

DOMELESS 太陽望遠鏡 (DST) 水平分光器におけるスペクトル線の倒れ角について

牧田 貢、船越康宏、岡本富三*

* 国立天文台

1. はじめに

太陽大気内のガスの運動を調べるべく、そのスペクトルをとり、ドップラーシフトを測定しようとするとき、スリットに沿った各観測点で、ドップラーシフトの基準点がどこにくるのか、が重要な問題である。例えば、幅40mmのスペクトル上で、スペクトル線が角度1分 (3×10^{-4} ラジアン) だけ分散方向に対して傾いていたとすると、スペクトル線の位置はその両端で $12 \mu\text{m}$ だけ異なっている。これがドップラーシフトによるものと考え、且つ、波長分散が $0.3 \text{ \AA/mm}$ 、測定波長を $5000 \text{ \AA}$ とすると、両端における視線速度の差は 0.22 km/s となる。回折格子分光器では、直線スリットの回折像は、一般には放物線であるが、結像系のFが暗い場合には直線とみなしてよい。この直線 (回折像或はスペクトル線) が分散方向に対して傾くのは、(1)スリットが回折格子の刻線を含む面に対して傾きを持つとき (スリットの回転)、及び、(2)入射光が刻線に垂直な面に対して傾きを持つとき (オフプレーン) がある。従って、適当な参照波長源によらずに視線速度を測定しようとする場合には、これらによるスペクトル線の傾きを補正することが必要である。また、現在議論されている太陽大気の数値場は時に 1 m/s の桁であり、スペクトル線倒れ角の視線速度への影響の検討は非常に大切である。

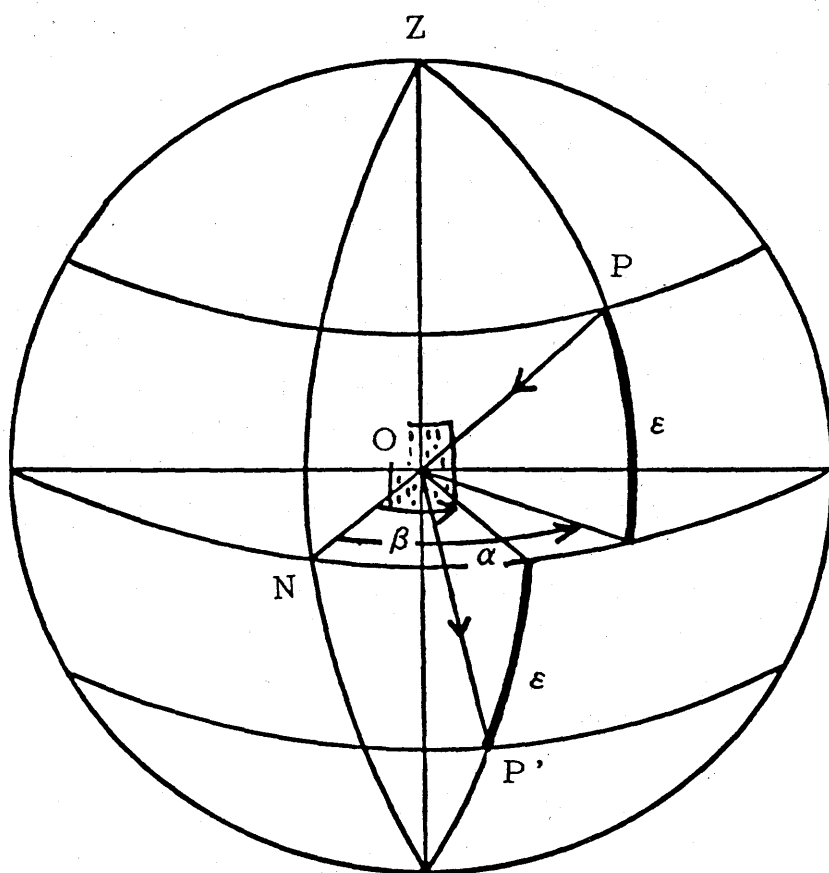
2. スペクトル線の倒れ

スペクトル線の倒れ角は Fig.1 の球座標を使って表すことができる。回折格子を球座標の中心Oにとり、格子面の法線をONとする。スリットからの入射光がP点から入り、回折光がP'点に出て行くとすると、P'点に出て来る光の干渉条件は次式で与えられる。

$$m\lambda = a(\sin\alpha + \sin\beta)\cos\varepsilon \quad (2.1)$$

ここで m はスペクトルの次数、 λ は波長、 a は回折格子定数 (刻線の間隔) である。今、観測している波長を固定して、入射の方向 (α, ε) が僅か変わるとすると、(2.1) 式から

Fig.1. 回折格子への入反射を示す球座標。



$$[\cos \alpha (d\alpha/d\varepsilon) + \cos \beta (d\beta/d\varepsilon)] \cos \varepsilon = (\sin \alpha + \sin \beta) \sin \varepsilon$$

が得られる。

$$\cos \varepsilon (d\alpha/d\varepsilon) = \tan \Phi, \quad \cos \varepsilon (d\beta/d\varepsilon) = \tan \Theta \quad (2.2)$$

とそれぞれおくと、 Φ はスリットの倒れ角、 Θ はスリットの単色像であるスペクトル線の倒れ角を表している。従って、次の式が成立する。

$$\tan \Theta \cos \beta = (\sin \alpha + \sin \beta) \sin \varepsilon - \cos \alpha \tan \Phi \quad (2.3)$$

入射角 α 及び出射角 β が既知とすると、(2.3)式は測定値より求めた $\tan \Theta \cos \beta$ が $(\sin \alpha + \sin \beta)$ と一次式の関係にあり、その勾配は $\sin \varepsilon$ 、切片は $\tan \Phi$ を与える (Fig.4 参照)。

3. スペクトル線倒れ角の測定

スペクトル線倒れ角の測定をドームレス太陽望遠鏡水平分光器で得た二種のデータについて行った。データ取得に用いた回折格子は No.3 ($a=1/600$ mm)、入射角 $\alpha=46^\circ 38'$ であった。

(1) 水平分光器の6箇所の窓(以後”ポート”と呼ぶ)で同時撮影した太陽のスペクトル線。スリットはD線が傾きゼロになるように傾けた。スペクトル線の中心位置を、スリット方向に沿って、東京天文台(現国立天文台)PDSで測定し (Fig.2)、それから倒れ角を求めた。結果は Fig.4 に縦棒で示してある。傾きについては右側縦軸のよみを使う。

(2) (1)と同じ入射角 α で、各ポート毎に、太陽を光源として撮影した I_2 ガスのスペクトル線 (Fig.3)。 I_2 のガス管(長さ40cm、3 mmHg)はスリットの前に置いた。スペクトルに写ったヘアラインとスペクトル線(太陽の線は幅広くぼけているが、 I_2 の線はシャープ)の交点を、2次元のニコン工場用顕微鏡でよみとり、倒れ角を求めた。測定は資料フィルム上のヘアラインが資料台のY軸に平行になるように置いて数回行い、且つ、複数のスペクトル線の測定を行うことによって、各回の平行度の補正をした。補正量は傾き角にして1分の程度であった。結果は Fig.4 の×点で示してある(傾きについては左側縦軸のよみを使う)。測定の中には、飛騨天文台のナルミ濃度計で測定したものが少数含まれている。また、ニコン顕

Fig.2. 太陽の吸収線の傾き。スリットに沿って（横軸）の中心波長（縦軸）の変化を示す。

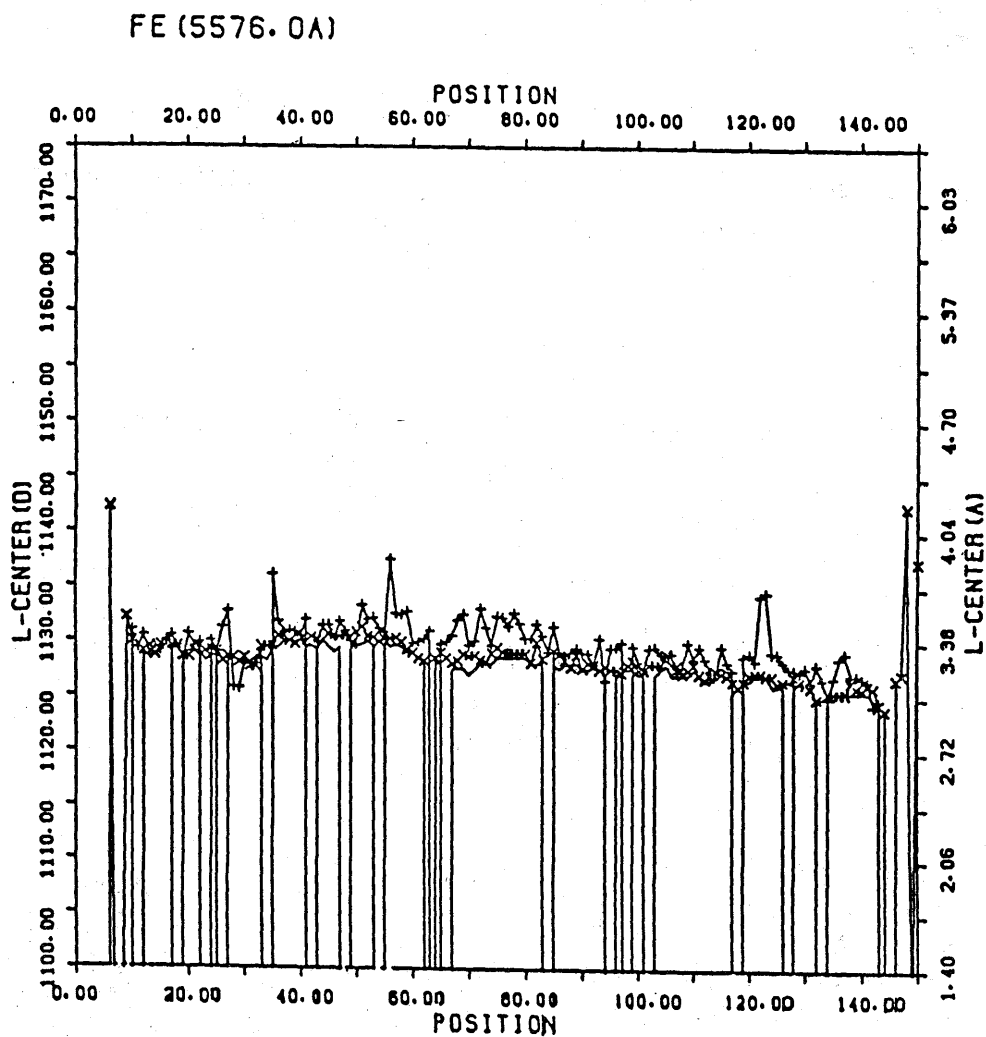
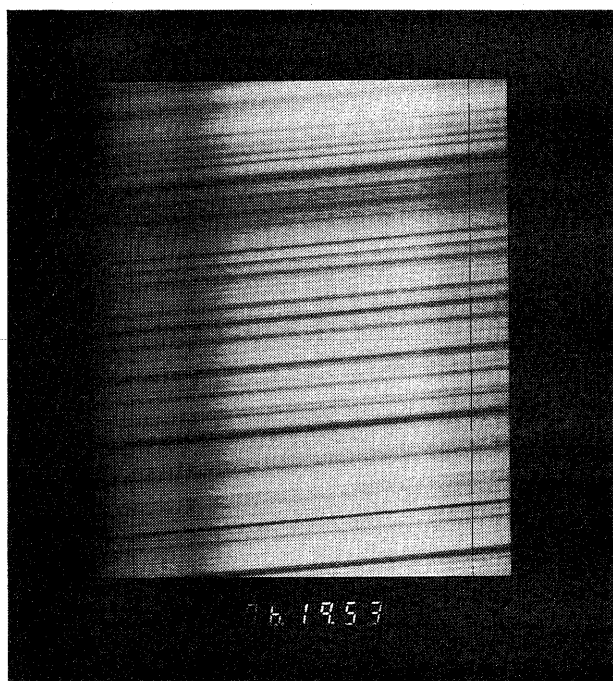


Fig.3. I_2 ガスの吸収スペクトル。ポート6でとったもの
($\alpha = 46^\circ 38'$, $\beta = 56^\circ 41'$)



ヘアライン

微鏡のXY軸直交性をみるために、資料フィルムを裏返して行った測定も含まれているが、有意な差は見いだされなかった。

4. 倒れ角測定精度

Fig.4 で、まず測定(2)のデーターをみると、測定値の散らばりは Θ の値にして ± 8 分の程度になる。測定値はヘアラインの間隔 40mm (Fig.3 参照) から求めたので、これを位置測定誤差になおすと 93 μm 、更に傾き角は二点の座標から計算されるので、測定点一つのみより誤差は 66 μm となる。資料台の上に資料を置く精度が 1分程度あると先にのべたが、これはのみより精度からくる誤差に較べて充分小さく、実際この補正をせずに作ったグラフは Fig.4 とあまり変わらない。各ポートで求めた傾きは、平均として直線からのずれは示さず、幾何学的に求めた $\varepsilon = 2.10^\circ$ (後段参照) の与える直線によくのっている。この直線から切片を求めると、スリットの倒れ角は $\Phi = 0.18^\circ$ (72mm ϕ のスリット板外周にて 0.11mmのずれに相当する) となり、スリットと回折格子刻線の平行度はこの程度ずれ得ることを示している。

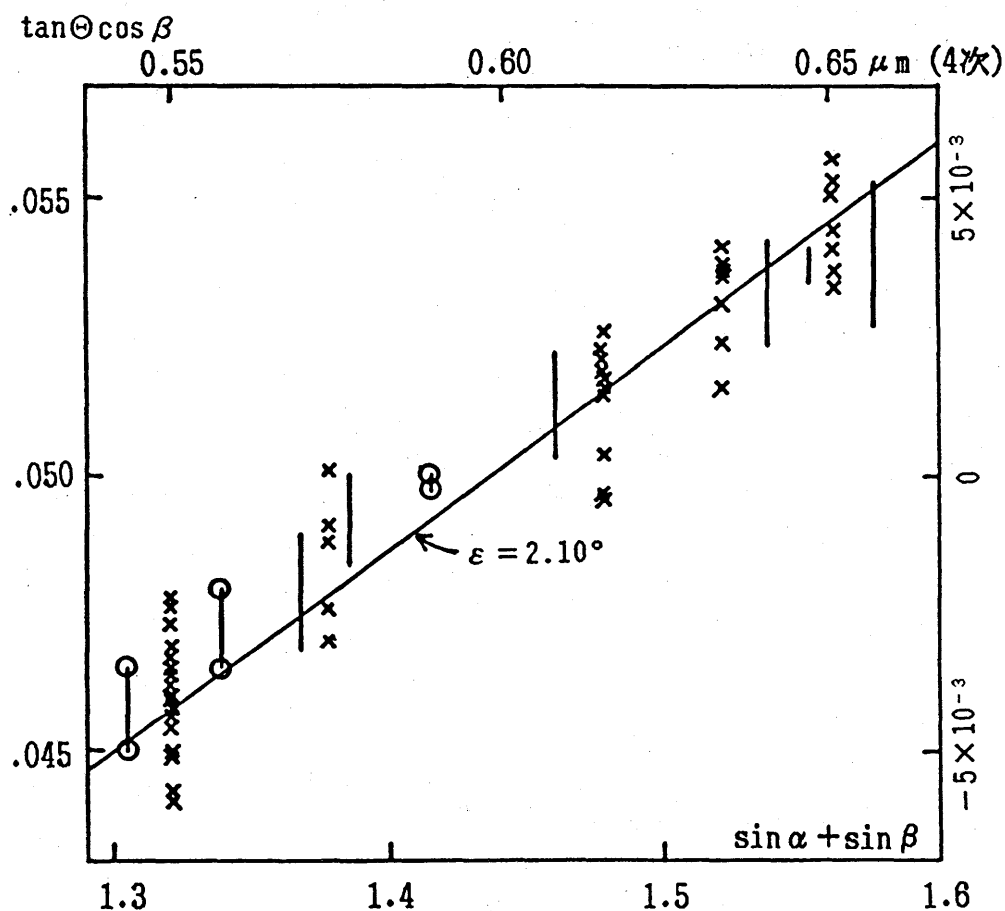
測定(1)の誤差(やや大きめに見積ってある)は測定(2)に較べて小さい。これは Fig.2 でみるように、スリットに沿った全ての点でのスペクトル線中心を平均するため、また、PDSという光電的測定のためであろう。各スペクトル線の傾きが直線にのらず曲がっている第一原因は、スペクトルの分散方向とX軸が充分一致していなかったためであろう。即ち、分散方向に長いスペクトル($\sim 22\text{cm}$)の結果を両端の丸い棒で示し、短いスペクトル($\sim 6\text{cm}$)と区別すると、前者が $\varepsilon = 2.10^\circ$ の直線と平行であるのに、後者のそれからのずれの大きいのは、測定(2)で行った平行度補正が必要といっているようである。

ここまでは撮影したスペクトル線の傾きについて論じてきたが、ここで方向を変えて、分光器の幾何学的構成から期待されるスペクトル線倒れ角の精度(不定性)を検討してみる。式(2.3)から明らかなように、スペクトル線の倒れ角は分光器構成素子の幾何学的配置で定まってくる。

(1) ε について

He-Neレーザーを分光器に入れ、ゼロ次での回折格子の反射角を知るべく、コリメーター上のレーザー位置と回折格子より反射して帰ってきたレーザー位置の間隔を測定した。測定誤差が $\pm 1\text{mm}$ (0.3%)

Fig.4. スペクトル線の倒れ角(Θ)。縦軸左は、測定(2) (ばつ)、右は、測定(1) (縦棒)の結果を示す。横軸下は、分光器回折光の出射方向に相当し、上はそれを4次スペクトルの波長で表したものである。斜めの直線は、分光器の幾何学的構成から期待される倒れ角を表す。



と見積ると

$$\varepsilon = 2.094^\circ \pm 0.006^\circ \quad (4.1)$$

となった。この不定性のために、Fig.4 の横軸の範囲内で縦軸に現れる変化を傾きに換算すると、高々 $0.1'$ であり、傾き角を直接測定した誤差に較べて極めて小さい。

(2) α, β について

6つのポートの中心にくる各波長を、太陽スペクトルを使って同定してみると、(2.1)式で計算した波長に較べて高々 $1\text{\AA}$ の差しかなかった。もし、これが全て $(\sin\alpha + \sin\beta)$ の項からくるとすると、その相対誤差は大ざっぱに $1\text{\AA}/5000\text{\AA} = 2 \cdot 10^{-4}$ となり、Fig.4 の横軸の変化が傾きに与える影響は見えないほど僅かで、(1)の影響より格段に小さい。他方、 $\cos\varepsilon$ から期待できる不定性は、(4.1)の関係によって 10^{-5} 程度の相対誤差にしかない。なお、格子定数 a は式(2.3)に含まれないので考慮外になる。

(3) 回折格子の回転軸と刻線の平行度について

回折格子の回転は、 $-70^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$ の範囲で、各ポートでのスペクトル移動が上下(分散に垂直方向)で 1mm 以内に収まるよう調整されている。この場合に、回転軸と刻線の方角のずれが最も大きくなるのは、Fig.5 で示すように、回転軸 OZ' が回折格子法線 ON と刻線方向 OZ の決める面内に傾いている時である。回転によって入射光の点 P は OZ' を軸として相対的に小円上を動き、 $\alpha = 90^\circ$ では近似的に ε が ϕ だけ増したことになる。従って、 $\alpha = \alpha_0$ における ε の増分は

$$\Delta\varepsilon \sim \phi(1 - \cos\alpha_0)$$

$\alpha_0 = 70^\circ$ とおけば、 $\Delta\varepsilon = 0.66\phi$ となる。一方、 $\Delta\varepsilon$ はスペクトルの上下移動から(分光器の焦点距離 = 10m)

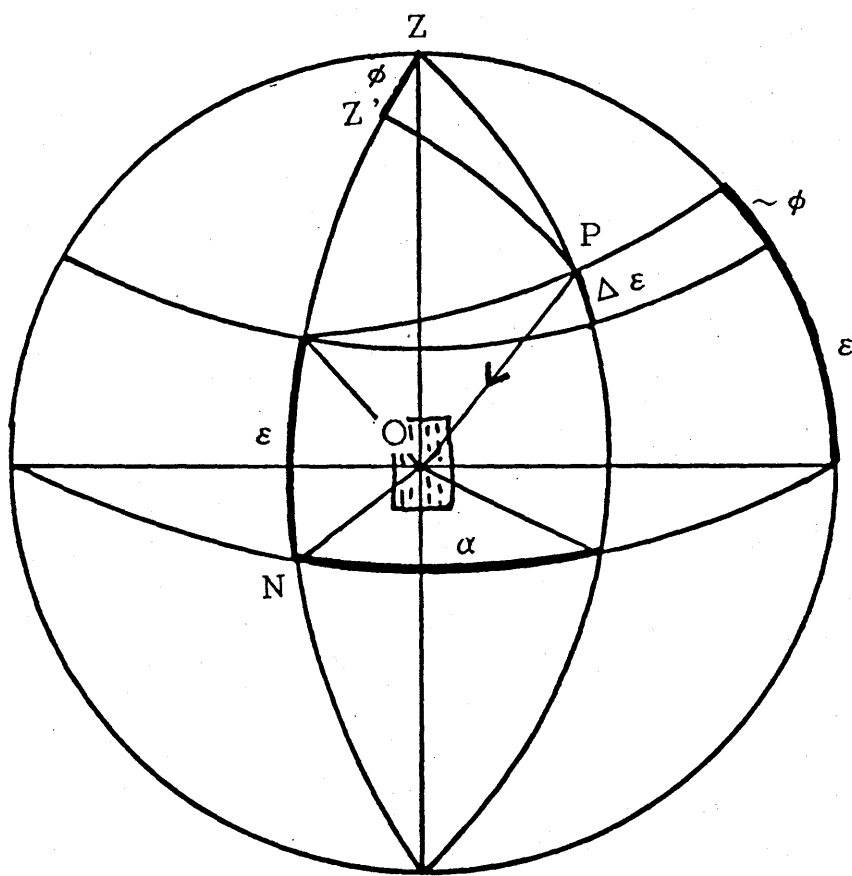
$$\Delta\varepsilon \leq (1/10^4) / 2 = 5 \cdot 10^{-5}$$

である。従って、両者を結べば

$$\phi \leq 5.3 \cdot 10^{-5} \sim 0.003^\circ$$

が得られ、(4.1)の測定誤差の半分以下である。

Fig.5. 回折格子の回転軸が、格子面の法線と刻線を含む面内に傾いている場合を示す球座標。



(4) Φ について

スリットの倒れ角 Φ は Fig.4 の直線の切片から求められるが、最も精度がわるい。すなわち、スペクトル線傾き角測定の精度がそのまま Φ の不定性となっている。

5. 結論

この仕事の発端は、Fig.4 で測定(1)が直線にのらないことからであった。測定(2)によって、測定(1)の結果は、分光器構成素子の幾何学的配置からは説明できないことが明らかになった。従って、測定(1)の原因は次の二つに絞られる。

(1) フィルム資料が短かったため、測定方向が十分に波長分散方向になっていなかった。

(2) 測定したスペクトル線が測定(2)のような地上の吸収源でなく太陽の吸収線であるため、実際にスリットに沿って系統的な視線速度の差があった。

上記については測定(1)の再検討が解決を与えるであろうが、以下に今後の視線速度測定についてまとめをしておく。

(1) 視線速度測定はスペクトル線の位置をよむことであるから、 I_2 のような実験室の吸収源、或は、地球大気の吸収線のような標準のスペクトル線にたいして相対的な測定をすれば、当然、分光器の構成によらず、即ち、スペクトル線の傾きに触れずに、視線速度がスペクトル線の位置よみとり精度でもとまるはずである。

(2) 測定した視線速度が本当に位置よみとり精度でもとまっているかどうか、それ以外に系統的なものがないかどうか、を知るために、分光器の構成からもとまるスペクトル線倒れ角を、測定した標準線の倒れ角と比較する事は、測定の信頼度を増す上で有意義である。第4章の議論で分かるように、分光器の構成の中で最も不定なのは、スリットの倒れ角であり、これを補うには出射角 β の異なる二箇所以上での測定が重要である (Fig.4 参照)。もし、測定の精度が $0.1'$ に近ずくと、第4章(1)で述べた ε の不定性が影響するようになり、分光器構成素子の幾何学的配置の不定性を考慮した比較が必要になるろう。