

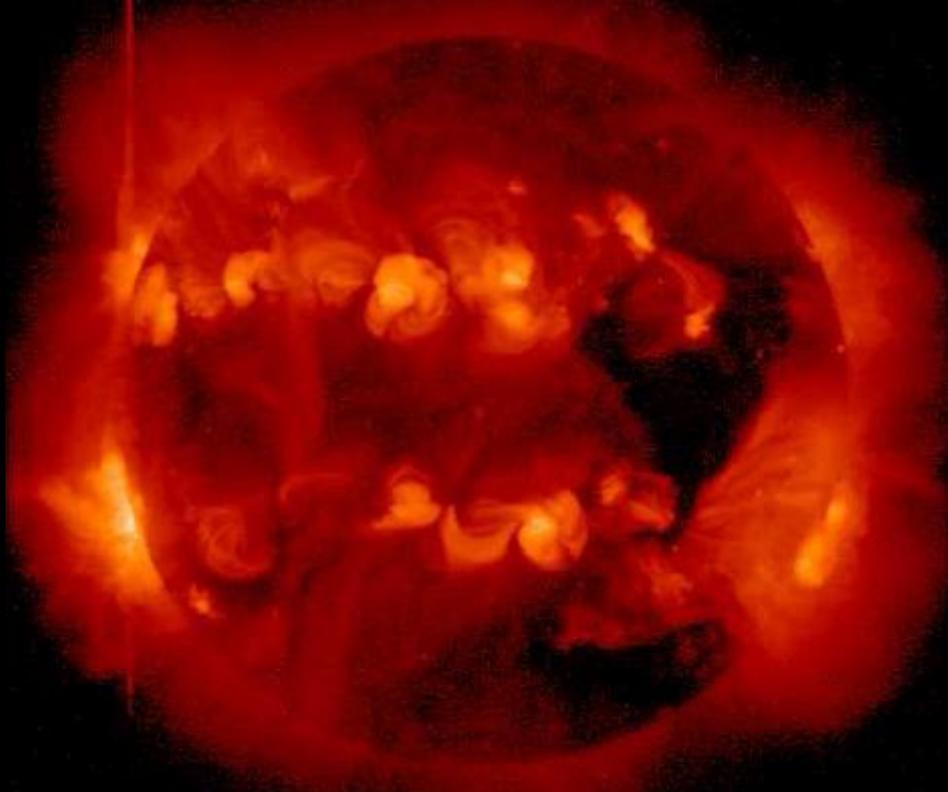


太陽内部の熱対流とダイナモ

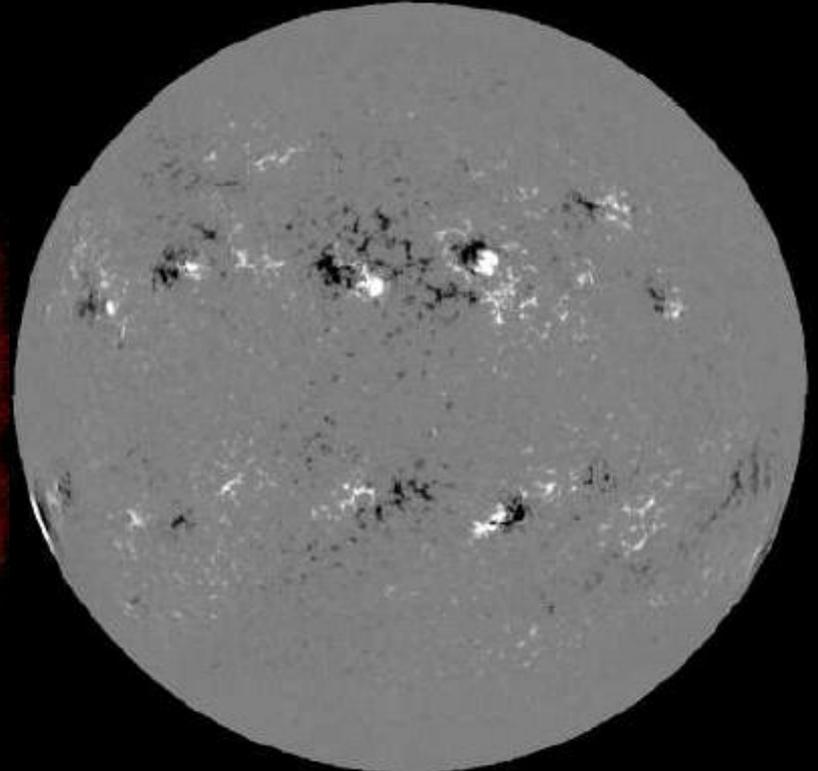
堀田英之
横山央明
東京大学地球惑星

共同研究者：Matthias Rempel (アメリカ HAO)

太陽磁場



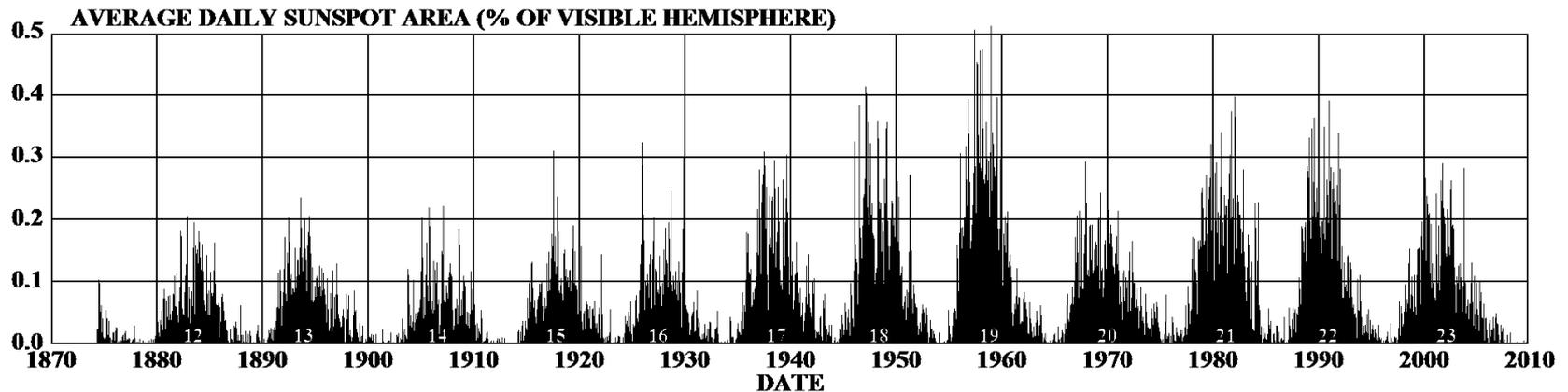
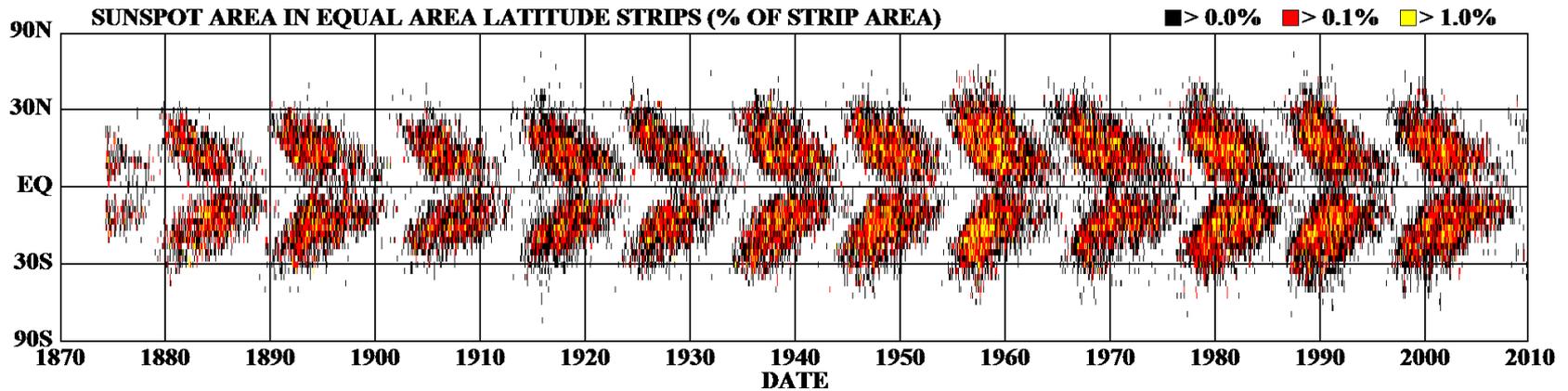
Soft X-ray image (Yohkoh/SXT)



Magnetogram

平均 Gauss程度
a few 10^{23} Mx (e.g. Hagenaar 2001)

黒点11年周期と緯度出現分布(蝶形図)

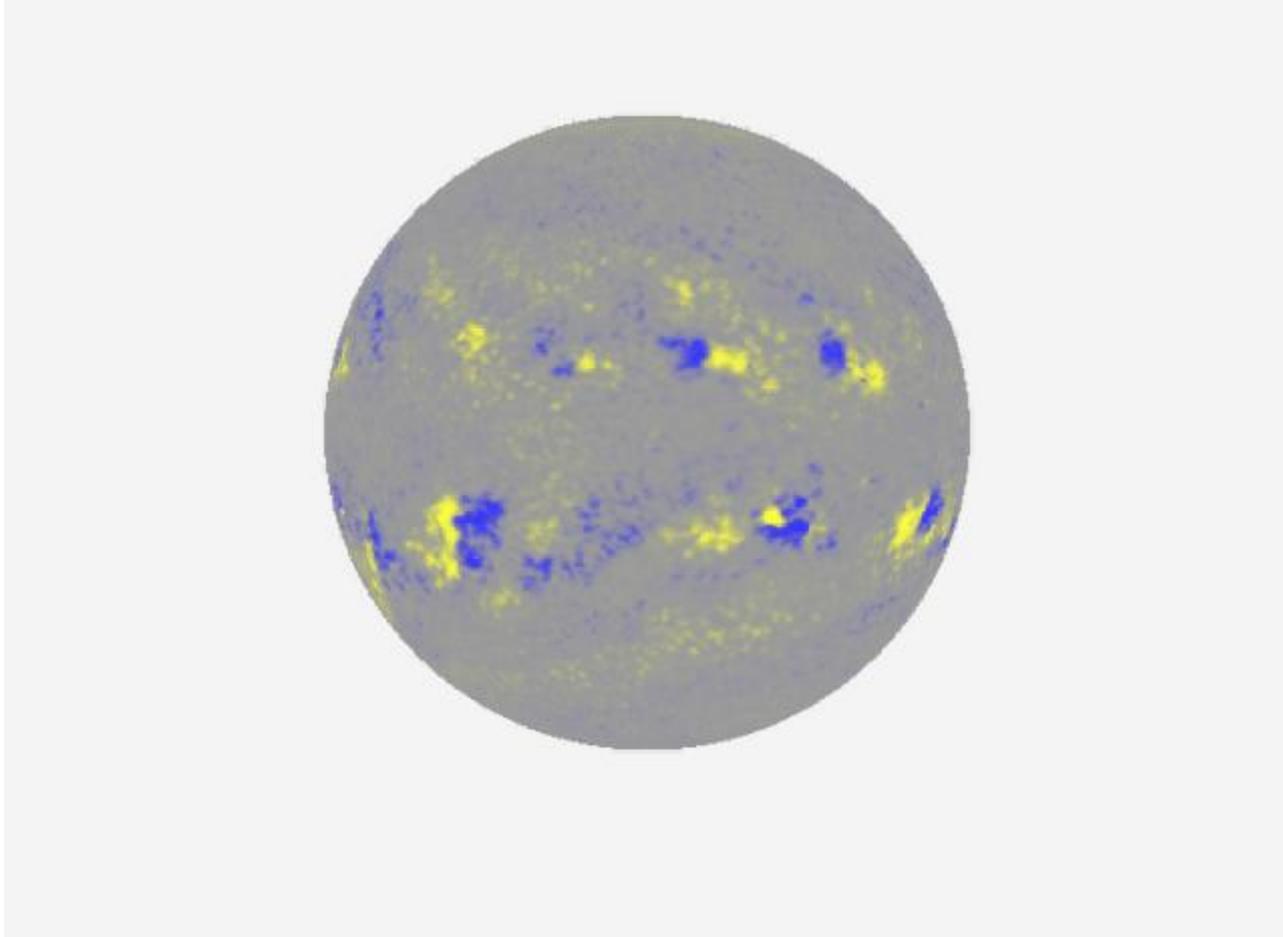


<http://solarscience.msfc.nasa.gov/>

HATHAWAY/NASA/MSFC 2009/12

(Hathaway博士提供 NASA/MSFC)

表面視線方向磁場觀測

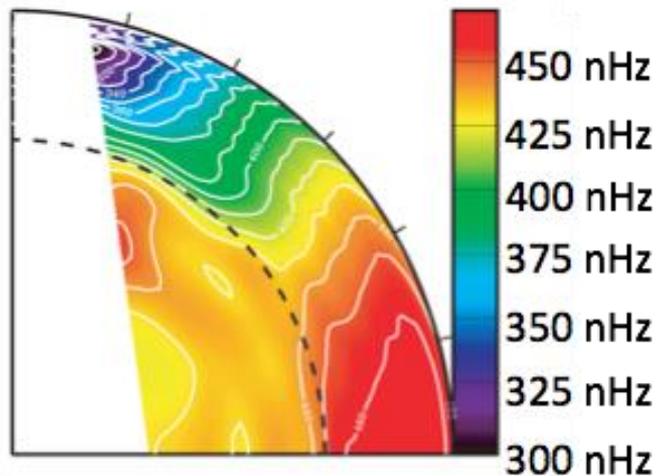


(Hathaway 2010)

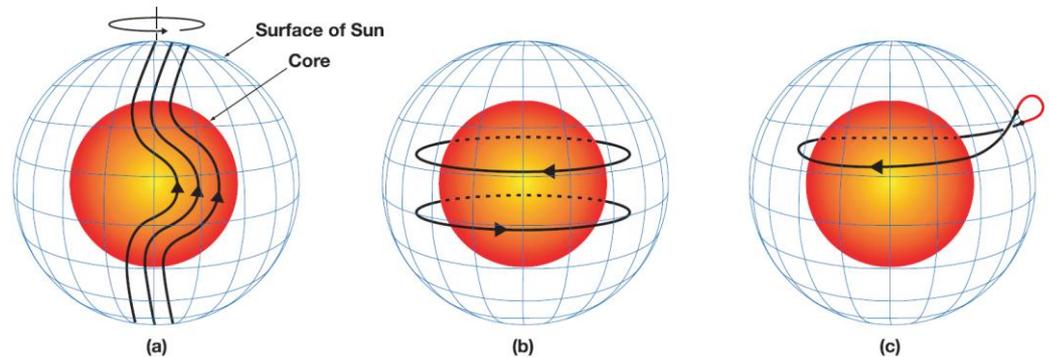
太陽ダイナモとは

以下のような過程を辿ると考えられている

1. **熱対流**による角運動量輸送(差動回転生成)
2. 対流層の底の**差動回転**による磁場生成
3. 生成された磁場が、**磁気浮力**で表面に上がり**黒点生成**
4. **黒点が崩壊**し新たな磁場生成の種に



(Thompson+2003 レビューより)



(図 : Dikpati & Gilman 2007)

太陽内部対流は多階層

現在実施中計算の目的:「熱対流」の再現を目指す

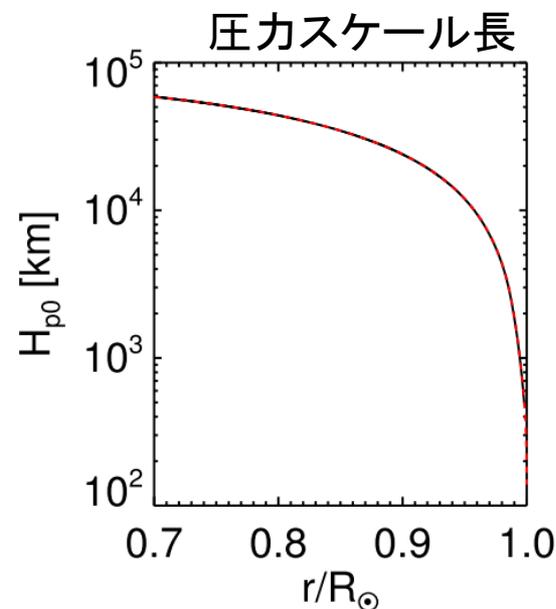
星の半径: 70万 km

対流層の厚み: 20万 km

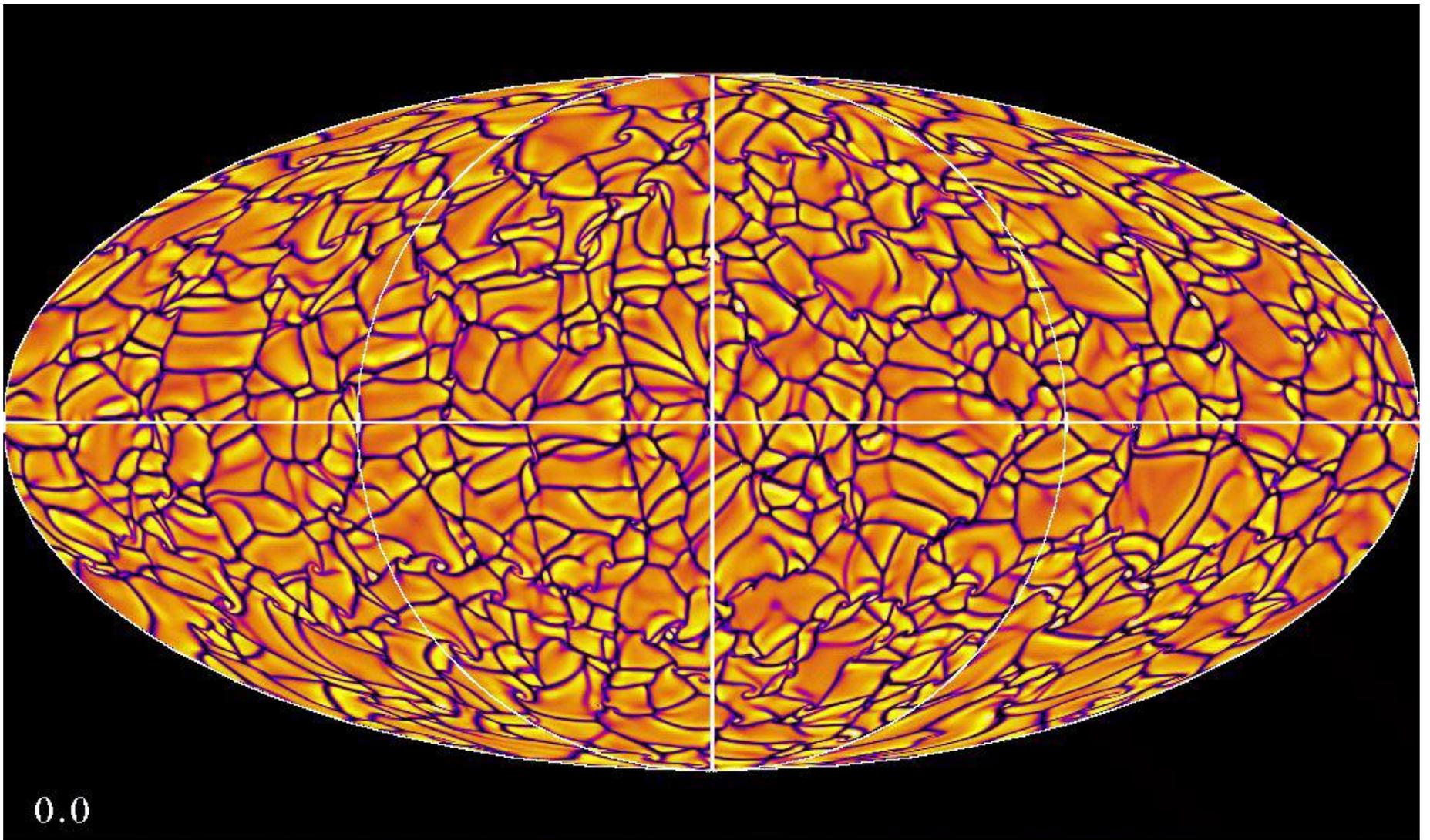
圧力スケール長: 6万 km(対流層の底)、300 km(表面)

熱対流セルの大きさ~スケール長

これを解きほぐして理解するには、
高解像度の数値計算が必要



これまでの世界最高解像度の数値計算 アネラスティック近似計算



アネラスティック近似計算の限界： 並列スケーリング

熱対流速度に対して音速が2000倍くらい速いので
アネラスティック近似：音波が無限大で伝搬

$$\nabla \cdot (\rho_0 \mathbf{v}) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_0 \mathbf{v}) = \nabla p_1 + \text{Other term}$$

圧力についてのポアソン方程式を毎ステップ解かなければいけない

ASH: 球面調和関数を使ったスペクトル法
グローバル通信を要する。

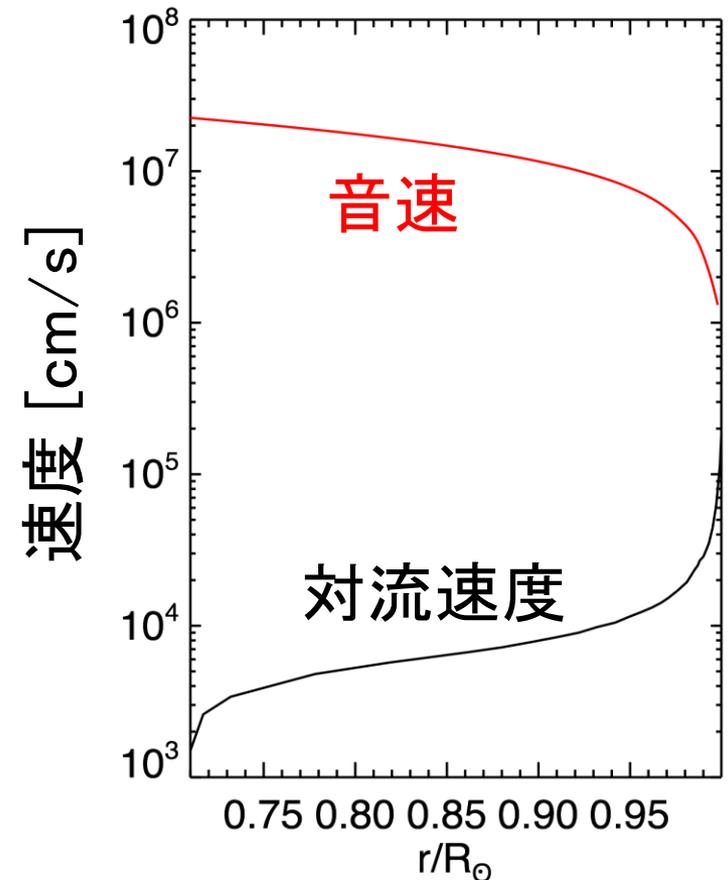
現在の所、ASHは**2000 並列**が限界らしい。

アネラスティック近似の限界： 星表面近傍に適用不能

近似が破れるために表面が解けない

例えば、対流層の底では
音速200 km/sに対して、
対流速度50 m/sほどなので
アネラスティック近似は良く
成り立っているが、表面付近では
音速と対流速度が同じくらいになる

$r=0.98R_{\text{sun}}$ までしか、有効でない



音速抑制法 (Hotta et al. 2012, A&Ap)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{1}{\xi^2} \nabla \cdot (\rho \mathbf{v})$$

連続の式をこのように変形することで、実効的な音速を $1/\xi$ にすることができる。数値計算的な困難は少なく

陽的に時間積分可能(スケーリング良さそう)

熱対流において、どういう影響が出るのか、
平均二乗速度、仕事、フーリエ成分、自動判別の
対流セルなどを比べて調査した。

**結果、ある条件のもとでは非一様な ξ も使って良く
表面まで解ける**

方程式

密度成層した中での磁気流体力学の方程式＋
水素・ヘリウムの電離再結合効果を取り入れた状態方程式

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} = -\frac{1}{\xi^2} \nabla \cdot (\rho \mathbf{v})$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \frac{\nabla p_1}{\rho} + \frac{\rho_1 \mathbf{g}}{\rho} + 2(\mathbf{v} \times \boldsymbol{\Omega})$$

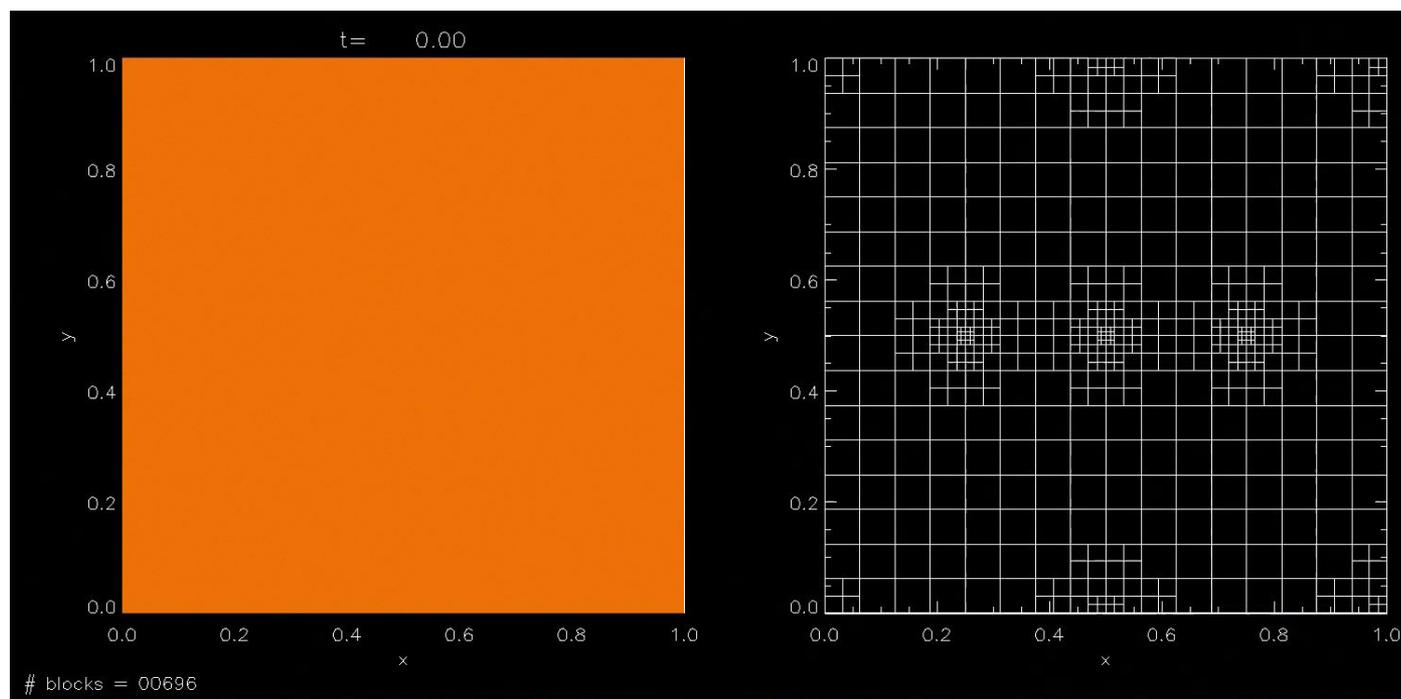
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

$$\frac{\partial s_1}{\partial t} = -(\mathbf{v} \cdot \nabla) s + \frac{1}{\rho T} \nabla \cdot (\kappa_r \rho c_p \nabla T)$$

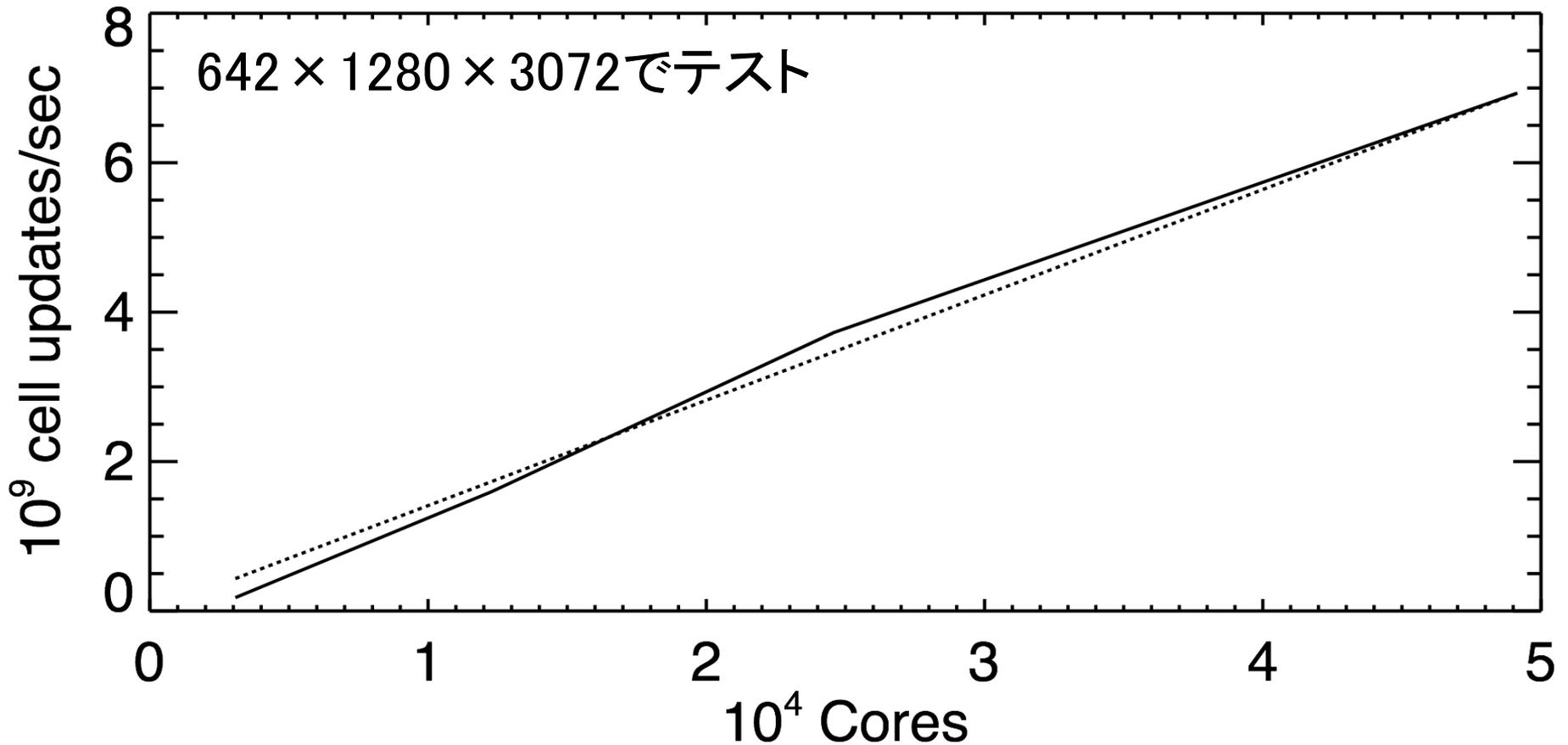
$$p_1 = p_1(\rho_1, s_1, r)$$

計算手法

- 4次精度中央差分 + 4次精度Runge-Kutta法 + 非線形人工粘性
- Hyperbolic divergence cleaningで $\text{div}B=0$ を保証(Dedner et al. 2012)
- (block structured AMR) 本計算では未使用
- MPI並列



並列計算スケーリング



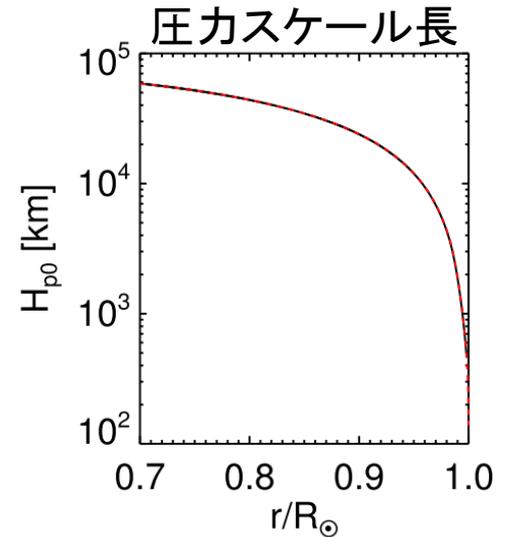
京のシステムで、50000コアくらいまでチェック済み。
制限するものはないので、weak scalingはかなりするはず

現在実施中の研究の目的

全球磁気熱対流計算で、先行研究よりも解像度を高く、境界条件を表面近く(スケール長を短く)することにより、

- 1) 熱対流構造
- 2) 局所的ダイナモ機構を調べる。

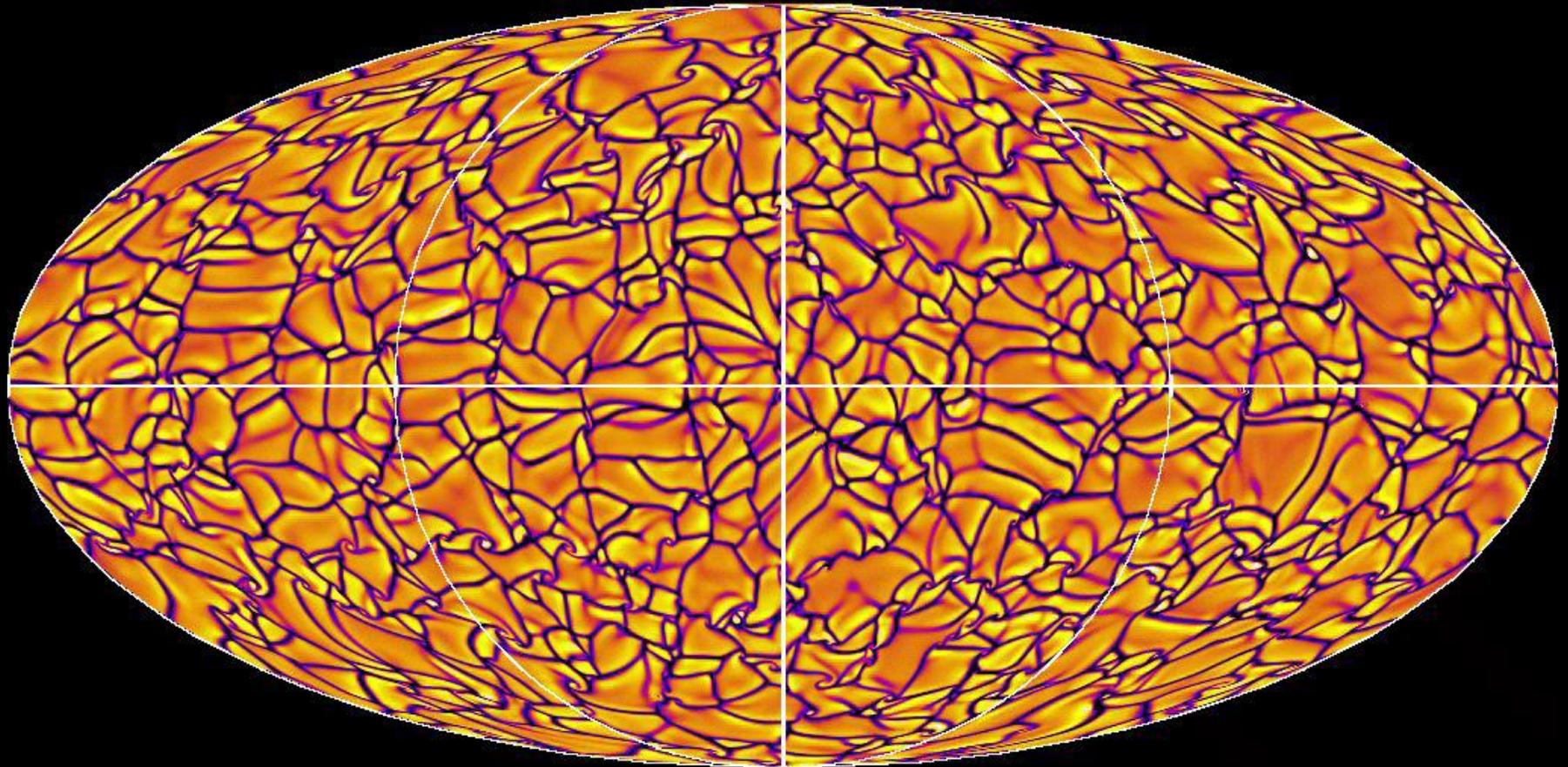
自転なし→大局的ダイナモ(11年周期など)は将来課題



	Miesch+2008	本研究
解像度	257x1024x2048	720x1280x3072
$\rho(r_{\min})/\rho(r_{\max})$	132	613
r_{\max}	$0.98R_{\text{sun}}$	$0.99R_{\text{sun}}$

先行研究: Miesch et al. (2008)

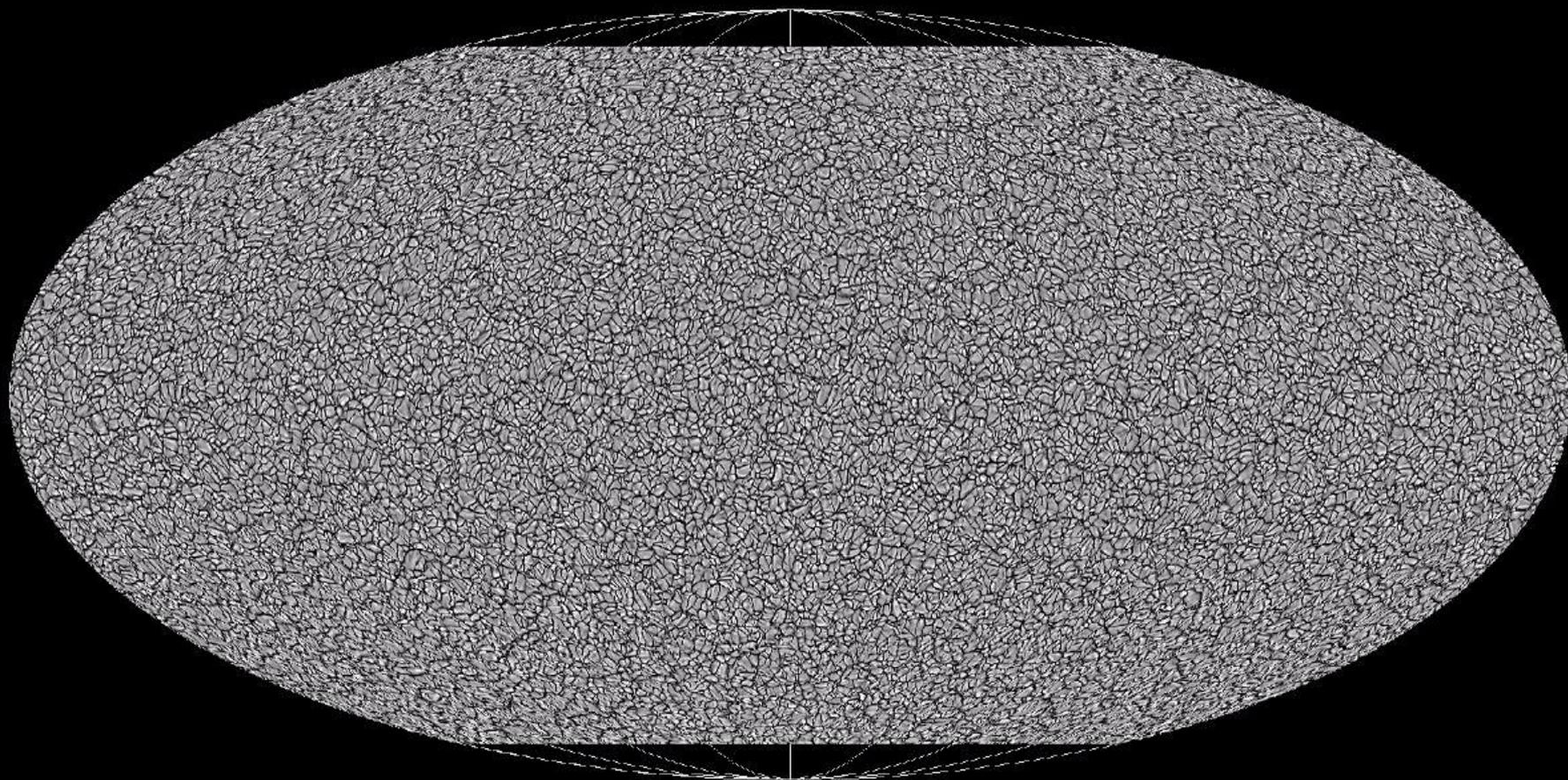
$r_{\max} = 0.98 R_{\text{sun}}$
257x1024x2048



0.0

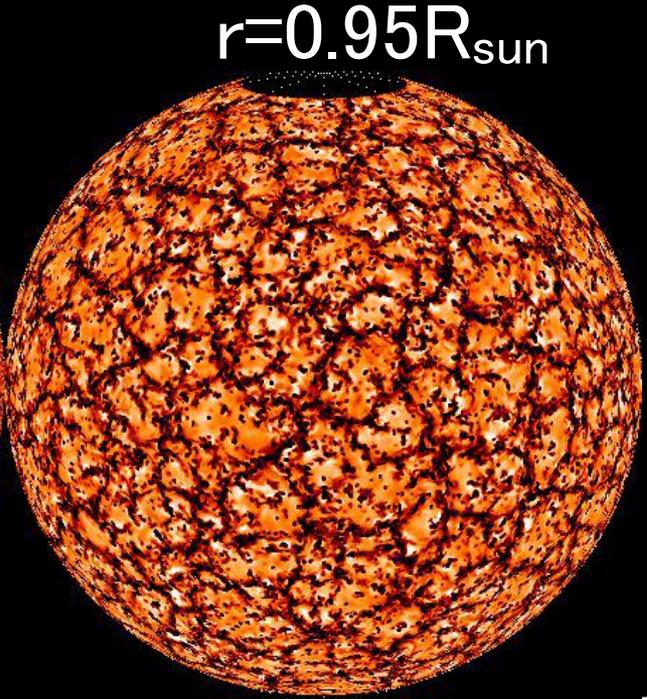
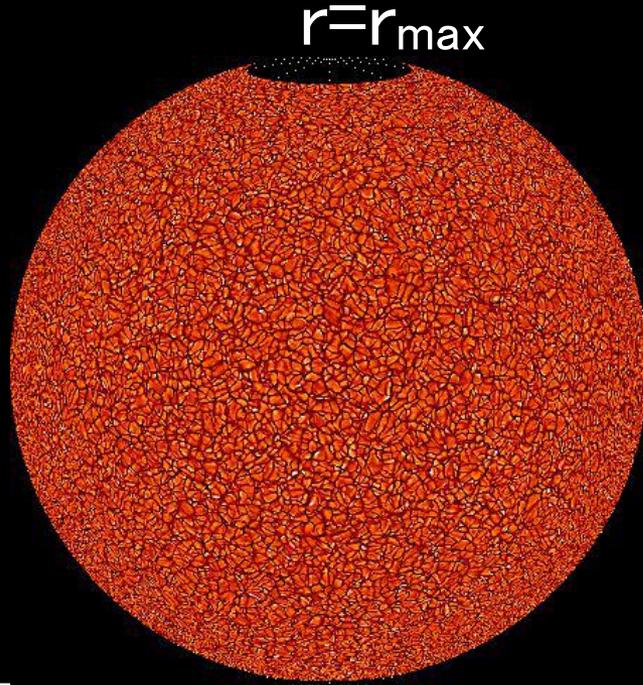
我々の計算結果

$r_{\max}=0.99R_{\text{sun}}$
720 × 1280 × 3072

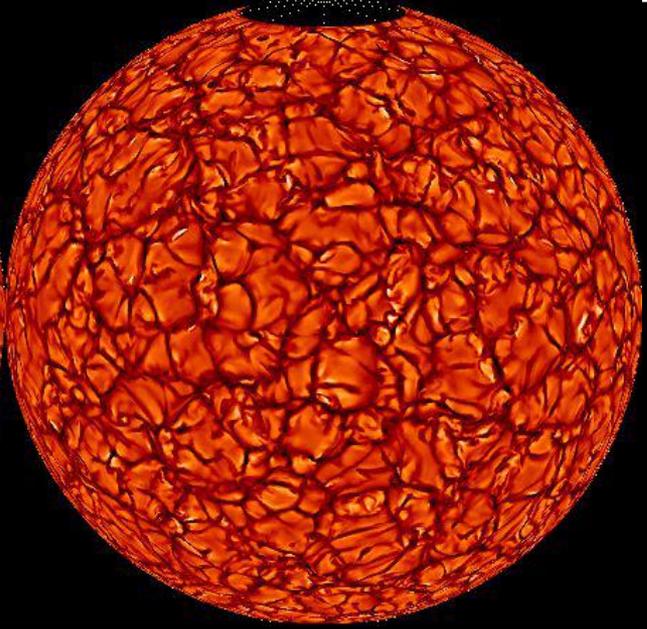
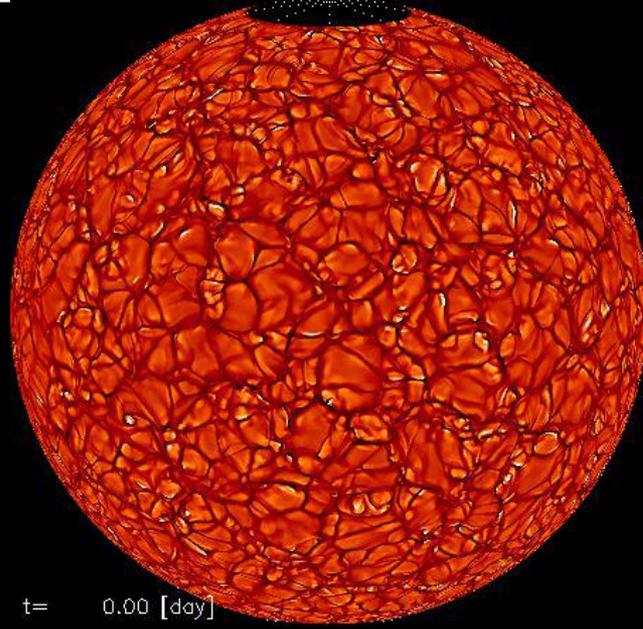


50太陽日 / 10000Core日

$r_{\max} = 0.99R_{\text{sun}}$
720x1280x3072

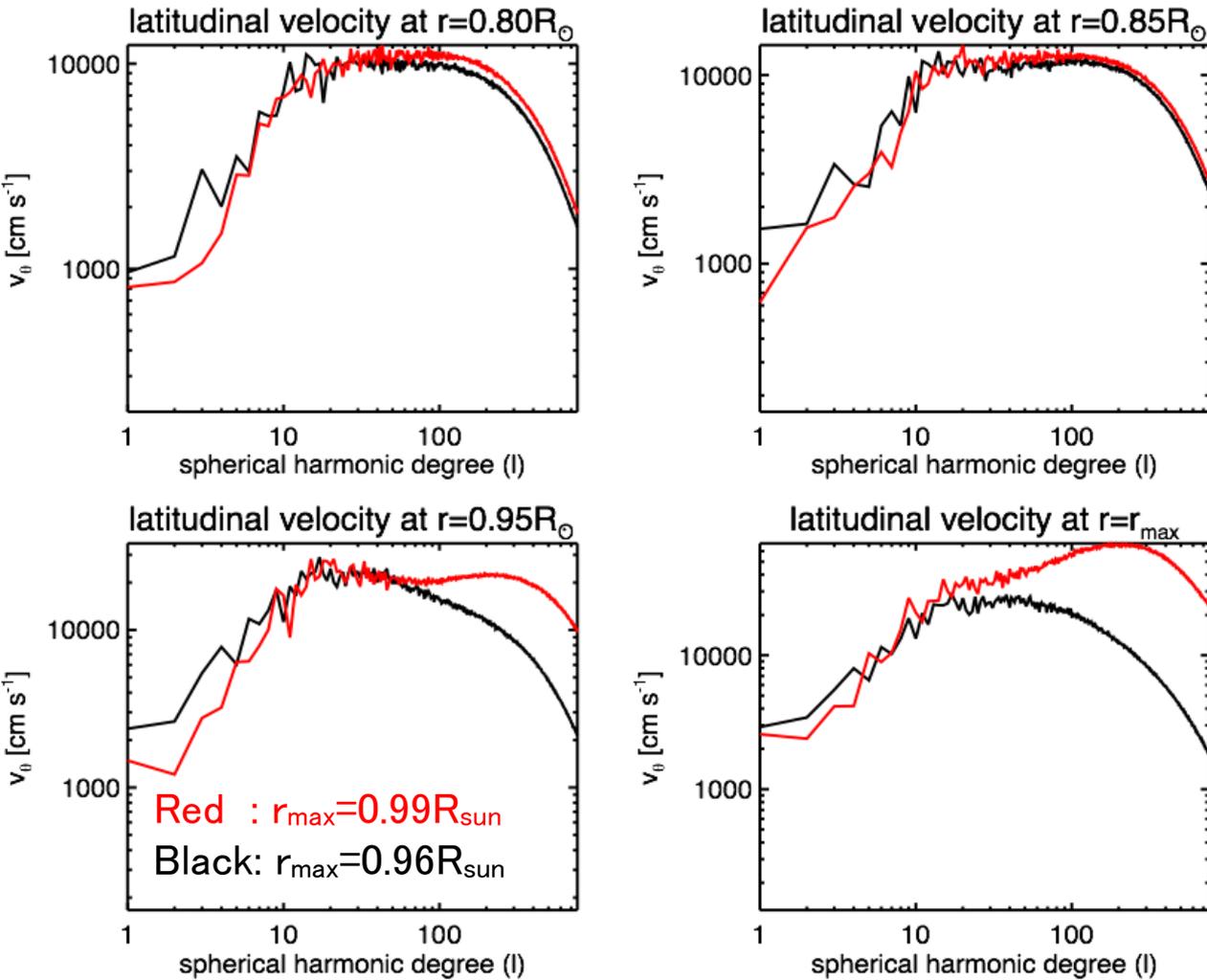


$r_{\max} = 0.96R_{\text{sun}}$
642x1280x3072

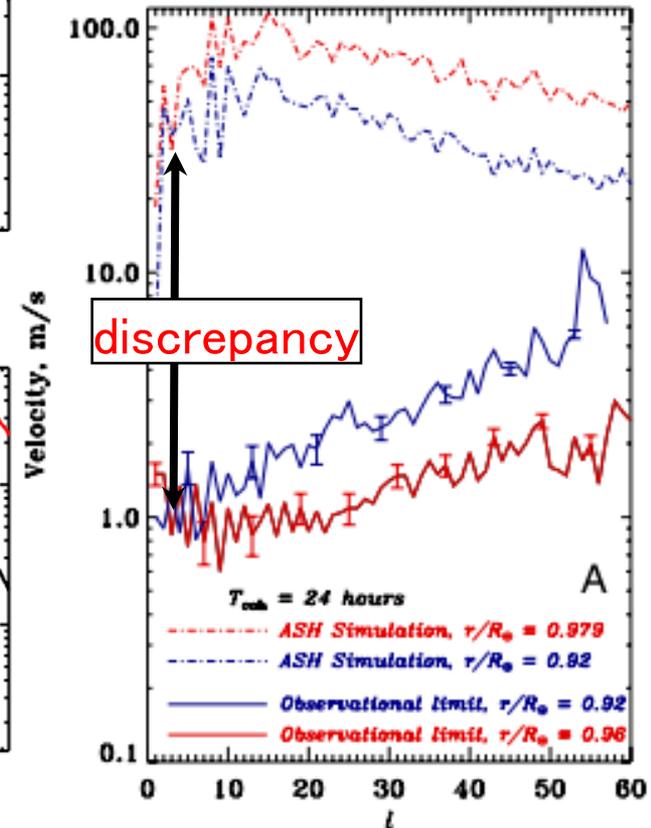


$t = 0.00$ [day]

熱対流乱流のスペクトル

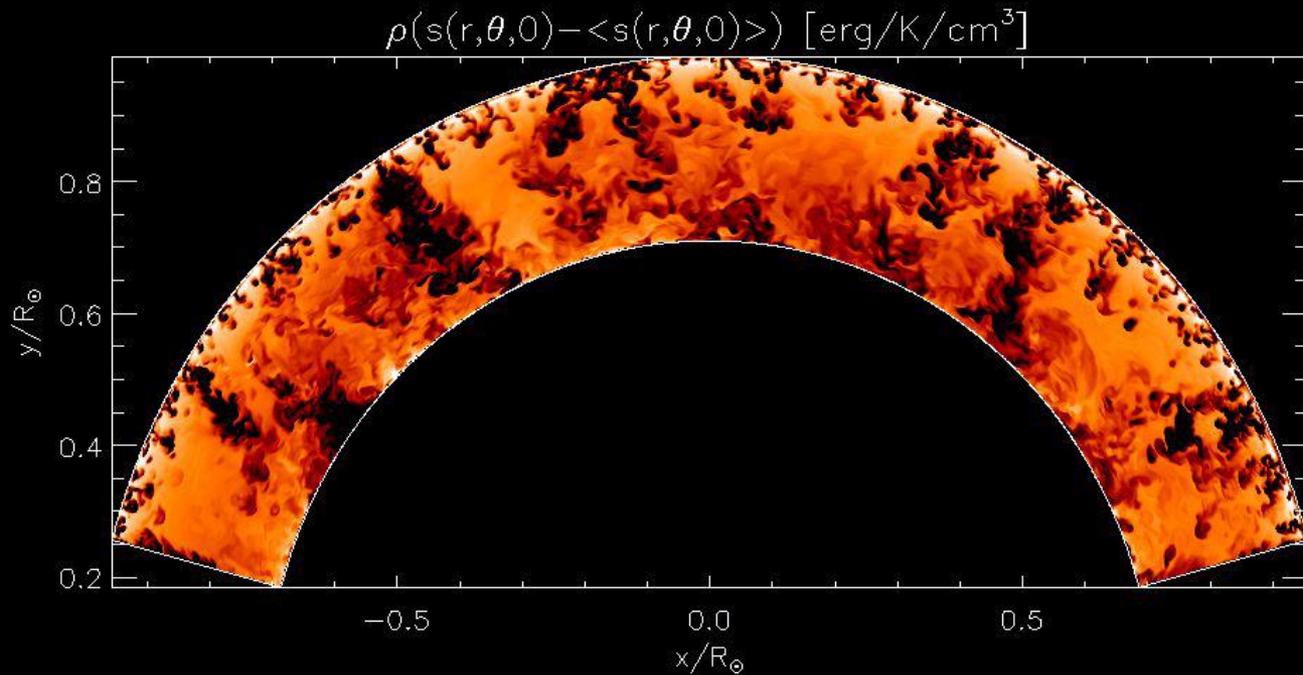


表面付近の小スケール強対流が0.95Rsun付近でも出現

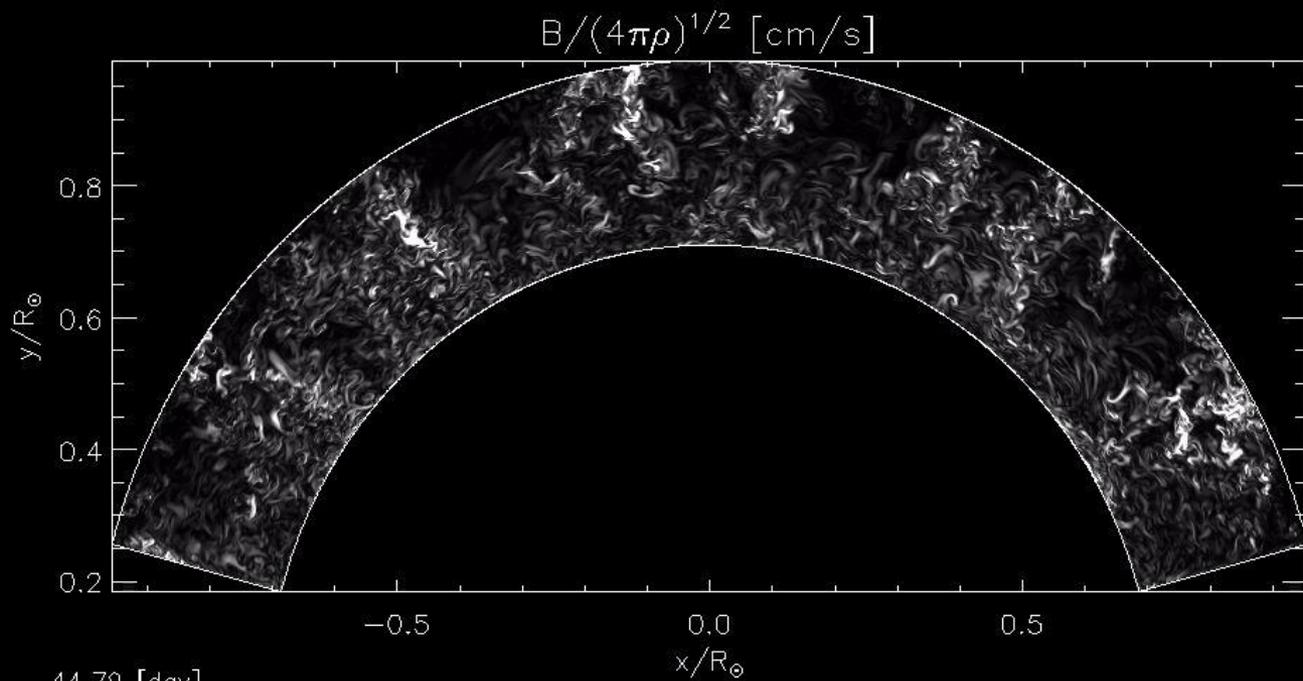


Hanasoge+2012

Entropy



Magnetic field



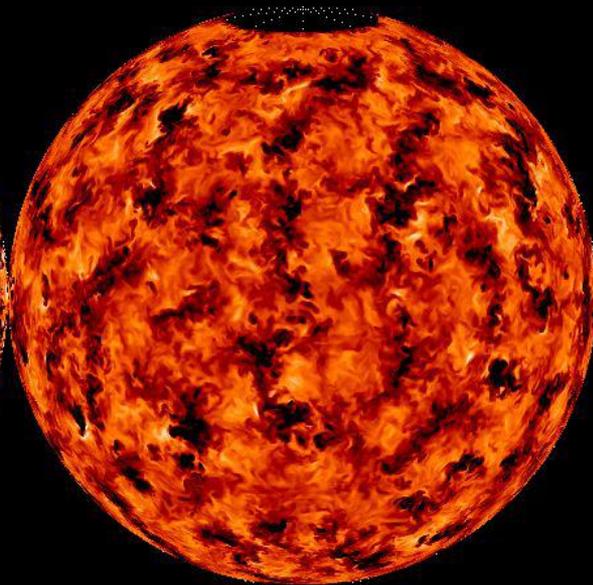
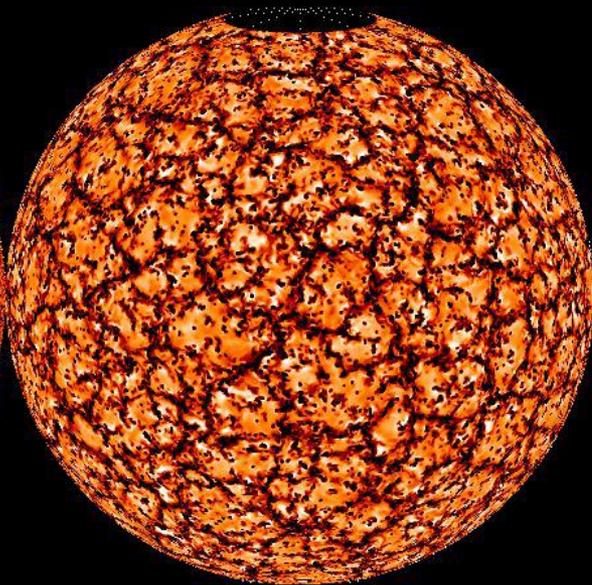
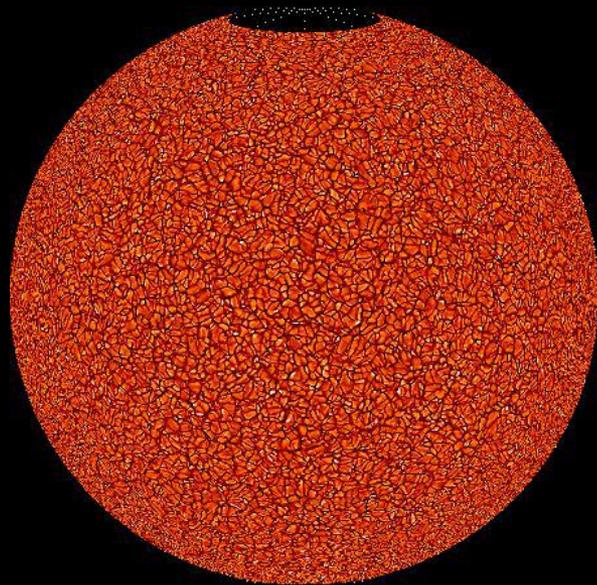
$t = 44.79 \text{ [day]}$

$r=0.99R_{\text{sun}}$

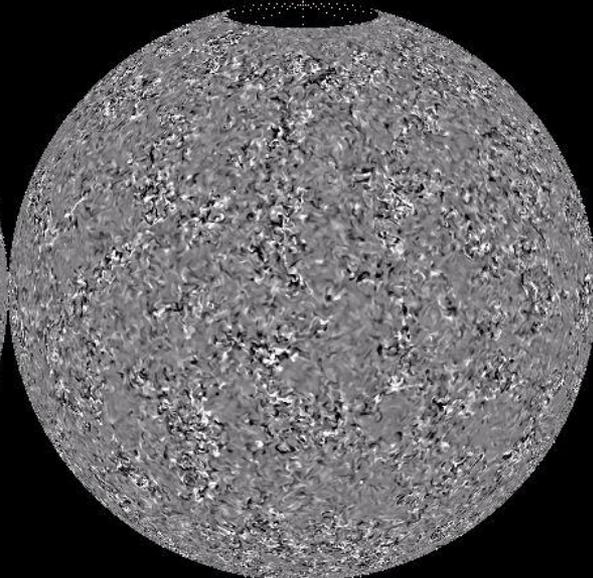
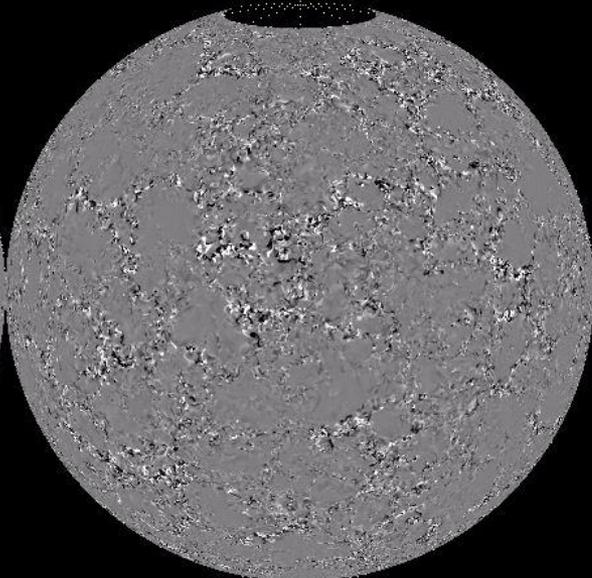
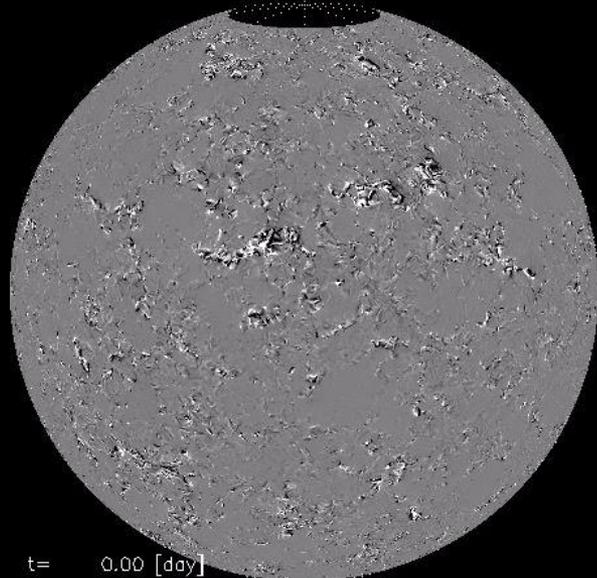
$r=0.95R_{\text{sun}}$

$r=0.85R_{\text{sun}}$

V_r

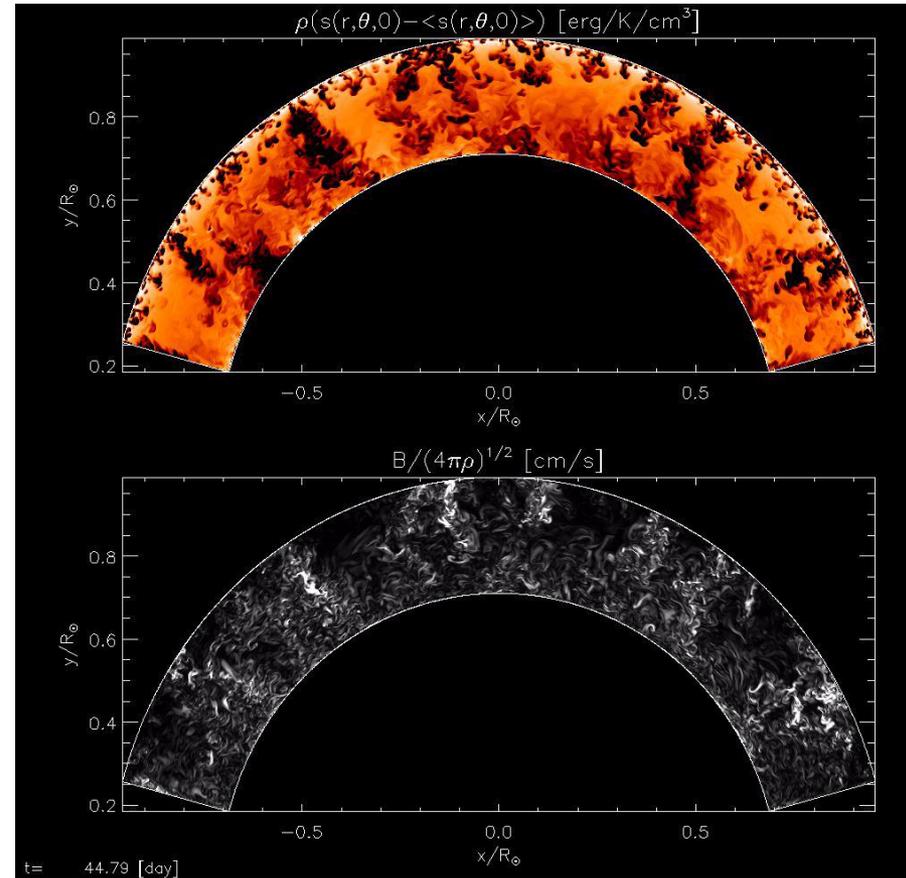
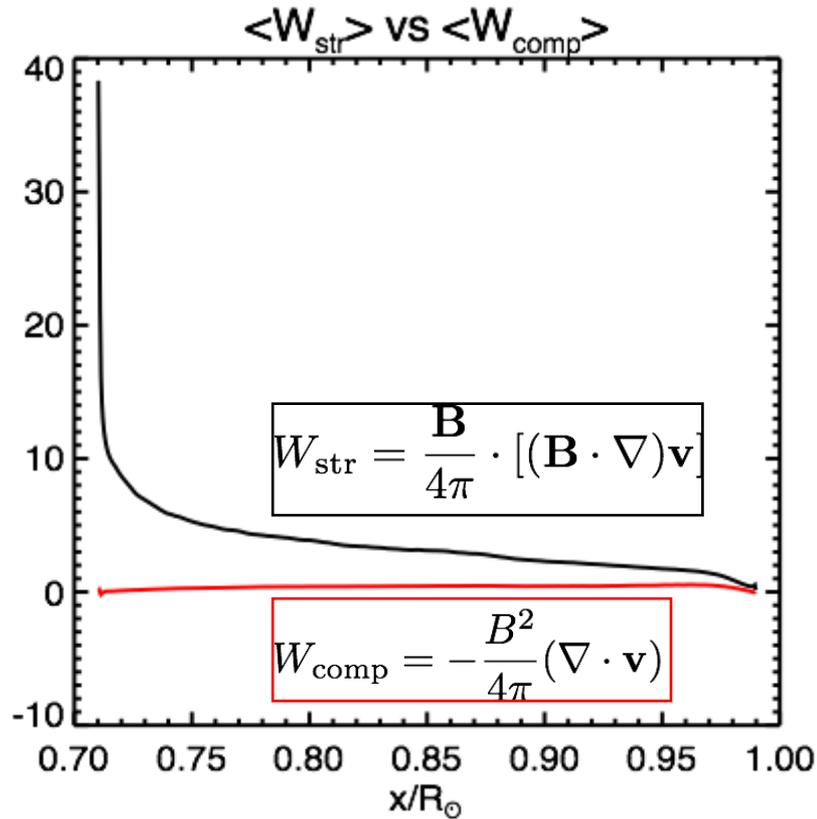


B_r



$t= 0.00$ [day]

磁場増幅機構



磁場増幅機構は、流れの圧縮効果と、磁力管の引き伸ばし効果とがあるが、「引き伸ばし」がより効果的

まとめ

太陽ダイナモ問題への道筋として、磁気熱対流の全球計算を実施した。熱対流は、星内部の乱流角運動量輸送や温度緯度依存性に影響を与え、大局的ダイナモを理解するには、これを正確に扱う必要がある。

「京」のパフォーマンスと、独自開発の「音速抑制法」とによって、世界最高解像度の計算を実施できた。

星表面近傍の小スケール強熱対流を分解、階層構造をなす太陽熱対流を実現し、とくに局所的ダイナモ機構に新しい知見を得た。

今後、黒点形成、星自転の導入、大局的ダイナモと研究を進めていく。