

太陽系外惑星の発見と情報学

嶋田 理博

奈良産業大学 情報学部

概要

1995年に人類が初めて太陽系外の惑星を発見して以来、800個以上もの太陽系外惑星が発見されている。太陽系外惑星の発見方法には、主に、直接撮像、食検出、視線速度測定の種類がある。それらの観測例を紹介するとともに、それらの観測が情報技術の進展によって牽引されていることについて述べる。

1. はじめに

太陽の他に惑星を持つ恒星はあるのだろうか？惑星があったとしてそこに生命は棲んでいるのだろうか？知的生命体はいるのだろうか？というのは、誰しもが思う疑問であろう。

ジュネーブ大学のマイヨール (Michel Mayor) とケロス (Didier Queloz) が最初の太陽系外惑星 (以降、単に系外惑星と略す) を発見したのは、1995年のことであった¹⁾。それから17年の間に、800個以上もの系外惑星が発見された。2007年以降は、毎年50個以上もの系外惑星が発見されている (図1)。

太陽系外の惑星はどうやって発見するのか、なぜこのように多数の系外惑星が発見されるようになったのかを概説しよう。

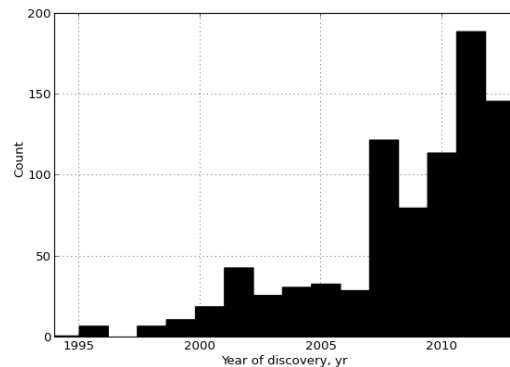


図1 系外惑星の年別発見数
横軸が年、縦軸が発見数を表す。
(The Extrasolar Planets Encyclopaedia²⁾ より)

2. 太陽系外惑星の発見方法

2.1. 直接撮像法

まず、系外惑星を発見する方法として単純で分かりやすいのは「直接撮像法」である。惑星の像を直接望遠鏡で捉える方法である。

しかし、この方法にはいくつかの難点がある。一つは惑星の明るさである。例えば、木星を100光年離れた距離から観測すると、その明るさは28等級 (肉眼で見える限界の6等星の6億分の1の暗さ) となる。これは、すばる望遠鏡のような口径8~10mクラスの大望遠鏡を使わなければ観測できない明るさである。さらに、恒星と惑星が接近しているにも関わらず、明るさの差が大きいことも観測を困難にする。例えば、100光年離れた距離から太陽系を見た場合、太陽と木星は0.16秒角 (1秒角は3600分の1度) しか離れておらず、

木星と太陽の明るさの比は可視光線で1億倍、赤外線でも1万倍となる。したがって、高性能の望遠鏡をもってしても、恒星のそばに暗く輝く系外惑星を直接撮像することは難しく、現在までに約30個が発見されたのみである。

図2は、ヘルツバーグ天体物理学研究所のマロワ (Christian Marois) らが、2008年にハワイ Keck 天文台と Gemini 天文台で、スペックルイメージングという方法を用いて赤外線で撮影した HR 8799 という星の画像である³⁾。中央のまだらになっている部分が恒星で、周囲の“b”、“c”、“d”の文字のそばに写っている小さな点が惑星である。中心の恒星からの距離は、“b”が1.7秒角、“c”が1.0秒角、“d”が0.6秒角である。この系にはもう一つ、合計で四つの惑星の存在が分かっている。

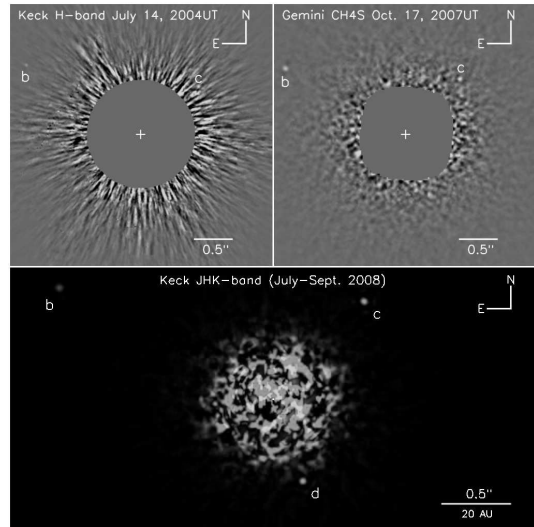


図2 HR 8799 の直接撮影画像³⁾
2004年に撮影した画像 (左上) と2007年 (右上)、2008年 (下) の画像を比べると、反時計回りに公転しており、惑星であることが分かる。

2.2. 食検出法

次に、系外惑星を発見する方法として「食検出法」を紹介する。金星の太陽面通過という現象が、2012年6月6日に起こり話題になったが、同じように、太陽系外の惑星も恒星面を横切ることがある (図3)。この時の、恒星の明るさのわずかな変化を観測するのが食検出法である。とは言っても、金星の太陽面通過では、太陽全体の明るさの変化は0.01%である。木星ほどの大きさの惑星が太陽面を横切っても、明るさの変化は1%しかないので、高い精度の観測が必要である。

また、惑星が恒星面の一部を遮るためには、恒星・惑星・地球が一直線に並ばなければならないので、日食や金星の太陽面通過が珍しい現象であるように、系外惑星による恒星食もめったに起こらない現象である。例えば、遠方のでたらめな方向から太陽系を見た場合、地球が太陽とちょうど重なって見える確率は20万分の1、木星と太陽がちょうど重なって見える確率は500万分の1である。惑星を持つ恒星があ

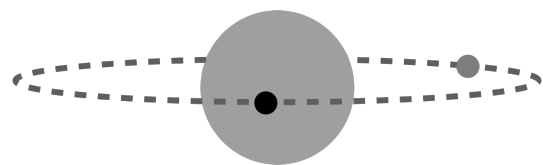


図3 惑星の恒星面通過

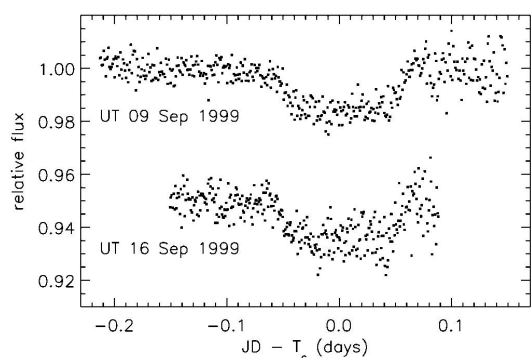


図4 HD 209458 の光度変化⁴⁾
1999年9月9日の光度変化 (上) と1999年9月16日の光度変化 (下)。横軸は食の中心を0.0とした時刻 (単位: 日)、縦軸は通常時を1.0とした明るさである。9月16日のデータは、区別のため、下に0.05だけずらしている。

ったとしても、それを食検出法で観測できるのはごく稀なのである。

図4は、ハーバード・スミソニアン天体物理学センターのシャルボノー (David Charbonneau) らが、1999年に観測した HD 209458 という星の光度変化である⁴⁾。この星は、シャルボノーらが観測する前に、後述する視線速度法の観測から惑星を持っていることが分かっていたが、シャルボノーらは、この星の前を惑星が 3.5 日ごとに通過し、1.5% 減光することを発見した。系外惑星による食を観測したのはシャルボノーらが初めてである。周期と減光量から、惑星の大きさが計算でき、木星の 1.4 倍程度と推定された。

食検出法はごく稀な現象を観測するのだが、惑星本体ではなく、恒星の明るさの変化を測定するので、口径 10cm 程度の望遠鏡でも観測可能である。そこで、視野の広い、小口径の望遠鏡を専有して多数の星を自動観測するプロジェクトが多数立ち上がった。食を検出できる確率が 100 万分の 1 でも、10 万個の星を数十回~数百回観測すれば、いくつかは系外惑星を発見できるだろう、というわけである。ハーバード・スミソニアン天体物理学センターが中心となって運営している HATNet プロジェクト^{5) 6)} は、44 個の系外惑星を発見し、カナリア諸島天体物理研究所、キール大学など 7 機関が運営する SuperWASP プロジェクト^{7) 8)} は、72 個の系外惑星を発見した。また、CNES/ESA (フランス国立宇宙研究センター/欧州宇宙機関) が打ち上げた CoRoT 宇宙望遠鏡⁹⁾ は、22 個の系外惑星を発見し、NASA (米国航空宇宙局) が打ち上げた Kepler 宇宙望遠鏡¹⁰⁾ は、105 個の系外惑星を発見するなど、宇宙望遠鏡を使った観測も行われている。現在までに、食が観測された系外惑星の数は約 300 個にのぼる。

2.3. 視線速度法

系外惑星を発見する方法の 3 つ目として「視線速度法」を紹介する。これは、恒星の視線方向の速度変化を観測する方法である。

惑星は、恒星に重力で引っ張られて恒星の周りを公転しているが、作用・反作用で恒星もまた惑星に引っ張られている。質量は恒星の方が圧倒的に大きい、それでもわずかながら惑星に振り回されることになる (図5)。例えば、太陽は地球に秒速 0.1 メートルの速度で、木星には秒速 12 メートルの速度で振り回されている。

光源が観測者に近づく運動をしているとき、光の波長は短くなり、光源が観測者から遠ざかる運動をしているとき、光の波長は長くなる (図6)。これをドップラー効果という。恒星表面大気は、水素、ナトリウム、マグネシウム、カル

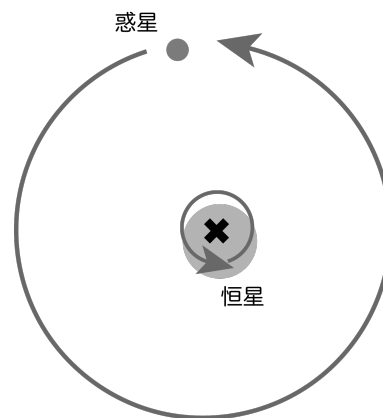


図5 惑星に振り回される恒星

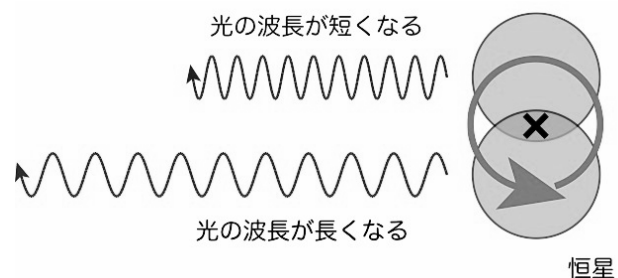


図6 光のドップラー効果

シウム、鉄など、元素やイオンによって波長の決まった光を吸収している（図7）ので、恒星の光をスペクトルに分解し、その波長の変化を観測すれば、運動速度とその変化を観測することが出来る。これが、「視線速度法」の原理である。

ジュネーブ大学のマイヨール（Michel Mayor）とケロス（Didier Queloz）は、1995年にフランス Haute Provence 天文台で、ペガサス座 51 番星を観測し、4.2 日周期で視線速度が秒速 60 メートルの振幅で変化していることを発見し（図8）、この現象は、木星の約半分の重さの惑星によって恒星が振り回されることによって起こっていると結論づけた¹⁾。第1章でも述べたように、これは人類が発見した最初の系外惑星である。

視線速度法は、恒星のふらつきを測定するものなので、食検出法のように、系外惑星の軌道が恒星面を横切る必要はなく、広く適用できる観測方法である。ただし、光をスペクトルに分解するので、ある程度以上明るい恒星しか観測できない。また、観測装置も大がかりなものになる。

視線速度法もいくつかプロジェクトが立ち上がっており、アメリカ Lick 天文台と、Keck 天文台で行われているリック・カーネ

ギー系外惑星探査（Lick-Carnegie Exoplanet Survey）¹²⁾ は、100 個以上の系外惑星を発見した。また、チリ La Silla 天文台で行われてる HARPS（High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher）プロジェクト^{13) 14)} は、75 個の系外惑星を発見した。いずれも口径が 4m や 10m といった大望遠鏡と高性能の分光器を使う大型プロジェクトである。現在までに、視線速度の変動が観測された系外惑星は約 500 個にのぼる。

3. 宇宙の観測と情報技術

前章では、近年相次いで発見される太陽系外惑星の発見方法について述べた。発見された系外惑星は、太陽系の惑星とは大きく異なり、従来の惑星系形成理論に大きな謎を投げかけているが、それについては稿を改めて述べることとして、本稿では、このような発見に、情報技術の発展がいかに深く関わっているかについて述べる。

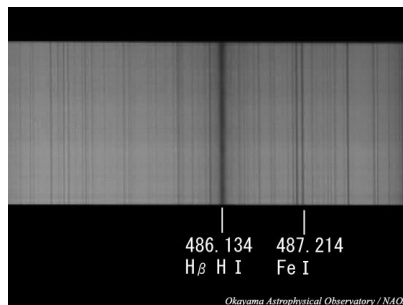


図7 太陽の吸収線スペクトルの一部
数値は波長（単位 nm : ナノメートル）。
486.134nm に水素の、
487.214nm に鉄の吸収線が見える。
（国立天文台岡山天体物理観測所¹¹⁾ より）

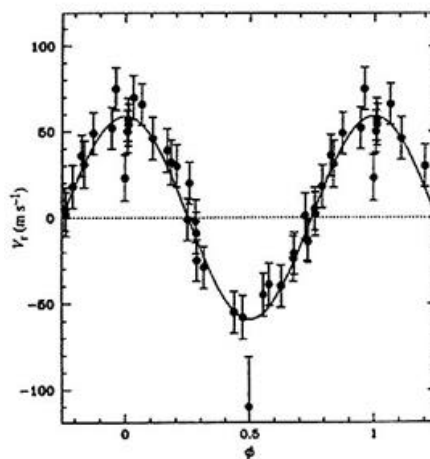


図8 ペガサス座 51 番星の視線速度変化¹⁾
横軸は、周期の 4.2 日を単位として
約 150 日間の観測データを折たたんだもの、
縦軸は視線速度の変化（単位：m/s）

3.1. CCD カメラ

CCD (Charge-Coupled Device) は、いわゆるデジタルカメラの撮像素子である。現在は民生用のデジタルカメラやスキャナにも広く使われているが、天文学の世界では、1980年代から広く使われるようになり、それまでの写真乾板に取って替わった。

写真乾板の量子効率 (受光エネルギーのうち、化学的または電氣的なエネルギーに変換される割合) が 1%程度なのに対し、天体観測用の CCD は 90%以上に達し、ほとんどロスがない。したがって、写真乾板に比べより暗い天体が観測可能になったり、あるいは、同じ明るさの天体を観測するのであれば、写真乾板よりも精度が向上したり、より小さな望遠鏡で観測可能になったり、観測時間が短くなり短時間の変動を捉えることが出来るようになったりと、観測天文学の発展に大きく貢献した。

3.2. 補償光学

地球上で天体を観測すると、大気のゆらぎの影響でどうしても像がぼけてしまう。例えば、点光源を撮像する場合、Hubble 宇宙望遠鏡では、像の大きさが 0.05 秒角 (1 秒角は 3600 分の 1 度) と小さいが、地上では、すばる望遠鏡のあるハワイ マウナケア山頂のような好立地でも、平均 0.6 秒角程度に広がってしまう。

大気のゆらぎによる光波面の乱れを測定し、可変形鏡を使ってリアルタイムに補正し、シャープな像を得る技術を補償光学 (Adaptive Optics) という。補償光学を用いると、地上の観測でも、点光源の星像サイズを 0.1 秒角以下にまで小さくすることが出来る (図 9)。補償光学は 1990 年代から研究が進められ、2000 年代になって実用化した。リアルタイムの高速処理を行う情報技術の発展なしには実現しない技術である。2.1 章の系外惑星の撮像にも使われている。

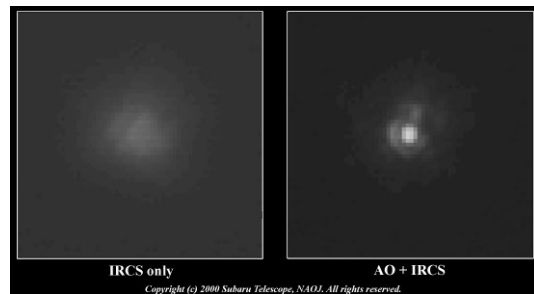


図 9 補償光学による星像の改善
左側が補償光学 OFF、右側が補償光学 ON
で恒星を撮影した画像。補償光学 ON で、
0.07 秒角まで星像が小さくなっている
(すばる望遠鏡ウェブサイト¹⁵⁾ より)

3.3. 自動観測、自動解析

食検出法のように、多数の天体の時間変化を追いかける観測は、人間が常に張り付いて実施することは難しい。例えば、2.2 章で取り上げた Kepler 宇宙望遠鏡¹⁰⁾ は 10 万個の星を 3 年半継続して追跡観測することになっている。そのような観測を人間が手順にしたがって実行し続けるのはとても不可能で、あらかじめ決められたプログラムに沿って、コンピュータで自動制御する必要がある。

また、Kepler 宇宙望遠鏡のカメラは 9,500 万画素あり、6.5 秒に 1 枚ずつ画像を撮影しているので、単純計算だと 1 日当たり 1 万枚以上の画像を取得することとなる。このような膨大な観測データを人間が一つ一つ解析することもとても不可能である。星の明るさを

自動で測定し、変化のあった星を自動で抽出するようなシステムが必要である。また、膨大なデータを保管するストレージも必要である。

このように、現代の観測天文学は、撮像素子がデジタル化されていることと、大量のデータを保管でき、望遠鏡や観測機器を自動で制御し、高速に自動処理できるコンピュータがあつて初めて実現可能となるのである。

4. まとめ

本稿では、観測天文学の近年の大きな成果の一つである系外惑星の発見について紹介したが、それらの成果は情報技術の進展によって得られた物である。

400年前、望遠鏡という観測装置を手に入れたことによって、人類は、万有引力の発見、光速度の測定、天体までの距離の測定、銀河系の発見など、天文学において飛躍的な進歩を遂げた。また、100年前、写真乾板や分光器、電波望遠鏡を手に入れた人類は、恒星や銀河の物理状態や構造の観測、元素の起源、宇宙膨張の発見など、天文学における第2の飛躍的進歩を遂げた。そして、現在、コンピュータという観測装置を手に入れた人類は、天文学における第3の飛躍的進歩の時期を迎えていると言えるのではなかろうか。

参考文献／リンク

- 1) Mayor & Queloz, 1995, Nature 378, 355.
- 2) The Extrasolar Planets Encyclopaedia, <http://exoplanet.eu/>
- 3) Marois et al., 2008, Science 322, 1348.
- 4) Charbonneau et al., 2000, Astrophysical Journal 529, L45.
- 5) Bakos et al., 2002, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 114, 974.
- 6) HATNet Project, <http://www.hatnet.hu/>
- 7) Pollacco et al., 2006, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 118, 1407.
- 8) SuperWASP Homepage, <http://www.superwasp.org/>
- 9) CoRoT, <http://smc.cnes.fr/COROT/>
- 10) Kepler : Home Page, <http://kepler.nasa.gov/>
- 11) 国立天文台 岡山天体物理観測所 太陽スペクトル - The Solar Spectrum -, http://www.oao.nao.ac.jp/stockroom/extra_content/sun/sun.htm
- 12) Howard et al., 2010, Astrophysical Journal 721, 1467.
- 13) Mayor et al., 2003, The Messenger 114, 20.
- 14) ESO - La Silla Instrumentation: HARPS, <http://www.eso.org/sci/facilities/lasilla/instruments/harps/>
- 15) Subaru Telescope Press Release - Adaptive Optics First Light! - Subaru Telescope, <http://subarutelescope.org/Pressrelease/2000/12/02/>