

重力レンズ効果と基準座標系の精度限界

標準計測部 細川瑞彦 今江理人
国立天文台 福島登志夫
長野高専 大西浩次

概要

クエーサーを用いた基準座標系は銀河の星々を通して観測するため、重力レンズ効果によってクエーサーの天球上の位置は揺らいでいる。この効果による位置のずれ及び基準座標系の経年劣化を検討したところ、次のような結果が得られた。銀河中心方向、銀緯がごく低いところではDisk Starによって10マイクロ秒角程度の位置のランダムなずれと1~0.1マイクロ秒角/年程度のランダムな固有運動が引き起こされていると期待されるが、銀河中心と反対方向、または銀緯が5~10度を越えるとそれらは急速に小さくなっていく。また、もし銀河ハローがMACHOと呼ばれる小天体から成っていたとすると、Disk Starのみの場合と比べて位置のずれはあまり変わらないが、ほぼ全天にわたって7マイクロ秒角/年以上の見せかけの固有運動が期待される。

1. Introduction

近年、相対VLBI、光赤外干渉計などの技術の発展によって、クエーサーを用いた基準座標系の高精度化が進められようとしている。VERA、VERA II、光干渉計衛星などの計画からすると、その位置測定精度は近い将来に10マイクロ秒角から、1マイクロ秒角にも達するものと思われる。

このような基準座標系のもととなるクエーサーは非常に遠方(Gpc)にあり、その運動による基準座標系の経年劣化は十分無視できるものと考えられてきた。1Gpcの距離にあるクエーサーを考えると、銀河団の分散速度程度(1000km/s)の横速度があると仮定をしても、その固有運動は0.2マイクロ秒角/年程度であり、実際にはより遠方の孤立したクエーサーが基準座標系構築に多く選ばれることを考えると、固有運動はこれよりさらに小さいと考えられる。

しかしそのような遠方のクエーサーは、それ自体の運動による位置変化が無視できるとしても、銀河の星々を通して観測するために、途中の星々が引き起こす重力レンズ効果によって天球上の位置は揺らいでしまわずである。さらに、これら途中にある星々は運動しているため、この位置変化も時間とともに変動し、見かけ上、クエーサーが固有運動をしているように見えてしまうだろう。我々はこの効果によって、クエーサーの位置がどのくらい揺らぎ、さらにこのための見せかけの固有運動がどれくらい生じるかについて検討を行った。これらの量を評価するものとして、その期待値と確率を別個に計算した。

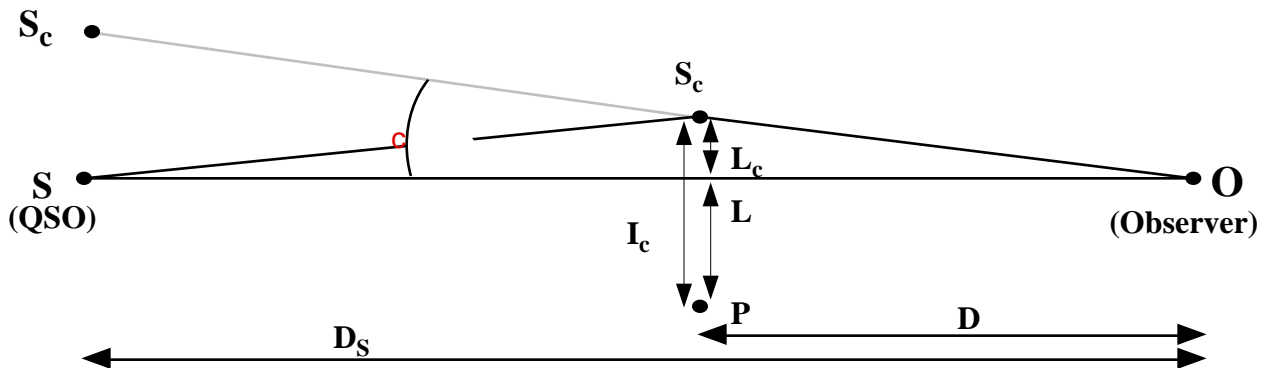
この検討の結果については初期段階を昨年9月の標準部談話会などで、また、もう少し練った形のを今年2月の標準部談話会の発表の一部として報告してきた。今年3月には一応のまとめを行ってAstronomical Journal誌に投稿、Refereeから、「興味深い」という意見とともにいくつかの改善すべきコメントをいただき、結果の大幅な変更はなかったが、定式化や不明瞭な点に関するかなりの改稿を行って6月17日(日本時間)に電子投稿、6月19日には電子メールにより受理の通知を受けた。8月に著者校正を行い、Astronomical Journal誌10月発行号に掲載予定である。今回は

今回はRefereeのコメントに基づいて行った改稿部分と、現在進めつつある新たな課題を中心に、この研究全体を振り返ってみる。第二章では基礎的な計算方法と位置の揺らぎについて、第三章では位置の時間変化、すなわち固有運動の揺らぎについて検討する。最後に簡単なまとめと議論を行う。

2. 重力レンズによる偏向と偏向角、誘起固有運動の期待値

重力レンズ効果による遠方の信号源Sの光度中心Scの位置変化の様子を図1に示す。実際にはSから放射された光(電波)のうち観測者Oに届くものは図のScのさらに上方を通過する主像と、レンズ源Pのさらに下方をまわってくる副像があるが、ここではその両者の光度中心Scの位置変化を以て、信号源Sの重力レンズ効果による位置変化と定義する。この点はRefereeのコメントによる変更点のうち、定式化に

関するものとしては最も大きなものである。以前は主像の位置変化のみを考慮していた。



主像の経路のインパクトパラメータを l_1 とし、副像の経路のインパクトパラメータを l_2 とする。これらは8.1の第5章と同様であるが、ここでは重力レンズによる位置変化を二つの像の光度中心で定義する。 l_1, l_2 はインパクトパラメータに比べて D が十分大きいという近似ができるときには次の重力レンズの基本式

$$l = L + m/l \tag{1}$$

の解として得られる。ここでこれから頻出する $4GM/c^2$ を、換算質量 $m = 4GM/c^2$ と表した。G はニュートンの重力常数、c は光速、M はレンズ源 P の質量である。特に S, P, O が完全に一直線に並び、 $L = 0$ の場合には次のような重解 l_E が得られる。

$$l_E = (mD) \tag{2}$$

これはアインシュタインリングと呼ばれるものの実半径であり、増光現象が起きるかどうかの目安として用いられる。計算の詳細は省くが、主像の角度変化 α_1 は

$$\alpha_1 = m/L \tag{3}$$

という単純なものであるが、二つの像の光度中心の見かけの角度変化は次のようになる。

$$\alpha_c = L_c/D = Lm/(L^2 + 2mD) \tag{4}$$

これは $L > l_E$ の領域では急速に α_1 に近づいていくため、増光ではなく偏向角を問題にする領域では実際上差はなくなる。しかしながら期待値の計算においては求める量の自乗に確率をかけて全空間で積分するという作業が必要になる。この際、(3)では L が0に近いところでの無限大の発散の問題が生じる。偏向角自身はうまく収束させることができるが、偏向角の時間変化、つまり誘起される固有運動の計算においては結果は無限大に発散してしまう。これは信号源、レンズ源ともに点状であるなどの理想化した近似を行っているためであり、現実を反映するものではないが、意味のある答えが得られないのは困る。我々は最初、インパクトパラメータがアインシュタインリング以内にあり、増光現象が顕著である範囲は、偏向角の近似が不適当となるし、偏向角によらなくとも増光現象から除外可能であるとして積分範囲から除いた計算を行った。しかし(4)を用いると中心部分の不自然な発散を丸め込むことができ、全空間にわたっての積分が可能になる。再計算の末得られた結果では誘起固有運動の期待値は約4割大きくなった。理論計算としては不自然さを無くすことができた。しかしこの増加分は主としてインパクトパラメータがアインシュタインリング以内にある場合からの寄与であり、基準座標系構築の際のクエーサーの位置精度の評価には役立つが、偏向現象

の起こる確率にはなんら寄与しないものである。

計算の際に用いた銀河内の星とMACHOの分布のモデルは以前と同様、以下のものである。

Disk Star : Exponential Disk model、個々の質量は全て太陽質量(Msun) に等しい。

$\rho_0 = 46 M_{\text{sun}}/\text{pc}^2$: Disk Star のコラム密度

$R_0 = 8.5 \text{ kpc}$: 銀河中心からの距離

$z_h = 300 \text{ pc}$: Disk の厚み

$v_0 = 220 \text{ km/s}$: flat rotation curve

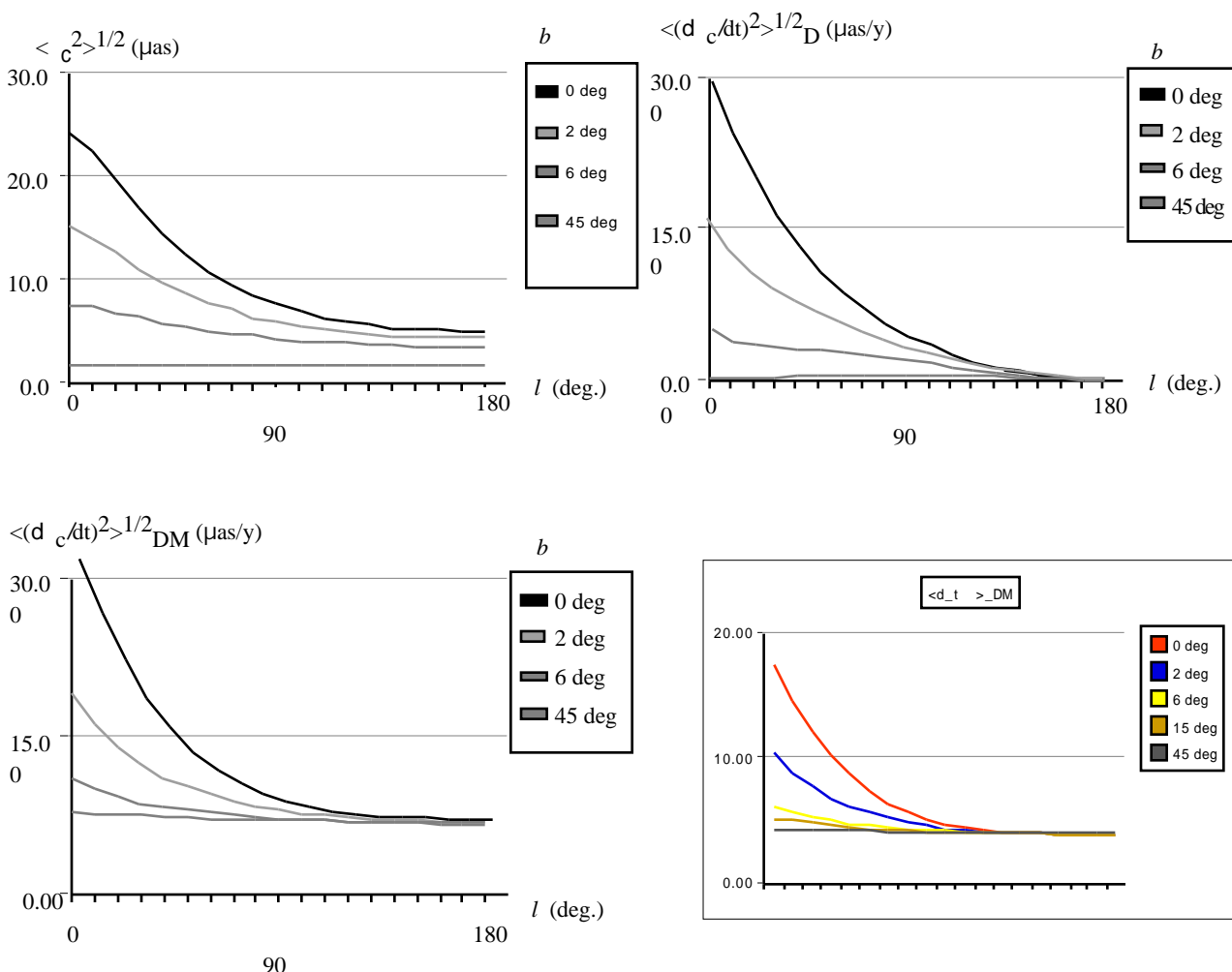
MACHO : Isothermal model、個々の質量は全て $0.1 M_{\text{sun}}$ に等しい。

a : MACHO のコア半径、ここではまず、 2000 pc

ρ_0 : 局所ダークマターの密度、 $8 \times 10^{-3} M_{\text{sun}}/\text{pc}^3$

$v = 180 \text{ km/s}$: 視線に対してランダム

偏向角及び誘起固有運動について得られた結果を以下に示す。

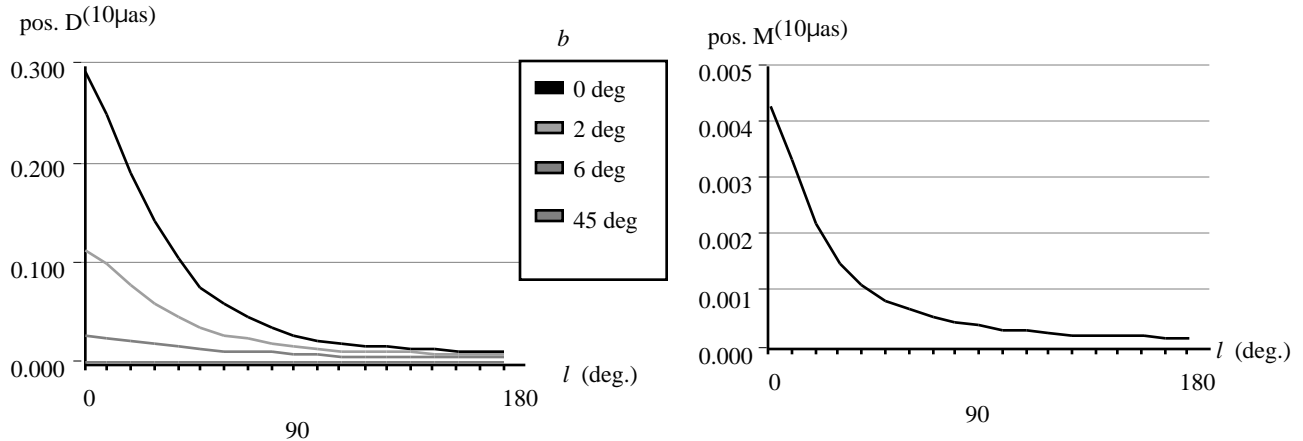


3. 確率の問題

期待値というのは予想される値を評価するために有用な値ではあるが、確率や値の分布が偏っている際にはどの程度の大きさの現象がどの程度の確率で起こるのか、ということとはかけ離れた値が得られることもある。今の場合、インパクトパラメータのごく小さい、めったに起きないような場合において偏向角、誘起固有運動の値がひじょうにおおきくなるので、期待値は現象の起きる確率を推定するにはあまり役立たない。しかし観測上、重要となるのは得られた精度でどれくらいの確率でその現象が見つけれられるのか、とい

うことである。そこで我々はある値以上の偏向角、誘起固有運動の起きる確率（正確には光学深さ）の計算も行った。偏向角については $10\mu\text{as}$ 、誘起固有運動については $1\mu\text{as/y}$ 以上の大きさの現象が個々のクエーサーに対して観測される確率として次の結果が得られた。

4. 確率のスケールング則、偏向角と誘起固有運動の関係



この部分は以前から関係を求め、議論は行ってきたが今一つ明確化しきっていません、Referee からも不明確である、との指摘を受けた。きちんと整理すると次のようになる。

まず、現象の起きる確率は、検出限界の量を k 倍にすると次のように変化する。

$$pos_{,i}(k c) = pos_{,i}(c) / k^2,$$

$$mot_{,i}(k d_c / dt) = mot_{,i}(d_c / dt) / k$$

この関係により、先に求めたそれぞれの $10\mu\text{as}$ 、 $1\mu\text{as/y}$ （以上）についての光学深さ（確率）の結果から、任意の検出精度における光学深さが求められることになる。

次に偏向角 c と誘起固有運動 d_c / dt の関係であるが、この二つには、 $d_c / dt = v^2 c^2 / m$ という関係があるためにレンズ源の速度及び質量さえ与えられれば 1 対 1 対応がつけられるため、上の光学深さのグラフの内どちらかが与えられれば他方はこの関係から求められることになる。逆に両者を観測し、この関係との食い違いを見つけることで、モデルに採用された質量、速度と実際のそれらとの違いが測れることになる。また、この偏向角と誘起固有運動の関係は現象のタイムスケールを求めるのにも有用である。

5. 今後の課題

これらの計算は Disk star, MACHO それぞれ、レンズ源の種類によってすべて質量が一定という仮定の下に行った。実際には Disk star も MACHO も様々な質量分布をしていると考えられる。実際、発見当初 0.1 太陽質量と見積もられていたのが、この 4 年間の統計から、平均質量の見積もりは 0.6 太陽質量へと変わってきている。また、Disk star も $10 \sim 0.1$ 太陽質量の範囲で分布していると考えられている。この質量分布の効果を考えてさらに計算を進めることと、空間的分布も特に MACHO に対しては球対称ではなく扁平率も考慮するなど、より複雑なモデルでの計算を行い近い将来の観測でどれだけのモデルの差の検出が期待されるかなどを調べておく必要がある。前者については定式化はほぼ終了しており、後は具体的な計算の実行だけとなっている。

参考文献

Hosokawa, Ohnishi and Fukushima, Astron. J., Vol. 114 (4), October, 1997