視線速度精密測定によるＧ型巨星の惑星サーベイ

佐藤文衛
（東京工業大学）

１．はじめに

太陽以外の恒星を周回する惑星は太陽系外惑星と呼ばれ、1995 年にスイスのグループによって初めて発見された。それ以降、主に欧米のグループによる精力的な探索によって 2010 年 5 月末までに約 450 個の発見が報告されている。これらの大部分は「ドップラー法」――惑星との共通重心を周回する恒星の微小な視線速度変化をとらえる手法――によって太陽に似た恒星（太陽型星、ここでは FGK 型矮星を指す）の周りで発見されたものであるが、ホット・ジュピター（短周期巨大惑星）やエキセントリック・プラネット（楕円軌道惑星）など太陽系の惑星とは大きく異なるものが数多く見つかっている。最近では、観測精度の向上に伴って地球質量の数倍から十数倍という比較的軽い惑星も見つかり始め、「第 2 の地球」発見への期待が高まっている。このような多様な系外惑星系の形成と進化を解明するための理論的研究も進み、太陽型星における惑星形成の理解はこの 15 年で飛躍的な進展を遂げた。

一方、太陽型以外の恒星における惑星系についてはまだよく分かっていない。質量の小さな M 型星では大口径望遠鏡を用いたサーベイが進んでいるが、逆に質量の大きな AB 型星などの早期型星は高温のためスペクトル中に吸収線が少なく、また、高速自転しているものが多いため吸収線が広がっており、そもそも視線速度の精密測定に適さないので惑星探索がほとんど行われてこなかった。そのため、このような恒星では惑星の性質はおろか惑星があるのかどうかさえつい数年前まで分かっていなかったのである。なんとかして重い恒星の周りの惑星を探すことはできないだろうか・・・これが、本研究の出発点であった。

２．岡山での系外惑星探索開始

話は 10 年前、岡山観測所がちょうど 40 周年を迎えた頃にさかのぼる。博士課程 1 年生だった私は、博士論文のテーマとして当時急速な勢いで発展しつつあった系外惑星の観測に興味をもった。10 年前と言えばちょうどすばるの HDS が試験観測を始め、岡山の HIDES が共同利用を始めた頃である。恒星の視線速度変化を精密に測定するためのヨウ素ガスフィルター（ヨードセル）も神戸栄治氏らを中心にまず HDS に、続いて竹田洋一氏の第 1 号機の後を継いで HIDES にも第 2 号機が導入され、日本でも系外惑星探索という観測研究が可能になった。私も独自にデータ解析用のソフトウェアを作り、惑星検出に十分な約 5 m/s という測定精度を達成した。しかし、肝心の観測テーマはなかなか決まらなかった。当時は長い歴史を誇る欧米のチームの独壇場で、堰を切ったように猛烈な勢いで次々と新たな惑星を発見しており、サーベイの規模から言って我々後発組の付け入る隙はなさそうに見えたからである。ところが、必死になって考えるとそれなりにアイディアも浮かぶもので、惑星探索は難しいと考えられていた A 型星も進化して G 型巨星の段階になると惑星探索が可能なことに気がついた。主系列段階では先に述べたような理由で視線速度の精密測定は難しいが、進化して巨星になると表面温度が下がり、自転速度も小さくなるので、スペクトル中に多数の吸収線が現れるようになり、太陽型星と同様に惑星探索ができるようになるのである。今でこそ巨星を対象にした惑星探しは盛んだが、幸い当時はまだ限られたグループが細々とやっていただけで、特に G 型

巨星についてはほとんど手つかずと言ってよかった（より進化の進んだ K 型巨星では脈動の観点から観測をしているグループがあった）。早速観測計画を立て、当時の私の指導教官であった安藤裕康先生を始めとする共同研究者の方々と共に、期待と不安を抱えながら岡山での系外惑星探索をスタートさせたのである。

3．日本初、系外惑星の発見―HD104985b

惑星探索という観測はとにかく時間がかかる。惑星が見つかる確率は典型的には約 10％程度なので多数の天体を観測しなければならないし、少なくとも一公転周期分は観測しなければならないので一年周期の惑星を見つけようと思ったら最低一年、念を入れると二年はかかる。当初は一般プロポーザルに申し込んでいたため毎月 3 日くらいしか割り当てがなかったが、2001 年の 5 月から私は岡山に移り住み、観測所時間の手当もあって大体毎月 6 日間くらいはもらえるようになった。他にも色々な空き時間をかき集めて、岡山に滞在した 2 年間はひたすら観測に明け暮れた（観測なので暮れ明けたか）。私の 20 代の思い出はほぼ観測一色である。その甲斐あってか、2003 年に晴れて日本初の系外惑星を発表、私の学位論文もめでたく完成した。当時はすばるが共同利用を始めたところであり、岡山の観測時間に比較的余裕が生まれていたということも一大学院生がこんなにも観測できた理由であろう。まさに、岡山無くしてこの成果は成しえなかったと言える。

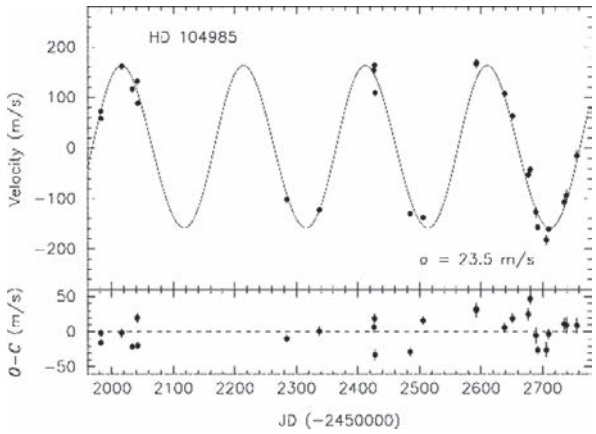

図 1：HIDES で検出された G 型巨星 HD104985 の視線速度変化。周期約 198 日、振幅約 160m/s で変化している（Sato et al. 2003, ApJ, 597, L157）。

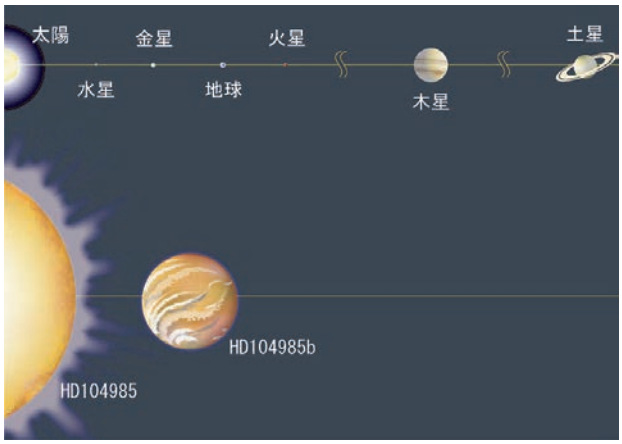

図 2：HD104985 を周回する惑星の想像図（岡山天体物理観測所提供）。

さて、日本初の系外惑星発見の舞台となったのは、きりん座にある HD104985 という巨星である。2 年間に及ぶ観測から、この天体は周期約 198 日、振幅約 160 m/s の視線速度変化を示すことが明らかになった（図 1）。恒星の進化モデルとの比較から中心星の質量を約 1.6 太陽質量（後に 2.3 太陽質量に修正）と推定すると、観測された視線速度変化は約 6.3 木星質量（後に 8.3 木星質量に修正）の惑星が軌道長半径約 0.78 天文単位（AU）（後に 0.95AU に修正）の位置をほぼ円軌道で周回していることを示している（図 2）。1.6 太陽質量と言えば主系列では早期 F 型星から晩期 A 型星に相当し、このような中質量星の周りでも惑星が形成され得ることが示されたのである。ちなみに、この発見は巨星の惑星としては当時世界で 3 例目、G 型巨星としては初めてであった。ちょうど学位論文を 1 年後に控えた冬のある日の観測中に、巨星初の惑星発見のニュースを目にしたのだが、それが G 型巨星ではなく K 型巨星だと分かってホッと胸を撫で下ろしたのを覚えている。G でも K でも似たようなものだが、発見に何か「初」という冠がつくかつかないかは大きな違いであった。

4．プロジェクト観測へ

この発見に勢いを得て、2004 年からはプロジェクト観測としてさらに大規模な惑星探索を行うことになった。プロジェクト観測は半期で 40 夜が上限とされているが、それを目一杯使っての観測である。毎月約 1 週間の観測が 3 年間確保されることになり、ある程度長期的な視点に立って計画を遂行することができるようになった。惑星探索のような観測にはこのプロジェクト観測というシステムはまさに打ってつけである。サーベイ対象天体も約 300 個に増やし、単なる発見だけでなく惑星系の統計的な性質を明らかにすることを目標に掲げた。ここでは、

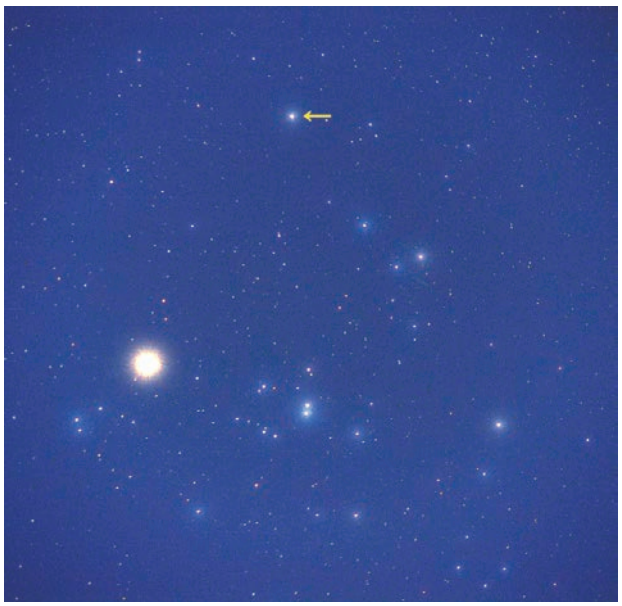

図３　ヒアデス星団。矢印の恒星が、HIDES による観測で惑星が見つかったおうし座 ε 星（岡山天体物理観測所提供）。

プロジェクト観測によってこれまでに得られた成果の一部を紹介したい。

４．１　世界初、散開星団における系外惑星発見

これまでに惑星が見つかっている恒星のほとんどはフィールドの恒星である。一般にフィールドの恒星の年齢を正確に決めるのは難しく、太陽型星だと典型的に数十億年の誤差がある。一方、星団に属する恒星は同じ時期に誕生したとみなすことができ、質量による進化の速さの違いを利用して等時曲線から精度よく年齢を見積もることができる。また、化学組成も一様とみなせるので、星団に属する恒星の主な違いは質量ということになり、中心星の質量の違いが惑星に及ぼす影響をクリアに調べることができるという利点がある。

2007 年、我々は地球から最も近い散開星団であるヒアデス星団に属する巨星の一つ、おうし座 ε 星の周りに巨大惑星を発見した（図 3）。当時、散開星団で惑星が見つかったのは世界で初めてだった。この惑星は木星の約 7.6 倍の質量をもち、約 2.7 太陽質量の巨星の周りを周期 595 日で周回している（図 4）。ヒアデス星団の年齢は約 6 億年と精度よく決められており、このことは巨大惑星が遅くとも約 6 億年以内には形成され得ることを観測的にはっきりと示したことになる。ところで、ヒアデス星団では過去に別のグループが惑星探索を行ったことがある。そのときは約 100 個の太陽型星をサーベイして惑星は発見できなかったが、我々は 4 つの中質量

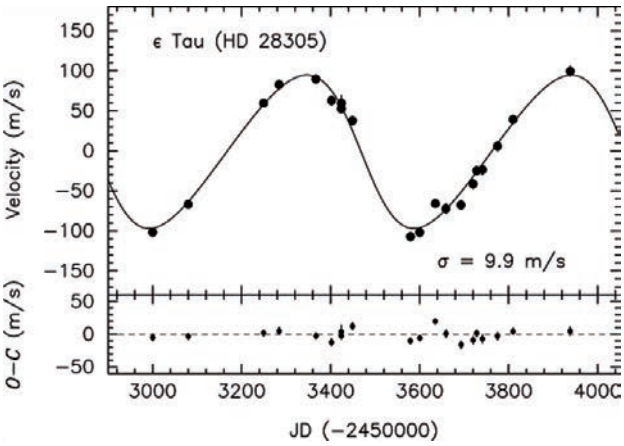

図 4：HIDES で検出されたおうし座 ε 星の視線速度変化（Sato et al. 2007, ApJ, 661, 527）。

巨星の中の 1 つに巨大惑星を発見した。このことは、質量の大きな恒星ほど巨大惑星をもつ確率が高いことを示唆している。

４．２　巨星を周回する褐色矮星の発見

岡山でのプロジェクト観測が始まって間もなく、さらに惑星探索の規模を広げようという機運が高まり、中国の共同研究者と協力して中国興隆観測所で新たに 100 個の G 型巨星について観測を始めることになった。この共同研究の最初の成果となったのが、かみのけ座 11 番星における褐色矮星の発見である。中心星は約 2.7 太陽質量の巨星で、その周りを 19 木星質量の伴星が約 326 日の周期で公転している。褐色矮星は「恒星になりそこねた星」とも呼ばれ、惑星と恒星の中間の質量をもつ天体である。その形成過程にはまだ謎も多く、恒星の伴星として見つかる確率は惑星が見つかる確率よりも低いことが知られている（褐色矮星砂漠と呼ばれる）。巨星の伴星として見つかった例もほとんどなく、当時としては 3 例目の発見であった。褐色矮星砂漠の存在は惑星と恒星の形成メカニズムの違いを反映していると考えられており、我々の発見は質量の大きな恒星における惑星形成過程を解明する上で貴重なサンプルとなった。

４．３　巨星の周りの惑星系の様子

2001 年の研究開始以来、我々が発見した系外惑星及び褐色矮星の数は合わせて 14 個になった（図 5）。巨星を周回する同様の天体はこれまでに約 40 個発見されているが、我々はその約 3 分の 1 を発見していることになり、単一グループによる発見数としては世界で単独トップを維持している。

惑星発見数が増えるにつれ、巨星を回る惑星の興

味深い性質が明らかになってきた。まず、質量が木星の５倍を超えるような超巨大惑星の頻度が高いことが挙げられる。太陽型星の周りではこのような惑星が見つかる確率はせいぜい１％程度であるのに対し、我々の観測では現在約３％程度と推定されている。巨星は脈動など星自身の活動性が高く質量の小さな惑星は一般に見つけにくいことを考えると、巨大惑星全体の頻度はもっと高い可能性がある。最近の理論的研究では巨大惑星の頻度は約３太陽質量でピークになるという予想もあり、近い将来我々の観測がこの答えを提示できるはずである。

軌道長半径の分布にも特徴がある。太陽型星の周りでは 0.02AU から外側に万遍なく惑星が見つかっているのに対し、巨星では約 0.6AU より外側にしか見つかっていない。つまり中心星近傍で惑星が欠乏している。中質量星は高温のため近傍に固体物質が少なく、惑星がもともとできにくいと考えられる一方で、中心星が巨星へ進化する過程で内側にあった惑星が中心星との潮汐作用によって軌道角運動量を失い中心星に落下してしまった可能性もある。また、太陽型星の惑星と違って軌道離心率も比較的小さい傾向にあり、このことも惑星形成および進化を解明する手がかりになると考えられる。

中心星の金属量と惑星との相関も興味深い。太陽型星では金属量の高い恒星ほど巨大惑星をもつ確率

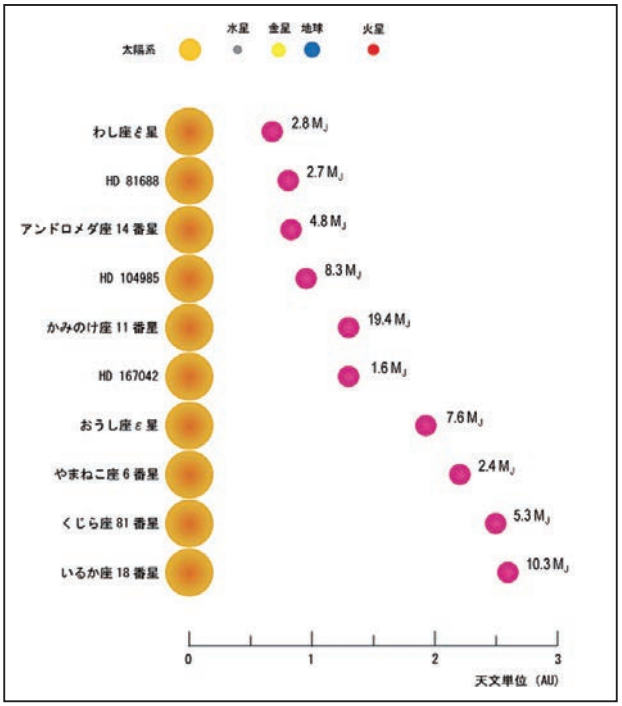

図５：岡山でこれまでに発見された巨星を回る惑星の例（模式図）。数字は惑星の質量（木星質量を１とする）。軌道長半径が小さい順に上から並べてある。

が高いことが知られており、惑星形成メカニズムとしてコア集積を支持する証拠と言われているが、巨星の場合は今のところそのような傾向は見られていない。この原因として、円盤重力不安定など金属量にあまり依存しないメカニズムでの惑星形成や表面対流層の発達による表面金属汚染の希釈などのアイディアが提案されているが、惑星の有無にかかわらず巨星ではそもそも金属量過剰な星がほとんど存在しないという事実もあり、議論が続いている。

このように、巨星の周りで見つかっている惑星系の性質は太陽型星のそれとは異なることが観測事実として明らかになってきた。今後の惑星形成理論には、これらの事実を矛盾なく説明することが求められる。

５．さらなる発展へ

プロジェクト観測は 2010 年からは３期目に入り、現在も観測が続いている。観測期間が長くなるにつれ、より遠方の惑星や複数の惑星をもつ多重惑星系なども見つかり始め、多様な系外惑星系の姿がさらに明らかになりつつある。中国や韓国、トルコの研究者との協力関係も進み、すばる望遠鏡も使いながら目下約 600 天体を観測している。これは、世界的にみてもかなり規模の大きな観測プロジェクトである。このような成功を収めることができたのは、やはりプロジェクト観測によって長期間まとまった時間を確保することができたからに他ならない。欧米では 2m クラスの望遠鏡をほぼ惑星探索専用に使っているところもあり、そのような相手に対抗するためにはプロジェクト観測が大きな助けとなった。そして何より、岡山の晴天率の高さにもずいぶん助けられた。経験的に言って、岡山の晴天率は東アジアでは抜きんでている。望遠鏡と観測装置の性能・安定度もまた然りである。今や OKAYAMA は系外惑星探索の主要なサイトの一つとして世界的に広く認知され、東アジアの重要な拠点と位置付けられている。今後も 188cm 望遠鏡とともに、この研究をさらに発展させていきたい。

最後に、開所以来50年の長きにわたり観測所の維持・発展に尽くしてこられた多くの先輩方、岡山観測所の方々、そして、この研究の共同研究者の方々に深く感謝するとともに、岡山観測所の今後のさらなる発展に微力ながら貢献できればと思う次第である。