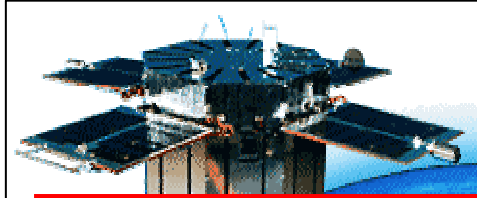


# スペースからの 太陽観測の現状と将来

## 磁氣的宇宙 (Magnetic Universe)

常田佐久  
(国立天文台)

# 日本のスペース太陽観測の歩み

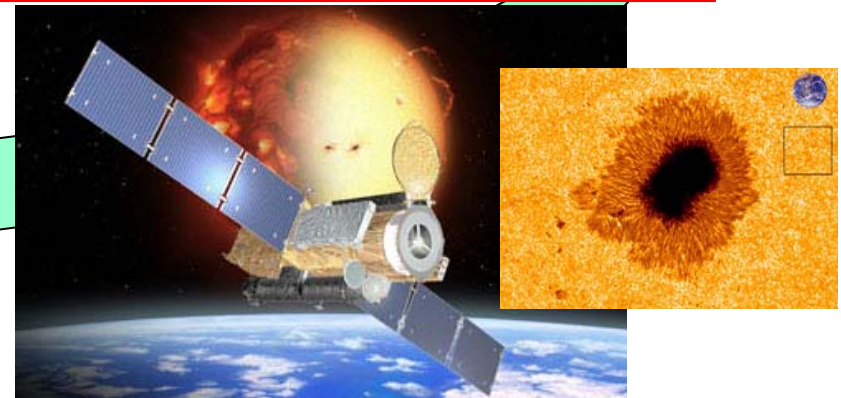
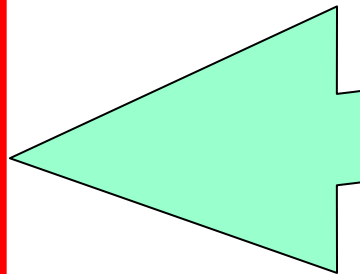


ようこう/SOLAR-A (1991-2001)



太陽物理における未解決問題  
磁場の起源(ダイナモ)  
彩層とコロナの加熱とダイナミズム  
(粒子加速)

次期太陽ミッション  
SOLAR-C  
2010年代半ば



光球、彩層、遷移層、コロナ、フレア  
可視光、極紫外線、X線

# 宇宙における多様な磁場の働き

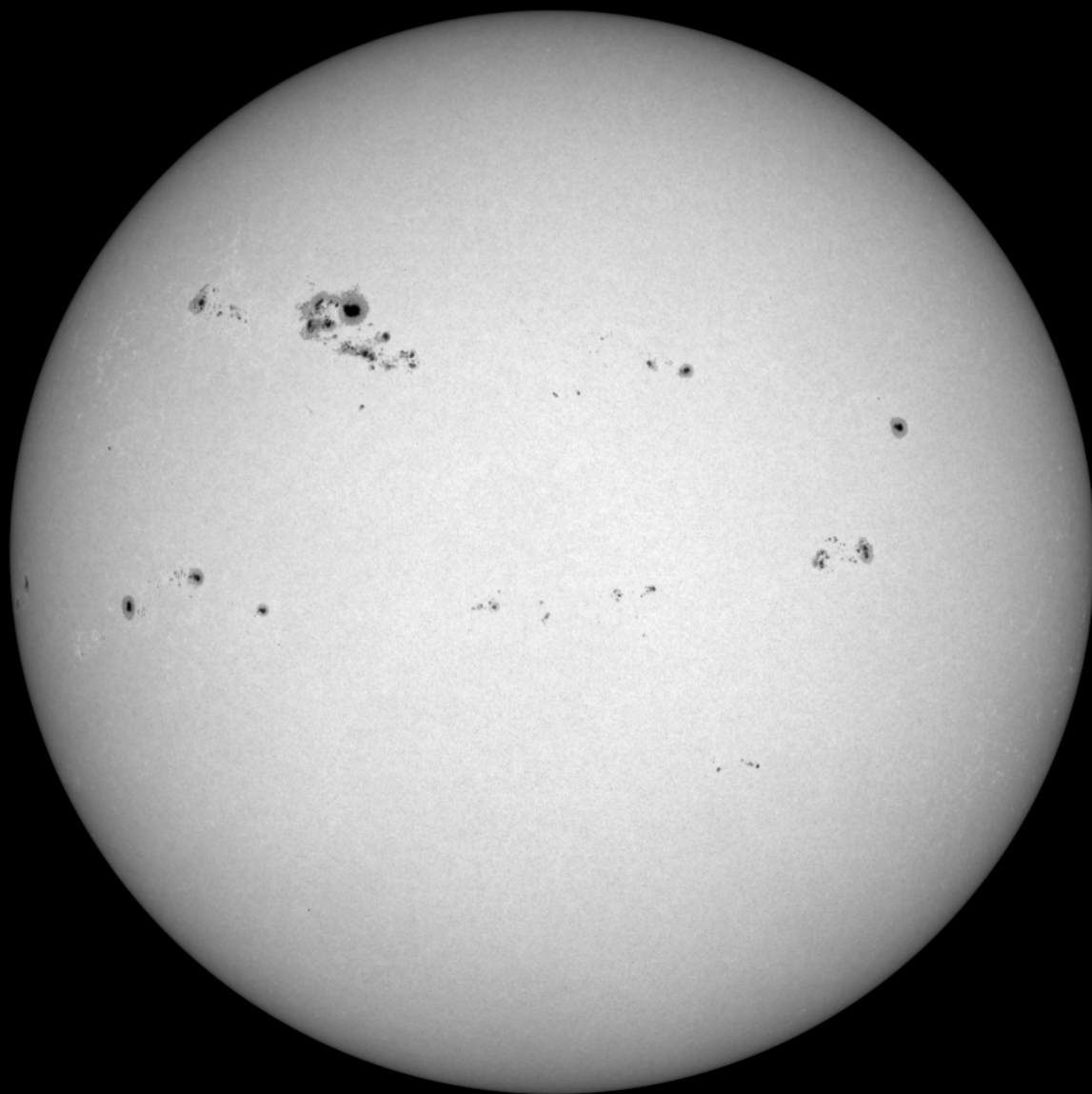
- 非一様な流れによる磁場の増幅(ダイナモ)
- 波によるエネルギーの輸送
- エネルギーの蓄積
- 磁気リコネクションにより蓄積したエネルギーをプラズマ加熱やジェット・非熱的粒子加速で放出
- MHD不安定性による物質の噴出
- 物質と熱輸送の抑圧(磁場に垂直方向)
- 対流の抑圧

# SOLAR-C A案、B案

- A案:未踏の**太陽極域探査**
  - 黄道面(目標40度)を離れ未踏の太陽極域の太陽内部診断と太陽ダイナモ機構の解明
- B案:**分光能力を大幅に強化した高分解能衛星**
  - 撮像から分光へ・可視光から紫外線へ。
  - ひので:高分解能+(偏光)分光の威力を見せつけた
  - ひので:彩層を見る能力がない
  - 光球—彩層—コロナをシステムとしてとらえる
  - 彩層・コロナ加熱機構の解明

A rotating solitary  
star has oscillating  
intense magnetic  
fields

回轉  
対流



# ダイナモ機構

※誘導方程式

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) + \eta \nabla^2 \vec{B}$$

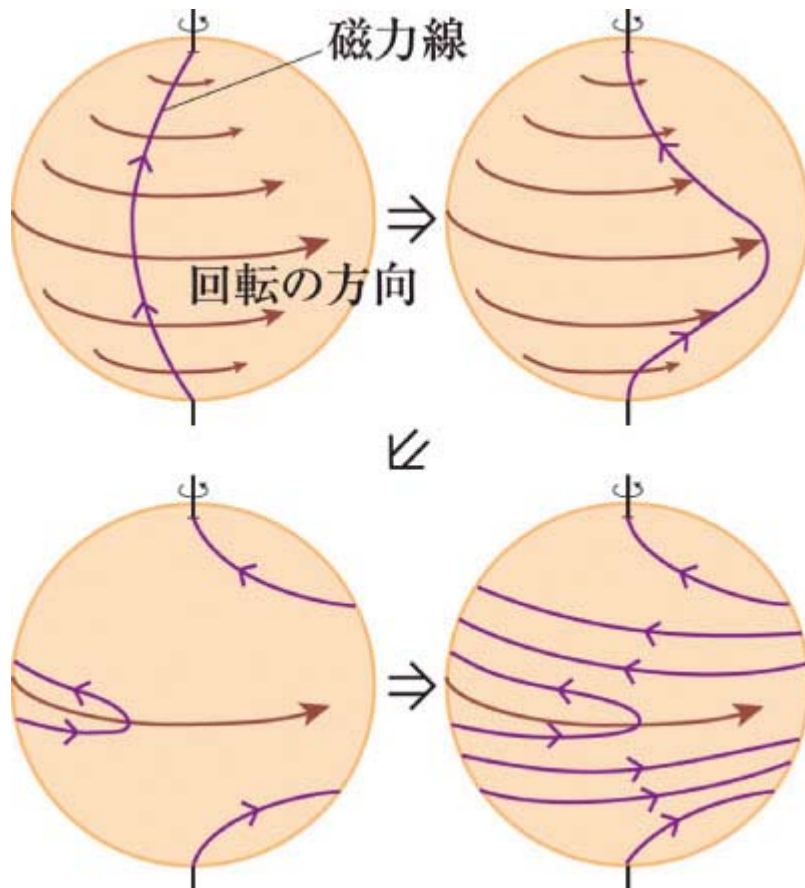
例

南北方向の磁束管(ポロイダル磁場)から  
東西方向の磁束管(トロイダル磁場)へ

運動エネルギー

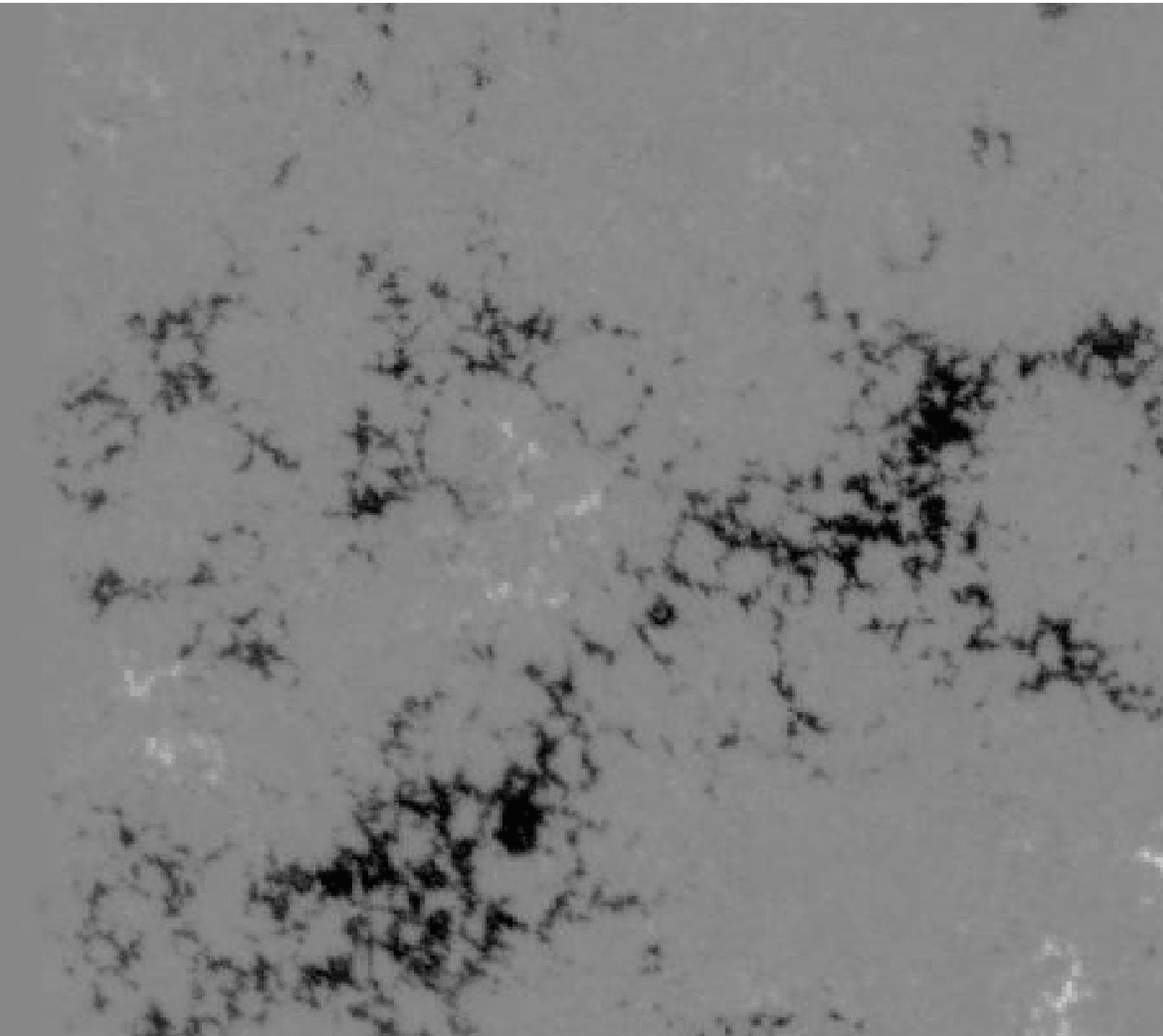


磁場エネルギー



+活動領域(黒点)を形成する  
ようなグローバルな磁場を  
生み出すシナリオ  
+太陽全体で駆動するダイナモ

グローバルダイナモ



# Primary Questions

- How is the solar magnetic fields generated, transported? (global and local dynamo process)
- Conversion of magnetic energy to create X-ray corona, flares and eruptions

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{V} \times \mathbf{B} + \eta \Delta \mathbf{B}$$



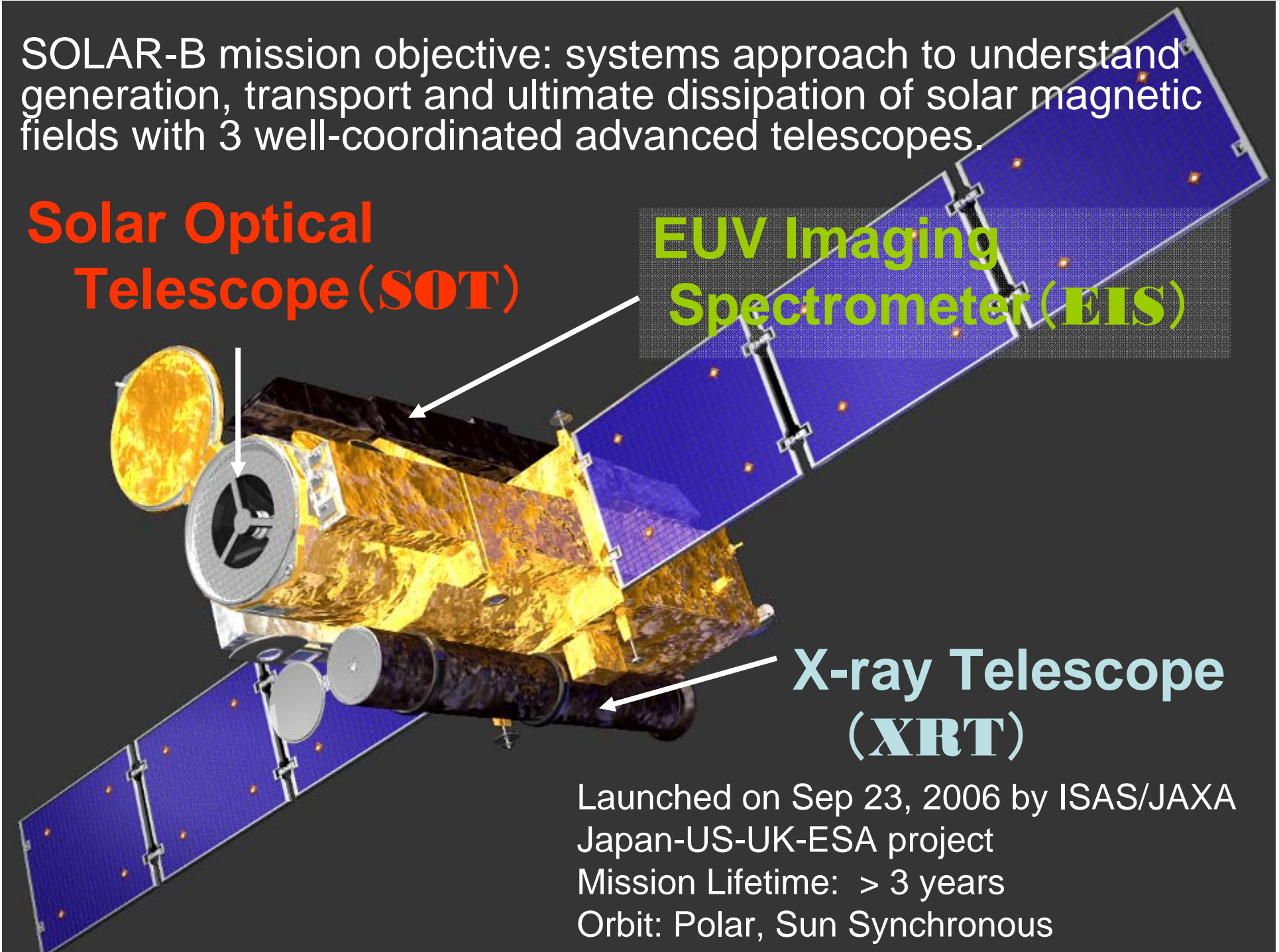
SOLAR-B mission objective: systems approach to understand generation, transport and ultimate dissipation of solar magnetic fields with 3 well-coordinated advanced telescopes.

**Solar Optical Telescope (SOT)**

**EUV Imaging Spectrometer (EIS)**

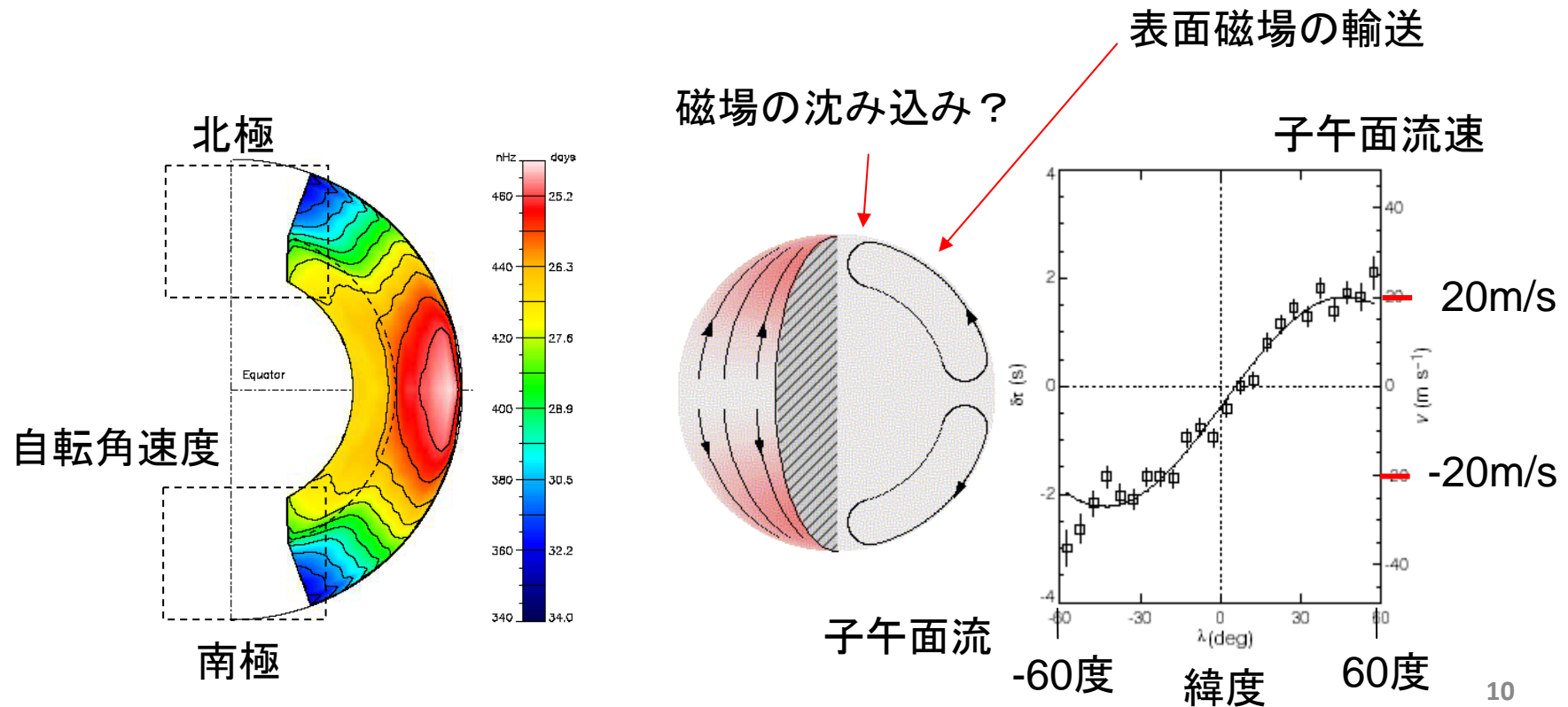
**X-ray Telescope (XRT)**

Launched on Sep 23, 2006 by ISAS/JAXA  
Japan-US-UK-ESA project  
Mission Lifetime: > 3 years  
Orbit: Polar, Sun Synchronous



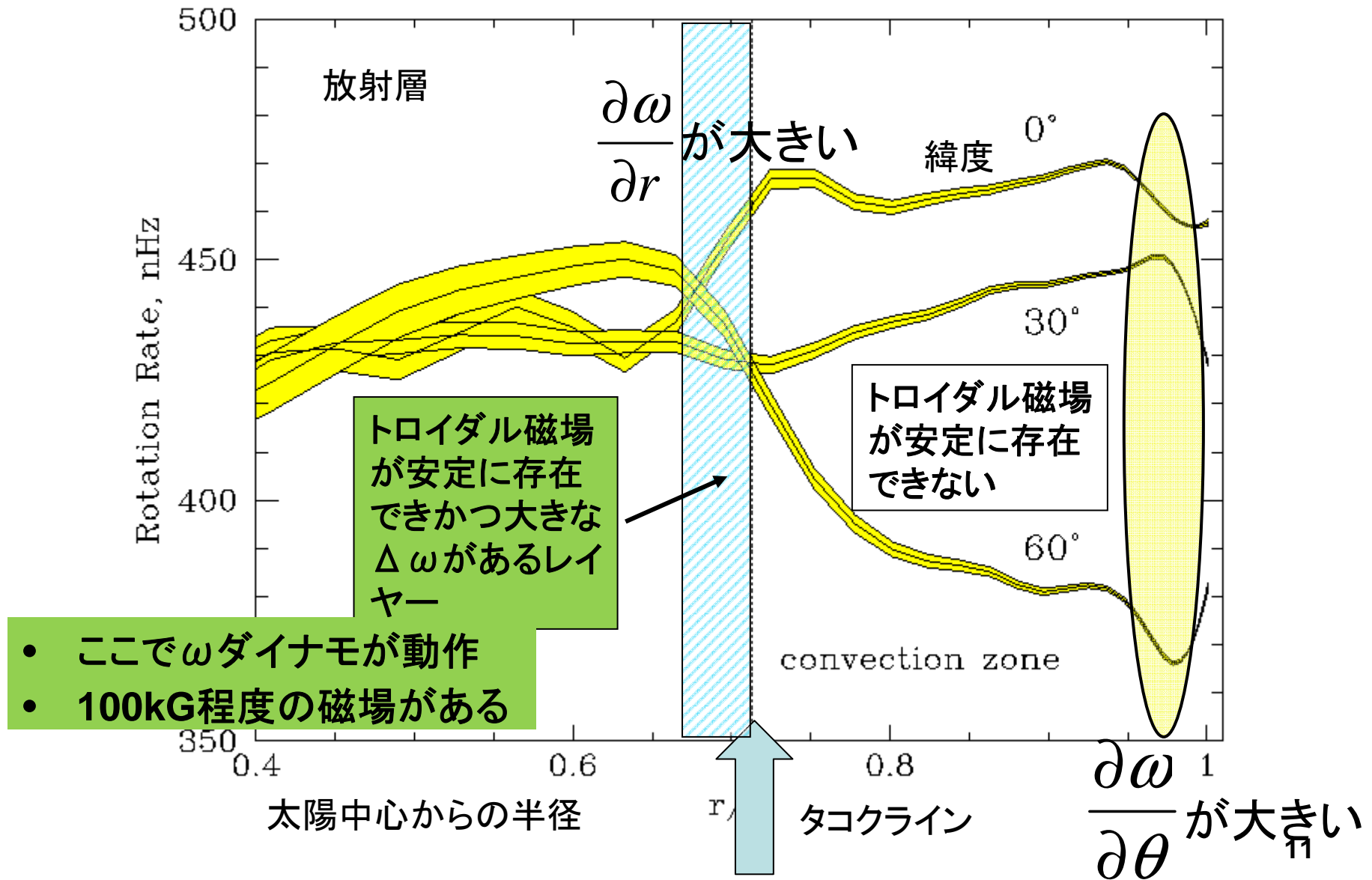
# 太陽内部自転角速度と子午面流

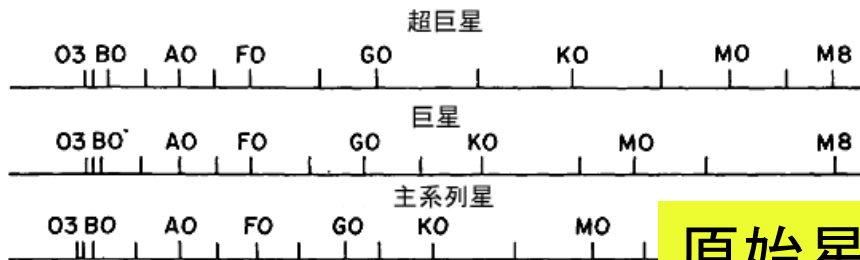
- 日振学から自転角速度と子午面流が分かり、インダクション方程式を解けるようになりつつある。しかし極領域は地球方向からの観測では測定困難で**対流層全域の速度場情報が必要**。⇒黄道面脱出した測定が必要。



# 太陽内部の角速度分布: どこでダイナモが起きるか?

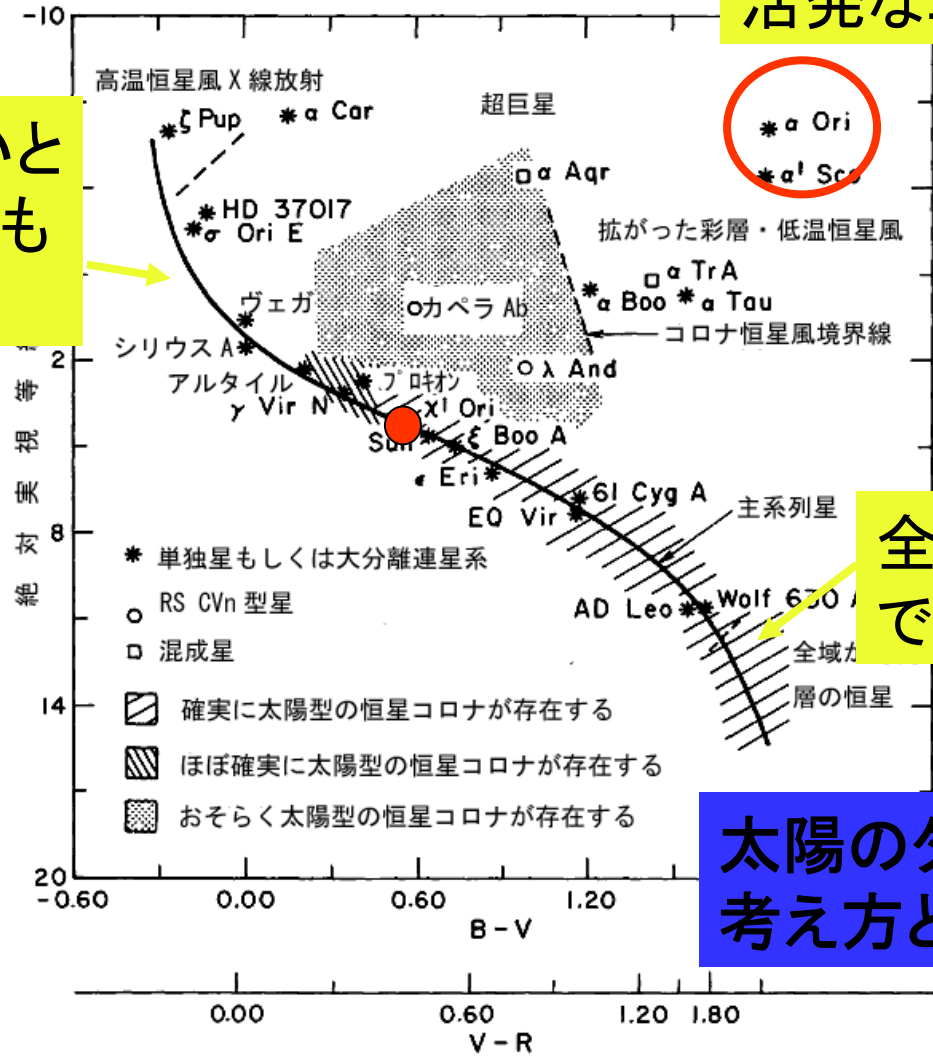
Tachocline: 対流層底部付近で自転角速度が急激に変わる層





原始星(対流が発達)  
活発なコロナ活動

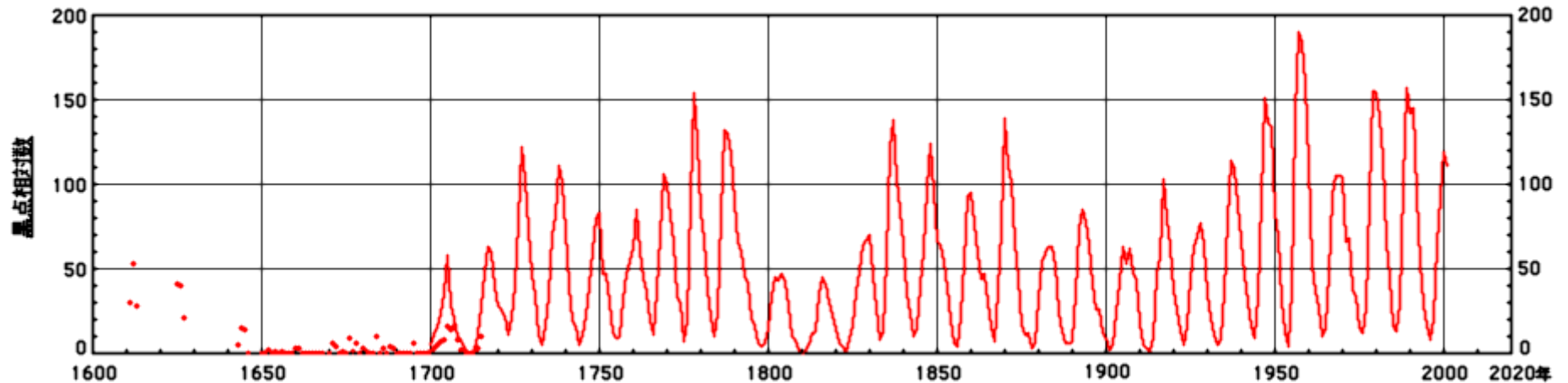
対流層がないと  
通常のコロナも  
ない



全域が対流層  
でもコロナがある！

太陽のダイナモの標準的  
考え方と整合しない

# 1650～1700年黒点がなくなる 太陽のダイナモが停止！



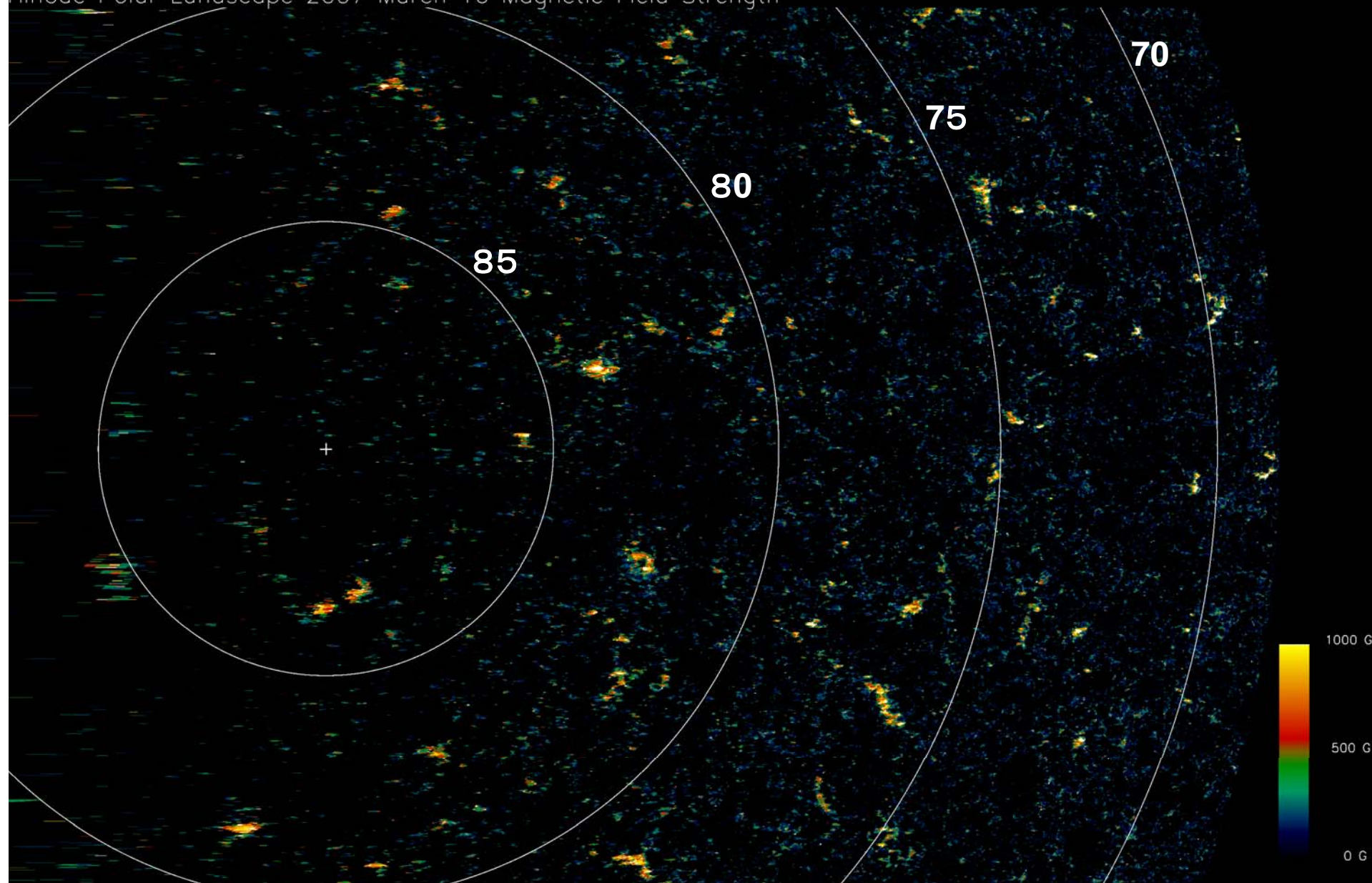
マウンダー極小期を説明できる理論はない

# 宇宙における強すぎる磁場問題

- Early universe  $10^{(-15)}$  G?
- (Clusters of) Galaxy a few  $10^{(-6)}$  G
  - *can not make this field from early universe with  $\omega$ -dynamo*
- Late type stars  $10^{(3)}$  G *super equipartition*
- **Bottom of convection zone  $10^{(6)}$  G? *super equipartition***
  - 強すぎてローレンツ反作用で差動回転を止めてしまう***
- Pulsar  $10^{(12)}$  G Compression and fossil
- Magnetar  $10^{(15)}$  G Needs dynamo
- ***How does Universe create strong field?***
  - ***fossil field,  $\alpha$   $\omega$ -oscillatory dynamo, turbulent dynamo, convective collapse***

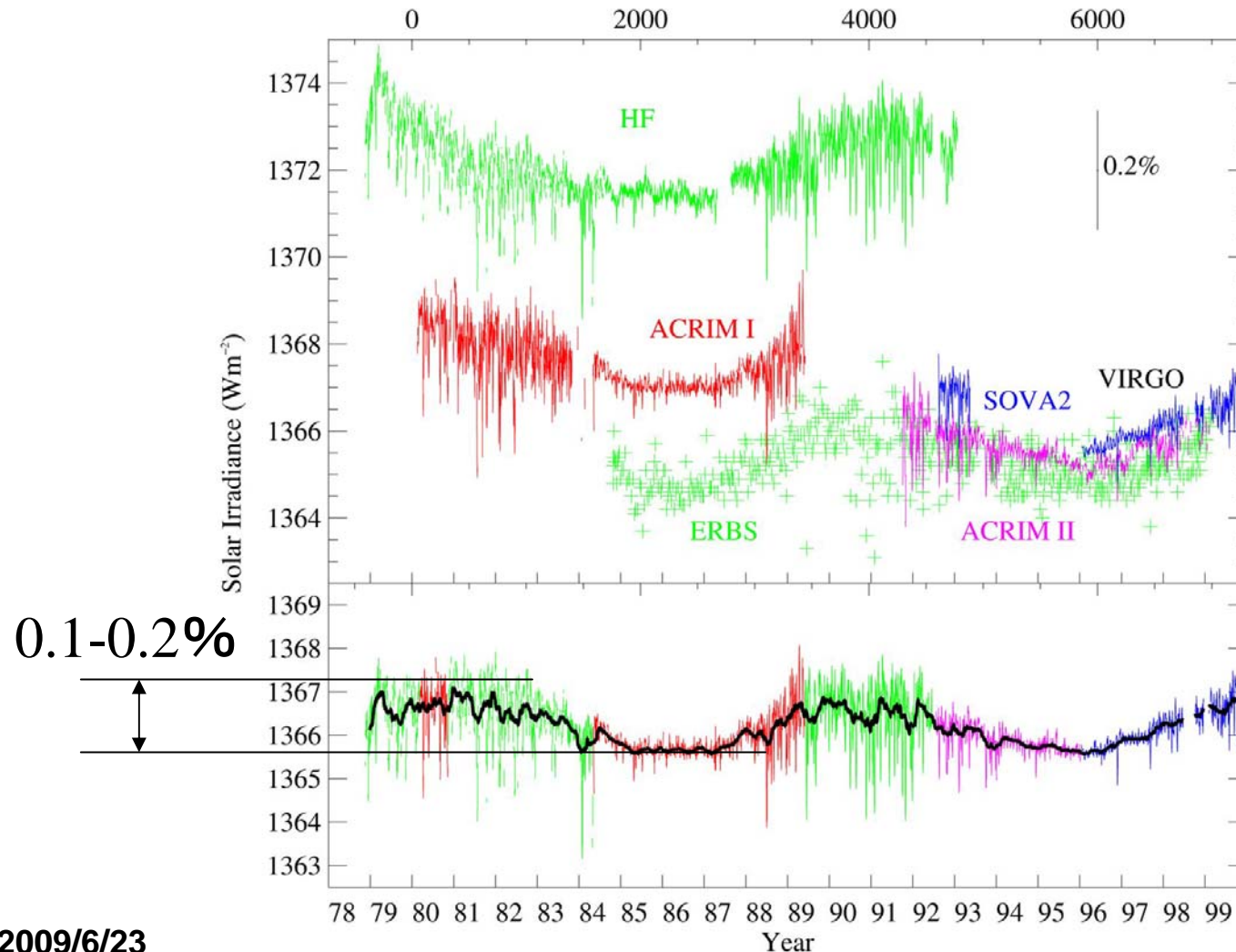
# 極磁場 (ポロイダル磁場) は強い

Hinode Polar Landscape 2007 March 16 Magnetic Field Strength



# 太陽定数は定数？

## 太陽定数の変動の大発見

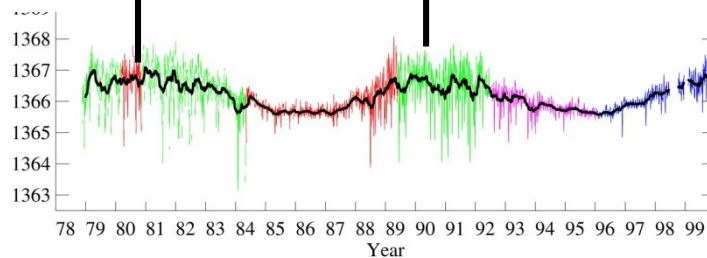
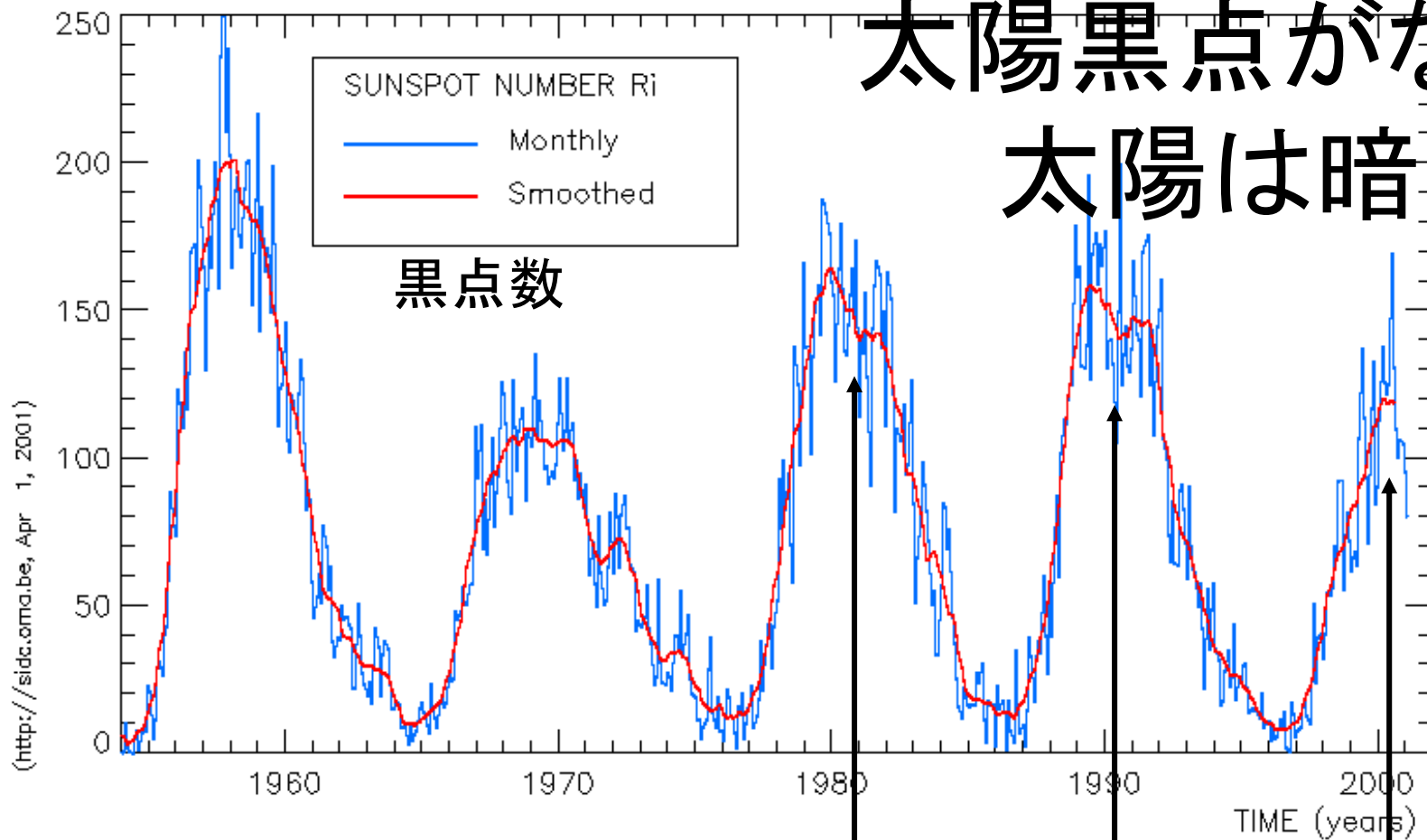


2009/6/23

16

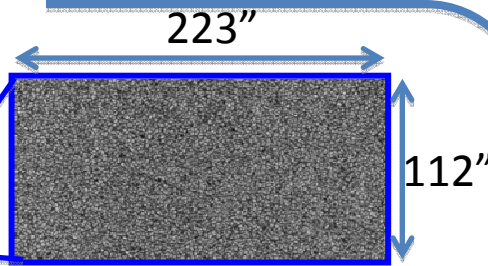
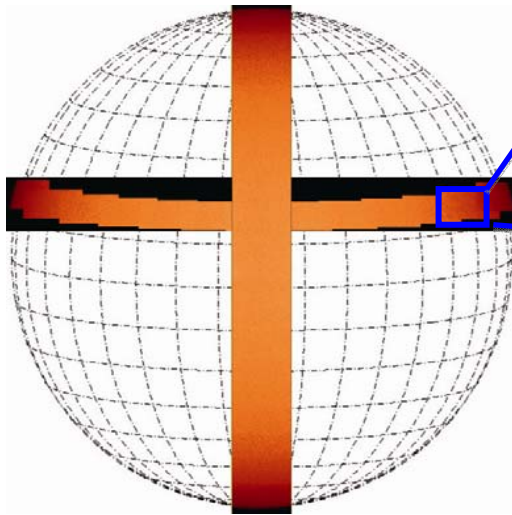


# 太陽黒点がないと 太陽は暗い



# Precision data analysis

Hinode Observation



red :  
668.4[nm],  
blue:  
450.5[nm]

Precision calibration  
of photometric data

Flat fielding

Temperature-  
dependent CCD Q.E.

SOT throughput

Correct effect of

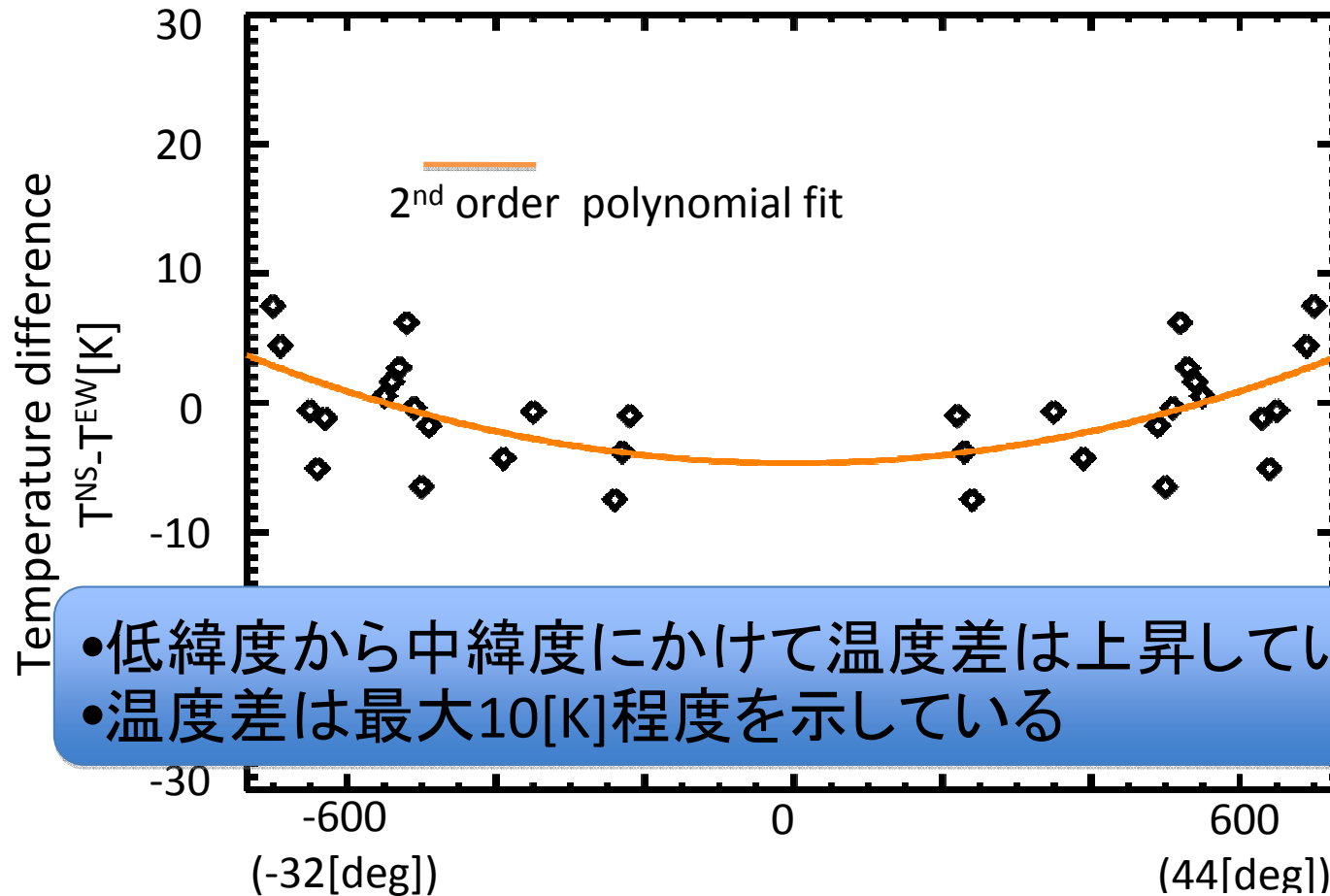
Limb-darkening

Faculae

Planck law

Temperature distribution along meridional line

# 太陽面の温度分布は不均一（ひので） 対流と回転の相互作用



- 低緯度から中緯度にかけて温度差は上昇している。
- 温度差は最大10[K]程度を示している

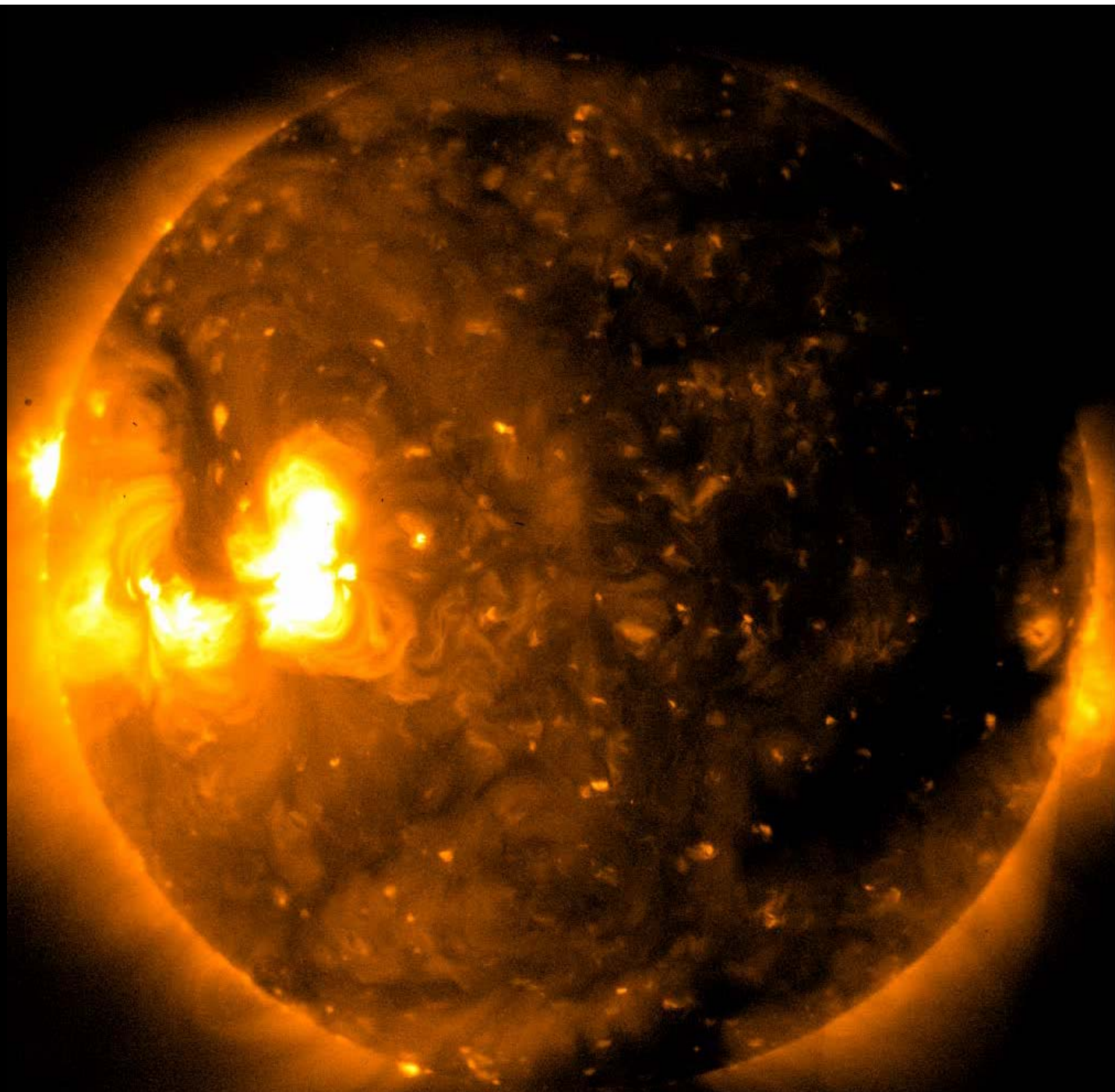
Distance **新しい内部診断の手法？**

# Primary Questions

- How is the solar magnetic fields generated, transported? (global and local dynamo process)
- Conversion of magnetic energy to create X-ray corona, flares and eruptions

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{V} \times \mathbf{B} + \eta \Delta \mathbf{B}$$

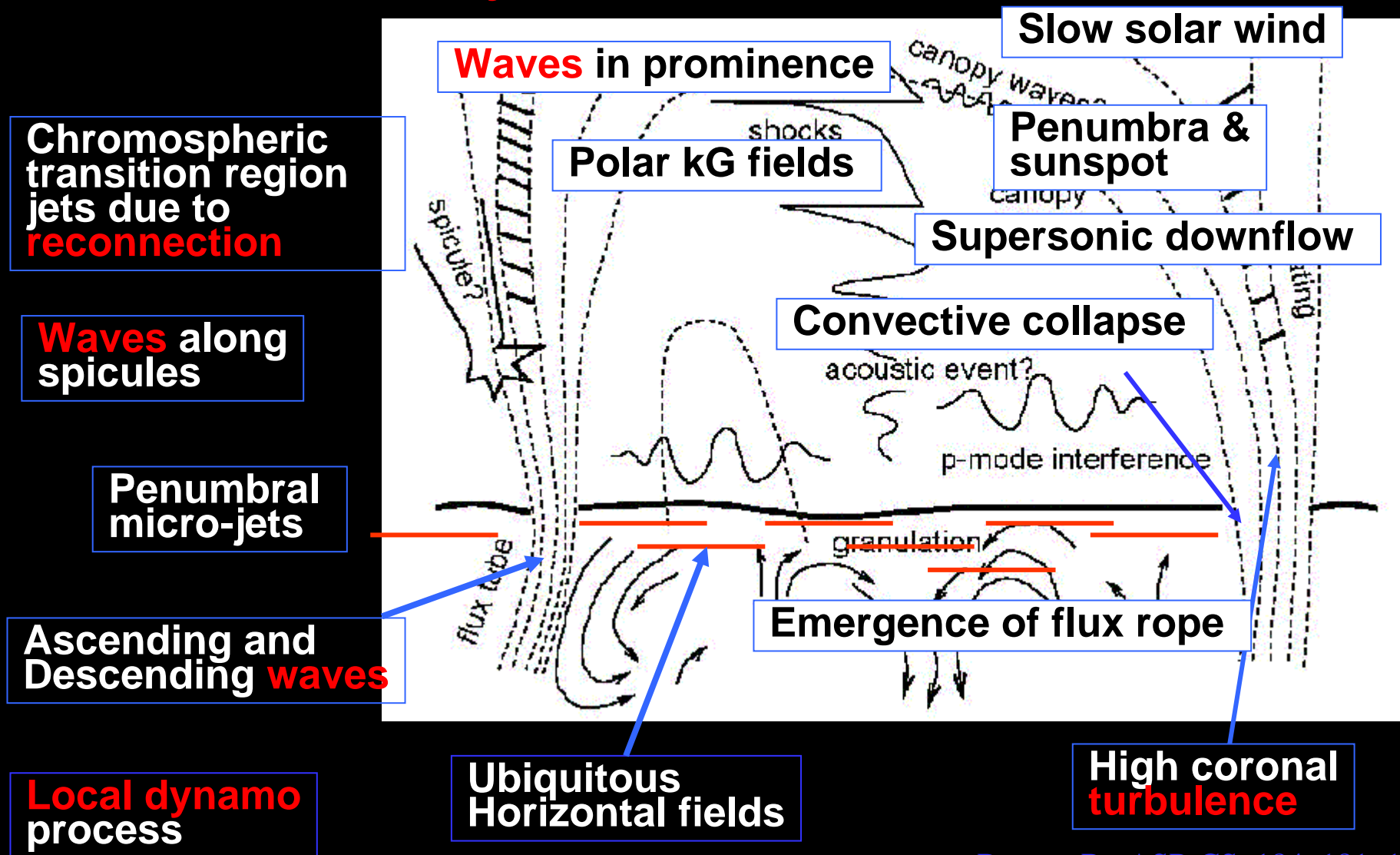
**磁気エネルギーは散逸する！**



*Hinode/XRT: 2007-01-03 16:19:03UT*

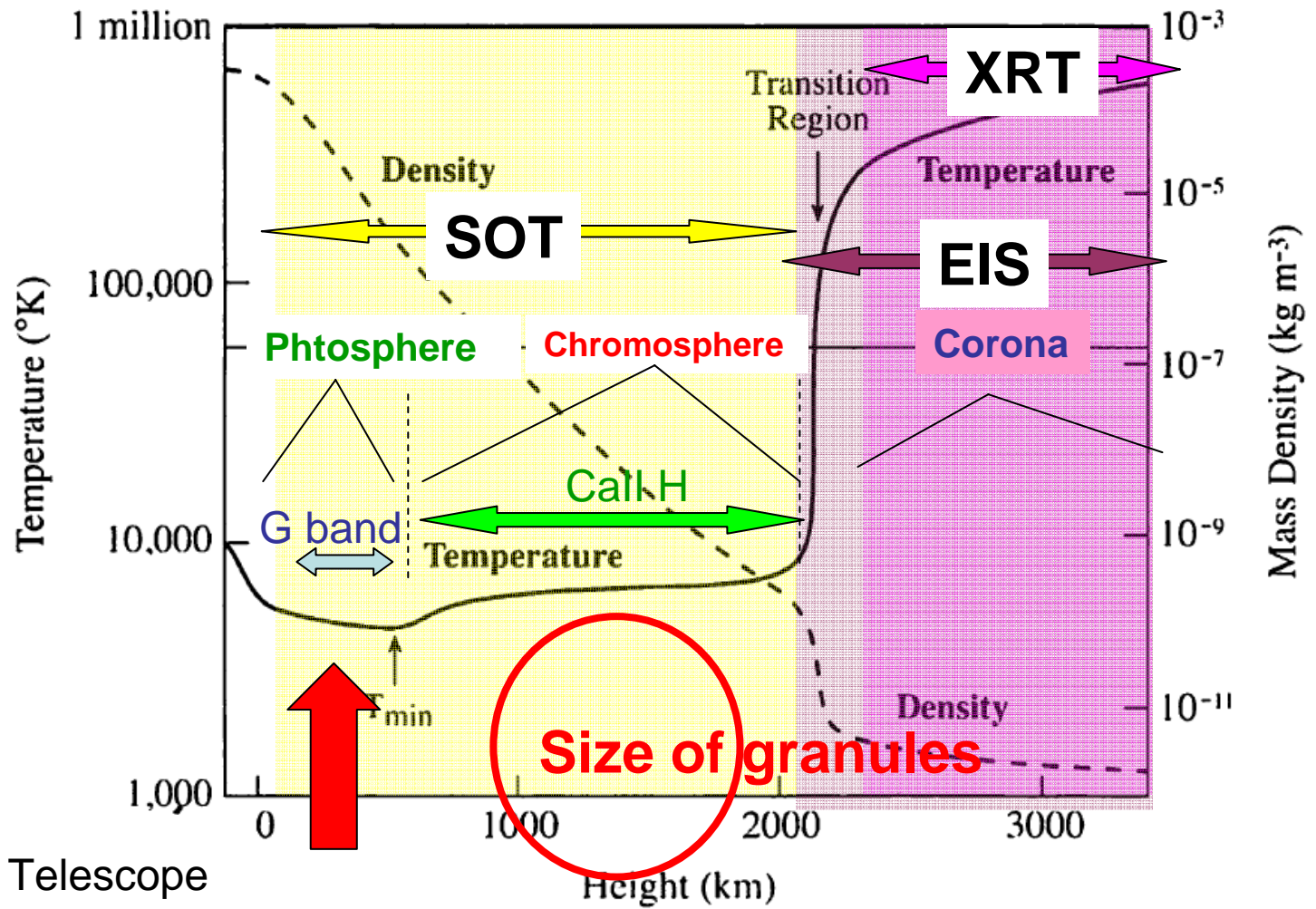
# Hinode discoveries golden age for solar physics!

**Reconnection, dynamo, turbulence, waves**



**Non-quiet**  
**Quiet Sun**  
**X-ray corona**

# Photosphere and corona

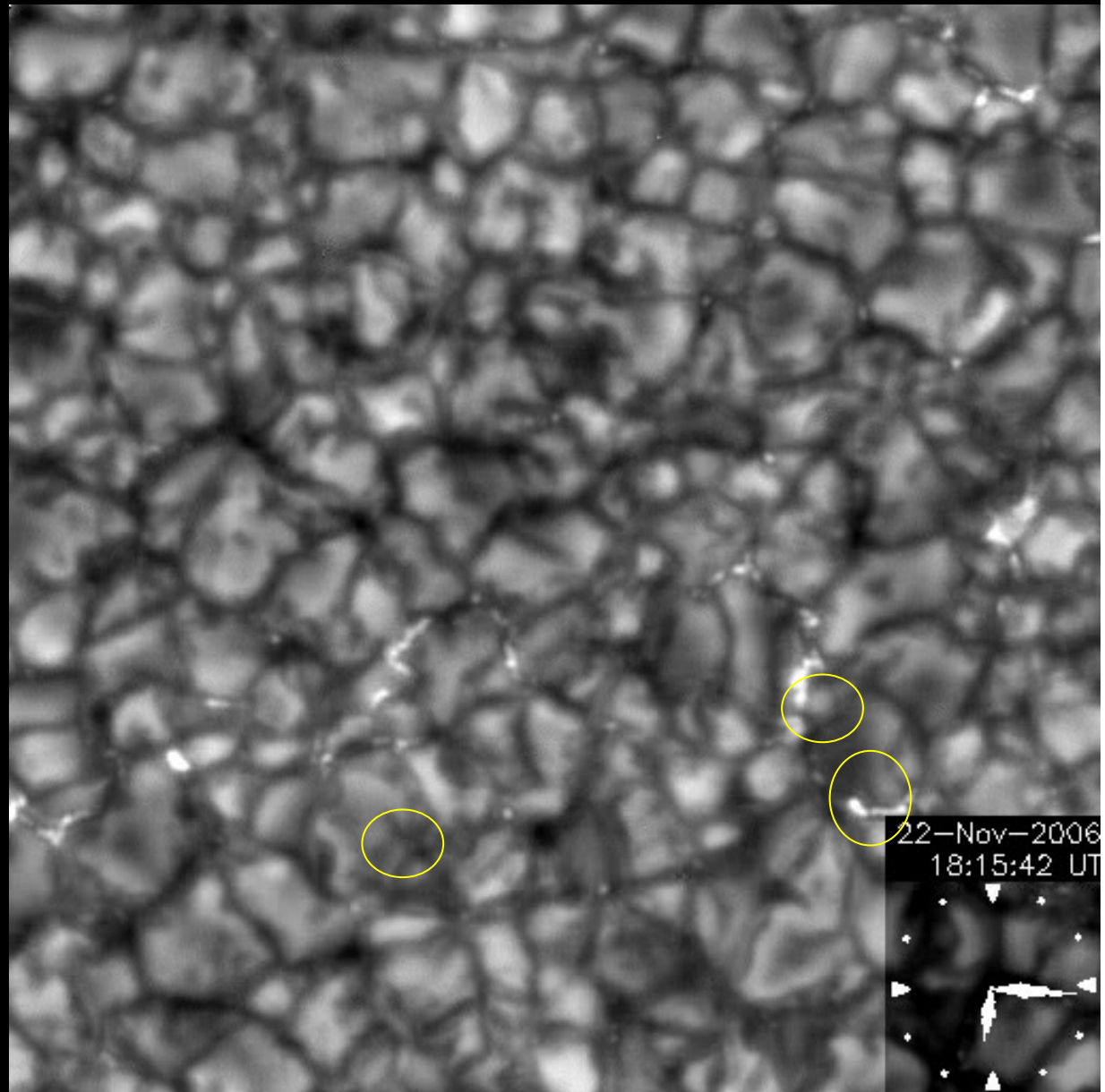
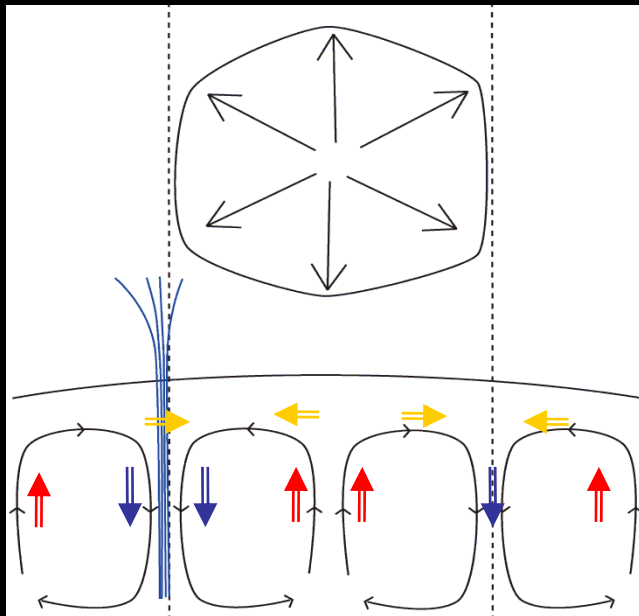


SOT: Solar Optical Telescope  
EIS: EUV Imaging Spectrometer  
XRT: X-ray Telescope

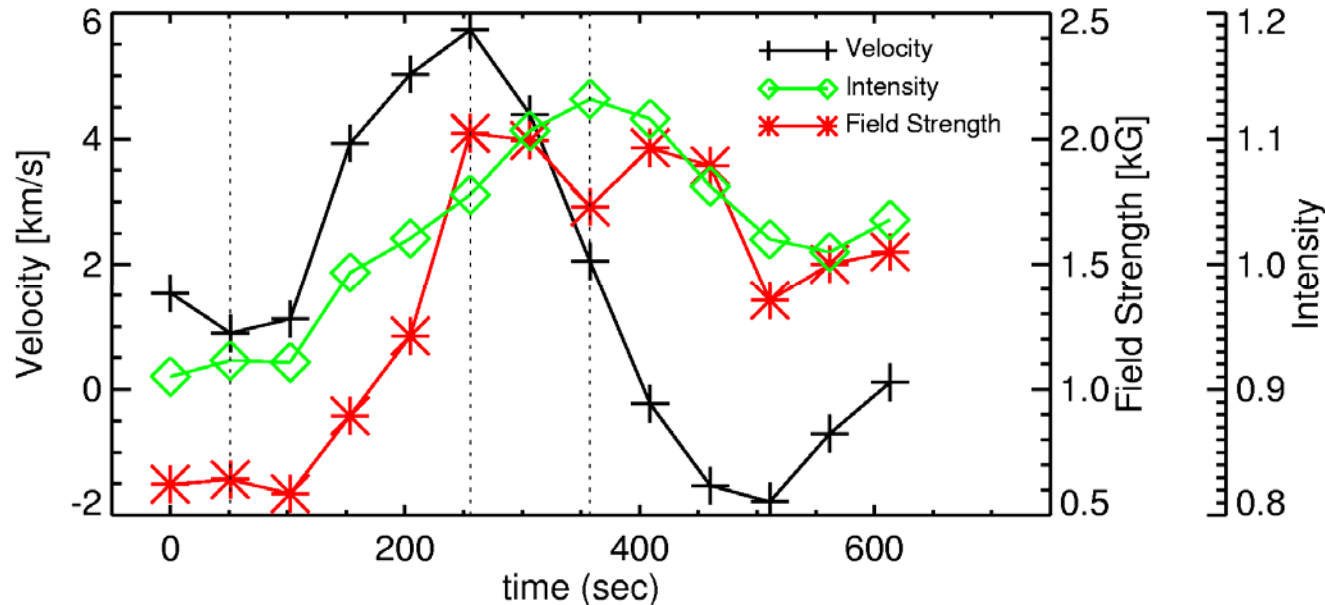


# The paradigm: ubiquitous *vertical* fields

- Both polarities
- Strong kG magnetic fields
- Field strength larger than equi-partition  $B$  (400G)
- Located in inter-granules



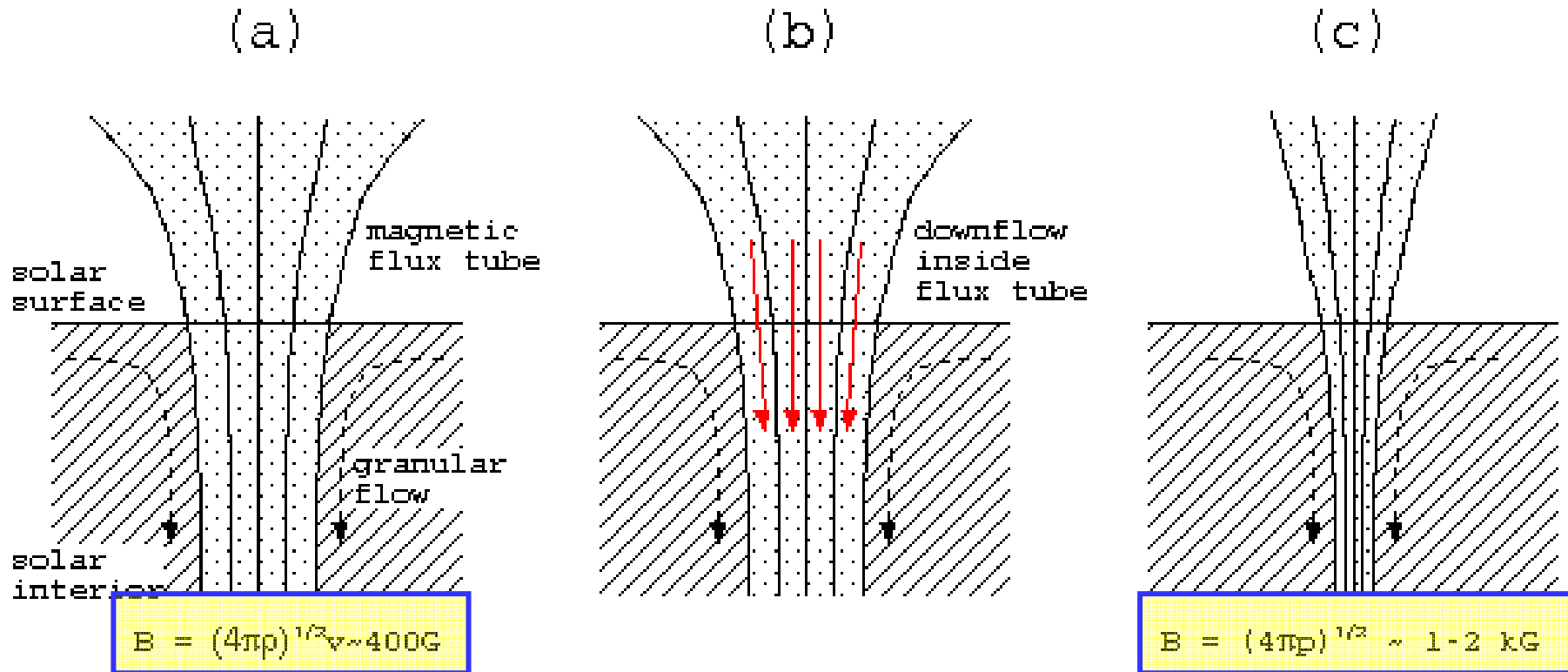
# Finally discovered 30 years after initial prediction: Magnetic field intensification due to convective collapse



The initial field strength of  $\sim 400$  G is intensified up to  $\sim 2000$  G as the downflow grows to 6 km/s in 150 s. The field strength then remains above 1000 G throughout the sequence. A transient upflow of  $\sim 2$  km/s at the end of the sequence.

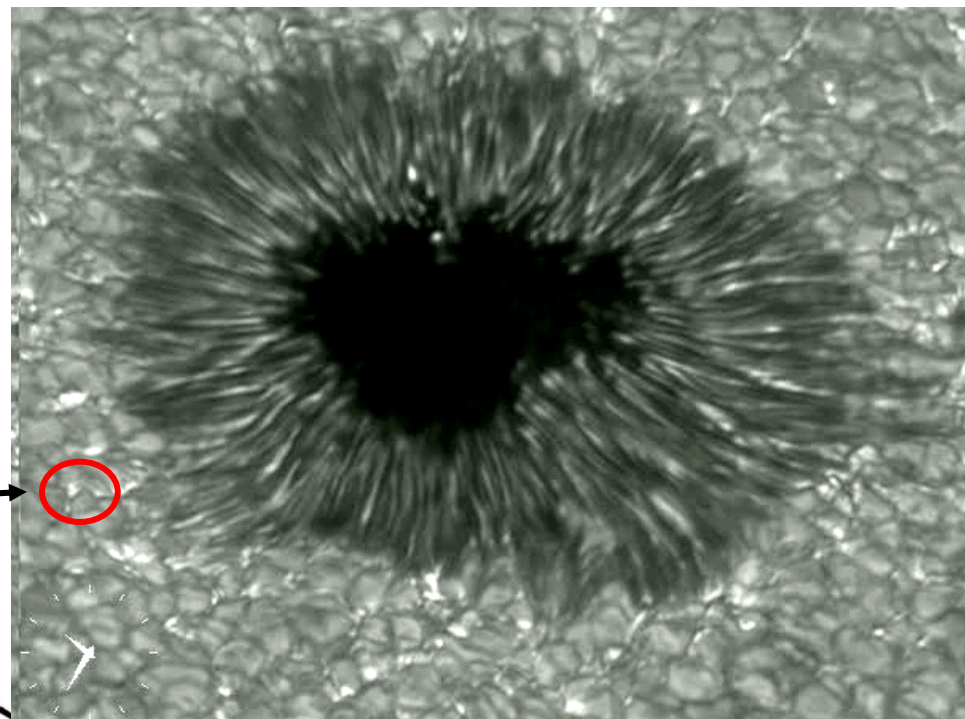
# How are ubiquitous kilo-G flux tubes formed?

Parker (1978); Hasan (1985), Hasan et al. (2003), Bunte, Hasan, Kalkofen, (1983)

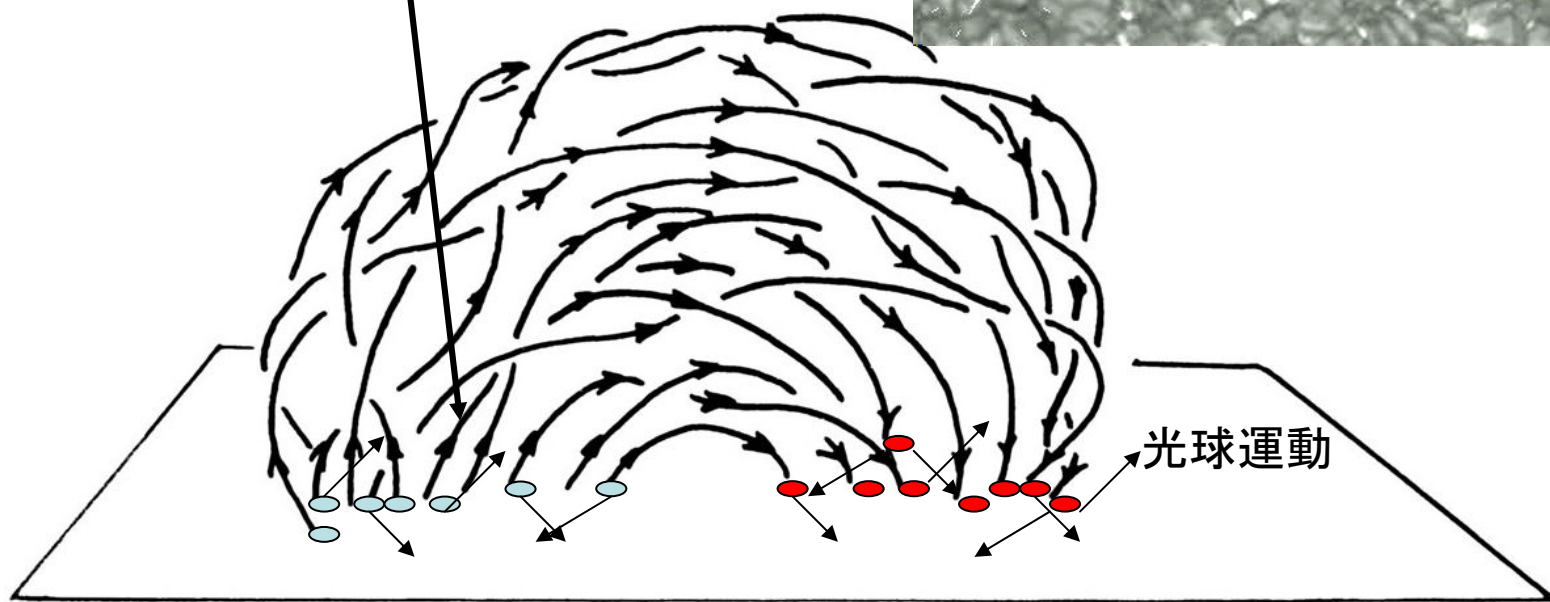


- As magnetic Pressure increases, heat flux from the granule decreases.
- Flux tube cools due to radiation loss, and down flow grows.
- Flux tube shrinks due to the decreased pressure inside, and then the field strength increases; kilo-gauss flux tube appears.

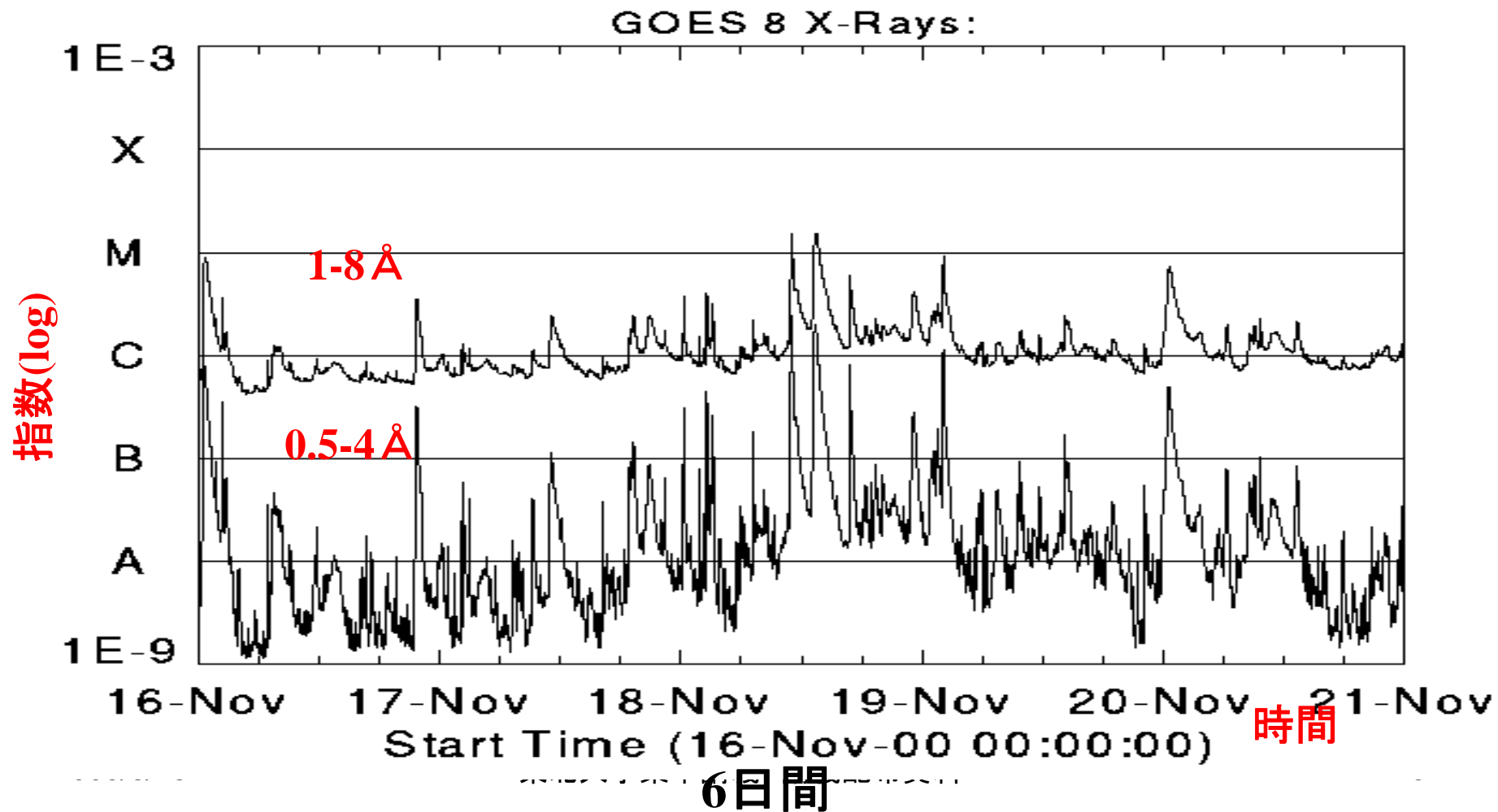
Parkerのナノフレア仮説：  
こんなことが本当に  
起きるの？



0.1秒角の磁気  
要素に対応



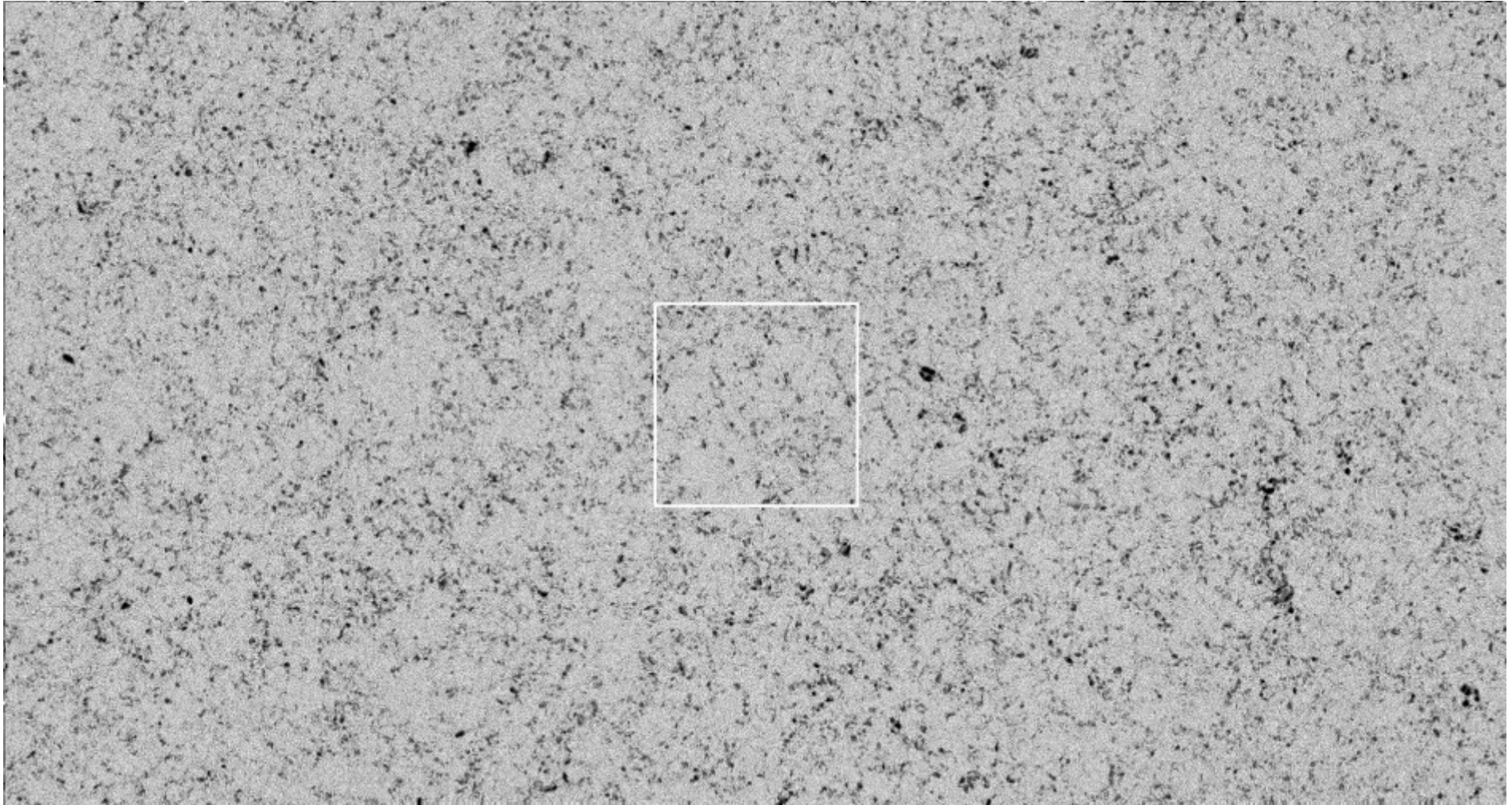
# 太陽コロナは小爆発よりなる？ コロナ加熱 = $\Sigma$ 小爆発？



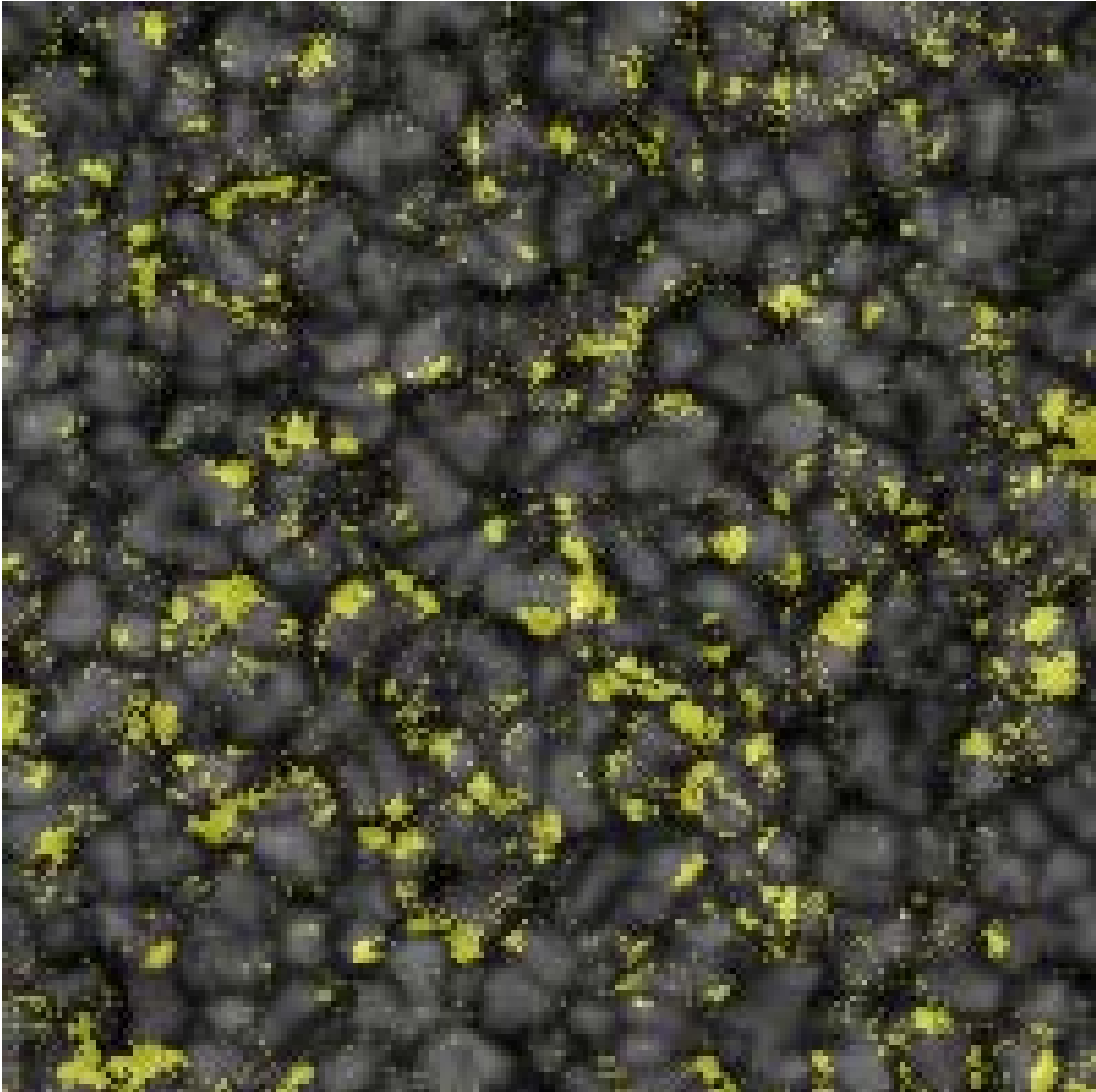


# *Discovery of ubiquitous horizontal magnetic field*

Horizontal magnetic flux



Lites et al. (2007), Orozco et al (2007)



Degree of linear  
Polarization  
ユビキタスな  
水平磁場

Courtesy of R. Ishikawa



# Horizontal field is highly transient!

## *Transient Horizontal Magnetic Field (THMF)*

Lites et al. 2007, Orozco et al 2007

Centeno et al. ApJL 2007

Ishikawa et al. A&A 2008

Ishikawa & Tsuneta A&A 2009

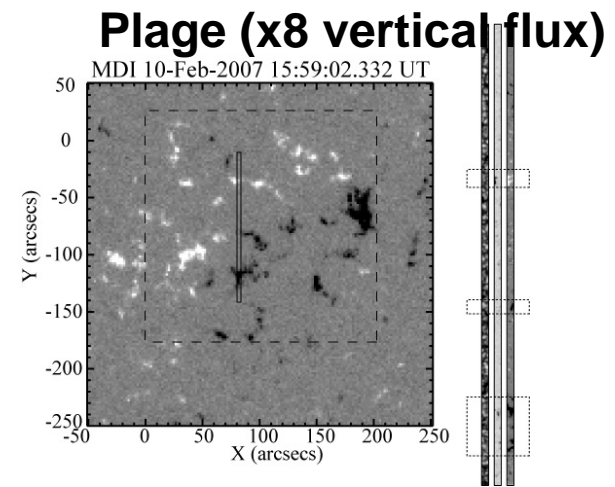
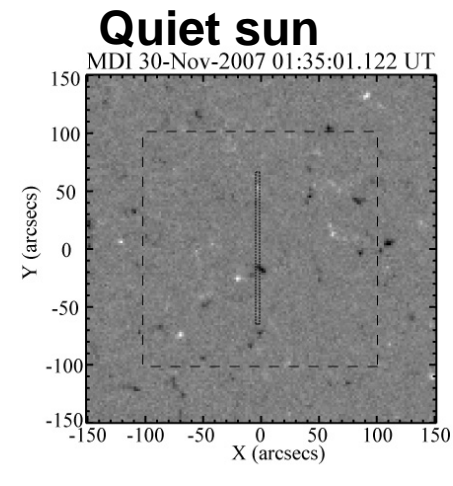
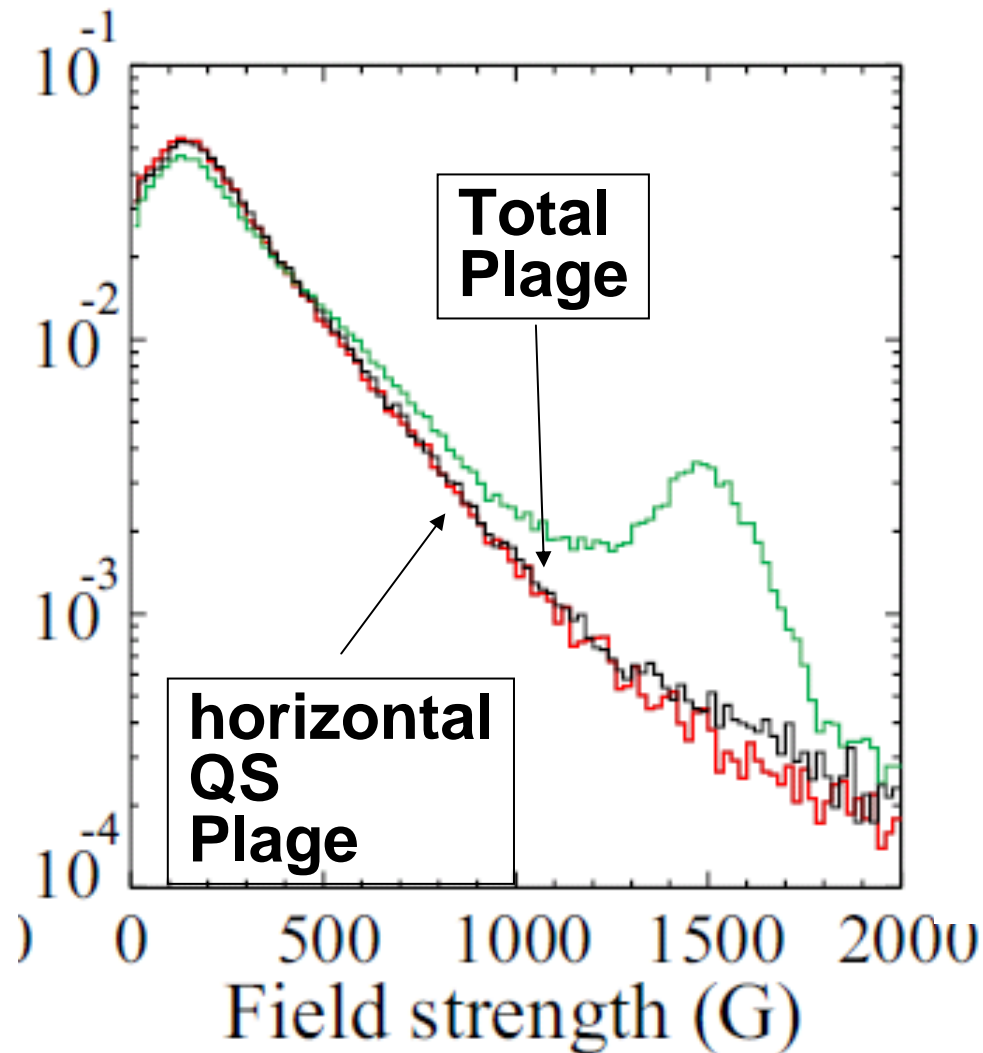
***X2 more horizontal flux than vertical***

- Sun center Quiet Sun
- Stokes-V (vertical field) **Green**
- Stokes-Q/U (horizontal field) **Yellow**
- Threshold: CP:0.3%, LP:0.18%

**Video available; Ishikawa & Tsuneta (A&A, 2009)**



# 水平磁場の分布関数は 太陽面上どこも同じ！

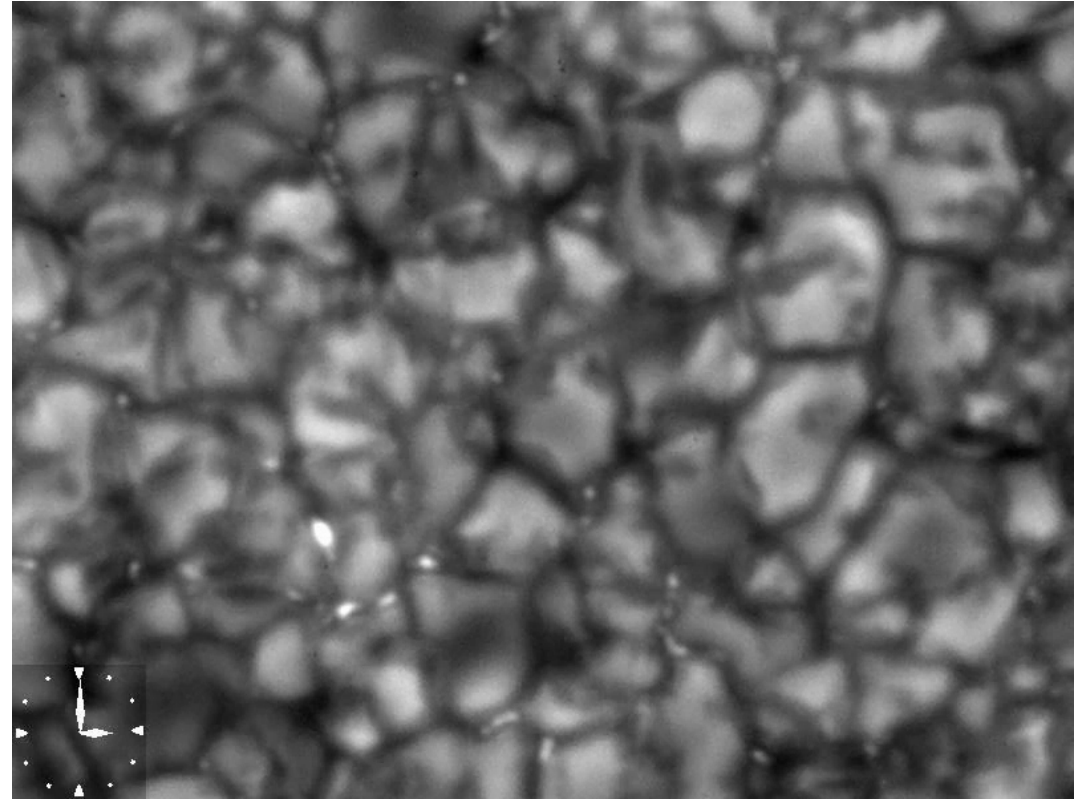


Ishikawa & Tsuneta (2009)

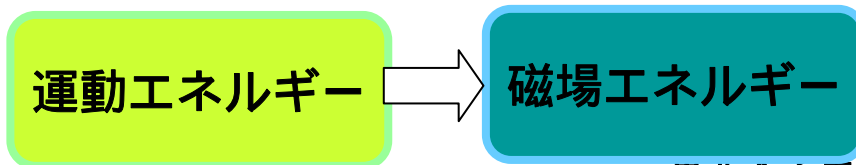
# ローカルダイナモとは

+太陽表面近傍で  
グラニューールなどの  
流れによる局所的  
なダイナモ機構  
(Cattaneo 1999)

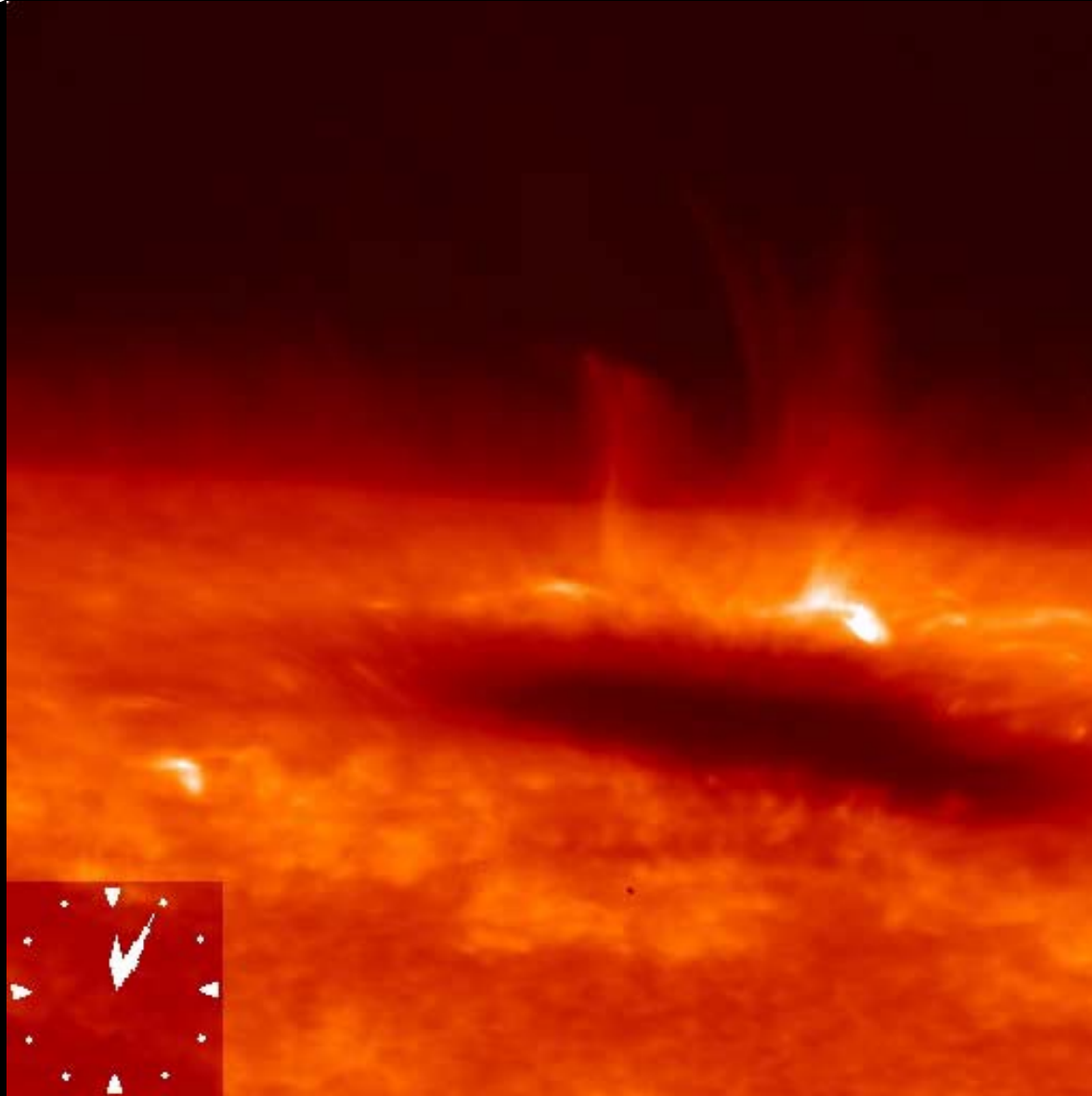
+その存在は確認さ  
れていなかった。



ローカルダイナモで磁場が生成さ  
れているなら  
+磁場のエネルギーは対流の運  
動エネルギーと同程度  
+グローバルな磁場の影響はない



***Chromosphere more dynamic than expected!***  
Chromospheric jets and fountain due to magnetic reconnection (shibata et al 2007)



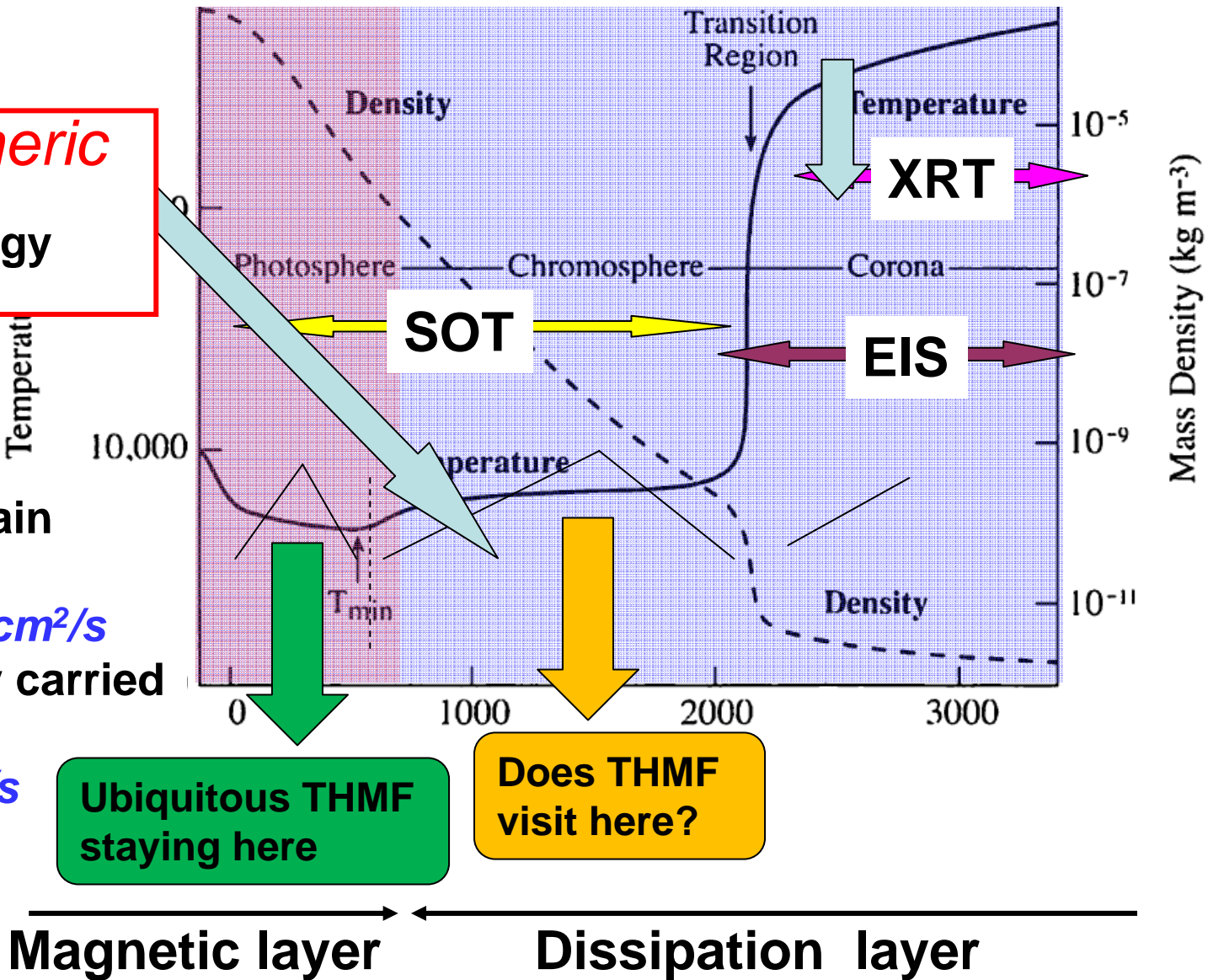
# New possibility of chromospheric heating With horizontal magnetic field

**Chromospheric heating**  
X10 more energy than corona

Energy to maintain Chromosphere  
 $4 \times 10^6 - 2 \times 10^7 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$   
Magnetic energy carried by horizontal B  
 $3 - 6 \times 10^6 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$

Ubiquitous THMF staying here

Does THMF visit here?



Magnetic layer

Dissipation layer



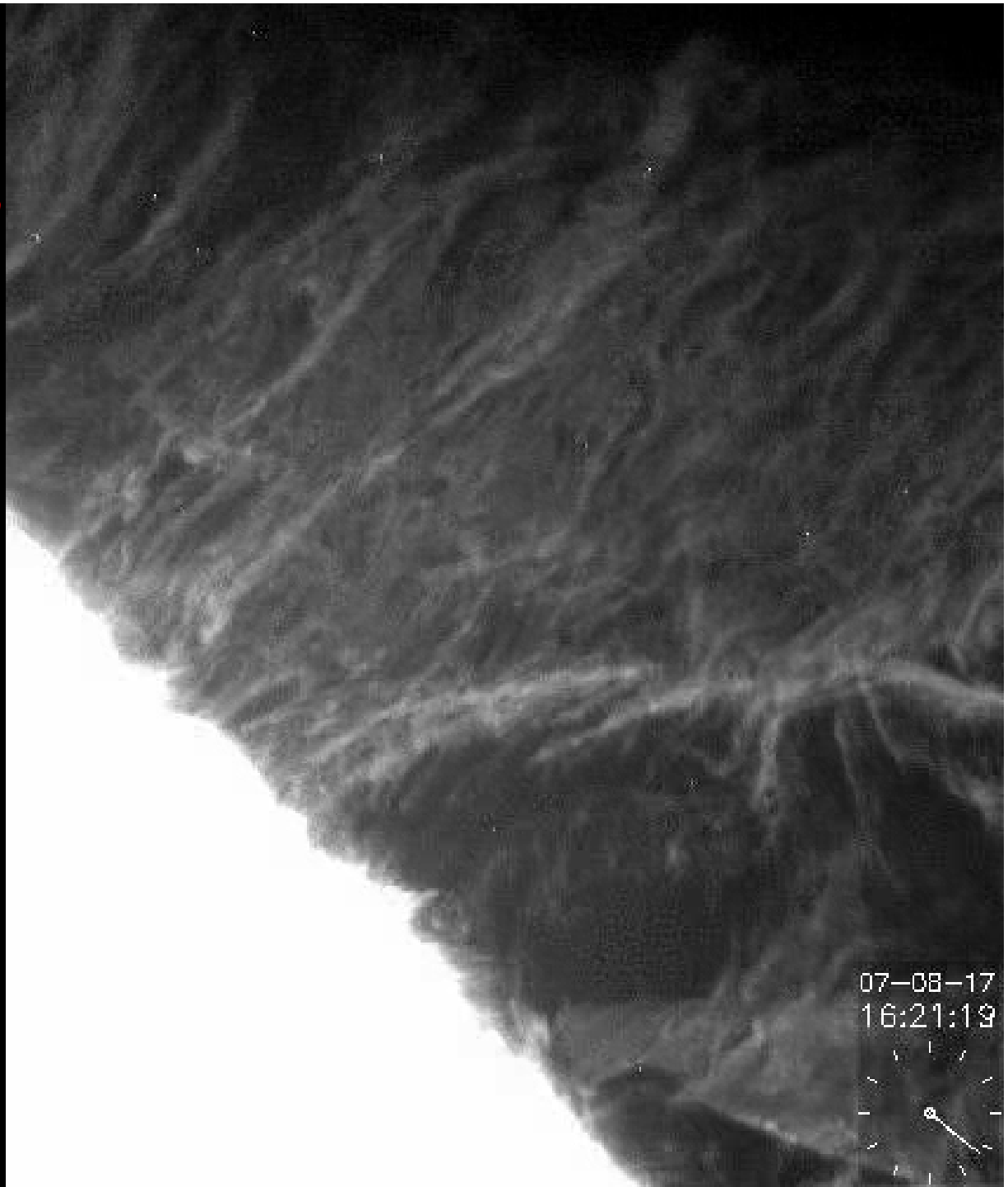
***Prominence is a cool and heavy material in the corona supposed to be suspended by magnetic fields in the corona.***

***(Berger et al 2007)***

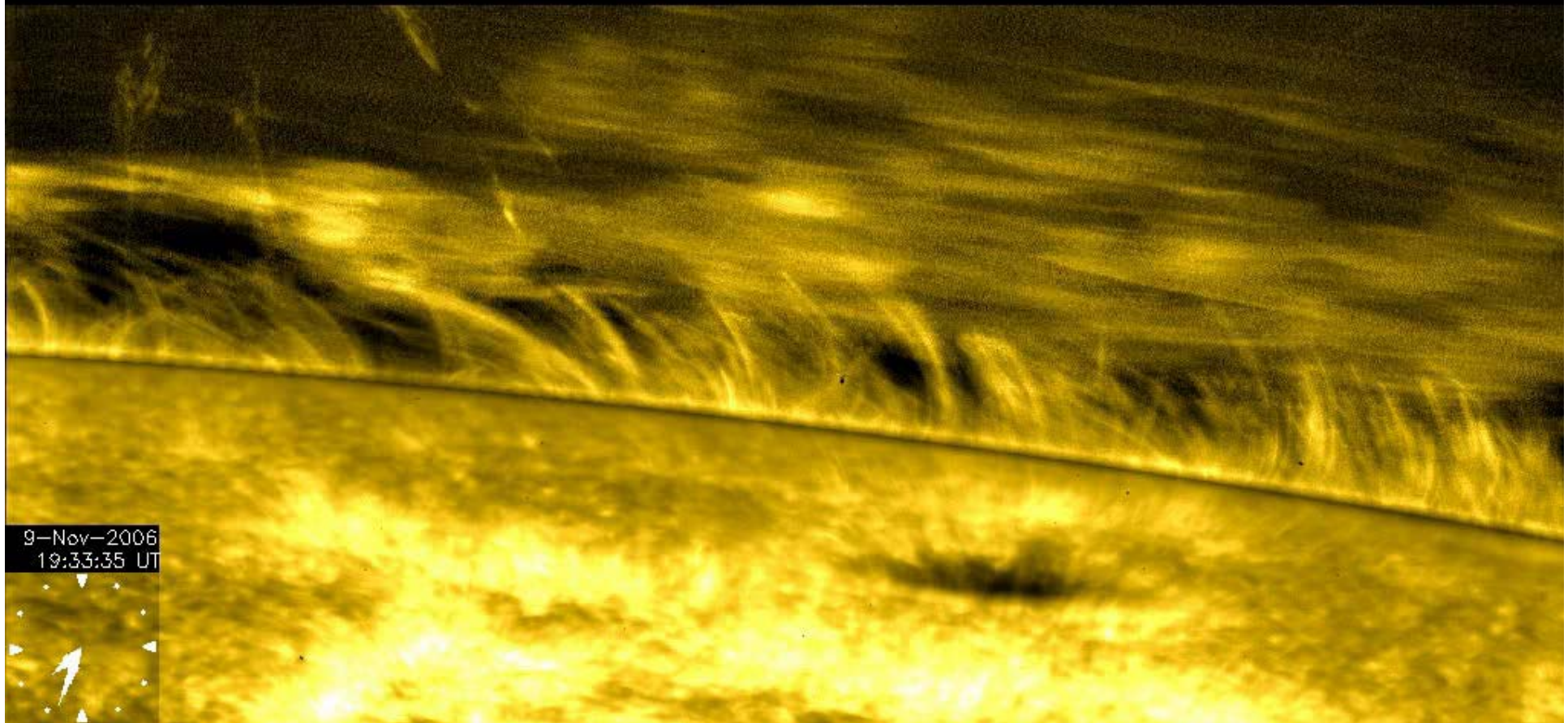
**Quiet Sun Call-H (ionized Calcium) Prominence**

**Characterized by  
very fine structure  
Up-down motion  
Convection-like feature**

**Where is signature of supporting magnetic fields?**

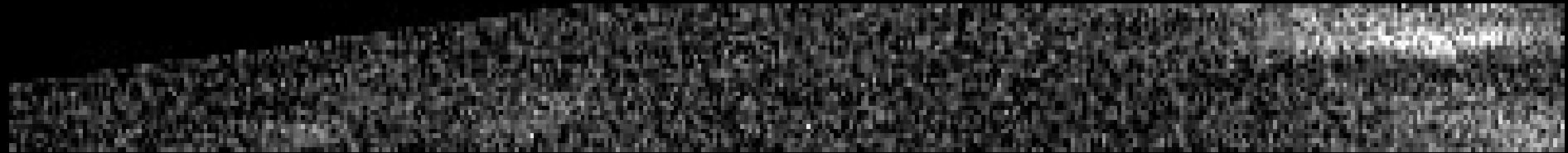


# *Discovery of Alfvén waves* (Okamoto et al 2007)



- Spicules, coronal rains, and cloud-like structures over an active region (AR10921)

# Oscillating motion



Okamoto et al. (2007)

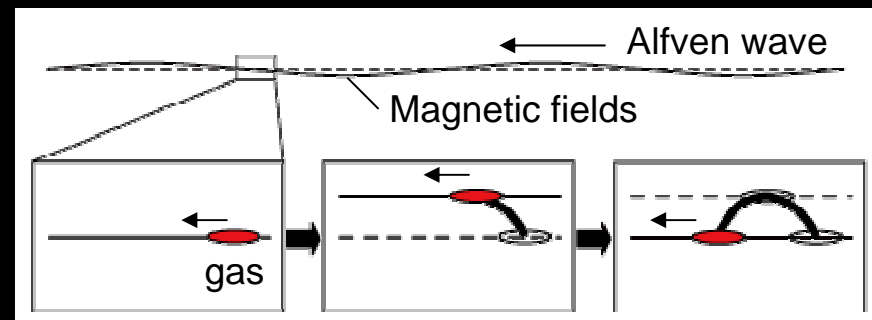
Oscillatory filament

Period: 3 ~ 4 min

Amplitude: 400 ~ 1000 km

*Poynting flux  $10^7 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$*

Similar fluctuation is seen in  
spicule (DePontieu et al. 2007)

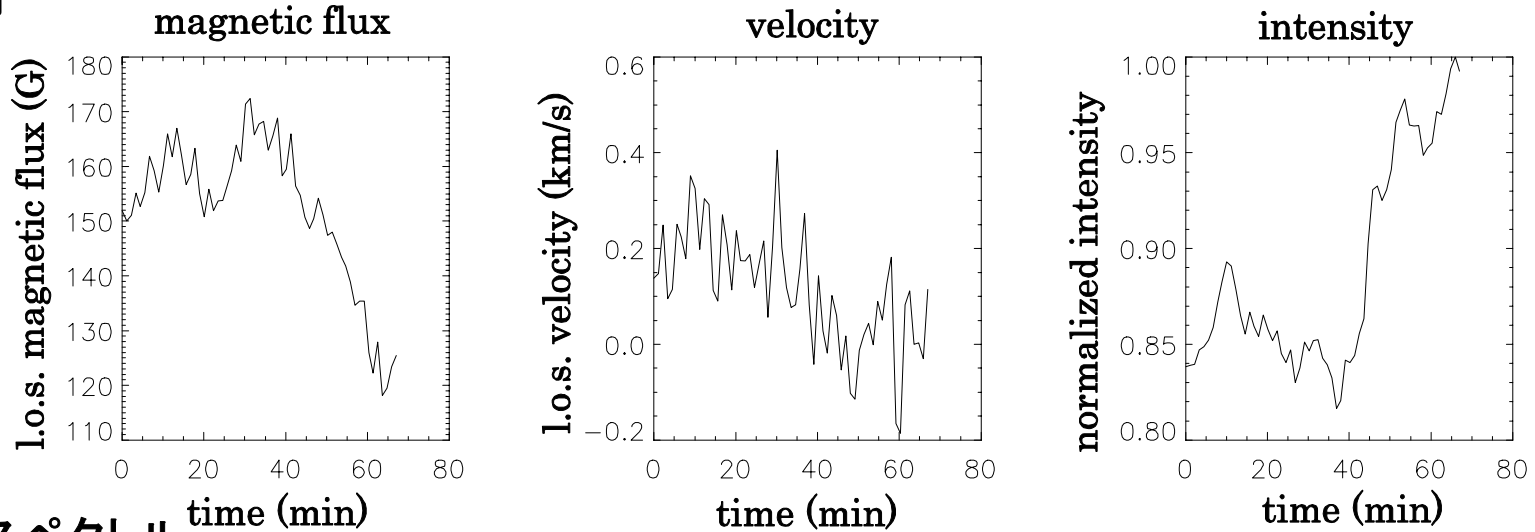


Alfven wave with moving material

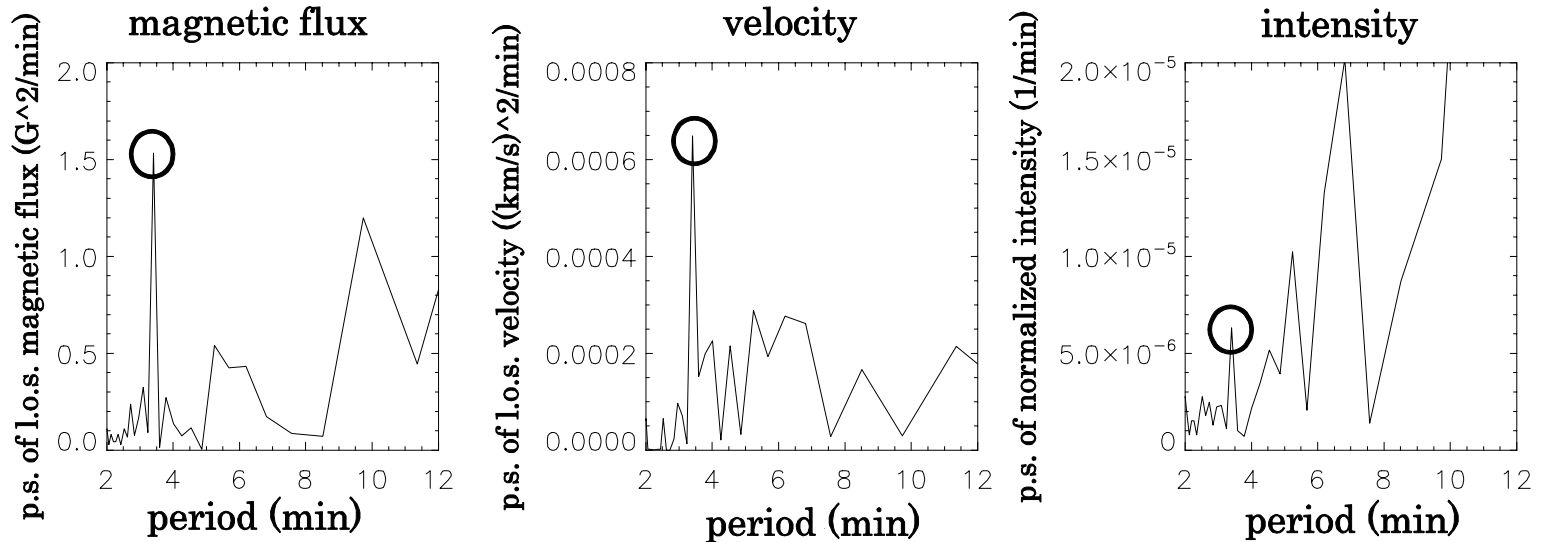


# 光球での磁気流体波の発見

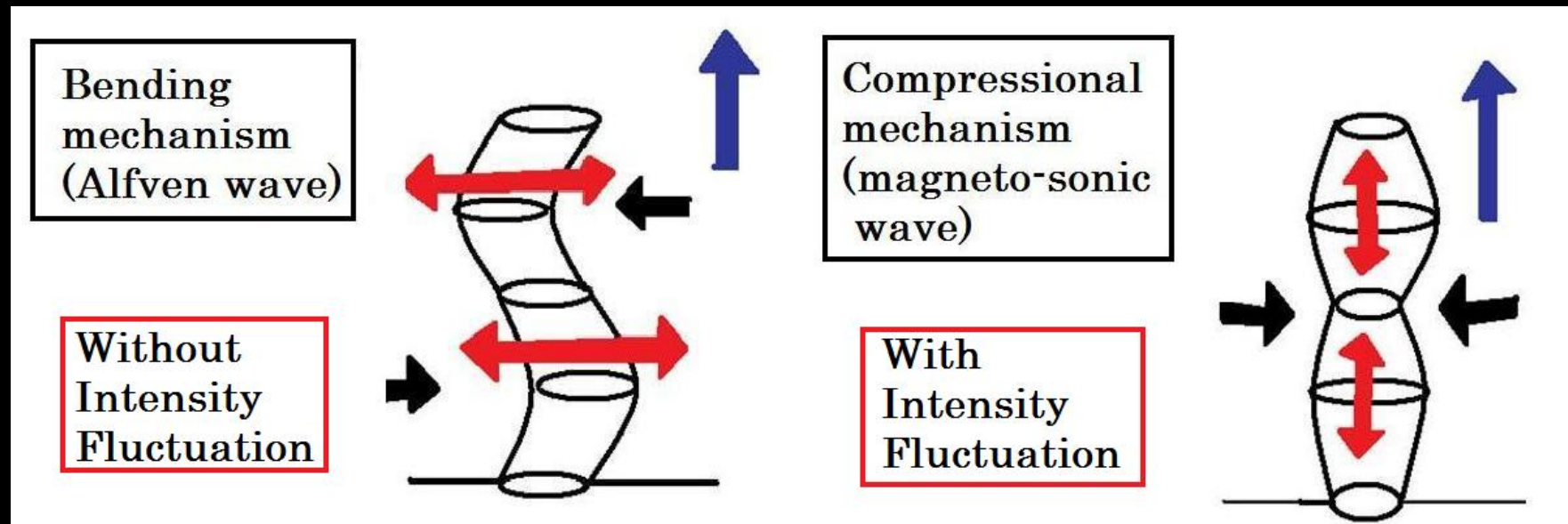
## 時刻列



## パワースペクトル



# MHD波のモードと伝搬方向同定が進行中 Kink wave (bending mode) and magneto-sonic wave (sausage mode)



Weakly compressible

Compressible

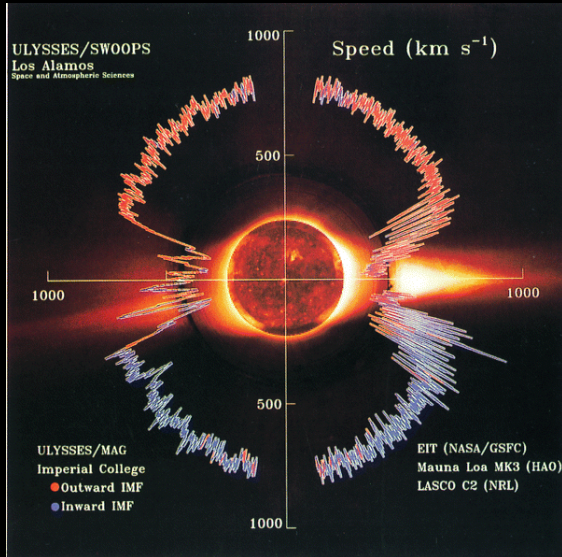
彩層で反射する反射波を検出！

# A案:未踏の太陽極域探査

- 未踏の太陽極域の探査を総合的に実施する。
  - 日震学の手法による、太陽極内部の音速・自転角速度・流れ場(子午面還流)・光球下磁力管の観測を行う。
  - 磁場計測の手法による、太陽極域の磁場・速度場の観測を行う。
  - オプション: NASA衛星と共同で局所的日震学の手法による、対流層深部・Tachocline・放射層の探査を行う。
- これらの観測により、太陽の内部構造・ダイナモ機構・高速太陽風の起源の解明を行う。
- 極域の黄道面から離れた位置からの極域観測は、これまで一度も実施されていない。
- 「ひので」の極域観測結果により、極域への関心が一挙に高まっている。

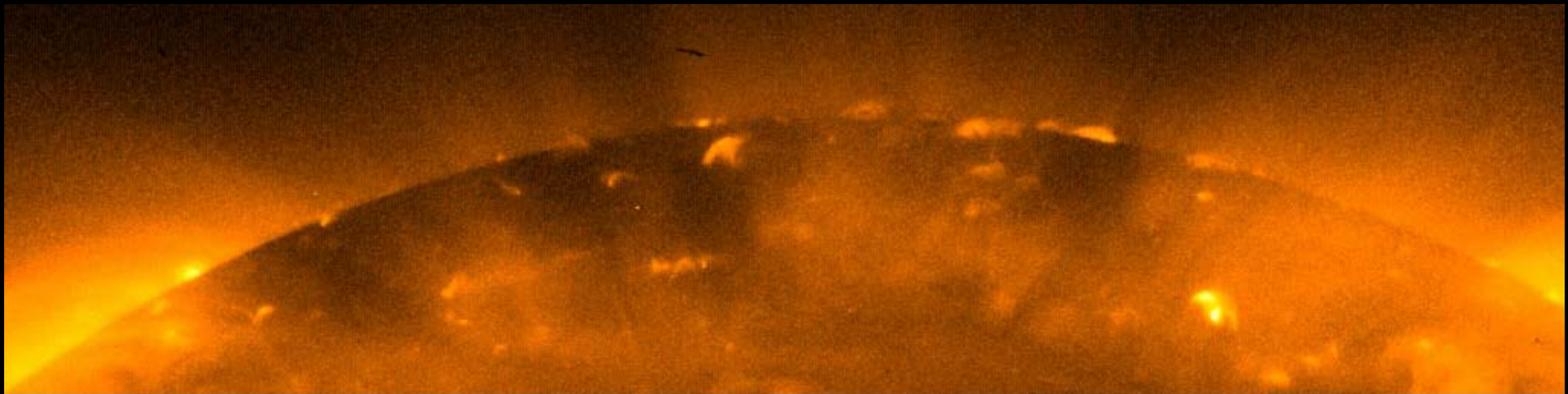
# What is going on in polar region ?

*Source of fast solar wind*  
*Location of global poloidal fields*  
*sink of meridional flow*



**High speed solar wind**  
**Ulysses**  
(McComas et al 2000)

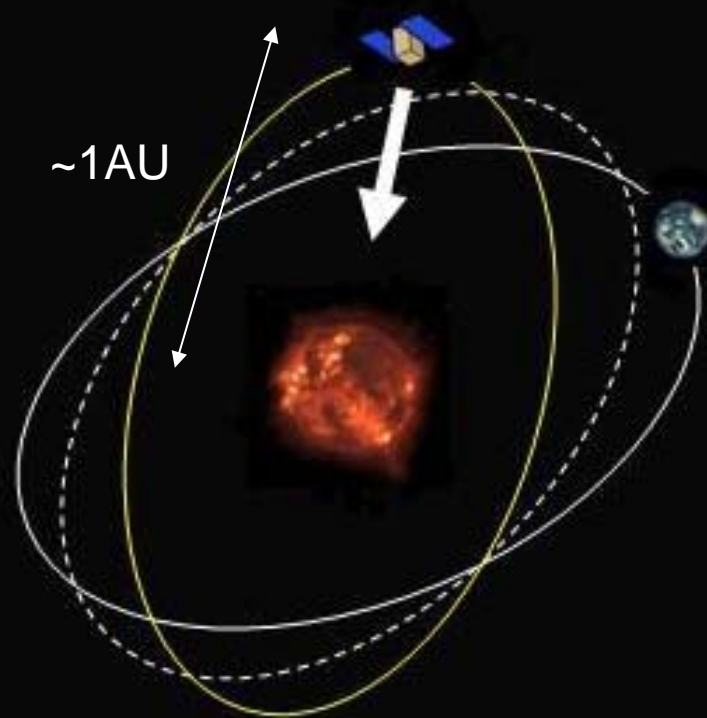
**High coronal activity in polar region**  
**Hinode XRT (Cirtain et al 2007)**



2006/11/23 00:47:25

XRT Al\_poly filter exp. 16385msec

# 高傾斜角軌道からの観測



「はやぶさ」のように  
イオンエンジンを使用した  
場合の軌道例

木星経由だと片道2.5年かかる  
(もどってくるまで休止状態)

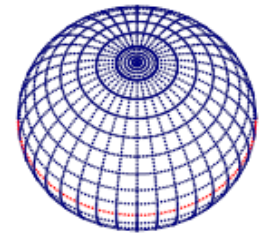
時期によってさまざまな緯度  
方向から太陽(+惑星間空間)  
を観測可能

# How is appearance of solar poles as a function of inclination?

$i$ : inclination angle between solar equatorial plane

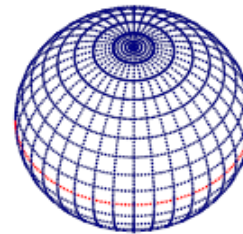
**Rocket: H2A-202**

Cruise by Ion engine in a shorter duration compared with SO



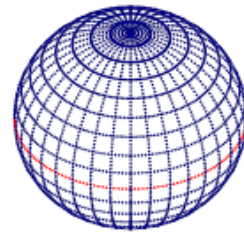
$i = 60 \text{ deg}$

**Jupiter swing-by of long-duration cruise (>10 yrs)**  
**H2A-204**



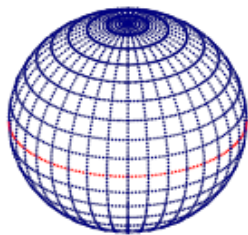
$i = 50 \text{ deg}$

Cruise by Ion engine in a long duration ~10 yrs, but with higher duty cycle for observations



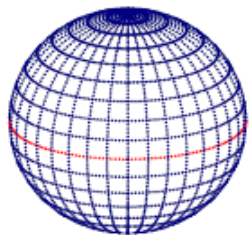
$i = 40 \text{ deg}$

Ballistic orbit by **Jupiter** and Earth Swing-by with heavier ( $\sim \times 3$ ) payload  
**H2A-204**



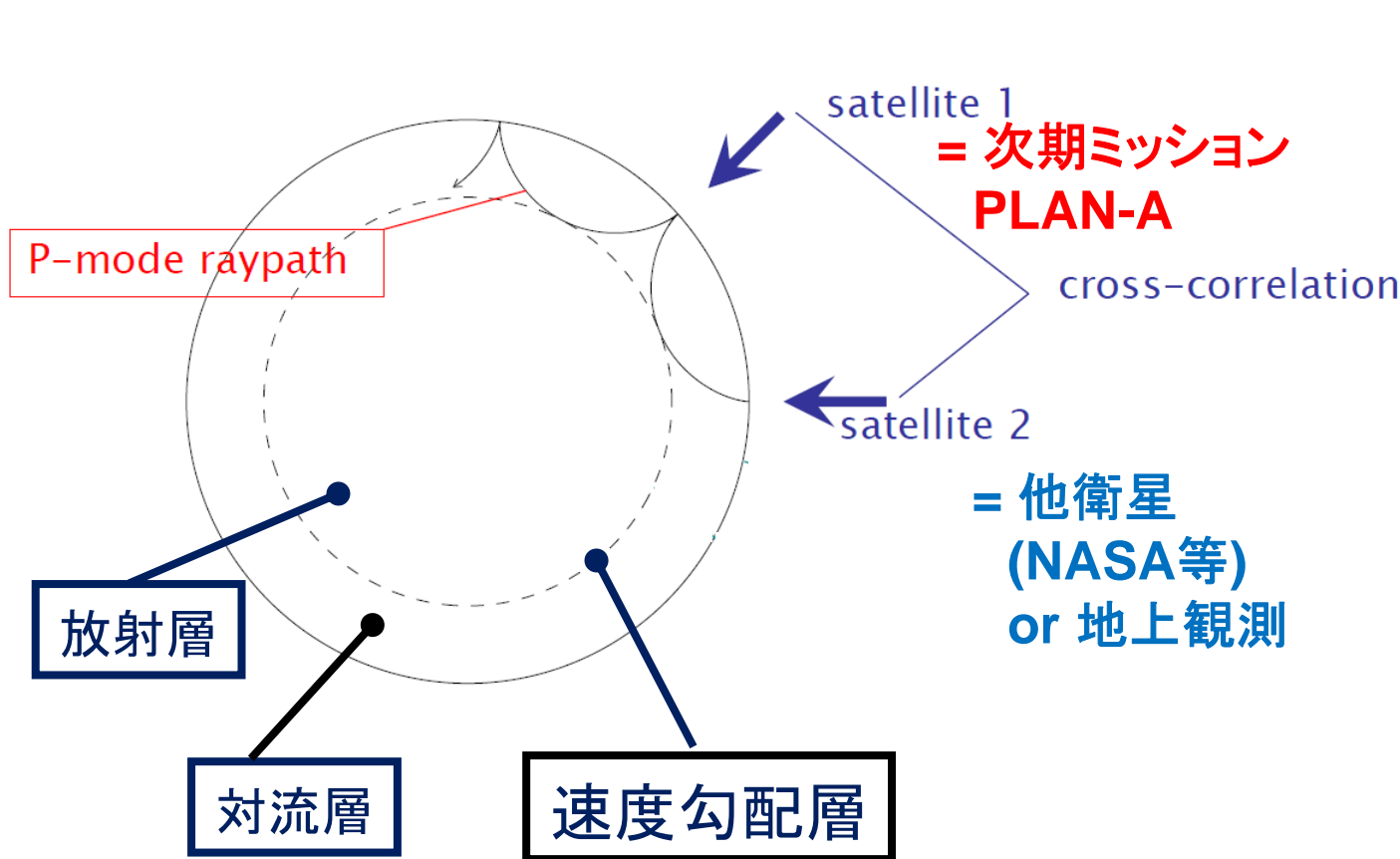
$i = 30 \text{ deg}$

Possible by Earth swing-by only

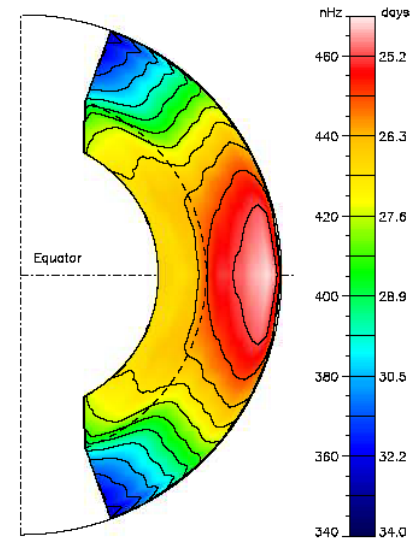


$i = 20 \text{ deg}$

# 太陽内部の磁束管を見る



自転角速度(nHz)



日震学的手法による

磁場が生成されていると考えられている**速度勾配層領域の探査**

# SOLAR-C A案、B案

- A案:未踏の**太陽極域探査**
  - 黄道面(目標40度)を離れ未踏の太陽極域の太陽内部診断と太陽ダイナモ機構の解明
- B案:**撮像から分光へ・可視光から紫外線へ。**
  - **ひので:高分解能+(偏光)分光の威力を見せつけた**
  - 光球—彩層—コロナをシステムとしてとらえる
  - 彩層コロナ加熱機構の解明



# Key features of visible light telescope

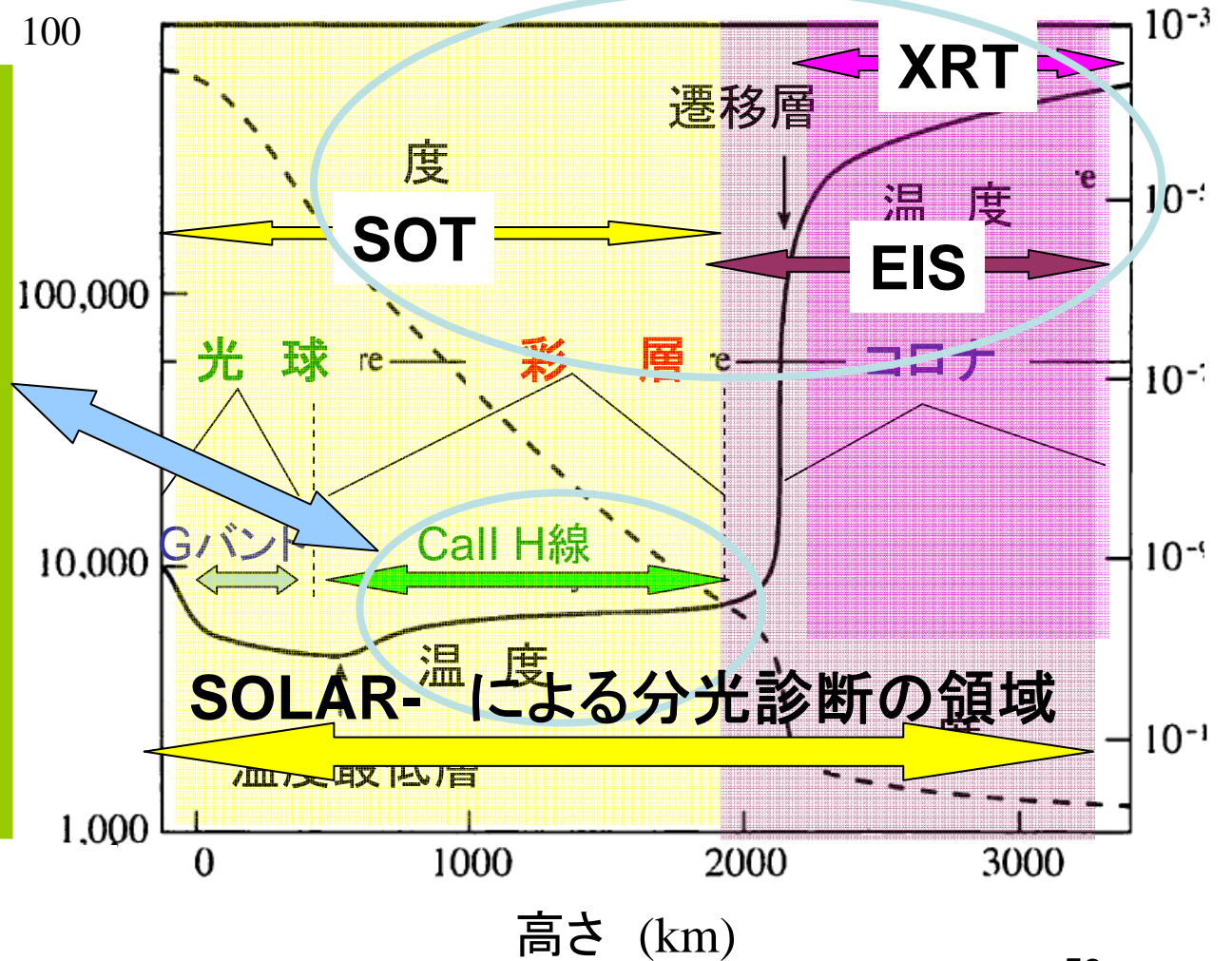
## *Solar version of Hubble Space telescope*

- Highest spatial resolution
- Stable point spread function
- Wide field of view to cover active regions
- 24hours continuous observations

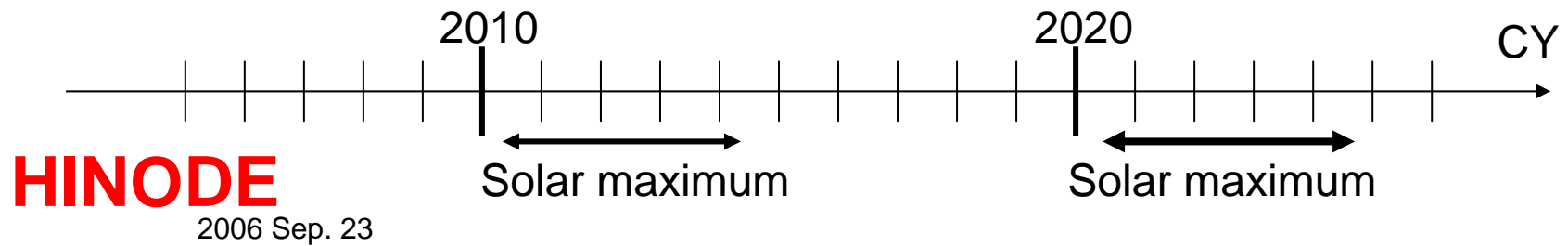
# B案: SOLAR-Cによる太陽大気全域 の高分解能・分光診断

ひのでは撮像ミッション

大目領域: 彩層で  
が  
起きているのか?  
・コロナの10<sup>6</sup> Kの加熱に  
より されている  
・「ひので」による多様な  
動的現象の発見  
・コロナ加熱の理解には、  
コロナ光球のインター  
フェースである彩層・遷  
移層の理解が本質であ  
るとの認識が急速に台  
頭している。



# Calendar for Years 2009–2020

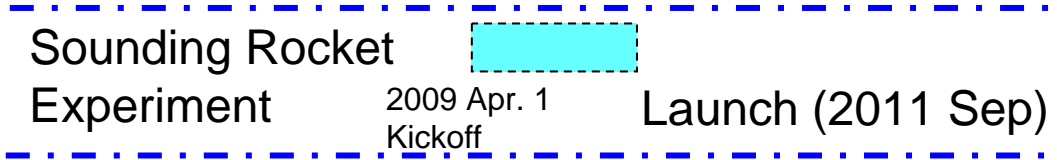
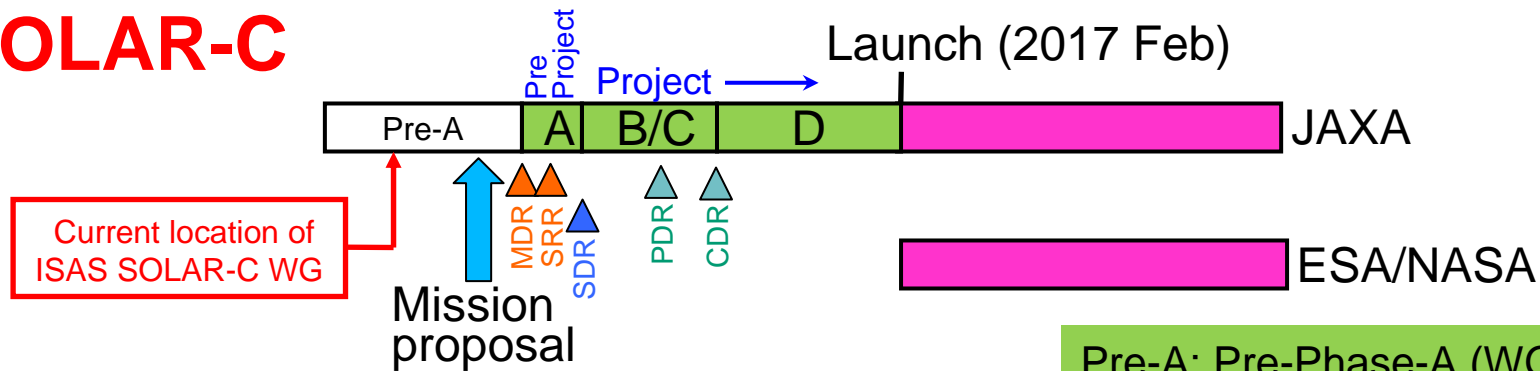


**Phase 1** Initial analysis and discovery

**Phase 2** New research development from solar max. observations

**Phase 3** New view with cycle-long observations

## SOLAR-C



Pre-A: Pre-Phase-A (WG activities)  
A: Phase-A (R&D)  
B/C: Phase-B/C (PM phase)  
D: Phase-D (FM phase)

# まとめ

- 太陽物理が「ひので」でおもしろくなっている。
- 「ひので」は問題の解明より、多くの新たな問題を起しつつある。
- 「ひので」の 一挙解 はまだ についてばかり。 もおもしろい成果が期 できる。
- 案・案から、 年程度で成案1案を 案する。
- 太陽から宇宙へ ツ ージを出していきたい。