

星食の高時間分解能測光観測による恒星視直径の測定

田 中 濟*

1. 恒星視直径の測定

恒星視直径は非常に小さいので、いかなる大望遠鏡をもってしても大きさを見ることはできないとされている。今日までに知られている視直径最大の星は α Cet (ミラ) で $0''.056$ である。これは口径 2m の望遠鏡の分解能に相当するから、大気のシンチレーションがなければ、世界最大級の望遠鏡をもってすればその円盤像を見ることも可能である。現に口径 2.4m の ST (スペース・テレスコープ) では観測目標の 1 つになっている。

地上からの観測では大気のシンチレーションをどう克服するかが問題である。恒星の視直径を最初に測ったのはピースで、1920 年ウィルソン山天文台の 100 インチ鏡にマイケルソン型の干渉計をつけて数個の恒星の視直径を測定した。1968 年からはハンブリー・ブラウンの強度干渉計による観測も報告されている。最近ではスペックル撮影によって α Ori (ベテルギウス) の表面模様を求める試みまで行なわれているが、これも恒星視直径の測定に使える。食連星では変光曲線と視線速度の観測から直径が直接求められる。

星食 (えんべい) は大気の外で起る現象であるから、大気のシンチレーションによる位置のゆらぎに関係なく恒星が月に次第に隠されてゆく様子を観測できる。とはいっても恒星の視直径はきわめて小さいから、時間分解能をかなりあげる必要がある、たとえば視直径 $0''.01$ の恒星の第 1 接触と第 2 接触の間隔は月縁に垂直に潜入した場合で 0.02 秒にすぎない。また、月の縁で回折が起るから、その影響を考えに入れる必要がある。観測に使う望遠鏡の口径が大きいと、その開口によって回折パターンが平均化されてしまうことも考慮しなければならない。

2. 回折パターンの解析

月にくらべて恒星の視直径は非常に小さいから、月縁は直線と考えることにする。実は月縁は複雑な形をしているはずで、特に 10m 程度の岩が突き出たりすると解析は大変複雑になってしまう (月で $0''.01$ は 19m に対応)。月縁での回折はフランホーファーの回折と呼ばれるものになっており、視直径 0 の恒星が地球においたついでの上に作るパターンは次のように表わされる。回折がないとしたときについで上にできる影の縁

を座標 0 として、その強度分布は、

$$F(x) = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{1}{2} + C(x) \right)^2 + \left(\frac{1}{2} + S(x) \right)^2 \right\}$$

ここで

$$C(x) = \int_0^x \cos \left(\frac{\pi}{2} t^2 \right) dt$$

$$S(x) = \int_0^x \sin \left(\frac{\pi}{2} t^2 \right) dt$$

x (あるいは t) は正規化された座標で、実距離を a 、月までの距離を D 、観測する波長を λ とすると

$$x = a \sqrt{\frac{2}{\lambda D}}$$

と書ける。たとえば $\lambda = 5500 \text{ \AA}$ 、 $D = 384,000 \text{ km}$ では

$$\sqrt{\frac{2}{\lambda D}} = 0.097 \text{ m}^{-1}$$

であるから、 $x=1$ は $a=10.3 \text{ m}$ に対応する。これは角度にすると $0''.0055$ である。

点光源によるパターンを積分することによって、有限の大きさをもった恒星の回折パターンを求めることができる。すなわち、

$$I(x) = \int_{x-R}^{x+R} F(t) G(t-x) dt$$

R は x と同じ単位で測った恒星の半径であり、視半径 d (単位 $''$) とは

$$R = d \cdot (\sin 1'') \sqrt{\frac{D}{2\lambda}}$$

の関係にある。 $G(x)$ は恒星面の輝度分布によってきまる関数であり (図 1 参照)、複雑なパッチがあることも考

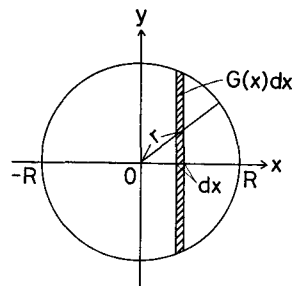


図 1 $G(x)$

周縁減光を $1-u+u \cos \theta$ のように表わしたとき、一様円盤は $u=0$ 、完全周縁減光は $u=1$ である。 $\cos \theta = \sqrt{1-(r/R)^2} = \sqrt{1-(x/R)^2-(y/R)^2}$ であって、 $G(x)$ (ハッチの部分) はこれを y 方向に積分してえられる。

* 東大理 Wataru Tanaka: Measurement of a stellar angular diameter by a high-time-resolving photometrical observation of a lunar occultation

えられるが、通常は周縁減光のみを考え、しかも周縁減光なし（一様）と完全周縁減光の場合について計算することで済ませる。

$$G(x) = \frac{2}{\pi R} \left(1 - \frac{x^2}{R^2}\right)^{1/2} : \text{一様円盤}$$

$$G(x) = \frac{3}{4R} \left(1 - \frac{x^2}{R^2}\right) : \text{完全周縁減光}$$

$G(x)$ が $-R \leq x \leq R$ でのみ値をもつことを銘記していれば、積分の限界は $-\infty, \infty$ にとってよく、 I は F と G のコンボリューション ($I = F * G$) である。

図2, 図3はこうして計算した $I(x)$ であるが、周縁減光のあるなしの影響はあまり大きくないことがわかる。

3. 星食の高時間分解能観測

光電測光装置があればその時定数をうんと短くしてやる。通常の測光では1秒程度の時定数がえらばれるが、これを1ms程度に短くする。実際には光電子増倍管の負荷抵抗と並列に入っているコンデンサを容量の小さいものと変えることになる。しかし、ただこれを実行しただけでは雑音、特にハムが極端にふえて実用にならないであろう。筆者は負荷抵抗を小さくし、電源も電池から供給した。電池の使用はコロンブスの卵であるが、きわめて効果的である。実はあれやこれやをやってみて電池を使うとよいことがわかったのであるが、やってから外

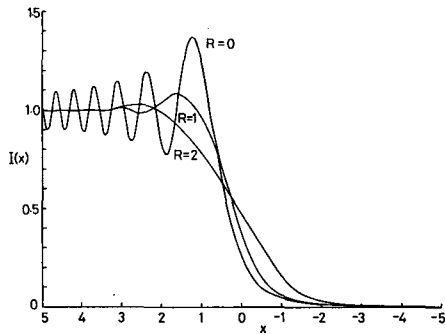


図2 $I(x)$: 一様円盤

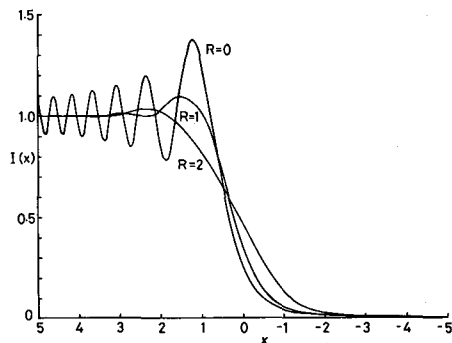


図3 $I(x)$: 完全周縁減光

国の論文をよく読みなおしたら、なんと battery-powered と書いてあるではないか。

フォトン・カウント式の測光装置があればそれに越したことはないが、その場合でも S/N 比はかなり悪くなるので、あまり暗い星の観測は困難である。

出力は高速のオシログラフに記録することも考えられるが、時定数 1ms というのは大変なものである。そこでコンピュータにたよることになる。ミニコンをつないで、磁気テープかディスクに記録するというのが最高であるが、マイコンでも十分に使える。フォトン・カウント式でない場合は AD コンバータがいる。積分型の AD コンバータはスピードの点で使えない。逐次比較型というのを使うことになる。筆者は近くにミニコンがないので、一度データ・レコーダに記録し、これをあとでゆっくりミニコンに食わせた。

観測はほんの数 100ms が勝負である。ダイヤフラムはバックグラウンドのふらつきをおさえるため小さいほどよいが、小さすぎるとシンチレーションやガイド・エラーの影響を受けやすくなる。一般に出現はどこにダイヤフラムをおいてよいかわからないので使えない。潜入が月の暗い縁に対して越える時をとらえる。この方法の最大の欠点は星が黄道帯に制限されること、チャンスがかなりきついことであろう。天候は完全な晴天である必要はないが、シンチレーションの大きい日は結果がおもしろくない。シンチレーションは時定数 10ms 程度のものがかなり卓越しており、測定系の時定数を短くしたことでこれがもろに影響してくる。

4. α Tau (アルデバラン) の星食観測

星食観測によって恒星の視直径を求めるアイデアは、すでに1909年に提示されている。1936年にはアーンルフが写真乾板を回転する方法で α Leo (レグルス) の視直径を 0''.0018 と求めている。その後理論的考察が進み、1950-52年には α Sco (アンタレス) の観測が行われた。1968年からはマクドナルド天文台でコンピュータを使った高速測光観測が開始され、近代的観測体制がととのった。

すでに述べたように、対象となる星は黄道帯にかざられ、白道の動きにあわせて、19年周期で変化してゆく。1つの星のシーズンは3年ほど続くが、暗縁潜入が夜おこるチャンスはそれほど多くない。天候のことを考えればできるだけ多くの人々が観測を心がけることが望ましい。

というわけで、われわれも手始めに明るくて大きい星 α Tau (K5III, $V=0.86$) をねらって応急の観測装置で臨むことになった。 α Tau の今回の星食シーズンは1978-80年であったが、1978年12月13日は月が満月に近かったのと、天候があまりかんばしくなかったので実



図 4 光度曲線 (α Tau: 1980.2.23)

用になるデータは得られなかった。1980年2月23日の星食は最高の条件(月令7.1)と天候にめぐまれ、図4に示すような光度曲線が得られた。ギザギザはシンチレーションによるものであり、これでもかなり良い方である。測光装置自体の雑音は潜入後のデータを見ていただければわかるようにきわめて小さい。

望遠鏡は東京大学天文学教室の60cm反射赤道儀を使用した。急ごしらえのためクーデ分光器のモニタ測光装置に時定数2.4msのアンプをつけた。ダイヤフラムはスリットを流用したので、1mm×1mmであり、天空上12"×12"に相当する。光電子増倍管は浜松テレビのR374で、東芝のVG54という色ガラス・フィルタを使った。従って有効波長は5300Å、半値幅は600Åとなる。アンプ出力は2kHzまでレスポンスのあるデータレコーダと22kHzまでレスポンスのあるソニーのオーディオ用プロセッサPCM-10+カセットVTRに記録をとった。これを後にミニコンで1ms間隔にデジタル化し、磁気テープに収録した。

潜入の時刻の測定は本来の目標ではないので、目耳法によるため±1秒の誤差はあるが、20^h18^m18^sで予測値と完全に一致した。

5. データの整約と視直径の決定

測光結果を計算と比べるための種々のパラメータは相馬充君に計算してもらった(図5)。前記潜入時刻の予測値も同君によるものである。

厳密には測光波長域が有限幅をもっていることを考慮に入れなければならないが、今の場合半値幅が小さいので有効波長でおきかえることとした。すなわち、 $\lambda_{\text{eff}} = 5.3 \times 10^{-7} \text{m}$ 、 $D = 3.766 \times 10^0 \text{m}$ を入れると、

$$\sqrt{\frac{3}{\lambda_{\text{eff}} D}} = 0.1001 \text{m}^{-1},$$

あるいは、

$$\sin 1'' \sqrt{\frac{D}{2\lambda_{\text{eff}}}} = 91.4$$

光度曲線は時間の関数として得られているのであるが、これを距離 a になおすためには影の速度 v を知らなければならない。恒星は遠方にあるので、これは観測

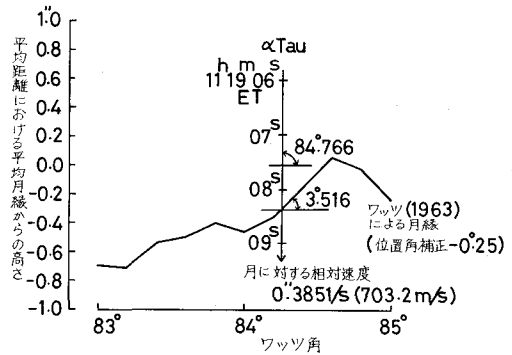


図 5 α Tau 星食 (1980.2.23) のパラメータ

東京大学天文学教室(東経139°47'47", 北緯35°42'45")におけるもの。 α Tau のロバートソンによる座標は赤経4^h34^m46^s.403, 赤緯16°28'03".35。ET-UT1=50^s。月の半径1738,065 km, 視半径951'865, 距離376628 km(天文学教室より月縁まで)。

点に対する月の相対速度と考えるとよいが、一般に恒星が月縁に角度をもって潜入するのでその効果を考慮に入れる必要がある。恒星の視直径が小さい場合は、光度曲線に回折パターンが出るので、その間隔から速度を求めることができる。前にも述べたように、月の縁の形は複雑であり、特に恒星の視直径が小さい場合にはきわめてローカルな(1mオーダーの)凸凹が問題となるから、これを未知数として求めることはぜひ必要である。しかし、 α Tau の場合回折パターンは出ないから、ワッツ(1963)の月縁図より計算で求めた結果、垂直成分として0.3844/s (695.0 m/s) が求まった。これから、

$$x = -69.57t$$

の関係が得られる(負号は潜入のため)。

フィッティングの結果(図6, 図7)一様円盤の場合、 $R = 1.8$ 、完全周縁減光の場合 $R = 2.0$ がベスト・フィットであると判定したが、これはそれぞれ $d = 0.020$ と $d = 0.022$ に相当する。シンチレーションの影響はかなり大きいですが、これは光量に比例しているので光度曲線のすその方を重点にフィットを行なった。 R が0.5ずれるとフィットは明らかに悪化するので、誤差は±0.005程度と考えられる。フィッティングは完全周縁減光の方がよいので、 α Tau の視直径は0.022±0.005と考えられる。

第1節で望遠鏡の口径が大きい場合は開口に対して積分を行なわなければならないと述べたが、0.022は影の大きさになおすと20mに相当し、口径60cmでは無視できる大きさである。

ジェンキンス(1952)による年周視差は0.048±0.004であるから、これを使うと α Tauの実径は一様円盤の場合太陽の45倍、完全周縁減光の場合太陽の49倍となる。

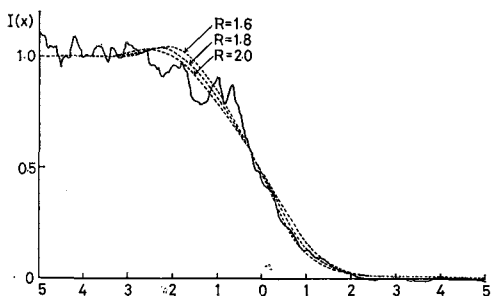


図 6 フィッティング: 一様円盤

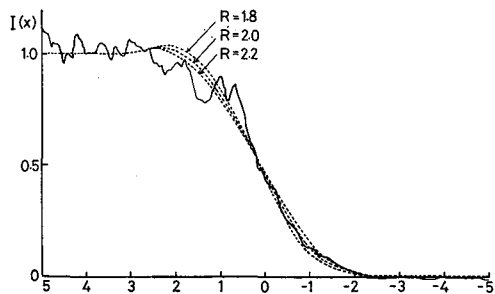


図 7 フィッティング: 完全周縁減光

6. マイコンによる測光観測の勧め

マイケルソン干渉計による α Tau の視直径の測定結果は 0'020, すでに発表されている星食による結果は 0'021, 0'023, 0'018 などであって, われわれの結果は良い線を行っている。モデル大気から表面温度をきめることで直径を求めることができるが, 一般にマイケルソン干渉計による結果はこれとよく一致している。強度干渉計による値は大きめに出るようである。星食による値

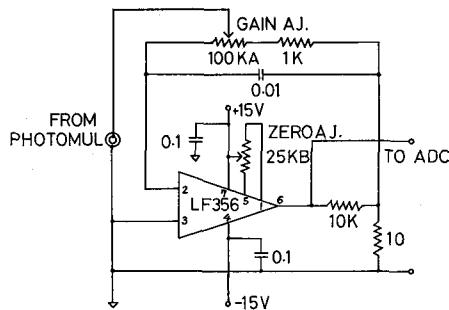


図 8 高速測光用アンプ

入力 0.01~10 μ A に対して出力 1V が得られる。

は実のところかなりバラついており, その小さい方の値はマイケルソン干渉計によるものに近い。これは月縁の形の影響と考えれば納得がいく。月縁が荒れていると減光の速さはゆるやかになり, 視直径を大きく見積ることになるからである。

星食の高時間分解能観測は測光装置とマイコンがあればアマチュアの方々でも実行できる。望遠鏡は大きいことを要しない。チャンスをとらえることがもっとも大切で, できるだけ多くの方々に参加して下さることが必要である。せんえつながらマイコンを使った測光観測についてももう少し詳しくお知りになりたい方は, 筆者による「天文と気象」の連載ものを参照いただきたい。図8に参考までに筆者の推奨する電気回路を示す。

終わりに, 観測に協力をして下さった渡辺鉄哉君, 星食のデータを提供して下さい下さった相馬充君に感謝の意を表す。

訃

報

本会元理事, 元東京天文台天体掃索部, 下保 茂氏は去る10月17日午後2時8分72才で逝去されました。

謹んで御冥福をお祈りするとともに会員諸氏にお知らせ致します。

本会元理事長, 元東京天文台長 広瀬秀雄氏は去る10月27日午後5時35分72才で逝去されました。

謹んで御冥福をお祈りするとともに会員諸氏にお知らせ致します。