つの指標になる。回帰する彗星の公転周期は、約 3 年から数百万年以上まで、大きな幅がある。公転周期 200 年以下を「短周期彗星」と言い、それ以上の場合を「長周期彗星」と言う。短周期彗星の大部分は惑星と同じ黄道面に集中し、惑星の回る向きに公転しているが、長周期彗星の方は黄道面とは無関係で、ランダムに分布している。周期が数百年以上の彗星の楕円軌道は、わずかな軌道の変化で周期が大きく変わる。

なお、周期が不安定な彗星も多く、新しい彗星が起こることもある。また、地球に接近する彗星もある。大抵は、火星軌道の内側に入るまで観測はできない。その後の軌道も、質量を失って他の惑星の質量の影響を受け、軌道予測がとても難しい。

では、いくつかの代表的な彗星を紹介しておこう。

まずは、よく知られている「ハレー彗星」である。1986 年にハレー彗星が地球に接近したので、日本の「すいせい」や「さきがけ」、WSA の「ジオット」、ロシアの「ベガ 1 号」及び「ベガ 2 号」が打ち上げられ、観測された。ハレー彗星は大きさ 10km ほどで、約 76 年の短周期彗星である。以前は、分子雲で生まれ、太陽系に遭遇したとき、惑星の引力に捕獲されて太陽の周りを回り出した、と考えられていた。ところが、この彗星核は水よりも小さな密度で、氷がスカスカの状態にあり、ケイ酸塩鉱物の固体粒子と、炭素、窒素、水素、酸素に富む固体粒子からできていること、さらにこの彗星核の組成成分比は太陽系の惑星のそれとほぼ同じであることが確認された。ということは、ハレー彗星は太陽系内に起源があったことになる。

1986 年 3 月 8 日　ハレー彗星

「ヘール・ポップ彗星」は、1995 年 7 月アメリカの天文家アラン・ヘールとトマス・ポップによって発見された。1997 年には、100 年に一度と言われるほど明るくなり（次に近くにやってくるのは、2,000 年以上先だと言われている）、世界中で広く観測された。自転は約 11 時間、直径は約 40km で、「太陽系外縁天体」か「オールトの雲」あたりから来ていると思われる。

「ボレリー彗星」は、フランス人アルフォンス・ボレリーによって 1904 年 12 月に発見された。軌道は 3.6 天文単位、周期は 6.86 年で短周期衛星である。彗星核の大きさは 8×4km で、地形に滑らかな部分とまだら模様に見える部分がある。滑らかな部分はジェットを吹き出している部分で、その主成分は比較的大きな氷の粒子と思われる。

「ヴィルド第 2 彗星」は、火星と木星の間を楕円形に回っている木星族彗星。中心核の大きさが約 5km、公転周期は 6.4 年の短周期彗星である。もともと木星と太陽系外縁部の間を周回していた。ところが、1974 年に木星に接近した際、現在の軌道になった。核全体に 2km 程度の何かに押しつぶされたことによる窪みのようなものが見られる。高さ 100 メートル程度の大地や、「ピナクル」と呼ばれる高さ数十メートルから 100 メートルの尖った塔のような構造をした地形もある。最接近したときには 20 本の水蒸気のジェットが噴出しており、そのいくつかは窪みから放出されていた。この彗星は、原始太陽系円盤内で 1,750K 以上の高温にさらされ、形成されたことが分かった。2009 年 8 月にチリの中から新たにグリシンが発見され、生命体との関係に関心がもたれている。

「テンペル第 1 彗星」は 1967 年に発見された短周期彗星である。木星に接近するとその重力によって摂動を起こしやすい。現在の公転周期は約 5.5 年であるが、変化しやすくなっている。核の大きさは 4.9×7.6km。内部物質には 1,000K 以上の高温にさらされた岩石質の微粒子が含まれており、彗星内部は長周期彗星に似ている。表面は、溶岩流のように見える地形や大小のクレーター、窪地、滑らかな地域、凸凹の激しい部分など、多様な地

形を見せている。これらのことから、太陽系外縁部に起源があったと考えられている。

6. 流星、隕石

流星は、天体ではなく「流星物質」と呼ばれる。太陽の周りを公転する小さな岩石小片が、秒速数kmから数十kmで地球または他の天体の大気に突入し、大気との摩擦でプラズマ化して発光する。一般的には「流れ星」と呼ばれているが、地上より100～150km程度で光り始め、50～70kmの高さで燃え尽きるものが多い。

彗星は「尾」から 0.1mm～数cmの小さな砂粒などを大量に放出している。これらは彗星の軌道上を公転している。この彗星の通り道を地球が横切ると、たくさんの流れ星が観測される。これが「流星群」である。「しし座流星群」とか、「ペルセウス座流星群」などがよく知られている。

隕石は、宇宙の岩石小片が地上にまで到達したものをいう。主として小惑星のかけらが大気圏で燃え尽きずに地上に落ちたか、あるいは地表近くで爆発したものである。今日までに、この地球上にたくさんの隕石が落ちているが、次のようなものが有名である。

今から 6,500 万年前メキシコのユカタン半島付近に落ちた直径約 10km の隕石跡地は、「チクシュルーブ・クレーター」と言われている。その衝撃で、大規模な地殻変動・火山噴火が発生し、大気が微粒子に覆われて気温が低下した。この隕石によって、恐竜たちをはじめ、多くの生物が滅亡したと考えられている。その破壊力は 80 テラトン、広島原爆の 50 億倍とも言われている。

5 万年前に直径 50m ほどの隕石がアメリカのアリゾナ州バリンジャに落ちた。そこには、直径約 1.2km、深さ約170mの隕石孔がある。この隕石は一瞬にして半径 20kmの範囲を荒野に変えたと言われている。

「ツングースカ大爆発」は、1908 年にシベリアに落下し、空中爆発した隕石である。直径 90 メートルだったが、落下地点の周囲 2,000 平方キロの木々をなぎ倒し、大規模な森林火災を引き起こした。その破壊力は 15 メガトン、広島の原爆の 750 倍と言われている。

なお、隕石が最も多く発見されているのは南極である。南極の氷の上に落ちた隕石は氷に閉じ込められ、長い年月の間に氷と共に海岸に向かって移動し、山脈にせきとめられる。この氷が次第に溶け、隕石が露呈し、発見される。白い氷の上であれば黒い隕石は見つけられやすいし、氷で保護されているので、風化することもない。

今年 2013 年 2 月 15 日、ロシア南部のチェリャビンスク州周辺で、突然隕石が現われた。閃光を放った後、地上に衝撃波をもたらした。この衝撃によって 4,000 の建物が破損し、1,200 人以上が割れたガラスなどで負傷した。NASA が、世界中の核爆発を監視するために設置した低周波音検出網がとらえたデータから推定すると、直径およそ 18 メートル、質量 11,000 トンという大きさだった。

隕石はたとえ小さくても、人口密集地域に落ちれば被害甚大なものになる。地上に落ちる寸前に空中で爆発し、破片が広範囲に飛び散る。地上に落ちれば大地震が、海に落ちれば巨大津波が発生し、地球上に大災害が発生することは間違いない。

この点を踏まえ、1991 年にアメリカ議会は「地球近傍小天体の発見率を大幅に引き上げ、衝突の恐れのある場合はこれを破壊/軌道変更する方法を定め、国際的に賛同を得るべきだ」という要求を NASA に提示した。また、1998 年のアメリカ議会は、より具体的なスペースガード・サーベイ計画を発表し、2008 年までに直径 1km以上の地球近傍小天体の 90%を発見するよう、NASA に指示した。

1996 年に国際天文学連合は、「地球に接近する天体の災害危険度を表わす 11 段階の尺度（トリノ・スケール）を発表した。それによれば、「危険度なし」がトリノ・スケール 0 で、「衝突が確実で地球規模の壊滅的被害の発生」をトリノ・スケール 10 としている。日本においても、これらの動きに合わせ、1996 年に「日本スペースガード協会」が設立され、観測が行われるようになった。

しかし、隕石の予測は大変難しい。例えば NASA は、2004 年に同年発見された小惑星「2004 NM4（後日「ア

ポフィス」と命名）」が 2029 年 4 月 13 日に地球に接近する、と発表した。当初地球への衝突確率は 300 分の 1 と発表された。しかし、その日のうちにこれが 62 分の 1 に引き上げられた。これは、トリノ・スケールの 2 から 4 に上がったことになる。アポフィスの衝突確率は、その後 2008 年 5 月の評価では、10 万分の 2.3（トリノスケール 0）となり、地表約 3 万kmのほぼ静止衛星軌道付近を通過すると発表された。これは肉眼で十分確認できる距離である。ただし 2008 年 4 月にはこの衝突確率が 450 分の 1 ではないかという指摘もされている。

同じようなことは他にも起こっている。1998 年には、直径 1.5kmの小惑星「1997　XF11」が 2028 年に地球から 4.6 万kmまで近づく可能性があると発表された。しかし、翌日「接近距離は 100 万km」と訂正された。また 2002 年には、直径 2kmの小惑星「2002NT7」が 2019 年に地球に衝突する可能性がある、と発表された。これも後日、杞憂と判明した。このように、早期の情報では接近度が正確に判断できない場合が多いので、数多くの天体を精密に観測し続けることが求められる。

おわりに

この講演を、宇宙探査機から撮った地球の写真を紹介することから始めた。その 10 日後の 2013 年 8 月 13 日号の朝日新聞朝刊の「天声人語」には、次のような文章が掲載された。それは、科学的な探求が、人間の日々の歩みを深く振り返る機会となっていることを示している。

> ほてりを残す夜の空に、天の川が美しい盆休み、都会を離れた静粛の中で眺める人もおいでだろう。仰ぎつつ、宇宙の無限と悠久に我が身の小ささを思えば、逆におおらかな気分がわいてくる。
> 14 億 4 千万キロの彼方から見た地球を、米航空宇宙局の土星探査機カッシーニが送ってきた。漆墨に浮かぶ一粒の点。なるほど、こんなところに住んでいますか、私たちは。水の惑星は、点ながらにうっすらと青い。
> ・・・
> これまでで最も遠くからの地球の写真は、太陽系を去りつつある探査機ボインジャー1 号が、約 60 億キロ先から振り向いてパチリと撮った。1990 年のことだ。そんな遠方からも、地球は青くとらえられた。
> 地上に戻れば、昨夜から今日の未明にかけてペルセウス座流星群が見ごろだった。音もなく流れる光の筋に、ささやかな涼を味わった方もおられよう。このところの猛暑はついに国内最高気温を塗り替えて、青い星が沸騰するような日が続く。
> 流星群は明後日頃まで見られるという。星が流れたら、消えないうちに「秋、秋、秋」と願いを三度唱えようか。
> 宇宙の時は悠久だが、夏から秋へ、冬から春へ、暑さ寒さは地球の時間が連れ去ってくれる。首を長くして。
> 優しい季節を待ちわびる。

それでは最後に、聖書の中で、この大空について歌われた詩を紹介しておこう。この詩は、大空が神の御手のわざを示していることを明らかにしている。

> 天は神の栄光を語り告げ、大空は御手のわざを告げ知らせる。
> 昼は昼へ、話を伝え、夜は夜へ、知識を示す。
> 話もなく、ことばもなく、その声も聞かれない。
> しかし、その呼び声は全地に響き渡り、そのことばは、地の果てまで届いた。
> 神はそこに、太陽のために、幕屋を設けられた。
> 太陽は、部屋から出て来る花婿のようだ。勇士のように、その走路を喜び走る。
> その上るのは、天の果てから、行き巡るのは、天の果て果てまで。
> その熱を、免れるものは何もない。（詩篇 19:1-6）

参考文献

＜太陽系に関する参考文献＞
野本陽代著『日本のロケット』（NHK出版、1993 年）
福井康雄著『私たちは暗黒宇宙から生まれた』（日本評論社、2004 年）114-37 頁
荒船良孝著『宇宙の新常識 100』（2008 年、ソフトバンク）123-62 頁
京極一樹著『こんなにわかってきた宇宙の姿』（技術評論社、2009 年）
野本陽代著『太陽系大紀行』（岩波書店、2010 年）

川口淳一郎著『はやぶさ―そうまでして君は』(宝島社、2010 年)
松井孝典著『探査機でここまでわかった太陽系』(技術評論社、2011 年)
福井康雄著『宇宙 100 の謎』(角川学芸出版、2011 年)78-125 頁
川口淳一郎著『はやぶさ式思考法』(飛鳥新社、2012 年)
渡部潤一著『新天文学事典―太陽系』(講談社、2013 年)321-372 頁
柴田一成著『新天文学事典―太陽』(講談社、2013 年)277-320 頁

＜星間物質に関連する参考文献＞
井上昭雄『新天文学事典―星間物質』(講談社、2013 年)465-508 頁

＜ALMAに関する参考文献＞
福井康雄著『私たちは暗黒宇宙から生まれた』(日本評論社、2004 年)162-208 頁
石黒正人著『ALMA電波望遠鏡』(筑摩書房、2009 年)

＜系外惑星に関する参考文献＞
井田茂、他著『宇宙は地球であふれてる』(技術評論社、1998 年)
井田茂著『新天文学事典―太陽系外惑星』(講談社、2013 年)373-400 頁

＜地球外生命に関する参考文献＞
桜井邦朋著『宇宙人はほんとうにいるか』(ポプラ社、1987 年)
桜井邦朋著『地球外知生体』(クレスト、1997 年)
佐治晴夫、佐藤勝彦著『宇宙はすべてを教えてくれる』(PHP、2003 年)194-207 頁
福井康雄著『私たちは暗黒宇宙から生まれた』(日本評論社、2004 年)138-61 頁
荒船良孝著『宇宙の新常識 100』(2008 年、ソフトバンク)154-62 頁
京極一樹著『こんなにわかってきた宇宙の姿』(技術評論社、2009 年)242-49 頁
福井康雄著『宇宙 100 の謎』(角川学芸出版、2011 年)210-17 頁
大石雅寿著『新天文学事典―宇宙生物学』(講談社、2013 年)527-560 頁

被造物管理の神学講演　５（Ａ－５）

2014 年 1 月 15 日
JWTC 春の特別セミナー(2)

A. 自然

5. 宇宙の大規模構造

（銀河系・銀河団・超銀河団）

はじめに

本日は、JWTC 春の特別セミナー(2)にお招きをいただき、大変光栄に思っている。
この講演は、「被造物管理の神学」に基づき、シリーズでお話をさせていただいている。「自然篇」の5回目の講演である。先週は、JWTC春の特別セミナー(1)として、我々が住む太陽系について講演した。今日は、その続きで、現代科学が明らかにした銀河系、さらにその奥に広がる銀河群、銀河団、超銀河団などについて解説したいと思う。

もう 50 年近くも前のことである。丹沢の山奥、その川べりで小学生の子どもたちと夏のキャンプをしていた。楽しいバーベキューも終わり、キャンプファイヤーの火も消え、あたり一面が真っ暗闇になった。その時突然、満天の星が現れた。手が届きそうなすぐ近くまで星が下りてきた。そこはまさに、自然だけの世界、神秘の世界、神の世界のようだった。私にとって、あの時ほど強烈に、夜空に輝く星に感動した経験はなかった。

この講演をお聞きの皆さんも、きっと同じような経験をおもちではないかと思う。そして、北極星はどれだろう。北斗七星は？　あの星はどれぐらい離れているのだろうか。この宇宙はどんな風にできているのだろうか。宇宙の果てはあるのだろうか。そんな思いに駆られたことがきっとあったことと思う。

Ｉ. 太陽系外惑星

これまで太陽系内の天体について考察してきた。そのほとんどは人間の肉眼で見える範囲である。しかし宇宙は広い。太陽系は、宇宙全体から見れば、2,000 億（銀河系の恒星の数）×1,000 億（銀河の数）分の1の世界である。太陽系を超えた世界は、大きく、大きく広がっている。太陽系から始まって、銀河系、銀河群、銀河団、超銀河団の世界が展開している。

いったい、この宇宙には、恒星と惑星を合わせ、どのくらいの数の星があるのだろうか。ごく最近までは、観測可能な星の数は、10 の 23 乗（1 兆の 1000 億倍）と言われてきた（これは 1,000 垓にあたる）。しかし、2011 年にアメリカの天文学者たちは、実際にはこの 3 倍の星がこの宇宙に存在していると計算している。まさに天文学的な数字である。このような数は、我々人間が通常の感覚で理解できる範囲をはるかに超えている。それにしても、そのような測定法を考え出した人間の知恵の見事さにもまた驚く。自然と自然を把握する人間の叡知は驚嘆以外の何ものでもない。

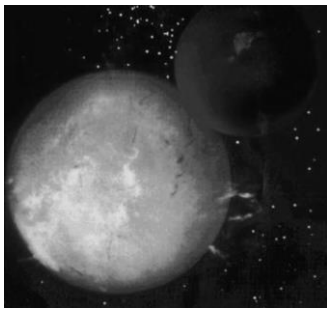
ではまず、系外惑星の世界を眺めることにしよう。

1. 系外惑星の発見に至るまで

系外惑星の発見は、20 世紀半ばから多くの天文学者によって試みられてきた。にもかかわらず、長い間発見できなかった。系外惑星は、恒星の近くにある。しかも自らは光らない。そのため、恒星に隠れてしまう。では、どうす

れば発見できるのか。惑星をもっている恒星は、惑星の重力に引っ張られて、ふらふらする。その時、恒星からの光はわずかに変化する。また、惑星が恒星と地球との間に入ると、恒星からの光がわずかにさえぎられる。このような光の微妙な変化を観測しながら、系外惑星の存在を探求していくのである。

20 世紀の後半になると、天体望遠鏡あるいは宇宙探査機が驚くほど発達した。それにより、冥王星以遠の太陽部ではあるが、太陽以外の恒星の惑星なので「系外惑星」と呼ばれている。それは太陽系内の惑星とはかなり様相が違っている。従って、「異形の惑星」と呼ばれることもある。様相の違いは、その形成過程の違いに起因する。といっても、太陽系の外側近くにあるわけだから、太陽系形成の初期の名残をとどめている点もあるはずである。太陽系の諸惑星との共通点もたくさんある。今後の系外惑星の調査データが、太陽や太陽系の惑星の起源や形成過程について、多くの重要な情報を提供してくれる可能性がある。


ペガスス座 51 番星

系外惑星が発見され、その研究が本格的に進んだのは 1995 年以降である。その年の 10 月、スイスの連星観測のエキスパートだったミッシェル・マイヨールと大学院生ディディエ・ケロスは、恒星「ペガスス座 51 番星」を周回している惑星を発見した。この恒星は、太陽にそっくりで、地球からは 47.9 光年離れている。惑星は、ペガスス座 51 番星から軌道半径がわずか 0.051 天文学単位（約 750 万kmの距離にある）の近距離だった。公転周期もわずか 4.2 日、木星の半分ほどの質量の巨大ガス惑星だった。このような惑星の存在は太陽系では考えられないものだった。太陽と木星（巨大ガス惑星）の距離は 5.2 天文単位なので 100 倍になる。太陽から一番近い水星でも 10 倍近い 0.39 天文単位である。太陽系の惑星は円軌道に近いが、系外惑星のそれは大きくずれた楕円軌道である。

観測者たちはそれまで、太陽系の惑星しか知らなかったので、太陽系の惑星を念頭に置いて系外惑星を探していた。つまり惑星は、恒星からかなり離れたところにあると思い込み、恒星から離れた地点を探していたのである。このような思い込みが、長い期間系外惑星の発見を遅らせてしまった。

ジェフリー・マーシー

このような系外惑星に関する情報が分かり始めた途端、系外惑星はどんどん発見されるようになった。アメリカのマーシーとポール・バトラーのグループがよい例である。彼らは 1988 年から系外惑星を探していた。しかし、木星のような長い周期の惑星を想定していたため、軌道の近いデータを解析していなかった。1995 年のマイヨール達の発見を知るにおよび、彼らはそれまで貯めていたデータを急いで解析してみた。すると、「おおぐま座 47 番星」や「おとめ座 70 番星」などに、既に惑星が検出されていた。

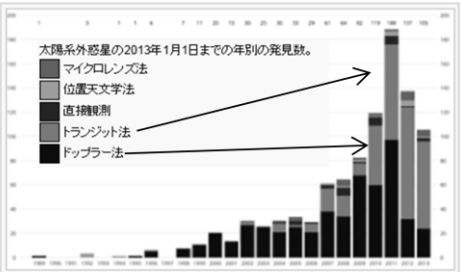
さらに彼らは、別の恒星「アンドロメダ座 υ（ユプシロン）」に関するデータを分析した。その結果、3 個の惑星をもっている多重惑星系であることを確認した。一番内側の惑星は、木星質量の 3 分の 2、円軌道の距離は 0.06 天文単位、公転周期は 4.6 日だった。2 番目の惑星は、木星質量の 2 倍、0.8 天文単位の楕円軌道、242 日の公転周期。3 番目の惑星は、木星の質量の 4 倍、2.5 天文単位の楕円軌道、約 4 年の周期で公転していた。

多重惑星系のもう一つの例は、地球から 44 億光年の距離にある「かに座 55 番星」である。この星は 4 つの惑星をもっているが、それぞれの距離は、0.04、0.1、0.2、5 天文単位だった。質量は木星に比べると 0.05 倍、0.8 倍、0.2 倍、3.9 倍、公転周期は短いものが 3 日、長いものは 12 年だった。このような多重惑星系の恒星は、2008 年 1 月までに 25 個発見されている。

多くの科学者たちが太陽系外惑星の調査を進めた結果、現在までに 1,000 個以上を発見している。今後観測が進むにつれ、その数は一層増えていくであろう。銀河系だけでも、2,000 億個の 10%、およそ 200 億個の恒星に惑星があると推測する学者もいる。むろん、系外惑星を画像に収めるような直接的な観測には、未だ一つも成功していない。

2. 系外惑星の発見方法

現時点では、系外惑星を中心星から切り離し、その惑星自体を観測できているわけではない。その惑星が回っている中心星を観察することによって、惑星の存在を確認しているだけである。



惑星の確認方法

間接的に惑星の存在を確認する方法が二つある。一つは「ドップラーシフト法」で、惑星の重力が中心星に及ぼすふらつきを測定する方法である。ハンマー投げの選手を恒星、ハンマーを惑星に例えると分かりやすい。ハンマーを振り回すと、それに引きずられて選手自身もぶれ、小さな円を描く。天体観測者は恒星そのものを見ることはできない。しかし、恒星のスペクトルの周期的変化をとらえることで、惑星の存在を確認できる。恒星が観測者から遠ざかっているときは光の波長が長くなり、近づいているときは波長が短くなる。その周期は惑星の公転周期と一致する。このように恒星が周期的に観測者に近づいたり遠ざかったりするのを、恒星が放出する光の周期的な長短を観測することにより、惑星を見つけ出すわけである。

このようなドップラーシフト法を用いての惑星検出方法の理論は、1952 年にオット・スツルーベによって提案されていた。しかし、1970 年代までの観測機の観測精度は低く、惑星を検出するには不十分だった。この方法による観測は、南フランスにあるオート・プロバンス天文台の 1.9 メートル望遠鏡によって始めて可能になった。1995 年のマイヨールとケロスの系外惑星は、この望遠鏡によって発見された。

オートプロバンス天文台

ところで、1952 年にドップラーシフト法を用いて惑星検出の可能性を提唱していたオット・スツルーベは、もう一つの惑星検出方法を提案していた。それは、惑星が中心星（恒星）の前を通り過ぎるときに星の光が遮られ、一時的に弱まる現象が起こる。もしこの現象をとらえることができれば惑星の存在が分かるはずだと考えた。これは、「トランジット法」といわれる。このトランジット法による明るさの変化率は中心星と惑星の大きさの比で決まる（例えば、地球による太陽の変化は 0.1%、木星による変化は 1%である）。

このように系外惑星が中心星の前を通過（トランジット）することは、「天体の食現象」と言われる。「食」とは、観測者から見て、ある天体が別の天体の一部または全部を隠す現象を言う。それは観測者と食を起こす天体とが一直線に並んだ時に起こる。地球−月−太陽が一直線に並ぶと「日食」となり、月−地球−太陽の順番に並ぶと「月食」となる。月が恒星や惑星を隠すのは「星食」とか「惑星食」と呼ばれる。お互いがお互いを隠し合う連星は「食連星」と呼ばれる。

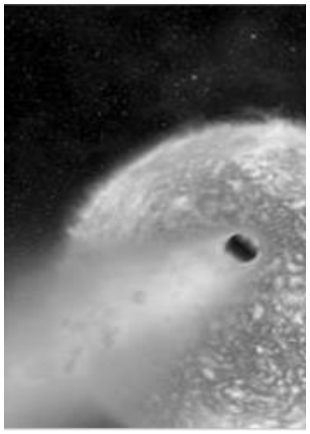
ドップラーシフト法は、高分散分光観測といって、巨大な望遠鏡と超高性能の分光器が必要である。しかし、トランジット観測の方は、恒星の明るさを測るというシンプルな測光観測である。前者による系外惑星の発見は専門家に頼らざるを得ないが、後者はアマチュアにも可能である。ドップラーシフト法で見つかった惑星がトランジットを起こすかどうかを調べることは、アマチュアにもできる。実際、このようなアマチュアによる系外惑星のトランジット観測ネットワークが世界各地でつくられている。日本にもある。

ドップラーシフト法やトランジット法は、系外惑星を発見するための「間接的な方法」である。しかし、このような間接方法では、惑星からの光を直接検出していない。不安定性が残るので、「直接撮影・分光観測」が望ましい。しかし、そのためには、①暗い惑星を検出するための高感度、②中心星と惑星を見分けるための高解像度、③惑星の近くにある恒星からの明るい光の影響を抑えるための高コントラスト、の 3 点を同時に実現しなければならない。これらは、極めて高度な技術を要する。

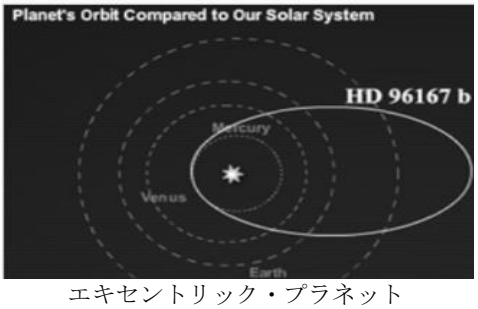
現在、すばる望遠鏡とコロナグラフ装置を用いて、若くて巨大な系外惑星を直接観測するためのさまざまな試みがなされている。これまでユニークな観測成果を数多く上げているので、「巨大惑星」を直接撮像できる時がくるかもしれない。特に、すばる望遠鏡用の新しいコロナグラフと、大気のゆらぎをリアルタイムで補正する新しい補償光学とを組み合わせた観測に、大きな期待が寄せられている。

3. 太陽系惑星と系外惑星の違い

系外惑星は、太陽系の惑星に比較すると三つの大きな違いがある。まず、系外惑星には「ホット・ジュピター（熱い木星）」がある、ということである。太陽系では、木星のような巨大ガス惑星は、太陽から遠く離れて氷が凝縮する温度の低い場所でできた。ところが、系外惑星では、0.05 天文単位という中心星からごく近いところに、木星のような巨大ガス惑星が誕生した。これを「ホット・ジュピター」と呼んでいるが、このような違いがどうして起こったのかはいまだ分からない。

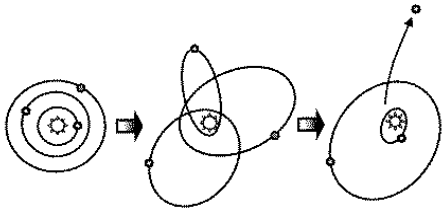

ホットジュピター

二番目は、系外惑星は「エキセントリック・プラネット（中心がずれている惑星）」である、ということである。これは、軌道離心率が大きいことをいう。太陽系の惑星は水星を除いてその公転軌道の離心率は0.1にも満たず、ほぼ真円に近い。ところが、系外惑星の多くは、離心率 0.2 以上の楕円軌道を描いている。このように大きな楕円軌道を描くのは、その形成過程に起因している。そのプロセスは、「ジャンピング・ジュピターモデル」と呼ばれている。この説明は、現在一番有力視されている仮説であるが、次のようなものである。

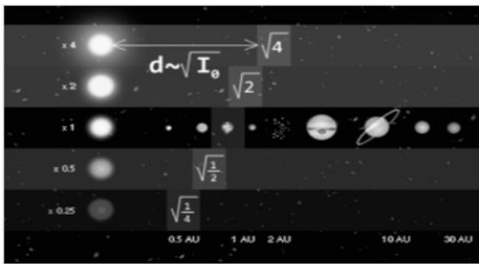


エキセントリック・プラネット

円軌道に近い軌道の惑星がいくつかあると、長い時間の間にお互いの引力で軌道がだんだん歪み、それぞれの軌道が交差するようになる。惑星が 2 個の場合は、ある軌道間隔より狭くなると軌道が不安定になる。それより広い場合には安定する。ところが 3 個以上の場合には、軌道間隔が広くても、ある一定時間は安定状態にある。しかし、その後急に不安定な状態が始まって、お互いの引力の影響がだんだん積み重なり、あるところまで行くと抑えきれなくなる。その結果、一つの巨大ガス惑星が惑星系外に弾き飛ばされる。その巨大ガス惑星を系外に弾き飛ばしたのは巨大ガス惑星なので、その軌道も反動で大きく歪む。しかし、残った巨大惑星の軌道間隔は大きくなり、軌道がゆがんでいても、それ以上の軌道交差はしないで、安定する。このようなプロセスで軌道が大きくゆがんだものが、これまでに発見されている「エキセントリック・プラネット」と考えられている。


重力散乱によるエキセントリック・ジュピターの形成モデルの模式図

ガス円盤の質量が太陽系の場合と同じ程度（太陽の 100 分の 1 ぐらいの質量）であれば、氷の多い外側領域では巨大ガス惑星が 1 個か 2 個できた時点で、円盤ガスが枯渇してしまう。その結果、ガス惑星はホット・ジュピターやエキセントリック・プラネットにならず、そのまま安定する。そして内側の地球型惑星も無事に存続し、結果的に現在の太陽系と同じような惑星系ができ上る。このような太陽系に似た惑星は、系外惑星においても数十％以上存在すると考えられている。



星の光度に応じたハビタブルゾーン

第三番目は、「ハビタブル・ゾーン（生命居住可能領域）」の違いである。生命が誕生・生存するのに適した環境をもつ天体が存在する領域は、宇宙の中で他にあるだろうか。天文学者は、太陽系に見られるような「ハビタブル・ゾーン」が系外惑星や銀河系の他の天体のどこかに存在するのではないかと、一生懸命探している。今までのところ見つかっていない。といっても、絶対にないと言えるほど、調査が進んでいるわけではない。

4. 地球外生命は存在するのか

太陽系は決して特別な惑星系ではない。どちらかというと、よくあるタイプの惑星系である。では、地球のように生命の存在する惑星が太陽系以外の惑星にあるのか。その可能性は、現時点でははっきりしない。生命に必要な水や海が過去にあったという痕跡は見つかっている。あるいは、現在もあるのではないかと推測できるケースも見られ始めている。しかし、生命の起源やその進化には、我々が未だ十分理解しているとは言えない微妙な条件

がいろいろある。従って、地球外惑星に生命はあるはずだと簡単には言い切れない。絶対にないとも言えない。今のところ、見つかっていない。だが、多くの科学者はあると信じて熱心に探索している。

現代の天文学者たちにとって、地球外に生命を発見することは夢である。系外惑星を研究する最終ゴールの一つにさえなっている。もし太陽系内なら、実際に探査機を送り、直接撮影したデータを解析できる。表面や地下からのサンプルを直接収集することも可能である。ところが、太陽系の外となると、そのような調査は現実的ではない。地球から精密なスペクトル観測を行い、生命の痕跡をたどる以外にない。地球の場合には、「生命の痕跡（バイオマーカー）」として、植物に由来する「酸素」および「オゾン」と、生命誕生の場としての「水の存在」があげられる。系外惑星にこれらが検出されれば、「地球に生存するような生命」が存在する可能性がある。
むろん、このような地球の生物とは全く異なる種類の生物の存在も理論上はあり得る。しかし、そのような別種の生命の存在については、現時点では想定しにくい。まずは、地球上の生物と同一の生物種が系外惑星にも存在するかどうかを調べることから始めるのが穏当だろう。

人間の現時点での調査、観測の技術や能力は、生命の起源の結論を出すレベルにまでは至っていない。ただ、現在の多くの科学者は「有機物の化学進化モデル」を有力な仮説として考えている。それは、有機物が結合を繰り返し、タンパク質や核酸のような高分子をつくり、生命の機能を獲得していったという考えである。このような進化が進むには、地球の水の海のような状態が一番適している。それゆえ科学者たちは、惑星表面に海が安定的に存在している場所はないかと必死に探索している。

これまで見つかっている系外惑星の多くは、木星のような巨大ガス惑星であり、太陽系の惑星とはかなり異なっている。このように巨大ガス惑星しか見つからない理由は、恒星の光の変化によって系外惑星を探すという方法に起因している。この方法では、質量の大きな巨大ガス惑星の方が見つけやすい。地球型のように質量が小さく冷えている惑星は、たとえ存在していても、見つけにくい。科学者たちは、より小さな系外惑星を捉えようと、日々研究を重ねている。

2005 年 6 月には、アメリカのグループが、地球の質量の 5.9 倍から 7.5 倍程度の系外惑星を発見している。また、2006 年 1 月には　名古屋大学を中心としたグループが地球の質量の 5.5 倍程度の系外惑星を見つけている。どちらも重さから、岩石を主成分とする地球型惑星（固体であり、その表面温度が海の存在を可能にするような、地球とよく似た惑星のこと）である可能性が高い。

グリーゼ５８１

2007 年 4 月、てんびん座の方向 20.5 光年の距離にある「グリーゼ 581」という星が発見された。この星の質量は、太陽の 0.31 倍、明るさは太陽の 0.013 倍で、「赤色矮星」と呼ばれている。赤色矮星は、太陽に比べ質量が　10%から　40%と小さく、大変暗い。中心温度は核融合が何とか維持できる程度のため、水素燃料の消費は遅い。宇宙が暗くなってしまうときに、最後まで輝いているのはこの赤色矮星だと考えられている。
この恒星には、3　つの惑星があり、それぞれ、「グリーゼ　581b」、「グリーゼ 581c」、「グリーゼ　581d」と名づけられている。中でも「グリーゼ　581c」は、半径が地球の約 1.5 倍、質量が約 5 倍、平均密度は地球の 1.5 倍と地球より少し大きい。内部はその重さのためより大きく潰れている。中心には金属鉄からなる「コア」があると推定され、地球型惑星である。軌道半径は中心星からすぐ近くで 0.073 天文単位、約 13 日かけて一周している。中心の星近くに回っているにもかかわらず、中心の星が暗いので、表面温度はマイナス3度から40度Ｃと推定される。これは1気圧下で液体の水が存在できる条件を満たしている。現在、海が存在するかどうか、大気の有無とその成分はどうか、生命の存在する痕跡があるかなど、地表環境について多くの研究がなされている。

2013 年 4 月 22 日の朝日新聞の夕刊に、「生命いる？惑星発見―1200 光年かなた　地球に近い大きさ」という見出しが躍っていた。米航空宇宙局（NASA）によって 2009 年に打ち上げた「ケプラー宇宙望遠鏡」が、1200 光年かなたにある惑星を発見した。こと座の恒星「ケプラー62」を公転している「ケプラー62f」という惑星である。直径は地球の 1.4 倍、岩石でできた地球型の惑星である。恒星からの距離が程よく、表面に液体の水が存在し得るので、生命の存在の可能性がある。

なお NASA は、この惑星以外にも、地球に似た惑星について発表している。例えば、「ケプラー62f」のすぐ内側を公転する、地球の 1.6 倍の大きさの惑星、あるいは、地球から 2,700 光年離れたはくちょう座の恒星「ケプラー69」の惑星などである。後者は、地球の 1.7 倍の大きさである。

これらはいずれも、地球に類似した条件をもつ惑星である。生命誕生に必要な海が存在し得る。といっても、「バイオマーカー」が発見されたというわけではない。たとえ「バイオマーカー」が発見されたとしても、それでもそれは状況証拠に過ぎない。生命そのものの実在を確証したことにはならない。今のところ、生命そのものどころか、その痕跡も見つかっていない。地球外生命探しという観点から、地球型系外惑星がいくつか見つかり始めている、という程度の話である。

ケプラー宇宙望遠鏡

では、もっと直接的に生命、あるいは生物の存在を明らかにする方法はないのか。昔から、地球外に高度の文明をもつ生命が存在し、何らかの人工的な電波を発信しているのではないかと考え、そのような電波をとらえようと試みている人々がいる。このような研究をSETI（Search for Extra Terrestrial Intelligence）と呼んでいる。

1972 年に打ち上げられた惑星探査機パイオニア 10 号および 1973 年のパイオニア 11 号には、機体に金属板が取りつけられた。この金属板には、地球外生命に向け、人類の存在を伝えようと男女の人間の絵や太陽系の位置などが刻み込まれた。

さらに 1977 年に打ち上げられたボイジャー1 号とボイジャー2 号にも、地球外生命に向けてのメッセージが積み込まれた。ボイジャーの場合は、その中に地球上の様々な音や世界の音楽、あいさつなどを収録した銅板に金メッキを施したレコードである。

パイオニア 10 号

4 つの探査機は、太陽系惑星の軌道を抜けている。パイオニア 10 号と 11 号とは交信が途絶えているが、ボイジャー1 号と 2 号とは 2006 年 8 月には、太陽系の果てであるヘリオシースに到着した。地球から約 150 億kmも離れており、人工物としては最も遠い場所にいる。

ボイジャー

むろん、このような方法は、通常の科学的な方法とは言えない。存在するかどうかも分からず、たとえ存在しても実態を想定することもできず、コミュニケーションの手段など全く不明であるのに、ただ一方的にやみくもにこちら側から情報を発信しているだけである。4 つの探査機が地球外生命に出会う可能性は限りなくゼロに近い。むろん、全くあり得ないと断定できるわけではないが。

5. 宇宙の距離はしご

人類は、太陽系から太陽系の外へ、そして銀河系へ、銀河系からさらにその外へと、宇宙の階層構造の存在を知るようになった。天文観測の進歩により、より遠くの天体までの距離を測定できるようになったからである。人類は、ある星や銀河の存在する方向は分かっていた。しかし、そこまでの奥行、つまり距離を測る手段を長い間見つけることはできなかった。太陽系のサイズから宇宙の大構造のサイズまでは、11 桁以上の差がある。それほど広大な範囲を一つの方法で測定することは、不可能である。そこで、近いところから測定可能な方法を見出す。そして、異なった方法を順次組み合わせながら、次第に「宇宙の距離はしご」を登っていく。天文学者たちは、試行錯誤を繰り返しながら、さまざまな観測技術を組み合わせ、近くの星から遠方の銀河に至るまでの距離を測る方法を見つけ出した。

まず、地球から太陽や惑星までの距離である。それは「ケプラーの法則」と、惑星探査機やレーダー法による惑星までの「**直接測定**」によって、現在ではかなり正確に測定できるようになった。

次に、比較的近くの恒星までの距離測定である。それには「**三角測量の原理**」を用いる。地球は 1 年かけて太

陽の周りを公転している。その結果、地球の位置は春と秋では約 3 億キロメートルも離れた場所に移動する。この移動距離を利用して春と秋に同じ星を観測し、見込む角度の差を測る。この角度が小さければ小さいほど星はより遠くにあることになる。このような、地球の公転を利用して測定した視差角を**「年周視差」**と呼ぶ。天文学では、「年周視差が 1 秒角（1 度角の 3,600 分の 1 の大きさの角度）になる星までの距離を 1 パーセクと定めた。それは約 31 兆 km で、3.26 光年になる。もし年周視差が 0.1 秒角であれば、その星までの距離は年周視差に反比例するので 10 パーセク（32.6 光年）となる。およそ 300 光年以内の恒星であれば、可視光を用いたこの方法によってほぼ正確に測定できる。しかし、現在のところそこまでが限界である。

この年周視差による測定法は、1838 年フリードリッヒ・ベッセルによって考案された。彼は「はくちょう座 61 番星」を 18 か月観測し続け、年周視差が 0.31 秒角であると検出した。現在の正確な測定値は 0.286 秒角なので、かなり精度のよい測定であったと言ってよい。

年周視差によっては測定できない、それよりさらに遠い星までの距離は、この「年周視差」によって「**距離が分かった星のある特徴**」を基に推測していく。

例えば、星の明るさが周期的に変化するAという「変光星」の距離が年周視座によって分かったとする。すると、そのAの「本当の明るさ（絶対等級）」が分かる。同じように周期的に変化するBという別の「変光星」があるとする。「同じように周期的に変化する」とは「本当の明るさ」は同じであるという意味である。このAとBの「見かけ上の明るさ」の違いは、観測によって分かる。すると、「明るさは距離の二乗に反比例する」という法則から、Bの距離を割り出すことができる。このようにして、そのような「変更星」を含む銀河であれば、現在 6,000 万光年先までの距離の銀河を測定できる。

変光星以外にも距離を推定するための「ある特徴」を利用できる星がある。星の中心で水素が燃えて核融合反応を起こしている「主系列星」である。この星もまた、星の色が分かると絶対等級を知ることができ、見かけ上の等級と比べてその星までの距離を推定することができる。ただし、以上のような変光星や主系列星に基づく推定は、モデルや仮定を介入させているので、直接的な年周視座のような方法に比べると、その正確さは劣る。

6,000 万光年よりさらに遠い距離を測る時には、違った方法を用いる。「超新星」などの大変明るい天体には、最も明るい時の絶対等級はどの超新星においてもほぼ同じであるという特徴がある。さらに銀河自体にもいろいろな特徴がある。その特徴を用いて距離を測ることができる。

例えば、渦巻き銀河は中心の周りを回転しているが、「その回転速度が速いほど銀河全体の本当の明るさは明るい」という規則が分かっている。変光星や主系列星を用いて距離が分かった銀河がある場合には、その銀河の絶対等級が分かる。その結果、変光星などでは距離が分からない銀河に対しては、もし回転速度を観測できれば絶対等級が推測でき、それと見かけ上の等級を比較するなら距離を推測できることになる。

渦巻き回転をしていない「楕円銀河」の場合であっても、その中の星々の速度のばらつきの大きさから楕円銀河の絶対等級が推測できるという経験則を用いて、距離を推定できる。なお、この銀河の回転速度や星の速度は、「ドップラー効果」を利用して推定する。

では、銀河がほとんど点にしか見えず、さらに遠くにあって速度も測れない銀河や星の距離はどのように推定するのか。宇宙空間は膨張しており、遠くの銀河はその距離に比例して速い速度で我々から遠ざかっている（ハッブルの法則）。その場合、その銀河にある元素から出ている特徴的な波長の「光」は、銀河の遠ざかる速度に応じて波長の長さが変化する。その変化を観測することによって速度が分かる。その銀河の遠ざかる速度が分かれば、その銀河までの距離を推定できる。そのようにして、非常に遠い銀河までの距離が測定できる。

ただし、この膨張則による距離推定法は近くの銀河では使えない。近くの銀河においては、膨張によって遠ざかる速度は小さい。従って、その銀河が周囲の銀河の重力の影響で独自に動いている速度なのか、それとも膨張速度によるものなのかを区別できない。その結果、純粋な膨張による速度を正確に把握できない。

以上のように、星や銀河の距離を測るには、梯子を上るように、いろいろな方法を組み合わせて行う。いくつかの方法で相互に補完し合いながら、矛盾なく説明できるところまで究明していく。このようにして、これまでの距離測定の科学的な方法論は確立されてきた。今後は、さらにより正確に距離を確定するための、新しい画期的な測定法が発見されるかもしれない。

Ⅱ. 銀河系

我々の住む太陽系は、一つの銀河に属している。澄み渡る夜空に、川のように細長く美しく輝く星の集団を見たことがあるだろう。「天の川」と呼ばれる星のグループである。その星の集団は、我々の「銀河」の中心に位置している。そこから、我々の銀河は「天の川銀河」と呼ばれている。英語では銀河を「galaxy」と言い、我々が住む銀河を「the Galaxy」と言う。そこで、「天の川銀河」は「銀河系（the Galaxy の訳語）」とも呼ばれる。最近は、この「銀河系」の方が普及しているようだ。そこで、本講演においても「銀河系」に統一して話を進めよう。

1. 銀河系のようす

この「銀河系」には、星（恒星）が少なくとも2,000億個（4,000億個という推定もある）存在している。ということは、我々の住む太陽系は、銀河系の2,000億分の1の存在ということになる。しかも、その太陽系のごく一部の地球に住んでいる。最近「グローバル（全地球的）」という言葉が流行している。大きな世界を指しているように感じるが、銀河のレベルから見ると、点にもならない。贖われたキリスト者がキリストと共に「被造物管理権」を委ねられたというとき、その「被造物」とは太陽系や銀河系どころか、全宇宙を含んだものである。もしこの使命を真剣に受けとめるなら、世界観も、価値観も、人生観も全く変わってしまう。神理解や祈りの意味、教会や神の国理解は根底からひっくり返される。新しい神学は、まさに劇薬である。

銀河系は、とてつもなく重い。質量は太陽1兆個分以上ある。巨大な重力を周囲に及ぼしていて、近くをふらふらと通りかかった小さな銀河などは呑み込んでしまう。この「銀河系」は円盤の形をしている。直径はおよそ 10 万光年。その真ん中には「バルジ」という膨らんだ領域があり、たくさんの星がそこに集中している。典型的なものは 50 万～100 万の恒星が直径わずか 30 光年ほどの空間に収まっており、「球状星団」と呼ばれている。この銀河系には 150 以上もの球状星団がある。中には 1,000 万もの恒星が密集しているものもある。ちなみに、太陽から 30 光年以内にある恒星は、おそらく 500 ぐらいであろう。このような混雑した環境では、星が変わった複雑な動きを見せ、通常では起こりえないような星の相互作用が見られる。

銀河系の想像図

球状星団内にある100万ほどの星は、同じ時期に、同じ恒星間ガスの雲を基にしてできた。従って、年齢も、化学組成も、そして、地球からの距離もほとんど同じである。同じ球状星団の二つの星の明るさや色や温度が違って見える場合には、一方が他方より重いことになる。このようにして球状星団は、星の特性が質量にどう左右されるかを理解する土台になる必須の道具となり、星の仕組みに関する私たちの知識に欠かせない。

なお、銀河系の円盤内には若い星も多い。ところが、「バルジ」部分には古い星が多い。円盤部分は、およそ毎秒 200km という速さで回転しているが、その回転による遠心力は、重力にちょうど釣り合っている。銀河系の重心は中心にある。その銀河の中心に星々が引っ張られて回転運動をするため、現在のような形が保たれている。

これは、地球が太陽の周囲を回っている原理と同じである。地球は、太陽によって引かれる力（重力）に対し釣り合いを保つ速さで回っている。そのため、太陽系を飛び出さず、安定した公転運動をしている。同じことが、太陽系レベルにおいても起きている。太陽系も全体として見れば円盤状をしている。回転しているものは、回転する物体に働く遠心力のため、回転軸に対して垂直に広がろうとする性質をもつからである。全く同じことが銀河レベルにおいても起こっている。これは、宇宙全体に見られる基本構造といってよい。

太陽系は、「銀河系」の中心部からはおよそ27,000光年離れている。今から100年ほど前には、我々が銀河系に住み、その銀河系は直径が厚みよりずっと大きい平らな巨大円盤であることが分かっていた。しかし、太陽や太陽系は、この巨大円盤の中心近くにあると考えられ、この円盤の直径はどの方向についても 2 万光年と見積もられていた。ところが、この構図は、1918年アメリカの天文学者ハーロー・シャブリーによる球状星団の研究によって崩れた。彼は、当時既に知られていた70の球状星団の分布は、地球から見て等しい割合で分布しているのではなく、一方的に偏っていることを明らかにした。こうして、太陽系が中心からの半径の真ん中あたりに位置していることが分かったのである。この太陽系は、2 億年程度かけて銀河系を一回転している。この回転の起源は、「銀河

系」の形成プロセスに関係している。

ところで、銀河系はいつ頃からでき上ってきたのか。宇宙にある通常の物質は、水素とヘリウム、それとこの二つを除いた「他のものをすべて含んだ金属」と三つに大別できる。宇宙に生まれた最初の星は、水素が 75%、ヘリウムが 25%、リチウムとベリウムが 0.00000001%で、それより重い元素はなかった。この星では水素をヘリウムに変えていたが、金属はできなかったので、そのリチウムとヘリウム(これらを一応「金属」と呼んでおこう)は最初のままだった。その星が死に、次の世代の星は、先の金属で汚染されたガス雲からできることになり、小さな金属度をもつことになる。その後、この星はこの金属によって、独自に炭素や酸素などの重い元素をつくる。従って、前より高い金属度になる。このようにして星が生死を繰り返すと、後にできる星ほど何世代か分の残骸でできることになり、金属度は高くなる。言い換えれば、古ければ古いほど金属度は低い。

現代の天文学は、この金属度を調べる「分光分析」と言われる手法を発見した。これは次のようなものである。すべての星はある幅の光を出す。それを丁寧に調べると、特定のところに影ができ、暗くなったり、欠けたりしている。これは星の大気にある金属が特定の色の光を遮断するからである。欠けている色の正確なパターンは、それぞれの星に固有のものである。そのことから、ある星が含んでいる金属の比率を正確に計算できる。

現在、銀河系で一番金属度の低い星は、「HE1327-2326」と言われる星である。これは、地球からウミヘビ座の方向に 4,000 光年ほど離れたところにある。2004 年、オーストラリア在住の天文学者アンナ・フレベルたちのチームは、この星の金属度を 0.00000005%と計算した。これは、太陽の金属度に比べると 25 万分の 1 ほどである。この金属度を基にこの星の誕生した時を計算すると、120 億年～130 億年と出た。天文学者たちは、さらに金属度の低い星がこの銀河系に存在するかもしれないと、現在も探索し続けている。

120 億年以上前の太古の宇宙には、今の銀河の 30 分の 1 ぐらいの数の小型銀河しか存在していなかった。当時の宇宙は、今よりはるかに銀河の密度は高く、小型銀河同士がたびたび衝突していた。この衝突によって銀河は分裂・合体を繰り返し、次第に大きな銀河に成長していった。現在の銀河の回転運動は、この小型銀河の運動の総和と考えてよい。「銀河系」もまた、このようなプロセスを経ながら、次第に形成されていった。現代の天文年代学は、銀河系の円盤の形成の年代を 83±18 億年前と推定している。これは、銀河系の最初の星の誕生から 20 億年ぐらい経った頃ということになる。すると、太陽系の元になる星々は 50 回近く銀河系を回転してきたことになる。そういう回転の中で 46 億年程前に太陽が生まれ、その後太陽系の惑星が次々と誕生したのである。

2. 星の誕生

では、銀河系に分布している 2,000 億(から 4,000 億)個の星の一つ一つは、どのように生まれてきたのか。「星」は、宇宙空間に渦巻き状に動いているガス雲から誕生する。ガス雲の中身は、大部分が水素分子である。このガス雲は、密度の低いところと濃く漂っているところとがある。その濃いところを中心に、星は生まれる。濃いところが種になり、自分自身の万有引力によって、およそ 100 万年かけ周囲のガスを集める。すると、濃くなった中心部分のガスの密度はさらに上がり、ガスの粒子の速度が速くなり、中心部の温度が高くなる。そうなるとさらにガスが降り積もって、中心部分の密度と温度は増々上昇し続ける。このようにして、「星の卵」ができ、やがてその中心に「赤ちゃん星」つまり「原始星」が誕生する。

「原始星」は少しずつ収縮し、中心部の温度はさらに上がる。原始星は、重力によって集めた濃いガスに取り囲まれているので、直接観測することはできない。しかし、原始星はこれらのガスを上下方向に噴出するので、ガスは原始星の周りを円盤状に取り巻くようになり、このようなガス円盤から地球のような惑星がつくられる。このガス円盤は「原始惑星系円盤」と呼ばれ、その円盤の半径は、太陽と地球の距離の 100 倍ぐらいの大きさだったと推定される。

原始星がさらに収縮していくと、「T タウリ星」と言われる段階になる。「タウリ」とは「おうし座」のことで、この種の星がおうし座において初めて観測されたことから、その名前がつけられた。T タウリ星は、他の星に比べリチウムが大量に含まれている。このリチウムは、宇宙が誕生した時の名残だと考えられている。星の内部では、リチウムは壊されて水素に代わる。T タウリ星は強力な恒星風を放出し、周囲のガスをさらに吹き飛ばす。

T タウリ星が約 1 億年経過すると、この間にさらに星の中心部に向かってガスが収縮し、中心部の温度が 1,000

万Kほどになる。すると、いよいよ核融合が始まる。そこでは水素原子核の陽子が 4 個結合して、ヘリウムの原子核を生じさせる。4 個の水素原子核の質量は 1 個のヘリウム原子核より少し大きいので、この核融合反応の結果、減少した質量の分だけエネルギーが中心部から外側に向かって放たれる。この現象は、アインシュタインの「質量とエネルギーは等価である」という特殊相対性理論どおりである。

Ｔタウリ星に核融合が起こると、「主系列星」と呼ばれる段階に達し、一般に「星」と呼ばれる天体になる。星の内部にはエネルギー源となる水素が大量に存在するので、安定的に反応が起こる。その結果、星はその一生をほとんど主系列星として過ごす。以上が、星の誕生のプロセスである。

ところで星は、太陽ぐらいの重量の星と、太陽より 10 倍ぐらいの重量の星の二つに大きく分けられる。前者は「軽い星」とか「小質量星」と呼ばれ、後者は「重い星」とか「大質量星」と呼ばれる。星の絶対的な明るさを「光度」という。その「光度」は星の重さによって決まる。重さもサイズも大きい星は、温度が高くなり、光度も大きくなる。例えば、太陽の 10 倍の重さの星の光度は、太陽の 10 万倍にもなる。なお、軽い星は重い星より多く、その数は 100 倍ぐらいと思われる。

星の色の違いは、表面温度の違いに基づく。温度が 30 万Ｋもあると青く、3,000Kぐらいに低くなると赤く見える。表面温度は内部の温度に比例する。つまり、「青い星」は中心温度も高く、「赤い星」は中心温度も低い。中心温度が高い星とは、質量が大きいということである。大きな質量を支えるためには、星は中心の圧力を高めなければならない。その圧力を高めるためには、ガスの粒子運動の速度を速めねばならない。そうなると中心の温度が高まり、表面の温度も影響される。逆に質量の小さな星は中心の圧力が低く、温度も低いことになる。

ところで、銀河系には今も星が誕生している。銀河系の星の密集しているところをよく観察すると、何か所もの「黒いしみ」のようなものが見える。実はそこには、チリ（星間チリ）とガス（星間ガス）が存在する。このチリやガスが濃くなると、背後にある星の光が吸収される。このような黒いしみを「暗黒星雲」と呼んでいるが、それは星の集まりではない。吸収の少ない近赤外線で見ると、背後の星が透けて見える。

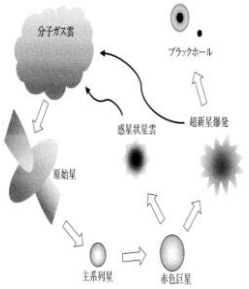
暗黒星雲は、宇宙で複合分子ができる数少ない場所の一つで、極めて重要な「るつぼ」である。それは、分子をつくるのに不可欠な場所である。と同時に、分子を構成する元の原子に戻ってしまわないようにするうえでも、不可欠な場所である。宇宙空間の過酷な状況では、分子は壊れやすく、あまり長くは生き残れない。遠くの星のかすかな光さえ、たいていの分子を個々の原子にばらばらにして、元の原子に戻してしまうエネルギーがある。暗黒星雲は、このような働きを妨げる役目も果たしている。

暗黒星雲の物質は「ガスとチリの混合体」でできており、マイナス 260 度 C という低温である。ガスはほとんど水素とヘリウムでできている。チリの方は炭素や酸素のような重い元素を多く含んでおり、外からやってくる光のほとんどをその奥深くには入り込めないようガードしている。この暗いチリだらけの星雲がなかったら、星が誕生することも、地球の生命が誕生することもなかった。

このチリ全体の重さはガス全体の重さの 100 分の 1 程度である。こうして漂う星間ガスの中で、銀河系全体で年間 3 個ぐらいの「太陽程度の星」が誕生する。宇宙の年齢を 137 億年とすると、この間に約 400 億個の星が生まれてくる計算になる。この数は、実際の銀河系の星の数 2,000 億個（から 4,000 億個）よりかなり少ない。ということは、昔の銀河系の方が、今よりもっと活発に星を誕生させていたことを意味する。

3. 星の死と超新星爆発

星の大部分を占める「軽い星」は、エネルギーをじわじわと出しながら、細く長く輝き続ける。このような恒星は、誕生から死に至るまで、核融合反応を起こし続ける。核融合反応とは、1,000 万 K を超える温度で、水素を燃やしてヘリウムに変えることである。その時は、星自身の重力エネルギーと核反応によって放出される熱エネルギーとが釣りあっているので、安定した球形を保っている。



星の一生

しかし、たとえ「主系列星」であっても、長期間にわたり水素を核融合すれば、やがて燃料の水素はなくなる。すると、星の中心部には燃えかすのヘリウムがたまる。水素とヘリウムでは水素の方が軽い。そのため、水素は中心部より外側

に移動する。中心部の水素を使い果たした「主系列星」は、その外側にある水素を使って核融合を始める。中心部に残されたヘリウムは核融合反応が起こるほど高温ではないため、外向きの圧力を失い、中心部に向かって収縮していく。こうなると、星は外側の水素の層を膨張させて、星全体のバランスを取ろうとする。つまり星の半径が大きくなり、表面の温度が下がってくる。この段階を「赤色巨星」と呼ぶ。星の最後の始まりである。

この後の歩みは、「軽い星」と「重い星」では違ってくる。軽い星の場合は、中心部の水素を使い果たすと、外側の水素の核融合が始まる。そして、その水素を使い果たす前に、中心部が高温になり、残されたヘリウムが核融合を始める。核融合によってヘリウムは炭素や酸素などの原子を生成するが、それ以上の核融合を進めるほどの高温にはならない。大きく膨らんだ星の外層を宇宙空間に放出しながら、静かに最後を迎える。中心部は炭素や酸素が残り、これらはやがて「白色矮星」になる。

星が白色矮星になる前は、普通のガスでできている。それは、主に自由に漂っている水素原子であるが、ヘリウムなどの不純物が（それほど量は多くはないけれど）混じっている。しかし、死にかけた星の中心部を重力が押しつぶすと奇妙な変形が生じる。星の密度が高くなり、一つ一つの原子は動くことができなくなり、規則正しい三次元の格子に収まってしまう。つまり白色矮星とは、重力が及ぼす巨大な圧力下で生じた、一個の「超高密度の巨大結晶」ということになる。実際、白色矮星は地球ぐらいの大きさなのに、質量は 30 万倍、密度は 1 立方センチあたり何と 2,000 キロにもなる。

一方、太陽の 10 倍の重さを持つ重い星の場合はどうなるのか。その中心部は圧力が高くなるため、温度は 1 億Ｋぐらいにまで上がる。核融合反応は、温度が少し上がるだけで急激に反応のスピードが速まる。太陽の 10 倍の重さの星は、太陽の 1 万倍の明るさで輝く。この星の燃料である水素は、もともと太陽の 10 倍あるはずなので、もし太陽と同じ明るさで輝くなら太陽の 10 倍生きることになる。ところが、実際には 1 万倍の明るさで輝くので、太陽の 1,000 分の 1 の寿命になる。つまり、太陽の寿命 100 億年の 1,000 分の 1 で、1,000 万年がこの重い星の寿命ということになる。

重い星の中心では、核融合の結果、水素がヘリウムになり、炭素になり、シリコンになり、最後に鉄となる。鉄までは原子核の種類が変わることでエネルギーを吐き出し、圧力は大きくなって釣りあいがとれる。ところが、鉄がコバルトになるときは、熱を吸収する。つまり鉄が次の原子核をつくろうとすると、周りの熱を奪い取り、圧力が下がる。それまで、自分自身の重力（中心に向かう力）と内部のガスの圧力（外に向かう力）のバランスが取れ、丸い形が保たれていた。ところが、圧力が下がると星の大部分が中心めがけて落ちていく。この落下のエネルギーは膨大で、その星が 100 億年で放出する熱量であっても、一秒よりはるかに短い時間で放つことになる。この激しい熱量の解放は、急激に星の明るさを増加させ、まるで新しい星が輝き出したかのように見える。これが、「超新星爆発」と呼ばれるものである。星を構成していたガスは、大爆発によって宇宙空間にまき散らされ、その後は、規則正しい間隔で電波やエックス線を放つ天体「パルサー」や「ブラックホール」になる。

「超新星爆発」によって宇宙空間に拡散されたガスは、初めは 1 万Ｋ以上の高温である。このような熱いガスは、内部の圧力が高く、重力もあまり効かない。しかし、やがて温度が下がるにつれ、ガスの圧力も下がり、重力が効いてくる。物質にはすべてに引きあう「万有引力」があるので、自分自身の重力でガスは再び集まるようになる。

最初のうちは温度が下がっても、乱流や磁場などの重力に対抗する力が存在するので、ガスはすぐには集まってこない。濃い部分が生まれては消える、という状況が繰り返される。ある密度に達すると、濃いガスは加速度的に周りのガスを集め始める。その結果、密度の高いガスの塊が生まれてくる。これは、万有引力が密度の 2 乗に比例して大きくなるためである。かくして非常に密度の高いガスの塊がつくられ、その中で新しい星が誕生する。それが数千万年かかり、星として成長していく。

「超新星爆発」は、単に新しい星の原料を供給するだけではない。生命誕生に必要な重元素をも生み出す。宇宙誕生後間もない頃の最初の世代の星は、水素とヘリウムという軽い元素だけでできていた。この水素とヘリウムは、ビッグバン直後の宇宙空間で、星の生まれる前に合成されたものである。しかし、比較的最近誕生した星は、宇宙の初めにはなかった鉄などの重元素も含んでいる。これらの鉄、炭素、酸素をはじめ、金、スズ、ヨウ素、ウランなど我々の周囲や胎内にある重元素はすべて、超新星の爆発によって宇宙空間に放出された物質である。

今も超新星爆発が起こる度に、これらの重元素量は宇宙に増え続けている。我々動物は、このような重元素を

食物などから取り込むことはできても、体内でつくり出すことはできない。超新星爆発によって宇宙空間に拡散した重元素が、46 億年前に原始太陽系に取り込まれ、生命誕生の基礎をつくったのである。

現在の銀河系には、重い星は軽い星の 10 万分の 1 ぐらいしかない。誕生の比率は 100 分の 1 ほどであるが、寿命が 1,000 分の 1 なので、それぞれが生存する割合は 10 万分の 1 ぐらいになる。重い星はますます少なくなっていくことになる。重い星から放出されるガスは、我々人間の生命にとって大変重要である。

普通の銀河で超新星爆発が起こるのは、平均すると 50 年に一度ぐらいである。ということは、継続的に 50 個の銀河を監視していれば、1 年の間に、どこかで超新星爆発を見ることが期待できる。天文学者たちは、毎晩望遠鏡によって観察して撮った写真を、同じ場所で何週間か前に得られた写真と比べ続ける。こうして、星の死を伝える新しい光の斑点がないかを探している。長い時間をかけ、何万もの銀河を観察して、大きな成果を得ている。
このようにして 2010 年には、全天で 337 個の超新星を発見している。超新星を発見しようと肉眼で天空を見回すだけであれば、何世紀かに一度ぐらいしか出くわせない。しかし、このような現代的な観測方法を用いれば、宇宙全体では、超新星爆発がポップコーンのように毎日はじけていることを発見できる。

4. 赤色矮星と褐色矮星

銀河系の星の 85%は、太陽質量の 10%から 40%ぐらいである。それらの星は、暗くて見えにくく、「赤色矮性」と呼ばれている。このような赤色矮星は、太陽と同じく核融合反応をしている。水素をヘリウムに変換し、その副産物として熱と光を放出している。その違いは主として星の内部温度にある。太陽の中心では 1,500 万度に達する。しかし、赤色矮星では質量は小さく、中心部分の圧力は低いので、温度は半分にも満たない。星内部の核融合の進展度合いは、温度に極めて敏感である。低温の場合は非常に遅く、赤く暗い星になる。どれほど高エネルギーの赤色矮星であっても、太陽エネルギーの 10 分の 1 ぐらいしか生み出していない。

赤色矮星は、軽いものではあるが、あくまでも恒星である。軽い赤色矮星ほど温度は低く、暗い。その内部における核反応は、ゆっくり進む。しかし、それが恒星と呼ばれる限り、質量をいくらでも小さくするわけにはいかない。中心部分の温度が 500 万度あたりを下回ると、核反応が進行しなくなる。そのような星を恒星と呼ぶわけにはいかない。天文学者たちは、赤色矮星にまで至らない星に対しては、「褐色矮星（かっしょくわいせい）」と名づけている。褐色矮星は「星」と呼ばれているが、恒星のように燃料を燃やしたり、光を発したりすることはない。

赤色矮星と褐色矮星の境目はどのへんになるのか。この点に関し、天文学者たちは現在議論を繰り返している。それは、その星の構成要素がほとんど純粋な水素なのか、それともヘリウムなどの他のガスによる相当量の不純物が含まれているのか、などによって異なってくる。それでも、赤色矮星として見られる最小限の重さは、太陽質量の 7%ぐらいだと、コンセンサスが得られつつある。これは、地球の 2 万 3 千倍の重さになる。このようなやせっぽっちの暗い赤色矮星は、太陽のような重い星に比べ、その数は10倍以上存在する。またそれは、燃料のもやし方も少ないため、1 兆年も輝き続ける。太陽の百倍である。このように目だない星が、宇宙のどの星よりも長生きするであろうと予測されるのは、極めて興味深い。

褐色矮星とは、赤色矮星にまで至らない質量の小さな星のことである。ではこれを、惑星の方から考えるとどうなるのか。恒星（赤色矮星）は、その最も軽いものであっても（惑星の中で最大の）木星質量の 80 倍はある。つまり、恒星と惑星の間には、質量の点で大きな違いがある。ところが宇宙には、木星質量より大きいが、恒星にまでは至らないという中間質量の天体がたくさんある。これらの天体は、もうちょっと重ければ、もっと収縮して中心部の温度は高くなり、核融合が始まるはずだった。しかし、結局はそこにまでは至らず、それでもエネルギーを放出し続け、低温の暗い天体として存在し続けている。いわば星になりそこねた星ということである。天文学の世界では、このような天体を「褐色矮星」と呼んでいる。

このような褐色矮星の存在については、理論的には 1960 年代から予測されていた。しかし実際に観測されたのは 1980 年代以降である。特に、1988 年にアメリカのエリック・ベックリンとベン・ザッカーマンが発見した「GD165b」、あるいは 1995 年に同じアメリカのシュリ・カカーニのチームが発見した「グリーゼ 229b」などが有名である。このような褐色矮星は、いずれも質量が小さいため星になり損ねたわけだが、薄暗いため比較的容易に直接撮影が可能だった。画像が初めて公開されたのは 2004 年のことである。

Ⅲ. 銀河群、銀河団、超銀河団

宇宙生成の基盤になったのは、「銀河」である。我々は、自分の身の回りから宇宙を見ている。そこで、まずは太陽、地球、そして月、それから太陽の周りを回る惑星、さらにその惑星以外の天体へと、論を進めてきた。むろん、このような流れは、我々の日常の感覚からいうとごく自然なものである。ところが、宇宙の成り立ちから言うと、違った考えを必要とする。もしビッグバンが 137 億年前に起こったとすれば、そこから出発し、宇宙の形成過程をたどる方が自然になる。その際ベースになるのは、銀河である。

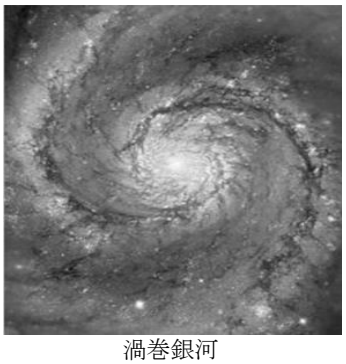
その辺のところをもう少し詳しくたどっておこう。

1. 銀河誕生

今から 60 年ほど前までは、まず巨大なガス雲ができ、それが分裂して銀河ができた、と考えられていた。しかし、現在そのように考える学者はいない。今は、ほとんどの学者が、この宇宙は 137 億年ほど前「ビッグバン」と呼ばれる急激な爆発的膨張が起こって誕生した、と考えている。

宇宙が始まった頃は、そのどこをとっても、密度と温度は同じ状態にあり、天体と呼べるものはなかった。しかし、宇宙ができてから 38 万年ほどたった頃、わずかながら放出された物質に濃薄があり、その濃い部分は重力も他よりわずかに強く、物質を引きつけ、次第に大きくなった。普通、物質が膨張すると、それは単に薄くなってしまうだけである。ところが、その中の物質同士に重力が働き、膨張する運動に打ち勝ったものがさらに大きくなるという現象が生じた。このようにして、たくさんの銀河のもとになる塊が誕生した。

宇宙の初期にこのような塊がいくつぐらいできたのか、それは分からない。とにかく時間が経つにつれ、最初はほとんど一様に分布していた物質の中で、わずかに密度の高い部分が重力によってそばの物質を引き寄せ、より高い密度に成長した。そして、原始星、銀河、銀河群、銀河団、超銀河団へと分裂・合体を繰り返し、今日見られるような天文学的な構造を形造った。最終的には、1,000 億個、あるいはそれ以上の銀河のもとができ上った。


渦巻銀河

この 1,000 億の銀河の一つ一つに、平均して 2,000 億個ほどの星が誕生した。すると、2,000 億×1,000 億の星がこの宇宙に存在することになる。ここで「星」というのは、自ら光を放っている太陽のような恒星を指す。その一つ一つの恒星の周りには、太陽系のような一連の天体（惑星、準惑星、小天体など）が取り囲んでいる。

一つの銀河に 2,000 億個の星があると述べたが、星の数を一つ一つ数えたわけではない。そうではなく、まず、それぞれの星が銀河を回る速度から銀河の重力を求める。そして、その重力を生み出すのに必要な星の数を計算する。その結果 2,000 億個ぐらいになる、ということである。

一口に銀河といっても、大きさは相当違い、ばらつきがある。今知られている最大の銀河「IC 1101」は、我々の銀河系 100 個分以上に重い。また、銀河にはさまざまな形のものがある。ある銀河は円盤をもち、ある銀河はもたない。前者は「円盤銀河」あるいは「渦巻き銀河」と呼ばれ、後者は「楕円銀河」と呼ばれる。円盤銀河には大量の星間ガスがあり、回転速度は速い。円盤銀河には、円盤部に棒状構造をもつ「棒渦巻き銀河」と、もたない「渦巻き銀河」とがある。割合はほぼ同数とみられる。遠方の宇宙に行くほど、棒渦巻き銀河の割合は少なくなる。

一方、楕円銀河は、黄色や赤色の星でできており、星間ガスはほとんど含まれていない。ガスを含んでいないということは、この種の星では新しい星が生まれてこないということである。楕円銀河は、見かけ上楕円に見える銀河の総称であって、実際には球に近いもの、平べったいアンパン形をしたもの、あるいはラグビーボールに似たようなものなどいろいろある。我々の銀河系に比較的近い宇宙では、円盤銀河と楕円銀河の割合は 4 対 1 である。このような割合になっている理由は、はっきりしない。多くの学者は、次のように考えている。銀河は合体を繰り返しながら成長していく。その場合、渦巻き銀河が合体しながら、次第に楕円銀河になっていく。そう考えると、今は、その成長過

楕円銀河

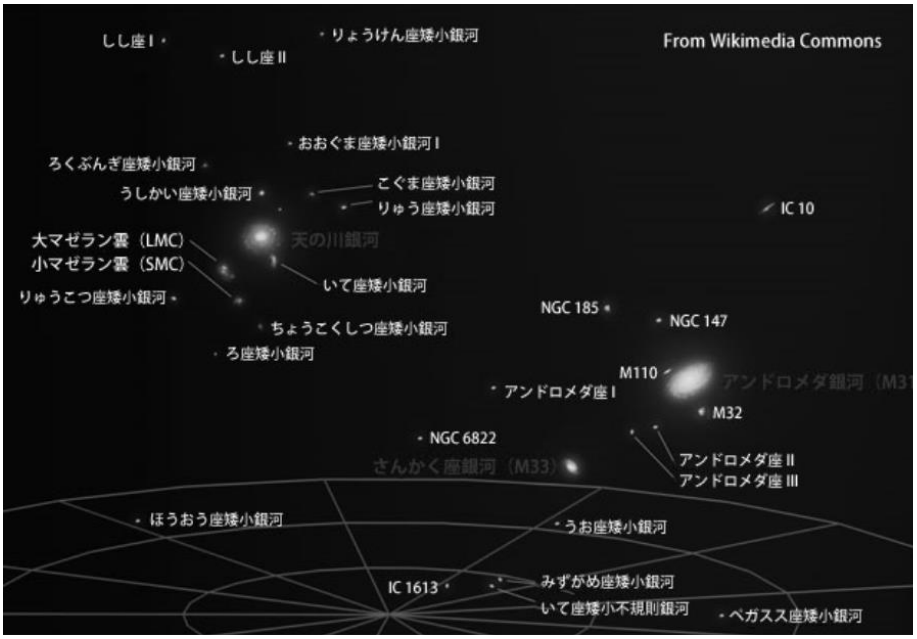
程が 4 分の 1 ほど進んでいる、ということになる。

なお、円盤銀河でも楕円銀河でもない、特に明確な形をしていない銀河もある。これは「不規則銀河」と呼ばれる。この銀河は多量の星間ガスとチリとを含んでいて、盛んに星を誕生させている。

2. 銀河群

今から百数十年前までは、銀河といえば、我々の住む銀河系だけだと考えられていた。当時の観測技術が及んだのは、その辺までだったからである。しかし 20 世紀に入ると、観測技術は格段の進歩を遂げた。宇宙は 470 億光年のかなたにまで拡大している(宇宙誕生は 137 億年前だったが、その間に宇宙は膨張し続け、広がりとしては 470 億光年になっている)。そして、1,000 億個以上の銀河の存在が明らかになった。

銀河は孤立しているものもたくさんある。しかし、その多くはある程度まとまって存在し、互いに影響し合っている。そのグループを「銀河群」と呼んでいる。銀河群は、「明るい銀河」が 2 個以上、50 個ぐらいまでの銀河集団を指す。「明るい銀河」とわざわざ断ったのは、銀河の中には「暗い銀河」もあるということである。暗い銀河とは、軽い銀河ということである。それは観測が難しいので、数に入れないのが普通である。銀河群の大きさは、直径 300 万光年ぐらいが平均である。



局所銀河群に所属する主な銀河

銀河群の銀河同士は、宇宙の膨張により互いに遠ざかっている。しかし、重力によって強く結びついているので、バラバラになることはない。銀河群の銀河は、銀河群自身の重力に対抗するため、動き回らなければならない。この動きを観測することによって個々の銀河の質量を求めることができる。ところが、ここに大きな問題が生じた。これらの銀河の質量と銀河群を満たしている高温のプラズマガスや、星をつくる材料になる低温のガスなどを合算しても、銀河群全体の質量に満たないのである。銀河においても、銀河群においても、質量の大部分を担っているものが他に存在しなければならない。科学者たちはこの物質を「暗黒物質」と呼んだ。そして彼らは、その正体解明に必死になっている(この点は次の講演で扱う)。

我々の銀河系から一番近い銀河は、212 万光年離れたところにある。それは「アンドロメダ銀河(M31)」と呼ばれている。その直径は 22 万光年から 26 万光年あり、銀河系の 2 倍以上の大きさである。この二つ銀河の間には、銀河とまでは言えないもう少し小さな「小銀河」と言われるさまざまな星の群れがある。この群れには 50 個ほどの銀河が見つかっているが、その多くは暗い銀河である。これらのすべての天体を含め、「局所銀河群」と呼ばれている。「局所」というのは英語の「local」の訳語で、「地元の」というほどの意味である。この語は、我々の住む地球、あるいは太陽系を「地元」と考えてつくられた表現である。なお、「局所銀河団」というのはない。ところが、「局所超銀河団」はある。

この「局所銀河群」は、およそ 650 万光年の広がりがある。この銀河の中では銀河系とアンドロメダ銀河とが際立って明るい。局所銀河群の質量の大部分はこの二つの銀河が担っている。この二つの銀河は、周囲の暗い銀河を飲み込みながら大きく成長してきた。現在、銀河系の円盤に突入しつつある銀河も見つかっている。

銀河系とアンドロメダ銀河は、既に互いの重力圏に入っている。両者は、時速 43 万kmで相手に向かって疾走している。ただ現時点では、両者の間には 250 万光年ほどの距離がある。両者の衝突はまだ 20 億年ほど先である。この衝突は、これまで銀河系が経験してきた小さな銀河との衝突とは違う。両者の大きさはほぼ同じなので、明確な勝敗はつかない。何十億年も複雑なダンスをしているような状態が続き、それぞれの銀河の内の星の残骸やガスなどが引き出され合う。やがて巨大な球になり、楕円銀河と呼ばれるような銀河になるだろう。この新しくできた楕円銀河は、質量も重力も、もとの銀河のいずれよりも大きいはずである。そしてさらに、近隣との接触が続き、吸収してさらに大きな銀河に変わっていくであろう。

局所銀河群のその他の主な銀河を、銀河系から近いものからあげると、おおいぬ座矮小銀河（4.2 万光年）、いて座矮小楕円銀河（7 万光年）、大マゼラン雲（16 万光年）、小マゼラン雲（20 万光年）、りゅう座矮小銀河（25 万光年）、こぐま座矮小銀河（25 万光年）、ちょうこくしつ座矮小銀河（30 万光年）、りゅうこつ座矮小銀河（40 万光年）、ろ座矮小銀河（60 万光年）、Leo Ⅰ（60 万光年）、LeoⅡ（60 万光年）、NGC6822（170 万光年）、IC1613（220 万光年）、アンドロメダ銀河 M31（212 万光年）、アンドロメダ銀河伴銀河（230 万光年）、NGC147（230 万光年）、NGC185（230 万光年）、NGC205（230 万光年）、さんかく座銀河 M33（235 万光年）などである。
このうち、銀河系に一番近い「おおいぬ座矮小銀河」は、2003 年に発見された。そのうち銀河系に吸収されるであろうと予測されている。

3. 銀河団

銀河がある程度集まったグループを「銀河群」と呼んだ。それよりさらに大規模に集まった銀河の集団を「銀河団」という。明るい銀河の数が 50 個以上 1,000 個ぐらいまでのグループである。銀河団の大きさは 600 万光年以上、平均すると1,500 万光年ぐらい。銀河群の大きさに比べると、およそ 5 倍の距離になる。しかし、占める体積は大きさの 3 乗になるので、125 倍と相当大きなものになる。形としては、ラグビーのボールを想定すればよい。

一般に銀河団は、中心部に近いほど銀河が密集している。銀河団内部の平均密度は宇宙の平均の 100 倍以上高い。銀河群と銀河団は大きさが違う。両者とも自己重力系で、同種の天体である。両者にはっきりとした境界はない。従って、大きな銀河群と小さな銀河団とは区別できない。銀河系が属する局所銀河群は、大きさとしては銀河団に近い。従って、局所銀河団と呼んでもよいのだが、局所銀河群と呼ぶ慣習になっている。

銀河団の銀河も、銀河群の銀河と同じく動き回っている。むろんその速度は銀河群のそれよりはるかに大きく、秒速で数百キロから 1,000 ㎞に及ぶ。集まっている銀河は、互いの重力によって引き合っているからである。
銀河団におけるそれぞれの銀河の運動を観察すると、光で見える銀河から推測される物質の質量だけでは説明できない。もっと質量が多くなければ銀河団全体を束ねることはできない。典型的な銀河団の質量は、銀河の質量が数%、星間ガスの質量は 20%、残りの大多数の質量は未だ分かっていない。これを「暗黒物質」と呼んでいる。銀河団もまた、重力的には暗黒物質に支配されている。なお、ここに出てくる「星間ガス」というのは、1 億K近い高温のプラズマガス（銀河団ガスと呼ばれる）である。X線望遠鏡が打ち上げられ、初めて判明した。

銀河系から最も近い銀河団は「おとめ座銀河団」である。この銀河団については、かなり詳しく分かっている。おとめ座銀河団は、銀河系から 6,000 万光年しか離れていない。銀河の数としては、暗いものまでも含めると 2,000 個以上が見つかっている。それらの銀河の公転の標準的な速さから推定すると、銀河、ガス、その他暗黒物質などすべてを合わせた合計は、太陽質量の 1,000 兆倍以上になる。

おとめ座銀河団

なお、このような銀河団の名前は、その銀河団が地球から見てどの星座の位置にあるかによってつけられている。「かみのけ座銀河団」や「うみへび座銀河団」などの銀河については、さまざまな角度から調査が続けられている。現在知られている銀河団の中で一番重いのは、「アベル 2163」と呼ばれる銀河団で、へびつかい座の方向に 20 億年以上離れたところにある。そこには 500 以上の銀河がある。1,500 万光年にわたって広がっており、どれも 1 億 5,000 万度ほどの超高温になったガスの中にある。その総重量は、フランスの天文学者ソフィ・モロゴルダードらのチームが測定したところでは、太陽質量の 4,000 兆倍になった。

現在、1 万個以上の銀河団の存在が確認されている。銀河団の中で最も大きな質量を持っている銀河は、銀河団のほぼ中心に位置している。そのほとんどは楕円銀河で年齢は古い。渦巻き銀河の多くは、銀河団の周辺領域にある。これらの現象から、銀河団の中心は宇宙形成当初は密度が大きかったことが、推測される。

4. 超銀河団

いくつかの「銀河団」や「銀河群」がゆるく集まった集団を「超銀河団」という。このグループになると、その直径の大きさは 1 億光年ほどになる。超銀河団は宇宙で最も大きな構造で、中には 2 億光年もの大きさのものもある。

しかし、周囲との境界がはっきりしていないものも多い。超銀河団は集団としてそれなりに独立して見えるが、銀河フィラメントの一部といってよく、あえて「超銀河団」だけを切り離して研究する意義はあまりない。

銀河系から約 1 億光年以内にある銀河は、「おとめ座銀河団」を中心に「局所超銀河団」を形成している。このグループは比較的平坦な構造をしており、銀河系はその端の方に位置している。他によく知られている超銀河団としては、「かみのけ-A1367 超銀河団」、「ヘルクレス超銀河団」、「うお-ベルセウス超銀河団」、「うみへび-ケンタウルス超銀河団」などがある。

天体あるいは天体の集合体は、そのほとんどが球、円盤、楕円体などの形をしている。それは、天体の力学的な平衡状態を反映しているからである。力学的平衡とは、回転運動をしている物体の遠心力と、その物体が中心に引きつけられる重力とが釣り合っていることである。銀河団ぐらいまではこの平衡状態が見られる。ところが、「超銀河団」になると、力学的平衡であることを示す形にはなっていない。重力的な結びつきが弱いので、形のいびつなものが多い。

「超銀河団」が力学的に平衡状態に達するまでの時間を求めると、「約 380 億年」と計算される。現在、超銀河団が平衡状態にないということは、宇宙ができてから 380 億年は経過していない、ということである。むろん、宇宙誕生は 137 億年前なのだから、このことは当然と言えば当然である。

5. 宇宙の大規模構造

最後に、「宇宙の大規模構造」についてふれておこう。

1970 年代までは、銀河は宇宙全体に同じぐらいの密度で分布している、と考えられていた。ところが、1978 年、スティーブン・グレゴリーとレアード・トンプソンは、銀河系を要にして赤経 11 度 5 分から 13 度 3 分まで、赤緯+19 度から+32 度までの領域を調べ、銀河の分布図を明らかにした。そこには、238 個の銀河が見つかったが、銀河が集中している領域と銀河がほとんど見つからない領域のあることが分かった。特に、100 万パーセク（1パーセクは 3.26 光年）付近を東西に横切る帯のような領域に銀河が多数存在し、フィラメント状に分布していた。

1986 年アメリカの女性天文学者マーガレット・ゲラーはハックラとともに 1,786 個の銀河の位置を調べ、赤方偏移掃天観測を行った。その結果、多くの銀河が大きさ約 1 億光年の「泡構造」の表面に並んでいることが分かった。超銀河団の連なりは、ちょうどシャボン玉がぶつかりあっているような泡の膜の形をしている。その内部には広大な 1 億光年以上のサイズの「空洞（ボイド）」があり、そこには星や銀河は全く存在せず、暗い空間が広がるだけである。その後、ゲラーは観測する銀河の数をさらに増やし、気の遠くなるような銀河観測を丁寧に行った。

その結果、長さが 6 億光年以上もある「かべ構造」も発見した。それは、数千個もの銀河が集まって細長い壁をつくり、宇宙空間を大きく切り分けている。この巨大な壁は、「グレート・ウォール」と呼ばれているが、現在十数個が発見されている。宇宙は、銀河がまんべんなく集まっているようなものではなく、このような泡構造やグレート・ウォールという壁、さらに大きな空洞の空間（ボイド）によって「大規模構造」を形成していることが分かってきた。

この宇宙の大構造が明らかになって以来、より遠くの銀河をより広範囲に観測し、さらに詳細な分布状況を明らかにする宇宙の地図つくりが進められている。

宇宙の三次元の構造は、夜空を写真に撮れば簡単に得られる、というようなものではない。前後にはたくさんの無関係な銀河が無数にあり、一つ一つの奥行きを探査しなければならない。天文学者たちは、このため長い時間をかけ、銀河の光を波長によって並べたスペクトルに分解し、銀河の色を精密に求めて三次元画像を作り続けて

きた。これは、銀河の「赤方偏移」による測定方法で、普通の銀河であるなら、現代の望遠鏡を使って 1 時間ほどの露光で可能である。1980 年代は、このような作業を銀河の一つ一つについて繰り返し、調べ上げていった。

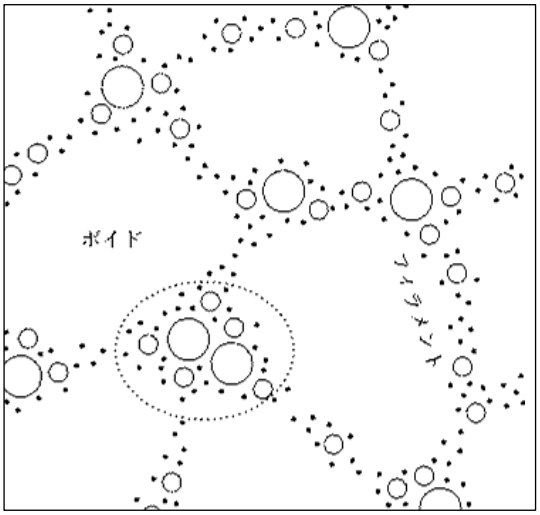
しかし宇宙に広がる無数の銀河をこのような方法によって明らかにするには数百年はかかってしまう。1990 年代になると、空のそれなりの領域をカバーするため、何百本もの光ファイバーを使って一度にたくさんの銀河の色を測定できる新型カメラが開発された。この光ファイバー方式の望遠鏡は、1 台で 100 台の別々の望遠鏡の能力をもつので、いろいろな銀河の距離の測定時間は 100 倍の速さになった。

この新しい多重ファイバー探査によって、今では全天の 30%ほどがカバーされるまでに至った。とはいえ、未だ 70%は手つかずの状態にある。その領域に、どのような構造が見られるのか、楽しみである。

このような新技術によって明らかにされたものの一つは、「スローン・グレート・ウォール」と言われる構造である。これは、2003 年にアメリカの天文学者J・リチャード・ゴットのグループが明らかにしたものである。「スローン・グレート・ウォール」は現在宇宙で知られている最大の構造で、長さはおよそ 14 億光年、うみへび座、ろくぶんぎ座、しし座、おとめ座の向こう側、夜空のほぼ 4 分の 1 にわたる範囲に広がっている。一本の直線的な糸ではなく、くねくねとよじれ、何億光年かにわたって 2 本の巻きひげに分かれたかと思うと、それがはるかかなたで再び 1 本になるというような構造になっている。

最後に、この宇宙の大規模構造に関係するいくつかのことに触れて話を終わることにしよう。

まず、右の図をご覧いただきたい。この図において、点は銀河、小さい円は銀河群、大きい円は銀河団を表わす。点線の楕円で囲まれた領域は超銀河団、フィラメントとボイドがつくる網の目のような構造が「大規模構造」である。大規模構造は宇宙で最も大きな構造であり、宇宙の骨格を成している。



なお、銀河群や銀河団は自己重力系で、自分自身の重力で形を保っている。しかし、超銀河団とこの大規模構造は、重力的な結びつきが弱いため、自己重力系ではなく、宇宙膨張の影響で拡大し続けている。従って、大規模構造は、今後さらに大規模になっていく運命にある。むろん、それと引き換えに中身は薄くなっていく。

既に、銀河は、銀河群や銀河団の中で動き回っていることを述べた。ところが実は、銀河は大規模構造の中でも運動している。例えば、銀河団の周囲の銀河は、ハッブルの法則から計算された後退速度よりもゆっくりと銀河団から遠ざかっている。銀河団の重力によって、後退にブレーキがかかっているからである。銀河団の近くにある銀河は遠ざかることすらできず、銀河団に飲み込まれる運命にある。一様な宇宙膨張からずれたこのような運動を、「銀河の特異運動」と呼ぶ。

宇宙の質量分布は滑らかではない。宇宙空間の重力場もでこぼこしている。従って、実質的にはすべての銀河は特異運動をしている。我々の銀河系も例外ではない。銀河団のような非常に重い系も特異運動をすることがあり、場合によっては銀河団同士が合体してしまうこともある。

銀河とその集団の起源は、宇宙誕生直後にまでさかのぼる。誕生直後の宇宙には、「原始密度ゆらぎ」と呼ばれるかすかな密度の濃淡が存在した。宇宙空間に密度の高い領域と低い領域がモザイクのように混在していたのである。密度の高い領域はそれだけ重力が強いので、時間と共にさらに密度が上がり、やがて銀河や銀河集団になった。この過程を「ゆらぎの成長」という。ゆらぎは実質的には暗黒物質の重力によって成長する。もし宇宙の密度が完全に一様だったとしたら、銀河はおろか、いかなる天体も、我々自身も、生まれてこなかっただろう。

そして、原始密度の揺らぎ自身の起源が宇宙誕生時の量子ゆらぎにあったとすれば、宇宙最大の構造は最小の素粒子の世界につながっていることになる。

おわりに

晴れた夜空には、星が満天にちらばっている。人間の目には、星は一枚のキャンバス上に配置されているように見える。だが、実際はそうではない。一つ一つの星は奥行深くにあり、想像できないほど遠い場所で輝いている。人の肉眼は、地球の近くにあるわずかの星しか見えない。北半球では、地球の北方向にある星しか見えない。南半球では、南方向の星が見えるだけである。たとえ見えても、その星に何かができるわけではない。星の世界に近づけば近づくほど、人は自らの小ささや弱さを知らされるだけである。その歩みや法則に手を出すことなど、全くできない。

> あなたはすばる座の鎖を結びつけることができるか。オリオン座の綱を解くことができるか。あなたは十二宮をその時々にしたがって引き出すことができるか。牡牛座をその子の星とともに導くことができるか。あなたは天の法令を知っているか。地にその法則を立てることができるか。（ヨブ 38:31-33）

この星空の位置を見定めるため、人類は天空の地図をつくる方法を思いついた。星座である。最古の星座は、今から5,000年ほど前、メソポタミア地方でつくられた。農耕民族の彼らにとって、季節の移り変わりは重要であり、それを知るには星座がとても便利だった。

以降、古代エジプトやギリシャなどにおいても、いろいろな星座が形づくられた。このような動きは近代になっても止まらない。16 世紀半ばからの 300 年間に、最大時には 130 個もの新しい星座ができあがった。そこまでいくとさすがに、いろいろな混乱も生じてきた。誰かが統制を取る必要があり、国際天文学連合が動いた。第三回総会が 1928 年に開かれ、88 個の星座が定義され、境界線も明確にされた。それが今日の天文学世界のコンセンサスになっている。

星座の名前は、旧約聖書のヨブ記、イザヤ書、アモス書などに登場する。古の神の民もまた、星座を眺めながら、創造主に思いを寄せていたのである。

> 神は牡牛座、オリオン座、すばる座、それに、南の天の室を造られた。（ヨブ 9:9）
> 天の星、天のオリオン座は光を放たず、太陽は日の出から暗く、月も光を放たない。（イザヤ 13:10）
> すばる座やオリオン座を造り、暗黒を朝に変え、昼を暗い夜にし、海の水を呼んで、それを地の面に注ぐ方、その名は主。（アモス 5:8）

旧約聖書を開き、預言者イザヤの言葉に耳を傾けよう。その時代のイスラエルの民は、祖国を追われ、遠い外国の地で捕囚民として生きることを余儀なくされていた。屈辱の歩みを強いられていた彼らは、「私の道は主に隠れ、私の正しい訴えは、私の神に見過ごしにされている」（イザヤ 40:27）とつぶやいていた。そんな民に向かい、預言者は強く語りかけている。

> 目を高く上げて、だれがこれらを創造したかを見よ。
> この方は、その万象を数えて呼び出し、一つ一つ、その名をもって、呼ばれる。
> この方は精力に満ち、その力は強い。一つももれるものはない。
> ・・・
> あなたは知らないのか。聞いていないのか。
> 主は永遠の神、地の果てまで創造された方。
> 疲れることなく、たゆむことなく、その英知は測り知れない。
> 疲れた者には力を与え、精力のない者には活気をつける。
> ・・・
> 主を待ち望む者は新しく力を得、鷲のように翼をかって上ることができる。
> 走ってもたゆまず、歩いても疲れない。（イザヤ 40:25-31）

キリスト者であっても、ときどき、「私の道は主に隠れ、私の正しい訴えは、私の神に見過ごしにされている」（イザヤ 40:27）とつぶやきたくなることがある。いわゆる「神の沈黙」という経験である。それは信仰の危機であり、自己存在の危機である。そんな時、宇宙を見上げ、創造者について思いを寄せよ、と預言者は語りかけている。そうするなら、神の本来のお姿を知ることができる。失望、落胆、疲れから解放され、新しい勇気と力が注がれる。

宇宙を知ることは、宇宙の創造者を知ることに通じる。すると生きる力に溢れてくる。この講演では、現代科学が

明らかにした宇宙像について考えた。しかしその目的は、最新の宇宙学の知識を身に着けることではない。聖書の神をより深く知り、豊かな人生へと羽ばたくことにある。

参考文献

＜宇宙に関する参考文献＞
マーティン・リース著、林一訳『宇宙を支配する6つの数』(草思社、2002 年)
マーティン・リース著、青木薫訳『宇宙の素顔』(講談社、2005 年)
荒船良孝著『宇宙の新常識 100』(2008 年、ソフトバンク)67-92 頁
杉山直、他著『宇宙のしくみ』(学研教育出版、2010 年)
村山斉著『宇宙に終わりはあるのか？』(近代科学社、2010 年)
村山斉著『宇宙は本当に一つなのか』(講談社、2011 年)
ブライアン・ゲンスラー著、松浦俊輔訳『とてつもない宇宙』(河出書房新社、2012 年)
村山斉著『宇宙はなぜこんなにうまくできているのか』(集英社、2012 年)
村山斉著『宇宙になぜ我々が存在するのか』(講談社、2013 年)

＜銀河、銀河系に関する参考文献＞
鍛冶澤賢著『新天文学事典―銀河』(講談社、2013 年)155-212 頁
和田桂一著『新天文学事典―銀河系』(講談社、2013 年)213-40 頁

＜星の誕生に関する参考文献＞
デニス・オーヴァバイ著、鳥居祥二訳『宇宙はこうして始まり、こう終わりを告げる』(白揚社、2000 年)230-58 頁
福井康雄著『私たちは暗黒宇宙から生まれた』(日本評論社、2004 年)28-80 頁
福井康雄著『大宇宙の誕生』(光文社、2006 年)75-124 頁
野本陽代著『宇宙はきらめく』(岩波書店、2007 年)
野本陽代著『ハッブル望遠鏡宇宙の謎に挑む』(講談社、2009 年)
京極一樹著『こんなにわかってきた宇宙の姿』(技術評論社、2009 年)、196-241 頁
野本陽代著『ベテルギウスの超新星爆発』(幻冬舎、2011 年)
吉田直樹著『宇宙で最初の星はどうやって生まれたのか』(宝島社、2011 年)
福井康雄著『宇宙 100 の謎』(角川学芸出版、2011 年)126-49 頁

＜宇宙の大規模構造に関連する参考文献＞
松原降彦著『宇宙に外側はあるか』(光文社新書、2012 年)107-140 頁
佐藤勝彦著『宇宙「96%の謎」』(角川書店、2008 年)61-90 頁
嶋作一大著『新天文学事典―宇宙の大規模構造』(講談社、2013 年)129-54 頁

被造物管理の神学講演　6　（A－6）

2014 年 1 月 22 日
JWTC 春の特別セミナー(3)

A. 自然

6. 謎の物質に迫る

（暗黒物質、暗黒エネルギー、ブラックホール）

はじめに

本日のJWTC春の特別セミナー(3)にご出席くださり、大変うれしく思う。寒さも厳しくなっているが、お互いに励まし合い、この冬を乗り越えていきたいと思う。

前々回の太陽系、前回の銀河系に続き、本講演では、現代の宇宙学が未だ解決できない問題を取り上げる。暗黒物質、暗黒エネルギー、ブラックホール、などである。こういう言葉は、どこかでお聞きになったことはあると思うが、それが本当のところ何を意味しているのか、考えたこともない、そう言われる方々が多いのではないだろうか。普段考えることのない事柄をちょっと覗いてみるというのも、楽しいものである。

この講演を、現代日本の天文学をリードする谷口義明氏の言葉を引用させていただき、始めたいと思う。これは、大方の科学者の心境ではないかと思う。

> 私たち人類が宇宙の歴史を正しく理解していると考えるのはもちろん早計である。まだ暗黒物質と暗黒エネルギーを正しく理解していないからだ。『平家物語』の冒頭にあるように、「おごれる人も久しからず」という一文はいつの時代にあっても正しい。そもそも暗黒物質と暗黒エネルギーが分かったとしても、そこにゴールがあるとは限らない。なぜなら、もっと、とてつもないものが宇宙に潜んでいる可能性を否定できないからだ。だが、最後に一つだけ言えることがある。私たちは幸せな宇宙、そして幸せな時代に生きている。

私は、最後の「幸せな宇宙」、「幸せな時代」という言葉が好きだ。20 世紀から 21 世紀にかけて、科学は我々の住む宇宙についてたくさんのことを明らかにした。しかし、一つの問題が解けると、新しい問題が起こり、謎は次々と深まっていく。人は、自然を前にして、謙虚にならねばならない。

被造物管理の神学に立つ者たちにとっては、科学で分からないことがあっても不安になるわけではない。神から管理を託されているとはいえ、人間の能力以上の管理を求められているわけではない。科学が明らかにしたことを踏まえて管理するのは当然であるにしても、いまだ明らかにできない分野においては、謙虚に神の知恵とご計画に信頼する。そして、与えられた分野で、ベストを尽くして自分の責任を果たせば、それでよいのである。

私はときどき、ローマ人への手紙 11 章の終わりを開いて沈思黙考する。そこでは、神が、歴史の流れの中でイスラエルの民をどのように取り扱われてきたのかが論じられている。神はご自身の民を決して見捨てたわけでなく、遠い歴史の流れを見通しながらすべてを導いておられる。神のご計画は誰にも分からない。だが、神の知恵は完全である。神に絶対的に信頼して憩うことができる。その結論として、次のような神の知恵に感嘆した言葉が吐露されている。

> ああ、神の知恵と知識との富は、何と底知れず深いことでしょう。そのさばきは、何と知り尽くしがたく、その道は、何と測り知りがたいことでしょう。なぜなら、だれが主のみこころを知ったのですか。また、だれが主のご計画にあずかったのですか。また、だれが、まず主に与えて報いを受けるのですか。というのは、すべてのことが、神から発し、神によって成り、神に至るからです。どうか、この神に、栄光がとこしえにありますように。アーメン。（ローマ 11:33-36）

Ⅰ. 暗黒物質

「宇宙の誕生」の講演において、2001 年にアメリカが探査機WMAP（宇宙マイクロ波背景放射を観測する探査機）を打ち上げたことについてふれた。その調査されたデータの解析結果が 2003 年に報告された。この宇宙は、原子は 4.6%、ニュートリノは 0.4%で、暗黒エネルギーは 72%、暗黒物質は 23%であるとの発表があった。暗黒物質」？　皆さんは、この言葉をどこかでお聞きになったことがあると思う。現在の天文学・物理学の世界では最もホットな話題であり、最近はマスコミなどでもよく取り上げられている。

我々には、夜空に見える星と星の間には、何もないように見える。しかし実際には、「真空状態」というわけではない。何も見えないが、我々の身の回りにあるのと同じような原子や電子が希薄なガス状になって存在している。しかし、それだけに留まらない。「暗黒物質」といわれる、未だ正体不明の物質が存在している。その重力が周りの天体運動に非常に大きな影響を及ぼしている、そういうことがこの 80 年ぐらいの間に、徐々に明らかになってきたのである。

では、その暗黒物質とはいったい何ものなのか。本講演では、この問題からご一緒に考えてみたいと思う。

1. 暗黒物質の存在

宇宙の構造や成り立ちを観測すると、この宇宙には、何か見えない正体不明の物質が大量にあるらしい。こういう考えは、1930 年前後から多くの科学者たちによって提唱されていた。その後多くの観測と理論的な考察とが今日まで積み重ねられてきた。特に、WMAP の報告は、決定的なもので、現代の宇宙科学者のほとんどが、この報告を受け、暗黒物質が存在することについて認めるようになった。

ここで、暗黒物質の正体を突き止めることから、ちょっと横道に逸れるが、大事な問題に触れておこう。WMAP 衛星が、宇宙の通常の物質は 4.6％であると観測結果を報告した。実は、宇宙にある星やガスを足しても、それらの量は全体の 2％ほどにしかならない。むろん、暗い星は観測できていないので、そこには含まれてはいない。だが、たとえそのすべてを足したとしても、到底 4.6％にはならない。

では、通常の物質が 4.6％あるという発表自体が間違っていたのか。それも言えない。宇宙の初期に水素とヘリウムをつくったビッグバン元素の合成から、理論上考えられている宇宙にある物質の値とぴったり一致する。従って、宇宙には 4.6％の通常物質があるというのは間違っていない。

消えた 2.6％は、おそらく電磁波では検出できない暖かい状態のガス状態で存在しているのだろうと予想される。しかしそれが観測的に証明もされているわけではない。このように、宇宙にはまだまだ謎や不思議なことが多く、地道な観測結果を待つ以外にない。

では、「暗黒物質」の本題に入っていこう。暗黒物質を想定しなければならない理由は、以下のような状況に基づく。

銀河や銀河団を電磁波で観測すると、星やガスの量を見積もることができる。星やガスは、我々がよく知っている水素、ヘリウム、炭素、酸素、窒素、鉄などの元素からできている。もし銀河や銀河団が我々の知っている元素からだけでできているとすれば、電磁波の観測によって、ある程度ではあるが、質量を見積もることができる。一方力学的な情報からも、銀河や銀河団の質量を見積もることができる。この力学的質量を計算すると、電磁波で見積もった質量より重くなる。すなわち、我々が知っている質量とは別の物質が存在すると想定しないと、話のつじつまが合わない。

暗黒物質が存在することについて、我々の住む太陽系と銀河系の例から説明してみる。

太陽を中心とする太陽系は、銀河系の一部である。地球が太陽の周りをまわっているように、太陽系自体も銀河系をまわっている。この銀河系は渦巻き銀河であるが、それを真上から見ると、この円盤状の銀河の中で、それぞれの星は互いの重力により、ケプラー運動と呼ばれる楕円運動をしている。通常、多くの星は銀河の中心付近に集中しており、中心から離れている星ほど重力の影響は弱くなり、その速度は遅くなるはずである。

ところが、渦巻き銀河における星の運動速度を測定してみると、実際には一定か、むしろ外側の方が速い速度で回っている。これは、銀河の質量は中心付近に偏って存在しているのではなく、銀河の周囲全体に何らかの物

質が存在していることを示唆する。その質量の方が大きいため、外側の方の速度が早くなっている。その質量こそ、暗黒物質といわれるものである。見えている星の 10 倍ぐらいの質量を持った暗黒物質が、重力によって星をひきつけ運動させていることは間違いない。

我々が今観測できている銀河系の中心部には、太陽系をつなぎ止めておくだけの引力はない。つまり、太陽系は銀河系からいつ飛び出してもおかしくない状況にある。それにも関わらず、実際には飛び出していない。それは、銀河系の中に未だ観測されていない物質（暗黒物質）があり、その引力が地球を含む太陽系に働いているからである。しかもその暗黒物質は、銀河の中心部分から離れれば離れるほど、どんどん増えていく計算になる。

太陽系や銀河系の現在の状態に関する話だけではない。星や銀河の生成過程においても、それらの構成要素である物質自体の重力だけでは固まることはできない。暗黒物質の重力が働いたので、星や銀河の元になる物質が引き寄せられた。暗黒物質がないと、結局、星も銀河も生まれなかった。暗黒物質は宇宙の骨組みをつくる原動力だった。最近では、銀河と銀河の間にも多くの暗黒物質が存在しており、銀河団あるいはグレート・ウォールのような大規模構造をつくっていることが確認されている。

2. 暗黒物質が見つかるまで

1927 年、オランダの天文学者ヤン・オールトは、太陽系から 300 光年以内にある星々の運動を調べ、その運動速度を実現するのに必要な質量を割り出した。それぞれの星の運動は、質量の分布に支配されている。従って、それぞれの星の運動速度を調べれば、それに必要な質量が分かる。するとそれは、おかしなことに、同じ範囲内にある天体の総質量の 1.6 倍にもなってしまった。その当時は、観測技術が発達すれば解決すると思われた。暗黒物質の存在という考えにまでは至らなかった。

1930 年代に入り、アメリカのリック天文台の**ホーレス・バブコック**は、アンドロメダ銀河のようすを調べた。バルジの部分は角速度が一定で、回転速度が上昇している。銀河の多くの星は中心部に集まっており、中心部の質量は高いからである。一方、円盤部の回転速度は落ちるだろうと推測していた。ところが、実際に測定してみると、回転速度は衰えず、むしろ上昇していることが分かった。

ブルガリア生まれのスイス人**フリッツ・ツヴィッキー**は、カリフォルニア工科大学の研究者だった。彼は、銀河団には「見えない物質」があると主張し、その研究論文を 1933 年に公表した。彼が活躍していた 30 年代には、銀河が集団で存在していることは既に知られていた。特に、「おとめ座銀河団」と「かみのけ座銀河団」が有名だった。ツヴィッキーは、銀河の集団としてよりはっきりしている「かみのけ座銀河団」を取り上げ、その質量を求めた。まず、この銀河団が力学的に落ち着いた状態（平衡状態）にあると仮定した。銀河団に含まれる銀河は、銀河団全体の質量を感じながら、銀河団の中を軌道運動している。その運動速度のばらつき具合（速度分散）は、銀河団全体の総質量で決まる。つまり、銀河団の銀河の速度分散を求めると、銀河団全体の質量を推定できる。

その速度分散の結果は、秒速 1,500kmという値になった。この値から銀河団の質量を計算すると、太陽質量の約 300 兆倍になってしまう（銀河団の半径は 300 キロパーセクとした）。一方銀河団の質量は、銀河の明るさを質量に換算して求めることもできる。彼は銀河の平均的な質量を太陽質量の 10 億倍とし、銀河団には 800 個の銀河があると考えた。これを掛け合わせると、太陽質量の約 8,000 億倍となる。銀河の平均的な質量を太陽質量の（10 億倍ではなく）100 億倍にしてもまだ 8 兆倍で、300 兆倍に比べ 40 分の 1 である。以上のことから彼は、「かみのけ座銀河団」には見えない物質がある。そのため、銀河団の中の銀河は、見えない物質の重力に支配されて運動している、と考えた。この「見えない物質」こそ、今日では暗黒物質と言われるものである。彼の研究は、多くの研究者に受け入れられなかった。時代がいかにも速すぎた。

1960 年代になって、アメリカの女性天文学者**ヴェラ・ルービン**は、アンドロメダ銀河を調べた。その結果、銀河の外側は、中心と比べても速度が遅くならないことを確認した。彼女はさらに、他の円盤銀河をも系統的に観察した。そしてほとんどの円盤銀河において、アンドロメダ銀河同様、銀河円盤の回転速度は外側でも減少しないことが分かった。これは、銀河の中心部の方が明るく、たくさんの星が集まっていることに矛盾する。彼女は、たくさんの銀河を観察すればするほど、同じような結論に達した。いずれの銀河においても、何らかの暗黒物質を想定しないと説明がつかなかった。

70 年代から 80 年代にかけて、アメリカのプリンストン大学の**ジェレミー・オストライカー**や**ジム・ピープルス**は、普通の円盤銀河も、渦巻銀河も、棒渦巻銀河も、楕円銀河も皆例外なく「見えない質量」に取り込まれていなければならないことを明らかにした。さらに、イギリスのノッティンガム大学の**クリストファー・コンセライス**達は、矮小銀河に関しても同じことを証明した。その後、カーネギー天文台の**アラン・サンデージ**のグループは、局所銀河群がおとめ座銀河団の方向に流れ込んでいくことを観察した。

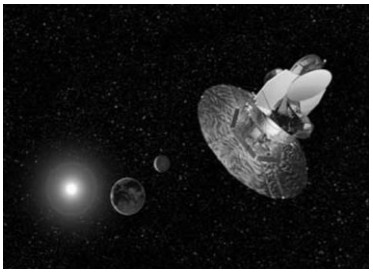
さらに 1987 年、**アラン・ドレスラー**を中心にした米英の 7 人の研究者グループは、楕円銀河がある方向に特異運動をしていることを観測した。これらの現象は、周辺にある銀河団や超銀河団の質量の影響によるものとは言えず、想定外の大きな質量の重力源が存在しない限り説明がつかないと考え、それを「グレート・アトラクター」と名づけた。

このような経過を経て、今日の天文学者たちは、この宇宙には、我々には見えない何らかの物質、つまり「暗黒物質」が存在することを認めるようになった。

2003 年より、アメリカのカリフォルニア大学のニック・スコピル教授を中心に世界 15 か国から 40 人の天文学者が参加して「**コスモス・プロジェクト**」が進められた。日本からは愛媛大学の谷口義明教授が参加した。2007 年には宇宙における（奥行 80 億光年までではあるが）暗黒物質の空間分布が、世界で初めて明らかにされた。その結果、暗黒物質のたくさんある場所にたくさんの銀河が集中していることが判明した。また、宇宙の織り成す大規模構造は、暗黒物質と普通の物質（バリオン）が寄り添うようにしてできあがってきたことも確認された。

3. 宇宙初期の暗黒物質

宇宙誕生から 38 万年後の「宇宙の晴れ上がり」の際に、「宇宙マイクロ波背景放射」が発せられた。その宇宙マイクロ波背景放射には、当時の宇宙の音が仕込まれている。我々は、その放射の温度（密度）の揺らぎを通して、宇宙の音を聴くことができる。その音の具合で、宇宙の性質を理解できる。基本振動も聞こえるし、倍音も聞こえる。通常の原子物質（バリオン）の他に、暗黒物質があると、トーンが変わる。これらの音の具合を詳細に調べるデータがWMAP（宇宙マイクロ波背景放射を観測する探査機）の観測によって提供された。それによると、2003 年の時点では、原子は 4.6%、ニュートリノは 0.4%で、暗黒エネルギーが 72%、暗黒物質が 23%だったのである。


NASA のマイクロ波観測衛星

現在の宇宙にある星、銀河、銀河間ガスなどは、原子でできている。ところが、宇宙にあるこれらすべての原子物質をかき集めても全エネルギーの 4.6%程度にしかならない。残りの 95%は、原子以外のものを想定しなければならない。そのうちの一つが「暗黒物質」であり、もう一つが「暗黒エネルギー」だった。宇宙の大部分を占めるとされる暗黒物質と暗黒エネルギーの存在は、これまで予測されてきた。だが、観測されてはいなかった。しかし現在は、未だ正体は不明ではあるが、とにかくWMAP によって観測されたという事実は、宇宙理解にとって大きな前進だった。

銀河、あるいは銀河団の誕生は、宇宙マイクロ波背景放射の「ゆらぎ」に原因があった。我々がよく見るこのWAMPの宇宙マイクロ波背景放射の写真は、ゆらぎのコントラ**ストを見やすくするために諧調が調整されている。実際には、非常になめらかな分布で、平均温度の 10 万分の 1** 程度の揺らぎしかなかった。この揺らぎは、宇宙が無から誕生した後のインフレーションの時に発生した量子的なゆらぎが基になっている。

「宇宙の晴れ上がり」の時期が過ぎる頃には、ガス雲が重力不安定になり、密度の高い場所が成長し、星や銀河の種ができた。ところが、密度ゆらぎが 10 万分の 1 程度では、密度の高い領域であってもその成長は遅く、とても現在の銀河をつくるには至らない。宇宙年齢の間に稼げるコントラストの増加は、せいぜい 1,000 倍程度だから、これではどうにもならない。

ここで登場するのが、暗黒物質である。宇宙マイクロ波背景放射の揺らぎのコントラストは 10 万分の 1 だった。これはバリオンの密度ゆらぎのことである。宇宙の晴れ上がりまで、バリオンは放射と強く結びついていたので、密

度ゆらぎを成長させにくかった。一方、暗黒物質の方は、バリオンと光子との相互作用が弱いので、比較的自由に密度ゆらぎを成長させることができた。そして宇宙が晴れ上がった後、バリオンの密度ゆらぎは、暗黒物質の大きな密度ゆらぎに助けられるように急激に成長した。このおかげで、宇宙年齢が 1 億歳の頃には太陽質量の 100 万倍程度の暗黒物質の固まりができ、そこにもバリオンが集められた。

バリオンの質量は暗黒物質の数分の 1 程度だった。それでもとにかく、星をつくることができるようになり、銀河の種ができた。後はそれらが合体を繰り返し、成長することだ。原始物質だけだと重力が弱く、現在の宇宙年齢である 137 億年の間に銀河はできない。暗黒物質の助けがどうしても必要だった。

宇宙年齢が 2 億年の頃になると、暗黒物質に導かれて星が生まれ、銀河の種ができた。それまで宇宙は真っ暗だったので、「宇宙の暗黒時代」と呼ばれた。もし宇宙誕生 2 億年後に一番星ができたとしたら、それは、今から 135 億年かなたの昔になる。しかも、できた星は 1 個または数個だっただろう。それらは、現在我々が手にしている望遠鏡では観測することはできない。あまりに遠く、暗いからだ。ただ、コンピュータ上では、ここに述べたことは、シュミレーションが可能になっている。

暗黒物質の助力を得て宇宙の一番星ができる頃のガス雲の物理的な状態については、はっきりは分からない。かなり重い星、太陽の 1,000 倍程度の質量をもつ星ができたかもしれない。もしそのような星であれば、100 万年も経てば超新星爆発を起こすことも十分あり得る。そのようにしてガスから星へ、星からガスへという循環がスタートしたのであろう。

むろん、このような循環を起こさせるには、ガス自身の重力だけでは不十分である。星になる物質が集まることができたのは、もともと数倍も重いはずの暗黒物質によった。宇宙誕生後 1 億年後頃にできた最初の物質は、暗黒物質の固まりだったと言ってよい。これを学者たちは、「暗黒物質のハロー（DMハローという）」と呼んでいる。

このDMハローは、単体でできたわけではない。密度の高い領域では何億個も出来上がり、それらがどんどん合体して、太陽質量の 100 万倍程度に太っていった。このようなDMハローが基になり、順次合体して、現在見られるような銀河の階層構造を形成してきたのである。

このような暗黒物質に操られて銀河が形成されてきたという考え方は、カルロス・フレンクらの論文が 1985 年の「ネーチャー」誌に投稿されたことによって明らかにされた。その後、多くのグループが、このような銀河形成論を観測的に検証しようと、熱心に調査され続けている。

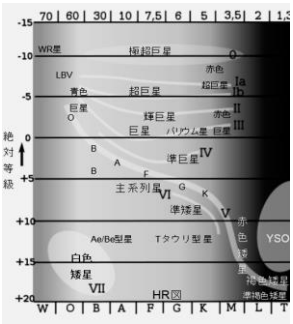
さらにこれと似たような考え方ではあるが、少々違うモデルも提唱されている。それは、DMハローの成長はバリオンの成長より早かった。暗黒物質は塊として合体成長していくが、バリオンはDMハローの質量のたくさんあるところに、川が流れるように流れ込んでいった、という考えである。塊の合体か、それとも流れ込みか、それを決定するのは現時点では難しい。銀河の種の時代（130 億光年以上かなた）のガスの運動状態を調べることができないからである。当時最も多かったガスは、中性水素原子ガスだった。現在の電波望遠鏡や受信機では、これらの原子が放射する電波領域のスペクトル線を分析するには不十分である。現在は、平方キロメートル電波アレイ（SKA）というプロジェクトが進められている。もしこれが完成すれば、塊の合体か、それとも流れ込みかがはっきりするかもしれない。とても楽しみである。

4. 暗黒物質の実体と本性

暗黒物質の存在は確認できたが、それが何なのか、今もって分かっていない。世界中の研究者が実態究明に努力しているのだが、未だ確かな答えは出ていない。そこで、暗黒物質について、今分かっていることを整理しておこう。

まず、我々が知っている原子や素粒子でない。

次に、宇宙には暗くて見えない天体がたくさんある。例えば、褐色矮星とか、ブラックホールなどである。しかし、そのような天体も暗黒物質ではない。このことは、大マゼラン星雲の星 100 万個ぐらいを観察し、次のような検証作業が行われた結果、判明した。



スペクトル型

目には見えなくても重力の大きな天体が横切ると、重力効果を起こして光を曲げて集める。すると、ある時だけ一時的に明るくなる。そしてその星が通り過ぎると元に戻る。そのような現象を探し続けた。その結果、暗い天体だけでは必要な質量に満たなかった。その暗い天体が太陽と同じぐらいの重さだった場合、その重量は銀河の中の 10%以下にしかならない。この種の天体が暗黒物質のごく一部の役割を担うことはあり得る。しかし、暗黒物質のほとんどは、この種の天体ではない。

さらに、暗黒物質は冷たくないといけない。暗黒物質は銀河をつくる役目を果たした。銀河が最初につくられたのは、宇宙誕生後 5 億年頃であろう。その時に、もし暗黒物質が熱いと粒子などが飛び回り、一か所に集まることは難しい。暗黒物質が一か所に集まっていないと、銀河形成の役目を果たせない。というわけで、暗黒物質は冷たく、ゆっくり動き、重いものになっていなければならない。

四番目に、暗黒物質は電気をもっていてはいけない。通常の物質は電気をもっているので、他の物質と反応してしまう。ところが、暗黒物質は銀河団同士が衝突する時も、ぶつかることなくすり抜けてしまう。ということは、暗黒物質は電気をもっていないことになる。

五番目に、暗黒物質の重さについては何も言えない。現在分かっていることは、陽子一つの重さに対し、10 の 31 乗分の 1 倍から、10 の 50 乗倍の範囲に入ることである。つまり、素粒子のように軽くても、あるいは眼に見えるような重いものであっても、問題はない。重さの範囲が分かると、およその見当はつきやすいものだが、81 ケタの範囲の幅となると、特定化することには役立たない。

六番目に、普通の元素ではない。我々の周囲のどこにでもあり、我々はそれに囲まれている。目に見えず、何でもすっとすり抜けてしまうところから、「オバケのようなもの」だと表現している学者もいる。暗黒物質は、今この瞬間も、我々の体をすり抜けているはずである。

七番目は、最近の観測結果から、銀河団の暗黒物質は、どこにどれだけ分布しているかが分かってきた。それは球形ではなく、少し伸びていて、大きくゆがんだ楕円形で分布していることが多い。

最後に、寿命についてである。暗黒物質が発生したのは、宇宙が誕生した直後である。宇宙で暗黒物質ができるほど大きなエネルギーがあったのは、宇宙誕生直後である。その頃であれば、宇宙はとても小さくて熱く、ものすごいエネルギーがあったので、重い素粒子もつくられたと考えられる。宇宙の初期の頃にできた素粒子はお互いに出会って反応することで消滅するのだが、暗黒物質は他のものに反応しないので、そのまま残ったと考えられている（ほんの少しだけは反応して、普通の物質に変わってしまったと考える学者もいる）。以来現在まで存在し続けている。今後もこのまま存在し続けると推測できるが、その点については何も言えない。

5. 暗黒物質の候補

現在、この暗黒物質の正体を明らかにしようと、世界中の物理学者が英知を傾けている。暗黒物質の候補としてこれまでに名前が上がっているのは、「ニュートリノ」、「アクシオン」、「ニュートラリーノ」の三つである。

特に「ニュートリノ」の特徴と暗黒物質の特徴とは似ているところが幾つかある。そのため、かつては有力な候補と考えられていた。確かにニュートリノはこの宇宙に満ち溢れている。計算すると、何もない空っぽの宇宙空間でも 1 立方センチメートルの中に 300 個ほどある。数だけでみると、この宇宙で一番多い元素である水素の、約 10 億倍の量のニュートリノが存在していることになる。ところがニュートリノの重さは軽く、その総量は、暗黒物質の推定量には到底及ばない。現在分かっているニュートリノの重さは、電子の 100 万分の 1 にも満たないので、宇宙全体で集めても 0.1～1.5%ぐらいにしかならない。23%には遠く及ばない。

ニュートリノ」が暗黒物質の候補になりえないもう一つの理由は、ニュートリノは光とほぼ同じ速さで移動し、熱いということである。実は、昔の高温の宇宙では、宇宙空間全体にわたって存在するニュートリノが光速近くで動いていたことが分かっている。ニュートリノが、光速近くで動いていた期間にどのくらいの距離を動いたかは、ニュートリノの質量の大きさによる。もし宇宙全体のうち約 20%を占めるだけの質量があれば、その距離は超銀河団、宇宙の大構造サイズになる。

すると、最初に超銀河団より小さいサイズの物質の密度ゆらぎがあったとしても、小さいスケールではニュートリノが自由に動くため、密度ゆらぎが消滅してしまう。密度が高いところと低いところが混じり合い、ならされてしまうことになる。密度が大きくて構造ができるのは、超銀河団サイズからとなる。その後、超銀河団サイズの天体が分裂、収縮などをして、銀河団、銀河がだんだん形成されていくことになる。これは、昔、ソ連の天体物理学者のゼルドビッチが描いていた「パンケーキモデル」である。

このモデルの難点は、銀河ができるまでに時間がかかりすぎることである。最近の観測では、銀河はかなり早くからできたと推定されている。従って、合わない。宇宙膨張により温度が下がってくると、ある時期に宇宙空間全体にわたって存在するニュートリノの速度は遅くなる。すると、重力ポテンシャルが大きくなり、宇宙背景放射のゆらぎが大きくなってしまう。従って、暗黒物質はニュートリノではありえない。

暗黒物質にできたムラがそのまま残るためには、暗黒物質の速度が今も昔も遅くなくてはいけない。つまりニュートリノのような熱い素粒子ではなく、冷たい素粒子でなければならない。物理学者は、「アクシオン」とか「ニュートラリーノ」ではないかと考えている。どちらもあまり聞いたことのない名前であろう。これらは、普通の物質をつくる粒子ではなく、理論的に予言されているだけで、実際にはまだ見つかっていない。

「アクシオン」は原子核力（強い力）を説明する理論である量子色力学と関連してその存在が期待されている。「ニュートラリーノ」もまた、超対称性理論においてその存在が期待されている。では、その超対称性理論とは何か。素粒子論では、この世の中に存在する 4 つの力（重力、強い力、弱い力、電磁気力）は、宇宙のごく初期では一つの力に統一されていたはずだと考える。その中である時期に重力を除いた、強い力、弱い力、電磁気力の三つの力が 1 つの力に統一された時代があったと考える。これが、「超対称性理論」である。この理論が本当だとすると、期待されているのが「ニュートラリーノ」である。
これらの二つの「冷たい暗黒物質」は、昔から動きが遅いはずだったから、小さいサイズの密度ゆらぎが消されずに残ることが可能である。すると、小さいサイズの銀河から、次第に大きな超銀河団に至る「階層的集団化モデル」を形成することが可能になる。ただし、「アクシオン」も、「ニュートラリーノ」のいずれも、その存在はいまだ未確認で、実際に観測してみなければ何も言えない。

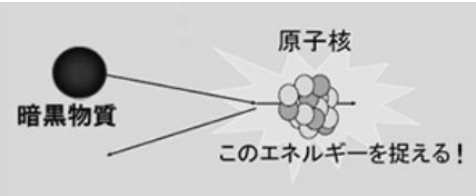
この二つの候補以外にも、暗黒物質に関わる新しい仮説が提案されている。アメリカのリサ・ランドール博士の考えは次のようなものである。我々が認識している四次元の宇宙には膜がある。それと同じような四次元の世界が別にあり、その二つが平行して存在している。その並行している二つの空間はワープしていて（両者を筒のような形のものが結んでいるのだが、その片側が小さく、もう一つの片側が大きくなっている）、その別次元の宇宙から暗黒物質のエネルギーが働きかけている。この見えない重い素粒子が我々からは見えない別の宇宙で動き回っていて、そのエネルギーが我々の宇宙に影響を及ぼしている。

このような考えは、我々常識人にとっては、突拍子もない理論である。ところが、物理学の世界では今真面目に考えられている。ある不可解な現象を矛盾なく説明できるような理論を考え、その理論を実験的に検証していくというのが物理学の研究方法である。その意味では、仮説として、選択肢の一つに残しておくことは重要であろう。

暗黒物質を実験室でつくることができる可能性はないのか。これは、今のところ、無理であると考えられている。アインシュタインの有名な式（E＝mc2）によれば、重さとエネルギーは変換できる。つまり、重い素粒子を作ろうとすると、大きなエネルギーを注がねばならない。素粒子を人工的に作るには加速器を使い、陽子などを加速・衝突させる方法を使う。この方法で暗黒物質を作ろうとすると、非常に大きな加速器が必要になる。ということより、暗黒物質の正体が分からない限り、どういう加速器を作ったらよいのか分からない。今は、こういう状態なのである。

暗黒物質は、他の物質と反応しない。反応しないものをどのようにすれば捕まえることができるのか。それは反応があまり頻繁に起こらない静かな場所に行くしかない。地上には宇宙からたくさんの粒子が降ってくる。例えば、ミュー粒子という粒子は宇宙から降ってきて、1 秒間に 1,000 個ぐらい我々の体を通り抜けている。このような粒子も地下に行けば邪魔されるものは少なく、反応もほとんどない。そういう静かな地下に実験室を作り、とても精度の高い測定器を置けば、数年に一回は、暗黒物質の反応が観測できるかもしれない。そういう気の長い話である。アメリカのミネソタ州の鉱山の地下 800 メートルの場所に、CDMSという純度の高いゲルマニウム結晶を使った実験装置が置かれ、20 年以上にわたって観測され続けている。

岐阜県の神岡町に建設したXMASS（エックスマス）という実験装置もその一つである。神岡鉱山の地下 1 キロメートルの場所に 100 キログラムの観測装置を設置し、普通の素粒子が入ってこないようにして、暗黒物質を捕まえるための検出器を水のタンクの中に入れている。検出器のなかの雑音が出ないようにきれいになっていないといけない。そこで、一つ一つの装置をクリーンルームで組み立てている。そこでは、巨大なプール（約 1 トンの液体キセノンが入っている）に宇宙から暗黒物質が降ってくるのを待ち受け、プールの中の原子と暗黒物質原子がコツンとぶつかる際の小さな動きを検出しようとしているのである。



また、次のような方法で暗黒物質をとらえることができるのではないかと考えている人たちもいる。夏は地球の動きと太陽系の動く向きが同じになるので、銀河系全体に対する地球全体の動きは相対的に早くなる。逆に冬は地球の動きと太陽系の動く向きが逆になるので、銀河系全体に対する相対速度は遅くなる。銀河系には暗黒物質がたくさんあるので、地球の速度が速ければ暗黒物質が地球にやってくる速度が速くなり、量も多くなる。地球の速度が遅い場合は、暗黒物質が地球に向かう速度は遅く、量も少なくなる。

このように、季節によって暗黒物質の速度と量が変化するので、その差をとらえることができれば、暗黒物質の正体がわかるのではないかというわけである。イタリアの研究グループが 8 年間観測を続け、その差をとらえたと発表した。同じような観測がたくさん発表されているが、他の観測結果と矛盾するところもあり、その発表の説明には今のところ信憑性が少ない。

さらに変わったところでは、南極の氷を全部装置代わりにして観測する計画も進んでいる。南極の氷は一番厚いところでは 4,000 メートルの厚みがある。この氷に直径 1 メートル、深さ 2,400 メートルの穴をあけ、「光電子増倍管が入った光学センサー」を埋め込み、暗黒物質同士の衝突で生み出されたニュートリノを捕まえようというのである。

観測衛星　パメラ

その他、銀河の中心に集まっている暗黒物質が出会うと底から強い光が出るのではないかと考えて観測しているグループもある。また、暗黒物質同士の反応では、反物質も生成されると考え、その反物質をとらえることで暗黒物質を解明しようという観測もなされている。実際、イタリアやロシアを中心とした観測衛星パメラとアメリカを中心としたガンマ線観測衛星フェルミがそれぞれ、反物質をとらえたと報告している。しかし、それらが暗黒物質の反物質であることの証明は十分ではなく、その報告がどこまで信憑性があるのか、いまだはっきりしていない。

ガンマ線観測衛星
フェルミ

ここまでは、暗黒物質を発見する試みであるが、ある学者たちは、暗黒物質をつくる取り組みをしている。欧州合同原子核研究機構は、スイス・ジュネーブ郊外の地下に一周 27 キロメートルにもなる大きなトンネルを作り、「大型ハドロン衝突型加速器」を設置した。その中で 2 つの陽子を高いエネルギーで加速して衝突させるなら、ビッグバンが起きた時に、この宇宙で起きたことが分かるのではないかと考えられている。多くの科学者が、そのとき、一緒に暗黒物質もできるのではないかと期待している。もし暗黒物質を捕まえて解明に成功すれば、宇宙ができてから「100 億分の 1 秒後」の世界に迫ることも夢ではなくなる。

現在、東京大学国際高等研究所数物連携宇宙研究機構が中心になり、国立天文台や外国の研究機関と協力して数十億光年離れた銀河を何百万個も観測する「すみれ計画」を立てている。これは宇宙のゲノム計画と言われるもので、すばる望遠鏡を使って、銀河のイメージと分光器による赤方偏移の観測をして、詳しい暗黒物質の地図を作ろうとしている。このため、9 億画素、重さ 3 トンの大型カメラや 1 度に 3,000 個ぐらいの銀河を観察できる分光装置を製作し、すばる望遠鏡に取りつける予定である。

この計画が進められると、さらに詳しい暗黒物質の地図をつくることができる。現在作られている暗黒物質の地図はほとんどが二次元のものである。平均的な分布は分かるが、奥行きがどのようになっているのか分からない。三次元の地図が作られていないわけではない。しかし、範囲が非常に狭いため、大規模構造までには至ってい

ない。宇宙が誕生した頃は、暗黒物質はどこでもほぼ同じ濃さだったが、時間が経つにつれ、だんだん集まるようになり、濃いところと薄いところとができ、大規模構造をつくってきた。もし「すみれ計画」が進めば、広い範囲で暗黒物質の地図をつくることができ、宇宙の大規模構造や昔の暗黒物質の状態をも観測できるようになるだろう。宇宙の進化の過程が明らかにされることを期待したい。

また、近い将来、素粒子物理学の研究者の国際組織が「国際リニアコライダー（ILC）」という巨大加速器の建設を計画している。ビッグバンで起こったことを詳細に調べることを目的にしている。岩手・宮城両県にまたがる北上山地と、佐賀・福岡両県にまたがる脊振山地の地域で熱心な誘致活動が広げられている。長期にわたる巨額の財政負担をめぐって諸問題を解決する必要があり、難題も多いが、ぜひ実現してほしい（朝日新聞、2013 年 8 月 13 日号朝刊）。

なお、暗黒物質が正体不明の物質であるなら、もしなんらかの未知の素粒子が見つかった場合、それが暗黒物質であるとどのように確認するのか。それは結局状況証拠を積み重ね、消去法によって確定していく方法しかない。光を発したら暗黒物質ではないし、化学反応を示したら暗黒物質ではないと、一つ一つ潰していかねばならない。あるいは、発見された素粒子が今まで知られているあらゆる現象に当てはまらなければ、暗黒物質である可能性は高い。もっとも、暗黒物質に、これまで発見されていないような性質があった場合には、見つけるのがさらに困難になるのだが。

このようにして、世界中の物理学者は、暗黒物質の正体を明らかにするために観測や実験を繰り返し、さまざまなデータを集めている。未だ暗中模索の段階ではある。実験や観測で得られた事実をつなぎ合わせ、矛盾がないような説明をすることに集中している。多くの科学者は、あと5年もすればこの正体が明らかになるのではないかと期待している。

Ⅱ. 暗黒エネルギー

WMAP の観測によれば、宇宙に存在する全物質の 4%のみが我々の知っている通常の物質であり、23%が暗黒物質、73%が暗黒エネルギーである。前章では、暗黒物質について検証したので、本章では、暗黒エネルギーについて考えてみよう。

実は、暗黒物質も、暗黒エネルギーも、どのようなものか分かっていない。にもかかわらず、物質とエネルギーとに分ける理由は何か。一番の違いは、「暗黒物質」は一つの場所に留まって天体などの動きに大きな影響を与えているのに対し、「暗黒エネルギー」は、ある場所に局在することなく、宇宙全体にほぼ一様に存在し、宇宙全体に大きな影響を及ぼしていることにある。従って、宇宙が膨張すると、暗黒物質は普通の物質同様薄まるのに対し、暗黒エネルギーの方は薄まらず、一様であり続ける。

従って、暗黒物質の方が我々には分かりやすく、1930 年代にはその存在が論議され始められている。しかし暗黒エネルギーの方は、1998 年、今からわずか 10 年ちょっと前になって初めて、宇宙物理学者の間で注目され始めたものである。暗黒物質の正体は間もなく明らかにされることだろう。ところが暗黒エネルギーの方は、今やっと解決の糸口に立ったところで、今世紀いっぱいかかるという学者もいる。場合によっては、我々の宇宙観を根底からひっくり返すような結論に導かれるかもしれない。

1. 暗黒エネルギーが提唱されるまで

1917 年、アインシュタインは一般相対性理論に基づく最初の宇宙モデルを発表した。彼は、宇宙を静止したものと考えていたので、その数式に「宇宙項」を導入した。しかしその後、宇宙が膨張していることが明らかになったので、その「宇宙項」を不要なものとし、破棄した。だが、ルメートルは膨張する宇宙においても宇宙項は必要であると主張し、アインシュタインに再考を促した。その後も、この「宇宙項」をめぐっての議論は、宇宙物理学者の間で盛んに論じられてきた。だが、決定的な観測的進展はなかったので、結論は出なかった。

一方、この「宇宙項」の問題は、宇宙スケールの問題だけでなく、ミクロの世界を記述する「場の量子論」の問題としても、真剣に受け止められるようになった。というのは、場の量子論においても「物質が存在しない真空の空間においても、大量のエネルギーが詰まっている」という計算結果が出ていたからである。場の量子論の枠内に留ま

る限り、この結果は大きな問題にならない。しかし、ミクロの世界から大きな宇宙の世界にそれを広げていくと、話が違ってくる。

一般相対性理論によれば、もし真空にエネルギーが存在するとすれば、宇宙空間を著しく曲げてしまうはずである。しかし実際には、この宇宙は広い範囲で平坦であることが分かっているので、矛盾してしまう。それゆえ、場の量子論で期待される真空エネルギーは、何らかの力によってゼロに打ち消されていなければならない。従って、この真空エネルギーを「宇宙項」にするわけにはいかない。では、この真空エネルギーを打ち消すものは何なのか、そういう問題が浮上してきたのである。

この問題は、意外な方向から大きなチャレンジを受けることになった。1998 年、ローレンス・バークレー国立研究所のパーミュッタ（1959 年～）は、遠方にある「超新星」の観測を通し、現在の宇宙が緩やかながらも再び「加速度的膨張」をしていることを発見した。その加速度的膨張は今から 60 億年ぐらい前から始まった。加速度が伴っている以上、この宇宙にはそうさせる何らかのエネルギーが存在しなければならない。しかし、そのエネルギーの正体は分からない。そこでパーミュッタは「正体不明のエネルギー」として自らの観測結果を公表した。

この宇宙の加速度的膨張は、アインシュタインの「宇宙項」の問題を蒸し返すことになった。その「宇宙項」が存在するとなると、量子論の場において計算上出てくる「真空エネルギー」を打ち消すことなく、かつある時点で加速度的な宇宙膨張をもたらすエネルギーでなければならない。そのようなことが可能となるためには、120 桁以上もの精度で微調整されていなければならない。しかしそれはあり得ない天文学的数字である。

理論に不自然なものが見え、微調整を必要とするとき、その奥にはまだ明らかになっていない真実が隠されていることが多い。それは、地動説を拒否して天動説を守るために、（惑星の動きを説明するため）苦し紛れに周転円や従円などを持ち出したことを思い出せば、十分であろう。星や惑星などの動きはすべて、地動説と万有引力の法則から簡単に説明できた。しかし、その出発点に立たない限り、とんでもない微調整を繰り返さねばならなかった。

同様に、不自然な微調整を繰り返し求められる「宇宙項」の裏には、何か未知の真実が隠されているに違いない、そう考えるのはごく自然なことだった。1998 年、超新星爆発の観測を通して宇宙の加速度的膨張が発見された（このことで、「宇宙項」の問題は一応の決着を見た）。シカゴ大学のマイケル・ターナーは、この加速度的膨張をもたらしている「宇宙を漂っている未知のエネルギー」が存在すると考え、それを「ダークエネルギー」と名づけた。日本語では「暗黒エネルギー」と訳されている。このエネルギーは、星とは違って光を発しないので「暗黒」である。と同時に「暗黒」という言葉には「正体不明の」という意味もある。そんな点が受け入れられたのであろう。その名は瞬く間に、世界中に広がった。

宇宙の加速度的膨張が明らかにされてから、この「暗黒エネルギー」の実態を解明するためのさまざまな理論的説明が提唱されている。しかし、今のところ、十分な説得力をもつ理論はない。むろん、「暗黒エネルギー」の性質を観測的に明らかにする試みもいろいろなされている。しかし、暗黒物質以上に難題に満ちており、21 世紀最大の天文学、あるいは素粒子物理学の問題となっている。

2. 暗黒エネルギーの発見

2003 年、WMAP（宇宙マイクロ波背景放射を観測する探査機）は、この宇宙は原子 4.6%、ニュートリノ 0.4%、暗黒エネルギー72%、暗黒物質 23%からできていると、発表した。普通、このような発表がある以上、当然「暗黒エネルギー」の正体は分かっていると考えられやすい。しかし、暗黒物質同様、暗黒エネルギーを想定しないと、今の宇宙を説明できないので使われている言葉である。その正体が明らかになっているわけではない。実際、暗黒物質の方は、近いうちにその正体が明らかにされると期待されているが、暗黒エネルギーの方は、まだ解決の糸口さえつかめていない。とりあえず、暗黒エネルギーとは、「宇宙全体を一様に満たしている正体不明のエネルギー」と定義しておき、話を進めることにしよう。

このエネルギーが確認されたのは、1998 年、今からわずか 15 年ほど前のことである。その年、ローレンス・バークレー国立研究所のパーミュッタ（1959 年～）は、現在の宇宙が、今から 60 億年ほど昔より、緩やかながらも再び加速度的膨張をしていることを発見した。加速度が伴っている以上、何らかのエネルギーが宇宙の膨張を加速さ

せているはずである。しかしその正体は分からない。そこで彼は、「正体不明のエネルギー」として、自らの観測結果を公表した。

1920 年代にハッブルが宇宙膨張説を唱え出したころは、学者間でも彼の考えはほとんど相手にされなかった。ところが、20 世紀後半になると、たくさんの観測結果から、もはや宇宙が膨張していることに疑義をはさむ人はいなくなった。問題はその膨張の仕方である。加速度的な膨張であるとは、誰も想像していなかったのである。

宇宙誕生の時にもインフレーションがあった。それは、真空エネルギーが空間を押し広げる力によって起こった。その際、真空エネルギーはゼロになった。確かに、その後も宇宙は膨張し続けているが、それはいわば惰性によるもので、膨張速度はそのうち減速すると思われていた。そんなところに、宇宙は再び加速膨張に転じているという観測結果が提示されたのである。学界は大騒ぎになった。さまざまな新たな観測が始まり、最終的には、2001 年に打ち上げられたWMAP衛星による観測結果が 2003 年に公表されるに及んで、一応の決着が見られた。

現在、この宇宙を満たしている暗黒エネルギーの値自体は非常にわずかなもので、宇宙の初期にインフレーションを起こした真空エネルギーに比べると、100 ケタくらい小さい。それでも、普通の物質の総量よりはるかに大きく、暗黒物質に比べても 3 倍以上になる。この暗黒エネルギーについては、膨張させる力があるという以外、何一つ分かっていない。このなんだか分からないエネルギーが宇宙の創生時から存在しており、それが約 80 億年の間何もしていなかったのに、突然動き出して宇宙を膨張させているという話である。

暗黒物質と暗黒エネルギーは本質的に同じものだ、と考える学者もいる。同じものが薄く広がれば暗黒エネルギーになり、濃い場所では暗黒物質になると説明する人もいる。あるいは、宇宙は凍りかけた湖のようなもので、氷になっているところが暗黒物質であり、液体として広がっているのが暗黒エネルギーだと提唱する人もいる。暗黒エネルギーなどというものは存在せず、何らかのエネルギーによって膨張しているのではなく、我々の知らない重力の別の働きが加速膨張を引き起こしているに過ぎないという意見もある。

このような批判的見解には、説得力のある部分もある。と同時に、全く的外れであるという部分もある。とにかく、宇宙が加速膨張していることは、超新星の観測からも証明されており、暗黒エネルギーの存在を想定しない限り、すべての観測結果を説明することは難しい。現在のほとんどの学者はそのように考えている。

現在暗黒エネルギーを研究している人たちは、暗黒エネルギーが時間的に変化するのかどうか、確かめようとしている。つまり、加速はずっと続くのか、それとも速度は緩まるのか。彼らは日夜、銀河を何百万個も観測するという大変な作業を行っている。その結果によっては、我々の宇宙の行き先も大きく変わることだろう。

暗黒エネルギーの存在については、「状況証拠」からそう信じるのが一番自然だ、という理論である。その正体は、暗黒物質とは違って、全く不明である。宇宙空間の膨張のようすから間接的に分かるのみである。重力レンズ効果（大きな重力をもっているものは、近くに来た光を曲げてしまうという性質があることを利用し、その銀河の歪みを解析する観測方法）やバリオン音響震動の観測によって、暗黒エネルギーの特徴がより明らかになるかもしれない。正体が絞られるだけで、正体までは明らかにならないかもしれない。まずは、このエネルギーの正体に関する画期的な理論が出される必要がある。そしてその理論（モデル）を「証明する」観測方法が提案されねばならない。
暗黒物質エネルギーについては、未だ、議論の糸口さえつかめていない。

3. 超新星爆発

この暗黒エネルギーを発見するきっかけとなったのは非常に遠くの宇宙で起きた超新星爆発だった。この超新星の加速度的な膨張の発見者アメリカのローレンス・バークレー研究所のソール・パールマター（1959 年～）とオーストラリア国立大学のブライアン・シュミット（1967 年～）、そしてアメリカのジョンズ・ホップキンス大学のリース博士に対し、2011 年度のノーベル物理学賞が授与された。

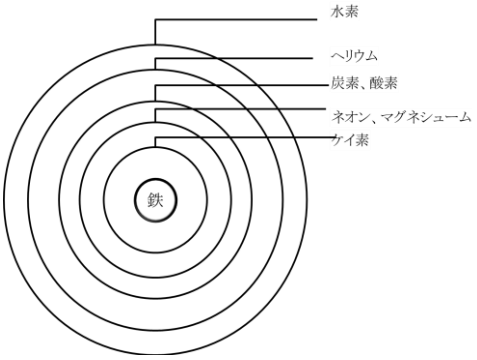
では、超新星爆発とはどういうものか。まず一般的な星の死について話すことから始めよう。
星は、水素をヘリウムに変えながら、光を放っている。通常、その状態で長い安定期を過ごす。しかし、その長

い安定期もいつかは終わる。星の中心部にある水素がすべてヘリウムに変換されると、星はエネルギーをつくれなくなる。それでも星の表面からエネルギー放出は続くため、星は縮み始める。一方星の中心には水素の燃えかすのヘリウムがたまってくる。そのヘリウムの芯は、さらに縮んで圧力が強まり、それによって押し出された外層は膨張してどんどん広がっていく。星の表面が広がれば面積は増え、その分温度が下がり、赤くなる。晩年に入った星は外から見ると赤い大きな星「赤色巨星」になる。

星の中心では、ヘリウムの芯が縮み、一層高温になる。一億度を超えると、ヘリウムの核融合が始まって炭素がつくられる。出来立ての炭素とヘリウムが核融合して、酸素もつくられる。宇宙が誕生したときには、水素とヘリウムしかなかった。それが、星という場を借りて新しい元素がつくられていく。ここまではすべての星が歩む道である。ところが、ここからは、質量が大きい「重い星」と、小さい「軽い星」とでは、歩む道が異なる。ここでは、超新星爆発の話なので、重い星に焦点をあてることにする。

太陽の質量の 8 倍以上ある星を「重い星」と呼ぶ。その星では、表面から放出されるエネルギーをまかなうため、中心にできた炭素と酸素の芯はさらに縮んでいく。それに伴い中心温度もうなぎ上りに上昇し、やがて8億度に達する。すると、炭素が核融合をはじめ、酸素、ネオン、マグネシウムなどの元素が新たにつくられる。中心部の炭素が燃え尽きると、また縮み、今度は酸素などが燃え、ケイ素、硫黄、カルシウムがつくられる。それも燃え尽き、また縮み、10 億度を超えるとケイ素などが燃え始め、鉄がつくられる。

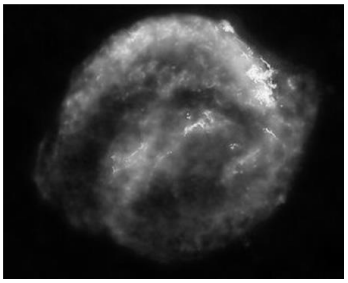
このときの星の中心は、鉄、その次にケイ素、硫黄、カルシウムの層、酸素、ネオン、マグネシウムの層、炭素と酸素の層、ヘリウムの層、水素の層と、いろいろな元素の層からなるたまねぎ構造となる。晩年を迎えた重い星は、自らの重みで中心部の温度を上げ、核融合によって新たな元素を次々と生み出していく。ところが、鉄までくると核融合は止まり、これ以上核融合によってエネルギーを取り出すことができなくなる。そこで星はひたすら収縮し、中心温度は50億度にまで上がる。これほどの高温になると原子核も無事ではいられず、構成要素である陽子や中性子に分解されてしまう。分解によって一挙にエネルギーが失われ、重力に対抗できなくなった星は一瞬にしてつぶれてしまう。



この瞬間、ほとんどの中性子は星の中心半径 10km ほどの範囲に集まり、硬い芯でできた「中性子星」がつくられる。中心めがけて高速で落ちてくる星の物質がこの硬い芯にぶつかると、超高温で強烈な衝撃波が生まれる。このとき、大量のニュートリノが放出される。そのニュートリノのエネルギーの一部を吸収した衝撃波は、外に向けて駆け上がり、星の表面に達する。すると、星はパァーと明るくなり、大爆発を起こす。星は太陽の 30 億倍もの明るさで輝き、星全体が宇宙空間に向けて飛び散っていく。これが超新星爆発の瞬間である。

質量が太陽の 20 倍以上もある「重い星」の場合、星の中心には「中性子星」ではなく、「ブラックホール」がつくられる。そして爆発の際には、星の物質が極度の高熱になることで、鉄よりも重い元素が一気につくられる。我々や我々の身のまわりにあるすべてのものを構成する元素の多くは、星と超新星によってつくられた。科学的に言えば、この世に星がなければ、我々人間が生まれてくることもなかった。

超新星は、観測される光の特徴から七つほどの種類に分類される。その中の一つに Ia 型の超新星がある。Ia 型超新星爆発は、二つの星がお互いの周りをくるくる回る連星で起こる。その連星の組み合わせには、次の二つのパターンがある。


超新星爆発の残骸

一つは、白色矮星に巨星の伴星という組み合わせである。白色矮星は自分の重力によって巨星からガスをどんどん吸い上げる。その結果、白色矮星は重さを増し、重力がより強くなっていく。重力が強くなると、ガスを飲み込むスピードはさらに増す。すると、重さが増え、重力がさらに強くなる、というサイクルが繰り返えされる。ただし、このサイクルは永遠に続くわけではなく、どこかで自分自身の重力に耐えられなくなり、潰れ始める。この時に大きな爆発を

起こすのである。

もう一つの組み合わせは、白色矮星と白色矮星の組み合わせである。この場合は、お互いに衝突して合体する。その時に超新星爆発を起こす。

このIa 型の超新星爆発は、銀河全体より明るく光る。地球に届く光を調べればどのタイプの超新星爆発かを調べることができる。Ia 型の超新星は、どれも明るさは同じである。しかし、Ia 型なのに、暗い超新星爆発が観測されることがある。暗く見えるのは、爆発が起きた場所が地球から遠く離れているからである。つまり、観測された爆発の明るさを調べることによって、爆発した場所が分かるので、Ia 型の爆発は宇宙空間の距離を測るよい指標になる。Ia 型の超新星がある銀河からの光を観測し、赤方偏移を測れば、それぞれの銀河がどれくらい早く遠ざかっているかを比較できる。

このIa 型の星を調べた結果、宇宙の膨張速度はどんどん増加していることが分かった。宇宙の膨張速度は、宇宙の創生以来だんだん遅くなっているはずである。宇宙が広がればその密度は薄まる。もし大きさが 2 倍になれば、縦、横、奥行きの三つの方向で長さがそれぞれ 2 倍になるので、堆積は 8 倍になり、密度は 8 分の1になる。すると、宇宙のエネルギー密度が低くなるので、宇宙の膨張速度は遅くなる。それが、全く逆の観測結果が得られた。宇宙物理研究者たちが驚くのも当然である。

宇宙が大きくなっても薄まらないエネルギーがどこかにあるはずである。引力に対抗する宇宙を広げようとする斥力を仮定しないと話のつじつまが合わない。宇宙が加速度的に膨張しているとすれば、宇宙が広がるたびに、それを補うような増え続けているエネルギーが必要になる。これが暗黒エネルギーを想定する理由である。

4. 第二のインフレーション

宇宙が膨張しているというとき、遠くの銀河の方が速く遠ざかっているように見える、ということを言っているのではない。AとBとCという点があったとする。A～Bは 1 の距離、B～Cの距離は 2 とする。A～Bが 2 になると、B～Cが 4 になる。Aから見ると膨張が大きくなっているように見える。しかしここで、加速度的に膨張するとは、ある時点でA～Bが1、B～Cが 2 だったのに、その後ある時点から、A～Bが 1 ではなく 1.5、B～Cが 2 ではなく 3 になったということである。すると、同じ時間が経った場合、A～Bが 2.25 に、B～Cが 4.5 になった、ということである。従って、これを第二のインフレーションと呼ぶ人もいる。

宇宙創生の初期のインフレーションでは、膨張の速度は 10 のマイナス 36 乗秒ごとに倍になるというものだった。しかし、今の第二のインフレーションによる宇宙の膨張速度は、最初のインフレーションとは違い、ごく緩やかなものである。

観測によれば、第二のインフレーションは 60 億年ほど前に始まった。なぜ 60 億年前なのか。この時期は、人類という知的生命体が宇宙に誕生するのにちょうどよい時期だった。もし第二のインフレーションの開始時期が早すぎたら、宇宙にある水素やヘリウムといったガスは、今日のように固まることなく、拡散し、今日のような天体は形成されなかっただろう。

太陽系が形成されていくのは、46 億年前である。天体が形成されなければ生命が誕生することもなく、当然人類という知的生命体が宇宙に出現することもなかった。137 億年という宇宙の歴史の中で、第二のインフレーションは偶然にも、人類が出現するのにちょうどよい約 60 億年前という時期に始まったのである。

もし残った真空エネルギーが一桁でも多ければ（10 倍）、開始時期が早すぎて人類は生まれなかったと考えられる。否、2 倍違っても人類の出現は難しかったのではないかと思う。絶妙な条件が整っていたからこそ、人類がこの宇宙に生まれてきたのである。電弱統一理論を完成したスティーヴン・ワインバーグは、この偶然性の問題は「人間原理（人間原理については、次回の講演において詳しく説明する）」という考え方しか説明できないのではないかと言っている。

5. 宇宙の未来

我々の宇宙は、現在のところ暗黒エネルギーによって加速度的に膨張していることは分かった。では、この宇宙は、今後どうなるのか。それについては、次の 4 つの考え方がある。そのいずれもが暗黒エネルギーと深く関わっている。

まず、宇宙は大きくなっていくが、ある時点を境にして収縮に転じ、最終的にはまた小さな点、かのビッグバンの状態に戻る、という予測である。この考えは、依然はかなり有力だった。しかし、暗黒エネルギーの発見を契機に、この考えを信じる学者はほとんどいなくなった。

二番目に、宇宙は、暗黒エネルギーによって加速膨張し続け、最終的には宇宙は破裂し、空間も原子もバラバラになってしまうという予測である。

三番目は、宇宙は暗黒エネルギーによって現在のスピードで膨張し続け、それが永遠に続くと予測する。二番目のように、どこかで破裂するという考えはない。宇宙は膨張しているので、最終的には、遠くの銀河はより遠くに行ってしまい、地球からは見えなくなる。つまり、このまま宇宙が光より速く膨張し続けると、今観測できているたくさんの銀河からの光も、いずれは見えなくなる時が来るということになる。

四番目は、物質と暗黒エネルギーの割合によって、宇宙はだんだん膨張速度が穏やかになる。そして、次第にゼロに近づき、最後は膨張が停止すると予測する。この場合も、宇宙の膨張は止まるが、宇宙そのものは終わるわけではなく、永遠に存続することになる。

我々の宇宙は、これから先、いったいどの道を歩むのか。そもそも暗黒エネルギーの実態が分かっていないのだから、今の時点で予測することは難しい。将来どれかの道をたどるであろうが、それは数千億年後の話である。現在の人類が関われるような話ではない。被造物の管理を任されている者としては、きちんと見据えておきたいという思いはある。だがきっと、そこまで心配すると、「It's not your job」と神から言われそうな気がする。

Ⅲ. ブラックホール

ダークマター（暗黒物質），ダークエネルギー（暗黒エネルギー）の「ダーク」は、「分からない」の代名詞のようなものである。それに比べ、日本語にすれば同じ「暗い、黒い」を意味する「ブラック」をつけた「ブラックホール」の方は、謎に満ちてはいるものの、かなりいろいろなことが分かってきている。

現代のブラックホールの描写は、アインシュタインの相対性理論を基にして考えられている。しかし、一般相対性理論の登場する 100 年も前に、イギリスの天文学者ミッチェルやフランスの数学者ラプラスは、ニュートン力学を応用して、ブラックホールの基になる暗黒天体が存在することを予測していた。

1. ブラックホールとは

ブラックホールとは、圧縮されてつぶれた物質の巨大な雲である。密度が高くて重力が強いため、近づいてきた物質をすべて飲み込んでしまう。ブラックホールとは、「黒い穴」が直訳である。その名前から想像できるように、この内側からは光さえも出てこられない。このブラックホールを理解するには、この「光さえ抜け出せない」ということを理解する必要がある。

もし地球からロケットを打ち上げようとすると、地球の重力によって引っ張られるので、相当な速度で打ち上げないと地球からの脱出に失敗する。この重力に打ち勝つ速度を脱出速度という。この脱出速度は、天体表面の重力によって決まる。天体が重いほど、そして小さいほど脱出は難しい。地球であれば、秒速 11 キロ以上であれば、脱出可能になる。我々の感覚で言えば、秒速 11 キロは途方もなく大きな速度である。ところが、光の速度は秒速 30 万kmで、軽々と地球を脱出してしまう。光の速度のものを脱出できない地球にしようとするには、今の重さを変えないままで、半径 9 ミリまで縮める必要がある。つまり、地球を 9 ミリの大きさに縮めたものが、光を閉じ込めておくことができるので、ブラックホールになったということになる。太陽の脱出速度は秒速約 620kmである。すると、太陽を半径 3 キロの大きさまで潰すとブラックホールになる。ブラックホールが、いかに密度の濃い天体であるか分かるであろう。ブラックホールは、材料には一切関係なく、質量とサイズだけで決まる。

ブラックホールかそうではないかの境界線は、光が脱出できるかどうかという事にある。この境界面を「事象の地平面」と呼ぶ。光速は宇宙の「最高速度」で、1 秒間に 30 万 km 進む速さである。ある領域の重力が、光速で飛んでも逃げられないほど強い場合を「事象の地平面」としているのである。ブラックホールの特徴は、この「事象の地

平面」の中にあることである。従って、そこでは、光さえ逃げ出させない。

カールシュヴァルツシルト

別な言い方をすれば、この「事象の地平面」がブラックホールの周囲を覆っている、ということになる。ブラックホールの中心から事象の地平面までの距離は計算することができる。その半径は、「シュヴァルツシルト半径」と呼ばれている。ドイツの天文学者シュヴァルツシルトは、1916 年頃、アインシュタインの一般相対性理論（1915-16 年に発表された）を基に、このブラックホールの半径を導き出した。

「事象の地平面」で囲まれた領域の大きさは、ブラックホールの質量で決まってくる。質量が太陽の 10 倍では半径 30kmくらいの大きさである。太陽の 10 億倍も質量がある場合には、その領域の半径は 30 億kmになる。それは、太陽から土星までがすっぽり入ってしまうほどの大きさになる。この「事象の地平面」より少しでも外側にいれば、光速であるなら飲み込まれることはなく、脱出できる。しかし、もし「事象の地平面」の真上まで来てしまったら、脱出しようと思ってもできず、衛星にしかならない。

「事象の地平面」より少しでも内側に足を踏み入れたら、光速でも中心に落ちていくしかない。これがブラックホールというものなのである。地面のように明確な境界線を引くことは難しいが、この「事象の地平面」をもって、暗黒領域とそうでない領域の境界という線が引かれ、ブラックホールのサイズということになる。

「事象の地平面」の中に入ると、光でも出てくることができない。従って、ブラックホールの中でどのようなことが起こっているのかは、外部の我々には分からない。理論的に考えると、事象の地平面を超えてしまった物質は、ブラックホールの重力の影響を受け、前後に細長く引き伸ばされる。特異点に近くなればなるほど重力は大きくなるので、引き伸ばす力も強くなり、原子核、素粒子とだんだん小さく分離されていく。そして特異点あたりでは物質としての存在はなくなって、エネルギーになると考えられる。

「ブラックホール」は、大量の物質を小さな領域に押し込め、極限状態に置いた状態にある。それは、時空に穴が開いた状態というか、我々の宇宙から見れば「底が抜ける」というイメージになる。もし中に入ったときに無限に底が抜けていくようなものであれば、それは別の宇宙ということになる。

1977 年天文学者ロジャー・ブランドフォードとローマン・ズナイェクは、ブラックホールが自転していると主張し、熱い磁気を帯びたガスを飲み込んでいることから、巨大な電気回路ができていることを明らかにした。ブラックホールが自転すると、赤道からそれを取り囲むガスへと電流が流れ出て、それがまたブラックホールの極に戻ってくる。そこでは巨大な質量が関わっているので、1,000 万兆ボルトもの電気を生み出している。ブラックホールは「超巨大なバッテリー」のようなものである。

2. ブラックホールの形成過程

恒星とは、太陽のように核融合のエネルギーで自ら光輝く星のことである。この恒星は、水素やヘリウムから成るガスの集まりである。宇宙空間を漂うガスが重力によって引き寄せられ、十分な量が集まると、中心部の温度が上がり、核反応が始まる。こうしてガスの塊は輝き始める。この核反応では膨大なエネルギーが発生する。すると、恒星を構成するガスが温められ、圧力が上昇する。この圧力は恒星を大きくしようとする。星自身の重力とガスの圧力がつりあうことによって恒星の大きさは一定に保たれる。

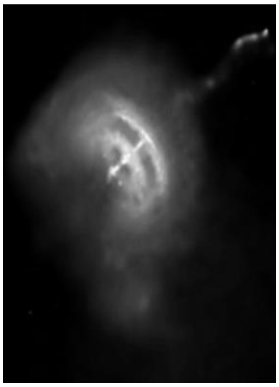
しかし、この安定はいつまでも続くわけではない。燃料に限りがあるので、燃料を使い果たした恒星ではガスの圧力が効かなくなり、収縮を始める。半径が約 1 万kmまで小さくなったあたりで電子の「縮退圧」という新たな力が働き、重力による収縮が止まる。この縮退圧によって支えられた星を「白色矮星」と呼ぶ。重力とガスの圧力がつりあっているのが「恒星」、重力と電子の縮退圧がつりあっているのが「白色矮星」である。通常の恒星は、いろいろな大きさのものがあるが、直径 100 万km程度のものが多い。それに対し「白色矮星」は 1 万kmと、大変小さな恒星の残骸となる。

1920 年代までは、すべての恒星が最終的には「白色矮星」になると考えられていた。しかし、インド生まれの天文学者チャンドラセカールは、太陽程度の質量の星は白色矮星になるが、それより重い星、太陽質量の約 1.4 倍

を超えると電子の「縮退圧」が働かず、無限に収縮して「白色矮星」にならず、ブラックホールになる、と提唱した。彼のこの~~発見~~提唱に対し、彼の師であり、イギリス天文学の大家エディントンは、ブラックホールのような奇妙な天体が生まれるはずがないと否定的な見解を示した。エディントンの権威は絶大だったし、ブラックホールがあまりに常識はずれの天体であったため、人々はエディントンの考えを受け入れた。チャンドラセカールの発見が天文学史上重要な意味があると認められたのは、提唱してから半世紀も経ってからの1983年、彼がノーベル賞を受賞したときである。

ただし、チャンドラセカールの発見で問題がすべて解決したわけではなかった。1932 年、原子核の分野で、陽子と電子以外に中性子があることが発見された。中性子が発見されると、電子の「縮退圧」で支えられる「白色矮星」だけでなく、中性子星の「縮退圧」で支えられる「中性子星」があってもいいはずだと、ツヴィッキーが提案した。ホイーラーは、この考えを取り入れ、「ブラックホール」ではなく、「中性子星」ではないか、と考えた。それに対し、ブラックホールができると言ったのが、後に「原爆の父」と言われた原子核や中性子の専門家オッペンハイマーだった。

その後、太陽の 8 倍から 30 倍の質量の恒星は、その最後は超新星爆発を起こす、その結果「中性子星」になるということが分かってきた。1967 年、イギリスの天文学者アントニー・ヒューイッシュとジョスリン・ベル・バーネルは、この「中性子星」を最初に観測した。さらに、太陽の 30 倍以上の恒星は、超新星爆発を起こし、その後「ブラックホール」が形成されることも明らかにした。このブラックホールについては、1971 年、世界初のX線天文衛星「ウフル」の観測によって確認された。ホイーラーは最初、オッペンハイマーに反対してブラックホールの存在を否定していた。しかし、後に自分の考えを変え、ブラックホールの存在を支持する立場に変わった。最初は、「爆縮星」とか「凍結星」と呼ばれていたものが「ブラックホール」と命名された。


中性子星

チャンドラセカールとエディントンの論争、オッペンハイマーとホイーラーの研究を通じ、次のことが明らかになった。質量の比較的小さな星の最後が「白色矮星」となる。もう少し質量の大きい星は「中性子星」になる。さらに重い星は、「ブラックホール」になる。現代の天文学者のほとんどは、そう考えている。白色矮星については既にふれた。ここでは「中性子星」についてもう少し詳しくふれておこう。

星は、核融合を続け、その最後になると、星の中心部にある原子をすべて鉄に変える。この鉄はそれより重い元素に融合することはない。一方、星の中心部の周囲にある熱いガスの殻は反応を続け、鉄になっていく。従って、終末を迎えた星の鉄の芯は、時間と共に大きく、重くなる。この巨大な鉄の玉が太陽質量の 1.4 倍ほどの質量(2,800 兆兆トン)に達すると、突然崩壊をはじめ、中性子星になる。この中性子星は直径が25キロほどしかないが、平均密度は立方センチあたり 3 億 4,000 万トン(白色矮星の 1 億 7,000 万倍)にもなる。この密度は、サイコロほどの中性子星に対し全人類の重さの 3 倍ほどでやっとつりあうという感じである。中性子星がいかに重いか分かるだろう。

中性子星がこのように高い密度に達することが可能なのは、原子と電子の配置の仕方が通常の規則とは異なるからである。どんな物質でも、一見中身はぎっしり詰まっているように見える。ところが、原子のレベルでみると、実際にはほとんどが空っぽである。通常の物質の原子では、陽子と中性子からなる原子核を、電子の雲がはるか遠くから取り囲んでいるような形なので、原子核と電子の間には何もない巨大な隙間がある。ところが、中性子星になると全く違う。

まず、白色矮星の場合は、通常の物質において埋めることができる原子の隙間を一番ぎちぎちに詰められたような状態になる。その結果、立方センチあたり2トンの密度にもなる。ところが、中性子星になると、白色矮星でもなお使っていない空間がたくさんあるので、それさえもすべてを埋め尽くした状態になる。

中性子星とは、星に存在する多くの陽子と電子が融合して中性子になることである。電子の 90～95%がなくなり、原子それぞれの原子核の周りに確保していた空っぽの隙間が使えるようになり、星は劇的に体積を減らす。新たにできた中性子は、基本的に触れ合うほどに接近しあう。こうして星の密度は急上昇し、立方センチあたり 3 億

4,000 万トンというとてつもない値になる。

では、このような中性子星が重力によってつぶされないのはなぜか。これは「パウリの排他原理」による。つまり2つの中性子は、同時に同じ場所で同じエネルギー状態を取ることはできない。この普遍的な法則に従わねばならないので、中性子はほとんど想像を絶する圧力と密度の状況で重力に逆らってきつく格子に詰め込まれている（白色矮星の方は結晶状の構造をとっているので、少々状況が異なる）。

中性子星の場合は、中性子の強烈な重力により、大気の厚さはほんの数センチ程度しかない。中性子の表面には、中性子星ができる時に星の大半を覆った中性子化を逃れた普通の原子が宿っている。その結果、これらの物質は特にきつく詰め込まれることはなく、密度は立方センチあたり 5 ないし 10 グラムである（鉄程度）。しかも、中性子星表面の強烈な磁場は、個々の原子を細長い円筒状につぶすので、それはものすごく長い鎖のようになり、磁場の方向に沿って並ぶことになる。
この場合、中性子表面の原子すべてがつながってきちんと並んでいる。この変わった物質は中性子星の殻で、厚さは 1 キロほどである。それはとてつもなく丈夫で、切れたり折れたりすることはない。原子核物理学者のチャールズ・ホロウィッツ・カダウによれば、その中性子の殻の強さは鋼鉄の 100 億倍の強度がある。

最後に、恒星ブラックホールについて述べておこう。質量の大きな星が爆発すると、たいていはその中心部分が中性子星として残る。ところがそれよりさらに大きな星は、超新星爆発後にもっと重い中心部を残すことがあり、それがさらにつぶれて恒星ブラックホールになる。ブラックホールにおいては、事象の地平の内側からは光さえ脱出できないほどの極度の重力があると想定される。

一方、恒星ブラックホールの中には、中性子星よりも重くて小さいものもある。従って、その内部は中性子星より密度が高いと予想するかもしれない。しかし、それは違う。未だはっきりしているわけではないが、多くの学者は次のように考えている。ブラックホールの質量はすべて、「特異点」という、事象の地平の中心にある、無限に小さい数学的な点に集中している。すると、ブラックホールの密度は、すべて無限大ということになる。ただし、これを理解するのは容易ではなく、この考えを確かめる測定結果が得られているわけではない。

一般的には、ブラックホールを「密度相当値」というものを使って記述する。つまり、ブラックホールの体積を、事象の地平を使って求め、質量を体積で割って密度を求める。通常の物質を押しつぶしてブラックホールになるまで小さくする場合に、ブラックホールができるほど圧縮したときに達する密度を、密度相当値という。
ブラックホールでは、質量が大きくなるほど重力は弱くなる。従って、重いブラックホールの方が軽いブラックホールよりも密度は低い。あり得る最高の密度のブラックホールを探そうとする場合には、質量の最小のブラックホールを調べればよい。現在知られているもので最小のブラックホールは「GRO J0422+32」で、質量は太陽の4倍もない（およそ 8,000 兆兆トン）。この事象の地平は直径およそ 23 キロである。質量を体積で割ると、密度相当値は立方センチあたり 12 億トンで、中性子星の密度の 3 倍以上となる。恒星ブラックホールは、現在 10 個余り見つかっている。しかしその密度相当値は相当下がる。例えば、太陽質量の 10 倍のブラックホールの密度は、立方センチあたり 1 億 8,000 万トンで、最小のものの 6 分の 1、中性子星の半分ほどである。また、ほとんどの銀河の中心には超大質量ブラックホールがある。中には太陽質量の何万倍、何億倍というものがある。このような巨大な質量であっても、事象の地平も大きいので、密度相当値は意外に低い。

3. 銀河系のブラックホール

天文学の場合、観測によって新種の天体が発見され、理論的にその正体が解明されるという順番で研究が進められる。しかし、ブラックホールの場合はその逆で、理論的に予言され、観測によって発見された。理論が観測に先行するという珍しいケースである。

ブラックホールは暗黒天体であり、その存在を検証するのは大変困難なことだった。しかし 1962 年、「銀河系」の中心部にある「はくちょう座」の方向に「X線源になるものがある」ことが分かった。それは、「白鳥座X-1（強いX線を放射している天体の意味）」と名づけられたが、その後の観測により、「白鳥座X-1」には、巨大な恒星が存在することが分かった。しかも、この恒星は強いX線を出す性質はなかった。
さらに、もう一つの別の天体とペアを組み、単独で存在していないことが分かった。恒星はこの謎の天体と重力

で引き合い、互いの周りを回っていたのである。謎の天体からのX線を詳しく観測すると、何と1,000分の1秒という非常に短い時間間隔で変動していた。これは、謎の天体の半径が300km以下であることを意味する。謎の天体は極めてコンパクトな天体だった。

またこの謎の天体は、質量が大きいことも判明した。「はくちょう座X-1」にある恒星は、太陽の30倍程度の大きな質量をもっているが、太陽のようにじっとしていない（太陽がほとんど動かないのは太陽を周る惑星の質量が非常に小さいからである）。地球の軌道半径（太陽と地球の距離）と回転周期（1年）から太陽の質量を見積もることができるように、互いに重力で引き合っている天体の質量は、軌道半径と周期を観測することによって調べることができる。

詳しい観測の結果、謎の天体の質量は太陽の6倍から20倍であることが分かった。これは、白色矮星でも、中性子星でもなく、ブラックホールであるに違いないと判断された。このような結論が出たのは、9年後の1971年のことだった。これが、天文観測によって人類が初めて発見したブラックホールである。なお、この「はくちょう座X-1」のX線観測においては、故小田稔氏をはじめ、日本の研究グループが多大な貢献をした。

太陽の10倍程度の質量をもつブラックホールを「恒星質量ブラックホール」と呼ぶ。2011年現在、銀河系の中心付近には20個ほどのブラックホールの痕跡が見つかっている。そのほとんどは、太陽の10倍程度の質量で、サイズは30キロほどである。発見されているこの種の「恒星質量ブラックホール」のほとんどは、「はくちょう座X-1」のように恒星とペアを組んでいる。二つの恒星がペアを組んでいるシステムを「連星」と呼んでいる。連星の片方がブラックホールである場合には、「ブラックホール連星」である。

我々の住む銀河系にも、銀河系の中心部に太陽の約400万倍の重さの「いて座A*（エースター）」と呼ばれる超巨大ブラックホールがある。ただし、巨大なのは質量であって、サイズではない。そのブラックホールの半径は1,200万kmで、地球と太陽の距離が1億5,000万kmなので、そのサイズは10分の1以下になる。銀河系のサイズは約10万光年なので、超巨大ブラックホールといっても、サイズとしてはわずか1,000億分の1にしかならない。このいて座A*は、本体はブラックホールなので暗いが、そのヘリのごく近くには、猛烈な速さの（多分もう終わりに近い）軌道上のガスが、大量の光と熱を発している。これは銀河系の中でただ一つの全く動かない天体で、銀河系のど真ん中にあり、銀河系のすべての星はこれを中心に公転している。

2005年頃から、若いアメリカ人天文学者ウォーレン・ブラウンは、アリゾナ州にある望遠鏡を使って、銀河系の質量と構造の新しい地図つくりを始めた。その作成過程の中で、銀河系の中心いて座A*から時速250キロの速さではじきとばされた「SDSS J090745・04024507」という星を発見した。これは、1億5,000万年ほど前に銀河系の中心いて座A*に接近し、40万年ほど前にその中心から弾き飛ばされたものである。それは、我々の知る限り最速で移動しており、今も減速する気配はない。このような発見以来、多くの天文学者がこの種の星の発見に興味をもち、今ではいて座A*から100万km以上の高速で遠ざかっている星が20個以上発見されている。この現象が銀河系の中心にある最大のブラックホールに何らかの関係があることは間違いない。このような現象が、ブラックホールの謎を解くための大きな手掛かりを提供するかもしれない。

4. 超巨大ブラックホール

銀河系の中心部にある「いて座A*」のような超巨大ブラックホールは、けっして珍しいものではない。銀河系のような渦巻き銀河の中心部分には必ずあると考えてよい。中には、太陽の重さの数百億倍もあるものもある。このような銀河の真ん中にあるブラックホールは、銀河全体の形成に関わっている。太陽の何千万倍、何億倍という規模の質量をもっているが、銀河が大きければ大きいほど、ブラックホールも大きい。これは、ブラックホールが銀河と共に進化している証拠でもある。

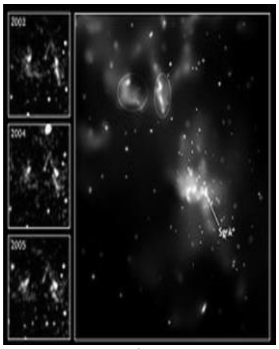
超巨大ブラックホールとは、太陽の100万倍から数百億倍もの質量をもつブラックホールのことである。超巨大ブラックホールは、ブラックホール同士が合体するとか、ブラックホールの左右に広がる超臨界円盤のガスを吸い込むなどして成長していく。未だ、正確なところは分からないが。

ブラックホールのある部分がときどき明るくなる。ブラックホール自身は光らない。では、なぜときどき明るくなるのか。その理由はブラックホールが周りにあるガスを飲み込んでいるからである。ブラックホールとは一度入ったら

絶対出ることができない場所である。当然ガスも出てくることはできないが、ガスはブラックホールに飲み込まれる直前に、まるで断末魔の叫びのように光を出す。その光が明るく輝くのである。このようにして、ブラックホールは、だんだん大きくなっていく。

いろいろな銀河において、銀河の中心にある巨大ブラックホールの質量は、バルジの質量の約 2,000 分の 1 になることが分かってきた。中心の巨大ブラックホールとバルジのサイズは何ケタも違うにもかかわらず、質量にこのような密接な関係があるのは、とても不思議である。巨大ブラックホールは、落ちてくる星やガスを飽きることなく飲み込み続け、重さを増やす方向にしか進まない。あるいは、ブラックホール同士が食い合って巨大化してきたことは分かっている。しかし、バルジがどうなっているのか、その質量はどのように決まっているのか、巨大ブラックホールの起源と成長にバルジがどのように関わっているのか、このような問題は未だよく分かっていない。

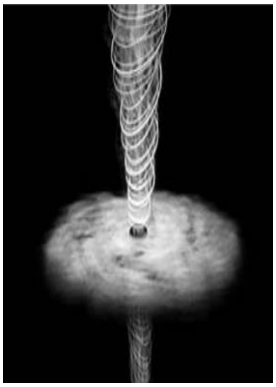
銀河系の最大の巨大ブラックホールは、その中心にある「いて座A*」である。これは、銀河系では最大であっても、宇宙全体では比較的小さな方だと言わねばならない。今ある望遠鏡によって、それぞれの銀河の中心にある巨大ブラックホールの質量などを、いて座A*を測るように正確に測定することはできない。しかし、いくつかの測定方法を用いて、それぞれの銀河の中心にある超巨大ブラックホールの質量を推定することは可能である。その結果、銀河の中心に位置する巨大ブラックホールの多くは、いて座A*の 100 倍近くあるものも珍しくはないことが分かった。現時点で分かっている一番質量の大きな巨大ブラックホールは、ケファウス座の方向に120億光年離れたところにある「S5　0014+813」である。イタリアの天文学者ガブリエレ・ギセリーニらのチームは、その質量を太陽の 400 億倍と計算している。これは、いて座A*の 1,000 倍にもなる。


いて座 A＊

5. クェーサー

1932 年、アメリカの物理学者・無線技術者であったカール・ジャンスキー（1905 年−1950 年）は、波長 14.6 メートルの電波を検出できるアンテナを用いて、宇宙から飛来する電波を初めてとらえた。彼は最初、太陽以上に強い電波源はない、また太陽が地平線に隠れたら、宇宙から飛来する電波は弱まるだろう、と考えていた。太陽の電波は、銀河系の 1,000 万倍も強いと計算していたのである。

ところが、その予想に反し、宇宙からの電波は太陽よりはるかに大きく、また太陽の動きには対応していないことが分かった。電波の来る方向に関しても、彼の予測は外れた。太陽の代わりに銀河系中心（いて座の方向にある天の川の最も明るい領域）が真上に来ると電波は強まり、それが地平線に隠れると電波は弱まった。銀河系の中心から飛来する電波は、太陽からの電波よりはるかに強いことが判明した。


クェーサーのイメージ

この観測は、「電波天文学の幕開け」と言われるほど重要なものだった。1950 年、彼は 44 歳の若さで死亡した。もし彼がもう少し長生きしていたなら、間違いなくノーベル賞を受賞した、と言われている。電波天文学の分野では、電波の強さを示すのに、今でも「ジャンスー」という単位を使っている。

その後、電波技師レーバーは、自分で電波望遠鏡を作成し、はくちょう座とカシオペア座の方向に強い電磁波のあることを確認した。それに関する論文は、アメリカの天文学会に提出された。そのような電磁波は、1960 年頃になると、数百個見つかるようになった。この謎の電波源は「クェーサー」と呼ばれた。クェーサーとは、準恒星状態の天体という意味で、星ではないが星のような天体を指した言葉である。1963 年、オランダ生まれのアメリカ在住の天文学者シュミットは、宇宙のはるかかなたで、とてつもない明るさで輝く天体を観測していた。これも、クェーサーだった。

クェーサーはあまりに遠いので、近傍の銀河のように、形や大きさを直接測ることはできない。しかし、クェーサーの明るさの時間的な変化から、そのサイズを推定することはできる。その結果、極めてコンパクトなサイズであることが分かった。銀河の 100 倍ほどの明るさをもっていても、そのサイズは 100 万分の 1 である。このような星は、

宇宙には存在しない。唯一の合理的な解釈は、ブラックホールと考えることである。このような明るさとコンパクトさの両方を満たす天体は、巨大なブラックホールとそれを取り巻くガス円盤であると解釈するなら、すべてが理解できるわけである。

しかもクェーサーは、赤方偏移(スペクトル線が赤い方にずれる)によって、我々から遠ざかっていることが分かった。20 億光年離れている「3C273」というクェーサーは光速の 16%、45 億光年離れている「3C48」のクェーサーは、光速の 37%の速度で遠ざかっている。これほど超高速で遠ざかっているということは、クェーサーが宇宙のはるか遠方に存在していることを意味している。

クェーサーほどのパワーはなくても、中心部が明るく輝き時間的に変動している銀河も、いくつも見つかってきた。それらはクェーサーの縮小版と考えてよい。現在は、このような銀河の中心部とクェーサーをひっくるめて「活動銀河中心核」と呼んでいる。非常にパワーの弱いものをも含めると、この「活動銀河中心核」は、およそ半数の銀河に存在することが分かっている。しかし、その構造については未だなぞに包まれていて、ほとんど分かっていない。現在では、活動銀河中心核をもつもたないに関わらず、およそすべての銀河の中心部には超巨大ブラックホールが存在することが明らかになっている。この超巨大ブラックホールに光り輝くガス円盤が付随しているというシステムは、多くの銀河の中で比較的ありふれたものとなっている。

最近では、多くの天文学者が、電波銀河、クェーサー、ブラックホールなどは基本的には同類の天体であると考えている。むろんその詳細な事柄は不明な点が多い。今後の観察結果を待つ以外にない。

6. ホーキング放射

これまで我々は、ブラックホール、超巨大ブラックホール、クェーサーなどについて考えてきた。最後に、このようなブラックホールが、どのような運命をたどるのか、考えてみたい。この問題に興味深い提案をしているのは、イギリスのスティーヴン・ホーキングである。彼は来日したこともあり、著書もたくさん翻訳され、ベストセラーにもなっている。車椅子の物理学者として、日本でも親しまれている。1974 年彼は、「ブラックホールは、さまざまな粒子を放出し続けるため、徐々に質量を失い、最後には蒸発して消えてしまう」という考えを公表した。

この理論は、「ホーキング放射」と言われる。それは、次のようなものである。

ブラックホールは穴が開いており、そこでは非常に強い力が働いている。従って、周囲のものはすべて吸い込まれてしまう。もし周囲のものがすべて飲み込まれると、周囲には何もなくなってしまう。ブラックホールがその状態で放っておかれると、今度は、じわじわと周囲にエネルギーを放射するようになる。その放射によってブラックホールはエネルギーを失っていき、だんだん小さくなる。そしてしまいには、パチンと蒸発してしまう。

現代物理学では、「真空」とは、絶えずペアの粒子が生まれては出会い、消滅している状態を言う。これは「粒子が揺らいでいる状態」にある。ペア粒子はあっという間に消滅し、平均すると揺らぎは何も起こらなかったかのように消えてしまう。ところが、ブラックホールの近傍では、違った状況が起こることがある。ペアで誕生した粒子がきちんと出会えれば消滅する。ところが、出会う前に片方だけがブラックホールに吸い込まれてしまう、という可能性がある。相棒を失った粒子は、同様にブラックホールに吸い込まれる場合もある。しかし、吸い込まれるのを免れ、はるか遠方に飛び去ることもある。このような粒子は、ブラックホールから飛び出してきた、粒子のエネルギー分だけブラックホールのエネルギーが減少した、と理解することができる。

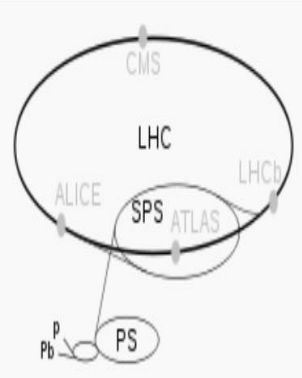
むろんこの現象は、ブラックホールがガス円盤をまとうことで光り輝いている状態とは違う。ホーキング放射は、ブラックホールがつくり出す歪んだ時空がもとになって起こる。従って、周囲にガス円盤がなくても起こる。ブラックホールの表面の重力は、ブラックホールの質量に反比例する。同様に、ブラックホールの温度もまた、質量に反比例する。例えば、太陽質量の 10 倍の質量をもつブラックホールの温度は、1 億分の 1 度となる。つまり、質量の大きなブラックホールほど温度は低くなる。ということは、放射は弱くなる。通常の恒星は質量が大きいほど明るく輝くが、ホーキング放射においては、全く反対の結果になる。質量の小さなブラックホールほど、ホーキング放射は強くなる。

ホーキング放射が強ければ強いほど、ブラックホールの崩壊にかかる時間は短い。宇宙年齢 137 億年の間に蒸発できるブラックホールの質量は、最大で小惑星程度（太陽質量の 100 億分の 1 のさらに 100 億分の 1）である。これまで見てきたブラックホールの場合は、宇宙年齢の 1 億倍の 1 億倍の・・・と 1 億倍を 7 回繰り返してもまだ足りないくらいの時間が必要である。巨大ブラックホールに至るとそれよりさらに長い時間がかかることになる。

従って、ホーキング放射によるブラックホールの崩壊という理論は、ミニブラックホールの世界の話である。現実のブラックホールの話ではない。というより、今日までの宇宙誕生から 137 億年の間に、たくさんのミニブラックホールが誕生し、それが消えていった、という話である。そういうことはあり得る。

銀河の真ん中にある超巨大ブラックホールと、星の成れの果てである恒星質量のブラックホールは見つかっている。というより、理論的に存在すると仮定しないとすべての天文現象は説明できない。しかし、まだ実際にブラックホールそのものが観測されたわけではない。ミニブラックホールの存在と消滅に関しては、理論的にあり得るが、確かな話として受け止めるわけにはいかない。

スイスのジュネーブ近郊につくられた「大型ハドロン衝突型加速器」において、ブラックホールの誕生という試みもなされている。もしそこでブラックホールがつくられたなら、この地球も飲み込まれてしまうのではないかという心配がまことしやかに語られたことがある。しかし、もし仮に加速器の中で作られたとしても、そのブラックホールは一瞬にして消えてしまう。その心配は全くない。



大型ハドロン衝突型加速器
模式図

おわりに

我々は、科学的な側面からこの宇宙の不可解な事柄を考えてきた。しかし、ほとんどのキリスト者は、この宇宙を科学的にではなく、神学的に見ることに慣れている。その結果、見方が全く違ってくる。この宇宙は、間もなくキリストの再臨と共に滅ぼされ、新天新地に取って替えられる。そう信じているキリスト者は、科学的な宇宙理解にはあまり興味を示さない。

本講演で扱われたような暗黒物質、暗黒エネルギー、ブラックホールなどの問題についても、科学の限界であり、神の創造の神秘に属するとして、まともに考える価値はない、と思い込んでいるキリスト者は意外に多い。キリスト者として、それはまずいというわけではない。科学的な意識を持っていなくても、この世界に生きていくのに不都合なことはほとんどない。ただ、このような科学の未解決の問題に関し、すぐに「神の創造の奥義」とか、「神の御業の神秘」などを持ち出し、問題をまともに取り合わない態度だけは控えるべきである。科学者は、科学の領域において、科学の方法論により、神の被造物を解明しようと真摯に向き合っている。被造物管理の神学においては、科学者に感謝することはあっても、蔑視することはあってはならない。

科学者がさまざまな現象に直面し、説明に窮すると、すぐ神を持ち出すキリスト者がいる。このような議論の仕方を「ギャップ・セオリー（Gap theory）」という。科学者が科学の論理では説明できないような事柄は、神がなさったことである。それゆえ、神は存在するのである、といった論理である。

これは、信仰者の仲間には通じる。しかし、科学者には通じない。それに、「ギャップ・セオリー」には、大きな盲点がある。もし科学がさらに進めば解明されるような事項にまで、神を持ち出してしまう危険性が常にある。それでは、科学の発展を阻害する。科学者たちを信仰から遠ざけてしまう。

さらにそこで語られる神は、普段は「理神論的な神（Deism）」で、ギャップが出てくると「有神論的な神（Theism）」になる。聖書の神はキリストを通して万物を創造され、常に万物を保持されている。ギャップの時だけ登場させる神は、聖書の神ではない。万物の創造者なるキリストのお姿とは大きく乖離している。

> なぜなら、万物は御子にあって造られたからです。天にあるもの、地にあるもの、見えるもの、また見えないもの、王座も主権も支配も権威も、すべて御子によって造られたのです。万物は、御子によって造られ、御子のために造られたのです。御子は、万物よりも先に存在し、万物は御子にあって成り立っています。
> （コロサイ 1:16-17）

参考文献

＜暗黒物質に関する参考文献＞
荒船良孝著『宇宙の新常識 100』(2008 年、ソフトバンク)44-50 頁
イアン・スチュアート著、水谷淳訳『もっとも美しい対称性』(日経BP社、2008 年)
谷口義明著『宇宙進化の謎』(講談社、2011 年)
郷田直樹『ダークマターとは何か』(PHP研究所、2012 年)
佐藤勝彦著『宇宙「96%の謎」』(角川書店、2008 年)211-40 頁
村山斉著『宇宙は何でできているか』(幻冬舎新書、2010 年)193-210 頁
青野由利著『宇宙はこう考えられている』(筑摩書房、2013 年)117-150 頁
谷口義明著『新天文学事典－ダークマター』(講談社、2013 年)103-28 頁

＜暗黒エネルギーに関する参考文献＞
荒船良孝著『宇宙の新常識 100』(2008 年、ソフトバンク)41-55 頁
土居守・松原隆彦著『宇宙のダークエネルギー』(2011 年、光文社)
松原降彦著『宇宙に外側はあるか』(光文社新書、2012 年)142-58 頁
青野由利著『宇宙はこう考えられている』(筑摩書房、2013 年)151-80 頁
松原隆彦著『新天文学事典―ダークエネルギー』(講談社、2013 年)75-102 頁

＜ブラックホールに関する参考文献＞
P・C・W・デイヴィス著、松田卓也訳『ブラックホールと宇宙の崩壊』(岩波現代選書、1983 年)
デニス・オーヴァバイ著、鳥居祥二訳『宇宙はこうして始まり、こう終わりを告げる』(白揚社、2000 年)142-207 頁
福井康雄著『大宇宙の誕生』(光文社、2006 年)125-99 頁
佐藤文隆、R.ルフィーニ著『ブラックホール』(筑摩書房、2009 年)
レオナルド・サスキンド著、林田陽子訳『ブラックホール戦争」(日経BP社、2009 年)
大須賀健著『ゼロからわかるブラックホール』(講談社、2011 年)
スティーヴン・ホーキング著『宇宙の始まりと終わり』(青志社、2008 年)77-120 頁
福井康雄著『宇宙 100 の謎』(角川学芸出版、2011 年)150-65 頁
大須賀健著『新天文学事典―ブラックホール』(講談社、2013 年)401-464 頁

＜宇宙の未来に関する参考文献＞
ポール・ディヴィス著、出口修至訳『宇宙最後の3分間』(草思社、1995 年)
デニス・オーヴァバイ著、鳥居祥二訳『宇宙はこうして始まり、こう終わりを告げる』(白揚社、2000 年)636-78 頁
スティーヴン・ホーキング著『ホーキング、未来を語る』(SB文庫、2006 年)
マーティン・リース著、堀千恵子訳『今世紀で人類は終わる？』(草思社、2007 年)
スティーヴン・ホーキング著『ホーキング、宇宙の始まりと終わり』(青志社、2008 年)
佐藤勝彦著『インフレーション宇宙論』(講談社、2010 年)125-42 頁
松原降彦著『宇宙に外側はあるか』(光文社新書、2012 年)159-70 頁

被造物管理の神学講演　7　（A－7）

2014 年 2 月 5 日
JWTC春の特別セミナー(4)

A. 自然

7. 現代物理学の謎に迫る

（素粒子研究の世界）

ごあいさつ

本日は、JWTC春の特別セミナーの 4 回目を迎えることができた。皆さんのお祈りと、励ましに心から感謝している。お茶の水クリスチャンセンターにおける「被造物管理の神学」の特別講演は、今回をもってひとまず終わる。次回は、大野キリスト教会の新会堂において、献堂記念講演として特別な準備をしている。「神はなぜ人を造られたのか」という興味深いテーマで、創世記 1 章の徹底的な解明を試みるつもりである。期待していただきたい。

本日の講演は、「被造物管理の神学」の自然篇 7 回目になる。今日は、現代物理学の最先端の問題、素粒子の世界に迫りたい。このテーマは、科学の限界点ギリギリの話である。ひょっとすると、宗教的な香りが漂い、SF的な話ではないかと間違えるような話題も出てくる。現代物理学もここまできたか、そんな印象をもたれるかもしれない。あまり難しく考えず、楽しみながら聞いていただくとよい。

Ⅰ. 素粒子の世界の謎

現代物理学では、物質を構成する究極の最小単位を素粒子と呼ぶ。この素粒子は、長い間「粒子」と考えられてきた。ところが、最近「超ひも理論」という考えが公表された。それによると、すべての物質の根源は「ひものゆらぎ」にある。素粒子というのは、ミクロの「ひも」のことである。その「ひも」の揺らぎがそれぞれ異なるために、別々の種類の素粒子として振舞っている。

多くの物理学者たちが、この理論に賛同し始めている。もしそれが真理であるなら、極小のミクロの世界から巨大な宇宙の成り立ちまでを一貫して説明し得る最終理論に到達できる。そのことが、物理学者たちがこの「超ひも理論」に熱い視線を注いでいる理由である。

1. 究極の素粒子を求めた歴史

この世界に存在するすべての物質は、究極的には何からできているのか？　この問いは、古代ギリシャの時代から、多くの哲学者や科学者が取り組んできたテーマだった。古代ギリシャの哲学者デモクリトスは、このような物質の根源となっているものを「アトモス」と呼んだ。この語が、現在の「アトム（原子）」の語源になった。デモクリトスの提唱した「アトモス」については、長い間それ以上究明されることはなかった。単に、哲学的な概念に留まっていた。むろん、その理論が実証される術もなかった。

しかし、18 世紀になるとこの問いに一つの答えが出てきた。つまり、水素や酸素などが発見され、これらが物質を構成する究極の基本粒子であろうと考えられた。そこで、「すべての元になる素である」という意味が込められ、「元素」と名づけられた。ところが、このような元素は次第に数多く発見されるようになった（現在では、自然界に安定して存在する元素だけでも100個ほどが見つかっている）。すると、それらを究極の粒子と見なすことに、疑問が投げかけられるようになった。

19 世紀になると、実験観測から、さらに小さな究極の粒子を探究する活動が盛んになった。その結果、「元素」

を構成するものとして、「原子」の存在が突き止められた。そこで多くの科学者は、その「原子」の実態を究明しようと、さらに研究に研究を積み重ねていった。

1897 年、イギリスの科学者ジョセフ・ジョン・トムソンは真空放電の実験を繰り返し、「電子」の存在を明らかにした。発見された「電子」は、最も軽い原子である水素原子の 2,000 分の 1 程度の重さしかなかった。つまり、原子の中に電子があると考えられるようになった。そこで、科学者たちは、原子の構造を調べるようになった。

1910 年代にイギリスの物理学者アーネスト・ラザフォードが原子にアルファ線をぶつけ、「陽子」を取り出すことに成功した。この出来事により、それまで知られていなかった原子の内部構造が明らかにされた。と同時に、原子内部の粒子を観測するには「加速器（原子などの小さな粒子にエネルギーを与えて加速させる装置）」が必要であることも分かった。加速した粒子を他の粒子にぶつけるなら粒子が壊れる。その結果、粒子の中身を詳しく調べることができるわけである。実際、1930 年代になると、線形加速器や円形のサイクロトロンなど、たくさんの加速器がつくられるようになった。

加速器ができたことにより、原子核の内部のようすがよく分かるようになった。と同時に加速器でも解決できない問題も生まれてきた。日本では湯川秀樹氏が、プラスの電気をもつ陽子と中性の中性子がくっついていることに疑問を抱き、その力の源について研究していた。何度かの試行錯誤の末、1934 年にまだ知られていない新しい粒子が存在し、その粒子が陽子と中性子との働きをくっつけているという理論を発表した。

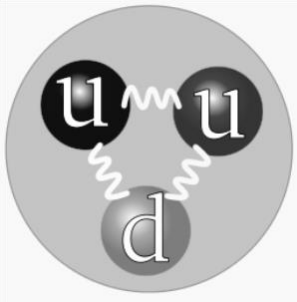
この粒子は、陽子や中性子と電子の間の大きさであることが分かった。それゆえ、その粒子は「中間子」と呼ばれ、その理論は「中間子論」と呼ばれた。湯川氏の予言した中間子は、とてもエネルギーが高いものだった。当時の加速器では作り出すことはできなかった。そこで、宇宙空間からやってくる高エネルギー放射線（宇宙線）に目をつけた。その宇宙線の中に湯川氏の予言した「中間子」を見つけたのは、13 年後の 1947 年だった。このようにして、中間子論は宇宙線物理学や素粒子物理学の扉を開くきっかけになった。湯川氏はその功績が認められ、1949 年に日本人初のノーベル物理学賞に輝いた。

湯川秀樹

科学者たちは、1937 年に「ミューオン」、1956 年に「電子ニュートリノ」、1962 年には「ミューニュートリノ」と、次々に素粒子を発見していった。ところで、素粒子は大きく二つに分けられる。「強い力」の影響を受け、陽子や中性子などの粒子を作る「クォーク」と、「強い力」の影響を受けない「レプトン」である。1962 年までに見つかったミューオン、電子ニュートリノ、ミューニュートリノなどは、いずれもレプトンだった。クォークについては、1963 年にアメリカの物理学者マレー・ゲルマンらによって「クォークモデル」が提唱された。しかし、発見はそれ以降のことになる。

クォークの発見はなぜ難しかったのか。クォークは、強い力で結合している。この強い力の働きはとても特殊なものである。10 のマイナス 15 乗㎝以下の距離では、ほとんど力が働かない。ところが、それより離れていくと、途端に大きな力が働く。例えば、2 つのクォークを陽子の半径くらい離すと、クォーク間に 30 トンという信じられないほどの大きな力がかかる。従って、陽子や中性子などからクォークを引き離すのはとても難しい。クォークを実際に研究できるようになったのは、高エネルギー状態の粒子をつくり出す加速器が登場してからである。

クォークは、アップクォーク、ダウンクォーク、ストレンジクォークの 3 つが最初に発見され、アメリカの物理学者マレー・ゲル＝マンによって命名された。例えば、原子核を構成する陽子は、アップクォーク、アップクォーク、ダウンクォークの 3 つの組み合わせから成っている。一方、陽子と共に原子核を構成している中性子の方は、アップクォーク、ダウンクォーク、ダウンクォークの 3 つの組み合わせから成り立っている。



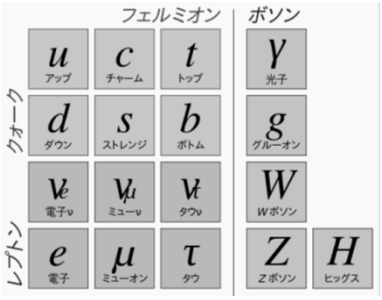
クォーク

ところが、その後、クォークの種類は 3 つでは収まらず、新たに、チャームクォーク、トップクォーク、ボトムクォークの 3 つがあることが分かった。それだけではなく、レプトンについても、電子、ミューオン、電子ニュートリノ、ミューニュートリノに続き、タウ、タウニュートリノが発見された。さらに 4 つのゲージ粒子（光子、Zボソン、Wボソン、グルーオン）も発見された。その結果、16 の素粒子が存在することが明らかになった。

これらに加え、理論上は、もう一つの素粒子がなければならなかった。この最後の素粒子は、提唱者ヒッグス氏の名にちなんで「ヒッグス粒子」と名づけられた。しかし、観測上では長い間未発見だった。ところが昨年、この最後の素粒子の存在がついに突き止められた。これで予測されていた 17 個すべての素粒子が、今や実験観測によって確認されたのである。これにより、この 17 個の素粒子が、物理学の世界では「標準模型」とされている。

2. ニュートリノは質量をもつ

万物に質量を与えるヒッグス粒子が発見された。その質量も分かった。これによって、素粒子物理学の基本的枠組みの「標準モデル」で予測された素粒子 17 個全部がそろった。しかしその中には、いまだに素性がよく分からない粒子がある。「ニュートリノ」である。ニュートリノは、物質を構成する粒子の一つでありながら、物質の中を幽霊のように素通りし、その質量はゼロとされていた。



標準模型　17 の素粒子

ところが 1990 年代の末、ニュートリノに質量のあることが発見された。ただその質量は極端に小さく、未だその値は定まっていない。しかもその質量は、標準モデルのヒッグス粒子だけでは説明がつかない。日常の物質を構成する電子や陽子などに比べ、我々にとってニュートリノは縁遠い存在のように見える。しかし、現在の宇宙がこのようにできているその根本には、ニュートリノの存在がある。今や、素粒子の世界だけでなく、宇宙を知るためにも、ニュートリノを知ることがキーとなりつつある。

ニュートリノには、「電子ニュートリノ」と「ミューニュートリノ」と「タウニュートリノ」の 3 種類がある。いずれも、「強い力」の影響を受けないのでレプトンに属している。しかも、電気的には中性で「電磁気力」には反応せず、「弱い力」にしか反応しない。従って、他の粒子や物質と出会っても反応せず通り抜けてしまう。実際、この宇宙にはニュートリノが満ち溢れている。我々の体を、毎秒数百兆個ものニュートリノが通り抜けている。しかしそれを、我々が実感することはない。では、このニュートリノの実体はどのようなものなのか。

1930 年頃、オーストリア生まれのスイスの物理学者ヴォルフガンク・パウリ（1900 年～1958 年）は、「ニュートリノ」の存在について予測していた。彼は、「ベータ崩壊（原子核が電子を放出して、他の種類の原子核に変わる現象）」を説明するには、どうしてもニュートリノのようなものが必要になる、との結論に達していた。ただし彼は、友人に「私はとんでもないことをした。検出不可能な粒子の存在を仮定してしまった」と話していた。ニュートリノは、粒子の観測に不可欠な装置のどのような材料をも通り抜けてしまう性質をもっている。ということは、ニュートリノの観測装置は作れないということである。パウリが検出不可能と考えたのも無理はない。

ところが、1956 年アメリカの研究グループは、原子炉の中で発生したニュートリノの存在を確認することに成功した。ニュートリノは、理論上の存在であるだけでなく、観測上の対象になってきたのである。

実はニュートリノは、物質の衝突や崩壊と深く関わっており、いろいろな場所で発生している。例えば、身近なところでは、地球内部でウランやトリウムが崩壊するとき、あるいは宇宙線が地球の大気にぶつかるとき、などである。もう少し遠いところでは、太陽内部の核融合反応において、あるいは超新星爆発において、さらには宇宙誕生時のビッグバンなどにおいて、である。

ニュートリノが他の物質と相互作用を起こさないということは、ニュートリノは生まれたときの状態をそのままずっと保ち続けていることを意味する。ということは、もしニュートリノを捉えることができれば、そのニュートリノの分析を通じ、その発生源の状況を推測できる。もし太陽から飛来するニュートリノを観測できれば太陽内部での核融合のようすを、超新星爆発からのニュートリノであれば、超新星爆発の詳しいようすを調べることができる。

現在の宇宙にはビッグバンの時に発生したニュートリノが一様に広がっているのではないかと推測する学者が多い。宇宙マイクロ波背景放射をとらえることができたように、「宇宙ニュートリノ波背景放射」を観測することができるかもしれない。そうすれば、ビッグバン時の出来事の解明に大きく近づくことができる。宇宙誕生直後にできたニュートリノを探るという野心的な計画は、日本では筑波大学を中心とする国際共同実験グループによって進めら

れている。もしこのような「宇宙ニュートリノ波背景放射」を観測できれば、宇宙誕生から0.1秒後の情報が得られることになる。むろん、そのエネルギーは極度に低いので、物質との反応が起きる頻度は限りなくゼロに近い。難しい取り組みであることは言うまでもない。いずれにしてもニュートリノは、直接見ることのできない発生現場を、その一部ではあるが、知らせてくれる可能性を秘めた、とても興味深い素粒子である。

2002 年、小柴昌俊氏は、「天体物理学、特にニュートリノの検出へのパイオニア的貢献」という理由で、ノーベル物理学賞を授与された。小柴氏のグループは、「力の大統一理論」から預言される「陽子崩壊現象」を観測するため、岐阜県の神岡町の神岡鉱山の地下 1,000mの所に、4 億円かけ「カミオカンデ」という巨大な実験装置を建設した。それは、直径 15.6m、高さ 16m の巨大な水槽に 3,000 トンもの純水を満たし、水槽の壁の部分一面に光電子増倍管という特殊なセンサーが取り付けられたものである。

この実験装置は 1983 年に運用が開始された。ところが、当初目論んでいた「陽子崩壊現象」を証明する結果はなかなか得られなかった。そこで小柴氏らは「ニュートリノ観測」に方向転換を図った。ニュートリノは、異色の素粒子である。原子を構成せず、化学反応にも関与しない。電気的には唯一の中性な物質粒子で、他の物質とは衝突せずに通り抜けてしまう。しかし小柴氏のグループは、たくさんの物質を通せばまれにニュートリノが反応する時があるはずだと考えた。そこで、ニュートリノが「カミオカンデ」の巨大な水槽に満たされた水の中を通過するとき、そのまれにしか起こらないニュートリノの光が起こることを期待したのである。ニュートリノ自身を捕まえることはできなくても、ニュートリノと水が反応した光をとらえることで、ニュートリノの存在を確かめようとしたのである。

1987 年 1 月 1 日、「カミオカンデ」の実験装置の改良作業は完成し、太陽で発生するニュートリノ観測が始まった。すると、その直後の 2 月 23 日、大マゼラン星雲で超新星爆発が発生した。小柴氏らのグループは、超新星爆発が起きたときのデータをすぐに調べ、超新星爆発によって発生した 11 個のニュートリノを観測することに成功した。

ニュートリノに関するさらに詳細な観測のためには、「カミオカンデ」の能力では不十分である。そこで、1991 年より 5 年かけ「スーパーカミオカンデ」の実験装置が建設された。直径 40m、高さ 42m の巨大な水槽の中に 5 万トンの純水を入れ、壁面の光電子増倍管も 11,146 本と大幅に増やし、従来のものより 20 倍以上の能力をもつ装置にした。この装置を利用し始めてから 2 年後の 1998 年、従来の考えを全く覆す「ニュートリノに質量がある」という研究成果が出た。ミューニュートリノがタウニュートリノに変化するという事実が確認され、その際ニュートリノの震動が見られたのである。そのような震動は、質量がなければ起こりえない。この発表に対し、その後世界中でその結果に対する追跡調査が行われた。その結果、99.99%の確立で、その観測結果の正しさが証明された。こうして、世界で初めて「ニュートリノに質量がある」ことが確認されたのである。

それまでの素粒子の標準理論は、ニュートリノには質量がないという前提で、積み上げられてきた。従って、この発表は従来の標準理論を書き換えるほどの大きな発見で、世界中の物理学者たちを驚かせた。とはいえその質量は、それまで一番軽いと見なされてきた電子の質量の 100 万分の 1 にも満たない、極めて小さなものだった。

その後、ニュートリノの微小の質量を測定しようと、さまざまな努力が積み重ねられている。最近は、広大な宇宙にその答えを求める傾向が強くなっている。検出は極めて困難ではあるが、宇宙全体であれば、10 の 89 乗という圧倒的な数のニュートリノが存在するはずである。特に初期宇宙では、超高温・高密度の中で核反応によって水素からヘリウムができ、その副産物として大量のニュートリノが生み出されたことが想定される。

今日、暗黒物質がまず集積し、その後にその暗黒物質の重力によって銀河や銀河団が形成されていったことが分かっている。ニュートリノは、暗黒物質が集積し始めた頃は自由に飛び回っていて、暗黒物質の集積を遅らせる働きをしたと推定される。ニュートリノの質量が大きければ大きいほど、物質（普通の物質と暗黒物質の総体）の集積を妨げる効果も大きく、宇宙の大規模構造の境界をぼやけた状態にする。つまり、宇宙における物質の分布状況を測定することによって、ニュートリノの質量が推測できると考えられている。

宇宙のビッグバンの名残りである「宇宙マイクロ波背景放射」は、宇宙空間を満たす暗黒物質の重力によって、光の進路がわずかに曲がり（重力レンズ効果）、その影響で宇宙マイクロ波背景放射の放射パターンもわずかに歪む。現在の進んだ精密観測は、この歪みを非常に高精度に測定できるようになった。その結果、それをもとに

暗黒物質の詳しい分布状況を描き出せるようになった。
　その分布は宇宙空間に存在する巨大なボイド（空洞）によって区切られている。もしその境界線がシャープになっていれば、ニュートリノの質量は小さい。その境界線が不明瞭であるなら、ニュートリノの質量は比較的大きいことになる。こうして、最も軽く、見つけにくい素粒子の質量測定が宇宙全体の観測から可能になるかもしれない。実に興味深い調査である。

　さらにニュートリノは、3 つのニュートリノの種類（フレーバーという）の間を行き来し（この現象は飛行距離によって異なるが、それを「ニュートリノ震動」と呼ぶ）、他のどの粒子よりも変身しやすい。なぜニュートリノはそれほど軽いのか。フレーバーは3種類しかないのか。もっと多くの種類が存在するのではないか。特に、第4番目の新粒子として候補に挙げられている「ステパノライルニュートリノ」は、実在するのか。なぜ、ころころ変身してしまうのか。ニュートリノの反粒子はニュートリノ自身なのか。
　素粒子物理学は、このような難問を次から次へと突きつけられている。もしこれらの問題が解明されれば、素粒子物理学の統一理論に向けた道が開かれる可能性がある。そういう期待から、素粒子物理学者たちは、世界中の粒子加速器や原子炉、廃炉になった鉱山などで、さまざまな新しい実験を展開している。

　「宇宙の晴れ上がり」以前の状態は、光や電波などの電磁波では観測できない。物質に邪魔されないでまっすぐ進む別のものが必要である。科学者は、そのようなものとして「ニュートリノ」と「重力波」を考えている。両方とも、理論上はその存在と活動状況についてかなりのことが構築されている。しかし、未だ観測上で確認されるには至っていない。観測技術の向上は目覚ましいものがあるので、近いうちに観測が可能になるかもしれない。

3. 重力波について

　次に、重力波は、どうか。ニュートンは、すべての物体に引力が働くことを明らかにし（万有引力の法則）、この力を「重力」と呼んだ。さらにアインシュタインは、一般相対性理論を発見し、重力が「時空間のゆがみ」によって解明できることを明らかにした。彼は、この「時空間のゆがみ」は波となって空間を伝わるはずだと予言した。この理論上提唱された「波」のことを「重力波」という。一般相対性理論が正しければ、この「重力波」は必ず存在するはずである。しかし、今までのところ、実際にその存在を証明した人はいない。

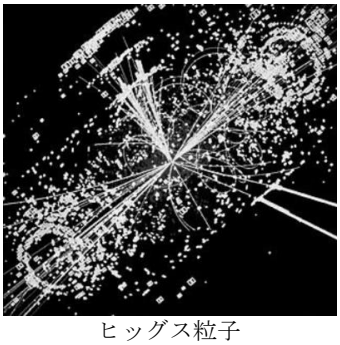
　「重力」は身近にあるので、大きなものと考えられやすい。しかしそれは、我々が地球のような大きなものを相手にしながら考えているからである。本来は、極めて弱いものである。時空間のゆがみは極めて小さいものであるので、「重力波」をとらえることは極めて難しい。もし重力波を検出できるなら、人類は、この宇宙の謎解明に対し、新しい目をもつことになる。しかしそれは簡単なことではない。

　重力波は、超新星爆発や中性子星連星の回転や合体などによっても発生すると考えられている。しかし、まだ実際には観測されていない。重力波は、宇宙初期にも発生している可能性がある。それは「宇宙マイクロ波背景放射」や「宇宙背景ニュートリノ」よりはるかに初期のものである。宇宙が始まってから1兆分の1の、1兆分の1の、そのまた1兆分の1という、桁外れに早い時期に発生したと考えられている。これを「宇宙背景重力波」と呼んでいる。むろん、未だ推論の段階である。この宇宙誕生の第一報を伝える重力波をとらえることができれば、誕生して間もない宇宙のようすが分かる。現在日本をはじめアメリカやヨーロッパのグループが、重力波望遠鏡の開発を進めている。

4. ヒッグス粒子について

　ニュートリノにまつわる問題の解決を模索していくと、現代の素粒子物理学において到達している「17 個の素粒子」理解でよいのかという、極めて根本的な問題にぶつかる。次に、この問題について紹介しよう。

　ヒッグス粒子は、2012 年 7 月 23 日、スイスとフランスの国境の地下に建設された大型ハドロン型衝突型加速器（LHC）という巨大加速器によって、確認された。もしヒッグス粒子が見つからなければ、標準理論である「ビッグバン理論」は台無しになり、根本から考え直さねばならなかった。裏返せば、この発見は、「ビッグバン理論」を検証したことになる。


ヒッグス粒子
シミュレーション画像

2012 年 7 月 31 日、マスコミは一斉に、ヒッグス粒子の発見を報じた。これに対し、世界中の物理学者たちが喜びと安堵の声を表明した。従来の素粒子に関する「標準理論」が大筋において間違っていなかったことが、この発見によって証明されたからである。世界各国から 3,000 人もの優秀な物理学者を動員しての大きなプロジェクトチームによる成果だった。日本からもこのチームに 110 名ほどの若手を中心とした研究者たちが加わっていた。

ピーター・ヒッグス

この発表の翌日のテレビやラジオの報道番組は、「ヒッグス粒子発見」の話題一色という感があった。一般の我々にとっては、この未知の素粒子の発見は大きな驚きであったが、専門家たちの間では、発表されたデータは事前の予測どおりで、驚きの声はほとんど聞かれなかった。むしろ、予想どおりの形でヒッグス粒子の痕跡が見つかったことに、安堵の声が上がった。例えば、吉田たかよし教授は、つぎのように述べている。

> 「世界中の物理学者が、標準模型というジグソーパズルの完成に取り組んできたのですが、17個のピースのうち、たった一つ、ヒッグス粒子だけがぽっかり空いていたんです。それが今回、寸分たがわずピッタリはまるピースが見つかり、ついに物質の根源を描くジグソーパズルが完成したため、価値ある発見だと言えるのです。」（『世界はゆらぎでできている』、66 頁）

フランソワ・アングレール

このヒッグス粒子の発見により、この存在を 1964 年頃最初に理論的に予言した二人の理論物理学者ピーター・ヒッグスとフランソワ・アングレールは、2013 年のノーベル物理学賞に輝いた。

5. 超対称性の素粒子の存在

このヒッグス粒子の発見によって、これまで素粒子物理学者たちが提唱してきた「標準模型の理論」が正しかったことが証明された。ところが、ヒッグス粒子の発見は、この標準模型に対し、新たな問題を投げかけた。その理論に従って計算すると、宇宙の創生直後の高温化では、ヒッグス粒子は今回の観測結果の 10 京倍という途方もなく大きな質量をもたねばならない。これに暗黒物質の存在を加えても、十分な説明にはならない。そこで、既知の17個の素粒子には双子のパートナーのような「超対称性素粒子」が存在するのではないかと推定する理論が提起された。この理論に基づいて宇宙の創生直後におけるヒッグス粒子の質量を計算し直すと、現在分かっているヒッグス粒子の質量の 10 倍から 100 倍程度になる。この程度であれば、あり得たのではないかと、多くの物理学者は考えている。

さらに、この超対称性粒子を暗黒物質と考えると、「質量が大きいのに見えない」という性質がうまく説明できる。従って、実験を専門とする物理学者たちは、超対称性の素粒子の存在を裏づけるデータを得ようと、現在実験を繰り返している。2013 年 4 月には、国際宇宙ステーションで観測した陽電子が暗黒物質の痕跡かもしれない、と大きく報じられた。これは、観測データが、超対称性粒子の理論に当てはまったからこそ、暗黒物質の可能性が浮上したわけである。とすると、素粒子の数は、17×2 で、34 個になる。

この 34 個の素粒子に加え、多くの物理学者は、重力の相互作用に関わるさらにもう一対の素粒子が存在すると想定する。これまで、「重力」とは 2 つのものが引き合う力であると言われてきた。しかし、物理学の世界では、2 つの物質の間に力が引き合っているということは、その物質の間で素粒子がキャッチボールのようにやり取りされていることだと分かってきた。むろん我々が、普段の生活において「力を媒介する素粒子」の存在を意識することはない。ただ、この宇宙の物質や力を突き詰めていくと、結局は素粒子に行き着くことになり、重力に関わる素粒子を想定するとうまく説明が可能になるという話である。

素粒子物理学者は、その「重力」に関わる素粒子を「グラヴィトン（重力子）」と名づけた。すると、その超対称性のパートナーになる「クラヴィティーノー」も存在するはずである。その結果、素粒子は、従来の 34 に 2 つを加え、全部で 36 個になる。こうなると、究極の素粒子というには、あまりにも多くの数になりすぎる。複雑なものには、よりシンプルで根源的な究極のものがあるはずだと考える物理学者にとって、抵抗感が大きい。このようなもやもや感を一掃したいという願望が出発点になって「超ひも理論」が提唱されるようになっていく。

Ⅱ. 力の統一理論と超ひも理論

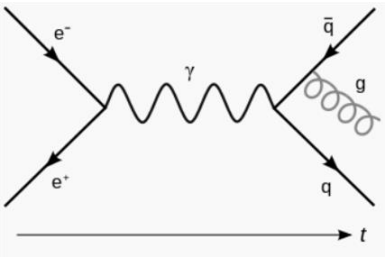
超ひも理論にいく前に、一つふれておかねばならない問題がある。「力の統一理論」という課題で、ビッグバン理論やインフレーション理論とも深い関係がある。現代物理学においては、どうしても解決しておかねばならない基本的なテーマである。現代の物理学者が最近特に注目し、協働研究が進められている分野である。

1. 力の統一理論が考えられるまで

この世界を理解するには、この世界が何からできているのかを究明しなければならない。と同時に、それぞれがどのように相互作用しあっているのかを明らかにしない限り、その全体像が分かったことにはならない。この物質と物質との間に働く相互作用を生み出しているもの、それが「力」である。

この世界に存在する物質が、どの程度であれ、加速運動できるのは、そこに力が働いているからである。我々は、「力」にはさまざまな種類があるように思っている。しかし今日の物理学では、すべての力は、基本的に「重力」、「電磁気力」、「弱い力」、「強い力」の四つに分類される、と考えている。

「重力」とは、「万有引力」として知られている。「電磁気力」とは、プラスの電荷とマイナスの電荷が引き合ったり、磁石のN極とS局が引き合ったりする力のことである。電気と磁気は同一の力の異なる面を指す。自然に生じる電気と磁気は、いたるところにある。「弱い力」とは、原子核を壊す働きをし、放射性物質が崩壊して放射線を出す力のことである。中性子が電子（ベータ粒子）と反電子（ニュートリノ）を放出して、「陽子になるような変化（ベータ崩壊）」を導く力を指す。「強い力」とは、原子核を構成している力で、3 つのクォークを結びつけて陽子や中性子をつくっている力である。湯川秀樹氏が発見した「中性子と陽子とを結びつける力」を指している。



ワインバーグ＝サラム理論

1967 年、アメリカの二人の物理学者スティーヴン・ワインバーグ（1933 年～）とシェルドン・グラショー（1932 年～）は、これら四つの力はそれぞれ別の振る舞いをするように見えるが、もとは一つで、宇宙誕生後に枝分かれした、と提唱した。実は、パキスタンの物理学者アブドゥッ・サラム（1926 年-1996 年）も、それ以前に、このような考えに到達していた。この考えは、一般に「力の統一理論」と呼ばれる。別名、発見者の名にちなんで、「ワインバーグ＝サラム理論」とも呼ばれている。ワインバーグ、グラショー、サラムの三人は、この研究により 1979 年にノーベル物理学賞を受賞した。

南部陽一郎

現代の物理学では、真空の空間を何もない空っぽの空間とは考えない。エネルギー的に一番低い基底状態を「真空」と呼んでいる。つまり、真空にも物理的な実態があるということになり、真空が相転移を起こしても不思議ではない、と考える。物理学者がいう「真空の相転移」とは、宇宙の初期に温度が急激に下がったことで、真空の空間自体の性質が変わり、真空での力の伝わり方が変わる。その結果、もともと一つであった「力」が四つに分かれた、という考えである。

このことを最初に理論化したのが、南部陽一郎氏（1921 年～）である。南部氏は、何か具体的な物理現象を発見したというより、極めて基礎的な物理学全体に関わる理論を構築した。先のワインバーグ＝サラム理論も、この南部氏の考えを基にして考え出されたものだったのである。この南部氏の功績は高く評価され、2008 年にノーベル賞に輝いた。

2. 力が 4 つに枝分かれした

「力」に関して、素粒子物理学的に言えば、違った理解になる。「電磁気力」は光子をやり取りしていることである。「強い力」は「グルーオン」と呼ばれる素粒子が媒介している。「弱い力」は「Wボソン」や「Zボソン」と言われる素粒子が媒介している。「重力」に介在している素粒子は「グラヴィトン」である。ところが、このグラヴィトンは見つかっていない。発見されていない理由は、「重力」があまりに小さな力だからである。我々は、重力が小さいと言わ

れてもピンとこない。むしろ、重力こそ一番大きいのではないかと勘違いしている。これは、我々の体や地球が非常に多くの原子からできており、その引っ張り合いの力を考える結果である。もし一つ一つの原子のレベルまでさかのぼって考えると、極めて小さな力になってしまう。

現代の物理学では、この力の枝分かれについて、次のようなプロセスを想定する。まず、宇宙が誕生してから10 のマイナス 44 乗秒後に、「重力」が他の三つの力から分かれた。続いて、10 のマイナス 36 乗秒後になると「強い力」が分離した。さらに、10 のマイナス 11 秒後に「電磁気力」と「弱い力」とが分かれた。つまり、宇宙の初期においては、温度が急激に下がったことにより、真空の空間自体の性質が変わった。その結果、真空での力の伝わり方も変わった。つまり、もともと一つであった「力」が四つに分かれた、と考えるわけである。このような現象を物理学者は「真空の相転移」と呼んでいる。

この現象は、温度の点から逆に考えると、次のようになる。「電磁気力」と「弱い力」は、絶対温度 1,000 兆 K（10 の 16 乗）の高温状態では同じような振る舞いをする。さらに高エネルギーの 10 の 28 乗 K という状態をつくると、その二つに加え「強い力」も含めた三つが同じように振舞う。もしそうだとすれば、「重力」をも含めた四つの力は、宇宙誕生直後のさらに高エネルギー状態では「一つの力」だったはずであるとの推測が成り立つ。つまり、宇宙の誕生時は一つの力だったものが、温度の低下と共に枝分かれしていった、というのである。このように四つを統一して考えるようになったことが、ビッグバン理論、インフレーション理論の背景にある。

3. 重力を統一する試み

物理学者は、電磁気力、弱い力、強い力に加え、重力を組み込んだ「大統一理論」を構築することが長年の夢だった。しかし、重力だけは他の 3 つに比べ極端に小さいので、いくら高温・高エネルギーの条件を設定しても、いくら微小の世界を設定しても、統一するには無理があると考えられてきた。「究極の理論（TOE）」までに、あと一歩の地点にまでたどりついている。強い力、弱い力、電磁気力の三つは、「大統一理論（GUT）」によって統一された。後は、重力を残すのみである。

ところが、この一歩が、物理学者にとっては途方もなく大きな一歩なのである。その理由は二つある。第一の理由は、量子力学はミクロな領域をうまく説明する理論である。それに対し、重力理論は大域的な領域を扱う理論である。両者の守備範囲にはきわめて大きなギャップがある。量子力学は巨視的世界で無効になるわけではない。ただ、その本領を発揮する領域は異なる、と言ってよい。

第二のより本質的な理由は、量子力学は時間的理論であるのに対し、一般相対性理論は空間的（＝幾何学的）で、本来時間を含まないことにある。このような事情から、場の量子論（ゲージ場の理論）に沿った電弱統一理論→大統一理論の延長上におけるTOEは、絶望とまではいわないまでも、極めて困難だと考えられている。

素粒子物理学者は、物質の構成要素である素粒子の究極の姿とすべての力とを統一して説明できる理論を追究する。例えば、1999 年、アメリカの物理学者リサ・ランドールとラマン・サンドラムは、「ワープした余剰次元モデル」を提唱した。これは、4 次元時空のプレーンの周りに第 5 の次元が広がっているという従来のプレーンワールド仮説に加え、第 5 の次元の向こう側には別の 4 次元時空のプレーンがあるという考えである。我々の宇宙とは別の宇宙（パラレルワールド）が存在している、というのだ。

しかも、もう一つ重要な点がある。第 5 の次元のプレーンは曲がっている（ワープしている）という点である。この宇宙に存在する 4 つの力の中で、重力だけは特殊な存在である。曲がっている第 5 の次元のプレーンを設定することで、なぜ重力が特殊なのかということがうまく説明できる。しかも、このモデルは、実験的な検証が可能だと彼らは述べたのである。

これまで、数多くの研究者が重力を含めた「大統一理論」の構築に挑んできた。しかし、なかなか良い説明はない。そこに登場したのが、超ひも理論である。

4. 超ひも理論とは何か

現代の物理学者の間では、「超ひも理論」のみが、現在のところ説明可能な唯一のものとして注目されている。「超ひも理論」では、これまで発見されてきた素粒子はそれぞれ別のものではなく、皆同じ「ひも」だと考える。つまり、それぞれの素粒子は、極小の同じような「ひも」から成り立っている。異なる粒子として振舞っているかのように見えるのは、そのひもの「揺らぎ方が異なっている」だけだ、というのである。ギターの一つの弦がいろいろな音を

出すように、同じひもがゆらぎの違いによって働きを変えている、そう整理したのである。

「超ひも理論」においては、素粒子の本質を「ひもそのもの」に求めているわけではない。ひもの太さや長さは関係ない。「ゆらぎ」にある。長さを持っていない「点」では「ゆらぎ」は考えにくい。従って、「ひも」というのは「揺らぎ」を与えるための仮想的な材料に過ぎず、本当はひもでさえない。揺らいでいるのは、点でも面でもなく、短いながらも「ひも」である。点と言えばゼロ次元、面と言えば 2 次元になる。素粒子はどちらでもなく、1 次元の「線」の世界であり、揺らいでいることを問題にしているのである。この「ゆらぎ」を問題にしたところが、「超ひも理論」の真髄である。

従来、この世の物質は、究極的には粒子という点みたいなものだと思い込んできた。しかし、究極の粒子を点と想定すると、重力を統一的に組み込めない。もし「点」ではなく、長さを持つ「線」が振動していると仮定すると、統一的な理解が可能になる。むろん、長さがあるといっても、ミクロの世界の話であり、極限に近く短いものである。「ひもの長さ」については、異論もあるが、「プランクの長さ」とする学者が多い。プランクの長さとは、長さの最小単位で、物理学的には、1.616×10 のマイナス 36 乗メートルということになっている。原子核を構成する陽子の大きさが 10 のマイナス 13 乗センチメートルなので、この陽子と超ひも理論の「ひも」の比は、ちょうど太陽系と陽子の大きさに匹敵する。

この「ひも」のさまざまなパターンの振動により、素粒子が生成される。なぜ粒子のように点ではなく、一次元上にひろがった「ひも」なのか。これは自由度の問題である。点だと、点それっきりなのだが、「ひも」だと同じ質量ゼロでも波うったり、形を歪めたり、回転したりと、いろいろな動きが考えられ、その振動に対応する素粒子も無限に現われると考えられる。

ただし、重力の相互作用を生み出す素粒子「グラヴィトン」だけは同じひもではあっても、別のタイプのひもであろうと、推定されている。残りの 17 の素粒子はすべて、一種類の、両端のあるひもでできており、それぞれの揺らぎの違いが別々の振舞いをもたらす。しかし、グラヴィトンは、「輪になった別のひも」、と考えられる。このように考えると、重力が極めて小さいことが無理なく説明できる。シンプルこそ真実の証だとする物理学者にとっては、大変魅力的な理論である。

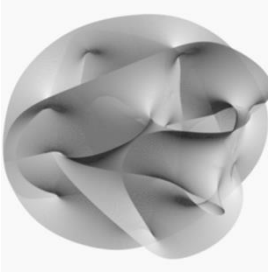
ところで、「超ひも理論」の「超」は「特別小さな」という意味ではない。「超対称性」を指している。では、「超対称性」とは何か。これは「フェルミオン」と「ボソン」との間の対称性のことである。自然界のすべての粒子は、整数または半整数の「スピン」という属性（自転角運動量）をもつ。通常の量子力学では、このスピン半整数の粒子を「フェルミオン（フェルミ粒子）」、スピン整数の粒子を「ボソン（ボース粒子）」と区別する。光子をはじめとする力の媒介粒子は、前者に含まれる。クォーク（陽子や中性子などを形成する基本粒子）やレプトン（基本粒子のうち、電磁相互作用と弱い相互作用しか起こさない粒子）は、後者に含まれる。

超対称性の出生以前は、フェルミオンとボソンはまったく性格が異なると考えられていた。フェルミオンとボソンの違いは、同じ種類のフェルミオンあるいはボソンが多数集まったときに、顕著に現われる。たとえば、フェルミオンである電子は、2 個以上つめ込んである一つの状態にすることは許されない。これは「パウリの排他律」として知られている。これに対してボソンは、何個でもつめ込むことができる。スピンの性質が違うだけで、この 2 つのグループは非常に異なる振る舞いを見せるのである。
「超対称性」では、ある種のフェルミオンとボソンは、もっと高いレベルをもった粒子が、対称性の崩れのために違った現われ方をしたものにすぎない、と考える。間接的にではあるが、このような超対称性を支持する計算結果もある。

最近の研究では、超ひも理論を発展させた「プレーンワールド（膜の世界）」が宇宙の新しい姿ではないかと提唱されている。「プレーン」とは膜のようなものを指す。我々が認識している 4 次元時空（縦、横、高さの 3 次元に時間を加えて 4 次元の世界）は、一枚の膜の上に広がっている。実は、その膜の外側に第 5 の次元以上の次元（6 つないし 7 つの余剰次元と呼ばれる隠れた次元）が展開されているのではないか、というのである。そのような余剰次元はミクロの世界であり、小さく丸め込まれたような状態になっていると説明されている。

素粒子物理学が明らかにした 17 の素粒子は、1 つを除いて、両端がブレーンワールドにくっついた状態で揺ら

いでいる。しかし、重力を伝達する「グラヴィトン」だけは例外である。それは輪っか状になっているため、我々が住むブレーンワールドから余剰次元に飛んでいくことができる。その結果、グラヴィトンによってブレーンワールド内に伝えられる重力は、ほんの一部だけになる。


弦理論（超ひも理論）

このような説明は、数式上ではきわめてきれいに矛盾なく説明できる。そのため、多くの物理学者がかなり有力な説であると考えている。しかし、現時点では実験的には何の証拠もなく、標準理論にまでは至っていない。このような研究方法自体を批判する研究者も少なくない。

5. 超ひも理論は 10 次元の世界

この「超ひも理論」は、この世界の次元を 10 次元と仮定している。我々は 3 次元空間に時間の1次元をプラスした 4 次元の時空に住んでいる。宇宙初期には 10 次元時空であったこの世界が、なぜ現在は 4 次元時空になっているのか（もしくはそう見えるのか）？　これを説明する（しようと試みる）のが「時空のコンパクト化」という考え方である。まず円筒を思い浮かべてほしい。これが宇宙である。これを横に 4 分割する。4 段の重箱のように。これで 4 次元。今度は縦にショートケーキのように 6 分割する。これで 10 次元になる。次元のコンパクト化は、円筒がどんどん細くなり、宇宙初期には存在した、6 次元がプランク長さ（10 のマイナス 35 乗メートル）にまで縮まってしまい、円筒が 4 分割された線になってしまった、と考えるのである。

この 10 次元の世界で「ひも」はいろいろな動きをする。開いたり、閉じたり、2 つに分離したり、逆に 1 つに合体したり。つまり超ひも理論では、素粒子の多様な世界は、1 つの基本的な「ひも」の異なるモードとして、統一的にとらえられている。振動のモードは無限にあるので、対応する素粒子も無限である。そして、エネルギーのもっとも低い振動のモードに対応するのがクォークやレプトンであり、またグラビトン（重力を媒介する）や光子などの媒介粒子だという。

この「時空のコンパクト化」という理論には、問題がある。宇宙誕生のとき、時空が 10 次元であったという考えは別に退けなくてもよい。しかし、その 10 次元のうち、我々の 4 次元を除いた 6 次元がどうなったのか、ということは問題として残る。物理的空間の次元の一部をコンパクト化する、その必然性はあるのか、という問題である。

また、拡がりをもつ粒子を取り扱おうとするときには、点状の粒子に通用した研究手法は使えない。従って超ひも理論は、量子電気力学（QED）や量子色力学とはかなり趣きの違ったものにならざるをえない。さらに 10 次元では、一般相対性理論のリーマン幾何学とはまったく違った構造をしていると考えねばならない。この未知の幾何学を発見（発明）し、それによって超ひも理論は語られる必要がある。

さらに、もっとも根本的な問題がある。当面、理論があまりにも数学的で、物理的コンセプトがあまりはっきりしない点である。この理論には数え切れないほど多くのバージョンがある。それぞれの理論の提唱者たちには、そのうちどれが正しいか判断する手段がない。それぞれのバージョンを研究するグループ間では、お互いの間で言葉さえ通じないという状況さえ生まれている。

さらにこの理論は検証が不可能である。超ひも理論が有効性を発揮するエネルギー領域（10 の 19 乗GeV）に到達する加速器は 1,000 光年の円周を必要とする。この「超ひも」が存在すると考えられる世界を検証するためには、円周 1,000 光年の素粒子加速器を建造しなければならない。物理学者がこの理論に惚れ込むのは、数学的な優雅さや美しさ、整合性、というものに対してである。

超ひも理論は有力ではあるが、現時点では単なる仮説の域を出ない。しかも仮説を裏付ける実験は極めて難しい。ヒッグス粒子の事実上の発見の舞台となったCERNでは、現在、超ひも理論を裏づけるデータを得るための実験も計画されている。ただし、CERNの加速器では、ヒッグス粒子の発見が限度で、素粒子の中のひも構造の検出には能力不足である。地球一周どころか、冥王星の軌道ぐらいの加速器が必要だという科学者もいる。数式をあれこれいじるだけで、空想物語をもて遊んでいるだけという批判がある一方、この理論に夢を託し、何とか実証したいと熱中している科学者もいる。これが、現在の物理学の最先端の学問状況なのである。

加速器による検証作業が難しいことは明らかである。そこで、宇宙の観測からこのことを証明できないかと考えている学者たちも少なくない。長い宇宙の歴史の中で、最もエネルギーの水準が高かったのは、ビッグバン直後である。その当時の宇宙のどこかに、「宇宙のひも」と思われる痕跡が残っているのではないか、そう考え、それを探し出して超ひも理論を証明したいと考えている。この他、ブラックホールの周辺も極端に高いエネルギー状態にある。それゆえ、ブラックホールの観測から実証の糸口が見つかるかもしれない、と期待する科学者もいる。

このような学問的状況は、次の村山斉氏の言葉によく表れている。この項を閉じるにあたり、紹介しておこう。

> 宇宙論の理論としては、宇宙は膨張し続けるということになっています。この理論の前提としては、アインシュタインの重力理論がありますので、宇宙加速膨張説を否定する人たちの中にはアインシュタインの重力理論が間違っているのではないかと考える人もいます。
> アインシュタインの重力理論が間違っているとすると、正しい理論はどういうものになるのでしょうか。今、注目を集めているのが超ひも理論です。超ひも理論の研究者の間では、宇宙は加速膨張するのではなく、その前提となるアインシュタインの重力理論が間違っていて膨張の加速が止まるのではないかという議論もあるのです。もしそうであれば、宇宙の未来は別の運命が待っていることになります。
> その一つが泡宇宙です。宇宙の加速膨張がどんどん続いていくと、あるところで泡ができ始めます。泡の外は加速膨張している宇宙なのですが、泡の中には暗黒エネルギーは存在せず、加速膨張をしません。泡がたくさんできるとある時点を境に、泡で宇宙が埋め尽くされ、暗黒エネルギーのない宇宙になります。そうすると、加速膨張も終わります。膨張を続けても加速せずにだんだん減速していくようになると考えられています。このストーリーは、まだ本当かどうかわかりません。超ひも理論の研究からはこのような宇宙も考えられますよと提案されている段階です。」(『宇宙は本当に一つなのか』122-23 頁)

Ⅲ. 人間原理

現代の宇宙論の書物の中に、しばしば「人間原理」という言葉が登場する。人間原理とは、「今のこの宇宙は、我々人間が生存できるように物理定数が調整されている」という考えである。確かにこの宇宙は、我々人間を筆頭に、この地球上の生命体系が存在し得るように、実に巧妙にできている。もしこのような調整がなされていなかったら、我々人間をはじめ、地球上のすべての生命、地球そのもの、太陽も、銀河系も、存在し得なかったことだろう。
宇宙論の最後に、この問題について考えてみたい。

1.「人間原理」を放棄する近代科学

古代と中世においては、科学と宗教が対立することはまずなかった。両者は、もちつ・もたれつの関係で近代まで歩んできた。近代科学以前の時代は、哲学や宗教が自然に関する研究を担ってきたが、「人間原理」などという言葉が使われることはなかった。たとえ使われなかったとしても、人間原理的な考え方は当然の前提として受け止められてきた。そのような一般的風土あるいは思潮を変えてしまうような空気は、近代科学が勃興し、天動説が揺らぎ始める頃からだった。

このような現象を端的に表す言葉として、「コペルニクスの原理」という言葉が使われる。「コペルニクスの原理」などというと、コペルニクスが「地動説」を唱えたときの科学上の根拠を指しているのではないか、と思うかもしれない。しかし、それは違う。この言葉は、そういう内容とは全く違うニュアンスの言葉として使われている。

コペルニクスは、天動説を否定し、地動説を主張した。その結果、それまで宇宙の中心と見られていた地球は、太陽の周りを回る惑星の一つになってしまった。それ以降、科学はこの地球をどんどん小さな、ごく平凡な存在へと追いやっていく。地球は太陽の八つの惑星の一つに過ぎない。その太陽は、銀河系の辺境にあるありふれた恒星の一つである。その銀河系さえ、宇宙に散らばる数千億の銀河の一つに過ぎない。

その結果、人間の位置や意味も変わってくる。天動説時代には、地球は宇宙の中心にあり、そこに住む人間は神によって創造された特別な存在だった。特権的な地位を付与された者と見なされてきた。ところが地動説は、そのような地球と人間を特別な位置から引きずり落とした。人間は他の物質と比べ、異質な存在というわけではなくなった。こういう考えをもたらした地動説を唱えたコペルニクスこそ、地球と人間をありふれた存在の一つにした張本人である。このような見方を端的に表現したのが、「コペルニクスの原理」という言葉だったのである。

むろん、コペルニクス自身には、地動説を唱えることによって、地球及び人間の価値を低めようなどという意図は毛頭なかった。彼は、科学的な真理を探究することに自分の使命があるとは考えていた。しかし、それ以上の目論みなど一切なかった。次のコペルニクスの言葉からも、それは明らかである。

「哲学者の仕事は神が人間の理性に許したもうた範囲においてあらゆる事物について真理を探究することであるから、その思想は愚人の判断に従うべきではないと思いますけれども、正義と真理に全く反する意見は避けるべきであると信じます」(『天体の回転について』、13 頁)。

それに、コペルニクスの時代には、地球が宇宙の中心であると信じられていたが、そのことは即、地球や人間を特別な存在に位置づけるものだとは考えられていなかった。そうではなく、この地球は生成消滅するものである。重くて動きのない澱のような物が降り積もってできた悪い場所で、地下に行けば地獄に行き着く。一方、月より上の広がりは、「エーテル」という重くも軽くもない第五元素によってできている。それは、永遠不変で完全を表わす円運動を展開している。神に近いのはそのような天球の世界であり、地球ではない、というのが一般的な人々の見方だった。もしコペルニクスが「天動説＝地球重視・人間尊重」という考えや、「コペルニクスの原理」などという言葉を聞いたなら、目を丸くして驚いたに違いない。

では、コペルニクスの偉大な科学的業績を「コペルニクスの原理」といわれるような中身に変容させたのは誰か。それは、コペルニクスから100年後、啓蒙主義の初期の時代に活躍したフランスの知識人フォントネル(1657年～1757 年)とその周辺の人たちだった。フォントネルは、長い間アカデミー・フランセーズの会長を務めた、初期啓蒙主義の代表的人物だった。彼はコペルニクスの科学的な成果を普及させたいと願い、さまざまな活動を展開していた。中でも、1668 年出版の『世界の複数性についての対話』という書物は、40 版以上を重ね、ヨーロッパの各語に翻訳され、広く愛読された。この書物の中でフォントネルは、一人の侯爵夫人に向かって、地球や月、惑星やさまざまな恒星、そして銀河に至るまでの成り立ちについて、詳しく、分かりやすく説明する。そんな中で彼は、コペルニクスの業績について、次のように述べている。

私は、彼(コペルニクス)に感謝したいですよ。宇宙の中でも一番いい場所(宇宙の中心)に自分を据えた、あの人間の虚栄心を引き下ろしてくれたのですからね。それに私は、地球が今は数ある、ただの惑星の一つに過ぎないのを見て、嬉しく思っているのですよ。(『世界の複数性についての対話』、35 頁)

彼は、「宇宙における人間の居場所は何ら特権的なものではない」とか、「この宇宙には特権的な場所はない」という考えを繰り返し述べている。このような表現が、後に「コペルニクスの原理」といわれるような言葉を生み出す背景になった。こういうことが積み重ねられることによって、「コペルニクスが地動説を唱えたので、人間や地球の尊厳を傷つけ、神を冒涜した」という誤解が流布されるようになったのである。

コペルニクスの業績に対する似たような捉え方は、詩人ゲーテの中にも見られる。彼の次の言葉を読んでいただきたい。(『色彩論』歴史編)

あらゆる発見と信念の中で、コペルニクスの学説ほど、人間精神に多大な影響を及ぼしたものはないだろう。我々の住むこの世界(地球)が、孤立した一つの球体であることが明らかになるやいなや、宇宙の中心という絶大なる特権を放棄することになったのだから。人間の精神に対し、かくも厳しい要求を突きつけられたことは、かつてなかった。・・・

しかしこの学説は、それを認める者に対しては、それまで知られていなかった、いやそれどころか予想すらされていなかったこと、すなわち、自由にものを考え、大きな枠組みで物事をとらえるという思想的立場権利を与え、それに参加するよう誘いかけるのである。

ここでゲーテは、コペルニクスの科学的な業績を、人間の間違った特権意識を放棄させ、自由な思想の基盤を与えるものと捉えている。これこそ、「コペルニクスの原理」といわれる考え方である。それは、啓蒙主義の根底に流れているもので、当時の知識人社会に広まっていった。啓蒙主義が科学をそのように捉えれば捉えるほど、教会は科学に警戒心を持ち、反動的な行動を取り始めた。ここに、科学と宗教の分離・対立が起こってくる。以降次第に、科学は自然を対象にし、宗教は人間の内面に関わる、という棲み分けが起こってくる。

18 世紀から 19 世紀になると、キリスト教は科学に対し対立・否定の道を選ぶ。信仰は人間の内面の世界にのみ関わると考えるようになる。啓蒙主義や近代の科学に対し、真正面からの対話を避けたのである。その結果、人間存在の意味や人間の尊厳性を、物理的な人間の居場所などには求めなくなった。人間には、宇宙を認識でき

るという事実がある。また人間精神に宿る道徳性がある。これこそが人間を人間たらしめているものである。宗教の意義はそこにある、と考えるようになった。

「コペルニクスの原理」と同じような問題が、19 世紀から 20 世紀において、「ダーウィンの進化論」に関しても起こった。キリスト教は、ダーウィンの進化論を科学的に正当に評価しなかった。むしろ、ダーウィンの研究成果がもたらす「既存の価値観や世界観への影響」を重要視し、進化論に否定的な態度を取る道を選んでしまった。これは、コペルニクスの原理に似た問題だった。

ダーウィン自身は、自然淘汰と突然変異によって生命が進化したことを、科学的に立証しようと努力した。ところがそれは、教会の従来の考えに真っ向から挑戦するものと捉えられた。ダーウィンは、神のかたちに造られた人間の特別な地位を否定し、人間を動物と同列に置き、被造物の単なる一存在にしてしまった、それは人間と神とを冒涜するものである、という風評が教会内に蔓延したのである。「ダーウィンの原理」などという言葉はないだろうが、そのように言っても過言ではない風潮が、教会を脅かしたのである。このような批判は、全くの的外れである。教会の伝統的な考え方が科学的なものによって破壊されてしまうことを恐れるメンタリティーは、いつの時代においても根深いものがある。

2. 不思議な今の宇宙の物理定数

コペルニクスにしても、ダーウィンにしても、科学が宗教を否定する意図があったわけではない。ただ、科学的な研究が従来の宗教的な価値観や世界観によって妨げられるようなことがあってはならない、と考えていたことは間違いない。実際教会は、科学の成果が従来の教会で教えていたことと異なる場合、科学に対し過剰反応を示した。近代科学は、神という超自然的な存在を持ち出さずに、この世界を理解する道を選んだのだから、それもやむを得なかったのかもしれない。

しかし、科学者がすべての科学的な真理を追求するにあたり、神を持ち出さないで物理的現象そのものを探究するのは当然のことである。科学的研究の途中で神を持ち出すことは、科学の世界に異質な前提と論理を混入させることで、科学的な探求に混乱が生じる。科学的成果は、その時点でストップしてしまう。科学的な作業においては、宗教的なものを絡ませてはいけない。あくまでも科学の方法論で、徹底的に真理を追求すべきである。ただここで重要なのは、科学の限界をわきまえておくことである。科学的な方法論による研究成果は、すべての疑問に答えることができるというわけではない。

科学者であればあるほど、科学的な研究の限界をよく知っている。宗教的な領域に属する問いに踏み込むことの間違いをわきまえている。しかし、すべての科学者がそういうわけではない。宇宙の謎に迫っていく過程の中で、合理的精神だけでは割り切れない現実にぶつかるのもまた、事実である。いくら科学者であっても、人間である。人間である限り、科学的な問いと同時に、宗教的な問いに対峙しなければならないことも当然である。科学的な探求において、宗教的な問題意識を持ち込むことは間違っている。同様に、世界の事象に対する宗教的な問いを全面的に拒否し、科学だけですべてを割り切ろうとするのも、高慢である。両者はできる限り厳しく区別しなければならない。しかし、どちらか一方を切り捨てたり、問いそのものをないかのように無視することはやめた方がよい。

アインシュタインは「私は、神がどのような原理にもとづいて、この世界を創造したのかを知りたい。そのほかのことは小さなことだ。私がもっとも興味を持っていることは、神が宇宙を創造したとき、選択の余地があったかどうかだ」と述べている。彼はある回想録の中で、12 才の時に信仰心を失う経験をしたと語っている。さらに他の手紙の中で、「私にとって神という言葉は、人間の弱さの表れであり、その産物に他ならない」と述べてもいる。従って、アインシュタインの神概念、あるいは宗教理解や信仰心は、ユダヤ教やキリスト教、あるいは既存のいかなる宗教が説くものとも異なる。

しかし、それでも、アインシュタインの科学的な追求精神の中に、宗教的な問題意識が常にあったことは間違いない。アインシュタインによるこの言明は、特定の宗教的な意味や意図があったわけではない。従って、アインシュタインの個人的な信仰について論じることは避けた方が賢明である。しかし、彼が相対性理論を追求する過程で、学問に必然的に付随するような宗教的な問いかけについては、最も大切な事柄だとして理解していたのである。それはたぶん、理神論に近い考え方なのだと思われる。彼の発言は、今日の物理学者たちが問題にしている

「人間原理」という問題意識に通じている。

ニ十世紀には物理学が大きく進展し、この宇宙の意外な本性が次々と明らかにされてきた。いつ、どこで、誰が測定しても、きちんとした手続きを踏みさえすれば、同じ値になる物理量のことを「物理定数」という。例えば、基本的な力の強さや、基本粒子の電化や質量の値などである。このような「物理定数」がなぜ今のような値になっているのか、この点が、多くの物理学者たちにとって、大きな関心の的になっている。村山斉氏は、宇宙の長い歴史を振り返り、次のように述べている。(『宇宙はなぜこんなにうまくできているのか』、175-177 頁)

> あまり科学者が使うべき言葉ではありませんが、これは奇跡のような話です。暗黒エネルギーがほとんどありえないような値だったから人間が生まれ、その知能を振り絞って宇宙の謎を解こうとしている。まるで、そこで人間が生まれるように誰かが「火加減」を微調整しながら宇宙を作り上げたかのようにも思えます。
> そんなふうに思わせるのが暗黒エネルギーだけなら、真空のエネルギーを前提に計算すること自体が間違っていると考えることもできるでしょう。しかし実のところ、そんな奇跡を感じさせるものはほかにもたくさんあります。さまざまな物理法則を改めて見直すと、宇宙に人間が生まれるための条件がそろい過ぎているように感じるのです。
> 単純な話、たとえば重力の強さがちょっと違うだけで、太陽と地球の距離は今とは異なるでしょう。太陽にちょっと近ければ水は水蒸気になり、ちょっと遠ければ凍ってしまいますから、そこに生命体は生まれません。
> 勿論、地球が存在しなかったとしても、ほかの惑星には生命が出現した可能性はあります。でも、たとえば素粒子の質量が今とは少し違ったとしたらどうでしょう。仮に、アップクォークに 10 倍の質量があったとして計算すると、陽子は中性子よりも 10%ほど重くなります。これは大きな違いで、そうなると陽子はすべて崩壊して中性子になってしまうので、原子をつくることができません。生命どころか、星をつくることもできないわけです。
> それ以外にも、定数をちょっと変えただけでも星も生命も生まれなくなる現象は少なくありません。電磁気力や強い力がほんの少し弱かったり強かったりするだけで、この世は全く違う様相を呈するのです。
> しかし現実には、どの法則も星や人間が生まれるのに「ちょうどよく」できています。知能を持った生命体がいなければ物理法則も考えられないので、当たり前と言えば当たり前なのですが、これはやはり不思議なことでしょう。どう考えても人間が誕生しない可能性の方が高いのに、私たちはこうして存在している。偶然にしてはできすぎです。
> そのため物理学者の中には、自分たちの研究している基本法則や物理定数などが、すべて「人間ができるようにつくられている」と考える人も出てきました。これを「人間原理」と言います。とても物理学の専門用語とは思えない雰囲気の言葉ですよね。むしろ、哲学書や宗教書に出てきそうな言葉です。
> 実際、これは科学者にとってはなかなか受け入れがたい考え方でしょう。
> ・・・
> それに、もし人間原理が正しいとしたら、「ではなぜ人間が存在するようにつくられたのか？」という疑問が出てきて当然でしょう。それを説明しようと思ったら、神様を持ち出すのがいちばん手っ取り早くなってしまいます。人知を超えた超越的な存在が、人間をこしらえるためにちょうどよく宇宙の法則を定めたのだ、――というわけです。そういう考え方も十分あり得ますが、これには科学者の出番はありません。

現在の宇宙の法則には、さまざまな物理定数がある。力には、重力、強い力、電磁気力、弱い力などの 4 つがあることは既に述べた。ところがその物理定数は、まるで人類が誕生するように値が調節されているとしか思えないものである。

強い力は近距離でしか働かない力のことである。その力の及ぶ範囲では、電磁気的な力に打ち勝ち、陽子を原子核の内部に閉じ込めておくことができる。もし強い力が今より少しでも弱いとすれば、電磁気力の反発力が相対的に強くなる結果、陽子はそもそも原子核の内部に入ることはできなかった。すると、初期宇宙の元素合成の時期に、水素原子核(陽子)よりも大きな原子核は生じない。そうなると、この宇宙は水素だけの世界で終わってしまうことになる。反対にもし強い力が今より少しでも強いと、陽子同士が速やかに結びついてしまい、水素(つまり単独の陽子)は早々に枯渇する。水素の存在しない宇宙は、今の宇宙とは似ても似つかない宇宙になったはずである。水素は、今の宇宙に存在する元素の 99%を占めているのだから。

もう少し大きなスケール、「重力」の場合を考えてみよう。もし重力が今より少しでも強いと、太陽やその他の恒星は押しつぶされ、今より小さくなる。強い重力で圧縮された中心部の核融合反応は急速に進み、星は速やかに燃え尽きてしまう。地球やその他の惑星も、今より小さなサイズになり、表面の重力は強くなる。すると我々のような生物は、自分の重さで潰れてしまう。逆にもし重力が今より弱かったなら、天体のサイズは大きくなる。すると、中心

部の核融合反応はゆっくり進み、星の寿命は延びる。そのような宇宙で、我々が出現し得たかどうかは、はなはだ疑わしい。

このように、物理定数が今と違っていたらという仮定の話は、いくらでも続けることができる。もう十分かなと思いつつも、この宇宙が本当に人間の生存のためによくできていることを確認するため、あえて、もう少し続けよう。

もし電磁気力の強さを、少しでも今と違うものに変えると、生命は生まれなくなる。強い力の値をちょっと弱くすると、星の中で元素を合成する「トリプルアルファ反応」というものが起こらなくなる。これは、3 個の「ヘリウム 4」の原子核が結合して「炭素 12」ができる核融合反応のことである。もしこの反応が起きないと、炭素や酸素のような生命に不可欠な元素が生成されない。さらにこの強い力が働かなくなると、陽子と中性子とを原子核の内部に留めておくことができなくなる。すると、正の電荷をもつ陽子は原子核から飛び出て、バラバラに飛び散ってしまう。

このように電磁気力と強い力の値が今と少しでも違うと、炭素原子が不安定になったり、水素原子が生まれなかったり、重水素が不安定になるなど、さまざまな不都合が生じる。そうなると、この地球は、知的生命体が誕生するのに都合よい領域ではなくなる。我々人類は、よほどの条件が整わない限り、この宇宙に存在できなかったことは確かである。我々が住む宇宙は、人類を含めた生命をつくるために絶妙にデザインされている。これは、否定しようのない観測事実であって、宗教的ドグマから述べているわけではない。

もしこの宇宙が今より弱い勢いで膨張すると、膨張はすぐに止まってしまう。そういう宇宙では、生命の進化は起こらず、人類は生まれることはない。この宇宙は 1,000 万年後あるいは 1 億年後にはつぶれてしまう。一方宇宙を膨張させる力が少しでも強すぎると、膨張する速度が速すぎ、ガスが十分に固まる前に宇宙は膨張してしまう。すると、ガスは固まれない。つまり、星もできなければ、炭素も水素もつくられず、生命も人類も生まれてこない。

この宇宙は、曲率がゼロになるようにできている。これは、ほっておけば自然にそうなるわけではない。それは、非常に難しいさまざまなバランスがとられて、初めて可能になる。もし宇宙が現在のようにきわめて平坦なものでなければ、人間は存在していない。人間のために絶妙に調整されているのがこの宇宙である。

我々の脳内の情報処理には、量子力学が深く関わっているという考えを「量子能理論」という。この理論の創設者として知られる宇宙物理学者、オックスフォード大学教授ロジャー・ペンローズ（1931 年～）は、「神様がわれわれの住んでいる宇宙と同じような宇宙を創り出すためには、途方もなく小さな空間の中の定数が必要である」と述べている。つまり、適当に物理定数を決めても、決して今の宇宙はできない。我々が住めるような宇宙がつくられる確率は、10 の 10 の 123 乗分の 1 だという。私には、何を根拠にそう言っているのかよく分からないが、とにかく、これはまずあり得ない、という確率であることだけは分かる。

このような考えを述べると、ある科学者たちは、測定結果は測定結果として、そのまま受け止めればよい。確かに、4 つの力は、それぞれ現在の宇宙を保持していくのに極めて都合の良い物理定数の値を持っている。基本粒子の質量や電荷、その他もろもろの物理定数も同様である。だから何だというのだ。こういう物理定数だから、こういう宇宙ができた。こういう宇宙ができたから、我々が存在する。ただそれだけのことではないか。不思議でも何でもない。そんな風に反応する人々も少なくない。

しかし、科学者すべてがそういう反応をするだけではない。そういうだけでは済まされないと感じている科学者もたくさんいる。なぜこの宇宙が今のような物理定数になっているのかということについて、科学者として何とか解を出したいと考えるのも自然なことである。むろん彼らは、神や奇跡を持ち出すわけにはいかない。彼らにとってそれは、宗教的な問いではなく、科学的な問いだからである。

3.「人間原理」に悩む科学者たち

19 世紀までの宇宙学では、「人間原理」などという言葉は使われなかった。それでも、人間原理的な宇宙理解はごく自然のこととして受け入れられてきた。しかし、20 世紀に入ると、宇宙学や物理学は次第に科学的な方法論を確立し、宗教的な意識や問題をできる限り取捨して科学を営むのが王道になった。そのような流れの中であるから、人間原理などということを問題にしない科学者たちが主流を占めていた。しかし、20 世紀後半には、人間原

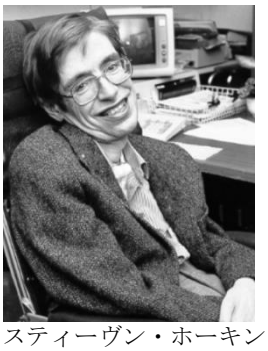
理を念頭に置き、今の宇宙の物理定数について論じる物理学者たちもた次第に多くなってきた。そのような中で、4 人の代表的な科学者を挙げておこう。

その第一は、イギリスの日食観測隊を率いてアインシュタインの一般相対性理論の正しさを証明し、その理論をイギリスに広く紹介した天体物理学者アーサー・エディントン（1882 年～1944 年）である。二番目は、二十世紀の物理学に華麗な足跡を残し、量子力学及び電磁気学の基礎づけに大きな貢献をした天才理論物理学者ポール・ディラック（1902 年～1984 年）、三番目は、「定常宇宙論者」だったイギリスの 3 人組の一人、ケンブリッジ大学で数学と宇宙学を講じていたハーマン・ボンディ（1919 年～2005 年）、そして四番目は、宇宙人の存在などについて多くの話題をまき散らしたイギリス王立協会会長のマーティン・リース（1942 年～）である。

彼らは、「人間原理」的な問題を論じたが、常にそういう言葉を使っていたというわけではない。人間原理という言葉を初めて使ったのは、プリンストン大学の宇宙物理学者ロバート・ディッケだった。彼は、「宇宙マイクロ波背景放射」の発見者から相談を受けた人物である。当時ディッケは、星の一生に関する研究を行い、現在の宇宙に存在する元素合成のプロセスを明らかにしようとしていた。

1950 年代も終わりの頃になると、二つのことが明らかになってきた。一つは、水素とヘリウム、その他わずかな軽い元素は、初期宇宙の高温高圧状態の中で合成されたことである。もう一つは、もっと重い鉄などの元素や我々の体内にある重い元素は、星の中心部で構成され、星の寿命が尽きて爆発したときに宇宙空間にばらまかれたことである。

このような研究成果を踏まえたディッケは、1961 年の論文の中で、次のように述べた。もし宇宙が今よりずっと昔に誕生していたとすれば、この銀河系の恒星の大半は既に燃え尽きていたことだろう。逆にもし宇宙が今より若いときに誕生した場合には、地球の核を構成している鉄や、我々生物に必要不可欠な炭素などの元素は、いまだ存在しないことだろう。この地球上に人間が存在・生存し得るには、宇宙は歳を取りすぎていても、若すぎていてもダメだった。ちょうど今の宇宙の年齢でなければならなかった、と。


スティーヴン・ホーキング

人間原理という言葉はディッケに由来したが、人間原理という考えを物理学者たちの間に広めたのは、ケンブリッジ大学の物理学者ブランドン・カーター（1942 年～）だった。ディッケが自分の考えを公表してからおよそ 10 年後の 1970 年に、カーターはプリンストン大学で開かれた国際会議において、人間原理に関する講演をした。（車椅子の物理学者）スティーヴン・ホーキングは、その異様なアイデアに注目し、論評した。ブラックホールの名づけ親だった物理学者ジョン・ホイラーは、カーターに人間原理のことをきちんと論文にまとめるべきだと進言した。そこでカーターは、1973 年に「大きな数の一致と宇宙論における人間原理」と題する論文を発表した。彼は、その論文を次のような文章で始めている。

> コペルニクスが与えてくれた教訓は、「われわれは宇宙の中心という、何か特権的な位置を占めているかのような、根拠のない思い込みをしてはいけない」という健全なものだった。しかし残念ながら、この教訓を過度に拡張して「我々の置かれた状況は、いかなる意味においても特権的なものではありえない」という、きわめて疑わしいドグマにしてしまう傾向が強い（そしてその拡張は、必ずしも無意識のうちに行われているわけではないのである）。（『宇宙はなぜこのような宇宙なのか』、131 頁）

この論文においてカーターは、コペルニクスについて 2 つの点を指摘した。一つは地球を宇宙の中心から追放したこと、もう一つは人間が勝手な思い込みによって自分を特権的な位置に置いたことを追放したことである。そしてカーターは、むろんコペルニクスは正しかったけれど、反対の極端に走り、人間はいかなる意味においても特権的なものではないと考えるべきではないと警告した。

1970 年ごろは、宇宙マイクロ波背景放射が発見されてから 5 年後のことであり、「ビッグバン理論」が天文学者や物理学者の間で急速に受け入れられつつあった時だった。カーターは、このビッグバン理論を背景に、この宇宙が人間にとって実に都合よくできているという「弱い人間原理」を明確にしたのである。

このようなカーターの「弱い人間原理」は、物理学者たちを十分に納得させることができたわけではない。むしろ、賛否両論が各方面から起こった。一番強い反対意見は、「観測選択効果」という考え方だった。それは、次のよう

なものである。
この宇宙は、人間が存在できるようにという目標のもとに形成されてきたわけではない。我々人間は、たまたま我々が生きることのできる条件の宇宙ができ上ったのでここにいるに過ぎない。例えば、宇宙の温度は、誕生直後から今に至るまでどのように変化したかが分かっている。宇宙の始まりの頃は高温のプラズマ状態だったが、遠い未来になると星が死滅し冷え切ったものになる。我々はいずれの時代にも存在し得ない。ただ、長いプロセスの中で、人間の生存条件が満たされている「今という時」にたまたま存在しているだけに過ぎない。ただ、それだけのことである。そういう見方をすれば、確かにその通りである。

なおカーターは、「弱い人間原理」からさらに一歩進んで、「強い人間原理」をも主張した。

> 宇宙は(それゆえ宇宙の性質を決めている物理定数は)、ある時点で観測者を創造することを見込むような性質を持っていなければならない。デカルトをもじって言えば、「我思う。ゆえに世界はかくのごとく存在する」のである。(『宇宙はなぜこのような宇宙なのか』、155 頁)

ここでは、物理定数が特定の値を取るのは、観測者としての人間が存在することを想定している、という。イギリスの天文学者ジョン・バーロー(1952 年〜)とアメリカの数理物理学者フランク・ティプラーは、1986 年に有名な「人間的宇宙原理(The Anthropic Cosmological Principle)」という本を書き、カーターの「強い人間原理」に賛意を表明した。彼らは、この書物の中で人間生存にとって都合の良いさまざまな物理現象を例示し、この宇宙では必ず知的生命体が生じると主張したのである。

「強い人間原理」を主張することは、果たして科学者としての発言として妥当なことだろうか。私自身は、そこまでいくと、宗教の世界にまで踏み込み過ぎているように感じる。「強い人間原理」は、キリスト教の創造説やインテリジェント・デザイン説と区別することが難しくなる。科学者の発言としては、慎重を期すべきだと思う。

4.「多宇宙」理論は「人間原理の問題」を解決するか

現代の宇宙物理学者のほとんどは、この宇宙の物理定数が人間の生存のために好都合な値になっている事実を認める。しかし、人間原理というような、どこか宗教的な匂いを払拭できない用語は使いたくない。そこでこの問題を、科学的な確率の論理で説明したいと考え、「多宇宙」という概念を持ち出している。

例えば、ビッグバン理論においてインフレーション論を提唱した、現代日本の代表的宇宙物理学者佐藤勝彦氏は、次のように述べている。

> 私自身はといえば、物理学の法則だけでこの世界のことをすべて説明できれば理想的だと考えています。人間原理という概念を物理学は安易に受け入れるべきではないというのが基本的な立場です。ただ、最近の人間原理の考え方には、科学的に認められるものが生まれてきているとも考えています。
> それは、マルチバースの考え方に立った人間原理です。インフレーション理解が予言するように、宇宙が子宇宙、孫宇宙、・・・と無数に生まれているならば、それぞれの宇宙が持つ物理法則もまた無数に存在するはずです。それらの中には、人間が生存するのにちょうどよい物理法則があっても不思議ではありません。そして、私たちの宇宙がたまたま、そういう物理法則を持つ宇宙だったのだ、とする考え方です。
> これには皆さんも納得できるのではないでしょうか。この宇宙を認識する主体である私たち人間は、ほかの宇宙を認識することはできません。だから、たった一つの宇宙がたまたま人間に都合のいいよう絶妙にデザインされていることをふしぎに感じますが、実はそれは、無数にある宇宙の中で、私たちの宇宙がたまたま人間が生まれるのに都合のいい宇宙だったにすぎないというわけです。そのような宇宙だからこそ生まれた人間が、この宇宙の物理法則について認識していくと、それは人間が生まれるように都合よくできていた、これは言ってみれば当たり前のことです。そして、そのような私たちの宇宙が、たとえベンローズが言ったように 10 の 10 の 123 乗分の 1 というわずかな確率でしかつくられないとしても、宇宙が無数にあるのなら、そのうちの一つが私たちの宇宙であっても何も不思議ではありません。
> このように、インフレーション理論が予言するマルチバースという宇宙像を前提にすると、人間原理についても論理的な説明が可能になってくるのです。(177-78 頁)

今日、我々が住むこの宇宙以外にも別の宇宙が存在するという考えは、物理学者の間で増えている。その結果、この宇宙を「単一宇宙(Universe)」と見なさず、「複合宇宙(Omniverse―オムニバース)」とか「多元宇宙(Multiverse―マルチバース)」と考えようとしている。例えば、アレキサンダー・ビレンケン(宇宙は「無」から生まれ

たと主張したことは既に述べた）は、宇宙は我々の宇宙に限定する必要はなく、他にいくらでも生まれてくる可能性があると主張している。

ここで、注意しておくことがある。この「多宇宙」は、素粒子物理学において最近脚光を浴びている「超ひも理論」で論じられている「10 次元の宇宙」という話とは異なる。そこでの「10 次元の宇宙」というのは、今の 4 次元の宇宙に並行して、別の次元を含んだ宇宙が存在していると仮定すると、力の統一理論の問題が解決するという話である。ところが、ここでいう「多宇宙」は、人間原理を確率的に説明するために仮定した話である。それは、今の宇宙と基本的に変わらない宇宙が無数に出来上がっているはずだ、という仮説である。

あるいは、アメリカのマックス・テグマーク（1967 年～）もまた、我々の宇宙と同じような宇宙がビッグバンのときにたくさんできたはずだと考えている。彼の計算によれば、2 の 10 の 18 乗もの数の宇宙ができたという。それらは、原理的には同じ時空にあるが、実質的には関わりをもてない場所にある（137 億年の前に誕生したのだから 420 億光年遠ざかっている）。従ってそれは、「別の宇宙」と呼んでもいいのではないか、と主張している。

ビッグバン理論において、最近はインフレーション理論を認める学者が増えている。ある科学者たちは、そのインフレーション理論を、多宇宙を生み出す根拠に利用している。
インフレーション理論によれば、宇宙誕生後の 10 のマイナス 35 秒後から 10 のマイナス 34 秒後までの短い時間に、宇宙空間は「指数関数的」に膨張したことになる。ここで「指数関数的に膨張する」というのは、ある時間間隔で空間が 2 乗に膨張するということである。インフレーション理論では、この一瞬の間に、宇宙空間は最低でも 10 の 30 倍以上に膨張したと考える。それは、我々の体を構成している細胞に含まれているDNA分子の一つ一つが銀河系ほどの大きさになるぐらいの途方もない膨張になる。しかもその宇宙空間の膨張は、エネルギーを含んだままでの空間である。このインフレーションにおいて宇宙が急激に膨張するとき、早くインフレーションを起こして膨張する場所とインフレーションをまだ起こしていない場所とが、小さな泡のように混在する。このような小さな泡から、多数の「子宇宙」や「孫宇宙」が生まれてくるという可能性がある。

かつては、ビッグバンの直前に、今の宇宙ができ上るためにはインフレーションという出来事がほんの一瞬起こったはずであるという提案が、ここでは「インフレーションを起こしている空間」という話に変わってくる。そして、そこに多宇宙の誕生を想定し、我々の宇宙は無数に生じる泡宇宙の一つに過ぎない、となってくる。そしてもし宇宙がたくさんあるとすれば、物理定数の問題も、人間原理をもち出さなくても説明できる。それは、人間による「観測選択効果」の問題になってくる、と論理が展開する。

ここには、今の宇宙を説明するために仮定されたインフレーションを、人間原理を説明するために用いるという循環論法が存在する。ところが、多くの物理学者がこのような論理展開を支持している。多宇宙を実在の世界と認め、今の宇宙の物理定数を確率の問題に引き下げたいからである。観測も実験も不可能な多宇宙である。にもかかわらず、物理学者がたくさんの宇宙の存在を確信できてしまうのはどうしてなのか。青木薫氏は、それは量子物理学者の実感であり、論理である。これまで、量子力学の世界はそのような論理で、数多くの問題を解決してきた、と解説する。

> COBEグループによる「ゆらぎ発見」の報道に接し、物理学者の中には、改めてこう感じた人が大勢いたのではないだろうか。「これ（宇宙の誕生）が一度きりの出来事であるはずがない」と。
> わたし自身、そう感じた者の一人だった。「二度あることは三度ある」と世間では言うけれど、物理学者に言わせれば、「起こりうることは必ず起こる、何度でも起こる」のである。
> 物理学者は、この「起こりうることは必ず起こる、何度でも起こる」という考え方を空気のように吸い込んで物理学者になっている。それはいわば、物理の世界の暗黙の了解、一種の常識なのである。しかしそれは量子的な世界での常識なので、日常的な古典物理学にもとづく常識からすると、なぜそんなことが言えるのかと不思議に思われるかもしれない。

青木氏は、この後、「これはけっこう重要なポイントなので、簡単に説明しておこう」と述べ、古典物理学の決定論の世界に対し、量子力学の世界の違いを強調する。

> それに対して量子的な世界は、「禁止されていること以外は、すべて強制される」という奇妙な世界なのである。しかしすべて強制されるとは、いったいどういう意味だろう？
> ・・・

「禁止されていること以外は、すべて強制される」という量子的な世界観からすると、ビッグバンが一度でも起こったということは、ビッグバンは禁止されていないということを意味し、従って、強制される。ビッグバンの道は、賑わいはどうであれ、人が通り続ける道だと考えられるのである。
1992 年のCOBEの発表に接した時、「宇宙は何度も誕生している。おそらく宇宙はわれわれの宇宙だけではないのだ…」とわたしが感じたのは、そういうわけだったのだ。
そしてじっさい、そのころにはすでに、いくつかの多宇宙ヴィジョンが提唱されていたのである。

正直言うと、私には、今一つこの論理展開が呑み込めない。「禁止されていないことは強制される」というのであれば、これまで提案されている「いろいろな多宇宙のモデル」は皆強制されることになるのだろうか。もし、ビッグバンは一度しか起こらないと物理学者が考えるなら、それは禁止されていないことなのだろうか。そしてそれは強制されることなのだろうか？　私も、「インフレーション+ビッグバン」という理論が、現時点で「今の宇宙を一番納得させてくれる理論」だと思う。しかし、青木氏の言明は、明らかに科学には実証が不可欠であるという道を踏み越えている。それは、宗教の世界の論理である。

私個人は、ビッグバン理論であっても、インフレーション理論であっても、多宇宙であっても、事実が本当にそういうふうに起こったと実証できるのであれば、そう信じたらいいと思っている。そういう風に受け入れること自体は、信仰者として全く問題はない。ただ、「ビッグバン+インフレーション」モデルを、ここまで幾重にも論理展開を重ねられると、それを土台に人間原理の問題を「観測選択効果」という問題にすり替えるため屁理屈を言っているようにしか見えない。

実際問題として、このような多宇宙の存在を我々が認識できるのだろうか。仮に多宇宙が存在するにしても、我々の宇宙とは因果関係がない以上、実験や観測によって確認できるわけではない。それは、我々とは無縁な世界の話である。もし観測ができ、認識できるのであれば、因果関係があるということになり、別の宇宙ではない。この宇宙の一部という話になる。すると、「多宇宙」にはならない。村山斉氏の「多宇宙」に関する言及を紹介しておこう。

もちろん、これは仮説の域を出ない話です。マルチバースの存在は、観測によって検証することもできません。もし観測できたら、その宇宙は私たちの宇宙の中にあることになるので矛盾してしまいます。
しかしいまのところ、まるで宇宙が人間のためにつくられているように思えることを、「神様抜き」に説明する方法は、マルチバース以外にありません。無数に生まれた宇宙の中で、この宇宙だけが人間をつくり出す条件を揃えていた。人間の生まれなかった宇宙は誰にも観測されないので、存在そのものが認識されない。したがって、そこでどんな物理法則が働いているのかも調べられません。人間を生んだこの宇宙だけが存在を認識されているのだとすれば、そこで働く法則が人間のためにできているのは当然でしょう。
そう考えると、この宇宙のことが何ともいとおしくなってきます。無数の宇宙が生まれたことに何の目的もないと思いますが、この宇宙はまさに人間のために用意されたといえるのかもしれません。あるいは、宇宙のために人間が用意されたということもできるでしょう。人間のいる宇宙がなければどんなにたくさんの宇宙が生まれたとしても、それは存在しないのと同じこと。しかし「この宇宙」に人間がいるからこそ、こうして、「それ以外の宇宙」の存在も予想してもらうことができるのです。(『宇宙はなぜこんなにうまくできているのか』、182 頁)

人間原理とは、科学者が宇宙の問題を科学的方法論で突き詰めているとき、自然に起こってくる科学の領域を超えた世界でぶつかる問題である。この宇宙に何らかの目的があったのか、という問いである。それは、How の問題から Why の問題に踏み込んでいる。しかし、「多宇宙」というのは、確率の問題にすれば、何でもありと言い得る。しかも今のところ、それ以外には有効な道は見つかっていない。それゆえ、現代の科学者たちが、それにすがりついている、という理論に他ならない。

おわりに

ここまで来ると、キリスト者にとって、信仰の世界を持ち出さざるを得ない。聖書を開くべき時が来たと思う。イザヤ書は、神が全被造物の創造者であることを明らかにしている。神は、「天を造り出し、これを引き述べ」た方である(イザヤ 42:5)。神は、「このわたしが地を造り、その上に人間を創造した。わたしはわたしの手で天を引き延べ、その万象に命じた」と宣言している(イザヤ 45:12)。

「天を創造した方、すなわち神、地を形造り、これを仕上げた方、すなわちこれを堅く立てた方、これを茫漠としたものに創造せず、人の住みかにこれを形造った方、まことに、この主がこう仰せられる。『わたしが主である。ほかにはいない。』」(イザヤ 45:18)。

この宇宙論の講演を閉じるにあたり、最後にアインシュタインの金言を紹介させていただこう。「宇宙について最も理解しがたいのは、それが理解可能だということである。」 多くの科学者が、この言葉を好んで引用している。おそらく、このアインシュタインの驚きが科学者たちの実感だからであろう。この宇宙は、人間存在のすべてを超えた、実に巨大な、実に神秘に満ちたものである。にもかかわらず科学者たちは、それを理解できると信じて、理性的・合理的に追求し、果敢に挑んできた。そして、驚くほどの成果を上げ、未知の世界を明らかにしてくれた。この事実は、宇宙の不思議さに勝るとも劣らぬものである。想像を絶する巨大な宇宙に挑み、極限を超えた微粒子の世界にまで踏み込んでいる科学者(人間)たちの能力の不可思議さに、私自身はしばしば呆然と立ち往生する。

科学者はこの宇宙をそのまま受け入れ、理解可能なものとの前提で学問的探求を進めている。このような立場は、哲学的に言えば「批判的な実在論者」ということになる。そして、このような立場を保証するのは、キリスト教神学にある。つまり、神が造られたこの宇宙を、神が「神のかたち」に造られた人間によって理解可能であるのは、当然のことなのである。むろん、このような論理は科学の論理ではない。聖書が説く教えであり、宗教や信仰の論理である。

キリスト者は、聖書に啓示された神をそのまま受け入れる。その神による宇宙の創造という啓示をもそのまま信じる。しかも、その神は、人間を「神のかたち」に創造された。そして、その人間に、全被造物の管理を託されたことを信じている。従って、批判的実在論の立場こそ、科学の立場であり、キリスト教神学の立場に他ならない。

宗教を持ち出すべきではない時に持ち出すのは間違っている。と同時に、持ち出すべき時に持ち出さないのも間違っている。キリスト者はしばしば前者の間違いを犯す。科学者はしばしば、後者の間違いを犯す。両方とも、愚かである。

この点については、次回の「宇宙の創造(創世記 1 章の神学的考察)」の講演において、さらに詳しくふれたいと思う。ご期待いただきたい。

参考文献

＜ヒッグス粒子に関する参考文献＞
レオン・レーダーマン著、高橋健次訳『神がつくった究極の素粒子』(草思社、1997 年)
須藤靖著『ものの大きさ　自然の階層・宇宙の階層』(東京大学出版会、2006 年)
ポール・ハルパーン著、武田正紀訳『神の素粒子』(日経NG社、2010 年)
フランク・ヴィルチェック著、吉田三知世訳『物質のすべては光』(早川書房)、2009 年)
橋本省二著『質量はどのように生まれるのか』(講談社、2010 年)
中嶋彰著『現代素粒子物語』(講談社、2012 年)
フランク・クローズ著、田中敦等訳『ヒッグス粒子を追え』(ダイヤモンド社、2012 年)
浅井祥仁著『ヒッグス粒子の謎』(祥伝社、2012 年)
竹内薫著『ヒッグス粒子と宇宙創生』(日経プレミアシリーズ、2012 年)
青野由利著『宇宙はこう考えられている』(筑摩書房、2013 年)17-74 頁
イアン・サンプル著、上原昌子訳『ヒッグス粒子の発見』(講談社、2013 年)
大栗博司著『強い力と弱い力』(幻冬舎、2013 年)

＜ニュートリノに関する参考文献＞
デニス・オーヴァバイ著、鳥居祥二訳『宇宙はこうして始まり、こう終わりを告げる』(白揚社、2000 年)305-44、475-506 頁
小柴昌俊著『ニュートリノ天体物理学入門』(講談社、2002 年)
『日経サイエンス、ニュートリノ特集、2013 年 8 月号』(日経新聞社、2013 年)

＜量子論に関する参考文献＞
ロジャー・ベンローズ著、中村和幸訳『心は量子で語れるか』(講談社、2001 年)
佐藤勝彦著『「量子論」を楽しむ本』(PHP文庫、2005 年)
ロジャー・ベンローズ著、竹内薫訳『ベンローズの〈量子脳理論＞』(筑摩書房、2006 年)
スティーヴン・ホーキング著『ホーキング、宇宙と人間を語る』(エクスナレッジ、2011 年)
吉田たかよし著『元素周期表で世界はすべて読み解ける』(光文社、2012 年)
吉田伸夫著『明解量子宇宙論入門』(KS 物理専門書、2013 年)

＜素粒子に関する参考文献＞
朝永振一郎著『量子力学Ｉ』(みすず書房、1969 年)
W・パウリ著、藤田純一訳『物理と認識』(講談社、1975 年)
朝永振一郎著『鏡の中の物理学』(講談社、1976 年)
B・デスパーニァ著、町田茂訳『量子力学における観測の理論』(岩波書店、1980 年)
G・ズーカフ著、佐野正博、他訳『踊る物理学者たち」(青土社、1985 年)
F・セレリ著、桜山義夫訳『量子力学論争』(共立出版、1986 年)
A・I・M・レイ著、林一訳『量子論』(岩波書店、1987 年)
J・M・ヤウホ著、小出昭一郎訳『量子論と認識論』(東京図書、1987 年)
J・C・ポーキングホーン著、宮崎忠訳『量子力学の考え方』(講談社、1994 年)
小林誠著『消えた反物質』(講談社、1997 年)
S・ワインバーグ著、本間三郎訳『電子と原子核の発見』(筑摩書房、2006 年)
朝永振一郎著『スピンはめぐる一成熟期の量子力学』(みすず書房、2008 年)
南部陽一郎著『クォーク第 2 版』(講談社、2008 年)
江尻宏泰著『ビックリするほど素粒子がわかる本』(2009 年、ソフトバンク)
佐藤勝彦著『図解量子論がみるみるわかる本』(図書印刷、2009 年)
村山斉著『宇宙は何でできているか』(幻冬舎新書、2010 年)
橋本省二著『質量はどのように生まれるのか』(講談社、2010 年)
佐藤勝彦著『ニュートリノと宇宙創生の謎』(実業の日本社、2012 年)
吉田たかよし著『世界は「ゆらぎ」で出来ている』(光文社、2013 年)

＜統一理論に関する参考文献＞
ミチオ・カク著、久志本克己訳『アインシュタインを超える』(講談社 1997 年)
デニス・オーヴァバイ著、鳥居祥二訳『宇宙はこうして始まり、こう終わりを告げる』(白揚社、2000 年)367-90 頁
広瀬立成著『図解雑学―超ひも理論』(ナツメ社, 2008 年)80-188 頁
佐藤勝彦著『宇宙「96％の謎」』(角川書店、2008 年)113-34 頁
村山斉著『宇宙は何でできているか』(幻冬舎新書、2010 年)105-92 頁
フランク・クローズ著、田中敦等訳『ヒッグス粒子を追え』(ダイヤモンド社、2012 年)、25-268 頁

〈超ひも理論に関する参考文献＞
ブライアン・グリーン著、林一等訳『エレガントな宇宙』(草思社、2002 年)
広瀬立成著『超ひも理論』(PHP, 2002 年)
竹内薫著『超ひも理論とはなにか』(講談社、2004 年)
レオナルド・サスキンド著、林田陽子訳『宇宙のランドスケープ』(日経BP社、2006 年)
リサ・ランドール著、塩原通緒訳『ワープする宇宙』(NHK出版、2007 年)
リサ・ランドール、若田光一著『異次元は存在する』(NHK出版、2007 年)
リー・スモーリン著、松浦俊輔訳『迷走する物理学』(講談社、2007 年』
白石拓著『マンガでわかる「超ひも理論」』(宝島社、2007 年)
川合光著『はじめての＜超ひも理論＞』(講談社、2008 年)
ピーター・ウォイト著、松浦俊輔訳『ストリング理論は科学か』(青土社、2008 年)
広瀬立成著『図解雑学―超ひも理論』(ナツメ社, 2008 年)
ローレンス・M・クラウス著、斎藤隆央訳『超ひも理論を疑う』(早川書房、2008 年)
夏梅誠著『超ひも理論への招待』(日経BP社、2008 年)

＜ディラックに関連する参考文献＞
アブラハム・パイス著、藤井昭彦訳『ポール・ディラック-人業績』(筑摩書房、2012 年)

＜多元世界に関する参考文献＞
ベルナール・フォントネル著、赤木昭二訳『世界の複数性についての対話』(工作舎、1992 年)
佐藤勝彦著『インフレーション宇宙論』(講談社、2010 年)143-68 頁
松原降彦著『宇宙に外側はあるか』(光文社新書、2012 年)、218-40 頁

＜人間原理に関する参考文献＞
ロバート・ジャストロウ著、趙慶哲訳『だれが宇宙を創ったか』(講談社、1988 年)
P・C・W・デイヴィス著、戸田盛和訳『宇宙はなぜあるのか』(岩波現代選書、1989 年)
ジョン・レスリー、松浦俊輔訳『世界の終焉』(青土社、1998 年)
ジョン・D・バロウ著、松浦俊輔訳『単純な法則に宇宙が複雑な姿を見せるわけ』(青土社、2002 年)
佐治晴夫、佐藤勝彦著『宇宙はすべてを教えてくれる』(PHP、2003 年)20-62 頁
ジョン・D・バロウ著、松浦俊輔訳『宇宙の定数』(青土社、2005 年)
ジョン・D・バロウ著、松浦俊輔訳『無限の話』(青土社、2006 年)
ジョン・D・バロウ著、松浦俊輔訳『科学にわからないことがある理由』(青土社、2006 年)
アレックス・ビレンケン著、林田陽子訳『多世界宇宙の探検』(日経BP社、2007 年)
ポール・ディヴィス著、吉田三知世訳『幸運な宇宙』(日経BP社、2008 年)
佐藤勝彦著『インフレーション宇宙論』(講談社、2010 年)169-85 頁
土居守・松原隆彦著『宇宙のダークエネルギー』(2011 年、光文社)、98-105 頁
村山斉著『宇宙はなぜこんなにうまくできているのか』(集英社、2012 年)179-83 頁
松原降彦著『宇宙に外側はあるか』(光文社新書、2012 年)197-217 頁
青木薫著『宇宙はなぜこのような宇宙なのか』(講談社、2013 年)