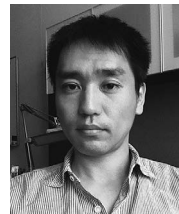


重力マイクロレンズを用いた 系外惑星の研究



住 貴 宏

〈大阪大学理学研究科宇宙地球化学専攻 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-1〉

e-mail: sumi@ess.sci.osaka-u.ac.jp

重力マイクロレンズは、暗黒物質探査用として華々しく登場した。その後下火になり、今度は系外惑星探査用として再び脚光を浴びるようになった。その歴史と今後の展望を紹介する。

1. 重力マイクロレンズとの出会い

私の二十年の研究生活は重力マイクロレンズとともに浮き沈みしてきた。これまでなんとか続けることができたのは、指導していただいた先生方のおかげである。

もともと、相対性理論や重力、ブラックホール、暗黒物質に憧れる無知な物理学生だった私は、大学四年の研究室配属では、富松彰先生の名古屋大学重力理論研究室に入ってしまった（今回知ったことだが、富松さんは林忠四郎先生の下で学んだらしい）。しかし、そこは異次元の世界で、凡人の私が到底ついていける場所ではなかった。そんな私を不憚に思った富松さんが卒業研究の題材として与えてくれたのが、1986年にBohdan Paczyński先生が、マイクロレンズ観測で銀河系ハローの暗黒物質探査を最初に提唱した論文だった¹⁾。当時から銀河系ハローに可視物質の10倍以上の暗黒物質が存在することが知られていたが、それがもし、MACHOs (Massive Compact Halo Objects) と呼ばれる褐色矮星、白色矮性、中性子星、ブラックホールのようなコンパクト天体なら、マイクロレンズで観測できるはずだ、というものである。私の興味とキーワードがドンピシャにもかかわらず、論文自体にテンソルが全く使われていない、私に最適な題材だった。これは、私が大学院

でマイクロレンズ観測を知ったことをご配慮でもあった。

2. 重力マイクロレンズ

この重力マイクロレンズという現象は、アインシュタインの一般相対性理論が予言する「光が重力によって曲がる」という性質のために起こる。普通の強い重力レンズのように銀河などがレンズだと、曲げられ変形したイメージが複数観測されるが、レンズが星のような軽いものだと、その離角（アインシュタイン半径程度）は～数百マイクロ秒角と小さくイメージを分解できない。その代わりに、スケールが小さいので時間変化を追える。ある星（ソース）の前を偶然別の星（レンズ星）が横切ると、その星の重力によって背後のソース星からの光は曲げられてレンズのように集光され、突然明るくなったように見える（図1）。レンズが普通の星の場合、20日程度の間、単調に1～数千倍明るくなり、同じ早さで元の明るさに戻っていく（図2）。

この現象は、元々1936年にアインシュタインが予言した²⁾。しかし、彼はこの現象が百万個の星を見て1個しか起きない非常に希な現象なので、実際に観測するのは無理だろうと結論づけた。（私にとってはこれがアインシュタインのbiggest blunderである。）

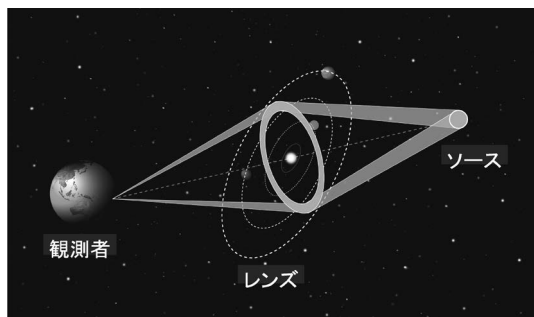


図1 マイクロレンズによる系外惑星検出の概念図。主星のレンズ効果で曲がったソースからの光を惑星がさらに曲げ複雑な増光を示す。

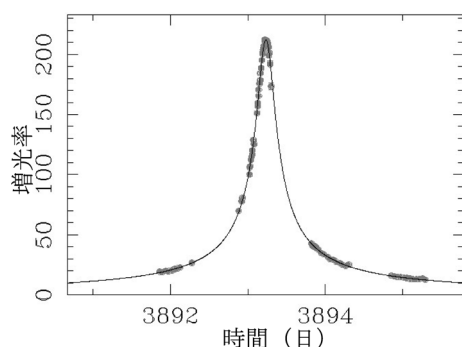


図2 マイクロレンズの光度曲線。レンズが単独の星の場合。

Paczynskiの提案は、では百万個見れば良い、という単純なものだった。しかし、これはこの当時ちょうどCCDが天文観測に使われ始めたからこそ実現が可能になった、技術革新に即した非常にタイムリーな提案だった。われわれの銀河系の伴銀河であるマゼラン雲内の星数百万個を観測すれば、ハローにあるMACHOsが観測できるはずだと。

これを受けて、1990年頃にMACHO、EROS、OGLEグループが観測を始め、1993年に初めてマイクロレンズ現象の観測が発表されると³⁾、世界中で大きな話題となった。当初、ハローダークマターの半分はMACHOsであると見積もられた。

3. 暗黒時代

大学院では、このマイクロレンズを使った暗黒物質探査をしている村木綏先生率いる名大CR研(宇宙線研究室)に入ったが、これが運命を決定した。重力理論には挫折したが、重力、暗黒物質に関連した研究がしたい、というもっともらしい動機だったが、実際はニュージーランドにただで行けるというのが動機の8割だった。これが安易な考えだったと気づくのはもう少し後のことだった。

CR研では乗鞍岳山頂の宇宙線観測所での冬季シフトも“ただ”で行けた。スキー場のリフト頂上駅からスキーを履いて数時間の過酷な雪山登山。そして2週間観測所に缶詰で装置点検作業をし、帰りはガリガリの道なき道を滑る辛いスキー。実験系研究室では体力が一番大事だと学んだ。

院生時代は、MOA (Microlensing Observation in Astrophysics) グループの一員として、ニュージーランド、Mt. John天文台でB&C 61 cm望遠鏡を借りて、1k×1kピクセルCCD 9枚を使用したMOA-cam1を搭載して観測を行った。当時は、1シフト2週間で、現在の1カ月より短い、観測室には暖房、トイレ、水道、ネットがなく、冬場は極寒の中(電気ストーブ1台のみ)での13時間の観測に加えて、8時間おきに液体窒素の継ぎ足しがあった。しかも、あせると入り口が凍ってしまい、ドライヤーで溶かしてやり直しと、ため息が出た。暴風雨のため宿舎に帰ることができないとき、トイレに窮し、やむなく扉を開けて試みた。そのとき舞い込んできたのは雨だけだったか。それに比べれば、現在のMOA-IIの観測部屋は、暖房、トイレ、洗面台、冷蔵庫がそろい1カ月のシフトでも極楽である。

しかし、マイクロレンズイベントは一向に見つからず、修論では、MACHOsの上限値をつけるのみで終わった⁴⁾。

この頃になり、ようやく周りが見え始め、自分

達の置かれている立場が理解できるようになってきた。先発のMACHO, EROS, OGLEグループが1-1.3 mクラス望遠鏡なのに対して、後発のわれわれMOAはそれより小さな61 cm. しかも、ニュージーランドのシーイングは平均2秒角と悪く、晴天率も50%程度と良くないので到底太刀打ちできるはずはなかった。自分たちは一体何をやっているんだ？ なんてニュージーランドなんかで観測をしてるんだ？ このままで未来はあるのか？ と自問する日々だった。

博士課程に入ると、先輩の柳沢俊史氏 (JAXA) が天文台の関口真木氏とともに製作した、2k×4kピクセルCCD 3枚を使ったMOA-cam2を搭載して視野1.3平方度という広視野での観測を始めた。

しかし、望遠鏡口径、サイト条件の差は歴然で、しかも、MACHO, EROSグループの結果からは、MACHOsはハロー暗黒物質の主要成分ではないことが明らかになりつつあり⁵⁾、マイクロレンズ業界自体が終わりに近づいているような有様で、MOA (=自分) の今後の行く末は真っ暗だった。

しかも、MOAはごく少人数で運営しているうえに、スタッフは皆、宇宙線研究者なため、天文の知識はほとんどなく、われわれ院生は手探りでの研究だった。CR研は山の上にあり、名大の天文系研究室とは物理的に離れており交流も少なく、孤立しており、就職どころか学位取得すら怪しかった。

そんなときに、出会ったのが、同じく銀河系暗黒物質の研究をしておられた国立天文台の本間稀樹先生だった。観測結果が出ないので、ない頭を捻って理論の論文を本間さんと書かせていただき、この論文のおかげで、もう少し研究を頑張ってみようという勇気ももてた。本間さんがいなければ、私はこのとき辞めていただろう。

その後、マゼラン雲は諦めて、今度は、多少なりともマイクロレンズイベントが検出される銀河系バルジ方向の観測データの解析を始めた。イベントレートはレンズとなる星の密度分布に比例す

るので、イベントレートを見積もれば、バルジ内の星の分布、つまりバルジの構造がわかる。MOA-cam2による広視野観測のおかげで、2000年シーズンに28個のイベントを発見し、銀河系中心は球状のバルジではなくバー構造をしていることがわかり、これを学位論文とすることができた⁶⁾。2000年、D2の夏にMOA-cam2が故障したとき、必死で、必死で直したのが功を奏した形になった。

4. 転 機

マイクロレンズというマニアックな研究をしていた私にポスドクでの行き先は国内にはなかった。そこで、留学先を村木先生に相談すると、一も二もなく、Bohdan Paczyńskiにコンタクトを取ってくださった。今思えばこれが私の運命を左右した最も大きな出来事だった。幸い仁科記念財団の海外特別研究員に採択していただき、Princeton大学行きが決まった。このとき、ニュージャージーがどこにあるかを初めて知った。

常に貧乏なMOAの学生時代は国際会議に出ることもできなかったが、延べ1年ほどにもなるニュージーランド観測を経験しているので、英語は多少の自信があった。が、実際渡米すると全く通じず愕然とした。電話や電気の開通の手続きは恐怖だった。マクドナルド (ドライブスルー) でポテトが買えなかったときは泣いた。「フライド・ポテイト～」と叫び続けた自分が哀れだった。サンドイッチの注文は今でも苦手である。

プリンストンでは、先におられた戸谷友則氏、小松英一朗氏夫妻には、公私ともにたいへんお世話になり、感謝の言葉もない。また、二人を訪ねてくる日本人天文学者の方とも知り合う機会が増えたのは大きな財産となっている。

Bohdanは、そんな私の拙い英語を辛抱強く聞いてくれて、いつも楽しそうに新しいアイデアや研究結果について議論し、物凄い速さで研究が進展した。ここでは、彼が参加するOGLEのデータを使い、マイクロレンズはもちろん、そのデータを

使ってバルジ方向の赤化減光則の測定や、バルジの星500万個の固有運動の測定など、マイクロレンズ以外のサイエンスもアイデア次第でできることを教えられた。PrincetonではSDSSやWMAPなどのプロジェクト関係者がそろい、大きな刺激を受けた。また、毎朝その日のプレプリントについて議論をするコーヒータイムがあり（常にBohdanが議論をリードしていた）、緊張しながらも毎日参加していたが、幅広い知識が得られ非常に勉強になった。隣の高等研究所で週に1度開かれる故John Bacall先生が主催するランチは、厳粛な雰囲気の中順番に自分の研究を紹介しなければならない。いつ自分の番が来るか非常に緊張したが、修行だと思いなるべく参加した。当時のポストドク仲間は今でも親交がある。

出身の名大CR研は、あくまで宇宙線研究室で、日本国内でマイクロレンズをやっているところはほかになく、国内に帰る場所はないと腹をくくり、なるべく幅の広いサイエンスをするように模索していた。渡米4年目にはスペース光干渉計計画SIMの研究员になり、Scott Tremaine先生、David Spergel先生とともに、超高精度アストロメトリーによる銀河系暗黒物質の分布測定についての研究をし⁷⁾、異分野への転職も考えていた。

しかし、その後、転機が訪れた。われわれMOAは、OGLEと共同でマイクロレンズによって初めて系外惑星を発見した。つづいて、名大で村木先生が1.8 m新望遠鏡を建設することが決まり、名大に復帰することになった。

5. 重力マイクロレンズによる系外惑星探査

1991年、Bohdanはその院生Maoとともに、マイクロレンズを使えば、系外惑星を検出できると予言した⁸⁾。普通の星がレンズの場合、単調に明るくなり、同じ早さで元に戻っていく。しかし、もしレンズ星の周りに惑星があり、主星によって作られたイメージと重なると、その重力の影響で

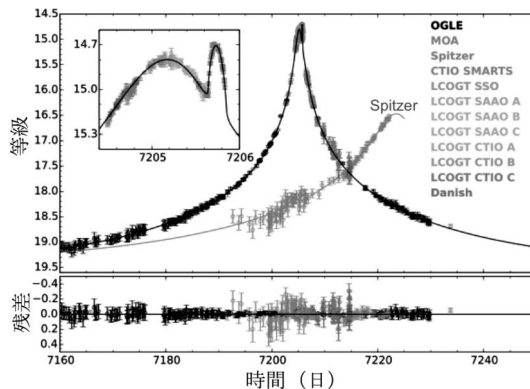


図3 海王星質量系外惑星 OGLE-2015-BLG-0966/MOA-2015-BLG-281 の光度曲線 (上段) と惑星モデル (黒実線) からの残差 (下段). box : 惑星シグナルの拡大 (左が主星, 右が惑星によるピーク). 青点/線は Spitzer 衛星による観測と理論曲線. 視差から質量, 距離が求まる⁹⁾.

単調でない増光成分が余分に加わる (図3). これにより、そこに惑星があることがわかる。

別の考え方で説明する。プールや海で、太陽からの光が水面で屈折して、底に光の網模様ができる。この光の線は、焦点がつらなものでコースティックと言う。焦点なので、この明るい線の上にいる魚や石は水面の上から見ると大きく見える。重力レンズでも同じことが起きる。重力レンズと同じように光が曲がるように作ったプラスチックレンズを図4のように中心を少しずらして2枚重ねて置き、上から一様な光をあてると、下にコースティックが現れる。つまり、レンズ面上でより広い面積に降り注ぐ光子がコースティック上に集まって明るくなる。コースティック上の光子の軌跡を遡ると、レンズ面上でより広い面積を占め、上の光源まで戻っていく。つまり、観測者が上から見ているときに、コースティック上にソース星がくると、レンズ面で大きく見え、その分全体として明るく増光して見える。したがって、図4の下にできるパターンは、もしそこにソース星があった場合に上から見たときの増光率を表すので、増光率マップと呼ばれる。

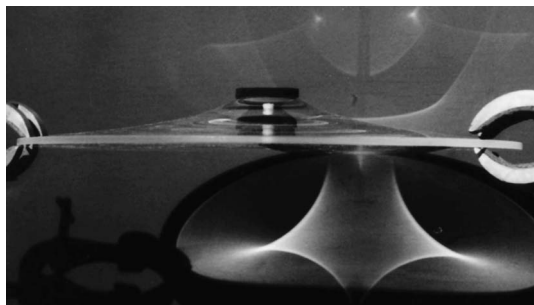


図4 重力レンズと同じように光が曲がるプラスチックレンズを2枚置き（連星レンズを模した）上から様光を当てたときに下に照らし出された光の様。焦点がつかない明るい線をコースティックという。角のどがった部分はカスプという。

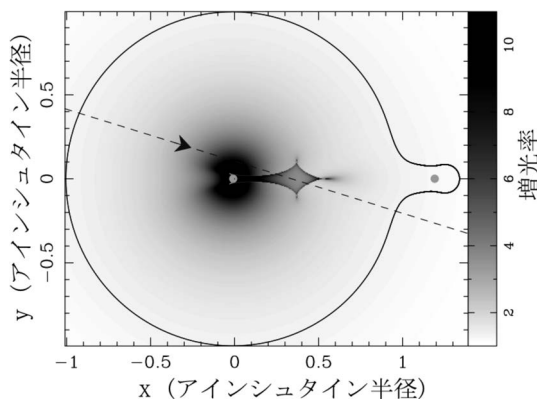


図5 質量比 $q=0.01$ 、射影距離 $s=1.2$ の惑星系レンズ（灰色円）による臨界曲線（黒実線）とコースティック（薄灰色曲線）。グレースケールは増光率マップ。ソースが破線の軌道を通ると図6のような増光曲線を描く。

図5に、伴星／主星の質量比 $q=0.01$ 、レンズ面に射影した伴星-主星間射影距離（アインシュタイン半径で規格化した値） $s=1.2$ の惑星系の増光率マップ、コースティック、臨界曲線（コースティックをレンズ面に射影した線）を示す。タイムスケール $t_E=20$ 日でソースが図5の破線を通った場合の増光曲線を図6に示す。ソースがコースティック上にくると増光率は無限大に発散し鋭いピークを示す。各 q, s ごとに異なる増効率マップ

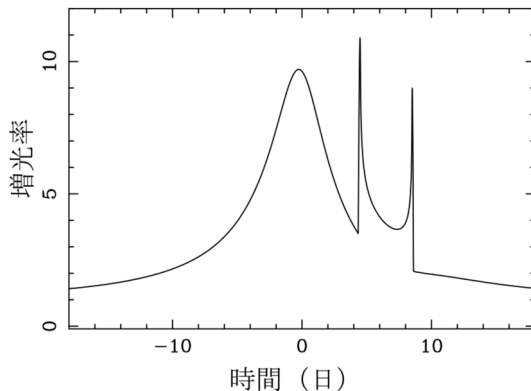


図6 質量比 $q=0.01$ 、射影距離 $s=1.2$ の惑星系による増光曲線。図5の軌跡を通った場合。

が描け、タイムスケール t_E とソースの軌道を決めるとモデル光度曲線が描け、これを観測データにフィットして最適な q, s が求まる。つまり惑星のパラメーターを導き出せる。 q が小さいほどコースティックは小さくなる。惑星がアインシュタイン半径に近い（ $s=1$ ）ほどコースティックは大きくなりソースが通過しやすくなる。アインシュタイン半径は1-6 AU程度なので、マイクロレンズではこの領域の惑星に最も感度がある。

このようにマイクロレンズは、従来の方法では困難だった比較的主星から離れた（1-6 AU）地球質量程度の系外惑星まで検出可能な現在唯一の方法である（図7）。この領域は、スノーライン [$\sim 2.7 \text{ AU } (M/M_\odot)^2$] と呼ばれる H_2O が氷に凝縮し始める境界の外側で、惑星形成が活発な領域にあたり非常に重要である。このようにほかの手法とは互いに相補的である。

また、主星からの光を利用するほかの方法では明るい星を主星とする惑星系しか検出できないのに対して、マイクロレンズは主星（レンズ星）の明るさによらないため、暗い星の周りでも惑星を検出できる。マイクロレンズはランダムに起こるので、確率としては、宇宙で最もありふれたM型矮星（赤色矮星；0.1-0.5太陽質量程度の軽くて暗い星）の周りで惑星が見つかりやすい。また、

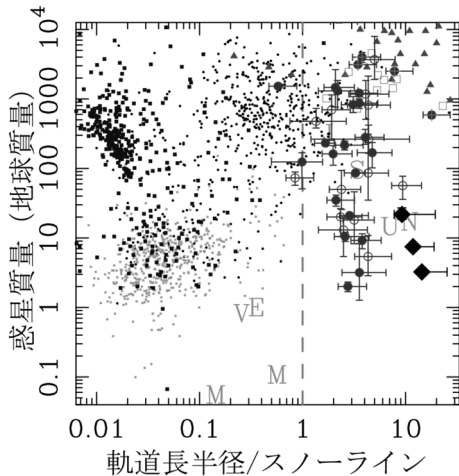


図7 発見された惑星の分布。惑星質量vsスノーラインで規格化した軌道長半径。●：ドップラー。■：トランジット。■：Kepler。○●：マイクロレンズ。▲：直接撮像。□：タイミング。アルファベット：太陽系惑星。◆：海王星に似た惑星MB13605（三つの解が縮退しているが、およそ海王星付近）。点線はスノーラインで、その外側でH₂Oが氷に凝縮し、惑星形成が活発。

遠方の星でも検出できる。実際には、銀河系バルジ内の比較的奥の星がバルジ内手前や円盤内の星に増光される。つまり、 ~ 8 kpc までの惑星系の銀河系内分布も調べられる。

マイクロレンズの欠点は、一度しか観測できないことである。したがって、加速器実験のように、多くのイベントを検出して統計的に惑星分布を議論する必要がある。

6. MOA

マイクロレンズは、百万個の星を見て1カ月に1回起こる程度の非常に稀な現象である。さらに、惑星が発見される確率はこの中の1%程度と小さいので、数千万個の星を長期間観測しなければならぬ。しかも、惑星シグナルのタイムスケールは数時間～数日と非常に短いので、高頻度観測が必要である。このため世界中の各グループが国際共同観測をしている。まず広視野をもつサーベイグループ（われわれMOAとOGLE）が

星の最も密集した銀河系中心付近の数千万個の星をモニターして、主星による増光を検出し警報を出す。次に追観測グループ（ μ FUN, PLANET, LCOGTなど）が警報を受けて世界各地で高頻度追観測をする。増光率が数千倍になる場合もあるので、アマチュア天文家の30 cmほどの望遠鏡も活躍している。

われわれMOAグループは、日本、ニュージーランド、米国の共同研究グループで、1995年からニュージーランド南島のMt. John天文台（南緯44°、標高1,029 m）で61 cm望遠鏡に1k×1kピクセルCCD 9枚を使用したカメラMOA-cam1を装備し、日本のグループとして初めてマイクロレンズ観測を始めた。1999年には、2k×4kピクセルCCD 3枚のMOA-cam2にアップグレードし、1.3平方度と言う広視野により世界で初めて一日数回と言う高頻度サーベイを始めた（MOA-I）。これにより、惑星シグナルが数日の木星質量程度の惑星も検出可能になった。

2005年には同天文台に1.8 m広視野望遠鏡（MOA-II、図8）を建設した。2k×4kピクセルCCDを10枚使用したMOA-cam3（図9）を装備して、2.2平方度（満月の約10倍）と言う広視野を実現し、マイクロレンズ探査用としては（当時）最強の装置となった。これにより、バルジ方向の約50平方度内の星約2千万個を、世界で初めて15-90分に1回という高頻度でサーベイ観測ができるようになった。このため、われわれが直接惑星シグナルを検出できるようになり、惑星検出効率率は飛躍的に向上した。ニュージーランドの唯一の利点は、シーイングが悪いせいで、ピクセルスケールを大きくとれ、視野を大きくできたことである。測光精度不足に目をつぶり、観測頻度に特化することで独自性を出した。星密集領域なので、Difference Image Analysis (DIA) によりリアルタイムで画像の引き算をし、観測後5分以内に新イベント探査と惑星シグナル探査を行う。現在、OGLEと共に世界中にマイクロレンズ警報を発信



図8 MOA-II 1.8 m望遠鏡.

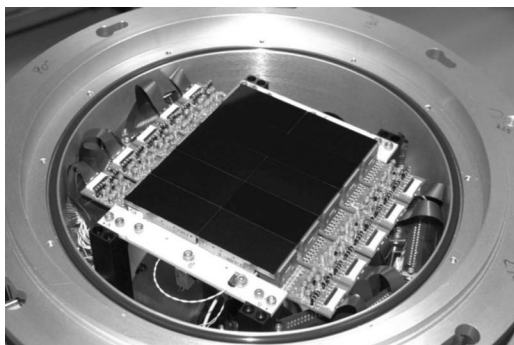


図9 主焦点カメラMOA-cam3. 2k×4k CCDを10枚使用. 0.58秒角/pixel.

して、このネットワークの中心的立場にある。同時に既存61 cm望遠鏡は追観測専用として運用している。

2003年、MOAはOGLEと共同で、世界で初めてマイクロレンズを使って木星質量の系外惑星を発見し¹⁰⁾、その後のほとんどの惑星発見に貢献している。2006年には、太陽/木星/土星を半分にした配置の惑星系を発見した¹¹⁾。これは太陽系以外で複数の巨大ガス惑星がスノーラインの外に存在し、現在の標準惑星形成モデルを支持する初めての例である。2007年には、主星が0.09太陽質量と最軽量の惑星系を発見し¹²⁾、このような軽い

星での惑星形成を世界で初めて観測的に実証した。

2008年までに発見された惑星10個から、M-K型矮星のスノーラインの外側での惑星/主星質量比関数を初めて求め、海王星質量惑星が木星質量惑星の3倍以上多いことを発見した¹³⁾。これは、K-M型矮星のこの領域で海王星質量のコアが多数形成されるが、それらにガスが降着して巨大ガス惑星に成長する前にガスが散逸してしまっている事を示し、惑星形成モデル研究に重要な情報となる。また、この領域の惑星存在量は、ドップラー法で求められた小軌道半径(～1 AU)での存在量の7倍と非常に多いことがわかった¹⁴⁾。これは、スノーライン外側では惑星形成が活発で、しかも、多くの惑星は移動せず、生まれた場所にとどまっていることを示唆する。これら質量比関数と存在量から、惑星は恒星の数と同程度存在することがわかった¹⁵⁾。

MOAの運営は大学院生(福井(NAOJ)、鈴木(JAXA)、越本、平尾、永金(阪大)、故朝倉君(名大)たち)の頑張りなしではありえなかった。今までに彼らは超地球^{16)、17)}や、それまで発見数の少なかった海王星と土星の中間程度の質量をもつ惑星^{18)、19)}、M型矮星周りの巨大ガス惑星²⁰⁾⁻²⁵⁾多数を発見した。理論的には、軽いM型矮星周りでは巨大ガス惑星は形成されにくいと考えられていたが、このような惑星が多く存在することを示し、形成モデル改良の必要性を提起した。

また、互いに15 AU離れた連星系の片方の星の周りに2倍地球質量の惑星を発見した²⁶⁾。これは、連星系での惑星形成過程の解明に重要な発見である。さらにこれまでで最も質量比の小さい(3倍地球質量)惑星も発見した²⁷⁾。

また、鈴木大介氏(JAXA)は、博士論文でMOA-IIで6年間に見つかった惑星23個とそれ以前に見つかった7個を合わせた合計30個を用いて、スノーライン外側での惑星の質量比関数を求めるという、MOAの総決算の仕事をし、海王星質量がピークのBroken power lawで表されるこ

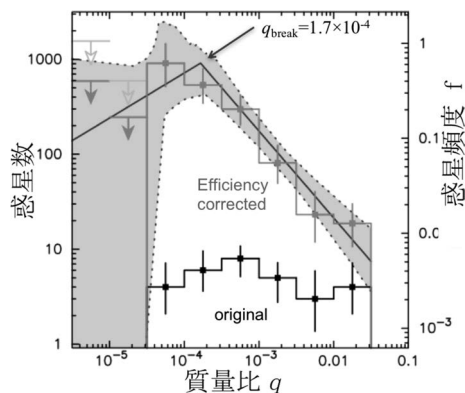


図10 惑星/主星質量比 q の分布。MOAが6年間に観測した23個の惑星。黒：観測。灰色：検出効率で補正した分布。実線：ベストフィット。点線および灰色影：誤差範囲。海王星質量程度にピークがある²⁸⁾。

とを発見した²⁸⁾ (図10)。

ほかの手法と違い、マイクロレンズは主星の光を必要としないので、主星に付随しない浮遊惑星を唯一検出できる。イベントの増光期間は、レンズ天体の質量の平方根に比例し、普通の星で約20日、木星質量天体で約1日である。われわれはMOA-IIの2年間の高頻度観測で、主星による長い増光を伴わない、増光期間が2日以下と非常に短いイベントを10例発見し、星間空間で浮遊惑星が存在する可能性を初めて示した²⁹⁾。これはまだ統計量が少なく、存在量、質量分布の不定性は大きかった。その後の観測の進展で、木星のような大きなものは恒星の数の1/4以下程度で、超地球程度の浮遊惑星が多数存在しそうなことが示唆されている。これらは、主星周りで形成後、重力相互作用ではじき飛ばされたと推測されるが、詳しく理解するには、後述のWFIRST衛星で質量関数を詳しく調べる必要がある。

軽くて冷たい海王星に似た惑星の検出は、今までいかなる方法でも困難だった(図7)が、これを初めて発見した³⁰⁾。図11のように、惑星シグナルが主星による増光から40日も離れているので、軌道長半径が非常に大きい冷たい惑星とわか

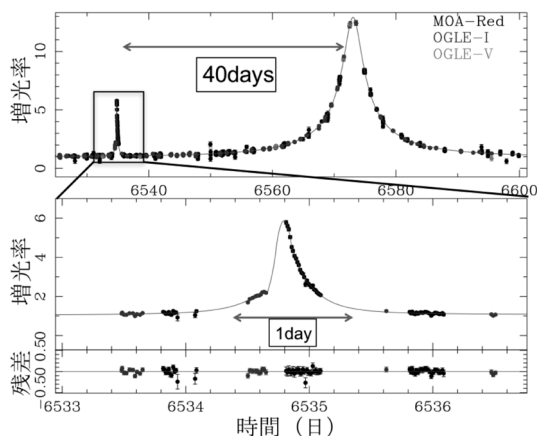


図11 海王星に似た惑星の光度曲線。上段：全体。中段：惑星シグナルの拡大。実線はベストフィット。下段：モデルからの残差。タイムスケールは1.2日で、レンズの重さは1木星質量程度³⁰⁾。

る。実は、太陽系の海王星の形成過程はよくわかっていない。主星からそれほど離れた場所に海王星程度の惑星を作るには時間が足りない。そこで、木星軌道付近で形成されたが、木星、土星より成長が遅れたために巨大化できず、その後、木星らの影響で現在の位置まで移動したとする説等があるが、まだよくわかっていない。このようなイベントは、マイクロレンズでも非常に検出効率がい小さいので、まだ1個の発見だが、実は非常に多く存在している可能性がある。今回の発見は海王星形成の謎に迫る鍵と期待され、今後統計を増やしていく。

これらはMOA-IIの非常にユニークな広視野、高頻度、長期間観測により初めて可能になったが、これを参考にして、OLGEはCCD 32枚のカメラにアップグレードし、韓国グループが口径1.6 m、視野4平方度の望遠鏡をチリ、南アフリカ、豪州に3台建設し(KMTNet)、競争は激化している。

7. PRIME

従来の可視光観測では、銀河系中心により近い低銀緯 ($|b| < 2^\circ$) は星間減光のために観測できない。そこで、これら競合グループと一線を画す次

のステップとして、南アフリカ共和国、南アフリカ天文台 (SAAO) に 1.8 m 望遠鏡を建設し、世界最大級の近赤外カメラを製作して、近赤外では世界最大視野 (1.5 deg^2) を実現し、初の近赤外線 (H-band) によるマイクロレンズ系外惑星探査を行う (PRIME: PRime-focus Infrared Microlensing Experiment). 近赤外線では、従来の可視光に比べて以下のような利点がある.

- ・星間減光が強い銀河系中心近くを観測可能. 星の数密度が高く、惑星発見数が約4倍に増える. 地球質量以下の惑星検出数も増え、より正確に惑星分布を求めることができる.
- ・銀河系中心付近の星の数密度が高い領域での惑星頻度を世界で初めて見積もり、従来の可視光観測の領域と比較することで、環境による惑星頻度の違いを検証できる.
- ・銀河系中心部は、速度分散が大きく、イベントのタイムスケールが短い. よって、銀河円盤内のレンズとバルジ内のレンズを区別しやすく、距離、質量を同定しやすい.

これらにより惑星形成、進化の過程を解明する.

このように、近赤外によるマイクロレンズ探査は大きなメリットがあることはわかっていたが、近赤外線検出器が高価なため広視野化を実現するのは難しかった. そんな折に、私は、NASAのWFIRST衛星のScience Definition Team (SDT) に日本を代表して参加し、最終レポート作成に貢献した³¹⁾. NASAのWFIRSTチームは、Teledyne社製、次世代の $4 \text{ k} \times 4 \text{ k}$ ピクセルHgCdTe赤外線アレイH4RG-10の実用化に向けた実験室での各種試験を順調に終えていた. SDTで活動する中で、故Neil Gehrels氏 (NASA/GSFC, WFIRST Project Scientist, 残念ながら昨年亡くなられた) と、WFIRSTチームが所有する4枚のH4RG-10をわれわれが無償で借用して、マイクロレンズ観測に使うことで合意した. これにより、本研究の実現が可能になった. 本計画では、NASAが中心となり、このH4RG-10を4枚使用した世界最大

級のカメラ (約5億円相当) をゴダードで製作しPRIME望遠鏡に搭載する.

NASA側の目的は三つある. (i) 実際の観測に使用して、H4RG-10の長期経年変化を調べる. (ii) 現在WFIRSTの観測領域は、MOAが可視光で求めたイベント数分布³²⁾を外挿して決めている (図12) が、場所による不定性が大きい. 本計画の近赤外観測で低銀緯の分布図を完成し、打ち上げ前に観測領域を最適化する. (iii) 将来WFIRSTと同じ領域を同時に観測すると、スペースと地上からの視差でそれぞれ異なる光度曲線が観測される. この視差から、WFIRSTだけでは困難な惑星系の質量、距離を決定でき、WFIRSTの成果を質的に向上させる. この手法は最近Spitzer衛星と地上可視光観測で実証され (図3)、Kepler衛星での観測も行われているが、WFIRSTと連携できるのはわれわれPRIMEだけである. これにより惑星系の銀河系内分布をより正確に測定する. このようにわれわれの系外惑星研究のサイエンスゴールを達成すると同時に、日本がWFIRSTに大きく貢献できるという、非常に大きなレバレッジ効果がある.

バルジが観測できない11-3月は、近赤外で明るいM型矮星の周りで生命居住可能 (ハビタブル) な惑星探査を行う. M型矮星は放射が小さいため、液体の水が存在するハビタブルゾーンが主星近傍にあり周期が短いので、視線速度法やトラ

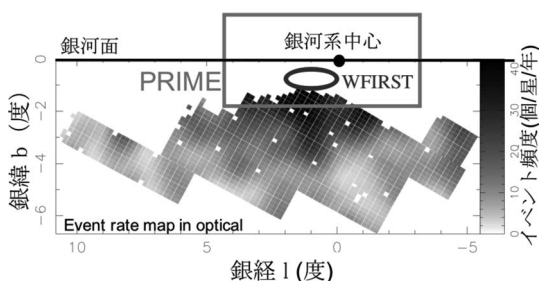


図12 イベント数の銀経銀緯分布. ピークは $l=0^\circ$ ではなく $l=1^\circ$. 四角、楕円はそれぞれPRIME, WFIRSTの観測予定領域.

ンジットで観測しやすく、質量、密度の精密測定や、惑星大気の観測、将来生命の痕跡を探す標的として非常に重要である。現在、以下の三つの観測計画がある。(a) 近赤外広視野を生かした独自のトランジット探査で新たな惑星を発見する。M型矮星は半径が小さいので、地球半径惑星でも約0.2%以上減光する。(b) NASAのトランジット探査衛星 TESSが発見する近傍の明るい惑星候補のうち、M型矮星を追観測する。(c) アストロバイオロジーセンターと共同で近赤外高分散分光器をPRIME望遠鏡に搭載し、近傍のM型矮星周りの惑星を視線速度法で探査する。

また、さまざまな突発天体のToO観測も行う。(d) 高赤方偏移ガンマ線バーストの残光観測は、近赤外では可視光に比べ倍の検出効率があり、しかも広視野が必要で、PRIMEは最適である。ガンマ線望遠鏡HESS, MAGIC, CTAと連携する。(e) また、LIGO, KAGRA等が検出する重力波源の対応天体の探査も行う。MOA-IIをはじめ、現在行われている対応天体探査は皆可視光だが、重力波源周りで吸収を受ける場合も示唆されており、われわれの近赤外観測はユニークである。PRIMEは、今年度から望遠鏡建設に入り、2019年度から稼働予定である。

8. WFIRST

2010年、米国天文宇宙物理の次期10年の計画を推薦する「Astro2010 Decadal Survey」で、大型衛星計画の1位に広視野赤外線サーベイ衛星WFIRST (Wide Field Infra Red Survey Telescope) が選ばれた。HST, JWSTに継ぐNASAの次期旗艦ミッションで、主目的に、暗黒エネルギーとマイクロレンズ系外惑星探査が同じ重要度で併記された。打ち上げ予定の2025年頃までは、PRIMEが地上観測で世界をリードし、WFIRSTにバトンをつなぐ。

WFIRSTはもともと、1.5 mクラスの宇宙望遠鏡だった。しかし、その後NASAが、米国国家偵

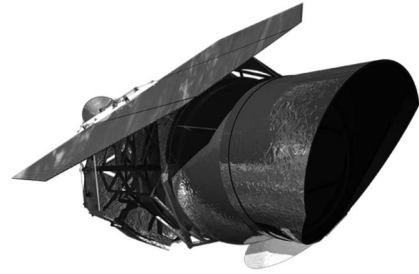


図13 WFIRSTの想像図³⁴⁾。口径2.4 m。

察局 (NRO) から、打ち上げを取り止めた2.4 m望遠鏡を譲り受けた。上空にはこのクラスの望遠鏡が十数機あり、下を向いているらしい。この2.4 m望遠鏡をWFIRSTに使用することでハッブル望遠鏡と同じサイズの強力な近赤外広視野望遠鏡計画となった³³⁾ (図13)。その後、系外惑星直接撮像用コロナグラフの搭載が決まり、 10^{-9} のコントラストを達成する。軌道はL2で運用期間6年間である。

主要検出器の広視野カメラは、上述のH4RG-10を18枚使用した波長0.7–2.0 μm 、視野0.28平方度 (図14) とかつてない広視野近赤外望遠鏡である。

マイクロレンズ観測は、銀河系バルジ方向の約2平方度の星1億個を15分ごとに24時間隙間なく72日間精密な連続測光をする。これを6シーズン行う。地上観測に比べて、測光精度の向上以外に、昼夜なく24時間連続観測することで数時間から数日の短い惑星シグナルをギャップなく精度良く観測することが可能である (図15)。図16に示すように、従来の地上観測より2桁感度が高く、軌道長半径が0.3–30 AUの広範囲で地球質量惑星に感度があり、1–2 AUでは水星質量まで感度がある。太陽系惑星で例えると水星以外のすべての惑星が検出でき、ハビタブルゾーン外縁部にも感度がある。全体で約3,000個の系外惑星を検出し、うち約300個は地球質量以下と期待される。また、地球質量以下の浮遊惑星も検出可能である。

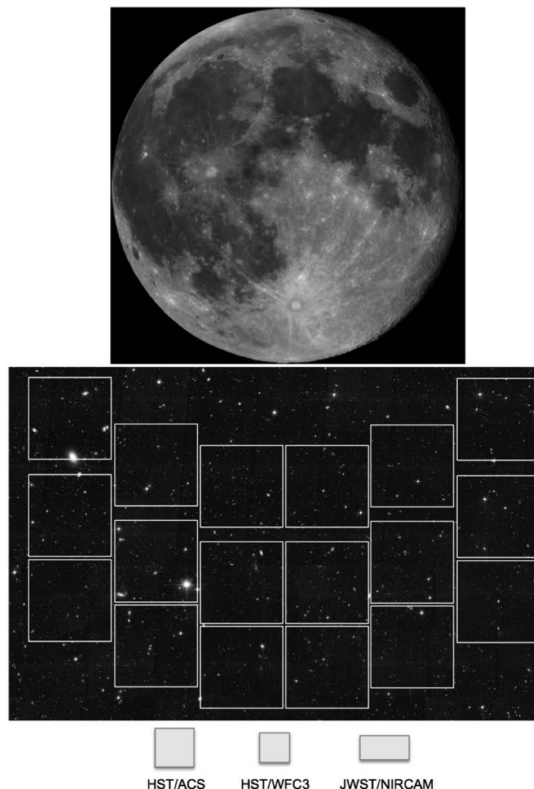


図14 WFIRST広視野撮像カメラの視野と月および、HST, JWSTの視野との比較³³⁾。

Kepler衛星が地球軌道より内側の惑星に感度があつたのに対し、WFIRSTはその外側をカバーし、互いに相補的である。これらを合わせることで、ほぼすべての種類の惑星の頻度を測ることが可能になり、惑星形成過程研究に非常に重要な情報を与える。また、WFIRSTは、アステロイド、彗星、TNO探査など惑星科学にも威力を発揮する。

現在、宇宙科学研究所にWFIRSTワーキンググループを設置して、マイクロレンズに限らず、コロナグラフによる系外惑星直接撮像、宇宙論、銀河形成などすべての日本のコミュニティがWFIRSTに参加するための活動を行っている。この世紀の大プロジェクトに皆さんも是非参加しましょう。

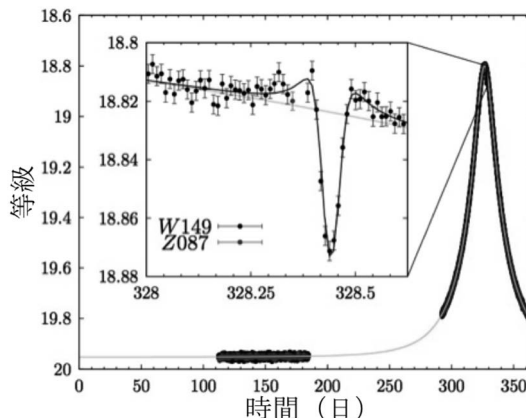


図15 WFIRSTによる水星質量 ($0.057 M_{\odot}$) 惑星イベントの光度曲線のシミュレーション。軌道長半径は2.19 AU, 主星は $0.36 M_{\odot}$ ³³⁾。

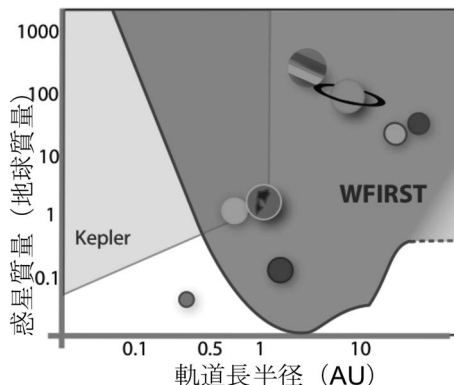


図16 WFIRSTマイクロレンズ系外惑星探査の感度。横軸：軌道長半径 (AU), 縦軸：惑星質量 (地球質量)。イラストは太陽系惑星³³⁾。

謝 辞

今回の賞は、MOAグループがいただいたものだと思います。これまで、多くの方にお世話になりました。すべての方の名前を挙げることはできませんが、特に以下の方々に感謝させてください。MOAグループ：村木先生、伊藤先生、阿部先生 (名大)、大学院生の皆さん。本間先生 (天文台)：院生時代唯一の天文学の共同研究者。仁科記念財団、日本学術振興会：プリンストン大学に海外特別研究員として派遣していただきありがとうございました。故 Paczyński先生：第2の

父。戸谷先生（東大）、小松先生（MPIA）：プリンストンでの生活を支えていただきありがとうございました。芝井先生（阪大）、須藤先生、田村先生、高田先生（東大）、山田先生（JAXA）：日頃のご指導ありがとうございました。百瀬先生、深川先生、小松先生：毎シーズンご声援ありがとうございました。

参考文献

- 1) Paczyński B., 1986, ApJ 304, 1
- 2) Einstein A., 1936, Science 84, 506
- 3) Alcock C., et al., 1993, Nature 365, 621
- 4) Muraki Y., Sumi T., 1999, PTPS 133, 233
- 5) Alcock C., et al., 2000, ApJ 542, 281
- 6) Sumi T., et al., 2003, ApJ 591, 204
- 7) Sumi T., et al., 2009, ApJ 699, 215
- 8) Mao S., Paczyński B., 1991, ApJ L374, 37
- 9) Street R., et al., 2016, ApJ 819, 93
- 10) Bond I. A., et al., 2004, ApJ 606, L155
- 11) Gaudi B. S., et al., 2008, Science 319, 927
- 12) Bennett D. P., et al., 2008, ApJ 684, 663
- 13) Sumi T., et al., 2010, ApJ 710, 1641
- 14) Gould A., et al., 2010, ApJ 720, 1073
- 15) Cassan A., et al., 2012, Nature 481, 167
- 16) Miyake N., et al., 2011, ApJ 728, 120
- 17) Koshimoto N., et al., 2017a, AJ 153, 1
- 18) Furusawa K., et al., 2013, ApJ 779, 91
- 19) Nagakane M., et al., 2017, AJ 154, 35
- 20) Koshimoto N., et al., 2014, ApJ 788, 128
- 21) Koshimoto N., et al., 2017b, AJ 154, 3
- 22) Suzuki D., et al., 2014, ApJ 780, 123
- 23) Fukui A., et al., 2015, ApJ 809, 74
- 24) Hirao Y., et al., 2016, ApJ 824, 139
- 25) Hirao Y., et al., 2017, AJ 154, 1
- 26) Gould A., et al., 2014, Science 345, 46
- 27) Bond I. A., et al., 2017, MNRAS 469, 2434
- 28) Suzuki D., et al., 2016, ApJ 833, 145
- 29) Sumi T., et al., 2011, Nature 473, 349
- 30) Sumi T., et al., 2016, ApJ 825, 112
- 31) Green J., et al., 2012, arXiv:1208.4012
- 32) Sumi T., Penny M. T., 2016, ApJ 827, 139
- 33) Spergel D., et al., 2013, arXiv:1305.5422
- 34) <http://wfirst.gsfc.nasa.gov>

Exoplanet Search by Using the Gravitational Microlensing

Takahiro Sumi

Osaka University, 1-1 Machikaneyama-cho, Toyonaka 560-0043, Osaka

Abstract: The gravitational Microlensing appeared with a bang as a tool to probe the dark matter. Then it declined. However, it regained the attention as a tool to probe the exoplanets. I review the history and future prospect of the microlensing.