

太陽系外に惑星を探す

—宇宙に生命を求めて—

自然科学研究機構国立天文台助教授 田村 元秀



ただいまご紹介に預かりました田村です。自然科学研究機構の一部である国立天文台という天文学の研究機関からまいりました。本日は「太陽系の外に惑星を探す」という内容で、お話をさせていただきます。よろしくお願いたします。

われわれの太陽系には一つの恒星（太陽）と九つの惑星が存在します。昔、理科の時間で「水金地火木土天海冥」と語呂を並べて覚えた記憶があると思いますが、馴染みのある九つの惑星、色も大きさも違って、非常にバラエティに富んでいます。

本年7月に、われわれの太陽系に第10番目の惑星があるのではないかと、新聞報道が第一紙面などに載っていたことは記憶に新しいと思います。しかしわれわれの太陽系には9個あるいは10個ぐらいの惑星があるかもしれませんが、太陽系の外に目を向けると、170個近い数の惑星が、もうすでに見つかっているのです。

では太陽系以外にも惑星は多数存在するが、なぜそのようなものを探すのかということも含め、最初に惑星とは何かというお話をします。そしてなぜそれを探すか、実際にどのようにして探しているのか、現在の探査ではどの方法がどれぐらいまで成功しているのか。恒星との違いは何かということをお話します。

現在の目標は何で、もう少し先の目標は何か。最終的な答を先に言ってしまうのですが、やはりわれわれは、地球以外にも、宇宙に生

命が存在するかどうかということにまで答えたいと考えています。総じて言いますと第2の地球を探す。第2の地球といったときは単にかたちだけではなくて、そこに生命が存在するかどうかということも含めてですが、その取り組みを紹介させていただければと思います。

われわれの太陽系の中には太陽と九つの惑星が存在するという話をしましたが、重さだけで分けると3種類の星があると思ってください。一つは恒星です。それから惑星、その間に別の種類の天体である褐色矮星という星が存在します。

星は生まれてからどう生涯を終えるか。星にも一生がありますが、それはその重さ、質量でほぼ決まってしまうことがわかっています。ここで、その3種類についてですが、太陽のように重い惑星は、ほかの星と比べて何が違うか。星が生まれてくるときには、十分に重いために、ある段階で星の内部、中心の部分の密度、温度が非常に高くなり、水素の核融合が起こります。つまり水素が燃えるのです。そのことによって、自分自身で光ることができるのが恒星と呼ばれているものです。つまり、木星の重さの約75倍未満（木星を1とすると、太陽はほぼ1,000）よりも重い星は、自分で水素の核融合を起こし、自ら光る天体になります。それで恒星、常に明るい星と呼ばれています。それに対して惑星のような天体は軽いために、自分で核融合を起こすことができない。生まれたときに塊になった

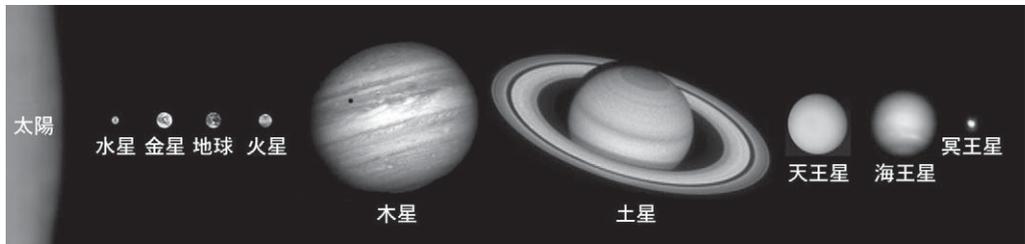


図1 太陽系の惑星（惑星の大きさの比のみ正しいスケール）（写真提供：ハミルトン他）

あとは、自分自身が光ることなくどんどん暗い天体になっていく。そういう種類の天体が存在します。

先ほど太陽が1,000に対して木星が1という話をしました。一番軽い恒星が75という話をしましたが、木星の1と一番軽い恒星の75の間にはやはり隙間があります。そういう天体が存在することはごく最近わかりました。こういう種類の天体は太陽系の中に存在しないので、ずっと知られていなかったわけですが、それらの天体を褐色矮星という名前で呼ぼうということになりました。何が違うかというと、質量が違う。惑星よりは重くて、恒星よりは軽いという天体になっています。

まとめると、重さで3種類の星、恒星、褐色矮星、惑星になります。一番重いほうの天体は、木星質量の約75倍以上は水素を燃やして恒星になるけれど、それよりも軽い天体は褐色矮星と呼ばれていて、水素は燃えない。ですから自分で輝くことはありません。惑星はそういう意味でいうと褐色矮星の仲間に入ります。そのような天体の中でも特に軽いものがちょうど惑星に対応していて、その境界線はあまりきちんとしたものではありませんが、木星質量のだいたい13倍よりも軽いものを惑星ということが多いです。

では、われわれの太陽系の外の惑星の話をする前に、太陽系の中の惑星のことを少しだけおさらいしておきたいと思います。太陽は非常に大きいためにこの図からはずれてしまっていますが、水金地火木土天海冥と並んでいます。しかし実際の距離は正しいものではありませんので、大きさの比と配列を参考に

してください。

これを見て気がつくのは、内側に小さい天体、惑星がある。外側に大きな惑星があるというのがわれわれの太陽系の特徴です。この大きさは重さにはほぼ対応していて、内側の惑星は軽くて小さいのです。そういうものを岩石惑星と呼びます。名前からわかるように主成分は岩石でできています。仲間としては地球、火星、金星、水星です。それからガス惑星と呼ばれている、あるいは巨大惑星と呼ぶことも多いのですが、そういう惑星は主成分がガスでできていますが、外側に並んでいるのがわかります。また、外側の天王星、海王星、冥王星はちょっと違う種類の惑星だと分類することがあります。

これがわれわれの太陽系の惑星の特徴です。たとえば地球ですが、岩石惑星の代表はご存じのとおり地球です。现阶段で太陽系の中で



図2 岩石惑星の代表：地球（写真提供：NASA）

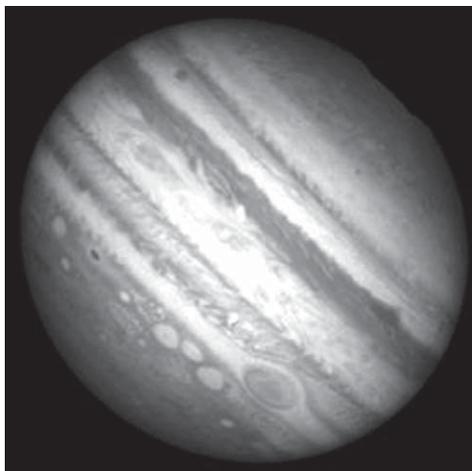


図3 ガス惑星の代表：木星
(写真提供：NASA)

はただ一つ、水と生命が存在する惑星でもあります。過去にはほかの惑星にも水があったかもしれませんが、現在という意味ではたぶん地球だけだろうと思われまゝ。何がそのもとか。それは、大気と水の存在が大きいのではないかと考えられます。どれぐらい前に生まれたかという点、太陽が生まれるのとほぼ同時期、46億年前に生まれました。

次に、巨大惑星の例で木星をあげると太陽系の中で最大の惑星です。先ほどのように重さでいうと太陽の1,000分の1ですが、地球に比べると300倍で、かなり重いです。主成



図4 土星
(写真提供：NASA)

分は水素とヘリウム、ほとんど水素からできているので、外側はぼやけた外観になっており地面がなく、ガスの塊です。そういう意味では太陽と似ていますが、自分で水素を燃やしているわけではありません。太陽からの光が反射して見えているわけです。

では先ほどの岩石惑星と何が違うかという点、主成分が水素ガス、ヘリウムガスですので、密度が小さい。真ん中に岩石物質があるので水素ガスほどは軽くありませんが、地球の密度に比べると6分の1ぐらい小さくなっています。

土星についても簡単に触れておきますと、重さは木星と比べると3分の1ぐらいで太陽系の中では2番目に重い惑星です。本体の模様は木星と同じようにできていますが、印象的なのはリングがあることです。多数の衛星があることも知られていますが、タイタンもその中のひとつです。

全部で46個ほどのうちの12個ぐらいを、今日ご紹介するすばる望遠鏡が、今年の5月に一挙に発見しました。

こういう太陽系の惑星を見たときに、ある特徴に気がつきます。大きさは太陽と比べると小さくて軽い。それ以外にも注目したい性質があります。それは運動です。惑星が太陽を中心とする一つの平面内を円運動しているという点です。一番外側にある冥王星はかなり軌道が傾いていますが、それ以外の惑星はほぼ円に近い軌道で回っています。

回り方は内側のほうが早く回り、外側のほうがゆっくり回るという運動の仕方をしています。回る速さは、たとえば地球は1秒間に30kmと、われわれの感覚からすると猛烈なスピードで回っています。1周するのに地球は1年で回りますが、内側の惑星はもっと早く、水星だと90日ぐらいで回りますが、海王星になると1周するのに165年もかかってしまいます。

それからもう一つは、先ほど惑星は自分で水素を燃やして光らないという話をしました。ということは、温度が低い。太陽からの熱で

光り、温度を保っているだけです。金星は内側にあるので温度は高く、木星になるとマイナス150度からマイナス160度ぐらいになってしまうということで、猛烈に寒い世界がガス惑星の本体だと思っていたらよいと思います。

では、どういうふうにしてこういう惑星ができたかというヒントが前述した軌道の中に隠されていますが、太陽の周りの円盤状の構造の中で、惑星は運動しています。星が生まれるということ。星とは、太陽系の場合だと太陽そのものですが、太陽が生まれると同時に、惑星はこのように生まれているのではないかと思います。

ももとは宇宙空間の中に、一定の割合でガスと塵があります。そういうのは一見漂っているように思いますが、非常にたくさんの質量があると、その真ん中、密度の大きな中心部分に自分自身の重力でじわじわとガスが集中します。それが周りのガスと塵を集めて星の種になります。そういうものの塊が分子雲と呼ばれているもので、星の種ができた状態は原始星と呼ばれています。ヒトでいうと赤ちゃんに対応するような星だと思ってください。それがさらにどんどん進化していき、星の周りにガスが集まるときに回転運動の影響で円盤状の構造ができるとされています。

この円盤状の構造こそが惑星の誕生の場、もともになるものですが、真ん中の天体は原始星、それからもう少し進化が進んだTタウ型星、人間でいうと子どものような状態から成人、太陽のような主系列星になり、晩期型星に至るといった時間スケールがあります。その周りの構造・物質も進化していき、最初は厚い円盤だったものが薄い円盤になり、その中には惑星の種ができていて、残っていた塵が全部なくなってしまうと惑星だけが残って回転運動しているという状態になります。これが太陽の周りに惑星ができるときの一種の模式図だと考えられています。

ただしこのような状況の中でどのように惑星が生まれるかというのはまだはっきりと裏

付けされていません。おそらく塵が赤道面に積もっていき、塵同士が合体して惑星の種ができると思われていますが、理論、観測で少しずつ解明されつつも決定的な回答はまだ得られていません。

ただ、おそらくこの過程で惑星ができるのだらうと考えられている為、惑星は恒星とともに生まれた副産物のようなもので円盤の中から生まれるということなので、この円盤状の構造のことを原始惑星系円盤という名前と呼ぶことが多いです。そのときのものになったものはガスというよりは、出発点は塵で、塵も積もれば惑星になるという言い方をするときもあります。惑星はだいたいこういうような生まれ方をするというのを覚えておいていただくと、あとの話がわかりやすくなります。

今までのイントロダクションの中では、惑星は自分で光らない天体と言いましたが、生まれたばかりの惑星は、まだ重力で縮んでいたときのエネルギーが残っています。そういうものは可視光では見えませんが、可視光よりも長い波長の赤外線で見ると、熱として見えます。長い波長で見ると惑星自体が見える、ということだけ言っておきます。

天文学の話は、基本的には宇宙からの電磁波をとらえることですが、電磁波は波長の短いほうからガンマ線、X線、紫外線、目で見える可視光、それから赤外線、マイクロ波、電波という順に並びます。目で見える光はそのうちの本当にごく一部です。最近ほとんどすべての電磁波をとらえる技術が発展してきています。可視光で見た場合、惑星は光っていませんが、赤外線で見えた場合、惑星は見えるという話があとで出てきます。

さて、イントロダクションはここまでにして、これから本題に入りますが、太陽系の外になぜわざわざ惑星を探すのかというところを、少しだけ触れておきます。

それは、生命の起源、あるいは生命を宿するのが、われわれの地球に似た惑星だと思われる、その起源を求めたいからです。生命と

いう言葉も含んだ第2の地球の存在が本当にあるのかないのかを知りたいからということがポイントです。

われわれの太陽系の中に現在の段階での生命活動の証拠はなさそうということがわかってきました。ですからわれわれの太陽系で一生懸命探すという努力はやるべきですが、それよりも銀河系の中には1,000億とか2,000億個の恒星があるとされています。そのうちのほとんどは太陽に似たような比較的軽い星ですが、そういうものが1,000億、2,000億あるのだったら、そっちを探したほうが太陽1個の周りを一生懸命探すよりもいいのではないかというのはすぐ思いつきます。

そういうことになると、地球に似た惑星を銀河系の中の別の恒星の周りに探そうことが早道だと思われるので、われわれは地球に似た惑星、あるいは太陽系に似た惑星のシステムが大事だと考えています。太陽に似た恒星がたくさんあるのだから、その周りにも生命や第2の地球があるだろうということは、哲学的、宗教的にも考えることができますが、現在では科学的な根拠をかたちとして、そういう惑星をきちんとカメラに収めるところまできつつあるところが新しいのです。

惑星を探すという視点で見ると、われわれの太陽系の中の惑星探しも似たようなもので、土星までは有史以前に知られていましたが、天王星、海王星、冥王星はほぼ100年に1度ぐらい、18、19、20世紀にそれぞれ1個ずつ見つかってきています。最近第10惑星候補の発見がありました。太陽系の外に惑星を探す試みは結構古く、1938年ぐらいからすでに行われていましたが全部うまくいかなかった。その理由は、やはり技術的に追いついていなかったところが一番大きな問題だと思われています。

それが画期的に変わったのがいまからちょうど10年ぐらい前の1995年のことです。これはおそらく今後天文学あるいは自然科学の教科書では必ず記載される年になると思いますが、いろいろな出来事が一挙に起こった年

です。

1938年ぐらいから惑星を探す試みがあるという話をしましたが、こういう発見はすべて別の人が、その天体を観測したら証拠がなかったと否定されてきました。系外惑星を探すことは、天文学の中ではそれほど意味があることではないのではないかとされていたのは事実です。1995年8月に技術的に非常にはっきりした方法ですが、天文のサイトとしては条件の良いハワイ・マウナケアで口径4mの望遠鏡を使い、カナダのウォーカーという人たちが12年間という、非常に長い年月にわたって21個の恒星（この場合は太陽に似た比較的近くの星）を探したところ、木星のような巨大惑星は存在しませんでしたというのを発表しました。残念なことに彼らはこれで惑星探しはやめましたという宣言までしました。こういう報告を聞いて天文のプロの人たちも、やはり系外惑星探しが天文の世界でやっていくのはあまり意味がないのではないかと考えた人は多かった。

ところが同じ年の、わずか二ヶ月あとですが、スイスのジュネーブ観測所で、マイヨールという人と、ケローズという大学院生が、太陽に似た恒星であるペガサス座の51番星という巨大惑星が存在するという報告をしました。そのニュースは世界中を駆け巡って有名になったのですが、肝心なことは、この報告が出た直後に別のグループがこの報告を確認したということです。これによってここで報告された系外惑星の発見というニュースは本当であることを皆さんが信じるようになった。この発見は関係者を驚かせ、系外惑星は天文の中でも、自然科学の中でも一気に重要なテーマのひとつになりました。

さて、先ほど太陽と惑星の間に、惑星よりも少し重く、恒星よりは軽い、ただし水素は燃やさない天体があるという話をしましたが、褐色矮星も不思議なことに同じ年の1995年に見つかっています。このニュースがほぼ同じくらの時期に報告されました。

系外惑星を最初に見つけたマイヨールとケ

ローズのスイスのチームは、95年に見つかった1年ぐらい前から惑星探しのプロジェクトを開始しており、すぐにおもしろい天体だというのに気がついていますが、星は年周運動をしますから、見えない時期が半年間あります。それが再び見えてすぐに結果を報告し、世界中に広まったわけです。これを見るとたった1年ぐらいで成果を取めたように見えますが、彼らは別の地道な仕事があって、これに結びついているのです。

一方、最初の発見を逃したけれど、彼らの結果を確認したアメリカのチームがいます。マーシーとバトラーという人たちですが、彼らは7年ほどにわたりこのような観測をしていました。観測を繰り返してはいたものの解析をしていなかった。解析とは取得したデータを解釈・分析することですが、そういうプロセスをしていなかった。彼らは太陽系と同じような惑星系を探そうとしていました。イントロダクションで述べたように、第2の木星を探そうとしていたのですが、木星は太陽を1周するのに12年ぐらいかかります。ですからデータを取って1年、2年ぐらいでは変化が見られないと思い解析をしていなかった。

ところが実際にここで見つかった惑星は木星と同じくらいの質量ですが、公転周期、太陽の周りを1周するのにかかるのが12年どころではなく、たった4日だった。こんなのはわれわれの太陽系の中では想像もしていない惑星でした。こういう先入観があったために解析を進めておらず、最初の榮譽を逃してしまったのです。これに気がついたらもう7年間の蓄積がありますから、過去のデータを見直すと、そのような惑星がいくつかデータの中に眠っていて、この半年後に次々と、三つ四つと新しい惑星を発見していきました。

このような裏話もありますが、一番の驚きは、見つかった惑星がわれわれの太陽系の惑星とは全然似ていなかったというのが新鮮なところだと思います。太陽と木星があり、その距離は地球－太陽の距離の5倍ぐらい離れたところでした。ところが実際に見つかったペ

ガス座の51番星の惑星はだいたい木星と同じくらいの大きさですが、それが恒星（太陽）に接するくらい近いところを4日の周期でビュンビュン回っていた。そういう惑星系が存在することが初めて発見された点だと思いません。

いま発見されたという話をいたしました、どのような方法を用いたのでしょうか。1930年代から惑星を探そうと行われていたという話をしました。実際に見つかったのは1995年です。かなり時間が空いていることにお気づきになるでしょう。惑星はとらえるのが非常に難しい天体です。特に画像に収めるのは非常に難しい。たとえば非常に明るい太陽があって、暗い天体がすぐ横にある。そういう状況の中で惑星を見分けるためには、クリアでシャープな画像を取らないといけない。惑星自身が暗いということで非常に高い感度が要る。それから明るいものすぐ近くに暗いものがあるというのは、またこれとは違う難しさがあります。

灯台を例にとり、近くを飛んでいる蛍を発見するとしましょう。この場合、惑星を蛍と仮定してみます。灯台の光の照らされていないところに蛍がいたとしても、望遠鏡を使えば見えます。蛍を発見することはできますが、灯台の光の中にいた場合はその明るい光に惑わされて蛍の光を受けられない。そういうことが惑星探しでも起こるのです。目で見える光で見たときは太陽と惑星の明るさの比は9桁から10桁ぐらい違います。それに対して赤外線波長の波長にいくと、先ほど惑星は赤外線で見ると熱を持っているという言い方をしましたが、その分だけ少し明るくなり、それでも6桁ぐらいの差がまだあります。ですから可視光で見ても赤外線で見ても、惑星と恒星は非常に明るさの差がある。コントラストの差が大きいためになかなか惑星を見つけることができないというところがあります。

そこでいろいろな方法が生み出されました。上述したものは、カメラで直接画像に収めようという話の例ですが、実際には画像として

捕らえることは非常に困難です。したがってまず惑星の存在を確認するために工夫された間接方法とよばれているものを紹介します。これらの中の4種類の方法は、ドップラー法、トランジット法、アストロメトリー法、重力レンズ法と呼ばれているものですが、そのうちいま成功しているドップラー法とトランジット法の話今日は引き続き説明します。そのあとに一番おもしろいと思われる直接画像に収める方法はどうしたらいいのかという話をしたいと思います。

最初にドップラー法の話です。原理は非常に簡単ですが、観測はそれほど簡単ではなく、ようやく1995年に成功した方法です。速さを測る方法です。恒星があって、惑星がその周りをグルグル回っているという状況を考えます。そのときにいったい何が起こるかということですが、惑星からの光は非常に暗くてとらえにくいですが、恒星からの光は当然恒星が見えていますから、恒星自身を見ることができます。その運動を見てやります。そうすると惑星が動くとき恒星は少しだけ動きます。ハンマー投げを例にして説明すると、もしハンマーを持たずにグルグル回ったときに選手は軸になっているところを中心にほとんどふらつきませんが、ハンマーを持って回るとその重さがあるために選手も遠心力で回ってしまふ。わずかであるが回ってしまふ。この原理を惑星に当てはめてみます。つまり、惑星が回ると恒星も回ります。回るとどうなるかというと、地球から見ていると、ここからやってくる光が近づいたり遠去かったりします。それが周期的に起こりますから、星の光を見ているとドップラー効果が観測されることになります。その運動をとらえるのがドップラー法と呼ばれているもので、これが現在最も成功している方法です。ただし星の光をとらえるといっても、惑星からきている光を見ているのではなく、恒星からきている光を見えていますから惑星の光子は見えていないのです。ということは間接的に惑星をとらえている。惑星の影響がわかるということです。

現在ドップラー法で恒星がどれぐらいの速さで運動しているかをとらえると、驚くべき数字ですが、ヒトが歩く速さで太陽が運動をしているのをとらえることができます。太陽のような恒星がヒトの歩く速さで運動しているのを測ることができるのは驚異的なことだと思いますが、そういうことができるようになったお陰で惑星の存在を発見することができます。

実際に太陽の周りを木星が回りますと、木星の影響で太陽がどれぐらいふらつくかは、ケプラーの法則を使えば出てきます。毎秒13mぐらいで動きます。ですから数mの精度があれば十分とらえることができます。この方法を使うと惑星の重さはどのくらいであるか。重いと恒星がたくさんふらつきますので、重いか軽いかわかります。それから1周するのにどれぐらいかかるか。軌道のかたちもわかります。こういう方法です。すでに160個ぐらいの巨大惑星が見つかっています。太陽のような恒星をランダムに100個ぐらい探すとすると、そのうちの5個(100分の5)ぐらいは木星のような巨大惑星を持つことがわかってきました。

この5%という数字ですが、カナダのグループについて前述いたしました。彼らは21個観測していますが、21個の5%はだいたい1個です。1個ということは統計でいうと±1がつきますから、0個か1個か2個が観測できていた。たまたま彼らは0個に終わった。ですから21個というのは、そういう意味ではちょっと残念な数で、もし40個とか、あるいは最初に100個観測して、もう少し多くの星を調べていれば彼らの観測精度は十分高かったもので、最初にわかっていたかもしれません。1995年にそういうことが一挙に起こったことは歴史的にもおもしろいと思います。

それでは星の動きを1mぐらいにまでどうやって精密に押さえることができるかですが、その方法は最初の発見を逃したカナダのグループだが、大いに工夫をして発展したということもあります。どういうことかということ、

早さの基準をたくさんつくっているのです。星のスペクトルを測ったときに、星の運動を調べるときに黒く見えている吸収線を使いますが、それが微妙にゆらぐのを測ります。それが絶対的に動くのはなかなかとらえることはできませんが、目盛になるようなものをきちんとたくさん用意しておけば、星の動きをきちんと押さえることができます。そういうのをやるためにドップラー法の一つの方法では、星を観測すると同時に、基準になる波長がわかっているようなヨードガスを含むガラスの入れ物を用意し、それを星の光と同時に写し込むことにより約3 m/secという方法を達成しています。

90年ぐらいからこういう方法が盛んに使われるようになったお陰で、1995年によく最初の1個の惑星が見つかりました。

次に、トランジット法と呼ばれているものです。明るさを測ります。この原理は先ほどよりもさらに簡単なもので、恒星があって惑星がある。これが手前にきたときにどういふことが起こるか。惑星が恒星からの光を隠してしまいます。明るさを追いかけていくと、後ろにきたときにちょっとだけ暗くなってしまふ。惑星の影を見ているようなものですが、それによる効果を見てやろうという方法で、非常に簡単な方法です。問題は、たとえば惑星が縦に回っているとすると、その影響が全然ない。明るさの変化をとらえるためには地球から見たときに惑星と恒星と地球との距離がほぼ一直線上にないと、このようなことは起こりません。もう一つは、恒星に比べると惑星は非常に小さいですから、明るさが変化するといっても目に見えるようにたくさん変化するわけではなく、せいぜいパーセントのオーダーです。これも簡単に大きさだけの比ですので、たとえば地球、木星、それから太陽という太陽系を遠くから見たときに、ちょうど真横から見たときに明るさがどれだけ変化するかを計算してやります。

そうすると地球は1年間に1回だけ、地球が太陽の周りをよぎる間だけ13時間ぐらい継

続しますが、1%のさらに100分の1だけ変わります。1%のさらに100分の1ですから、現在の地上からの技術ではこれだけの明るさの変化は測れません。ところが木星は地球に比べるとさらにまだ大きいですから、1周するのに12年かかりますが、一遍そういうのが起こってしまうと1%も明るさが変わります。1%の明るさの変化は測れるわけです。それにこれは太陽系の場合ですが、太陽系以外の惑星は4日で1周するというものもあると言いましたから、4日待って1%変化するのだっただけで観測できてしまいます。

すでに、この方法で惑星をとらえることには成功しています。それは最初に見つかった惑星検出からおよそ5年後の2000年ぐらいのことです。すでにドップラーの動きを示す惑星があって、その影響で主星が速度的にふらついている天体がすでに知られていましたが、その天体の明るさを10cmの望遠鏡で測っていました。すると、あるときに急に暗くなり、また元に戻ってというのを繰り返すことがわかりました。これが先ほど予想した1%とだいたい同じぐらいで、2%ぐらいでした。

その情報とドップラー法でどれぐらいの重さの惑星があるというのがわかりますから、それらを合わせると、まず重さに関しては、この惑星は木星の0.6倍ぐらいだということがわかりました。もう一つはどれぐらい暗くなるかということから、木星だと1%と言いましたが、それよりちょっと大きいのがわかります。それで半径は木星の1.3倍だとわかりました。ということは重さと半径がわかりますから体積がわかり、比重がわかります。つまりこれを1として、1だったら木星と同じ比重ですが、これは木星より明らかに比重が軽い。木星はガス惑星ですから、岩石惑星に比べるとこの天体はもっと比重が軽いことになりますから、少なくともこれは岩石惑星ではない。おそらくガス惑星であろうということが初めてわかった。つまり直接は見えていませんが、重さと半径からそこまで推定で

きるようになりました。

それ以外の方法として、ドップラー法は一番成功していて160個ぐらいすでもうわかっていますがこの方法は速度がふらつく。速度がふらつくと同時に恒星自体の位置がふらつく。その位置のふらつきをとらえるアストロメトリ法という方法を3種類目とします。これはまだいまのところ成功していません。それから明るさの変化を見るトランジット法は最近の成功率が増えてきて7個ぐらい見つかっています。

そして、重力レンズ法です。この原理は重力レンズを使ったものです。ちょっととっつきにくい方法ですが、この方法も結構行われていて1個ぐらいわかっています。電波で中性子星の周りに惑星がないかを探すことも行われていて、それは数個ぐらい発見されており、合計すると170個に近いくらいの惑星がもうすでに確認されています。日本での間接方法の観測は岡山天文台、すばる望遠鏡で行われています。

ドップラー法で惑星が見つかってきていますが、最近が一番軽いものだと地球の重さの7倍ぐらいのものがわかっています。しかし、まだこれを岩石惑星、地球型惑星という分類はできず、基本的には木星のような巨大惑星がわかったけれど、それよりも地球型の惑星はまだ見つかっていないと言っていると考えています。

われわれの太陽系と比べるとまったく似ても似つかないという話をしましたが、実は軌道も最初に紹介したような太陽系の惑星のような円運動ではなく、非常にひしゃげた楕円運動をしている天体も多い。こういうのは太陽系をつくったメカニズム、同じ理論でこういう惑星が説明できるかということ、いろいろ新しいアイデアを駆使しないと説明できないと考えています。一言で言うならば太陽系の惑星とは大きく異なったものが多く、惑星は非常に多様であることがわかってきたと思います。

さて、そうなるとうやはり一番ほしいのは直

接観測で惑星を画像に収めたい。それでもう少し詳しくいろいろ調べたい。太陽があって、その近くに惑星がある。すばる望遠鏡の観測ではいろいろな種類の惑星があることがわかりましたから、比較的まず簡単な惑星の直接観測から目指していこう。簡単と言いましたが、最初に言いましたようにこれはそもそも非常に難しい。大きな望遠鏡にいろいろな工夫をしないとできないことですが、まずその方法で比較的簡単なものからスタートしていこうというわけです。

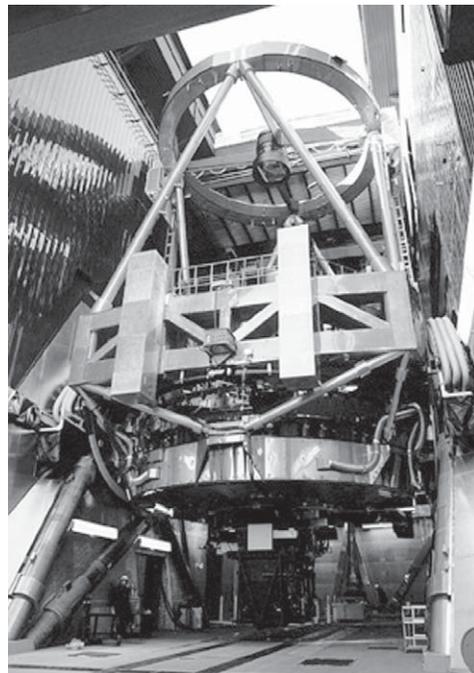


図5 すばる望遠鏡
(写真提供：国立天文台)

では、すばる望遠鏡でどういうことが行われているかを紹介したいと思います。すばる望遠鏡は、私が所属する国立天文台がつくって運用している口径8mの巨大望遠鏡で、ハワイのマウナケアという、4,200mの標高に建設された望遠鏡です。望遠鏡自体は計画開始から現在までで20年ほどの歳月を経ています。建設が10年間、動き始めたのが1999年です。

最初に光を集める鏡の直径は8.2mで、こ

ため、すばる望遠鏡よりさらに口径の大きな望遠鏡を宇宙空間に上げることになりますが、1枚の大きな鏡を、それもすばる望遠鏡の数倍大きな望遠鏡を上げるなどは不可能です。ですから小さな望遠鏡をいくつか上げることで、それらをうまく組み合わせれば巨大望遠鏡として使うことができると考えています。そういうものを干渉計といいます、その方法を使う。

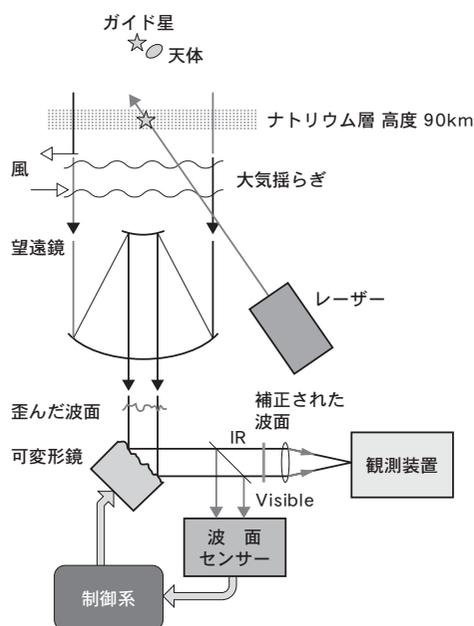


図6 補償光学の概念図

干渉計は基本的に二つの望遠鏡を並べ、それら二つの望遠鏡があたかも一つの望遠鏡として見えるような工夫をしてやる方法です。大きな望遠鏡では光をたくさん集めることができるという利点があります。集められる光の量は鏡の面積に比例します。小さな望遠鏡を二つ置いただけでは、確かに光は足りないのですが、望遠鏡同士の距離を離すことができる分だけ細かな構造が見えます。したがって干渉計は非常に有利になります。

では、そこに生命があるかどうかをどのように判断すればいいのでしょうか。一つは、生命の存在の指標となるスペクトルを判断してやります。大事なものは酸素とオゾン、どち

らも同じようなもので副産物がオゾンですが、酸素があるかどうかを言えればよい。それから次は水です。水があるかないかを言えればよい。金星、地球、火星のスペクトルを見てみると、二酸化炭素はすべての惑星にありますが、表面に水とか酸素があるのは地球だけです。ですから遠くからスペクトルを見たときに酸素があって水があることがわかると、たぶん地球に似た大気を持った惑星ではないかと考えることができます。

水の存在を捉えるというのは非常に大事なことを考えます。生命が存在するというのは、おそらく液体の水があるからだろう。そして、ある明るさの星があったときに、たとえば太陽だったら水がある領域はほとんど距離で決まってしまう。地球～太陽の距離の0.8倍から1.6倍のところにある天体しかも、その上で惑星がある場合にしか液体の水は存在しないことになります。惑星の重さが変わると、水が荒れる。液体の水が存在する領域が変わってきます。そういうのをハビタブルゾーンといいます。

それからもう一つ酸素は、たとえば地球の場合は約35億年前にすでにストロマライトと呼ばれているラン藻の化石が残っていますが、こういうものは葉緑素のもとになったもので、光合成が行われていた。そこで酸素ができるというのが、たくさん酸素がある原因だと思われています。ですから生命のもとになるものを見る時には、酸素がある、ないが非常に大事なことになると思われま

す。これらを総合すると、まずは点として惑星があるかないかを望遠鏡で見たり、そこでスペクトルを見てやる。そこからさらに先は、地球の陸と海を見分けるとか、なるべく人工衛星でわれわれが太陽系の惑星を見ているように画像を得ていくのが理想的ですが、そこまでの間はなかなか時間的、技術的にも無理があり、現在のところは点状の画像を撮り、スペクトルを取ってやるというところまで行くのだと思います。

こういう感じで太陽系の外に惑星を探し、

そこに第2の地球があるかどうか。生命も含めて第2の地球があるかというのは、タイムスケールとしてはいまから10年、15年ぐらい、2015年から2020年ぐらいの計画としてようやくメインテーマになりつつあります。先ほど言ったようにすばる望遠鏡のような規模のものを宇宙空間に上げてやって第2の地球を見つけようという計画が進みつつあります。国立天文台でも今年度に入って系外惑星を真剣に研究しようというプロジェクト室ができました。それはここでも重要なテーマのひとつになっています。

最後に、太陽系の中でどういう生命探しが行われているかをごく簡単に紹介させてください。われわれの太陽系の中で水が存在する、あるいは生命が存在すると思われる領域が三つあります。火星とエウロパとタイタンです。

そのうちのタイタンは海があるのではないと言われていて、ごく最近カッシーニ、ホイヘンスという衛星が打ち上げられ、その様子を描きました。メタンの海があるのではないかと予想されていましたが、メタンの海は大昔の地球の大気と同じようなものです。それが打ち上げられて地面に着地をしようとしてきました。その画像を途中で撮影し地球の海岸の風景とか川が流れているような様子などが見えたのですが、残念ながらメタンの海はありませんでした。おそらく地中には以前のメタンが残存している可能性もあり、昔の地球を再現する上では重要な地形だと思われています。生命があるとかそういうところまでは急にはいきませんが、ようやくわれわれの太陽系の中でも生命探しが真剣に行われるようになってきたというのも、一つ付け加えておきたいと思います。

どうしてわれわれの太陽系が生まれたのか。それから木星や地球のような惑星はほかの恒星にも存在するのか。最後は生命も含めた第2の地球は存在するのかという問いに答えたいということに対して、惑星を生み出す場の本格的な観測は進んだ。すばる望遠鏡では実

際にそういう画像が得られるようになってきた。間接的だけれども巨大な惑星に関しては約170個がもうすでにわかってきた。これは今後もどんどん進むだろう。いまは大きな惑星を直接に画像に収めようということでのぎが削られているという話をしました。

第2の地球探はまだ実現していませんが、10年あるいは15年後の計画として本格的に進みつつあるという話をして、その延長としてわれわれの太陽系の中でも昔の地球を再現するような大きな実験室としてタイタンの状況がだんだんわかってきたという話をしました。

私たち天文学者が今取り組んでいること、そして諸外国の研究成果などを含め「宇宙に生命を求めて」についての将来への展望をお話させていただきました。ご清聴ありがとうございました。