

重力マイクロレンズ法による系外惑星探査の現状について

手塚 謙次郎 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

系外惑星探査の手法の一つであるマイクロレンズ法に関する最新の論文を読み、JASMINE 計画との関係性を検討した。まず、2 体系のレンズの系に注目し、マイクロレンズ法に関する基礎的な物理を紹介する。マイクロレンズ法を用いて惑星の質量と軌道半径を決定するのは難しいが、光度曲線と高解像度の画像の詳細な解析によって決定することができる。地上での観測でも惑星系の物理量を測定することが可能だが、宇宙での観測の方が、より正確に決定できる。マイクロレンズ法では、主星と惑星の距離が遠くても惑星を検出することが可能なので、宇宙での観測から惑星系の軌道長半径の分布を調べた。2 次元的に投影された惑星の個数に対する観測データから、3 次元的なデータを取得する統計的な手法が 2011 年に Brown 氏によって考案されているので、それを用いて軌道長半径密度に対する単純なべき分布を発見した。さらに、地上での観測から惑星形成過程の鍵を握る自由浮遊惑星が多く存在することについて言及し、宇宙での観測によって、自由浮遊惑星の質量分布の測定にどの程度貢献できるのかを示した。

1 Introduction

1992 年に PSRB1257+12 の周りを公転する惑星がパルサー・タイミング法によって発見されてから、多くの手法で新たな系外惑星が発見されている。この惑星は、パルサーから一定のリズムで放射される電磁波に対するズレを測ることで発見された。主系列星を主星として持つ系外惑星は 1995 年に Doppler 法を用いて初めて発見され、2012 年 10 月の段階で、664 個の惑星系で 825 個の系外惑星が発見されており、その大部分は Transit 法か Doppler 法によって検出されている。Doppler 法(視線速度法)とは、惑星の軌道運動により、主星が揺れ、主星から届く光の波長が変化して観測されることを用いて惑星を発見する手法を指す。Transit 法とは、惑星が主星の前面を通過するときに生じる食を検出することで惑星の有無を判断する手法である。Transit 法に関連する Mission としては、Kepler が有名であり、現在 2300 個程度の惑星候補が発見されている。さらに、Astrometry 法と呼ばれる主星の位置を時間の関数として測定し、主星の揺れから惑星を発見する手法なども存在し、Gaia や JASMINE などによって観測が行われる予定である。マイクロレンズ法では、相対論的重力レンズ効果によって生じる増光によって惑星の有無を判断する。現在では、15 個の惑星系で 16 個の惑星が

この手法で発見されている。具体的には、図 1 にあるように、以下の 2 つのステップで判断する。(1) 観測者、レンズ、光源の相対的な位置によって、光源の見かけの像が複数現れる場合がある。(2) 惑星が存在する場合は惑星の重力の影響で、像の数や形が変化することがある。

他の検出手法では比較的軌道半径の小さな惑星しか発見できないのに対し、マイクロレンズ法では、軌道長半径が大きい惑星でも検出できる。(図 2) また、理論上は地球よりも質量が小さい惑星も発見することが可能であり、比較的広い軌道長半径の領域に対して惑星の有無を判断できる。しかし、マイクロレンズ法では、これらの惑星が重力に束縛されているか、自由に浮遊しているかは判断できない。マイクロレンズ法の欠点としては、惑星までの距離が kpc のオーダーの場合は、距離を正確に決定することが難しい、主星のスペクトル型がわからない、惑星の質量や半径が Doppler 法や Transit 法と比べて正確に決定することができない事などが挙げられる。さらに、ある恒星に対して、マイクロレンズ効果が検出される確率は 10^{-6} 程度の確率であり、惑星の有無が判断できるような位置関係になっている場合は、 10^{-8} 程度の確率になっている。つまり、マイクロレンズ現象を 100 回観測しても、1 つしか惑星の有無を

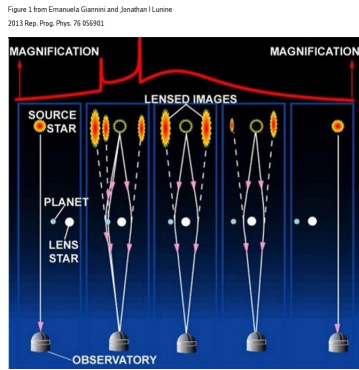


図 1: マイクロレンズ現象の概略図

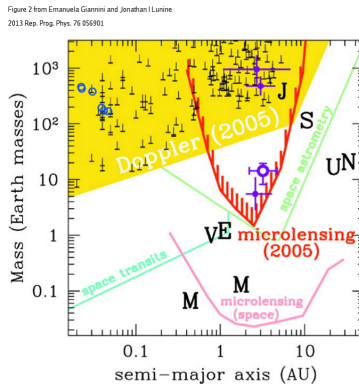


図 2: 各探査手法の観測領域

判断できないような割合になっている。最後に、マイクロレンズ法では 1 回の観測で惑星を検出できるが、追試がほぼ不可能なので、見逃さないようにしなければならない。

Outline

2 章ではマイクロレンズ法の物理的な背景について、3 章では観測に関する説明を行う。4 章では惑星形成モデルについて触れ、5 章では自由浮遊惑星に関して言及する。6 章では自分の研究との関係を明示し、7 章で結論としてまとめる。

2 Basic physics of microlensing

マイクロレンズ現象における一般的なレンズの系を図 3 に示す。

光線は位置 β にある光源; S から来るが、球対称な重力場によって、光が屈折され、 $\tilde{\alpha}$ にみかけの光源がある場合と同じようにして観測点 O に届く。このとき、みかけの光源; S_1 の位置を θ とし、 D_L と D_S をそれぞれレンズと観測点間の、レンズと光源の相対的な距離としよう。レンズの質量を M とすると、一般相対論から、 $\tilde{\alpha} = \frac{4GM}{c^2 D_L \theta}$ が成り立つ。

さらに、レンズ方程式は $\beta = \alpha - \theta$ となるので、微小角に対する近似; $\tilde{\alpha}(D_S - D_L) = \alpha D_S$ を行くと、2 式より、

$$\beta = \theta - \frac{4GM}{c^2 \theta} \frac{D_S - D_L}{D_S D_L} \quad (1)$$

が導かれる。 $\beta = 0$ の場合は光源、レンズスター、観測点が一直線上に並び、Einstein ring と呼ばれる円環が生じ、その半径は、 $\theta_E = \sqrt{\frac{4GM(D_L^{-1} - D_S^{-1})}{c^2}}$ で表される。

次に、 $u = \frac{\beta}{\theta_E}$ 、 $y = \frac{\theta}{\theta_E}$ と変数変換すると、レンズ方程式は、

$$u = y - y^{-1} \quad (2)$$

のように書くことができる。これは、 y に関する 2 次方程式と考えることができ、光源、レンズスター、観測点、が一直線上に並ばない場合は、2 つの解を持ち、

$$y_{\pm} = \pm \frac{1}{2} (\sqrt{u^2 + 4} \pm u) \quad (3)$$

となる。この 2 つの解が、みかけの光源の位置を表す。

また、像は視線方向に $\frac{dy_{\pm}}{du}$ だけ縮み、接線方向に $\frac{y_{\pm}}{u}$ だけ伸びるので、像の増光率は、

$$A_{\pm} = \left| \frac{dy_{\pm}}{du} \frac{y_{\pm}}{u} \right| = \frac{1}{2} \left(\frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}} \pm 1 \right) \quad (4)$$

となり、全体の増光率は $A_+ + A_-$ から、

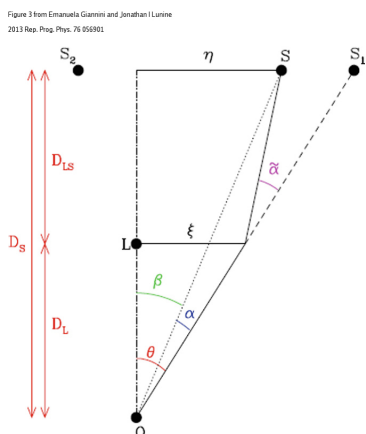


図 3: 一般的なレンズの系

$$A(u) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}} \quad (5)$$

となる。レンズと光源の距離が無限に離れた場合、増光率は 1 となる。さらに、レンズと光源の相対運動が、単純な直線運動の場合は、

$$u = \sqrt{\left(\frac{t - t_0}{t_E}\right)^2 + u_0^2} \quad (6)$$

のように書くことがわかっている。(Paczynski 1996) u_0 と t_0 は増光率が最大となる時のレンズと光源の角距離及び時刻を表す。(5)、(6) の 2 つの方程式によって、光度曲線が決まる。

このようにして決定された光度曲線を詳細に解析していくことで、恒星が惑星を持っているかを判断するというのが、マイクロレンズ法の基礎的な背景である。

3 Observation

マイクロレンズ現象をより多く観測するために、星が多く存在する銀河のバルジ方向の観測が行われている。バルジ方向の星の個数密度は $10^7 / \text{deg}^2$ であり、この方向を 1 年間観測したときに、マイクロレンズ現象を観測できる確率は 10^{-6} 程度である。1 年間で数百という数のマイクロレンズ現象を発見するためには、数十 deg^2 程度の視野が必要になる。この

ような広い範囲を 1 時間ごとに何回も詳細に観測するのは不可能なので、惑星のマイクロレンズ現象の調査は以下の 2 つのステップで行われている。(1) バルジ方向の広範囲の観測で増光、減光の小さな変化を捉える。(2) より狭い範囲の高精度の観測で光度曲線上の惑星による摂動を見る。

これまでに、マイクロレンズ法を用いることで 15 の惑星系で 16 個の系外惑星が発見されている。snowline を超えるような大きな軌道半径の惑星が発見されたため、このような領域でも惑星が存在する可能性があることがわかった。(snowline…水が大量に存在し、氷が安定に存在するような領域。) マイクロレンズ法では、発見できる惑星の数が少ないことで、統計的にサンプルが不足するといった事態は生じても、これによって惑星形成に関する重要な情報が得られないというわけではない。例えば、Sumi 氏によって、2010 年に、海王星程度の質量を持った惑星は、木星の質量をもった惑星よりも 3 倍多く存在すると発表されている。さらに、マイクロレンズ法を用いた銀河のバルジ方向の観測によって、木星程度の質量を持った惑星で、非束縛あるいは主星からの距離がかなり大きいものは、主系列星周りの惑星の 1.8% 程度に相当することがわかった等が挙げられる。これらの浮遊物体は、10AU の範囲まで、マイクロレンズ法を用いて検出できる。地上での観測で、マイクロレンズ法による観測を行う場合、大気による影響が現れるだけでなく、現象を継続して観測したり、地球クラスの惑星を発見するのが難しい。さらに地上の観測でマイクロレンズ現象を発見しても、レンズスターの検出は可能になるが、惑星系の物理量を決定することが困難である。このような理由から、宇宙での観測が有効な手段となる。今後、宇宙での観測として、ESA による Euclid、NASA による WFIRST が予定されている。

4 Planetary formation models with microlensing data

マイクロレンズ法を用いると、他の手法では発見できない大きな軌道半径を持った惑星の情報を得ることができ、観測される軌道半径—質量の分布から、

惑星形成の理論を発展させることができる。全ての系外惑星の探査手法には、得手、不得手な状況が存在し、原理的に観測できるサンプルに偏りが生じてしまう場合がある。理論によるモデルと観測を比較する場合は、この不完全性を考慮する必要がある。実際の観測では投影された 2 次元的なデータしか得られないので、2 次元的なデータから 3 次元的なデータを取り出す必要がある。この手法が 2011 年に Brown 氏によって考案されているので、これを用いて軌道長半径と質量に関するべき分布

$$\frac{dN}{dM} \propto M^{-\alpha} ; \quad \frac{dN}{da} \propto a^{-\beta} \quad (7)$$

を仮定し、惑星系に対するモデルを作る。但し、 M は惑星の質量、 a は軌道長半径である。そして、 (α, β) のパラメータを適切に変更することで、ある質量を持った惑星を検出できる確率を計算できる。

5 Free-floating planets

これまでに、どの星にも重力的に束縛されていない木星クラスの質量を持った天体の候補は数多く発見されてきたが、小さな天体に関する情報はほとんど無かった。Pena Ramirez 氏によって、2012 年に σ Orions という若い星の集団の周りに褐色矮星や木星の質量を持った自由浮遊惑星が存在することが明らかにされたが、それらの質量と比較してずっと小さな質量の星も存在することがわかってきた。これらの浮遊物体の形成過程は未だに解明されていない。現在、直接撮像によって木星クラスの質量の天体を探るのは難しいが、マイクロレンズ法を用いると、他の星の重力に束縛されていない褐色矮星と惑星を検出できる可能性がある。Stringfili 氏は各主系列星に対して、 10^5 個程度の浮遊物体が $10^{-8} \sim 10^{-2} M_{\odot}$ 程度の質量を持って存在していると主張した。さらに、WFIRST で観測される浮遊惑星のうち、木星よりも大きな質量の浮遊物体が 13%、火星よりも大きな質量をもった浮遊物体は 25% 程度であると見積もった。近い将来、Gaia による全天 Survey によって、木星よりも大きな質量の浮遊物体を発見することもできるだろう。

6 Discussion

系外惑星探査の手法はいくつか存在するが、万能な探査手法は存在せず、観測は全ての探査手法を用いて相補的に行われている。例えば、軌道法線面が視線方向に対して垂直な場合は、原理的に惑星による食を検出できないので、Transit 法以外の手法で観測する必要がある。特に、Astrometry 法では、Transit 法や視線速度法では得られない情報が得られるので、今後の発展に期待されており、国内では JASMINE という位置天文衛星の打ち上げが計画されている。今後、JASMINE で位置天文情報を獲得し、光度曲線による解析と相補的に観測を行っていくことで、惑星に関する物理量をより正確に決定することが可能になり、惑星系の理解が深まることになるだろう。

7 Conclusion

本稿では、マイクロレンズ法に関する基本的な物理を解説し、他の系外惑星の探査手法と比較した。その結果、マイクロレンズ法には固有の利点が存在し、他の手法よりも軌道半径が大きい惑星の検出と物理量の決定が可能であることが確認された。注目すべきなのは、マイクロレンズ法では、Habitable Zone の内側でも外側でも物理量に関する情報が得られることである。一度、宇宙でマイクロレンズ法を用いた観測を行うことで、惑星系に対する惑星の質量と軌道運動に関する多くの情報が得られるだろう。系外惑星探査は今後さらなる進化を遂げ、惑星形成や惑星の物理量に関する理解が深まり、我々の太陽系が宇宙で普遍的なものであるかどうか解明されることになるだろう。

Reference

Emanuela Giannini and Jonathan I Lunine. 2013. Rep. Prog. Phys. 76 056901