

特集2

Sol' Ex による太陽観察

～分光器を利用した太陽撮影装置の紹介～

山崎 明宏 (東大和天文同好会 / 月惑星研究会)

1. はじめに

太陽活動は、現在第 25 周期という新しいサイクルのピークをやや過ぎたあたりです。黒点数は緩やかな減少傾向ですが、それでも大なり小なりの黒点が、常に見えている状態です。次の底は 2030 年前後と思われるので、今から太陽観察を始めても、十分楽しむことができます。今回は、少し手間がかかりますが、現時点でもっとも安価に太陽を撮影できる手法をご紹介します。

2. Sol' Ex とは

Sol' Ex とは、「Solar Explorer Project」の略で、フランスの天文家 Christian Buil が設計した、太陽観察用の分光器を使用して、太陽の科学的な観察を行うことを目的としたプロジェクトの総称です。

2.1 Sol' Ex は分光器

Sol' Ex の基本原理は、実は 100 年以上前に確立された SpectroHelioGraph (SHG) と同じ技術です。直訳すると、「分光器を使用した太陽撮影」でしょうか。1890 年代、天文学者ヘールなどによって確立されました。ヘールは、この方法で世界最初のプロミネンスの撮影に成功しています。

2.2 Sol' Ex のシステム構成

図 1 は、私の使用している Sol' Ex の全体写真です。主な構成は、市販の天体望遠鏡の後段に、Sol' Ex 本体 (図 1-B) を装着しています。使用している望遠鏡は、ビクセン製の ED70SS (口径 70 mm, 焦点距離 400 mm) です。(図 1-A)。先端には、77mm 径の ND16

(1/16 減光) フィルターを装着しています。また、Sol' Ex 後方には、撮影用の CMOS カメラをセットしています (図 1-C)。よくよく見ると、カメラが斜めに付いています。これは、分光器が反射式のため、光路が折り返されたためです。このようにわりとシンプルな構成ですが、これだけで、可視光全域のスペクトルを撮影することができます。

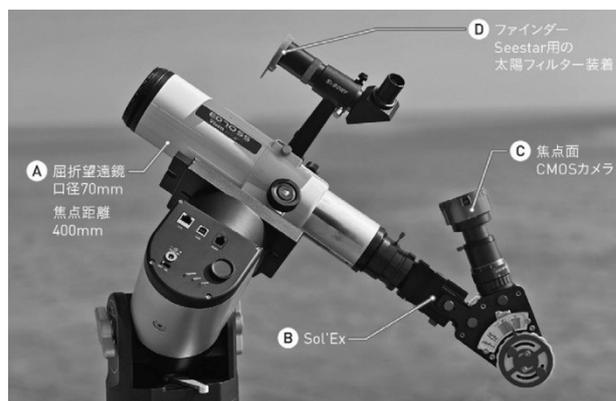


図 1 Sol' EX を使用した筆者の撮影システム
前段は、市販の望遠鏡。先端部に 1/16 の減光フィルターを装着して、入光量を制限しています。後段が、Sol' Ex 分光器。そのままでは太陽を画像化できないので、赤道儀に載せて、太陽をスキャンして画像化します。

2.3 Sol' Ex の仕組み

図 2 が内部構造です。対物レンズで集光した光は、Sol' Ex 先端に配置された、スリット面に結像します。スリットの大きさは、 $0.01 \times 4.2 \text{ mm}$ と非常に細長い形状です。太陽像は焦点距離のおよそ 1/100 の大きさで結像するので、焦点距離が 420 mm 以下であれば、このスリットの長手方向に太陽像が収まります。スリットを通過した光は、後段のコリメ

ートレンズで平行光に戻され、その光は、反射型の回折格子に照射されます。回折格子は、入射光を波長毎に異なる角度で反射します（分散）。分散した光から目的の波長を選別するため、回折格子は角度を調整し、目的の波長がカメラの光軸上に向くように調整します。光軸上に向かう光は、その先にある再結像レンズによってカメラに結像します。これにより、選択した波長の観察が可能になるのです。

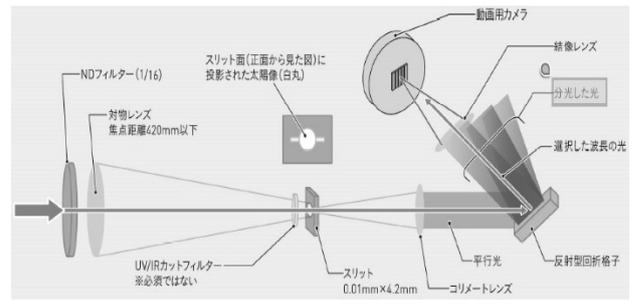


図2 Sol' EXの内部構成

内部には、スリット、レンズ2枚と回折格子の4つの部品が収まっています。

表1 市販の太陽望遠鏡とSol' Exの比較

	H α 太陽望遠鏡	Sol' Ex
機器構成	多くの機種は太陽専用望遠鏡。Daystar製は、天体望遠鏡に装着して使用する	一般的な天体望遠鏡に装着して使用する
口径	口径 230mm まで販売されているが非常に高価。40~100mm 程度の機種が主流。Daystar 製は市販の望遠鏡に装着するので、口径 180mm まで対応可能。	太陽全体を撮影したい場合は、焦点距離が 400mm 以下に制限されるので、口径は 4~8cm 程度になる。拡大撮影専用で使えば、口径 150mm 程度まで対応可能。
観察可能な波長	H α 線 (656.28nm) 用が大半だが、CaK 線 (393.4nm)、CaH (396.8nm) などの専用フィルターも販売されている。	機器単体で、380~700nm までの可視光全域の観察が可能。
特徴	専用機を使用すれば、安全に彩層の各現象を観察できる。H α 線観測機器としてはもっともおすすめだが、導入コストが高いのが難点。	DIY 的な製品のため、最低限の光学知識は必要。その分専用機に比べると、安価にシステムを構築できる。フィルターとしての性能は、市販の専用機よりも高い
デメリット	導入費用が高い。専用機を購入すると、口径の変更などがほぼ不可能。機種によっては、見え方に差が生じる。 ※最近では機差が小さくなってきている	コントラストの高い画像を撮影できるが、振動等の影響を受けやすく、解像度の高い画像は得にくい。そのため、拡大撮影には不向き。
使い勝手	専用機は安全に使用できる。Daystar 製のフィルターで構成する場合は、安全面などで、多少の光学知識が必要。	光学系の組み立て・調整が必要なので、ある程度の知識は必要。また、機器を微速で動かして撮影するので多少手間がかかる。
導入費用	4cm クラスで 15 万円程。口径 10cm ともなると 100 万円を超える。Daystar 製の専用フィルターは、25 万円程度から購入できるが、高性能品は 200 万円を超える。	本体を 3D プリンターで製作すれば、光学部品の費用のみ (約 5 万円)。プリンターがない場合でも、完成品 (光学パーツは別売り) を購入できる。ただし、光学系の組み込み・調整は、自分で行う必要がある。

3. Sol' Ex を導入するには

安価でシステムを構成できる点が、大きなメリットですが、機器の調整も含め、ユーザーがやらなければならないことが多いのが難点でもあります。Sol' Ex 導入までの大きな流れをまとめてみました。

3.1 Sol' Ex のホームページ

Sol' Ex プロジェクトの HP には、機器の構成から組み立て手順、そして使用方法とその応用まで、実に幅広く、しかも詳細に書かれています (図 3)。難点は全て英語 (またはフランス語) なので、最近の AI 翻訳を駆使しても、解釈にやや悩む箇所がちらほらありますが、その内容は、単純 H α 画像の取得から、磁気分布の撮影にまで及び、とても興味深い観測方法を紹介しています。

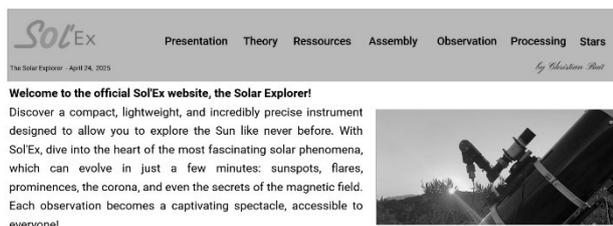


図 3 Sol' Ex プロジェクトの H. P.

ここには、導入・組み立て調整・観測手法までの、ほぼ全ての情報が網羅されている。
<http://www.astrosurf.com/solex/sol-ex-presentation-en.html>

3.2 Sol' Ex 用の光学部品を入手する

使用する光学部品は、Sheluck 社よりネット経由で購入します。フランスの会社なので、カード決済による個人輸入になります。慣れていないと、多少の抵抗感があるかと思いますが、私は 2 回取引をしていますが、どちらもトラブルなく購入できました。

Sheluck 社

<https://www.shelyak.com/produit/kit-optique-solex/?lang=en>

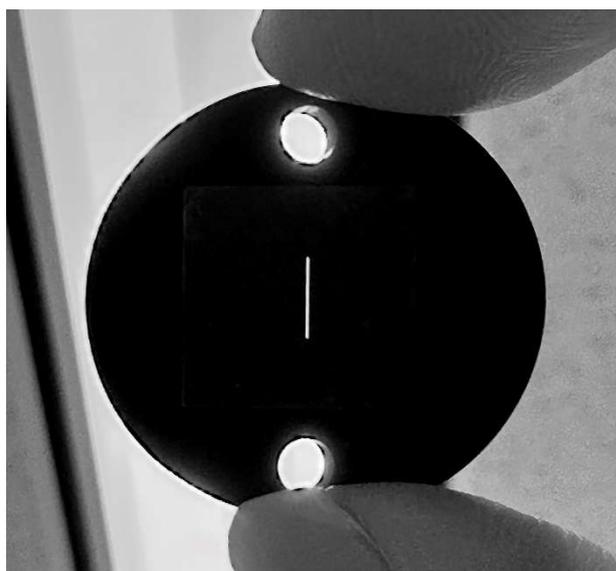


図 4 Sol' Ex で使用しているスリット
裏面から光を透かして見た様子。幅は 0.01mm、長さは 4.2mm です。通常は、長手が南北方向になるように装着します。撮影時は、望遠鏡を東西方向 (赤経方向) に動かして、スリット上を走査させて撮影します。



図 5 Sol' Ex で使用している反射型回折格子
反射光が青から黄色に変化して見える光学部品が、回折格子です。2400 line/mm という非常に細かい溝が刻まれています。この素子に光を当てると、波長によって異なる角度で反射します。これを回転するホルダーに搭載し、角度を調整することで、任意の波長を撮影することができます。

3.3 Sol'Ex 本体（ケース）を用意する

Sol'Ex の本体ですが、以下のどちらかで入手します。ひとつ目は、3D プリンターで自作する方法です。Sol'Ex は現在、初期型、V2 仕様、PRO 仕様の 3 機種が用意されています。光学的な基本構成は同じですが、使い勝手が改善されています。その内、初期型については、3D データーが公開されていますから、プリンターが手元があれば、自作することが可能です。私も 1 号機は印刷して制作したのですが、寸法精度がよくなく、組み立て時に、けっこう苦勞しました。多少の費用がかかっても、トラブル無く進めたい場合は、Sol'Ex プロジェクトとパートナー関係にある、Azur3dprint という Web ショップから、完成品（光学部品は別売）を購入することができます。

Azur3dprint 社

<https://azur3dprintshop.com/>



図 6 Azur3dprint 製の Sol'Ex V2
筆者も現在は、このユニットを使用している。

3.4 それ以外の購入品

前章のセット以外に、別途購入する部品があります。必須なのが 31.7 mm 用のヘリコイドフォーカサーです（図 7）。再結像側（カメラ

側）に配置して、フラウンホーファー線の焦点調整用として使用します。また、使用する PC のカメラによって、焦点位置が異なるので、追加の M42 サイズの延長筒が必要になります。Azur3dprint 社の製品には、30 mm 長の M42 延長筒が付属しているのですが、それでピントが出ない場合は、別途購入する必要があります。

※その他、望遠鏡・撮影用カメラも必要です



図 7 31.7mm ヘリコイドフォーカサー
カメラ側に追加して、フラウンホーファー線が明瞭に見えるように、焦点調整を行う。

4. Sol'Ex の組み立て・調整

ここでは、組み立てから調整までの流れを解説します。光学系を自分で組み込むことには抵抗があるかもしれませんが、Sol'Ex プロジェクトの目的の一つに機器を理解してもらうことも含まれているように思います。

4.1 光学部品の組み込み

実際、組み込む部品は 4 点のみですから、慣れれば 10 分もかかりません。この先には、素晴らしい景色が広がっていますから、ぜひチャレンジしてください。本体に組み込む光学部品は、表 2 の 4 点です。どれも、専用のホルダーが用意されています。

表 2 Sol' Ex に組み込む光学部品と調整内容

それぞれ専用ホルダーが用意されているので、それらに固定して組み込む。レンズ類は全て方向がある。またグレーチングの表面は非常に脆いので、ゴミ等が付着してもそのままにしておく。エアブローも禁止。調整作業は、慣れれば数分で終わるが、最初は 2 時間ほど要した。

	名称	組立時の注意点	調整内容
1	スリット	ゴミの付着に注意	機器との直交を合わせる
2	コリメートレンズ	方向があるので注意	フラウンホーファー線が鮮明に見えるよう、スリット間距離を調整する
3	反射型回折格子	表面に絶対触らない エアブローも禁止	H α 線が画像中央に見える状態で、目盛りの位置が H α に重なるよう調整する
4	再結像レンズ	方向があるので注意	波長毎にフラウンホーファー線の焦点位置を微調整する

4.2 光学部品の調整

機器として調整するところは、表 2 の 4 箇所、順番は 1→4→2→3 になります。詳しい手順は、Sol' Ex プロジェクトの H.P. からリンクしている動画で細かく説明しているので、そちらを参照してください。

5. Sol' Ex による撮影の流れ

Sol' Ex での撮影は、月や惑星などの撮影に比べると、かなり特殊な操作が必要になります。ここでは、導入から撮影までの概要を解説します。

5.1 カメラに映る画像

スリット経由で入射した光は、グレーチングで反射され分散します。そして、反射先にあるレンズで撮影用カメラに結像します。ただ、この時に画面に写る画像は、図 8 のような無数の暗線のみです。Sol' Ex は分光器ですから、撮影できるのは、このようなスペクトル画像だけです。なお、水平方向に無数に見える暗線は、フラウンホーファー線です。Sol' Ex は、この暗線を多数撮影して解析し、最終的には、太陽の全体像を生成します。

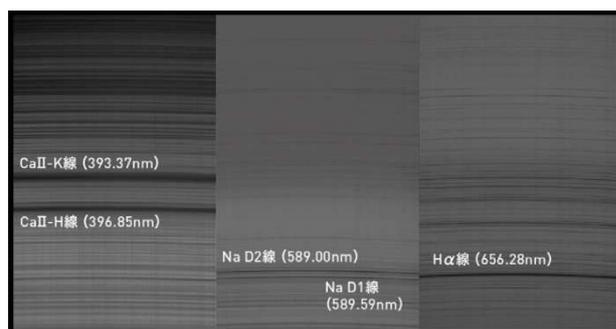


図 8 Sol' Ex で撮影した太陽のスペクトル色が無いので分かりづらいですが、左から 400 nm 付近の Ca II の吸収線。中央は、緑線から Na の吸収線 D2 線 (560 nm) 付近。右は、太陽の代表的な吸収線の H α 線 (656.28 nm) 付近の画像。撮影時は通常モノクロカメラを使用するが、手持ちのカラーカメラがあれば、最初はそれを使用することで、波長に応じた色がつくので、見やすくなります。

5.2 H α 線で撮影

まず、フラウンホーファー線の中から、H α 線を見つける必要があります。Sol' Ex の回折格子は、回転するホルダーに搭載されているので、これを回すことでカメラの中心の波長を変更できます。この際、付属の目盛りに合わせて、およその位置は決められま

す(図9)。最終的には、スペクトル線の見本などを見ながら、自力で探し出すのですが、 $H\alpha$ 線は、明瞭な暗線なので、それほど難しくはないはずですが。見つけたら画面中心に誘導します。

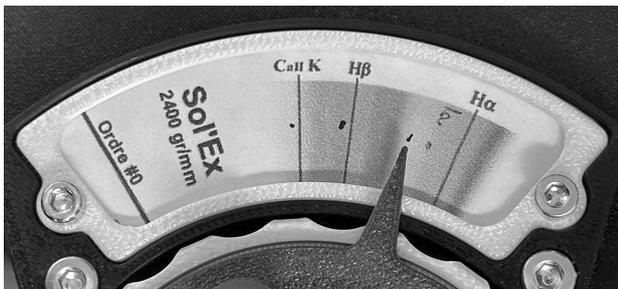


図9 Sol'Ex 付属のバーニヤ

代表的な $H\alpha$ 、 $H\beta$ 、CaKの位置が明記されていますが、あまり正確ではありません。私の場合は、 $H\alpha$ 線の位置で目盛りがピッタリ重なるように調整し、それ以外は、黒点を打って、誤差を修正しています。

5.3 撮影方法

画面に $H\alpha$ 線を導入して、望遠鏡ピントを合わせると、暗線の縁がギザギザに見え、さらに暗線内にも明暗があることが分かります。この明暗こそ、スリットで切り出された太陽、1ライン分の彩層の様子を表しています。スリットの長さは4.2mmほどあります。太陽は、望遠鏡の焦点距離のおよそ1/100の大きさで結像するので、焦点距離が400mm内であれば、太陽の南北方向1ライン分を撮影することができます。そのため、太陽全域を撮影する場合は、望遠鏡を東西方向に早回しすればよいこととなります。動画で連続的に撮影するこの操作をスキャンと呼んでいます。太陽面をスキャンして得られた画像から、1ライン分のデータを抽出し、それを並べることで、太陽面を画像化します(図10)。この方法が、Sol'Exの特徴でもあり、やや分かりづらい点でもあります。しかしご安心くだ

さい。動画から、短冊状の情報を抽出し画像化する作業を、全工程自動で行ってくれるソフトが無償公開されています。これらのソフトを使用すれば、驚くほど簡単に太陽画像を生成してくれます。

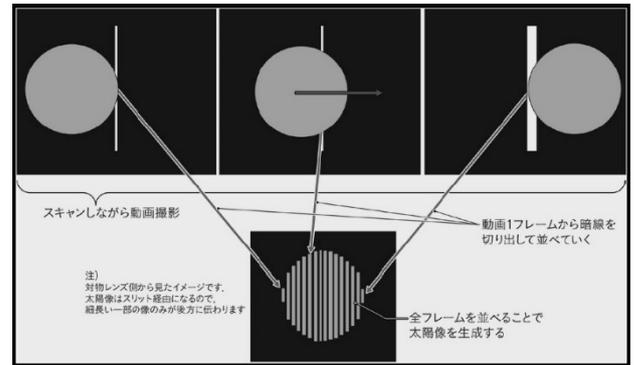


図10 Sol'Exで撮影した動画から画像化する

スリットを通過した光は、太陽の南北方向1ラインだけなので、そのままでは画像になりません。画像化するには、太陽をスリット上で動かし、その様子を動画で撮影。その撮影した動画から抽出した1ライン分の太陽画像を並べて画像化します。とてつもなく手間がかかりますが、無償で公開されている専用ソフトで、完全自動化されています。撮影さえできれば、以降の処理は簡単なのです。

5.4 撮影手順

まず、撮影用として、動画用のカメラを用意します。近年の太陽・月・惑星撮影は動画で撮影するのが主流なので、安価な製品が多数出回っています。私が使用しているのは、ZWO製のASI183MMというモノクロ動画カメラです。撮影開始前に、太陽をスリットの端に誘導しておきます。そして、動画の記録を開始したら、太陽時の8倍前後の速度で赤経軸を動かしてスキャンします。太陽の反対側の端がスリットまで到達したら、撮影を停止します。これで1回の撮影が完了します。この動画を処理すれば、 $H\alpha$ 太陽画像が生成

されます。

6. 画像化作業

Sol'Ex で撮影した動画には、フラウンホーファー線の画像しか記録されていません。ここから画像情報を抽出するのは、人手ではほぼ不可能です。処理には専用のソフトが必要で、いくつか無償公開されていますが、今回は、JSol'Ex と呼ばれているソフトウェアで処理を行いました。

JSol'Ex

<https://melix.github.io/astro4j/1.5.0/en/jsolex.html>

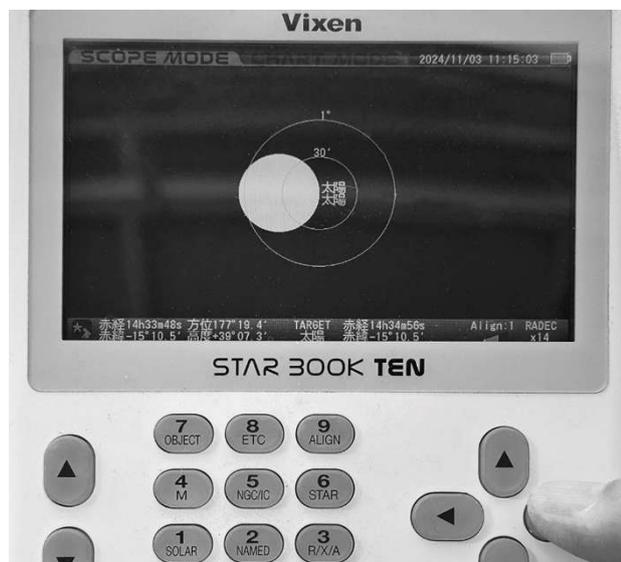


図 11 太陽をスキャンして撮影

赤道儀等で太陽を動かして、太陽をスリット上で移動させて撮影する。筆者は、太陽時の約 8 倍の速度で、赤経軸を動かして撮影している。撮影時間は、およそ 15~20 秒程度。

6.1 画像化する

JSol'Ex は、頻繁に Ver アップがなされていて、自動処理ながら、様々な画像を吐き出してくれる優れモノです。その使い方はとても簡単です。処理したいファイルを選択して、「Full」ボタンを押すだけです(図 12)。あとは、画像化されるのを待つだけです(図 13)

一つ注意したいのは、スキャン方向によって、東西が入れ替わる場合があります。合成された画像と、SOHO 等の太陽画像を見比べ、もし黒点などの位置が鏡像の場合は、ソフトの設定にある XINV にチェックを入れて再度処理してください。これで修正されるはずです。

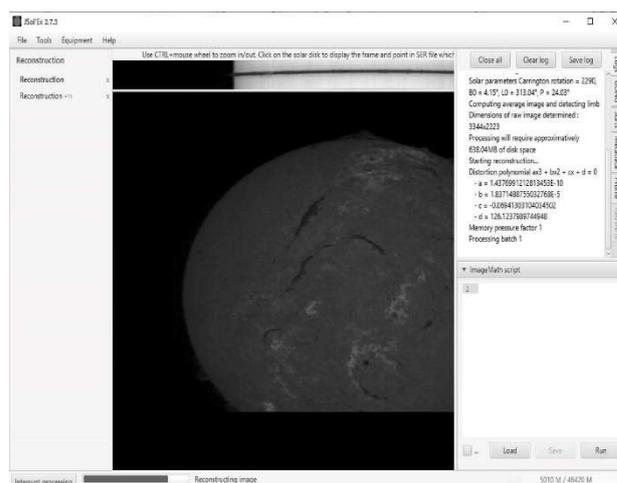


図 12 JSol' Ex の処理時のイメージ

動画を指定するだけで、以降は、暗線の位置を抽出し、並べて画像化する。通常、南北方向の画素数と、スキャンで得られる東西方向の画素数は合わないが、自動で真円補正してくれるので、気にする必要はない。

私の場合は往復でスキャンしているのので、反対方向のスキャンは裏像になりますから、動画の半分は、このチェックを入れて処理しています。

7. Sol' Ex をより使いこなす

Sol'Ex には、他の太陽望遠鏡では実現できない、もう一つの特徴があります。それは、 $H\alpha$ 線だけでなく、可視光域であれば、ほぼ全ての波長で画像を生成できる点です。フラウンホーファー線には、 $H\alpha$ 線だけでなく、 $H\beta$ 線、カルシウム分子によって吸収される K 線(図 14)・H 線や、ナトリウムの吸収による D2 線、ヘリウムによる輝線の D3 線等、

特徴的な画像を得られる波長域が複数存在します。これらの波長の内いくつかは、専用のフィルターが販売されていますが、どれも日本で購入すると 20 万円以上になり、しかも撮影波長毎に用意する必要があります。しかし、Sol'Ex の場合は、グレーチングの角度を変えるだけで、これら全ての波長に対応することができます。日々の太陽観測は、これ一台で対応することができます。

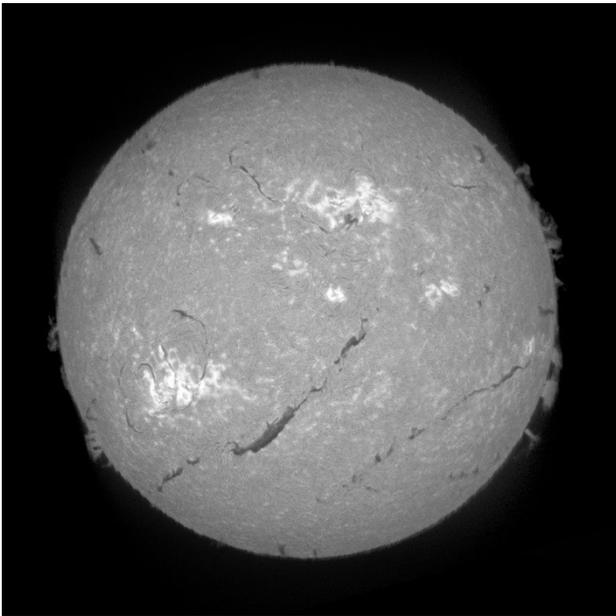


図 13 Sol'Ex で生成した H α 線画像
半値幅に相当する波長分解能は、0.2Å と市販望遠鏡よりも狭小。なので、コントラストの高い彩層面の画像を得ることができる。

8. おわりに

Sol'Ex システムを構築するためには、ある程度の光学知識が必要なので、万人向きの太陽撮影方法とは言えません。その一方、太陽の単色光撮影の基本原則をそのまま使用したシステムなので、教育的な効果は非常に高いと考えています。また、この本体一つで可視光域の全ての波長を撮影できるなど、今どきの言葉で表現するなら、非常にコスパの高いシステムと言えます。太陽の日々の観測装置

として、製作にトライしてみてもはいかがでしょうか。

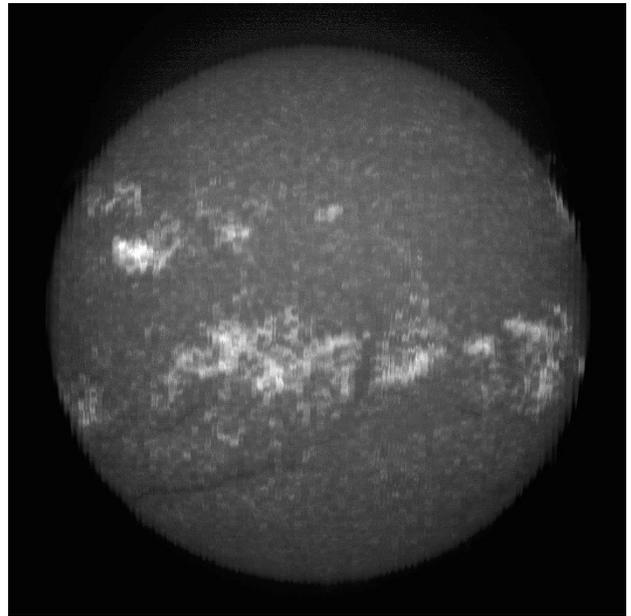


図 14 Sol'Ex で生成した CaK 画像
紫外域の半値幅に相当する波長分解能は、0.4Å。市販のフィルターが 5Å 程度なので、H α 線なみの画像を得ることができる。

文 献

- [1] Sol'Ex Project の H.P
- [2] 柴田一成, 大山真満, 浅井歩 (2011) 『太陽: 最新画像で見る』, ナノオプトニクス・エネルギー出版局.0
- [3] 山崎明宏(2024)「Sol'Ex 太陽分光装置の製作①」,天文ガイド,60(11):25-31.
- [4] 山崎明宏(2024)「Sol'Ex 太陽分光装置の製作②」,天文ガイド,60(12):48-53.
- [5] 山崎明宏(2025)「Sol'Ex 太陽分光装置の製作③」,天文ガイド,61(1):48-53.
- [6] 山崎明宏(2025)「Sol'Ex 太陽分光装置の製作④」,天文ガイド,61(2):52-57.
- [7] 山崎明宏(2025)「Sol'Ex 太陽分光装置の製作⑤」,天文ガイド,61(3):52-57.

山崎 明宏