

# 狭帯域チューナブルフィルターUTF-32 及び 1/8Åブロックの性能評価

宮良碧、野澤恵(茨城大学)

一本潔、大辻賢一、木村剛一(京都大学)、萩野正興(国立天文台)

## 概要(Abstract)

京都大学大学院理学研究科附属飛騨天文台で開発、観測を行ってきた狭帯域チューナブルフィルター(UTF-32)は液晶可変遅延素子を用いた高速波長チューニングが特長であり、太陽表面の高速現象の面分光観測に適している。本講演では UTF-32 を用いた太陽活動現象の観測例及び、UTF-32 の波長分解能を向上させる 1/8Åブロックの性能評価について報告する。また、1/8Åブロックの機能をキャンセルする機構について、現状での問題点を報告する。

## はじめに

太陽観測においては、分光測定は太陽表面で発生する様々な活動現象の観測に欠かすことが出来ない手段である。太陽スペクトルの解析から、速度や温度、磁場といった物理量の測定を行うことが出来る。しかし恒星等の観測と比べ、太陽は点光源ではなく有限の広がりを持つ天体であるため、スリットを用いた分光観測では必然的にスリット位置を動かしてスキャンすることで観測対象全体をカバーする必要がある。スキャン幅と時間分解能はトレードオフの関係となっており、大きな観測対象全体をスキャンすることは時間分解能が犠牲となる。太陽ではフィラメント噴出現象のような、100秒角以上の広がりを持つ物体が高速で運動する現象が発生するが、通常のスリット分光観測では時々刻々と形状を変化させる対象の動きを追うことは困難である。このため、2次元面を短時間で分光観測することが可能な面分光観測が有力な手段となる。面分光にはマイクロレンズアレイを用いて多数のスペクトルを一度に取得する方法もあるが、空間分解能の低さや視野の狭さといった問題が生じる。それを解決するのが、観測波長を変更可能なフィルター(チューナブルフィルター)を用いて多波長観測を行う手法である。太陽観測ではこれまでも、リオフィルターやファブリペローフィルターといったチューナブルフィルターを用いた観測が行われてきたが、波長選択にかかる時間や透過幅などに改良の余地があった。飛騨天文台では、リオフィルターの回転波長板を液晶可変遅延素子に置き換えることで、高速に波長選択が可能なチューナブルフィルター(UTF-32)の開発を行ってきた。本稿では、UTF-32の原理と内部機構の解説及び、実際に太陽観測に用いて得られた結果について報告する。また、UTF-32の波長分解能の向上を目的とした追加ブロックである「1/8Åブロック」についても紹介し、現時点での課題についても取り上げる。

## 1. 狭帯域チューナブルフィルター UTF-32

UTF-32 の名称は、設計段階でのコンセプトである「Universal すなわち、特定の波長帯のみならず様々な観測波長で用いることが可能な Tunable Filter (有効口径 32mm)」に由来する。UTF-32 は 7 段のブロックを直列に配置した層構造をしており、それぞれの段は、方解石 (16 Å ブロックのみ水晶板)、直線偏光板、液晶可変遅延素子 (Liquid Crystal Variable Retarder: LCVR)、1/2 波長板からなる。入り口側にはブロッキングフィルターを置き、UTF-32 の free spectral range ( $H\alpha$  線近傍で 32 Å) に相当する波長帯以外の透過光をブロックしている。ブロッキングフィルターは観測する波長によって交換することが可能で、 $H\alpha$  線の他にも He I 10830 Å や Ca II 8542 Å 用のブロッキングフィルターを用いた観測も行うことが出来る。図 2 には、7 段のブロックそれぞれの透過プロファイルおよびフィルター全体の透過光を示す。一番上が図 1 の一番右の段の透過光と対応している。透過プロファイルの半値幅 (FWHM) は  $H\alpha$  線付近でそれぞれ、16 Å、8 Å、4 Å、2 Å、0.5 Å、0.25 Å、1 Å である。ここでブロック列の最後に 1 Å ブロックを持ってきた理由は、このブロックの最後尾の直線偏光板を取り外して偏光ビームスプリッターを設置可能とするためである (詳細は後述)。全ての段を合わせた透過プロファイルを図 1 左の最下段に赤線で示す。 $H\alpha$  線付近での透過光の半値幅は 0.25 Å、free spectral range は 32 Å、fineness は 128 となり、狭帯域を実現している。 $H\alpha$  線幅に対して UTF-32 の透過幅が十分狭いことがわかる。UTF-32 は、液晶可変遅延素子を用いていることで、偏光板などの光学素子を回転させる必要がなく、電圧制御による波長制御が可能になり任意の波長に高速 (0.1 秒程度) でチューニングすることが可能になっている。加えて、取り付けられた偏光ビームスプリッターによって最終的な出射光を直交 2 偏光に分けて、その先にそれぞれ取り付けられた 2 台のカメラで 2 波長同時撮像を行うことができる。図 2 右は Dual mode すなわち偏光ビームスプリッターによって直行 2 偏光成分同時に観測する際の各ブロックの様子を示したものである。この 2 偏光は透過波長が 1 Å 異なるため、例えば  $\pm 0.5$  Å の透過光を同時に観測することが可能となる。さらに、液晶や偏光板などの素子は 5000 Å ~ 11000 Å の幅広い波長帯で使用可能なものが用いられている。ブロッキングフィルターを用いることによって波長の範囲内であればどのような波長でも観測可能である。以上のように UTF-32 には、高速波長スキャン、2 波長同時観測、広波長域で使用可能という特徴がある。

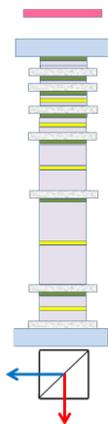


図 1: UTF-32 の模式図。上が入射側。

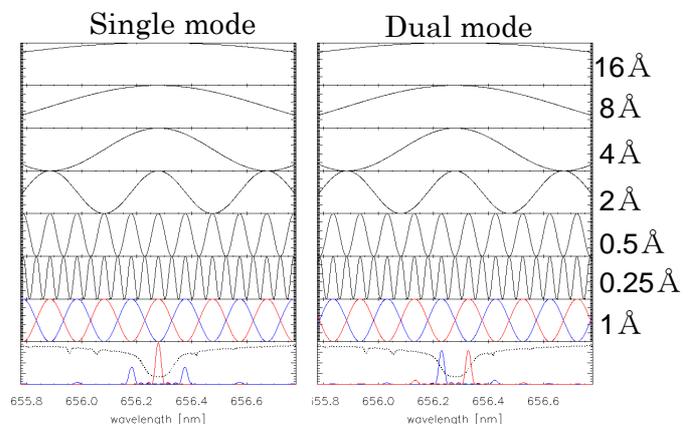


図 2: UTF-32 の各段の透過プロファイルと最終的な透過ピーク (最下段)。左が single mode、右が dual mode。

## 2. 観測例

図3は、2019年5月4日 22:04~24:20 (UT) に飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡にて UTF-32 を使用して観測された太陽活動領域 12740 で発生したフィラメント噴出現象の  $H\alpha$  線像である。ドームレス太陽望遠鏡はグレゴリー式反射望遠鏡で、有効口径は 600mm である。この観測は、UTF-32 の dual mode を使用して  $H\alpha$  線センター(6563Å)と+1Å、および  $H\alpha$  線 $\pm 0.5\text{\AA}$ の観測波長をそれぞれ同時に取得する手法で行った。露出時間は 8 ミリ秒、時間分解能は 10 秒となっている。1 波長あたり 50 フレーム高速連続撮像し、得られたデータセットにスペックルマスクングを施してシーイングの補正を行っている。観測には CMOS カメラ(素子数 2048x2048)を用いている。

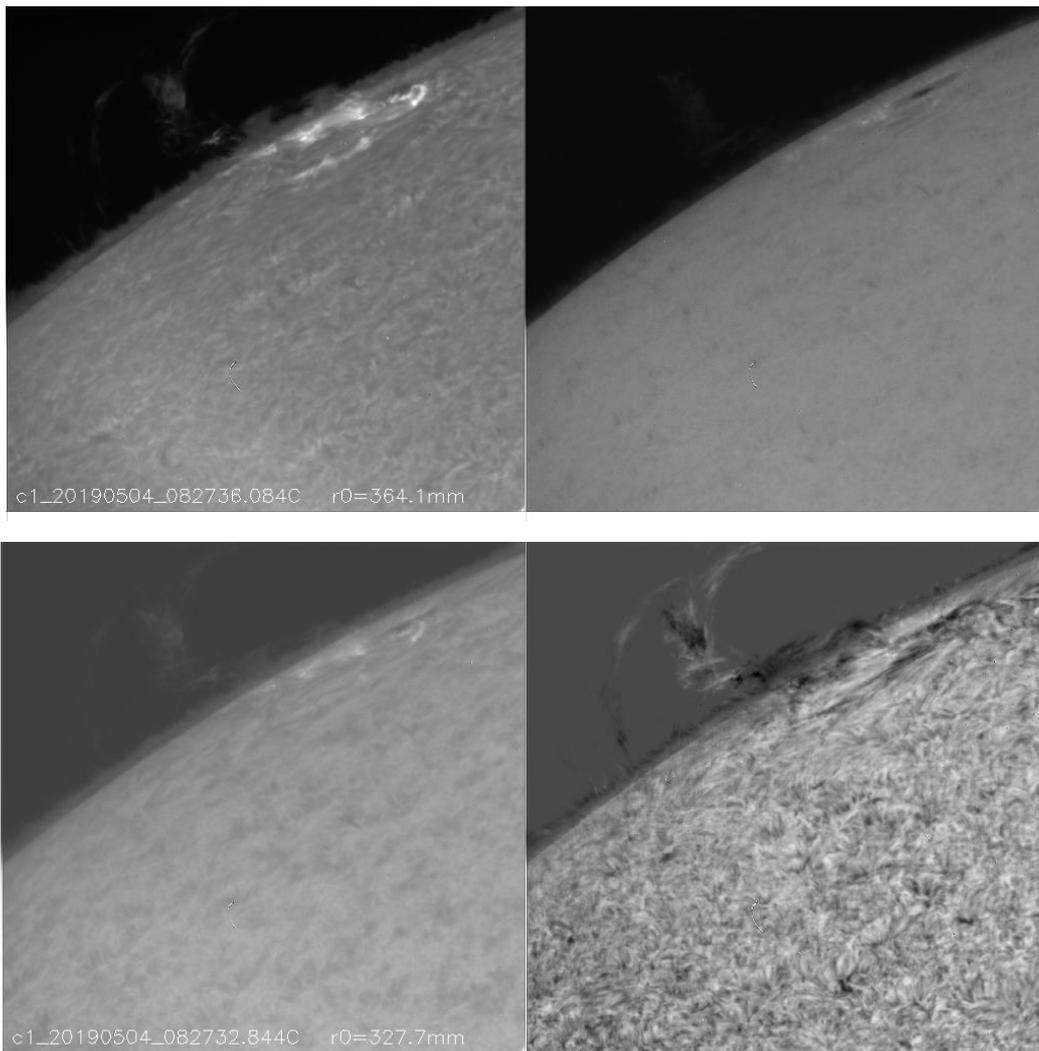


図3: UTF-32 を使用して撮像された太陽彩層における噴出現象。(左上) $H\alpha$  線中心、(右上) $H\alpha + 1\text{\AA}$ 、(左下) $H\alpha \pm 0.5\text{\AA}$  足し合わせ、(右下) $H\alpha \pm 0.5\text{\AA}$  差し引きドップラー。ドップラー画像からは、フィラメント中の細いスレッドごとに白黒パターンが見取れ、隣り合う磁束管内で異なる速度でプラズマが運動している様子が捉えられている。この運動を詳細に解析することで、フィラメント噴出時のメカニズムを解明することが可能となる。

#### 4. UTF-32 の課題

UTF-32 の長所は、Universal の名にあるように、さまざまな波長での観測に用いることが可能な点である。しかし実際には  $H\alpha$  線以外の波長の観測では、UTF-32 のフィルター透過幅が観測するライン幅と同程度あるいは過大となってしまう、ラインプロファイルが正確に取得できない課題が明らかになっている。これは対象とするライン幅の狭さにも一因があるが、さらにはリオフィルター型の特徴である、長波長域になればなるほど観測波長で規格化した透過幅が増大していく性質にも起因する。そのため、He I 10830 Å のような赤外域での観測では、UTF-32 の透過幅をさらに小さくするための追加の光学ブロックが必要となる。そのために開発されたのが  $1/8\text{Å}$  ブロックである。

#### 5. $1/8\text{Å}$ ブロックの開発と課題

$1/8\text{Å}$  ブロックも基本的には、UTF-32 内部の 7 段のブロックと同じであるが、用いられている方解石の厚みが  $0.25\text{Å}$  ブロックのもの 2 倍となっている。このことで透過波長が  $0.25\text{Å}$  ブロックのさらに半分の  $0.125\text{Å}$  すなわち  $1/8\text{Å}$  となっている。さらに追加の機能として、方解石を同じ厚みに分割して間に LCVR を挟んでいる。この LCVR での遅延量を制御することで、2 つの方解石で生じた遅延量をそのまま足し合わせたり、キャンセルしたりを切り替えることが可能となる。つまり、 $1/8\text{Å}$  ブロックの光路上への設置、撤去を仮想的に行うことができる。

このように、UTF-32 の観測能力を向上させる目的で開発された  $1/8\text{Å}$  ブロックであるが、現在のところ以下のような課題が見つかっている。

- ・ UTF-32 と  $1/8\text{Å}$  を組み合わせると、観測時に焦点が合わない。
- ・ 温度制御が不十分で、透過波長のピーク出しが困難である。

焦点が合わない問題は、光線がフィルターに対して斜めに入射していることや  $1/8\text{Å}$  ブロック内での内面反射、波面精度が理由として考えられ、現在も原因究明を行っている。また温度制御に関しては、ヒーターやセンサーの改良を予定している。

#### 6. まとめ

京都大学飛騨天文台では、UTF-32 と  $1/8\text{Å}$  ブロックの開発が進められてきた。UTF-32 と  $1/8\text{Å}$  ブロックを使うことにより、今までの  $H\alpha$  線での観測に加え、Mg I 5172 Å、Ca II 8542 Å、He I 10830 Å での観測が可能になる。しかし、現時点での課題として、焦点が合わなくなることや温度制御が不十分で、フィルター温度が不安定になるなどの問題がある。焦点が合わない問題に関しては現在対応中であり、今後も観測に向け、改善していくことが必要である。

#### 参考文献：

徳田怜美, 2019 年度, 狭帯域チューナブルフィルター UTF-32 の波長分解能向上を目的としたエレメントの開発

M. Hagino, K. Ichimoto, G. Kimura a, Y. Nakatani, T. Kawate, K. Shinoda, Y. Suematsu, H. Hara, and T. Shimizu. Development of a universal tunable filter for future solar observations. In *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation*, Vol. 9151 of SPIE, p.91515V, July 2014.