

2013年度 京都産業大学
集中講義特論IA
太陽物理学(資料その2)

磯部洋明

京都大学学際融合教育研究推進センター
宇宙総合学研究ユニット

質問等あれば

isobe@kwasan.kyoto-u.ac.jp

短いのなら

twitter @isobehiroaki

2013年7月31日-8月2日

(電)磁場がある場合の荷電粒子の運動

ローレンツ力

$$\mathbf{F}_{Lorenz} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

=>荷電粒子は磁場の周りを旋回運動する

旋回半径(ラーモア半径、ジャイロ半径)

$$r_L = \left(\frac{mv_{perp}}{|q|B} \right)$$

サイクロトロン振動数(ジャイロ振動数)

$$\omega_c = \left(\frac{|q|B}{m} \right)$$

小問題: 太陽コロナ中での陽子の旋回半径を計算せよ。

ただし $B=10^{-3}$ テスラ、陽子質量 1.6×10^{-27} kg、素電荷 1.6×10^{-19} C、温度は100万Kとする。

流体力学の方程式

連続の式(質量保存)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

運動方程式(運動量保存)

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \xi \nabla^2 \mathbf{v}$$

エネルギー方程式(エネルギー保存)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \rho \left(\frac{1}{2} v^2 + \varepsilon \right) \right\} + \nabla \cdot \left\{ \rho \mathbf{v} \left(\frac{1}{2} v^2 + \varepsilon + \frac{p}{\rho} \right) \right\} = \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{g} + K \nabla^2 T + R$$

音波の導出

一様媒質、断熱、理想気体の状態方程式を仮定し、
方程式を線形化して、微小擾乱の進化を表す式が波動方程式の形になり、
音速が $(\gamma P/\rho)^{1/2}$ で与えられることを確認。
黒板でやったので割愛。

Maxwellの法則

ファラデーの電磁誘導の法則

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

アンペールの法則

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{J} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

ただし非相対論の場合は
右辺第二項(変位電流)は無視できる

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_e}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

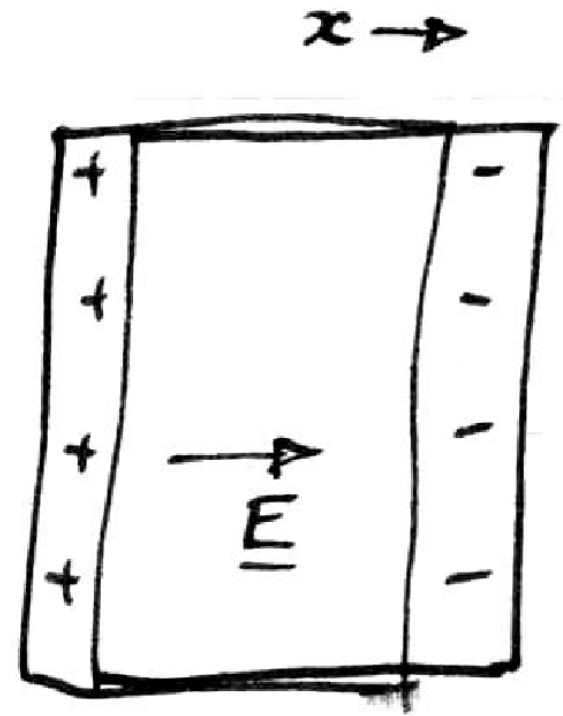
正確にはBは磁束密度、 $H=B/\mu$ を磁場強度と呼ぶこともあれば、Bを磁場強度と呼ぶこともある
(特に天文学は今でもcgs単位系を使っているので...)

プラズマは電氣的に中性

プラズマ振動数

$$\omega_{pe} = \left(\frac{ne^2}{m\epsilon_0} \right)^{1/2}$$

正味の電荷(正電荷と負電荷の差)及びそれにより生じる静電場は、プラズマ振動周期程度の時間で解消される。



ローレンツ力

電子の集合に働くローレンツ力 $\mathbf{F}_e = -n_e q (\mathbf{v}_e \times \mathbf{B})$

イオン(陽子)の集合に働くローレンツ力 $\mathbf{F}_i = n_i q (\mathbf{v}_i \times \mathbf{B})$

単位体積あたりのプラズマに働くローレンツ力

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_i = n_i q (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_e) \times \mathbf{B} \\ = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

$$= \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}$$

$$= -\nabla \left(\frac{B^2}{2\mu} \right) + \frac{1}{\mu} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}$$

磁場は

- 圧縮すると反発する(磁気圧勾配)
- 曲げると戻ろうとする(磁気張力)

つまりプラズマ中の磁力線はゴムひものような性質を持つ。

↑
磁気圧勾配

←
磁気張力

磁場の誘導方程式

オームの法則

$$\mathbf{J}' = \sigma \mathbf{E}' \quad \text{流体静止系。}\sigma\text{:電気伝導度}$$

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad \text{観測者静止系}$$

$$\rightarrow \mathbf{E} = \frac{\mathbf{J}}{\sigma} - \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \frac{1}{\sigma\mu} \nabla \times \mathbf{B} - \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

ファラデーの電磁誘導の法則

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= -\nabla \times \mathbf{E} \\ &= -\nabla \times \left(\frac{1}{\sigma\mu} \nabla \times \mathbf{B} - \mathbf{v} \times \mathbf{B} \right) \\ &= \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B} \end{aligned}$$

ただし、 $\eta=1/\sigma\mu$ は磁気拡散係数(電気抵抗度)

磁気流体力学(magnetohydrodynamics, MHD)

連続の式(質量保存)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

運動方程式(運動量保存)

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \xi \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

エネルギー方程式(エネルギー保存)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \rho \left(\frac{1}{2} v^2 + \varepsilon \right) + \frac{B^2}{2\mu} \right\} + \nabla \cdot \left\{ \rho \mathbf{v} \left(\frac{1}{2} v^2 + \varepsilon + \frac{p}{\rho} \right) + \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{\mu} \right\} = \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{g} + K \nabla^2 T + R$$

誘導方程式(磁場の発展方程式)

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

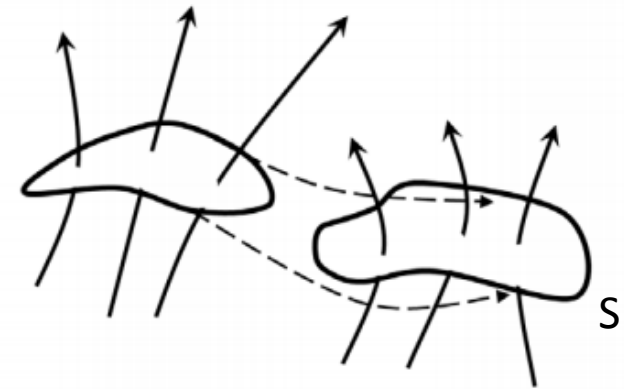
磁力線の凍結

電気伝導度が大きい＝電気抵抗が小さい場合、誘導方程式の第二項(磁気拡散)は無視できる

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

「流体と共に動く」閉曲線 $S(t)$ を貫く磁束

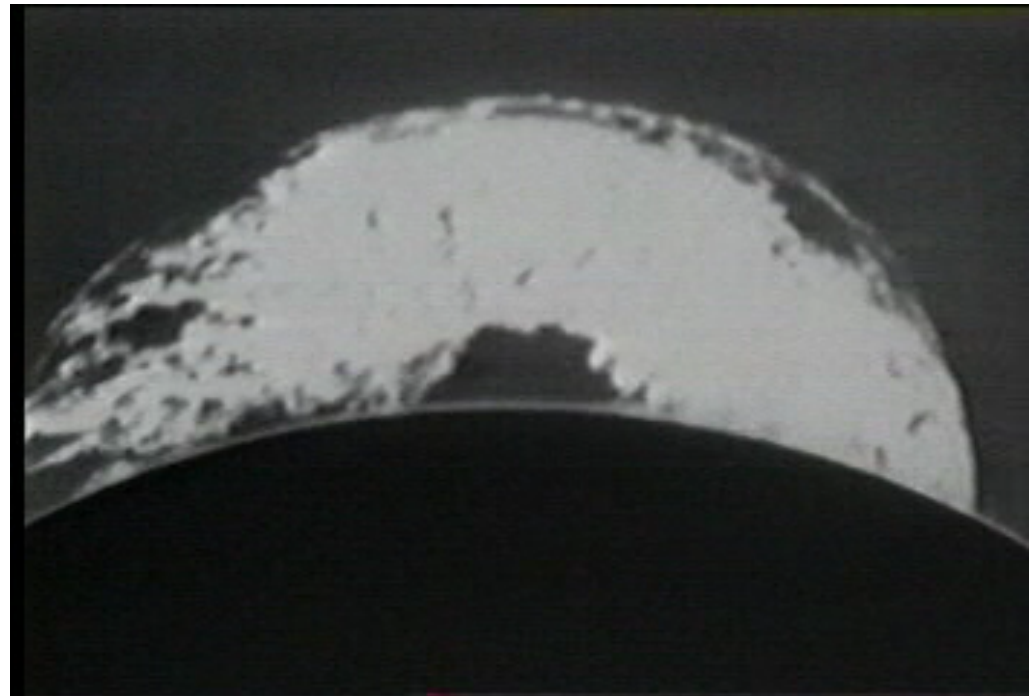
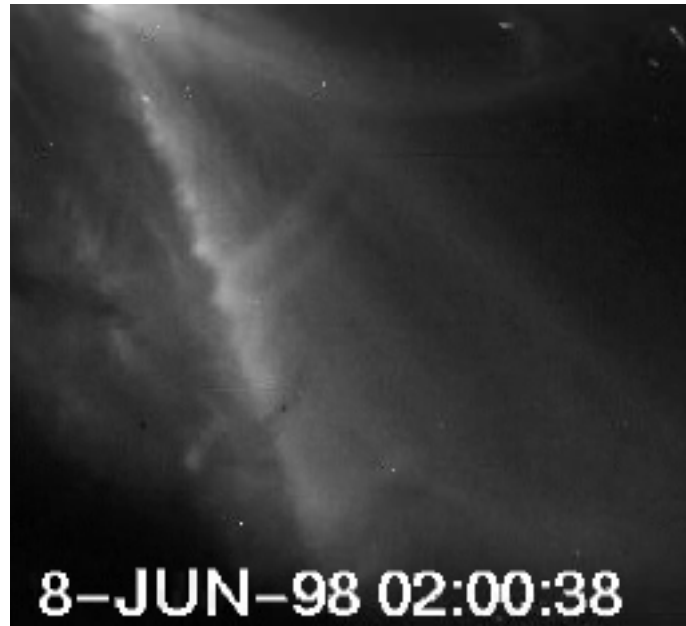
$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS$$



$$\frac{d\Phi}{dt} = \int_S \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \right) dS = 0$$

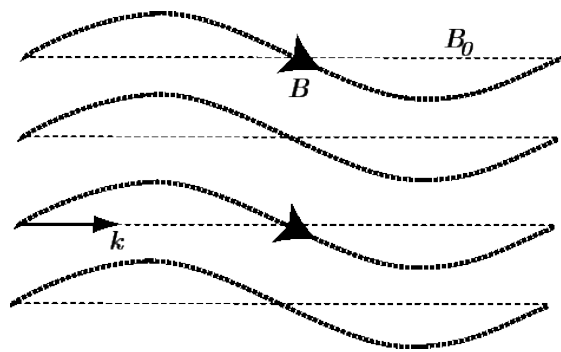
つまり、磁気拡散が無い場合、磁場と流体は一緒に動く。

磁場とプラズマと一緒に動いて見える例

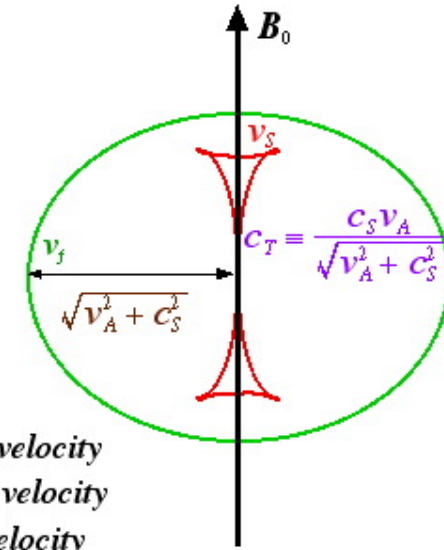
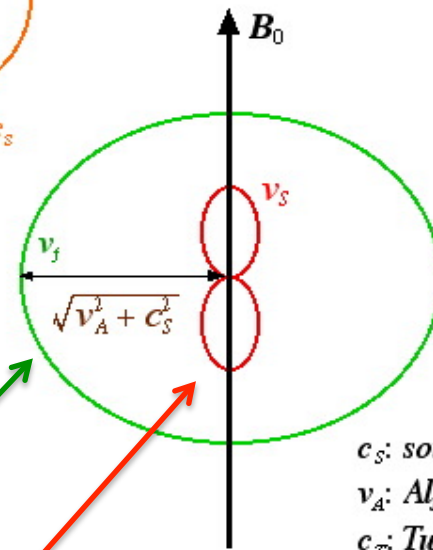


磁気流体波動

アルフベン波
(Alfvén wave)



MHD wave



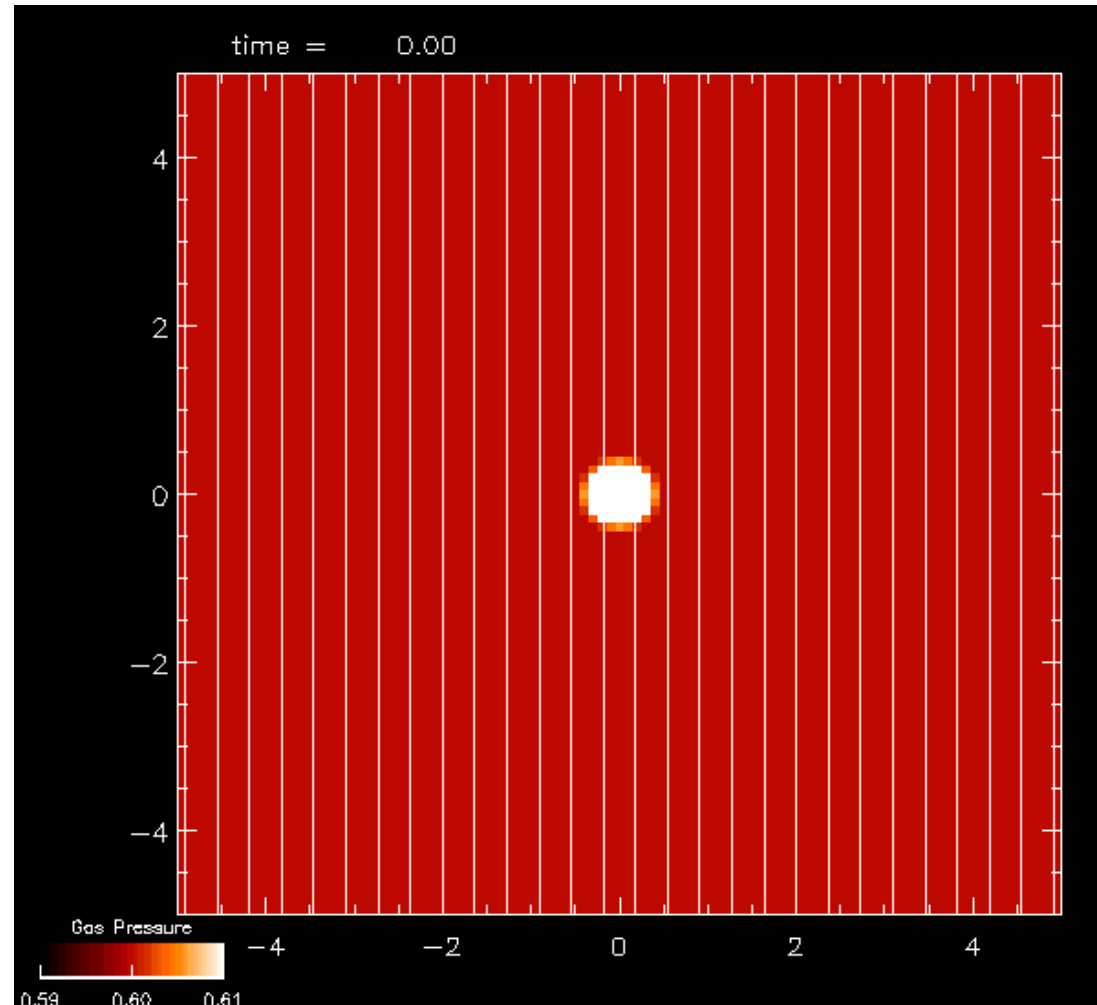
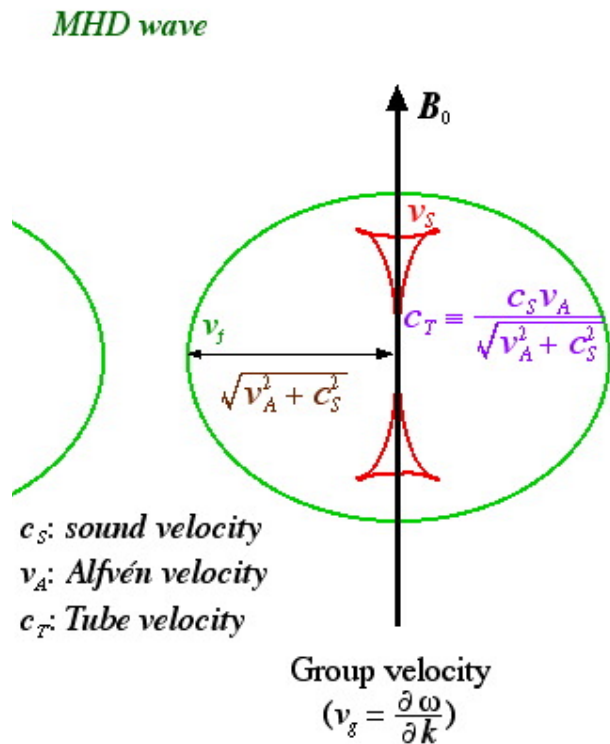
速い磁気音波
(fast mode wave)

遅い磁気音波
(slow mode wave)

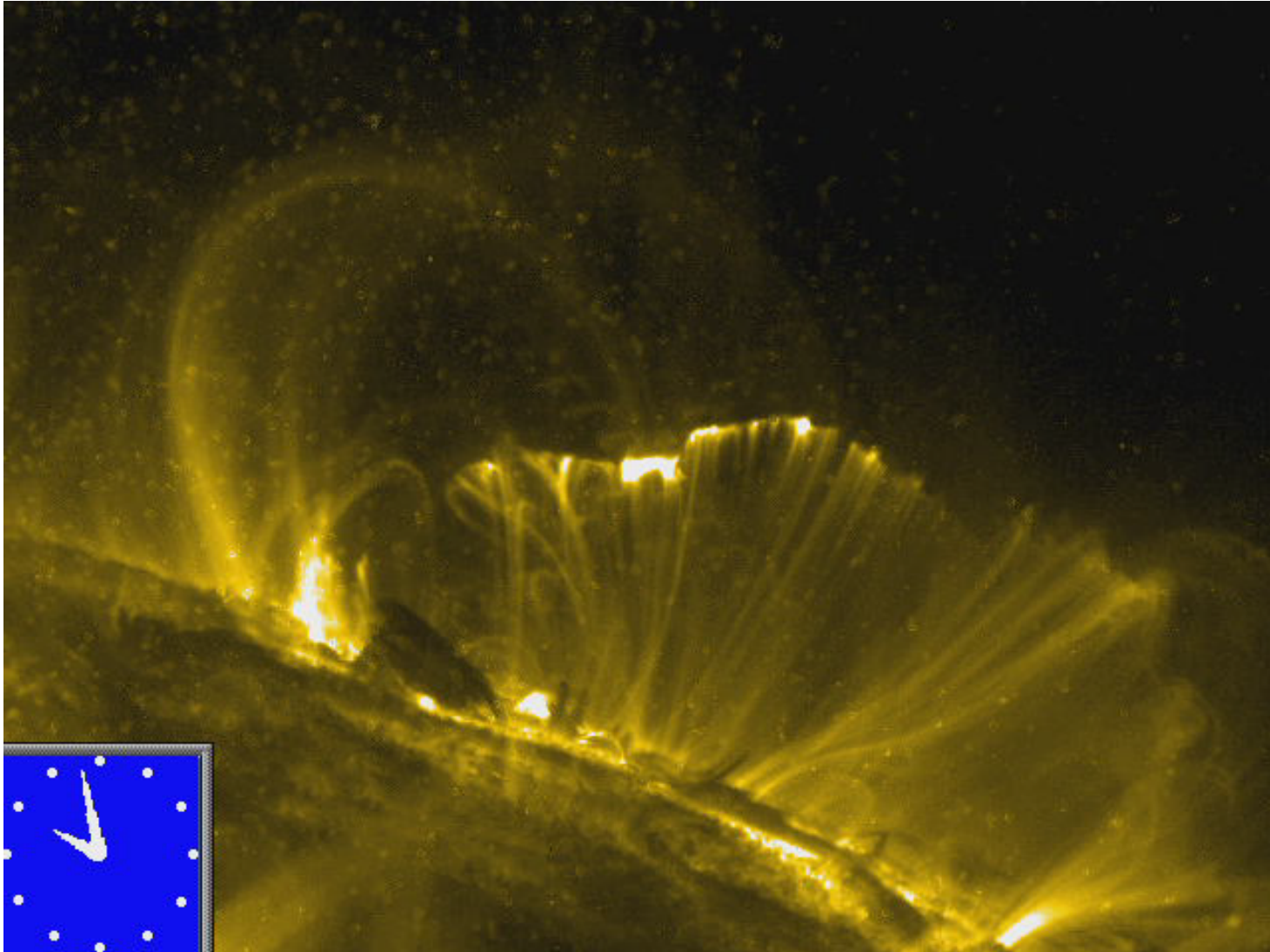
c_s : sound velocity
 v_A : Alfvén velocity
 c_T : Tube velocity

$c_T \equiv \frac{c_s v_A}{\sqrt{v_A^2 + c_s^2}}$

磁気流体波動の数値シミュレーション



アルフベン波(磁力線の振動)



太陽物理の主要な課題

- 磁場の起源(ダイナモ)
- コロナの加熱
- フレア・コロナ質量放出(爆発現象)

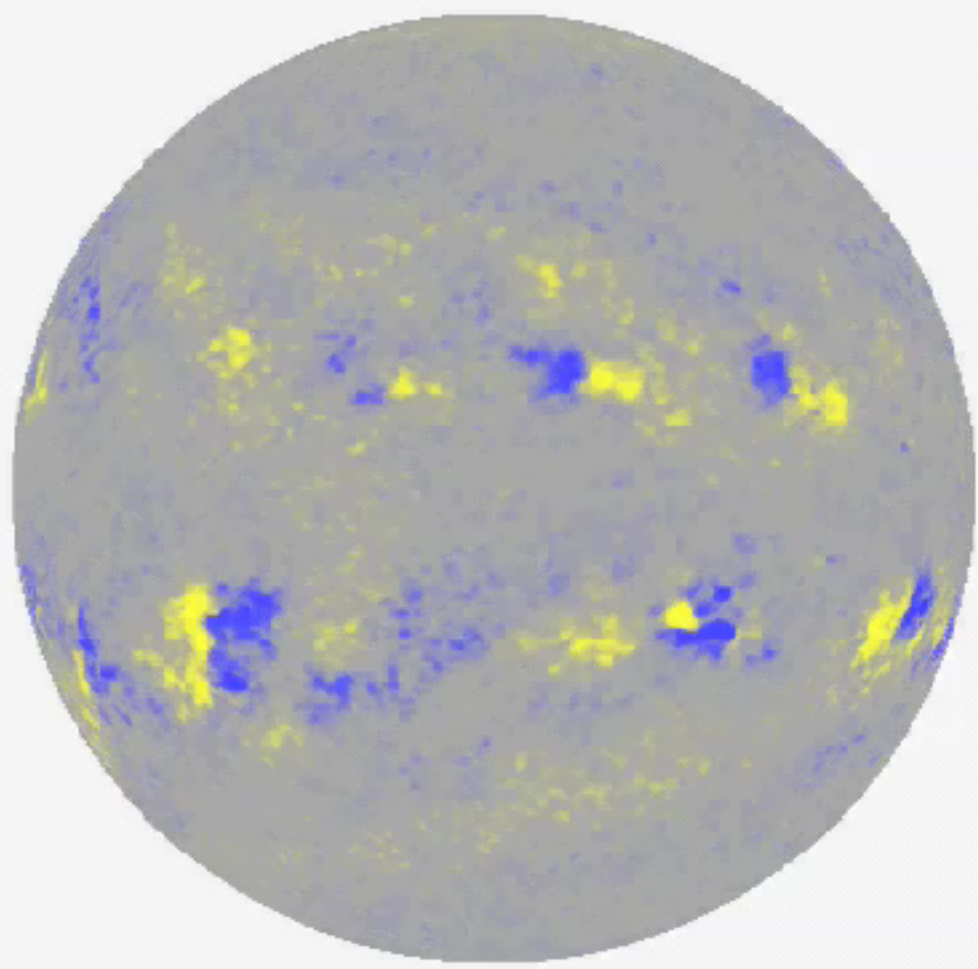
磁場の起源＝ダイナモ機構

↓電気抵抗により拡散する

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

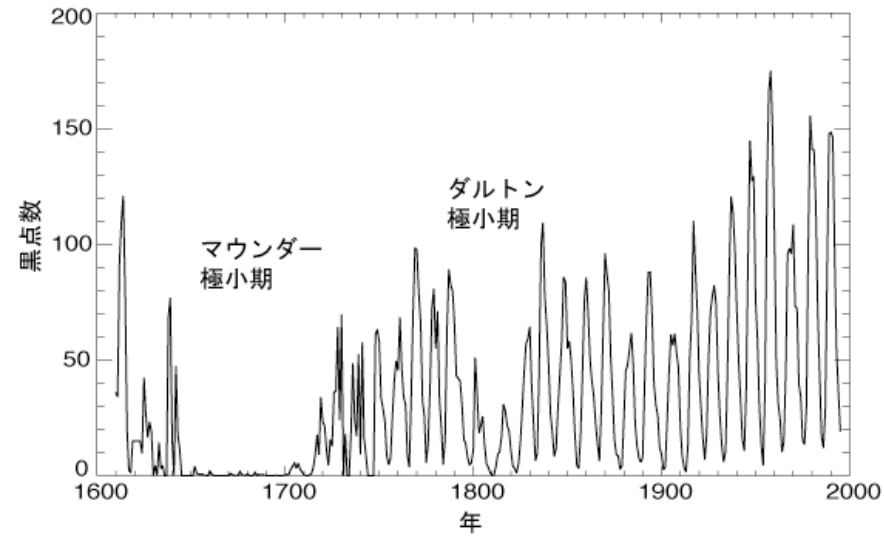
↑流れが磁場を増幅する

小問題: 太陽ができた時に持っていた磁場が拡散してしまう時間はどれくらいか?

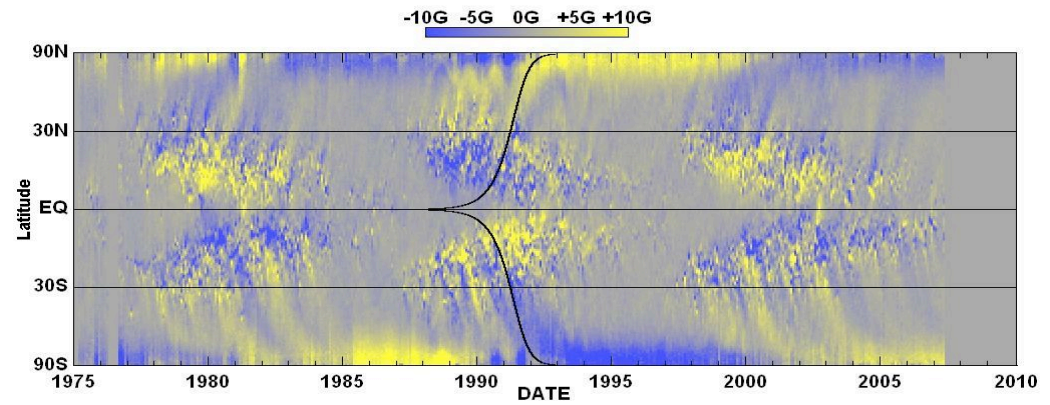


説明されるべき磁場の振る舞い

黒点の11年周期と
グランド極小期



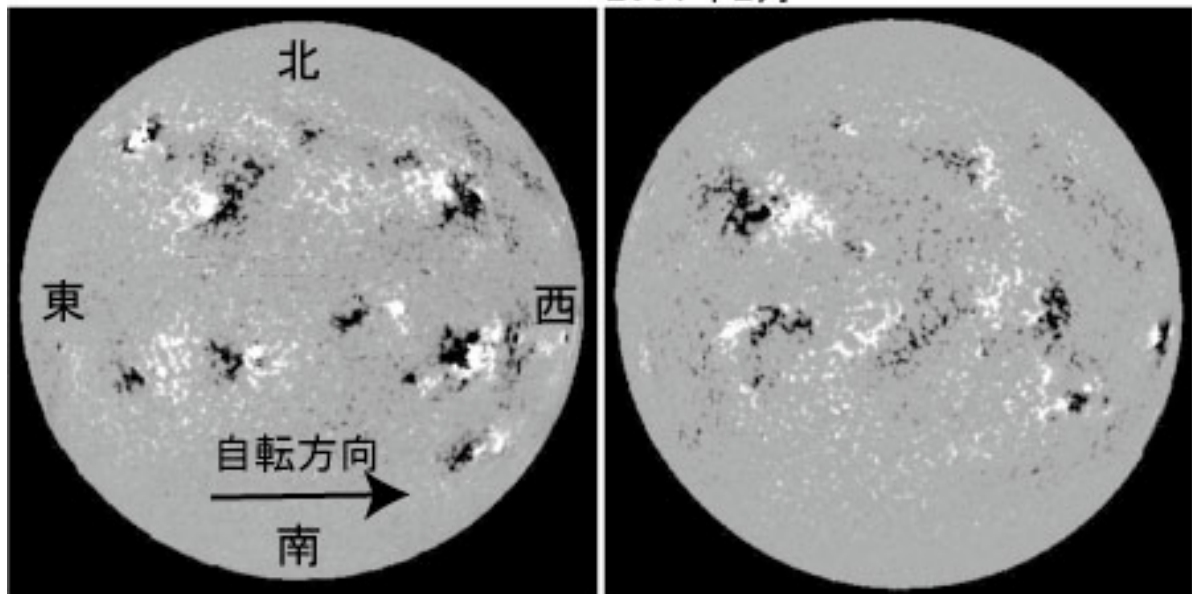
バタフライダイアグラム



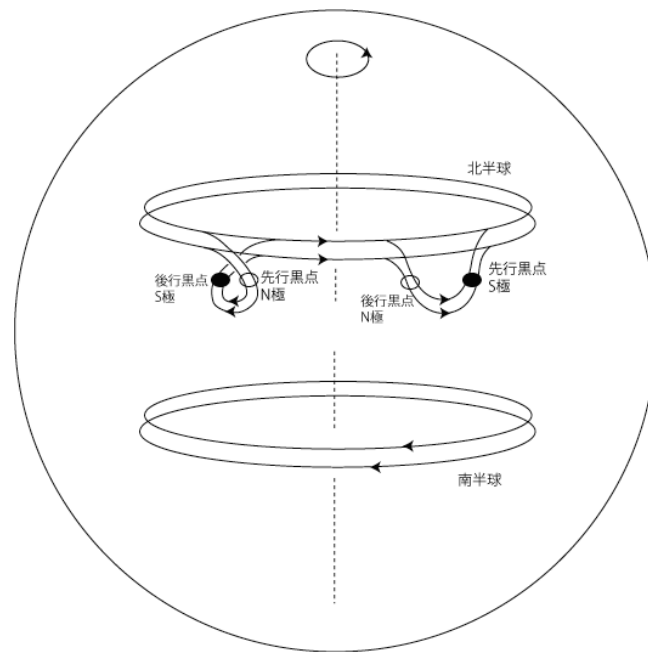
NASA/MSFC/NSSTC/Hathaway 2007/08

1990年2月

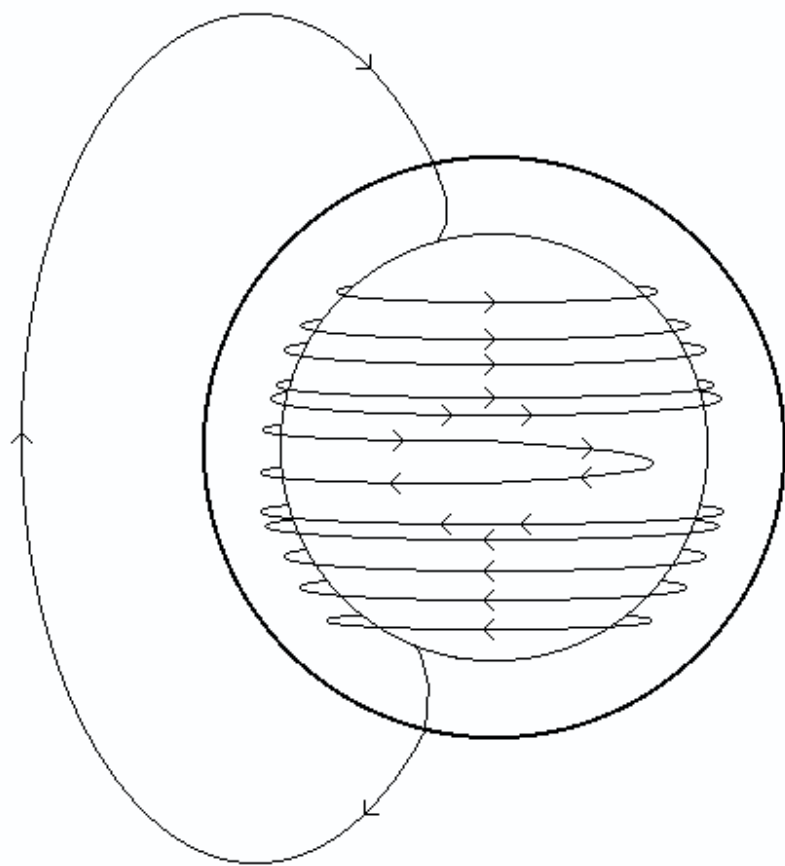
2001年2月



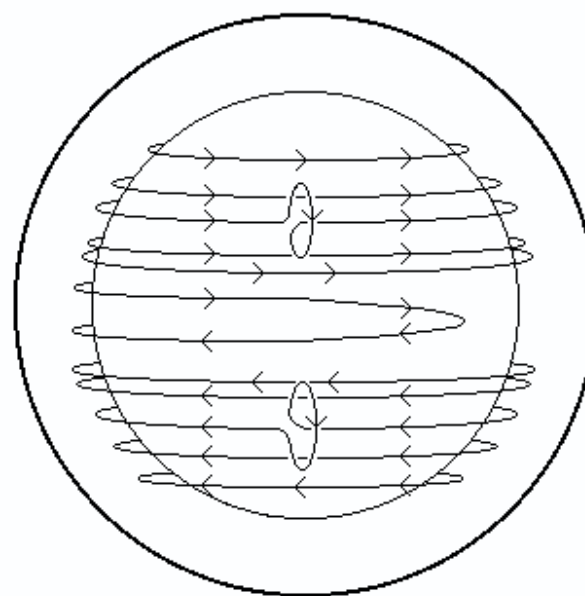
- ・黒点は正負のペアで現れる。
- ・ほぼ東西に並び、先行黒点(西側)がやや低緯度 (Joyの法則)
- ・先行黒点と後行黒点の極性には決まりがあり、北半球と南半球で逆。また11年周期ごとに反転する (Haleの法則)



$\alpha\omega$ ダイナモ



The ω -effect

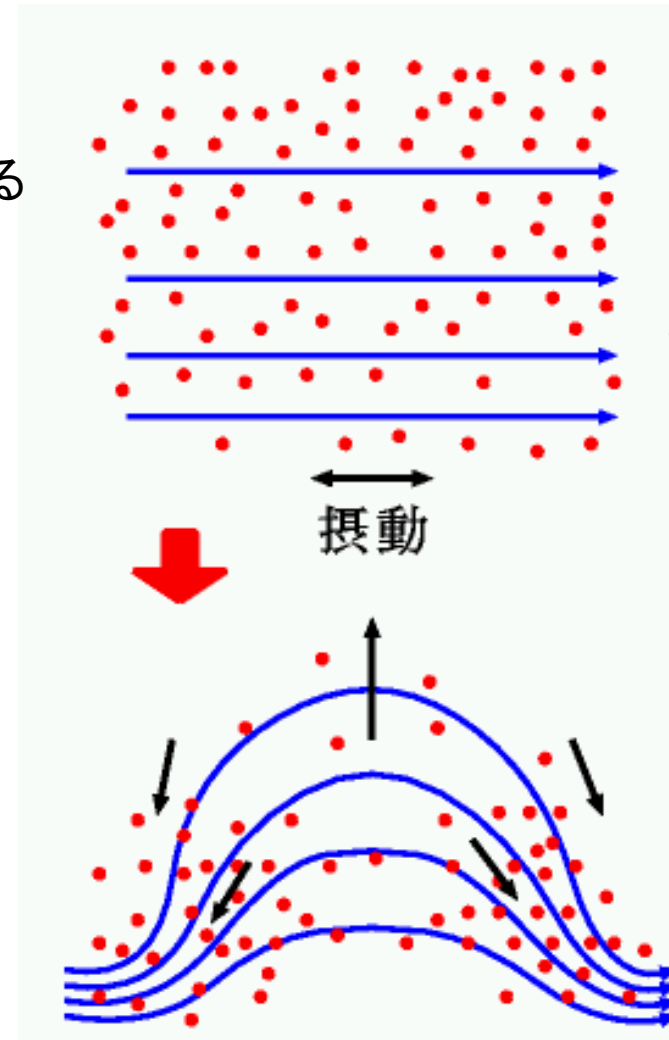


The α -effect

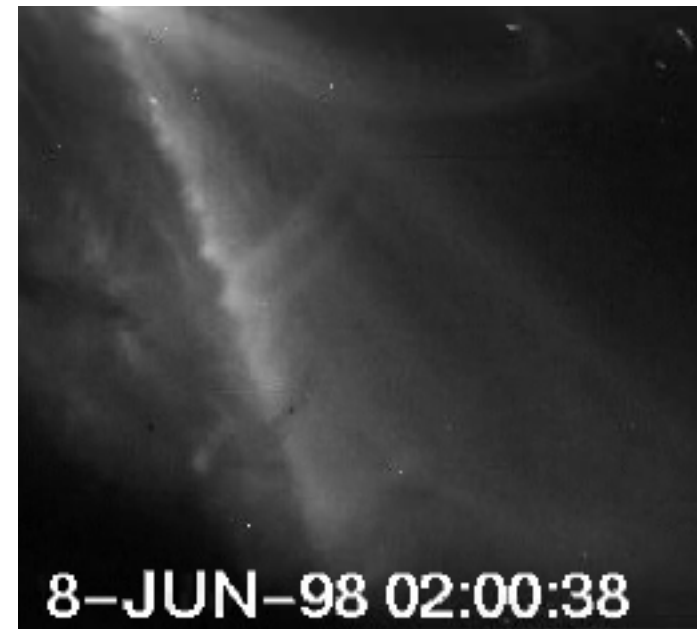
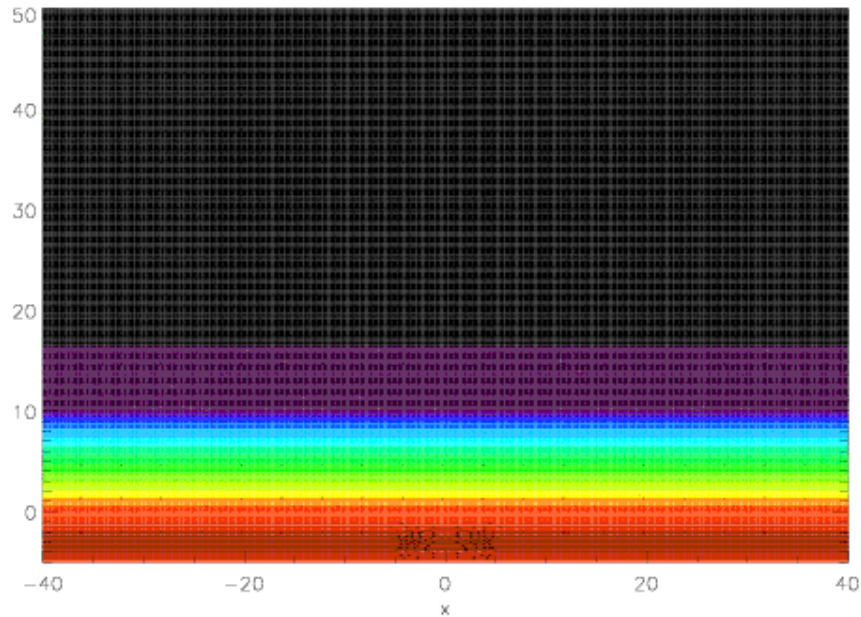
磁気浮力とパーカー不安定

磁場は圧力を持つためプラズマを排除し軽くなる
=>磁気浮力

一部が持ち上がった磁力線に沿ってガスが
流れ落ちる
=>その部分がさらに軽くなる
=>さらに持ち上がる
(パーカー不安定)

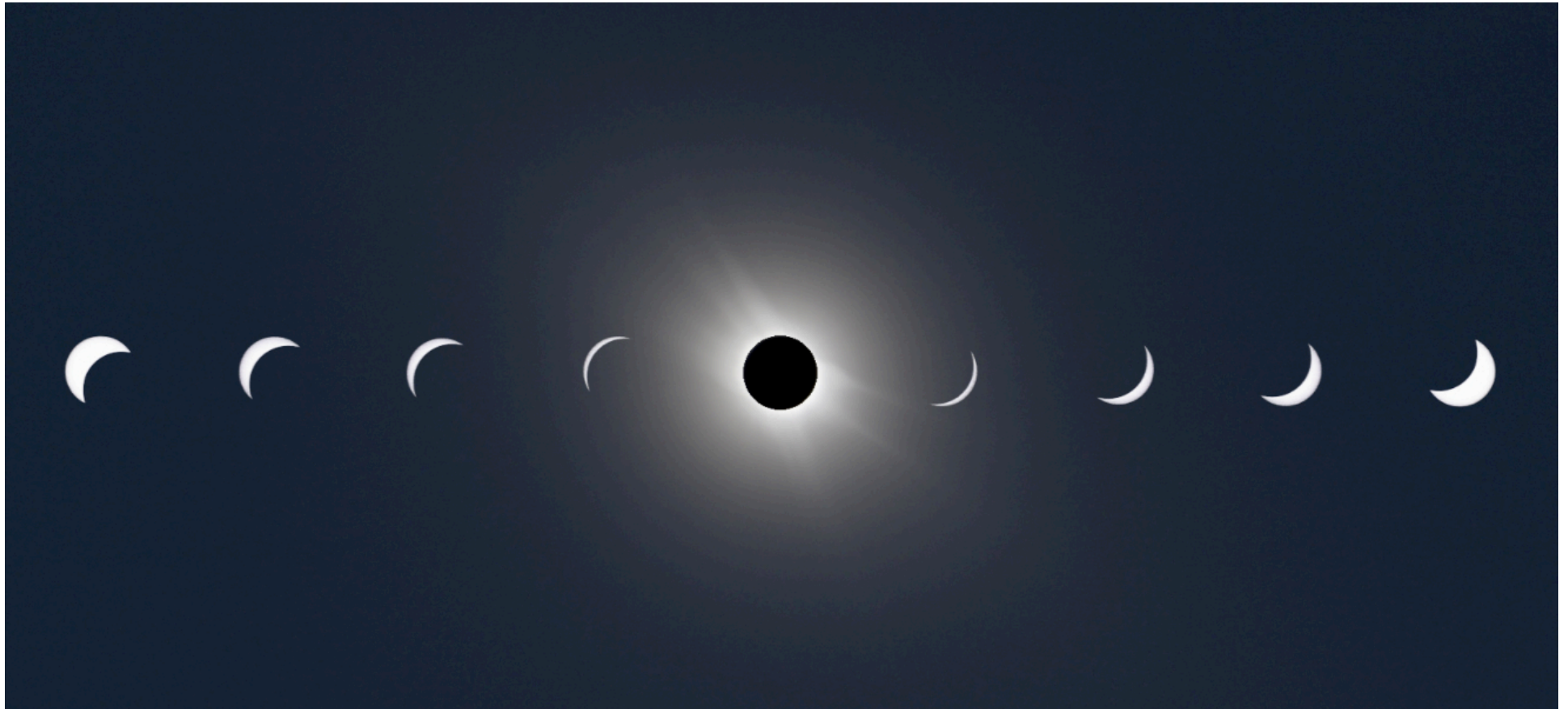


パーカー不安定の数値シミュレーション



磁気流体方程式をコンピュータで数値的に解く。

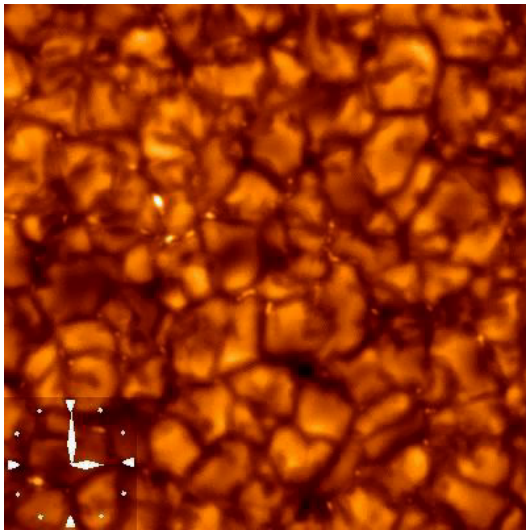
コロナ加熱問題



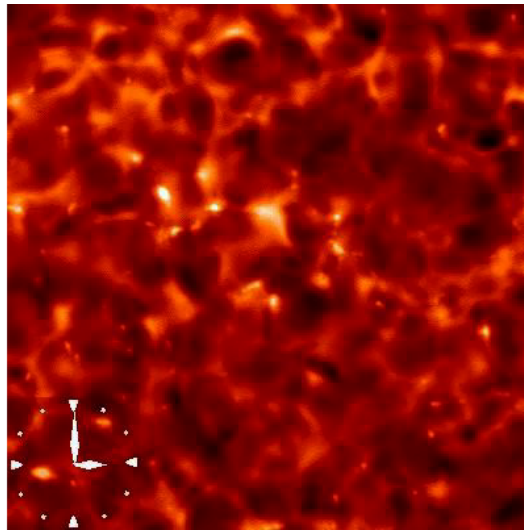
なぜ6000Kの表面の上空に100万K以上のコロナがあるか？

コロナ加熱問題の答え レベル1

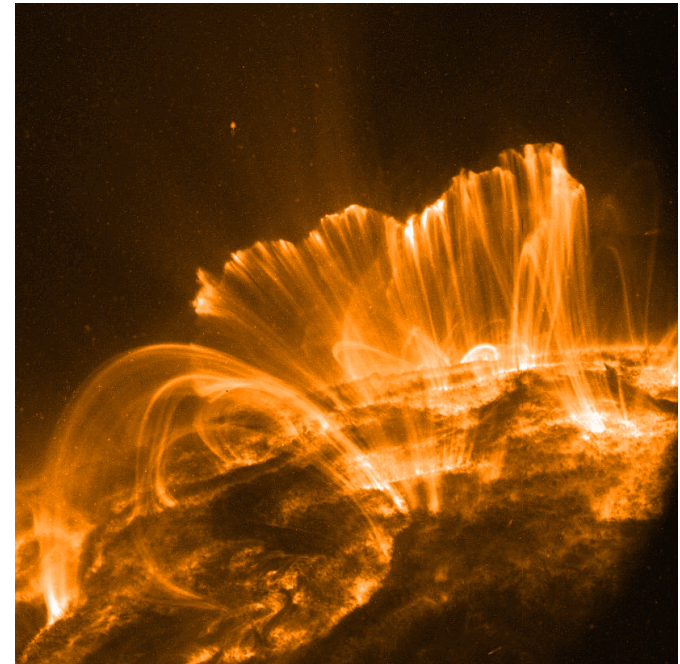
- 問題: 表面は6000度なのになぜ外側が100万度になれるのか
- 答え: 非熱的エネルギー(運動E、磁場E)が輸送、散逸する



光球



彩層



コロナ

コロナ加熱に必要なエネルギーフラックスは静穏領域で 10^3 、活動領域で 10^4 J/s/m²
光球の磁場 $B=0.01$ テスラ、速度を1km/sとして、
ポインティングフラックス($E \times B$)/ 2μ を計算せよ。

コロナの加熱の原理 レベル2: 電磁調理器

関西電力のHPから



電磁調理器 (IH: Induction Heating)

調理器に電流を流す

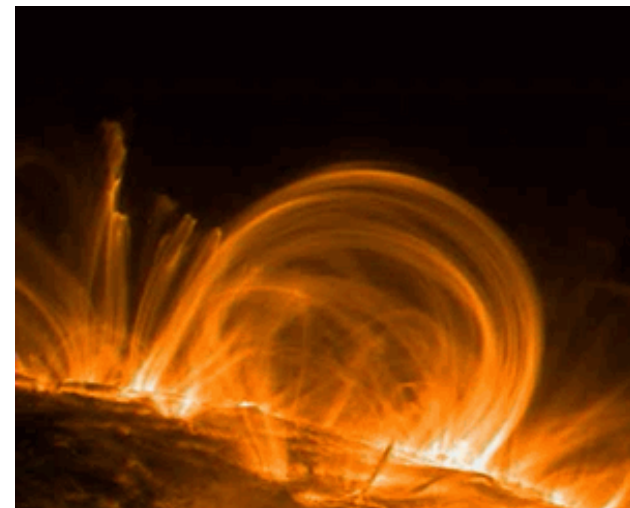
=> 磁場ができる (電磁石の原理)

=> 鍋に電流が流れる (電磁誘導の原理)

=> 電流が電気抵抗により熱化 (電気ストーブ)

太陽では:

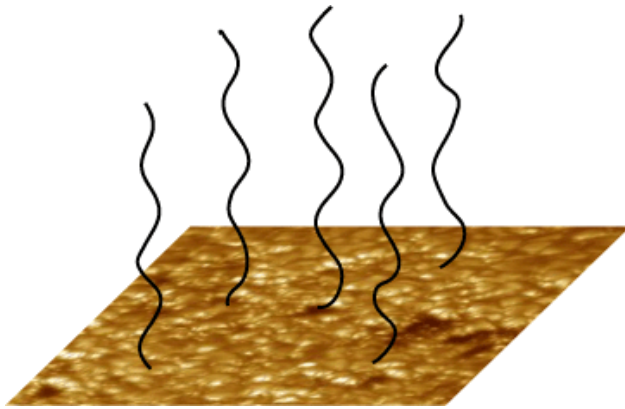
太陽表面のガスの運動 (電流)
が磁場を介してコロナに電流を流し、
その電流のエネルギーが熱に変わる



コロナ加熱の理論モデル

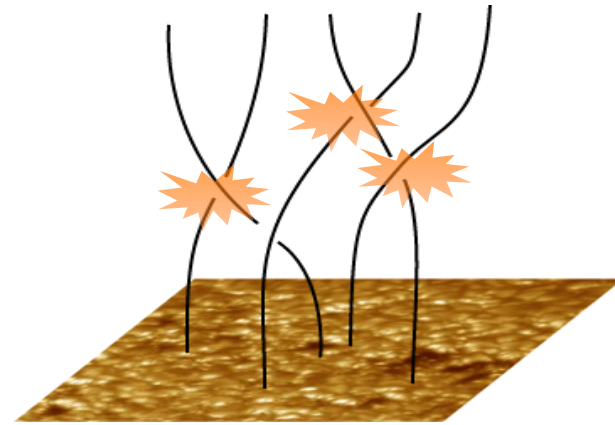
τ_{cv} : 対流運動のタイムスケール、 τ_A : コロナループのアルフベントイム

$\tau_{cv} < \tau_A \Rightarrow$ アルフベン波



- 波の散逸メカニズムは色々。ショック形成、位相混合、共鳴吸収...
- 高周波が散逸しやすい

$\tau_{cv} > \tau_A \Rightarrow$ 磁気リコネクション

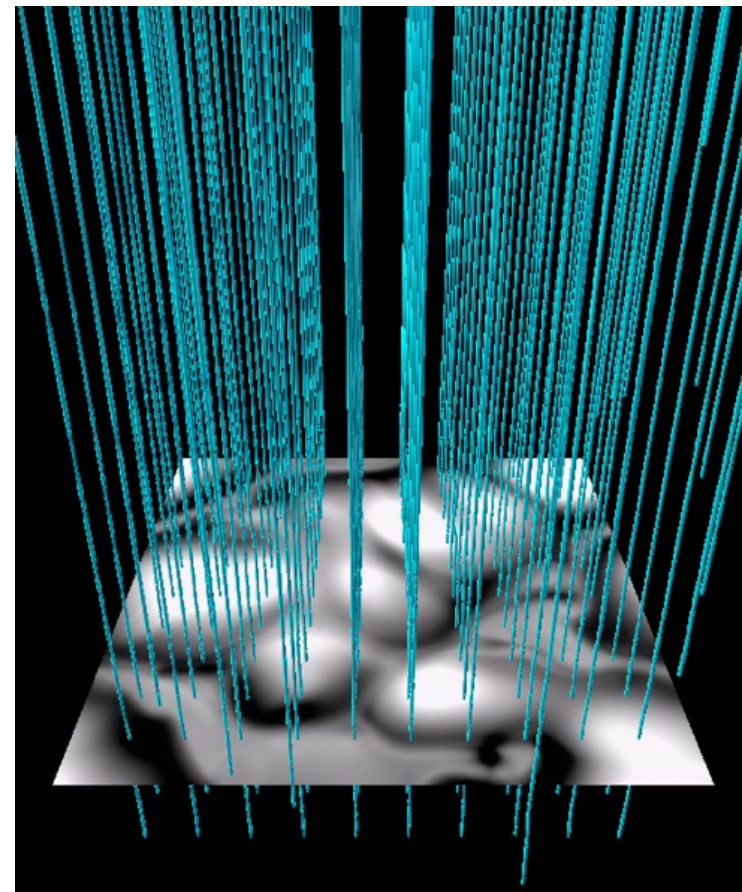


小さいフレアの集まり = ナノフレア加熱

波がエネルギーを伝えるのか、ゆっくりした動きで磁場のねじれを蓄積することで伝えるのか？これが現在の課題

対流層ーコロナ結合のMHDシミュレーション

- 対流層からコロナまで
 - 密度比 ≈ 7 桁
 - $10,000 \times 10,000 \times 25,000 \text{ km}^3$
- 光球を冷却(Newton近似)
- 対流が準定常状態に発達したら、
一様な垂直磁場を入れる



コロナ

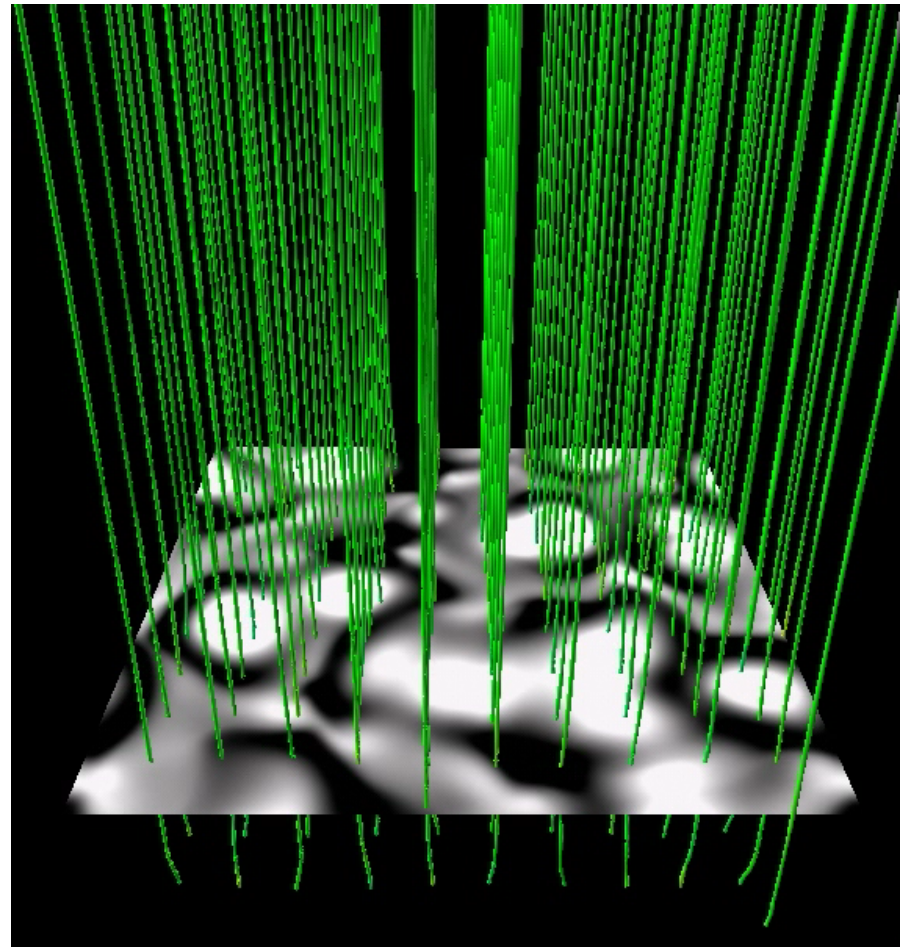
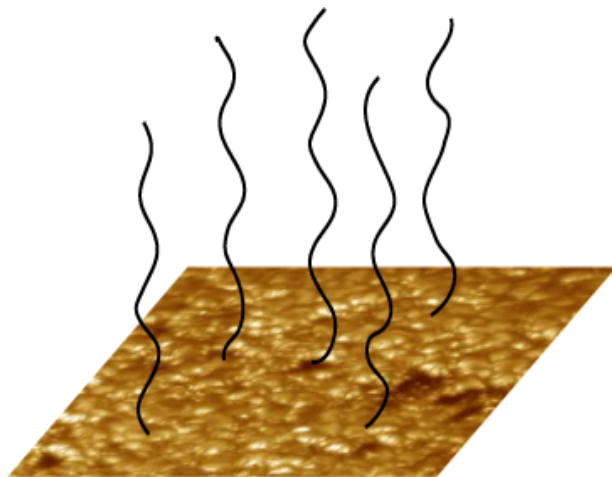
彩層

光球

対流層

$Q=12000$ ($\langle B \rangle \approx 1\text{kG}$, strong B like umbra)

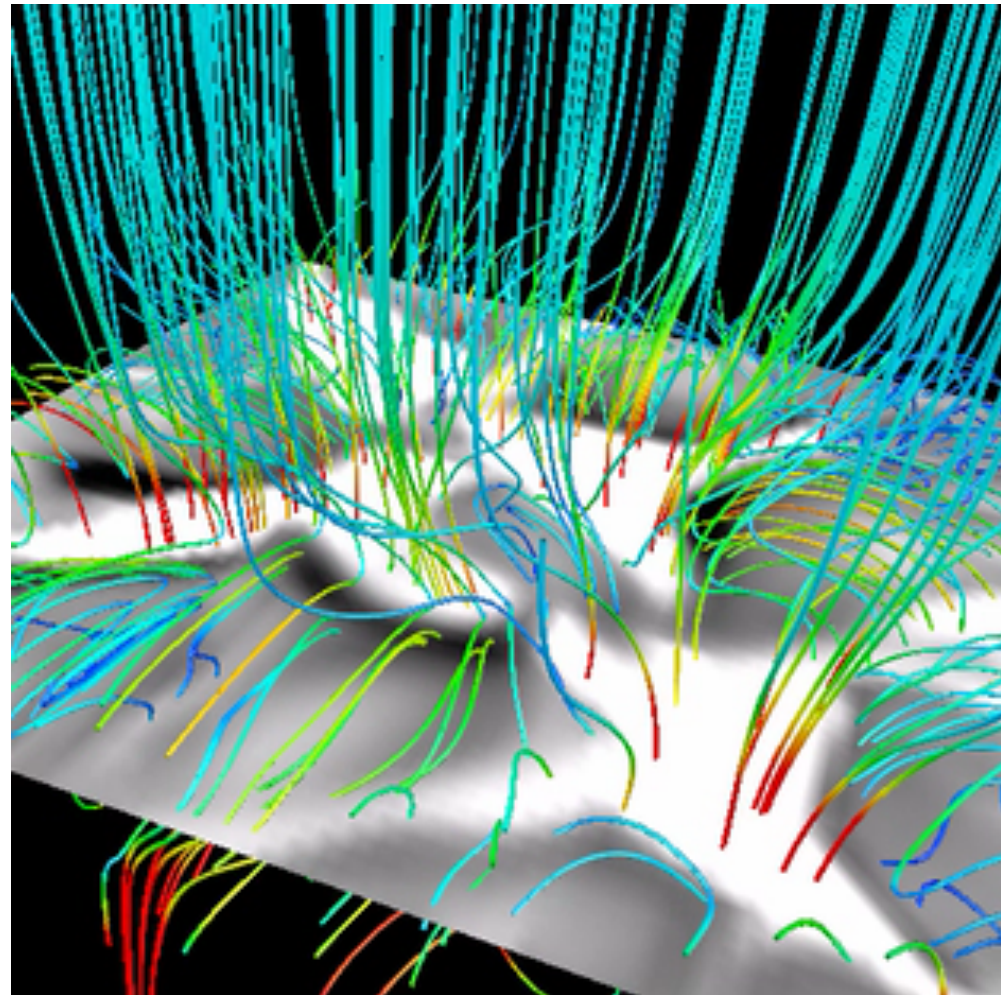
- 振動的対流
- 縦磁場が対流の水平運動で揺らされる。古典的描像。
- 発生したアルフベン波の大部分はコロナの底で反射



光球の V_z と磁力線

$Q=300$ ($\langle B \rangle \approx 100\text{G}$, active region but outside sunspot)

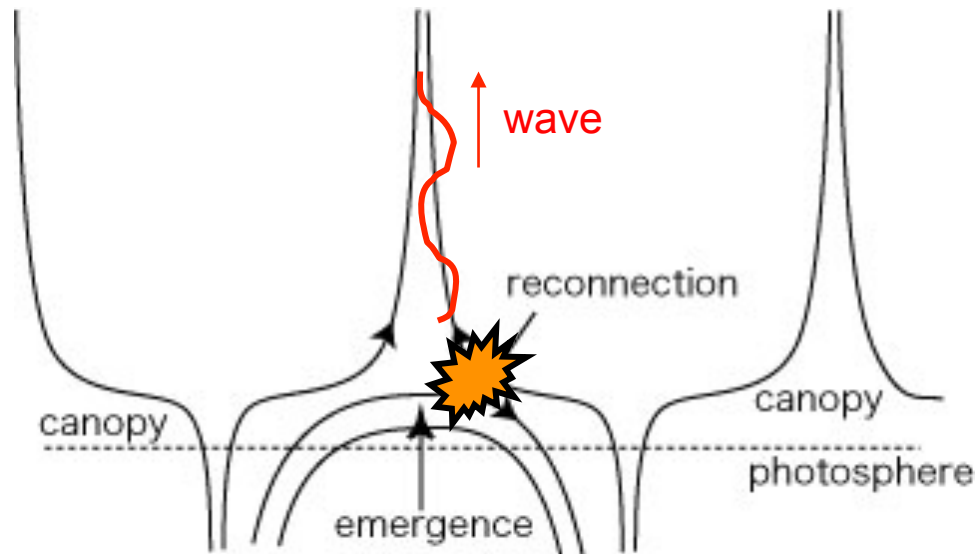
- 縦磁場は対流セル間の下降流に集中(>1kG)
- 対流層中の磁場が乱流的になる
- 対流の上昇流に乗って数百Gの磁場が浮上



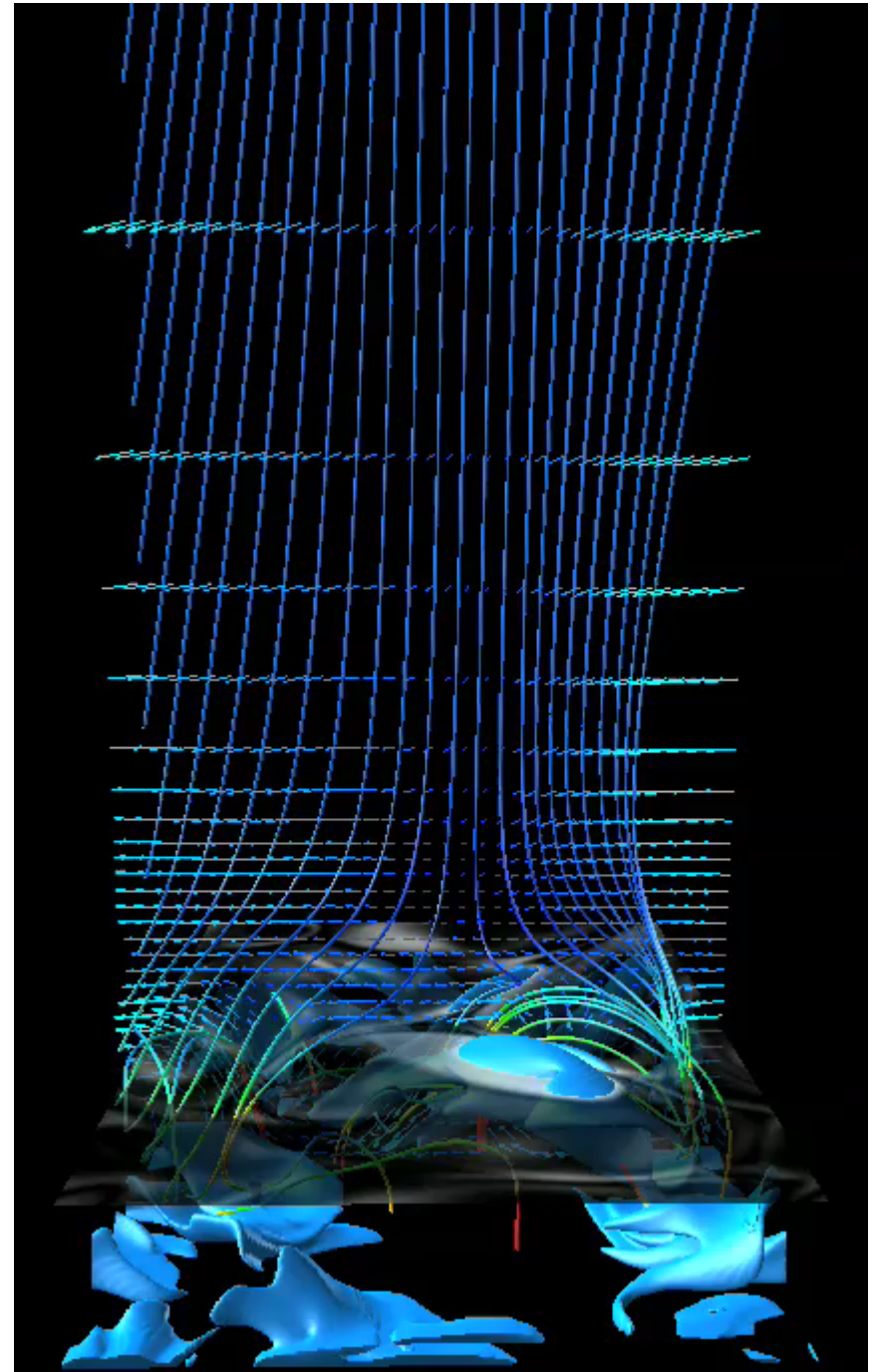
光球の B_z と磁力線

微細浮上磁場と 彩層リコネクション

- 微細浮上磁場は自分ではコロナに届かない
- 縦磁場とリコネクションすることで、エネルギーをコロナに輸送

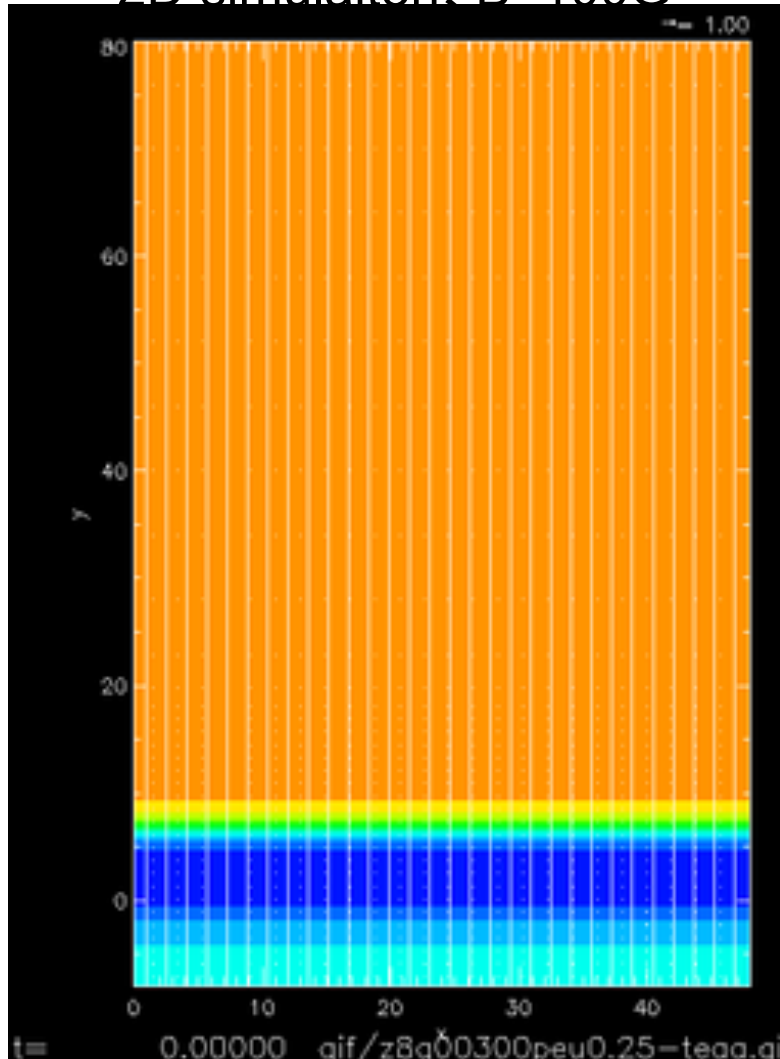


Isobe, Proctor and Weiss 2008, ApJ



高周波波動の発生

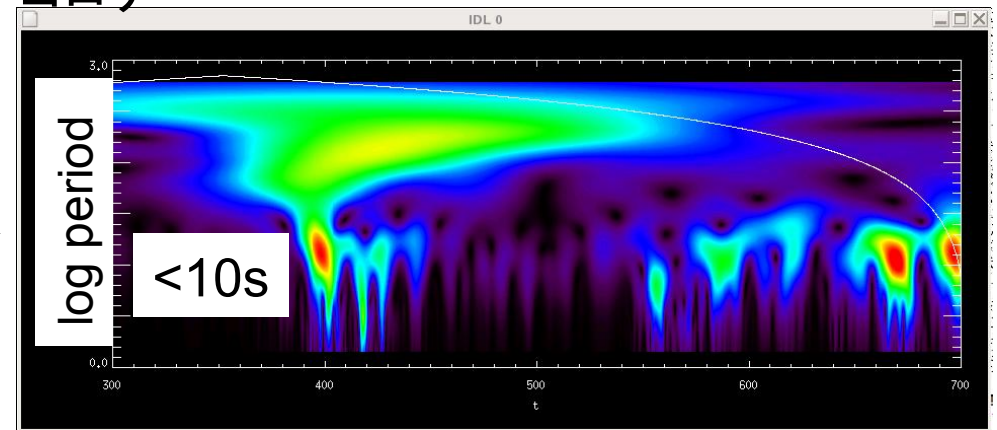
2D simulation, $B \approx 100G$



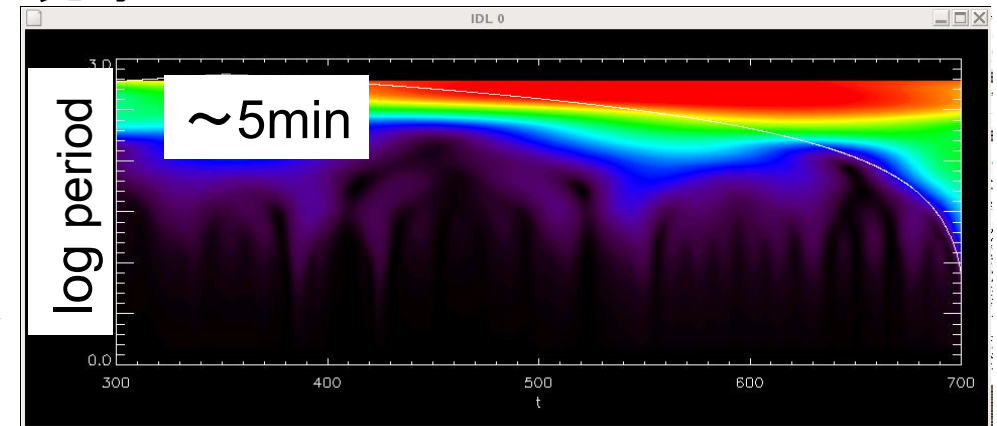
color: log Temperature

V_x のウェーブレットスペクトル

コロナ



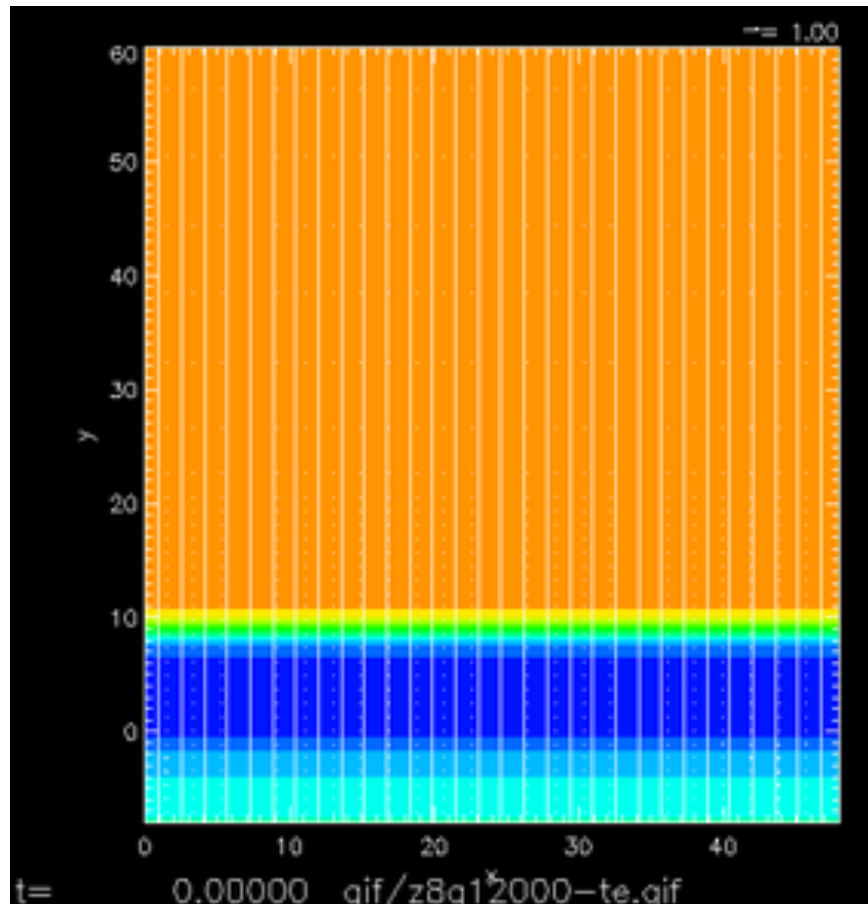
光球



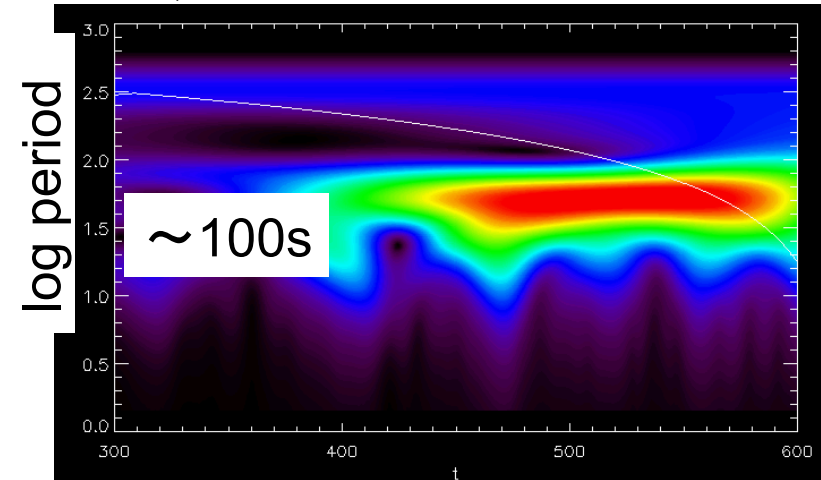
- 彩層でのリコネクションに伴い、高周波波動がintermittentに発生

乱流磁場のない場合

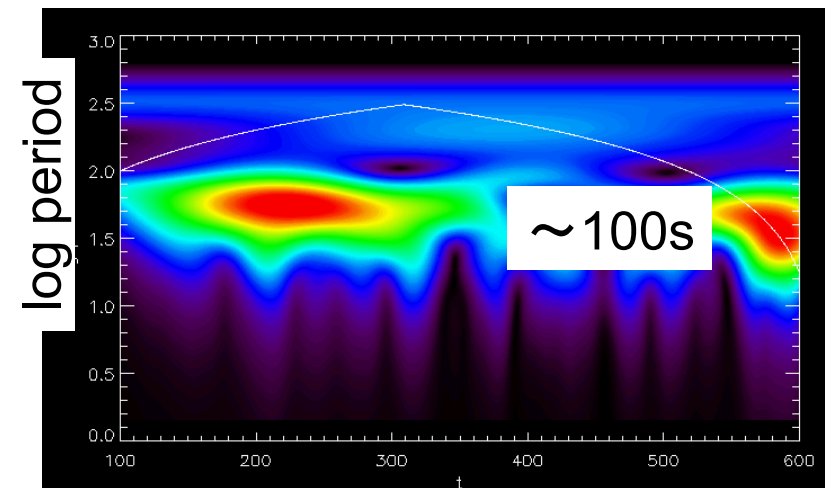
B=400G



コロナ



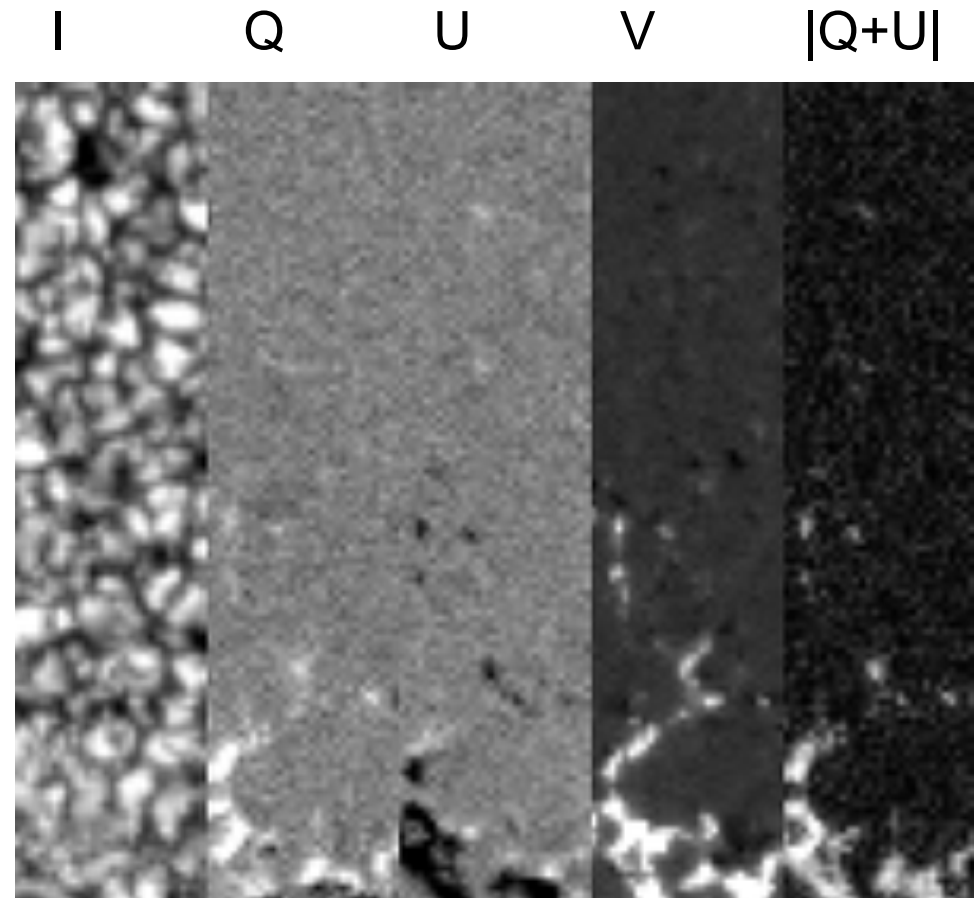
光球



対流のスペクトルとほぼ同じ

観測で見えてきた乱流磁場

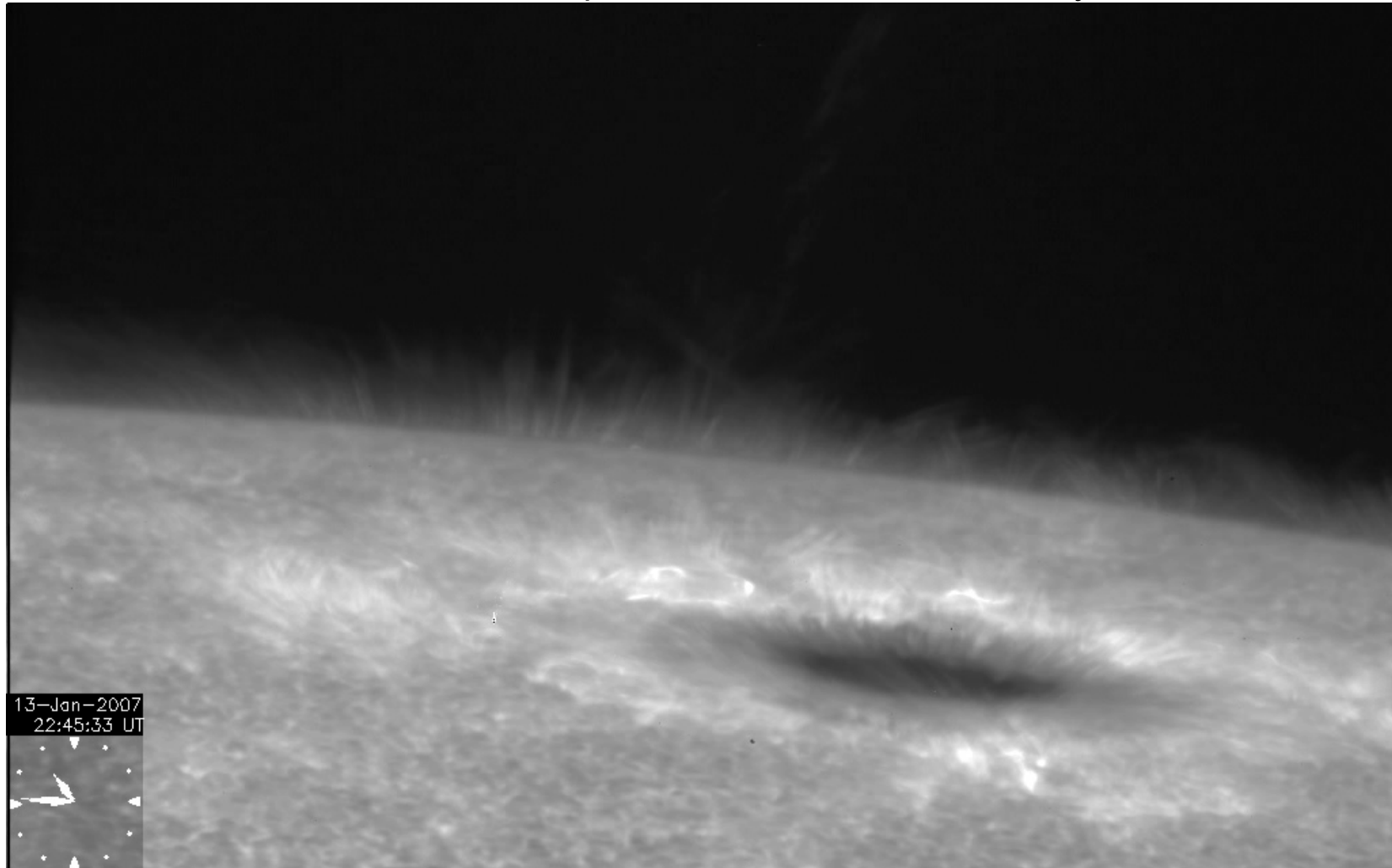
- ひので可視光望遠鏡
- はじめてスペースからの偏光観測(IQUV)
- 対流スケールの水平浮上磁場(直線偏光)(Ishikawa+08 ; Centeno+ 07)
- コロナ加熱に要求されるのと同程度のPoynting flux ($>10^6 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$; Ishikawa & Tsuneta 09)



Q and U (linear polarization)
= transverse (\approx horizontal) fields

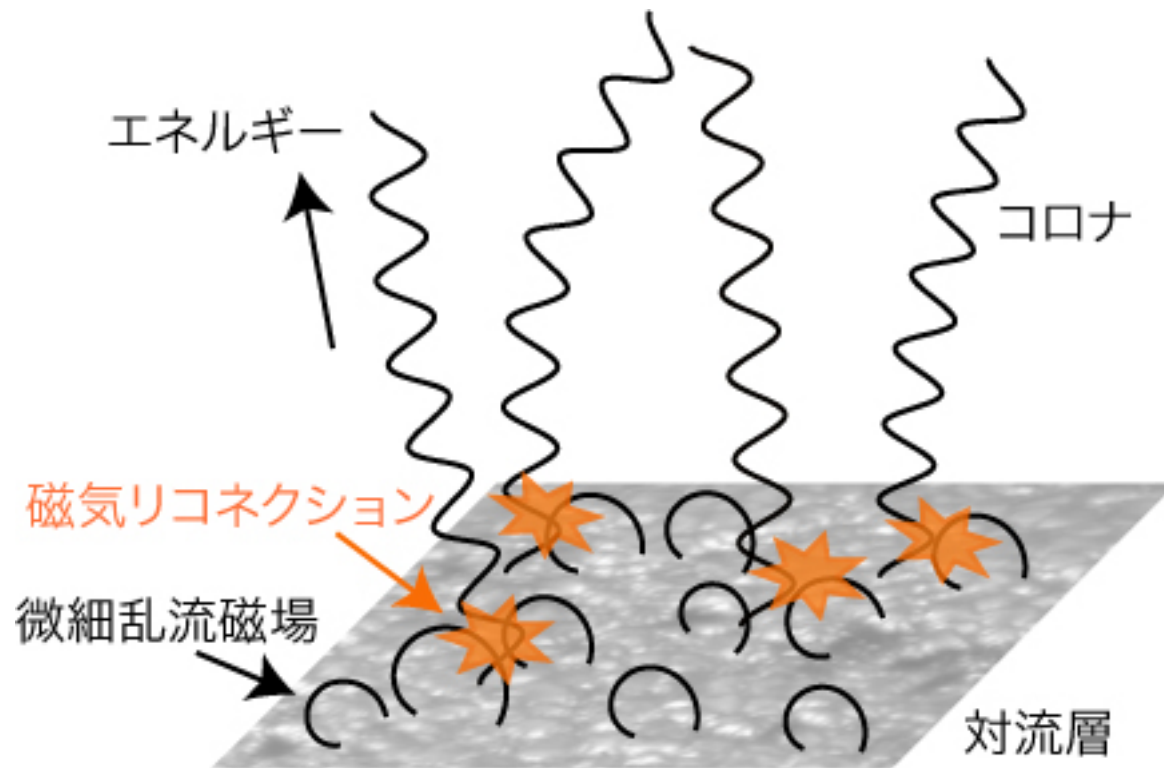
意外と激しい彩層の活動性

Hinode/SOT chromospheric CaH line; movie courtesy of T. J. Okamoto

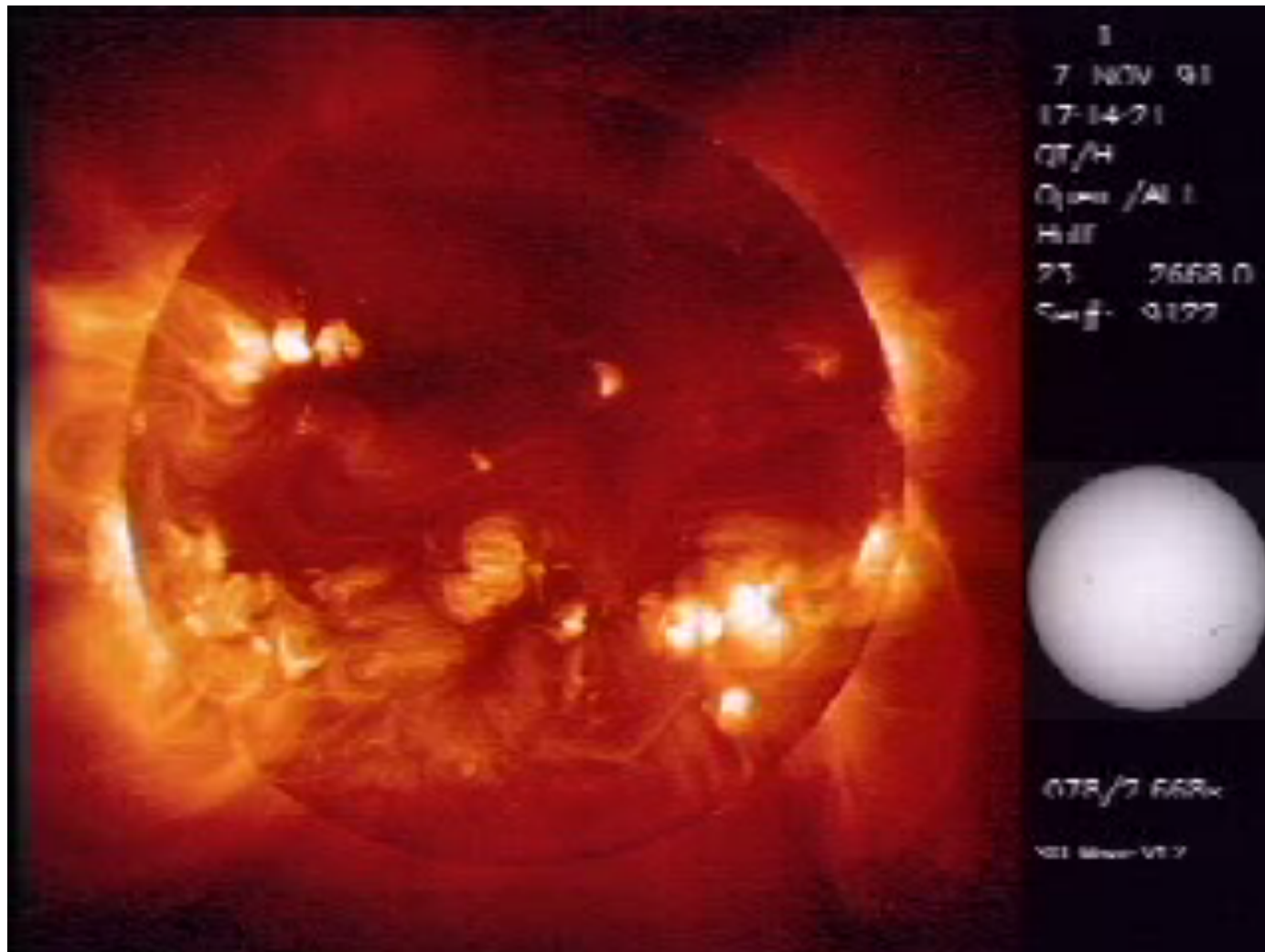


Ubiquitous jets (Shibata+ 07; Katsukawa+ 07) and “Alfvénic” waves (Okamoto+ 07, De Pontieu+ 07; Nishizuka+ 08)

コロナ加熱最新描像



フレア

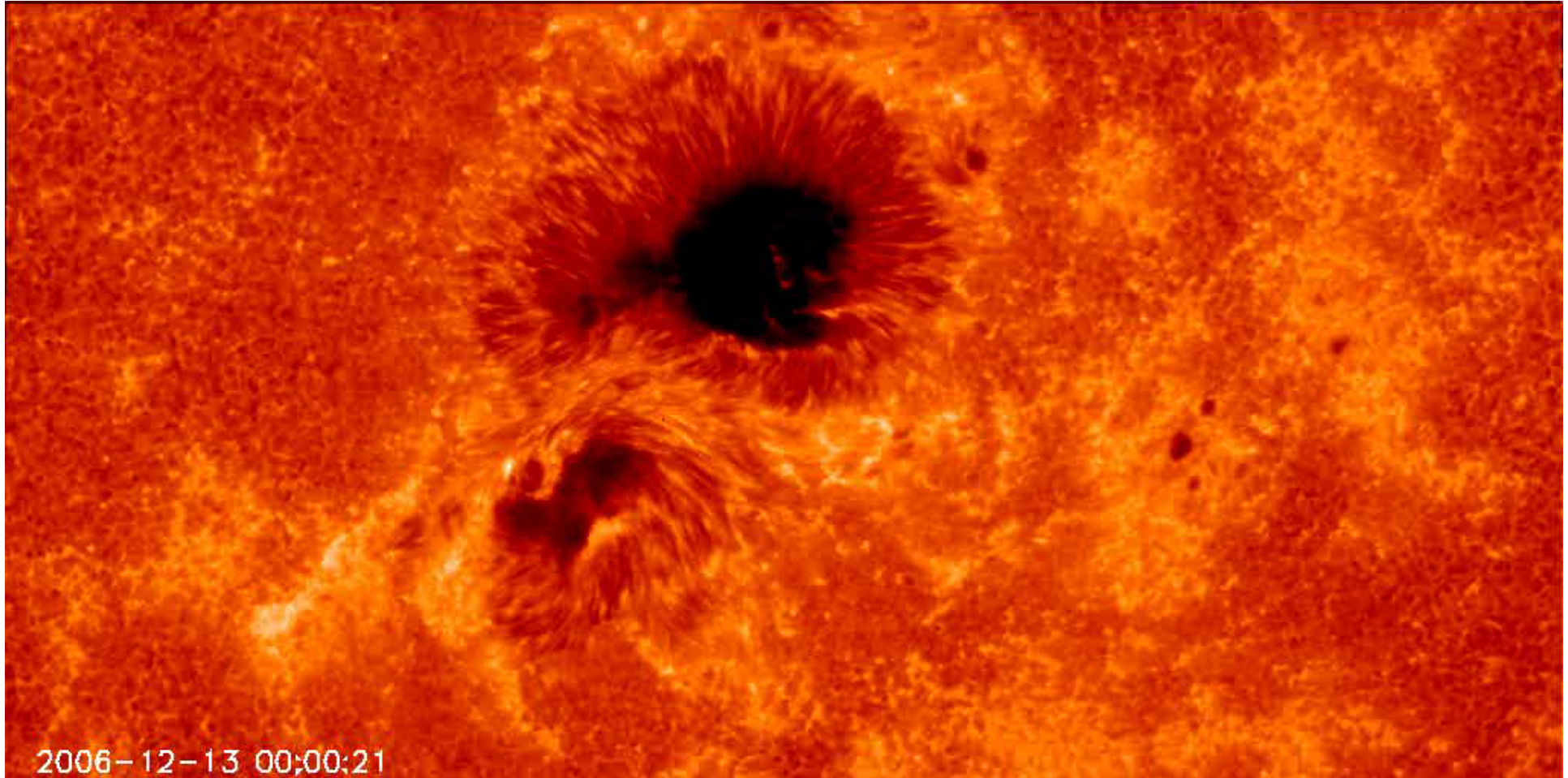


フレアのエネルギー

- 温度 $T \sim 1000$ 万K、密度 $n \sim 10^{16} \text{ m}^{-3}$
- サイズ $L \sim 10$ 万km
- 全熱エネルギー $E = nkTL^3$ を計算せよ

- 黒点付近のコロナの磁場強度は $B \sim 0.01\text{T}$
 - 磁気エネルギー $B^2V/2\mu$ で足りるか？

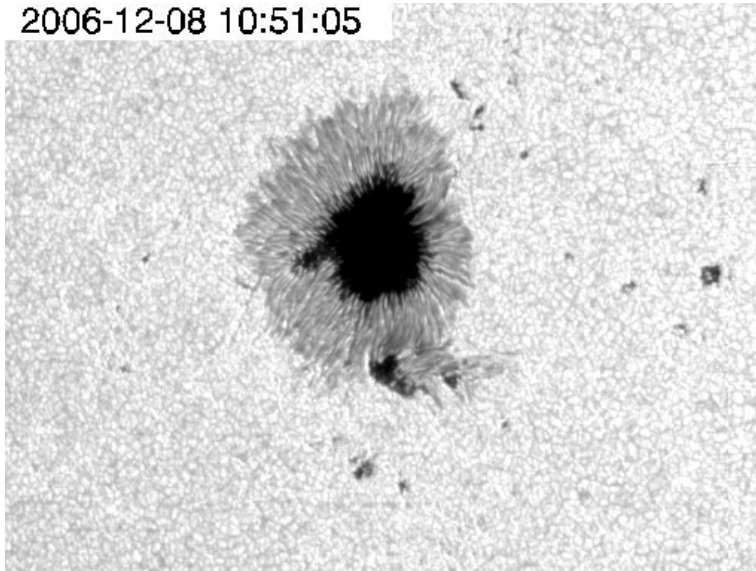
フレア時の彩層



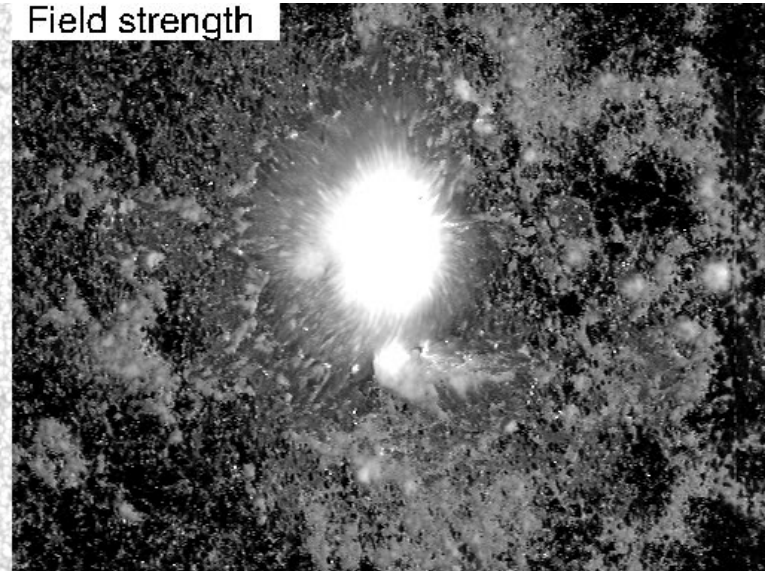
2006-12-13 00:00:21

磁気エネルギーの蓄積

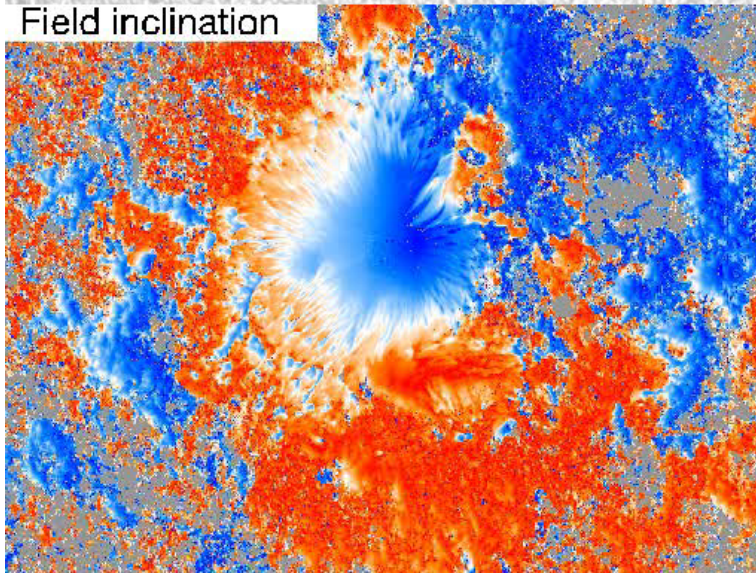
2006-12-08 10:51:05



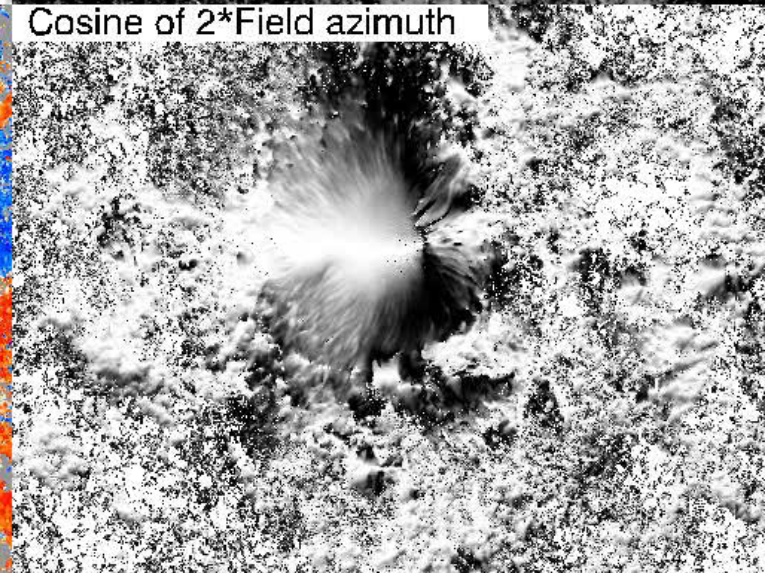
Field strength



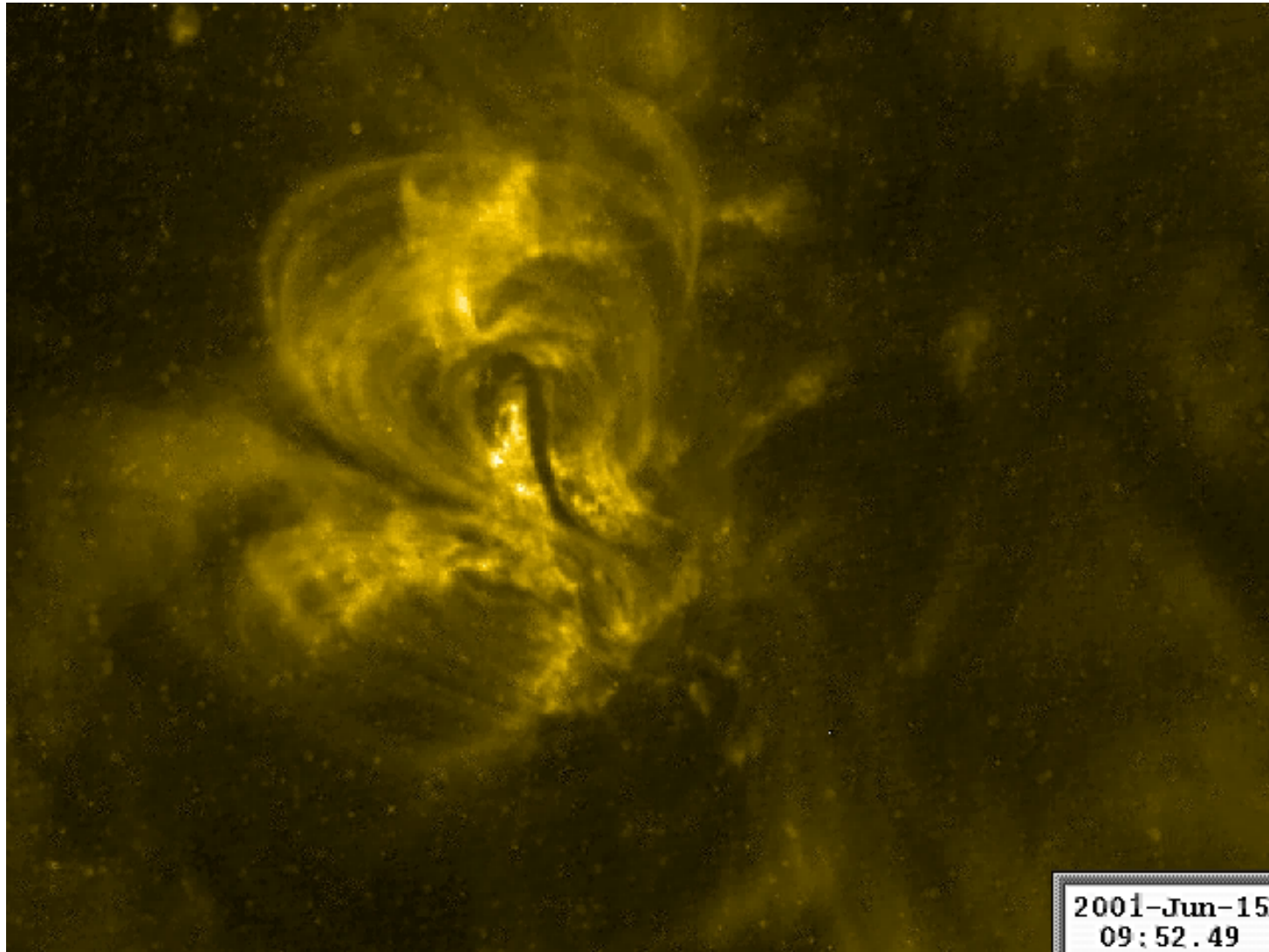
Field inclination



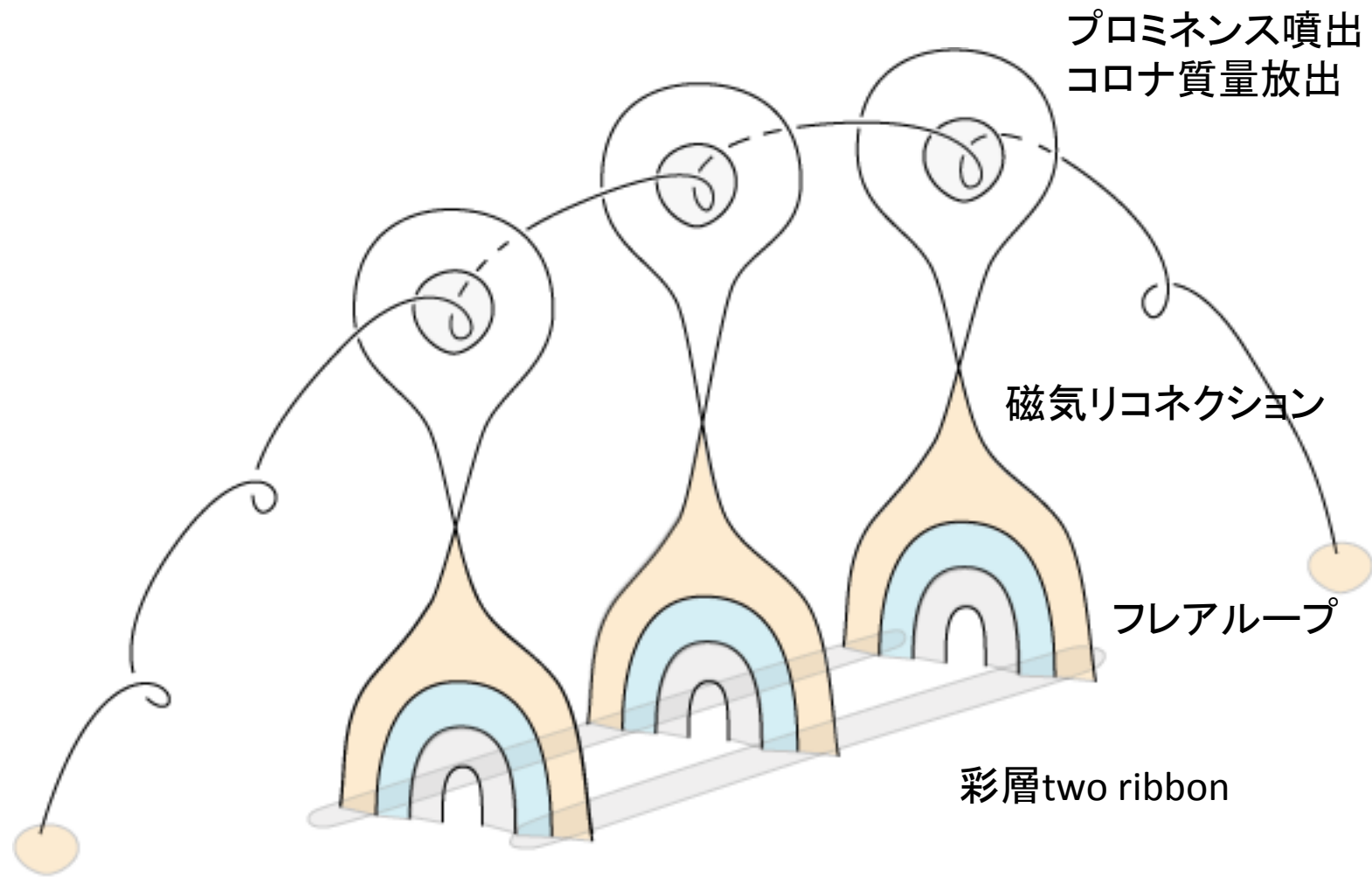
Cosine of 2*Field azimuth



プロミネンス噴出とフレア



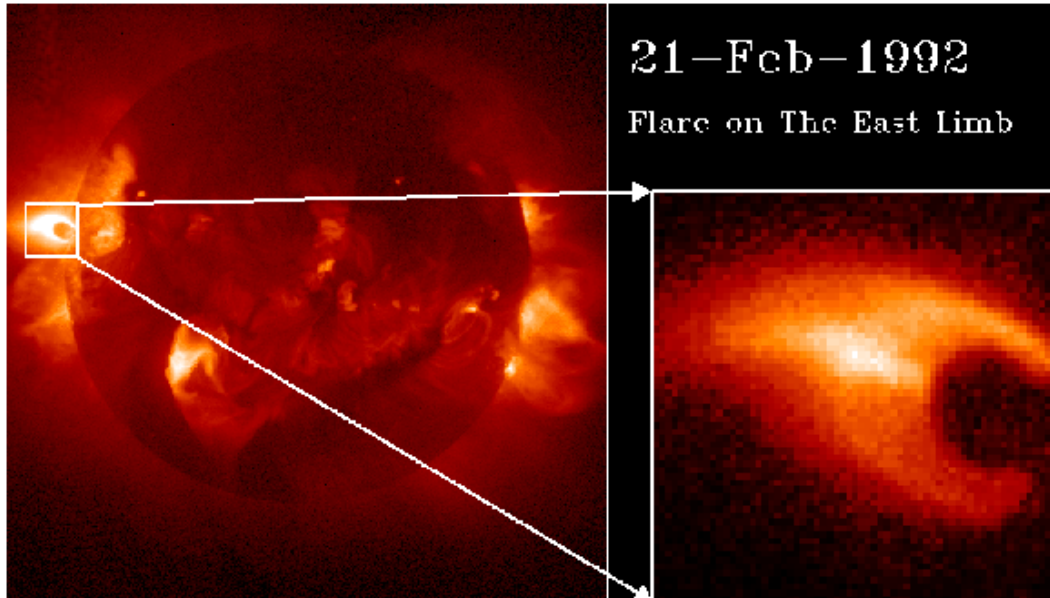
フレアの磁気リコネクションモデル



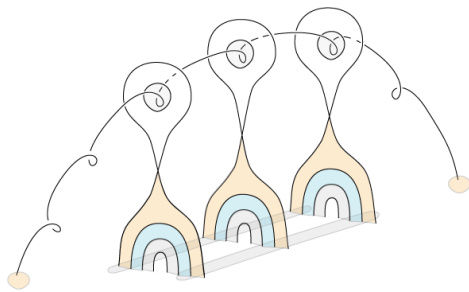
なぜ磁気リコネクションが必要か

- 小問題:ジュール加熱にかかる時間を計算
- 希薄なプラズマ中は電気抵抗が小さく、ジュール加熱では磁場(電流)のエネルギーを熱化するのに、フレアの継続時間(~100-1000秒)より何桁も長い時間がかかる。従って、磁気エネルギー解放を加速するメカニズムが必要=>磁気リコネクション
- 磁気リコネクション=磁力線のつなぎかえ。簡単に言えば、つなぎ変わった磁力線がパチンコのようにプラズマを加速して、磁気エネルギーをプラズマの熱・運動エネルギーに変換する
 - 実際のプロセスは複雑。太陽以外の天体現象、地球・惑星磁気圏(オーロラ)や核融合の磁気閉じ込めプラズマ中でも重要な物理過程であり、様々な分野の研究者がこの問題に取り組んでいる。

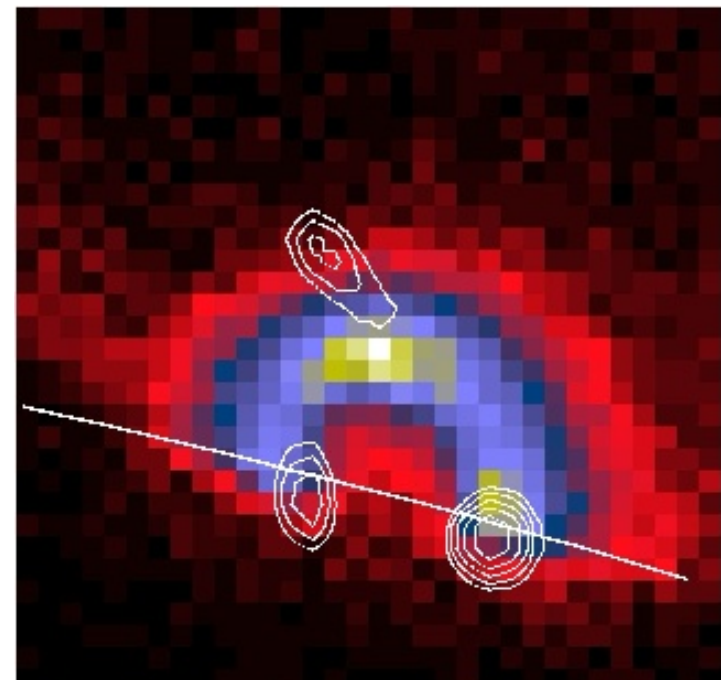
Observational evidence for magnetic reconnection in the corona (before Hinode/SDO)

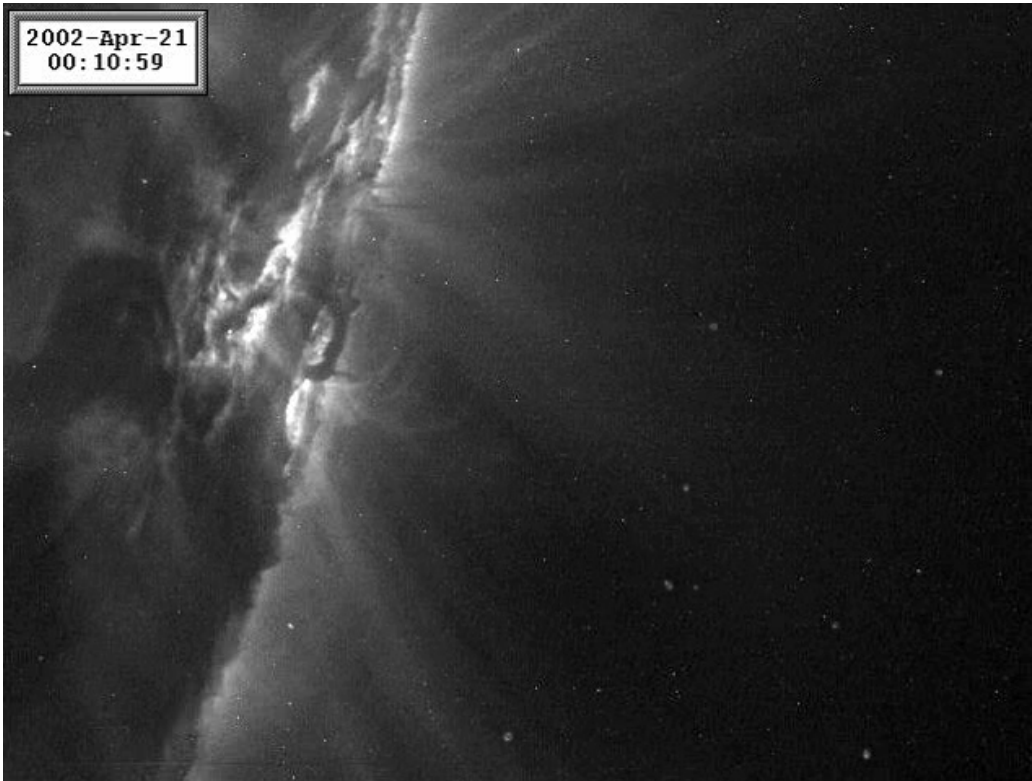


Cusp-shaped loop
(Tsuneta+92)

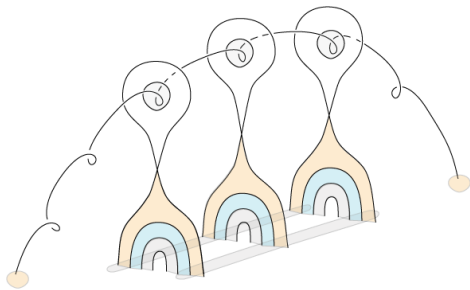


Loop-top Hard X-Ray source
(Masuda+94)



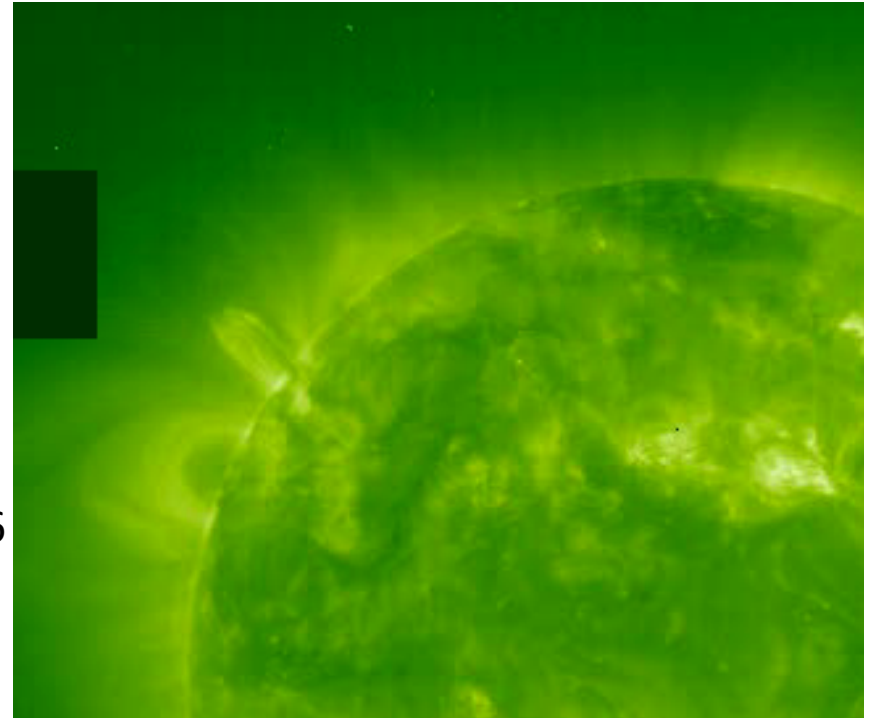


Supra-arcade downflow
(McKenzie Hudson99, Innes+03, Asai+04,
Savage+12)



Reconnection inflow
(Yokoyama+01; Narukage & Shibata06
Lin+05, Hara+06)

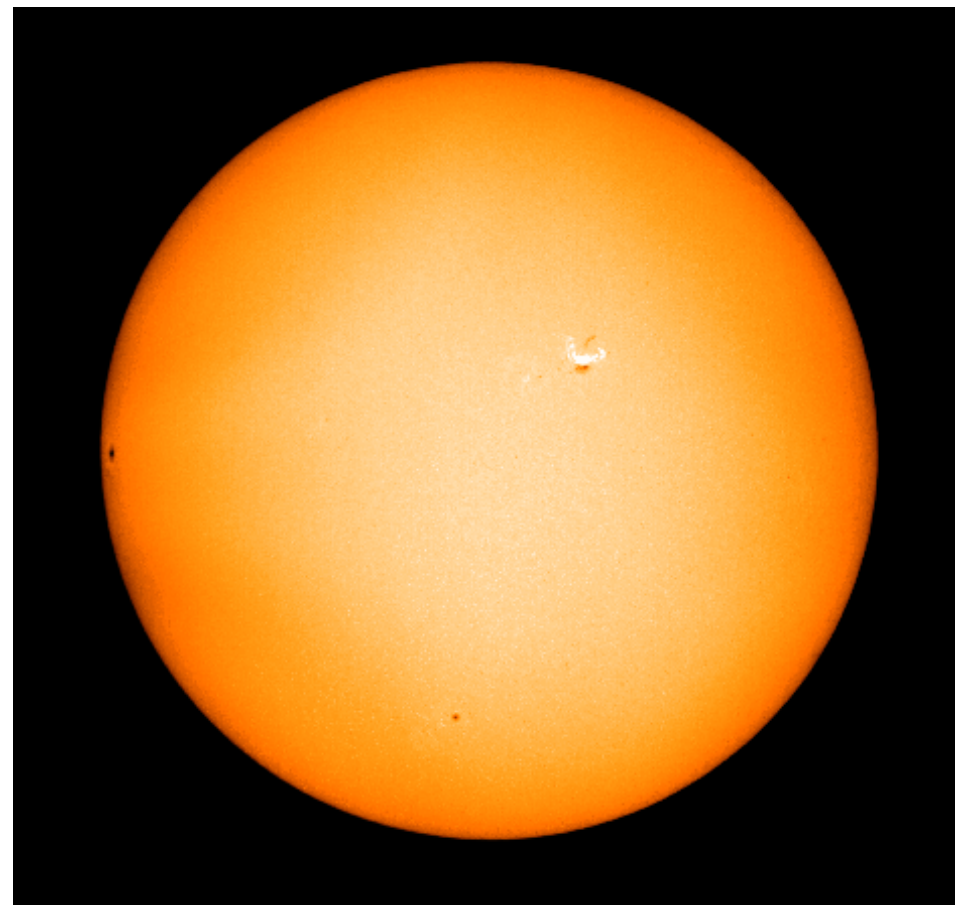
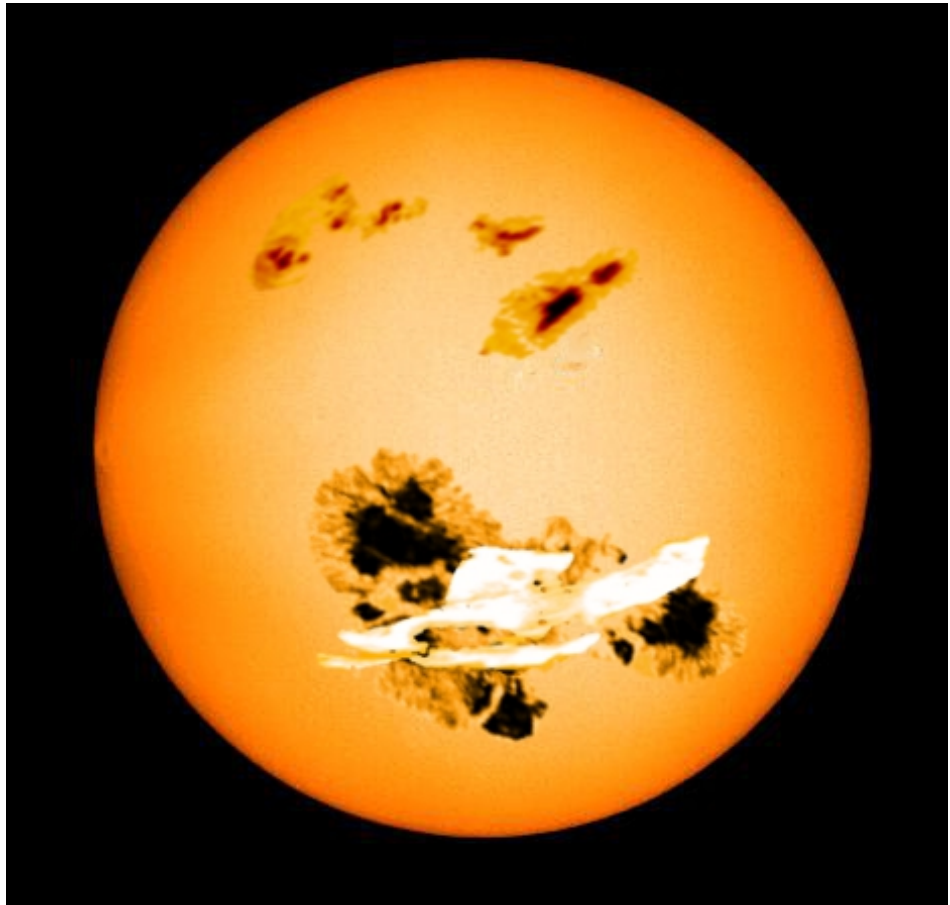
$$V_{\text{inflow}} \sim 0.01 V_A$$



最近の話題：大陽でスーパーフレア？

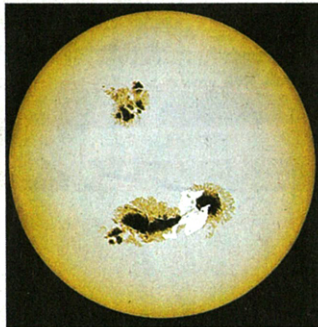
スーパーフレアの想像図

太陽フレア
(実際の観測)



太陽も「スーパー爆発」!?

通信障害など懸念



スーパーフレア(白い部分)の想像図(京都大提供)

太陽では起きないと考えられていた大規模な爆発「スーパーフレア」が起きるかもしれないことが、京都大グループの解析でわかった。発生すれば広範囲での通信障害や停電、上空の航空機内での放射線被曝とい



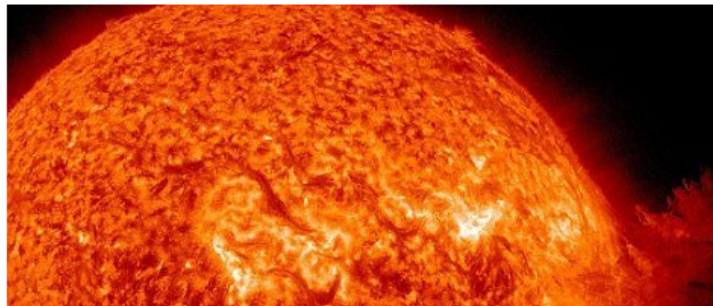
滚动新闻 资讯排行 RSS订阅

位置: 环球网 > 科技 > 科学探索 > 正文

太阳可能爆发超级耀斑 届时地球将遭灭顶之灾

12-05-18 19:54 新华网 请快来参与 分享到: [Social media icons]

摘要: 日本京都大学附属天文台教授柴田一成率领的研究小组在新一期英国《自然》杂志网络版上报告说, 太阳表面也有可能发生称为“超级耀斑”的巨大爆发。而此前科学家认为太阳不会出现超级耀斑。

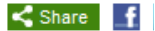


BBC News Sport Weather Travel

NEWS SCIENCE & ENVIRONMENT

Home UK Africa Asia Europe Latin America Mid-East US & Canada Business Health

17 May 2012 Last updated at 13:37 GMT



Kepler telescope studies star superflare



By Jonathan Amos
Science correspondent, BBC News

Nasa's Kepler space telescope has provided fresh insight on the colossal explosions that can afflict some stars.



태양에서 초거대 폭발 가능성

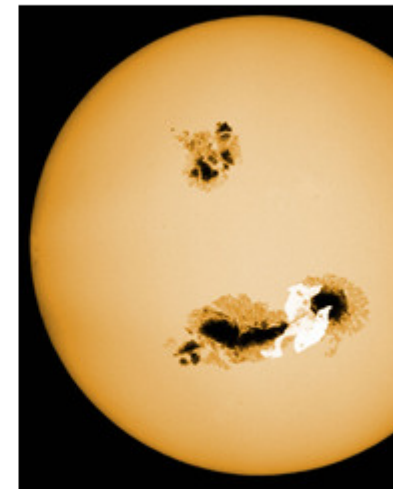
12/05/17 11:09

초거대 폭발현상 '슈퍼플레어(Superflare)'가 태양의 표면에서 일어날지도 모른다는 해석결과를 교토(京都)대부속 천문대 그룹이 16일자 영국 과학저널 <네이처> 전자판에 발표했다.

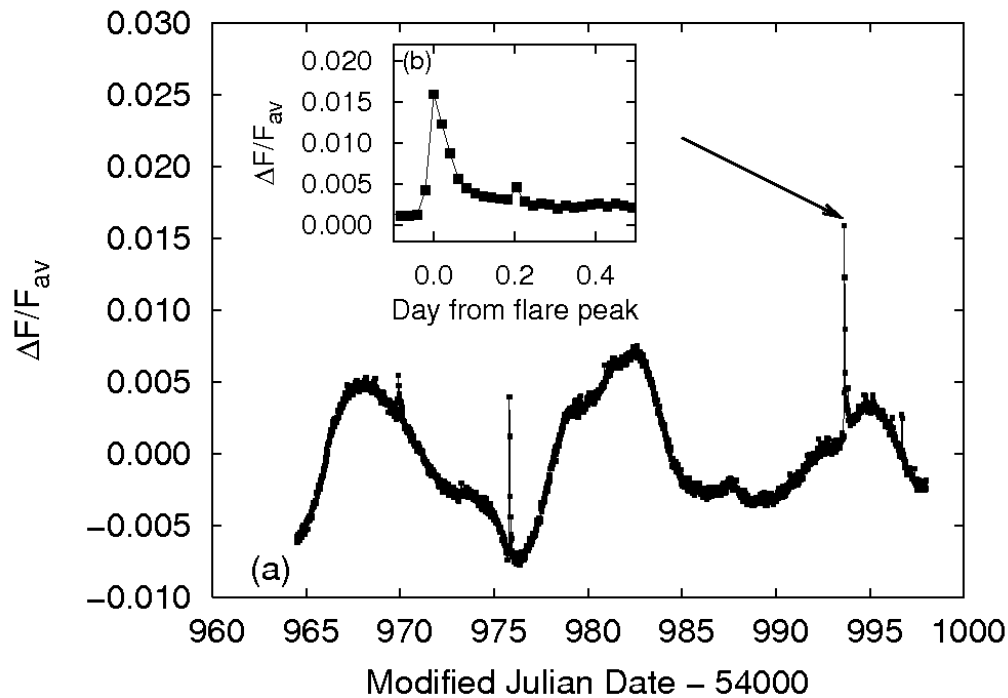
태양에서는 태양계 최대 폭발현상이라고 여겨지는 플레어가 일어나고 있으며 그 때 발생하는 자기풍으로 통신장애 및 정전 등이 발생하고 있다.

슈퍼플레어는 방출되는 에너지가 태양 플레어 가운데 최대급 플레어의 10배~100만배에 달한다. 태양에서 슈퍼플레어는 일어나지 않는다는 통설에 의의(疑義)를 제기하는 결과로, 그룹은 "(슈퍼플레어가) 발생한다면 지구는 큰 피해를 입을 것으로 예상돼 연구를 더 진전시키고 싶다"고 말했다.

그룹의 시바타 카즈나리(柴田一成) 교수(태양·우주플라즈마물리학) 등은 미항공우주국(NASA)의 행성탐사기 '케플러'가 2009년 4~12월에 관측한 데이터를 이용, 지구에



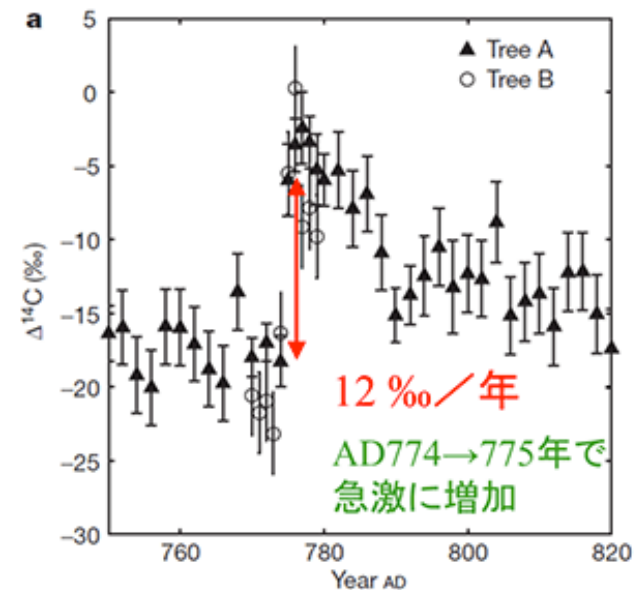
'태양형 별'에서 슈퍼플레어(중앙의 하얀 부분)가 일어날 경우의 상상도. 교토대부속천문대=京都大付属天文台 제공. [통신] 2012/05/16



太陽系外惑星探査衛星ケプラーのデータから、100個以上の太陽型の恒星で知られている太陽フレアより遥かに大きい、最大で1000倍にもなるフレアを多数発見(Maehara et al. 2012)

太陽で同じことが起きるとすると、数千年に1回、知られている過去最大のフレアの1000倍ものエネルギーのスーパーフレアが起きることになる。

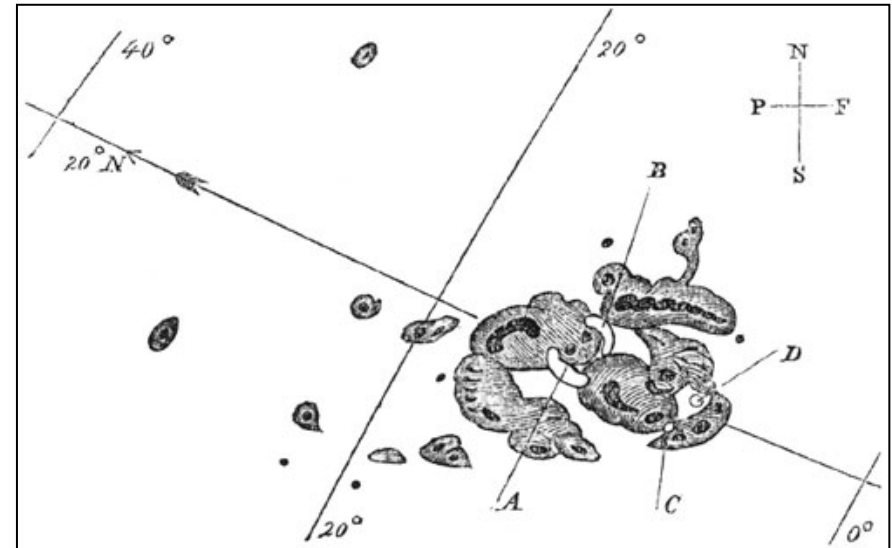
屋久杉の年輪中の放射性同位体から、8世紀に大量の宇宙線が飛来した形跡。スーパーフレア？(Miyake et al. 2012)



(図 a) AD750-820年までの ^{14}C 濃度。TreeA, TreeBはそれぞれ別個体の屋久杉のデータ。

観測史上最大のフレア＝ 人類が最初に見たフレア (キャリントン・フレア)

- 1859年9月1日、英国の天文学者キャリントンが黒点スケッチ中にフレアを発見。
- 友人を呼びに行っている間に消滅。継続時間はわずか5分間
- 英国のホジソンも観測
- 翌日、巨大オーロラ発生。
キューバ、バハマ、ジャマイカ、
ハワイでもオーロラ
過去200年間で最大の磁気嵐
($> 1000 \text{ nT} = 0.01 \text{ G}$)



ヨーロッパと北米の電信機システムで
火花放電が起こり、火事が多発
(Loomis 1861)

スーパーフレアが起きたら 地球はどうなるか？

	最近の巨大フレア (1989年3月13日)	キャリントン・フレア (1859年)	スーパー・フレア (巨大フレアの100~1000倍)
放射線 (航空機内の推定値)	4mSv	20mSv	400~4000mSv ?
地磁気嵐	540nT (全米でオーロラ)	1760nT (赤道帯でオーロラ)	5000~ 15000nT ?
社会への影響	ケベック州大停電 電波通信障害 気象衛星故障 衛星放送停止 (被害総額数100億円以上)	電信局の火事 >今起きたら 中高磁気緯度の <big>大停電</big> 多くの衛星の故障 地球規模の通信障害 GPS故障 (被害総額1兆~2兆ドル)	地球規模の大停電 オゾン層破壊 全衛星の故障 地球規模の通信障害 全航空機飛行停止 船舶運航停止 GPS停止 ITインフラの破壊