

第1回 SOLAR-B 講習会



2006年2月22日
国立天文台 SOLAR-B サイエンスセンター編

第 1 回 SOLAR-B 講習会

**2006 年 2 月 22 日
国立天文台 SOLAR-B サイエンスセンター編**

冊子目次

- 0. 第1回 SOLAR-B 講習会プログラム
- I. SOLAR-B 衛星とは (原: 国立天文台)
- II. XRT データの説明 (鹿野: 国立天文台)
- III. EIS データの説明 (浅井: 国立天文台)
- IV. SOT による太陽大気構造の診断 (本格的なスペース可視光望遠鏡のデータをより理解するために) (永田: 京都大学)
- V. SOT データの説明 (久保: JAXA*宇宙科学研究本部)
- VI. SOLAR-B データフォーマット・SOLAR-B データ検索システム (下条: 国立天文台)
- VII. SOLAR-B 運用イメージ (清水: JAXA 宇宙科学研究本部)

*JAXA: 宇宙航空研究開発機構

この講義用冊子の PDF 原稿は (<http://solar.nro.nao.ac.jp/solar-b/meeting/koshukai1/>) にもありますので、必要な方はそちらもご覧ください。また SOLAR-B 衛星と各観測装置に関する情報は、国立天文台 SOLAR-B 推進室(サイエンスセンター)のホームページ (<http://solar.nro.nao.ac.jp/solar-b/>)にもまとめてあります。どうぞ参考にしてください。

第1回 SOLAR-B 講習会世話人
常田 佐久 (国立天文台)
原 弘久 (国立天文台)
浅井 歩 (国立天文台)
永田 伸一 (京都大学)

第 1 回 SOLAR-B 講習会

日時: 2006 年 2 月 22 日(水) 10:00 ~ 18:00

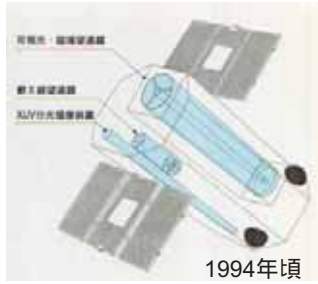
場所: 電気通信大学(調布市) 東 5 号館 2 階 241 大講義室

(注) 会場となる講義室は**飲食禁止・禁煙**です!

プログラム:

10:00-10:10	開催にあたって	常田 (国立天文台)
10:10-10:20	SOLAR-B 衛星とは	原 (国立天文台)
<< 各観測装置のデータおよびデータ内に含まれる情報に関する講義 >>		
10:20-11:20	XRT データの説明	鹿野 (国立天文台)
11:20-12:20	EIS データの説明	浅井 (国立天文台)
12:20-13:30	昼食休憩 (電通大内の生協食堂は当日 13:30 までの営業です!)	
13:30-14:00	質問時間 1	
14:00-15:00	SOT による太陽大気構造の診断 (本格的なスペース可視光望遠鏡のデータを より理解するために)	永田 (京都大学)
15:00-15:20	休憩	
15:20-16:20	SOT データの説明	久保 (JAXA 宇宙研)
16:20-16:40	質問時間 2	
16:40-17:10	SOLAR-B データフォーマット・SOLAR-B データ検索システム	下条 (国立天文台)
17:10-17:30	SOLAR-B 運用イメージ	清水 (JAXA 宇宙研)
17:30-18:00	質問時間 3 (アンケートも含む)	
18:00	終了	
19:00	退室時刻	

SOT: Solar Optical Telescope	可視光望遠鏡
XRT: X-Ray Telescope	X 線望遠鏡
EIS: EUV Imaging Spectrometer	極紫外線撮像分光装置



1994年頃

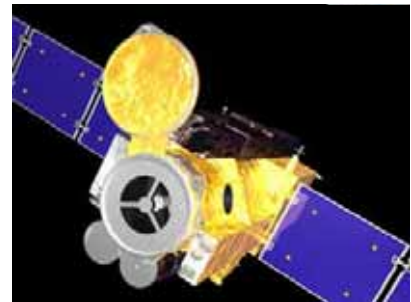
SOLAR-B

— 太陽観測用軌道天文台 —

原 弘久

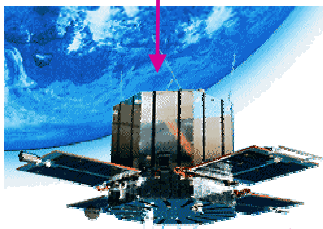
国立天文台

SOLAR-B推進室



たんせい
技術試験衛星

日本の太陽観測衛星



ひのとり(ASTRO-A)

188 kg
1981年2月打ち上げ

粒子加速・プラズマ加熱

- ・回転すだれコリメータによる硬X線望遠鏡
空間分解能 10秒角
- ・プラグ分光器
- ・軟X線スペクトル計
- ・硬X線スペクトル計



ようこう(SOLAR-A)

390 kg
1991年8月打ち上げ

粒子加速・プラズマ加熱

- ・フーリエ型硬X線望遠鏡(日)
空間分解能 5秒角
- ・軟X線望遠鏡(日・米)
空間分解能 5秒角
- ・プラグ分光器(日・米・英)
- ・広帯域スペクトル計(日)
(軟X線、硬X線、ガンマ線)
- 日・米・英の国際協力



SOLAR-B

~ 900kg (軌道制御推葉込)
2006年9月打ち上げ予定

プラズマ加熱 磁場生成

- ・光学望遠鏡 (日・米)
空間分解能 0.2秒角
- ・軟X線望遠鏡 (日・米)
空間分解能 2秒角
- ・EUV撮像分光装置(日・英・米)
空間分解能 2秒角
- 日・米・英(+)の国際協力

「ようこう」からSOLAR-Bへ

- 「ようこう」で観測されたダイナミックなコロナ
- コロナ 彩層生成の起源の解明
光球からコロナまでの総合的な理解
Photosphere – Corona Connection
- 磁気リコネクション過程の理解
- 本格的な光学望遠鏡による微細磁気構造・
磁場生成過程の理解

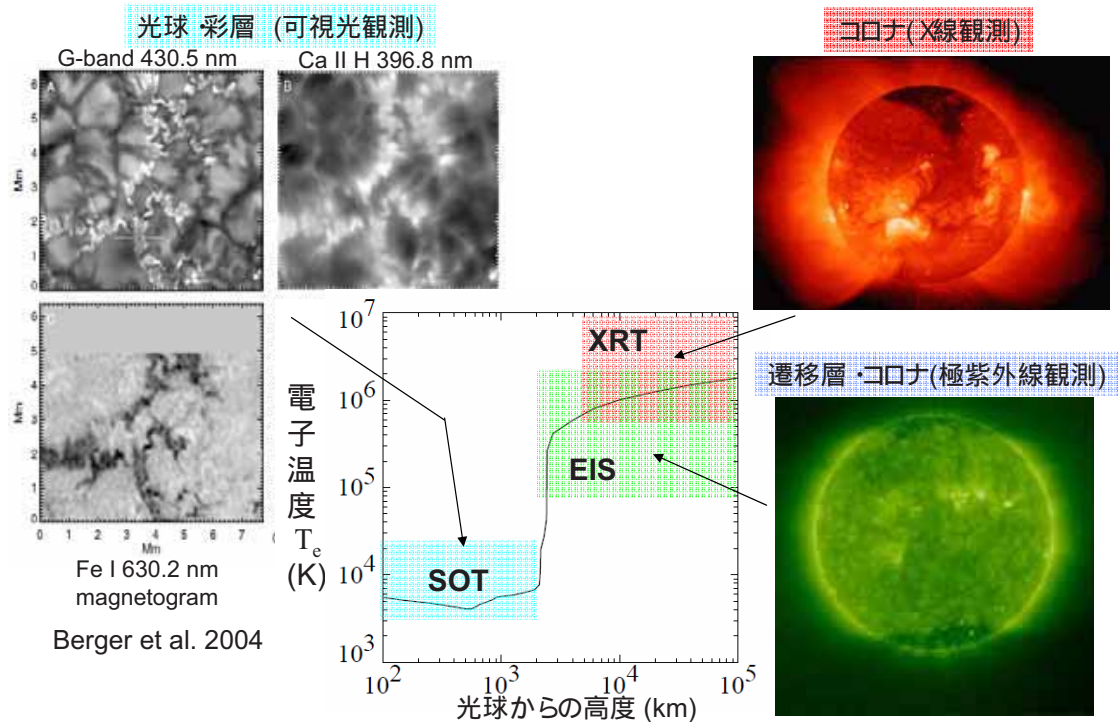


SOLAR-B搭載観測装置

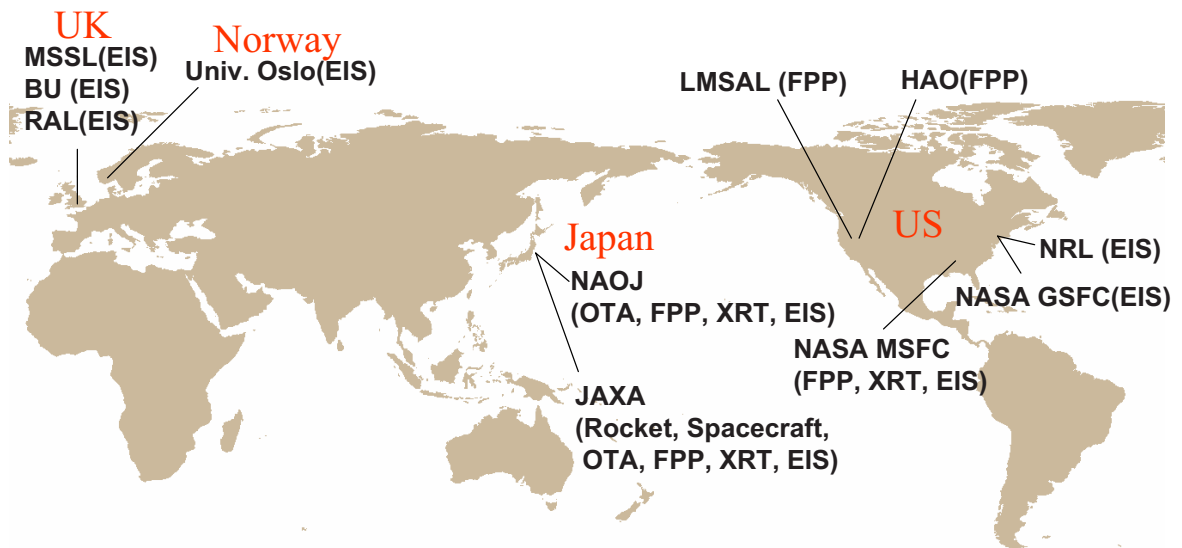
- 光球磁場の詳細観測 → SOT: 可視光望遠鏡
- コロナの微細構造の観測 → XRT: X線望遠鏡
- 遷移層・コロナの速度場観測 → EIS: 極紫外線撮像分光装置

少数の装置ながら、
太陽用軌道天文台と呼べる内容

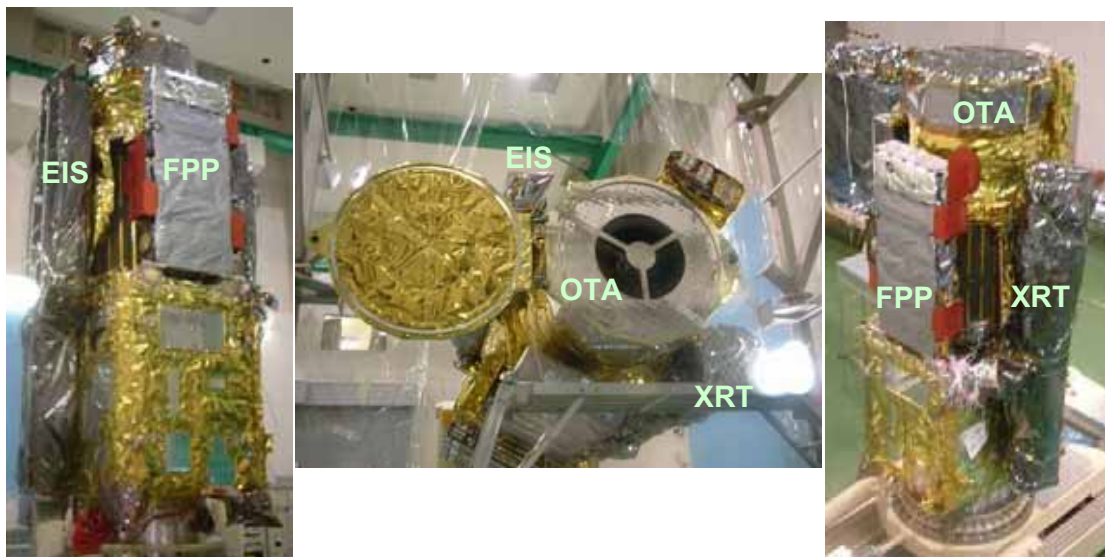
SOLAR-Bで観測する対象



国際協力による開発 SOLAR-B Development team



観測装置外観



注：XRT/EISは汚染防止用カバーに包まれています。

観測装置全般に対して必要な知識

- 衛星は太陽同期極軌道に投入。年間9ヶ月間は夜なしの連続観測が可能。
- SOT SPとEISの分光装置のスリットは太陽南北方向を向く
- 視野サイズと画像ピクセルサイズ
- 自転する太陽上の構造を追跡するため、太陽の自転速度(微分回転)モデルにしたがって衛星の指向方向を変更
- 指向方向の制限
- 機上データ圧縮と解析用データまでの流れ

視野サイズとCCDピクセルサイズ

- 全観測装置の検出器は裏面照射型CCDカメラ

機器名	視野サイズ (EW×NS)	CCDピクセルサイズ (1.0" = 1 / 3600 deg)
SOT (Solar Optical Telescope)		
NFI (Narrow-band Filter Imager)	328" × 164"	0.08"
BFI (Broad-band Filter Imager)	218" × 109"	0.053"
SP (Spectro-Polarimeter)	328" × 164"	0.16"
XRT (X-ray Telescope)	2048" × 2048"	1.0"
EIS (EUV Imaging Spectrometer)	590" × 512"	1.0"

微分回転追跡による指向方向の変更

- SOLAR-B衛星は、姿勢制御により太陽表面の**微分回転モデル**にしたがって、その指向方向を西に向けて連続的に移動。

θ : 日面緯度、 ϕ : 日面経度
 ω : 地球から見た太陽回転角速度
 ω_0 : 慣性系に対する太陽回転角速度
 Ω_e : 地球の公転角速度

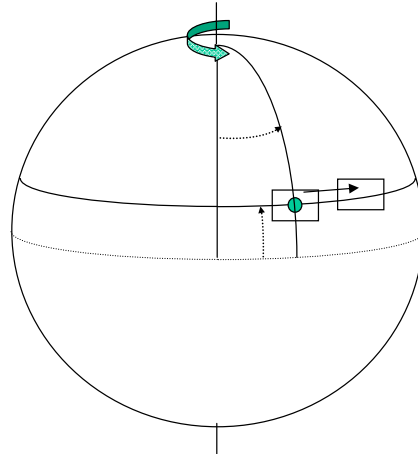
$$\theta(t) = \theta(t_0)$$

$$\phi(t) = \phi(t_0)$$

$$\omega = \omega_0 - \Omega_e$$

$$\omega_0 = a - b \sin^2(\theta)$$

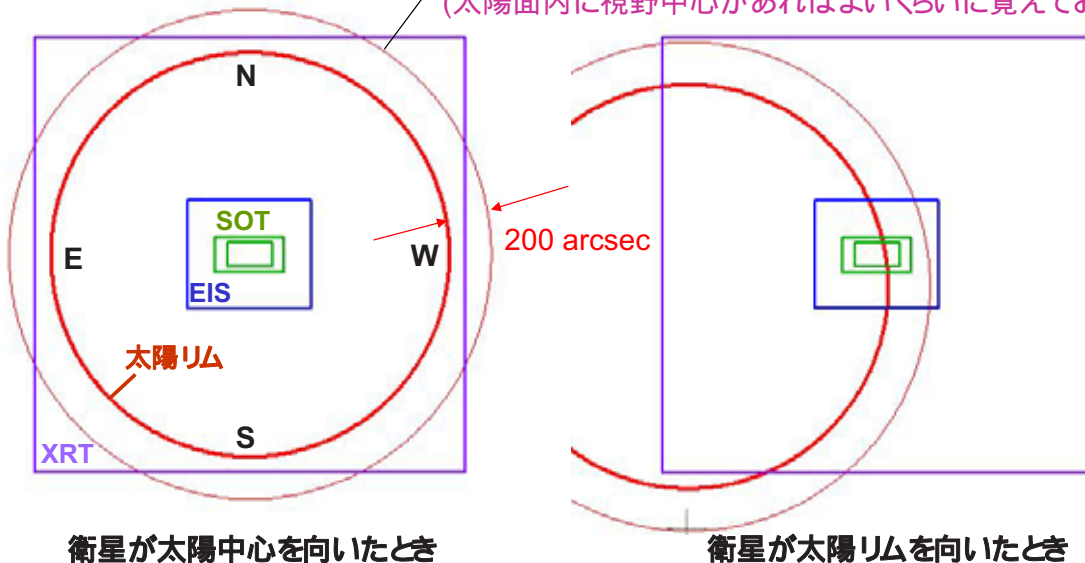
$\theta(t_0)$, $\phi(t_0)$, t_0 , ω_0 をパラメータとして与え、時刻 t の位置 $\theta(t)$, $\phi(t)$ を予測し追跡する。



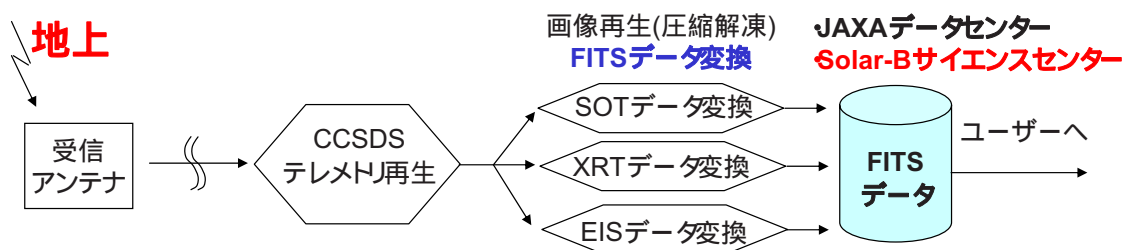
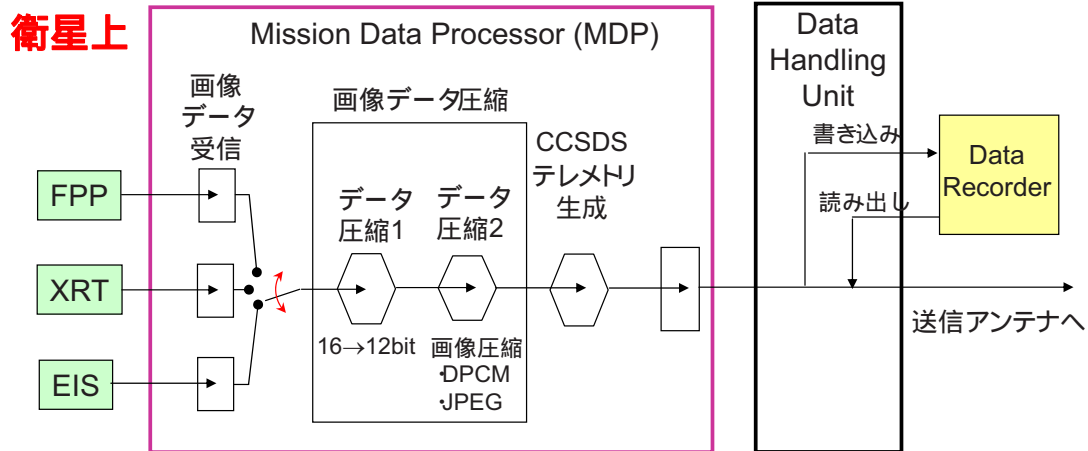
SOLAR-B指向方向制限と観測視野

- 3つの観測装置の最大観測視野サイズを表示

SOT視野中心をこの円内に収めれば安全に観測可能
 (太陽面内に視野中心があればよいくらいに覚えておく)



機上データ圧縮と解析用データ



現状・予定

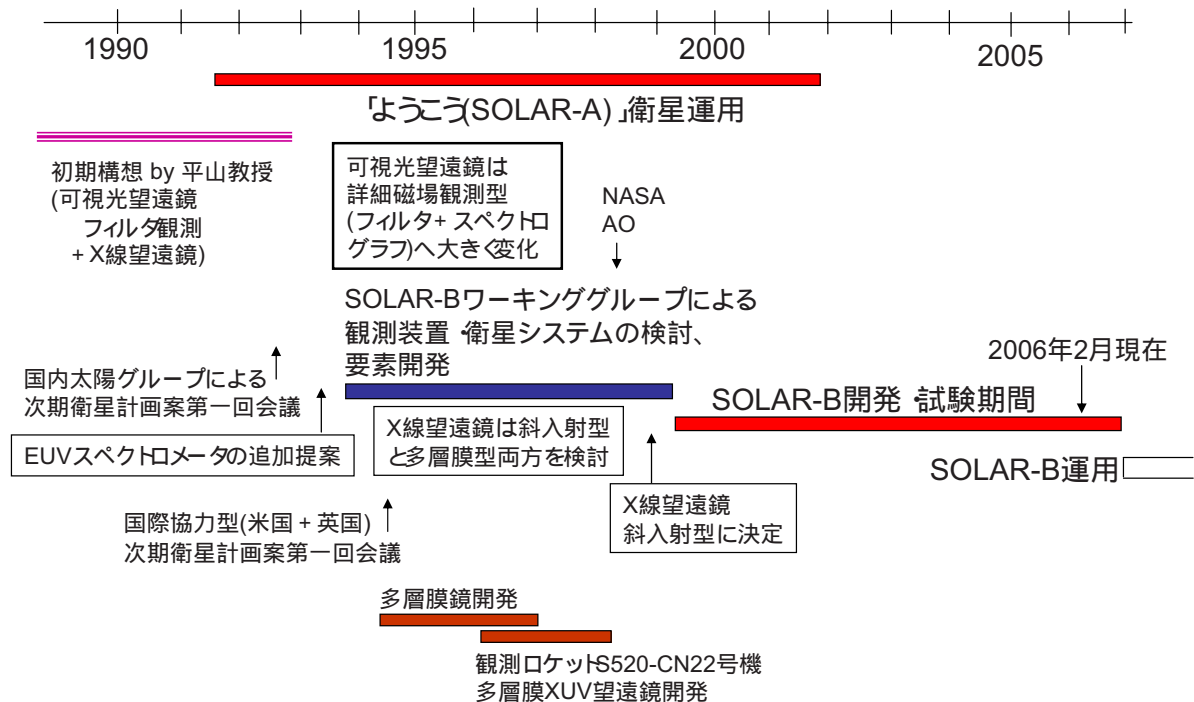
- 宇宙研で実施中の衛星性能試験は最終段階。
- 各観測装置チームは、上記試験のほかに観測装置の運用・データ解析ソフトウェアの開発を行っている。
- 2006年の夏に打ち上げ予定。
- 打ち上げ後、定常運用に入るまで2ヶ月程度。

詳細は各講義で

- SOT 可視光望遠鏡 永田・久保
- XRT X線望遠鏡 鹿野
- EIS 極紫外線撮像分光装置 浅井
- データフォーマット・検索ツール・
SOLAR-Bサイエンスセンター 下条
- 衛星運用 清水

よく分からない点があれば、どんどん質問して下さい。

参考 :SOLAR-B打ち上げまでの道程

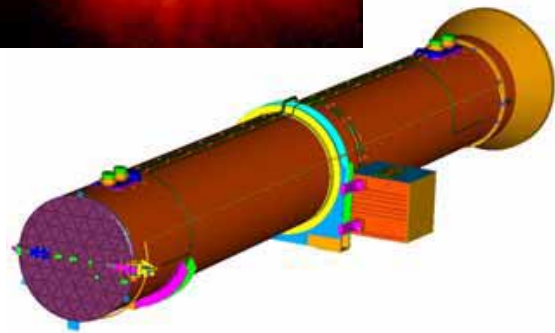
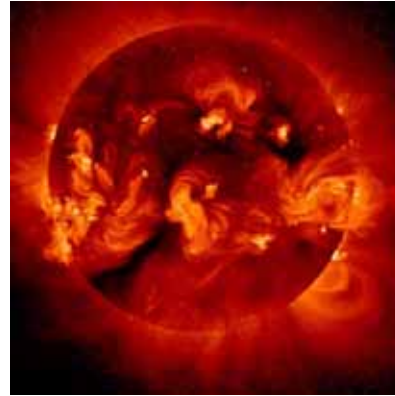


XRTとそのデータ解析

国立天文台・Solar-B推進室・鹿野良平

目次

- ・ XRT画像を見る
 - X線で見える太陽
 - Solar-BでのXRTの役割
 - XRT画像ファイルの基本要素
 - XRTの観測形態
- ・ XRTを知る
 - XRT光学系の特徴
 - 光学系による見え方の違い
 - XRT視野と解像度の関係
 - コロナスペクトルと波長感度
 - 温度感度
- ・ XRT画像を解析する
 - CCD画像の前処理
 - 温度診断
 - Alignment
- ・ XRTで観測する
 - 観測テーブル



XRT画像を見る:

X線で見える太陽

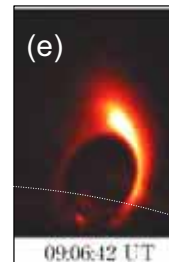
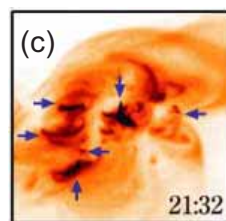
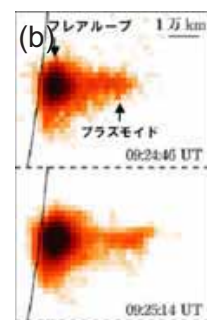
「ようこう」軟X線望遠鏡画像: ベストショット10より抜粋

- ・ 活動領域
 - フレア(e)
 - トランジェント・ブライティング(c)
 - ジェット(d)
 - CME(b)
 - コロナループ
- ・ 静穏領域
 - フィラメント消滅に伴うアーケード構造
 - スリーマー
- ・ コロナホール
 - XBP

[太陽コロナの自転](#)

[太陽活動周期](#)

2006/02/22

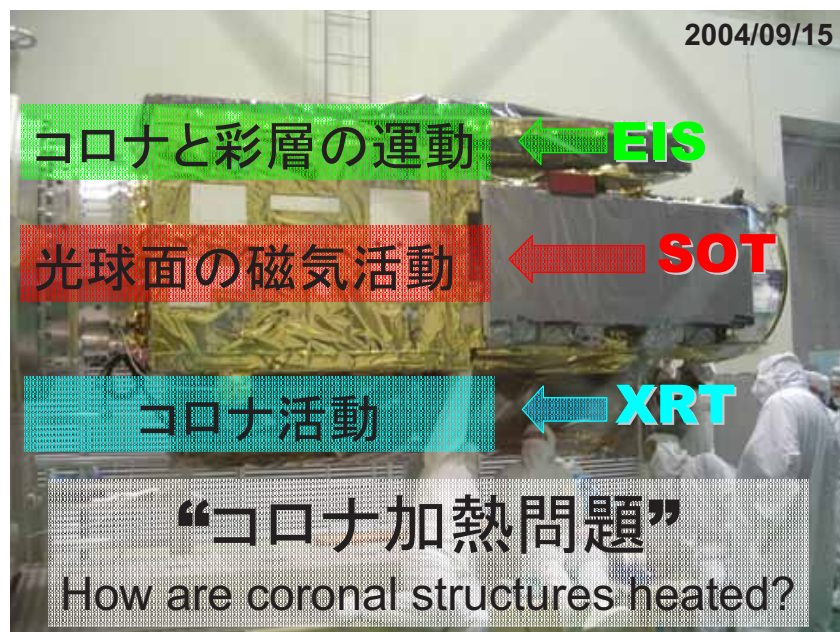


<http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/complate/yohkoh/best10.shtml>

XRTデータ 鹿野良平

2

XRT画像を見る: Solar-BでのXRTの役割

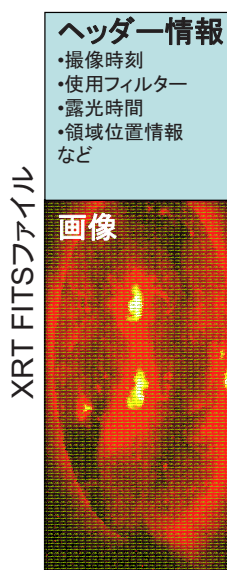


2006/02/22

XRTデータ 鹿野良平

3

XRT画像を見る: XRT画像ファイルの基本要素



- ・ XRT画像とは、…
CCDカメラで撮ったコロナの姿そのもの
- ・ 1つのXRT画像が1つのFITSファイルに
納められている

つまり、…

- ・ 1FITSファイルから画像を読み込めば、
何もせずともその瞬間のコロナの姿が見える。
- ・ 連続して読み込めば、変化の様子も見える。

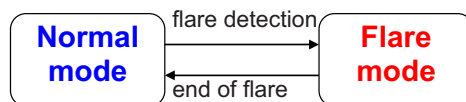
2006/02/22

XRTデータ 鹿野良平

4

XRT画像を見る： XRTの観測形態1 観測モードのバラエティー

観測モードには大きく分けて**Normal Mode**と**Flare Mode**がある。
それぞれ、独立な”観測テーブル”によって観測が制御されている。
XRTは自分自身でフレアを検出し(FLD機能)、観測モードを自動的に切替える。



特殊観測：“Pre-Flare観測” [<click>](#)

Normal Modeの観測の一種であるが、観測テーブルの設定によっては、Flare Modeに入る直前のデータを凍結保存することができる。

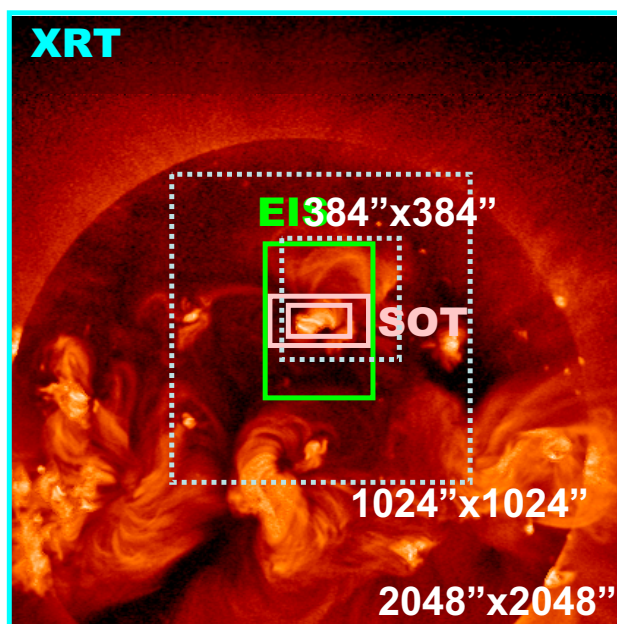
2006/02/22

XRTデータ 鹿野良平

5

XRT画像を見る： XRTの観測形態2 観測パラメータのバラエティー

- 視野
 - 観測ターゲット
衛星の向きを変えて選択する。
SOT, EISとの協調が必要。
 - CCD内の観測視野の選択
CCD内であれば、位置もサイズも自由に視野が選択可能。
但し、周辺では収差が大きい。
- 空間分解能
 - 1”,2”,4”,8”の分解能が選択可能。
- X線解析フィルター
 - 観測対象の温度と輝度に応じて9つの中から選択する。
- 可視光撮像
 - アライメント用の可視光撮像可。
- 画像圧縮
 - 可逆圧縮(DPCM)を主に使用。
 - 非可逆圧縮(JPEG)も使用可能。



2006/02/22

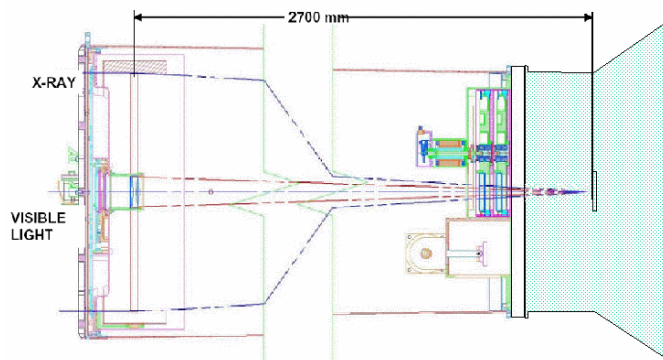
XRTデータ 鹿野良平

6

XRTを知る:

XRT光学系の特徴

- 斜入射光学系(付録参照)で波長感度範囲と温度感度範囲が広い
- (斜入射のX線望遠鏡としては)最高の空間分解能・1”ピクセル
- X線光学系に加えてアライメント用の可視光光学系がある。



- TRACEのほうが空間分解能は若干高いが、直入射光学系で、特定波長 & 特定温度にしか感度がないので、コロナ全体の研究には向いていない。

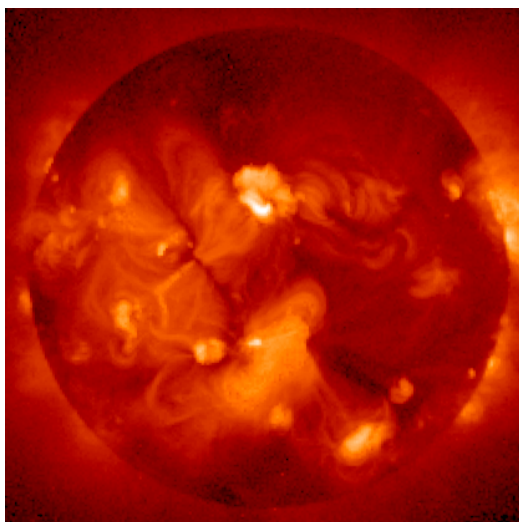
2006/02/22

XRTデータ 鹿野良平

7

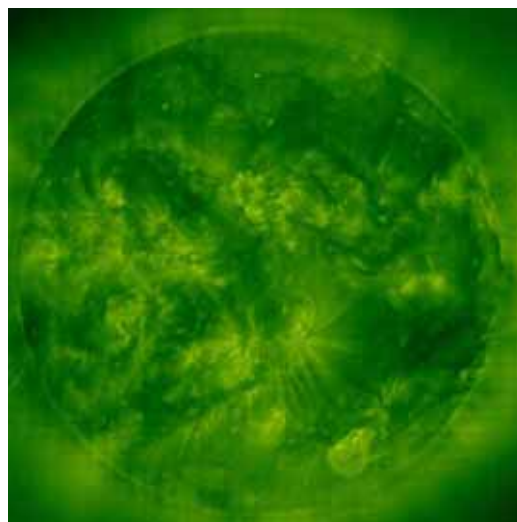
XRTを知る: 光学系による見え方の違い1

斜入射望遠鏡:「ようこう」SXT



2000/08/15 20:59UT AlMg

直入射望遠鏡: SoHO/EIT



2000/08/15 21:48UT Fe XII line, 195A

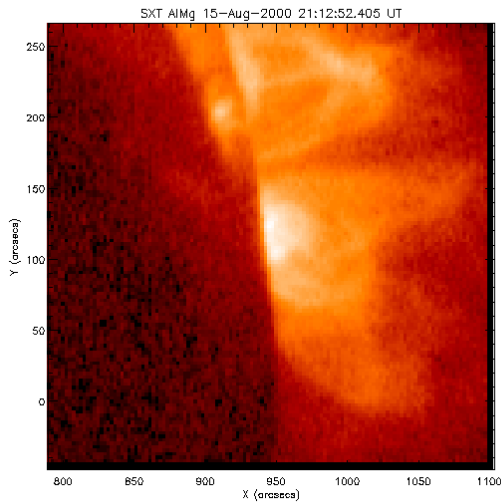
2006/02/22

XRTデータ 鹿野良平

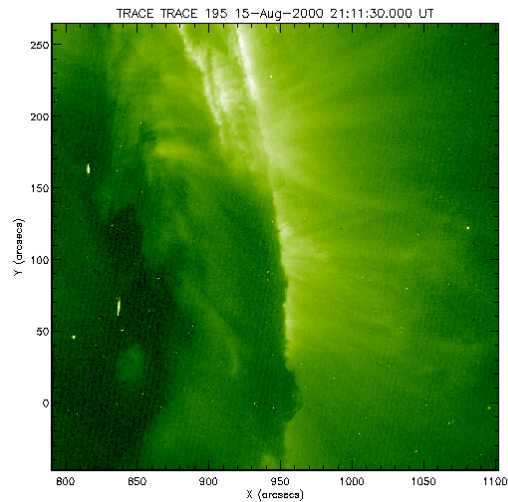
8

XRTを知る: 光学系による見え方の違い2

斜入射望遠鏡:「ようこう」SXT



直入射望遠鏡:TRACE



2006/02/22

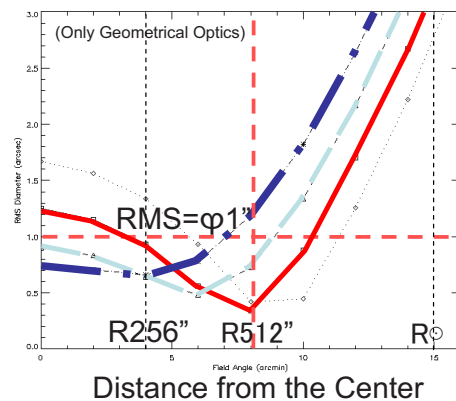
XRTデータ 鹿野良平

9

XRTを知る: XRT視野と解像度の関係

- 像面湾曲のため、平坦なCCDでは全体を一度にカバーできない。必要な視野サイズと分解能に応じて、XRTが持つ焦点調節機構で、適切な焦点にして撮像することが望ましい。

- 図中青一点破線: 高空間分解能用焦点
但し、視野はCCD中心からR512"以内に限られる。SOT, EISの視野はCCD中央近傍なので、協調観測には適している。
- 図中赤実線: 広視野用焦点
周辺部の分解能は改善するが、中央部では劣化する。太陽全体を4"程度の分解能で撮像するには最適な焦点。



2006/02/22

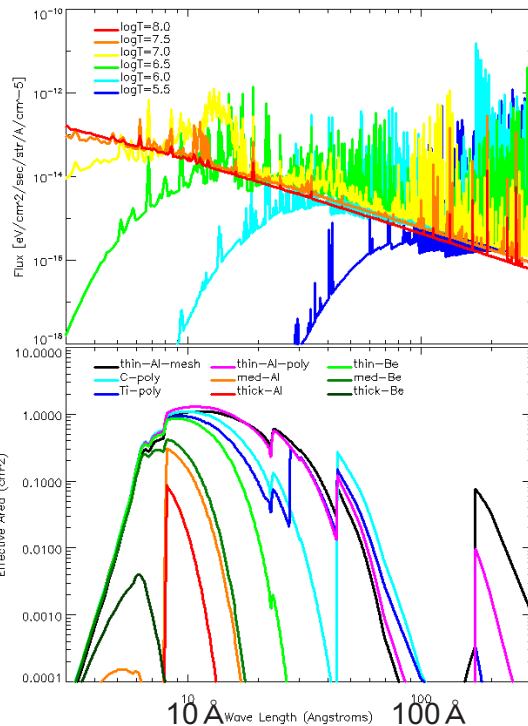
XRTデータ 鹿野良平

10

XRTを知る: コロナスペクトルと波長感度

・太陽コロナのスペクトル: 上図

光学的に薄いプラズマでモデル化され、波長と温度の関数として表される。連続光成分と輝線成分があり、基本的に温度が高いと短波長X線の量が多くなる。XRTでは、150~200Å近傍の100万度 (logT=6.0)で強くなる輝線群に着目し、これらの輝線によって”低温(100万度)”コロナを観測する。



・XRTの波長感度: 下図

物質によって異なるX線透過率をフィルターとして利用し、XRTは9つの波長感度特性を持つ。特定の輝線に偏らない広い波長感度がXRTの特徴であるが、100万度プラズマに対する感度を向上させるために、thin-Al-meshフィルターでは170~200Åの輝線群を敢えて取り込んだ。

2006/02/22

XRTデータ 鹿!

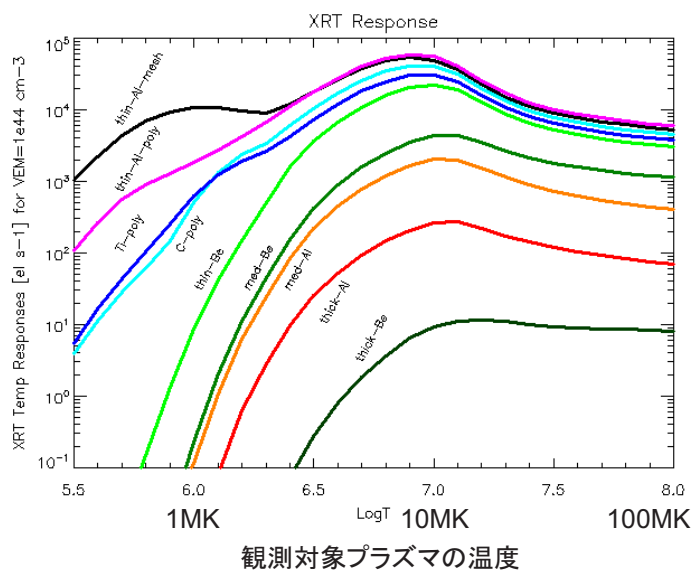
XRTを知る:

温度感度

・XRTの温度感度

前頁の2項の積の波長積分より、”(プラズマ)温度(に対する)感度”が求まる。相手の温度さえわかればこの図からプラズマの量(EM)が診断できる。

特定輝線に偏らないので、広い温度感度範囲を持つのが特徴的。但し、thin-Al-meshの1MKにある盛り上がりは、長波長輝線群の寄与である。



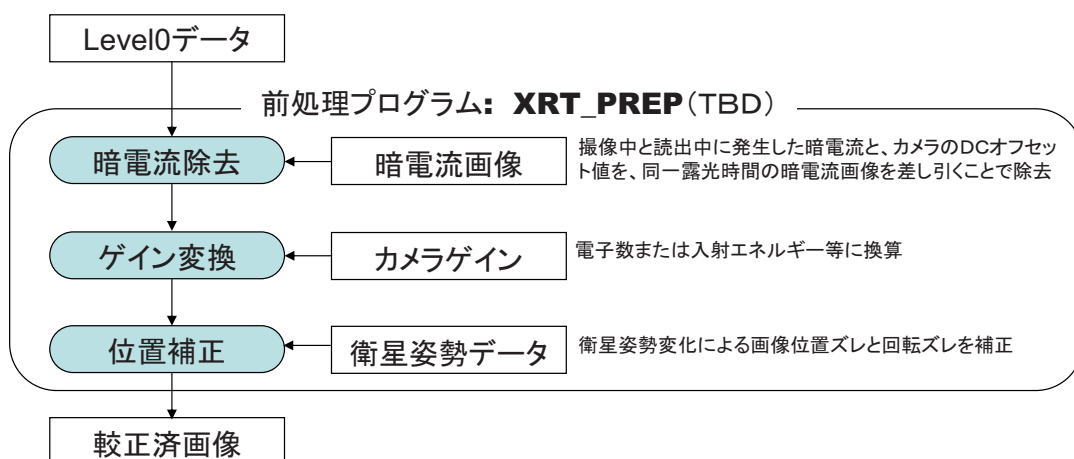
2006/02/22

XRTデータ 鹿野良平

12

XRT画像を解析する: CCD画像の前処理

- ・ 配布されるLevel0データを下記のように前処理する。



2006/02/22

XRTデータ 鹿野良平

13

XRT画像を解析する: 温度診断

- ・ カウント値の相対比を用いた方法

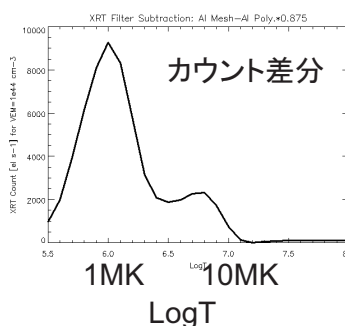
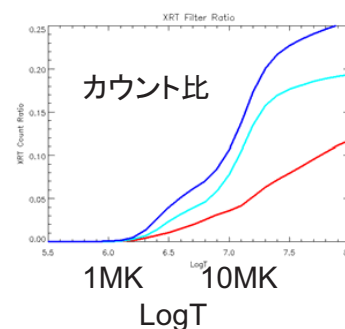
カウント値はコロナプラズマの量(EM)に比例する。但し、2つの異なるフィルターで得たカウント値の相対比は、EMに寄らないプラズマ温度のみの関数となる。XRT温度感度から作った、温度-相対比相関図を利用すれば、コロナプラズマ温度が求まる。(温度がわかればカウント値からEMも求まる。)

- 2MK-10MK 用のフィルターペア
 - ・ **med-Be & thin-Al-poly**
 - ・ **med-Be & C-poly**
- >10MK以上 用のフィルターペア
 - ・ **thick-Be & thick-Al**

- ・ カウント値の差分を用いた方法

1MKプラズマはthin-Al-meshフィルターで観測されるが、2MK以上プラズマ成分の混入がある。その混入を、thin-Al-polyフィルターとの差分をとって除去する。

- 1MKプラズマ 用のフィルターペア
 - ・ **thin-Al-mesh & thin-Al-poly**



2006/02/22

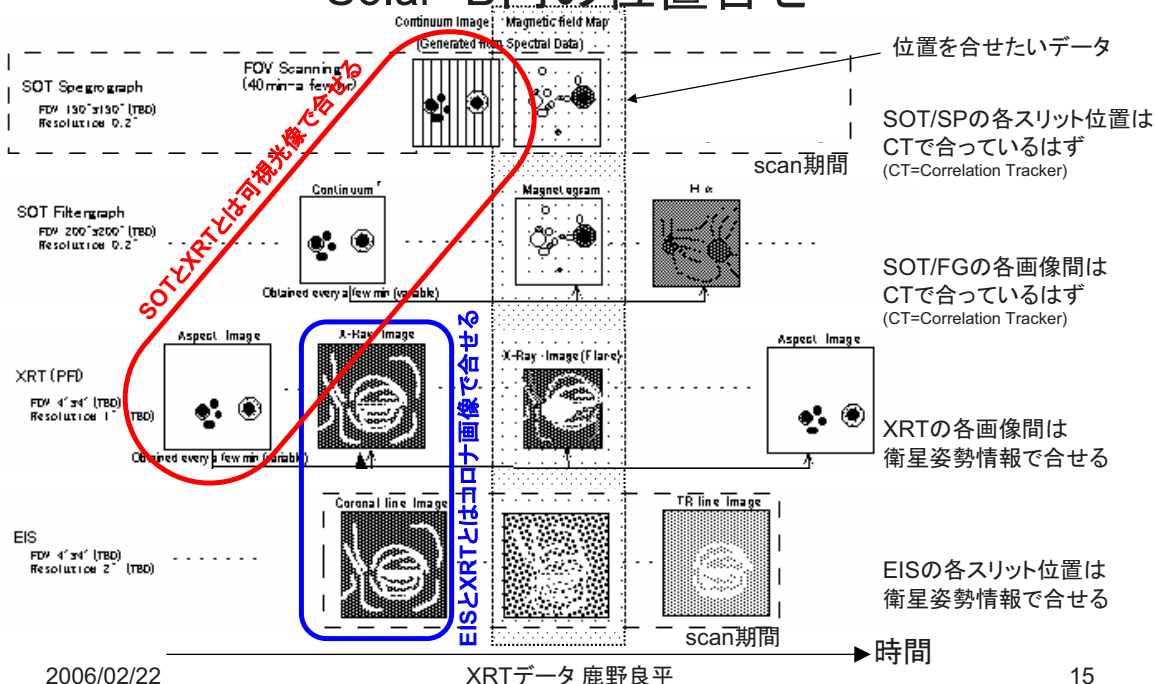
XRTデータ 鹿野良平

14

XRT画像を解析する:

Alignment:1

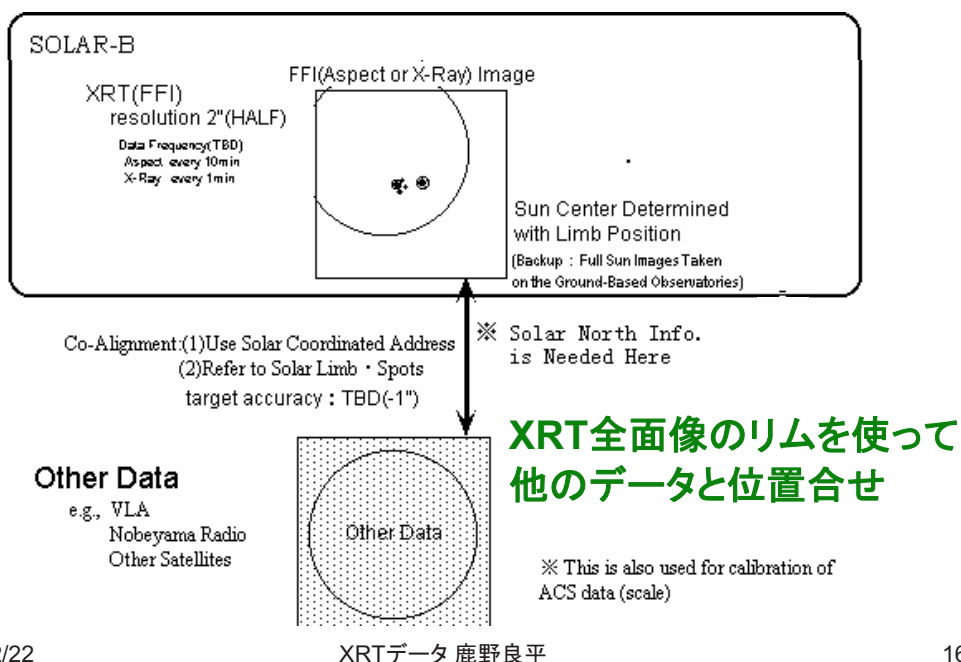
Solar-B内の位置合せ



XRT画像を解析する:

Alignment:2

Solar-B外との位置合せ

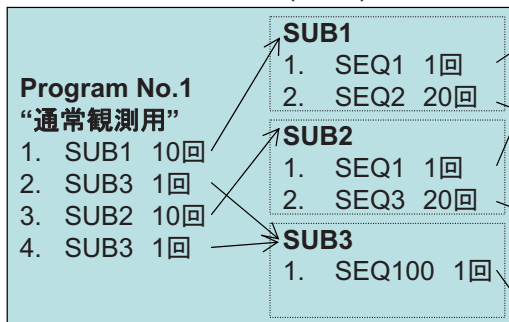


XRTで観測する： 観測テーブル

観測制御のテーブルの関係の模式図を示す。

既存のテーブルに満足できなくなったら、これらのテーブルを編集する。

Observation Tables (20枚)



Sequence Tables (100枚)



観測の構造を決めるもの。

繰り返し回数や観測間隔などを定義。

使用SEQを組替えるとき、これを編集する。

観測の素要素。観測ターゲットや温度診断用フィルターペアなどの基本的組合せを定義。

新たな視点での観測が必要なときこれを創る。

2006/02/22

XRTデータ 鹿野良平

17

付録：データ圧縮

- XRTデータのオリジナル画像は1pixelあたり12bitsのデータ量を持っています。そのデータを保存するさいに、下記の3つの圧縮方法を選べます。観測者が研究形態とデータ量によって選択します。

- **非圧縮：**

画像圧縮を一切せず、12bits/pixelのままで保存します。DPCMでも情報を失わないので、一般には使用しません。

- **可逆圧縮：**

DPCMによって画像を圧縮します。圧縮率は約50%とあまりよくありませんが、解凍処理にてオリジナルデータが完全に復活されるので、温度診断を初めとする多くの定量的な研究に適。XRTで主に使用する圧縮法となるでしょう。

- **非可逆圧縮：**

JPEGによって画像を圧縮します。選ぶQ値によっては、圧縮率も15%まで上げることが可能です。但し、解凍しても多少誤差が残るので、定量解析には注意が必要です。データ量に比べて、撮像枚数が上げられるので、形態変化を主眼とする定性的な研究に適。

2006/02/22

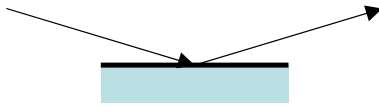
XRTデータ 鹿野良平

18

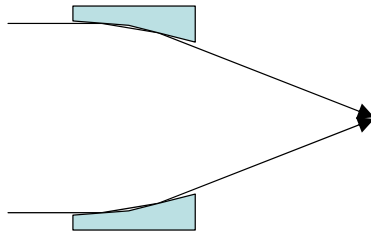
付録: 軟X線望遠鏡の種類

- 斜入射X線望遠鏡

- 斜入射時の全反射を利用する。



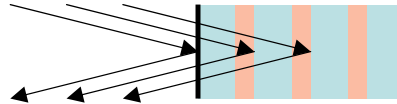
- 利点: 波長感度範囲が広い
- 不利点: 焦点距離 ~ 望遠鏡長さ



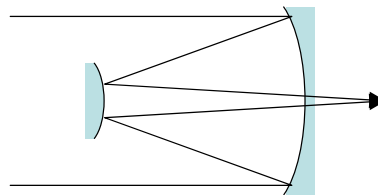
- Skylab, Yohkoh/SXT, GOES/SXI, Solar-B/XRT

- 直入射X線望遠鏡

- 多層膜による特定波長のX線の反射を利用する。



- 利点: 長焦点でもコンパクト
- 不利点: 単一波長のみ感度



- SoHO/EIT, TRACE

2006/02/22

XRTデータ 鹿野良平

19

[<return>](#)

付録: XRT性能表

X-Ray Optics	
Optics	Optimized Wolter-I-like grazing incidence optics
Focal length	2708 mm
Mirror micro-roughness	6 Å expected (TBD; analysis ongoing)
Aperture size	> 340 mm
Spatial resolution	68 % of encircled energy in 2 arcsec (at 0.523 keV)
Wavelength range	6–200 Å
Effective area	> 1.0 cm ² at 0.523 keV
Visible Light Optics	
Focal length	2708 mm
Wavelength	4305 Å (G-band)
Focal Plane CCD Camera	
CCD device	E2V 2048 × 2048 back-illuminated
Pixel Size	13.5 μm = 1.0 arcsec
Field of view	34 × 34 arcmin (capable of covering the whole Sun)
Image readout	500 kpixel/s

2006/02/22

XRTデータ 鹿野良平

20

付録: 参考文献・参考ページ

- 参考文献
 - **Solar-B中間報告書: XRT編**
 - SOLAR-B XRT-D Software User's Manual, April 14, 2005, Rev K
 - Solar-B XRT-to-Spacecraft ICD
 - Solar-B XRT-to-Camera ICD, Oct.31, 2005, Rev D
 - SOLAR-B MDP 搭載ソフトウェア基本設計書XRT編
- 参考ページ
 - Solar-B衛星全般
 - <http://solar.nro.nao.ac.jp/solar-b/>
 - <http://www.isas.ac.jp/j/enterp/missions/solar-b/index.shtml>
 - 「ようこう」衛星(Solar-Bの前任機)
 - <http://www.isas.jaxa.jp/home/solar/>
 - <http://www.lmsal.com/SXT/homepage.html>

2006/02/22

XRTデータ 鹿野良平

21

付録: 略語

CME: Coronal Mass Ejection
CT: Correlation Tracker
EIS: Solar-B / EUV Imaging Spectrometer
EM: Emission Measure (VEM=Volume Emission Measure)
MDP: Solar-B / Mission Data Processor
SOT: Solar-B / Solar Optical Telescope
XBP: X-ray Bright Point
XRT: Solar-B / X-ray Telescope

2006/02/22

XRTデータ 鹿野良平

22

つぎはSolar-Bだ！



Astro-Fの打上げ準備の写真から
2006/02/10



何かありましたら.....

国立天文台 Solar-B推進室 鹿野良平

ryouhei.kano@nao.ac.jp

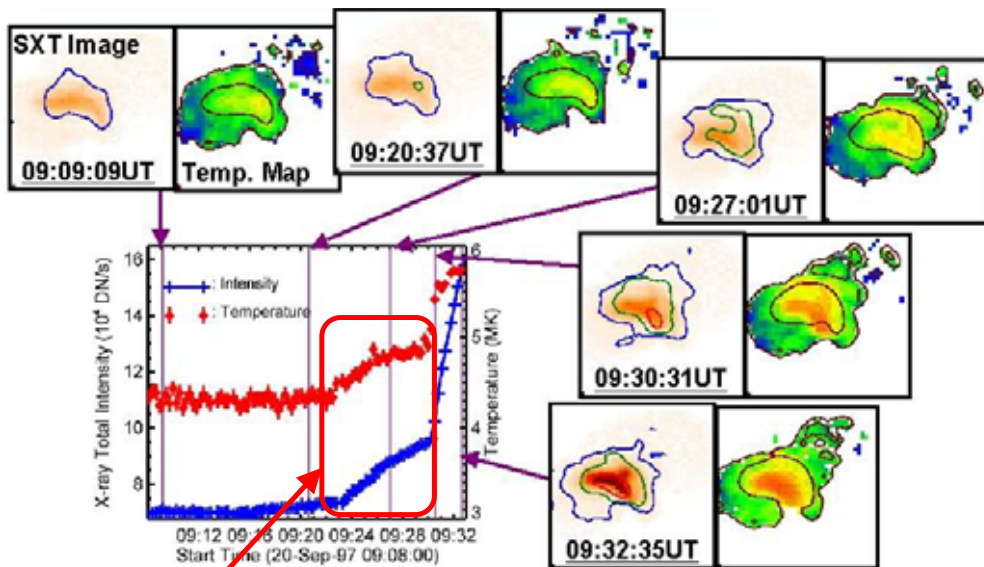
end

2006/02/22

XRTデータ 鹿野良平

25

Pre-flare Observation



FOV = 256"x256", 1"-res.
Time Cadence = 10 ~ 20 sec for a filter pair

Shimojo (ASJ 1999 autumn)

2006/02/22

XRTデータ 鹿野良平

26

[<return>](#)





2000/02/22

http://www.isas.jaxa.jp/home/solar/

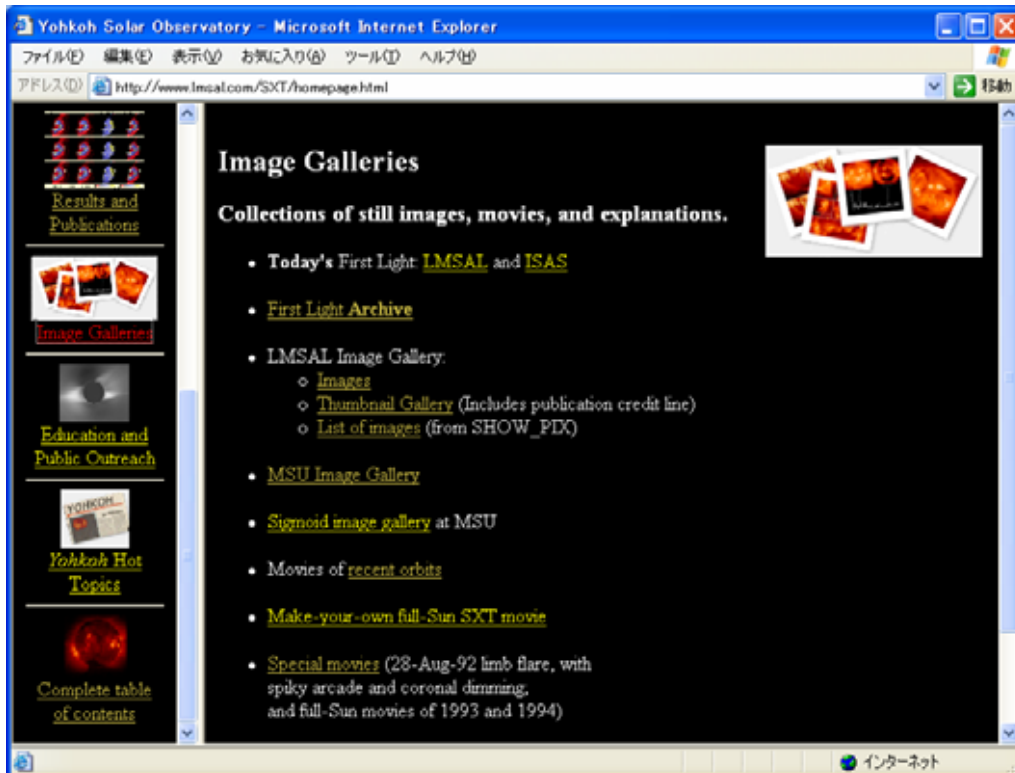
29



2000/02/22

http://www.lmsal.com/SXT/homepage.html

30



2000/02/22

インターネット

31



2000/02/22

インターネット

32

SOLAR-B / EIS

Extreme-ultraviolet Imaging Spectrometer

(極紫外線撮像分光装置)



浅井 歩

asai @ nro.nao.ac.jp
国立天文台
野辺山太陽電波観測所



SOLAR-B/EIS

- SOLAR-Bの科学的目的:
 - コロナの成因を探る
 - 太陽磁場・コロナ活動の起源に迫る
 - 宇宙プラズマの素過程を探る
- EISの目的・役割:
 - 極紫外線での分光観測
 - 高い空間・時間・波長分解能
 - 太陽大気プラズマの様子と運動を調べる

今日の講義の内容:

- 太陽極紫外線放射とは、分光観測とは
- EISによって得られる観測データの特徴を知る

極紫外線での分光観測

極(/極端)紫外線

(Extreme UltraViolet: EUV*)

*EUV: 100 – 1200 (10 – 120 nm)

太陽像

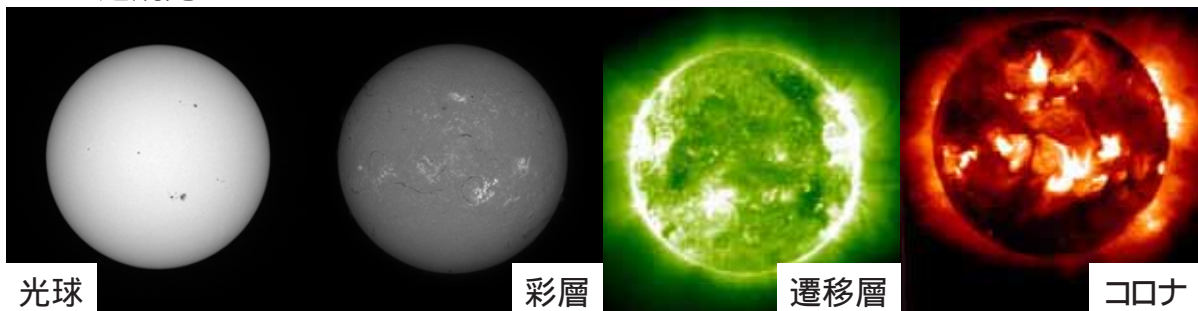
- 太陽像: 観測する波長によって見え方が異なる
- 太陽大気の温度・密度の構造によって、どの高さの層からどの放射が出るか異なるため
- EUVではどのような放射を見ている?

連続光

H α 線ライン

EUV

軟X線



光球

彩層

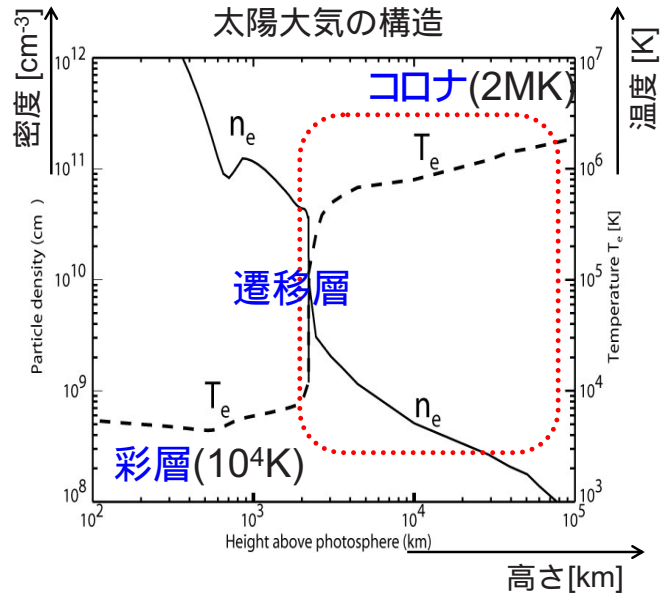
遷移層

コロナ

さまざまな波長で見た太陽画像(色は人工的につけたもの)

太陽大気構造

- 低温の(10^4K)彩層と高温の(10^6K)コロナ、それらをつなぐ遷移層
- 密度も3桁ほど変動
- EUVを出すのは、主に遷移層~コロナ(EISのターゲットは上部遷移層から下部コロナ)

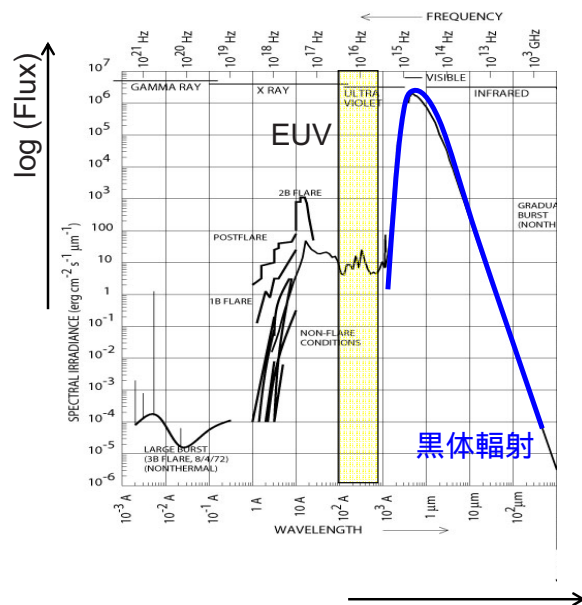


(Fontenla et al. 1990; Gabriel 1976)

太陽からの放射

- 太陽表面からは連続光 (5700K の黒体放射)が主な放射
- EUV*では黒体放射による連続光はほとんどない

*EUV: 100 – 1200



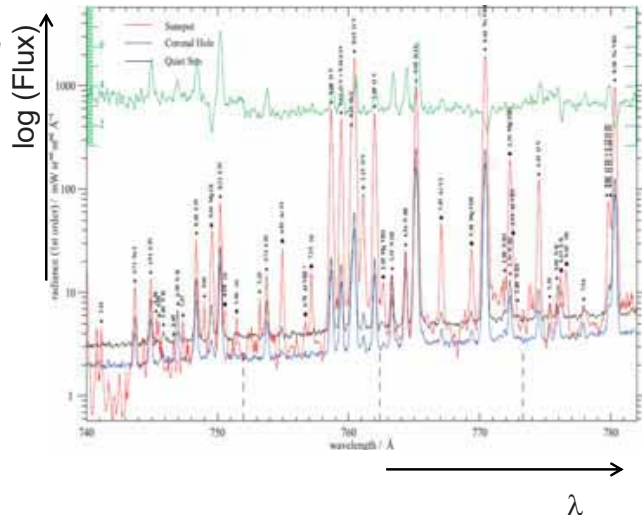
太陽の放射強度スペクトル λ
(Zombeck 1990; Foukal 1990)

太陽からの放射

- 太陽表面からは連続光 (5700Kの黒体輻射)が主な放射
- EUV*では黒体輻射による連続光はほとんどない

*EUV: 100 – 1200

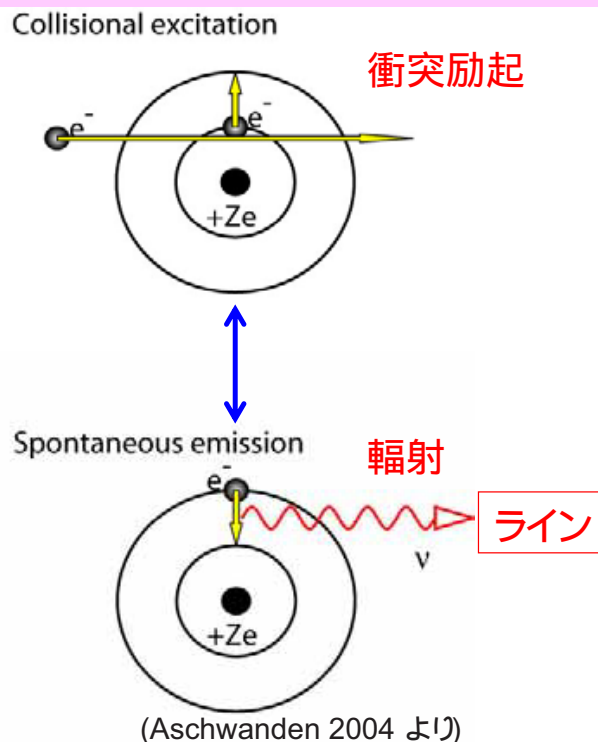
→ **イオンからのライン放射が優勢**



極紫外域での太陽放射スペクトル
SOHO/SUMER (Curdt et al. 2001)

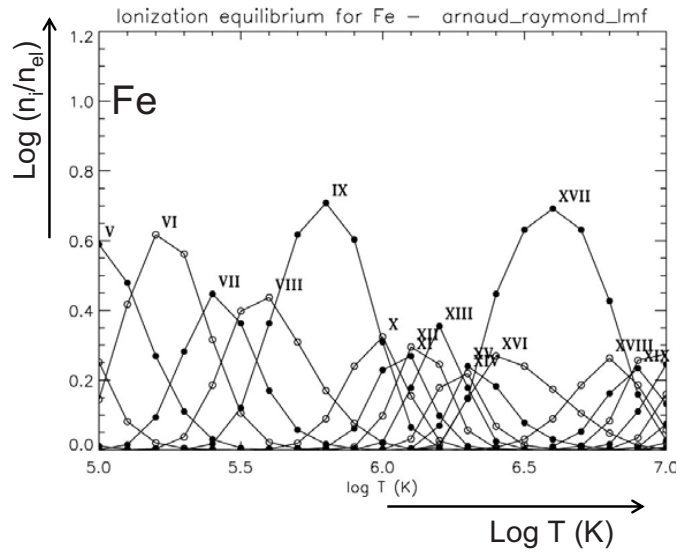
輝線(ライン)1: 放射メカニズム

- ラインの形成
衝突による励起
↕
輻射による下方遷移



輝線(ライン)2: イオン化

- ラインの形成
 - イオン化の度合い (温度に依存)
 - 温度が上るにつれ、より多くの電子が剥ぎ取られ、イオン化が進む
- イオン化平衡(n_i/n_{ei})

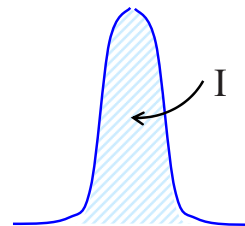


イオン化バランス
(Aschwanden 2004)

ライン診断 - 1

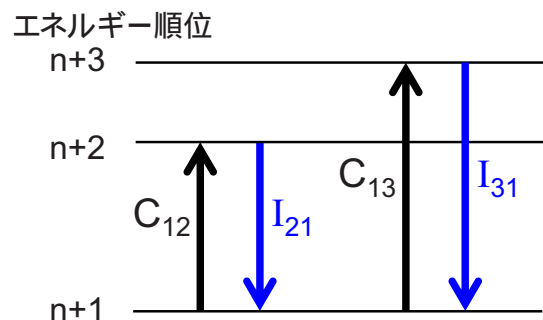
- **温度診断**
- 温度に感度のあるライン比で測定

放射強度を測定



衝突で励起 → 輻射で下方遷移
衝突係数が温度に依存

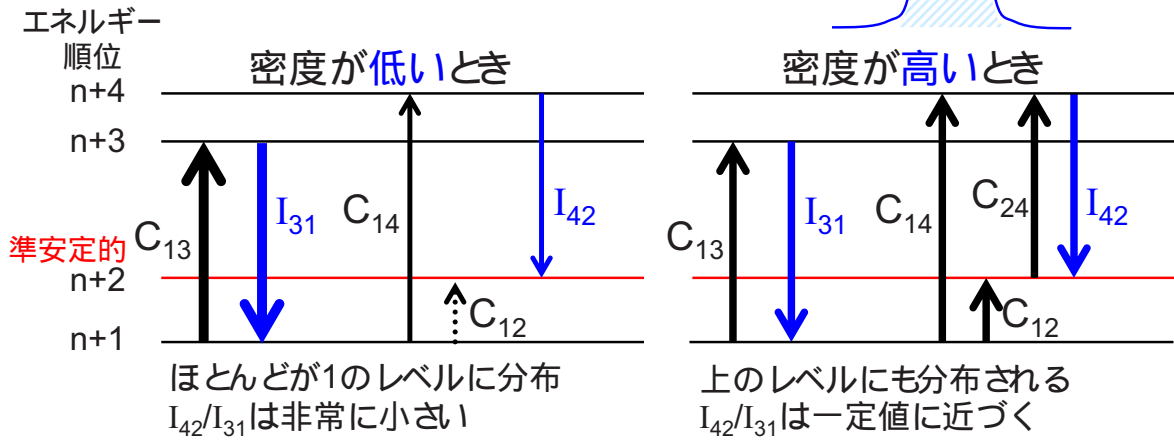
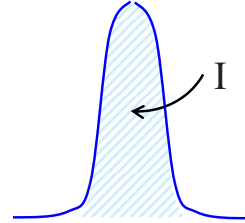
$$\frac{I_{31}}{I_{21}} \propto \exp\left(\frac{\Delta E_{12} - \Delta E_{13}}{kT}\right)$$



ライン診断 - 2

- 密度診断
- 密度に感度のあるライン比で測定

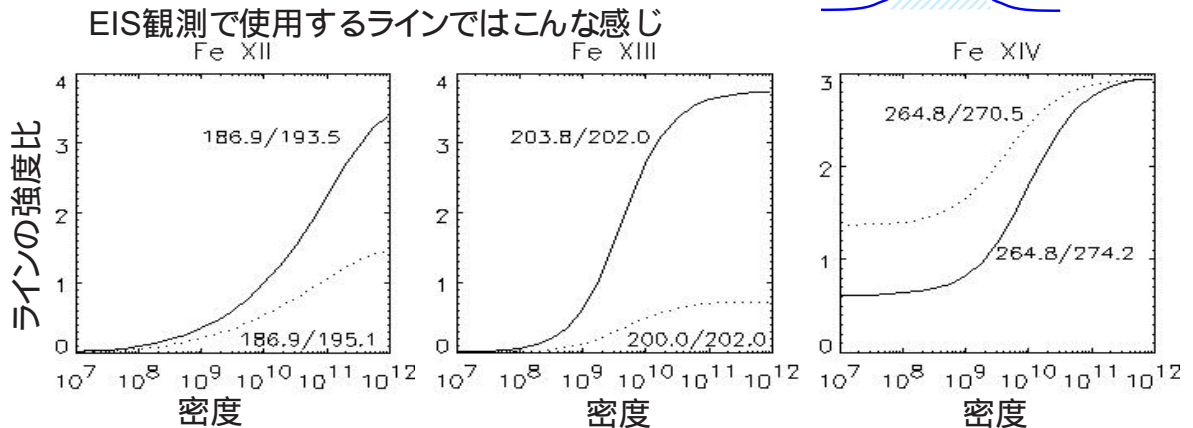
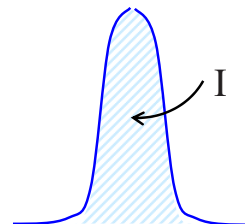
放射強度を測定



ライン診断 - 2

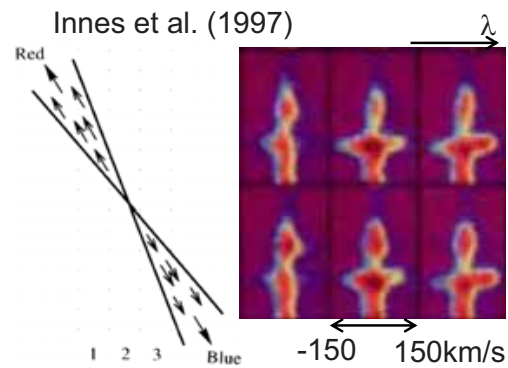
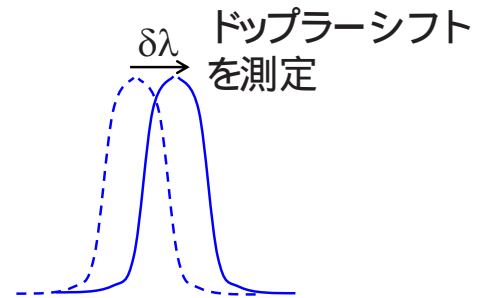
- 密度診断
- 密度に感度のあるライン比で測定

放射強度を測定



ライン診断 - 3

- **速度診断**
- プラズマの運動が波長シフトとして計測可能

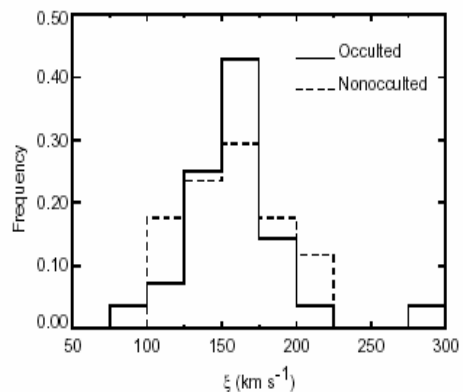
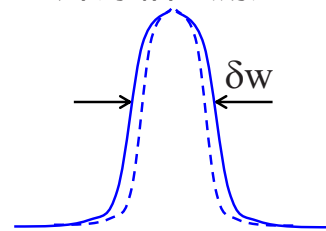


ライン診断 - 4

- **輝線幅**
- 温度、非熱的效果 (熱速度による広がりが加え、静穏時10-20km/sの速度、フレア時~100km/sの速度が加わる)

Yohkoh/BCSによる観測
非熱的な効果によるラインの広がりが(フレアとの相関)
(Mariska and McTiernan 1999)

輝線幅を測定



EISでの観測

EISの性能(概要)

観測波長域: 170 – 210 , 250 – 290 (CCDも2基)

* $10^5 - 10^7$ Kに温度感度のあるラインを含む

空間分解能: スリット方向 : 1"/pixel

スリット幅 : 最小1"

スキャン方向 : 0.24" (ラスタースキャンの1ステップ)

波長分解能: ピクセル分解能 : 22m 、

分光器の分解能: 分散~4000

→観測装置によるライン幅の広がり: 50m

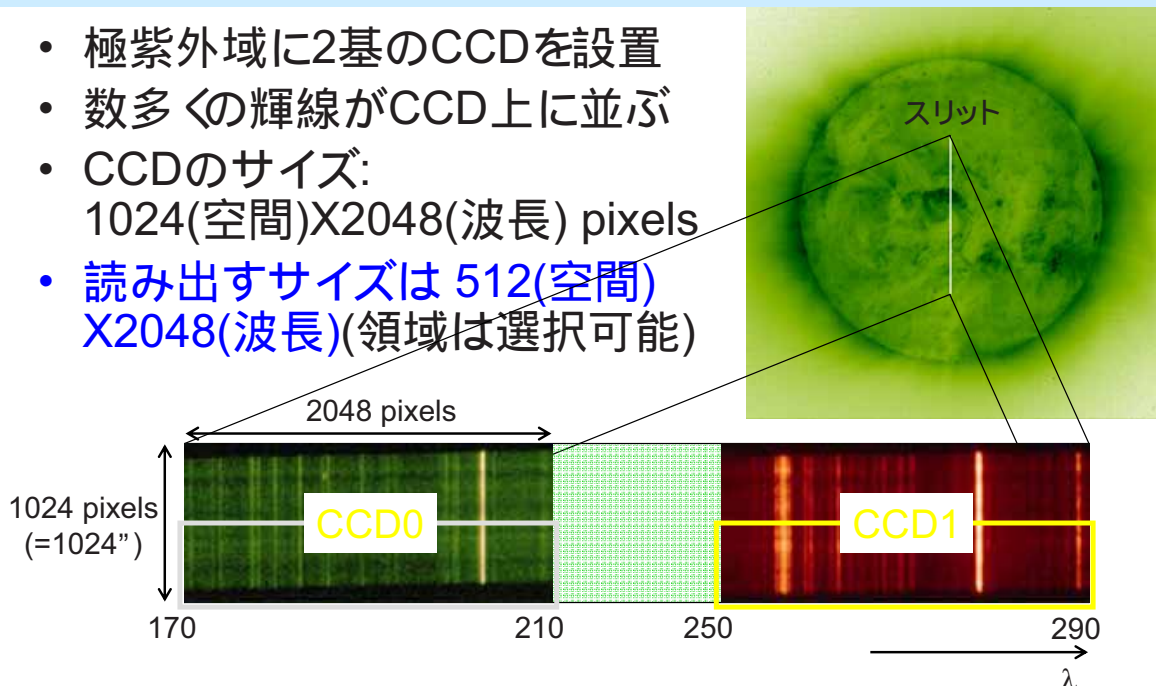
時間分解能: 最高0.5秒 ←ほぼ露出時間で決まる

EISの性能の特徴

- SOHO/CDS/NISとの比較してどこがどれだけ良くなったのか
 - 観測波長域が違う(310-380, 510-630)
 - 空間分解能: 3倍向上
 - 波長分解能: 分光器の角度分散で3倍以上向上
 - 有効面積: 10倍程度向上→時間分解能の向上
 - スキャン可能領域が広い(590"x512")
(c.f. CDS: 240"x240")
- 数秒間の露出時間で2秒角の空間分解能と高い(波長)速度分解能をもったEUV領域の分光データが得られる
- これまでのEUV分光観測とは全く異なる、新しい太陽の姿を明らかにする!?

観測データ概観

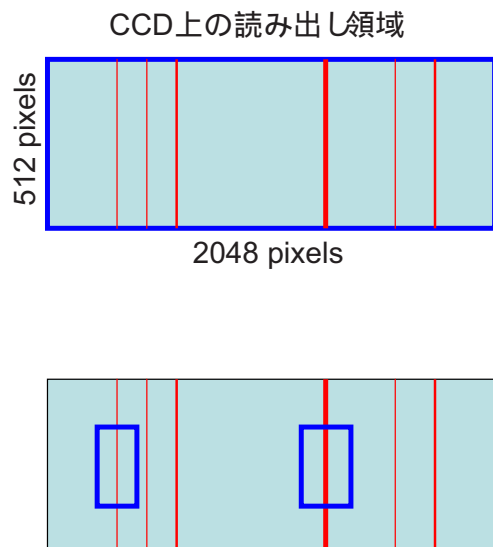
- 極紫外域に2基のCCDを設置
- 数多くの輝線がCCD上に並ぶ
- CCDのサイズ:
1024(空間)X2048(波長) pixels
- 読み出すサイズは 512(空間)
X2048(波長)(領域は選択可能)



*これらはSOHO/EIT, CDSから作成したサンプル図です

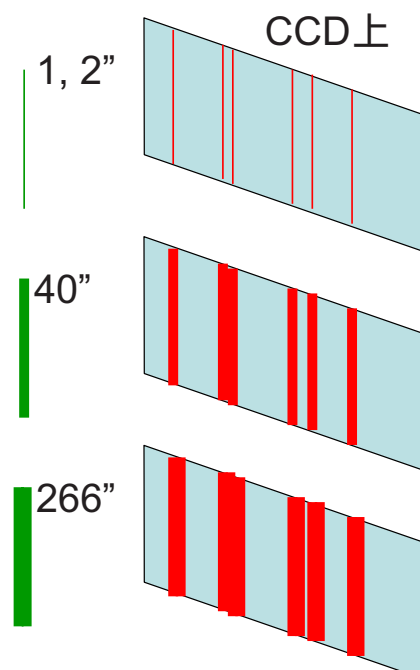
ラインの切り出し

- 観測波長領域を全て保存
→スペクトルを詳しく調べる
- ラインを選択し、そこだけ切り出して保存(最大25輝線まで)
 - 切り出す幅(window size)はラインによる
 - ラインリストで指定
- スリット方向にも範囲を限って保存
→データ量を節約できる



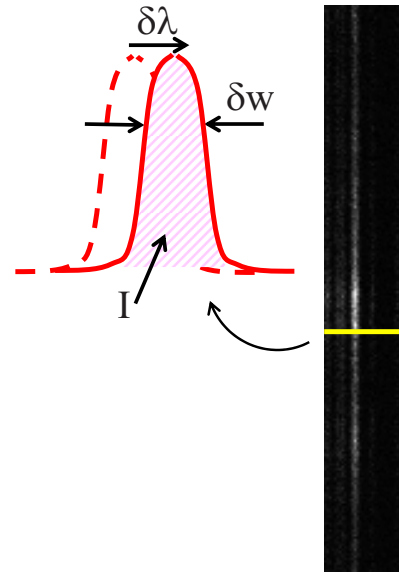
スリット スロット

- **スリットは太陽の南北方向**
- CCD上ではスリットの幅方向 = 波長方向
- **スリット: 1, 2"**
 - **ラインの分光用**
 - スリット幅が広い方が分光画像がなまる
 - スリット幅が広い方が光子数をかせげ、露出時間を短くできる
- **スロット: 40, 266"**
 - **画像**が得られる
 - ターゲットを逃しにくい



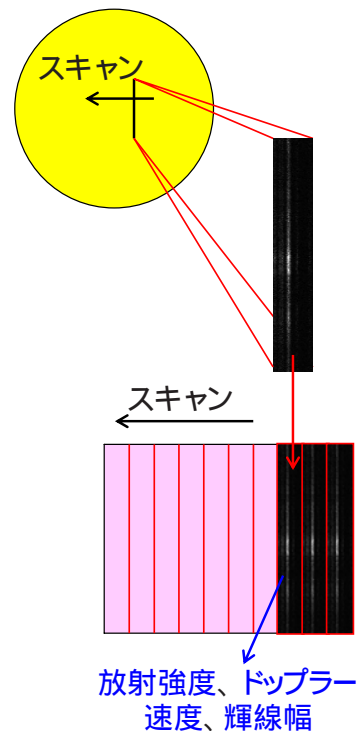
スリット・ラインのフィッティング

- **ガウス関数でフィッティング**
 - 放射強度 : I
 - ドップラー速度(ピーク位置のずれ) : $\delta\lambda$
 - 輝線幅 : δw
- が情報として求まる
- IDL*のソフトウェアとして計算ツールを提供
 - 計算後のデータも公開の予定
 - *IDL: (Interactive Data Language) 解析用アプリケーション
- **ガウス関数でない場合の研究も可能(速い速度場など)**



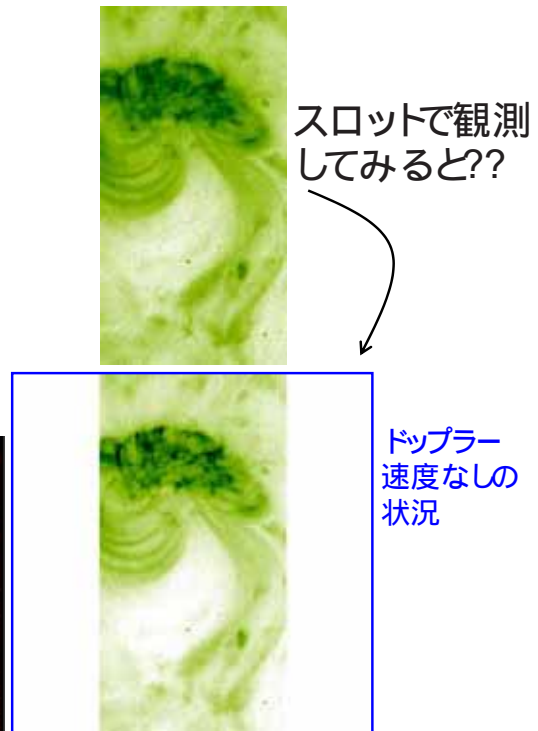
スリット・ラスタ観測

- スリット位置を移動することで「分光+撮像」が可能 = **ラスタ観測**
- 放射強度、速度、輝線幅の2次元画像
- 細かい空間情報・広いスキャン範囲(刻みの間隔・ステップ数)
- ←→空間・時間分解能



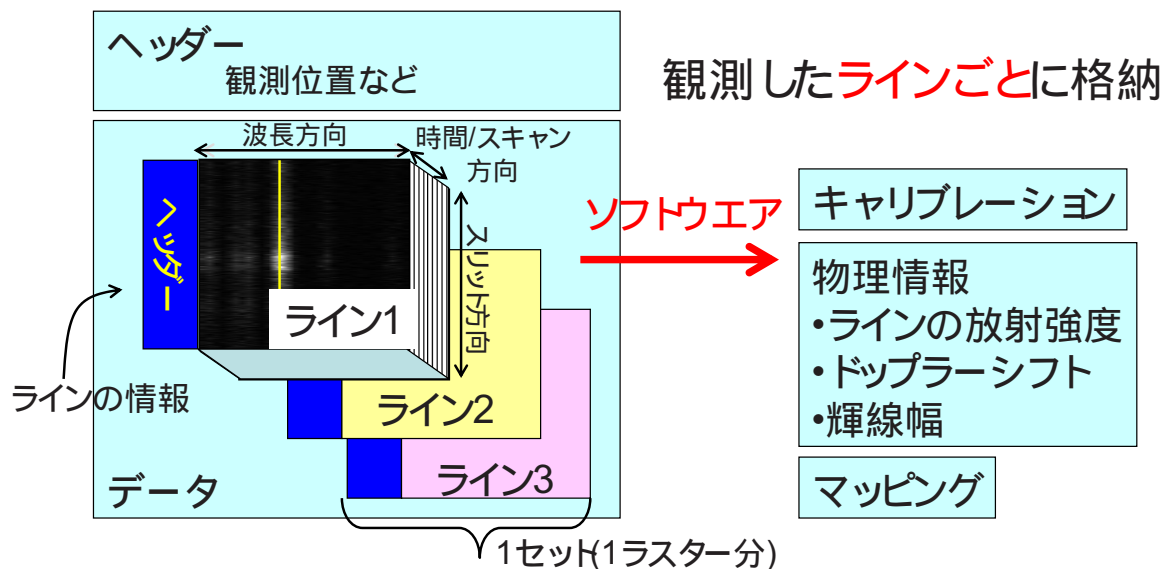
スロット観測

- スロット観測
- 東西の空間情報が波長情報に重なる
- 構造や速度構造を見るときに用いる
- 近くに他のラインがあると重なってしまう



EISのデータの中身

- FITSで配布 (***.fits)
 - IDL/SSW*で解析用ソフトウェアを配布
- *SSW (Solar SoftWare)太陽観測データ解析用のソフト群



ラインの選択

- EISで観測できるライン(短波長)
- 170 – 210Å
- (電離度の異なる)鉄イオンのラインが複数含まれる
- 温度・密度の診断に便利

Ion	Wavelength (nm)	log T	N _{photons} [s ⁻¹ (1 × 10 ⁻¹) ⁻¹]	
			Active Region	M2 Flare
Fe IX	17.107	5.80	3	9
O VI	18.412	5.51	1	9
Fe X	18.454	6.00	15	36
Fe XII	18.685/18.688	6.11	34	240
Fe XXI	18.789	7.00	-	350
Fe XI	18.823/18.830	6.11	56	160
Fe XXIV	19.204	7.30	-	4.0×10 ⁴
Fe XII	19.239	6.11	46	120
Ca XVII	19.282	6.70	31	1.8×10 ³
O V	18.290/19.291	5.40	2	130
Fe XII	19.352	6.11	140	310
Fe XII	19.512/19.513	6.11	256	670
Fe XIII	20.002	6.20	20	110
Fe XIII	20.204	6.20	35	82
Fe XIII	20.380/20.383	6.20	27	150

明るいラインのみピックアップ

ラインの選択

- EISで観測できるライン(長波長)
- 250 – 290Å
- 温度感度域が広い(5万度~2千万度)

→観測目的に適切なラインを適宜選択(最大25本)

キアンティ

- CHIANTIを利用しどのラインが適しているかチェック

Ion	Wavelength (nm)	log T	N _{photons} [s ⁻¹ (1 × 10 ⁻¹) ⁻¹]	
			Active Region	M2 Flare
Fe XVI	25.107	6.40	4	110
Fe XXII	25.316	7.11	-	71
Fe XVII	25.487	6.60	2	110
Fe XXIV	25.510	7.30	-	3.3×10 ³
He II	25.632	4.70	16	3.6×10 ³
Si X	25.837	6.11	14	62
Si X	26.106	6.11	5	21
Fe XVI	26.298	6.40	15	440
Fe XXIII	26.376	7.20	-	1.2×10 ³
Fe XIV	26.478	6.30	20	220
Mg VI	26.899	5.60	2	20
Mg VI	27.039/27.040	5.60	5	46
Fe XIV	27.051	6.30	17	100
Si VII	27.264	5.80	3	12
Fe XIV	27.420	6.30	14	76
Si VII	27.535	5.80	9	38
Fe XV	28.416	6.30	110	1.5×10 ³

明るいラインのみピックアップ

CHIANTI

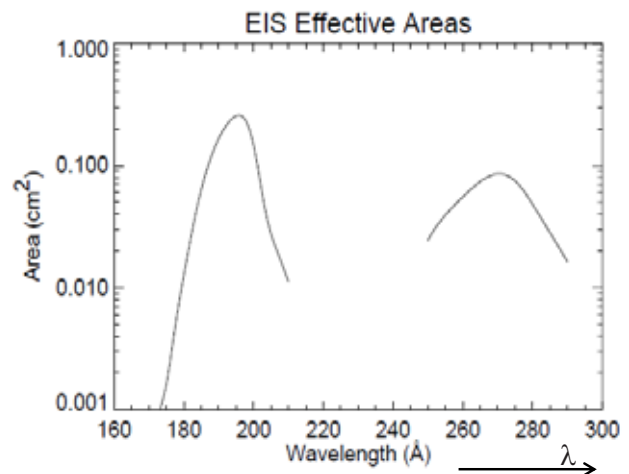
<http://www.solar.nrl.navy.mil/chianti.html>
<http://www.chianti.rl.ac.uk/>

- (ラインを生成する)原子の情報データベースと解析ツールを併せたパッケージ
- 密度や温度の情報からラインの強度を計算
- SSWにパッケージがあり、IDLを介して利用可能



露出時間

- 各ラインの放射強度 +EISの有効面積 → 到達する光子数が決まる → **必要な露出時間**
- CCD読み出しにかかる時間
- スキャンにかかる時間 (CCD読み出し時間でキャンセルできる)
- **これらを総合して時間分解能が決まる**



EISの有効面積

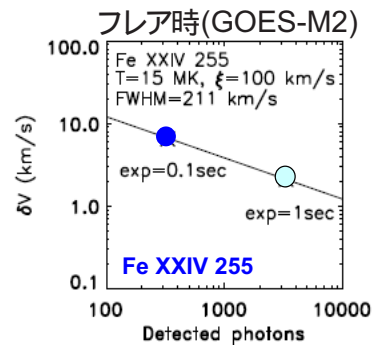
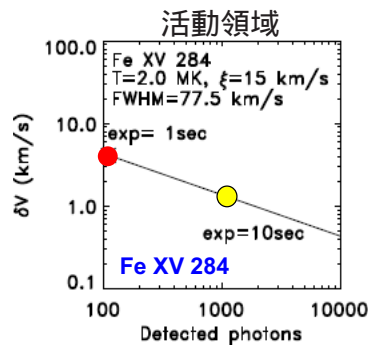
露出時間

- 各ラインの放射強度 +EISの有効面積 → 到達する光子数が決まる
→ 必要な露出時間
- CCD読み出しにかかる時間
- スキャンにかかる時間 (CCD読み出し時間でキャンセルできる)
- これらを総合して時間分解能が決まる

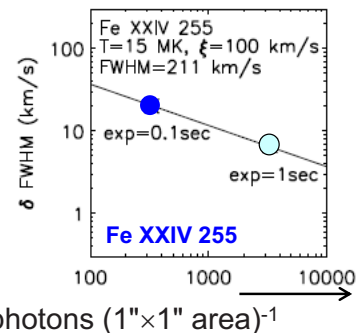
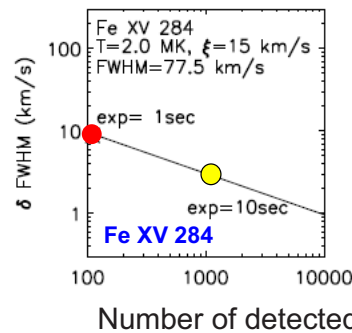
Ion	Wavelength (nm)	$N_{\text{photons}} [s^{-1} (1'' \times 1'')^{-1}]$	
		Active Region	M2 Flare
Fe XVI	25.107	4	110
Fe XXII	25.316	-	71
Fe XVII	25.487	2	110
Fe XXIV	25.510	-	3.3×10^3
He II	25.632	16	3.6×10^3
Si X	25.837	14	62
Si X	26.106	5	21
Fe XVI	26.298	15	440
Fe XXIII	26.376	-	1.2×10^3
Fe XIV	26.478	20	220
Mg VI	26.899	2	20
Mg VI	27.039/27.040	5	46
Fe XIV	27.051	17	100
Si VII	27.264	3	12
Fe XIV	27.420	14	76
Si VII	27.535	9	38
Fe XV	28.416	110	1.5×10^3

物理量の測定精度

ドップラー速度
3km/s程度



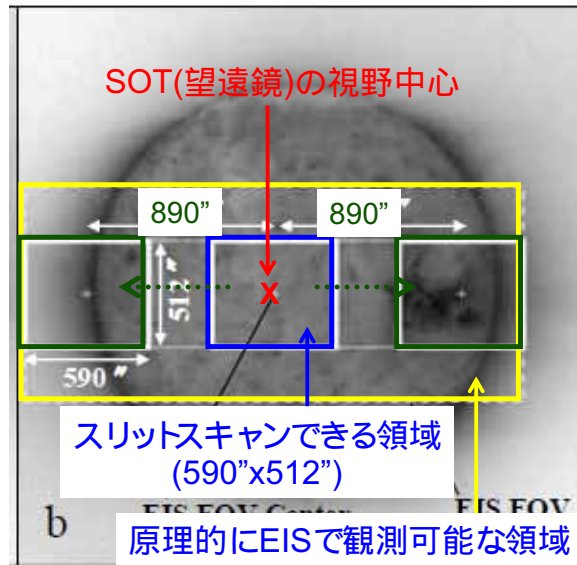
ライン幅
10km/s程度



Number of detected photons ($1'' \times 1''$ area)⁻¹

観測視野

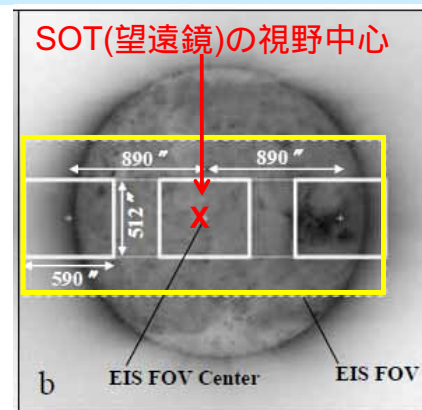
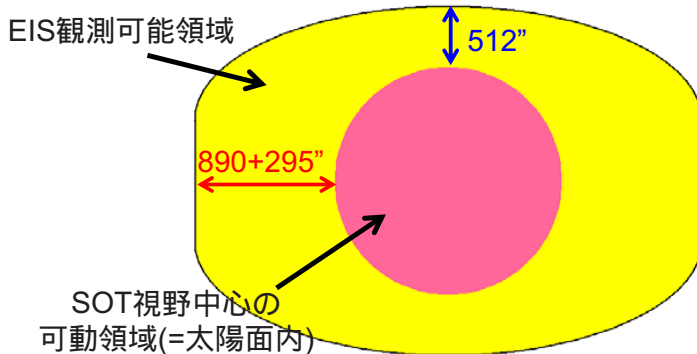
- 衛星(SOT)によって制限を受ける
- SOTに対する自由度:
視野中心に対し
 - 590"x512"のスキャン可能領域
 - 左右(東西)各890"のEIS可動領域



振動を生じ SOT(OTA)に影響を及ぼす可能性あり
→頻繁には動かさない

観測視野

原理的にEISで観測可能な範囲



- 望遠鏡(SOT)の可動領域(グレー)*に対して大きな観測可能視野(実線)をもつ
*SOTの可動領域を太陽円盤内とした

EIS自動判定観測機能

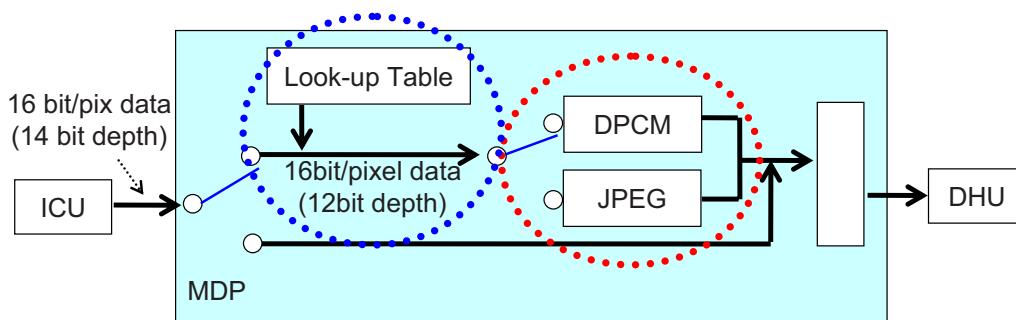
- 観測装置側が自ら判断し、新しい観測テーブルを開始することができる
- EIS自動露出時間変更機能
 - 露出時間を適正に保つ
- EISイベント観測機能(ラスタースキャン中)
- EISフレア観測機能(スロット観測中)
 - 特に明るい場所があれば、そこを集中的に観測する
- XRTフレア観測機能
 - XRTからの「フレア発生」信号を受け取り、スリット可動範囲であればその場所に向けることができる
- 太陽追尾補正機能
 - 太陽差動回転の補正をキャンセルすることができる

データ量とデータ圧縮

- テレメトリでのデータ量・データレートの上限が決まっている
 - スリット長やラスター視野を限る
 - ライン数を限る
 - 時間分解能を低めにする
- データ圧縮を有効利用する

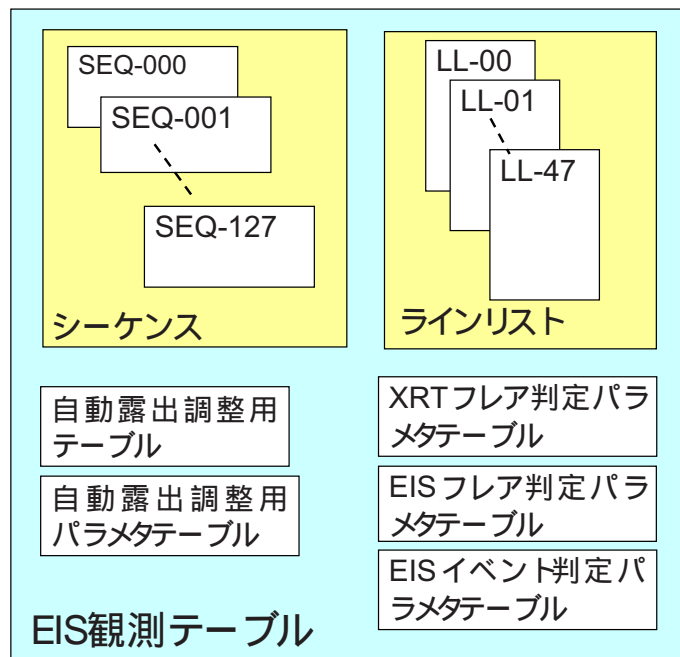
データ圧縮

- **画素内圧縮(14ビット→12ビット)が必要**
 - EISで取得される画像データは14ビット→圧縮チップの入力は12ビット
- **画像圧縮(DPCM圧縮/JPEG圧縮)をかけてさらに圧縮**

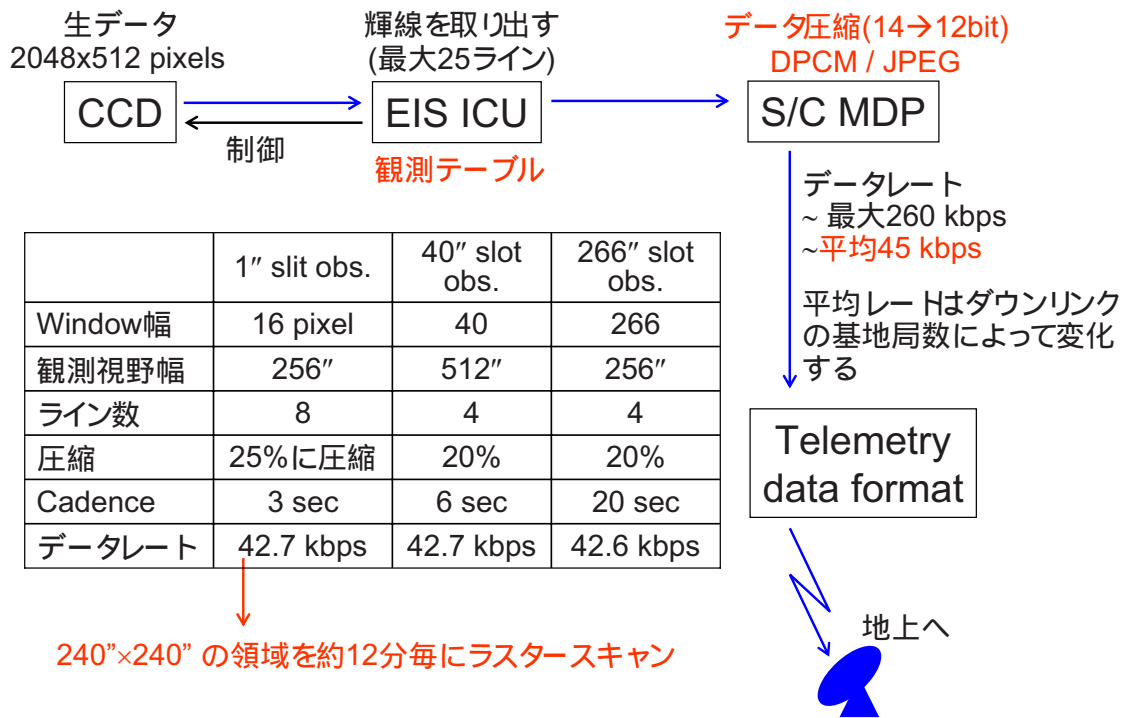


観測テーブル

- 観測の内容に応じて、**観測視野(位置)、スリット・スリット長、ラスタ、ライン、露出時間、観測間隔、データ圧縮、自動判定機能**などを考慮して**観測テーブル**を作成



データの流れ



EISを用いた研究例

- **フレアの発生機構とプラズマのダイナミクス**
 - フレアループ足元での彩層蒸発
 - リコネクションインフロー/アウトフロー
 - 乱流的な運動(非熱的なライン幅)
 - ジェットなど
- **活動領域/コロナ加熱**
 - コロナループに沿ったプラズマの物理状態(heating function)
 - 彩層構造とコロナループ構造の関係?(SOTとの協同観測)
 - 波動観測
- **静穏領域/コロナホール**
 - 静穏領域での輝点、ブリンカーなどの観測
- **ガウス分布からのずれ**

EISを用いた観測例

EIS core science program (MSSL)から抜粋
(http://www.mssl.ucl.ac.uk/www_solar/solarB/core.htm)

活動領域

- 広い温度帯で速度場を詳細に観測、密度診断のライン
- 候補のライン: Fe_{XI} (188), Fe_{XXIV} (192), Fe_{XII} (195), Fe_{XIII} (202), Fe_{XIII} (203), He_{II} (256), Fe_{XV} (284)

1/2に圧縮

スリット	Window幅	スリット方向	ライン数	露出(sec)	Cadence(sec)	ステップ数	1ラスターの時間	データレート(kbps)
1"	16 pixel	256"	7	4	5	0	5 sec	44.8
1"	16	256	15	10	11	60	11 min	43.6

フレア

- 高時間分解能、広い温度帯をカバー
- 候補のライン: Fe_{XII} (195), Ca_{XVII} (193), He_{II} (256), Fe_{X} (184), Fe_{XXIV} (192), Fe_{XV} (284)

1/8に圧縮

スリット	Window幅	スリット方向	ライン数	露出(sec)	Cadence(sec)	ステップ数	1ラスターの時間	データレート(kbps)
2"	32 pixel	200"	6	1	1.5	100	2.5 min	50.0
40"	40	512	6	1	5	2	10 sec	48.0

体制

日本

- 国立天文台
- 宇宙航空開発研究機構

国際共同研究の
下に開発が進む

イギリス

- Mullard Space Science Laboratory, Univ. College London
- The University of Birmingham
- Rutherford Appleton Laboratory

アメリカ

- NASA MSFC
- NRL Hulbert Center for Space Research
- NASA GSFC

ルウェー

- University of Oslo

EISについて知りたい時

• コンタクトポイント

- 渡邊 鉄哉(国立天文台): [PI](#)
E-mail: watanabe.tetsuya @ nao.ac.jp
- 原 弘久(国立天文台)
E-mail: hirohisa.hara @ nao.ac.jp
- 浅井 歩(国立天文台)
E-mail: asai @ nro.nao.ac.jp

遠慮なく質問
してください

• EIS関連のウェブサイト:

- MSSL (http://www.mssl.ucl.ac.uk/www_solar/solarB/)
- 国立天文台SOLAR-B推進室のEISページ
(<http://www.solar.nro.nao.ac.jp/solar-b/eis/>)

付録: EISの概要

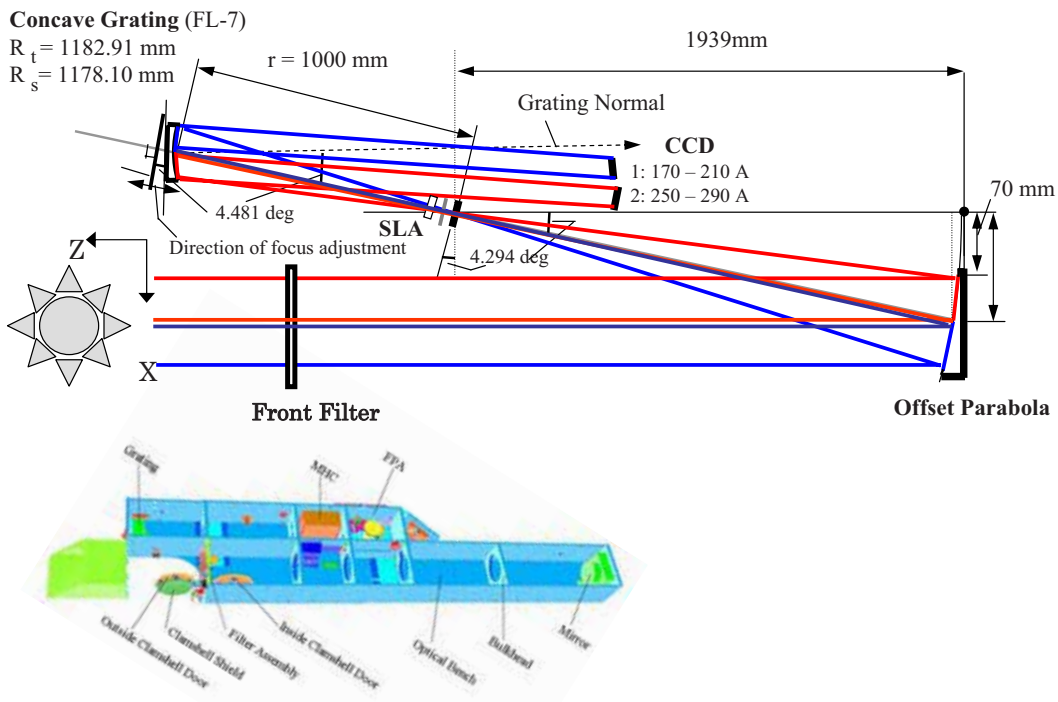
望遠鏡 (直入射型)

主鏡:	off-axis 160mmパラボラ(多層膜コーティング)
焦点距離:	1939mm

分光器 (直入射型)

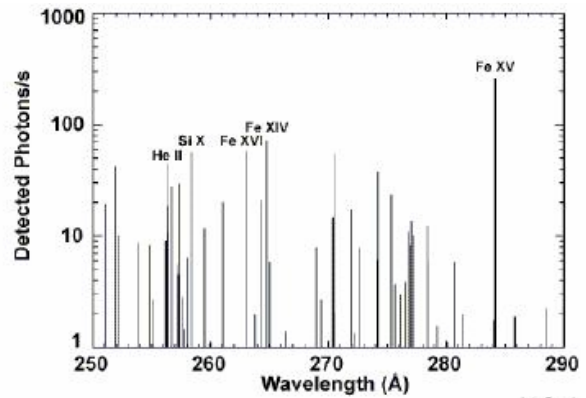
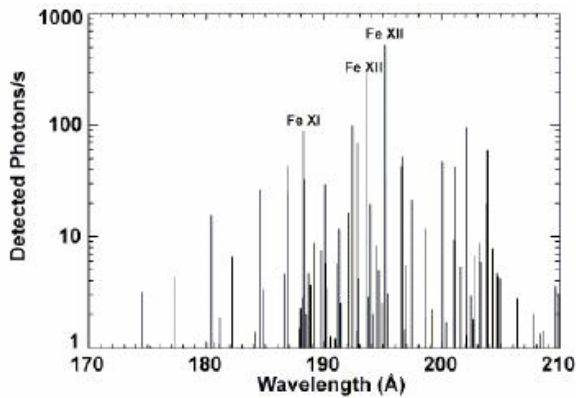
スリット幅:	1, 2, 40, 266"
刻線間隔:	4200本/mm
グレーチング:	トロイダル回折格子
観測波長:	170 – 210Å, 250 – 290Å
波長分解能 ($\lambda/\Delta\lambda$):	~4000(170-210Å), ~4600(250-290Å)
CCD:	1024X2048 (readoutは512X2048)

付録: EIS光学系レイアウト



付録: EISで観測されるライン

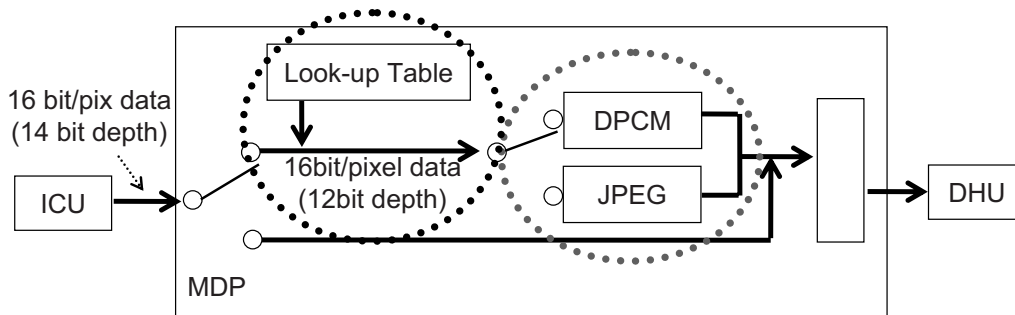
- 活動領域観測時にEISで観測されると予想されるスペクトル



Actv_Rep 01

付録: データ圧縮について

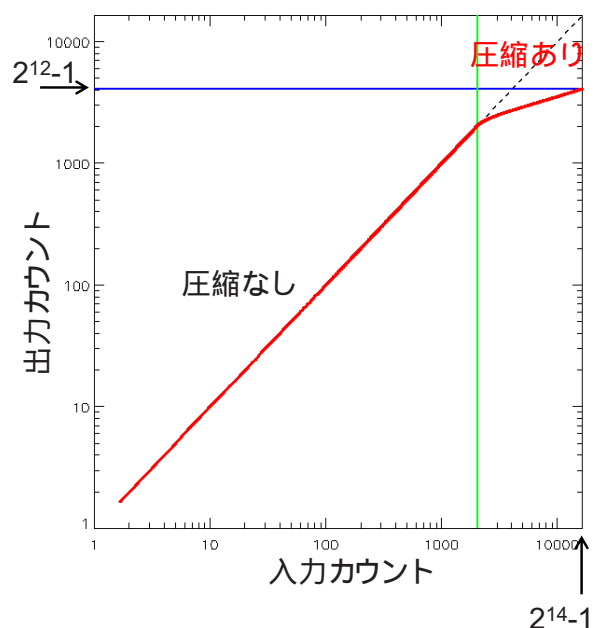
- EISで取得される画像データは14ビット(1画素16ビットのデータとして転送)
- 圧縮チップの入力は12ビット
- 14ビット→12ビットの画素内圧縮が必要



データ圧縮1: 画素内圧縮

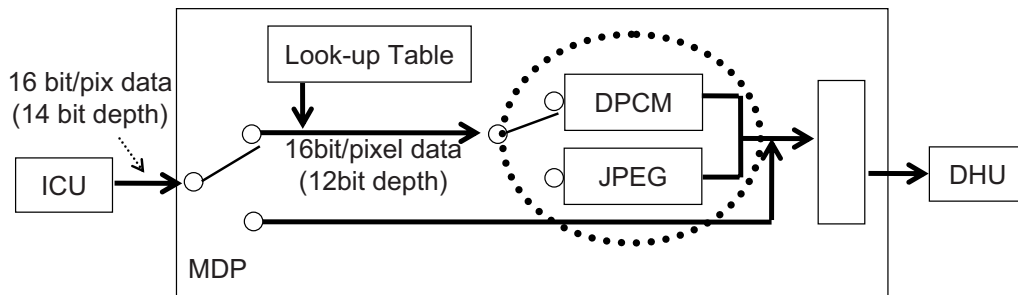
- **カウント**: 入射光子数

$$N = 3.4 \times 10^3 \frac{\hbar \nu}{g \lambda} + N_{\text{offset}}$$
↑ データカウント
- 14ビット→12ビット変換
 最大カウント: 16383→4095
- カウントがある程度より大きいと圧縮を受ける
- 閾値や圧縮の係数はエラーがもっとも少なくなるよう設定(ポアソンノイズに対し3%程度)



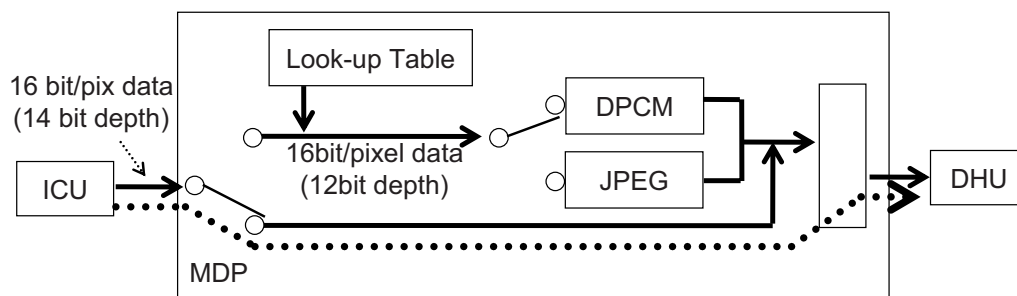
データ圧縮2: 画像圧縮

- DPCM圧縮: 圧縮によるロスがない(約50%圧縮)
- JPEG圧縮: さまざまな度合いの圧縮をかけることができる



データ圧縮3: 番外編(圧縮なし)

- 全く圧縮をかけない」ことも可能
- 1画素16ビットのデータのまま転送



SOTによる太陽大気構造の診断

永田伸一
(京都大学)

nagata@kwasan.kyoto-u.ac.jp

1

目次

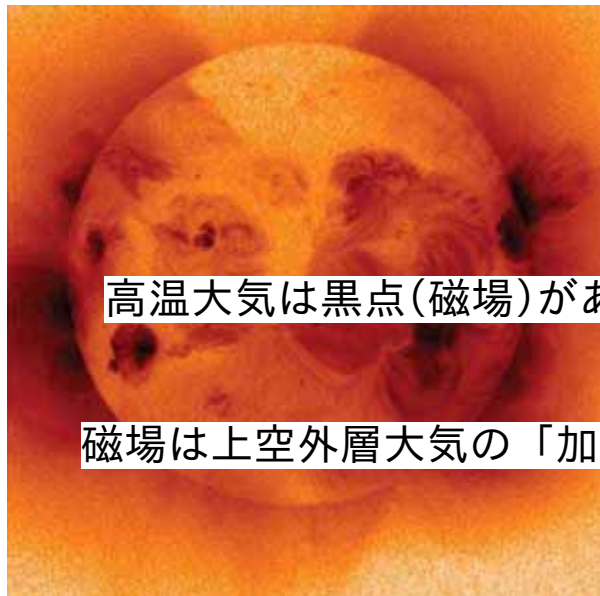
- 太陽の外層大気と磁場
- 可視光望遠鏡SOTとは
- 太陽大気構造の診断
 - 診断の原理
 - 可視光領域の吸収線と大気構造
 - 温度診断
 - 速度場診断
 - 磁場診断
 - SOTを用いた太陽大気構造診断
- まとめ
- 付録

2

太陽の外層大気と磁場

Corona (Yohkoh SXT)

Field strength (Kitt Peak)



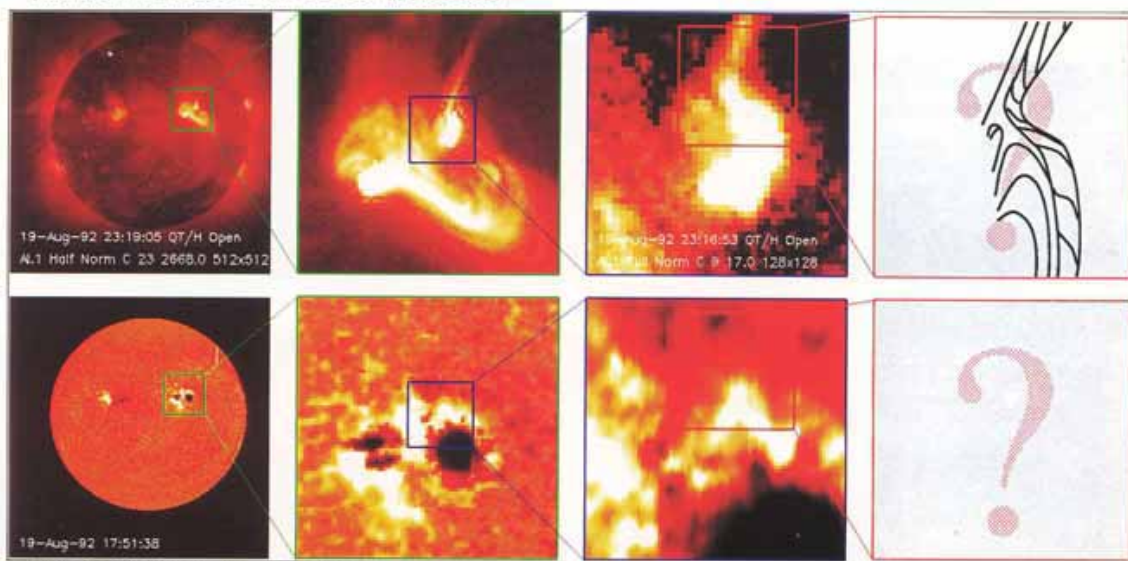
高温大気は黒点(磁場)があるところに局在化している

磁場は上空外層大気の「加熱」にどう寄与しているのか?

太陽の外層大気と磁場

コロナ加熱と微細磁束管

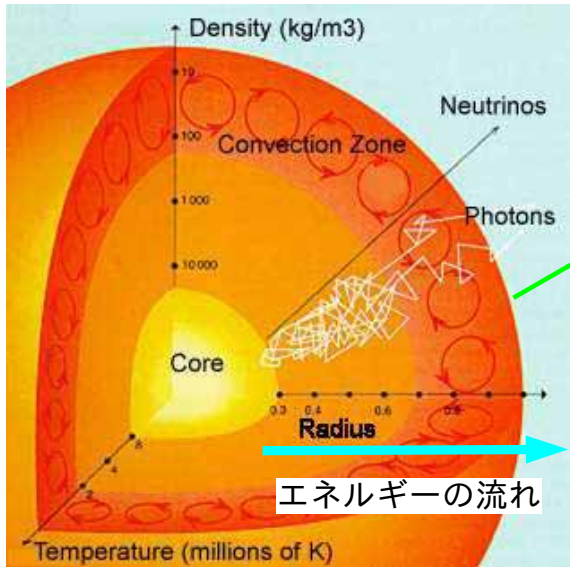
軟X線でみたコロナジェットとフレア(「ようこう」)



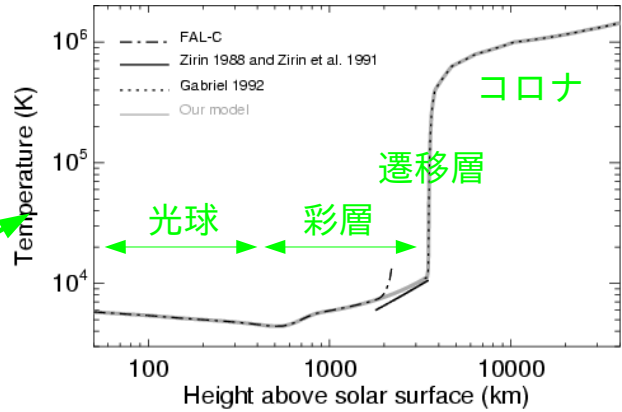
光球面の磁場(キットピーク天文台)

太陽の外層大気と磁場

太陽の構造とエネルギーの伝達



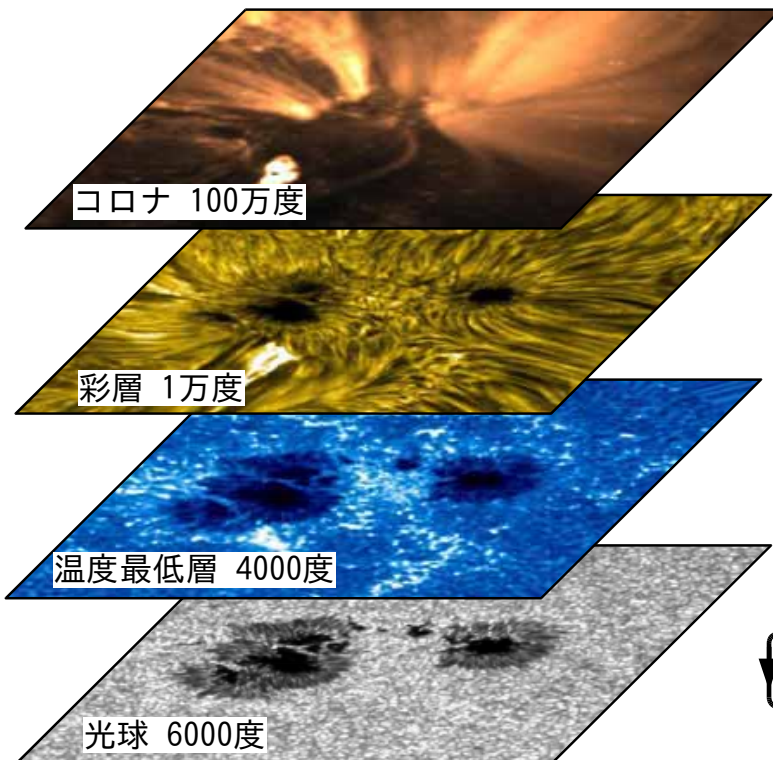
外層大気の温度構造



- 上空ほど温度が上昇する
- 外層大気の「加熱」は輻射では説明出来ない!

5

太陽の外層大気と磁場



コロナエネルギー損失
10⁷ [erg/cm²/s]

- 上空大気加熱のエネルギー源は光球の乱流の運動エネルギー
- 磁場をチャンネルとして非熱的にエネルギーを上空へ伝搬し、熱化する

対流胞
光球乱流運動のエネルギー流束
10⁹ [erg/cm²/s]

6

太陽の外層大気と磁場

磁気大気概念図

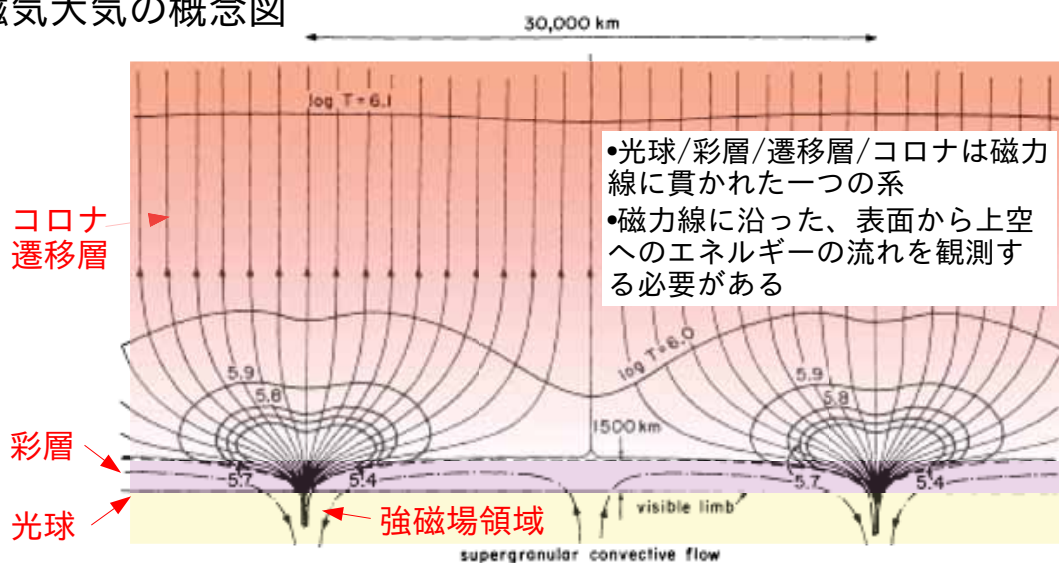


Figure 4 Magnetic field configuration associated with the network and temperature contours from Gabriel's (1976a) model for the transition region and low corona in a quiet region.

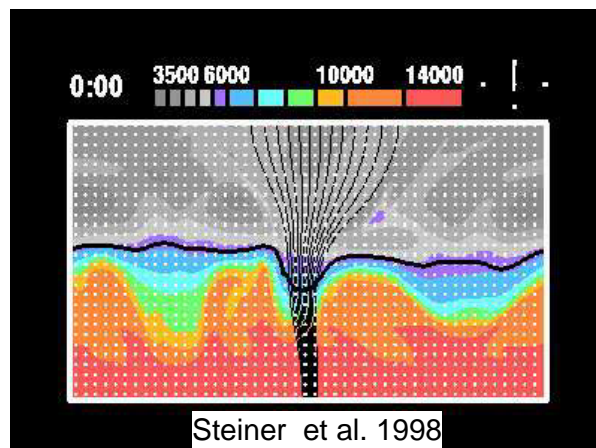
太陽の外層大気と磁場

SOTは磁束管の物理を解明するために高空間分解能磁場観測を行う

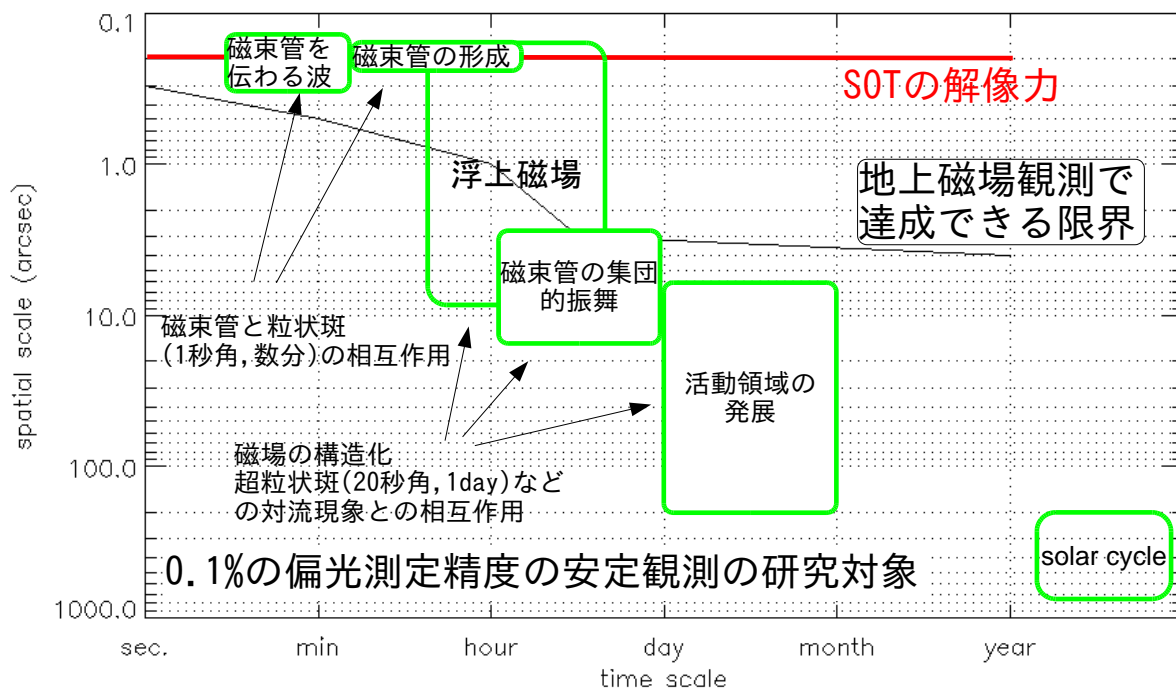
- ・ 強い磁場を持つ磁束管の形成過程
光球に出現直後：数百ガウス ⇔ 黒点中：1キロガウス以上

→ SOTで磁場が強くなる瞬間の物理量の変化が初めてわかる

- ・ 対流と磁束管の相互作用
 - 磁束管の振動
 - ねじれた磁束管の形成
今までは空間分解能不足でなまされていた可能性がある



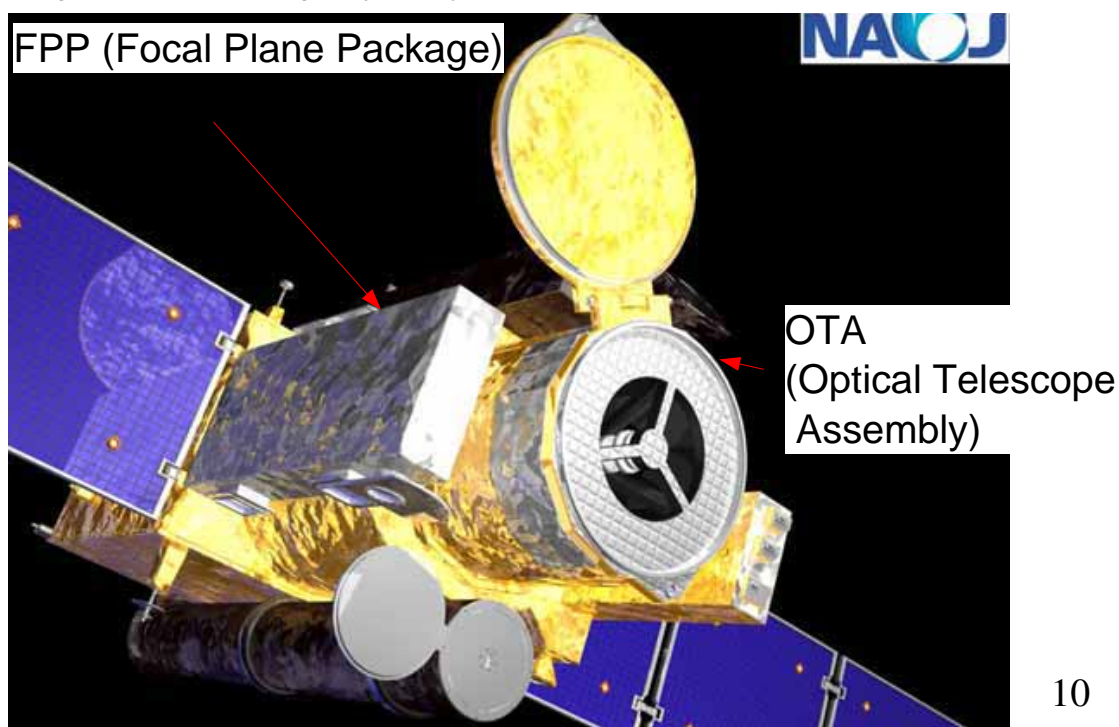
太陽の外層大気と磁場



9

可視光望遠鏡SOTとは

Solar Optical Telescope (SOT)口径50cmのSolar-B衛星主望遠鏡



10

可視光望遠鏡SOTとは

可視光線領域で高空間分解能の連続観測を実現する装置

Q: なぜ可視光領域を観測するのか?

A: 可視光領域のスペクトルは太陽表面で形成されるため

Q: なぜ高空間分解能が必要なのか?

A: 微細磁場構造($\phi=150\text{km}$)を分解するため

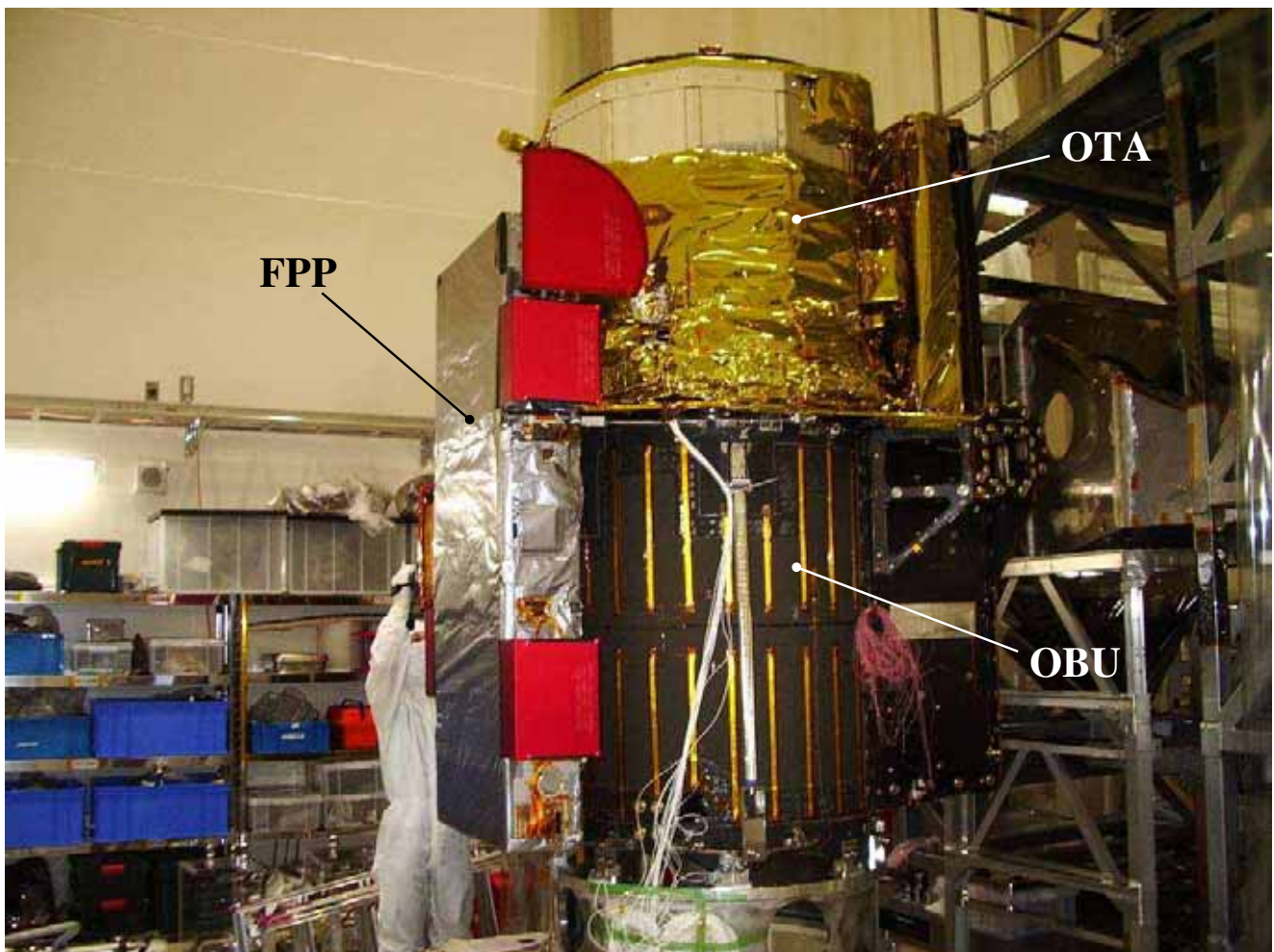
Q: なぜ安定した連続観測が必要なのか?

A: 太陽磁場の微細構造の時間発展を観測するため

言い替えると、SOTは

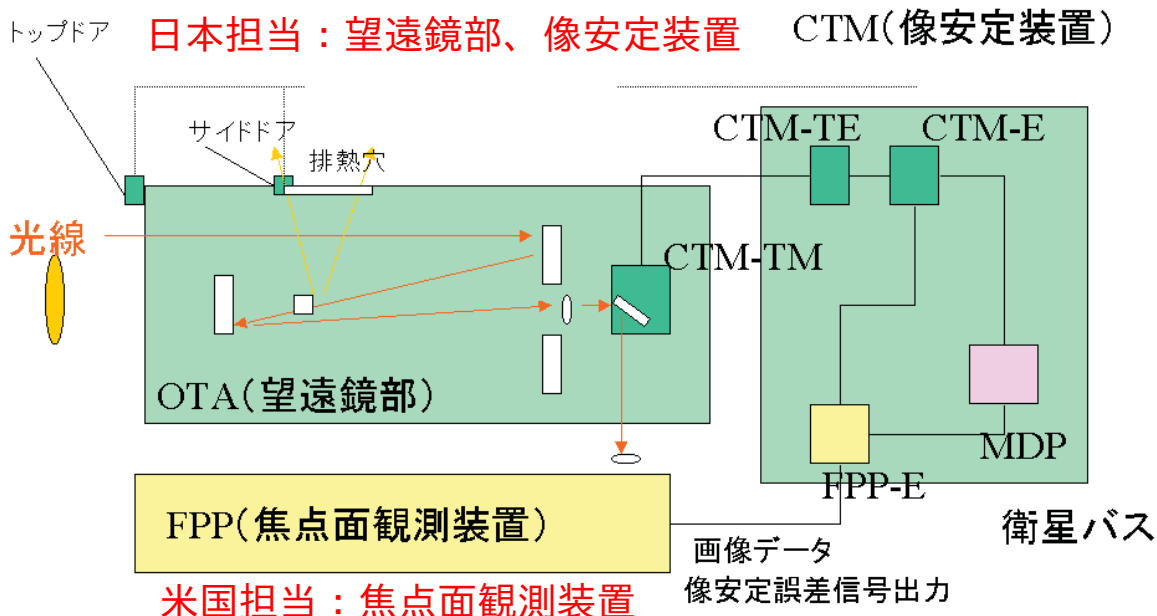
太陽表面の微細磁場構造の時間発展を観測する装置

11



可視光望遠鏡SOTとは

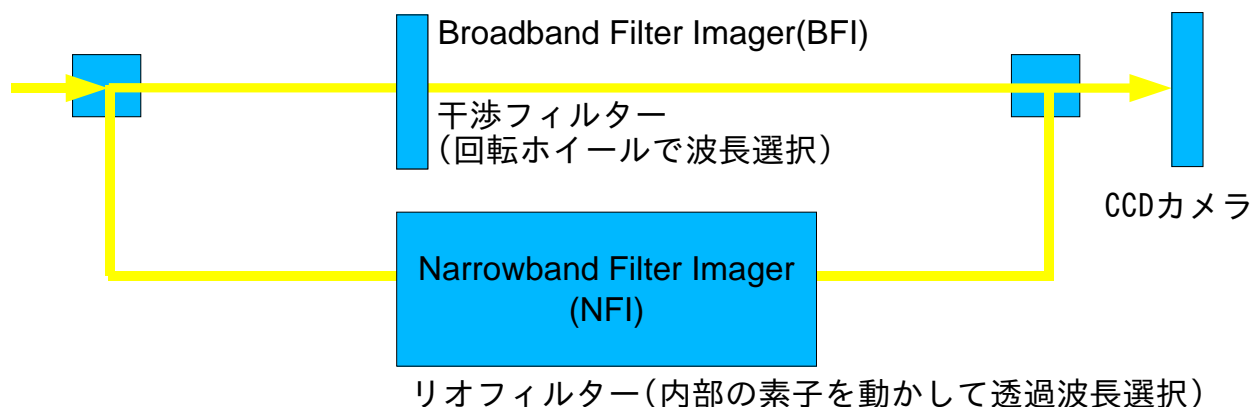
機能ダイヤグラム



13

可視光望遠鏡SOTとは

フィルターグラフ 12種類の波長帯で高時間分解能2次元画像を取得する



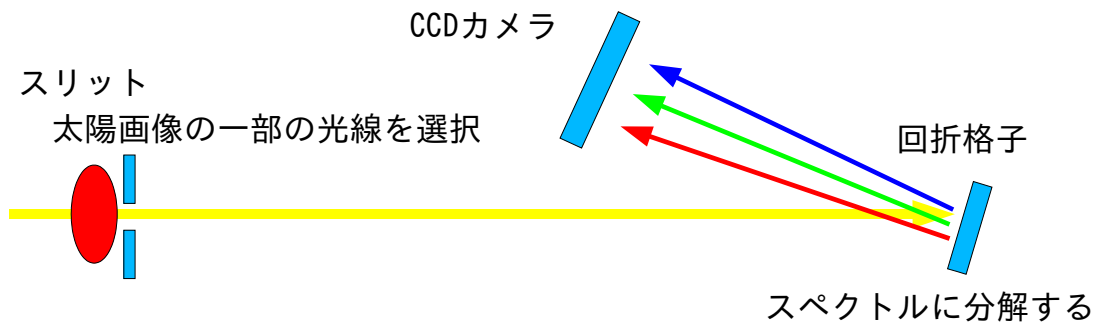
BFI: 3種類の吸収線を観測、さまざまな現象をとらえる
3波長点で連続光強度を観測、表面温度を計測する

NFI: 6種類の吸収線の線輪郭を観測、速度場、磁場の定量診断を実施

14

可視光望遠鏡SOTとは

スペクトロポリリメーター FeI6302/6303の偏光分光スペクトルを精密観測

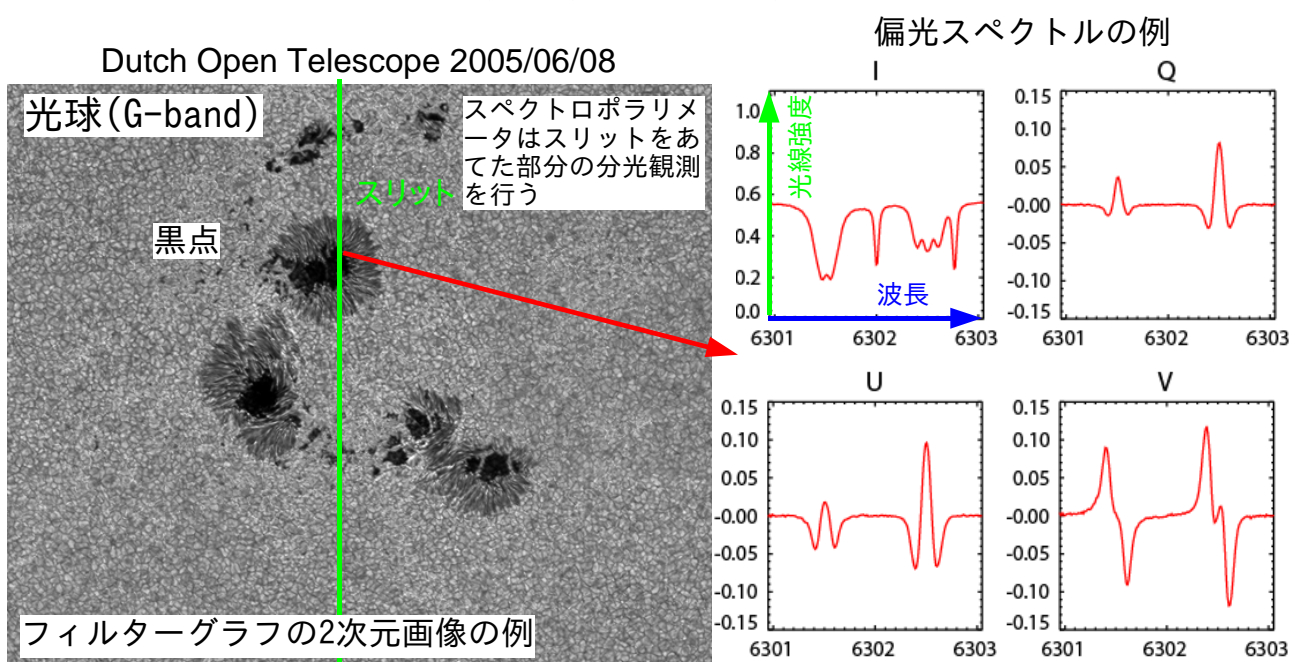


取得された偏光スペクトルを用いて高精度ベクトル磁場マップを得る

15

可視光望遠鏡SOTとは

可視光望遠鏡が取得する2種類のデータ



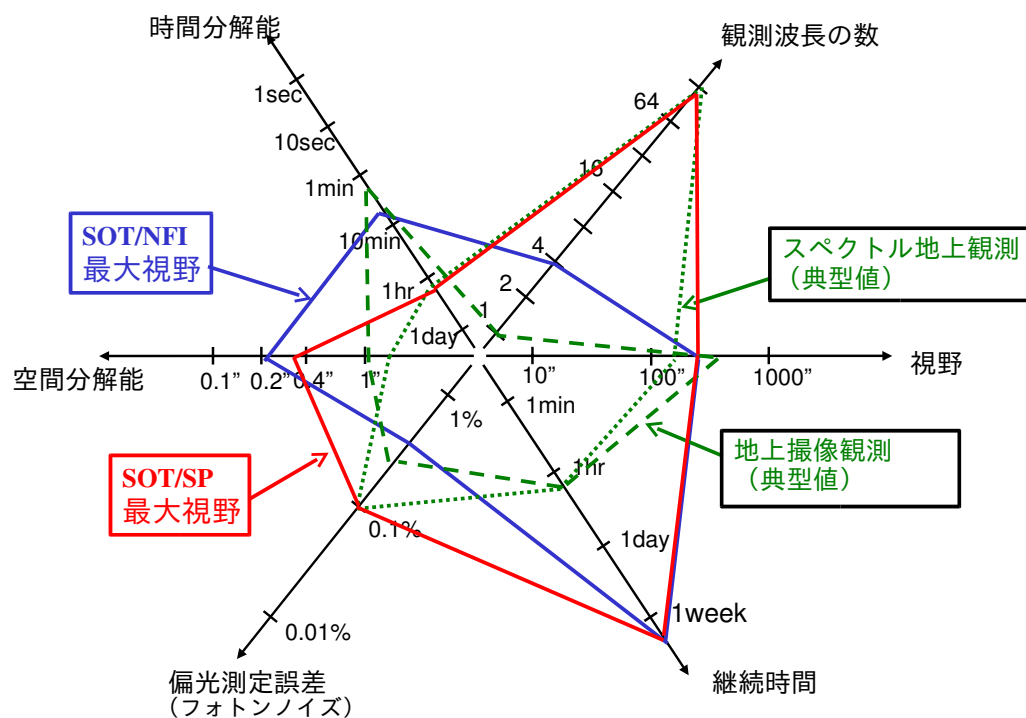
16

可視光望遠鏡SOTとは

- 高空間分解能かつ高精度偏光観測の実現
 - 高空間分解能のベクトル磁場マップが得られる
- 24時間連続観測
 - 磁束の浮上、微細磁束管の形成、活動領域発展まで、磁場の構造化現象を連続的に調べられる
- 撮像観測と分光観測の相補性
 - 分光観測の時間、空間分解能を補う撮像観測
 - 分光による高精度光球磁場測定と撮像観測による、磁束管と対流の相互作用の追跡

17

可視光望遠鏡SOTとは



18

太陽大気構造の診断

可視光領域の吸収線と大気構造

診断の原理

速度診断の原理

温度診断の原理

磁場診断の原理

SOTを用いた大気構造診断

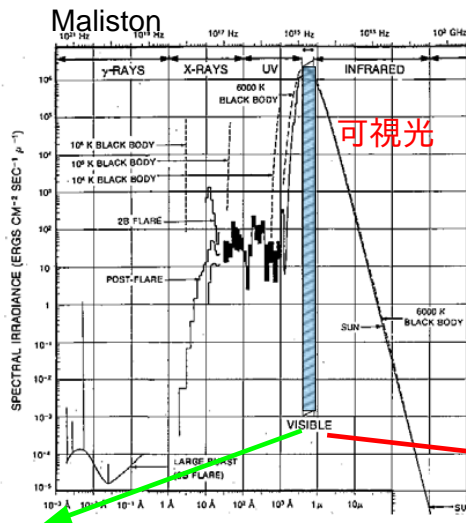
19

太陽大気構造の診断

可視光領域の吸収線と大気構造

20

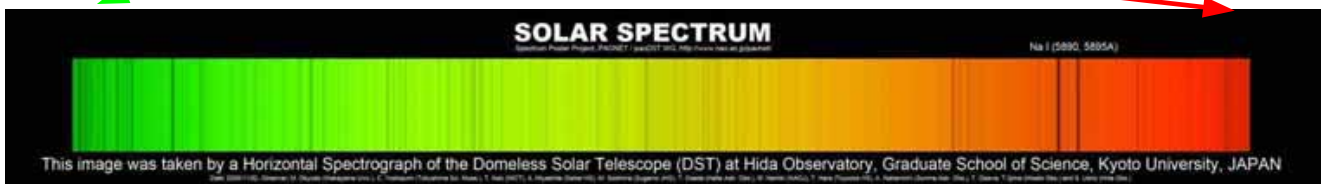
太陽大気構造の診断



可視光スペクトルの特徴

- 全体的なスペクトルは6000Kの黒体放射
- 連続スペクトル上には無数の吸収線(暗線)がある
- 吸収線は大気を構成する原子、分子特有のエネルギー準位間の遷移に対応

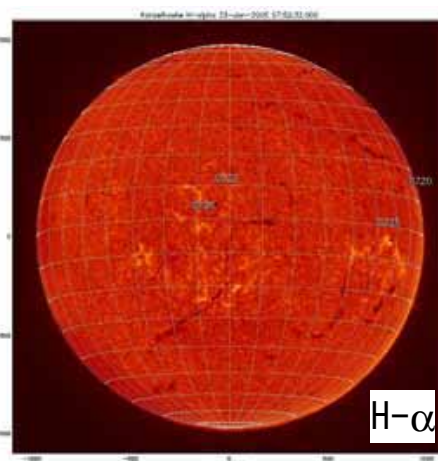
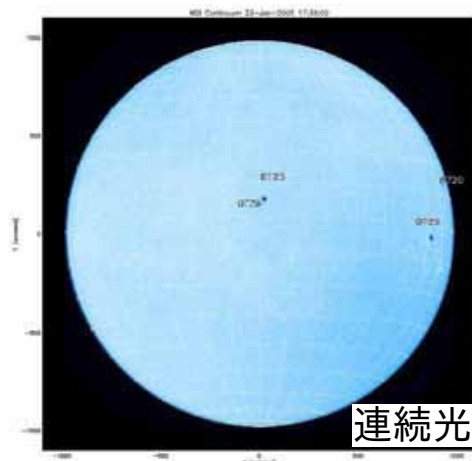
さまざまなスペクトル観測を実施することで大気構造診断が可能



21

太陽大気構造の診断

連続光と吸収線の見え方の違い

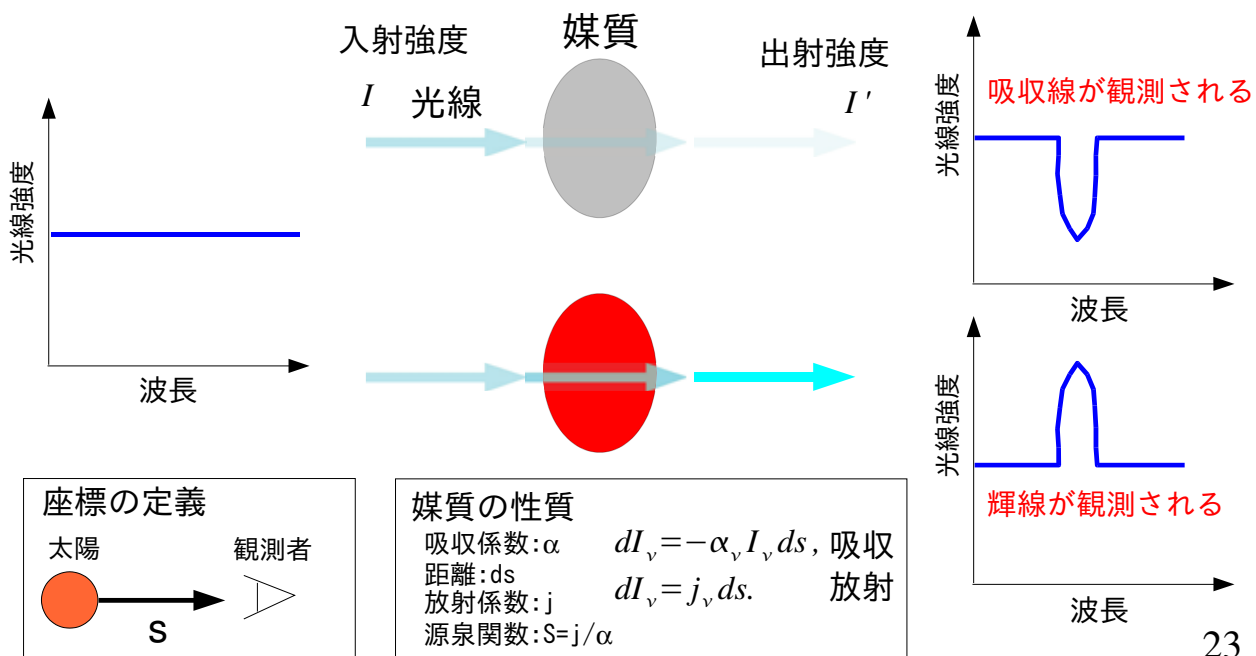


- 連続光で見える構造は黒体放射をする表面
- 吸収線で見える構造は、連続光を吸収する上空に浮かぶ「雲」

22

太陽大気構造の診断

大気中では吸収(強度減少)と放射(強度増大)が同時に起こる
媒質の状態でスペクトルが異なる



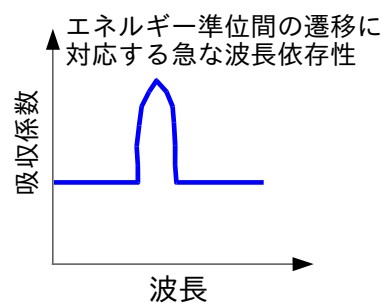
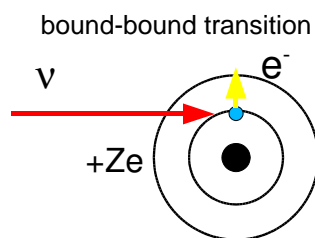
23

太陽大気構造の診断

線吸収と連続吸収

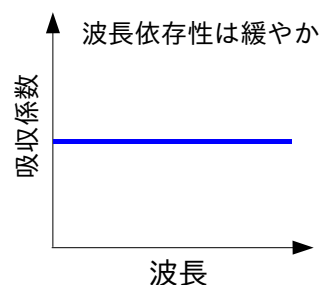
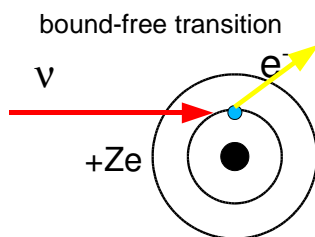
線吸収

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\alpha_{l,\nu} I_\nu + j_{l,\nu}$$



連続吸収

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\alpha_{c,\nu} I_\nu + j_{c,\nu}$$



24

太陽大気構造の診断

輻射輸送方程式: 光線強度の変化を記述する方程式

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_c} = k(I_\nu - S_\nu), \quad d\tau_c = -\alpha_c ds, \quad k = 1 + \alpha_l/\alpha_c$$

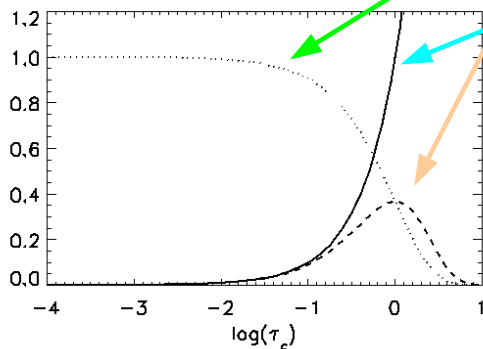
光学的厚み

解析解:

$\tau_c = 0$ が観測者の位置

$$I(0) = \int_0^\infty e^{-\int_0^{\tau_c} k(t) dt} k(\tau_c) S(\tau_c) d\tau_c$$

観測者に届く確率
放射光子の相対数



- 吸収係数、源泉関数の高さ方向分布(原子の励起状態、温度、密度)により吸収線の形状が決まる
- 吸収線ごとに形成に寄与する大気層の高さが異なる

複数の吸収線を観測することで異なる高さの大気構造を診断出来る

25

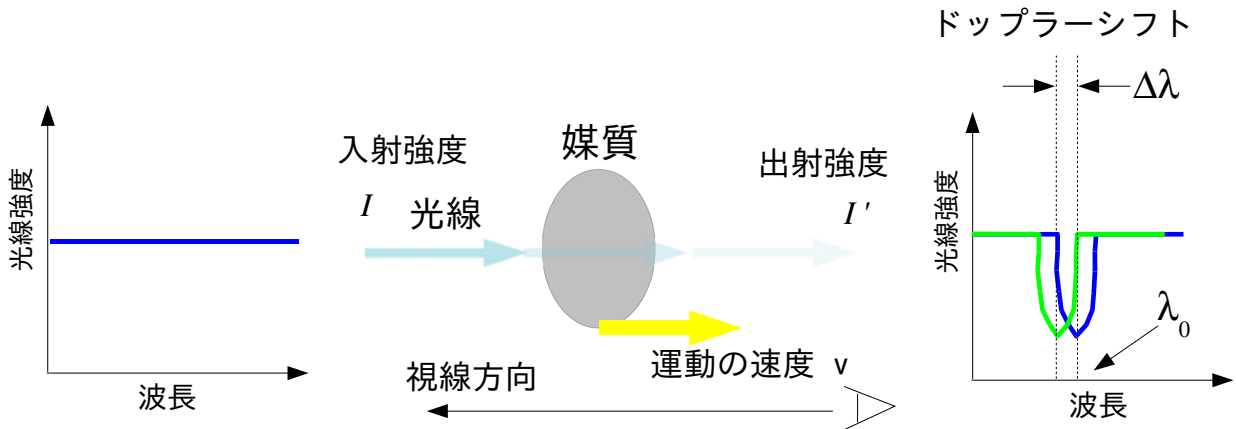
太陽大気構造の診断

速度診断の原理

26

太陽大気構造の診断

媒質が視線方向に運動しているとドップラー効果によりシフトした吸収線が観測される



ドップラーシフトから視線方向速度を求める：
(分光観測では直接シフトを測定する)

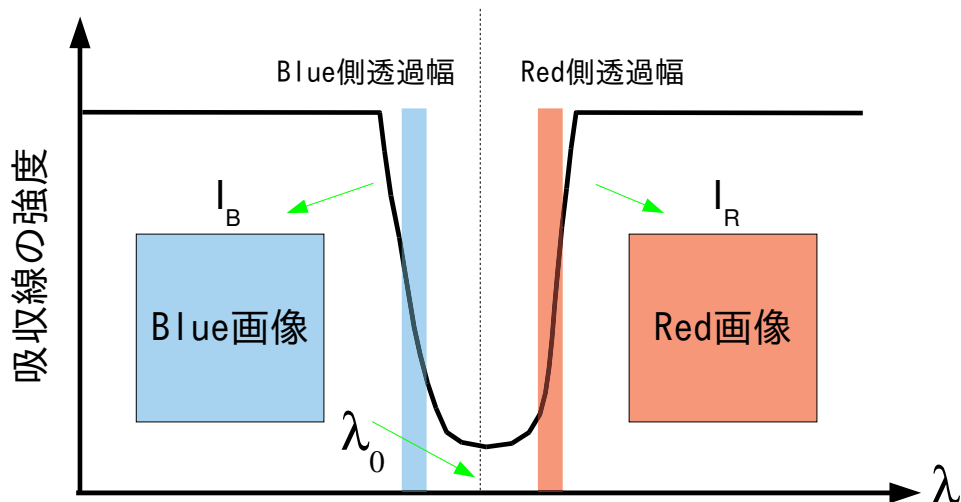
$$v = -c \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

27

太陽大気構造の診断

狭帯域フィルターで撮像した吸収線のウイング画像の強度差はドップラーシフトの関数になる

$$(I_B - I_R) \Rightarrow \text{視線方向速度マップ}$$



28

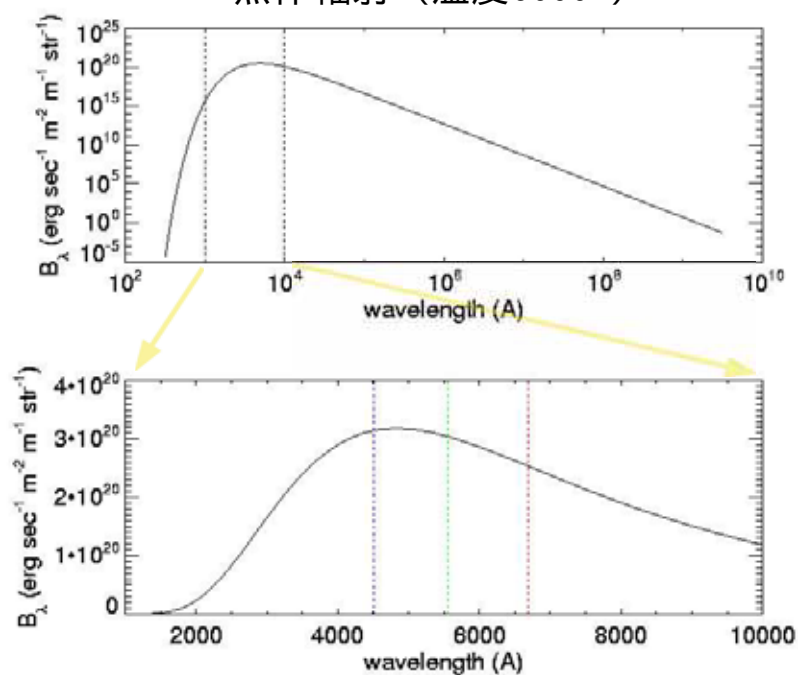
太陽大気構造の診断

温度診断の原理

29

太陽大気構造の診断

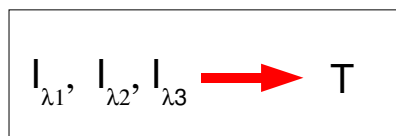
黒体放射 (温度6000K)



Planck関数

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2/\lambda^5}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}$$

複数波長点で連続光強度を計測、黒体放射の式に当てはめて温度を導出する



30

太陽大気構造の診断

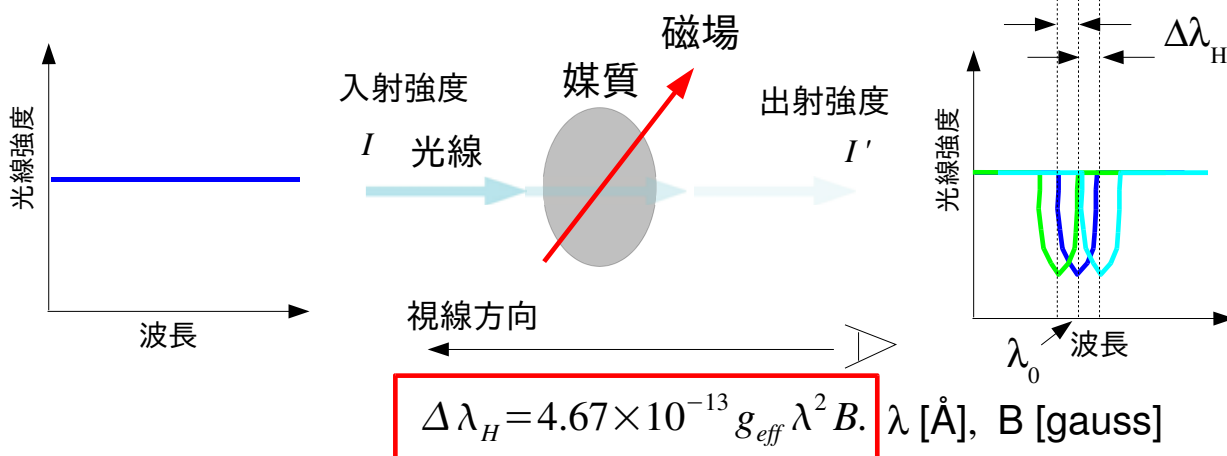
磁場診断の原理

31

太陽大気構造の診断

磁場が媒質を貫いている場合、一つの吸収線はゼーマン効果により縮退が解けたサブレベル間の遷移に分かれる

ゼーマンシフト



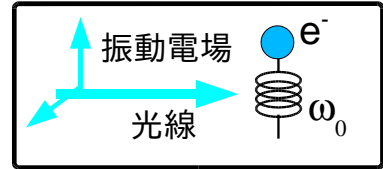
振動子による電磁波の吸収を考察することで縮退のとけた各吸収線が偏光していることが分かる

32

太陽大気構造の診断

定磁場、振動電場中(振動数 ω_0)にある電子の運動方程式:

$$\ddot{\vec{r}} - \frac{e}{mc} \dot{\vec{r}} \times \vec{B} + \gamma \dot{\vec{r}} + \omega_0^2 \vec{r} = \frac{e \vec{E}_0}{m} e^{i\omega t}$$

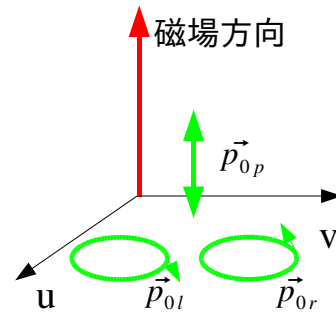


振動数 ω を持つ解を求める。(次の形)

$$\vec{r} = \vec{a} e^{-i\omega t}$$

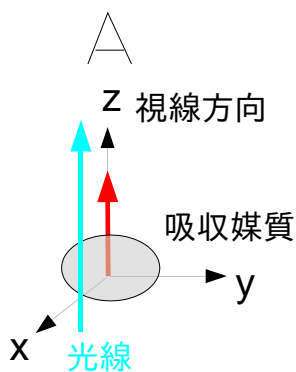
定磁場方向を含む直交座標系で記述すると

- 磁場方向の直線運動 (π component) ==> p
- 磁場に対して右回りの円運動 (σ component) ==> r
- 磁場に対して左回りの円運動 (σ component) ==> l

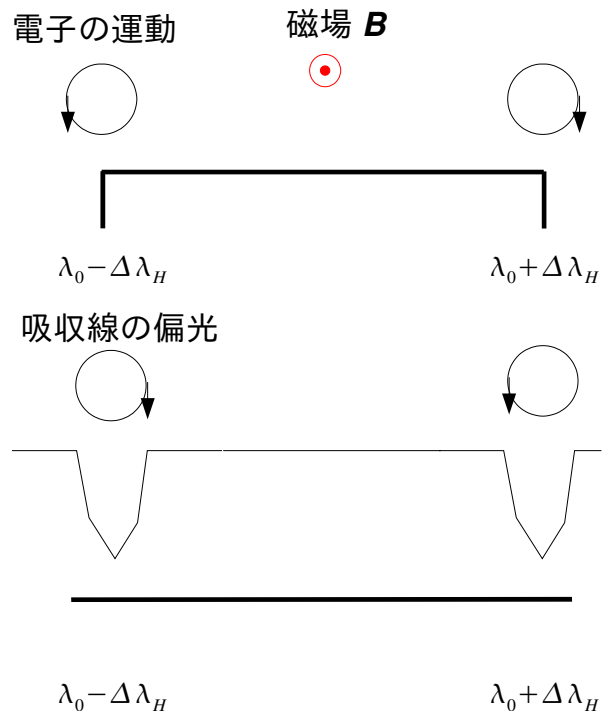


の3種類の固有振動が得られる。

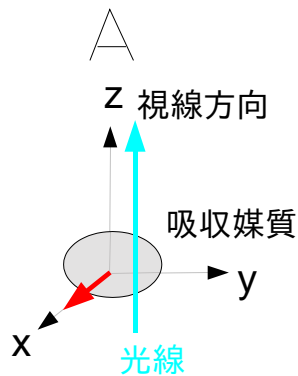
太陽大気構造の診断



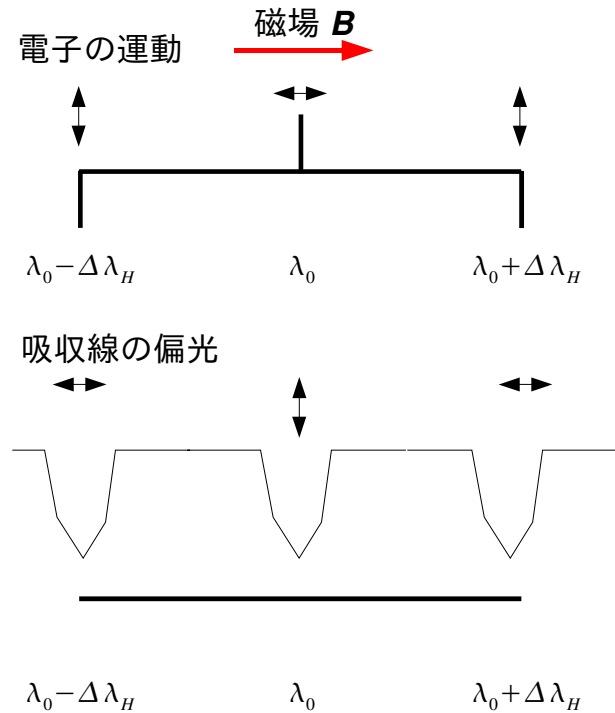
- 磁力線に対して円運動をする電子(σ 成分)による吸収の効果が見える
- 磁力線方向の振動子(π 成分)の方向は視線方向なので、吸収は見えない



太陽大気構造の診断



- σ/π 全ての振動子の影響が見える
- 観測者からは、円運動をする σ 振動子は、直線振動子に見えるために、吸収線は直線偏光する



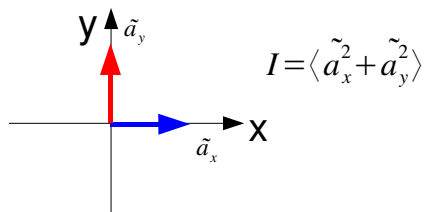
35

太陽大気構造の診断

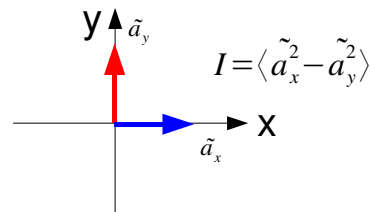
Stokes Vector (I/Q/U/V)の定義

直交する偏光フィルタを透過する光線強度の組合せ

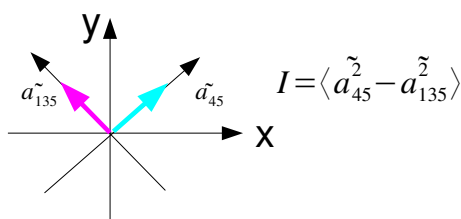
I: x方向電場とy方向電場の強度和



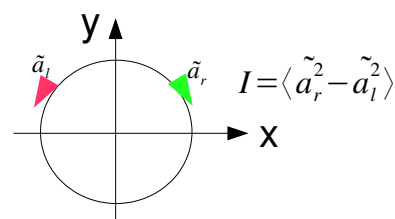
Q: x方向電場とy方向電場の強度差



U: 45度方向電場と145度方向電場の強度差



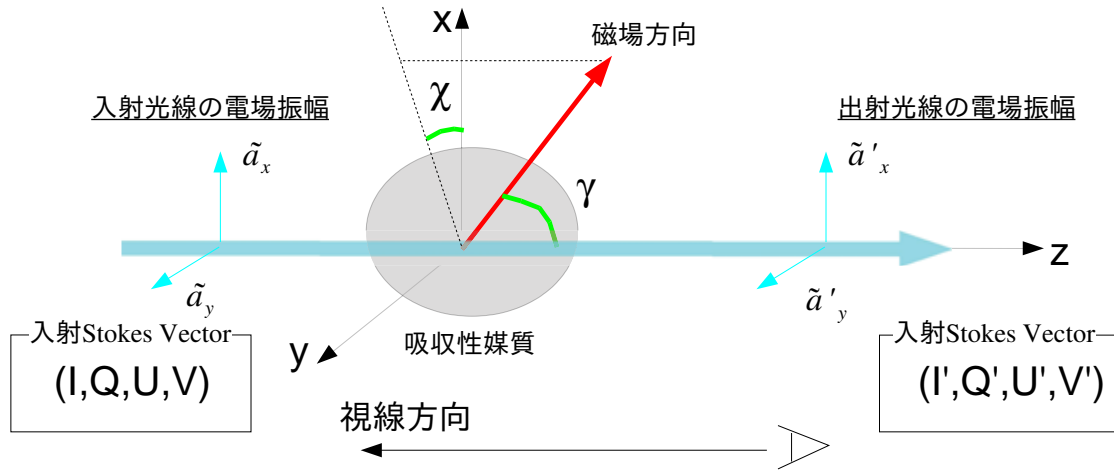
V: 右回転電場と左回転電場の強度差



36

太陽大気構造の診断

Stokes Vectorと輻射輸送



磁場がある場合、輻射輸送方程式はストークスベクトル (I, Q, U, V) に対するものになる

37

太陽大気構造の診断

輻射輸送方程式: ストークスベクトルの変化を記述する方程式

$$\frac{d\mathbf{I}}{d\tau_c} = \mathbf{K}(\mathbf{I} - \mathbf{S}), \quad \mathbf{I} = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} S \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{K} \text{は} 4 \times 4 \text{行列} \\ \text{(伝達行列)}$$

形式解:

$$\tau_c = 0 \text{が観測者の位置} \quad \mathbf{I}(0) = \int_0^\infty e^{-\int_0^{\tau_c} \mathbf{K}(t) dt} \mathbf{K}(\tau_c) \mathbf{S}(\tau_c) d\tau_c.$$

伝達行列、源泉関数の高さ方向分布により吸収線の形状が決まる

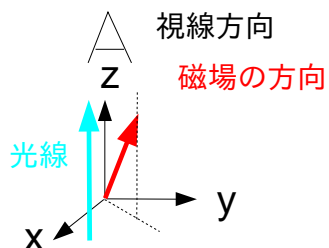


吸収に関与する原子の励起状態の割合、磁場、温度、密度の分布がストークスベクトルの形状に影響

38

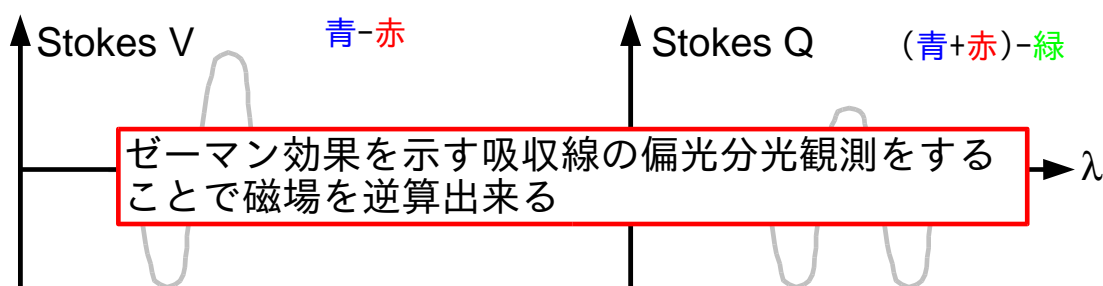
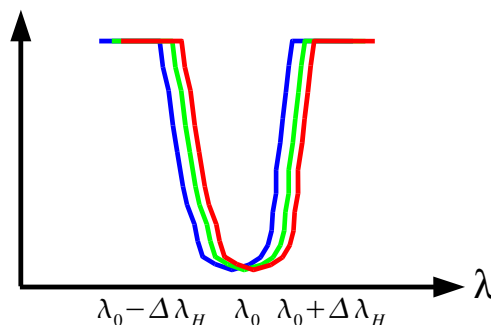
太陽大気構造の診断

Stokes Vectorの形



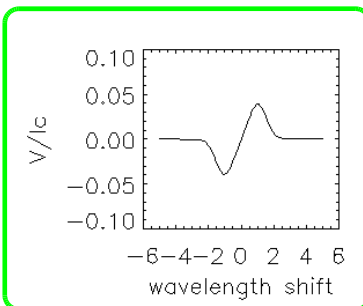
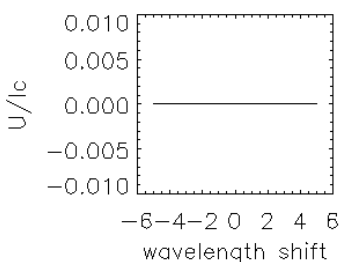
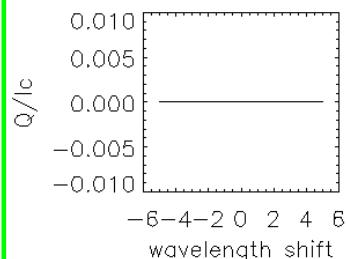
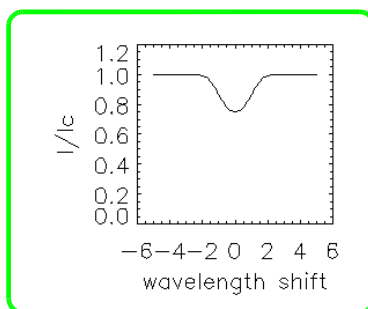
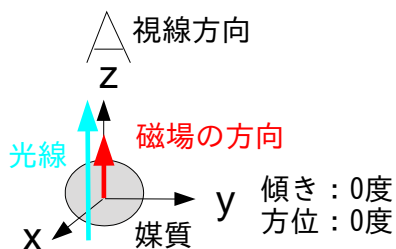
一般にはゼーマンシフトに比較してライン幅の方が大きい

青：右楕円
緑：直線
赤：左楕円



太陽大気構造の診断

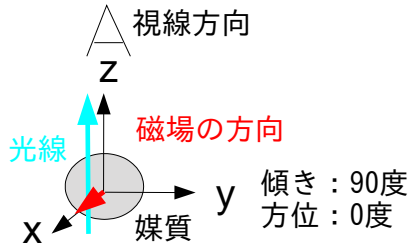
Stokes Vectorの形



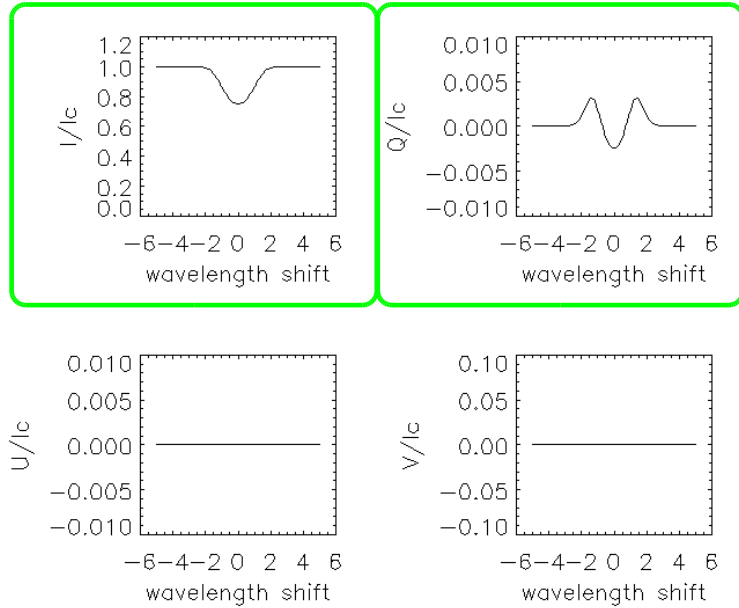
視線方向に磁場が向いている場合、ノンゼロになるストークスベクトルはIとV

太陽大気構造の診断

Stokes Vectorの形



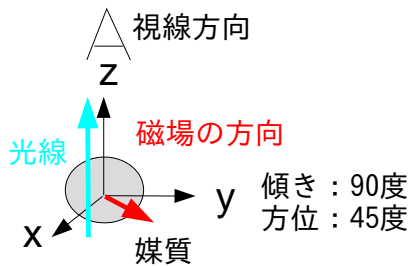
視線方向に磁場が直交する場合、ノンゼロになるストークスペクトルはIとQ/U



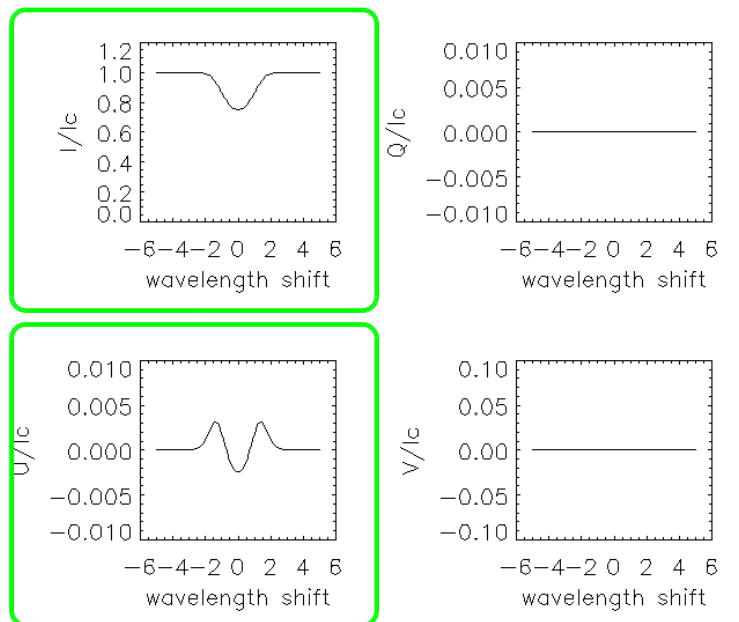
41

太陽大気構造の診断

Stokes Vectorの形



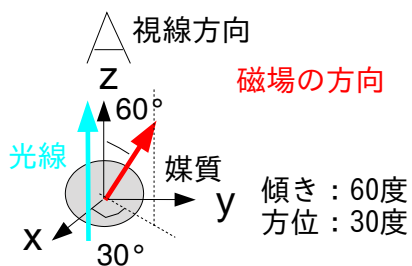
視線方向に磁場が直交する場合、ノンゼロになるストークスペクトルはIとQ/U



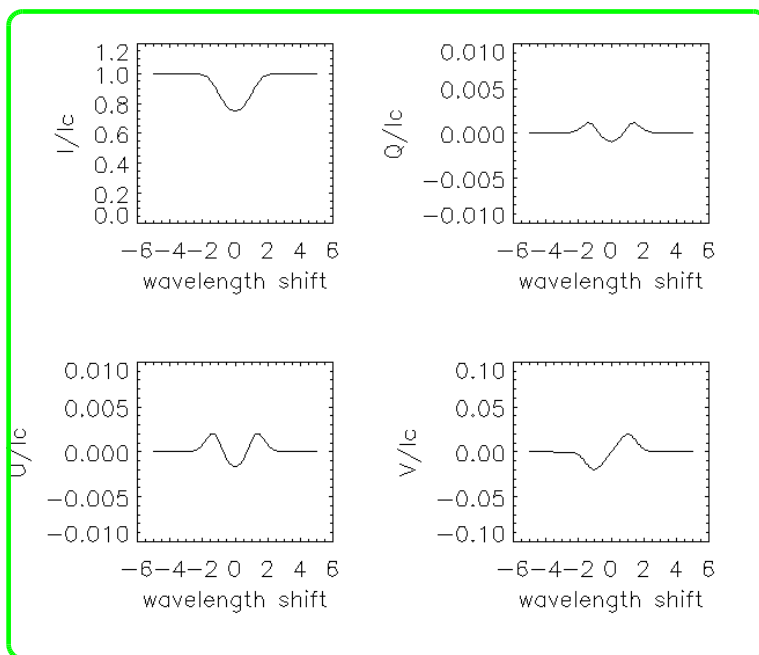
42

太陽大気構造の診断

Stokes Vectorの形



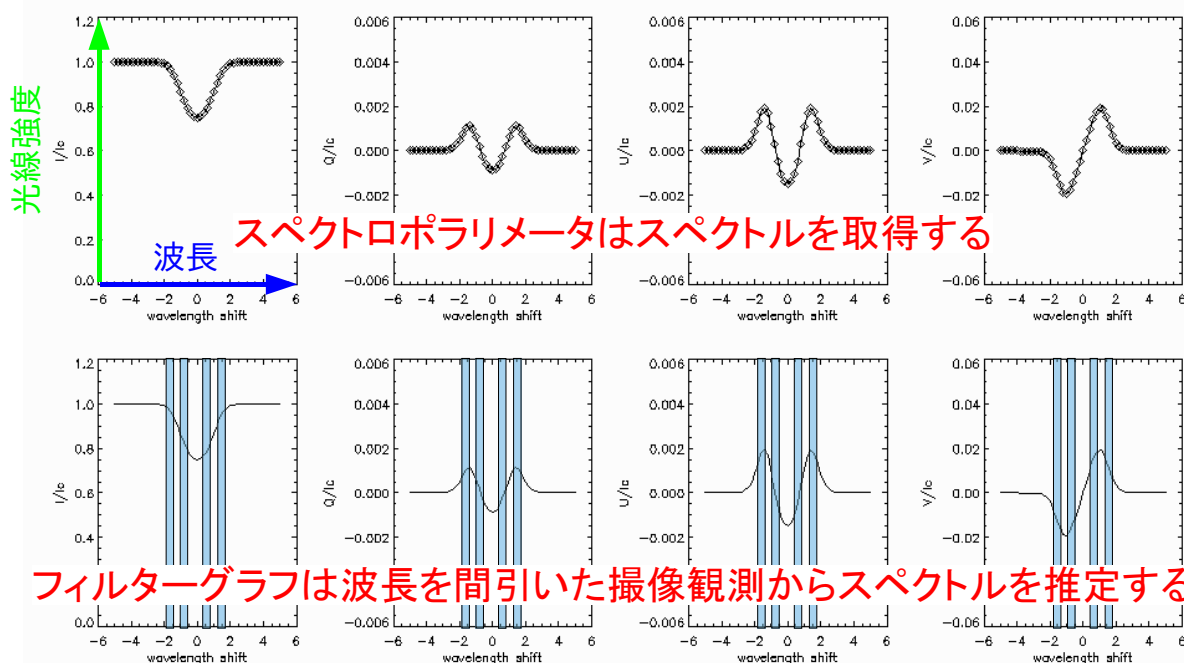
一般的にはストークスベクトル全成分がノンゼロになる:
 $V \Rightarrow$ 視線方向成分
 $Q/U \Rightarrow$ 視線直交成分



43

太陽大気構造の診断

スペクトロポリリメータとフィルターグラフの偏光観測の違い



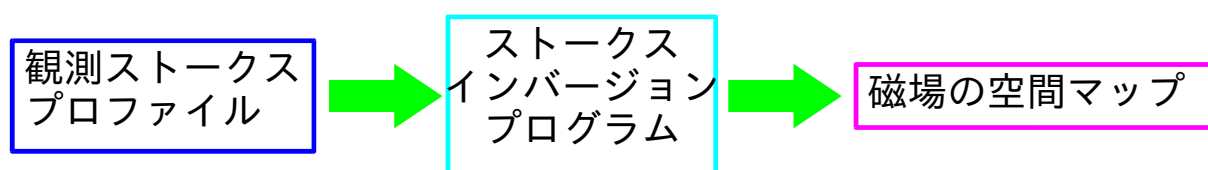
44

太陽大気構造の診断

ベクトル磁場導出方法 [ストークスインバージョン]

ストークスベクトル(IQUV)は大気構造をパラメータとする輻射輸送方程式の解

観測されたストークスベクトルを最もよく再現する大気構造を推定する(SP:最小二乗法を使用、FG:ルックアップテーブルを使用)



45

太陽大気構造の診断

SOTを用いた大気構造診断

46

太陽大気構造の診断

SOT観測波長一覧

Ion	A	Purpose	g_{eff}	BFI	NFI	SP
CN I	3883.0	Magnetic Network Imaging	-	*		
Ca II H	3968.5	Chromospheric Heating	1.33	*		
CH I	4305.0	Magnetic Elements	-	*		
	4504.5	Blue Continuum		*		
Mg I b	5172.7	Chromospheric Dopplergrams and Magnetograms	1.75		*	
Fe I	5250.2	Photospheric Magnetograms	3.00		*	
	5550.5	Green Continuum		*		
Fe I	5576.1	Photospheric Dopplergrams	0.00		*	
Na I	5895.9	Chromospheric Dopp/Mag.	1.33		*	
Fe I	6302.5	Photospheric Magnetograms	2.50		*	*
H I	6562.8	Chromospheric Structure	-		*	
	6684.0	Red Continuum		*		

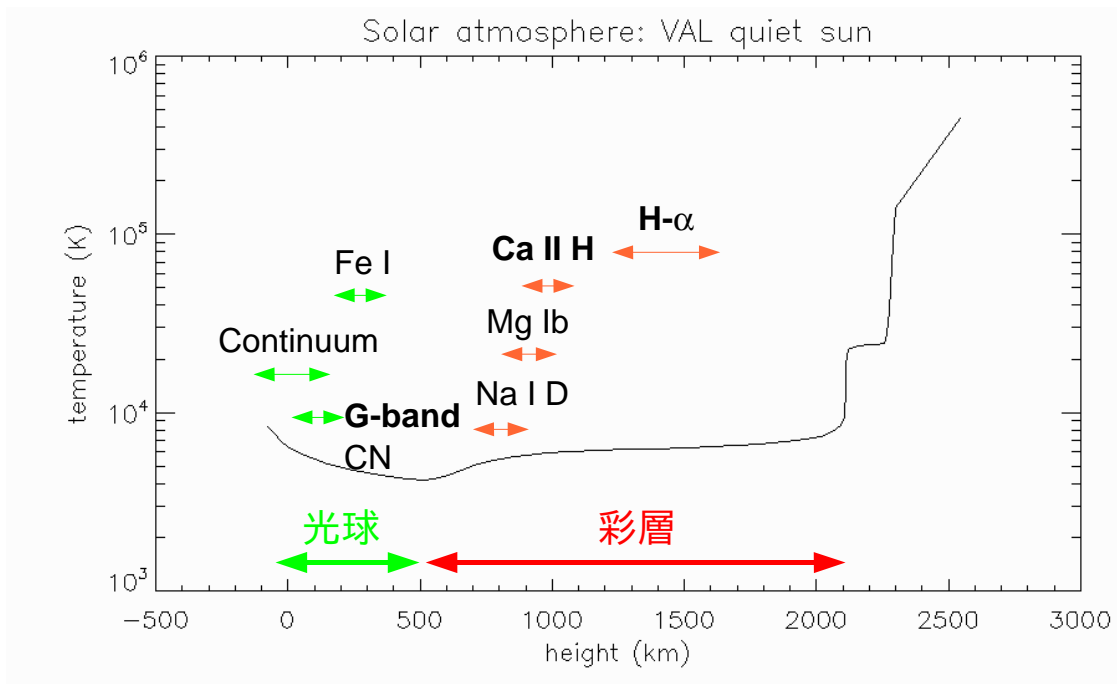
BFI: 3吸収線、3連続光帯域
 NFI: 6 吸収線(6波長帯域)
 SP: 2 吸収線

詳細は付録図を参照

47

太陽大気構造の診断

SOTが見るのは光球と彩層の吸収線



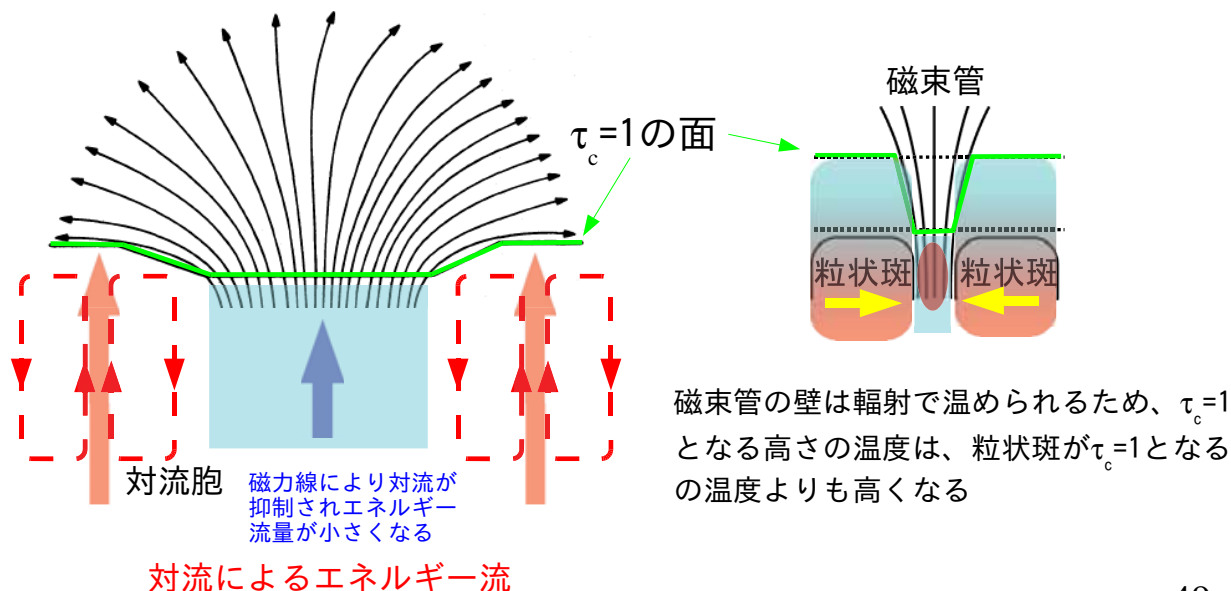
48

太陽大気構造の診断

光球の構造の見え方

黒点は周囲より低温なため「暗い」

微細磁束管は「明るい」



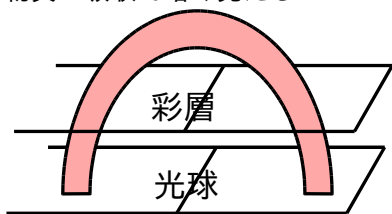
49

太陽大気構造の診断

彩層構造の例

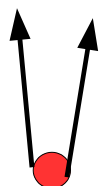
筋状の構造

H α では小さな磁気ループ内部の物質の吸収で暗く見える



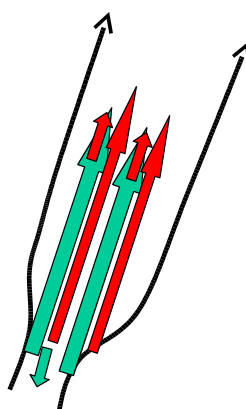
彩層磁場構造の時間発展追跡に最適

輝点構造



加熱現象の場所を特定

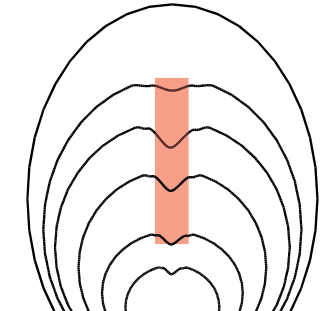
ジェット現象



磁力線に沿ったジェット発生機構は？

H- α フィラメント

磁力線に支えられ、コロナ中に浮かぶ低温、高密物質



フィラメントは磁気中性線形成の鍵

50

太陽大気構造の診断

空間サイズ
10" (7200km)

G-band

2005/06/08
Dutch Open Telescope

黒点
暗部
半暗部

無数の粒状斑 黒点の成長過程

粒状斑の間を埋めつくす磁気要素

戻る

51

太陽大気構造の診断

空間サイズ
10" (7200km)

Ca II H

2005/06/08
Dutch Open Telescope

黒点
暗部
半暗部

粒状斑より、局所的な加熱で輝線として見えるコントラストが強い

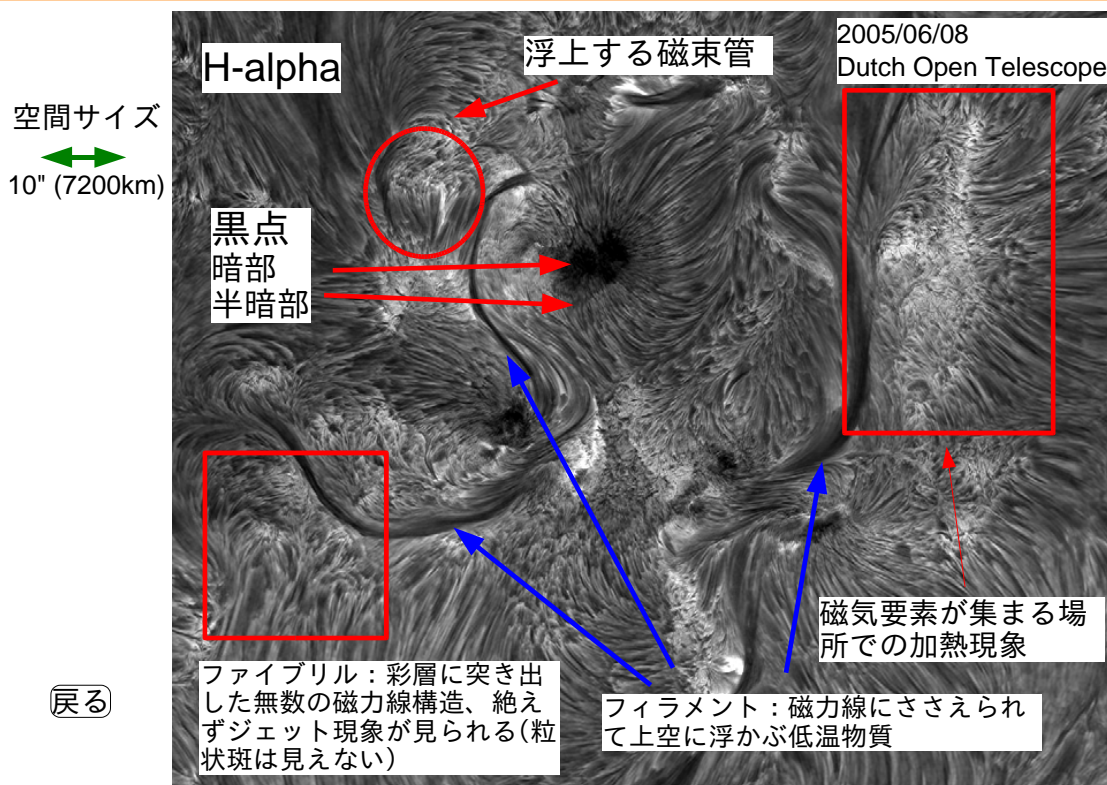
黒点の成長過程

磁気要素が集まる場所での加熱現象

戻る

52

太陽大気構造の診断



53

まとめ

- 宇宙からの太陽光学観測を世界で初めて実現
 - 安定した高空間分解能、高精度偏光観測
 - 分光と撮像 2 系統の相補的な観測
- 光球と彩層を観測する
 - 12種類の波長を使い分けて高さ構造を診断
 - スペクトル形状から物理量診断(とくに磁場)
- 観測対象の時間スケールが極めて大きい
 - 対流層からの磁気浮上、微細磁束管形成から活動領域の発展まで

54

参考文献

- The Sun, M.Stix : Springer, 2002
- Astrophysics of the Sun, H.Zirin : Cambridge University Press, 1988
- Sunspots, Bray & Loughhead : Chapman & Hall, 1964
- Radiative Process in Astrophysics, Rybicki & Lightman : Wiley, 1979
- Introduction to Spectropolarimetry, J.C del Toro Iniesta : Cambridge University Press, 2003
- 現代天文学、小平桂一訳 : 岩波書店、1968
- SOLAR-B中間報告書 可視光望遠鏡(SOT)編

55

SOT担当者

常田佐久¹、末松芳法¹、一本潔¹、清水敏文²、
勝川行雄¹、永田伸一³、久保雅仁²

1:国立天文台

2:宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部

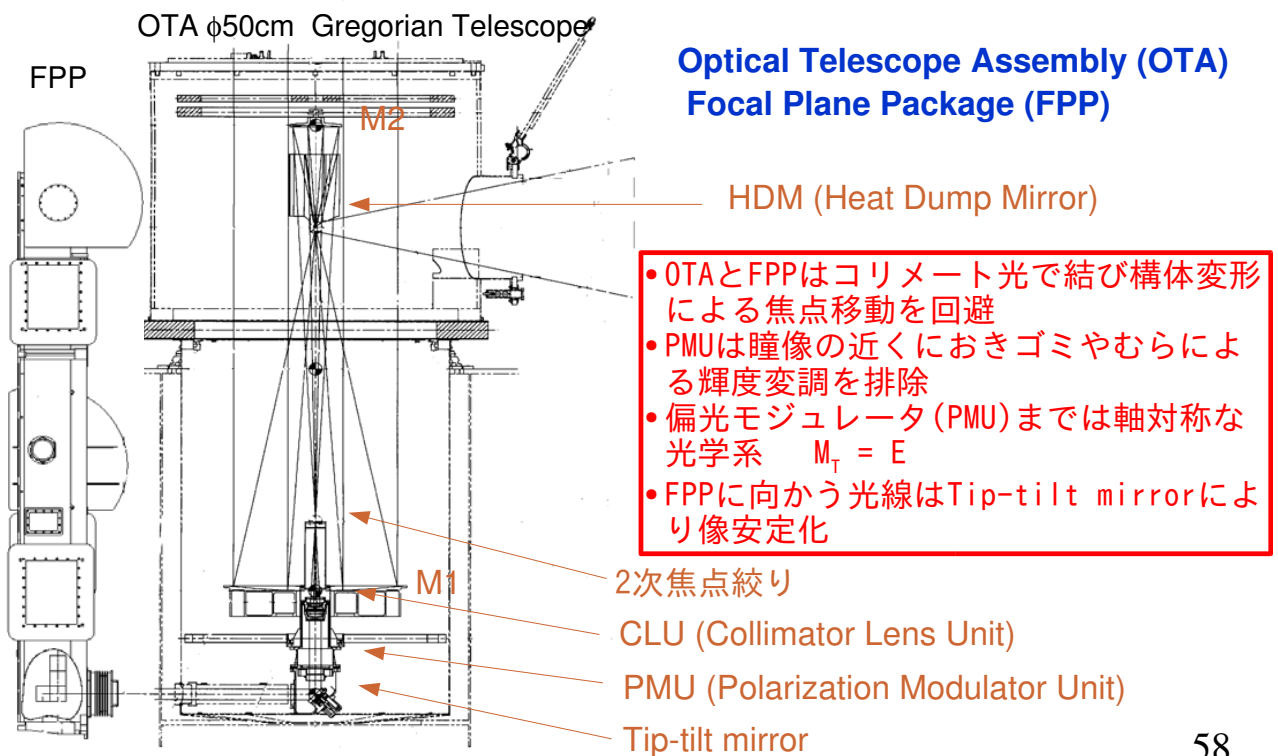
3:京都大学

56

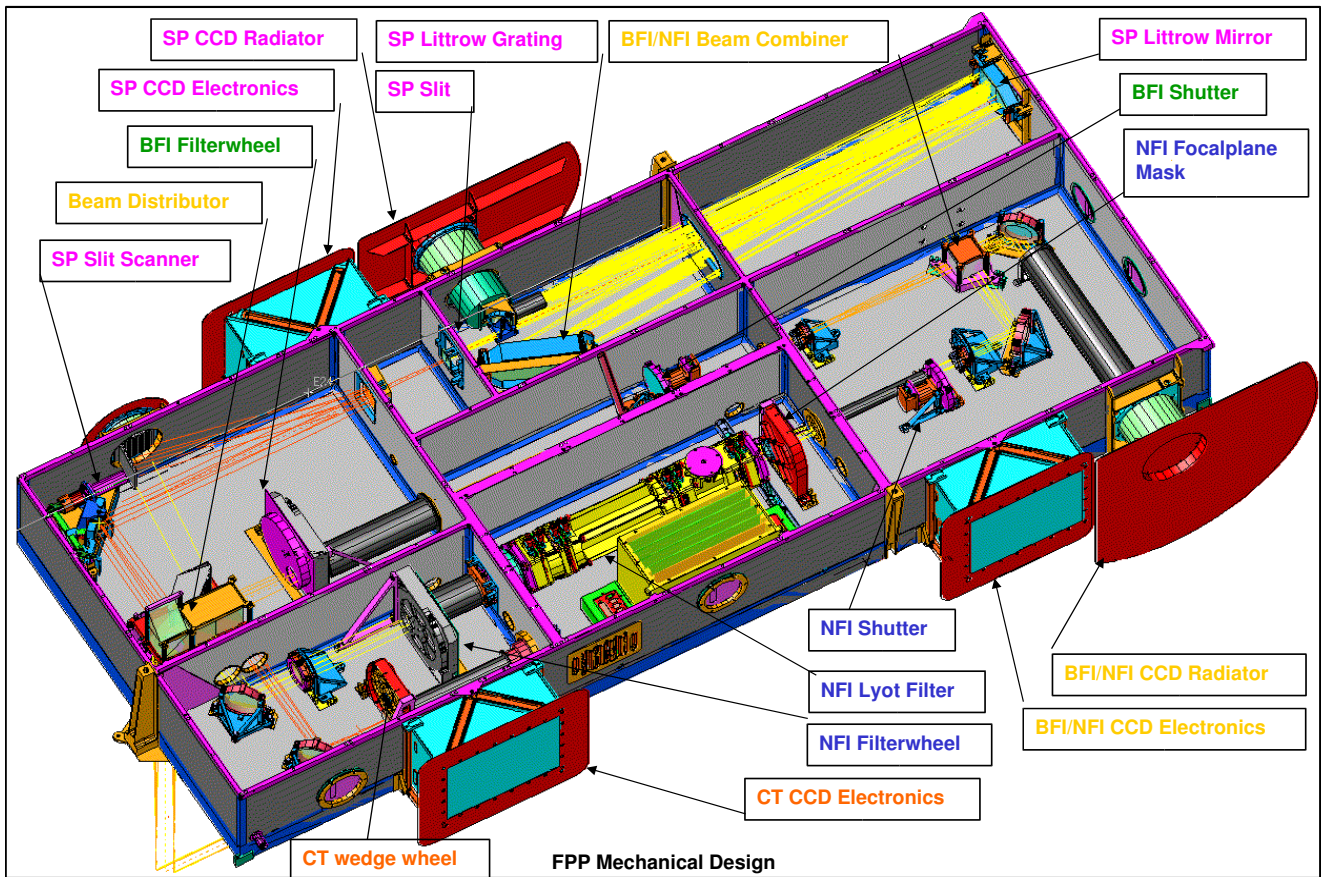
付録A

可視光望遠鏡光学系

57



58

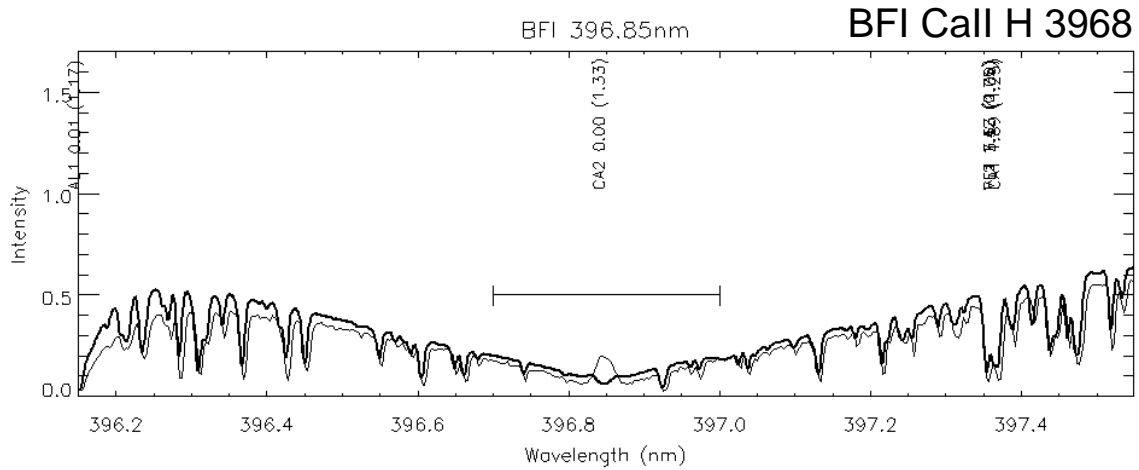
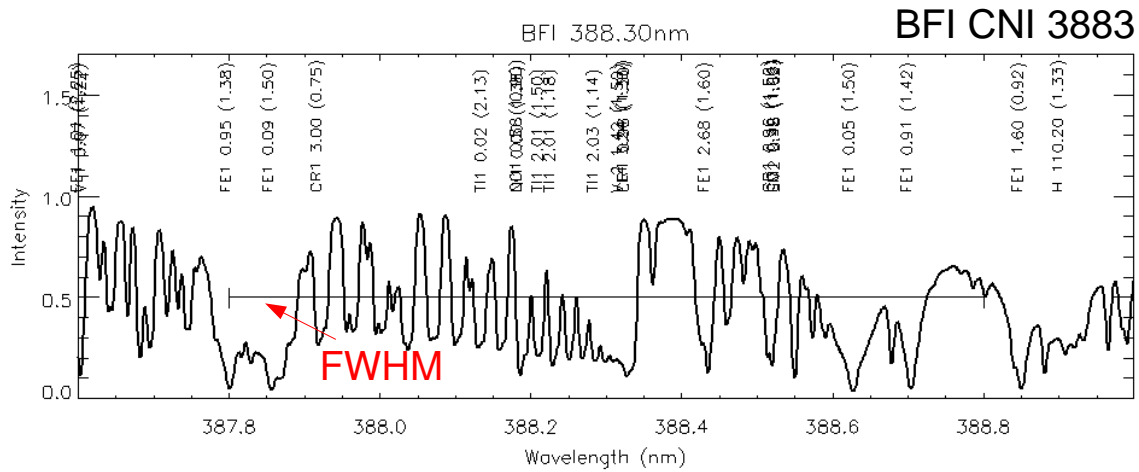


59

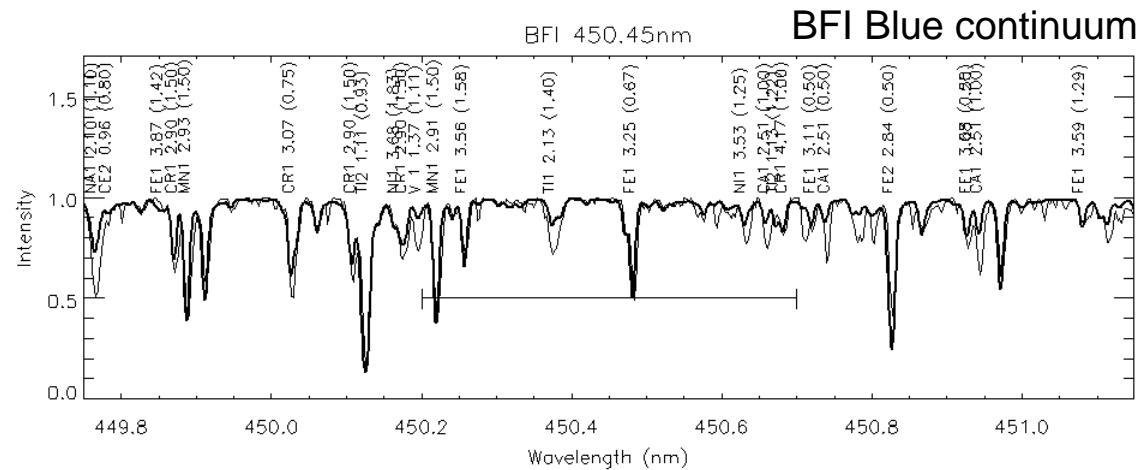
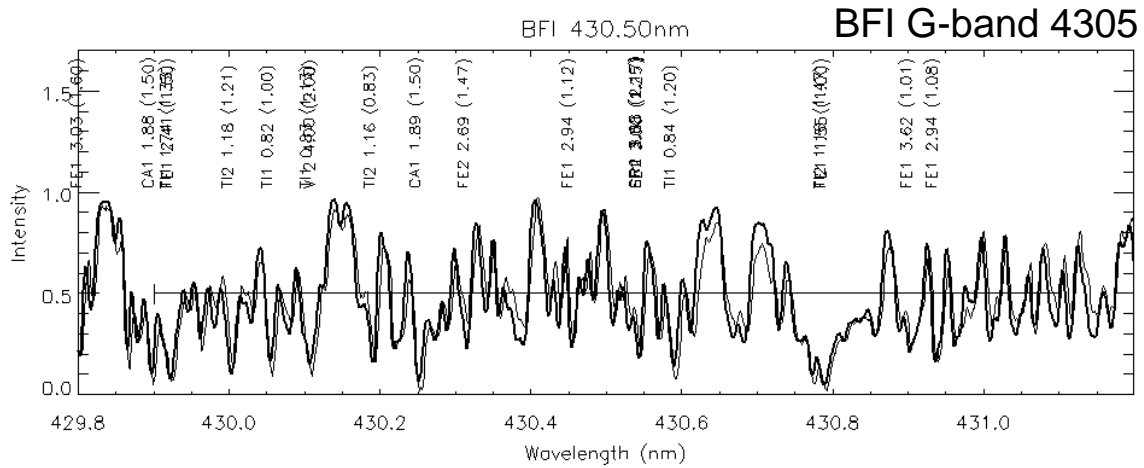
付録B

BF I 観測波長と分光透過幅

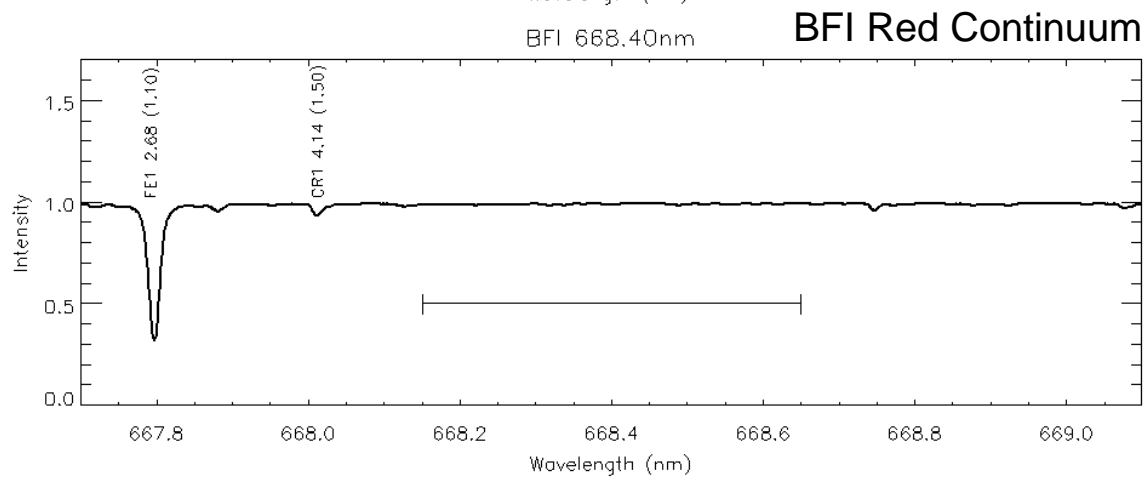
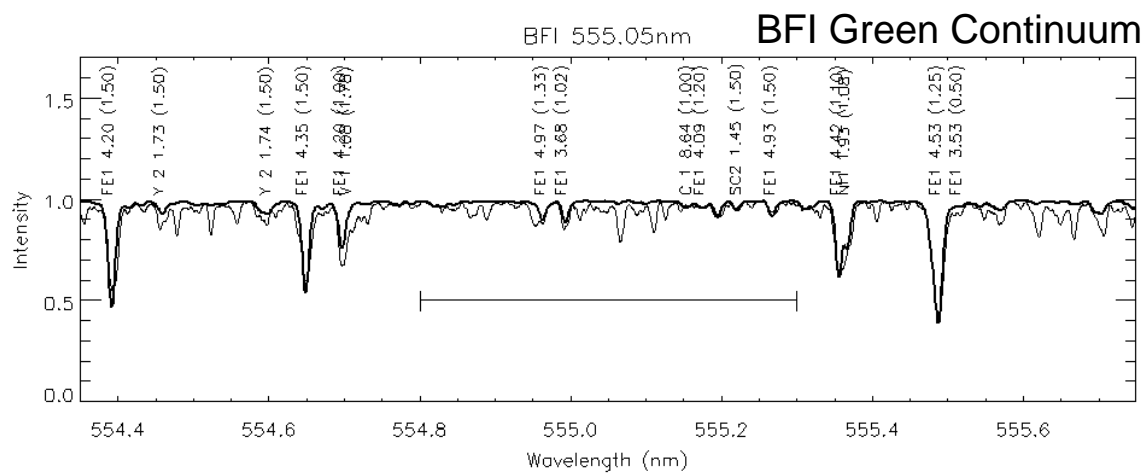
60



61



62



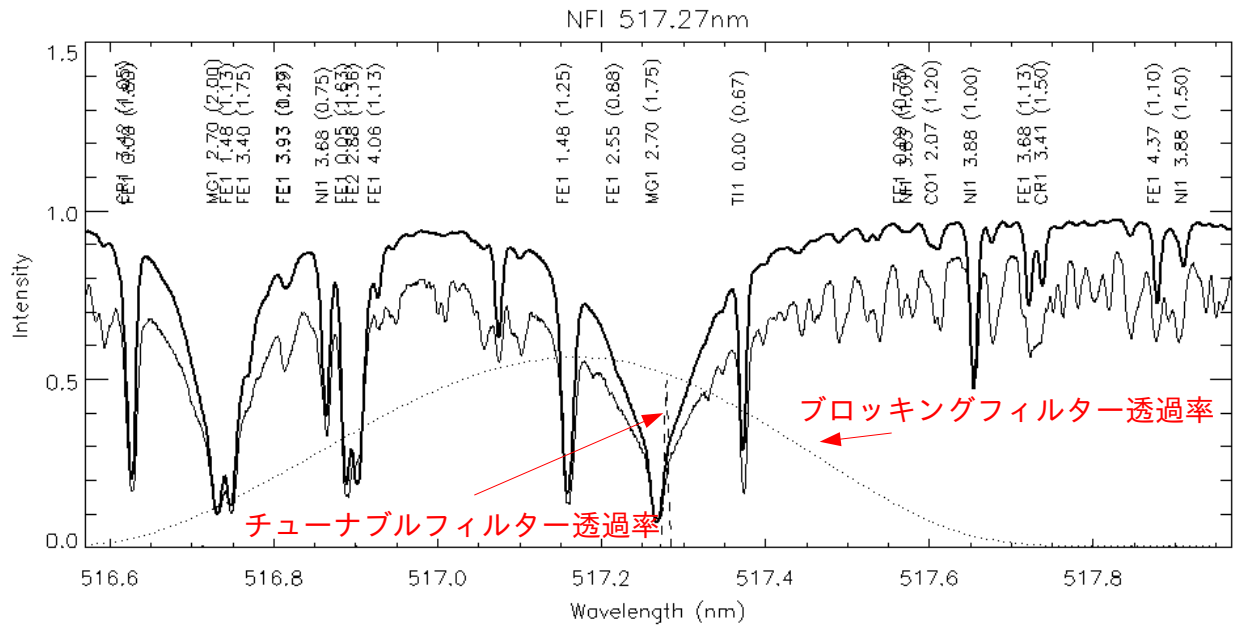
63

付録C

NF I 観測波長と分光透過率

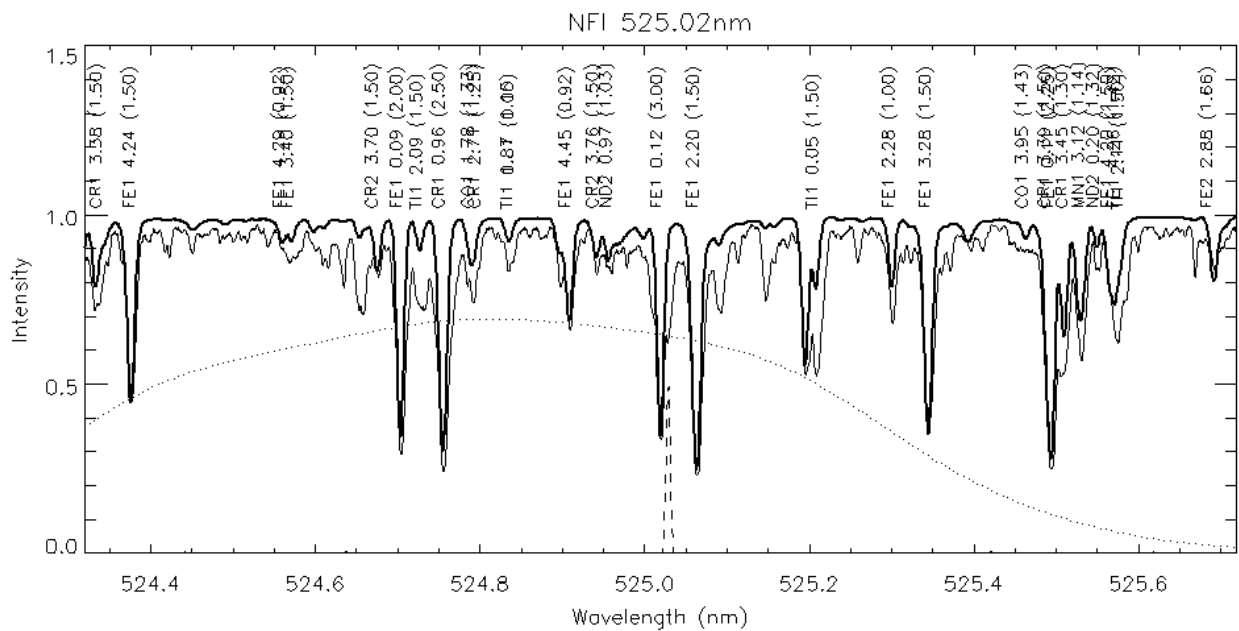
64

NFI 517.27 (Mg b2)



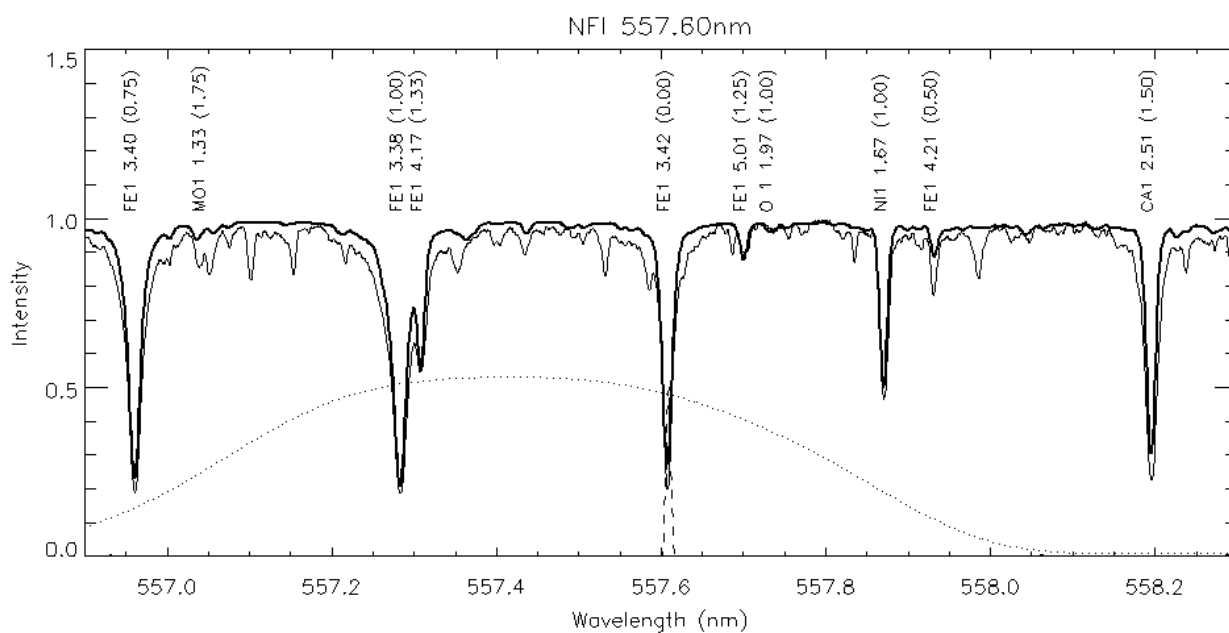
65

NFI 525.02 (FeI)



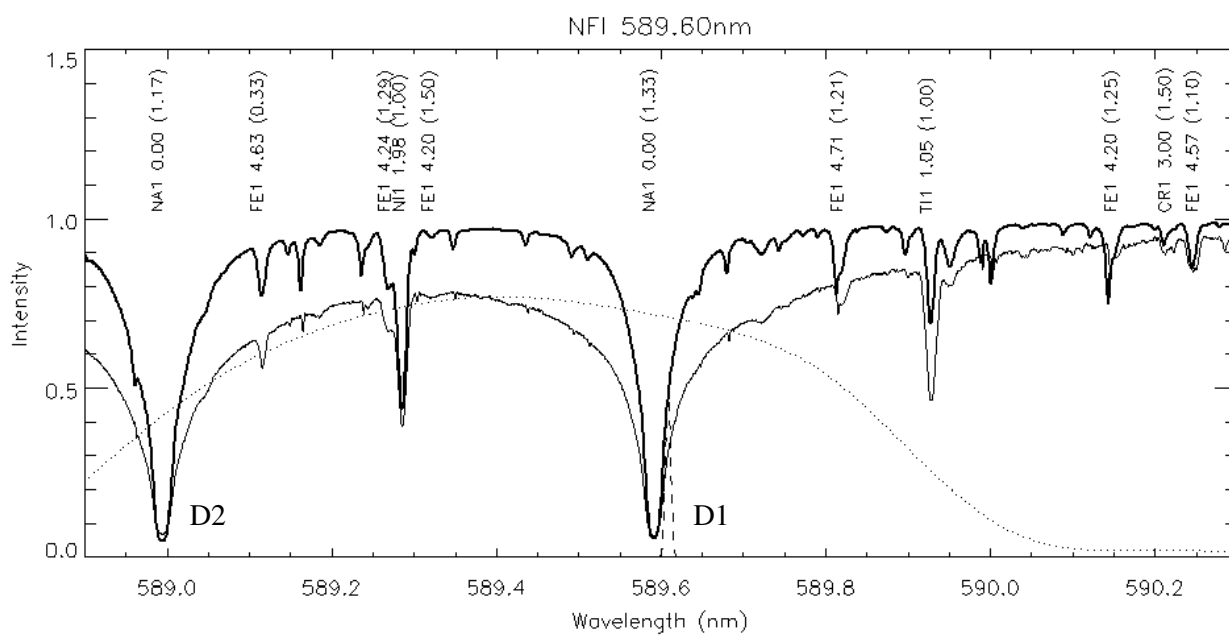
66

NFI 557.60 (FeI)



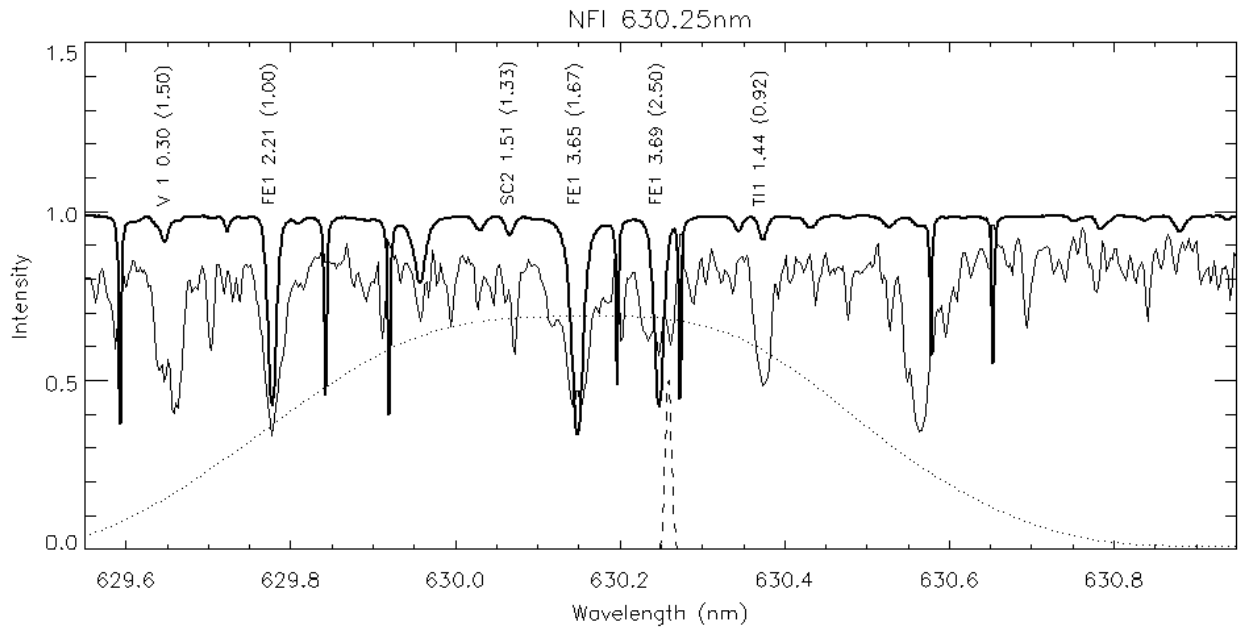
67

NFI 589.60 Na D1



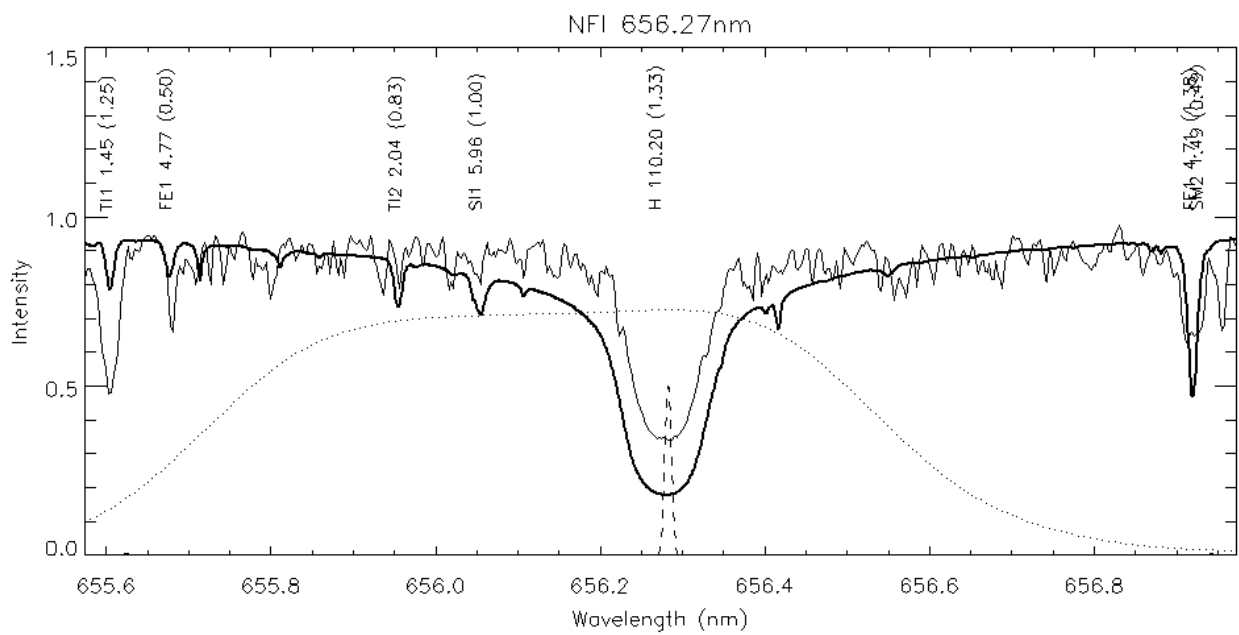
68

NFI 630.25 (FeI), 630.4 (TiI)



69

NFI 656.27 H α



70

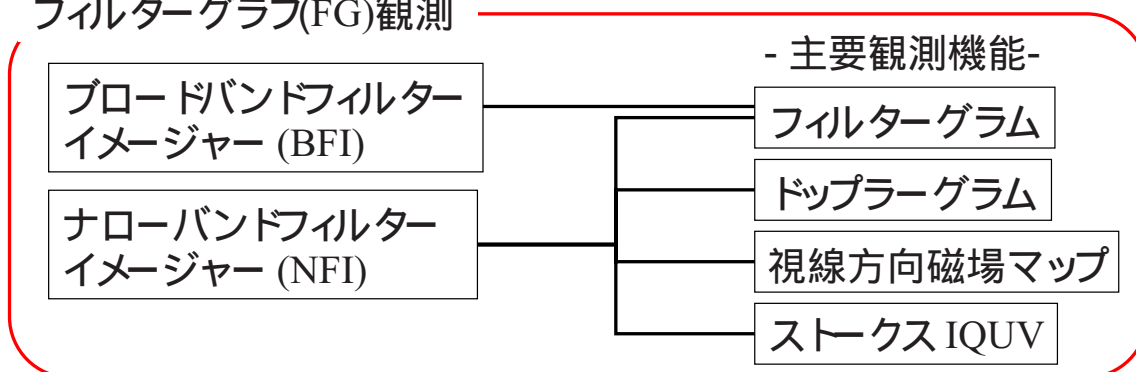
可視光望遠鏡観測の実際 - SOTデータ -

久保 雅仁
(宇宙航空研究開発機構)
mkubo@solar.isas.jaxa.jp

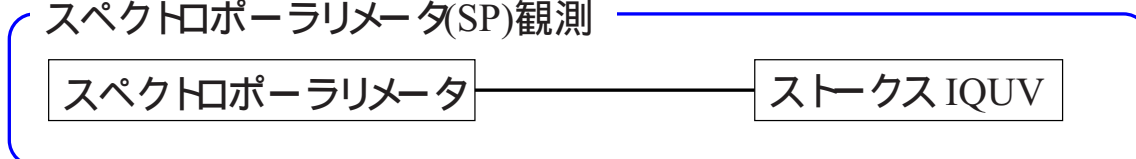
可視光望遠鏡 < 観測機能 >

可視光望遠鏡はフィルターグラフとスペクトロポーラリメータで構成され、それぞれ独立(同時に)観測することができる

フィルターグラフ(FG)観測



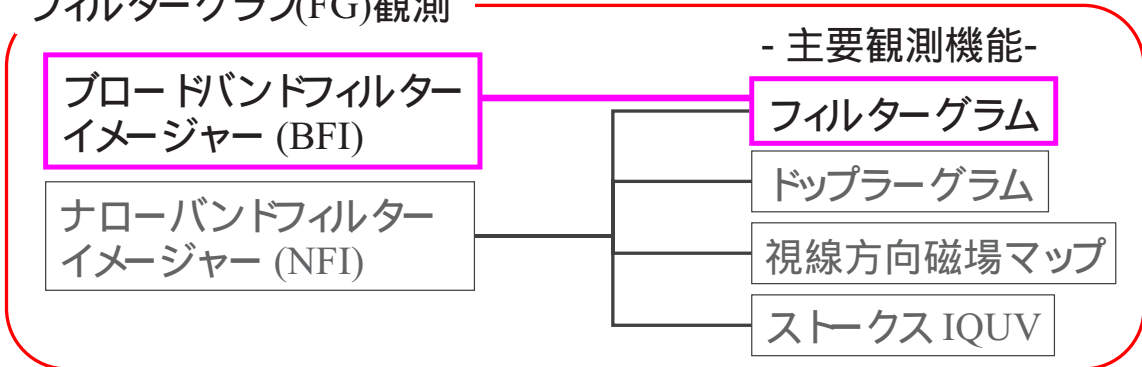
スペクトロポーラリメータ(SP)観測



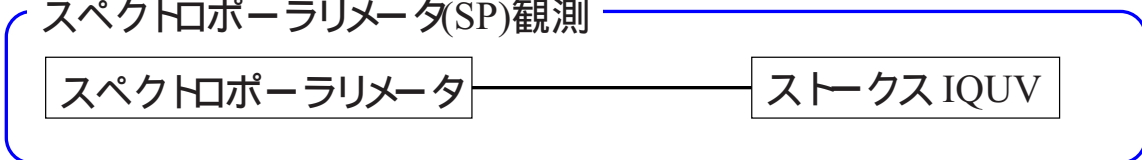
可視光望遠鏡 < 観測機能 >

フィルターグラフは2つの観測装置(BFI & NFI)で構成され、4つの観測機能がある

フィルターグラフ(FG)観測



スペクトロポーラリメータ(SP)観測



ブロードバンドフィルターイメジャー (BFI)

可視光望遠鏡の中で
最高の空間・時間分解能観測

・1ピクセル = 0.054秒角

・最大視野 : 218 x 109秒角

・波長分解能 3 - 10 Å

・観測波長 : 6波長域

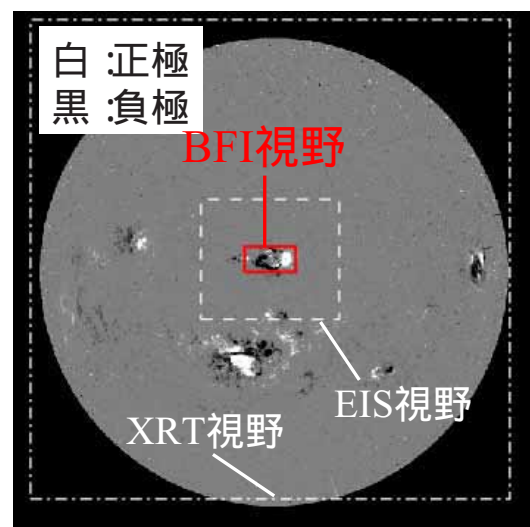
CN (3883 Å)

Ca II H (3969 Å)

CH (4305 Å)

連続光 (青:4505 Å, 緑 :5550 Å, 赤 :6684 Å)

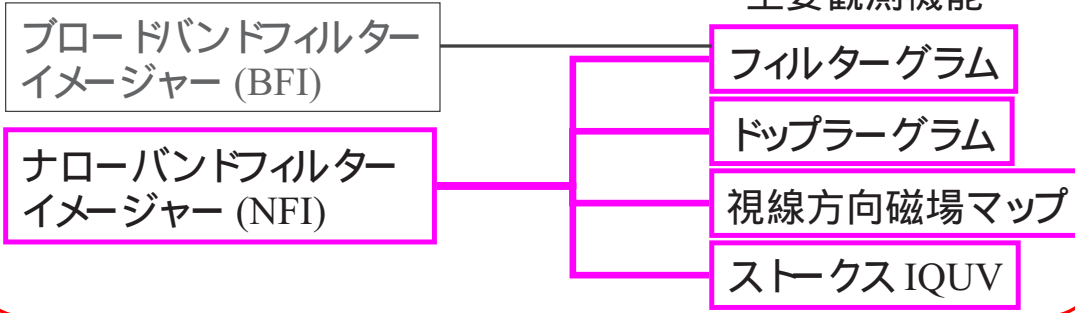
視線方向磁場(SOHO衛星)



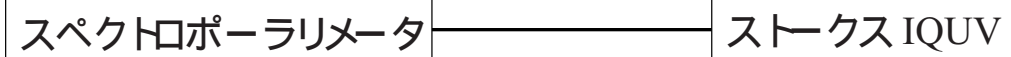
可視光望遠鏡 < 観測機能 >

フィルターグラフは2つの観測装置(BFI & NFI)で構成され、4つの観測機能がある

フィルターグラフ(FG)観測



スペクトロポーラリメータ(SP)観測



ナローバンドフィルターイメージャー (NFI)

明るさだけでなくドップラー速度
磁場3成分観測も可能

視線方向磁場(SOHO衛星)

・1ピクセル = 0.08秒角

・最大視野 : 328 x 164秒角

・波長分解能 : ~ 0.1 Å

・観測波長 : 6波長域

Mg I (5173 Å)

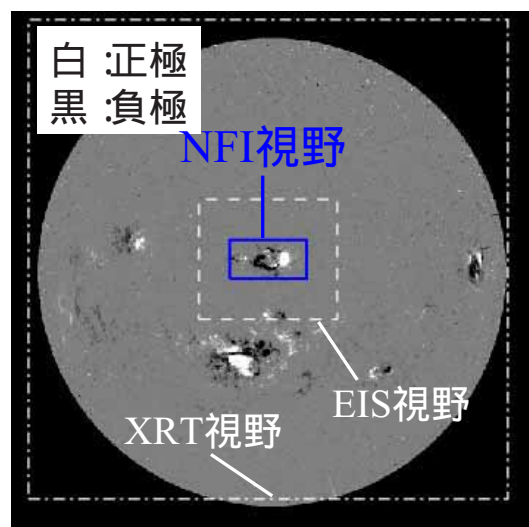
Fe I (5250 Å)

Fe I (5576 Å)

Na D (5896 Å)

Fe I (6303 Å)

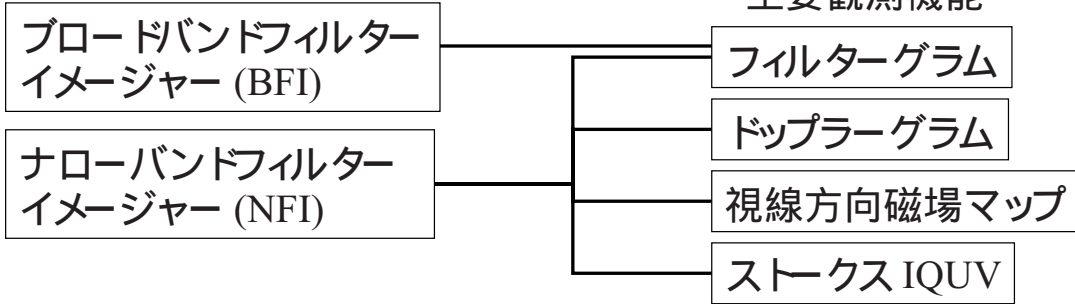
H (6563 Å)



可視光望遠鏡 < 観測機能 >

スペクトロポーラリメータ(SP)では偏光スペクトルを観測

フィルターグラフ(FG)



スペクトロポーラリメータ(SP)

スペクトロポーラリメータ

ストークス IQUV

スペクトロポーラリメータ(SP)

高精度の偏光スペクトル観測
から光球の磁場3成分や
ドップラー速度を取得

・1ピクセル = 0.16秒角

・最大視野 : 328 x 164秒角

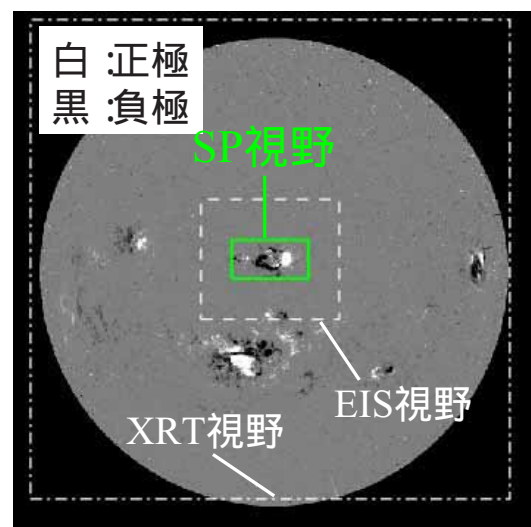
・波長分解能 : $\sim 0.03 \text{ \AA}$

・波長範囲 :

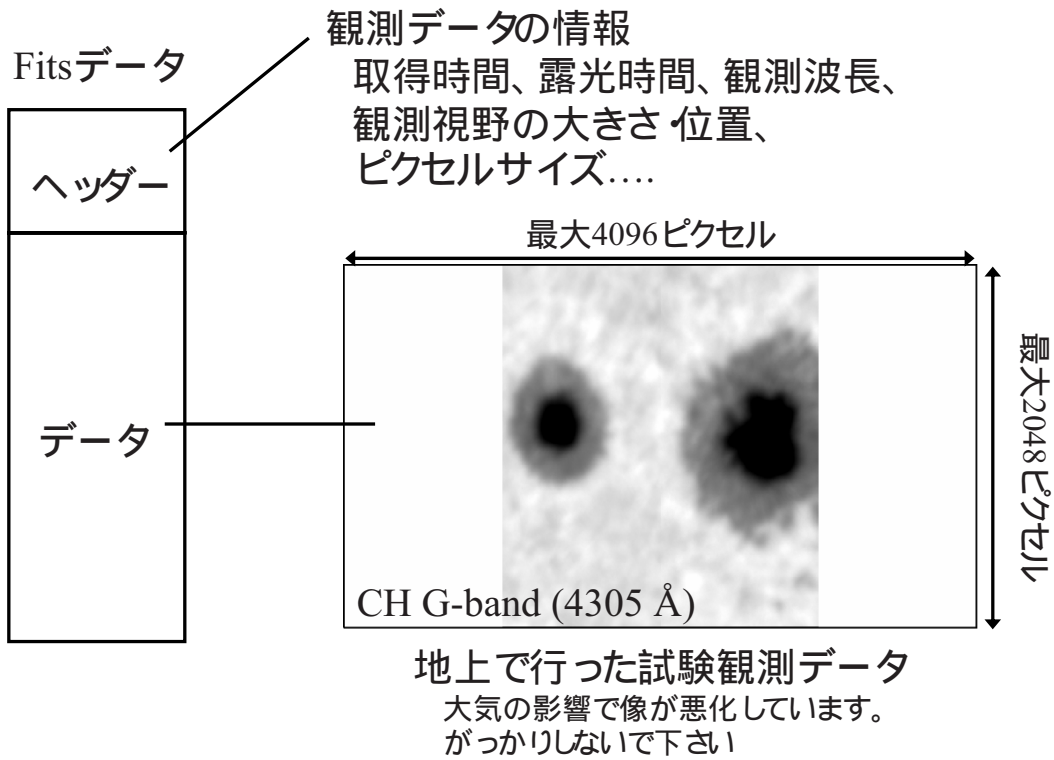
6300.8 \AA \sim 6303.2 \AA

Fe I (6301.5 \AA 、6302.5 \AA)の
2本の吸収線を含む

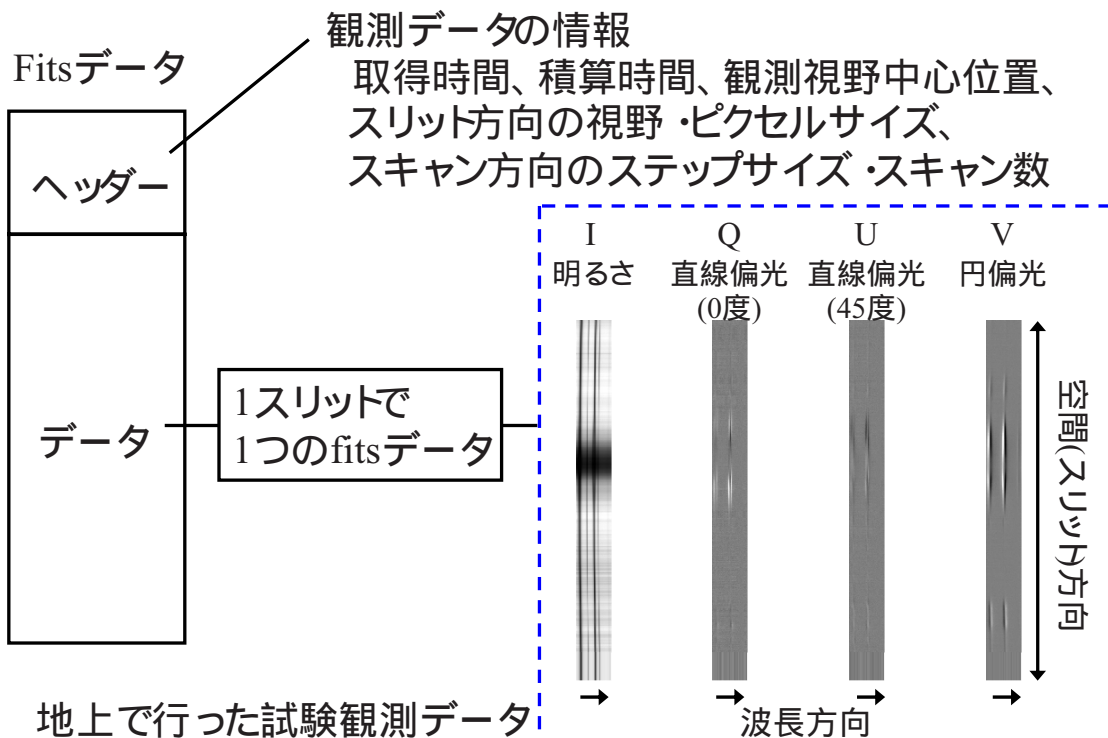
視線方向磁場(SOHO衛星)



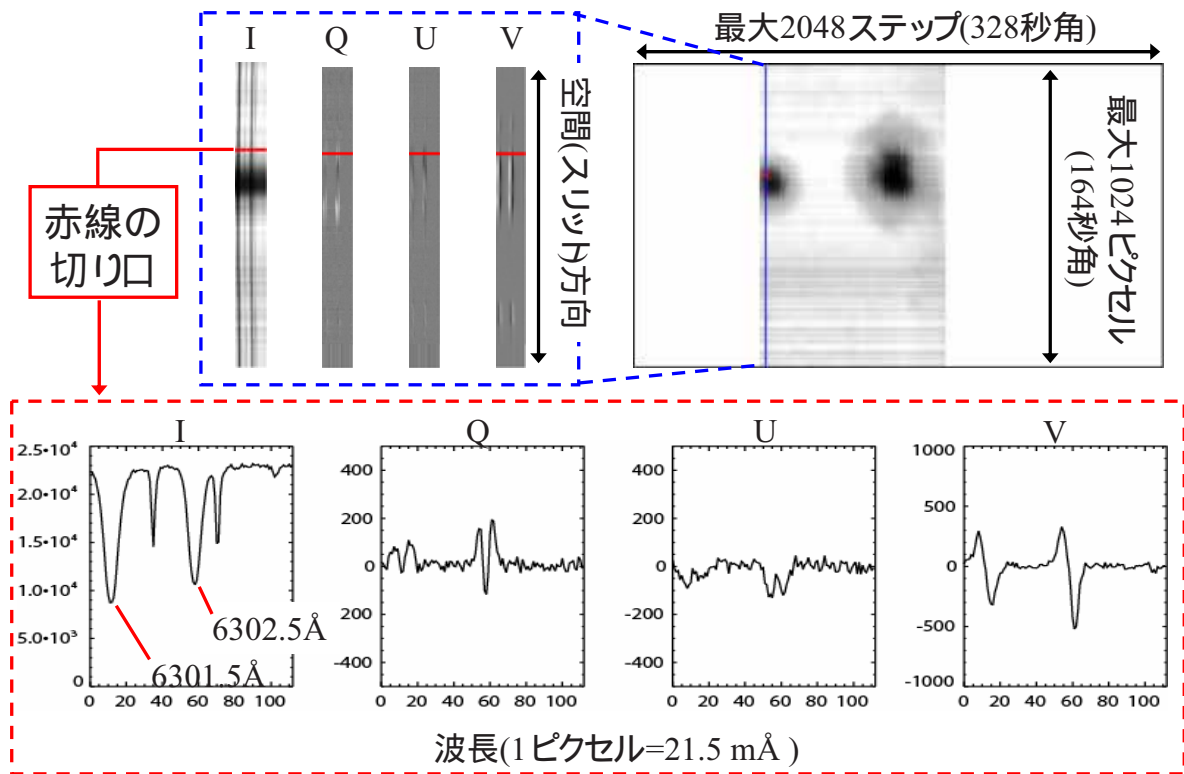
フィルターグラフ<取得データ>



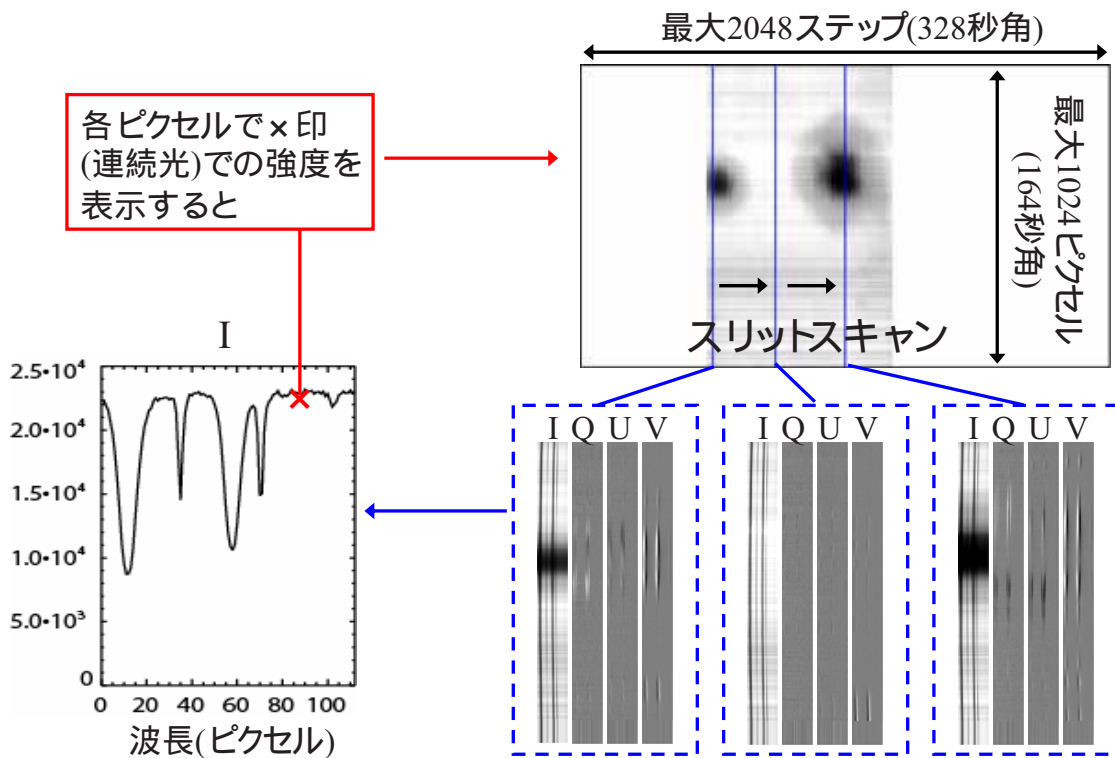
スペクトロポーラリメータ<取得データ>



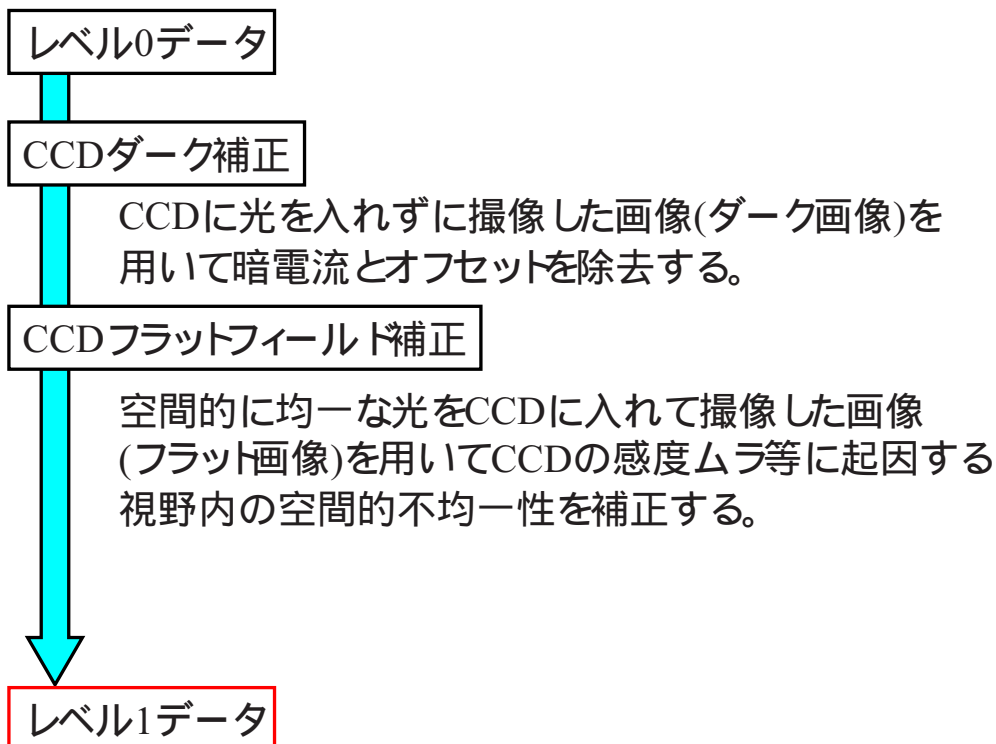
スペクトロポーラリメータ<取得データ>



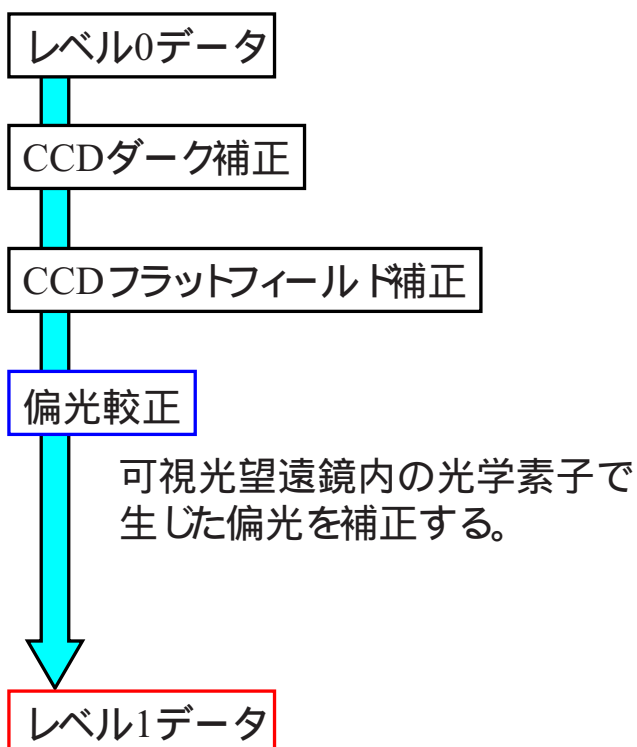
スペクトロポーラリメータ<取得データ>



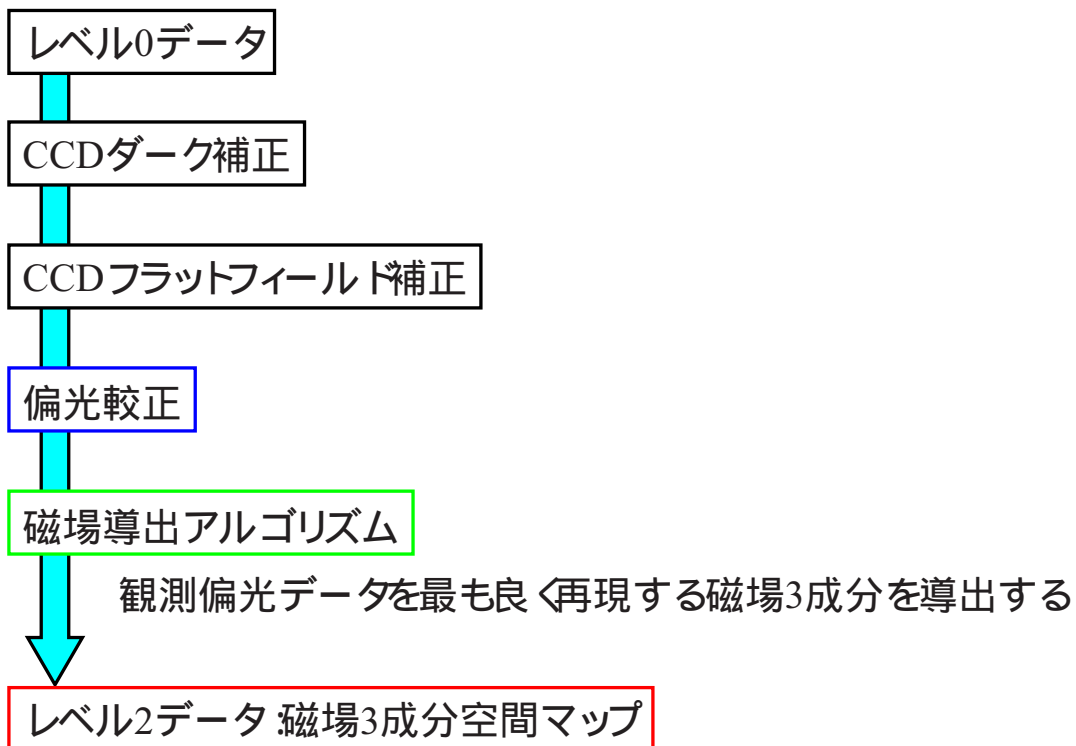
データ解析への道程 < 偏光データ以外 >



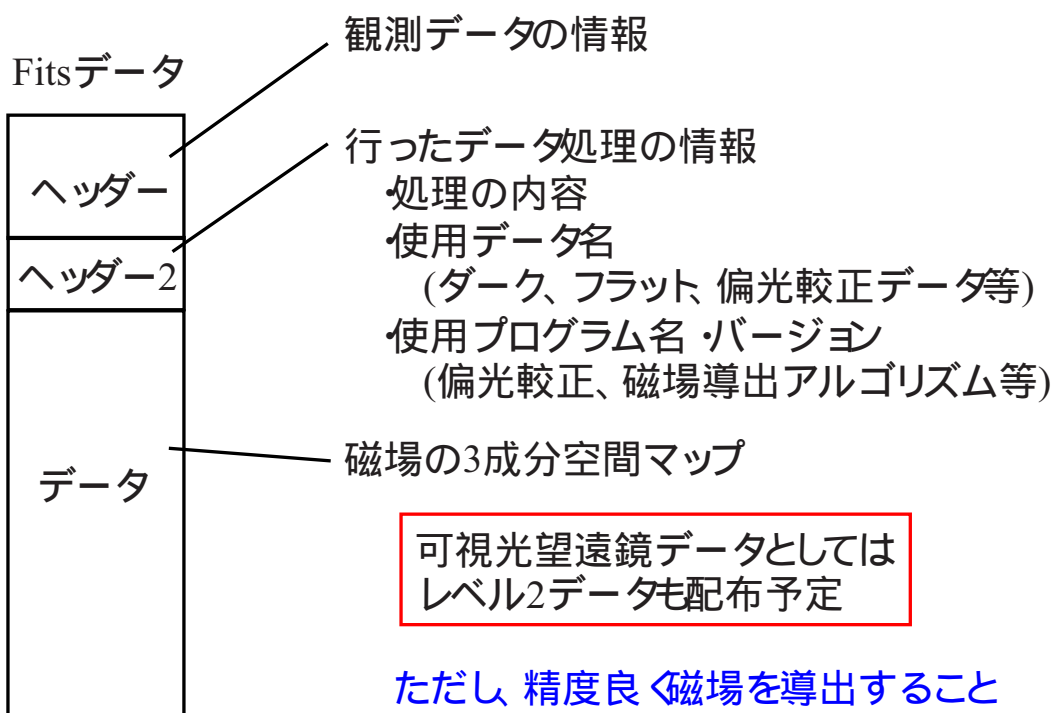
データ解析への道程 < 偏光データ >



データ解析への道程 < 磁場3成分データ >



レベル2データ(磁場3成分の空間マップ)



ただし 精度良く磁場を導出すること
自体が重要な研究テーマ

可視光望遠鏡の 観測機能と取得データ

- ・フィルターグラム観測 (フィルターグラフ)
- ・視線方向マグネットグラム観測 (フィルターグラフ)
- ・ドップラーグラム観測 (フィルターグラフ)
- ・ストークスIQUV観測
(フィルターグラフ& スペクトロポーラリメータ)

フィルターグラフ<フィルターグラム観測>

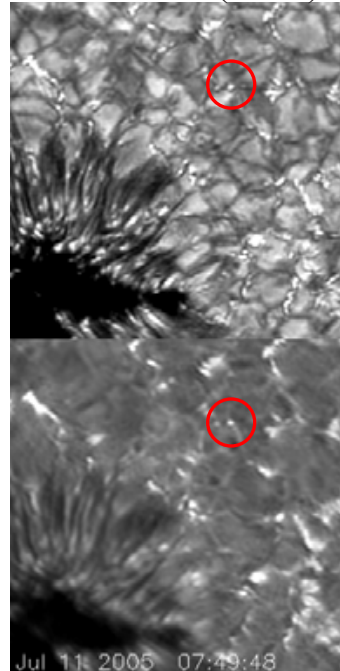
各波長で撮像した画像データ

- 波長 :フィルターグラフで観測可能な
12波長域全て
- 時間分解能 :最長の場合で~6秒

複数の波長の同時観測で
光球 彩層の変化

連続的にデータを取得すれば
時間発展もわかる

CH G-band (光球)

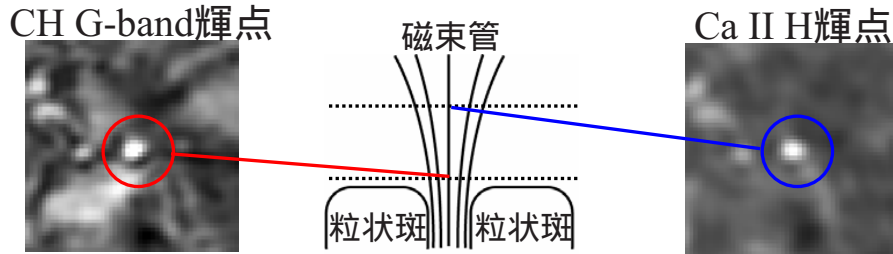


Ca II H (彩層下部)

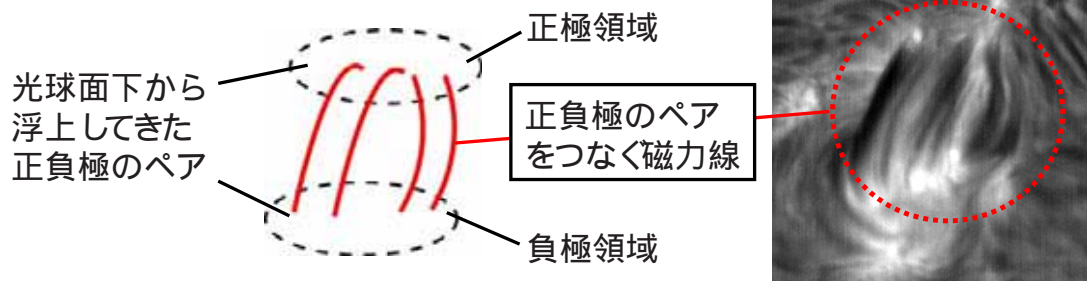
フィルターグラフ<フィルターグラム観測>

磁場に対応する構造から磁力線の運動を調べる

・CH G-band(光球), Ca II H(彩層下部) の輝点



・H で観測される彩層のすじ模様

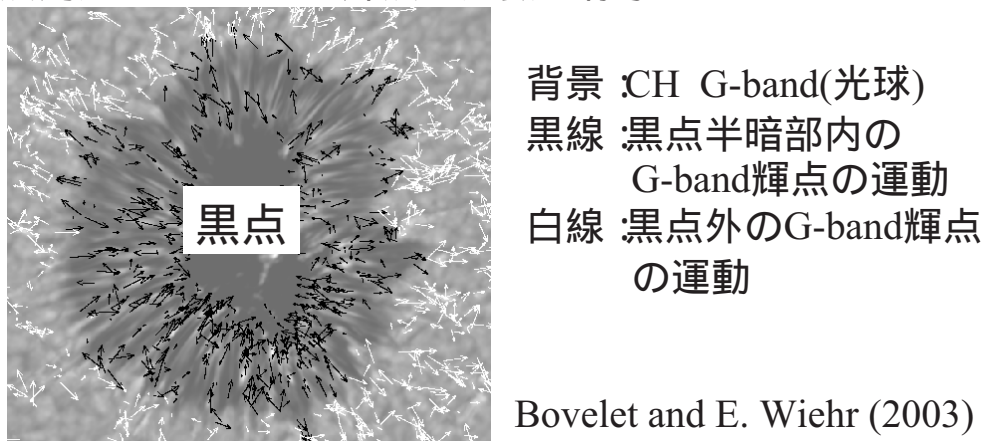


フィルターグラフ<フィルターグラム観測>

磁気要素の移動速度を定量的に計算

・対流のフローパターンの検出

黒点周辺のCH G-band輝点の運動の様子

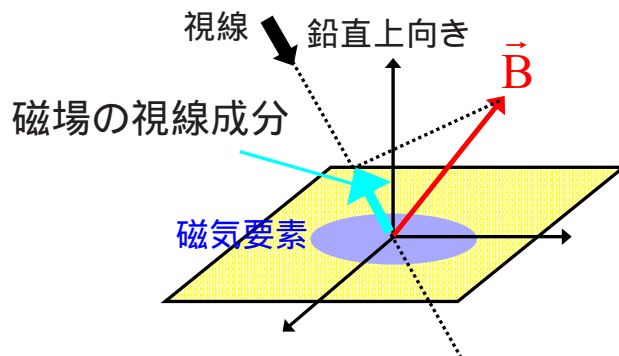


フィルターグラフ< 視線方向マグネットグラム観測 >

光球・彩層での磁場の視線成分を観測

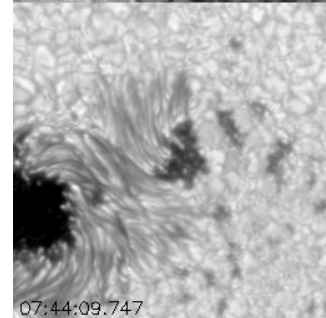
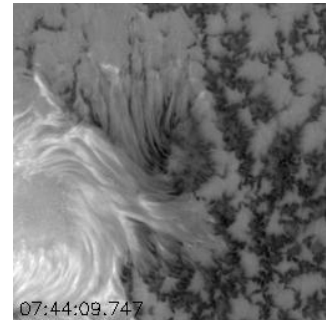
- 波長 :Fe I (6303 Å, 5250 Å) 光球
- Mg I (5173 Å) 彩層下部
- Na D (5896 Å) 彩層下部

- 時間分解能 :10 - 30秒



視線方向磁場(光球)

白 :正極、黒 :負極



連続光強度

フィルターグラフ< 視線方向マグネットグラム観測 >

光球・彩層での磁場の視線成分を観測

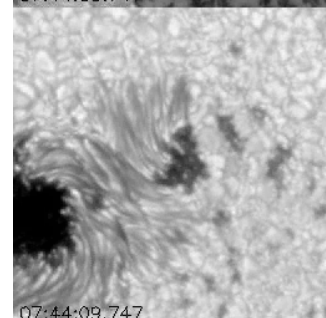
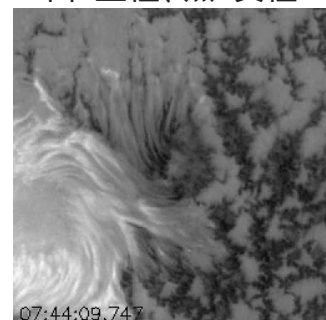
- 波長 :Fe I (6303 Å, 5250 Å) 光球
- Mg I (5173 Å) 彩層下部
- Na D (5896 Å) 彩層下部

- 時間分解能 :10 - 30秒

- ・磁場の視線方向成分の強弱
- ・磁気要素の出現・消滅、運動
- ・正極、負極の空間分布、混ざり具合

視線方向磁場(光球)

白 :正極、黒 :負極



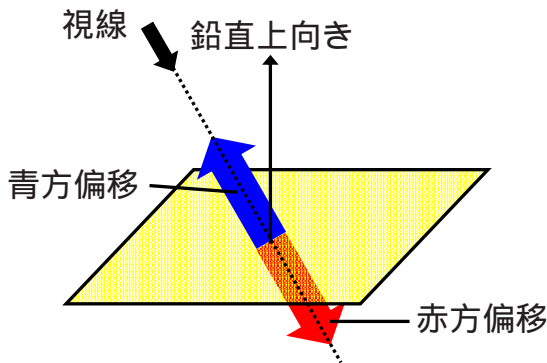
連続光強度

フィルターグラフ< ドップラーグラム観測 >

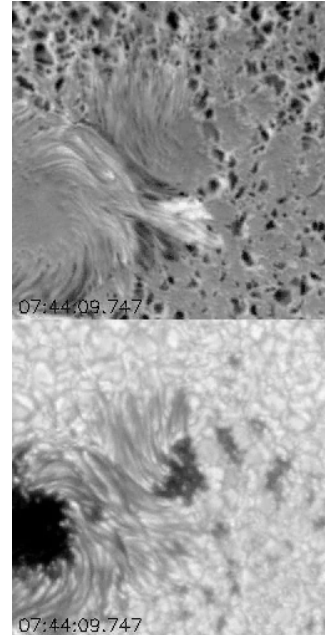
光球・彩層でのドップラー速度を観測

- 波長 Fe I (5576Å) 光球
- Mg I (5173Å) 彩層下部
- H (6563Å) 彩層

- 時間分解能 :10 - 30秒

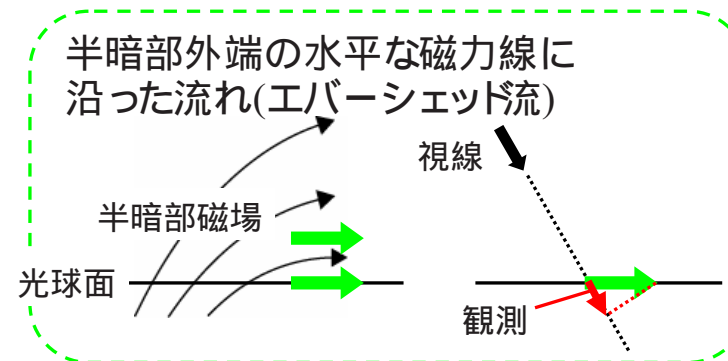
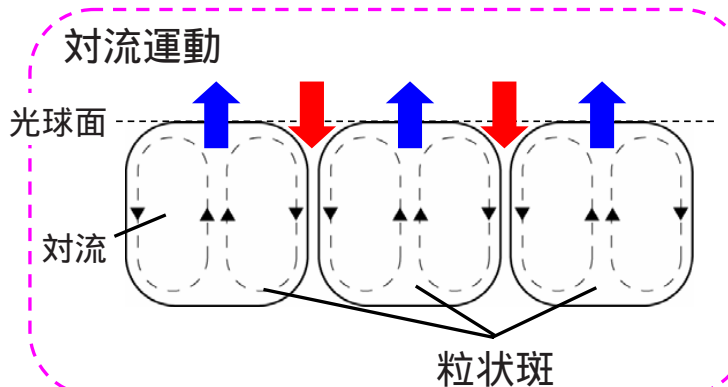


ドップラー速度(光球)
白 赤方偏移、黒 :青方偏移

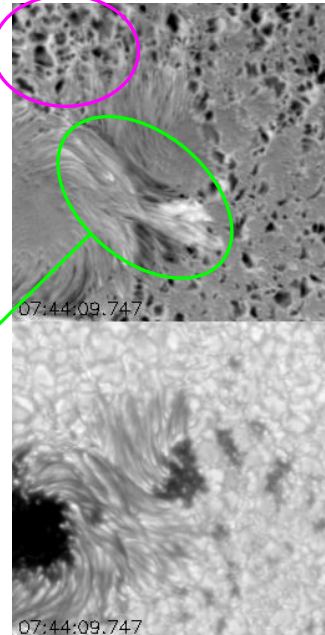


連続光強度

フィルターグラフ< ドップラーグラム観測 >



ドップラー速度(光球)
白 赤方偏移、黒 :青方偏移

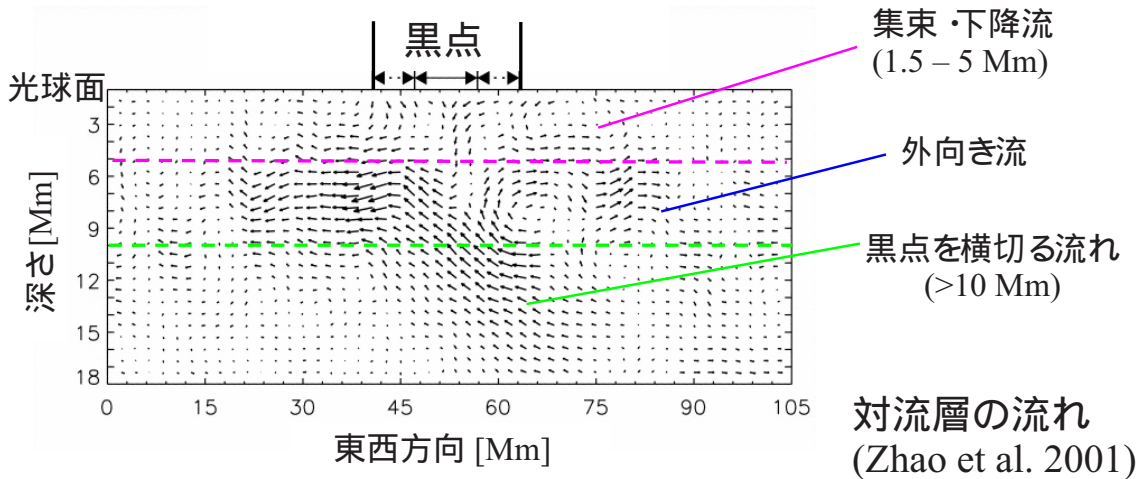


連続光強度

フィルターグラフ< ドップラーグラム観測 >

局所日振学を用いて対流層での速度場、磁場構造を調べる

地震波の伝播から地球の内部構造を調べるように
太陽でも太陽内部を伝播する波による太陽表面での
振動(ドップラー速度)を測定することで太陽の
内部構造を知ることができる



フィルター & スペクトル< ストックスIQUV >

光球 彩層での磁場3成分、
ドップラー速度を取得

・フィルターグラフ(FG)

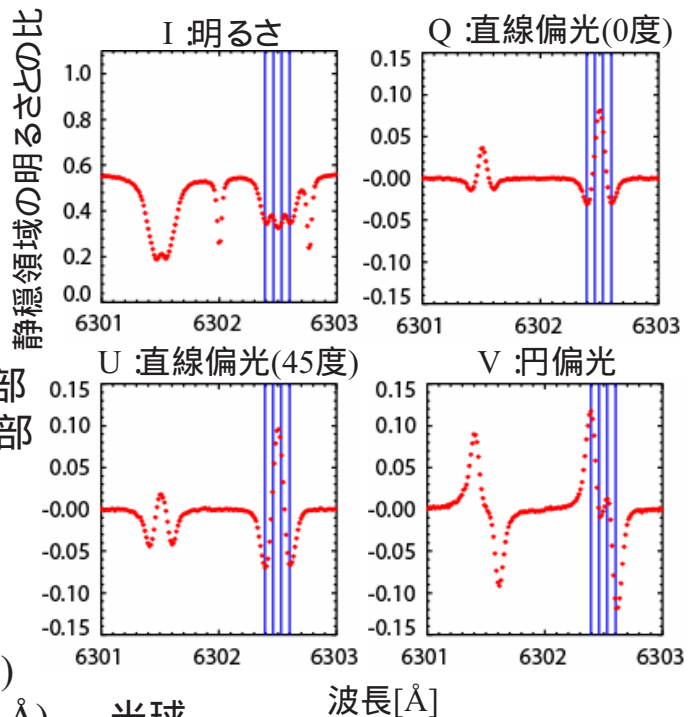
- 波長 :

Fe I (5250 Å)	光球
Fe I (6303 Å)	光球
Mg I (5173 Å)	彩層下部
Na D (5896 Å)	彩層下部

- 時間分解能 :10 - 30秒

・スペクトロポーラリメータ(SP)

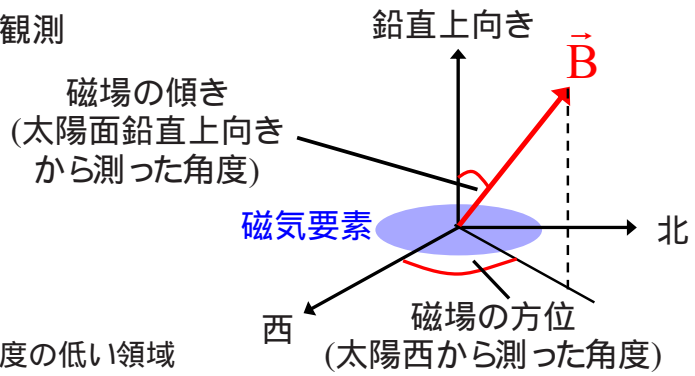
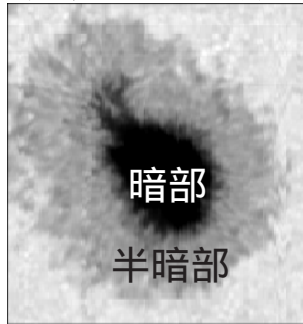
- 波長: Fe I (6301.5, 6302.5 Å) 光球



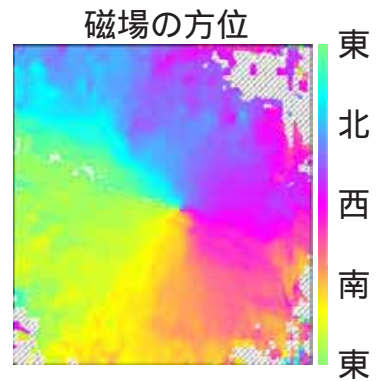
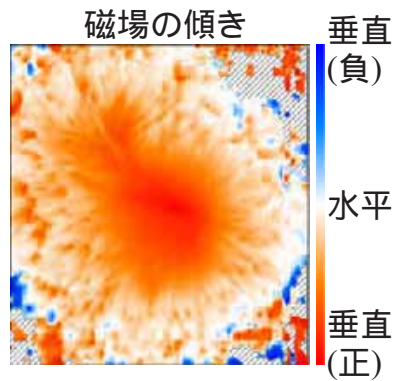
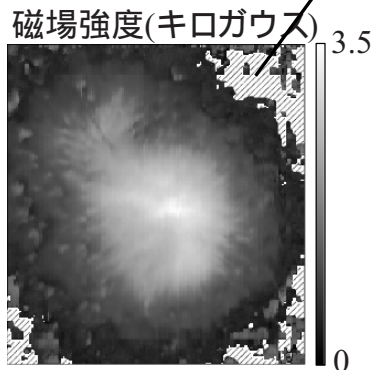
・:SP、 - :FG(4波長)

磁場3成分観測例 (Fe I 6301.5 & 6302.5 Å : 光球)

スペクトロポーリメータ地上観測

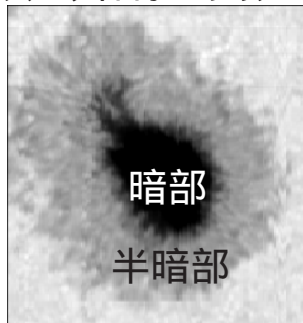


偏光度の低い領域

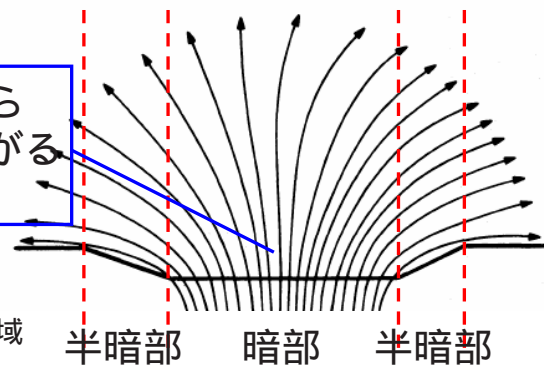


磁場3成分観測例 (Fe I 6301.5 & 6302.5 Å : 光球)

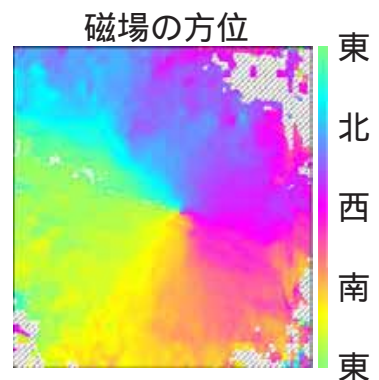
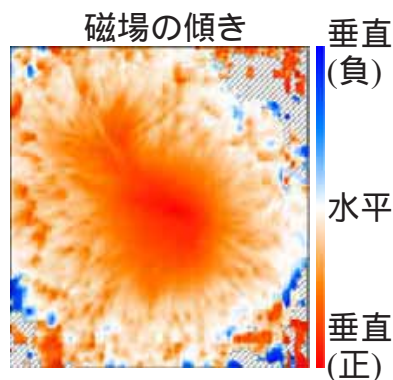
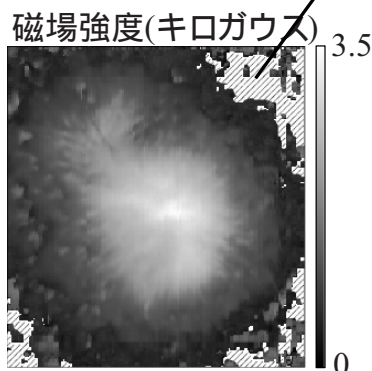
スペクトロポーリメータ地上観測



黒点中心から放射状に広がる磁場構造



偏光度の低い領域



フィルター & スペクトル観測の特徴

広い視野でかつ高い時間分解能の観測がしたい場合
光球 彩層における磁場 速度の変化を得たい場合

フィルターグラフ(FG)

(観測視野は狭くなるがFGでもSPと同程度の測光精度で観測可能)

磁場、速度、(温度)といった大気構造の情報を正確に知りたい場合

スペクトロポーラリメータ(SP)

	最大視野取得 に要する時間	波長分解能 [Å]	波長点数 [個]	測光精度 [%]	観測波長域
FG	10 - 30秒	~ 0.1	1 - 4	~ 0.5	光球 × 3 彩層 × 3
SP	1 - 2.5時間	~ 0.03	112	~ 0.1	光球 × 1

長所

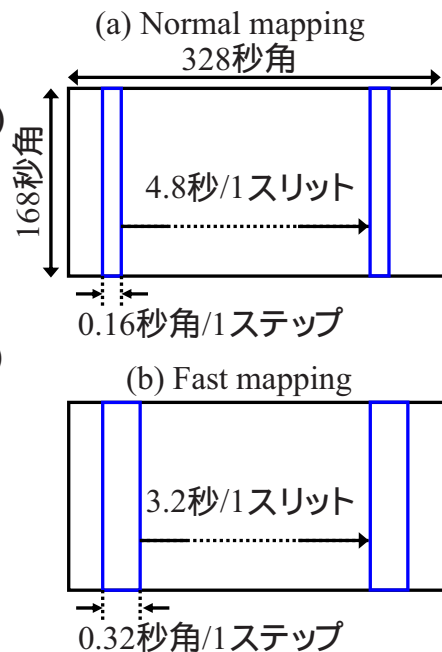
スペクトロポーラリメータ < 観測視野 vs. 取得時間 >

・視野最大データの取得にかかる時間
(比較的大きな活動領域でも全体が入る)
Normal map :160分、Fast map:60分

・**スキャン範囲は任意に変更可能**
スキャン領域が半分なら時間も半分
(コンパクトな活動領域なら全体が入る)

・高い時間分解能で観測したい場合
最高 :1.6秒/1スリット
(測光精度はNormalと比べて悪くなる)

・弱い磁場まで精度良く測定したい場合
1スリット当たりの積算時間を4.8秒以上にもすることも可能



可視光望遠鏡を使った観測

・観測テーブルの構造

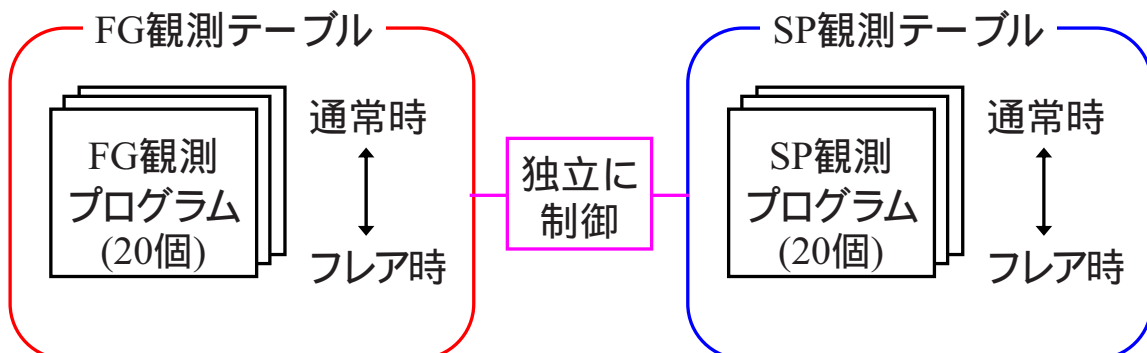
・観測例

可視光望遠鏡 < 観測テーブルの構造 >

・可視光望遠鏡観測は、フィルターグラフ(FG)とスペクトロポーラリメータ(SP)用の2つの観測テーブルで独立に制御される。

・観測テーブルは20個の観測プログラムで構成される。

・観測プログラムの中には通常時/フレア時の2種類のモードがある



可視光望遠鏡 < 観測テーブルの構造 >

観測プログラム#1		
繰り返し回数 3回		
サブルーチン	繰り返し	間隔
#1	10回	30 s
#4	2回	60 s
#3	5回	10 s
#1	1回	30 s

サブルーチン#1		
シーケンス	繰り返し	間隔
#1	5回	20 s
#2	10回	40 s
#50	1回	10 s
#18	2回	30 s

----- シーケンステーブル -----

観測機能、波長、視野等のパラメータで構成される観測の基本要素群 (コマンド)

シーケンス#1			
機能	波長	サイズ、視野...	間隔
フィルター	CH	2k x 1k、...	10 s

シーケンス#2			
機能	波長	サイズ、視野...	間隔
フィルター	CH	1k x 1k、...	30 s
ドップラー	Fe I	1k x 1k、...	30 s
IQUV	Fe I	1k x 1k	30 s
⋮			
シーケンス#100			
機能	波長	サイズ、視野...	間隔

< 取得データレートとデータ圧縮 >

・可視光望遠鏡のデータレコード量 5.6Gbits (1バイト= 8ビット)

・可視光望遠鏡の最大テレメトリレート: ~ 1.3Mbps
 最大レートで観測すると70分程度でデータレコードが一杯。
 その後、データを地上局に落とすまで数周回お休み。

連続的に観測したい場合: ~ 0.3Mbps

データ圧縮を利用する必要がある

・16ビットピクセルの可視光望遠鏡の元データが、最終的に
 - 可逆圧縮の場合(解凍時誤差無し) 5-6ビットピクセル

- 非可逆圧縮の場合(解凍時誤差発生):

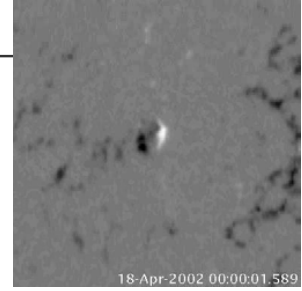
3ビットピクセル(フィルターグラフ)、
 1.5ビットピクセル(スペクトロポーラリメータ)

光子ノイズと解凍時の誤差が同程度になる圧縮率。ただし画像や領域に依存。

配布されるfitsデータは解凍されている

可視光望遠鏡観測 < 観測例1 >

視線方向磁場(SOHO衛星)



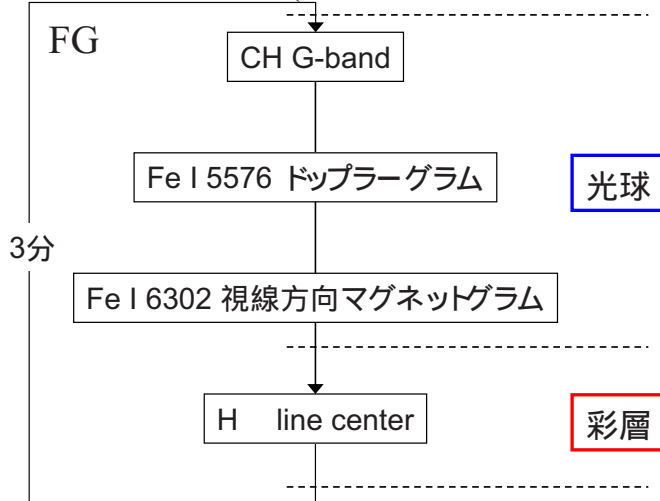
1週間程度の連続観測(例題 :活動領域全体)

光球での磁場・速度場の時間発展を観測

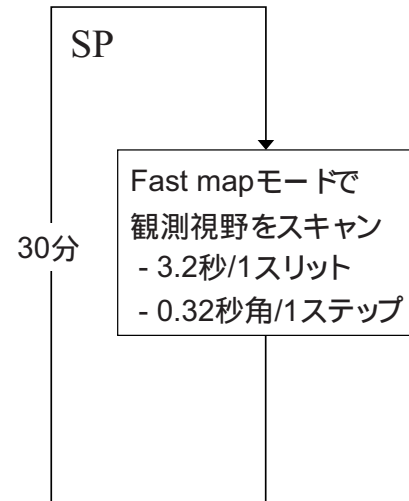
視野 :1K × 1Kピクセル

BFI :100 × 100秒角(0.054 × 2 = 0.1秒角/ピクセル)

NFI :160 × 160秒角(0.08 × 2 = 0.16秒角/ピクセル)



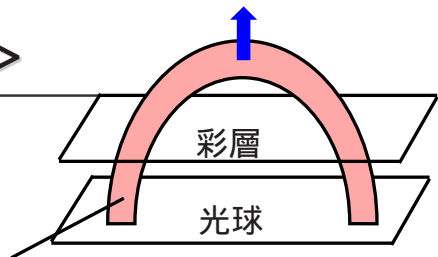
視野 :160x160秒角



可視光望遠鏡観測 < 観測例2 >

数時間程度の連続観測(例題 :磁気浮上)

光球から彩層の3次元的な構造を観測

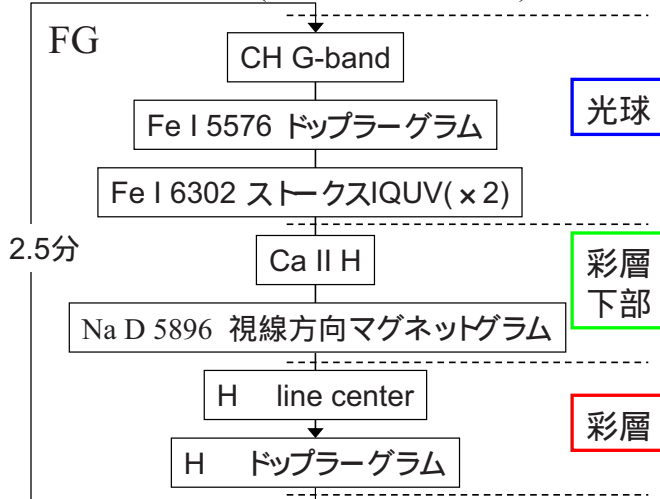


浮上する磁力線

視野 :1K × 1Kピクセル

BFI :50 × 50秒角(0.054秒角/ピクセル)

NFI :80 × 80秒角(0.08秒角/ピクセル)



視野 :80x80秒角



可視光望遠鏡観測 < 観測例3 >

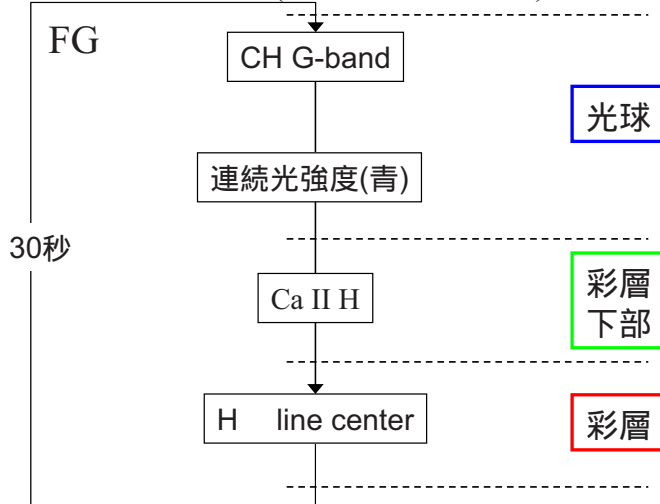
スリット固定で高時間分解能観測(例題 : 微細磁束管)

微細磁束管と対流の相互作用を観測

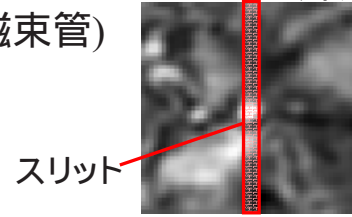
視野 : 0.5K × 2Kピクセル

BFI : 25 × 100秒角(0.054秒角/ピクセル)

NFI : 40 × 160秒角(0.08秒角/ピクセル)



CH G-band輝点



スリット

視野 : 0.16x160秒角



可視光望遠鏡観測 < まとめ >

可視光望遠鏡は3つの観測装置を組み合わせて、高空間分解能、高時間分解能、高精度の磁場・速度場観測を実現している。

- BFI, NFI, SPそれぞれが既存の観測に対してアドバンテージがある
- 様々な観測機能を組み合わせることでさらに面白い研究ができる

BFI: ブロードバンドフィルターイメージャー、NFI: ナローバンドフィルターイメージャー

	フィルターグラフ		スペクトロ ポーラリメータ(SP)
	BFI	NFI	
ピクセルスケール[秒角]	0.054	0.08	0.16
最大視野[秒角](東西 × 南北)	218 × 109	328 × 164	328 (スキャン) × 164 (スリット)
波長分解能 [Å]	3~10	~0.1	0.03
波長点数	1	1~4	112
時間分解能 (典型)	1~6s	10~30s	~1hr
測光精度 [%]	0.5	0.1 ~ 0.5	~ 0.1

付録 :可視光望遠鏡担当者

常田佐久¹、末松芳法¹、一本潔¹、清水敏文²、
勝川行雄¹、永田伸一³、久保雅仁²

1:国立天文台

2:宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部

3:京都大学

付録 :可視光望遠鏡参考文献

・SOLAR-B中間報告書 可視光望遠鏡(SOT)編

・第6回SOLAR-Bサイエンス会議収録

Shimizu, T., 2004, ASP Conf. Ser. 325,

‘ The Solar-B Mission and the Forefront of Solar Physics’, 325, 3

・国立天文台SOLAR-B推進室ホームページ

<http://solar.nro.nao.ac.jp/solar-b/index.html>

付録 発表に使用した地上観測データ

•CH I G-band, Ca II H

Dutch Open Telescope < <http://dot.astro.uu.nl/> >

•視線方向マグネットグラム、ドップラーグラム、連続光強度

Swedish Solar Telescope < <http://www.solarphysics.kva.se/> >

•H

Vacuum Tower Telescope

< http://www.kis.uni-freiburg.de/kisobservatorien_e.html >

•磁場3成分空間マップ

Advanced Stokes Polarimeter < <http://www.nso.edu/nsosp/dst/userman/instruments/advanced-stokes-polarimeter/asp.html> >

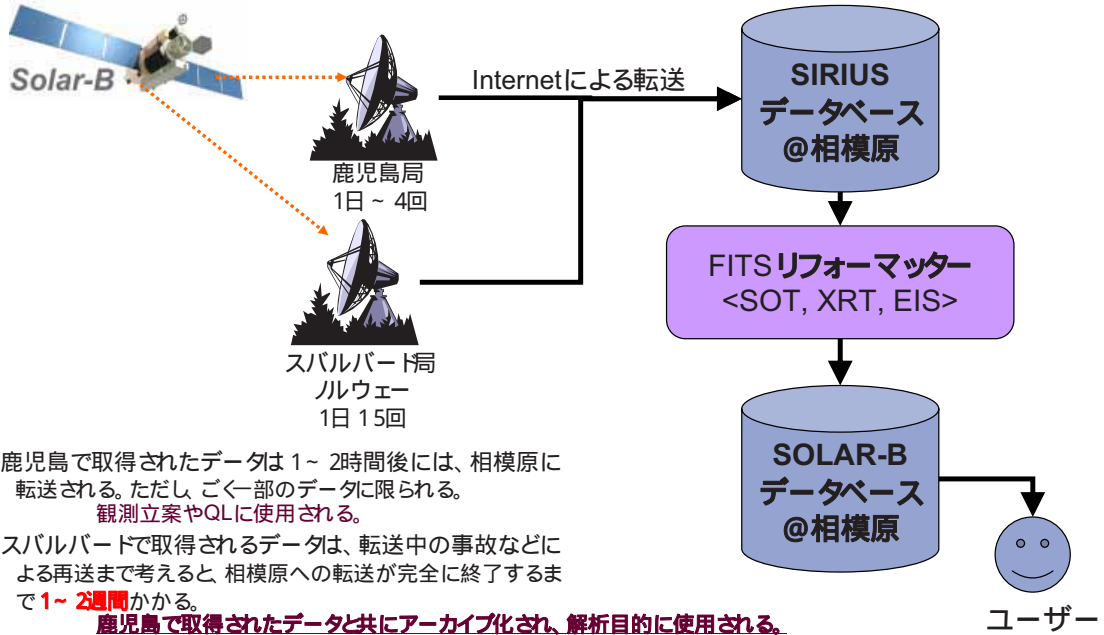
SOLAR-Bデータフォーマット データ取得・解析の流れ

下条圭美
SOLAR-Bサイエンスセンター
SOLAR-B推進室
shimojo@nro.nao.ac.jp

Topics

- SOLAR-B衛星からデータ取得までの流れ
- SOLAR-Bの観測データ種類
- FITSフォーマットとは？
- SOLAR-B観測データの取得方法
- SOLAR-Bデータ解析環境および解析の流れ
- SOLAR-Bサイエンスセンターの紹介

SOLAR-B衛星からデータ取得まで



- 鹿児島で取得されたデータは1~2時間後には、相模原に転送される。ただし、ごく一部のデータに限られる。
観測立案やQLに使用される。
- スバルバードで取得されるデータは、転送中の事故などによる再送まで考えると、相模原への転送が完全に終了するまで**1~2週間**かかる。
鹿児島で取得されたデータと共にアーカイブされ、解析目的に使用される。

SOLAR-B観測データの種類 : 1

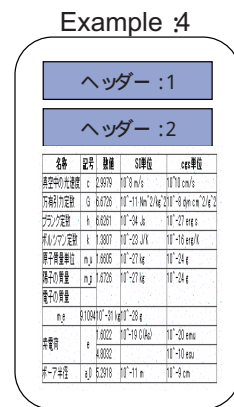
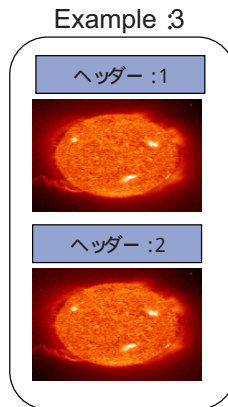
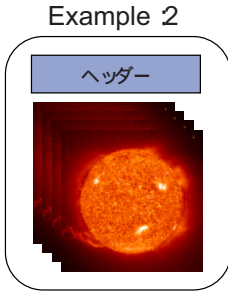
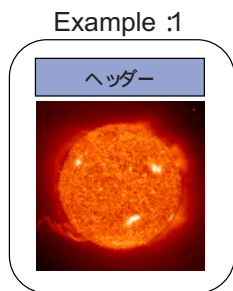
- 較正レベルによる区分け (観測機器共通)
 - Level-0データ (配布される)
 - 衛星から出てきたデータそのものを、データフォーマットをFITSに変えたデータ。カウント・位置情報とも較正されていない。
 - 研究者に配布されるデータ。
 - Level-1データ (配布されない)
 - Level-0データを、その他の較正用データおよびプログラムで、較正したデータ。カウント・位置情報とも較正されている。
 - 研究者が、上記のデータ・プログラムを利用して作成するデータ。
 - 較正用データやプログラムは各観測機器チームから随時提供される。
 - Level-2データ (一部が配布される)
 - Level-1データを解析し、カウント等から物理量 (磁束密度・温度等) に変換したデータ。
 - 一部の観測機器に関しては、観測機器チームから提供される。
 - SOT-SPによるベクトル磁場マップ (国立天文台 HAO)
 - EISによる紫外線輝線のドップラー速度、線幅等のマップ (MSSL)

SOLAR-B観測データの種類 :2

- 観測機器による区分け (1ファイルに入っているデータ量の違い)
 - SOT
 - SOT - FG
 - 1ファイルあたり1枚または、1セット(QUV, ドップラー赤 青側)
 - SOT-SP
 - 1ファイルあたり1露出 (1マップは約1000ファイルで構成されている。)
 - Level-2は 1ファイルあたり1マップ
 - XRT
 - 1ファイルあたり1枚の画像
 - EIS
 - 1ファイルあたり1スキャン
(複数の波長の画像が、1ファイルに入っている。)
- **すべてのデータは、FITSフォーマットを利用してファイル化されている。**

FITSフォーマットとは? :1

- 天文学界でのスタンダード
 - FITSの手引き第5版http://www.fukuoka-edu.ac.jp/~kanamitu/fits/fits_t50/
- 基本的に単純な構造 (ヘッダー + データ)
 - ヘッダー部はASCIIテキスト
 - データ部はn次元データ
 - データ部に拡張がいくつかある



FITSフォーマットとは？ :2

■ FITSヘッダー

- ヘッダーの名前と内容は、衛星全体と各機器チームにより規定されている。

```

1 SIMPLE *          / 1 / file desc conform to FITS standard
2 BITPIX *         -32 / number of bits per data pixel
3 NAXIS *           2 / number of data axes
4 NAXIS1 *          250 / length of data axis 1
5 NAXIS2 *          1024 / length of data axis 2
6 TELESCOP *       "SOLAR-B SOT"
7 INSTRUME *       "SP Spectro-polarimeter"
8 OBS_ID *         "2005-09-01T05:20:45.000"
9 DATE_OBS *       "2005-09-01T05:20:45.000"
10 FILEORIG *       "File: 200509014_002133.sci"
11 ORIGIN *         "NAOJ" / File creation place
12 OBJ_LEV *        2 / DATA Level
13 DATE_FIT *       "2005-09-21" / the date of Level-1 reform
14 DATE *           "2005-09-29T19:58:14" / file creation date (YYYY-MM-DDThh:mm:ss UT)
15 DATE_REF *       "2005-09-01T19:58:14" / the date of Level-2 reform
16 VER_NUM *       "SP FITSIO TEST 2005/06/23" / the software of Level-2 reform
17 NAME *           "K902A"
18 CRVAL1 *         0
19 CRVAL2 *         0
20 CRVAL3 *         0
21 CRPIX1 *         0.00000 /
22 CRPIX2 *         0.00000 /
23 CRPIX3 *         0.00000 /
24 CUNIT1 *         "arcsec"
25 CUNIT2 *         "arcsec"
26 CUNIT3 *         "Solar-R"
27 CTYPE1 *         "Solar-R"
28 CTYPE2 *         "Solar-R"
29 CTYPE3 *         "Solar-R"
30 WLEN *           0
31 WFTN *           0
32 XSCALE *         0.00000 /
33 YSCALE *         0.00000 /
34 FWHM *           0.00000 /
35 FWHM *           163.820 /
36 SPOCC01 *       1023 /
37 SPOCC01 *       112 /
38 SPOCC01 *       223 /
39 MJDREFD *        0
40 MJDREFD *        4830
41 PCY_201 *        436
  
```

2005/2/22

SBデータフォーマットデータ取得 解析

7

SOLAR-BのFITSファイル :1 XRT/SOTのFITSファイル

■ SOT/XRTはスタンダードFITS

XRT FITSファイル

ヘッダー

1ファイルに1枚の画像のみ。
もっともシンプルなFITSファイル

SOT-FG FITSファイル*

ヘッダー

波長が微妙に違ったり 偏光成分が異なるような画像が複数枚収納されている。

SOT-SP FITSファイル

ヘッダー

スキャン中の1露出分が、1つのファイルに、収納されている。SOT-SPは1露出で異なる偏光成分が取得できるので、複数枚の画像が格納される。

- XRT/SOTファイルは、フリーで手に入る
FITSビューワで閲覧可能。

* SOT-SPのLevel-2はSOT-FGと同フォーマット。

2005/2/22

SBデータフォーマットデータ取得 解析

8

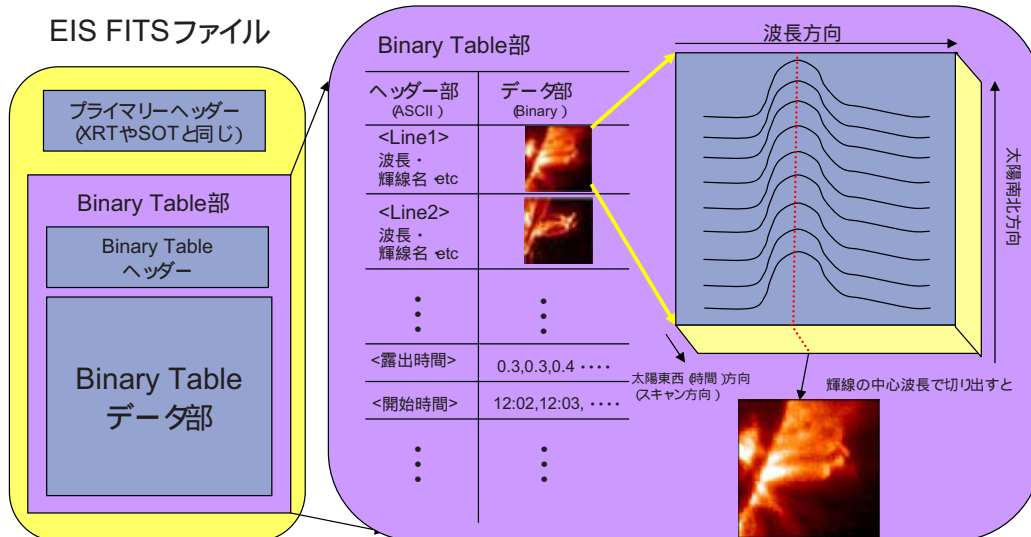
SOLAR-BのFITSファイル :2

EISのFITSファイル



EISはBinary Table Extensionを使用

3次元のデータキューブ



SOLAR-Bデータ取得方法




- JAXA/ISAS-NAOJの共同開発で、Webベースのデータ検索・取得システムを開発中。
 - SOLAR-B搭載 3機器のデータが1つのインターフェースから検索・取得が可能。
 - 較正前のLevel-0データその他、ムービーや磁場マップなどのLevel-2データも検索・取得可能。
 - グラフィカルに観測特長を表示することにより、検索が直感的に行える。
 - 観測領域や観測シーケンスを画像で表示。
 - JAXA/ISASのDARTSシステム下に実装予定。

2005/2/22

SBデータフォーマットデータ取得 解析

10

DARTS/SOLAR-B :スタート画面



SOLAR-B Data Center


SOT-FG SOT-SP XRT EIS SOT-SP 3D-Mag EIS Level-2

 The search system for all users
 The search system for the SOLAR-B experts
 The search system for all users (Movie)

2005/2/2

11

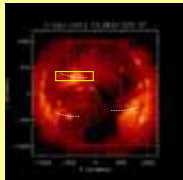
DARTS/SOLAR-B 検索画面<BASIC>

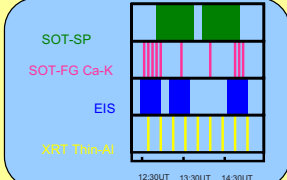


SOLAR-B Data Center

Target Position
 X(arcsec) [-590]
 Y(arcsec) [+300]
 X RANGE [740]
 Y RANGE [180]

Observation Time
 Start [2007/05/02 12 : 23 : 00](UT)
 End [2007/05/02 14 : 30 : 00](UT)





SOT-FG

Binning	<input type="checkbox"/> 1x1	<input type="checkbox"/> 2x2	<input type="checkbox"/> 4x4	...	ITEM 200 SIZE 120MB
	<input type="checkbox"/> H	<input type="checkbox"/> CaK	<input type="checkbox"/> G-Ban		
Wavelength	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	...	<input type="button" value="SHOW LIST"/>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	...	<input type="button" value="GET DATA"/>


XRT

Binning	<input type="checkbox"/> 1x1	<input type="checkbox"/> 2x2	<input type="checkbox"/> 4x4	...	ITEM 200 SIZE 120MB
	<input type="checkbox"/> H	<input type="checkbox"/> CaK	<input type="checkbox"/> G-Ban		
Wavelength	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	...	<input type="button" value="SHOW LIST"/>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	...	<input type="button" value="GET DATA"/>

...

DARTS/SOLAR-B 検索結果画面

Click "Date" in the list.




SOLAR-B Data Center

Start Time [2007/05/02 12 : 23 : 00](UT)
End Time [2007/05/02 14 : 30 : 00](UT)
Target Position X(arcsec) [+130] Y(arcsec) [-120]
Instruments : SOT-FG, XRT, EIS

SOT - FG

Get	Date	Pos(X)	Pos(Y)	wave
<input type="checkbox"/>	2005/05/02 12:25:20	128	-100	H
<input type="checkbox"/>	2005/05/02 12:26:16	128	-100	H
<input type="checkbox"/>	2005/05/02 12:27:19	128	-100	H
<input type="checkbox"/>	2005/05/02 12:28:22	128	-100	H

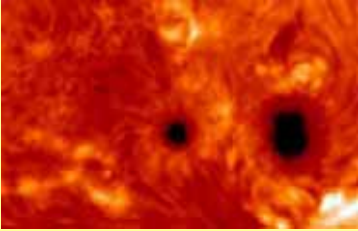


SOLAR-B Data Center

Start Time [2007/05/02 12 : 23 : 00](UT)
End Time [2007/05/02 14 : 30 : 00](UT)
Target Position X(arcsec) [+130] Y(arcsec) [-120]
Instruments : SOT-FG, XRT, EIS

SOT - FG

Date	Pos(X)	Pos(Y)	Wave
2005/05/02 12:25:20	128	-100	H



本格的なSOLAR-Bデータ解析 : 1 データの質による違い

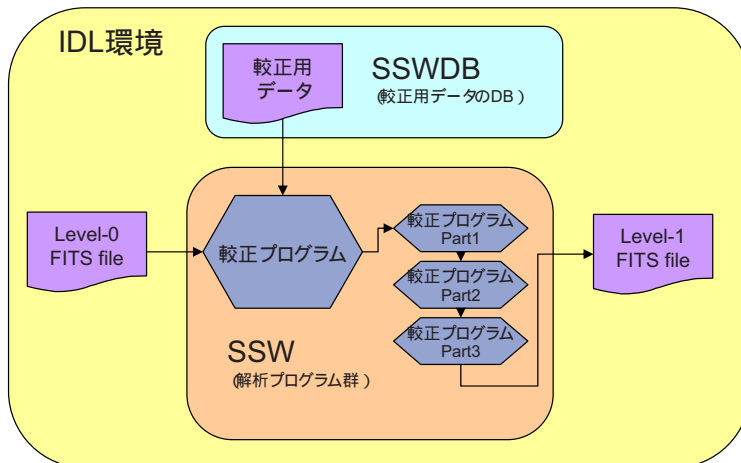


- Level-0のデータは、較正されていないので、カウントの強度分布や時間発展やカウントを基にした温度診断などはできない。
 - 形状の研究(morphology)ならばLevel-0だけでも研究は可。
- Level-2のデータは、較正され物理量になっているので、このデータを基に研究をスタートすることもできる。
- 本格的解析には画像解析ソフトRSI社製IDLとIDL上での太陽データ解析パッケージSSW(SolarSoftWare)が必須
 - IDL : <http://www.rsi.com> (US)
<http://www.jicoux.com/idl.html> (日本)
 - SSW : <http://www.lmsal.com/solarsoft/>

本格的なSOLAR-Bデータ解析 : 2 データ校正の仕組み



- IDL・SSWを使って、各観測機器PIが校正ソフトウェアを開発し、SSWに登録する予定。



- SSW, SSWDBともFTP等で公開される。
- ユーザは、IDL, SSW, SSWDBをセットアップすれば、データの校正や解析が行える。
- 各観測機器毎に校正プログラムが作成され、中身はわからなくとも、自動的に必要な校正用データを取得し、校正してくれる。

2005/2/22

SBデータフォーマットデータ取得 解析

15

SOLAR-Bサイエンスセンターの紹介



- 天文台・三鷹に設置されたサイエンスセンター
 - データセンターではなく、データ解析など**サイエンスに特化した拠点**。
 - **観測データ解析環境の提供**
 - 3次元磁場マップをパイプライン的に作成し、提供
 - ムービー・DVDの作成・配布
 - 大規模なデータ解析に対応する、CPUパワーの提供
 - 研究会・講習会・解析ワークショップ等の開催
 - JAXA/ISASと密接に協力し、**相互のデータをシームレスに共有する**。

2005/2/22

SBデータフォーマットデータ取得 解析

16

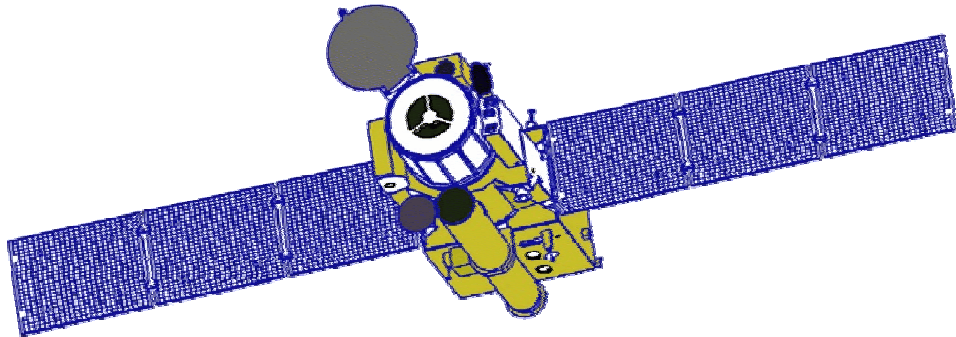
SOLAR-Bサイエンスセンター： 共同利用設備



- 共同利用解析室
 - 1度に10名以上の研究者が解析できる環境を提供
 - TV会議システムを利用し、JAXA/ISASで行われる衛星運用の支援や他機関との共同研究をスムーズに
- 計算機資源
 - ユーザー端末 (10台以上)
 - IDL解析サーバ (外部からネットワーク越しに利用可)
 - PCクラスター (夜は3次元磁場マップ作成・昼は共同利用)
 - DVD・MPEG2ムービー作成システム

上記の設備は、すべて共同利用設備です。
来台またはネットワーク越しで、ご利用ください。

SOLAR-B運用イメージ



清水 敏文

(JAXA宇宙科学研究本部)

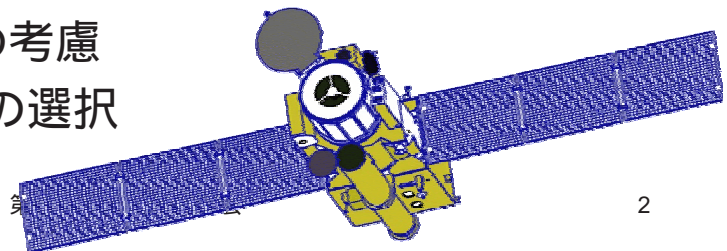
shimizu@solar.isas.jaxa.jp

第1回SOLAR-B講習会

1

Solar-B科学運用

- 3つの望遠鏡の観測制御は全 \angle 独立
 - 望遠鏡ごと単独の観測をしても構わない
- だが、限られたミッション期間に、サイエンス成果を最大限にするような観測をしたい
 - 3つの望遠鏡の協調した観測計画
- 科学運用を考える上で重要な2点
 - 取得データ量の考慮
 - 観測ターゲットの選択



2

取得データ量の考慮

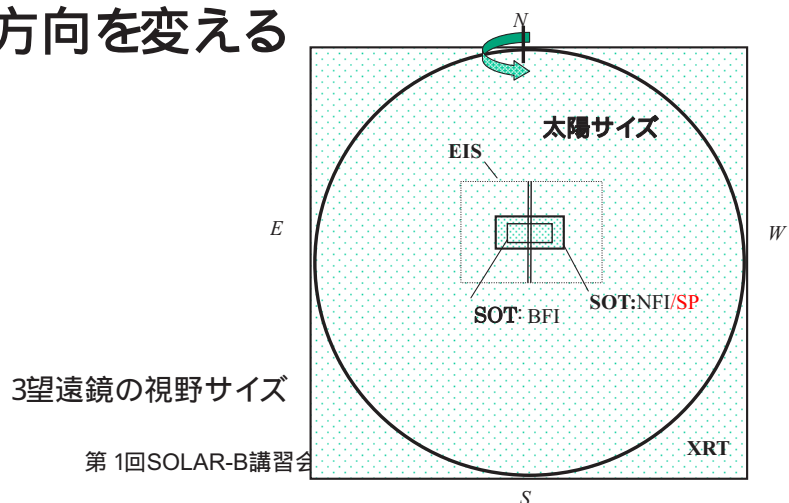
- 一日あたり取得できるデータ量
 - ダウンリンク局の頻度に依存 平均的には、
 - ・ USC (内之浦) 朝夕最大各2パス
 - ・ Svalvard (ESA) 毎週回、一日15パス
 - 科学データ量 約4.4Gバイト日
- 搭載データレコーダ
 - 容量1Gバイト、うち科学データに7/8使用
 - 3つの望遠鏡がシェアして使用
 - 観測内容に応じて使用配分調整

第1回SOLAR-B講習会

3

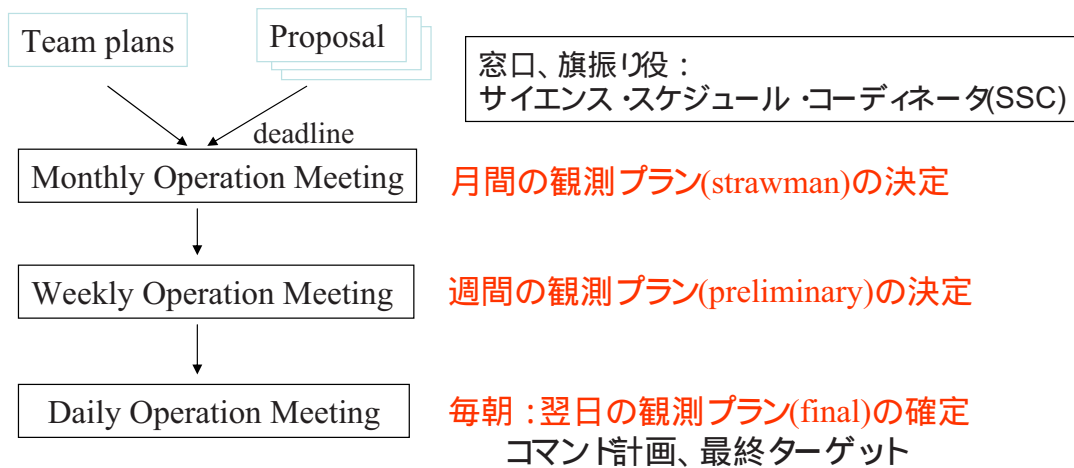
観測ターゲットの選択

- 視野の狭い望遠鏡 ~ 視野の広い望遠鏡
- 観測内容に従って太陽面上ターゲットを選択
- 衛星の指向方向を変える



科学運用の調整

■ 一連の運用会議で科学運用計画を調整



第 1回SOLAR-B講習会

5

科学運用の実施

- 科学運用チームが運用の立案 指示
- 追跡地上局(鹿児島内之浦USC)
での運用実施は
運用支援チーム
(メーカ運用専門員)
- 科学運用チーム運用
作業は相模原(SSOC)
(予定)



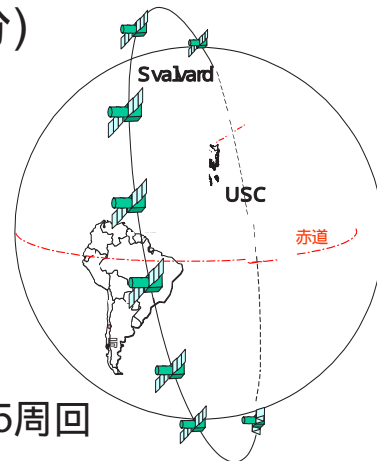
USCの運用支援チーム

第 1回SOLAR-B講習会

6

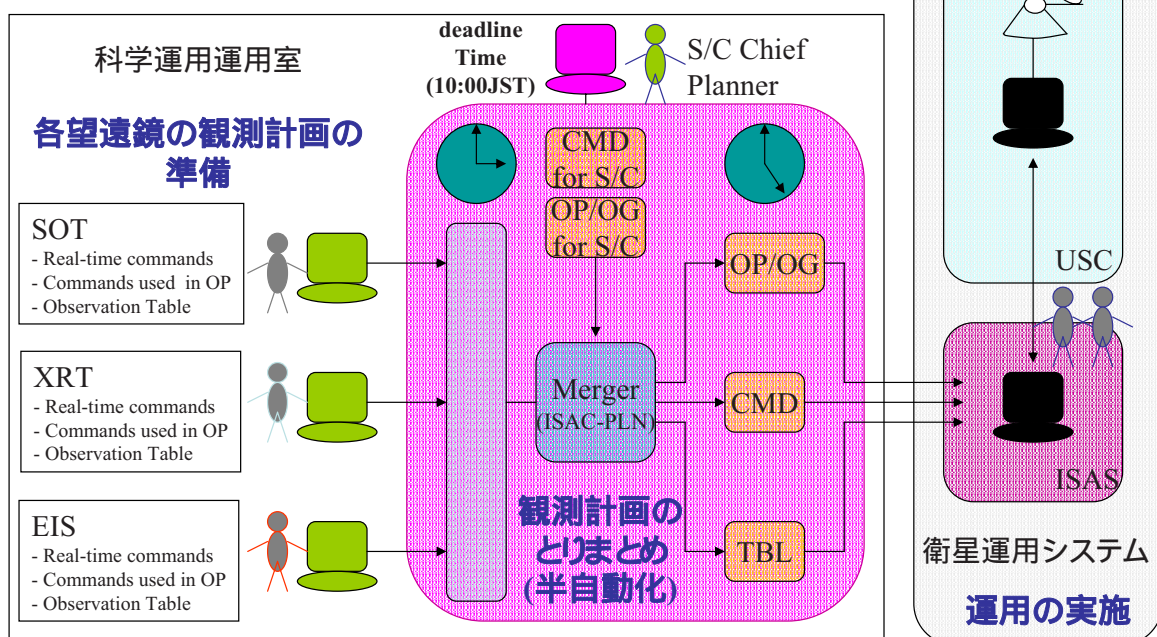
科学運用の実施

- 鹿児島内之浦USCを衛星が通る時に観測のためのコマンドを衛星にセット
 - 朝夕に各 2パス(1パス~10分)
- 非可視中の観測は衛星にセットしたコマンド観測テーブルで自動観測



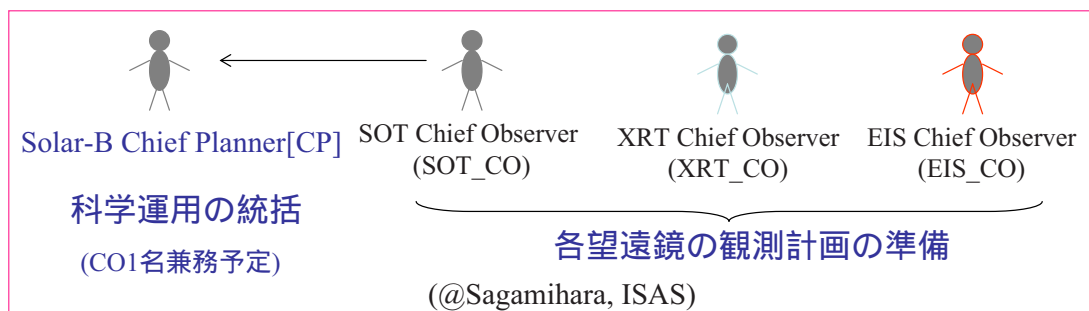
太陽同期極軌道 約95分周期一日15周回

日々の運用の流れ

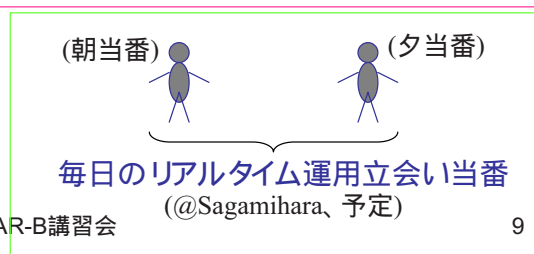


科学運用チームの人的体制

- 運用立案・実施のためには毎日4~5人程度研究者・院生がたずさわる必要がある



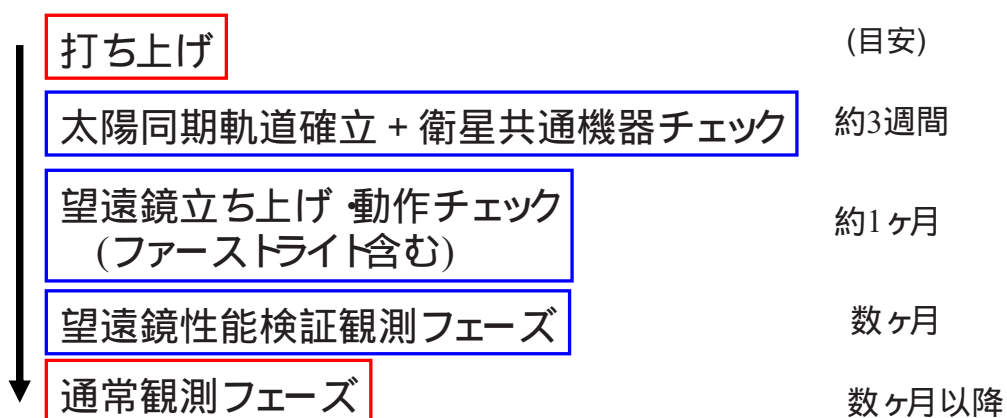
- 週単位で交代
- 日本・海外(米英等)の公平参加
- 研究者・院生が可能な限り公平に負荷を少なく
- 一部に専門員の登用 (予定)



第1回SOLAR-B講習会

運用フェーズ

- 打ち上げ以降の大まかな運用予定に関して



第1回SOLAR-B講習会

10

科学運用への参加協力をお願い

- 科学運用への参加協力を是非お願いします
(強制ではありません)
- 以下のメリットが考えられます
 - 自分が解析したい観測データを自ら寄与して取得する喜び
 - 最新の観測データにすぐに触れることで興味深い現象などを一番に発見できる
 - Solar-Bコアメンバとの協力関係が得やすくなり、データ装置・衛星の正しい理解に基づきデータ解析を効率よく進めることができる