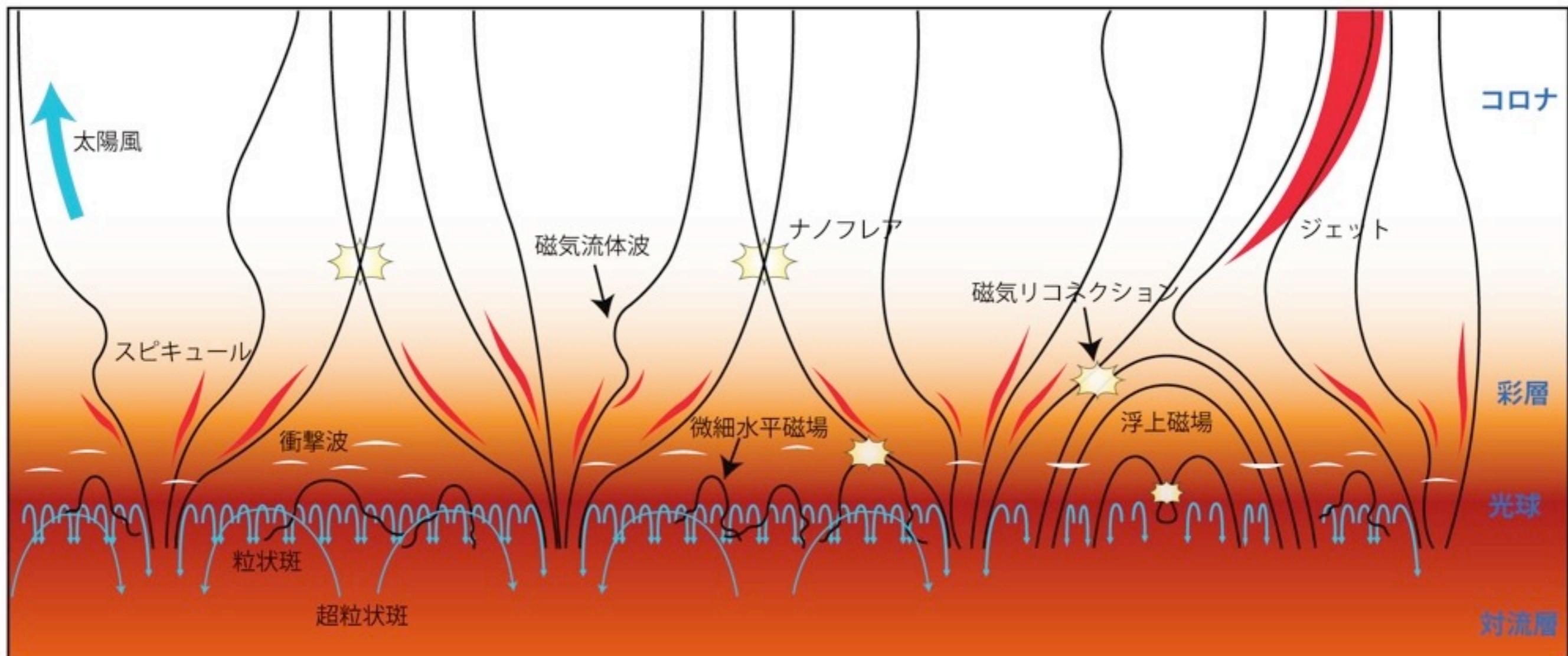


CLASPとALMAの共同 観測について

石川遼子（国立天文台）

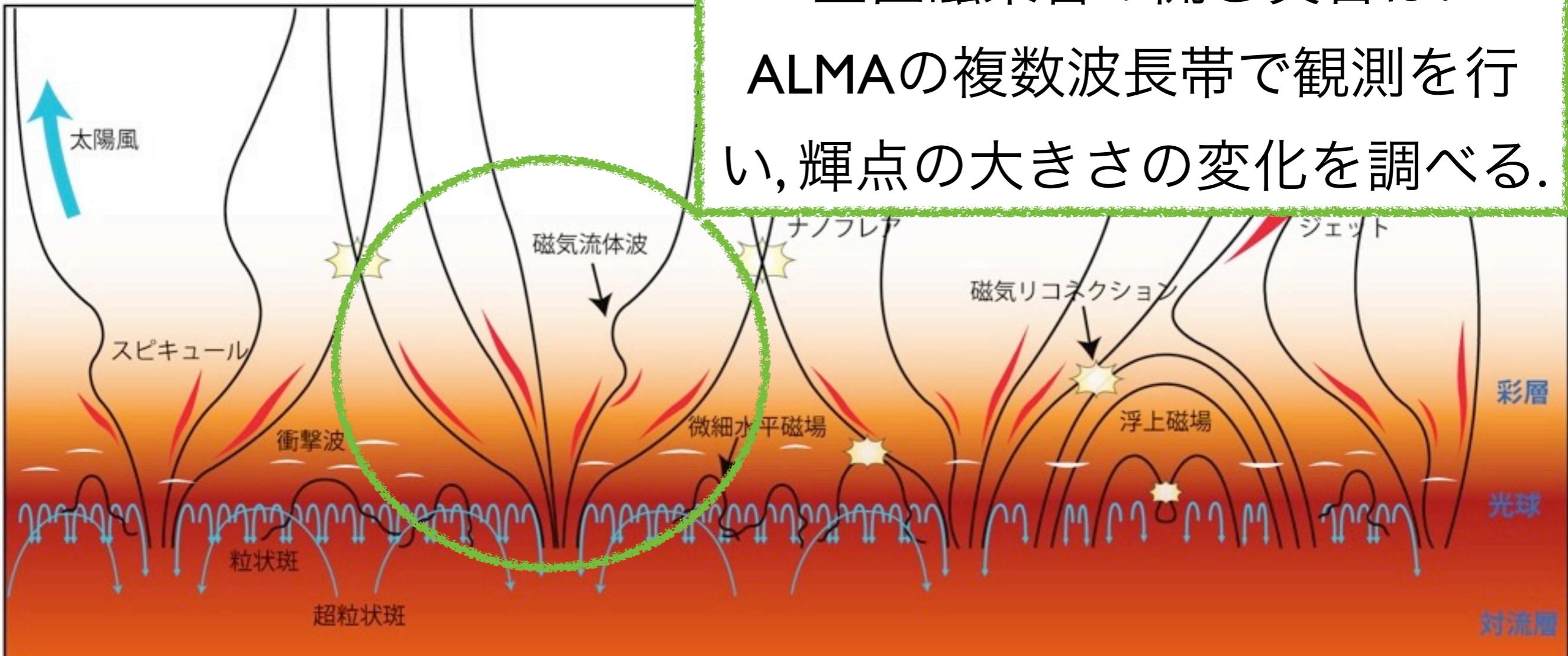
彩層磁場とダイナミクス



Courtesy of Solar-Cパンフ製作グループ

- 見てきたような絵だが、彩層はよくわかっていない

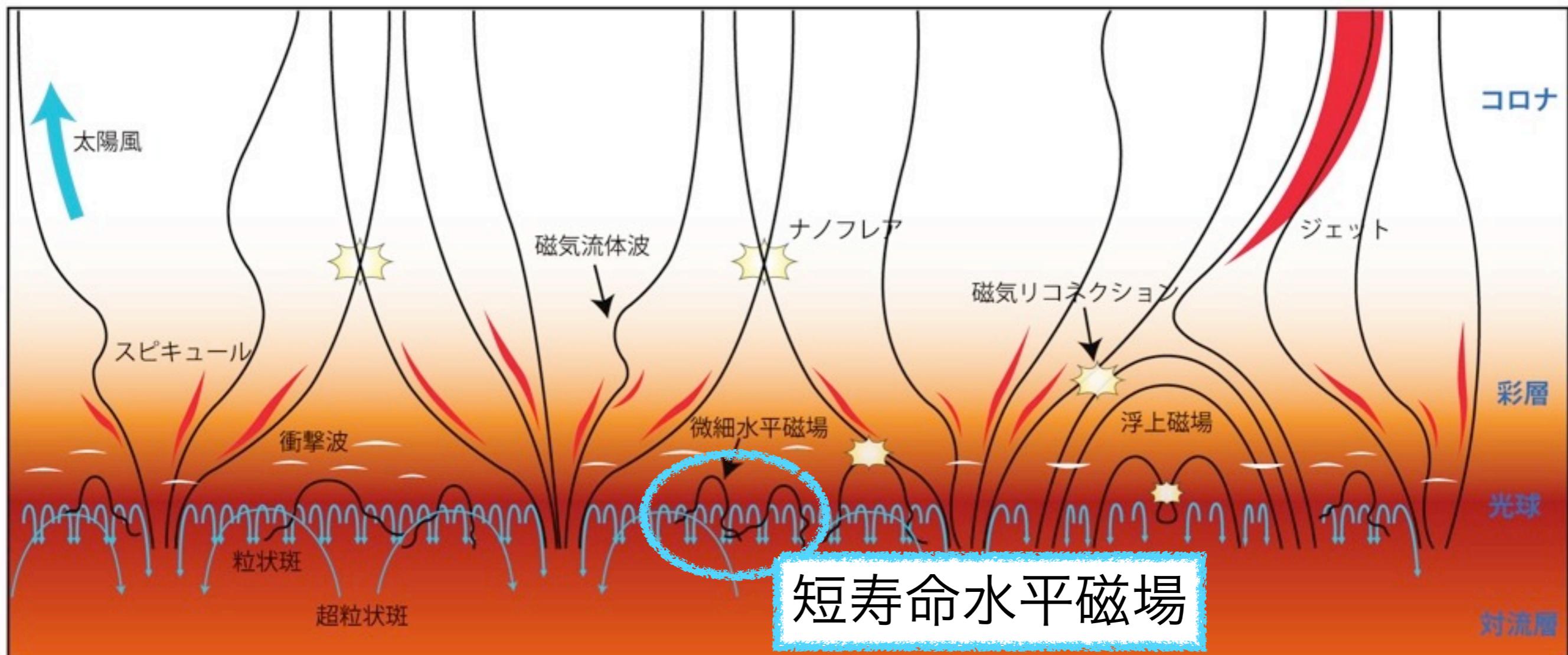
彩層磁場とダイナミクス



Courtesy of Solar-Cパンフ製作グループ

- 見てきたような絵だが、彩層はよくわかっていない

彩層磁場とダイナミクス



Courtesy of Solar-Cパンフ製作グループ

- 見てきたような絵だが、彩層はよくわかっていない

CLASP+ALMAで目指すサイエンス

～水平磁場(THMF)の巻～

Required energy input (Withbroe & Noyes 1977)	Quiet Sun [erg cm ⁻² s ⁻¹]
Corona	3×10^5
Chromosphere	4×10^6
Magnetic energy flux of THMFs	2×10^6 (Ishikawa & Tsuneta 2009) $1 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7$ (Martinez Gonzalez et al. 2010)

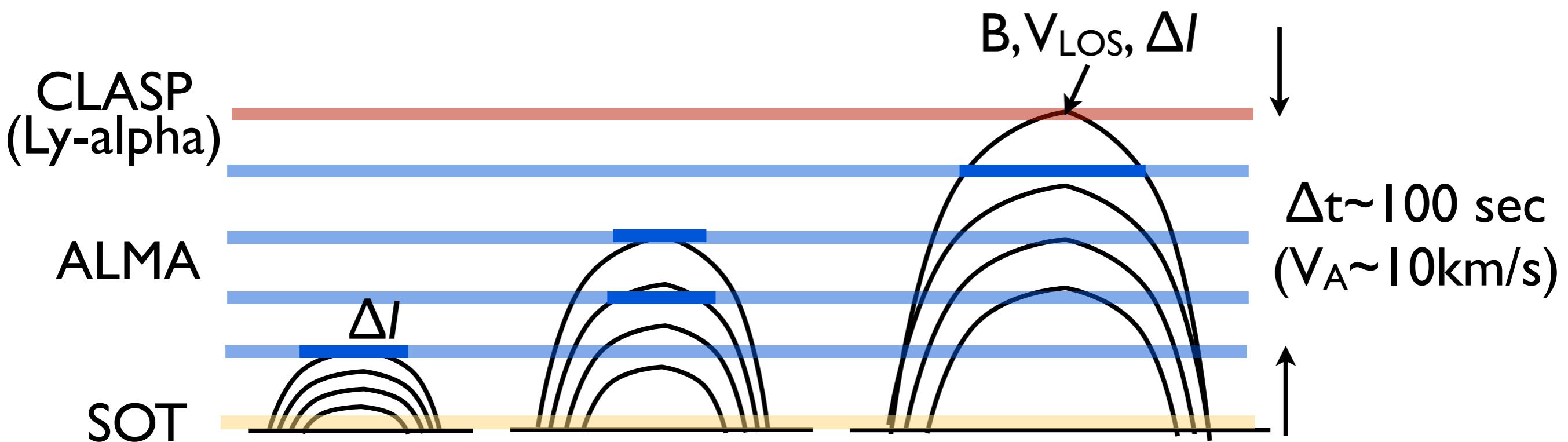
- 水平磁場は彩層～コロナに到達し、これらの上層大気を加熱しているか？

短寿命水平磁場はALMAの 偏光測定で検出できるか？

- 彩層での磁場強度~10G と仮定 (400G @ 光球, Ishikawa & Tsuneta 2008)
- サイクロotron放射 : 280 MHz (ALMA では検出不可).
- 水平磁場が浮上すると周囲と構造が異なるため, 明るく・もしくは暗くなって同定できるのでは.

CLASP+ALMAで目指すサイエンス

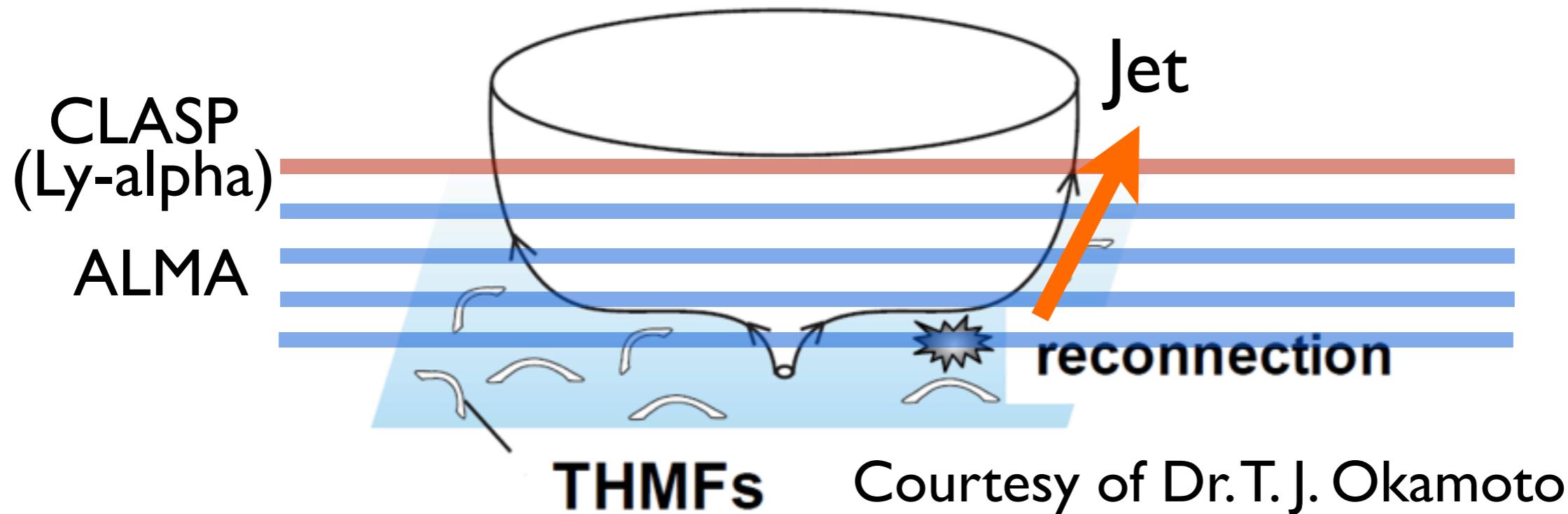
~水平磁場の浮上~



- 水平磁場の浮上とともに, ALMAでは強度変化が順番に現れる?

CLASP+ALMAで目指すサイエンス

～水平磁場による彩層加熱～



- Ly-alphaでジェットが検出されるとともに, ALMAの4周波数帯とLy-alphaで順に加熱による増光がみられる?

Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter (CLASP)

- 太陽の彩層～遷移層から放射されるライマン
 α 線 ($\lambda=121.6\text{nm}$)を0.1%の高精度で偏光分光観
測する世界で初めての試み
- NASAの観測口ケットを用いた日米共同ミッ
ション
- 日本・米国・スペイン・ノルウェー・フラン
スの国際共同研究

2014年12月打ち上げを目指して

- 2012年5月NASAへプロポーザル提出. 現在採択結果待ち. 採択され次第, ISAS/JAXAへプロポーザル提出予定.
- 2009年度より行なってきた基礎開発はほぼ終了. フライト品の光学設計も終了し, 構造設計中.
- これまで2回の日米技術会合, 4回の国際サイエンス会合を実施.

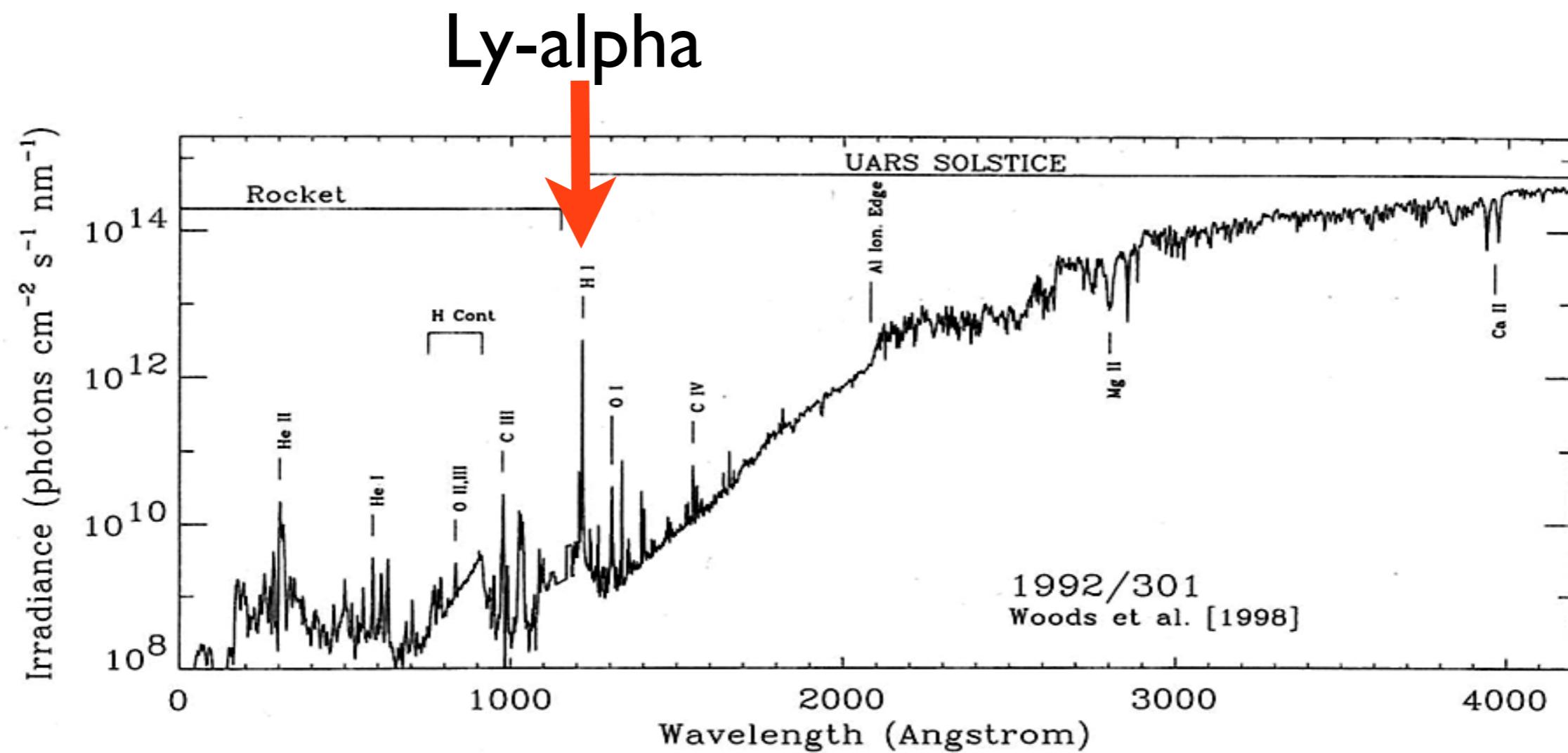
CLASP success criteria

1. The **first detection** of the linear polarization due to **atomic polarization** in Ly-alpha
2. The **first detection** of the Hanle effect in Ly-alpha
3. To infer **magnetic fields** in the upper chromosphere and transition region

彩層～遷移層の磁場診断手法の確立を目指す
パスファインダーミッション。

ライマンα偏光分光観測の利点

- I. 真空紫外で最も明るく, 高い偏光精度を達成できる.

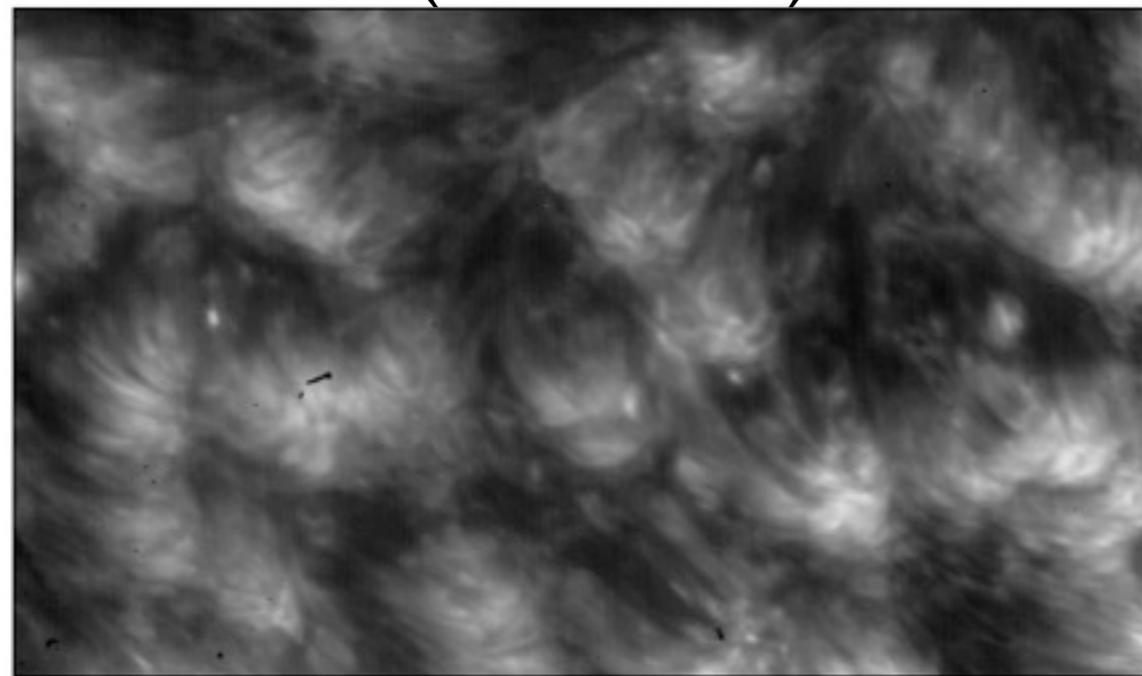


ライマンα偏光分光観測の利点

2. 遷移層上部での磁場測定が可能

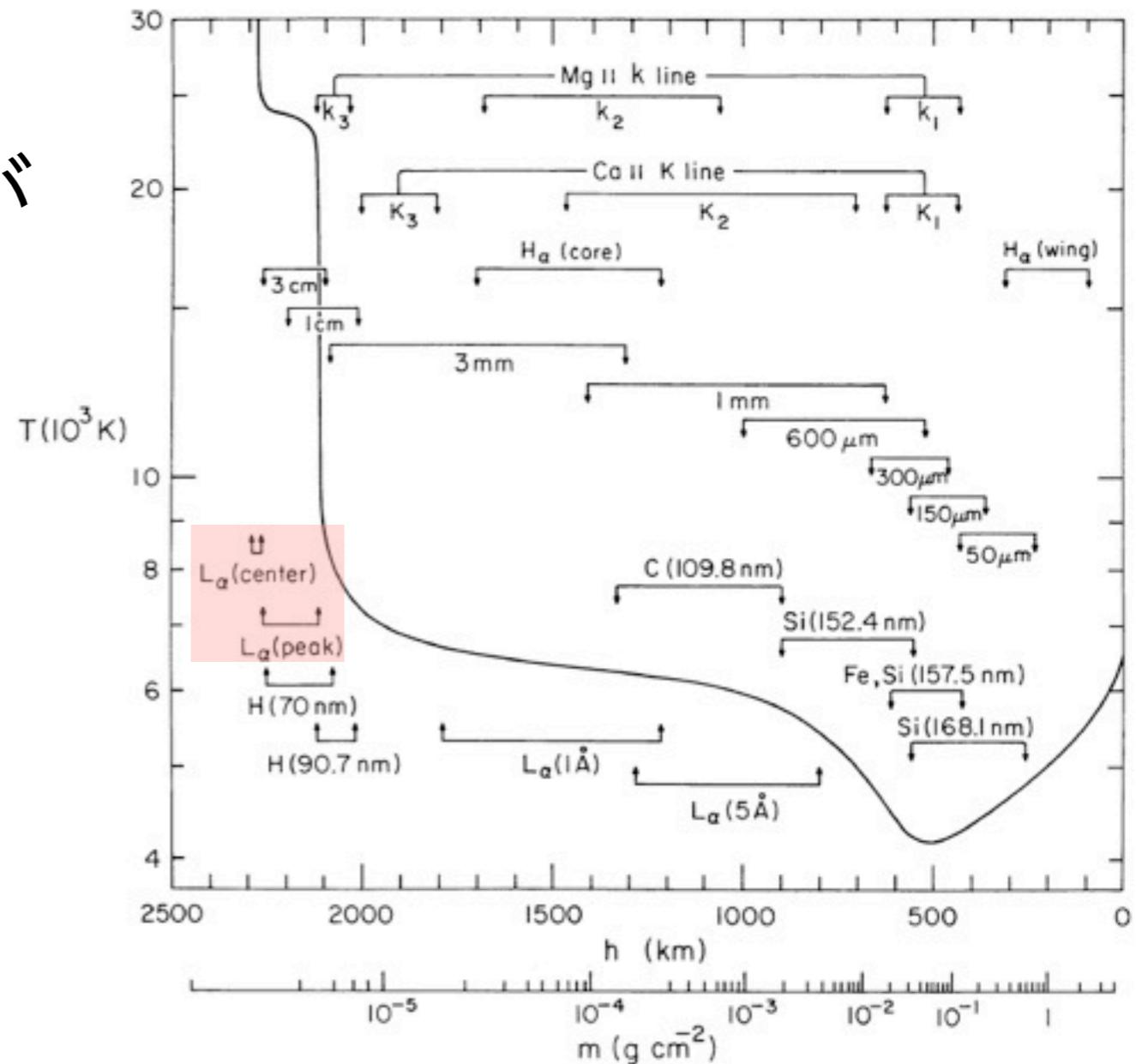
3. 静穏領域も磁場測定が可能

Quiet Sun observed with VAULT
(100''x170'')



Courtesy of Dr. Angelos Vourlidas

The average quiet-Sun temperature distribution from obs.



Vernazza et al. (1980)

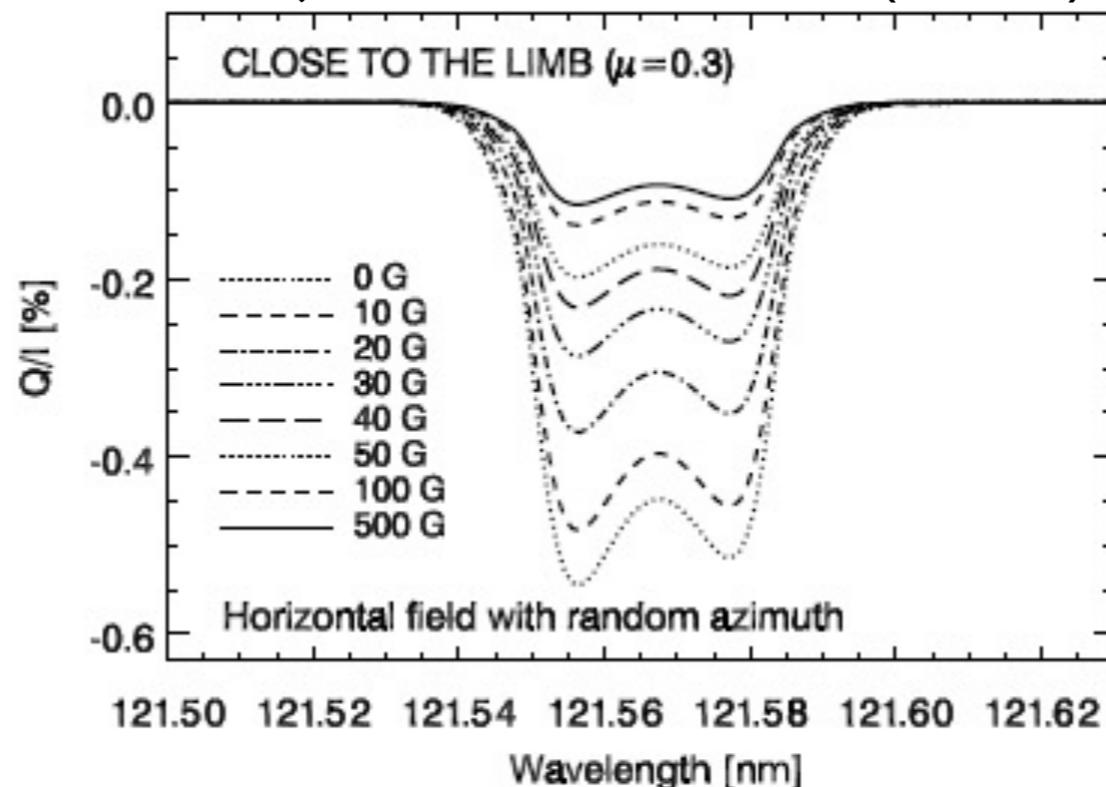
ライマン α 偏光分光観測の利点

4. Hanle効果で測定できる磁場の強度範囲

が適切

5<B<250G @ Ly-alpha

Trujillo Bueno et al. (2011)



Zeeman vs. Hanle

- 彩層上部~遷移層：10~100G程度
- 激しいプラズマ運動を持つ彩層～遷移層ではZeeman効果を用いた磁場測定は困難.

$$\frac{V}{I} = -\Delta\lambda_B \cos\gamma \frac{1}{I} \frac{\partial I}{\partial \lambda} \approx -\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\lambda_D} = 0.05\% \quad @ B_{\text{LOS}}=100\text{G}$$

- Hanle効果はプラズマ運動の影響を受けず、偏光信号の測定が可能に.

$Q/I > 0.1\%$ with $10 < B < 250\text{G}$ @Ly-alpha

Calculation of Hanle

Rotation of
quantization axis

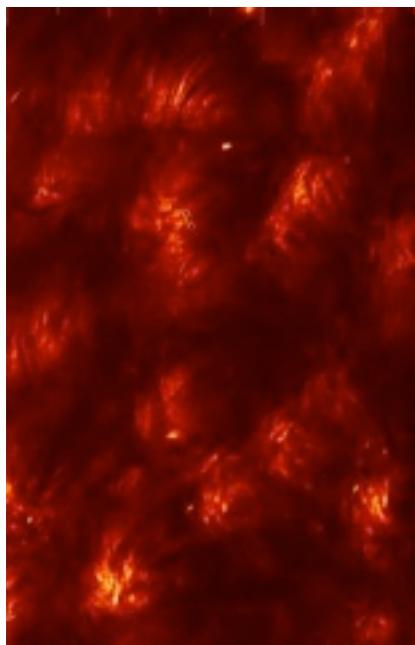
Atomic
polarization

Population imbalance between
magnetic sublevels

Atomic
coherency

linear combination of basis states

Intensity
Distribution



Anisotropic
Radiation Field

Atmospheric
model

Polarization
profile

Magnetic
field!!!

Relaxation of
coherency



Calculation of Hanle

Rotation of
quantization axis

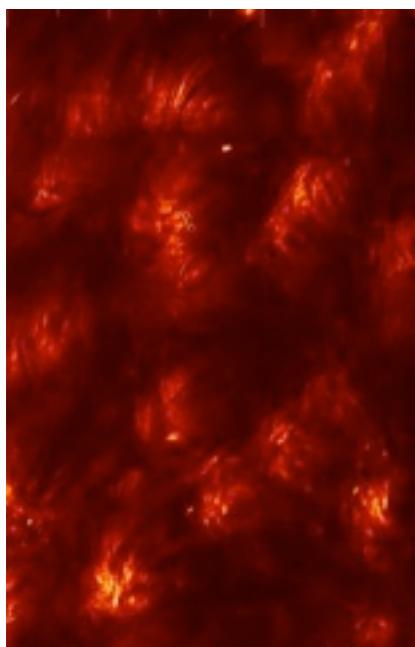
Atomic
polarization

Population imbalance between
magnetic sublevels

Atomic
coherency

linear combination of basis states

Intensity
Distribution



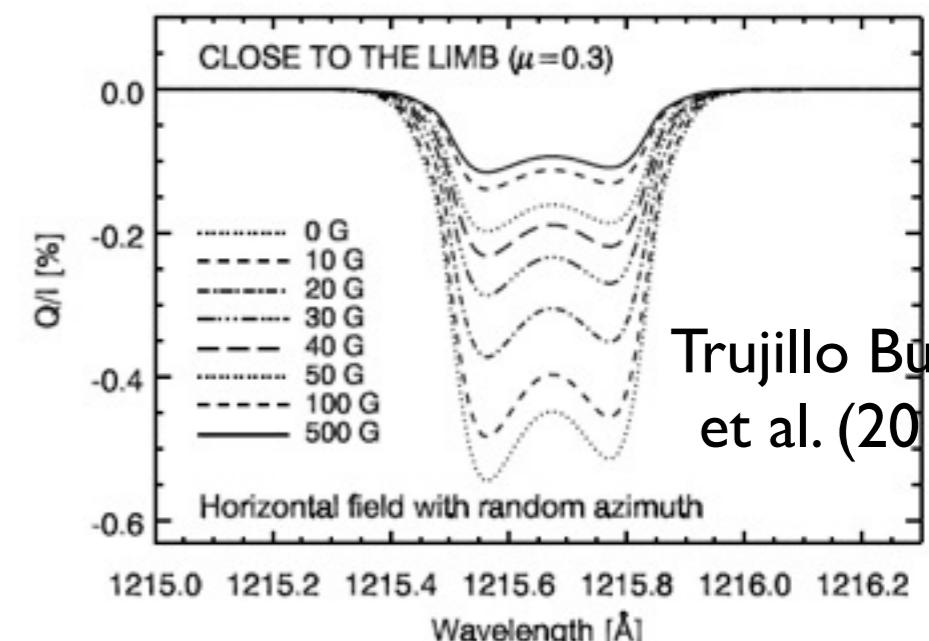
Anisotropic
Radiation Field



Atmo
mo ...

Magnetic
field!!!

Relaxation of
coherency



Calculation of Hanle

Rotation of

quantization axis

Quantum
theory

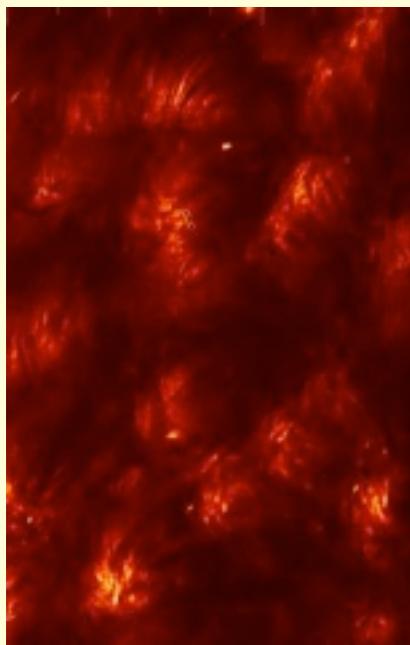
Atomic
polarization

Population imbalance between
magnetic sublevels

Atomic
coherency

linear combination of basis states

Intensity
Distribution



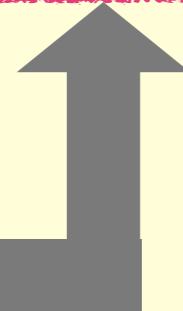
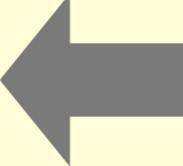
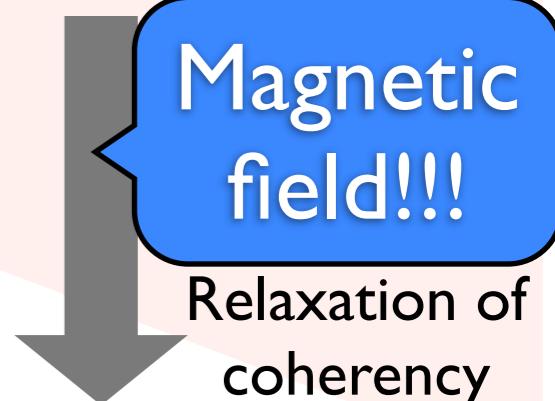
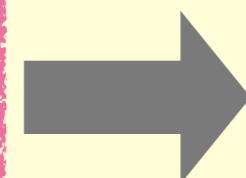
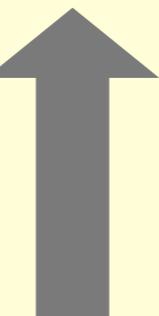
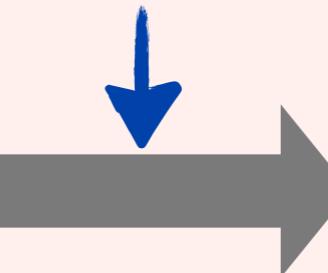
Anisotropic
Radiation Field

Polarization
profile

Atmospheric
model

non-LTE RTE

Atmospheric modeling



Calculation of Hanle

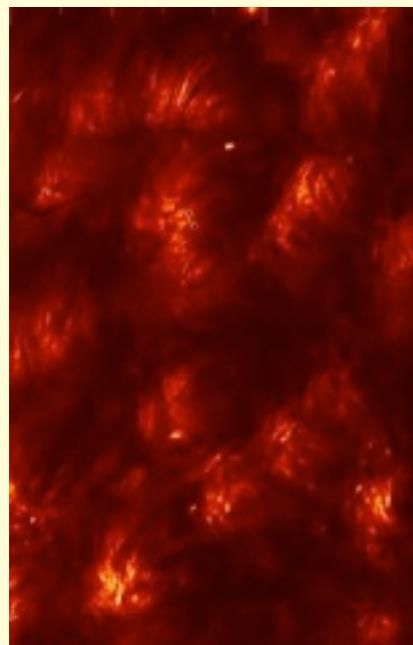
Rotation of

quantization axis

Quantum
theory

ALMA!!!

Intensity
Distribution



Atmospheric modeling

Atomic
polarization

Population imbalance between
magnetic sublevels

Atomic
coherency

linear combination of basis states

Magnetic
field!!!

Relaxation of
coherency

Anisotropic
Radiation Field

Polarization
profile

Atmospheric
model

non-LTE RTE

量子力学に基づいた Hanle効果の定性的理解

Keywords

- Atomic polarization
- Atomic coherency
- Hanle effect

量子力学に基づいた Hanle効果の定性的理解

Keywords

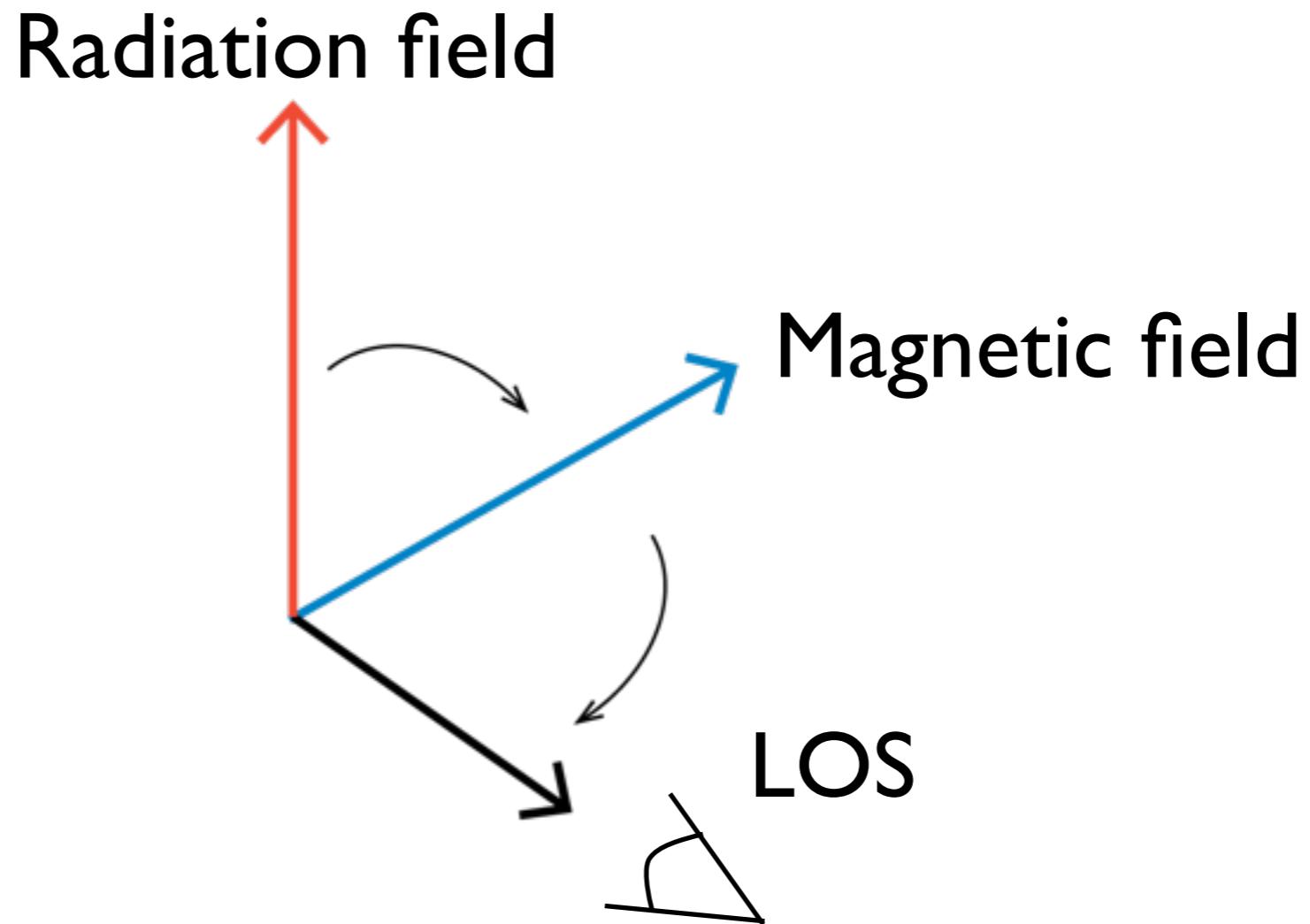
- Atomic polarization
- Atomic coherency
- Hanle effect



- ★ Conservation of angular momentum
- ★ Rotation of quantization axis

Importance of choice of quantization axis

- Rotation of quantization axes



J=0-1 transition

J : total angular momentum

m : magnetic quantum number

$|J=1, m=1\rangle$ $|J=1, m=0\rangle$ $|J=1, m=-1\rangle$



$|J=0, m=0\rangle$

Example

J=0-1 transition

J : total angular momentum
m : magnetic quantum number

$|J=1, m=1\rangle$ $|J=1, m=0\rangle$ $|J=1, m=-1\rangle$

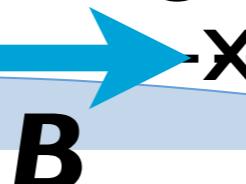


$|J=0, m=0\rangle$

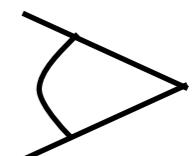
Radiation field



Magnetic field



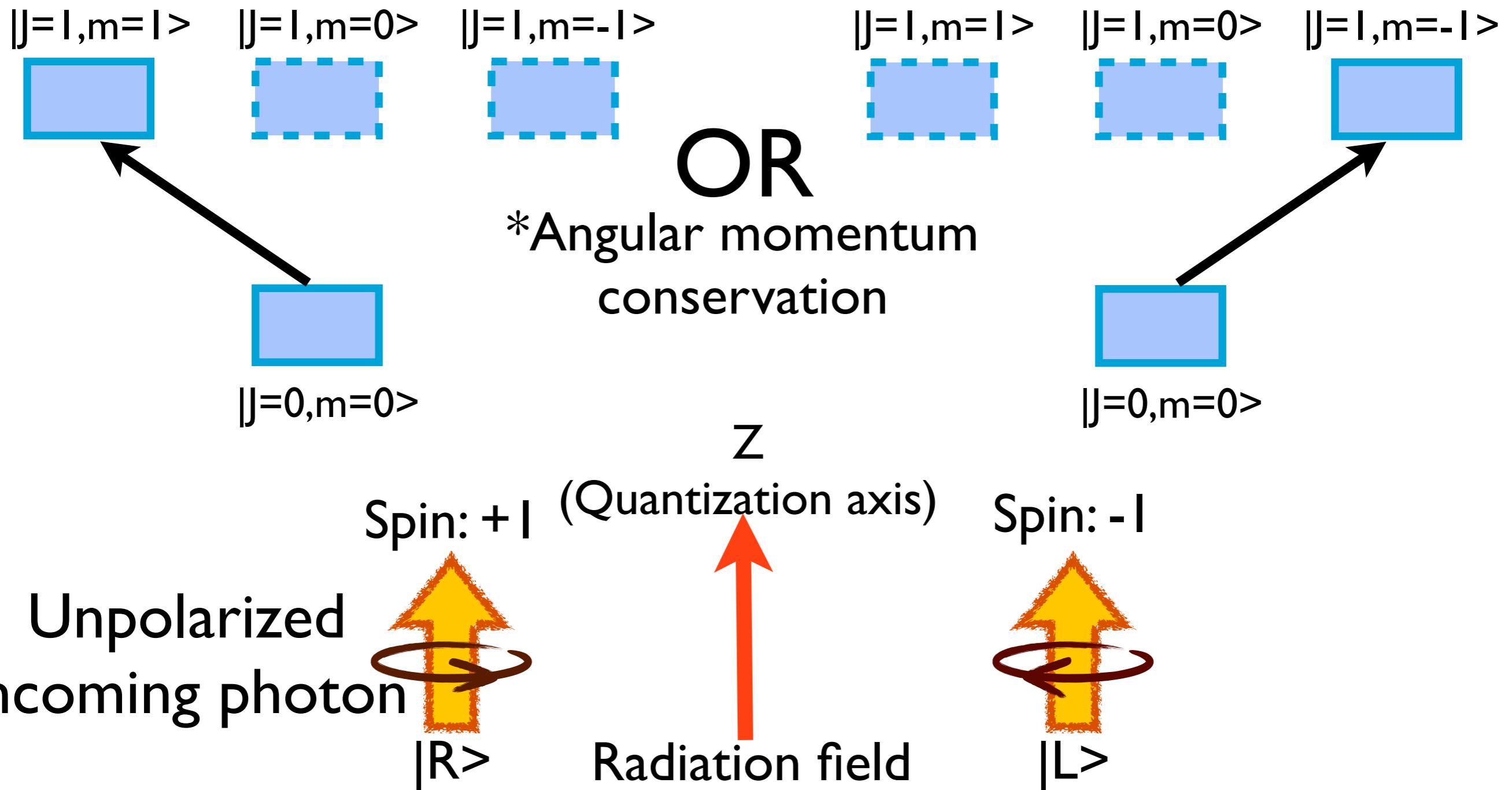
Limb observation



Example

Atomic polarization

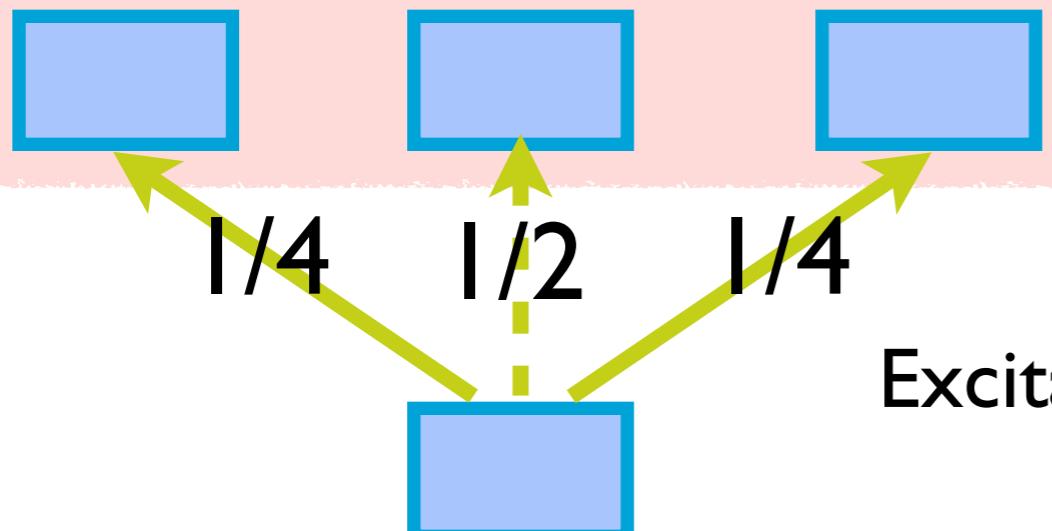
Selective excitation (population imbalance)
due to non-uniform radiation field



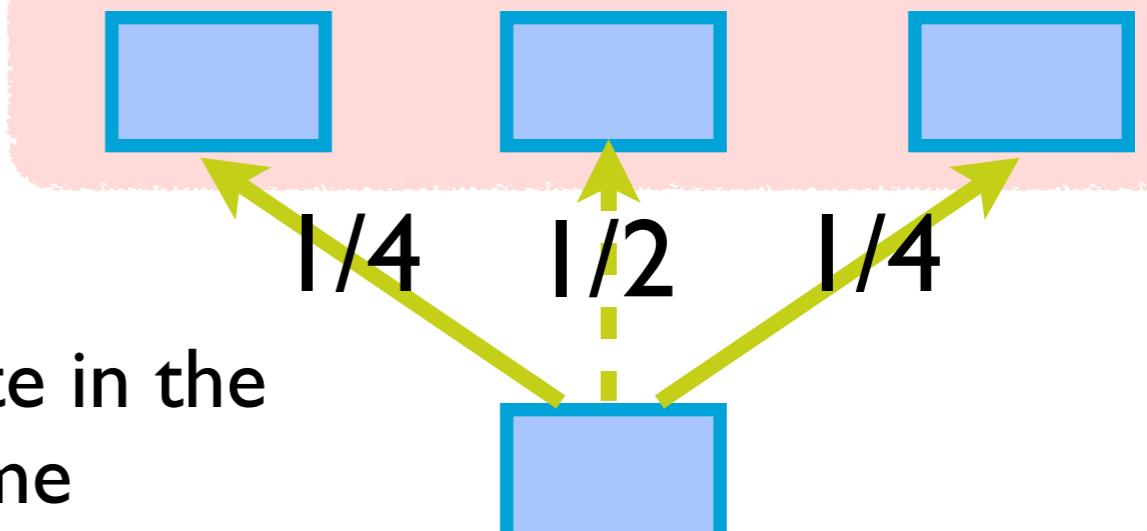
Atomic coherency

After the rotation of quantization axis, the new basis ($|J', J'>$, $|J', 0'>$, $|J', -J'>$) can be expressed by linear combination of original basis.

$|J=J', m=J'>$ $|J=J', m=0'>$ $|J=J', m=-J'>$

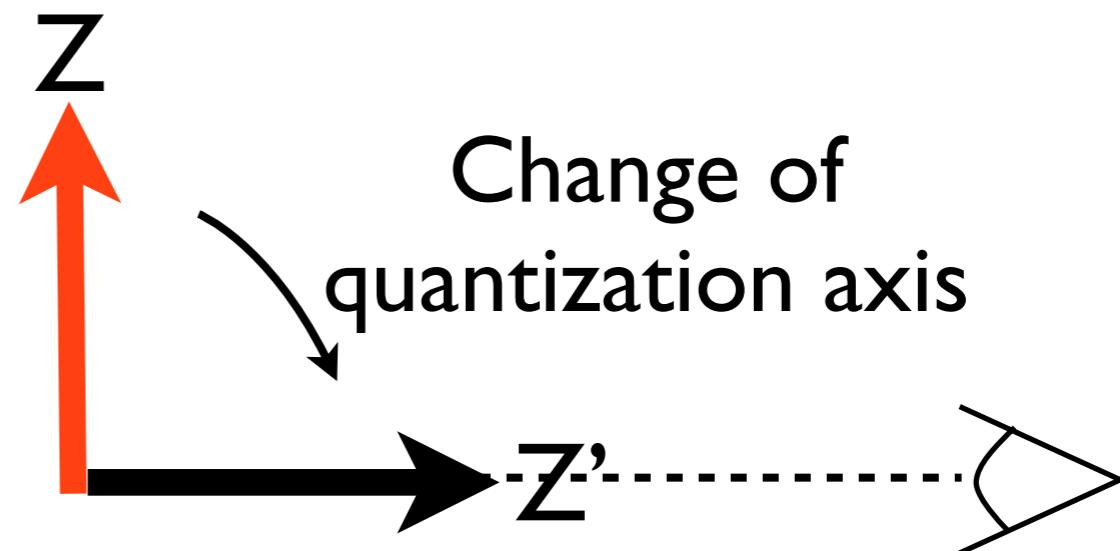


$|J=J', m=J'>$ $|J=J', m=0'>$ $|J=J', m=-J'>$



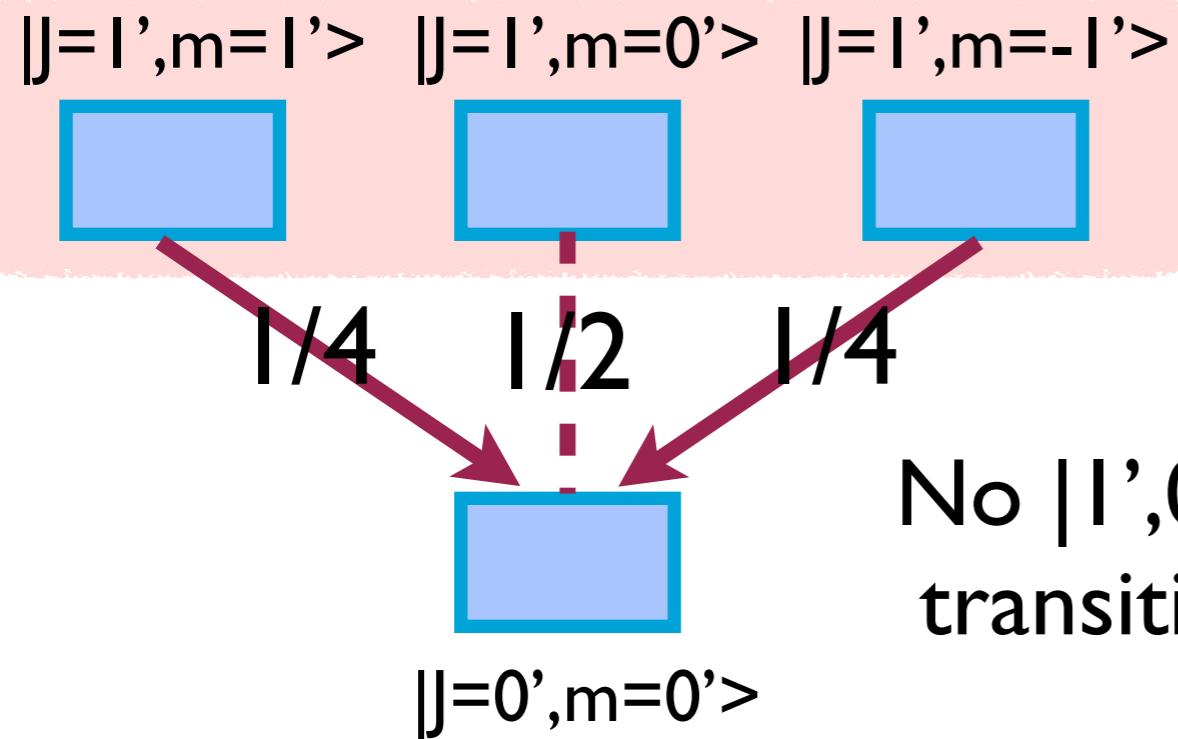
Excitation state in the
new frame

Population and **coherency**
are present.

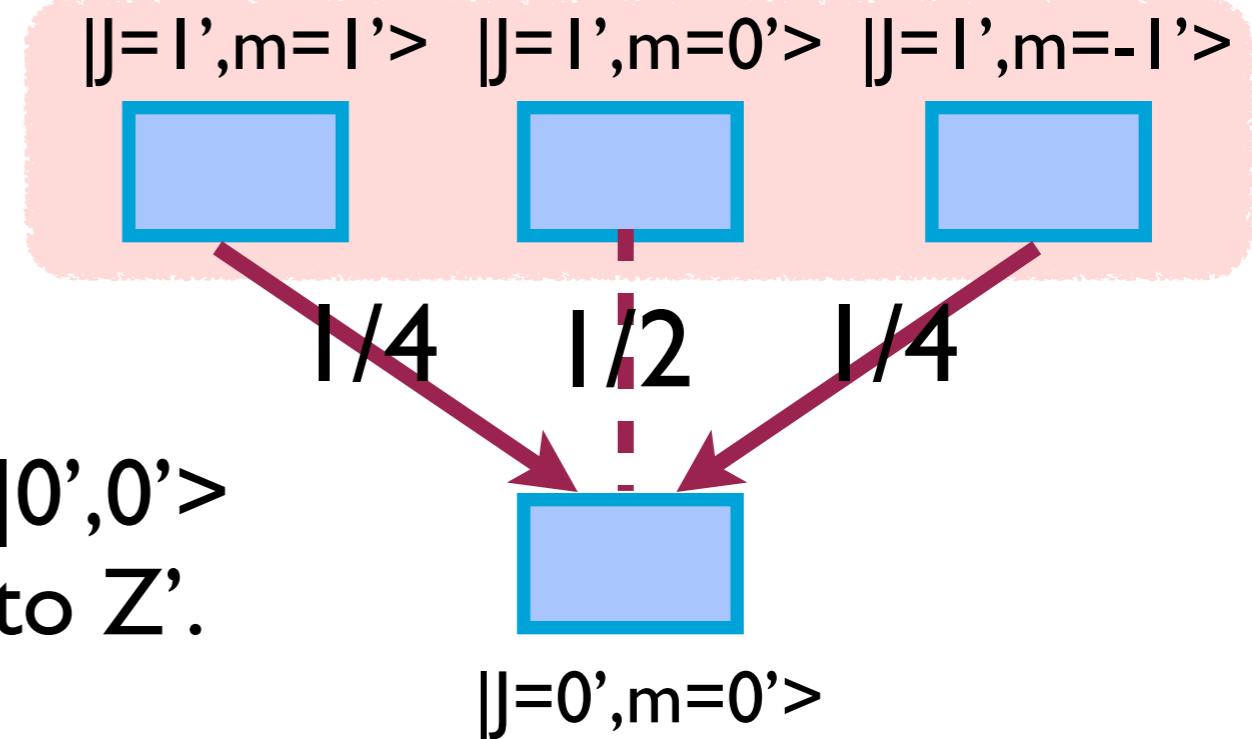


De-excitation ($B=0$)

- Maintain atomic coherency

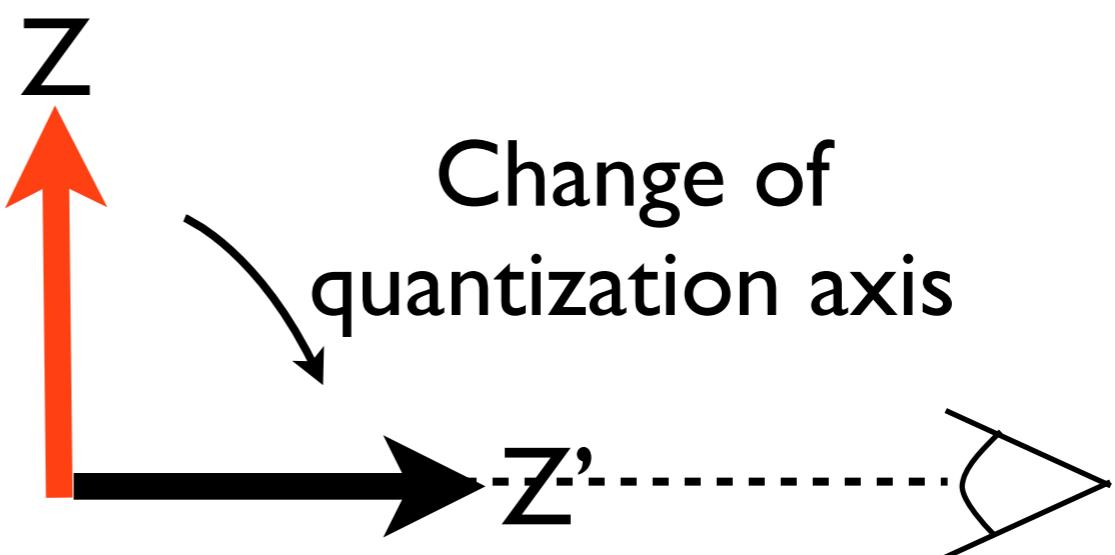


No $|I', 0'\rangle \rightarrow |0', 0'\rangle$ transition into Z' .



Emitted photon is
($|R\rangle + |L\rangle$), linearly polarized.

→ 90 deg scattering!



De-excitation (Strong B)

- Coherency is removed.

$|J=I', m=I'\rangle$ $|J=I', m=0'\rangle$ $|J=I', m=-I'\rangle$



$|J=I', m=I'\rangle$ $|J=I', m=0'\rangle$ $|J=I', m=-I'\rangle$



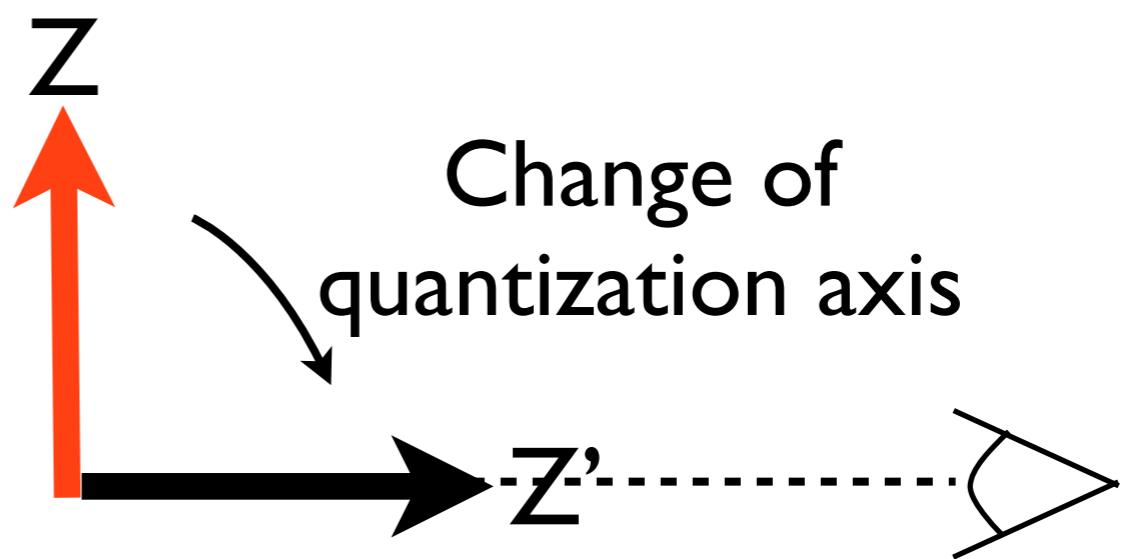
OR

$|J=0', m=0'\rangle$

No $|I', 0'\rangle \rightarrow |0', 0'\rangle$
transition into Z' .

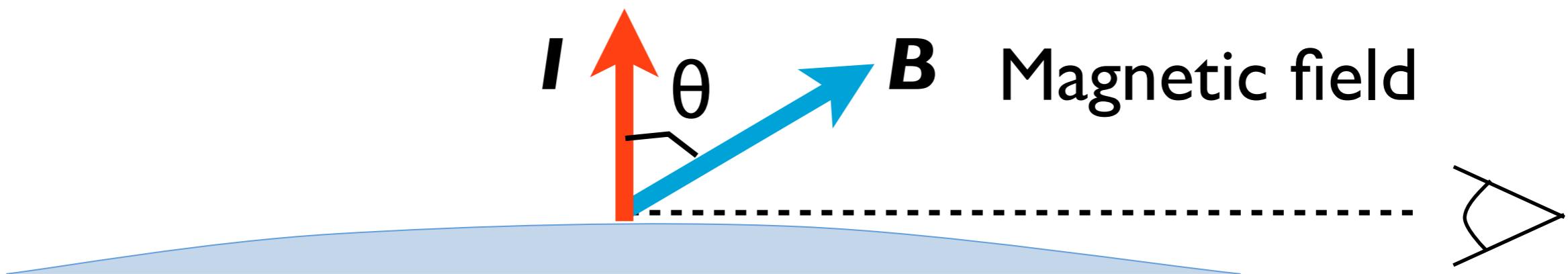
$|J=0', m=0'\rangle$

The same amount of $|R\rangle$ and $|L\rangle$ are emitted, and no polarization.

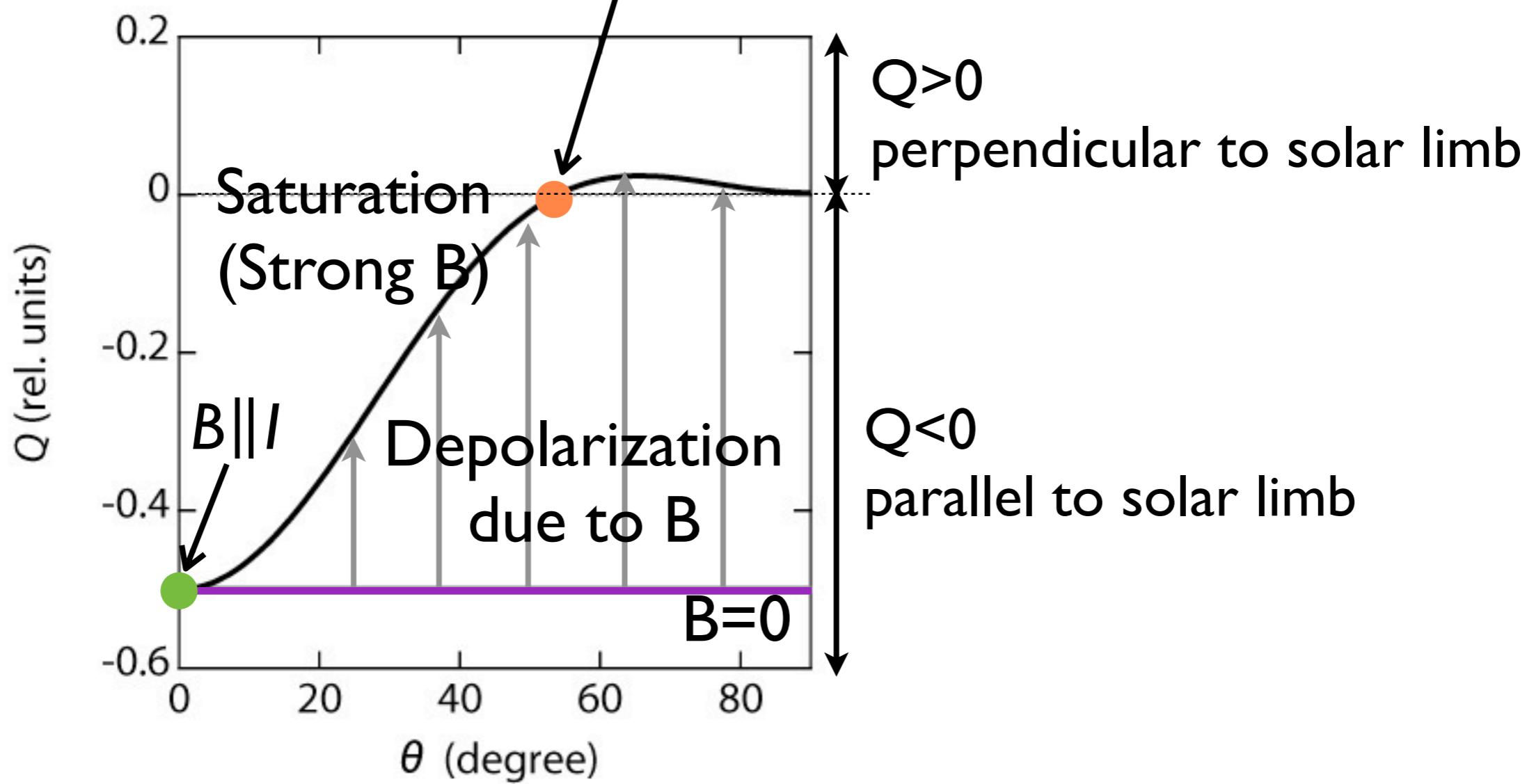


Radiation field

Limb observation

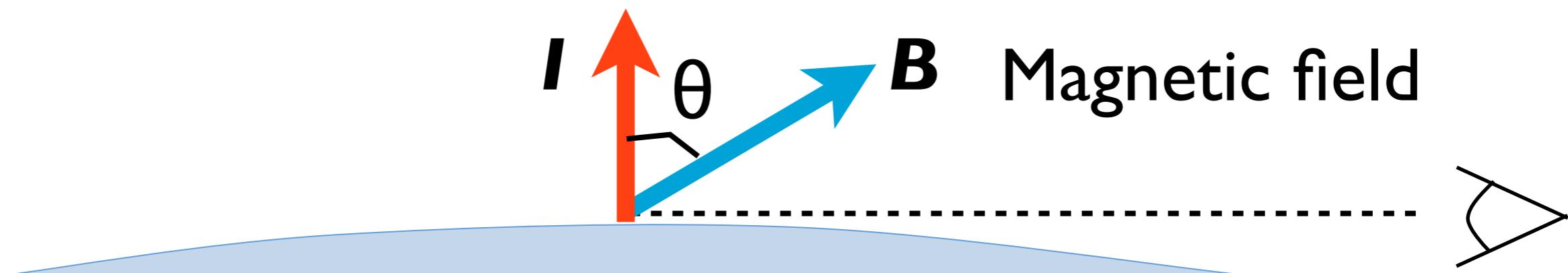


Van Vleck angle

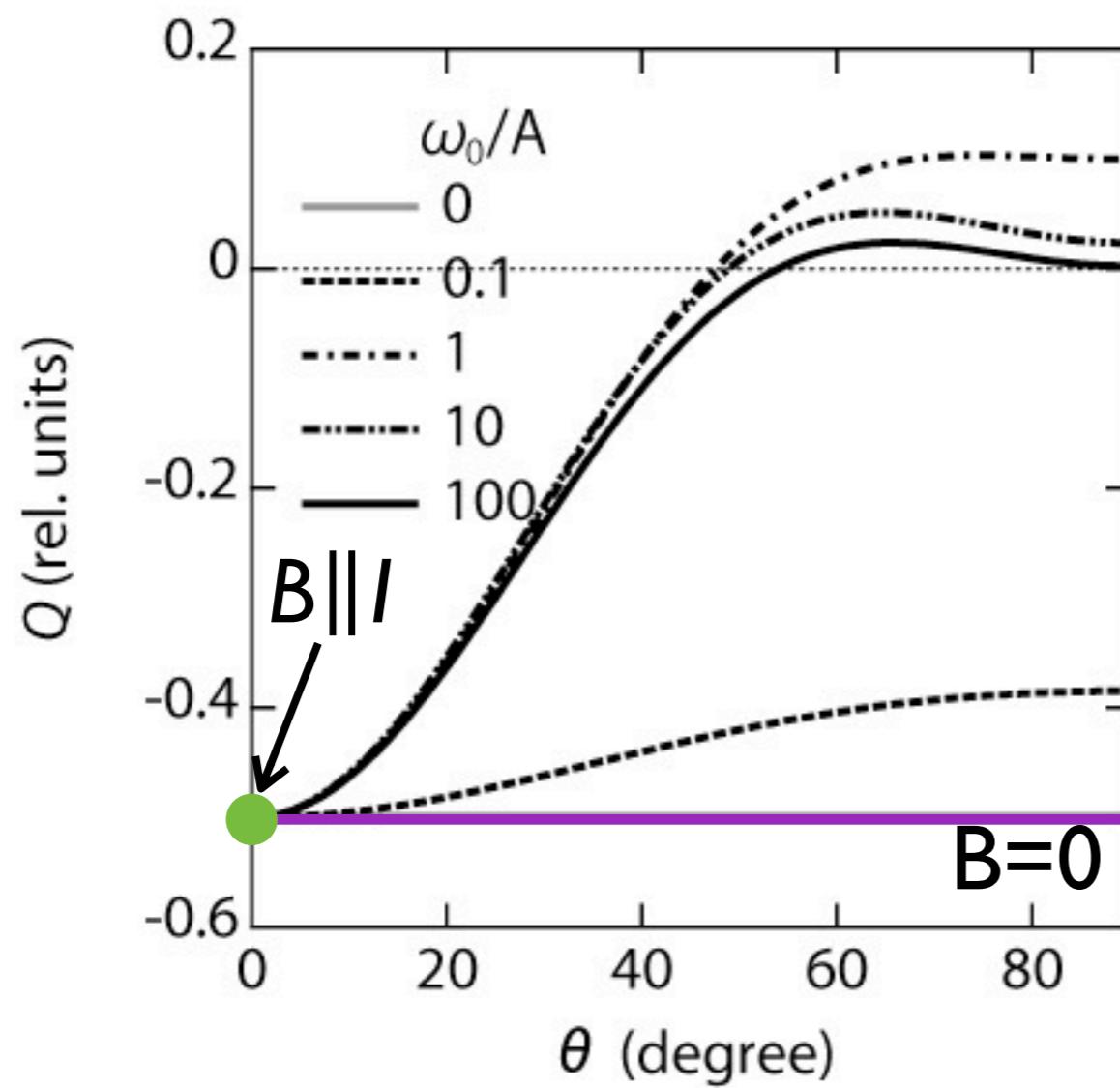


Radiation field

Limb observation



Density matrixを用いた解析解 Courtesy of Dr. M Goto



$$\omega_0 \sim A_{\alpha\beta}$$

Einstein A coefficient
Larmor frequency: $\omega_0 = \frac{e}{2m} gB$

の時, 磁場の強度に応じて偏光変調が生じる。

Atomic polarizationと

Hanle効果のまとめ

- 非等方な輻射場によって,励起状態の磁気副準位間に不均一性が生じる(=atomic polarization).
- 磁場の強度,向きによって atomic coherencyが緩和され,偏光信号が変調を受ける (=Hanle効果).
- 脱励起する際にこれらを反映した直線偏光が放射される.

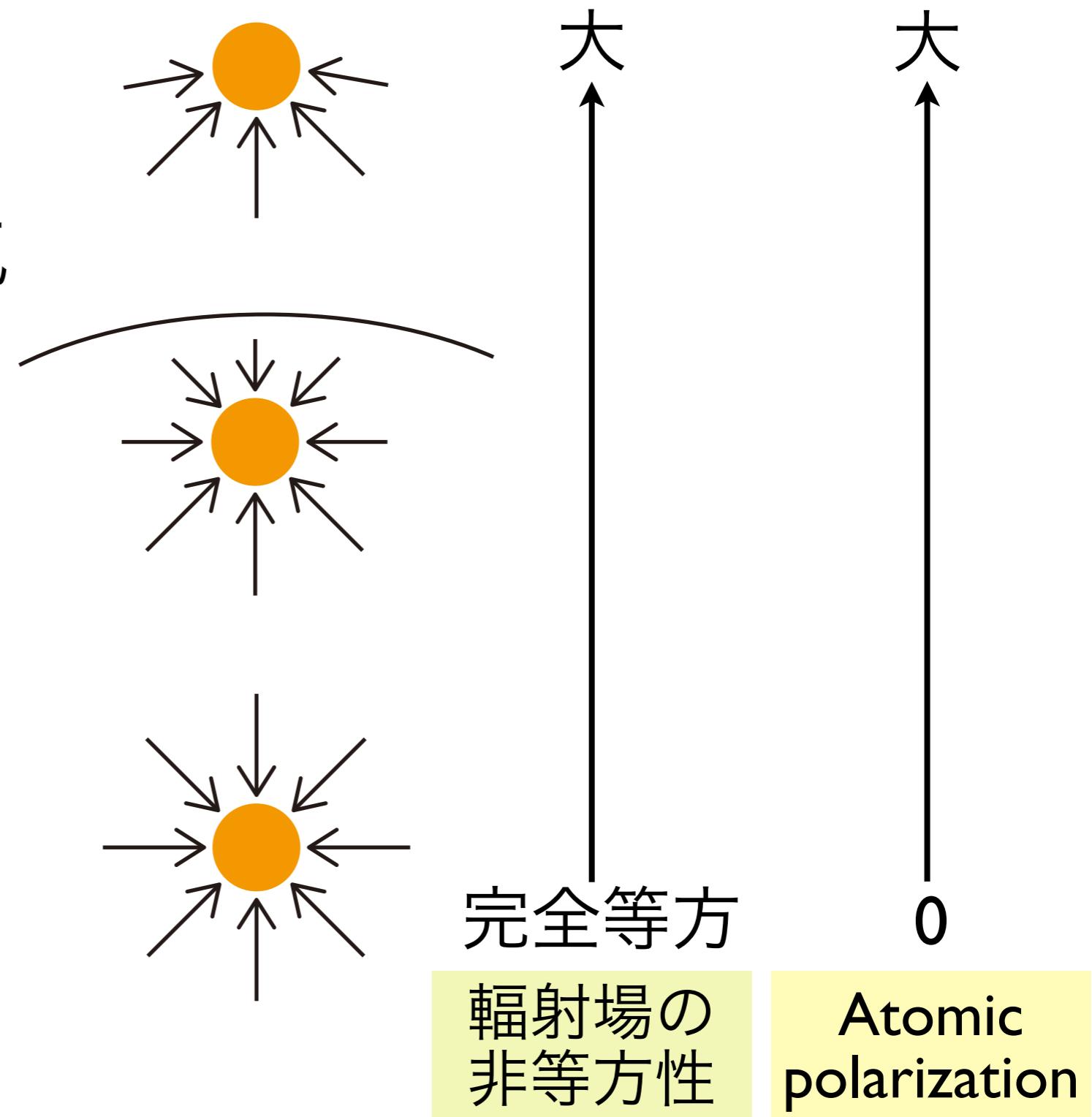
磁場診断を行う際の非等方

輻射場の重要性

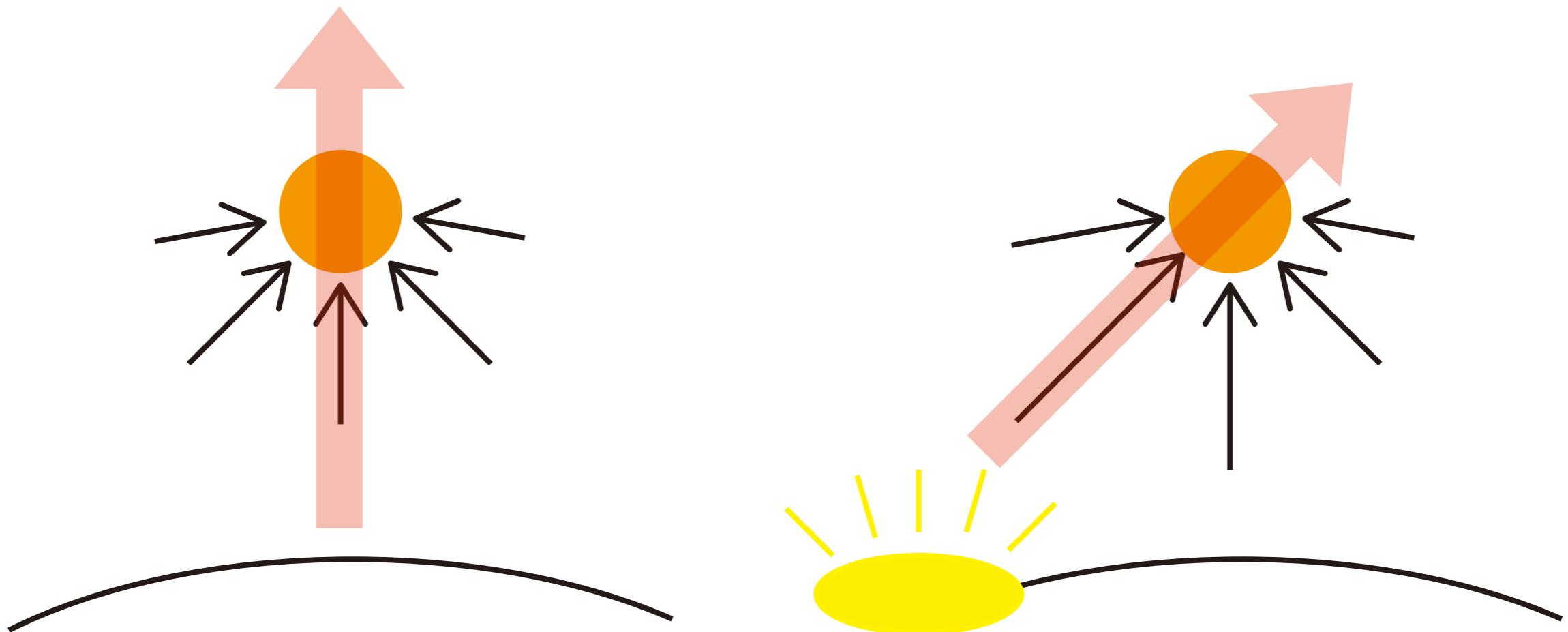
- Hanle効果を用いた磁場診断では, 偏光変調の様子から磁場強度と向きを導出する.
- そのためには, どれだけのatomic polarizationが生じているかを知る必要があるが, そのためには輻射場の非等方性を見積もることが必要不可欠.

非等方輻射場の見積り！

- 観測している大気の温度構造を反映した適切な大気モデルの選択



非等方輻射場の見積り2

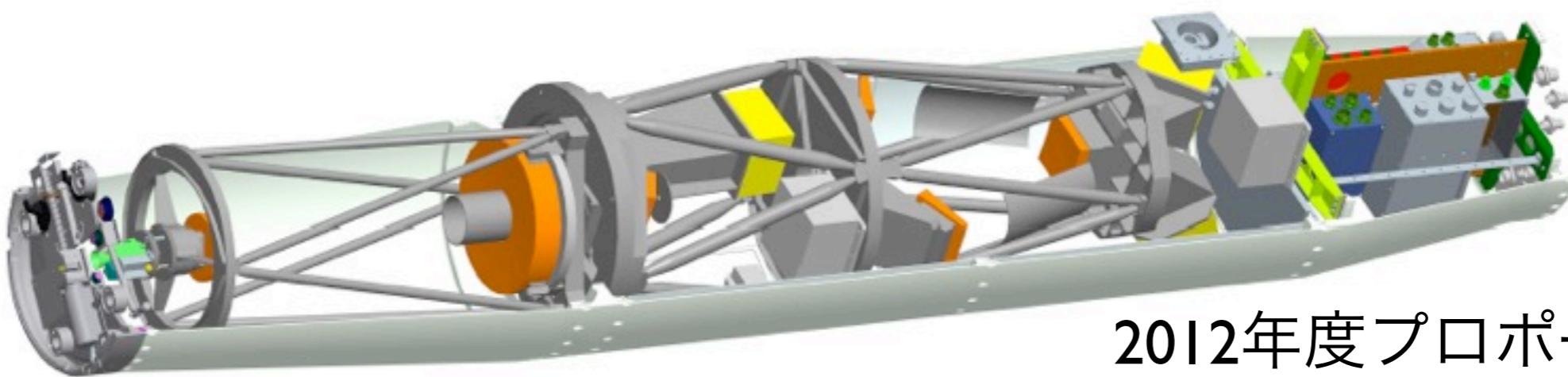


- 彩層～遷移層の2次元構造の把握

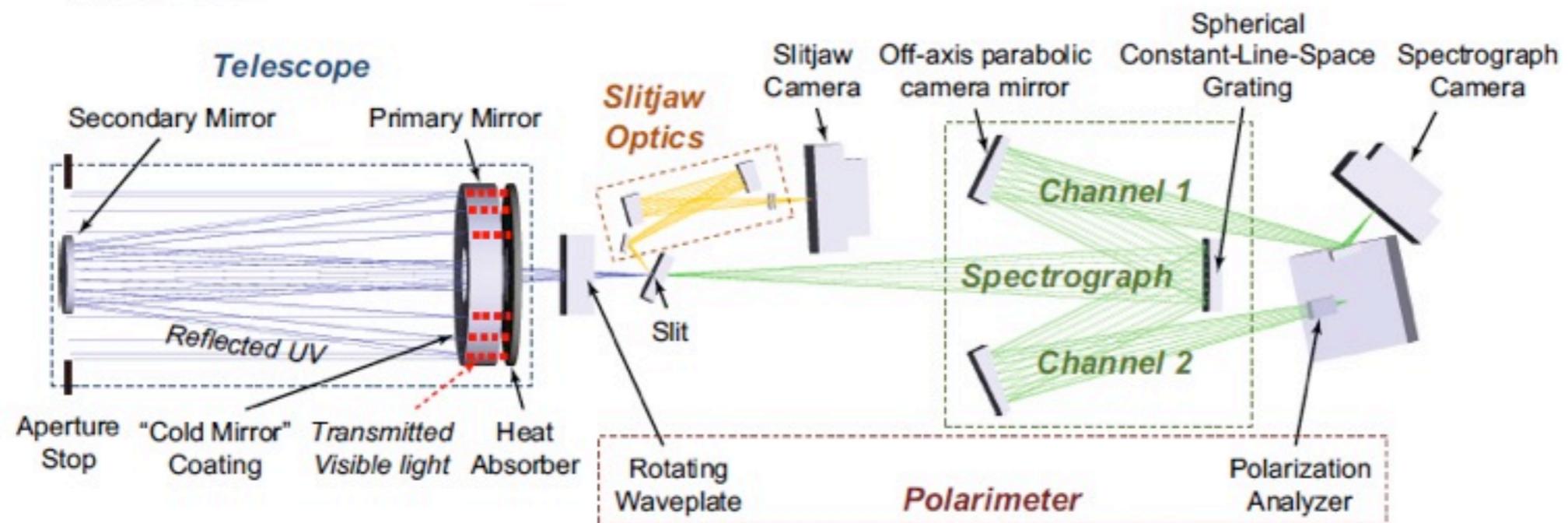
ALMAが担う役割

- 複数の周波数帯を用いて観測を行うことで彩層の温度構造に制限を与える。
- CLASPの空間分解能よりも充分高い空間分解能で観測を行うことで, 空間2次元構造を明らかにする。

CLASP観測装置の概要



2012年度プロポーザルより



30cmカセグ
レン望遠鏡

+

スリット
ジョー光学系

+

偏光分光器
直交2成分の直線
偏光の同時測定

CLASP specification

- 観測時間：5分!!!

偏光分光器

視野：400” (slit方向) × 1.45” (slit幅)

観測波長域： 121.6 ± 0.8 nm

空間分解能：2.2”

波長分解能： ~ 0.01 nm

撮像間隔(積算時間)：0.3 sec

Ly-aコアで0.1%の偏光精度を達成するのに必要な積算時間：~5分

Ly-aコアで0.1%の偏光精度を達成するのに必要な空間積算：~6.6”

スリットジョー光学系

視野：527” × 527”

空間分解能：2.9” (1.03”/pix)

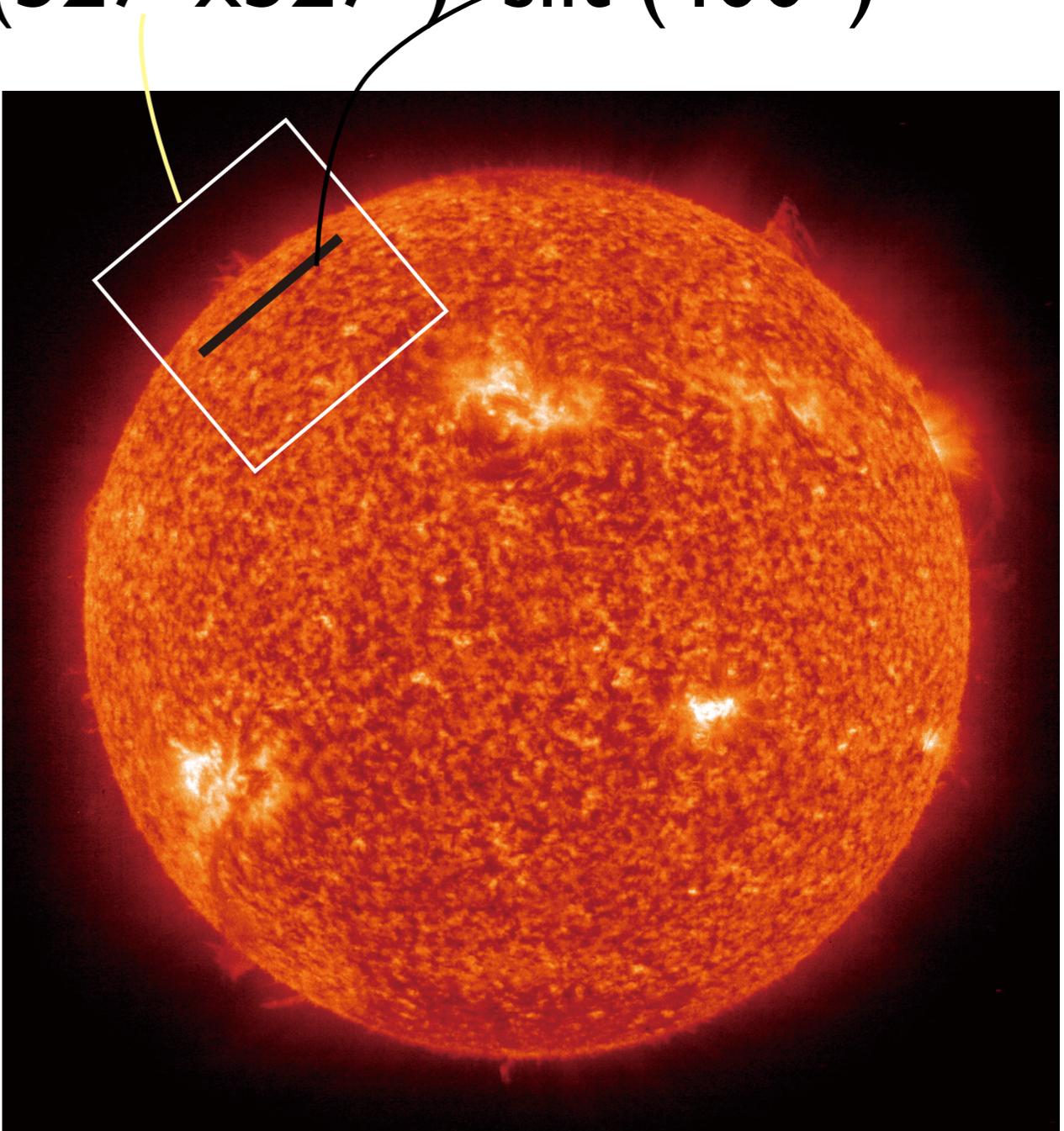
フィルター幅：10nm (FWHM)

撮像間隔：0.3 sec

CLASP target

slit-jaw (527''x527'') slit (400'')

- 観測領域 : atomic polarizationが大きな太陽リム($\mu=0.3$)
- primary target : 静穏領域
 - スリットは充分長いので, プロミネンス・スピキュール・プラージュなども視野内に収める



CLASP vs. ALMA

観測装置	FoV	空間分解能	時間分解能	周波数	FoV	空間分解能	時間分解能
SP (磁場測定)	400''×1.45''	6.6''	~5min	100GHz	Φ62''	0.38''	~1min
SP (強度のみ)	400''×1.45''	2.2''	0.3 sec	300GHz	Φ18''	0.12''	~1min
Slit-jaw	527''×527''	2.9''	0.3 sec	950GHz	Φ7''	0.04''	~1min

下条さんの資料より

CLASP vs.ALMA

観測装置	FoV	空間分解能	時間分解能	周波数	FoV	空間分解能	時間分解能
SP (磁場測定)	400''×1.45''	6.6''	~5min	100GHz	Φ62''	0.38''	~1min
SP (強度のみ)	400''×1.45''	2.2''	0.3 sec	300GHz	Φ18''	0.12''	~1min
Slit-jaw	527''×527''	2.9''	0.3 sec	950GHz	Φ7''	0.04''	~1min

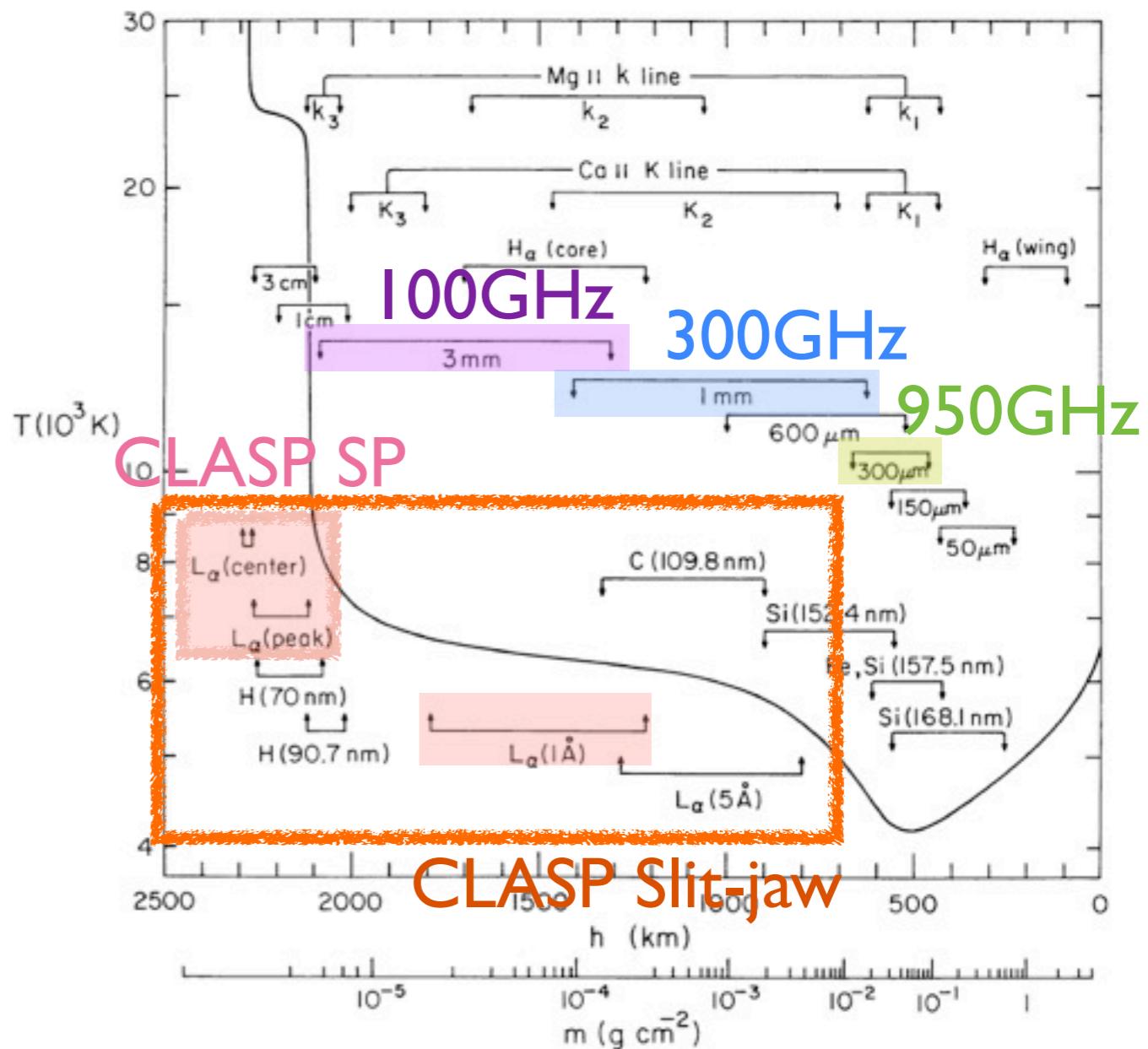
下条さんの資料より

2次元構造の把握、位置合わせの観点から、
視野ができるだけ広いほうが望ましい。

CLASP vs.ALMA

- Hanle効果が働き, 磁場測定が行えるのはLy-alpha中心付近($\pm 0.02\text{nm}$)のみ.
- できるだけ彩層上部の測定を行い, CLASPの測定範囲とオーバーラップさせたい.

The average quiet-Sun temperature distribution from obs.



Vernazza et al. (1980)

- CLASPとの共同観測で行うALMA観測(案)
 - 周波数の最も低いBand 3を用いた4周波数帯で同時観測.
 - ALMAの特異性
 - ALMAと同様, 大気の温度構造を制限するのに使用することを考えているCLASPのLy-alpha wingやIRISのデータは, 複雑なnon-LTEを考慮しなければならない. ALMAはその必要がなく, 良いレファレンスとなる.
 - CLASP slit-jawのフィルターは透過幅が広い.そのため, slit-jawでは取得が困難であったLy-alpha center付近での2次元構造を得ることができる.

質問

- 時間分解能をもっとあげられないか?
- 強度の時間変化を用いたダイナミクスを追求する観点からも時間分解能は高い方が良い。
- 光学的厚みはどのくらい? 複数の周波数帯を選んだとき, 高さ方向の差分はどれくらい?
- ポイントティング精度はどのくらいか?
- 実際に観測ターゲットをどのように指定するのが良いのか?