

リオ・フィルターによる太陽の狭波長帯域撮像

桜 井 隆

Narrow-Band Imaging Observations of the Sun Using a Lyot Filter

Takashi SAKURAI

A filter based on the birefringence of optical crystals (calcite and quartz), invented by French astronomer Bernard Lyot in the 1930s, is still widely used in solar observations requiring narrow-band wavelength selection. The principle of its operation and current status of its usage are described.

Key words: sun, imaging, birefringence, narrow-band filters

1. 太陽観測の概要

太陽は表面温度が約 6000 度の星で、その放射は大体可視光域 (380~770 nm) にある。放射強度の波長分布は、ピークが 500 nm 近辺 (緑色) にくる黒体放射で近似的に表されるが、それに重畳して多くの吸収線がある (図1)。これは太陽表面では温度が外ほど低いために、太陽を構成する水素、ヘリウム (ただし次段落の注意事項を参照)、またナトリウム、カルシウム、鉄といった元素がおおのその決まった波長の光を吸収するからである (太陽はほとんど水素とヘリウムでできており、重量比では水素が 71%、ヘリウムが 27% で、その他の元素は全部足しても 2% にすぎない)。

太陽はガスであるため、地球のようなはっきりとした表面はなく、いろいろな深さからの光が混ざったものをわれわれは見ている。しかし、深い層からの光は吸収されてわれわれには届かず、また浅い層のガスは希薄であり強い光を出さないため、われわれの見る光のほとんどが出てくる層というのが定義できる。これを天文学では光球とよんでおり、厚さ数百 km である。太陽の半径 70 万 km に比べればごく薄い層であり、ほとんど「表面」と同義となる。光球の上には、約 2000 km の厚さ (太陽半径の 0.3%) の彩層がある。彩層は皆既日食のときにピンク色に見えることからこう名づけられた。温度は 1 万度程度で光球より高温だが、彩層のガスも太陽のスペクトルに吸収線を作り出

す。これは彩層が希薄であるため、ガスを構成する粒子は 1 万度に相当する熱速度で飛び回っているが、粒子同士が衝突して光を放射するような励起状態にはなかなかならないことによる。ヘリウムは最初太陽の彩層のスペクトルにおいて発見された (1868 年) もので、光球のスペクトルには現れない。彩層の上には温度が 2 百万度にも達する超高温のコロナが続く。彩層、コロナがなぜ太陽表面より熱くなるのか、という大気加熱の問題は天文学上未解決の研究課題であるが、ここでは立ち入らないことにする。

望遠鏡で太陽の画像を作り、それをフィルムや CCD で記録する場合、太陽から来るほとんどすべての波長の光を記録することになるので、得られる画像は白色光 (white light) 画像とよばれる (CCD は波長 1000 nm くらいまでの近赤外線にも感度がある)。色フィルターなどで観測波長の幅を数十から数 nm に限定しても、観測に寄与する光は吸収線でなく連続光であるので、得られる画像は連続光画像 (continuum image) あるいは広波長帯域画像 (broad-band image) となる。これらはすべて、多少の深さの差はあるものの、光球からの光を受けていることになる。一方、彩層で形成される吸収線、たとえば波長 656.3 nm の H α 線は幅が 0.1 nm くらいなので、その部分の光だけを取り出して画像を作れば、H α 線の単色像 (monochromatic image) が得られる。「単色」はやや誇張表現なので、スペクトル線の幅と同程度の波長幅の光を取り出して撮影した

H α 線



波長 →

図1 太陽のスペクトルの赤色部分 (645~685 nm). 左の強い吸収線は H α 線 (656.3 nm). (国立天文台乗鞍コロナ観測所提供)

画像を狭波長帯域画像 (narrow-band image) ともよぶ.

なぜ H α 線での彩層観測が重要かというと、フレア爆発のような激しい現象が彩層観測ではみられ、これが地球上での磁気嵐などの原因ともなっているからである。しかし透過波長幅が 0.1 nm を切るような狭帯域フィルターは、リオ・フィルターができるまでは存在しなかったもので、それまではスペクトロヘリオグラフという方式が用いられた。これを発明したのは、フランスのデランドルとアメリカのヘル (カリフォルニアのウィルソン山天文台の口径 200 インチ望遠鏡などを作った天文学者) で、1905 年ころのことである。スリット分光器で太陽のスペクトルを作り、H α 線の部分の波長のみを取り出す第 2 のスリットを写真乾板の上に置く。太陽の画像上を、スリットを動かすのと同期して写真乾板上のスリットも移動させると、H α の波長だけで撮影した太陽の画像ができる。この方法の利点は、原理的にどのスペクトル線でも使え、また使う波長の幅もコントロールできる点である (したがって現在でも使われている)。しかし大型の分光器が必要であり、また、ある程度の領域をスキャンするのに時間がかかる。これを解決し、小型のフィルターで H α 単色像を得られるようにしたもののがリオ・フィルターである。

2. 複屈折フィルター (リオ・フィルター)

フランスの天文学者ベルナール・リオ (1897~1952) が結晶の複屈折を利用した狭帯域フィルターの開発を始めたのは 1920 年ころで、当初はコロナ観測を想定し、コロナのスペクトル輝線 530.3 nm 用のものを製作した。リオはコロナグラフの発明者としても知られており、コロナを観測する際の空の背景光を減らすために狭帯域フィルターを考えたものと思われる。1933 年に透過幅 0.1 nm の初号器が完成、1938 年にはこれを改良し、H α 線も透過幅 0.3 nm で観測できるものを作った¹⁾。今ではこの方式の狭帯域フィルターを、複屈折フィルターまたは発明者の名前をとってリオ・フィルターとよんでいる。原理の説明は、後に出版された Evans の論文²⁾ によくまとまっており、以下

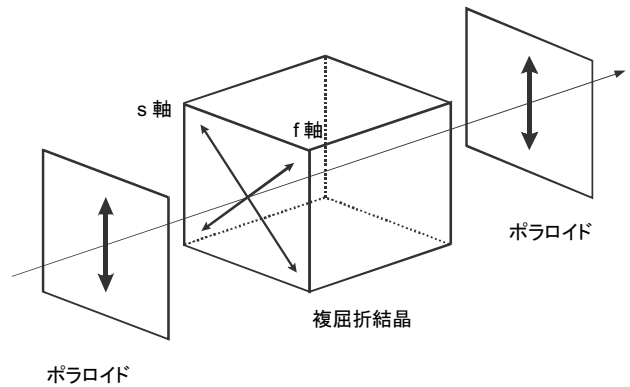


図2 リオ・フィルターの基本素子。

それに従って解説する。

2.1 原 理

リオ・フィルターに用いる単軸性の複屈折結晶 (方解石や水晶) では、光学軸 3 つのうち 1 つに沿って光線を入射させる。光線に垂直な面 (光の電気ベクトルが振動する面) には 2 つの結晶軸が含まれる。電場の振動がどちらの結晶軸方向であるかによって、複屈折のため光の伝搬速度が異なる。伝搬速度が遅い振動方向を遅軸 (s 軸)、速い振動方向を速軸 (f 軸) とよぶ。おのおのの屈折率を n_s 、 n_f と書けば、 $n_s > n_f$ である。方解石は 2 本の s 軸と 1 本の f 軸をもつ結晶で、 n_s 、 n_f が大きいので大きな遅延を出すために用いられる。水晶は 2 本の f 軸と 1 本の s 軸をもち、小さな遅延を与えるために使われる。

リオ・フィルターの 1 つの素子は、複屈折結晶の結晶軸と 45° の角度をなす向きに偏光面があるポラロイドを結晶の両端につけたものである (図 2)。入りのポラロイドに光が入ると、直線偏光が生成され、それと 45° をなす結晶軸方向の成分に分配される。おのおのの成分は異なった速度で結晶中を伝搬するので、出口のポラロイドのところで一般にはそのまま通過はできず、波長によって通りやすい波長とそうでない波長ができる。結晶の長さを d 、光の真空中の波長を λ とすると、出射光は波長方向の山の幅が

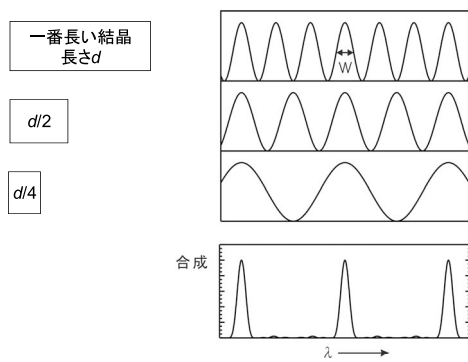


図3 リオ・フィルターの透過特性合成の原理.

1981 SEPTEMBER 22
21.55-22.03

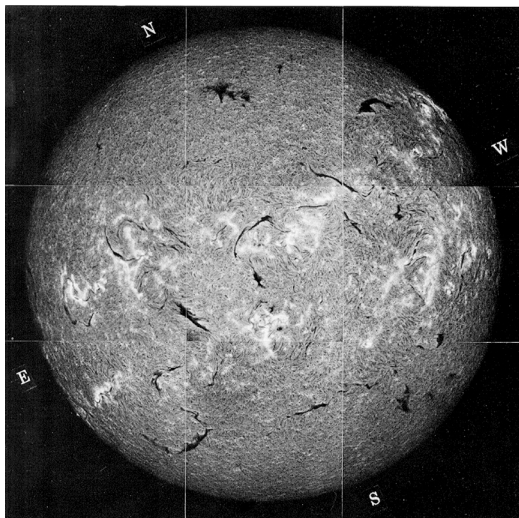


図4 彩層のH α 線画像(国立天文台乗鞍コロナ観測所提供). 9枚の画像を貼り合わせて太陽全面画像としたもの.

$$W = \frac{\lambda^2}{2d(n_s - n_f)} \quad (1)$$

であるような正弦波的強度変調を受ける(図3a). 結晶の長さが $d, d/2, d/4, \dots$ である素子を作って直列につなげると, 総合した透過特性は図3dのようになり, ある波長の光だけが通るようになる(遠くに出る別の透過ピークは, あまり透過幅の狭くない干渉フィルターで取り除くことができる). 図3aのような性質はリオの前にも知られていたと思われるが, これを組み合わせると狭帯域フィルターができる, というアイデアはリオの天才的ひらめきによるものであろう.

図4は観測例を示したもので, 連続光でみる太陽は黒点以外には特に目立った構造がないのに対し, H α 線で見ると彩層は多数の筋模様で覆われている. これは太陽の大気の中を貫く磁力線を表したもので, 磁力線のゆがみが増加し

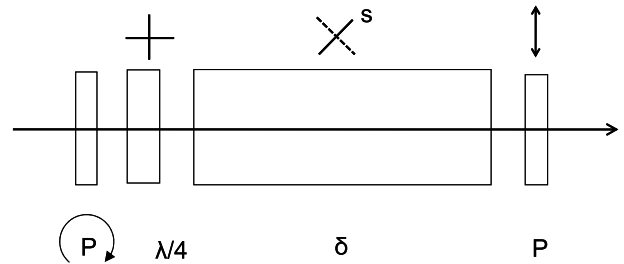


図5 波長可変型素子 (tunable element). 図中の+や×は結晶の軸方向を光線の進む向き(この図では左側)から見て示したものである. δ が方解石結晶, Pはポラロイド, $\lambda/4$ は四分の一波長板. 左端のポラロイドが回転して透過波長を変える.

ていくとフレア爆発に結びつく.

2.2 フィルター使用の実際

H α 線($\lambda = 656.3 \text{ nm}$)では, 方解石の屈折率が $n_s = 1.6544$, $n_f = 1.4846$ であるから, $W = 0.05 \text{ nm}$ の透過半値幅のフィルターを作るには, $d = 26 \text{ mm}$ の結晶がある. 温度が変わると屈折率も変わり, 波長透過特性が変わってしまうので, フィルターは温度制御しなければならない. 温度 1°C の変化で透過波長は $0.3 \text{ \AA}$ も変化するので, 0.1°C よりよい温度安定度が必要である.

実際のフィルターでは, この基本形以外の素子が多く使われる³⁾. 観測波長を変化させるためには, 方解石とポラロイドの間に四分の一波長板(s軸とf軸の間の位相差が $1/4$ 波長となる遅延子, 普通水晶で作る)を挟み, ポラロイドを回転させると, その素子の図3の正弦波のような透過パターンを図上左右に動かすことができる(図5). あるいはポラロイドを回転させる代わりに, ポラロイドと二分の一波長板(位相差が $1/2$ 波長である遅延子)を組み合わせ, ポラロイドは固定, 二分の一波長板のほうを回しても同じ効果が得られる. このような波長移動の仕組み(tunable element)を, 最も長い結晶(長さが $d, d/2$ など)につければ, 波長板またはポラロイドを回転させて観測波長を変えることができる. たくさんの素子を波長可変型にすれば, 広い波長範囲に透過波長を動かせるが, それだけフィルターは複雑になり高価になる.

基本的な素子では, 光が斜めに通るとき, 入射角度が大きいと透過波長特性が変わるので, フィルターとしての機能が損なわれる. この効果をできるだけ打ち消すために, 広角化素子(wide-field element)というものが用いられる(図6). これは1つの方解石を2分割して90度回転し, 真ん中に二分の一波長板を入れたものである. これでも, 角度 θ をなす光線に対して, 透過波長は本来の波長より下記の $\Delta\lambda$ だけずれる.

0.01 nm くらいしかないので、フィルターとして高性能のものが要求される。図7は国立天文台・三鷹の太陽フレア望遠鏡に装着されているリオ・フィルターの内部構造で、5個の広角化かつ波長可変型素子と、その他の素子2組からなる。全長40 cm、重さ20 kg 程度のものである。

3. リオ・フィルターの現況

リオの発明後、1950年代になるとリオ・フィルターは市販品としてドイツのHalle社 (Bernhard Halle Nachfolger GmbH) と Carl Zeiss 社から供給された。Halle 社の $H\alpha$ フィルターは透過波長幅 0.05 nm で、波長可変素子が2つしかついていないため、波長調整範囲は 0.2 nm しかないが、軽量簡便 (長さ20 cm、直径10 cm、重さ10 kg 程度、波長変更は手動) で、約200台が生産された (現在では保守しか行っていない)。国立天文台でも4台保有している (図8左)。Zeiss 社のものは透過波長幅 0.025 nm で、7つの偏光素子すべてが波長可変であるため、波長調整範囲は 1.6 nm ある (波長変更はモーター駆動)。生産台数は数十台であったと思われ、こちらも現在では保守しか行っていない。日本国内には3台しかない (図8右)。両社は初期にはオーダーメイドで $H\alpha$ 線以外のフィルターも製作した。1980年代になると、中国科学院南京天文儀器廠 (現在、天文光学技術研究所) が北京天文台用のフィルターを生産

したのをきっかけに、オーダーメイドのリオ・フィルターを受注し、日本国内にも10台程度が納品され使用されている。このほか、天文、光学関係の研究所が単品で製作することもあり、例えばひので衛星 (2006年打ち上げ) 搭載の狭帯域フィルターはアメリカのロッキード・マーチン先端技術研究所が製作したものである。

現在では、狭帯域フィルターはリオ・フィルターだけでなく、ファブリー・ペローのエタロンなども市販品があり、また多層膜干渉フィルターでも透過幅が1 nm を切るものが手に入る。しかしリオ・フィルターは、ポラロイドや内部に充填されている光学オイルの劣化 (これらの交換は比較的安価で済む) を除けば、きわめて安定長寿命の装置であり、今後も太陽の狭帯域観測の主要装置として用いられると思われる。

文 献

- 1) B. Lyot: "Le filtre monochromatique polarisant et ses applications en physique solaire," *Ann. Astrophys.*, **7** (1939) 31-79.
- 2) J. W. Evans: "The birefringent filter," *J. Opt. Soc. Am.*, **39** (1949) 229-242.
- 3) 桜井 隆: "太陽大気と彩層・コロナの加熱", 宇宙天気科学—太陽地球環境—, 柴田一成, 上出洋介編 (京都大学学術出版会, 2010), 印刷中.

(2010年7月13日受理)