

大規模太陽球殻熱対流計算 と大規模データの取り扱いについて

東京大学
堀田英之

共同研究者：M. Rempel(HAO), 横山央明(東京大学)

概要

本講演の目的：

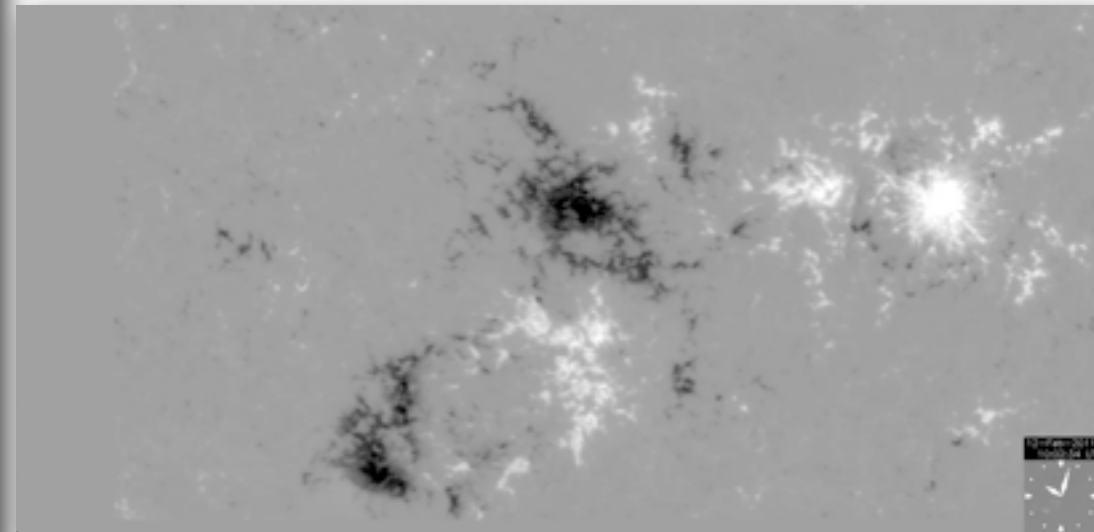
音速抑制法により、高解像度の熱対流計算が可能になった。

その初期成果を紹介するとともに容量の増え続ける数値計算結果について、
どのような取り扱いをすればいいかを議論する。

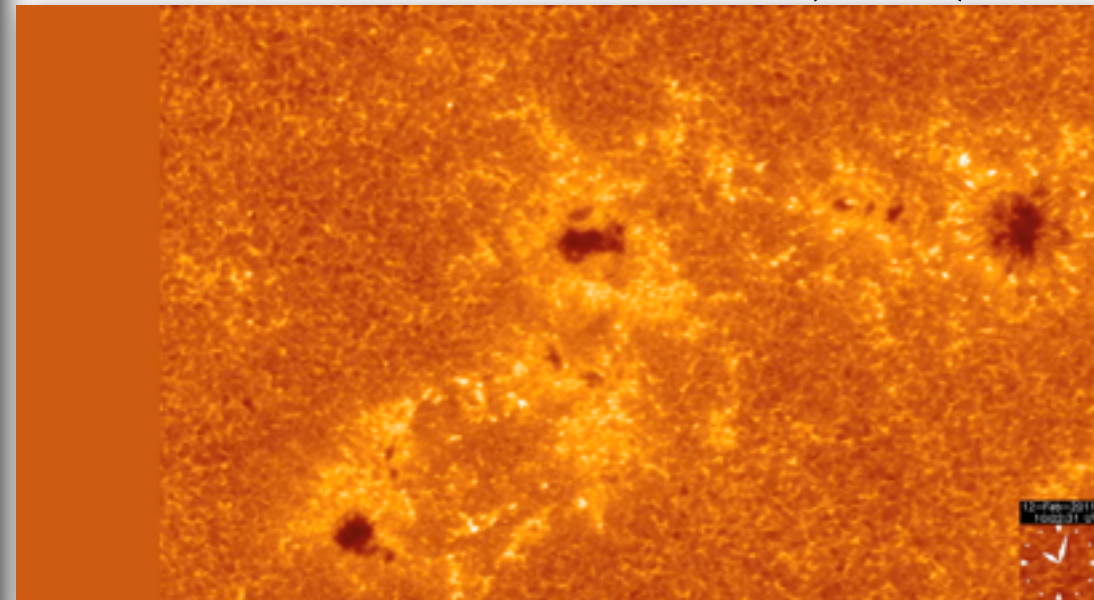
今回は、大規模熱対流に特化した話

太陽物理学最大の問題：太陽ダイナモ (1/2)

視線方向磁場



光球付近光度(Ca)



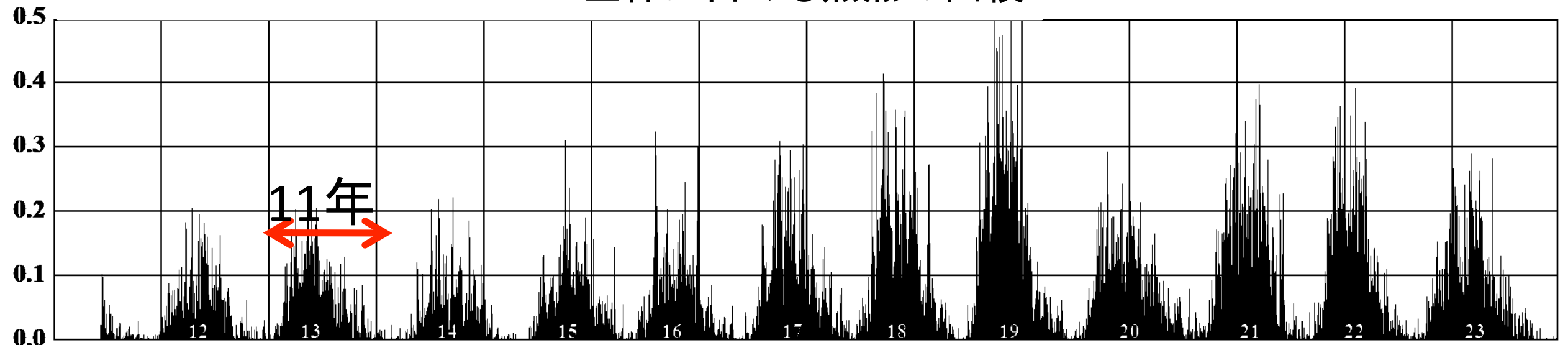
Hinode/SOT 岡本さん提供



171,000 km

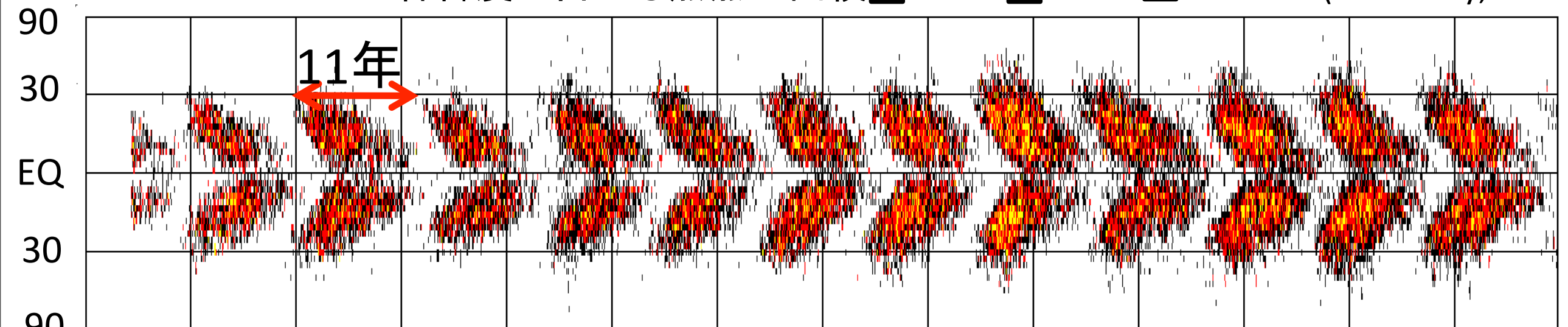
太陽物理学最大の問題：太陽ダイナモ (2/2)

全体に占める黒点の面積



1870 1880 1890 1900 1910 1920 1930 1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010

各緯度に占める黒点の面積 ■ >0.0% ■ >0.1% ■ >1.0% (Hathaway, 2010)

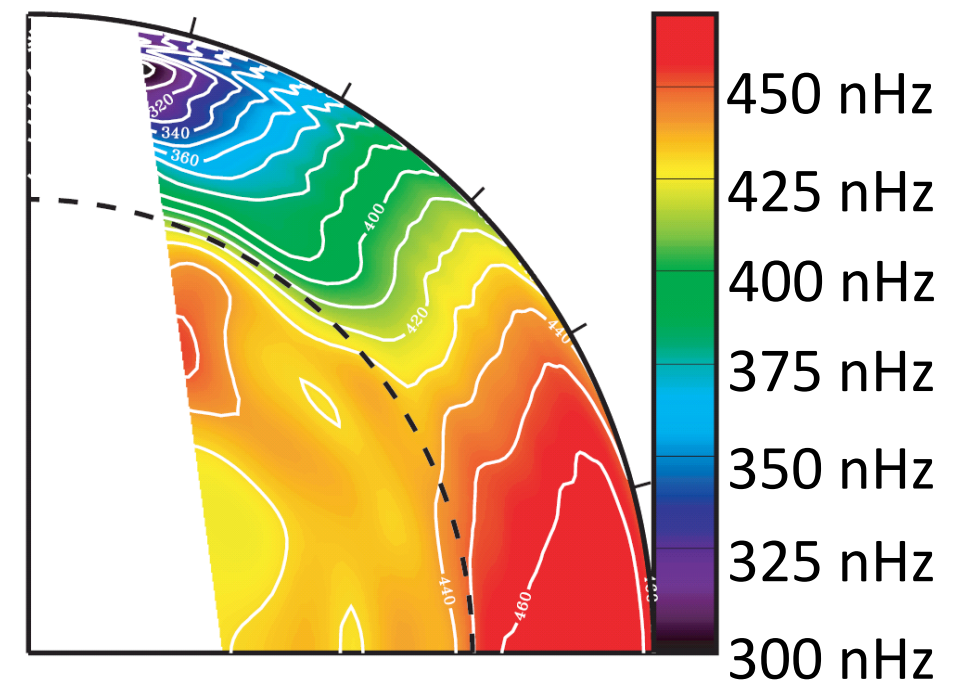


1870 1880 1890 1900 1910 1920 1930 1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010

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



太陽内部対流は多階層

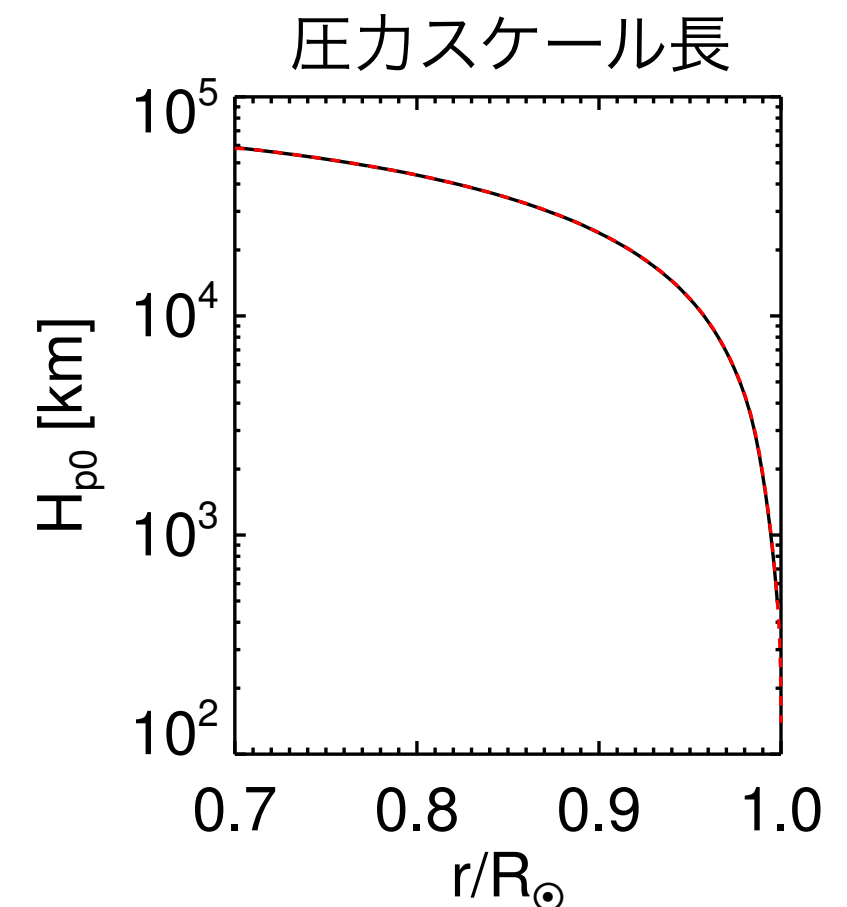
星の半径：70万 km(一周440万 km)

対流層の厚み：20万 km

圧力スケール長：

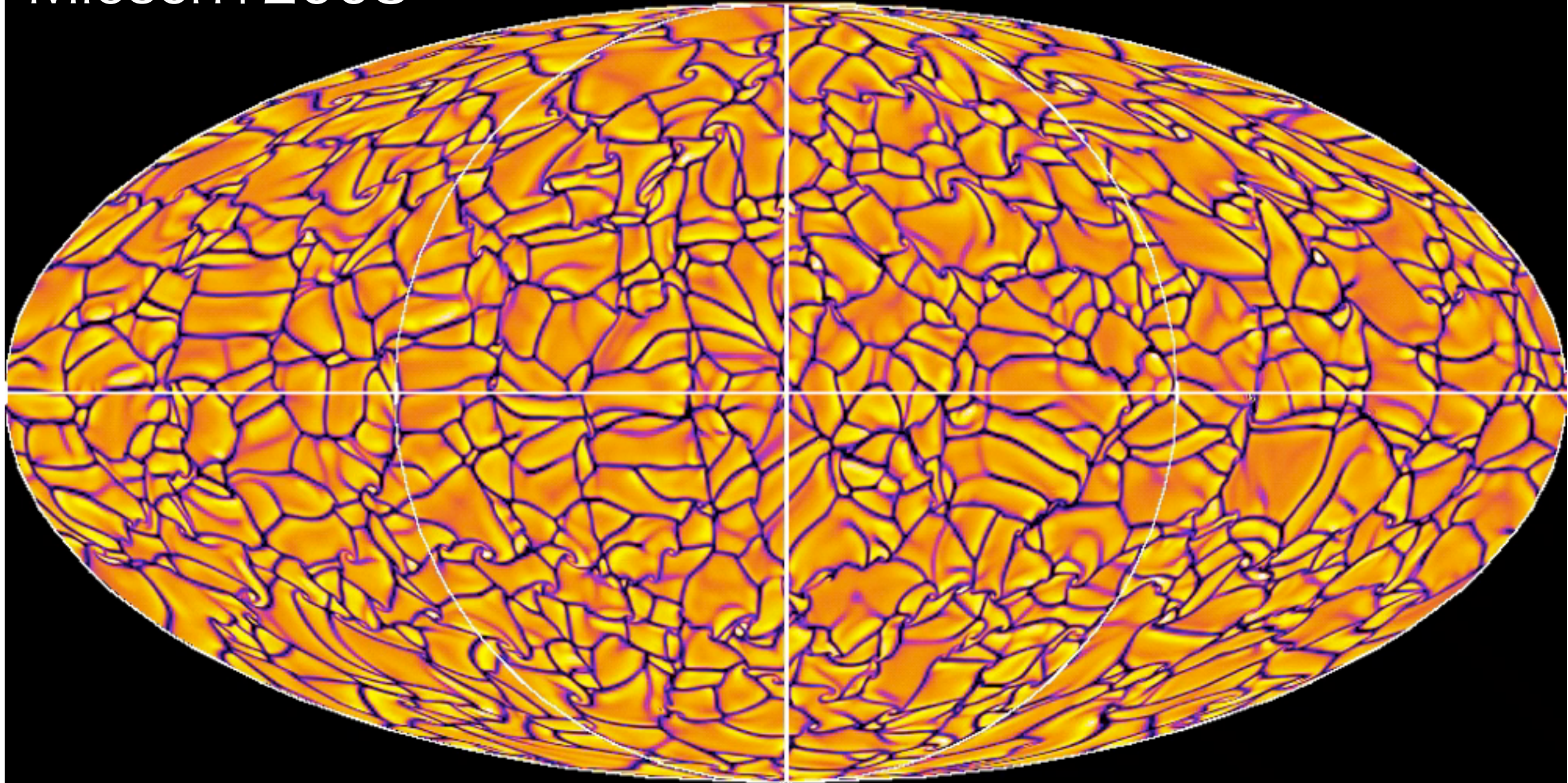
6万 km(対流層の底)、300 km(表面)

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
例えば、光球まで解こうと思ったら
50kmの解像度が必要で
4000x44000x88000の解像度を
とれば、熱対流の層流が計算可能



これまでの世界最高解像度の数値計算

Miesch+2008



0.0

解像度：257x1024x2048

スケーリングを制限するもの

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

EULAG：反復法でポアソン方程式を解く

いずれにせよ、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。

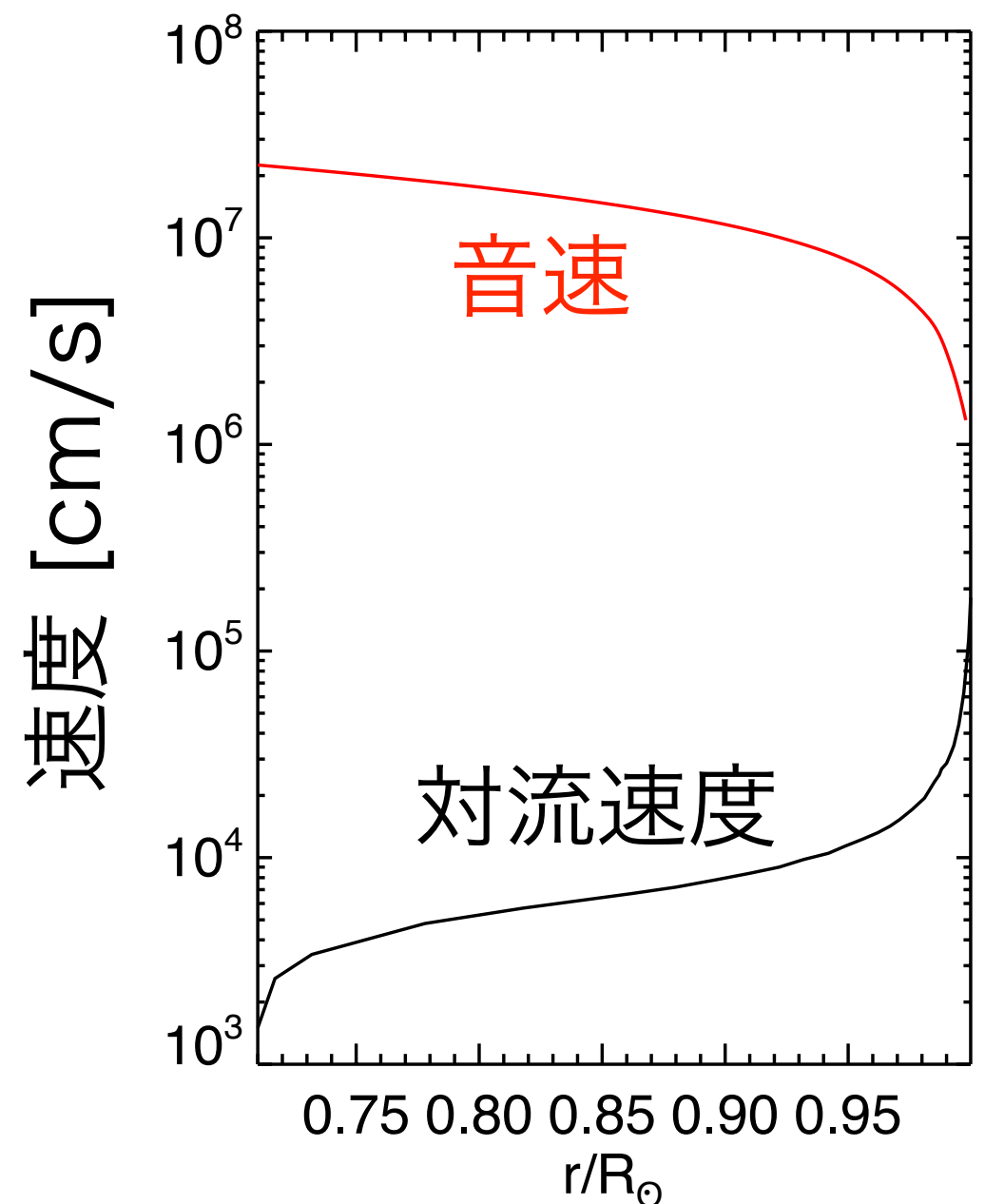
EULAGは良く知らないが、1000 並列まで？

アネラスティック近似で他に嫌なこと

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

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

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/ξ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ども使って良く
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・ヘリウムの電離の効果を取り入れた状態方程式

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

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

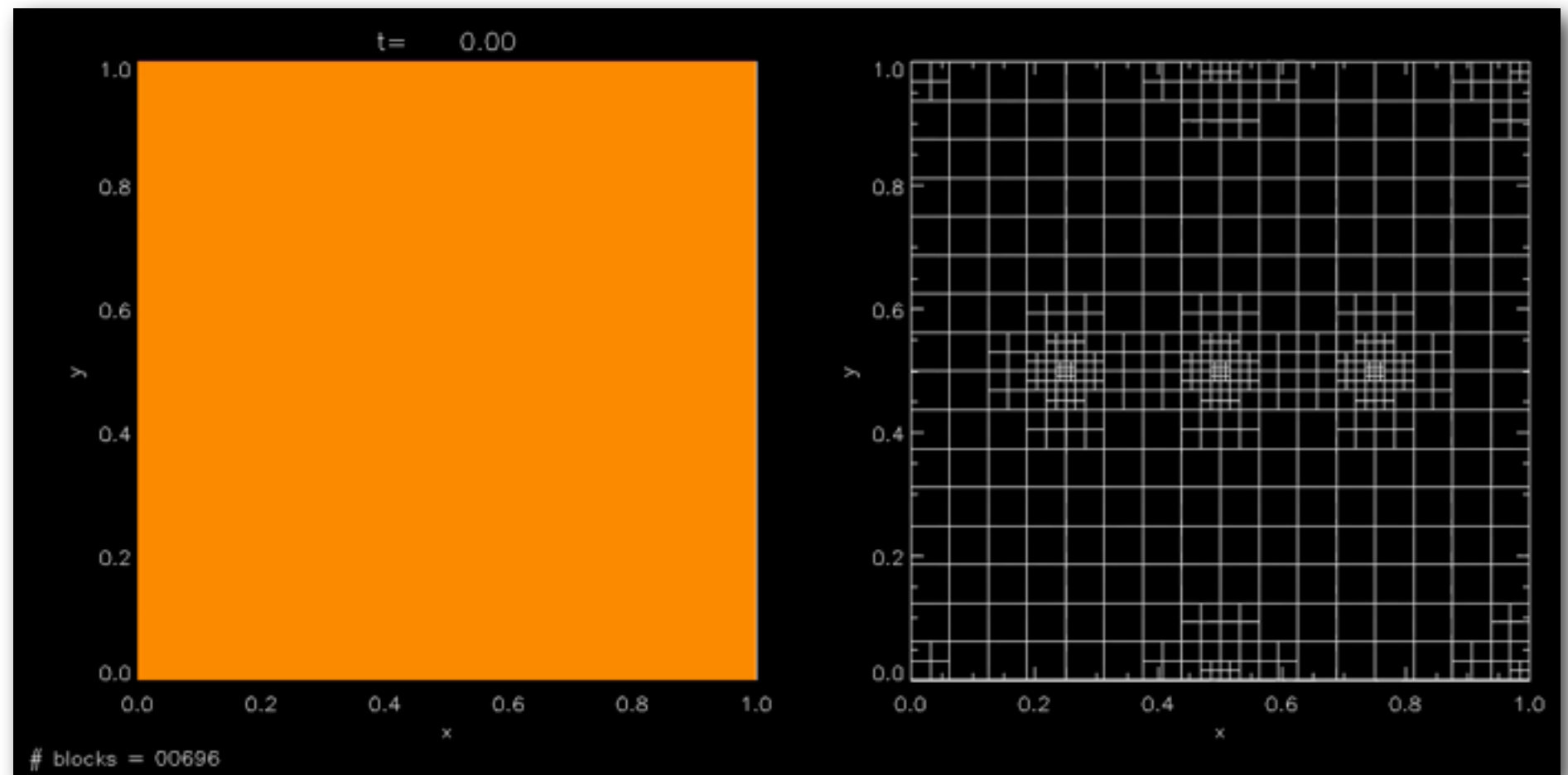
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

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

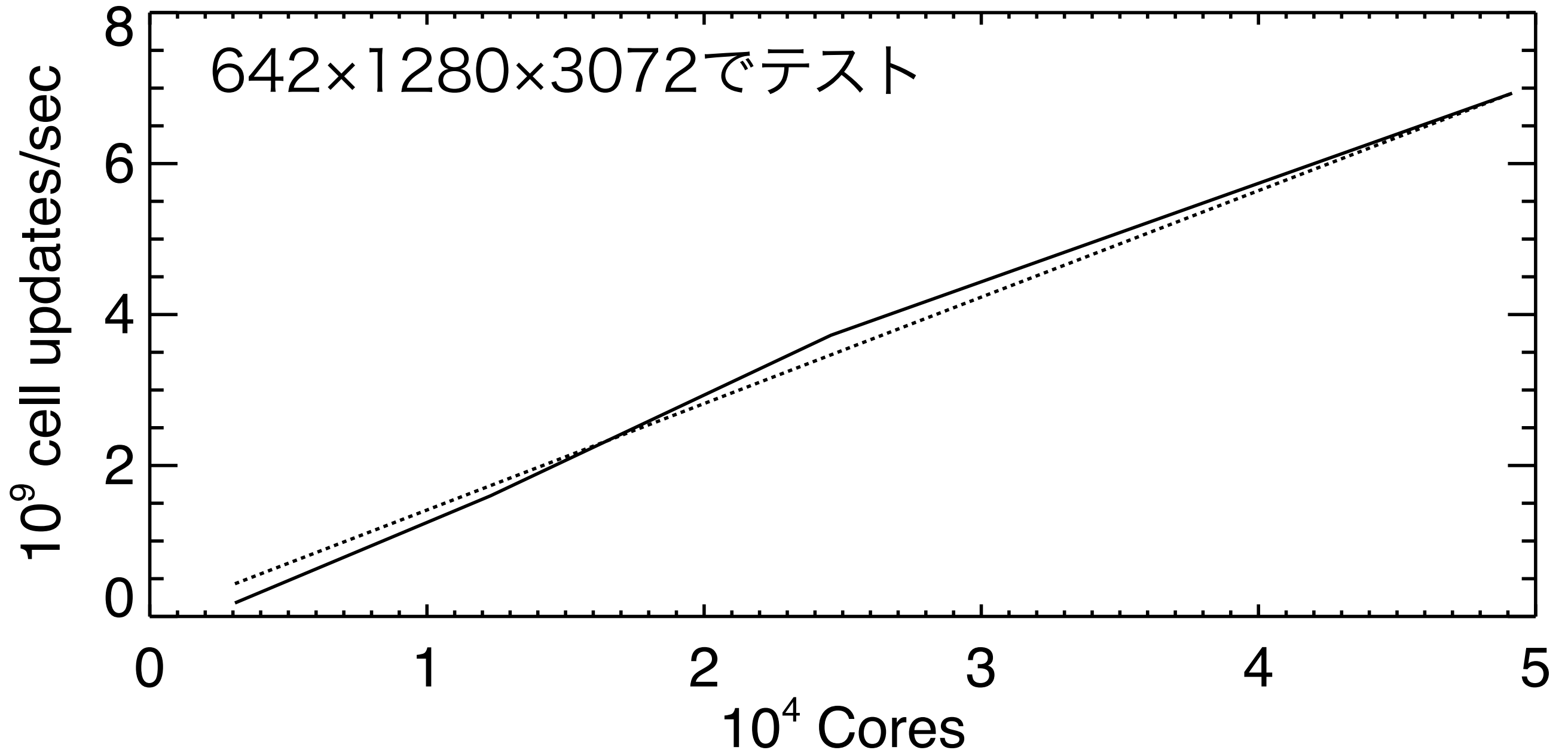
$$p_1 = p_1(\rho_1, s_1, r)$$

計算手法

- 4次精度中央差分 + 4次精度RK + 非線形人工粘性
- Hyperbolic divergence cleaning
- block structured AMR
- Peano-Hilbert曲線でMPI並列化



スケーリング



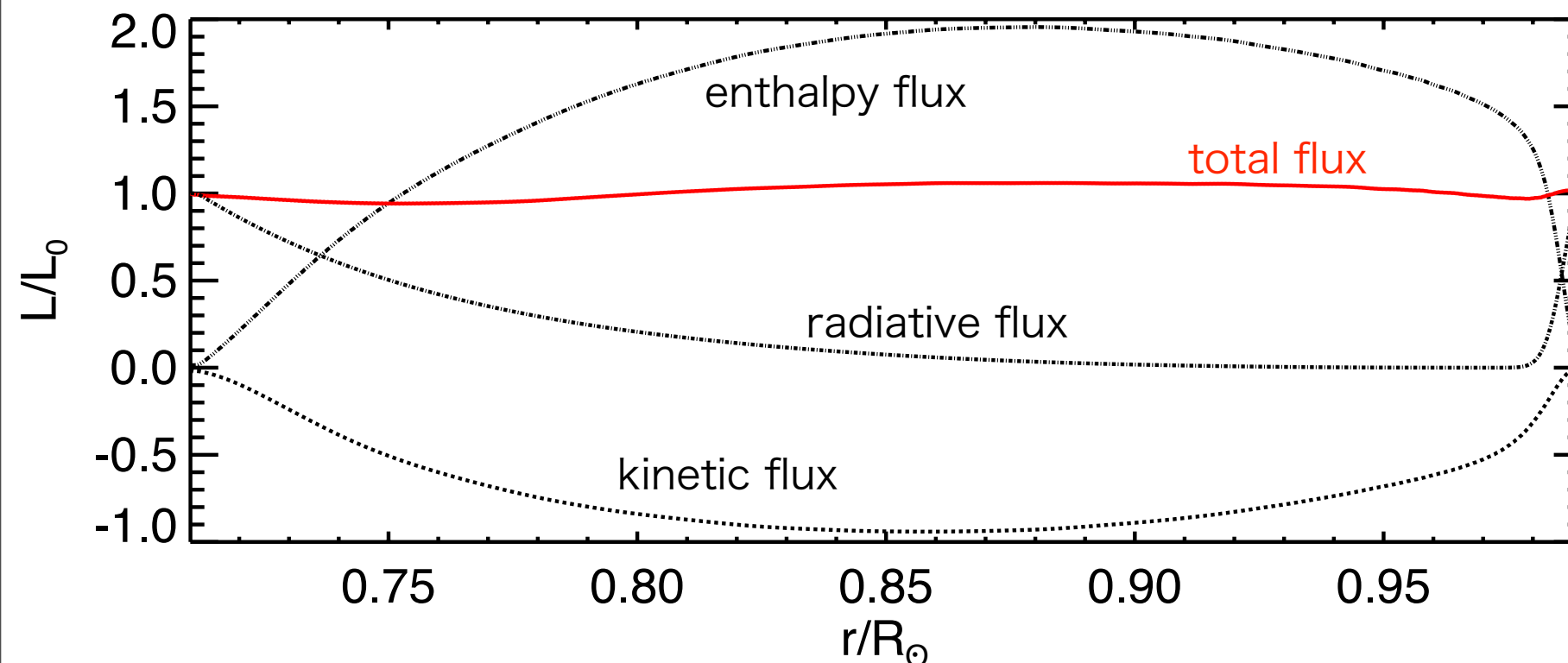
京のシステムで、50000コアくらいまでチェック済み。
制限するものはないので、weak scalingはかなりするはず

ここからが本題

どうやってこのような大きなデータを取り扱おう

256³格子程度の計算ならば

1. 全データをダウンロード
2. AMR blockから一様格子に直す
3. 球面調和関数展開などして解析



特に計算の進み
具合を見るには
エネルギー流束
を見なければ
いけない

現在の計算は

$720 \times 1280 \times 3072$ (解像度) $\times 8$ (単精度) $\times 8$ (種類) = **180 GB**

例えば、100 step出力するだけで**18 TB**のデータになる

1. 転送に時間がかかる・ハードディスクが足りない
2. メモリが足りなくて一様グリッドにできない

京：16 GiB FX10：32 GiB or 64 GiB

3. 解析に異様な時間がかかる

とにかく苦しい研究になる

現在の計算は

$720 \times 1280 \times 3072$ (解像度) $\times 8$ (単精度) $\times 8$ (種類) = **180 GB**

例えば、100 step出力するだけで**18 TB**のデータになる

1. 転送に時間がかかる・ハードディスクが足りない
2. メモリが足りなくて一様グリッドにできない

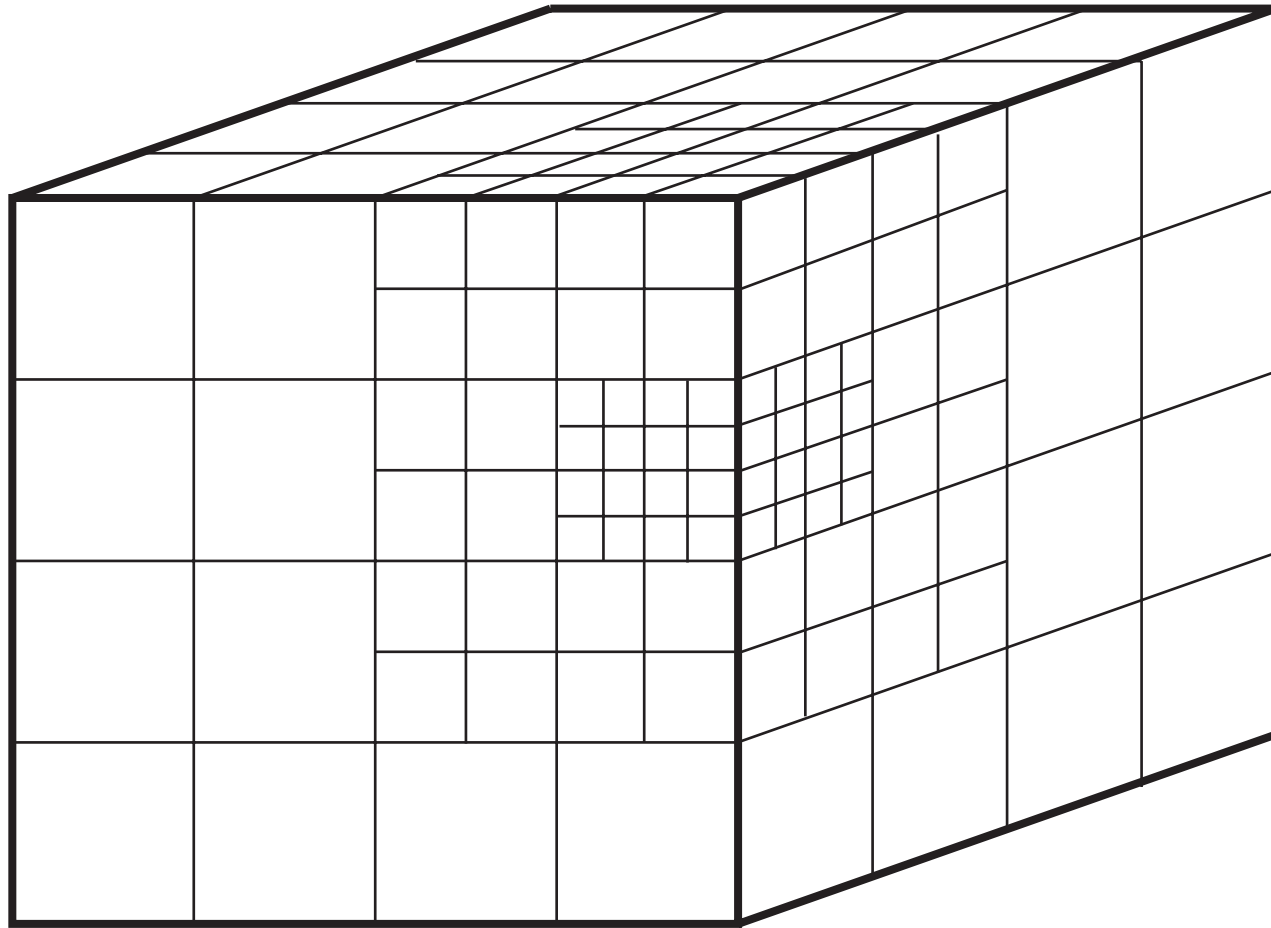
京：16 GiB FX10：32 GiB or 64 GiB

3. 解析に異様な時間がかかる

とにかく苦しい研究になる

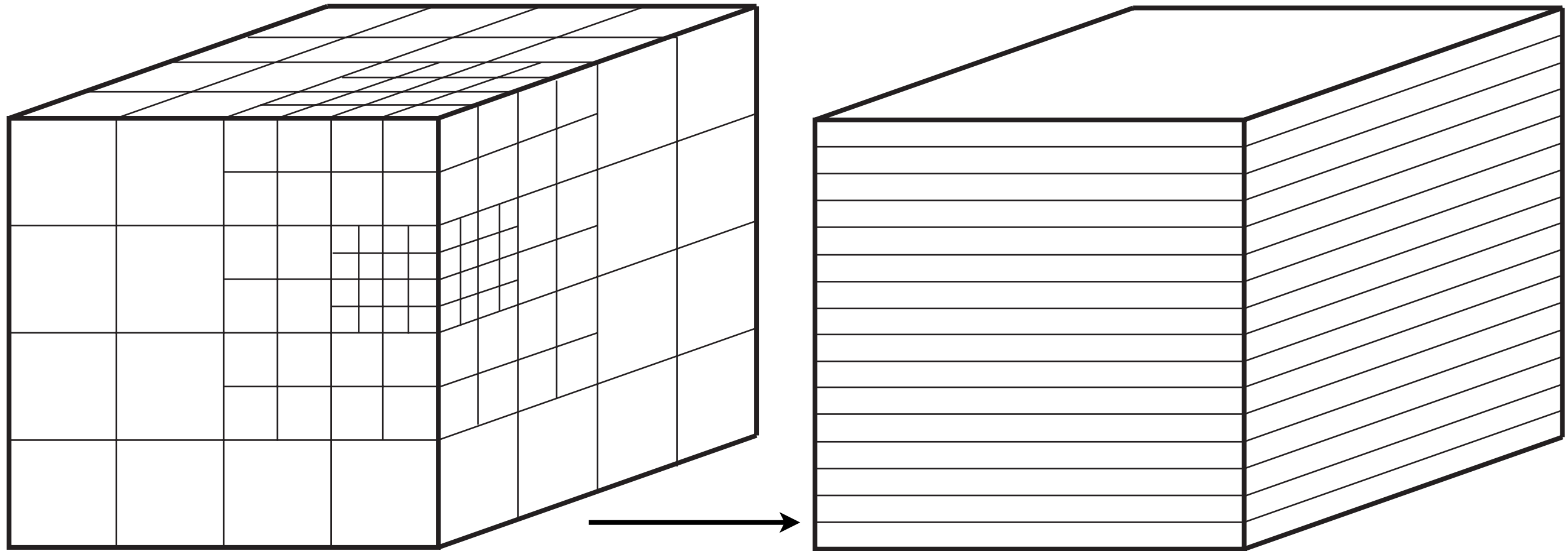
「3次元計算では、すべてのデータを使うことはあっても
すべてのデータを見ることは少ない」

AMR blockのままでは扱いにくい



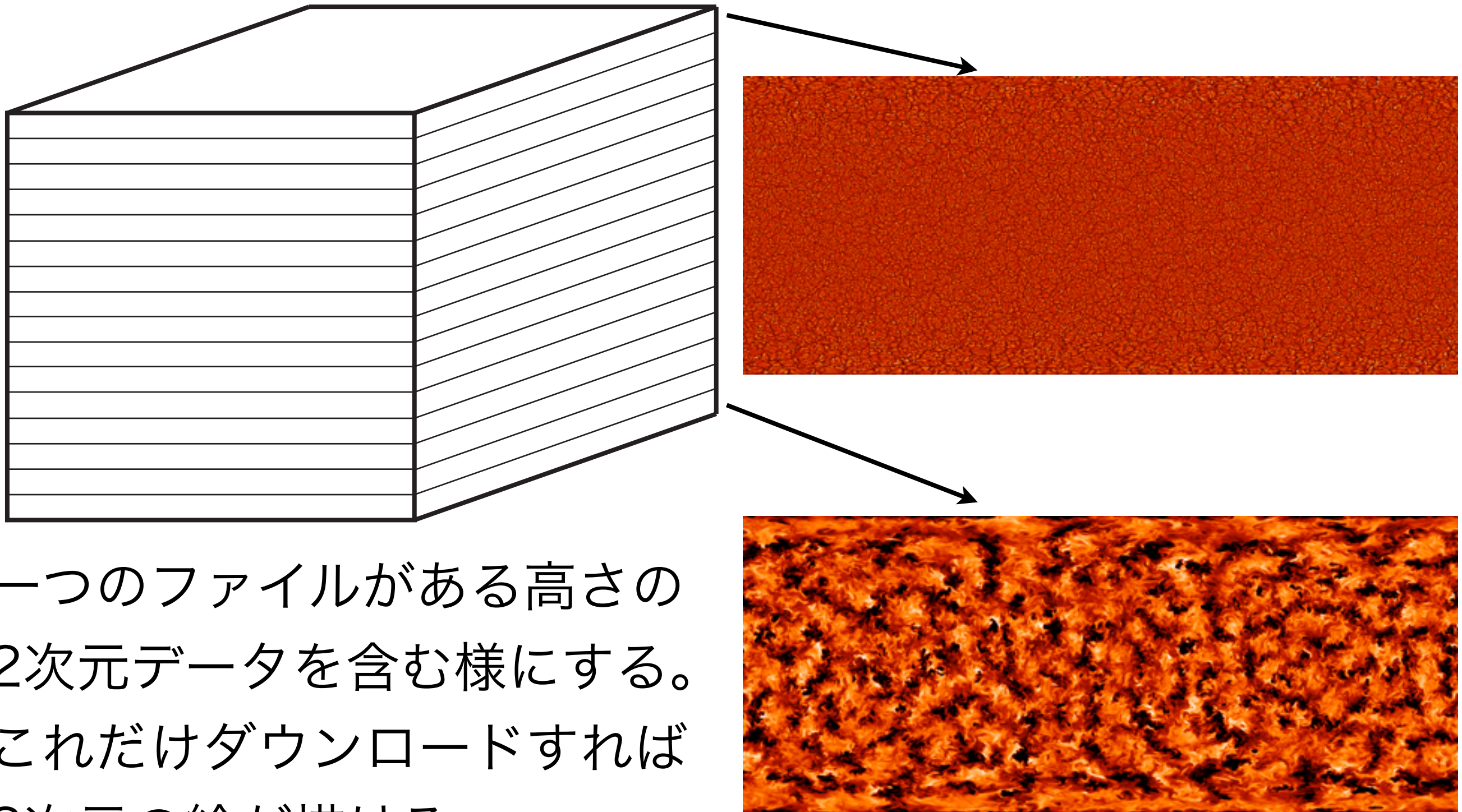
一つのCPUで、全部のデータを持たない様に注意して、
一様グリッド、動径方向に分割し、
それぞれのランクに持たせる
(スペクトル法の人などと方針は一緒)

AMR blockのままでは扱いにくい



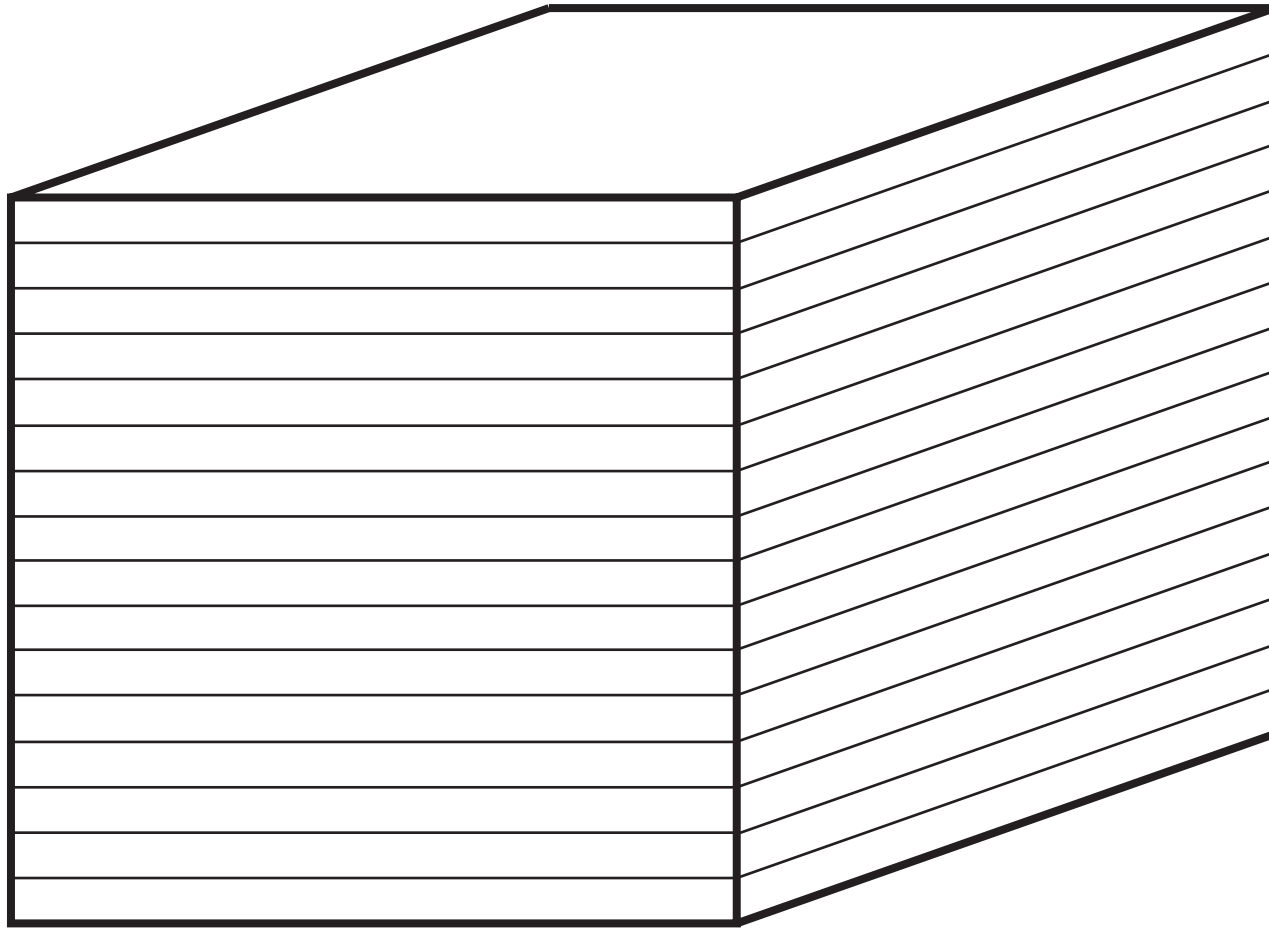
一つのCPUで、全部のデータを持たない様に注意して、
一様グリッド、動径方向に分割し、
それぞれのランクに持たせる
(スペクトル法の人などと方針は一緒)

データファイルを分ける



一つのファイルがある高さの
2次元データを含む様にする。
これだけダウンロードすれば
2次元の絵が描ける

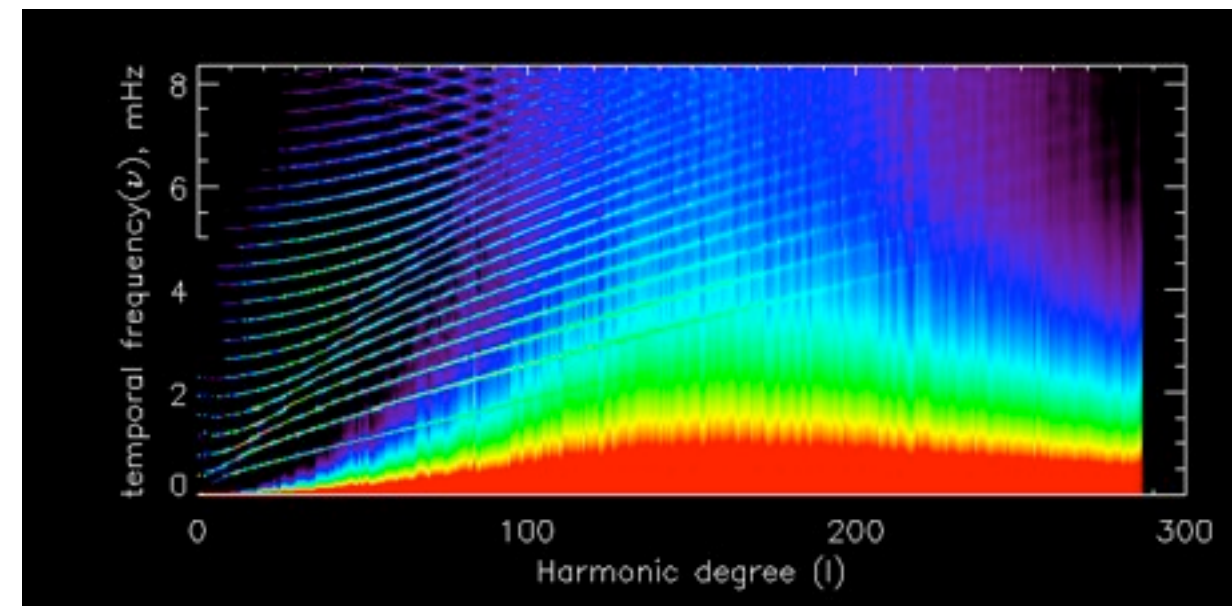
解析もできるだけスパコンで (1/2)



球面調和関数を使った解析
特に、ルジャンドル関数の
展開はとても重い

それぞれの高さでスペクトル
データを出力。ダウンロード

動径方向のスペクトルを
見るということはない。
日震学にも簡単に使える



解析もできるだけスパコンで (2/2)

熱対流で知りたい物理量は

$$v_{r(rms)}(r) = \sqrt{\frac{\int v_r^2 ds}{\int ds}}$$

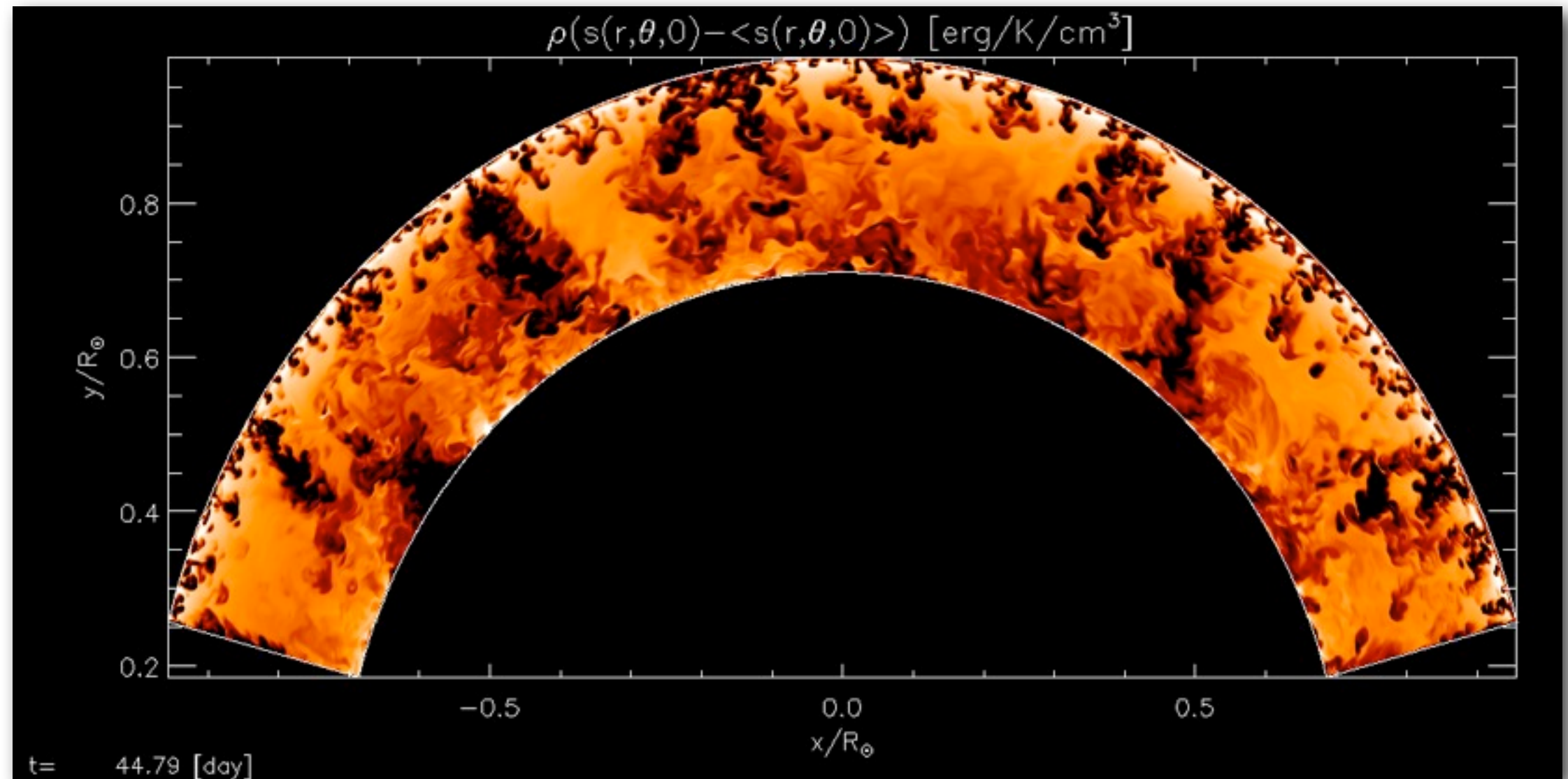
$$F_k(r) = \int \frac{1}{2} \rho v^2 v_r ds$$

$$F_r(r, \theta) = \rho r \sin \theta \langle v'_r v'_\phi \rangle$$

水平平均や経度方向平均などが必要。これは、リマッピングの後の各ランクで計算できる→一つのファイルにして出力
思いつく限り、とにかくたくさん1次元、2次元の物理量を出力(現時点で70種類くらい出力)

子午面カットは？

1次元、2次元の平均量を出力するのと同じ方針を使う。
数面取り出して、 r - θ 平面や r - ϕ 平面を出力しておく



3次元の絵 (1/3)

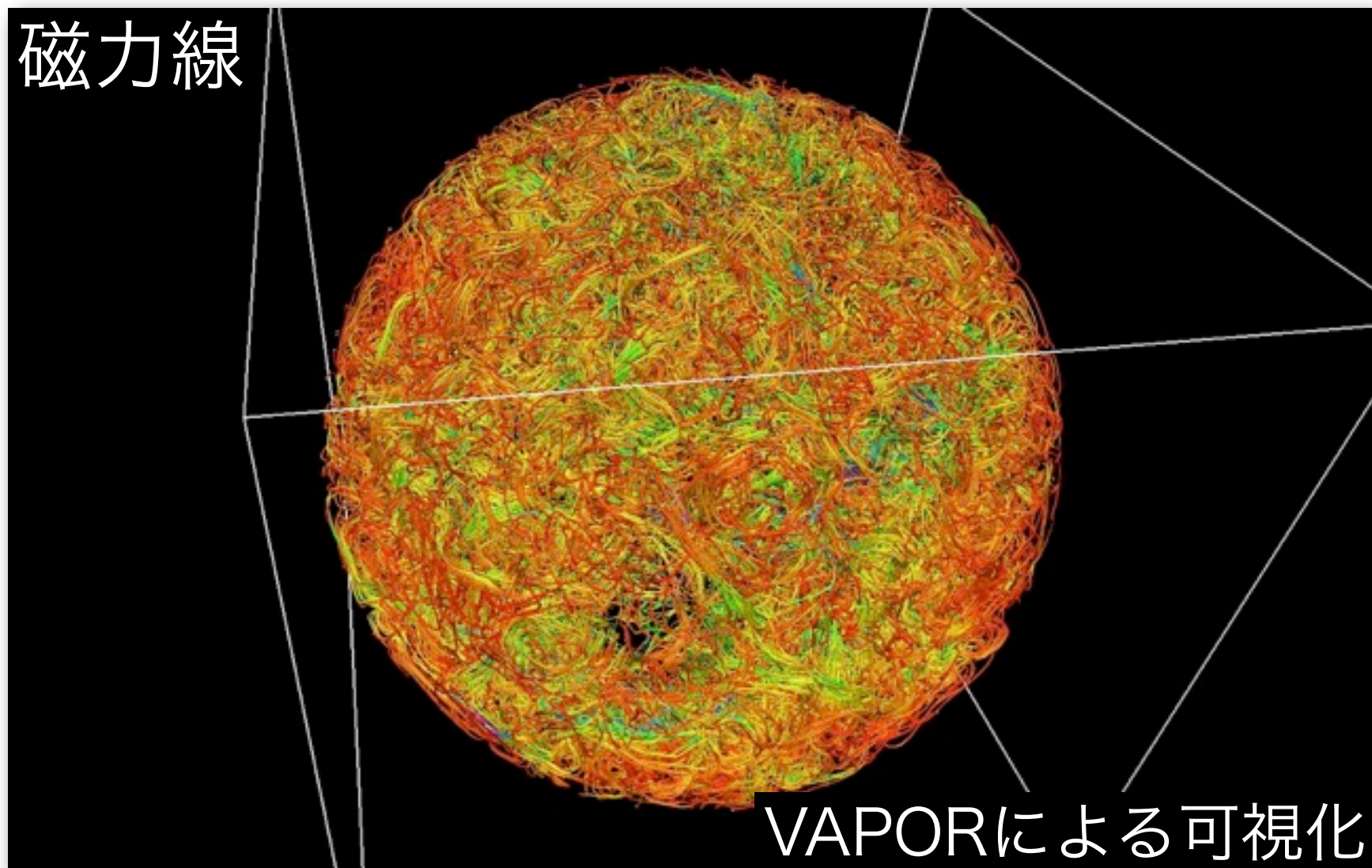
3次元の絵が見たいときもある
磁場浮上のところなど、詳しくどうなってるか知りたい

メルカトル図法で書いた表面付近の動径方向磁場 B_r



3次元の絵 (2/4)

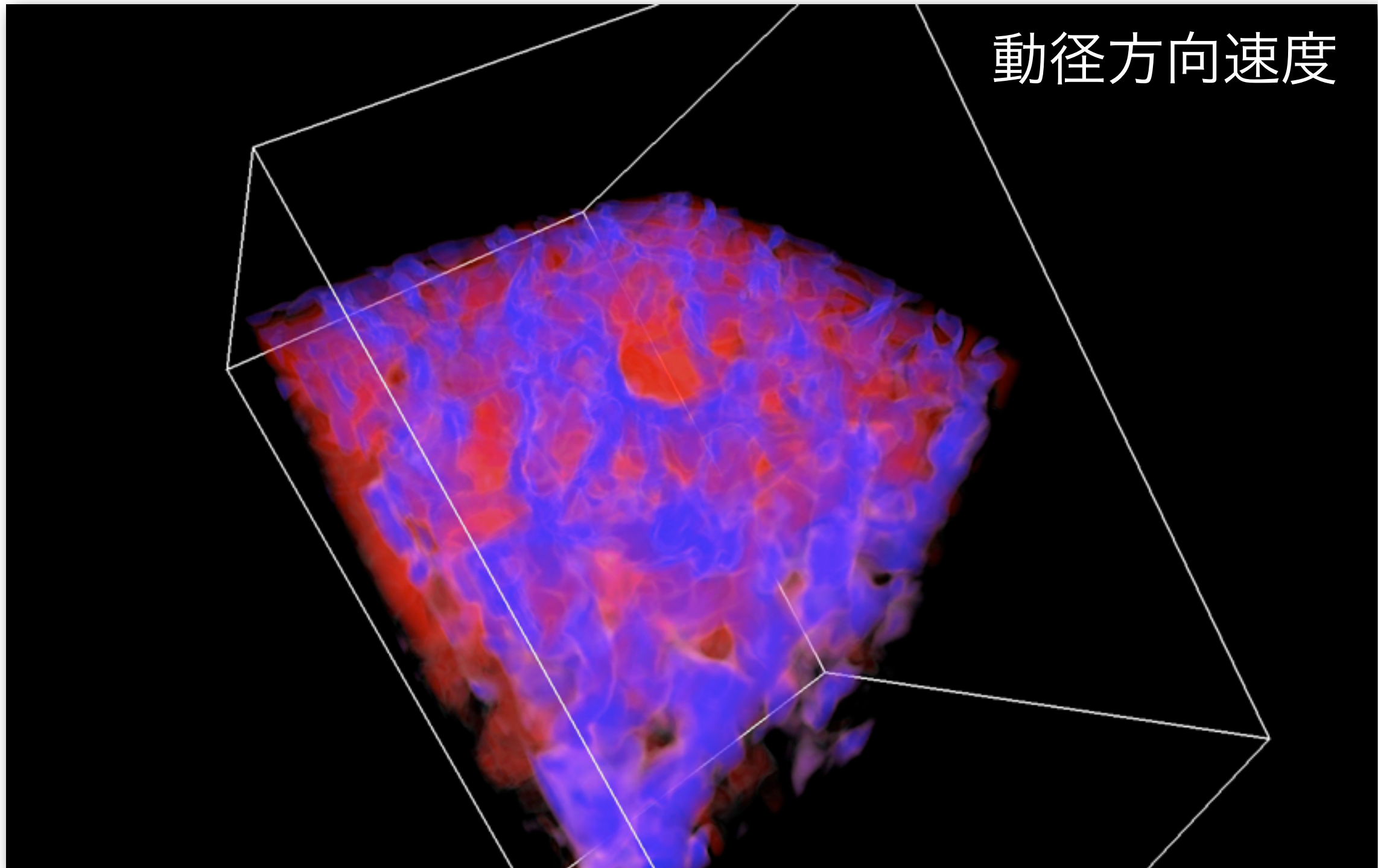
解決策 1 : スパコンの中で可視化する。特に、京には可視化ツールが提供されている(話者はまだ使えない)



3次元の絵 (3/4)

解決策 2 : 興味のある部分のみカットしてダウンロード

動径方向速度

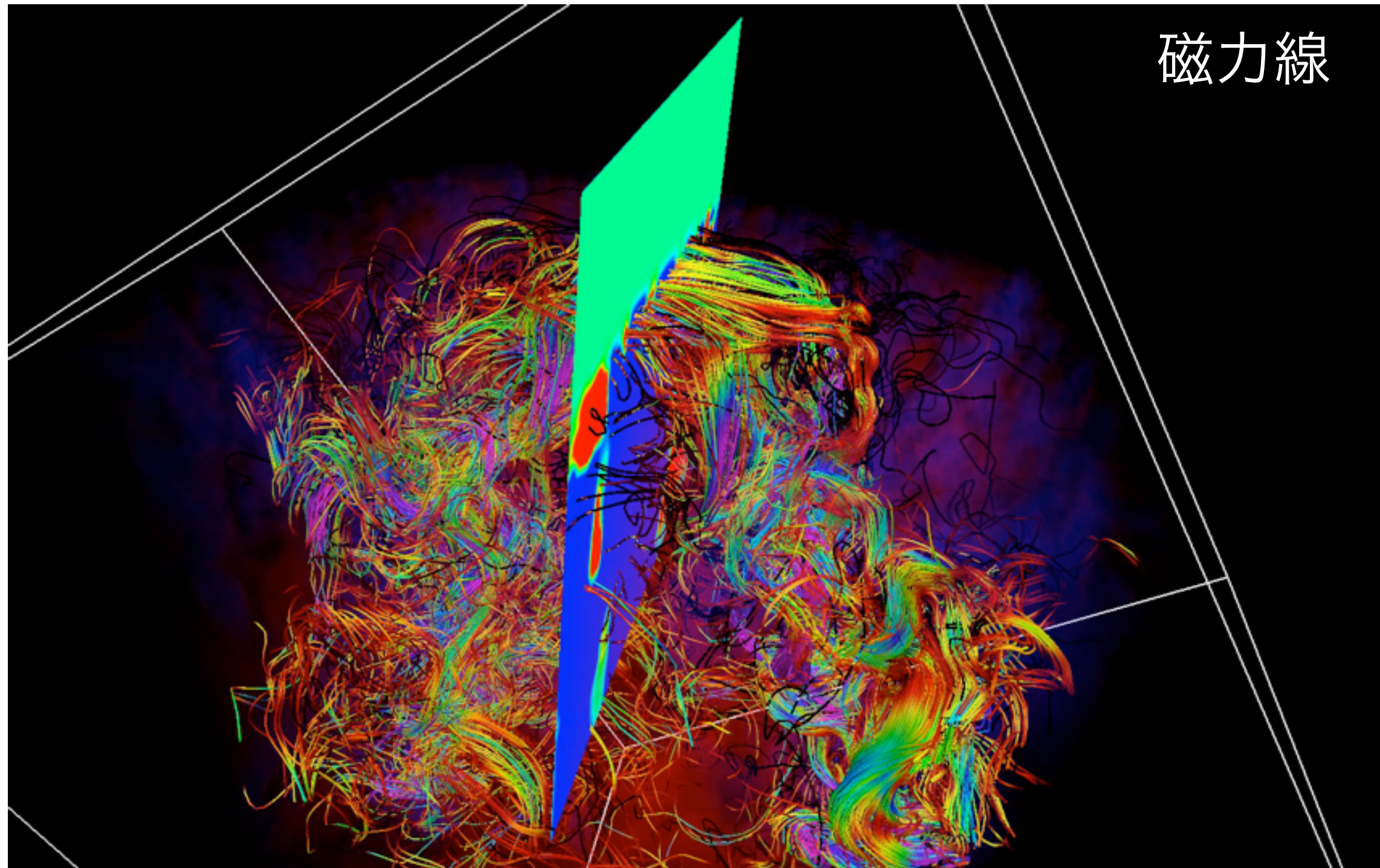


3次元の絵 (4/4)

解決策 2 : 興味のある部分のみカットしてダウンロード

3次元の絵 (4/4)

解決策 2 : 興味のある部分のみカットしてダウンロード



まとめ

大規模データを取り扱う上で困ること

1. 転送に時間がかかる
2. ハードディスクが足りない
3. メモリが足りない
4. 解析に時間がかかる

問題に特有な方法を毎回考えなければいけないが、
スパコンに十分なハードディスクが用意されていれば、
これらは解決できる可能性がある。