

# 系外惑星の多様性と遍在性

**Keyword:** 系外惑星

## 1. 系外惑星の発見

太陽以外の恒星を巡る惑星を「系外惑星」と呼ぶ。ここで「系」は太陽系を意味する。1940年代から系外惑星探しが始まったが、1995年まで何も発見されなかった。

系外惑星を中心星から空間分解することは難しく、それらの光度差は非常に大きいので、中心星を観測することで系外惑星を検出する「間接法」が主になっている（ただし、現在では軌道半径が大きいガス惑星については、直接検出が可能になってきている）。当初は、惑星がまわることで恒星が共通重心のまわりを首振り運動することを天球上での精密位置観測（アストロメトリ法）により検出しようとしたが、大気の揺らぎや長期間観測の系統誤差を克服することはできなかった。1980年代には中心星の首振り運動による中心星光のドップラー遷移を分光観測する（具体的にはスペクトルの吸収線の位置のずれを観測する）視線速度法が一般的になり、木星クラスの惑星の検出は可能になった。しかし、それでも発見できなかった。

ところが、それが嘘のように、1995年に初の系外惑星が発見されるや否や発見が加速していき、その後の20年間で発見数は2,000個に迫り、候補天体まで入れると5,000個を超えている。このような大転換が起きた原因は、観測精度は足りていたが、系外惑星系の多くが太陽系とは異なる多様な姿で検出し損なっていたこと、1995年までは（当然）人員も予算も望遠鏡時間も極めて限られていたことである。

## 2. 多様な系外惑星系

太陽系では、中心星に近い方から小型岩石惑星（水星、金星、地球、火星）、巨大ガス惑星（木星、土星）、中型氷惑星（天王星、海王星）の順に円軌道で並んでいる。太陽からの木星と土星の距離は5.2 AU、9.6 AUである（AUは太陽と地球の平均距離を表す）。

1980年代に林忠四郎が率いた京都大学チームは太陽系形成の標準モデルとなる「京都モデル」を構築した。<sup>1)</sup>現在の惑星の固体成分を動径方向にならして、太陽組成を仮定して（水素・ヘリウムガスは一定時間経つと散逸したとする）、太陽系を生んだ円盤を推定し、その円盤内で多数の固体小天体（微惑星）群の合体成長を考え、惑星質量が地球の約10倍を超えたら、円盤の水素・ヘリウムガスが惑星に流れ込むとした。このモデルに従うと、軌道半径が大きいほど集められる微惑星領域が増え、3 AU以遠では水も凝縮するので、木星・土星領域では惑星にガスが流れ込む。それより外側の天王星・海王星領域では成長が遅いので、

先に円盤ガスが散逸して、氷惑星として残る。このように、太陽系の惑星の並びは説明されたと思われた。

1995年までは太陽系という1サンプルしかなく、その姿の合理的説明もあったので、必然的に太陽系の姿を基準にして系外惑星探しが行われていた。

だが、1995年に初の系外惑星として発見されたのは、中心星の至近距離（0.05 AU）を数日で周回する巨大ガス惑星「ホット・ジュピター」であり、その後も彗星のような偏心した楕円軌道をえがく巨大ガス惑星「エキセントリック・ジュピター」が視線速度法によって続々と発見された。

2009年に打ち上げられたケプラー宇宙望遠鏡は、惑星による中心星の食を観測するトランジット法を用いて、地球サイズに迫る小さい惑星まで検出し、多くの恒星で、中心星近く（0.1 AU 近辺）に地球サイズの数倍程度の「スーパーアース」が何個も編隊で並んでいることを発見した。

さらには連星系での惑星、中心星の自転方向とは逆向きに公転している惑星、軌道半径が100 AUというような中心星から離れた惑星など、多様な惑星系が次々と発見された。

視線速度法やトランジット法では、中心星に近い惑星、質量や物理半径が大きい惑星の検出にバイアスがかかっている。観測精度が上がるにつれて、太陽系の木星や土星と似たような質量、軌道半径の惑星も数多く発見されるようになって、太陽系は必ずしも特殊な惑星系ではないようだ。しかし、惑星系は非常に多様だということは確かである。

## 3. 系外惑星の存在確率

惑星系は多様であり、かつ存在確率は極めて高い。太陽型恒星（F、G、K型矮星）に対して、巨大ガス惑星が存在する確率は10~20%程度と推定されている。ホット・ジュピターは1%程度で、実は少数派であることがわかった。スーパーアースについては観測精度の問題で、まだ中心星に近いものしか検出できないが、その制限のもとでも存在確率は数十%を超えると推定されている。この精度で太陽系を観測すると、木星がぎりぎり検出できるかどうかというところで、地球型惑星は全く検出できない。つまり、実際には太陽型星のほとんどが惑星系を有していると想像される。

質量が小さいM型矮星は銀河系では太陽型星よりも数が多いが、太陽型星に比べて巨大ガス惑星の存在確率は小さいものの、スーパーアースはむしろ多いようである。質量が大きいA型矮星やB型矮星では観測が難しいが、巨大ガス惑星の存在確率は高いようである。

このように、惑星の存在は非常に普遍的であり、恒星が

形成されるときに副産物として必然的に形成されるものがあることが示唆される。

#### 4. 系外惑星の形成理論モデル

古典的な標準モデルでは、ホット・ジュピターやエキセントリック・ジュピター、および中心星に近い領域に編隊を組むスーパー・アースを説明することはできない。古典的標準モデルに抜けていた物理プロセス(たとえば、ガス円盤と惑星との重力相互作用による惑星軌道の変化や惑星同士の重力相互作用による惑星軌道の不安定化など)をモデルに加えて、解決しようとする試みがなされてきたが<sup>2,3)</sup>系外惑星の分布を十分に説明するには至っていない。

また、系外惑星系を考えた後で、太陽系を眺め直してみると、なぜ水星軌道の内側には何も無いのか、なぜ小惑星帯には惑星がないのか、天王星や海王星の形成など、太陽系も古典的標準モデルでは説明しきれないことが認識されてきている。そのため、「微惑星」の集積で惑星ができたのではなく、10センチメートル程度の塵の塊(ペブル)の集積で惑星が形成された可能性や円盤ガスの自己重力不安定による惑星形成の可能性といった、惑星形成理論の根本的な見直しも議論されるようになってきている<sup>2,3)</sup>。

惑星形成理論は今大きく変動している最中である。しかし、その理論を較正すべき観測データもたくさんあり、惑星形成のパーツをなす物理過程についての知識はかなり蓄積されているので、太陽系も系外惑星系も統一的に説明する理論の構築は夢のまた夢というわけではなく、手が届くところにあると考えられる。

#### 5. 内部構造、大気

視線速度法は惑星質量を測定し、トランジット法は惑星断面積を測定する。両方の方法で観測できている惑星は多数あり、結果として、それらの惑星の密度が推定できている。惑星をつくる成分の代表的なものには、鉄、岩石、水、水素・ヘリウムガスの4つがあり、この順で密度が低くなっていくので、密度から惑星の組成をある程度推定することができる。

その結果わかったことは、おおまかに言って、地球の数十倍以上の質量を持っているものは木星や土星のように水素・ヘリウムガス、それより小さいものは天王星や海王星のように氷、地球質量の数倍以下のものは地球のように岩石を主成分としているということである。ただし、密度の幅は非常に大きく、土星程度の質量があっても主成分がガスではなく固体に見える密度のものもある一方で、常識では考えられないほど密度が低いガス惑星もある。また、中心星に近い高温領域のスーパーアースが氷を主成分にしている

というのも考えにくいので、岩石の惑星に分厚い水素・ヘリウム大気がある可能性も検討されているが、謎は多い。

系外惑星の大気組成も観測から推定されている。惑星からだけのスペクトルを取り出すことができれば、大気組成はわかる。だが、現状の望遠鏡では中心星と惑星を分離することができない。しかし、食を起こす惑星(トランジット観測できる惑星)の場合、惑星が食を起こしている間、中心星の光の一部は惑星大気を通過してきており、惑星が食を起こしていないときとのスペクトルの差から、その惑星の大気組成が推定できる。惑星大気のモデルと観測データを組み合わせる必要があるため、複雑になるが、現在、精力的に大気組成の観測が進められている。

#### 6. ハビタブル惑星

中心星からの距離がほどよく、惑星表面温度が高すぎず低すぎずで液体の海が存在可能な軌道範囲を「ハビタブル・ゾーン」と呼ぶ。太陽型星ではハビタブル・ゾーンは1AU付近に位置し、その場所でのスーパーアースや地球質量程度の惑星の検出は、軌道半径が小さい惑星の検出が得意な視線速度法やトランジット法での検出はまだ難しいが、今後観測が加速しそうな重力マイクロレンズ法ではまさにそのエリアの惑星に感度があるので、期待したい。

2020年代の超大口径望遠鏡(30~40メートル)を使えば、ハビタブル・ゾーンの地球型惑星を中心星から分離できて、大気成分がわかるかもしれない。地球大気の酸素のほとんどは光合成生物が吐き出したものであるが、そのような非平衡大気組成は生命存在の証拠だという考えがある。つまり、スペクトルの酸素やオゾンの吸収線から系外生命存在を同定できるかもしれないのである。他にも、地球植物が赤外線を強く反射しているのは光合成の一般的性質という考えもあり、そうならば、植物という高等生物の存在も調べられるかもしれない。現在、生命存在のサインの検出について、様々な観測方法が議論されている。現在の地球生命は、微生物も動物も植物も共通祖先から枝分かれした単一の生命であることがわかっている。たった1つのサンプルで考える難しさは、系外惑星系の例で我々は身にしてみている。地球外生命に関する統計的データが得られることで初めて、我々は生命の起源に迫れるようになるかもしれない。

#### 参考文献

- 1) C. Hayashi, N. Nakazawa and Y. Nakagawa: in *Protostars and Planets II* (Univ. Arizona Press, 1985) 1100.
- 2) 井田 茂:『系外惑星』(東京大学出版会, 2007).
- 3) 井田 茂, 中本泰史:『惑星形成の物理』(共立出版, 2015).

井田 茂(東京工業大学地球生命研究所)

(2015年6月20日原稿受付)