黒点と太陽活動周期

京都大学理学部附属天文台 一本 潔

宇宙天気サマースクール@清里 2008.8.28-31

黒点と太陽活動周期 内容

- 3.0 はじめに(歴史、黒点研究と宇宙天気、参考文献)
- 3.1 黒点の基本構造 明るさと温度 Wilson 効果 黒点の磁場、分類
- 3.2 黒点内のダイナミックスと微細構造

エバーシェッド効果

udot, light bridge

彩層のダイナミクス

3.3 黒点の3D構造

黒点モデル

内部診断

3.4 黒点の形成と消滅

浮上磁場

活動領域のtilt、非対称性

対流層下部磁束からの切断

黒点の衰退、Moving Magnetic Features (MMF)

活動領域のエネルギーとる型黒点

3.5 太陽活動周期(11年サイクル)

黒点数の指標

黒点周期に見られる規則性(シュペーラー、Hale)

活動経度

150日周期

次期サイクルの予測

3.6 黒点に関する主要問題

0. はじめに

黒点研究の歴史

- BC350 最古の黒点記録 (アテネ)
- BC27 中国に黒点の記録
- 1611 望遠鏡による黒点観測(Fbricius, Galileo, Scheiner, Harriot)
- 1613 黒点が太陽表面の現象であることを論証(Galileo)
- 1749 公式なsunspot number の出発点(solar cycle-0)
- 1769 Wilson 効果の発見 (Wilson)
- 1843 11年周期発見(Schwabe)
- 1849 黑点相対数 (Wolf), Zurich (Wolf) sunspot number 定常記録開始
- 1858 黒点緯度の11年変化(シュペーラー則) (Carrington)
- 1874 グリニッジ黒点位置・面積記録開始
- 1893 マウンダー極小期の発見 (Maunder)
- 1908 黒点磁場の発見 (Hale)
- 1909 エバーシェッド効果の発見 (Evershed)
- 1919 黒点ペアのティルト (Joy's low) (Hale)
- 1922 蝶型図(Maunder)
- 1934 黒点の磁束管モデル (Cowling)
- 1938 活動周期の磁場極性 (Hale の法則) (Hale & Nicholson)

黒点研究の歴史(続)

- 1941 黒点が暗いのは磁場による対流抑制 説(Biermann)
- 1966 Parker 不安定 (Parker)
- 1969 Umbral flash (Backers & Tallant)
- 1973 Moving Magnetic Feature (MMF) (Harvey & Harvey)
- 1979 黒点磁場のcluster (spaghetti) モデル(Parker)
- 1980 Magnetic 'canopy' (Giovanelli)
- 1993 Uncombed penumbra 構造 (Title etal., Solanki & Motavon)
- 1997 Return flux of B&V at outer boundary (Westendorp Plazza etal)
- 1998 Penumbra Ørising flux tube model (Schlichenmaier)
- 2002 Penumbral dark core (Scharmer etal)

黒点研究の意義と宇宙天気

- ・黒点は太陽磁場の主構造である。活動指標、'新鮮な'磁場の指標。
 ダイナモの仕組みを解き明かすにはまずは黒点の構造や発展を調べることからだろう。
- ・黒点は磁場とプラズマの相互作用をみる格好の実験室である。
 磁場とプラズマの強いカップリングとダイナミックス。
 安定して存在していると思えば崩壊、消滅する。
- ・黒点の出現によって太陽定数が変化する。地球への影響。 塞いだエネルギーはどこに溜まりいつ表面に出てくるのか?
- ・黒点はコロナを明るく活発にする。地球への影響。

コロナ加熱、爆発的現象の元、コロナを揺さぶるエンジン。

参考文献(レビュー)

Bray and Loughhead , 1964, 'Sunspots', Chapman and Hall

Thomas J.H.,Weiss N.O., (Eds.), 1992, 'Sunspots: Theory and Observations', Kluwer, Dordrecht

Solanki, 2003, 'Sunspots: An Overview', The Astron Astrophys Rev., 11: 153–286

資料制作協力者: Rolf Schlichenmeier, Thomas Rimmele, 岡本丈典、 勝川行雄、 渡邊浩子、 柴田一成、 黒河宏企、



Mitaka white -light images



黒点はしばしば群れをなす 特に東西方向の対。

サイズ: 3500 – 60000km (pore < 7000km)

小さいものほど数多い Log-normal → おおきい flux tube か らのfragmentation

黒点の基本構造



黒点の明るさと温度

	明るさ(可視光)	温度	
暗部:	0.05 – 0.2 I _{QS} ,	3500 - 5000K	
	* タングステンランプ(T<	3700k)よりも明るい	
半暗部: (明グレイン	0.7 – 0.8 _{QS} , 0.8 – 1.1 _{QS})	~ 5600K	

黒点は何故暗いのか?

・穴が空いて太陽内部の低温部が見えている

- ・竜巻によってダストが集まり表面を覆っている
- ・Alfven 波によってエネルギーが抜かれ冷却

・磁場による対流の抑制 → 正解!

但し、完全に抑制すると黒点は真っ暗

黒点は何故'明るい'のか? → 微細構造が鍵

明るさ(温度)は黒点モデルのキーパラメータ 暗部の明るさは皆一緒か? → No

黒点サイズ、磁場、11年周期のフェーズとの相関

黒点の明るさ vs. サイズ







Figure 2. Peak magnetic field vs. umbral continuum intensity. *Filled circles* are for cycle 22 (1990–1991); *open circles* for cycle 23 (2000–2001). Each point represents an individual spot.

Livingston 2002, Sol.Phys., 207,41, umbra の一番くらいところ、Fel1.56µm





Albregtsen & Maltby, 1981, Sol.Phys., 71, 269, large spot のみ

Wilson depression



τ~1 のレベルが400 - 1000km 低い 理由:

- 低温 → H⁻ opacity の低下
- 磁場 → 圧力平衡のため密度低下

$$P_{QS} - P(r) = \frac{B_z^2(r)}{8\pi} + F_c$$

F_c: curvature force Wilson depression からこれを求める試みも

黒点の磁場

Zeeman効果の発見

The Effect of Magnetisation on the Nature of Light Emitted by a Substance P. Zeeman, *Nature,* vol. 55, 11 February 1897, pg. 347



Zeeman 効果

磁場によってスペクトル線が分離($\Delta \lambda \sim B$). 分離した各コンポーネントが偏光。

> 縦Zeeman効果 (磁場方向からみて)

横Zeeman 効果 (磁場と直角方向からみて)







偏光スペクトルのフィッティングにより磁場の3成分、視線速度等が求まる。 さらにプロファイルの「歪み」より大気の深さ方向の構造を求めることも可能である。 黒点の磁場

丸い黒点の周方向に平均した磁場構造

・大きい黒点ほど中心の磁場強い。

・磁場分布には umbra-penumbra の境界がない。

・50%以上のfluxが半暗部から出ている。

・半暗部の外側には'canopy'構造。

total flux (D= 3500~60000km, B=1500G)
 = 1x10¹⁹ ~ 4x10²² Mx





Mathew etal 2003



Keppens and Martinez Pillet ,1996, ASP 16 spots

黒点のチューリッヒ分類

MODIFIED ZÜRICH CLASSIFICATIONS

Class A	A single spot or group of spots that:
	Are unipolar.
	 Have no penumbra.
Class B	A group of spots that:
	Are bipolar.
	 Have no penumbra.
Class C	A group of spots that:
	 Are bipolar.
	 Has spots with penumbrae - usually on only 1 side of an
	elongated group.
Class D	A group of spots that:
	Are bipolar.
	 Has spots with penumbrae on both sides of an elongated
	group.
	 Has a group length of less than 10° of heliographic longitude.
Class E	A group of spots that:
	Are bipolar.
	 Has spots with penumbrae on both sides of an elongated
	group.
	 Has a group length of between 10° and 15° of heliographic
	longitude.
Class F	A group of spots that:
	 Are bipolar.
	 Has spots with penumbrae on both sides of an elongated
	group.
	 Has a group length of greater than 15° heliographic
	longitude.
Class H	A single spot or group of spots that:
	Are unipolar.
	 Have penumbrae.



Mount Wilson Sunspot Magnetic Classification (Hale etal. 1919)

Classification of the magnetic character of sunspots according to rules set forth by the Mount Wilson Observatory in California.

- α : A unipolar sunspot group.
- β: A sunspot group having both positive and negative magnetic polarities (bipolar), with a simple and distinct division between the polarities.
- γ: A complex active region in which the positive and negative polarities are so irregularly distributed as to prevent classification as a bipolar group.
- β - γ : A sunspot group that is bipolar but which is sufficiently complex that no single, continuous line can be drawn between spots of opposite polarities.
- δ: A qualifier to magnetic classes(see below) indicating that umbrae separated by less than 2 degrees within one penumbra have opposite polarity.
- β - δ : A sunspot group of general beta magnetic classification but containing one (or more) delta spot(s).
- β-γ-δ: A sunspot group of beta-gamma magnetic classification but containing one (or more) delta spot(s).
- γ - δ : A sunspot group of gamma magnetic classification but containing one (or more) delta spot(s).

2. 黒点のダイナミックスと微細構造 エバーシェッド効果

'Radial Movement in Sun-spots', Evershed J. 1909, MNRAS 69, 454



Evershed flow のパラドックス: (1970 - 1980年代)

Penumbrae/Evershed 流のモデル(ex.)

BXV 観測的に rolling convection elevated dark filament В B B **Evershed** flow Frozen-in は?? T = 1 ∇P_G driving force: j×В (siphon flow) 高温·高密度 dark filament: 低温 黒点の磁場が短時間に v // B は観測と違う なくなってしまう 外周でのmass conservation??

解決の糸口:半暗部磁場の微細構造

Title et al. 1993, ApJ, 403, 780 フィルターによる高分解マグネトグラム・ドップ ラーグラム



Solanki & Motavon 1993, A&A, 275, 283 'uncombed' penumbral model



半暗部磁場の仰角が明暗筋のスケールで変化している。 ⇒ Evershed flow は磁場の水平なチャンネルを流れている!

そして「ひので」、、、









Filamentary structure of penumbra

Evershed outflow

Magneto-convection

110min average

Local intensity fluctuations move in radial direction. Flow channels have life time longer than 1 hour. Evershed flow is not a stationary (or uniform) flow (eg. Shine etal. 1994, Solana etal.2007,2008)







Upflow and downflow patches are aligned on horizontal field filaments that carries the Evershed flow.

→ Evershed flowは内半暗部で下から湧き出し、外縁で光球下へ沈む

3D structure of penumbrae and the Evershed flow, *Hinode/SOT resolved it!*







暗部輝点(umbral dots) umbral dotとは?



- 周囲より10%程度明るい
- ・ 直径約300km、15-60分 と幅広い寿命をもつ
- メカニズムは、対流による 下部高温ガスの上昇、又 は強い垂直磁場内の振 動

Kitai et al. (2007) PASJ, 59, S585

umbral dotの磁場と速度場

磁場強度が弱く(Fel6302で17Gauss)、水平に傾いていて(0.6°)、上昇流(28m/s)を伴う

H.Watanabe et al. (2008) in preparation center-to-limb variation によるcusp型磁力線の 証拠


ライトブリッジの形成



半暗部からの継続的な進入チャンネル ライトブリッジは磁場弱い → weak field gas が下から覗いたものと解釈できる Katsukawa et al. (2007)



Inverse Evershed Effect, umbral flush, running penumbral wave

Chromosphere: Radial inflow



Photosphere: Radial outflow



IBIS Ca 8542 doppler IB

IBIS A. Tritschler

IBIS Fel 7090 doppler

半暗部マイクロジェットの発見Call H 線でみた黒点ムービーKatsukawa et al. (2007)



- Length: 1" ~ 5" (1000km ~ 4000km), Width: ~ 0.4" (300km)
- Duration: Shorter than 1 min
- Observed everywhere above the penumbra!

解釈: 半暗部磁場構造に起因した磁気リコネクション



コロナ加熱、質量供給、、

3. 黒点の3D構造

Monolith モデルと cluster モデル



黒点のグローバル静的磁場モデル



黒点が変化する時間スケール 全体構造:1週間 ~ 2ヶ月 微細構造:数分~1時間

黒点は静的な平衡状態にはない。 微細構造が常に変化する動的な平衡にある。

Current sheet model

Jahn & Schmidt (1994)



Time – distance 法による内部診断

Kosovichev, Astron. Nachr./AN 323 (2002) 3/4, 186–191

MDI Dopplergram





音速~温度

深さ4000km の音速断面

黒点の下4000km までは温度が低い それよりも下は温度が高い 但し、温度による効果と磁場による効果の切り分けはできてない。

Time – distance 法による内部診断 (MDI/SoHO)



(Zhao et al. 2001, NASA/ESA)

http://www.gsfc.nasa.gov/topstory/20010919sunspot.html

黒点直下の下降流 → cluster model の傍証

要注意! 黒点は複雑 過渡的現象







SoHO/MDI, 可視連続光 200147

黒点の形成、消滅

く概要>

- 誕生: 磁束管の浮上によって双極磁場領域が形成される
- 成長: 小さな磁極(ポア)が合体して2-3日で黒点成長、半暗部形成
- 発展:後続黒点は数日の内にバラバラになってプラージになることが多い 先行黒点は安定して2-3ヶ月存在し続けることがある。
- 衰退:light bridge ができて黒点分裂

MMF(Moving Magnetic Feature)によって磁場が拡散していく 黒点の衰退 は黒点形成の初期からすでにはじまっている。

→ 新たな浮上と拡散の共存する時期がある。

消滅:磁場の拡散領域では反対極性の磁場が合体してなくなる。 (キャンセレーション)

黒点の寿命 Gnevishev-Waldmeier 則 (Gnevishev 1938, Waldmeier 1955) A₀ = WT A₀: 最大サイズ T: 寿命 W = 10 MSH day⁻¹ (MSH = Millionth Solar Hemisphere = 3.32Mm²)

黒点の誕生:磁気浮上(Emerging flux)



Shibata etal., ,,,

EFR observed by Ha

In the chromosphere, EFRs are seen as arch filament systems (Bruzek 1967, 1969).

30,000 km



From Chou & Zirin 1988



- Size ~ 30,000 km
- Width ~ 20,000km
- Life time \sim 3 days
- Rise Velocity ~ 10-20

8-JUN-98 02:01:28

Active Region Tilt: Joy's Law [Hale et al., 1919]

Active regions (sunspot groups) are tilted so that the following polarity spots are slightly poleward of the preceding polarity spots. This tilt increases with latitude.





活動領域の非対称性

先行黒点は浮上後大きな黒点に成 長し、1ヶ月以上安定して存在する。 後行黒点は数日以内にばらばらに なって消えていく。

Martinez Pillet 2002, Astron. Nachr / AN ³⁄₄, 342



なぜ後行黒点はすぐに壊れるのか?







(b)

深い層は速く自転していると考えられたため、後行黒点の磁場はよりつよく曲げられインターチェンジ不安定で壊れてしまう。

Meyer etal 1977, MNRAS, 179, 741

しかし、、

- helioseismology より深い層は速く自転していない。

要するにまだ理解されてない。。。

Dynamical disconnection

浮上中の双極磁場は対流層底の磁束管のアイデンティをもっているが、 浮上後2-3日で表面の流れに乗って漂っているようにみえる。

もし、磁束管がいつまでも対流層底の磁束管とつながっていたら、

- ・双極磁場の間隔はどんどん広がっていく、
- ・双極磁場のtilt は元の東西方向に戻るはず。
- ・そもそも黒点がなくなることが説明できない。

黒点磁場は浮上後まもなく対流層底の磁束管と'切り離されている'はずである。



表面下でのリコネクションにより切断 (必然性に欠ける。。?) Schrijver and Title, 1999, Sol.Phys., 188, 331

Dynamical disconnection



黒点の衰退速度と消失メカニズム

純理論的な黒点の衰退タイムスケール ジュール dissippation \rightarrow ~300yr (Cawling 1949) MHD 不安定による崩壊 \rightarrow ~1hr

どちらでもない!ではなにか?

- その場消滅(沈み込み or コロナへエスケープ) → dA/dt ~ A Howard (1992), Chapman *et al. (2003)*
- 黒点外周からの浸食(erosion, eg. MMF) → dA/dt ~ sqrt(A) Moreno-Insertis &Vazquez (1988), Petrovay & van Driel-Gesztelyi (1997)
- 拡散(diffusion) → dA/dt ~ const. Krause and RÄudiger, (1975), Stix (2002)

拡散方程式
$$\frac{\partial C}{\partial t} = \eta \nabla^2 C = \frac{\eta}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right)$$
 から
 $C > C_0$ の面積を A(t), $\frac{dA(t)}{dt} = -4\pi\eta$ を導くことができる

黒 点 の 衰 退 と MMF

Moving Magnetic Feature (MMFs, Harvey & Harvey 1973)



MMF の分類

Penumbra dark filament と bright filament は相互に混ざらない別の磁場



Weiss, etal, ApJ, 2004, 600, 1073-1090

MMFで運ばれる磁束は 黒点の減衰率と一致する 黒点の減衰率よりも有意におおきい Multinez Pillet 2002, Kubo etal 2007

Harvey & Harvey 1973, Kubo etal 2008

dA/dt 最近のある結果

 ^{1849 ~} 現在 までの黒点面積記録(後述)を使って解析
 → 個々の黒点面積の減少率は'面積'に依存しない。



Hathaway and Choudhary, 2008, submitted to Sol.Phys.

活動領域の発達・エネルギーの蓄積



- SOT NOAA 10930 from 6-Dec-2006 to 19-Dec-2006.
- Magnetic field emergence and rotational motions of the spot made highly sheared magnetic configuration between the spots, and resulted in X-class flares.
- Relaxation of vector magnetic fields after the flare was also detected.

磁気シアーの発達過程の分類 磁気シアーの発達過程によってフレア活動度が異なる! Two types of processes for the development of magnetic shear along the neutral line (Kurokawa 1987) (A)Collision of two sunspots of opposite magnetic polarities f, ©____P Weak flare activity (B) Successive emergence of twisted magnetic flux ropes **Strong flare activity**

Type A Magnetic Shear

: Collision of sunpots of different magnetic polarity



7/200727 UT7/2104277/2322147/25232110'r = 12'30''r = 10'30''r = 03'00''r = 06'50''20''



Hale Region 17751(July 1981): No Major flare (Hida DST)

Type B: Successive emergence of twisted magnetic flux ropes

Rapid Rotation of Emerging Magnetic Axis

EMERGENCE OF TWISTED MAGNETIC ROPE AND THE 3B FLARE OF 12 OCT. 1981



(a) 10/11 0308 UT (b) 10/12 0116 UT (c) 10/12 0630 UT



(f) 10/12 2343 UT (e) 10/12 0627 UT 10/11 0100 UT (d)

Kurokawa (1987) TypeBの磁気シアーが急速に発達したときに強いフレア発生!

5.太陽活動の11年周期

400 Years of Sunspot Observations



黒点数の指標

1. 黒点相対数(Wolf or Zurich数) 1749 ~ 現在(official、かなり内挿部分あり) 1849 ~ 現在(定常観測)

- R = k (10g + f)
- g グループ数、
- f 黒点数、
- k~1 観測者補正係数 (基準は'primary observer'の観測)

 Primary observers:

 1749–1787
 Staudacher

 1788–1825
 Flaugergues

 1826–1847
 Schwabe

 1848–1893
 Wolf

 1893–1928
 Wolfer

 1929–1944
 Brunner

 1945–1980
 Waldmeier

 1980–
 Koeckelenbergh

2. グループ黒点数 1610 ~ 現在

(Hoyt and Schatten, 1998, Sol.Phys. 179, 189)

$$R_{g} = \frac{12.08}{n} \sum_{i} k_{i}G_{i}$$

i: 観測者、 *Gi*: 黒点群の数
黒点数(f)を使わない、
多くの観測記録を平均
→ Wolf数より客観的、誤差評価可

3. 黒点面積 1874 ~ 1976 Royal Greenwich Observatory (RGO)
 1977 ~ 現在 United States Air Force (USAF)

蝶型図(シュペーラー則)

DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS





http://solarscience.msfc.nasa.gov/

極大値と黒点緯度分布

Sunspot area data since 1874



極大値が大きいサイクルでは黒点の平均緯度は高く、分布緯度の幅も大きい。 高緯度ほどサイクル間の変動が大きい。 Solanki etal., 2008, A&A 483, 623



黒点の磁場極性(Hale則)



極大値と上昇期間 (Waldmeier 則)

高いピークの活動周期ほど立ち上がりが速い

極大値と極小値

極小期の黒点相対数が高いと次の極大値が 高い



Hathaway etal, 2002, Sol.Phys., 211, 357

偶奇 則 偶サイクルと次の奇サイクルの極大値の相関 (Gnevyshev & Ohl, 1948)


Dalton minimum と'missing' cycle



Figure 9. Semiannual GSN data at the beginning of Dalton minimum (after Usoskin, Mursula and Kovaltsov, 2002). *White, light grey, dark grey* and *black shading* denotes, respectively, unreliable (< 6 observation days during the corresponding 6 months), poorly reliable (6–12 days), reliable (13–24 days), and highly reliable (> 24 days) values.

Dalton 極小期の周期の長いサイクル4は実は2つの極大だが観測が希であったため見逃されていた、とする Usoskin etal, 2002,

黒点周期に見られる規則性

偶奇 則 偶サイクルと次の奇サイクルの極大値の相関 (Gnevyshev & Ohl, 1948)



Usoskin and Mursula, 2003, Sol. Phys., 218, 319

偶サイクル>次の奇サイクル → radiative zone に化石磁場が存在?



黒点周期に見られる規則性

極大値の経年変化(マウンダー極小以降)

黒点グループ数で見ると徐々に極大値が上がっている



Hathaway, NASA/NSSTC AAS/SPD 2007 May 30

Active longitude

太陽面には黒点の発生しやすい特定の経度があり、それが数年に渡って継続 するといわれていた。



Active longitude は180度離れて2つ存在する傾向にある

Active longitude



- Active longitude は黒点の平均緯度における微分回転速に従ってドリフトする。
- これを考慮して繋ぐと2つのactive longitude は120年に渡って継続している!
- 2つのactive longitude の優劣は3.8年(北)3.65年(南)の周期で入れ替わっている。 (Berdyugina & Usoskin, 2003, A&A 405, 1121)

Active longitude の微分回転をモデル化し、フレアの発生経度を予報する試み → Zhang etal. 2008, A&A, 484, 523, 'Prediction of solar active longitude'

150日周期

. . .

Reager etal, 1984, Nature, 312, 623 Ichimoto etal, 1985, Nature, 316, 422 Lean, 1990, ApJ, 363, 718 γ線フレア Hαフレア, 1つのactive long. に周期存在 黒点面積, cycle 19,20,21 で位相が繋がっている



次期サイクルの予測

Dikpati etal, 2006, Geophys. Res., 33, L05102

'Calibrated flux transport dynamo model '

Maridional flow がpolar field をtachocline まで運ぶのに17-21年かかる サイクルn のピークに n-1, n-2, n-3 のpolar field が関与す る。

サイクル24は23より30-40% ピーク高いと予測



次期サイクルの予測

Svalgaard, Cliver, and Kamide (2005), Geophys. Res. Lett., 32, L01104

Cycle	Dipole Moment μ Tesla ABS(North - South)	Observed Rmax	Predicted Rmax	Prediction Error
22	245.1 ± 2.7	158.5	154.1	2.9%
23	200.8 ± 3.6	120.8	126.2	4.3%
24	119.3 ± 3.2	?	75.0	3.6% (Assumed)
	A			

1つ前のdeclining phase の太陽のdipole moment

サイクル24は23より40%程ピークが低いと予測。

Schatten, K. H. (2005), Geophys. Res. Lett., 32, L21106, も同様の予測

The Solar Cycle 24 Prediction Panel The panel expects solar minimum to occur in March, 2008. The panel expects the solar cycle to reach a peak sunspot number of 140 in October, 2011 or a peak of 90 in August, 2012. http://www.swpc.noaa.gov/SolarCycle/SC24/index.html 極大値予測の正解率 (精度10%, Cycle 22) (Li etal, 2001)



Statistical method 4/37

Precursor method 10/26

Figure 5. Predictions of the maximum sunspot number of solar cycle 22 (after Li, Yun, and Gu, 2001) using (a) mathematical/statistical methods based solely on sunspot activity features and (b) precursor methods.



http://science.nasa.gov/headlines/y2008/11jul_solarcycleupdate.htm

3.6 黒点に関する主要問題:

- 黒点はなぜ安定しているか、なぜ崩壊するか? 黒点の大きさの上限を決めるものは何?星の巨大黒点は理解できるか? 磁気浮上、磁場消滅のメカニズム。
- 黒点の3次元構造は? (Monolithic or spaghetti? Sub-surface flow?)
- 黒点のエネルギー収支は?十分な「対流」が存在するか? umbra ~ 0.1I, penumbra ~ 0.7I このエネルギーはどうやって補給している?
- Penumbra はなぜ存在するか? Evershed flow の駆動力は?
- MMFの起源?黒点の成長崩壊の担い手?
- Umbral dotの起源?エネルギーの流れ?
- 振動のメカニズム、その波紋。
- 黒点上空の彩層・コロナの構造。 黒点上空のコロナはなぜ暗いのか? Canopy 構造。 TRのsupersonic flow。。 磁場エネルギーの蓄積、カレントシートの形成。
- 黒点の中にはどこまで小さな構造があるか?そのスケールでなにが起きているか?
- 黒点の11年周期、磁場生成メカニズムは?
- 黒点の発生、成長、衰退、爆発現象等の予報

3.6 黒点に関する主要問題: <u>青:今後数年で解決</u>...。

- 黒点はなぜ安定しているか、なぜ崩壊するか? 黒点の大きさの上限を決めるものは何?星の巨大黒点は理解できるか? 磁気浮上、磁場消滅のメカニズム。
- 黒点の3次元構造は? (Monolithic or spaghetti? Sub-surface flow?)
- 黒点のエネルギー収支は?十分な「対流」が存在するか? umbra ~ 0.1I, penumbra ~ 0.7I このエネルギーはどうやって補給している?
- Penumbra はなぜ存在するか? Evershed flow の駆動力は?
- MMFの起源?黒点の成長崩壊の担い手?
- Umbral dotの起源?エネルギーの流れ?
- 振動のメカニズム、その波紋。
- 黒点上空の彩層・コロナの構造。 黒点上空のコロナはなぜ暗いのか?Canopy構造。TRのsupersonic flow。。 磁場エネルギーの蓄積、カレントシートの形成。
- 黒点の中にはどこまで小さな構造があるか?そのスケールでなにが起きているか?
- 黒点の11年周期、磁場生成メカニズムは?
- 黒点の発生、成長、衰退、爆発現象等の予報

「宇宙天気予報」にむけた太陽研究の役割・・・

宇宙環境の擾乱源、

- 太陽風の構造、時間変動の予測(長短期的)、
- 太陽フレア・CME等突発現象の予報(短期的)、
- ・これらを担う黒点の成長・衰退の予測(長短期的) ⇒
- 「黒点現象」を理解することはその基礎として重要であろう。
- 黒点の誕生(磁場浮上)・成長過程
- 安定期黒点の3次元構造
- 黒点の崩壊・拡散・消滅過程
- 黒点上空のダイナミクス

なにが黒点の成長・安定・消滅をドライブしているのか? ← ダイナモ ← 磁場 - プラズマ相互作用 ----- 黒点は恰好の研究素材 -----