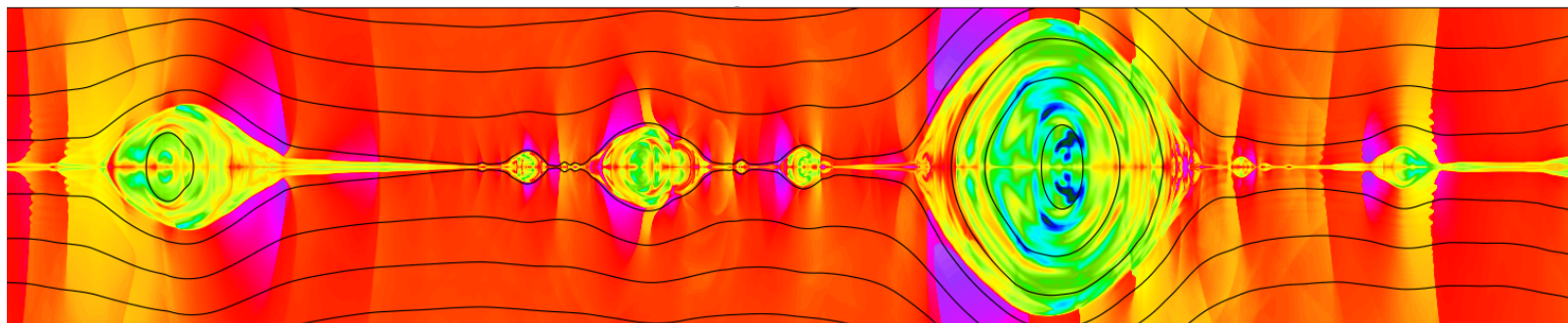


プラズモイド型乱流リコネクションの 磁気流体シミュレーション研究

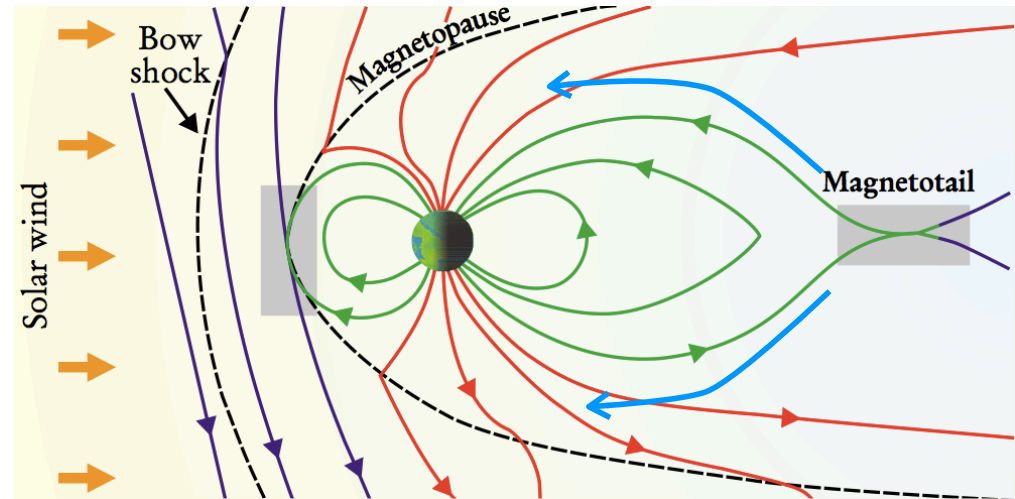
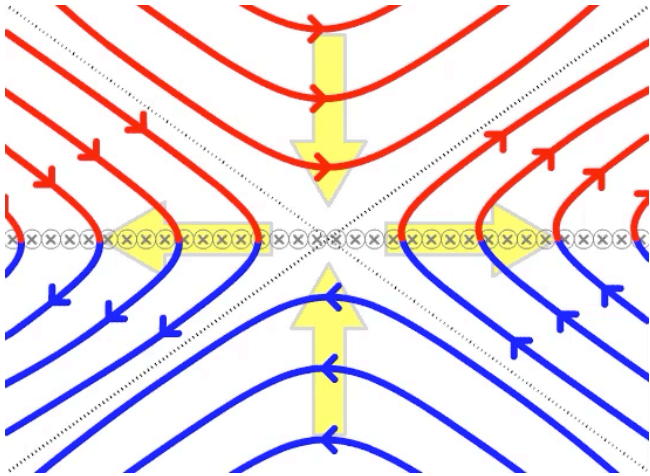
銭谷誠司（神戸大学） ・ 三好隆博（広島大学）



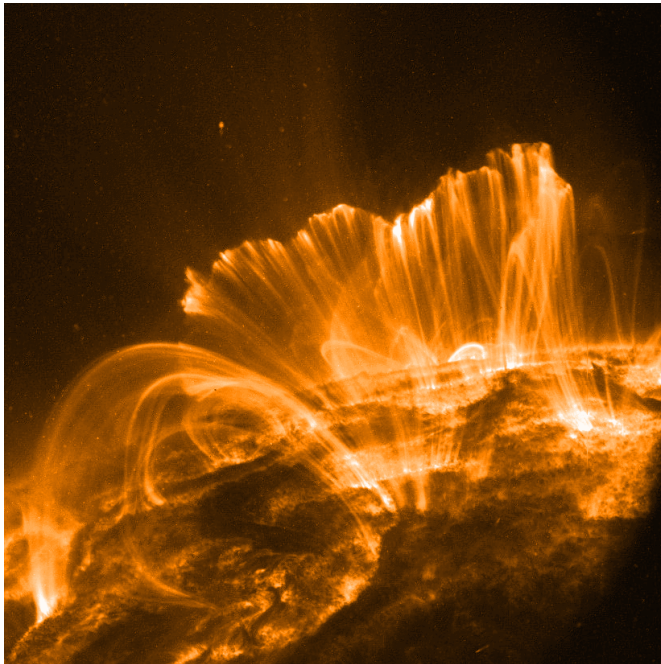
もくじ

- ・ プラズモイド型乱流リコネクションのMHDシミュレーション
 - ・ 磁気圧優勢：低 β ($\beta < 1$) の場合
 - ・ 縦衝撃波の生成
 - ・ プラズマ圧縮効果によるリコネクションレート的高速化
 - ・ 密度非対称の場合
- ・ シミュレーションコード：OpenMHD
 - ・ GPU移植・クラウド

磁気リコネクション

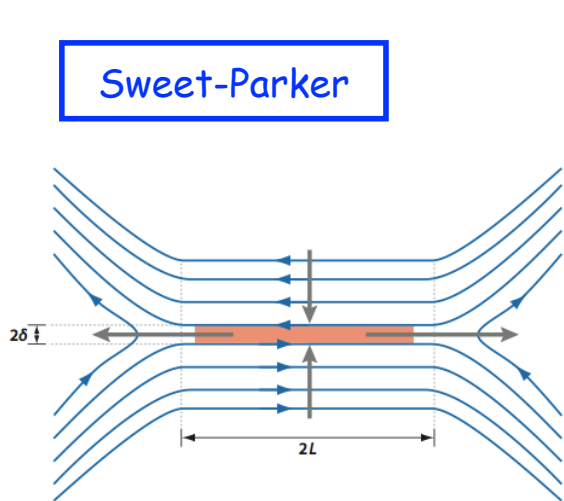


Day 2001

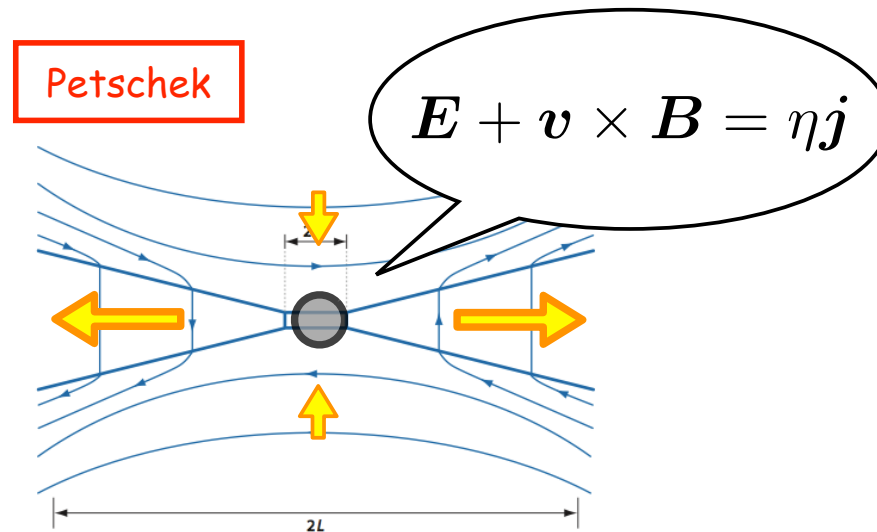


- ・ 磁気トポロジーを変え、エネルギーを解放
- ・ 解明すべき課題：
 - ・ オンセット (トリガー)
 - ・ **エネルギー解放効率**
 - ・ 高エネルギー粒子の加速
 - ・ 他のプラズマ過程との相互作用

磁気リコネクションのMHDモデル



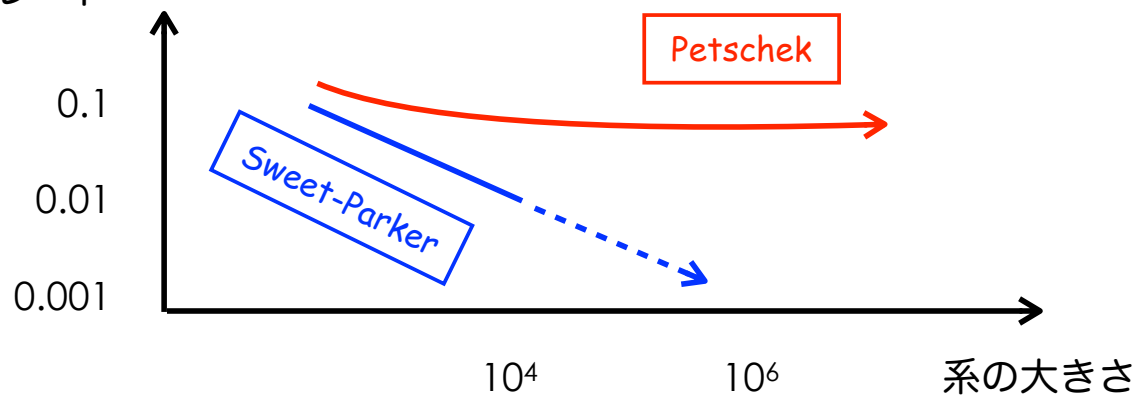
Sweet 1958, Parker 1957



Petschek 1964

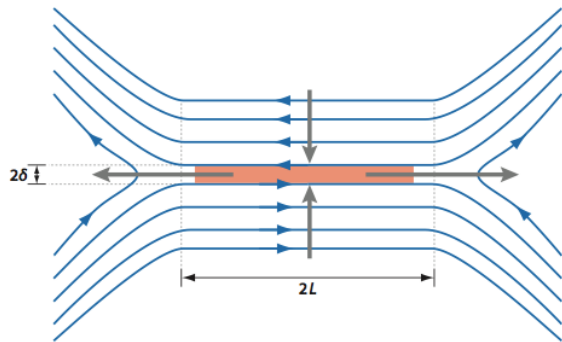
リコネクション・レート

$$\mathcal{R} \equiv \frac{v_{in}}{c_A}$$



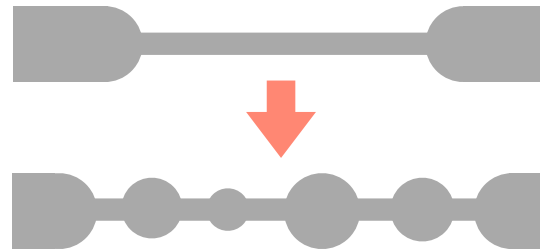
磁気リコネクションのMHDモデル

Sweet-Parker



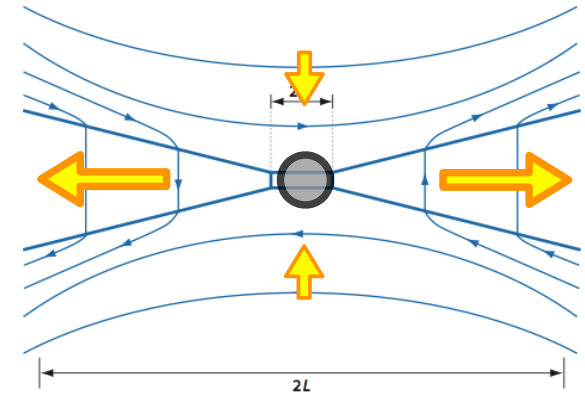
Sweet 1958, Parker 1957

plasmoid-dominated



Loureiro 2007, Bhattacharjee+ 2009

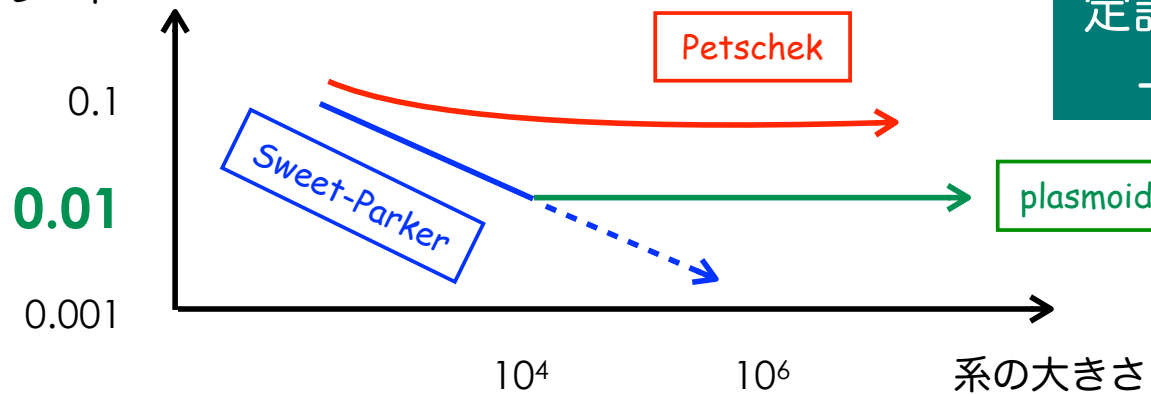
Petschek



Petschek 1964

リコネクション・レート

$$\mathcal{R} \equiv \frac{v_{in}}{c_A}$$

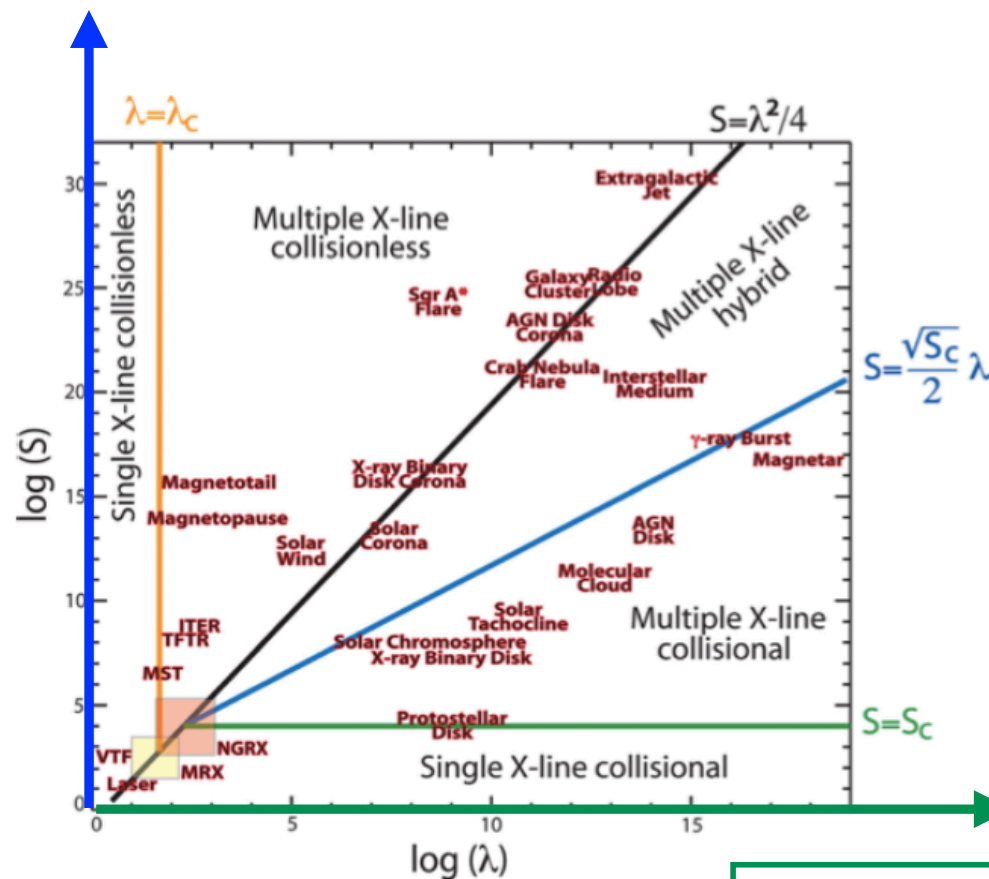


定説：レートは一定 ~ 0.01

磁気リコネクションのフェイズ・ダイアグラム

Lundquist数
(領域サイズ)

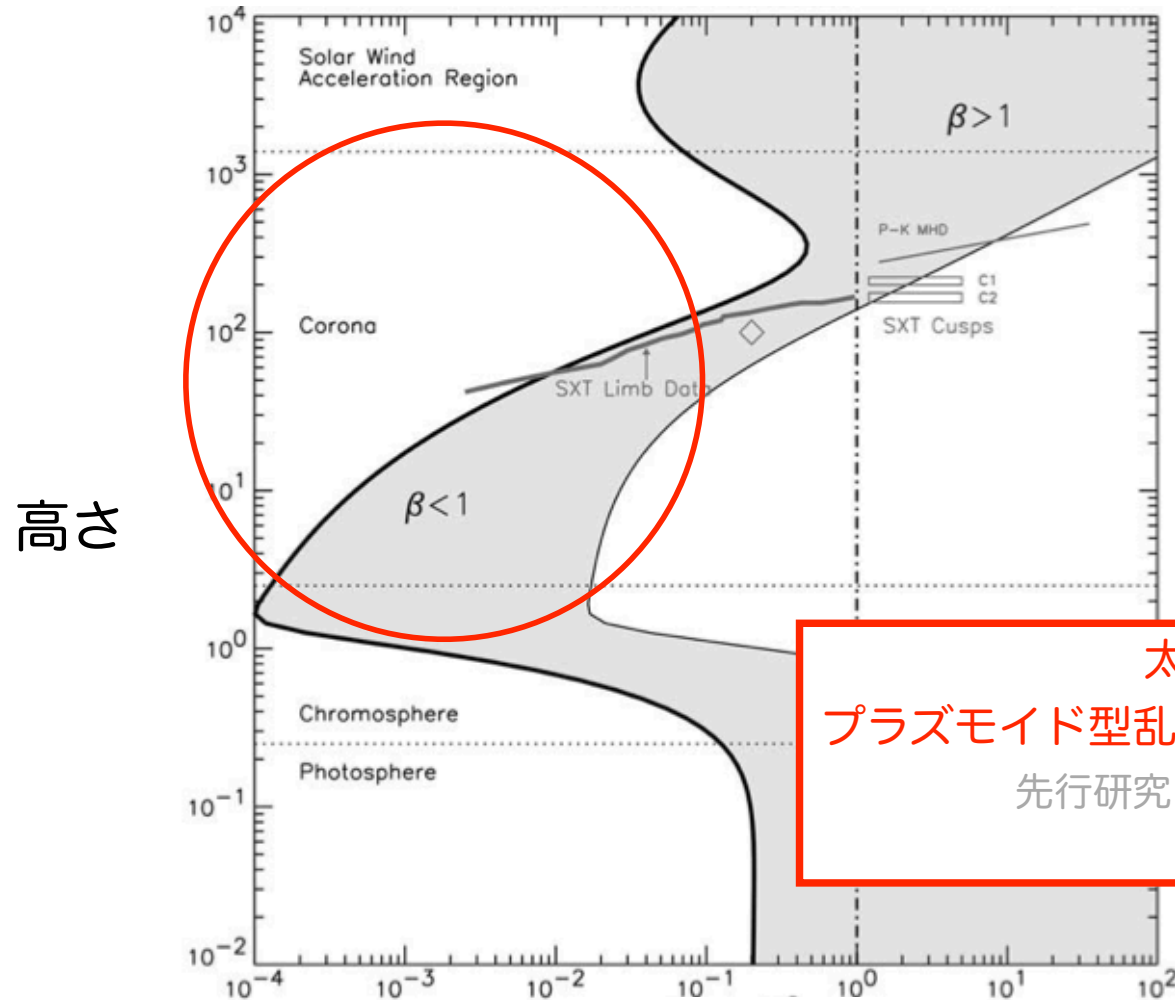
Bhattacharjee+ 2009,
Uzdensky+ 2010



磁場反転層の厚み
(運動論効果)

- ・ 2次元パラメーター空間に
リコネクションの形態がマッピングされた
- ・ 2010年前後に定着した理解

太陽コロナのプラズマ β



太陽コロナ ($\beta \ll 1$) 環境での
プラズモイド型乱流リコネクションの性質は？
先行研究： $\beta \downarrow$ でリコネクションレートが
下がる (Ni+ 2012)

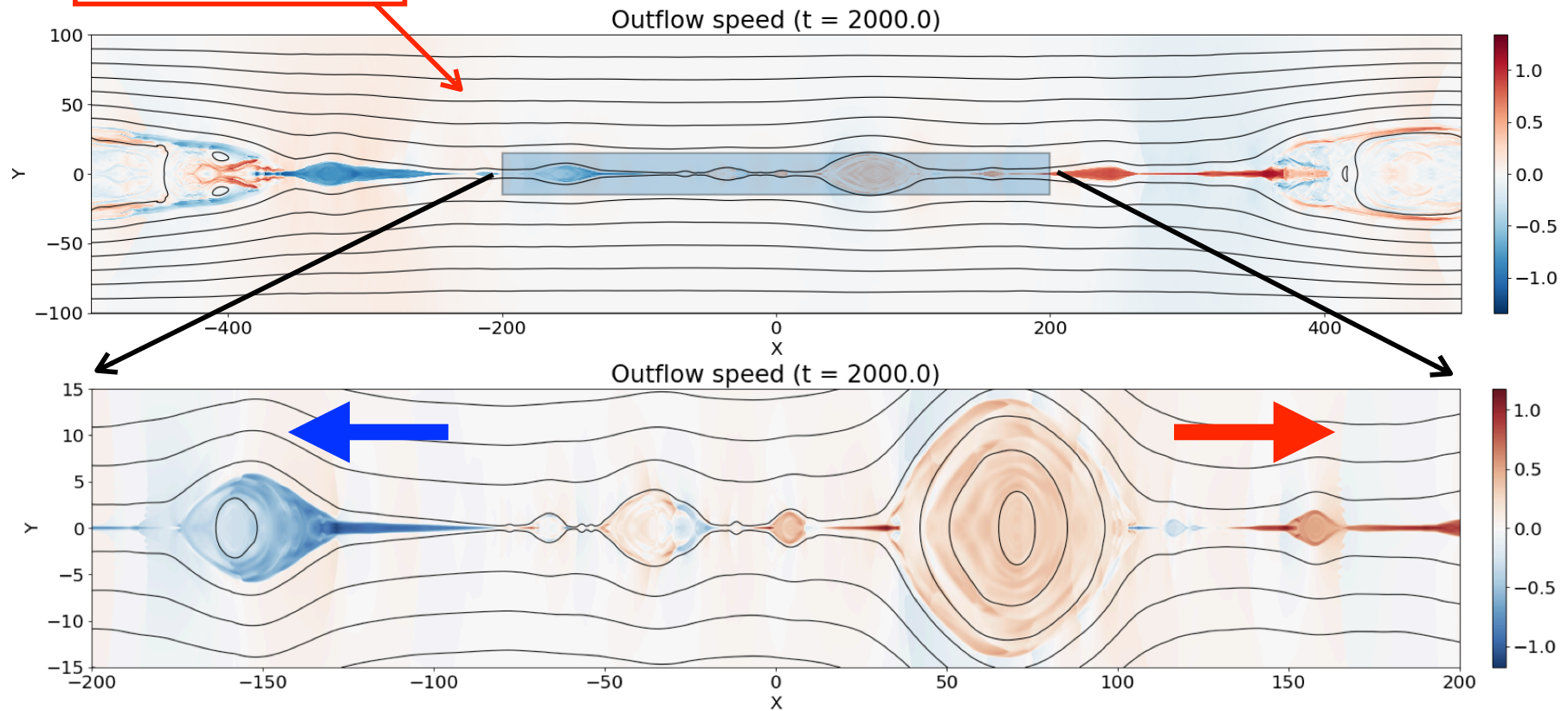


MHDシミュレーションで検証

プラズマ β $\beta \equiv \frac{p_{\text{gas}}}{p_{\text{mag}}}$

MHDシミュレーション

背景 β をコントロール
 $\beta=0.2 \sim 5.0$

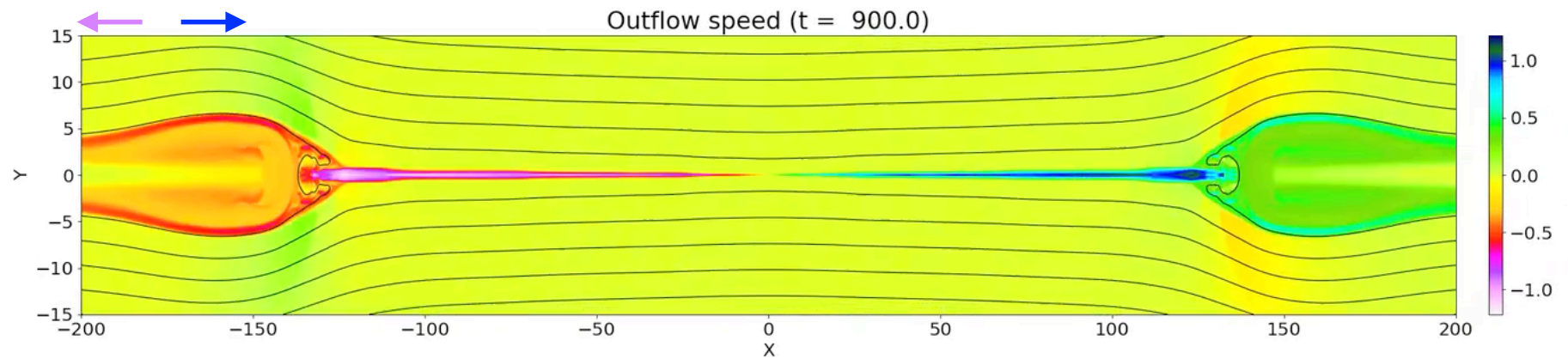


- $\eta = 1/1000$, $S_L = 2.5 \times 10^5$ for $L_{cs} = 250$
- 30,000 x 3,000 (x 2) グリッド
- スパコン 500コア あるいは高性能GPU 1枚 (NVIDIA A6000)

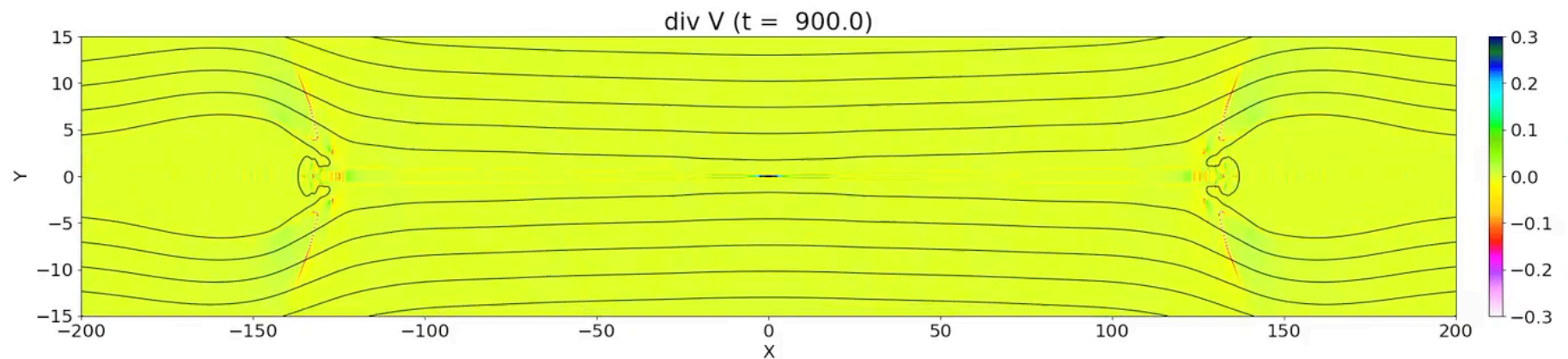
MHDシミュレーション

- https://sci.nao.ac.jp/MEMBER/zenitani/files/b02_outflowB.mp4
- https://sci.nao.ac.jp/MEMBER/zenitani/files/b02_divvB.mp4

ジェット速度 (V_x)



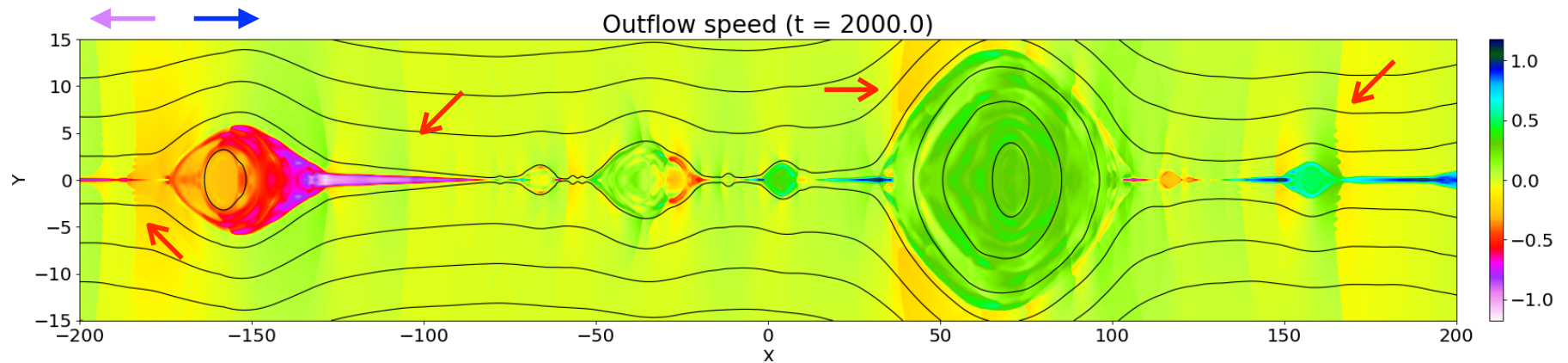
div V - 赤色が圧縮領域



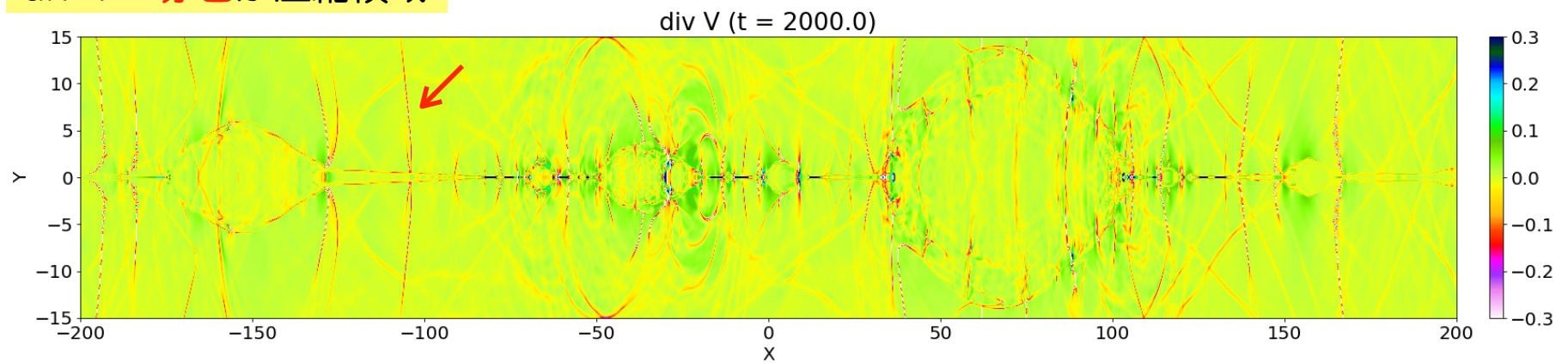
縦衝撃波の発見

- 縦衝撃波が領域内を左右に飛び交う
- プラズモイド内部も通過

ジェット速度 (V_x)



div V - 赤色が圧縮領域

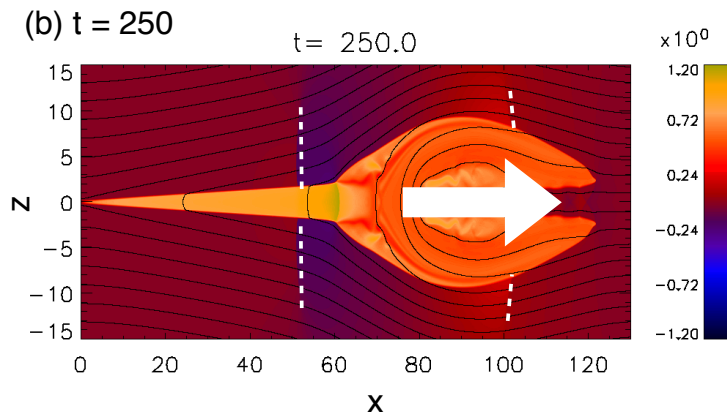


縦衝撃波：翼とのアナロジー

- ・ 遷音速／超音速流の特徴
- ・ プラズモイドはAlfvén速度で運動
- ・ $\beta \ll 1$ では遷音速／超音速に

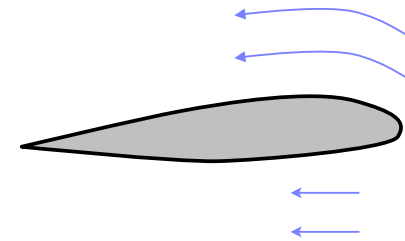
$$\frac{1}{\beta} \sim \left(\frac{c_A}{c_s}\right)^2 \sim \left(\frac{V}{c_s}\right)^2 = \mathcal{M}_s^2$$

Alfvén速度
音速

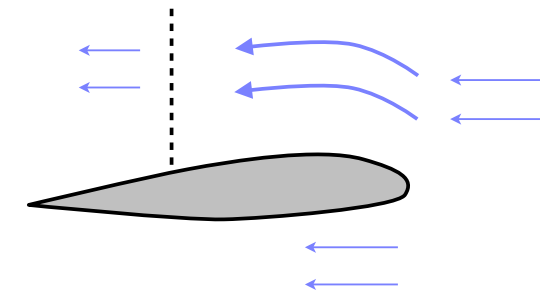


SZ & Miyoshi 2011, 2015

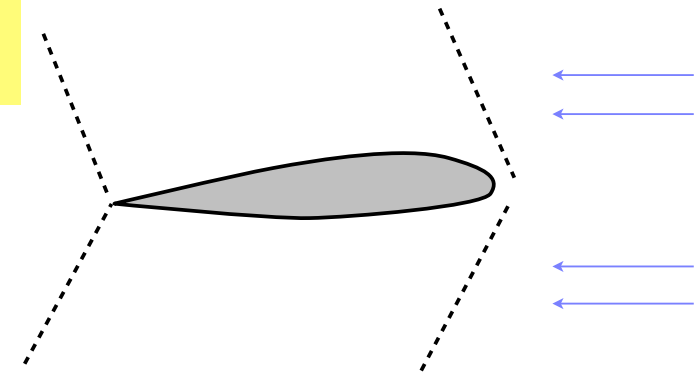
亜音速
($V \ll c_s$)



遷音速
($0.8c_s < V$)



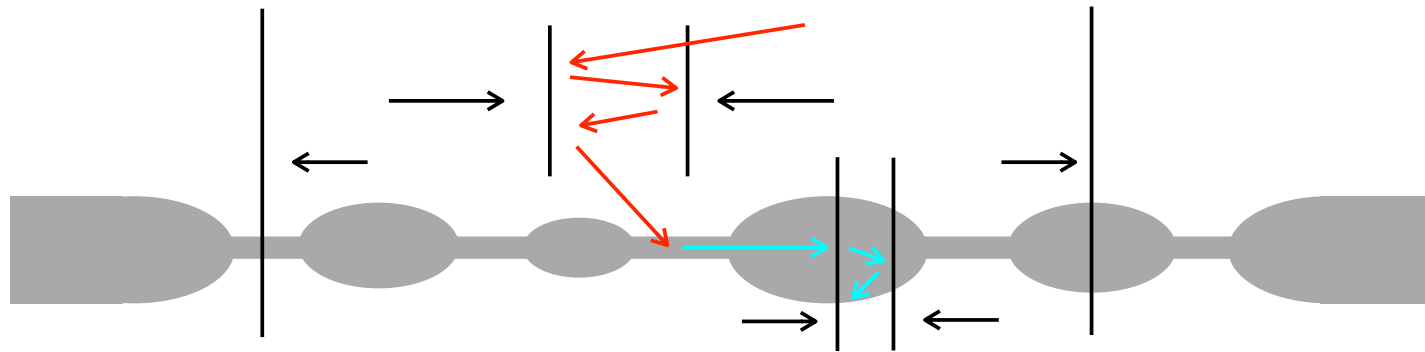
超音速
($c_s < V$)



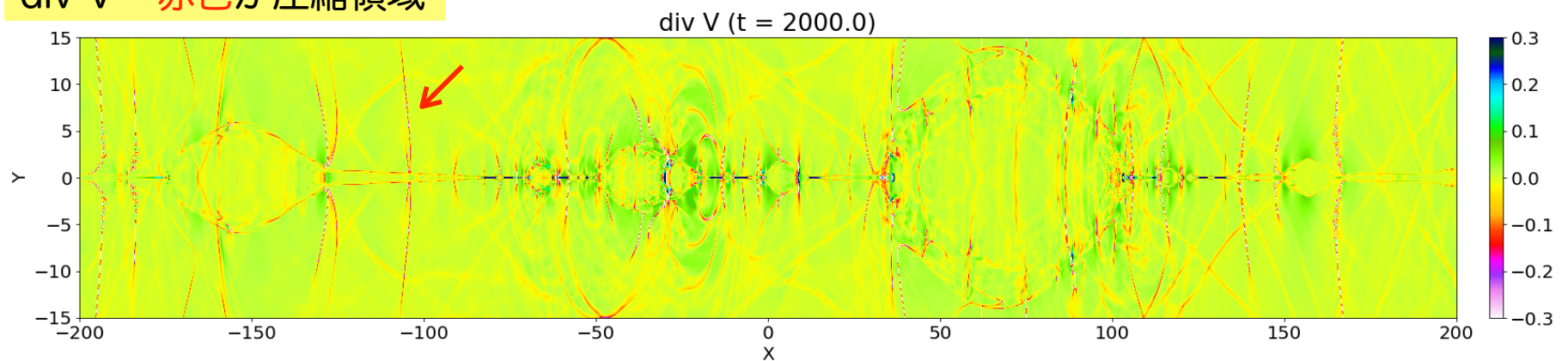
See also <https://www.youtube.com/watch?v=8OIQfCTAZQo>

縦衝撃波の役割

- ・ 粒子加速の新たな散乱体候補
- ・ 他グループのシミュレーションでも (Arnold et al. 2021)



div V - 赤色が圧縮領域

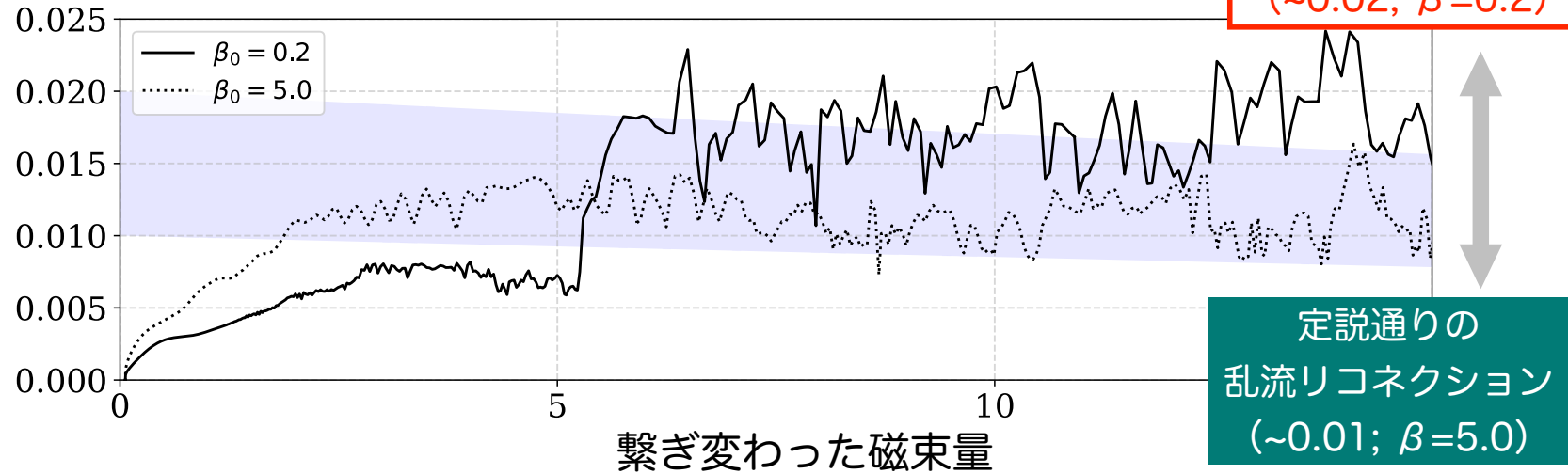


リコネクションレート

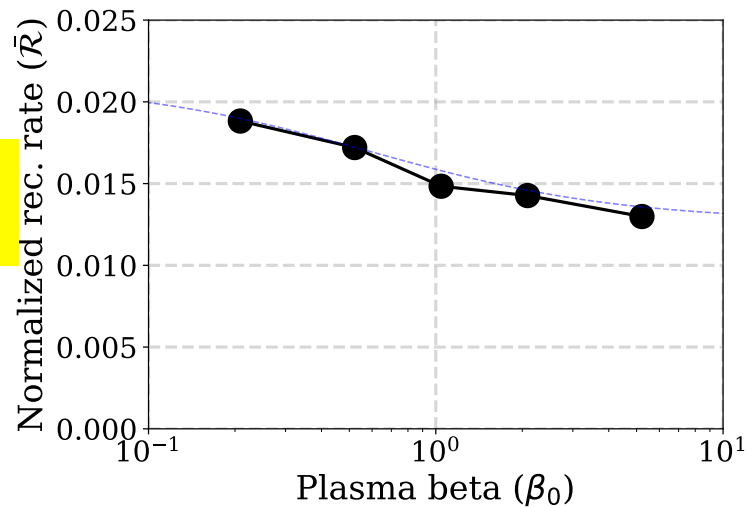
$$\mathcal{R} = -\frac{1}{c_{A0} B_{A0}} \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

高速リコネクション
(~ 0.02 ; $\beta = 0.2$)

Rec.
rate

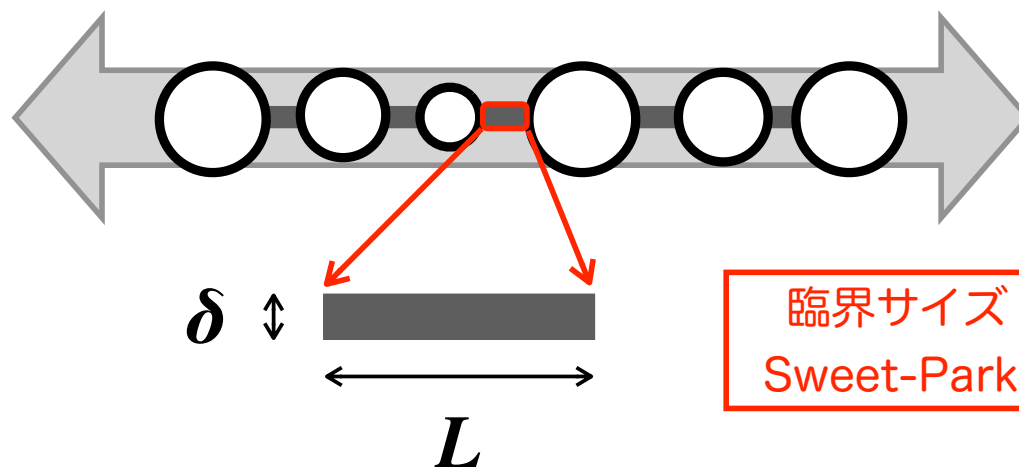


Rec.
rate



- 低 β ほどリコネクションが速い
- $\beta \ll 1$ ではレートは $R \sim 0.02$ に漸近
- $\beta \gg 1$ では定説通りの $R \sim 0.01$

リコネクションレートの見積もり



臨界サイズ ($S_L \sim 10^4$) の多数の Sweet-Parker (SP) layer に分裂

- ・ 小リコネクション領域のリコネクション速度は、**プラズマ圧縮比**・**アスペクト比**とバランスする (Hesse+ 2011)
- ・ **アスペクト比**を固定すると、**圧縮比**がリコネクション速度の加速ファクターに
- ・ 全体のリコネクション速度もこれに比例

$$\mathcal{R}_{\text{sp}} \equiv \frac{v_{in}}{c_A} = \frac{2\gamma(1+\beta)}{3(\gamma-1) + 2\gamma\beta} \left(\frac{\delta}{L} \right)$$

$$\left(\frac{\delta}{L} \right) \approx S_{\text{crit}}^{-1/2} = \text{const.}$$

$$\langle \mathcal{R} \rangle \sim \mathcal{R}_{\text{sp}} \propto \frac{2\gamma(1+\beta)}{3(\gamma-1) + 2\gamma\beta}$$

r : 比熱比

2次元パラメーターサーベイ

比熱比

圧縮性

$\gamma = 1.33, 1.5, 1.67, 2.0$

非圧縮



圧縮性

プラズマ β

$\beta = 0.2$

0.5

1.0

2.0

5.0

非圧縮



理論予想

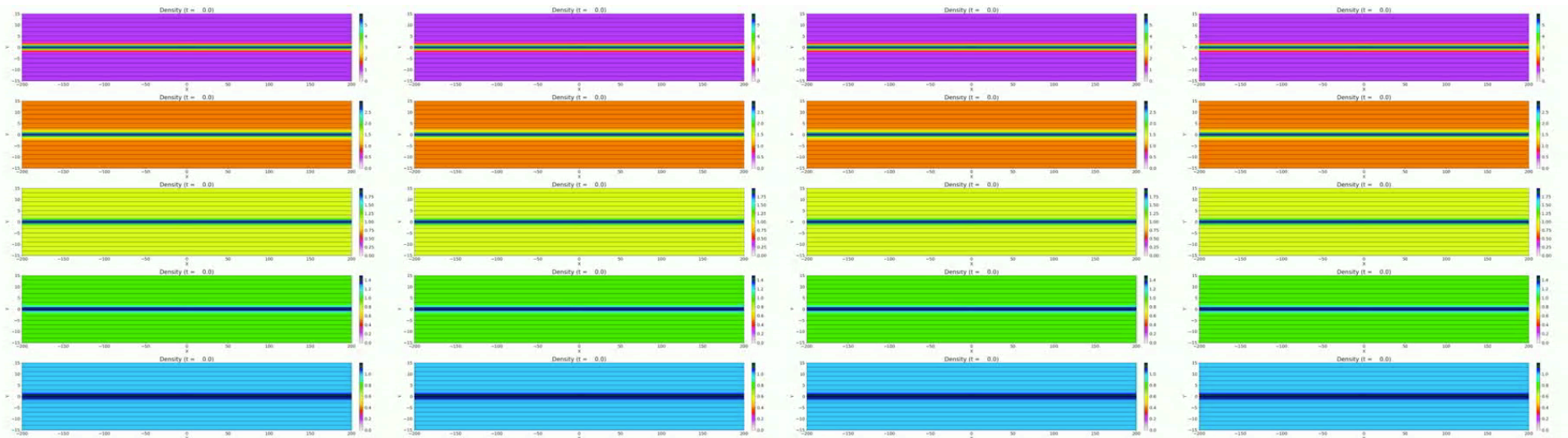
$$\mathcal{R} \propto r(\beta, \gamma) \equiv \frac{2\gamma(1 + \beta)}{3(\gamma - 1) + 2\gamma\beta}$$

2次元パラメーターサーベイ

アウトフロー速度

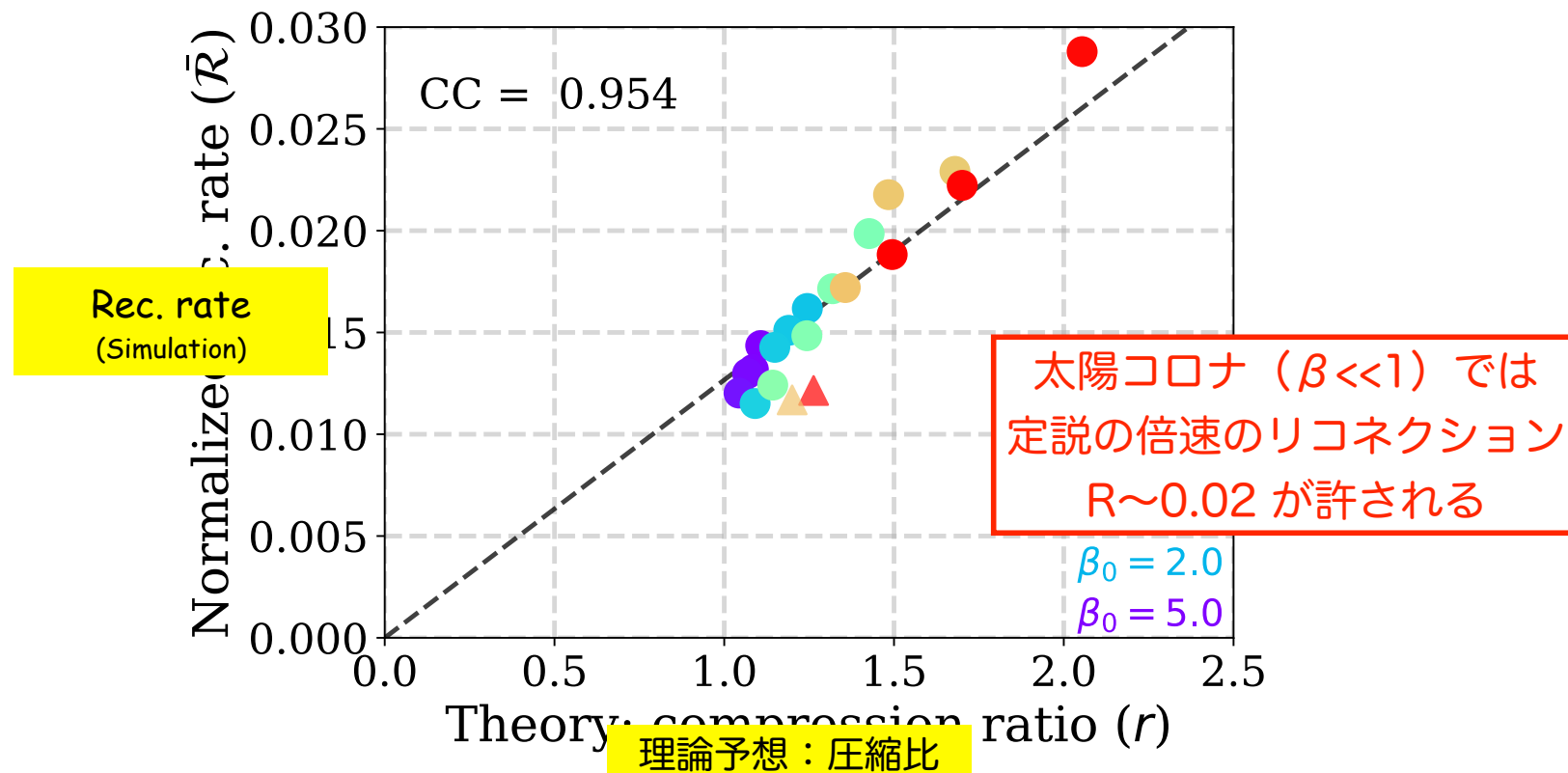


プラズマ密度

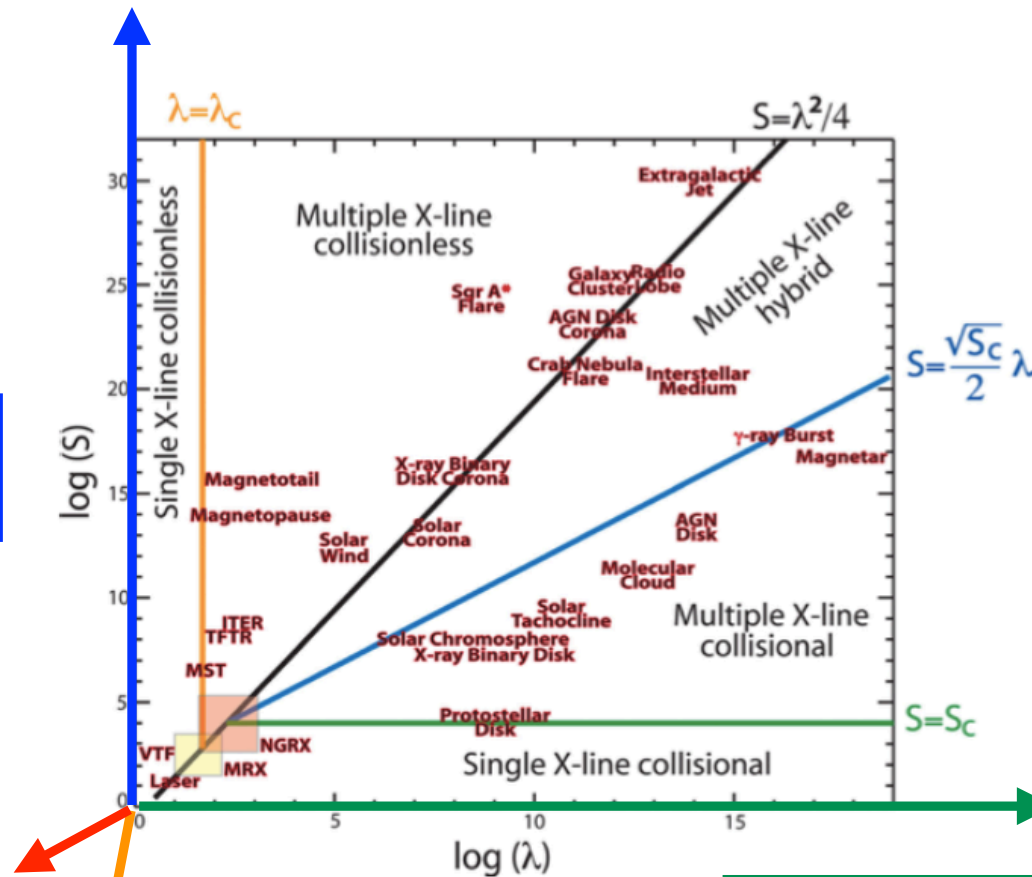


Simulation vs Theory

- 2変数 (β, r)、数十ケースのサーベイ
- リコネクションレートと圧縮比 (理論値) との相関を確認
 - → 圧縮性効果によるリコネクションの高速化を示唆



磁気リコネクションのフェイズ・ダイアグラム



Lundquist数 (S)
Reynolds数 (R)

Bhattacharjee+ 2009,
Uzdensky+ 2010

プラズマβ (β)
Mach数 (M)

SZ & Miyoshi 2020

粘性効果 (ν)
Prandtl 数 (Pr)

Minoshima+ 2016

磁場反転層の厚み (λ)
Knudsen数 (Kn)

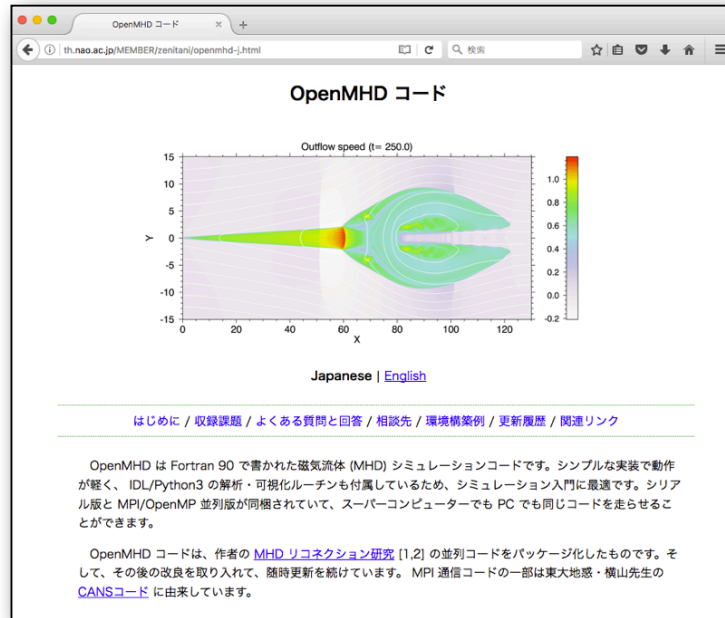
Ji & Daughton 2011, Huang+ 2011

密度非対称型 プラズモイド・リコネクション

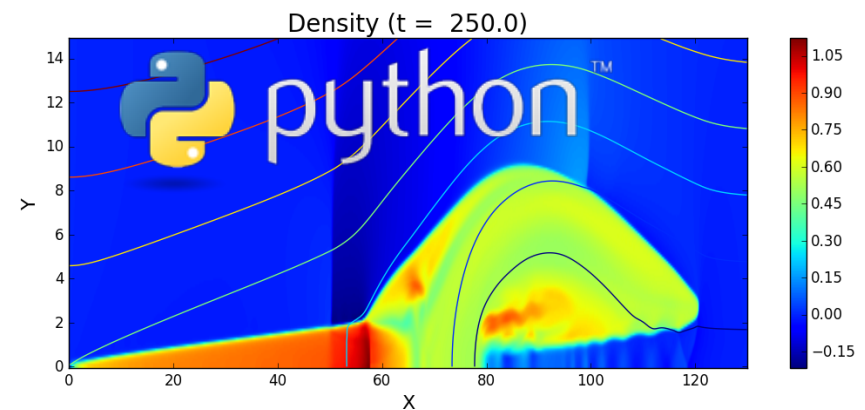
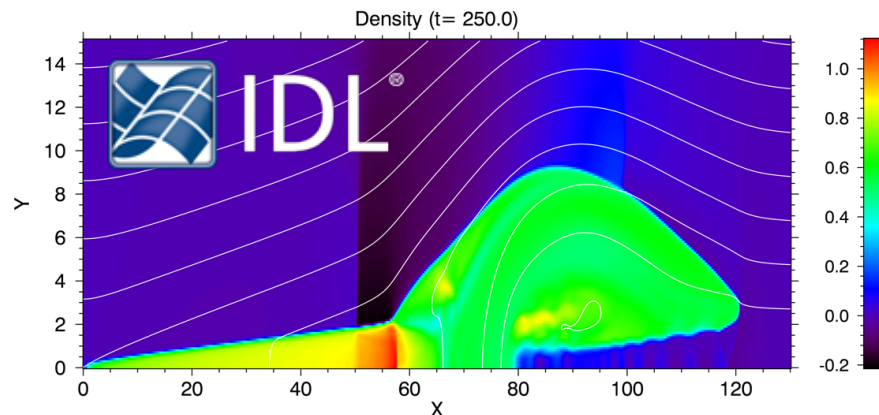
by 神戸大学修士2年：山本百華さん

公開まで
もうしばらく
お待ちください

公開コード OpenMHD



- コードをパッケージ化して Web & GitHub で公開
- CPU版 : Fortran 90, MPI+OpenMP
- GPU版 : CUDA Fortran + MPI
- Python3・IDL の可視化ルーチン
- 累計11本の学術論文に

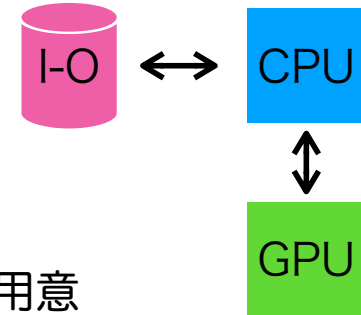


<https://sci.nao.ac.jp/MEMBER/zenitani/openmhd-j.html>

CUDA Fortran による GPU 移植

- 移植方針

- I-O 以外の主要計算ループを全て GPU 側に移動

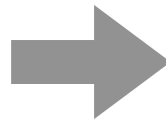


- 移植手順

- 1. **ホスト (PC)** 用・**デバイス (GPU)** 用の変数をそれぞれ用意
- 2. サブルーチンにホスト・デバイス用の修飾子を追加
- 3. デバイス用サブルーチンへの移植。
ループの中身がデバイスルーチンになると思えば良い

```
call limiter(...)
```

```
subroutine limiter(...)  
    ...  
    do j=1,jx  
        do i=1,ix  
            ...  
        enddo  
    enddo
```

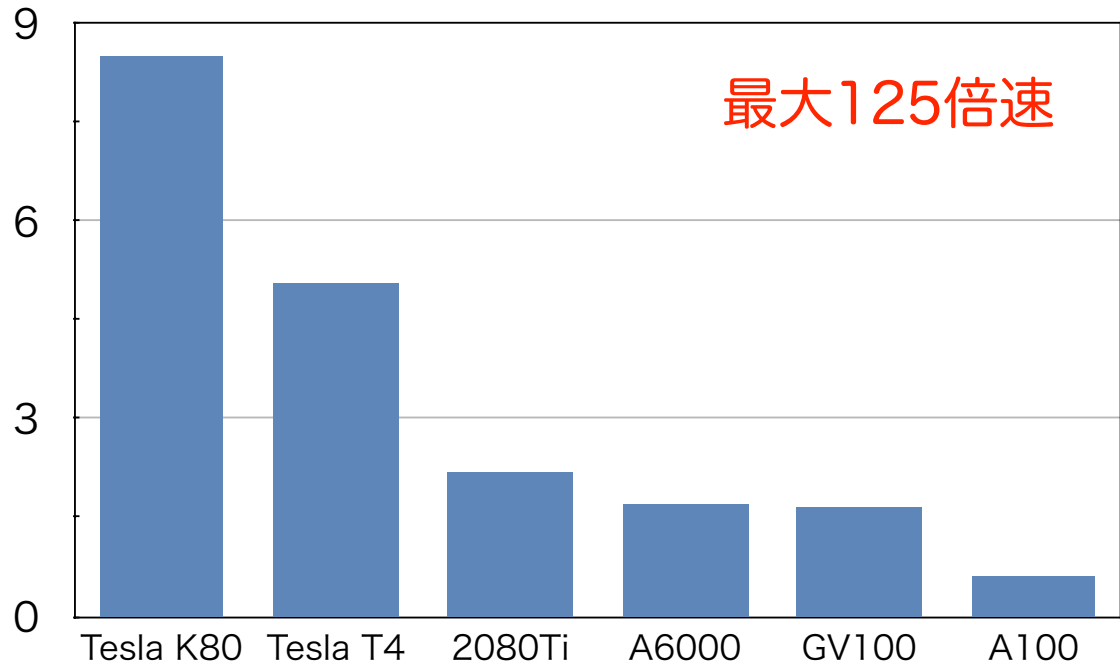
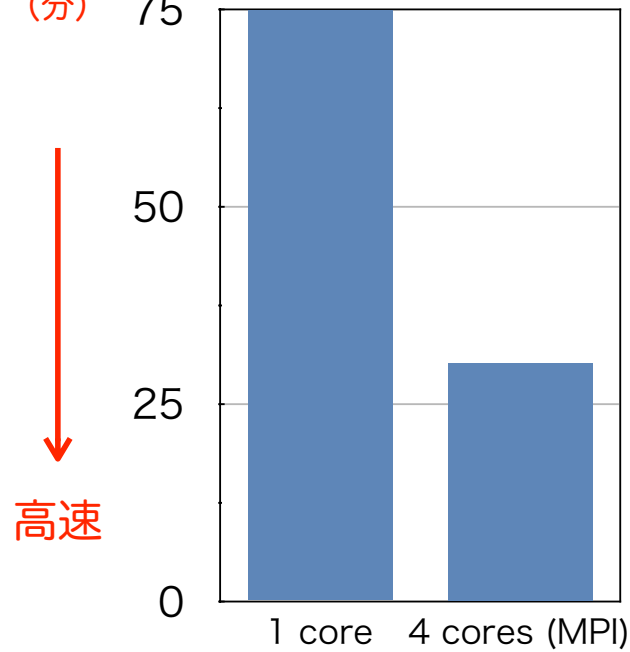


```
call <<<dim3,dim3>>limiter(...)
```

```
attributes(global) &  
subroutine limiter(...)  
    ...  
    j = (blockIdx%y-1)*blockDim%y + threadIdx%y  
    i = (blockIdx%x-1)*blockDim%x + threadIdx%x  
    if( (1<=j).and.(j<=jx) ) then  
        if( (1<=i).and.(i<=ix) ) then  
            ...  
        endif  
    endif
```

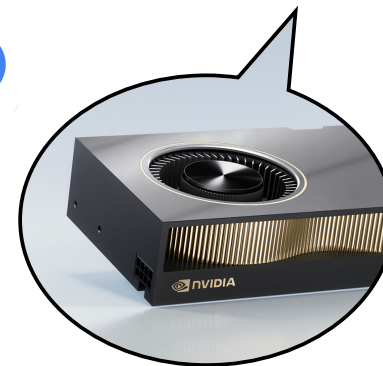
OpenMHD-GPU ベンチマーク

計算時間
(分)



最大125倍速

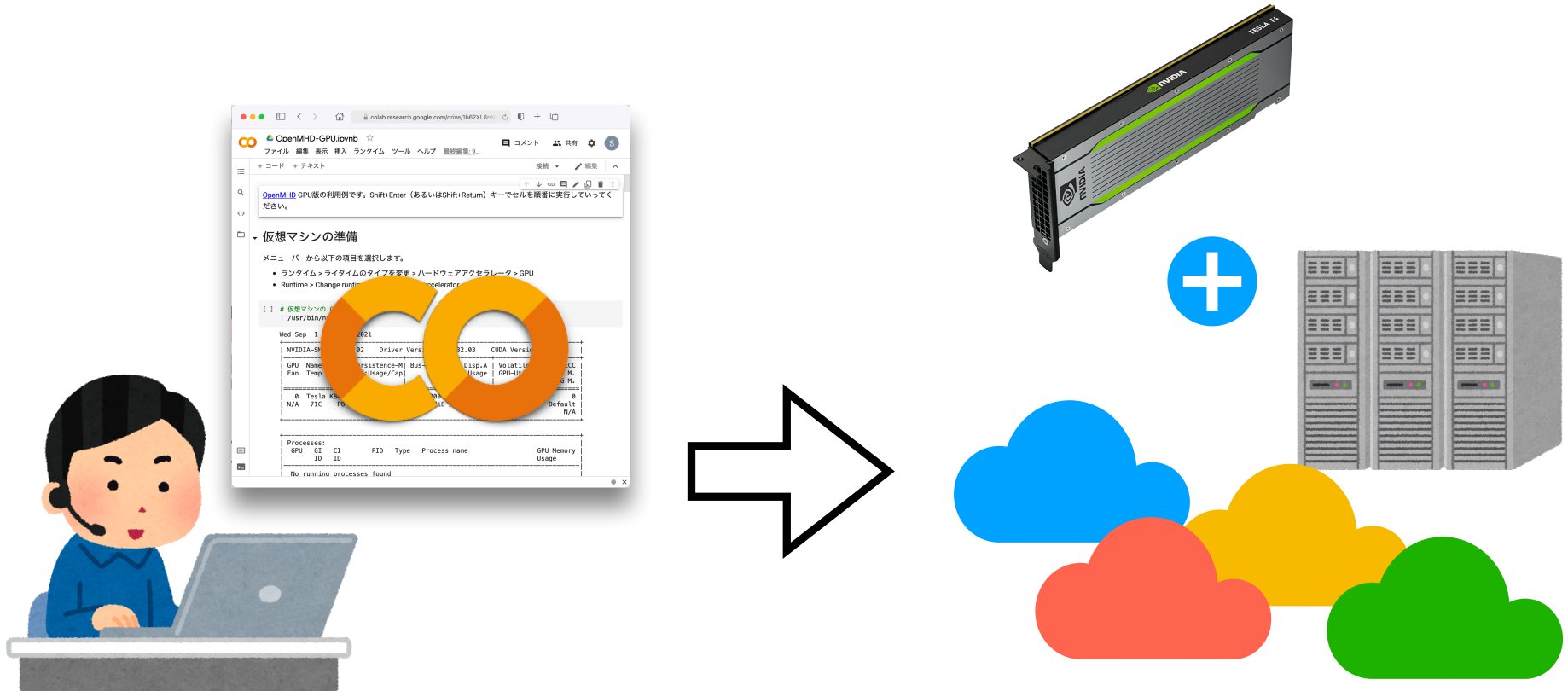
- Intel core i9-9900K
3.6GHz - 5.0GHz



核融合研
データ解析
サーバ

国立天文台
CfCA
GPU試用機

Google Colaboratory



- ブラウザで操作
- Jupyter ノートブック

- Googleクラウド上の仮想マシン
- GPUインスタンスも利用可

Google Colaboratory

The screenshot shows a Google Colaboratory notebook interface. At the top, the browser address bar shows the URL `colab.research.google.com/drive/1b62XL8nN...`. The notebook title is `OpenMHD-GPU.ipynb`. Below the title, there are navigation options: `ファイル`, `編集`, `表示`, `挿入`, `ランタイム`, `ツール`, `ヘルプ`, and `最終編集: 9...`. The main content area has a tab for `+ コード` and `+ テキスト`. A text box contains the instruction: `OpenMHD GPU版の利用例です。Shift+Enter (あるいはShift+Return) キーでセルを順番に実行して行ってください。`

Below this is a section titled `▼ 仮想マシンの準備` (Virtual Machine Preparation). It includes the instruction: `メニューバーから以下の項目を選択します。` (Select the following items from the menu bar). A list of steps is provided:

- `ランタイム > ライタイムのタイプを変更 > ハードウェアアクセラレータ > GPU`
- `Runtime > Change runtime type > Hardware accelerator > GPU`

Below the list is a code cell with the following content:

```
[ ] # 仮想マシンの GPU を確認します。  
! /usr/bin/nvidia-smi
```

The terminal output shows the date and time: `Wed Sep 1 16:19:55 2021`. It then displays the output of `nvidia-smi` in a table format:

NVIDIA-SMI 470.57.02 Driver Version: 460.32.03 CUDA Version: 11.2								
GPU	Name	Persistence-M	Bus-Id	Disp.A	Volatile Uncorr. ECC	GPU-Util	Compute M.	MIG M.
Fan	Temp	Perf	Pwr:Usage/Cap	Memory-Usage	GPU-Util	Compute M.	MIG M.	
0	Tesla K80	Off	00000000:00:04:0	Off	0			
N/A	71C	P8	31W / 149W	0MiB / 11441MiB	0%	Default		N/A

Below this, the terminal shows the output of `nvidia-smi -l`:

```
Processes:  
GPU  GI  CI      PID  Type  Process name      GPU Memory  
   ID  ID                               Usage  
-----  
No running processes found
```

<https://colab.research.google.com/drive/1b62XL8nN5W7oxPTCiYPH8M265JQ5gZla?usp=sharing>

まとめ

- プラズモイド型乱流リコネクションのMHDシミュレーション
 - 磁気圧優勢：低 β ($\beta < 1$) の場合：
 - 縦衝撃波の生成
 - プラズマ圧縮効果によるリコネクションレート的高速化
 - $\beta \ll 1$ では倍速の $R \sim 0.02$ に
 - 密度非対称の場合：スケール則が見えてきた
- OpenMHD
 - コード公開中、GPU対応、クラウドでも動作
- Future
 - 2D磁場非対称・3D・熱伝導 ...