

ドップラー法による系外惑星検出

佐藤 文 衛

〈東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: satobn@oao.nao.ac.jp

1995年に初めて系外惑星が発見されて以来、現在までに100個以上の系外惑星がドップラー法によって見つかった。その数は今も着々と増え続けており、それに伴って様々な系外惑星の姿が明らかになってきた。ここでは、系外惑星発見の歴史とこれまでに見つかった系外惑星の様子、視線速度精密測定の方法、そして、我々のグループが岡山天体物理観測所で行っている系外惑星探査について紹介する。

1. 系外惑星の発見

地球を始めとする太陽系の惑星は太陽のまわりを公転しているが、実際は太陽も惑星の万有引力をうけてわずかに動いている。太陽は主に木星の力を受け、木星との共通重心のまわりを木星の公転周期である約12年で1周している。太陽系を外から観測すれば、太陽は12年の周期で我々に近づいたり遠ざかったりしながら速度（視線速度*）が変化してみえることだろう。天体がこのような運動をすると、そこから放たれた光は「ドップラー効果」によって我々に近づくときは波長が短い（青い）方に、遠ざかるときは波長が長い（赤い）方にずれる。太陽が木星によって揺らされる速度は約13m/s、これがもたらす波長のずれは500nmの波長の光（可視光）でわずか0.00002nmほどであるが、もし、他の恒星においてこのような周期的な波長のずれ（視線速度変化）をとらえることができれば、その星のまわりに惑星があるという間接的な証拠になるのではないだろうか？ このようにして他の恒星の惑

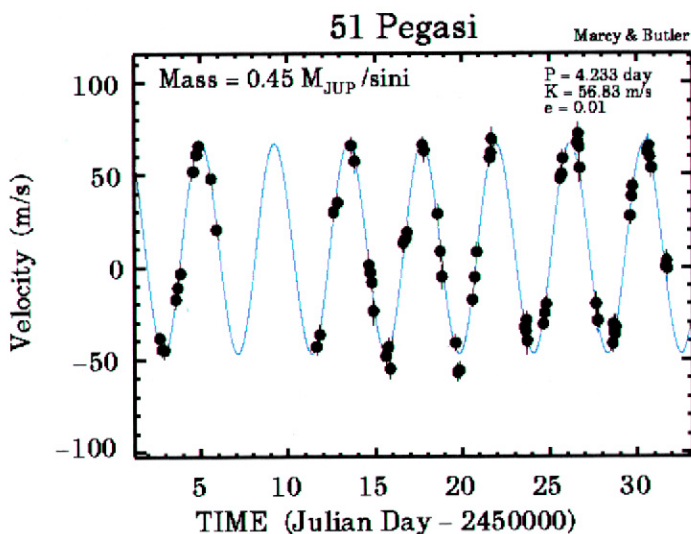


図1：ペガサス座51番星の視線速度変化。横軸はユリウス日、縦軸は視線速度、黒い点が実際の観測点。我々から遠ざかる時の速度を正としている（<http://exoplanets.org>より引用）。

星を見つける方法は、「ドップラー法」と呼ばれている。

ドップラー法による本格的な系外惑星探査は、1980年代初頭、カナダのWalkerらのサーベイに始まる¹⁾。彼らは、太陽型星の中から21個を選んで約12年間視線速度変化をモニターしたが、残念ながら惑星による変動を検出することはできなかった。その直後の1995年、スイスのMayorらが、太

* 我々の視線方向に対する速度

陽型星であるペガサス座 51 番星に巨大惑星を発見したと発表した²⁾。彼らがこの星で見つけた視線速度変化の周期は 4.2 日、振幅は 57m/s、これが惑星によるものだとすると、木星の半分ほどの重さをもつ惑星が主星からわずか 0.05 天文単位（太陽と水星の距離の約 8 分の 1）の距離をまわっていることになる（図 1）。この発見は、その後すぐに同じく惑星探査を行っていたアメリカの Marcy らのグループによって確認され、さらに翌年彼らはこの星と同じような惑星をもつ星を複数個発見した。その後、サーベイは飛躍的に発展し、現在までに 100 個以上の系外惑星が発見されている。そしてその数は今年 10 ~ 20 個のペースで増え続けている³⁾。

2. 視線速度精密測定

星の視線速度は分光器を用いて測定する。分光して得られた星のスペクトルには吸収線が多数存在し、星の視線速度変化に伴って検出器上のこれらの位置が変化する。速度変化が大きいほど吸収線の位置変化は大きくなり検出しやすくなるが、惑星による主星の速度変化の振幅はほんの 10m/s 程度、CCD 検出器上でわずか 100 分の 1 ピクセルほどの移動にしかならない。通常、星の視線速度を測定するときは、前もって取得しておいた比較光源のスペクトルを用いて検出器上の波長の目盛を決め、その目盛に対して星の吸収線がどのくらい動いたかを調べる。しかしこの方法だと、星と比較光源との光の経路の違いや、両者をとったときの温度の違い等に起因する分光器のゆがみによって波長目盛がずれてしまい、星の吸収線の位置測定に誤差が生じる。この誤差は普通数 100m/s にもなるため、これでは星自体のわずかな速度変化を検出することは不可能である。

このような精密測定を行う方法の一つに、「ヨー

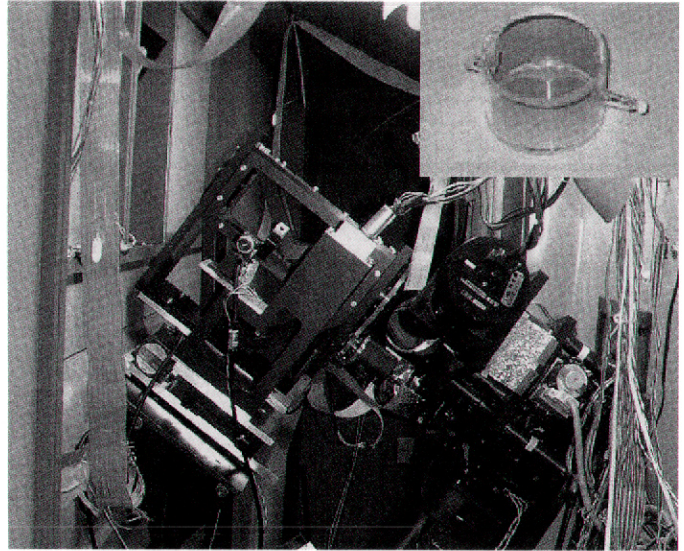


図 2：岡山天体物理観測所 188cm 望遠鏡のクーデ室内に設置されたヨードセル装置（中央手前の小さな箱）。左が望遠鏡側で、右が高分散エシェル分光器 HIDES への入口（スリット部）。右上の写真はヨウ素ガスを封入したセル本体で、これが中央の箱の中に収まっている。

ドセル法」と呼ばれるものがある。ヨードセルとはヨウ素分子ガスを封入した容器のことで、分光器の入口の光軸上に置かれる（図 2）。この状態で観測すると、星のスペクトルにヨウ素のスペクトルと一緒にうつるが、ヨウ素の吸収線は可視域に無数に存在し、その波長はとてもよく決まっているので、非常に精度のよい目盛を星と同時にとっていることになる。つまり、このヨウ素の吸収線が検出器上で常に正しい波長の位置を教えてくれるので、たとえ分光器のゆがみなどでスペクトルが動いても、ヨウ素の吸収線を基準にして星の吸収線の位置を測ればよいというわけである（図 3）。これによってあらゆる器機的な誤差を取り除くことができ、その結果、数 m/s という超高精度で天体の視線速度変化を検出することが可能となる。この方法による測定精度は、今のところ Lick, Keck, AAT などの 3 m/s が最高である⁴⁾。我々のグループは、3 年前に岡山観測所の高分散エシェル分光器 HIDES (High Dispersion Echelle Spectrograph)

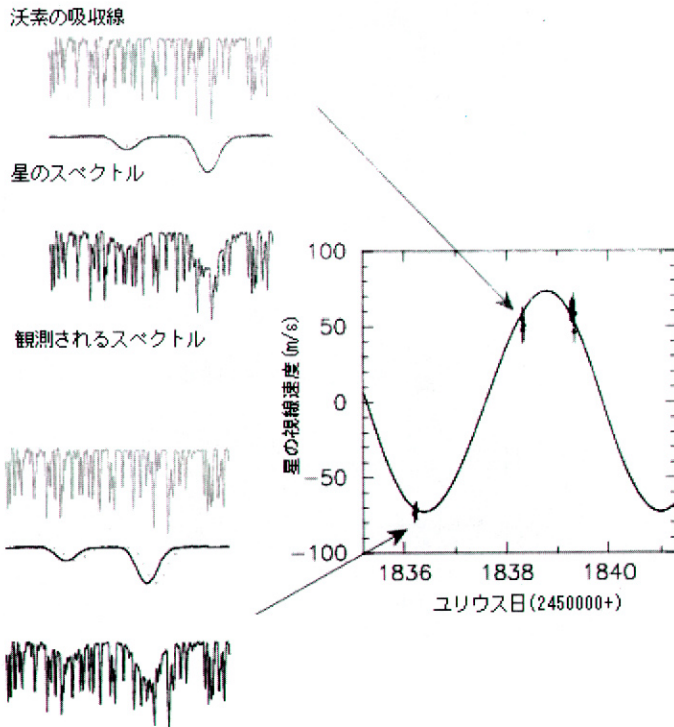


図3：ヨードセルを用いた視線速度精密測定原理。ヨウ素の吸収線に対する星のスペクトルのシフトを測定する。右図は、HIDESで測定したアンドロメダ座アップシロン星の視線速度変化。この星は3つの惑星をもっていると言われている。

とすばる望遠鏡の高分散分光器 HDS (High Dispersion Spectrograph) 用にヨードセルを開発し⁵⁾、日本におけるこの分野の研究を本格的にスタートさせた。現在、両分光器ともに約 5m/s の精度が得られており、世界的にみても遜色のないレベルに達している⁶⁾。

3. 多様な系外惑星

ドップラー法では、惑星が主星の近くにあるほど（周期が短いほど）、そして惑星の質量が大きいほど主星の視線速度変化が大きくなるため、その惑星を検出しやすくなる。この方法による検出限界を図4に示す。現在の精度では、主星近傍なら土星質量程度の惑星まで検出可能である。また、系外

惑星探査が本格的に始まって10年以上が経ち、太陽系の木星軌道あたりの惑星も検出できるようになってきた。

最初に発見されたペガスス座51番星の惑星は、主星のごく近く（～0.05天文単位）にある木星型惑星だった。このような惑星はその後多数発見されており、「ホットジュピター」と呼ばれている。また、これまでに見つかった系外惑星の多くは大きな離心率をもっている。いわゆる太陽系形成論では、木星のような大惑星は主星から遠く離れたところに円軌道で形成されると予想されるので、このような異形の系外惑星は、遠くでできた後で内側に移動してきたのではない⁷⁾、あるいは、惑星同士の交差（衝突）によって軌道が乱されたのではない⁸⁾、といった可能性がその起源として考えられている。その他、木星質量程度の惑星が数多く見つかる中で、木星の10倍以上の質量をもつような非常に重い惑星も見つかる⁹⁾。このような超巨大惑星

は、現在の標準的な惑星形成理論ではつくるのが困難とされており、別の惑星形成メカニズムでできた可能性が議論されている¹⁰⁾。

2002年6月、Marcyらのグループは、かに座55番星に新たな惑星を発見した¹¹⁾。この星では以前にホットジュピターが見つかったが、さらにその外側約5.5天文単位の距離を木星の数倍の質量をもつ惑星がほぼ円軌道でまわっていたのだ。このような周期の長い円軌道の惑星や、複数の惑星をもつ星はここ1、2年で続々と発見されており、これまで少ないとされてきた太陽系のような惑星系は、実はたくさんあるのではないかと考えられるようになってきた。この中には、地球のような惑星をもつ星もあるかもしれない。

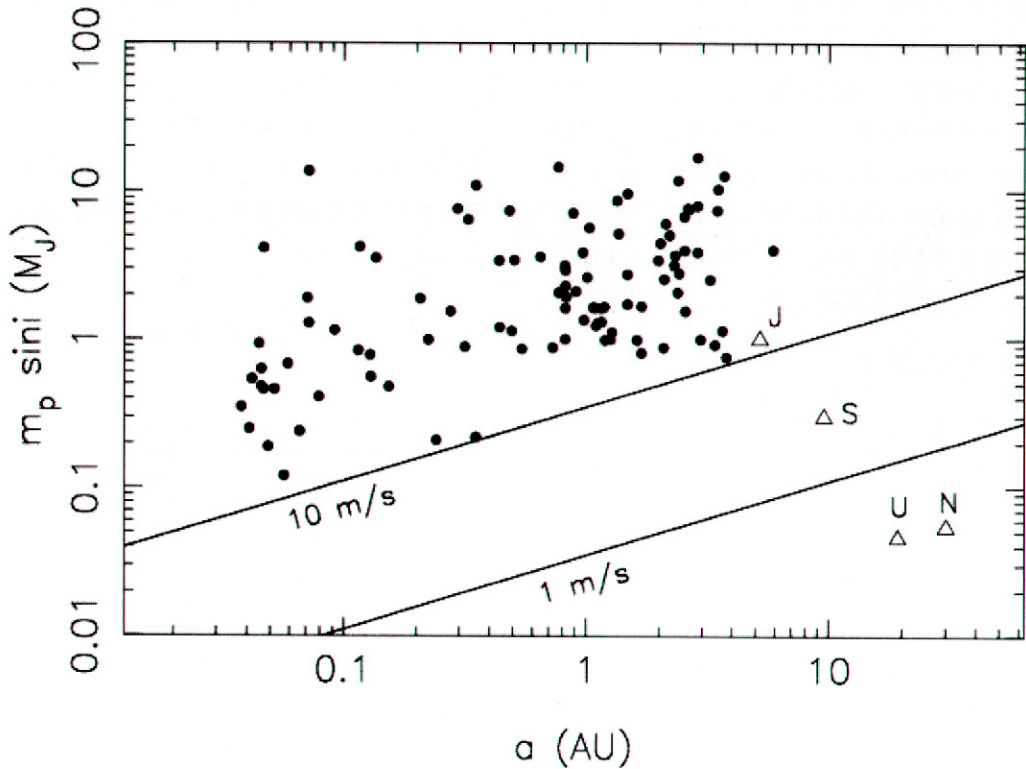


図4：ドップラー法による検出限界。横軸は軌道半径（天文単位）、縦軸は木星質量を単位とした惑星質量。黒丸はこれまでに見つかった系外惑星、三角は太陽系の惑星を表す。直線は視線速度変化の振幅が一定の線。現在の精度（3m/s）では、主星に振幅約10m/s以上の視線速度変化を及ぼすような惑星を検出することができる。

4. 日本での系外惑星探査

系外惑星の発見は、太陽だけが惑星をもつ特別な星ではないことを明らかにした。次なるステップは、太陽型以外の星にも惑星はあるのか、どんな星にでも惑星は普遍的に存在するのかを明らかにすることである。太陽系とは異なる様々な環境下での惑星の有無や、その特徴を調べることによって、惑星形成に必要な条件を知ることができるだろう。

我々は今、太陽の2～3倍程度の質量をもつ中質量星に注目している。これらは、主系列ではA型星やB型星に相当し、原始惑星系円盤をもつ若い星も多数観測されているが、未だ惑星は見つかっていない。赤外線による観測から、これらの円

盤が消失するタイムスケールは、太陽型星の場合よりも短い可能性が示唆されている¹²⁾。木星型惑星は円盤が消える前に形成されなければならないので、円盤の寿命が異なる様々なタイプの星で惑星の有無を調べることによって、木星型惑星形成のタイムスケールを観測的に知ることができると考えられる。しかし、A型やB型の主系列星は、スペクトル中に吸収線が少ないうえに、自転速度が大きいので吸収線の幅が広がっているため、惑星検出に必要な視線速度の測定精度を得ることができない。そのため、これらの星は現在世界中で行われている系外惑星サーベイからは除かれている。そこで我々は、これらが少し進化した星であるG型巨星に目を付けた。G型巨星は、進化によって半径が太陽の10倍くらいに膨張しているが、これ

は軌道半径にすると高々 0.05 天文単位であり、また、吸収線の数も多く自転速度も小さいので視線速度の精密測定が可能である。我々のグループは、岡山観測所の HIDES とヨードセルを用いて、現在約 50 個の G 型巨星について惑星探査を行っている。観測を始めて約 2 年が経ち、そろそろ成果が出始める頃である。また、すばる望遠鏡の HDS でも同様のサーベイを検討している。

5. 今後の展望

ドップラー法は現在最も成功している惑星検出法であり、世界中の天文台で多くのグループがサーベイを行っている。現在サーベイされている太陽型星は北天、南天合わせて約 3000 個にのぼるが、これは太陽近傍 50pc 以内の太陽型星をほぼ網羅している。Keck について VLT でも惑星探査が始まり、3-4 m 級の望遠鏡では視線速度測定専用の望遠鏡、分光器がまもなく動き始める¹³⁾。また、1 m/s 以下の精度が実現されれば、主星近傍にある天王星クラスの惑星まで検出できるようになり、系外惑星に関する統計的な議論がさらに進むだろう。一方、太陽型星以外の星を対象としたサーベイや、テーマを絞ったサーベイも徐々に始まっており、我々の G 型巨星や、もっと進化の進んだ K 型巨星¹⁴⁾、散開星団¹⁵⁾や連星系¹⁶⁾など、惑星探査のターゲットは拡大しつつある。テーマを選べば 1-2 m 級の望遠鏡でも十分貢献できるが、やはり専用望遠鏡化して多大な観測時間を投入できるようにするのが望ましいだろう。

また、今後は地上、スペースを問わず他の様々な観測手法との連携が一層重要になる。例えば、ドップラー法では下限値しか決まらない惑星質量を、アストロメトリと組み合わせることで正確に決めることができる。ドップラー法で見つけた惑星のさらに外側の惑星をコロナグラフ観測などで見つけることができれば、惑星の軌道進化に関する手がかりが得られる。ドップラー法で地球型惑星を見つけることは困難だが、木星型惑星を見つける

ことによって、その星は将来地球型惑星を探すためのよいターゲットとなる。

ドップラー法は、系外惑星探査を行う上で基本的かつ強力な手法であり、今後、この分野で日本が独自のサイエンスを切り拓いていくためにも、その手法をしっかりと確立していきたいと考えている。

参考文献

- 1) Walker G.A.H., et al., 1995, *Icarus*, 116, 359
- 2) Mayor M., Queloz D., 1995, *Nature*, 378, 355
- 3) <http://www.obspm.fr/encycl/encycl.html>
- 4) Butler R.P., et al., 1996, *PASP*, 108, 500
- 5) Kambe E., et al., 2002, *PASJ*, 54, 865
- 6) Sato B., et al., 2002, *PASJ*, 54, 873
- 7) Lin D.N.C., Bodenheimer P., Richardson D.C., 1996, *Nature*, 380, 606
- 8) Lin D.N.C., Ida S., 1997, *ApJ*, 477, 781
- 9) Marcy G.W., et al., 2001, *ApJ*, 555, 418
- 10) Boss A.P., 2001, *ApJ*, 563, 367
- 11) Marcy G.W., et al., 2002, *ApJ*, 581, 1375
- 12) Haisch K.E., Jr., Lada E.A., Lada C.J., 2001, *AJ*, 121, 2065
- 13) Queloz D., Mayor M., 2001, *ESO Messenger Newsletter*, 105, 1
- 14) Setiawan J., et al., 2003, *A&A*, 398, L19
- 15) Cochran W.D., Hatzes A.P., Paulson D.B., 2002, *AJ*, 124, 565
- 16) Gratton R.G., et al., 2001, *A&A*, 377, 123

Detection of Extrasolar Planets by Precise Doppler Technique

Bun'ei SATO

The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: Since the discovery of the first extrasolar planet in 1995, more than 100 planetary candidates have been identified so far by the precise Doppler technique. The number is still increasing and various types of extrasolar planets have been revealed. In this paper, I will introduce the results of current Doppler surveys, the method of precise radial velocity measurements, and the outline of our planet search program on-going at Okayama Astrophysical Observatory.