

太陽の周縁減光における波長依存性についての観測的研究

川口市立高等学校

天文部 櫻井 優輝 江口 真由美 小倉 遙河 小泉 翔愛 佐々木 健人 寺原 直希
中根 陽輝 井上 円花 加藤 杏花 釜付 七輝 齋藤 夕真 鈴木 虹花 渡部 風香

抄録

太陽には周縁減光と呼ばれる、中央部から周縁部に向かって暗くなるという現象がある。今回はウィーンの変位則、シュテファン・ボルツマンの法則、プランクの法則によって説明できる周縁減光の波長依存性を観測によってとらえることができた。また、そこから関係式を導出し太陽中央部の温度と深さを求めることができた。

1. 研究の背景と目的

私たちは、学校で所有している分光器を活用した研究に取り組んでいる。今回は、太陽の周縁減光について研究を行った。太陽の周縁減光は、太陽の中央部に比べて周縁部に向けて徐々に暗く見える現象である。図1に示すように、太陽の中央部ではより高温な層からの光を観測できるが、周縁部では比較的低温な層から発せられた光しか観測でき

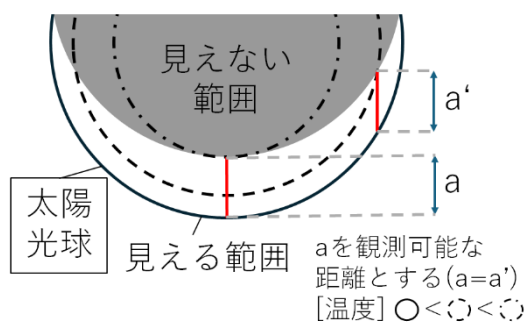


図1 太陽の観測範囲

ない。これは、中央部では太陽の深い層まで見通すことができるため、高温なガスから放射された光が届く一方、周縁部では浅い層までしか見通すことができないため、低温なガスから放射された光しか届かないからである。そこで私たちは、周縁減光の割合に波長依存性があるかを調べ、その理由について追及するために今回の研究を行った。また、周縁減光の波長依存性から太陽中央部の波長ごとの温度からその見通せる深さについて理論的に求めた。

2. 方法

【観測】望遠鏡と分光器を固定し太陽の日周運動により太陽がその視直径分移動する約2分間のスリットスキャン低分散分光観測(350~700 [nm])を行った。

日時：2025年8月19日12:21:37~12:24:04(JST) 天候：晴れ

場所：埼玉県川口市 川口市立高等学校屋上

機材：屈折望遠鏡(口径60mm、焦点距離330mm Sharpstar ED60)

低分散分光器 VEGA(昭和機械製作所)

減光フィルターND10000+ND8 カメラ ZWO ASI 178MM

【解析】

① 太陽のスキャン方向の直径における周縁減光を求める。

- ・観測データをすばる画像処理ソフト“マカリ” [1] と MS Excel を用いて、理科年表 [2] 太陽フラウンホーファー線の波長データを基に波長付けを行う。

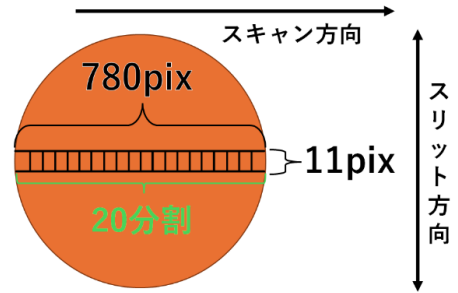


図 2 太陽の解析方法

- ・観測で得られた太陽のスペクトルデータ 395 枚を図 2 のように縦を太陽直径の約 70 分の 1 の幅(11pix)で、横はデータを 7 秒ごと(図 2 のように 20 分割)に分けて加算平均する。
- ・スリットスキャンしたデータを分割した領域で平均スペクトル強度を 350nm から 700nm まで 50nm 毎に求める。
- ・それぞれの波長帯におけるスペクトル強度の最大値を 1 として、周縁減光の割合をグラフに表す。(この方法は Solar Astrophysics [3] によるもので、一定のセンサー位置を使用しているため、Dark Flat の一次処理を必要としないという利点がある。)

② プランクの法則を利用して、波長ごとの温度と観測できる中央部の深さを求める。

- ・プランクの公式 [4]

$$B_{\lambda}(T) = \frac{(2hc)^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{(hc/\lambda k T)} - 1}$$

$B_{\lambda}(T)$: 温度 T [K] , 波長 λ [m] における
分光輝度

h : プランク定数 $6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

c : 光速 $2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$

k : ボルツマン定数 $1.380649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

T_0 : 中央部の温度

を利用して、太陽の周縁部の温度を T (本研究では $T=5.8 \times 10^3 \text{ K}$)としたとき

$$\frac{B_{\lambda}(T)}{B_{\lambda}(T_0)} = \frac{\frac{(2hc)^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{(hc/\lambda k T)} - 1}}{\frac{(2hc)^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{(hc/\lambda k T_0)} - 1}}$$

と表すことができ、 $\frac{(2hc)^2}{\lambda^5}$ は約分される

ので $\frac{e^{(hc/\lambda k T_0)} - 1}{e^{(hc/\lambda k T)} - 1}$ と表される。これを利用

して、 $B_{\lambda}(T)/B_{\lambda}(T_0)$ の比、つまり太陽

の中央部と周縁部の輝度比 I/I_0 が、①で求めたスペクトルデータを利用して $(I/I_0) =$

$B_{\lambda}(T)/B_{\lambda}(T_0)$ の関係を用いて、波長ごとに T_0 の値を求める。また、前文で求めた T_0 と太陽の温度と高さの関係を表した先行研究論文 Gingerich, Noyes, Kalkofen and Cuny, Solar Physics 18, 347(1971) [5] を用いて、観測できる太陽の中央部の深さを求める。(波長 λ は各波長の階級値、太陽の中央部の温度、高さは有効数字 2 桁で表す。)

3. 結果

太陽の周縁減光と波長依存性についてのグラフ

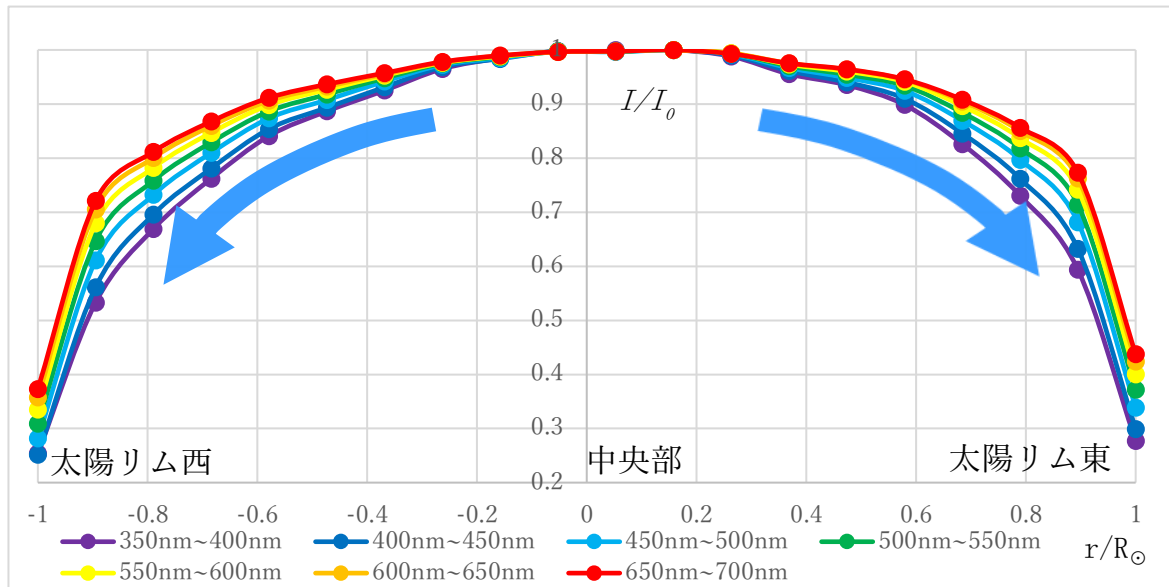


図3 太陽の半径比(r/R_{\odot})と各波長のスペクトルの相対強度(I/I_0)のグラフ

- ・ 太陽の周縁部に近づくにつれ各波長域ともにスペクトル強度が弱くなっている。
- ・ 短波長のほうが長波長に比べて、スペクトル強度の減衰が大きい。
- ・ 中央部付近では、波長ごとの強度比の差がほとんど出ていない。

表1 各波長における太陽中央部の温度と高さ

波長 [nm]	太陽中央部の温度 [$\times 10^3$ K]	図4と温度から求めた高さ [km]
350~400	7.2	-2.6×10
400~450	7.4	-2.9×10
450~500	7.5	-3.0×10
500~550	7.5	-3.0×10
550~600	7.5	-3.1×10
600~650	7.5	-3.1×10
650~700	7.6	-3.2×10

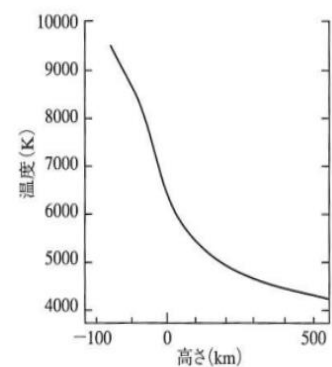


図4 太陽の温度と高さの関係
Gingerich, Noyes, Kalkofen and Cuny,
Solar Physics 18, 347(1971) [5]

- ・ 波長が長くなるほど、温度が高くなり高さが低くなる。
- ・ 負の高さは深さである。

4. 考察

まず、太陽の中央から周縁に向けてスペクトル強度の減衰があった。また、短波長になるほど周縁減光が大きくなるという波長依存性が見られた。理由として、太陽は半透明なガスで構成されており中央部では表面からより深く、温度が高い部分まで見ることができるのに対し、周縁部では表面から浅く、温度が比較的低い部分しか見ることができないためだと考えている。

スペクトル強度の減衰があったのはシュテファン・ボルツマンの法則によるもの、波長依存性が見られたのはウィーンの変位則によるものだと考えられる。図 5、6 において、実線の矢印はシュテファン・ボルツマンの法則を表しており、黒体から放射されるエネルギーの総量が、黒体の絶対温度の 4 乗に比例し、黒体の温度が高いほどより多くのエネルギーを放射するという法則である。また、図 5、6 において、破線の矢印はウィーンの変位則を表しており、黒体から放射される電磁波のスペクトルにおいて、放射強度が最大となる波長が、黒体の絶対温度に反比例し、黒体の温度が高いほどピークとなる波長は短くなるという法則である。また、表 1 のように波長が長くなるほど中央部の温度も高くなるのは、短波長の光のほうがより多くの光が吸収・散乱しやすいためだと考えた。

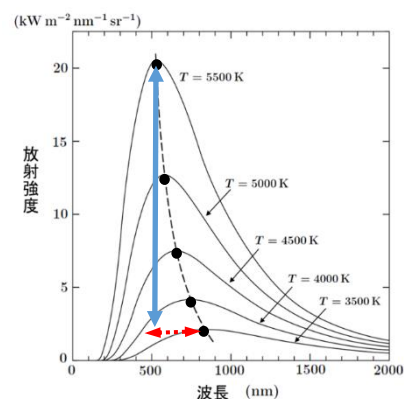


図 5 波長と放射強度の関係

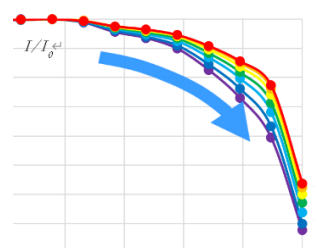


図 6 図 3 の一部

5. 結論

今回の研究で周縁減光に波長依存性があることが確認できた。特に可視光領域について詳細な減光の様子が分かり、その理由についても考察することができ、周縁減光を用いて太陽の中央部分の温度も推定した。今後の研究では、太陽のスリット方向の直径においても波長依存性が見られるか研究するとともに、波長が長くなるほど中央部の温度が高くなる理由を追求していきたい。

6. 参考文献

- [1] 画像処理ソフト マカリ <https://makalii.mtk.nao.ac.jp/index.html.ja>
- [2] 理科年表 2007 国立天文台編
- [3] Solar Astrophysics Peter Foukal Third, Revised Edition
- [4] 天文学辞典 <https://astro-dic.jp/>
- [5] Gingerich, Noyes, Kalkofen and Cuny, Solar Physics 18, 347(1971)