

彩層磁場計測サブWG 報告

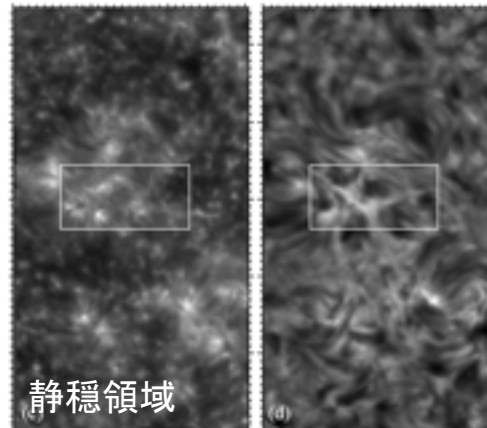
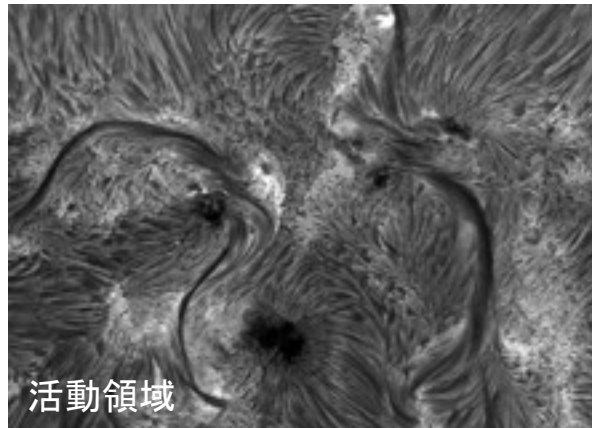
勝川行雄 (国立天文台), B. Lites (HAO)
末松芳法, 岡本丈典, D. Orozco Suarez (国立天文台),
一本潔, 永田伸一 (京都大学), R. Casini (HAO),
M. Carlsson (U. Oslo), J. Trujillo Bueno, H. Socas-Navarro (IAC),
H. Lin (U. Hawaii), H. Uitenbroek (NSO), T. Wiegmann (MPS)

サブWG 活動

- SOLAR-C・B案の主力装置は口径1.5mΦ大口径光学望遠鏡
 - 高解像度とともに高光子数を実現し、偏光分光性能を1桁向上させることを目指す。
 - これによって、従来の望遠鏡では困難であった太陽彩層磁場の診断を可能にし、彩層・コロナ磁気活動の総合的理解を狙う。
- 本サブワーキンググループは、以下の項目について国際的な太陽コミュニティー(彩層研究のエキスパートを含む)の中から提言を行う
 - 彩層磁場診断の実現によって見込まれる新たな科学領域
 - 彩層磁場診断手法の進展・成熟度
 - 科学的視点からのSOLAR-Cへの要求仕様
 - 地上望遠鏡や他宇宙ミッションとの関係性

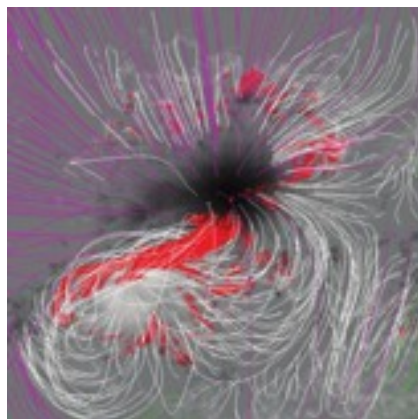
太陽大気中での磁場構造・その時間発展の探求

- 静穏領域・活動領域の磁場構造の直接測定。特に、静穏領域彩層の磁場診断は従来の観測では実現できていない。



H α 線で観測した太陽彩層の構造。SOLAR-Cでは、筋状構造に沿った磁場ベクトルの測定を可能にする。

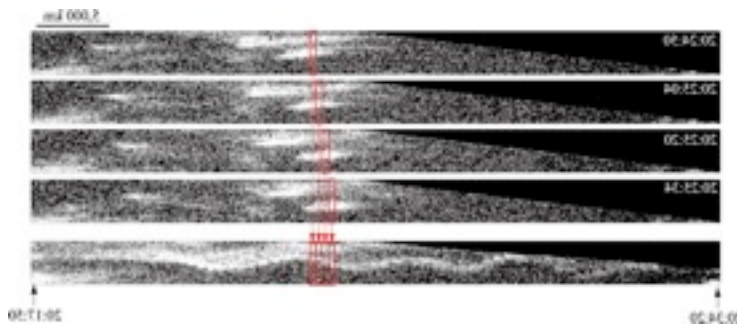
- プラズマ $\beta \leq 1$ の層での磁場診断は、ノースフリー近似によるコロナ磁場モデル化の理想的な境界条件を与える。



フォースフリー近似によりモデル化された活動領域コロナの磁場構造。フレア・CMEの発生機構を探る上で重要となる。
(Schrijver et al. 2008)

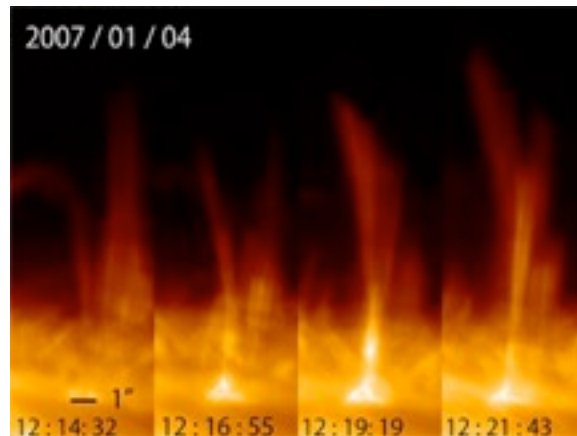
光球から彩層・コロナへのエネルギー・

- 光球から彩層への波動の伝搬・散逸過程の直接観測。波動や衝撃波のモードを定量的に明らかにする。



「ひので」がとらえたプロミネンス中の波。磁場測定によって波の性質が明らかになる。
(Okamoto et al. 2007)

- 磁気リコネクションにともなう磁場・速度・温度構造の変化を定量的にとらえる。彩層・コロナ加熱への寄与を定量的に明らかにする。

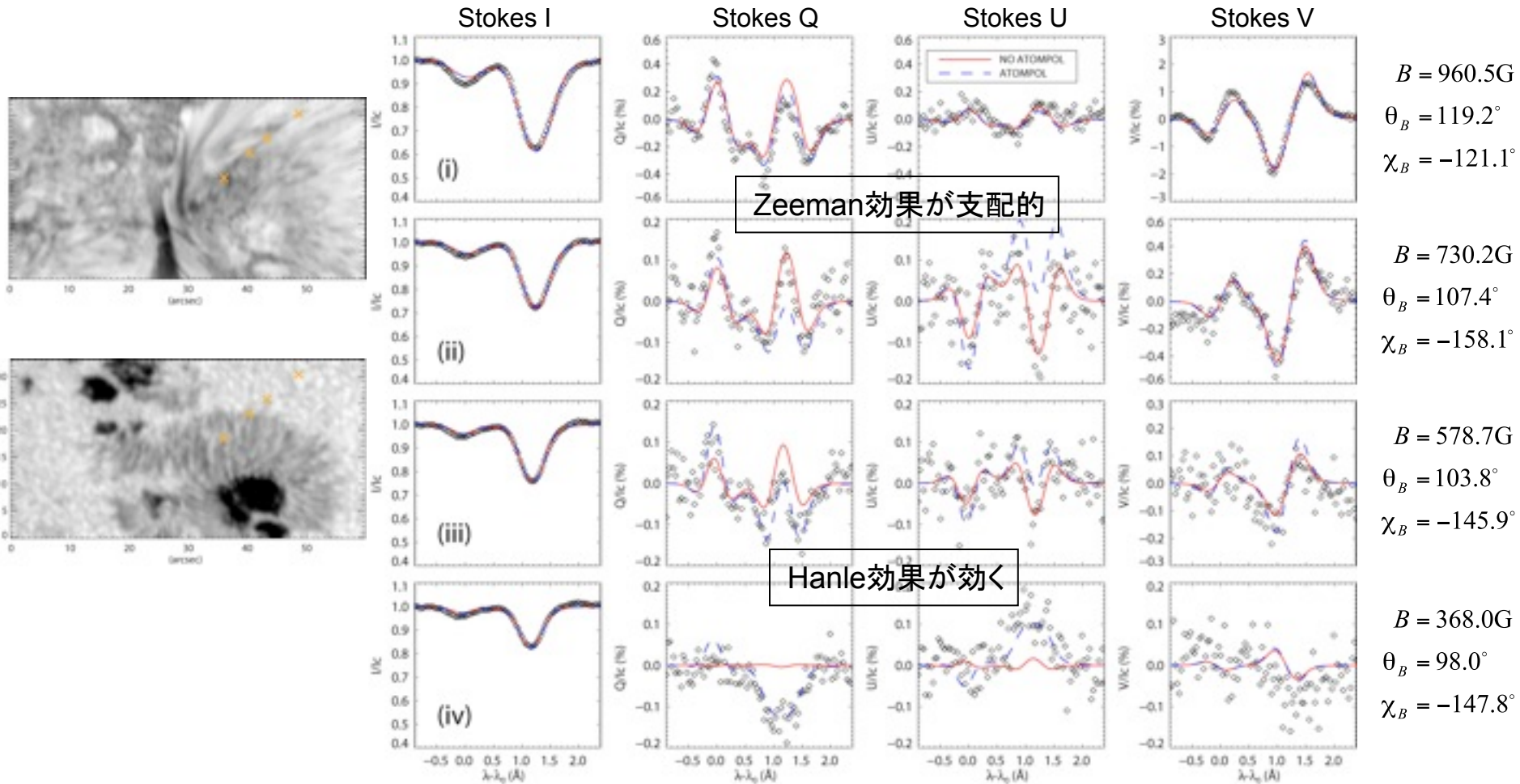


「ひので」がとらえた彩層ジェット。磁気リコネクションがプラズマの加速・加熱へどのように寄与しているかを明らかにする。
(Shibata et al. 2007)

彩層磁場診断実現の鍵は

1. ゼーマン効果に加え**ハンレ効果**を用いた診断
 - 横ゼーマン効果は数100ガウスより弱い磁場に対して感度が無い。ハンレ効果は100ガウスより弱い磁場に対しても測定可能な偏光信号を生じる。
- **S/N \sim 10⁴**に達する高い偏光測定感度
 - 彩層においてゼーマン効果とハンレ効果を作る偏光信号を測定するためには、高い偏光測定感度を実現しないといけない。S/N \sim 10⁴を実現することで、数10ガウスの磁場計測が可能になる。

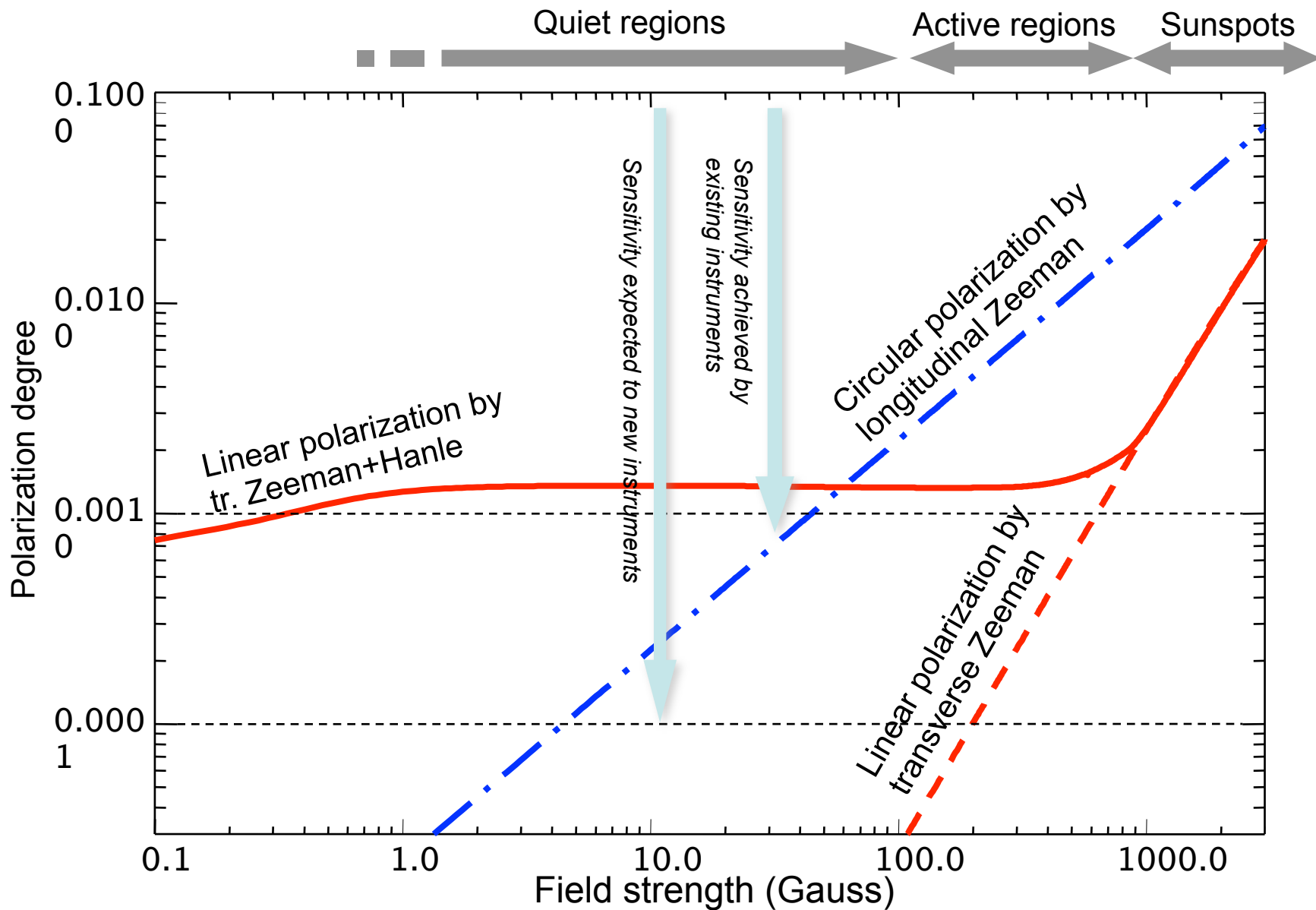
ハンレ効果



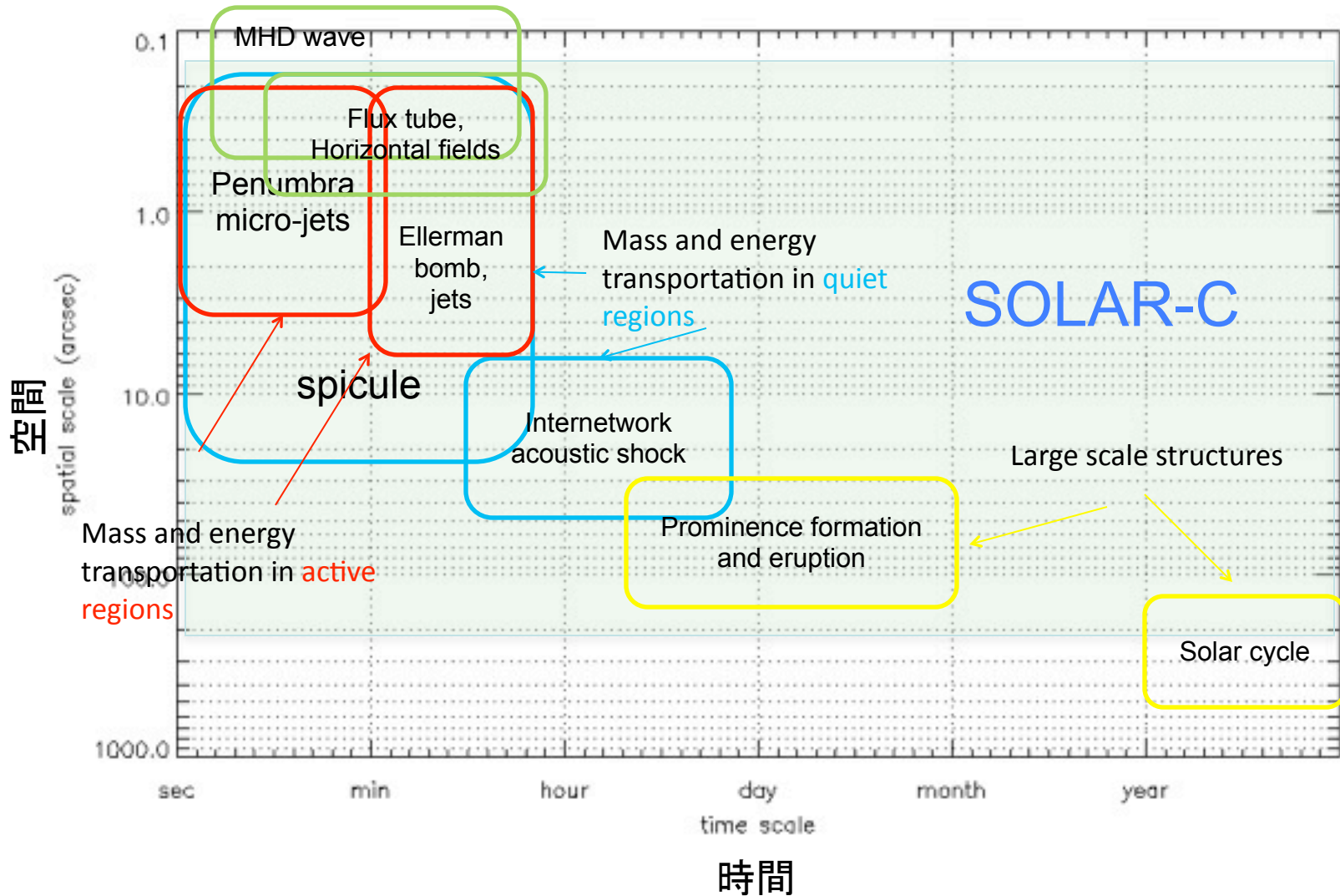
ハンレ効果: 散乱偏光が磁場の存在によって変調を受ける効果

磁場強度が数100ガウスよりも弱くなると、直線偏光はハンレ効果が支配的になる。偏光度は0.1%程度。

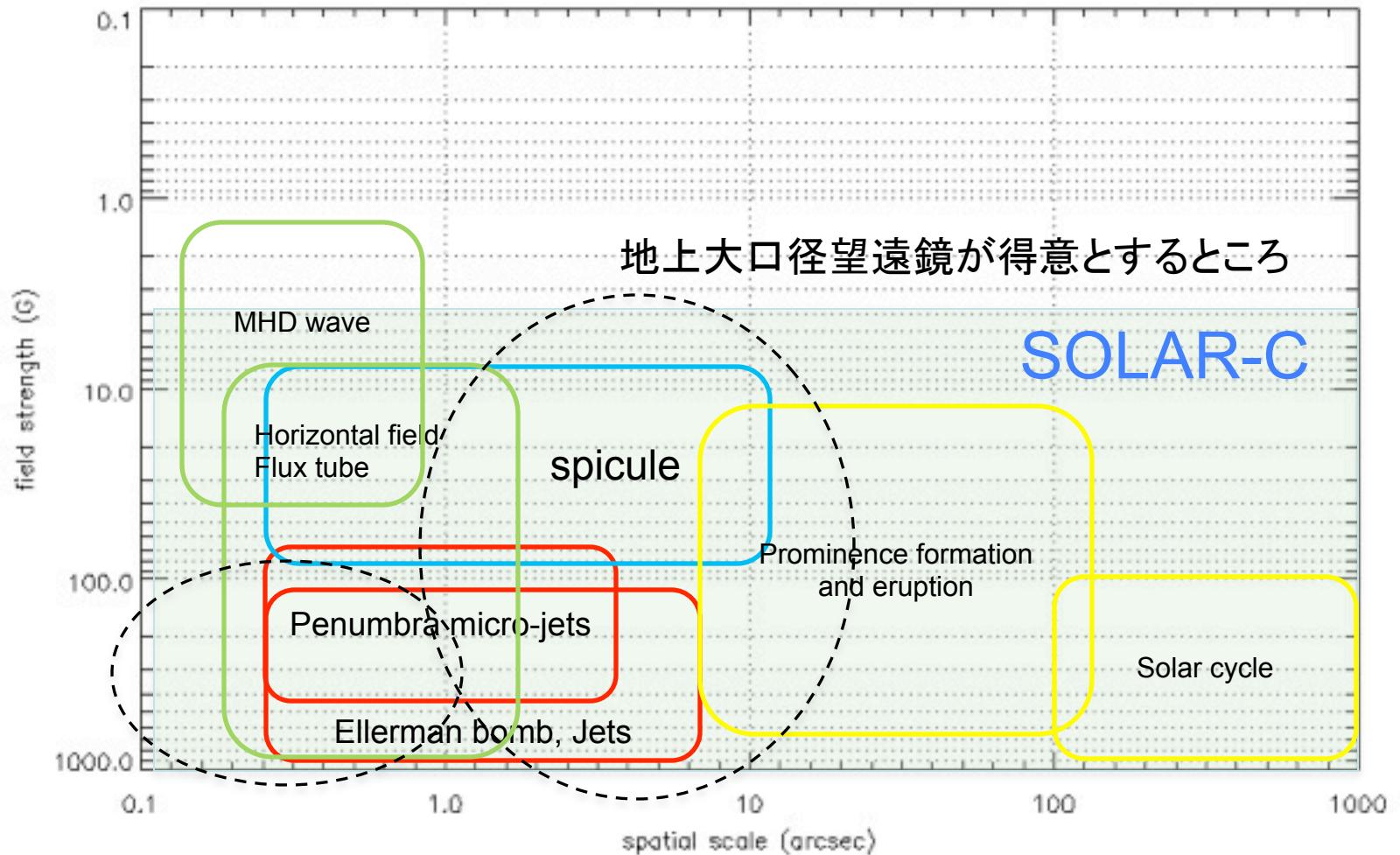
狙うべき偏光信号の大きさ (He II 0830Å)



SOLAR-C 彩層磁場診断が狙うターゲット

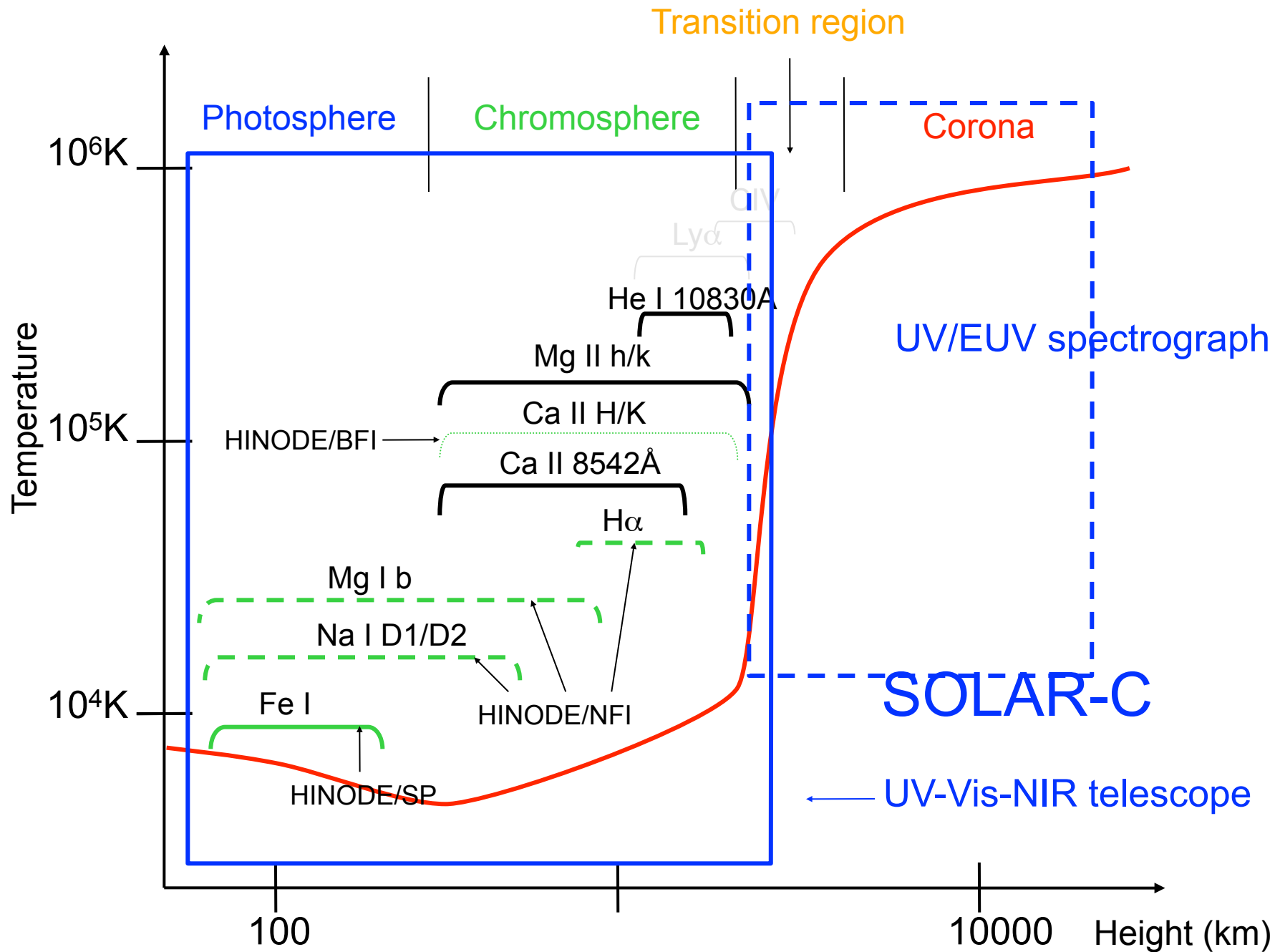


SOLAR-C彩層磁場診断が狙うターゲット

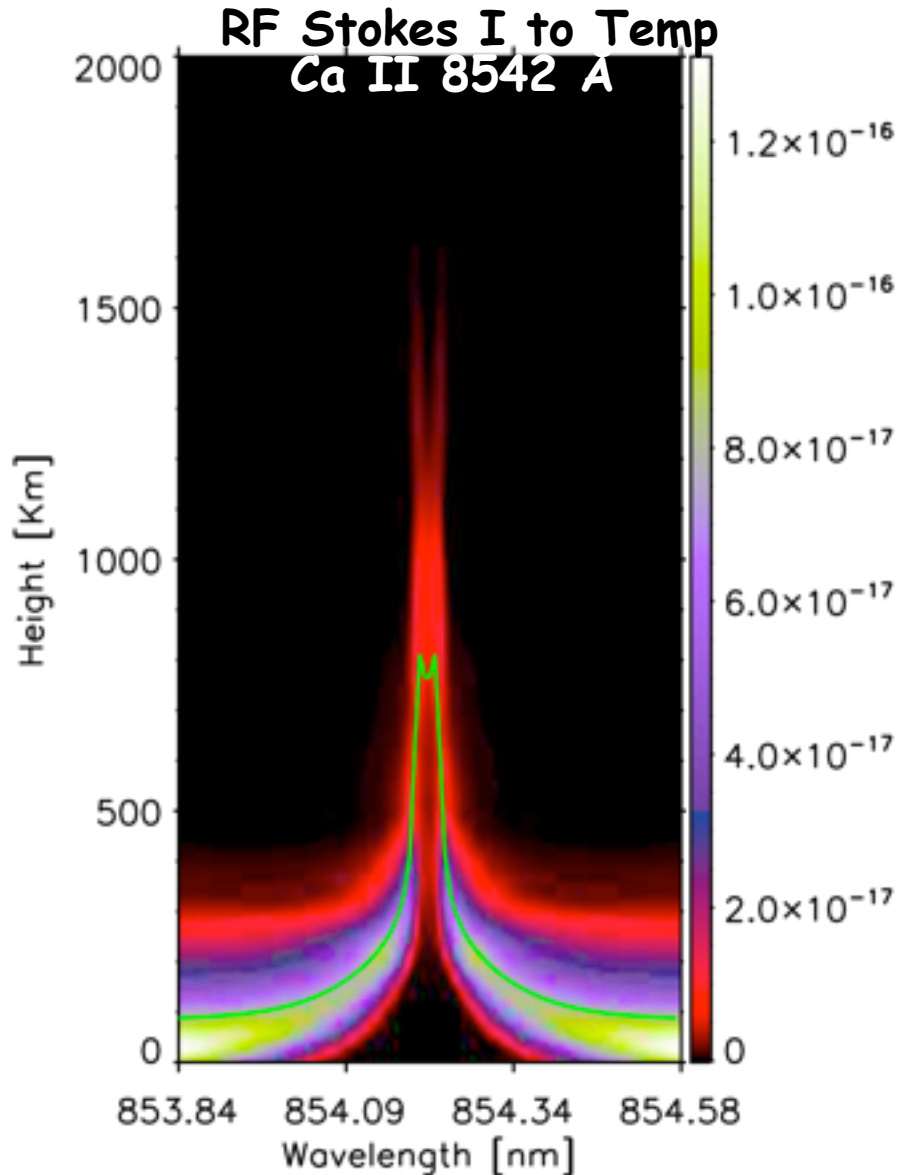


SOLAR-Cで観測すべき彩層ライン

- 以下の条件について検討し、観測すべきラインの優先度をつけた
 - (1) 彩層上部に十分な感度があること
 - (2) 速度・磁場診断に使えるラインであること
(感度があること + 解釈できること)
- **磁場診断用**
 - He I 10830Å
 - Ca II 8542Å
- **温度・速度診断用**
 1. Mg II k 2796Å
 2. Ca II 8542Å
 3. H α 6563Å

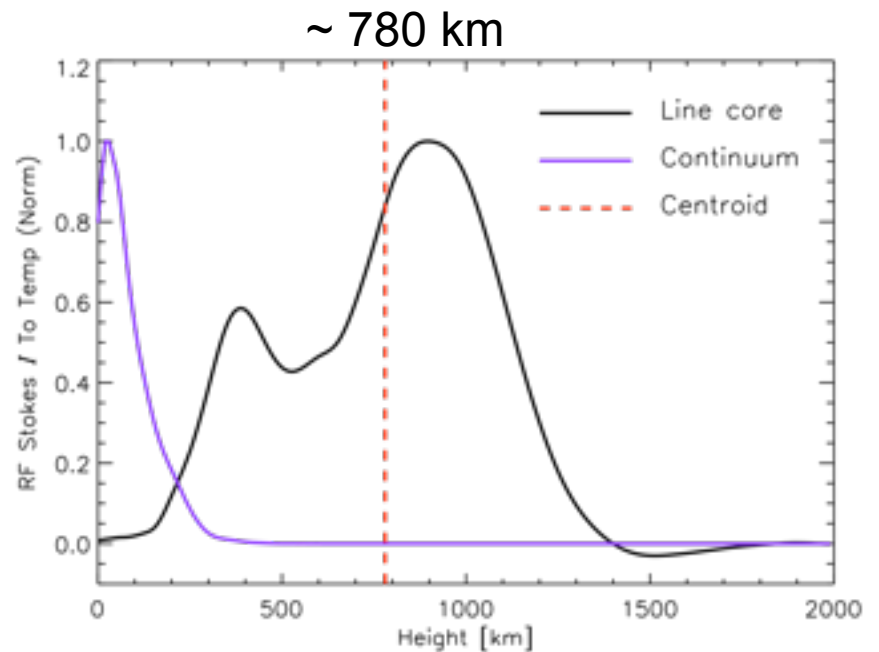


彩層ラインが形成される高さ



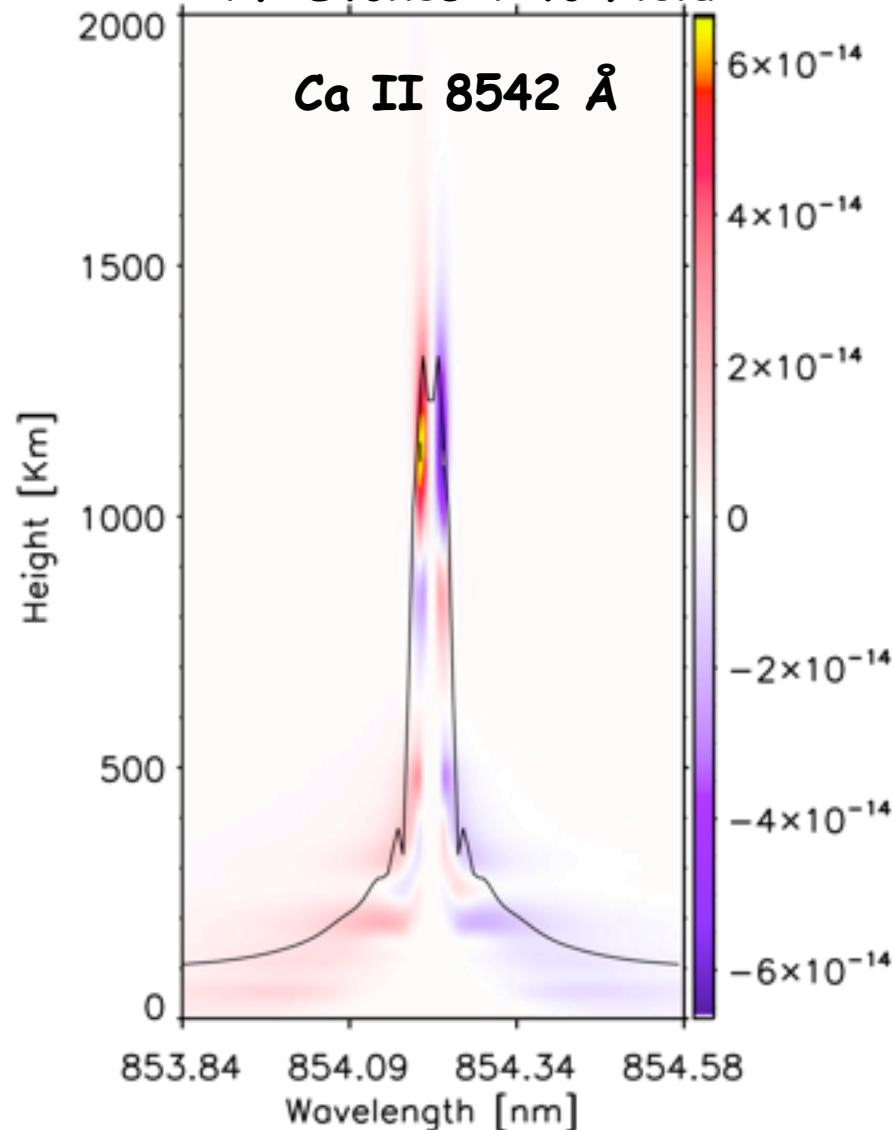
(by courtesy of H. Uitenbroek)

- Response Functions can be used to investigate the sensitivity of spectral lines to model parameters.
- RFs depend on the atmospheric height and wavelength (2D-functions).
- Centroid of RFs at different wavelengths provide information on the average sensitivity of spectral lines: “Formation Heights”

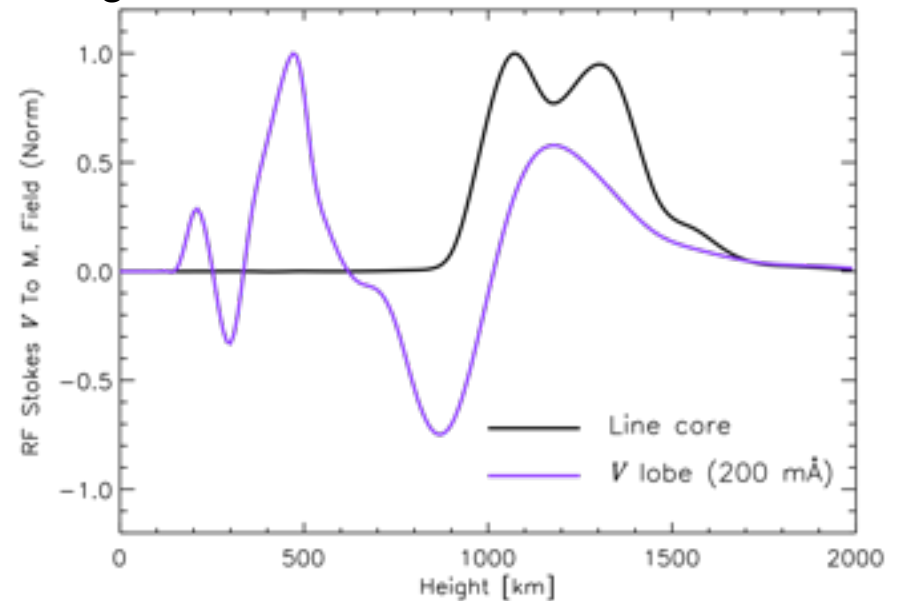


Response Function to Magnetic Fields

RF Stokes V to Field

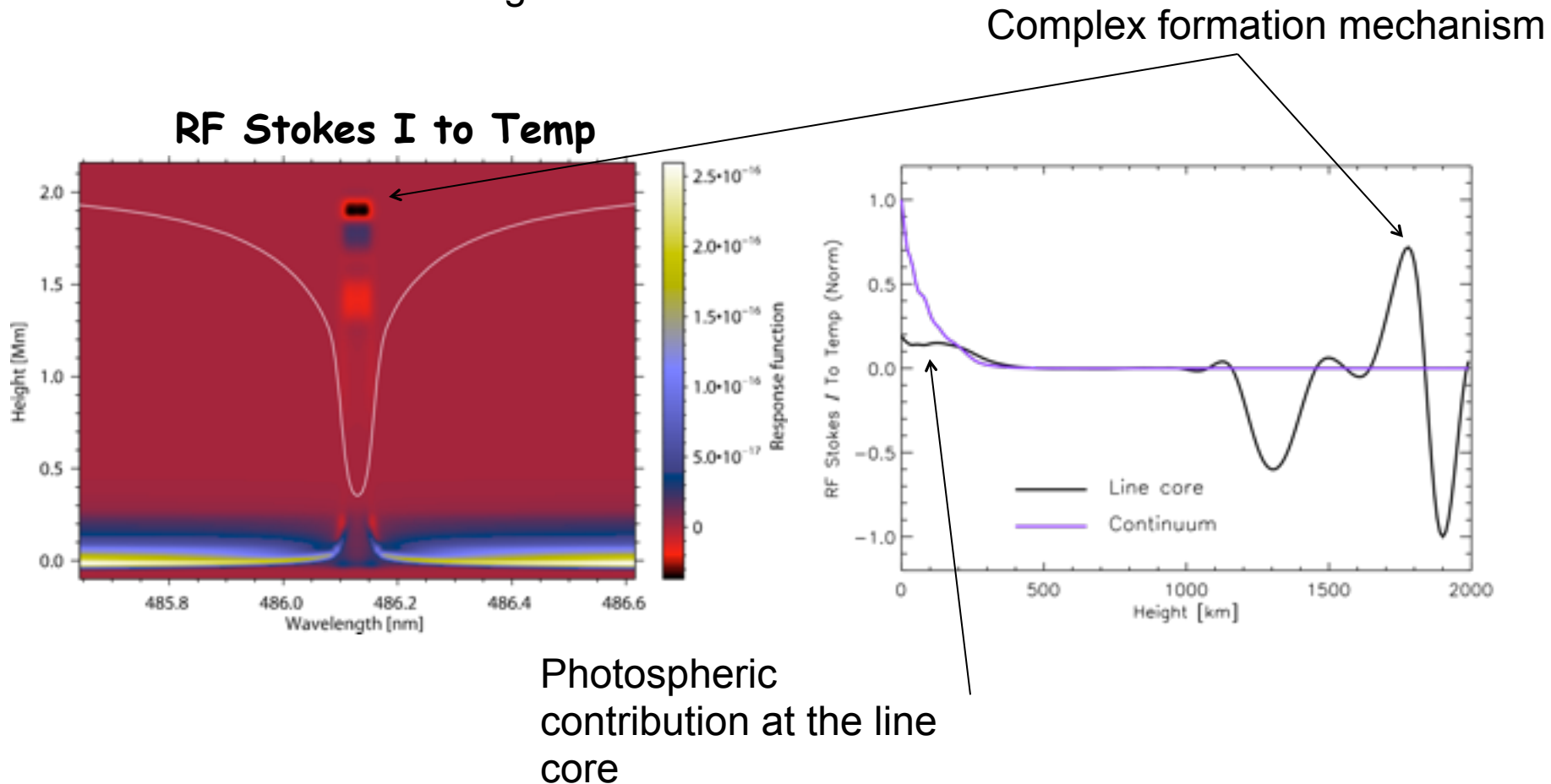


- There is a RF associated to each of the physical quantities describing the model atmosphere.
- In the case of the magnetic field strength, the RF is rather complex, so that it is difficult to talk about the sensitivity of the spectral line to the magnetic field.



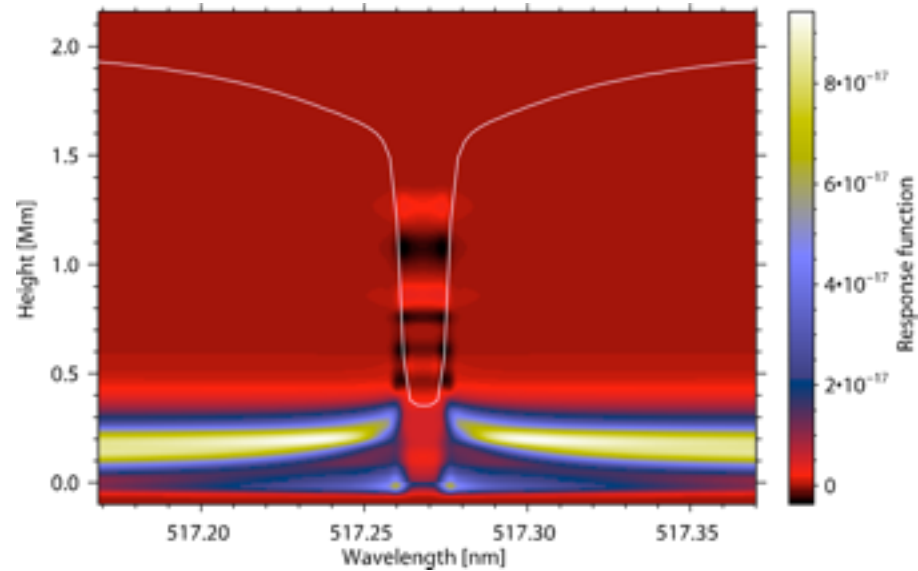
Complex formation: $H\alpha$ 6563 Å

- Determining a “formation height” in some spectral lines is rather difficult. Instead, one has to talk about “average” formation.

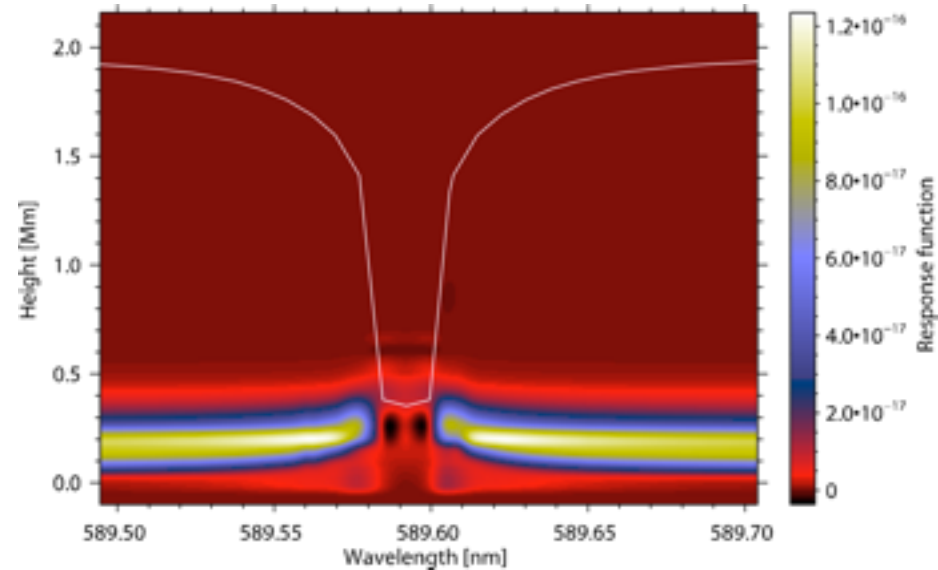


その他の彩層ライン

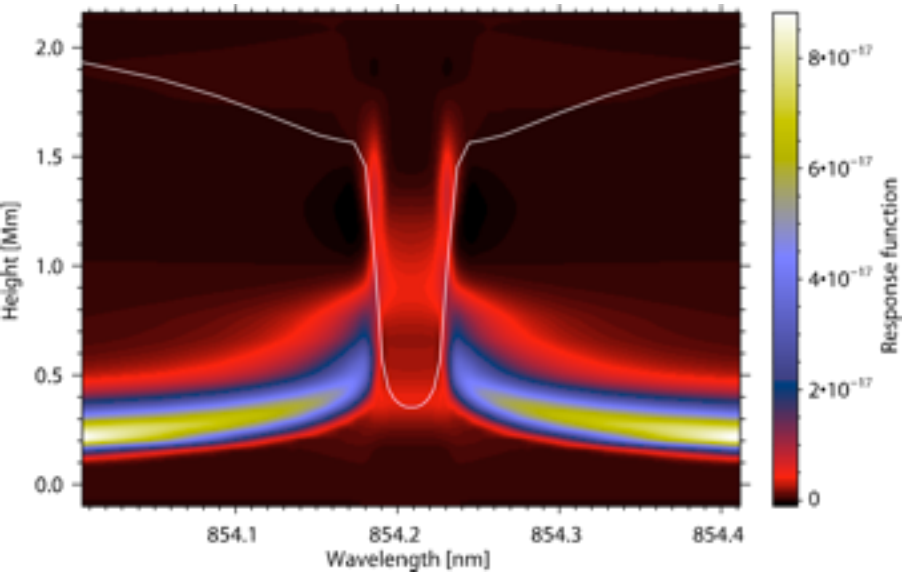
Mg I b2 5173



Na I D 5896



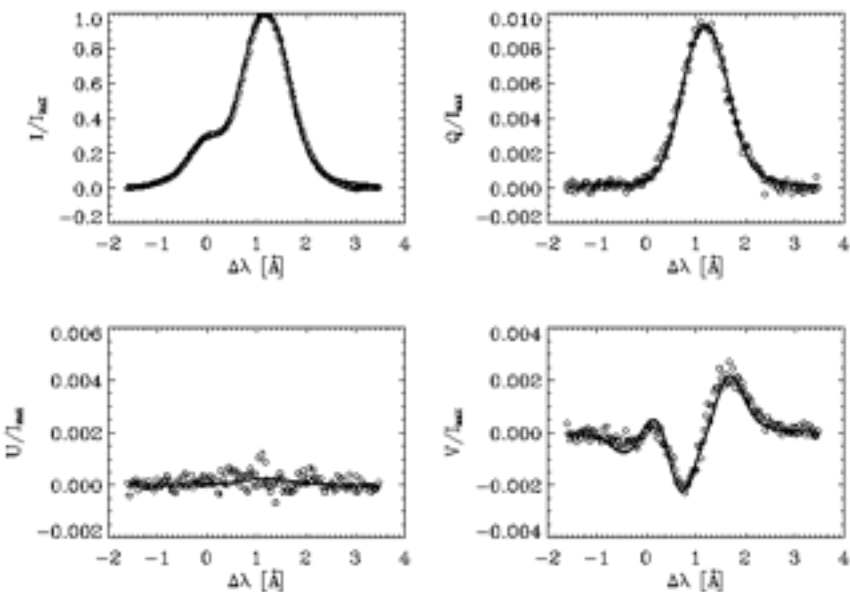
Ca II 8542



- Mg Ib, Na ID と比較して、Ca II 8542 (IRT)は彩層上部に感度があり、かつ、比較的シンプルなライン形成。
- 磁場に対する感度も高い。
- 速度・磁場診断に最適なライン

He I 10830Å

Stokes profiles in off-limb spicules



Population of He I triplet (FAL1993)

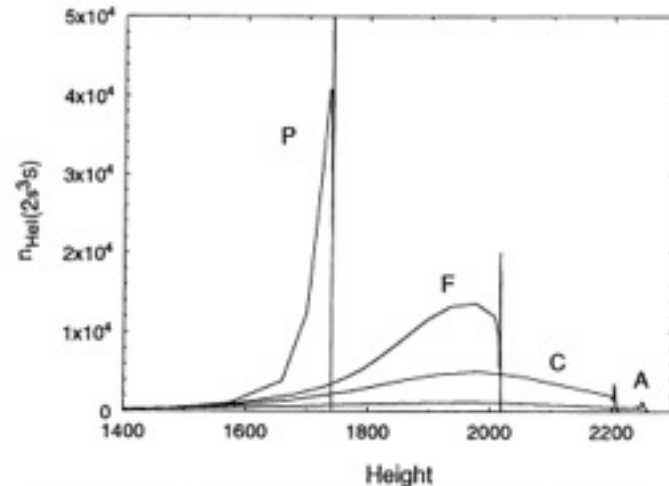


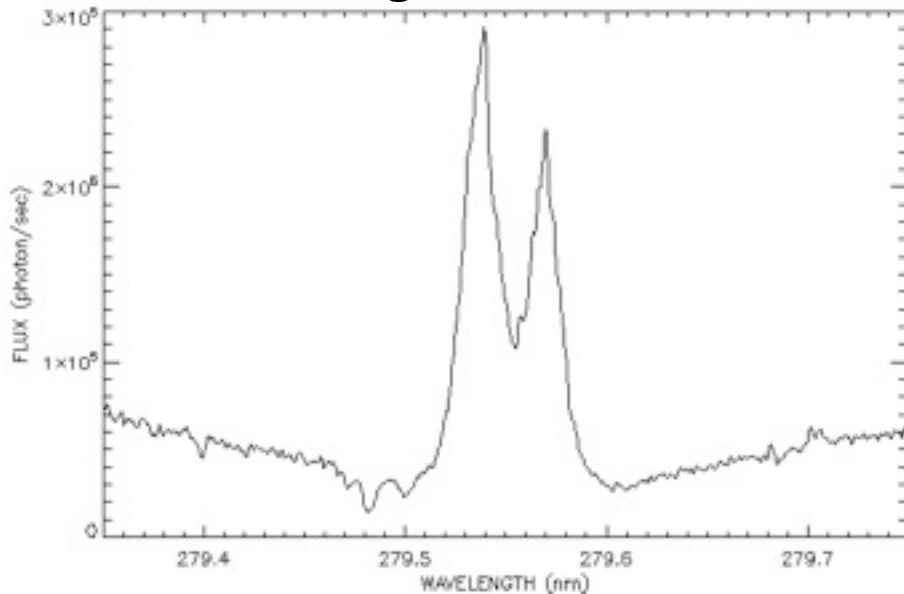
FIG. 28.—Number density (cm^{-3}) of the $2s^3S$ level of He I vs. height (km) calculated for models A, C, F, and P.

(by courtesy of R. Centeno and J. Trujillo Bueno)

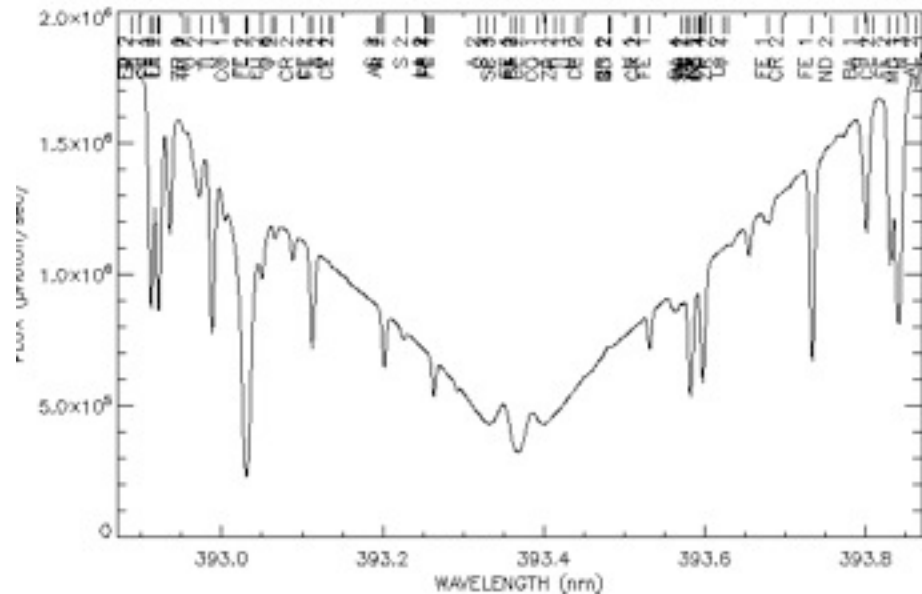
- 彩層上部の薄い層で形成するライン（コロナUV照射）。彩層下部の大気構造に依存せず、磁場・速度診断が容易。
- ゼーマン効果＋ハンレ効果で高い磁場感度。
- 近年、ハンレ効果のモデル化が大きく進展。磁場診断手法が確立されている (HAZEL etc.)

Mg II h/kによる彩層診断

Mg II k 2796 Å



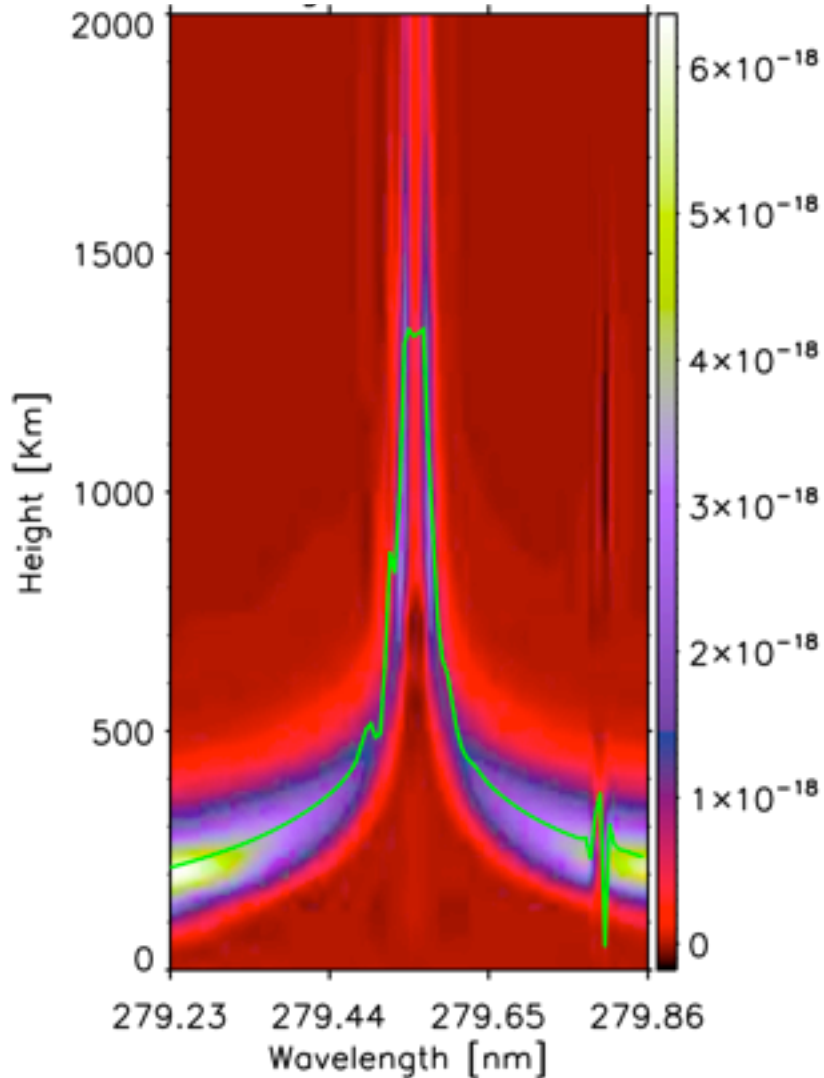
Ca II k 3933 Å



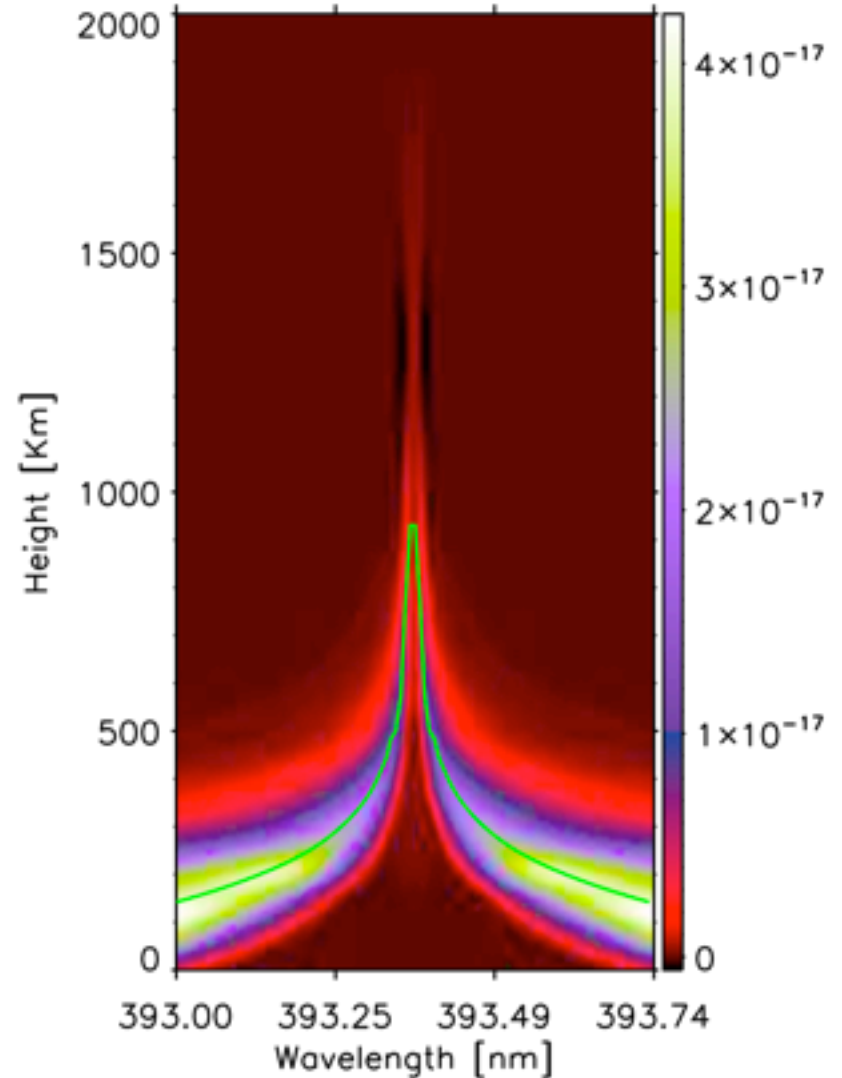
- Ca II よりOpacity大→ より彩層上部に感度がある。
- 連続光成分が暗い→ 光球の寄与が小さく、コントラストの高い彩層撮像観測ができる。
- 地上からは観測できない
- よって、SOLAR-Cで観測すべき重要なライン。

Mg II h/kによる彩層診断

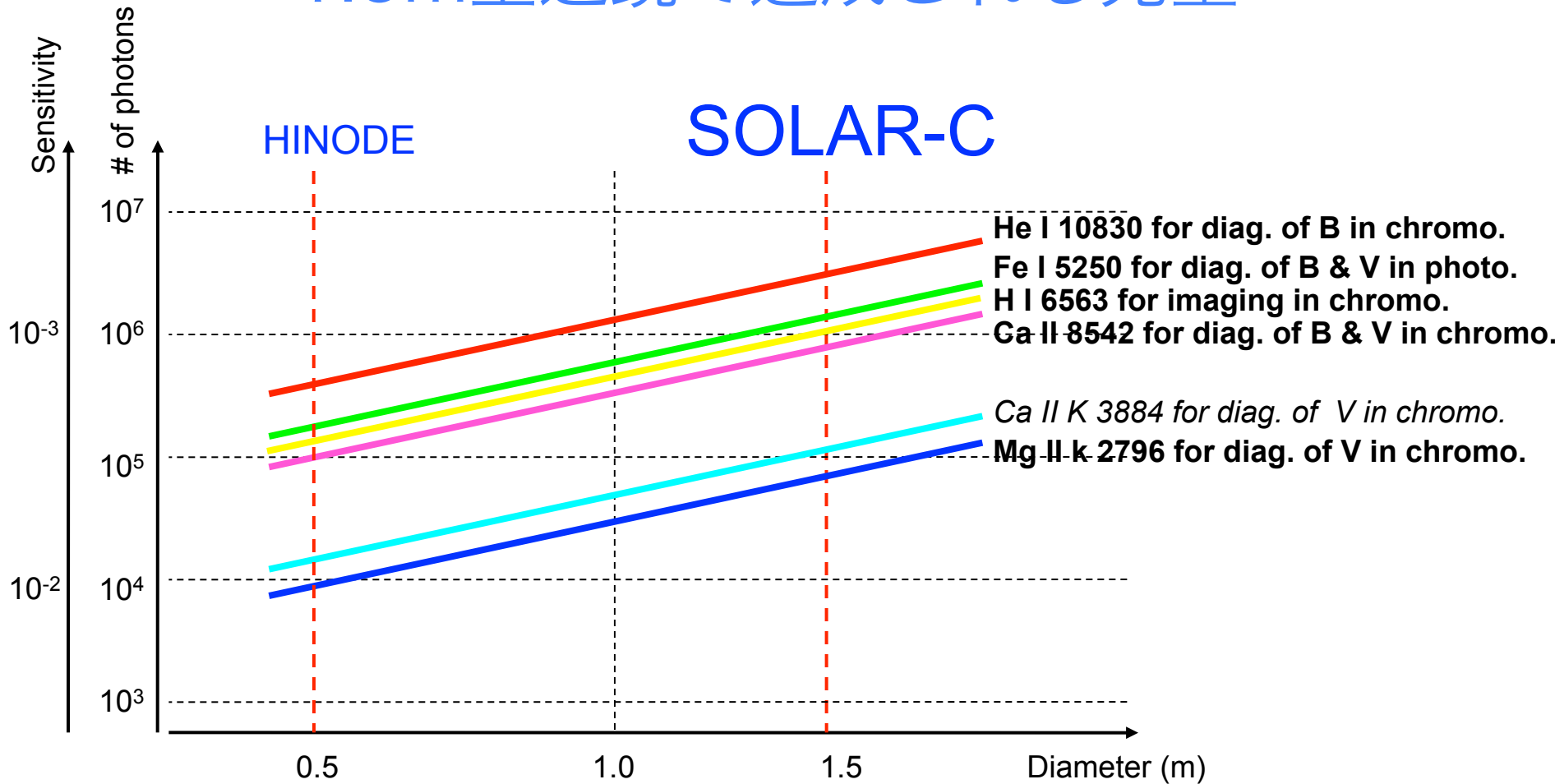
Mg II k 2796 Å



Ca II k 3933 Å



1.5m望遠鏡で達成される光量



- 光量見積もりに用いた光学系
 - Al+MgF₂ コーティング鏡 4枚
 - 分光器の効率 0.2

- サンプルング
 - 空間サンプルング: 0.06"/pix
 - 時間サンプルング: 1sec
 - 波長サンプルング: $\lambda/\Delta\lambda=2 \times 10^5$

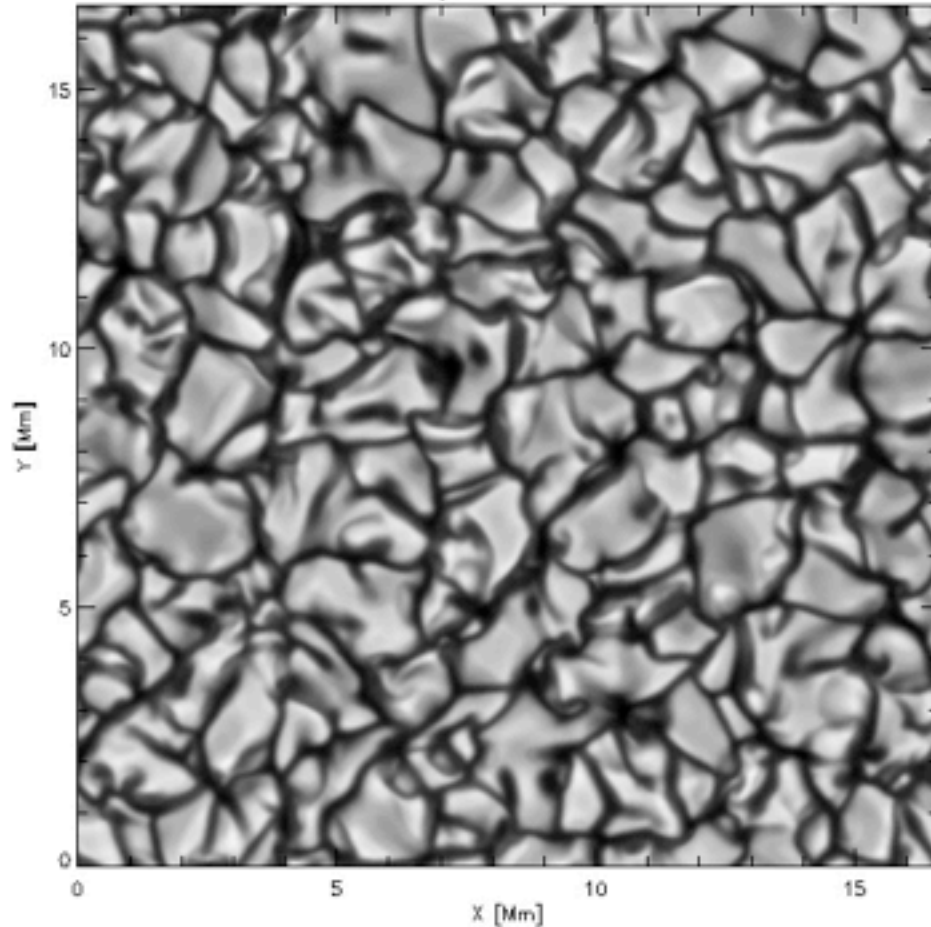
1.5m望遠鏡で達成される光量

- $S/N \sim 10^4$ for high precision spectro-polarimetry
 - Ca II 8542Å: 0.18"/pix, 10sec integration
 - He I 10830Å: 0.18"/pix, 3-10sec integration
- $S/N \sim 10^2$ for high-speed spectroscopy
 - Mg II k 2796Å: 0.06"/pix, 0.5sec integration
 - Ca II 8542Å: 0.06"/pix, <0.1sec integration

3次元輻射MHDシミュレーションによる彩層のモデル化 (M. Carlsson et al.)

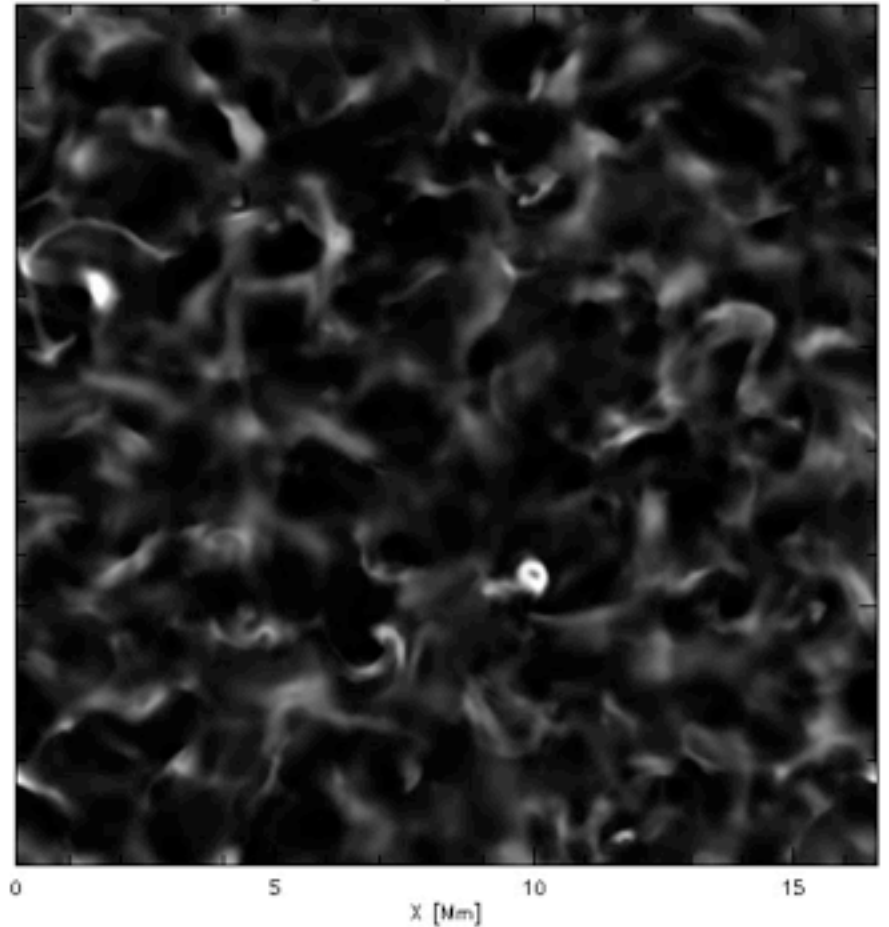
Mg II k continuum

Continuum, $\lambda=259$ nm $t= 0$ s



Mg II k broadband image ($\Delta\lambda_{\text{FWHM}}=4\text{\AA}$)

Mg II k, slit-jaw $t= 0$ s

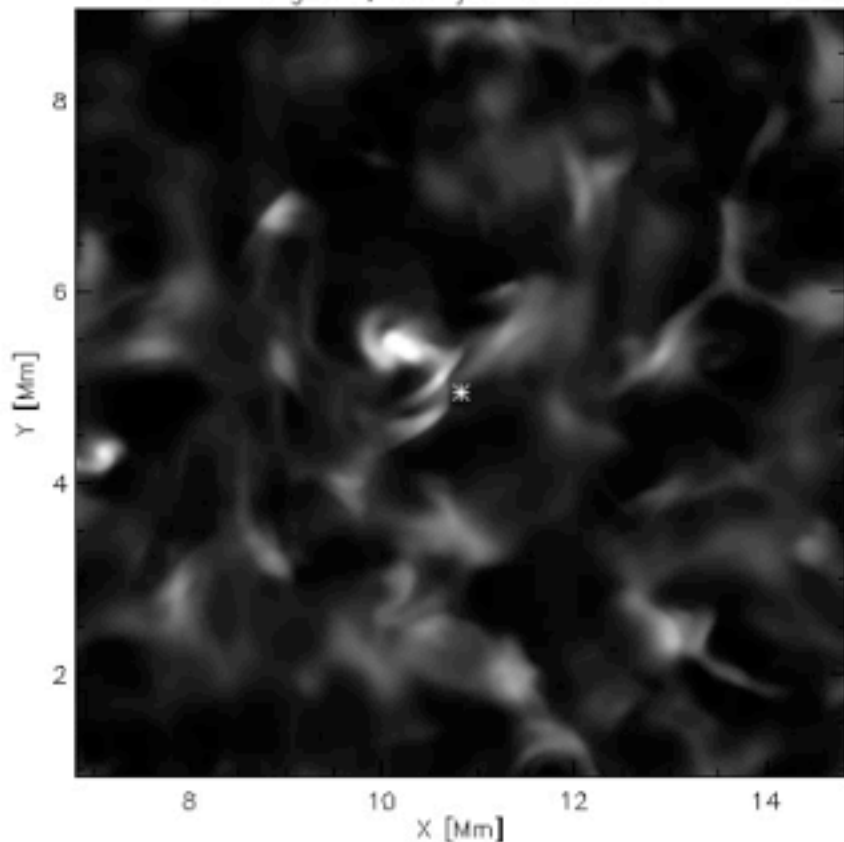


ダイナミックな彩層を2 or 3次元シミュレーションによって再現されつつある。非LTE輻射輸送を入れる非定常な計算は困難であった。観測とシミュレーションの直接比較が近い将来可能になる

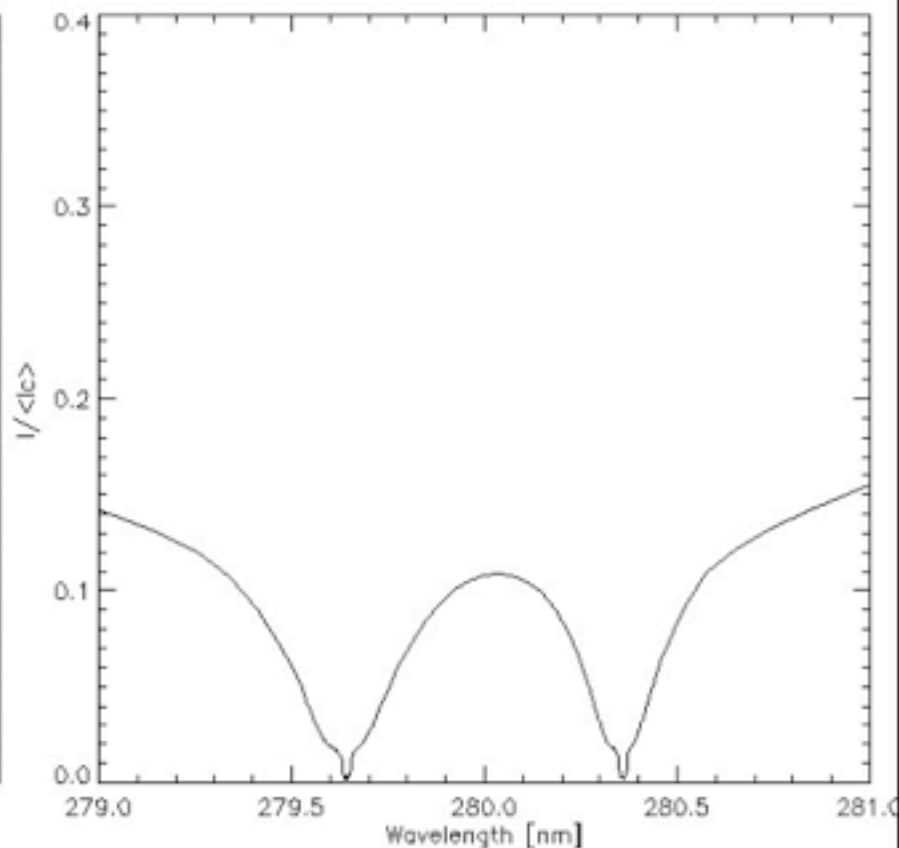
3次元輻射MHDシミュレーションによる彩層のモデル化 (M. Carlsson et al.)

Mg II k broadband image ($\Delta\lambda_{\text{FWHM}}=4\text{\AA}$)

Mg II k, slit-jaw $t = 210$ s



Mg II k&h spectra



ダイナミックな彩層を2 or 3次元シミュレーションによって再現されつつある。非LTE輻射輸送を入れる非定常な計算は困難であった。観測とシミュレーションを直接比較が近い将来可能になる

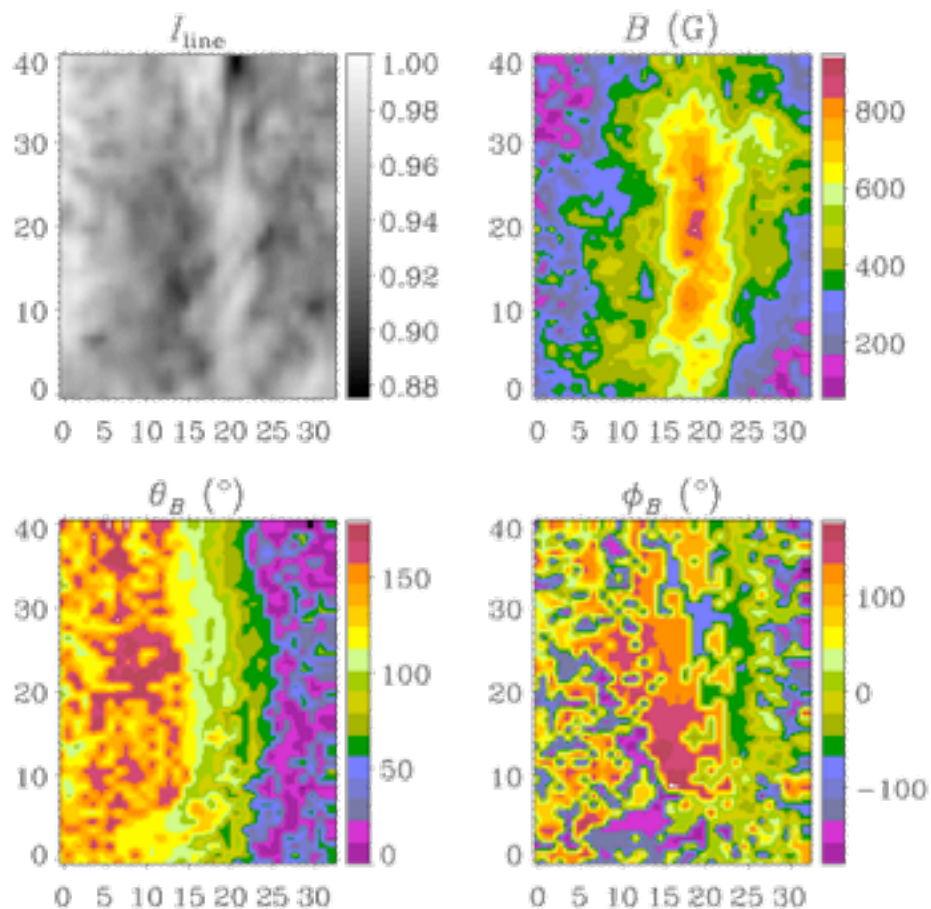
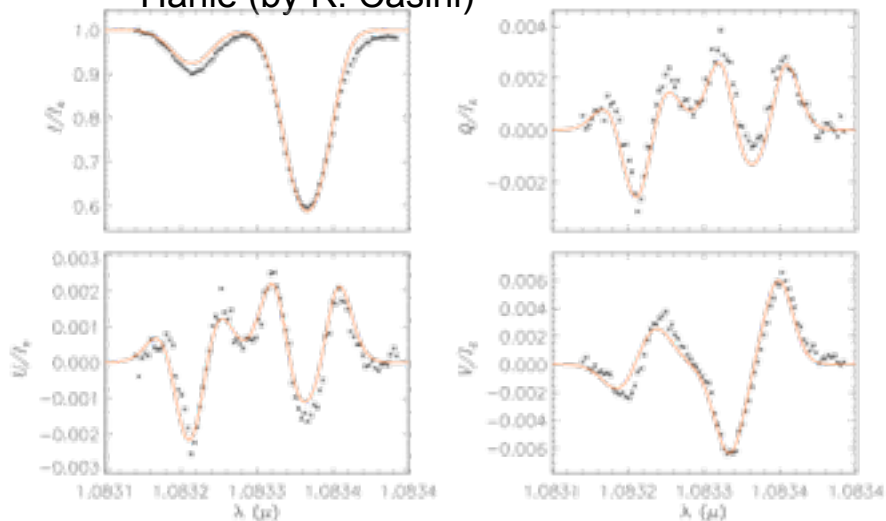
彩層磁場診断手法の成熟度

- Stokes IQUV observations of the spectral lines provide significant polarized signals by joint action of Zeeman and Hanle effect if we achieve 10^{-4} sensitivity.

Vector magnetic fields of an active region filament measured by the PCA analysis of He 10830Å profiles. (Kuckein et al. 2009)

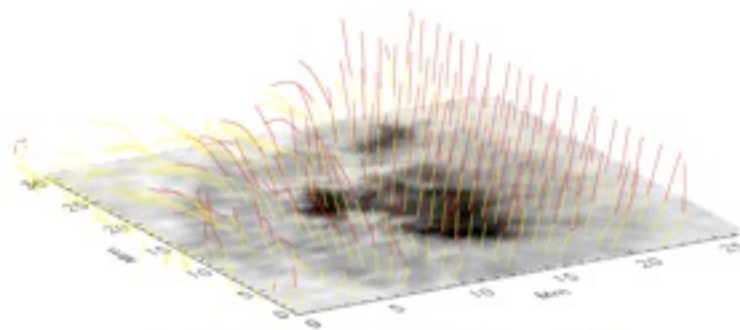
- 特にHe I 10830ÅでのHanle+Zeeman診断を行うツールは実用レベルに達している。

- Hanle and Zeeman analysis for He I 10830Å (by A. Ramos and J. Trujillo-Bueno)
- Principal Component Analysis including Hanle (by R. Casini)

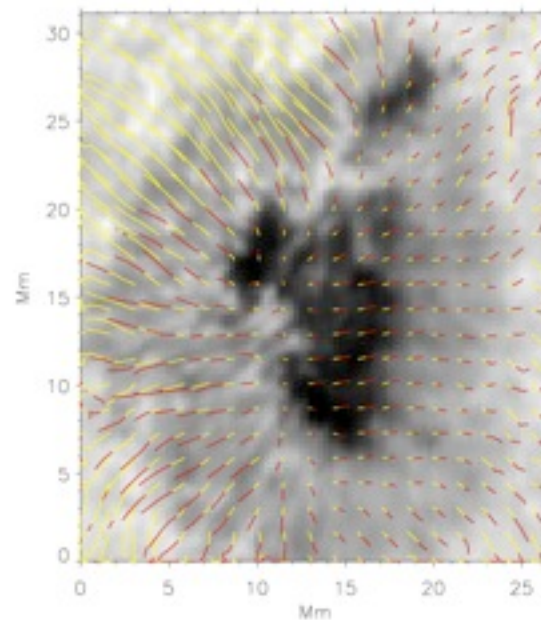
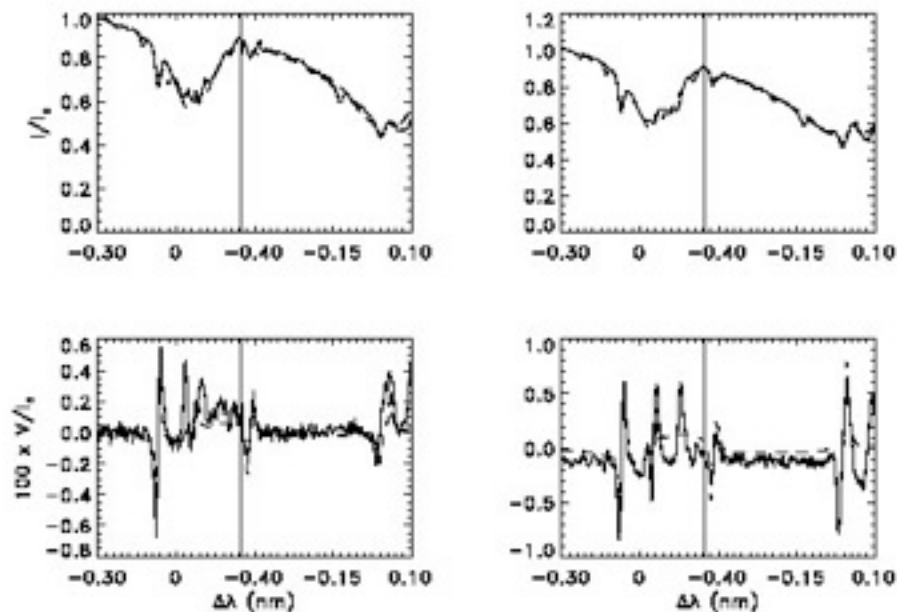


非LTE輻射輸送インバージョン

- Ca II線の解析のためには、非LTEな輻射輸送をダイレクトに解く必要。大規模な計算を要する。
- 単純化することで、NLTEインバージョンの試みもなされている (by H. Socas-Navarro)



2 CaII lines: 849.8 and 854.2 nm
2 FeI lines: 849.7 and 854.0 nm

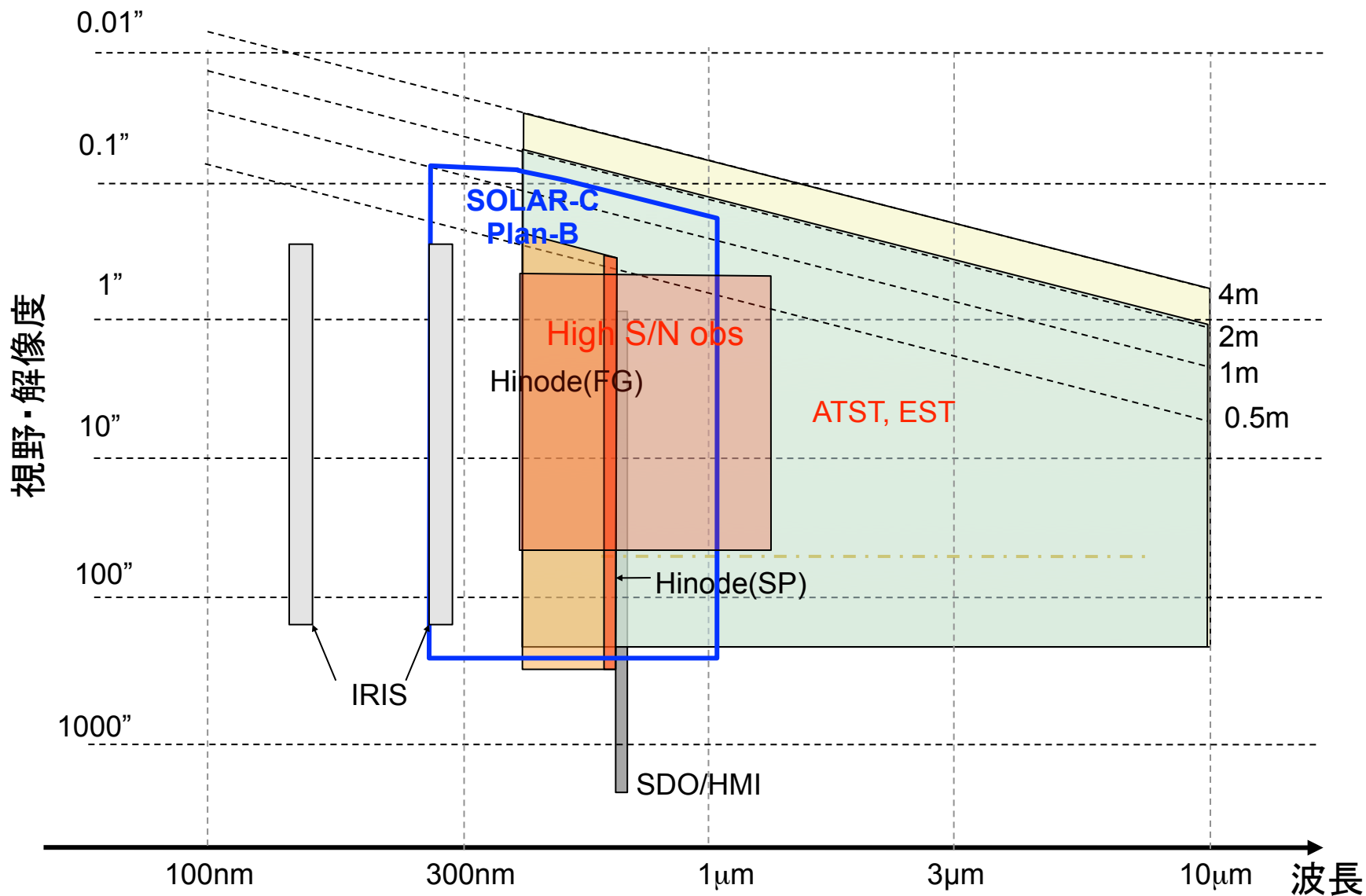


It is possible to decouple magnetic and velocity fields from atmospheric conditions (temperatures and densities) by the inversion.

科学的要求に基づく基本性能

- 空間分解能
 - 高S/Nの磁場観測においては約0.2秒角 (光量でリミット)
 - 低S/Nの輝度・速度観測においては回折限界分解能 (1.5m口径では約0.05秒角)
- 視野
 - 中規模の活動領域を十分カバーするためには200秒角x200秒角
- 波長分解能
 - 彩層スペクトル線の熱的ライン幅を分解するために $N/\Delta\lambda > 100,000$
- 偏光測定精度
 - 測光感度 $(1-3) \times 10^{-4}$ 、装置の偏光特性は 10^{-3} のオーダーで校正
- 2次元分光観測
 - 変動の激しい彩層のダイナミクスを観測するためには、単一ス

他の宇宙ミッション・地上望遠鏡



まとめ

- 1.5m Φ 大型光学望遠鏡によって、1桁高い偏光感度を実現。彩層磁場の計測を可能にする。これにより、これまでは見えなかった光球より上部での磁場の散逸過程に迫ることができる。
- 近年、「ひので」や地上望遠鏡を使った観測の発達もあり、シミュレーション、彩層ラインのモデル化、ハンレ効果の解釈など、彩層診断を行う上で必要な土壌が世界的にできている。SOLAR-C B案への期待は高い。