重力レンズ現象で探る我々の銀河系

西　亮一（京都大学・理・物二教室）

1　Microlensing

重力レンズ現象の中で、レンズ物体が星のような低質量のコンパクトな天体の場合をMicrolensingと呼ぶ。このとき点光源から放出された光は、重力レンズ現象により複数の像を持つが、像の間隔はミリ秒程度になり通常は分解できない。そのかわり、すべての像を合わせた光度の変化が観測される。

レンズ物体、背景の光源星ともに点状とする近似では、増光率 A は次式のようになる。

$$A = \frac{u^2+2}{u(u^2+4)^{1/2}}, \quad u \equiv \frac{r_0}{R_E}, \tag{1}$$

ここで r_0 はレンズ物体の位置に射影した光源星とレンズ物体の相対距離であり、R_E はレンズ物体の位置におけるアインシュタインリングの半径で次式で定義される。

$$R_E^2 \equiv \frac{4GM D_l D_{ls}}{c^2 D_s}, \tag{2}$$

ここで M はレンズ物体の質量であり、また D_l、D_{ls}、D_s はそれぞれ観測者とレンズ物体、レンズ物体と光源星、観測者と光源星の相対距離である。A は当然ながら、光の波長にはよらない。そのため複数の色で同時に観測し光度曲線が一致することを要請すれば、重力レンズ効果をより確実に識別できる。

$u \leq 1$ （$A \geq 1.34$）の場合が観測可能だとすると、ある恒星が重力レンズ効果を受けている確率 τ は

$$\tau = \int_0^{D_s} \frac{4\pi G D_l D_{ls}}{c^2 D_s} \int M n(M, D_l) dM dD_l = \int_0^{D_s} \frac{4\pi G D_l D_{ls}}{c^2 D_s} \rho(D_l) dD_l, \tag{3}$$

となりレンズ物体の質量分布にはよらない。ここで n、ρ はそれぞれ数密度と質量密度である。

Microlensingは我々の銀河系がどうなっているかを探るための手段として非常に有用である。光源の星としてLMC （大マゼラン星雲）の星を使った場合にはハローの暗黒物質探索、光源に銀河バルジの星を使った場合には銀河系の構造の研究や系外惑星やブラックホール等の暗天体探索などに用いることができる。

2　暗黒物質探索

宇宙には大量の暗黒物質（電磁波では直接観測できない物質）が存在している。中でも渦状銀河のハローには、その回転則の観測から、直接観測される恒星やガスの総量の10倍程度も暗黒物質が存在すると考えられている。この量は膨大ではあるが銀河のダークハローがすべてバリオンであることは、現在のところでは、否定されるわけではない。ま

た、我々の銀河系においても、大質量のダークハローの存在が示唆されている。これら、銀河のダークハローを構成する暗黒物質の1候補として考えられているのが、暗い星状天体MACHOs（MAssive Compact Halo Objects）である。MACHOsの候補としては褐色矮星、古い白色矮星、中性子星、ブラックホール等があげられる。その他の暗黒物質の候補としては、WIMPs（Weakly Interacting Massive Particles）に代表される素粒子論的物質がある。

2.1 MACHOsは存在するか?

我々の銀河系のダークハローが主としてMACHOsによって構成されているかどうかは、Microlensingによって判定することができる（Paczynski 1986）。例えばLMC（Large Magellanic Cloud）内のような遠方の恒星の手前をMACHOが横切れば、MACHOがレンズの役割を果して背景の恒星が増減光するのが観測される。

我々の銀河系において円盤内での回転速度が遠方まで等速的だとして、LMC内の恒星に対してτを評価すると5×10^{-7}程度になる。このように重力レンズ効果が起きる確率は低く、10^6個以上の恒星を継続的に観測する必要がある。この観測を主として行っているのはMACHO、EROS、OGLEそして最近観測をはじめた日本–NZのMOAの4グループである。その中でもMACHOは最大のグループであり、最初から専用望遠鏡を用いて観測していたため、最も多くのデータを保有し、またMicrolensingのEventも最も多く発見している。ここでは1992年夏から観測を始めたMACHOグループの、約5.7年間の結果についてまとめる（Alcock *et al.* 2000b）。MACHOグループがLMC方向で常時観測した星の数は約10^7個である。

MicrolensingのEventを探すためには、光源の星自体の変光との区別が重要である。そのため当初のcriterionでは、重力レンズ効果が波長によらない現象であることから、異なった2波長で観測して、増光中に色が変化しないことを光度曲線が重力レンズ効果の理論曲線によくあっていることと共に要請していた（Alcock *et al.* 1996）。しかし、実際にはCCDの1視野中に色の違う複数の星が入り、その内の1個のみが重力レンズ効果を受ける場合がある。この場合は、それぞれの星のblendの割合が時間的に変化するために色が変化する。そこで、blendの影響を考慮して色変化を許し、その代り増減光と色変化が重力レンズ効果による理論曲線と充分よく一致することを要請する（Alcock *et al.* 1997）。

また、背景にある遠方銀河で起きた超新星爆発を見間違える可能性があるので、今回の解析では超新星爆発による増減光の理論曲線でもfittingを行い、その方がよりχ^2が小さい場合には超新星爆発だとしてMicrolensingのEvent候補から除くことにしている。

最終的にMicrolensingのEvent候補と認定された増光現象は13–17個である。この個数の違いは、増光率が1.49倍以上（13個）または、1.34倍以上（17個）の現象のみを選択したことによる。観測効率が異なる効果を加味すると最終的なτの推定値はどちらの場合でもほとんど同じである。この結果と、Microlensingによる増光の継続時間ごとの観測効率の推定とを組み合わせて得られたτは$1.2^{+0.4}_{-0.3}\times10^{-7}$と推定される。これは普通のハローモデルから予想される値の20数％である。また、継続時間から推定された質量は$0.6M_\odot$であり、赤色矮星や白色矮星に対応する質量である。τは最初の2.1年分のデータを解析したとき（Alcock *et al.* 1997）に比べ約半分に減少した。これは、以前の解析で

は、増光率が 1.75 倍以上のみを考えていたのに比べ、より低い増光率の Event も含めるようにしたことから観測効率が上がったはずなのに、あまり Microlensing の Event が観測されなかった結果である。しかし、もともと Event 数が少なく統計誤差が大きかったことから、統計的には問題ない結果ではある。

Microlensing の観測はハローに存在する MACHOs の質量密度分布に対する情報を与える。しかし、我々の銀河系の太陽軌道付近より外側における質量分布はほとんど分かっていない。そのためハローに対する MACHOs の比率の推定には大きな不定性が存在する (Honma & Kan-ya 1998)。またレンズ物体までの距離が分からないために、MACHOs 自体の分布に対する情報もほとんどない。そこで我々は、重力レンズ効果を用いた研究は、ハロー構造のどの部分に主として感度を持っているかを調べ、観測された $\tau \simeq 1.2\times10^{-7}$ を説明するための MACHO ハローの最小質量を求めた (Nakamura, Kan-ya & Nishi 1996)。ハローの密度分布が銀河中心に対して球対称だったとすると、

$$\tau = \frac{4\pi G}{c^2}\int_0^{D_s} x(1-\frac{D_l}{D_s})\rho(r)dD_l, \tag{4}$$

$$r^2 = R_0^2 - 2R_0\eta D_l + D_l^2, \tag{5}$$

となる。ここで、R_0 は銀河中心から太陽までの距離であり、$\eta = \cos b \cos l$ である（l, b は銀経、銀緯）。書き直すと、

$$\tau = \int f(D_l)dm, \tag{6}$$

$$f(D_l) = \frac{G}{c^2}\frac{D_l(1-\frac{D_l}{D_s})}{r^2\frac{dr}{dD_l}}, \tag{7}$$

$$dm = 4\pi r^2\rho(r)\frac{dr}{dD_l}dD_l, \tag{8}$$

となる。$f(D_l)$ は単位質量あたりどれだけ τ に寄与するかの効率であるが、光源が LMC の場合には、$D_l = D_{lc} \equiv R_0\eta = 0.153R_0$ で発散する。つまり、$r = r_c \equiv \sqrt{1-\eta^2}R_0$ の球殻上が最も効率がいいことになる。MACHO ハローが球対称でかつ密度が外側で増大することがないとすると、$r \le r_c$ で一定密度で外側が 0 になる場合が最大効率となり、最小質量は $2.8\times10^{10}\tau/(1\times10^{-7})M_\odot$ になる。ある程度自然な密度分布を考えるとこの質量は 2 倍程度大きくなる。

結局、観測された $\tau \simeq 1.2\times10^{-7}$ という値は、銀河の暗黒ハローがすべて MACHOs で構成されていると考えるには、かなり小さい。しかし、統計誤差の大きさやハローモデルの大きな不定性を考えると、暗黒ハローが MACHOs のみで構成されている可能性は否定しきれない。また、LMC や銀河円盤やハローの通常の星による τ は 4×10^{-8} 程度であり、観測値よりかなり小さくなる。すべて MACHOs で構成された LMC ハローを加えると丁度よい τ になるが、LMC ハローのみが MACHOs で構成されているという考えはかなり無理があるだろう。そこで、我々の銀河系の暗黒ハローが全体としてどうなっているかは別にして、全質量が $6 \sim 10\times10^{10}M_\odot$ 程度の MACHOs ハローが存在すると考えるのが現時点では最もすなおな解釈である。

ところで、EROS グループの観測によると、彼らのデータの中で Microlensing と考えられる Event 数は 3 ~ 4 個であり、ハローの MACHOs の割合は約 20% 以下となって

いる（Lasserre *et al.* 2000）。この結果は、MACHO グループの最初の 2.1 年分のデータ解析の結果（Alcock *et al.* 1997）とははっきり矛盾するが今回の結果とは consistent である。

2.2 MACHOs の候補

MACHOs の推定質量は $0.6M_{\odot}$ 程度である。これは赤色矮星や白色矮星の典型的な質量に対応する。しかし赤色矮星については HST によるハロー観測や、近傍の高速度星の分布等から、太陽近傍のハローに占める質量の比率は 1% 未満であることが分かっている。そのため非常に強く星団状に集中していなければ、MACHOs の候補とはなれない。

白色矮星についても HST によって Hubble Deep Field で探索されたが発見されなかった（Flynn, Gould & Bahcall 1996）。普通のハローモデルを仮定し、その 20% が白色矮星だとして適当な白色矮星の冷却モデルを使用すると、この観測で期待されるのは 1 個程度である。しかしこの評価には、最初に星が形成されたときの初期質量関数、初期質量と白色矮星になったときの質量の関係、白色矮星の冷却率と光度変化（冷却に伴う結晶化と組成分離による重力エネルギーの開放過程の詳細を含む）、ハローの年齢等、多くの未解決の問題がパラメーターとして関係しておりまだ強い制限はつけられない。最近、表面に水素大気を持つ白色矮星は冷却に伴う水素分子形成により青くなる可能性が指摘され、実際、比較的青いハローに所属する白色矮星と考えられる天体が発見されたりしている（Ibata *et al.* 1999）。しかし、survey は不十分であり、ハローにどれだけ白色矮星が存在するかは、まだよくわかっていない。

MACHOs が白色矮星であるためには、現在赤色矮星がほとんど存在しないことや、我々の銀河円盤の化学進化の制限から、初期質量関数が $1 \sim 2M_{\odot}$ あたりに強いピークを持つ特異なものでなければならないことが分かっている。また、白色矮星に進化する前に AGB や HB という巨星段階を経たと考えられるため、その大光度により銀河の個数 – 光度関係に影響したり、強い赤外線背景輻射を作ったりすることからの制限もかなり厳しい。しかし、MACHOs が白色矮星である可能性が完全に否定されているわけではない。

他の可能性として、$0.6M_{\odot}$ という質量は、宇宙の温度が数百 eV 程度のときのホライズン質量に相当することから、そのころ形成された Primordial Black Hole も候補に挙げられる。この場合には電磁波による観測的な制限はつけられていない。それに対し、連星 MACHO が合体するときの重力波を用いた検証の可能性が提案されている。

質量に対しても、これまでの解析では観測された重力レンズ現象の候補数が少ないため大きな統計的誤差が存在する可能性がある。その上、MACHOs の質量を推定するために重要なパラメーターとなる、銀河円盤の回転速度はまだよくわかっていない。実際、現在までの銀河回転の観測に矛盾しない範囲で、MACHOs の推定質量を太陽質量の 1/10 以下まで下げることも可能である（Honma & Kan-ya 1998）。この質量は水素燃焼を起こすことのできない褐色矮星に対応する。褐色矮星ハローに対する観測的制限はほとんど存在しない。はっきりした制限をつけるためには、近赤外線領域での広視野 Proper Motion Survey が行われることが重要である。

3　バルジ方向

銀河系のバルジの星を光源星として用いることで、銀河系のバルジ・ディスクの構造の研究やディスク中の暗黒天体探索が可能になる。現在までの観測で得られたバルジの星に対する τ は、LMC 方向よりかなり大きく、$3.23^{+0.39}_{-0.38} \times 10^{-6}$ である（Alcock *et al.* 2000a）。

3.1　銀河構造

バルジの星に対する τ は、伝統的な銀河モデルから予想された値に比べ 2 倍程度以上大きく、銀河モデルの変更をせまるものである。

軸対称なディスクの場合の τ の上限を考えよう（Kuijken 1997）。銀径 0、銀位 b の光源を観測する場合に、半径 R から $R + \Delta R$ にリング状に存在する星による τ への寄与は、

$$\tau_{\rm ring} = \frac{4\pi G}{c^2} \frac{(R_0 - R)R}{R_0} \rho(z) \Delta R, \tag{9}$$

となる。ここで、$z = b(R_0 - R)$ である。このリングの質量は

$$M_{\rm ring} = 2\pi R \Delta R \Sigma = \frac{c^2 \tau_{\rm ring} R_0 b}{2G} F_z, \tag{10}$$

である。ここで Σ は質量の面密度で、$F_z = \frac{\Sigma}{z\rho(z)}$ である。ディスク面から垂直方向の密度分布が階段関数状である場合に $F_z \geq 2$ となるが、実際的には $F_z \gtrsim 4$ である。ところで、銀河の回転速度を考えると、次の条件が出てくる。

$$v_{\rm circ}^2 \gtrsim \frac{GM_{\rm ring}}{R_0} = \frac{c^2 \tau_{\rm ring}}{2} F_z. \tag{11}$$

つまり、τ と $v_{\rm circ}$ が F_z のみを通じて関係付けられることになる。ここで、$v_{\rm circ} = 200$ Km/s を用いると $\tau \lesssim 2 \times 10^{-6}$ となる。このことから、軸対称な質量分布では、どんな半径分布をとろうと観測を説明できないことがわかる。現実的なディスクモデルを考えると、より厳しい結果が得られる。

ところで、近年、我々の銀河系は Bar 構造をしていることが示唆されてきた。この Bar 構造を考えると 2 倍程度 τ が大きくなる可能性があるので、なんとか説明可能であるが、まだかなり厳しい（Binney, Bissantz & Gerhard 2000）。

バルジ方向の τ を再解析する動きもある（Popowski *et al.* 2000）。バルジ方向の場合は、Microlensing の Event 数が多いので、明るい光源星（Clump Giants）のみを用いた解析を行うことができる。これにより、背景の星を同時に観測するために起きるブレンドをほとんど考える必要がなくなり、重力レンズ現象かどうかの決定精度が上がる。その結果、preliminary な解析ではあるが、$\tau = 2.0 \pm 0.4 \times 10^{-6}$ という値が得られている。この値なら、バー構造を持った自然なモデルで説明可能である。この結果が正しいとすると、LMC 方向の場合においてもブレンドがある場合の Microlensing 候補の選別方法を見直す必要があるかもしれない。

また、EROS グループでは、銀河の渦状腕方向の観測も行っている（Derue *et al.* 1999）。まだまだ Event 数が少なく、確実なことは言えないが、この観測から得られた銀径方向の τ 分布もバーの存在を示唆している。

3.2　惑星探索

近年、惑星の公転運動による主星の微少な運動を高精度なドップラーシフト観測で調べることにより、太陽系外惑星がかなり発見されてきた。しかし、この方法で発見できる惑星は、大質量（木星質量程度）の惑星が主星のかなり近傍に存在するときに強くバイアスされる。それに対して、Microlensingを用いることによって、太陽系のような惑星系の探索も可能になる。

レンズ天体に伴星や惑星が存在すると、増光曲線が主星単独の場合から変化する。高精度（増光率の誤差1%以内）、高頻度（20分に1回程度）の観測を行えば、地球程度の質量の惑星を発見することも可能である。

現在までに、惑星の発見の示唆が3回あった。それぞれ、MACHO 1997-BLG-41, OGLE 2000-BUL-12, MACHO 1998-BLG-35という重力レンズ現象に対してである。しかし、どの場合も他のグループのデータでは確認されておらず、まだ確実な発見とは言えない（Sackett 2000）。

3.3　その他

Microlensingはその他の研究にも応用されつつある。まず、レンズ天体の連星頻度やその質量比などを調べることができ、星形成や進化の研究に対して情報を与える。

また連星レンズでは、質量比が小さくて連星間距離が近い場合と、質量比が大きくて距離が遠い場合とが増光曲線が縮退する場合がある（Gould & Han 2000）。こういう場合については、次世代のAstrometry衛星で像の光の中心を調べることにより、縮退を解くことができる。

次に、降着円盤を持たないブラックホールや活動性を失った古い中性子星そして褐色矮星等の銀河円盤中に多数存在すると考えられている暗天体の探索も可能である。他の方法では、活動しているものが選択的に発見されるが、重力レンズでは重力ポテンシャルを直接用いるので、バイアスのない探索が可能になる。このことは、銀河ディスクでの星形成史や銀河進化の研究に対して重要な情報を与えるだろう。

連星レンズによってできるCausticsを光源星が横切るときには、光源星の一部分からの光だけが強く増光されることになる。そこで連続的にスペクトルをとることによって、遠方の恒星の大気構造を調べることもできる。

4　まとめ

我々の銀河系に対する理解はあまりにも乏しい。この銀河系を調査するための手段としてMicrolensingは重要である。ただ、重力レンズによって得られる情報は限られているので、平行してAstrometryその他の伝統的手法による天文観測も行う必要がある。

暗黒物質については、現段階ではMACHOsはやはり存在する可能性が高いと考えられる。存在比率については不定性が非常に大きい。しかし、CDMなどの他の暗黒物質が銀河ハローに大量に存在することを否定することはなくなったと考えられる。

個々のMACHOsの質量推定にも不定性が大きく、候補がなかなかしぼり切れない。しかし、どの候補も形成過程をはじめ未解決の問題が多く、MACHOsが何であるかは依然として大問題である。

太陽系外惑星や活動していないブラックホールや中性子星そして褐色矮星など、銀河円盤中の暗天体の探索に対して、Microlensing を用いる方法は非常に有力であり、今後が期待される。

MACHO グループがクローズした現在、日本–NZ の MOA をはじめとする現在も観測継続中の他のグループへの期待は大きい。

References

Alcock, C. *et al*. 1996, ApJ, **461**, 84 (MACHO).
Alcock, C. *et al*., 1997, ApJ, **486**, 697 (MACHO).
Alcock, C. *et al*., 2000a, ApJ, **541**, 734 (MACHO).
Alcock, C. *et al*., 2000b, ApJ, **542**, 281 (MACHO).
Binney, J., Bissantz, N. & Gerhard, O., 2000, ApJ, **537**, 99.
Derue, F. *et al*., 1999, AA, **351**, 87 (EROS).
Flynn, C., Gould, A. & Bahcall, J. N., 1996 ApJL, **466**, L55.
Gould, A. & Han, C., 2000, ApJ, **538**, 653.
Honma, M. & Kan-ya, Y., 1998, ApJL, **503**, L139.
Ibata R. A. *et al*., 1999, ApJL, **524**, L95.
Kuijken K., 1997 ApJL, **486**, L19.
Lasserre, T. *et al*., 2000, AA, **355**, L39 (EROS).
Nakamura, T., Kan-ya, Y. & Nishi, R., 1996, ApJL **473**, L99.
Paczynski, B., 1986, ApJ, **304**, 1.
Popowski, P. *et al*., 2000, astro-ph/0005466 (MACHO).
Sackett, P. D., 2000, astro-ph/0011128.