



Simulações numéricas da região de difusão dos elétrons

Roberta Gonçalves Schmitz
Maria Virginia Alves

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

26 de setembro de 2016

Sumário



Introdução

Motivação

Região de difusão dos elétrons

Introdução

Geometria da região de difusão dos íons e dos elétrons

Simulações numéricas da região de difusão dos elétrons

Simulações numéricas em reconexão magnética

Agradecimentos

Referências



Motivação

Reconexão magnética

- ▶ Um dos principais mecanismos de transporte de plasma e conversão de energia em plasmas espaciais;
- ▶ Ocorre na magnetosfera, facilitando entrada de partículas e energia¹;
- ▶ Também contribui para formação de ejeções de massa coronal e para o aquecimento coronal².
- ▶ É um processo multi-escala;
- ▶ Ocorre em uma pequena região onde a condição MHD ideal é quebrada, conhecida como região de difusão³.

¹ Drake [1995]

² Hesse, Neukirch, Schindler, Kuznetsova, and Zenitani [2011]

³ Zenitani, Shinohara, Nagai, and Wada [2013]



Motivação

Região de difusão

- ▶ Também é uma estrutura multi-escala, formada pela *região de difusão dos íons* e pela *região de difusão dos elétrons*;
- ▶ Na região de difusão dos elétrons ocorrem processos dissipativos e é onde as linhas de campo efetivamente se reconectam⁴;
- ▶ A missão MMS - *Magnetospheric Multiscale Mission* - foi recentemente lançada com o objetivo de estudar a região de difusão dos elétrons⁵.

⁴ Gonzalez and Parker [2016]

⁵ Cassak [2016]



Região de difusão

- ▶ A teoria MHD tem servido para descrever processos não colisionais em plasma de grande escala;
- ▶ A teoria cinética é usada para estudar estruturas de pequenas escalas;
- ▶ Na reconexão magnética as mudanças em larga escala são controladas por fenômenos em pequena escala⁶.

⁶ Schrijver and Siscoe [2009]



Região de difusão dos elétrons

A dinâmica da região de reconexão é controlada pela Lei de Ohm generalizada⁷:

$$\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \frac{\mathbf{J} \times \mathbf{B}}{ne} - \frac{\nabla \cdot \mathbf{p}_e}{ne} + \frac{m_e}{e} \frac{d(\mathbf{J}/ne)}{dt} + \eta \mathbf{J}. \quad (1)$$

- ▶ Reconexão não colisional: o termo resistivo não domina sobre os outros.
- ▶ Os termos restantes são importantes e possuem escalas associadas.

⁷ Schrijver and Siscoe [2009]



Região de difusão dos elétrons

Comparando dimensionalmente⁸ o termo Hall ($\mathbf{J} \times \mathbf{B}/ne$) com o termo de convecção ($\mathbf{v} \times \mathbf{B}$):

$$d_i = \frac{c_A}{\Omega_{ci}} = \frac{c}{\omega_{pi}} = \left(\frac{\epsilon_0 m_i c^2}{n q_i^2} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

Uma escala equivalente para os elétrons é:

$$d_e = \frac{c_A}{\Omega_{ce}} = \frac{c}{\omega_{pe}} = \left(\frac{\epsilon_0 m_e c^2}{n e^2} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

⁸ Gonzalez and Parker [2016]

Geometria da região de difusão

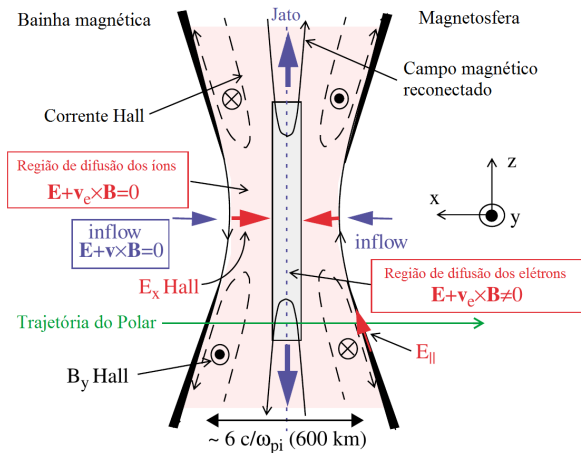


Figura 1: Representação das regiões de difusão dos íons e dos elétrons. Fonte: Mozer et al. [2002].



Geometria da região de difusão

- ▶ Na região de difusão dos elétrons é que ocorrem processos difusivos e dissipativos⁹;
- ▶ Simulações por partículas têm sido úteis para estudar essa região.

⁹ Gonzalez and Parker [2016]



Simulações por partículas

- ▶ Consiste em seguir o movimento das partículas do plasma, resolvendo as equações de movimento;
- ▶ Um dos métodos mais utilizados é o PIC - *particle-in-cell*;
- ▶ Equações de Maxwell e equações de movimento são resolvidas de forma auto-consistente¹⁰.

¹⁰ Birdsall and Langdon [1991], Dawson [1983]



Resultados

Principais parâmetros da simulação¹¹:

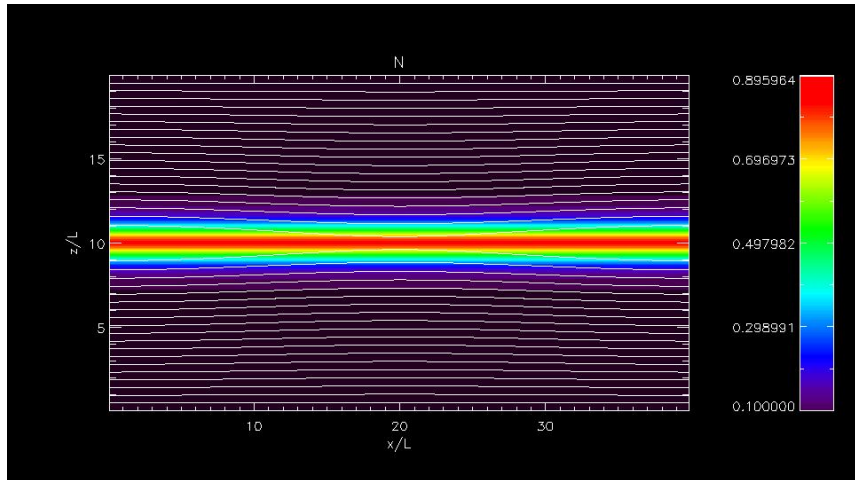
- ▶ Código utilizado: CELESTE3D¹²;
- ▶ Equilíbrio inicial de Harris;
- ▶ Grade espacial de 512×256 células;
- ▶ $dx = dz = 0,0390625$
- ▶ $m_i/m_e = 100$;
- ▶ $\Omega_{ci} = 1,95$;
- ▶ Passos temporais: 10000

¹¹Karimabadi, Daughton, and Scudder [2007]

¹²Brackbill and Forslund [1982], Sugiyama and Kusano [2007]

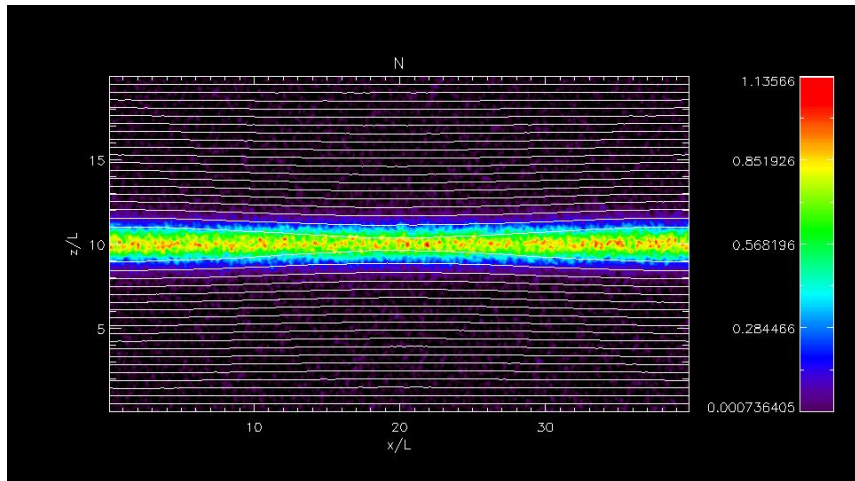


Resultados



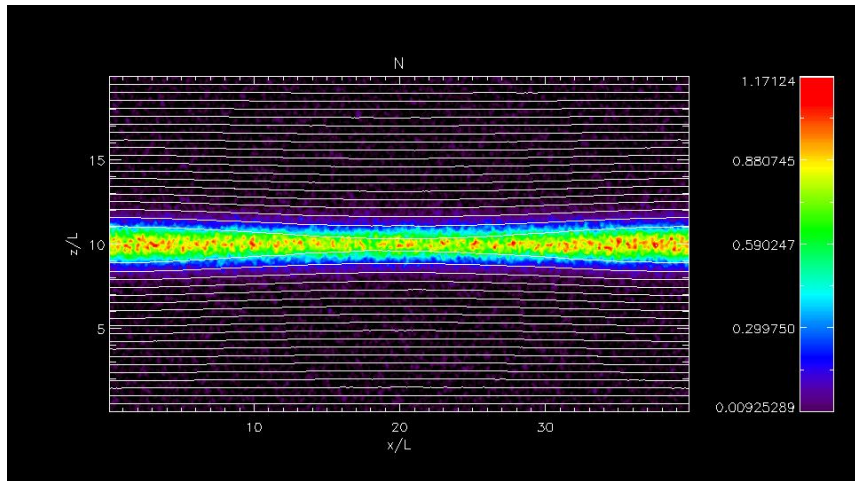


Resultados



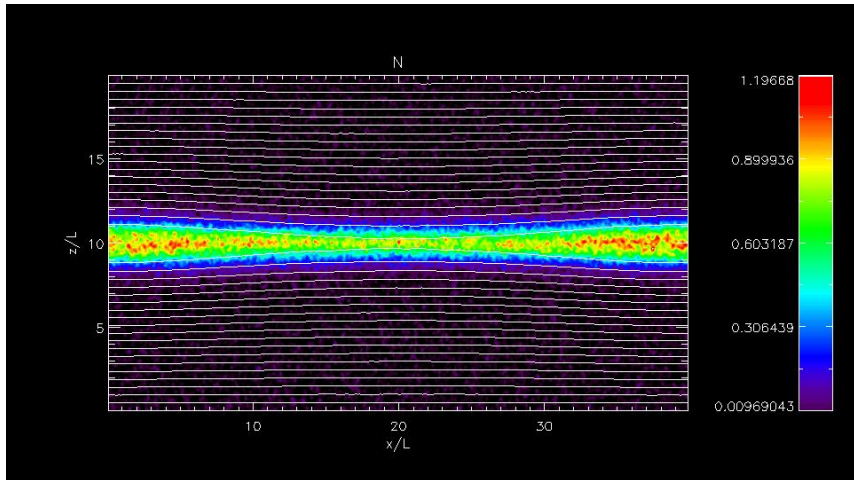


Resultados



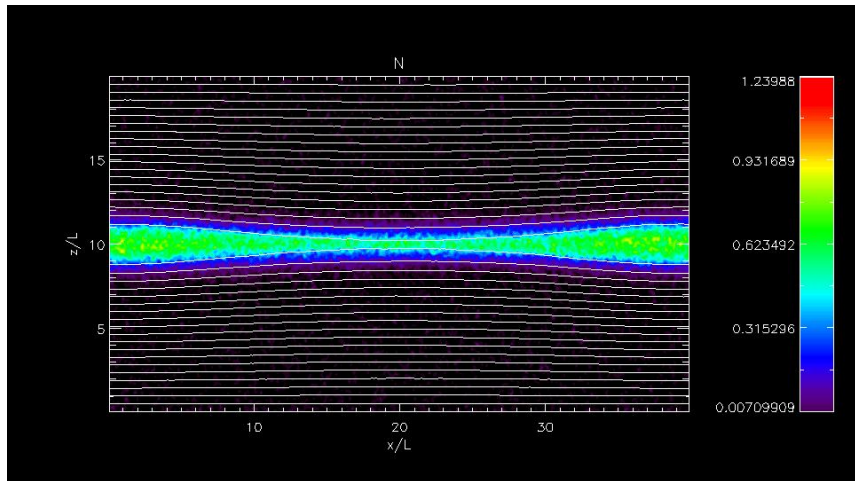


Resultados



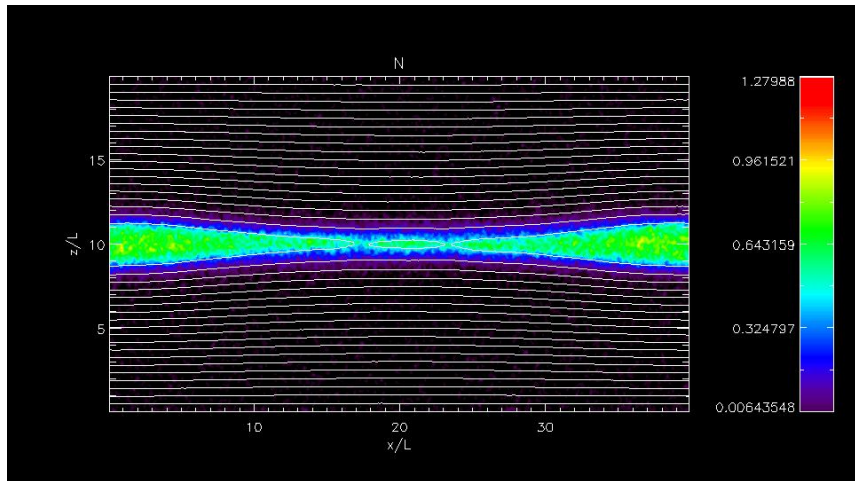


Resultados

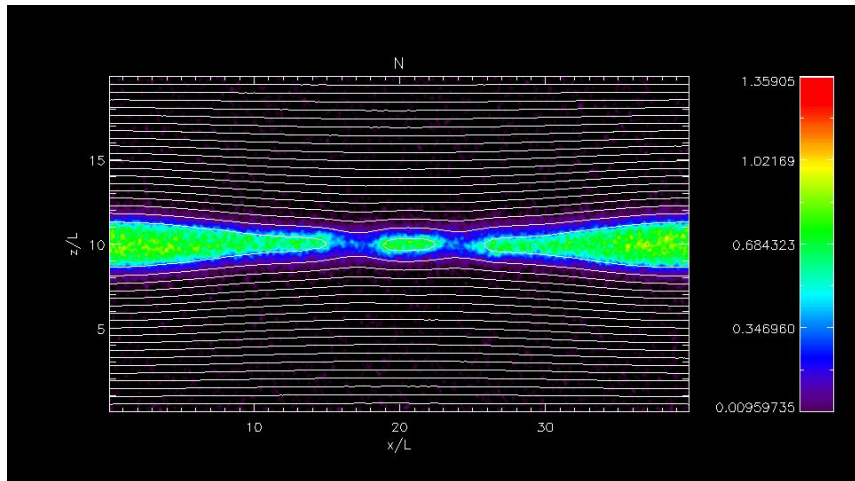




Resultados

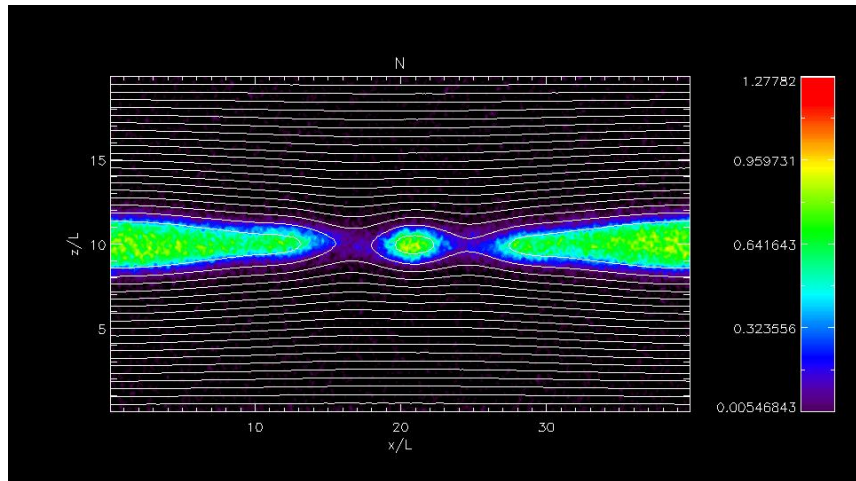


Resultados

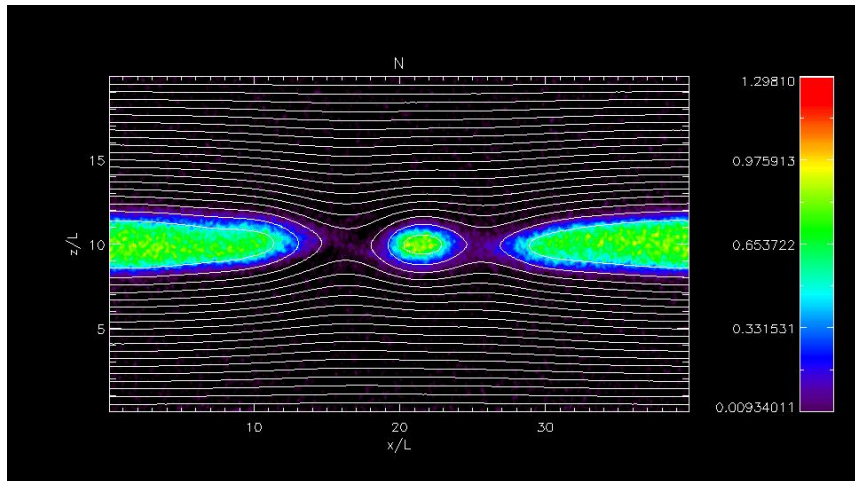




Resultados

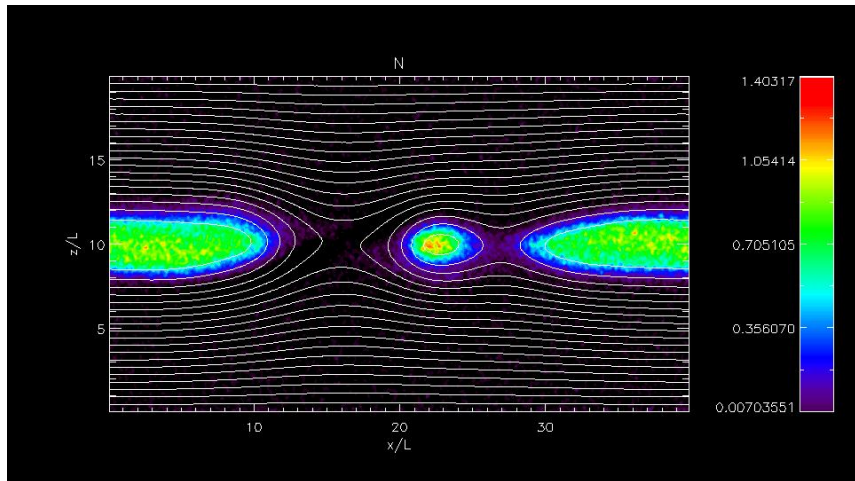


Resultados



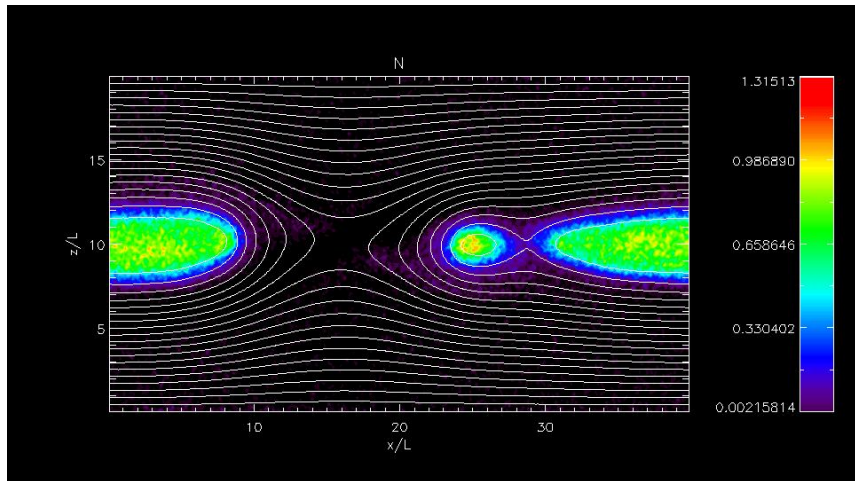


Resultados



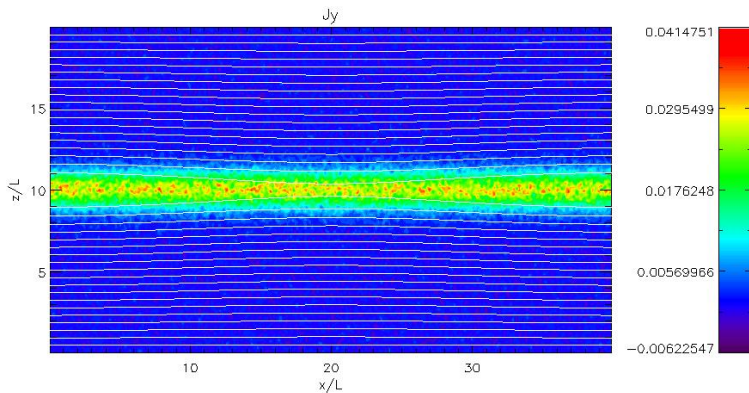


Resultados



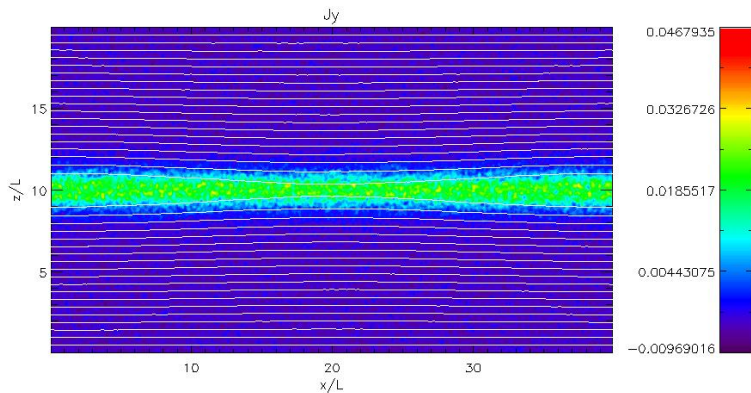


Resultados



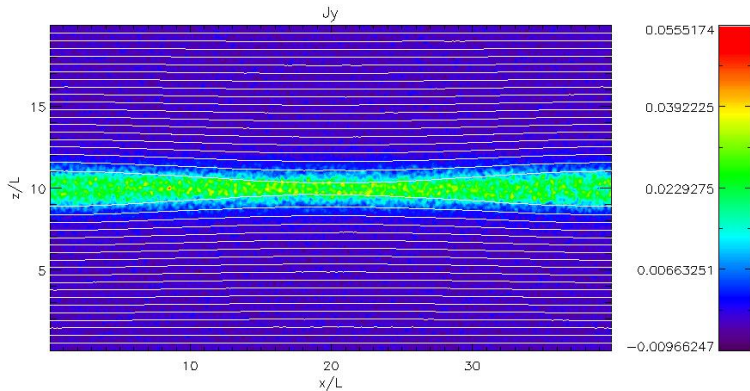


Resultados



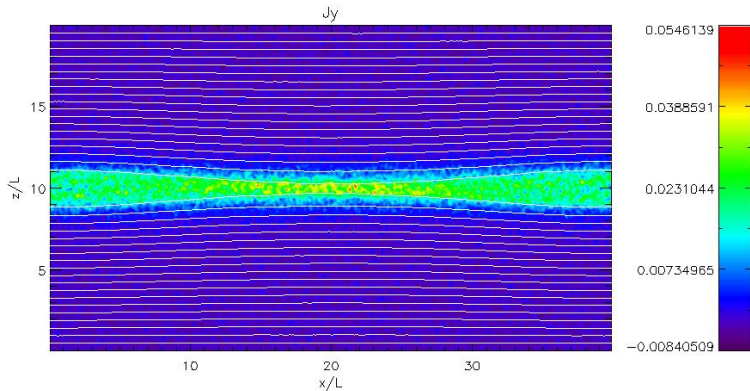


Resultados



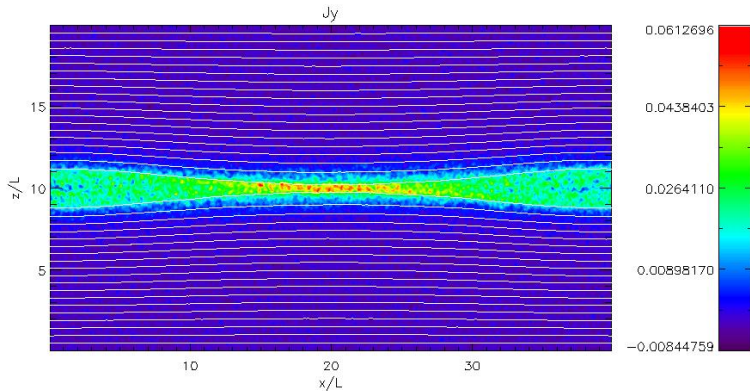


Resultados



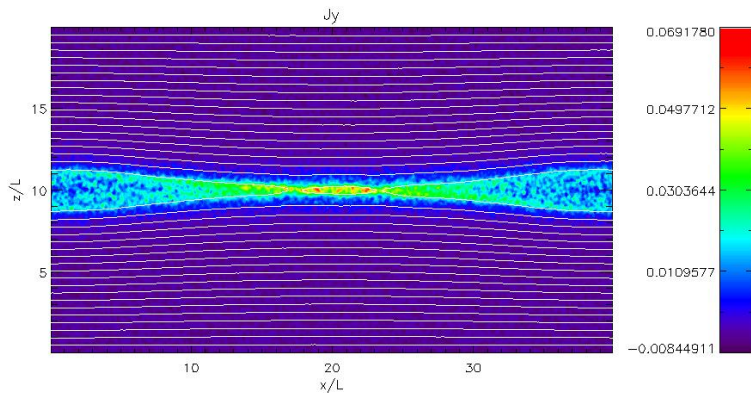


Resultados



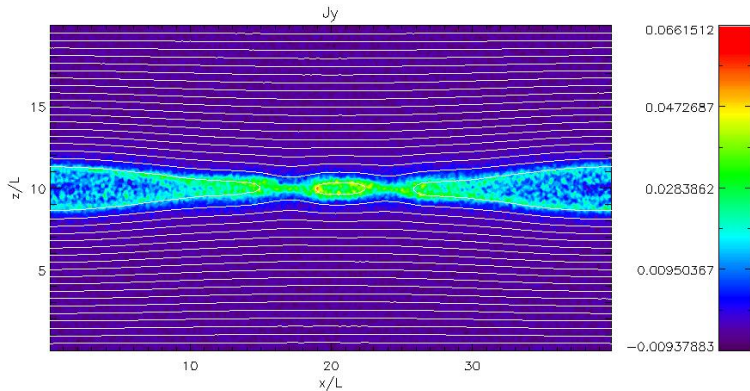


Resultados

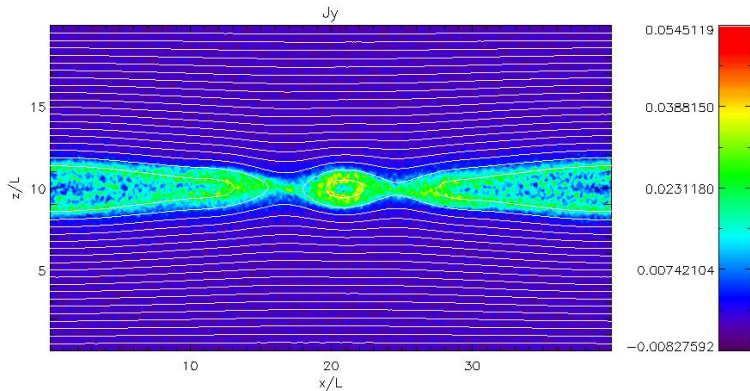




Resultados

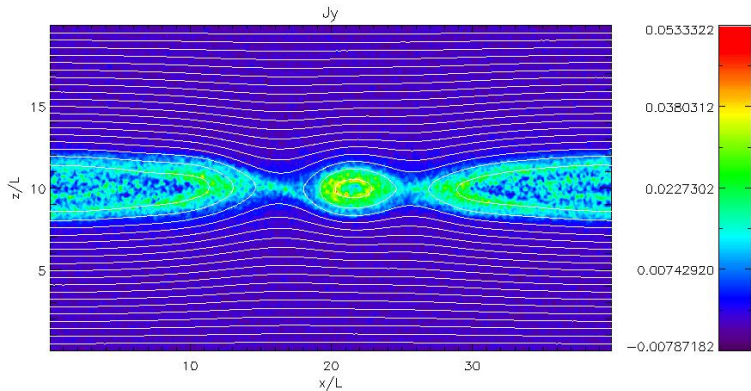


Resultados

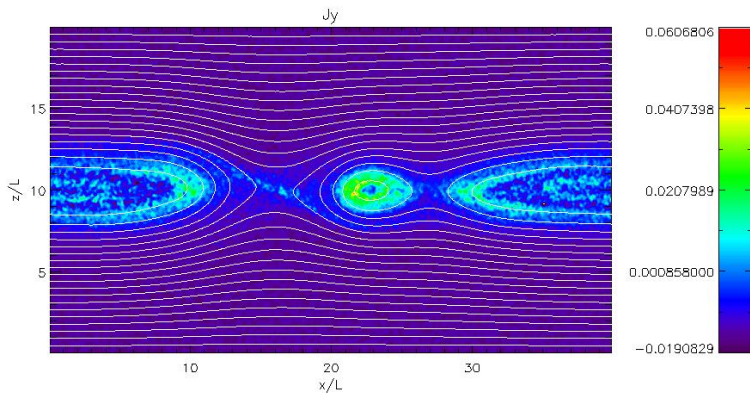




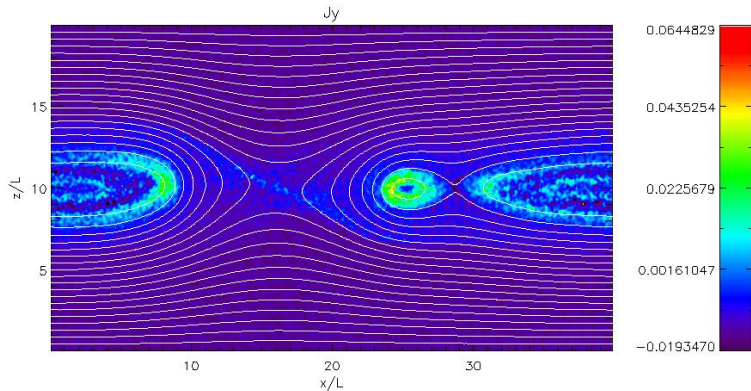
Resultados



Resultados



Resultados





Considerações finais

- ▶ Região de difusão é caracterizada pela desmagnetização das partículas;
- ▶ Simulações por partículas desempenham um papel importante;
- ▶ Missão MMS: medidas em escalas comparadas ao raio de giro dos elétrons na magnetosfera.



Agradecimentos:





Referências I

- J. F. Drake. Magnetic reconnection: A kinetic treatment. Physics of the Magnetopause, pages 155–165, 1995.
- Michael Hesse, Thomas Neukirch, Karl Schindler, Masha Kuznetsova, and Seiji Zenitani. The diffusion region in collisionless magnetic reconnection. Space science reviews, 160(1-4):3–23, 2011.
- Seiji Zenitani, Iku Shinohara, Tsugunobu Nagai, and Tomohide Wada. Kinetic aspects of the ion current layer in a reconnection outflow exhaust. Physics of Plasmas (1994-present), 20(9):092120, 2013.
- W. Gonzalez and E. Parker. Magnetic reconnection: Concepts and Applications. Springer, USA, 2016.
- P.A. Cassak. Inside the black box: Magnetic reconnection and the magnetospheric multiscale mission. Space Weather, 14(3):186–197, 2016.
- C. J. Schrijver and G. L. Siscoe. Heliophysics: plasma physics of the local cosmos. Cambridge University Press, USA, 2009.



Referências II

- FS Mozer, SD Bale, and TD Phan. Evidence of diffusion regions at a subsolar magnetopause crossing. Physical review letters, 89(1):015002, 2002.
- C. K. Birdsall and A. B. Langdon. Plasma Physics via Computer Simulation. Institute of Physics Publishing, Bristol, 2 edition, 1991.
- J. M. Dawson. Particle simulation of plasmas. 55(2):403–447, Apr. 1983.
- H. Karimabadi, W. Daughton, and J. Scudder. Multi-scale structure of the electron diffusion region. Geophysical research letters, 34(13), 2007.
- JU Brackbill and DW Forslund. An implicit method for electromagnetic plasma simulation in two dimensions. Journal of Computational Physics, 46(2): 271–308, 1982.
- Tooru Sugiyama and Kanya Kusano. Multi-scale plasma simulation by the interlocking of magnetohydrodynamic model and particle-in-cell kinetic model. Journal of Computational Physics, 227(2):1340–1352, 2007.