

# 小惑星(381)ミルラによるふたご座 $\gamma$ 星の掩蔽

佐藤 勲 (総合研究大学院大学/国立天文台)

相馬 充 (国立天文台)

広瀬 敏夫 (国際掩蔽観測協会)

Astronomical Journal Vol. 105 No. 4 (1993) pp. 1553~1561

## 要約

日本と中国で観測された1991年1月13日の小惑星(381)ミルラによるふたご座 $\gamma$ 星の掩蔽は、これまでに見られた小惑星による恒星の掩蔽の中で最も明るい現象であった。日本で行なわれたこの現象の時刻観測の解析から、ミルラの断面が $(147.2 \pm 2.4 \text{ km}) \times (126.6 \pm 7.9 \text{ km})$ の楕円でよく近似できることが示された。ふたご座 $\gamma$ 星の視直径の上限が $2.6 \text{ mas}$ (ミリ秒角)であることも推定された。光度約7.5等のふたご座 $\gamma$ 星の伴星が、離角 $(64 \pm 8) \text{ mas}$ 、位置角 $P = 129 \pm 59^\circ$ にあった。ミルラとふたご座 $\gamma$ 星の相対位置が約 $1 \text{ mas}$ の精度で決定された。ミルラが3軸不等の楕円体で、姿勢が等方的な確率であるという仮定の下に、ミルラの3次元形状と自転軸の方向に直接的な制限が与えられた。

## 1. はじめに

小惑星による恒星の掩蔽は、小惑星の大きさ、形、自転そして衛星の存在に関する高い質の情報を得る優れた機会を提供してくれる。1958年の最初の観測以来、多数の小惑星による恒星の掩蔽が観測されてきた(ミリス&ダナム, 1989)。これまでに観測された最も明るい現象は、1977年3月5日の(6)ヘベによるくじら座 $\gamma$ 星(3.5等)の掩蔽であったが、本論文で述べる(381)ミルラによるふたご座 $\gamma$ 星(アルヘナ, FK5番号251, 1.9等)の掩蔽は、これの新記録を樹立するものである。

1991年1月のこの現象より前には、日本ではわずか2回の小惑星による恒星の掩蔽が眼視的に観測されただけであった。その1つは、1983年1月19日の(106)ディオネによる $+25^\circ 1937$ の掩蔽(クリステンセン, 1984を参照)で、もう1つは、1987年12月8日の(324)バンベルカによる $AG+40^\circ 783$ の掩蔽(ミリス他, 1989)である。

小惑星による掩蔽の掩蔽帯は、正確に予報されないで、適当な範囲をカバーするには、広い地域にわたってできるだけ多くの観測者が協力し、よく組織されたネットワークを作ることが必要である。日本での多くの参加者の協力の結果、ここでこのあまり研究されていない小惑星の基本的な特徴を明らかにすることができる。中国では大掛かりな全国キャンペーンが行なわれ、5000人以上の人々がふたご座 $\gamma$ 星の監視に参加して、山東省で少なくとも4人がこの現象を認めたが、詳しい情報は入っていない(ダナム, 1991)。

日本では多くの好都合な条件が重なって、このミルラの現象をうまく見る事ができた。それは、隠される星が肉眼でもよく見えるほど明るかったこと、掩蔽帯が人口の密集した首都圏の真上を通ったこと、現象が日曜の夜9時に起こったこと、そして掩蔽帯に沿った広い地域で晴天に恵まれたことである。

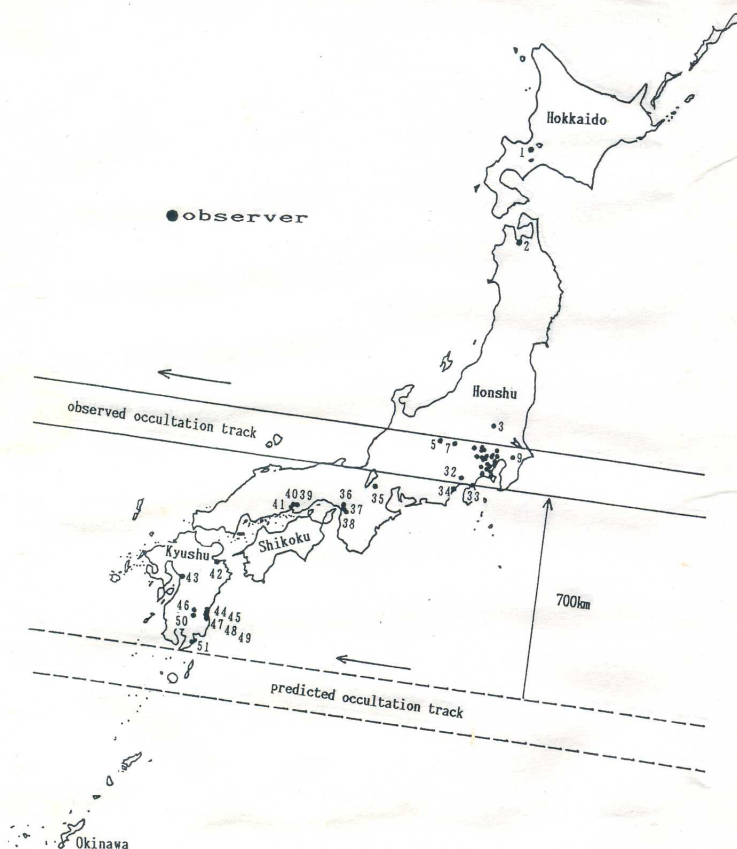
これより以前には、ミルラは測光観測や掩蔽による詳しい観測は行なわれていない(ラゲルクビフト他, 1987, 1988)。わずかにIRASの赤外観測によって、平均直径が $(124 \pm 4) \text{ km}$ と求められているだけである(テデスコ, 1989)。従って、今回の現象の注意深く、正確で詳しい観測は、ミルラの形や自転に関する情報を得る重要な機会であると期待される。実際に、第3節と4節で示すように、その断面だけでなく、立体形状や自転軸の向きにまで直接的な制限を得ることができた。

ふたご座 $\gamma$ 星は、分光連星であることが知られていた。しかし、月によっても掩蔽されないし、スペックル干渉計でも検出できないので、伴星に関する直接的な情報は得られていなかった。この現象で主星が隠されている間、伴星が直接観測され、明るさと位置が決定された(第5節)。また、この現象の光電測光記録を使って、主星の視直径の上限も求められた。

## 2. 予報と観測

小惑星による掩蔽の初期予報には、典型的には $1000 \text{ km}$ にも達する大きな誤差があるので、予報を改良するため、現象の直前に隠す小惑星と隠される小惑星の相対位置を正確に観測することが望まれる。

ミルラによるふたご座 $\gamma$ 星の掩蔽の初期予報は、ダナムと相馬によって出された(ダナム, 1990)。それによると、この現象は図1に示すように、日本の南方海上と中国で見られるはずだった。この予報を改良するため、1990年12月15日にバン・ブレック天文台で写真観測が行なわれた。その結果は、初期予報に対して大きな修正はないというものだった。この観測は、現象



【図1】1991年1月13日の小惑星(381)ミルラによるふたご座 $\gamma$ 星の掩蔽の、予報された掩蔽帯と観測された掩蔽帯。最も良い位置観測は、九州の南を通ることを示していたが、影は予報された経路より $700 \text{ km}$ も北の東京を通ったのが多数の観測者によって観測された。この大きな誤差は、おもに位置観測が現象の1ヶ月も前に行なわれたことに起因している。



| 0 <sup>h</sup> TD<br>1991 | R.Asc.<br>J2000.0 | Dec.          | R.Asc.<br>Apparent | Dec.          | r        | Δ        | Elong. |
|---------------------------|-------------------|---------------|--------------------|---------------|----------|----------|--------|
| Jan. 11                   | h m s             | ° ' "         | h m s              | ° ' "         | AU       | AU       | °      |
| 12                        | 6 39 40.7050      | +16 14 59.204 | 6 39 12.1852       | +16 15 30.974 | 3.524591 | 2.558720 | 167.1  |
| 13                        | 6 38 53.1536      | 16 18 33.855  | 6 38 24.6191       | 16 19 04.983  | 3.524190 | 2.561181 | 166.1  |
| 14                        | 6 38 06.0261      | 16 22 09.884  | 6 37 37.4878       | 16 22 40.390  | 3.523786 | 2.563947 | 165.1  |
| 15                        | 6 37 19.3679      | 16 25 47.185  | 6 36 50.8258       | 16 26 17.092  | 3.523379 | 2.567017 | 164.0  |
| 16                        | 6 36 33.2239      | 16 29 25.651  | 6 36 04.6770       | 16 29 54.986  | 3.522971 | 2.570389 | 162.9  |
| 17                        | 6 35 47.6381      | 16 33 05.178  | 6 35 19.0843       | 16 33 33.964  | 3.522560 | 2.574060 | 161.8  |

【表1】ミルラの暦

注釈：この表の値は、ソ連版小惑星暦による軌道要素を数値積分して得られた。

| R.Asc.<br>J2000.0                                     | Dec.              |
|-------------------------------------------------------|-------------------|
| 6 <sup>h</sup> 37 <sup>m</sup> 42 <sup>s</sup> .69824 | +16° 23' 57".8006 |

【表2】1991年1月13日12hTDにおけるFK5によるふたご座γ星の位置

蔽によって跡切れた日周運動の弧が短すぎてあまり有力な観測にならなかった。

最終的に、時間の精度が1秒かそれよりいいと期待される観測だけが、後の解析に採用された。採用された観測は、表4に掲げられているが、継続時間の測定だけの観測も含まれている。

### 3. ミルラの断面

一般的に、小惑星の形は3軸不等の楕円体か、より不規則な形であると考えられている。これまでに恒星の掩蔽の観測から得られた小惑星の断面の多くは、直径が100kmより大きな小惑星では、楕円でよく当てはめられている。従って、ミルラの断面が楕円で近似できると仮定するのは妥当なことである。

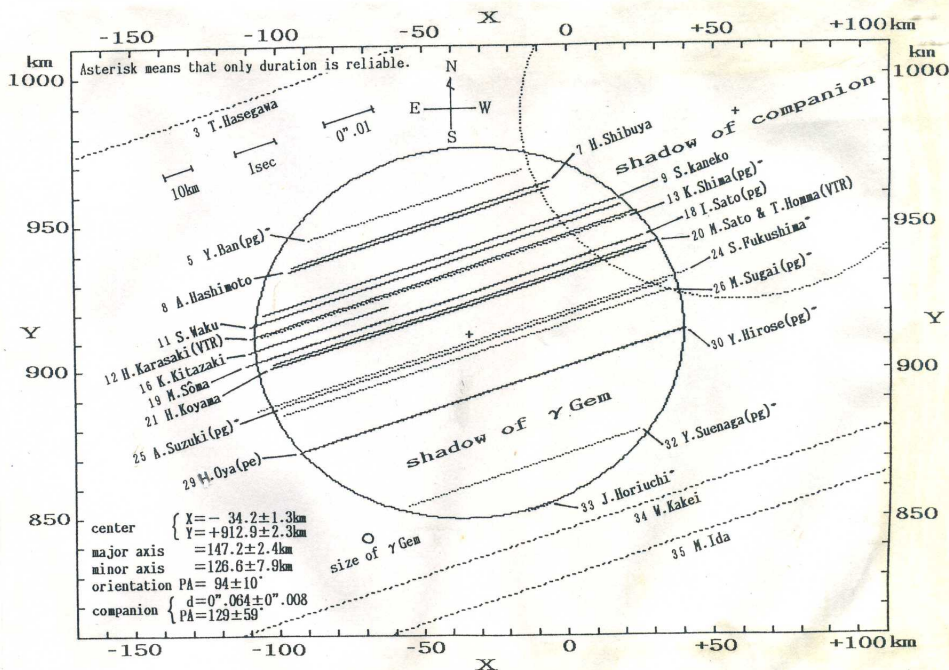
一般に、楕円は中心の位置、長軸と短軸の長さ、そして長軸の向きの5つのパラメーターによって決められる。この論文では、これらのパラメーターを、それぞれの観測の方法や状況に応じて適当に重みをつけた最小自乗法によって決定した。継続時間のみの観測の場合には、最小自乗法で解くために現象の中心時刻も未知数として扱われることになる。

ミルラの断面は、軸長が(147.2±2.4)km×(126.6±7.9)kmで、長軸の向きが94±10°の楕円でよくフィッティングできることがわかった(図2)。楕円の大きさは、IRASによって決められた平均直径(124±4)km(デスコ, 1989)よりいくぶん大きい。渋谷と橋本によって独立になされた楕円の北部にあたる2つの眼視観測は、この部分が楕円より凹んでいることを示唆していることは注目に値する。プロフィールの南側は、光電観測と限界線上での観測に強く引き招られている。

上に述べたような最小自乗法によるフィッティングの結果、1991年1月13日12h00m(TD)におけるふたご座γ星に対するミルラの相対位置が、赤経で0.7mas、赤緯で1.2masの精度で決定された。これは、地上での距離にして1.3kmと2.3kmに相当する(表5)。この高い精度は、VLBIによって達成される精度に匹敵する。ふたご座γ星は、位置の誤差が非常に小さいはずのFK5星表にある星(フリック他, 1988)なので、表5にある相対位置の補正量の大部分は、ミルラの位置の悪さのせいであると考えられる。

ミルラの暦とふたご座γ星の位置を表1, 2に示す。観測者の観測値は、表3に掲げられている。

大矢の光電観測記録から、主星の潜入と出現の時刻が0.02秒の精度で求められたのは注目すべきことである。ビデオ観測では、数フレームにわたってゆっくりとした潜入と出現が記録されており、30分の数秒の精度が得られる。固定撮影による写真観測は、絶対時刻測定には向いていないが、掩蔽の継続時間は信頼性があることもある。このような写真観測においては、レンズの焦点距離が500mm以下では、掩



【図2】ふたご座γ星の掩蔽から得られた小惑星(381)ミルラの断面。楕円の輪郭は、最小自乗法で当てはめられた。楕円の北部には凹みがあるのかもしれない。北限界線付近での観測がないため、短軸の長さは、長軸の長さより推定精度が悪い。

の1ヶ月も前だったため、更なる観測が要請されたが、成功しなかった。

この予報に従って、我々はおもに九州地方の観測者にこの現象の観測を要請した。しかし、ミルラの影は、実際には九州よりはるか北を通り、世界で最も人口の集中した都市の一つである東京の真上を通過したのである。ずれの量は、北へ0°.4で、地上の距離にして約700kmに相当した。1ヶ所の光電観測、2ヶ所のビデオ観測、9ヶ所以上の写真観測、そして数十ヶ所での望遠鏡、双眼鏡、肉眼による眼視観測によって、この現象は捕らえられた。



| No. | Name                       | Observer                          | Longitude<br>(East) | Latitude<br>(North) | Height           | Instrument            | Method        | Time<br>Keeping |
|-----|----------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|-----------------------|---------------|-----------------|
| 1   | Sapporo, Hokkaido          | O. Watanabe                       | 141° 21' 11.6"      | 42° 58' 47.0"       | 110 <sup>m</sup> |                       |               |                 |
| 2   | Aomori City, Aomori        | S. Odagiri                        | 140 48 01           | 40 49 31            | 4                | 7×50 B                | v.            |                 |
| 3   | Tochigi City, Tochigi      | T. Hasegawa                       | 139 37 30           | 36 28 00            |                  |                       |               |                 |
| 4   | Higashimatsuyama, Saitama  | K. Tanaka                         | 139 25              | 36 01               | 60               | f=400mm               | v. & pg.      |                 |
| 5   | Matsumoto, Nagano          | Y. Ban                            | 137 58 24.7         | 36 10 34.8          |                  | 6cm R DF              | pg.           |                 |
| 6   | Sakado, Saitama            | M. Komuro<br>& N. Muto            | 139 22 52           | 35 58 20            | 25               | NE                    |               | SW              |
| 7   | Matsubarako, Nagano        | H. Shibuya                        | 138 26 16.7         | 36 03 26.3          | 1285             | 20cm N                | v.,EE         | JJY             |
| 8   | Chichibu, Saitama          | A. Hashimoto                      | 139 02 52           | 35 58 27            | 140              | 7.5cm R               | v. & pg.      | SW              |
| 9   | Sakura, Chiba              | S. Kaneko                         | 140 11 39           | 35 43 50            | 59               | 15cm N                | v.,key tap    | JJY             |
| 10  | Soka, Saitama              | S. Hosoi                          | 139 47 41           | 35 48 14            | 3                | finder                | v.            |                 |
| 11  | Katsushika, Tokyo          | S. Waku                           | 139 52 39.0         | 35 44 51.1          | 2                | NE                    | v.            | WWVH            |
| 12  | Nerima, Tokyo              | H. Karasaki                       | 139 40 12.8         | 35 44 13.7          | 45               | 20cm SC               | video         | tel.            |
| 13  | Fujimi, Nagano             | K. Shima                          | 138 18 27           | 35 53 25            | 1040             | f=300mmF2.8           | pg.           |                 |
| 14  | Toshima, Tokyo             | Y. Imai                           | 139 43.4            | 35 43.5             |                  | NE                    |               |                 |
| 15  | Kodaira, Tokyo             | Y. Suzuki                         | 139 29 13.2         | 35 42 57.5          | 77               | B                     | v.            |                 |
| 16  | Musashino, Tokyo           | K. Kitazaki                       | 139 33 52.8         | 35 42 25.6          | 59               | 7.6cm R               | video monitor | SW              |
| 17  | Meguro, Tokyo              | Astron. Club<br>Univ. of Tokyo    | 139 41.2            | 35 39.5             |                  | NE                    |               |                 |
| 18  | Meguro, Tokyo              | I. Sato                           | 139 41 25.7         | 35 39 13.7          | 45               | 6.5cm R ex.<br>finder | pg.<br>v.     | JJY<br>watch    |
| 19  | Mitaka, Tokyo              | M. Sôma                           | 139 32 11.8         | 35 40 26.1          | 59               | NE                    |               |                 |
| 20  | Fuchu, Tokyo               | M. Sato<br>& T. Homma             | 139 28 38           | 35 39 17            | 45               |                       | video         |                 |
| 21  | Hachioji, Tokyo            | H. Koyama                         | 139 21 36.2         | 35 39 30.6          | 133              | NE                    | voice rec.    | JJY             |
| 22  | Ota, Tokyo                 | T. Hirose                         | 139 41 17.8         | 35 34 15.6          | 11               | NE                    |               | watch           |
| 23  | Yokohama, Kanagawa         | Y. Moriya                         | 139 31 57.3         | 35 34 40.9          | 78               | NE                    |               | watch           |
| 24  | Machida, Tokyo             | S. Fukushima                      | 139 28 12.4         | 35 31 47.4          |                  | 6cm R                 | v.            |                 |
| 25  | Yamato, Kanagawa           | A. Suzuki                         | 139 27 43.3         | 35 31 03.2          | 87               | 6.5cm R DF            | pg.           |                 |
| 26  | Aikawa, Kanagawa           | M. Sugai                          | 139 18 26.0         | 35 30 47.7          | 130              | f=150mmF4.0           | pg.           | tel.            |
| 27  | Yokohama, Kanagawa         | M. Yamada                         | 139 32.6            | 35 27.3             |                  | NE                    |               | SW              |
| 28  | Zama, Kanagawa             | T. Kiyokawa                       | 139 24 54.5         | 35 29 55.9          | 79               | 10cm N                | v.            |                 |
| 29  | Chigasaki, Kanagawa        | H. Oya                            | 139 24 48           | 35 22 12            |                  | 18cm C                | pe.           |                 |
| 30  | Chigasaki, Kanagawa        | Y. Hirose                         | 139 26 07.76        | 35 21 51.89         |                  | f=300mmF2.8<br>B      | pg.<br>v.     |                 |
| 31  | Zushi, Kanagawa            | H. Hayashi                        | 139 36 30           | 35 17 48            |                  | B                     | v.            |                 |
| 32  | Fujinomiya, Shizuoka       | Y. Suenaga                        | 138 36 38           | 35 11 56            |                  | f=75mm                | pg.           |                 |
| 33  | Ohito, Shizuoka            | J. Horiuchi                       | 138 57 30           | 35 01 18            |                  | 10cm N                | v.            |                 |
| 34  | Shizuoka City, Shizuoka    | W. Kakei                          | 138 25 30           | 34 59 36            |                  |                       | v.            |                 |
| 35  | Yokaichi, Shiga            | M. Ida                            | 136 12 34.9         | 35 05 54.0          | 140              | NE                    |               |                 |
| 36  | Suita, Osaka               | S. Watanabe                       | 135 31 40           | 34 47 13            | 24               | 7×50 B                | v.            |                 |
| 37  | Osaka City, Osaka          | Y. Fujiwara                       | 135 29 13.8         | 34 43 54.3          | 0                |                       | I.I.+video    | JJY             |
| 38  | Habikino, Osaka            | M. Ueda                           | 135 38 11           | 34 32 04            | 45               |                       | I.I.+video    |                 |
| 39  | Okayama City, Okayama      | N. Okura                          | 133 52 36           | 34 36 25            |                  | 18cm C                | pe.           |                 |
| 40  | Funaho, Okayama            | H. Akazawa                        | 133 42 43.3         | 34 34 42.6          |                  | 20cm SC               | pe.           |                 |
| 41  | Kurashiki, Okayama         | O. Oshima                         | 133 40 24.4         | 34 32 16.4          |                  | 20cm C                | pe.           |                 |
| 42  | Oita City, Oita            | K. Mato                           | 131 39 23.6         | 33 14 46.7          | 3                |                       |               |                 |
| 43  | Kumamoto City, Kumamoto    | Kumamoto Civil<br>Observatory     | 130 42              | 32 47               |                  |                       |               |                 |
| 44  | Miyazaki City, Miyazaki    | Y. Hattori<br>& Y. Torihara       | 131 25 03           | 31 58 00            |                  |                       | v.            |                 |
| 45  | Miyazaki City, Miyazaki    | T. Akiyoshi                       | 131 27 08           | 31 55 18            |                  |                       | v.            |                 |
| 46  | Kobayashi, Miyazaki        | T. Tomoda                         | 130 55              | 31 59               |                  |                       | v.            |                 |
| 47  | Kiyotake, Miyazaki         | K. Maeda                          | 131 23 19           | 31 51 16            | 15               |                       | video         |                 |
| 48  | Kiyotake, Miyazaki         | Astron. Club<br>Univ. of Miyazaki | 131 22 13           | 31 52 13            |                  | B                     | pg.+v.        |                 |
| 49  | Kiyotake, Miyazaki         | Astron. Club<br>Univ. of Miyazaki | 131 21 51           | 31 46 58            |                  | B                     | pg.+v.        |                 |
| 50  | Takasaki, Miyazaki         | J. Minobe                         | 131 04              | 31 51               |                  |                       | v.            |                 |
| 51  | ISAS, Uchinoura, Kagoshima | M. Eiraku                         | 131 04 02.59        | 31 13 43.72         | 229              | 10cm R                | video         |                 |

【表3】観測者の位置(日本測地系)

R:屈折, N:ニュートン, C:カセグレン, SC:シュミカセ, B:双眼鏡, NE:肉眼, DF:直焦点, ex.:拡大法,  
v.:眼視, pg.:写真, pe.:光電, I.I.:イメージインテンシファイヤー, EE:目耳法, tel.:電話時報, SW:ストップウォッチ  
表4に掲げられていない観測者は、掩蔽せずを報告している。日本測地系から世界測地系(WGS84)への変換量は、  
 $\Delta u = -146.3m$ ,  $\Delta v = +507.1m$ ,  $\Delta w = +681.0m$ 。

| No. | Observer                    | Disappearance<br>UTC           | Reappearance<br>UTC    | Adoption<br>(*) | Time-<br>Shift | Notes                |
|-----|-----------------------------|--------------------------------|------------------------|-----------------|----------------|----------------------|
|     |                             | h m s s                        | h m s s                |                 | s              |                      |
| 3   | T. Hasegawa                 | no occultation                 |                        | A               |                |                      |
| 4   | K. Tanaka                   | 2 seconds duration             |                        | R               |                |                      |
| 5   | Y. Ban                      | 11 59 58.2 $\pm 0.5$           | 12 00 03.2 $\pm 0.5$   | D               | +0.7           | companion visible    |
| 6   | M. Komuro<br>& N. Muto      | 11 59 59.89 $-0.5$             | 12 00 12.98 $-0.1$     | RR              |                |                      |
| 7   | H. Shibuya                  | 11 59 56.1 $\pm 0.4$           | 12 00 02.1 $\pm 0.5$   | AA              | —              | companion visible    |
| 8   | A. Hashimoto                | 11 59 53 $\pm 1.0$             | 11 59 59 $\pm 1.0$     | AA              | —              | companion visible    |
| 9   | S. Kaneko                   | 11 59 45.7 $\pm 0.3$           | 11 59 53.9 $\pm 0.3$   | AA              | —              | primary star         |
|     |                             |                                | 11 59 47.1 $\pm 0.3$   | A               | —              | companion star       |
| 10  | S. Hosoi                    | occulted                       |                        | R               |                |                      |
| 11  | S. Waku                     | 11 59 47.3 $\pm 0.3$           | 11 59 55.9 $\pm 0.2$   | AA              | —              |                      |
| 12  | H. Karasaki                 | 11 59 48.07 $\pm 0.05$         | 11 59 57.03 $\pm 0.05$ | AA              | —              |                      |
| 13  | K. Shima                    | 11 59 50.6 $\pm 0.5$           | 11 59 59.1 $\pm 0.5$   | D               | +4.7           |                      |
| 14  | Y. Imai                     | occulted                       |                        | R               |                |                      |
| 15  | Y. Suzuki                   | no occultation                 |                        | R               |                |                      |
| 16  | K. Kitazaki                 | 11 59 54.5 $\pm 0.8$           | 11 59 57.7 $\pm 0.2$   | RA              | —              |                      |
| 17  | Astron. Club<br>Tokyo Univ. | occulted                       |                        | R               |                |                      |
| 18  | I. Sato                     | 11 59 48.0 $\pm 0.7$           | 11 59 56.7 $\pm 0.5$   | AA              | —              | primary star         |
|     |                             |                                | 11 59 49.3 $\pm 0.3$   | A               | —              | companion star       |
| 19  | M. Sōma                     | 11 59 49 $\pm 1.0$             | 11 59 58 $\pm 1.0$     | AA              | —              |                      |
| 20  | M. Sato<br>& T. Homma       | 11 59 48.8 $\pm 0.1$           | 11 59 57.7 $\pm 0.1$   | AA              | —              |                      |
| 21  | H. Koyama                   | 11 59 49.7 $\pm 0.5$           | 11 59 58.4 $\pm 0.4$   | AA              | —              |                      |
| 22  | T. Hirose                   | 11 59 50 $\pm 5$               | 11 59 55 $\pm 5$       | RR              |                |                      |
| 23  | Y. Moriya                   | 11 59 52 $\pm 2$               | 11 59 58 $\pm 1$       | RR              |                |                      |
| 24  | S. Fukushima                | 11 59 50                       | 12 00 00               | D               | -1.6           | companion visible    |
| 25  | A. Suzuki                   | 11 59 46 $\pm 1$               | 11 59 55 $\pm 1$       | D               | +2.9           |                      |
| 26  | M. Sugai                    | 11 59 45.6 $\pm 0.5$           | 11 59 54.6 $\pm 0.5$   | D               | +4.1           |                      |
| 27  | M. Yamada                   | 11 59 48                       | 11 59 53               | RR              |                |                      |
| 28  | T. Kiyokawa                 | 11 59 52.4 $\pm 0.7$           | 11 59 58.9 $\pm 0.4$   | RR              |                |                      |
| 29  | H. Oya                      | 11 59 49.12 $\pm 0.02$         | 11 59 58.00 $\pm 0.02$ | AA              | —              | image reconstruction |
| 30  | Y. Hirose                   | 11 59 48                       | 11 59 57               | D               | +0.9           | companion visible    |
| 31  | H. Hayashi                  | longer than 5 seconds duration |                        | R               |                |                      |
| 32  | Y. Suenaga                  | 11 59 59.7 $\pm 1$             | 12 00 05.1 $\pm 1$     | D               | -4.9           |                      |
| 33  | J. Horiuchi                 | 11 59 55.0                     | 11 59 55.5             | D               | +0.4           |                      |
| 34  | W. Kakei                    | no occultation                 |                        | A               |                |                      |

【表4】現象の測定時刻

注釈：時刻補正は、この解析によって得られた報告された時刻に対する補正である。

表に掲げられた時刻は、報告された時刻である。

AA：潜入・出現ともに採用

RA：出現のみ採用

RR：潜入・出現ともに棄却

D：継続時間のみ採用

A：採用

R：棄却

| Epoch<br>TD                                  | R.Asc.<br>J2000.0                                             | Motion<br>per minute | Dec.<br>J2000.0            | Motion<br>per minute |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|
| 1991 Jan. 13 12 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup> | 6 <sup>h</sup> 37 <sup>m</sup> 42 <sup>s</sup> .63681 $\pm 5$ | +0°03'24.02          | +16° 23' 58".8728 $\pm 12$ | +0".15091            |

【表5】ミルラの位置と移動量

注釈：移動量は、表1の暦から得られた。

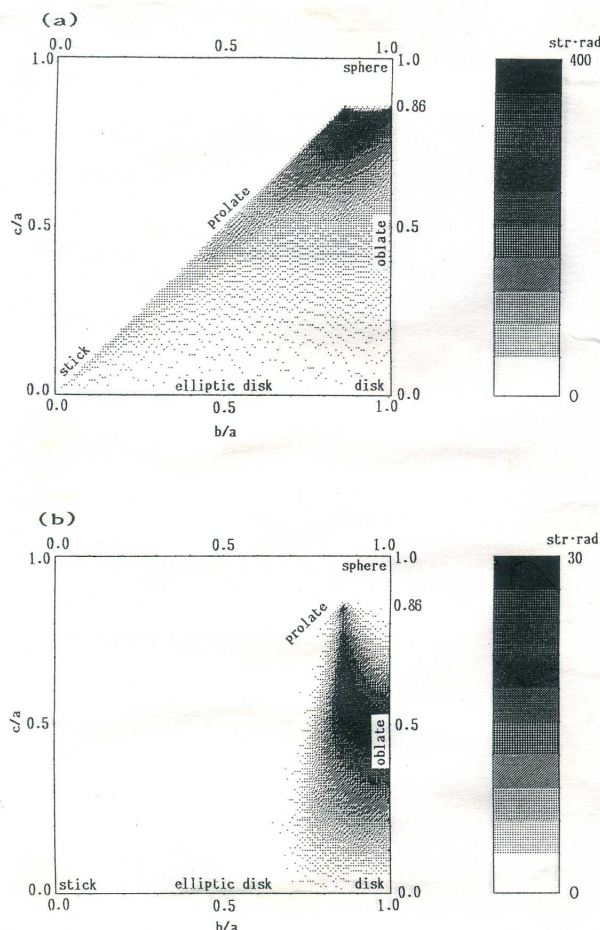


#### 4. 3次元形状の推定

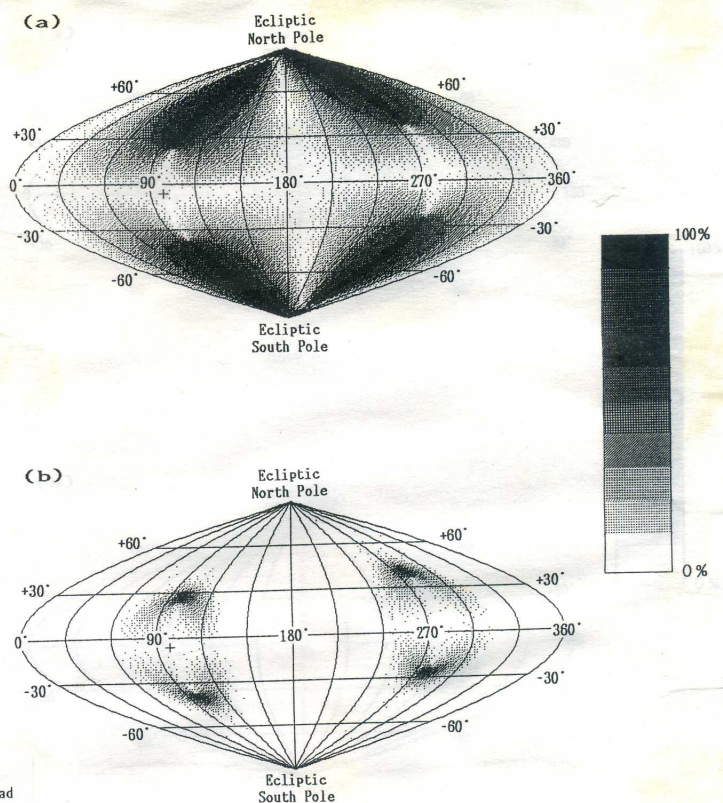
ミルラについては、これまで恒星の掩蔽も観測されていないし、自転についても何も知られていない(マグヌソン, 1989)。前節で得られたミルラの断面は、可能なミルラの3次元形状や向きについての基礎的な制限を与えるであろう。直径で100kmより大きな小惑星の多くは、3軸不等の楕円体でよく近似される。そこでミルラの3次元形状も3軸不等の楕円体であると推定することにする。

付録に示すように、楕円体が投影されてできる楕円の長軸と短軸の長さそれに長軸の向きという3つの観測量から、向きが等方的な確率であると仮定することによって、3軸不等の楕円体の向きの2次元的な確率分布図を導くことができる。実現される楕円体の3つの軸のうちの2軸の長さの比についての確率分布も導くことができる。これらの確率を導くのに必要なたった1つのパラメータは、自転の位相角である。

図3は、正積図法であるサンソン図法で投影した、ミルラの最短軸の方向の確率分布図である。自転軸は最短軸と一致していると仮定する。図3(a)は純幾何学的な制限から得られたもので、図3(b)はIRASの観測と組み合わせた場合である。ドットの密度は、その方向に自転軸があるとした時の可能な自転の位相角の



【図4】ミルラの3次元形状の主軸の長さの比の確率分布。図(a)は純幾何学的に可能な場合、図(b)はIRASの観測で制限された場合である。ドットの濃度は確率測度を表わす。観測されたミルラの断面の楕円の軸比は、0.86である。可能な領域は台形である。図(a)および(b)から、 $c/a$ は0.86より小さいことがわかる。また、図(b)からIRASの観測により $b/a$ は0.7より大きいかもしれないことがわかる。



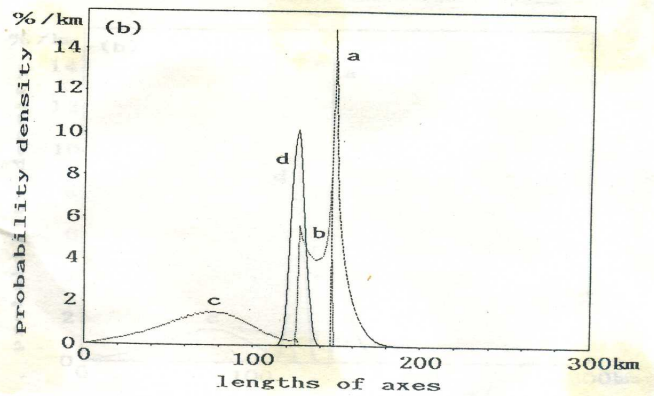
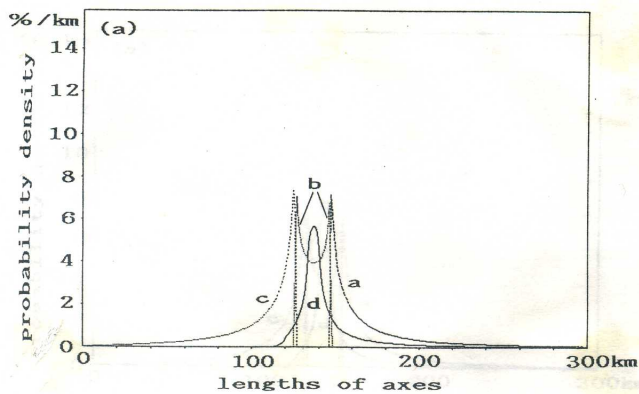
【図3】サンソン図法で投影した、ミルラの最短主軸の方向の確率分布図。ふたご座 $\gamma$ 星の位置は、黄経 $99^{\circ}.1$ 、黄緯 $-6^{\circ}.7$ で、+印で示してある。ドットの濃度は、各方向における可能な自転位相角の範囲を示す。図(a)は純幾何学的な制限の場合、図(b)はIRASの観測によって制限された場合である。4つ折対称の分布が見られる。IRASの観測は、最短主軸の方向を4つの狭い領域に制限する。

範囲を示す。例えば、100%というのは、0から $360^{\circ}$ までのどの自転位相角に対しても可能な3軸不等の楕円体の解が存在することを意味する。ふたご座 $\gamma$ 星の方向は、+印で示してある。4つ折の対称性が見られる。図3(a)では、全ての向きのうちの23.6%が可能であるが、図3(b)ではたった2.07%しか可能でない。従って、IRASの観測によって得られた $(124 \pm 4)$ kmという平均直径は、最短軸の向きの可能性に非常に強い制限を与えている。

ミルラの3次元形状の主軸の長さの比の確率分布は、図4に示されている。図4(a)は純幾何学的に可能な確率分布、図4(b)はIRASの平均直径によって制限された確率分布である。各図において、 $b/a$ 、 $c/a$ は、それぞれ中間軸と最長軸、最短軸と最長軸の長さの比を表わす。観測されたミルラの楕円断面の軸比は0.86で、可能な領域が図4のような台形であることに注目せよ。図4(a)と(b)から、ミルラの立体形状が断面の楕円より丸い形は、確率測度0ではなく不可能であること、すなわち $c/a$ が0.86より小さくならなければならないことがわかる。また図4(b)から、IRASの観測の制限によって、 $b/a$ が0.7より大きいだろうということもわかる。

ミルラの3軸の長さ $a$ 、 $b$ 、 $c$ と平均直径 $d$ の確率分布は、図5に示されている。図5(a)は純幾何学的な制限の場合で、図5(b)はIRASの観測の制限の場合である。3軸の長さについては、 $c \leq 126.6 \text{ km} \leq b \leq 147.2 \text{ km} \leq a$ という制限が与えられる。図5(b)は、 $(124 \pm 4)$ kmというIRASの平均直径が $c$ についてかなり小さい値を要求することを示しているが、ミルラのような大きさの天体についてはそのようなことはありそうもない。従って、IRASの平均直径の値には、何等かの系統的誤差があるのかもしれない。



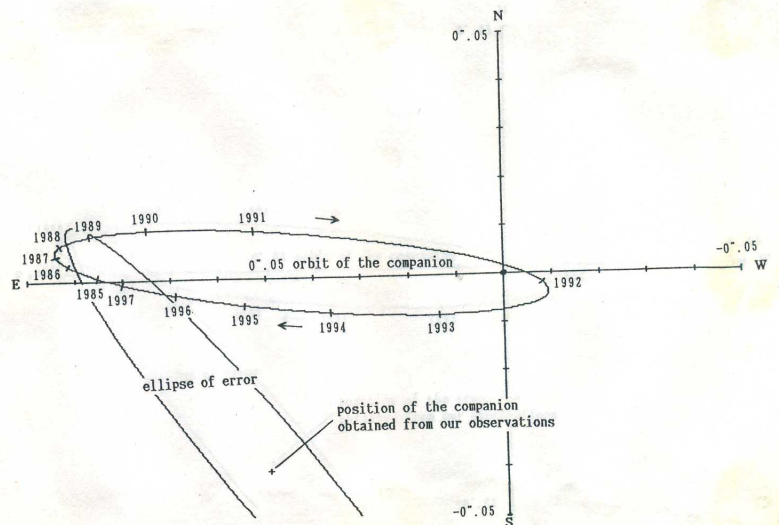


【図5】ミルラの3次元形状の3つの主軸の長さa, b, cと平均直径dの確率分布。図(a)は純幾何学的な制限の場合、図(b)はIRASの平均直径によって制限された場合である。 $c \leq 126.6 \text{ km} \leq b \leq 147.2 \text{ km} \leq a$ ,  $d \geq 112.1 \text{ km}$ という制限が与えられる。IRASの観測による制限では、最短主軸がかなり短くなければならないことが示唆されるが、そんなことはありそうにない。

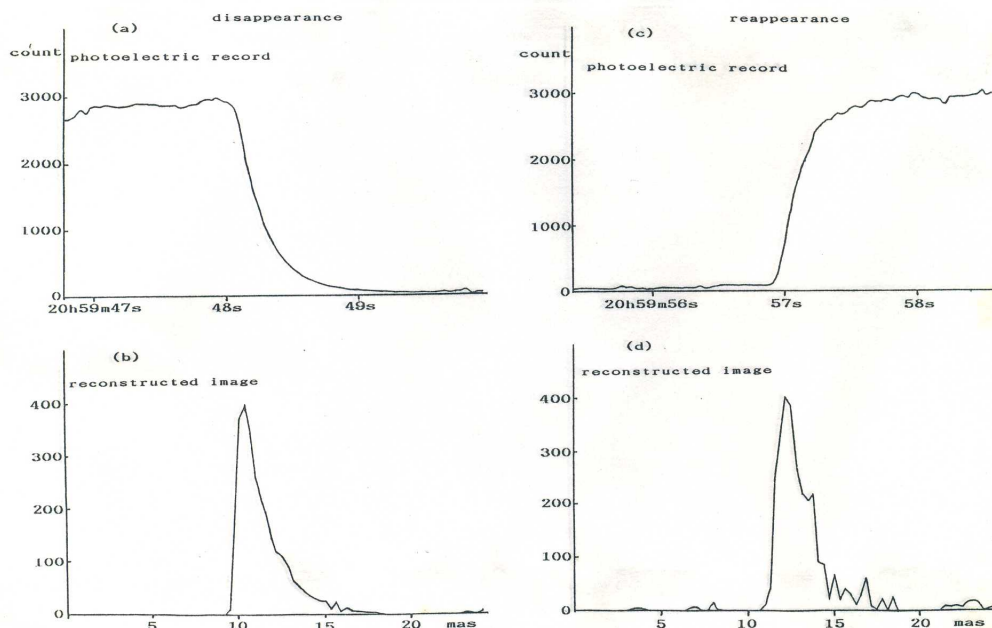
## 5. ふたご座 $\gamma$ 星の直径と伴星の位置

ふたご座 $\gamma$ 星は、分光連星であることが知られていた。ミルラによるこの掩蔽の最中、主星がミルラの陰にある間、伴星が写真と眼視の両方で直接観測された。その光度は約7.5等で黄色味を帯びていた。表4の注釈にあるように、数人の観測者が主星が掩蔽されている間伴星が見えたと報告しているが、金子と佐藤は、それぞれ眼視と写真(図9)によって主星が隠されて約1秒後によく伴星が見え出したと報告している。この観測は、伴星が主星より早く隠されたことを示唆している。これらの観測から、主星に対する伴星の相対位置を位置角 $129 \pm 59^\circ$ で角距離 $(64 \pm 8) \text{ mas}$ であると推定することができる。

カンパー&ピアズレー(1987)により、三角視差と分光視差によって導かれた伴星の軌道要素が彼らの論文の表Vに掲げられている。我々の観測結果は、この軌道要素から予報される位置とは一致していない。特に、図6でわかるように位置角に大きな食い違いがある。我々の得た伴星の位置は、たった2個の観測に基づくものであるが、数人の観測者によって直接伴星の姿が捕らえられているので、我々の結果の信頼性には確信がある。

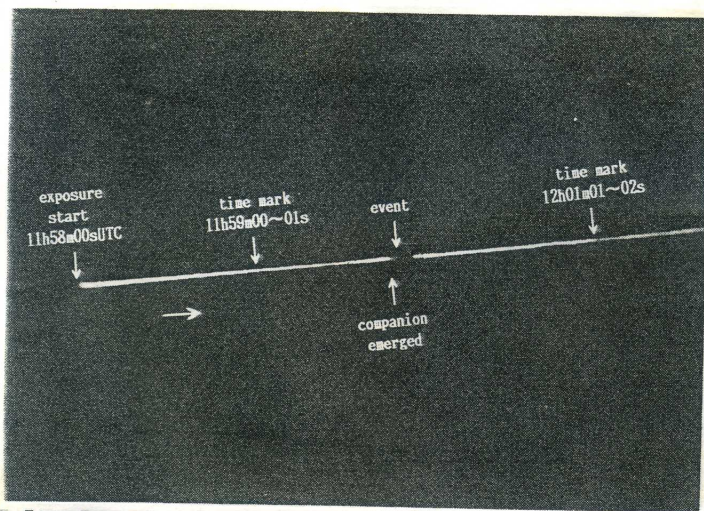


【図6】カンパー&ピアズレー(1987)による伴星の軌道と掩蔽から観測された伴星の位置。主星からの角距離はよく一致しているが、位置角は大きく食い違いがある。



【図7】大矢による光電観測記録から再生されたふたご座 $\gamma$ 星の星像。時定数約200ミリ秒の機器応答が重畳したフレネル回折によって、ゆっくりとした潜入と出現が現れている。再生されたふたご座 $\gamma$ 星の星像から、潜入と出現の時刻が20ミリ秒の精度で得られた。ふたご座 $\gamma$ 星の視直径の上限が $2.6 \text{ mas}$ であることもわかった。





【図9】小惑星(381)ミルラによるふたご座 $\gamma$ 星の掩蔽が、4分間の露出中の8.7秒間の日周運動の跡切れとなって写っている。露出中薄雲が数回通過し、星が減光した。

投影されたミルラの断面は、長軸の位置角が $(94^\circ \pm 10^\circ)$ で $(147.2 \pm 2.5) \times (126.6 \pm 7.9)$ kmの楕円でよく当てはめられる。導かれた大きさは、IRASの赤外線観測から得られた $(124 \pm 4)$ km(テデスコ, 1989)よりいくぶん大きい。ふたご座 $\gamma$ 星に対するミルラの相対位置が、高い精度で決定された。この論文で報告された1 masという精度は、VLBIによって達成される精度に相当し、通常の光学位置天文観測の能力を超えるものである。

ミルラが3軸不等の楕円体であると仮定して、ミルラの3次元形状と向きについて直接的な制限を得ることに成功した。

さらに、回折パターンの光電観測プロフィールの解析から、ふたご座 $\gamma$ 星の視直径の上限が2.6 masであることが導かれた。ふたご座 $\gamma$ 星の伴星がこの現象の最中に初めて直接的に観測された。現象の元期における主星に対する伴星の相対位置が求められ、これまでの予報と比較された。

この現象の予報を提供していただいたD. W. ダナム博士、我々の原稿を改訂していただいたW. ニッセン、有益な示唆をいただいたW. H. ワーレン博士、および吉澤正則助教授と福田弘一郎氏の有益な議論、それに観測結果を提供していただいた表3に掲げられた多数の観測者に感謝する。

## 参考文献

- Batrkov, Y.V. 1991, Ephemerides of Minor Planets for 1992 (Institute of Theoretical Astronomy, Leningrad)
- Dunham, D.W. 1990, Occultation Newsletter 5, 38
- Dunham, D.W. 1991, private communication
- Fricke, W., Schwan, H., & Lederle, T. 1988, Fifth Fundamental Catalogue (FK5), (Veröff Astron. Recher. Inst., Heidelberg No.32)
- Kamper, K.W., & Beardsley, W.R. 1987, AJ 94, 1302
- Kristensen, L.K. 1984, Astron. Nachr. 305, 207
- Lagerkvist, C.I., Barucci, M.A., Capria, M.T. 1987, 1988, Asteroid Photometric Catalogue (Configlio Nazionale Delle Ricerche)
- Magnusson, P. 1989, In Asteroids II, edited by R.P. Binzel, T. Gehrels and M.S. Matthews (The University of Arizona Press, Tucson), p.1180
- Millis, R.L. et al. 1989, AJ 98, 1094
- Millis, R.L., & Dunham, D.W. 1989, In Asteroids II, edited by R.P. Binzel, T. Gehrels and M.S. Matthews (The University of Arizona Press, Tucson), p.148
- Tedesco, E.F. 1989, In Asteroids II, edited by R.P. Binzel, T. Gehrels and M.S. Matthews (The University of Arizona Press, Tucson), p.1090

大矢によって観測された光電観測のプロフィール(図7(a), (c))には、時定数約200ミリ秒の機器応答の重畳したフレネル回折パターンが現れている。サンプリング間隔は40ミリ秒なので、現象の時刻は0.15 masの空間分解能に相当する20ミリ秒の精度で決定できる。観測されたプロフィールを数値的にデコンボリューションすることにより、隠された恒星の再生像が得られる(図7(b), (d))。これからふたご座 $\gamma$ 星の視直径が2.6 masであることが推定される。しかし、再生された星像は減衰した尾を引いており、2.6 masというのは主星の視直径の上限であるとみなすべきであると言えない。

## 6. まとめ

小惑星による恒星の掩蔽は、隠した小惑星の大きさ、形、自転軸に加えて、隠された星の直径や2重性に関する優れた情報を提供する。1991年1月13日のミルラによるふたご座 $\gamma$ 星の掩蔽では、日本の30ヶ所以上でポジティブな観測があった。この現象以前には、小惑星(381)ミルラについては、ほとんど何も知られていなかった。

## 付録：楕円断面からの3軸不等楕円体の3次元形状の導出

無限遠方から見た見かけの断面は、以下のような2次形式で表わされる。

$$1 = {}^t r R X {}^t R_r,$$

ここで、 $R, X$ は次のように定義される行列である。

$$X = {}^t R_z(\theta) Q R_z(\theta),$$

$$R = R_z(90^\circ + P) R_x(90^\circ + \delta_s) {}^t R_z(90^\circ + \alpha_c - \alpha_s) {}^t R_y(90^\circ - \delta_c),$$

$$Q = \begin{pmatrix} 1/a^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/b^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/c^2 \end{pmatrix}, \quad (a \geq b \geq c > 0)$$

ここで、 $a, b, c$ は3つの主軸の長さ、 $R_x, R_y, R_z$ は $x, y, z$ 軸の周りの回転行列

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix},$$

$$R_y = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix},$$

$$R_z = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

で、ベクトル $r$ は

$$r = {}^t(x, y, z) = {}^t(x_1, x_2, x_3).$$

である。

この方程式で、 $\alpha_s, \delta_s$ は恒星の赤経と赤緯、 $\alpha_c, \delta_c$ は楕円体の最短軸の方向、 $\theta$ は最長軸の自転の位相角、 $P$ は見かけの楕円の長軸の方向で、その様子は図8に示すとおりである。

見かけの楕円の長軸と短軸の長さが $A, B$ であるという条件は、ラグランジュの未定乗数法によって解かれる。座標 $x_k$ の最大値は、次のラグランジュ形式を最大にすることから導かれる。

$$\Phi = x_k + \lambda \left( \sum_{i,j=1}^3 K_{ij} x_i x_j - 1 \right),$$

ここで $\lambda$ は未定乗数、 $K_{ij} (i=1, 2, 3; j=1, 2, 3)$ は行列 $RX^*R$ の成分である。最大になるための必要条件は、

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x_i} = \delta_{ik} + 2\lambda \sum_{j=1}^3 K_{ij} x_j = 0,$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} = \sum_{i,j=1}^3 K_{ij} x_i x_j - 1 = 0,$$

ここで $\delta_{ij}$ はクロネッカーのデルタである。この連立方程式を解くことにより、

$$x_j = \frac{K_{kj}^{-1}}{(K_{kk}^{-1})^{1/2}},$$

よって

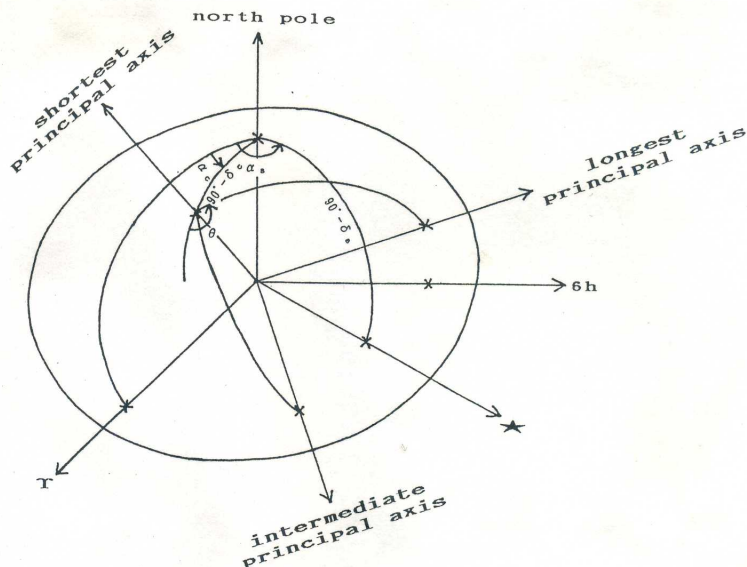
$$x_k = (K_{kk}^{-1})^{1/2}.$$

が得られる。

従って、見かけの楕円の長軸と短軸の長さが $A, B$ であるという条件は、 $K = RX^*R$ を代入することにより、

$$(RX^{-1} {}^t R)_{11} = A^2,$$

$$(RX^{-1} {}^t R)_{22} = B^2,$$



【図8】恒星から見た3軸不等の楕円体の見え方。



および、楕円の軸が座標軸に平行なので非対角成分が0になるという条件

$$(RX^{-1}{}^tR)_{12} = (RX^{-1}{}^tR)_{21} = 0.$$

から導かれる。

この連立方程式で、 $A, B, P, \alpha_s, \delta_s$ は観測量、 $a, b, c, \alpha_c, \delta_c, \theta$ は未知数である。6個の未知数に対して3本の方程式しかないので、この連立方程式は3個のパラメーターを仮定しないとユニークには解けない。最短軸の方向 $\alpha_c, \delta_c$ は、多くの場合慣性性能率が最大の軸である。従って自転軸とみなすことができ、自転の位相角 $\theta$ は $0^\circ$ から $360^\circ$ まで一様に確からしい。よって楕円体の向きのパラメーターの全体積は、 $(4\pi \text{ステラジアン}) \times (2\pi \text{ラジアン})$ となる。

$D = a^2 + b^2$ ,  $E = a^2 - b^2$ とおく。 $D, E, c^2$ を独立なパラメーターに採ると、3元連立方程式は、次の様な線形の方程式となる。

$$\begin{pmatrix} R_{11}^2 + R_{12}^2 & (R_{11}^2 - R_{12}^2) \cos 2\theta + 2R_{11}R_{12} \sin 2\theta & 2R_{13}^2 \\ R_{21}^2 + R_{22}^2 & (R_{21}^2 - R_{22}^2) \cos 2\theta + 2R_{21}R_{22} \sin 2\theta & 2R_{23}^2 \\ R_{11}R_{21} + R_{12}R_{22} & (R_{11}R_{21} - R_{12}R_{22}) \cos 2\theta + (R_{11}R_{22} + R_{12}R_{21}) \sin 2\theta & 2R_{13}R_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D \\ E \\ c^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2A^2 \\ 2B^2 \\ 0 \end{pmatrix},$$

ここで

$$\begin{aligned} R_{11} &= \sin \delta_c \sin(\alpha_c - \alpha_s) \sin P - (\cos \delta_c \cos \delta_s + \sin \delta_c \sin \delta_s \cos(\alpha_c - \alpha_s)) \cos P, \\ R_{12} &= \cos(\alpha_c - \alpha_s) \sin P + \sin \delta_s \sin(\alpha_c - \alpha_s) \cos P, \\ R_{13} &= \cos \delta_c \sin(\alpha_c - \alpha_s) \sin P + (\sin \delta_c \cos \delta_s - \cos \delta_c \sin \delta_s \cos(\alpha_c - \alpha_s)) \cos P, \\ R_{21} &= \sin \delta_c \sin(\alpha_c - \alpha_s) \cos P + (\cos \delta_c \cos \delta_s + \sin \delta_c \sin \delta_s \cos(\alpha_c - \alpha_s)) \sin P, \\ R_{22} &= \cos(\alpha_c - \alpha_s) \cos P - \sin \delta_s \sin(\alpha_c - \alpha_s) \sin P, \\ R_{23} &= \cos \delta_c \sin(\alpha_c - \alpha_s) \cos P - (\sin \delta_c \cos \delta_s - \cos \delta_c \sin \delta_s \cos(\alpha_c - \alpha_s)) \sin P, \\ R_{31} &= \cos \delta_c \sin \delta_s - \sin \delta_c \cos \delta_s \cos(\alpha_c - \alpha_s), \\ R_{32} &= \cos \delta_s \sin(\alpha_c - \alpha_s), \\ R_{33} &= -\sin \delta_c \sin \delta_s - \cos \delta_c \cos \delta_s \cos(\alpha_c - \alpha_s). \end{aligned}$$

この連立方程式を解くことにより、 $a, b, c$ が得られるが、どんな解も $a \geq b \geq c > 0$ という条件を満たさなければならない。実際、どんな楕円体の向きについても解となる楕円体が存在するわけではないので、可能な楕円体の向きは制限される。

楕円体の平均直径を

$$d = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2}{3}},$$

と定義しよう。すると、簡単に証明できるように、断面楕円の平均2乗直径の期待値は、 $d^2$ に等しい。すなわち、

$$E\left[\frac{A^2 + B^2}{2}\right] = \frac{a^2 + b^2 + c^2}{3} = d^2,$$

ここで、積分は $(4\pi \text{ステラジアン}) \times (2\pi \text{ラジアン})$ の全ての向きについて等しい測度で行なう。

IRASの観測による $(124 \pm 4) \text{ km}$ という平均直径は、我々の定義の意味で解釈されている。IRASの観測は、平均が $124 \text{ km}$ 、標準偏差が $4 \text{ km}$ のガウシアンで表現されている。

このようにして導かれた制限は、小惑星の自転に関する重要な情報を与える。