



CHIBA UNIVERSITY

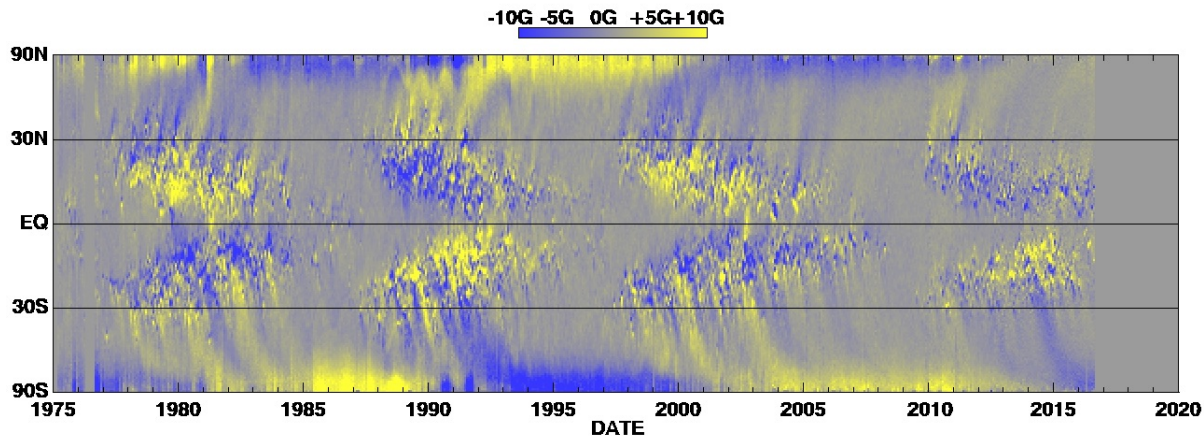
---

磁気流体プラズマで探る高エネルギー天体現象研究会  
2017年8月30日@JAMSTEC 東京事務所

# 太陽と音速抑制法と大規模計算

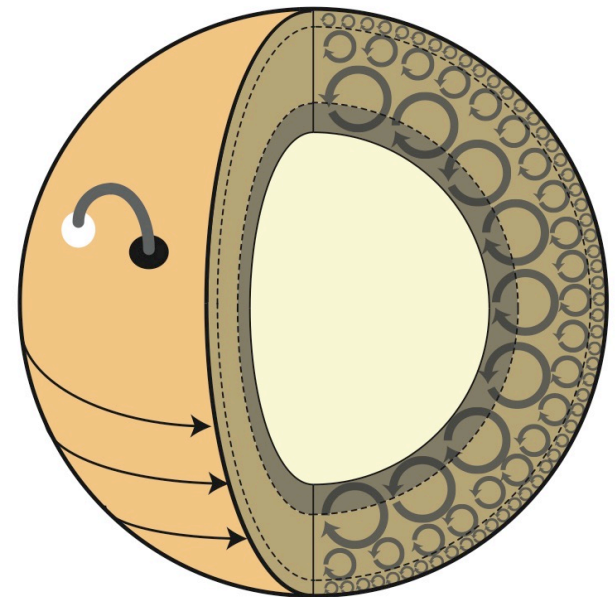
千葉大学  
堀田英之

# 太陽対流層研究



太陽11年周期を駆動している大規模磁場は太陽対流層の熱対流(乱流)によって、形成されていると考えられている。

太陽内部の熱対流は非常に大きなレイノルズ数を持っており、できるだけ乱流を解像するために**多くの数値資源**を必要とする。



# 太陽対流層の困難とアネラスティック近似

太陽対流層内部では音速がとても速いので、陽解放で解くとCFL条件がきつい

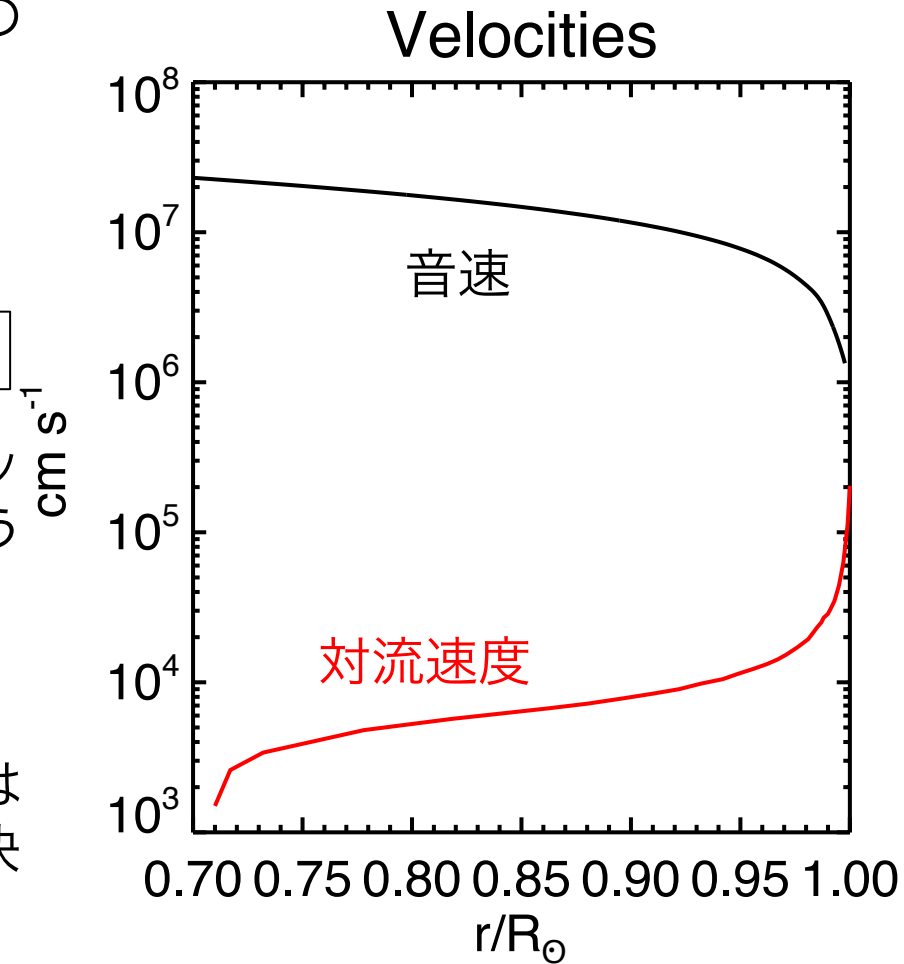
$$\Delta t < \frac{\Delta x}{c_s + v_c + c_a}$$

$c_s$ : 音速  $v_c$ : 熱対流速度,  $c_a$ : アルフベン速度

そこで採用されるのが、アネラスティック近似。そこでは連続の式を以下のように変形する。

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

音波の速度は無限大になり音波の伝搬は解かれない。CFLは熱対流速度だけで決まる。



# アネラスティック近似の問題

**音速無限大の仮定**：音速が無限大で情報を運ぶので毎時間ステップすべてのCPUの情報をすべてのCPUが必要とする。通信不可大

**高解像度化の限界(ASH限定)**：球面調和関数を用いたスペクトル法を用いた手法が一般的であるが、フーリエ変換( $O(N \log N)$ )と違いルジャンドル陪関数を用いた展開には高速なものがないので、負荷は $O(N^2)$ となる。

また、MHDでよく使われるslope-limiter的な手法が使いにくいので、実質的に低解像度になる。

**近似の限界**：太陽表面( $>0.99R_{\text{sun}}$ )では、音速と熱対流速度が同程度になるので、Anelastic近似の仮定自体が破綻。表面が取り扱えない。



# 音速抑制法(RSST)

密度の擾乱  $\rho_1$  を  $\xi^2$  倍する ( $\rho_0$  は時間変化しない背景密度場)

$$\rho = \rho_0 + \rho_1 \longrightarrow \rho = \rho_0 + \xi^2 \rho_1$$

この操作によって実効的な音速は  $1/\xi$  になる。連続の式を以下のように変形したことと同等になる。

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

この手法ならば、局所通信のみが必要となる。この方法の妥当性は我々の過去研究で確認されている (Hotta+2012)。

抑制された音速で測ったマッハ数が0.7よりも小さかったら熱対流に対して影響がないことが確かめられた。

非一様などを使ってもよく。対流層の底で大きなと、太陽表面近くでは  $\xi=1$  を用いることで物理を失うことなく太陽表面まで解ける。

# 音速抑制法を大規模計算に適用するための経緯

---

2010年夏にアメリカのボルダーにて研究

研究資料を発掘すると2011年3月11日に科研費の打ち合わせ  
音速抑制法を千葉大学の研究会で紹介する

(その研究会の間に地震があり、千葉大学に泊まる)

2012年度「京」募集落ちる

2012年7月25日

松元→横山「京で大規模計算やりませんか？」

横山→堀田「どうしましょう？」

堀田→横山「結果を出すのが難しいので断りを」

横山→松元「すみませんが、断ります」

**松元→横山「考え直せませんか？」**

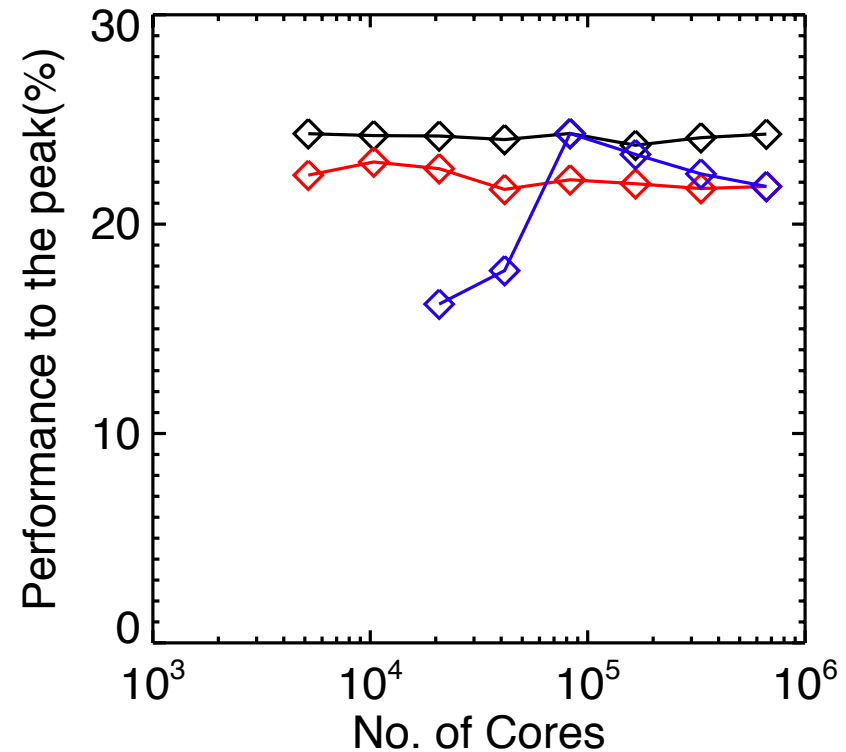
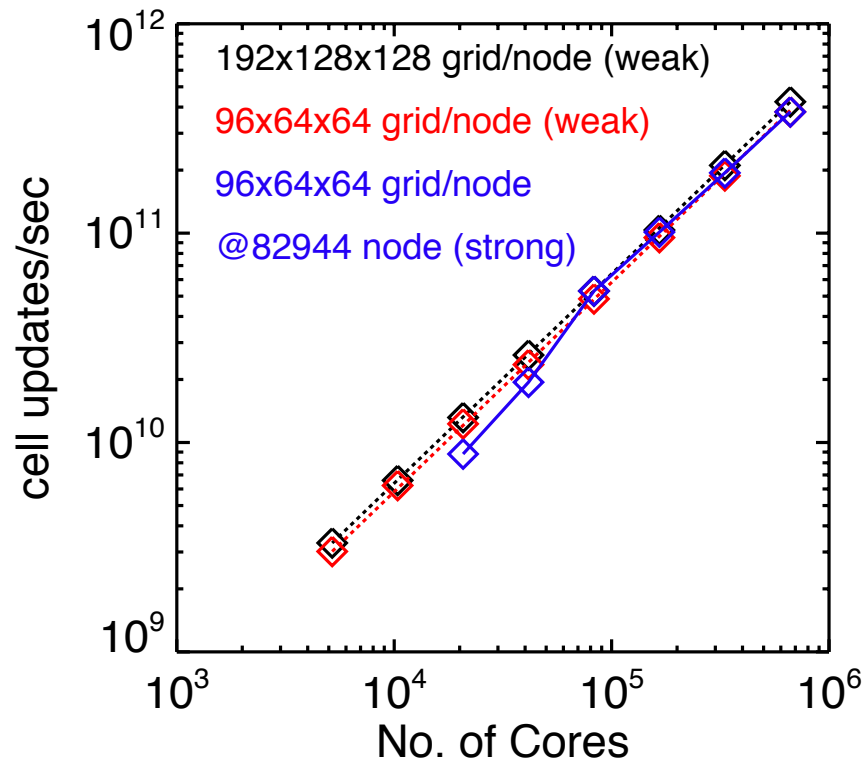
松元→横山「いかがでしょう？」

2012年7月26日

横山→堀田「やるってことでどうでしょうか？」

堀田→横山「やりましょう。。」

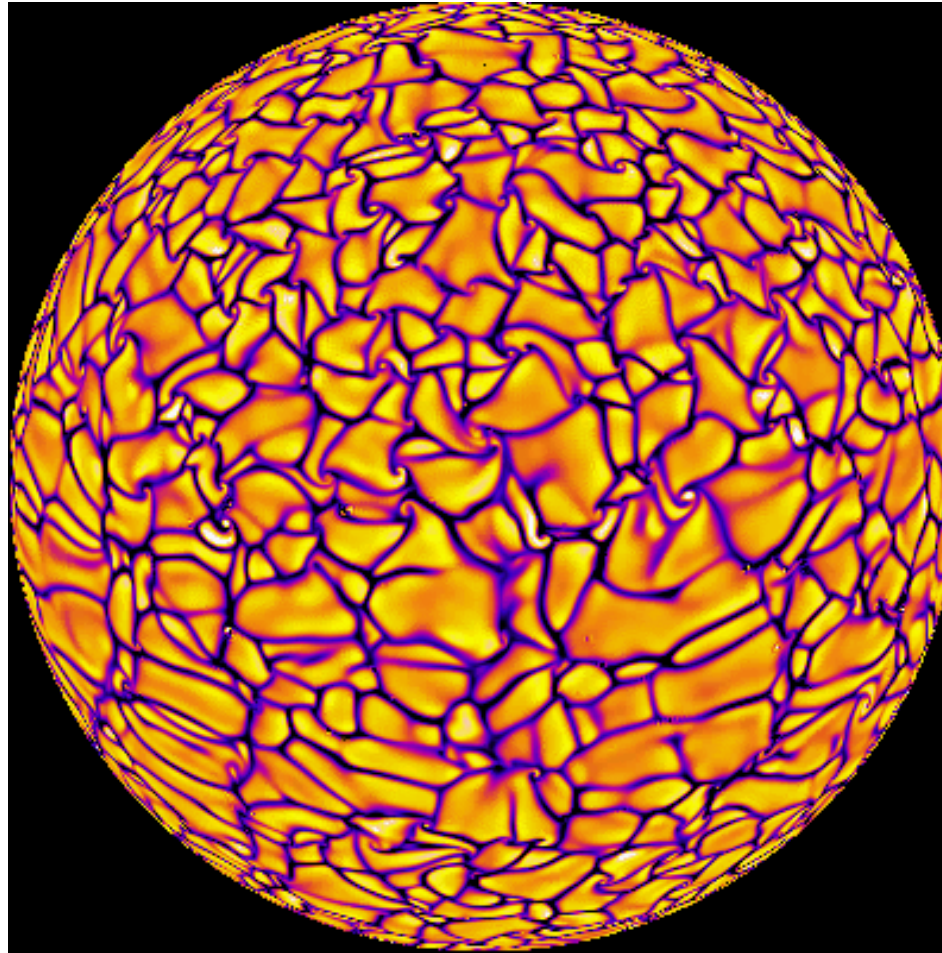
# とても効率の良いコードを生成



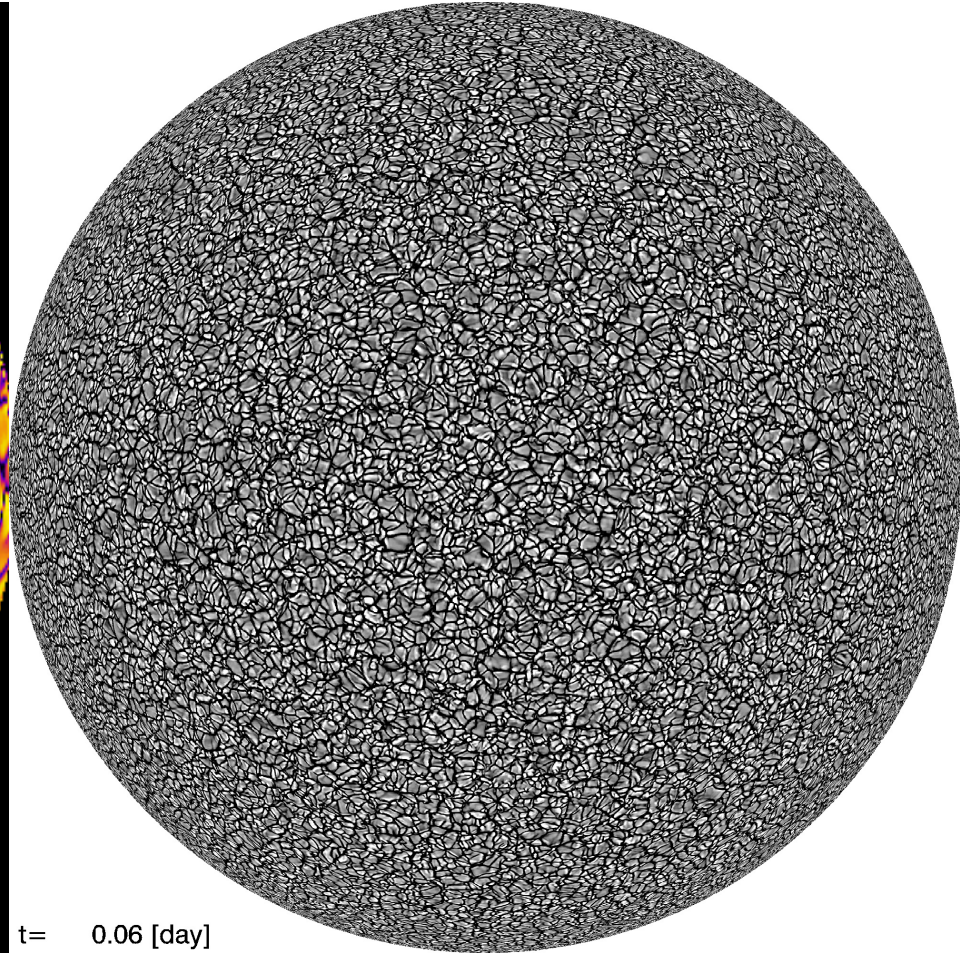
京全体である**663,552 core**まで、ほぼ理想的なスケーリング。  
理論ピーク性能に対して**24%**の実行性能が達成できている。



# 成果 1 : 小ケール熱対流



Miesch+2008



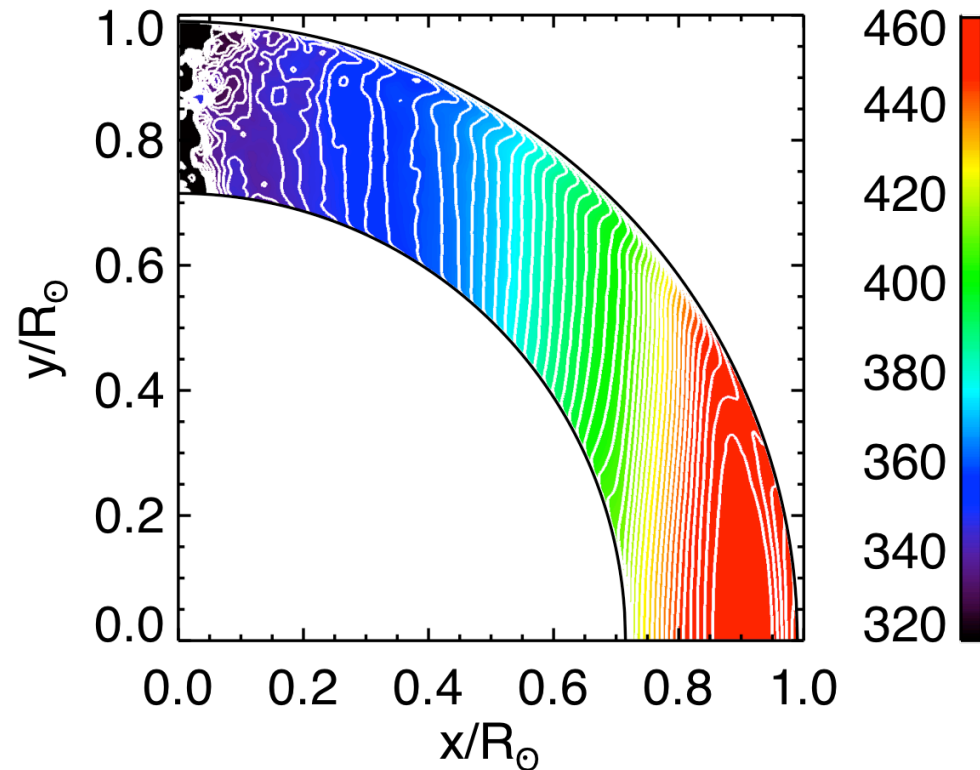
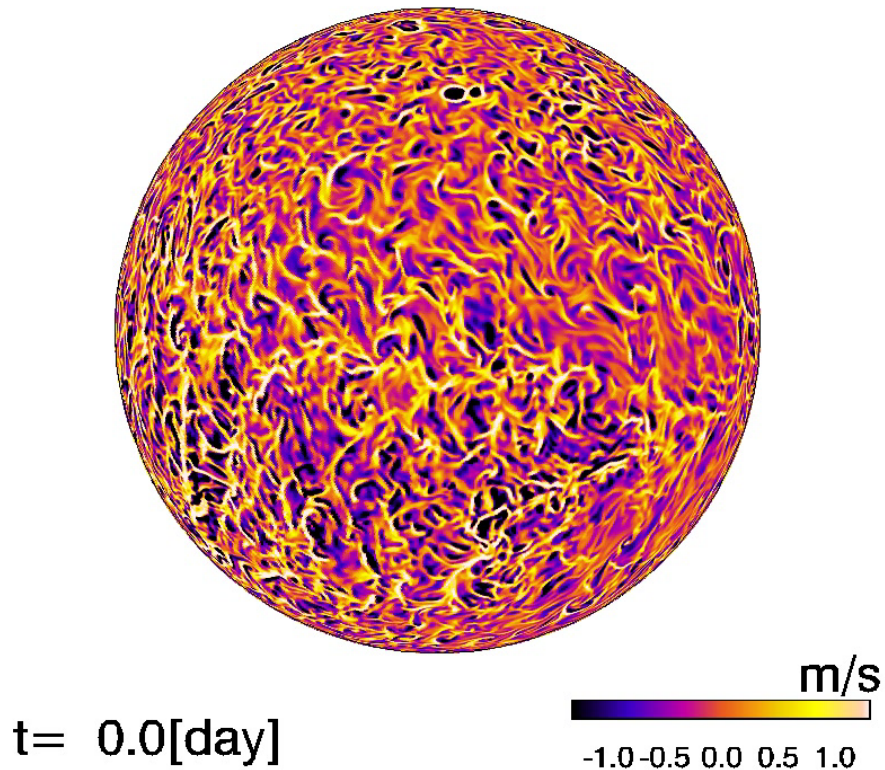
t= 0.06 [day]

Hotta+2014



## 成果 2 : 表面勾配層

$r = 0.715R$



1960年頃に発見された太陽表面付近にある角速度の勾配層を世界で初めて数値計算で実現し、その生成・維持機構を明らかにした。



# これまでで最も大きな計算

4096×32400×32352

=4.3兆格子点

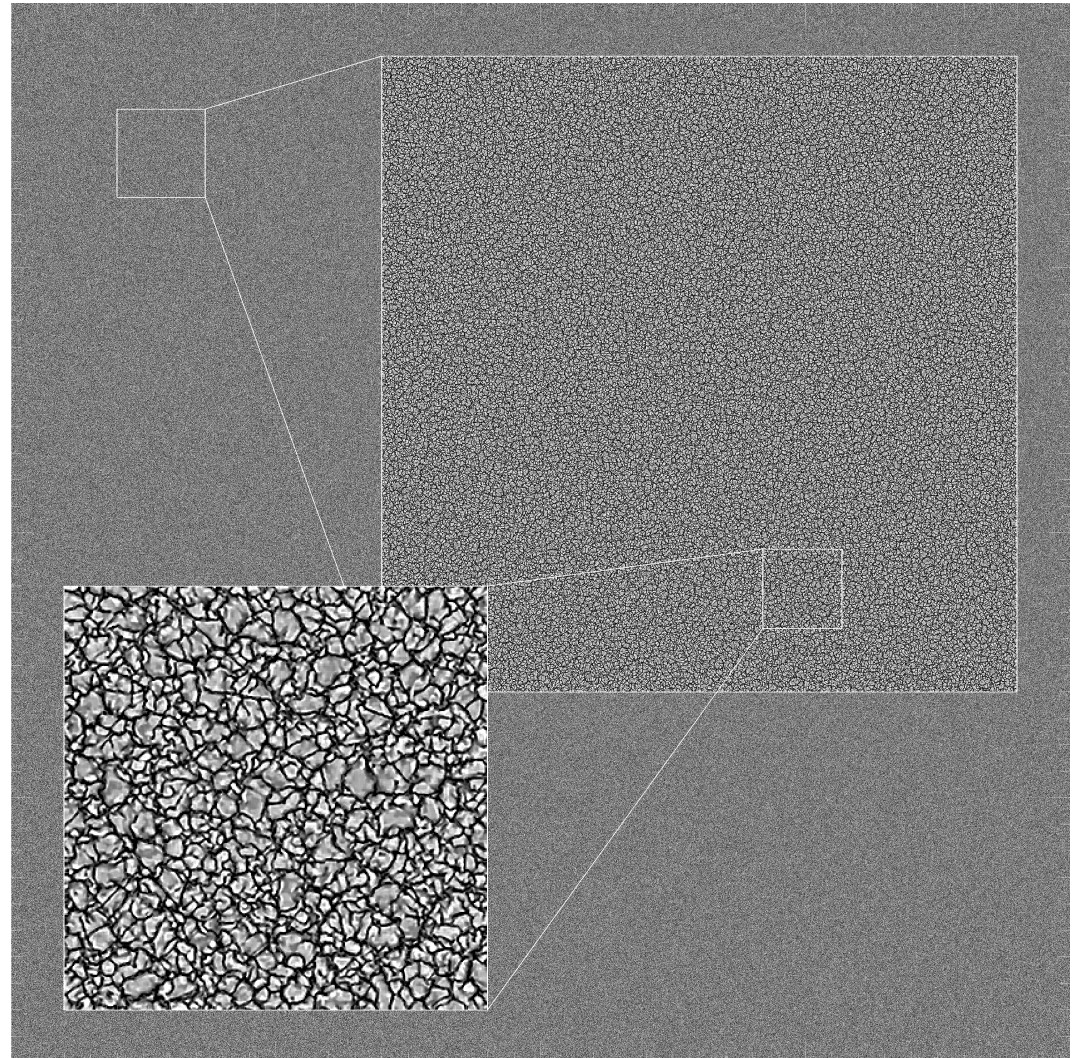
世界で最も大きい流体力学  
計算

京全体を8時間使用

(82944 node. 663552  
core)

Power Cost  
250万円

1.14 PB メモリー使用  
(京は1.26 PBを持っている)  
2.54 PFLOPSを達成





# 解像度ごとの比較

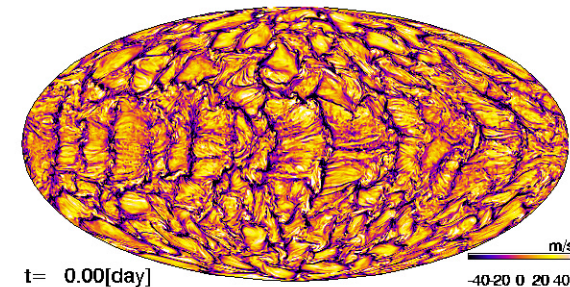
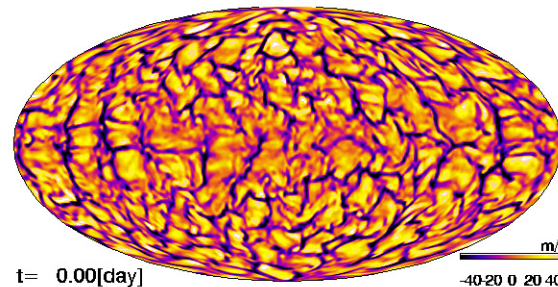
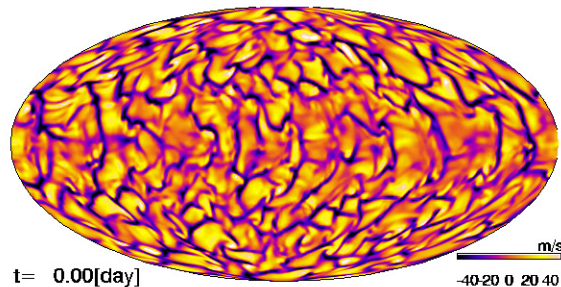
右に行くほど解像度が低い

Low

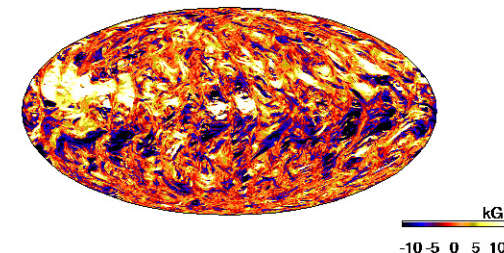
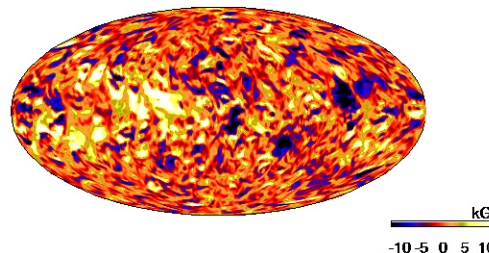
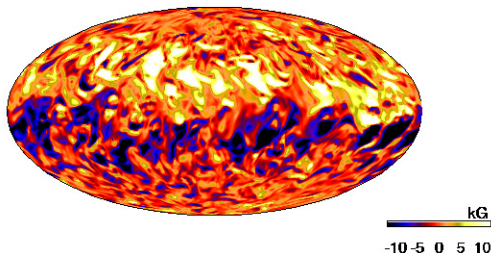
Medium

High

$v_r$  at  
 $0.95R$



$B_\phi$  at  
 $0.72R$



Lowでは、コヒーレントな磁場が対流層の底に生成されている。(Fan+2014). 実効的な解像度があがると (Medium), 大スケール磁場は壊される。さらに解像度を上げると (High), 大スケール磁場が再度、生成された。

# アネラスティック近似の問題

**音速無限大の仮定**：音速が無限大で情報を運ぶので毎時間ステップすべてのCPUの情報をすべてのCPUが必要とする。通信不可大

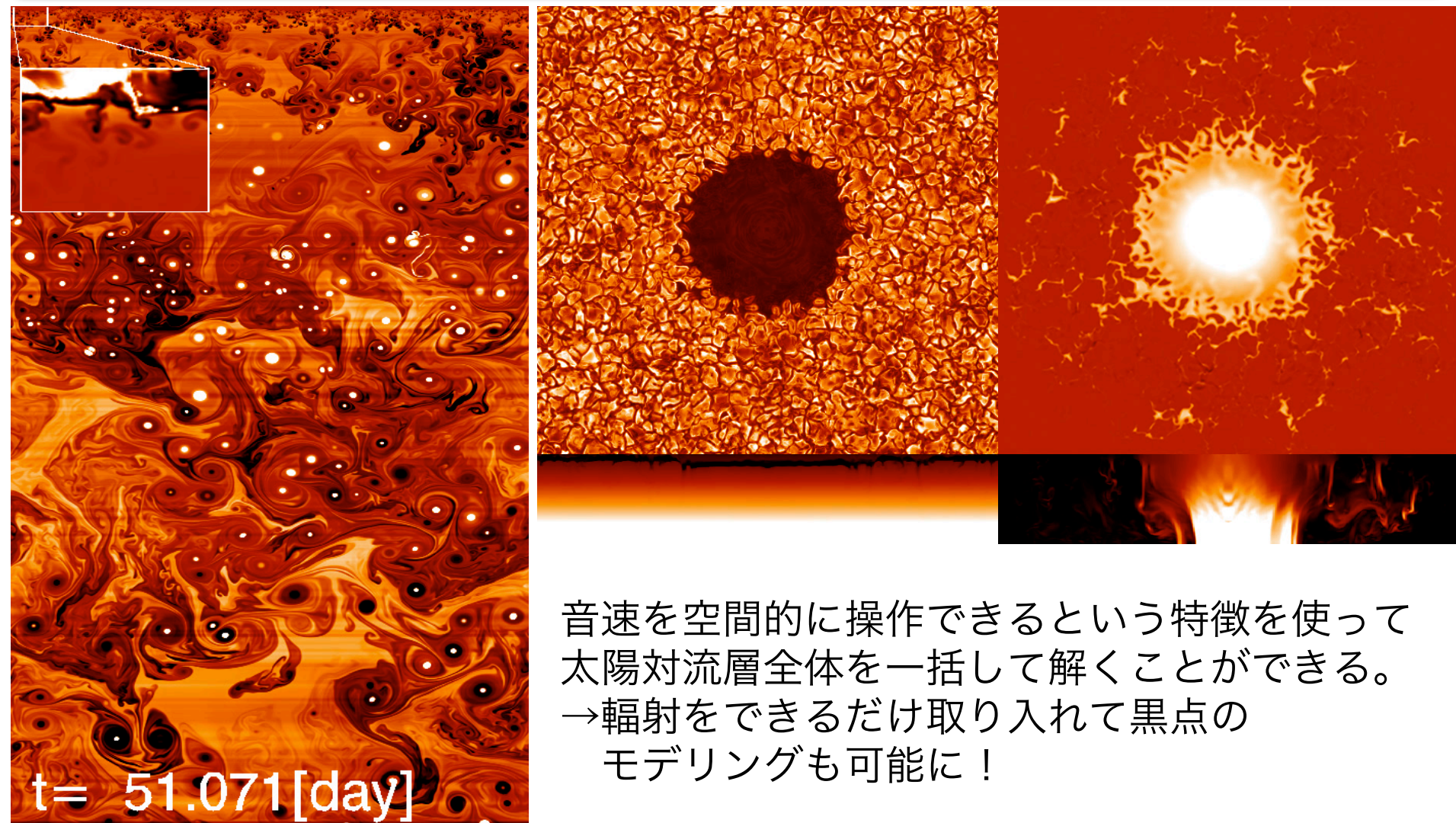
**高解像度化の限界(ASH限定)**：球面調和関数を用いたスペクトル法を用いた手法が一般的であるが、フーリエ変換( $O(N \log N)$ )と違いルジャンドル陪関数を用いた展開には高速なものがないので、負荷は $O(N^2)$ となる。

また、MHDでよく使われるslope-limiter的な手法が使いにくいので、実質的に低解像度になる。

**近似の限界**：太陽表面( $>0.99R_{\text{sun}}$ )では、音速と熱対流速度が同程度になるので、Anelastic近似の仮定自体が破綻。表面が取り扱えない。



# 音速抑制法のこれから



# まとめ

音速抑制法は、低マッハ数の流体を大規模計算で高解像度にとける手法である。

2012年ごろに京での計算に適用して以来多くの成果をあげてきた。つぎは、太陽表面を取り入れた計算であり、順調に進んでいる。

**大規模計算計算を若者が実行するいうときに、助けてくれるシニアの存在はとてつもなくありがたいと思います。**

**ありがとうございます。**