

Magnetické rekonexe v záblescích gama

Martin Topinka, Marián Karlický a Henk Spruit

AsÚ AVČR – Ondřejov a MPA – Garching

Školitel: René Hudec

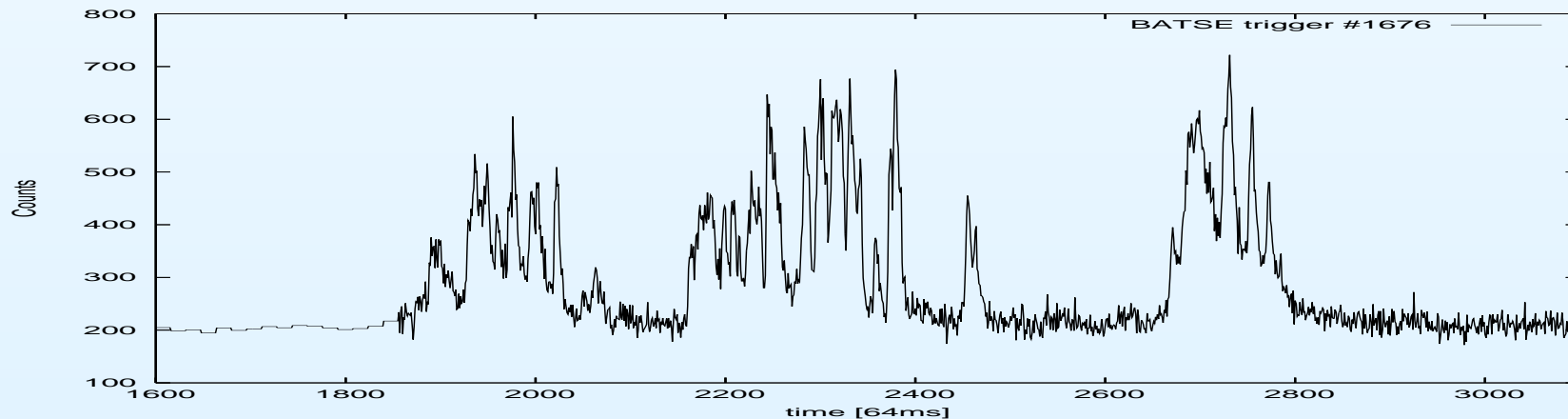
„Všech 271 zde prezentovaných teorií záblesků gama má jedno společné: všechny – možná až na jednu – s určitostí nepopisují záblesky gama. Kvůli nedostatku času vám bohužel nestíhám říct, která je ta jedna.”

– Malvin Rudeman, Huntsville 1994

Co to je záblesk gama?

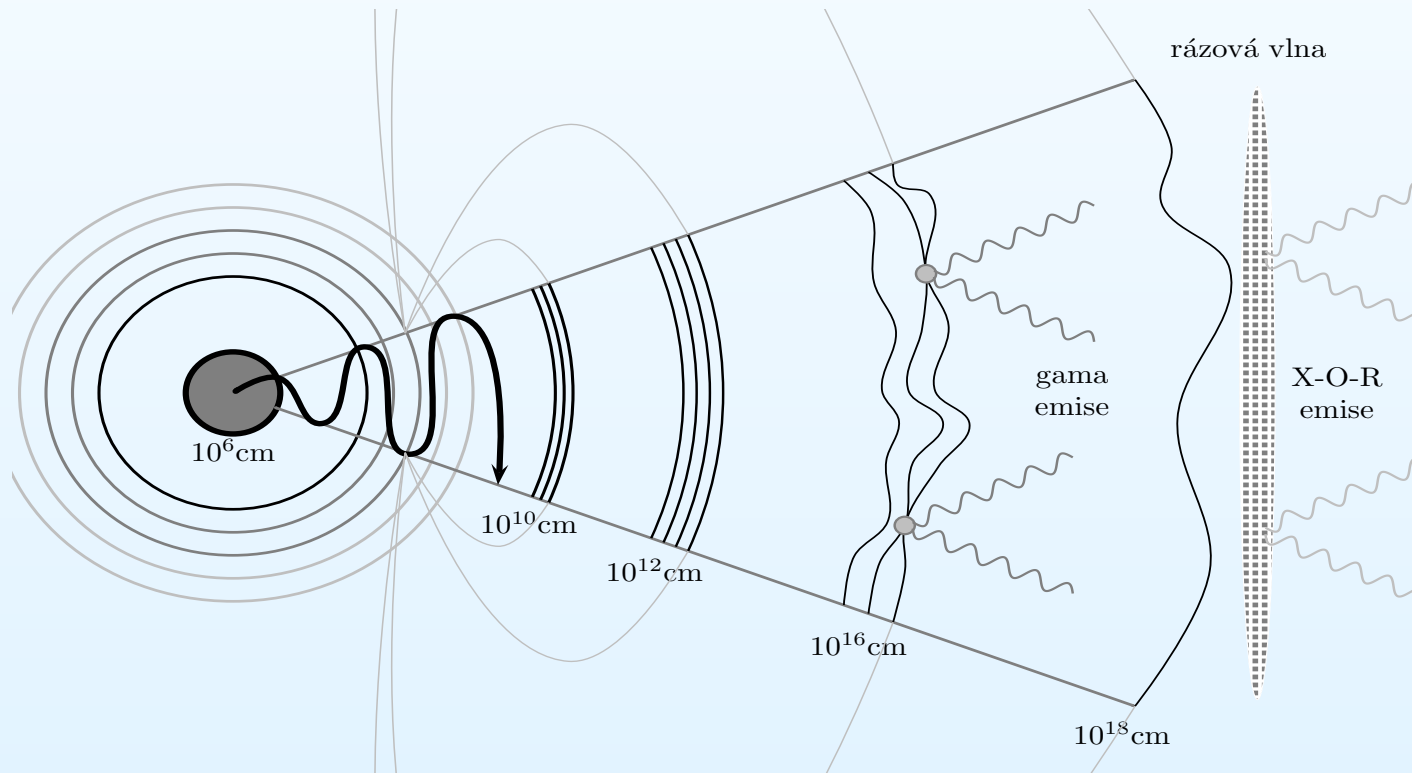
Nevíme. Raději shrneme observační fakta:

- Krátký, vysoce energetický $\sim 10^{51} - 10^{53} \text{ erg s}^{-1}$ záblesk přicházející z velmi vzdáleného Vesmíru, mající možná něco společného se smrtí hvězdy
- Chaotické světelné křivky tvořené pulsy
- Netermální (synchrotronové) spektrum ($h\nu_{max} \sim 1 \text{ MeV}$), absence $\gamma\gamma \rightarrow e^\pm \Rightarrow \Gamma \geq 100$
- Lineární polarizace 80% ?



Dobřej model by měl vysvětlit...

1. Zdroj energie (gravitační + rotační + elektromagnetická)
2. Přenos energie do opticky tenké oblasti (pro gama)
3. Vznik gama záření samotného, spektrum, světelnou křivku
4. Dosvit – ale o tom raději až jindy a s Ivanou...



Baryonová rel. ohnivá koule ($\sigma \equiv \frac{B^2}{4\pi\rho c^2\Gamma} \ll 1$)

1. Zdrojem je hypernova, skrytá pozorovateli
2. Kinetická energie hromadného pohybu, nejlépe v úzce kolimovaném výtrysku (*to bulk = nasolovat ryby*)
3. Vnitřní relativistické rázové vlny (vyvržená obálka $\Gamma_i \times$ vyvržená obálka Γ_j) \rightarrow Fermiho urychlování \rightarrow synchrotronové záření
4. Vnější relativistická rázová vlna (co zbylo z obálek \times mezihvězdné prostředí)

Baryonová rel. ohnivá koule ($\sigma \equiv \frac{B^2}{4\pi\rho c^2\Gamma} \ll 1$)

1. Zdrojem je hypernova, skrytá pozorovateli
2. Kinetická energie hromadného pohybu, nejlépe v úzce kolimovaném výtrysku (*to bulk = nasolovat ryby*)
3. Vnitřní relativistické rázové vlny (vyvržená obálka $\Gamma_i \times$ vyvržená obálka Γ_j) \rightarrow Fermiho urychlování \rightarrow synchrotronové záření
4. Vnější relativistická rázová vlna (co zbylo z obálek \times mezihvězdné prostředí)

$\Gamma_i/\Gamma_j \gg 1 \Rightarrow$ všechno se posrání v opticky tlusté oblasti.

$\Gamma_i/\Gamma_j \doteq 1 \Rightarrow$ mizerná efektivita, $\theta_{\text{total}} \sim 1/\Gamma_i \Rightarrow$ při 80% polarizaci

ještě horší. Nutno pečlivě nastavit hmotu baryonů. $E_\gamma \gg E_{\text{dosvit}}$.

θ^{-2} krát více sirotek než záblesků...

El.-mag. relativistická ohnivá koule ($\sigma \gg 1$)

1. Zdrojem je ms pulsar, magnetar
2. Magnetický vítr složený z anti-paralelních vrstev, Poyntingův tok
3. Nestability/rekonexe magnetických polí \rightarrow urychlování částic \rightarrow synchrotronové záření
4. Dosvit podobně jako u baryonové verze

El.-mag. relativistická ohnivá koule ($\sigma \gg 1$)

1. Zdrojem je ms pulsar, magnetar
2. Magnetický vítr složený z anti-paralelních vrstev, Poyntingův tok
3. Nestability/rekonexe magnetických polí \rightarrow urychlování částic \rightarrow synchrotronové záření
4. Dosvit podobně jako u baryonové verze

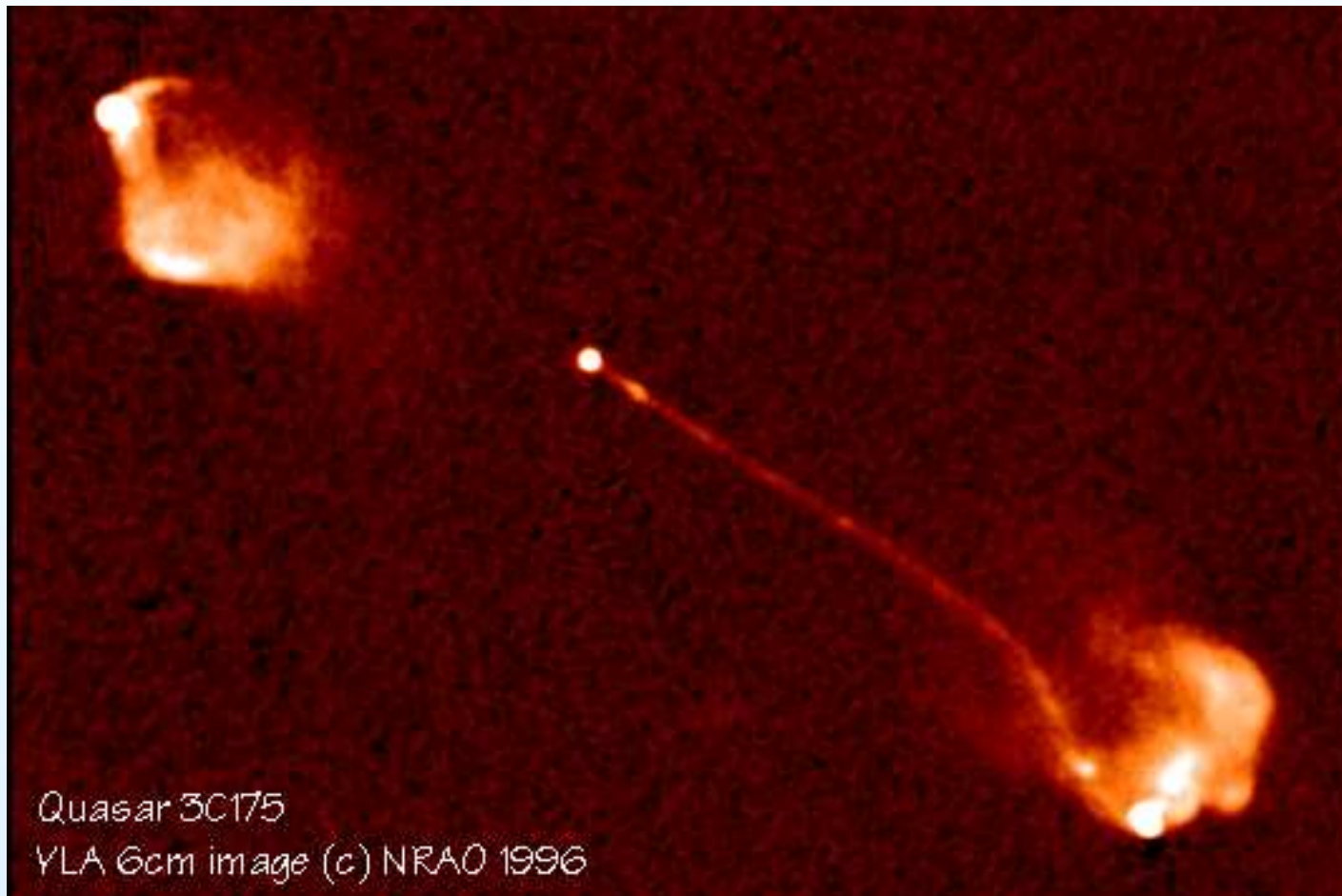
Na neduhy ohnivé koule, ve které dominuje magnetické pole, se zeptejte za rok, zatím je model v plenkách.

Mag. pole jsou v astrofyzice velmi populární

- Výtrysky kvazarů, μ -kvazarů
- Kataklyzmické proměnné
- Pulsary
- Magnetary
- Rekonexe v akrečních discích černých děr
- Sluneční erupce
- Gama záblesky ?

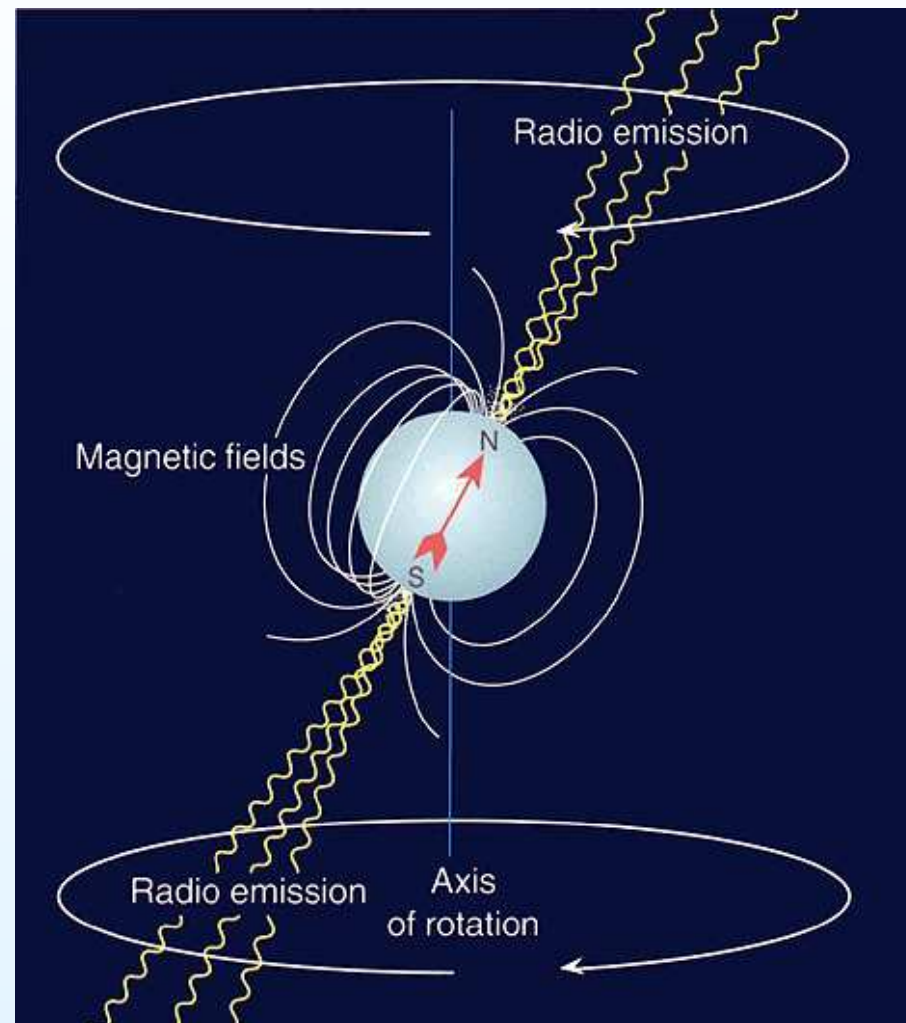
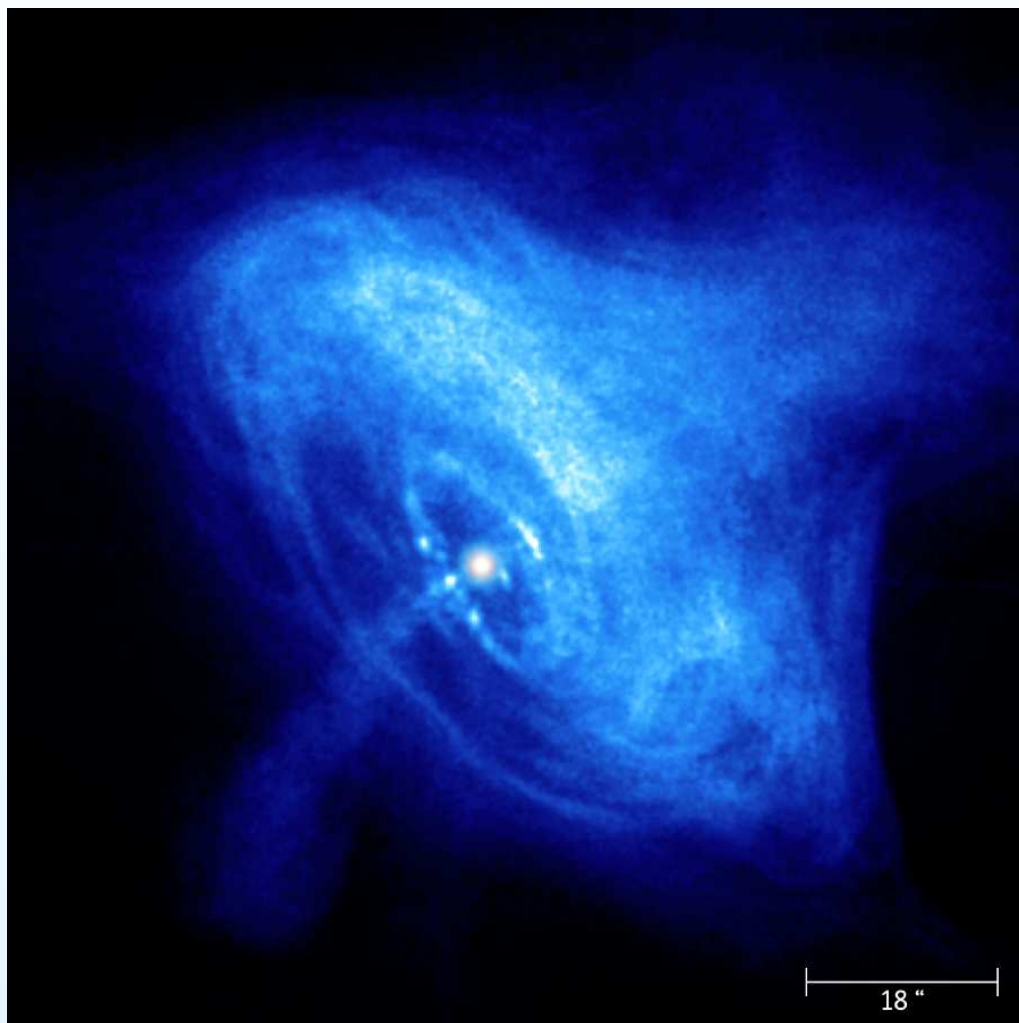
Kvazary

- Blandford-Znajek proces
- toroidální magnetické pole

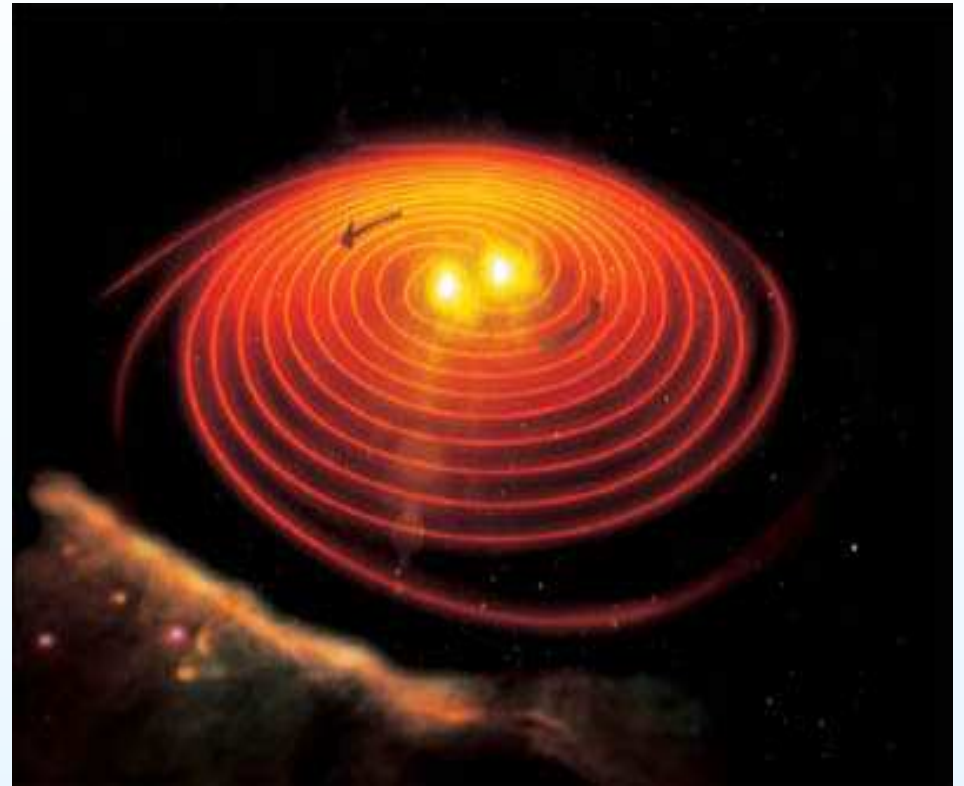
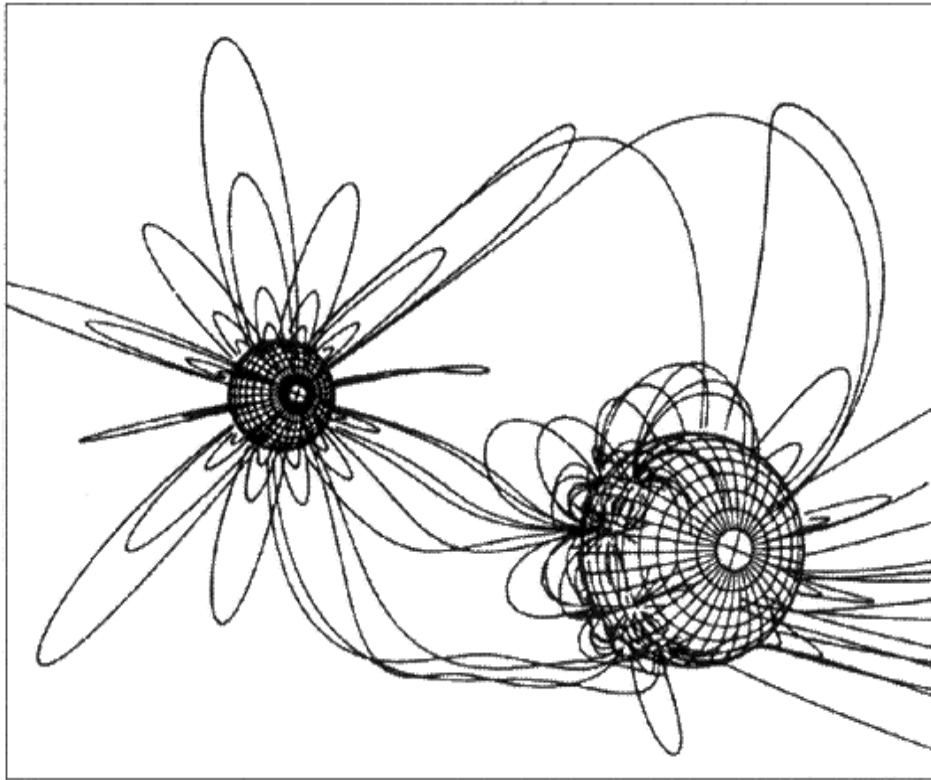


Quasar 3C175
YLA 6cm image (c) NRAO 1996

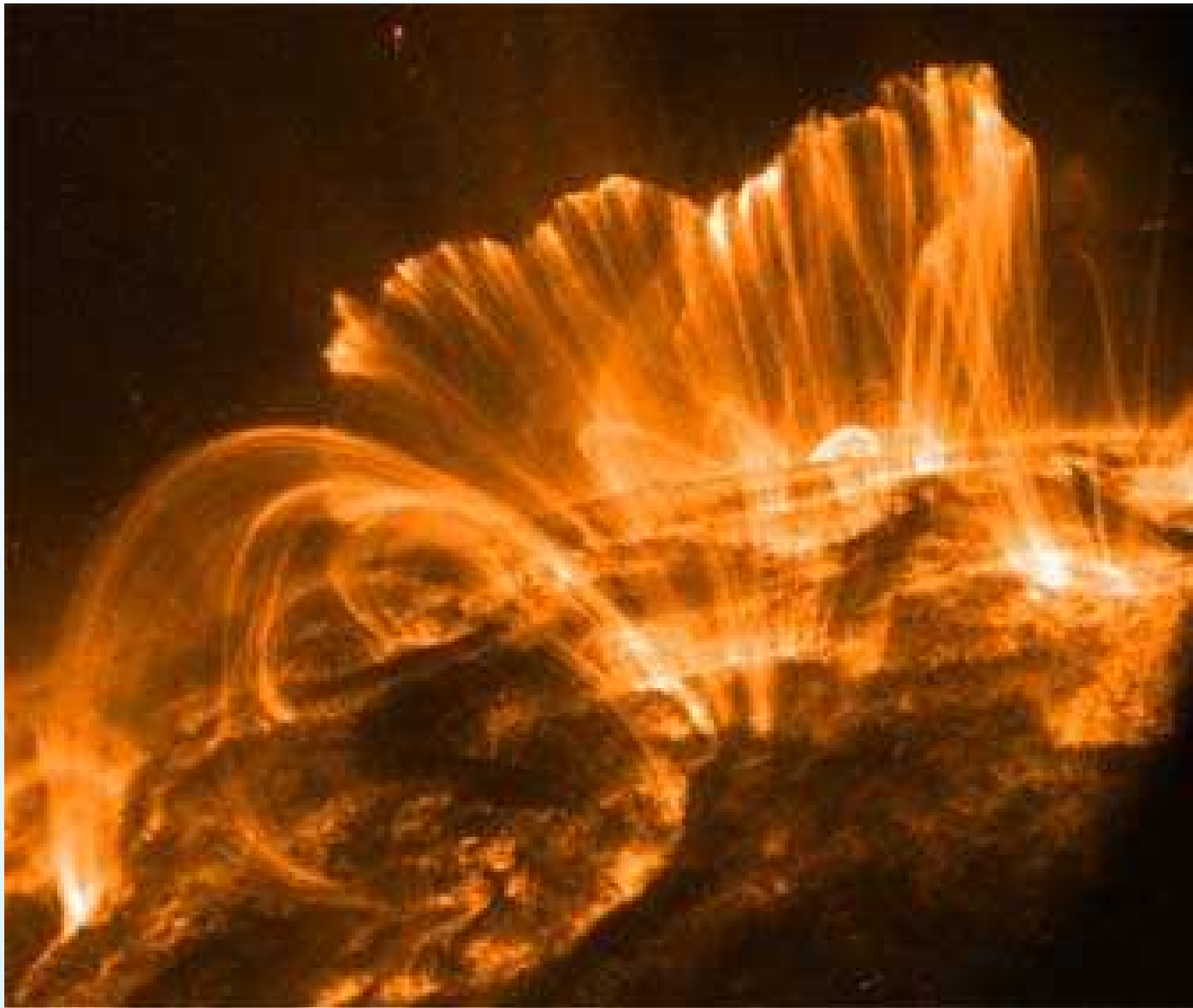
Krabí mlhovina



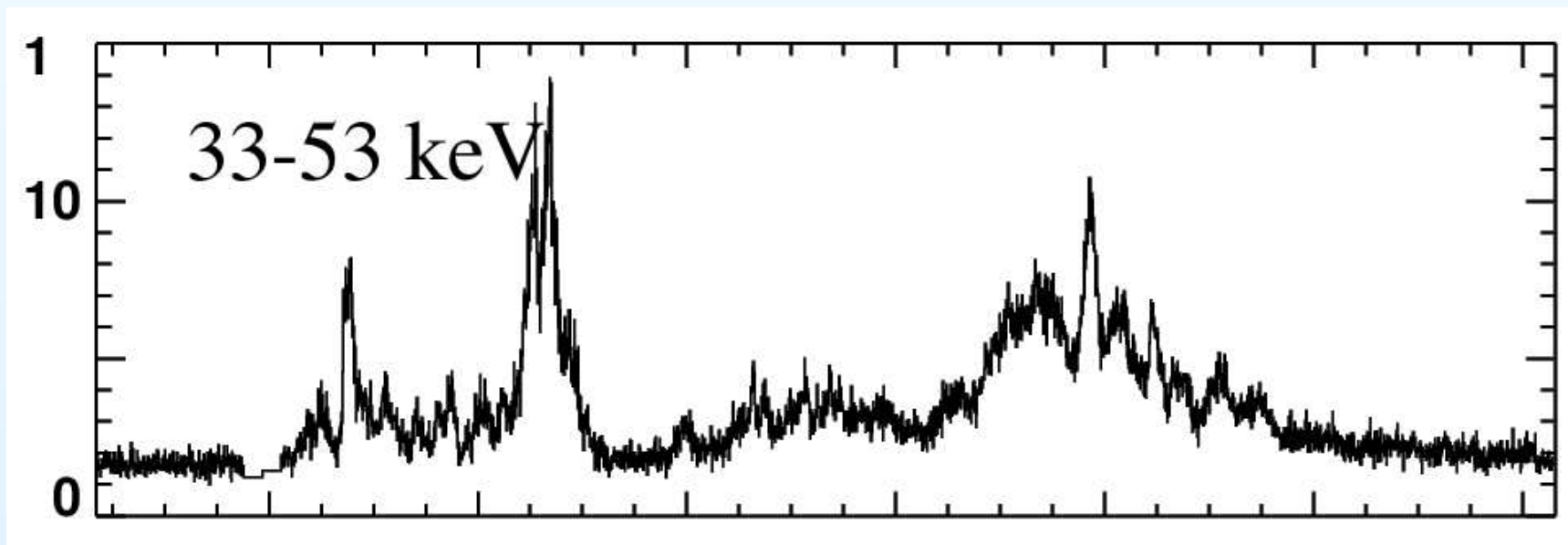
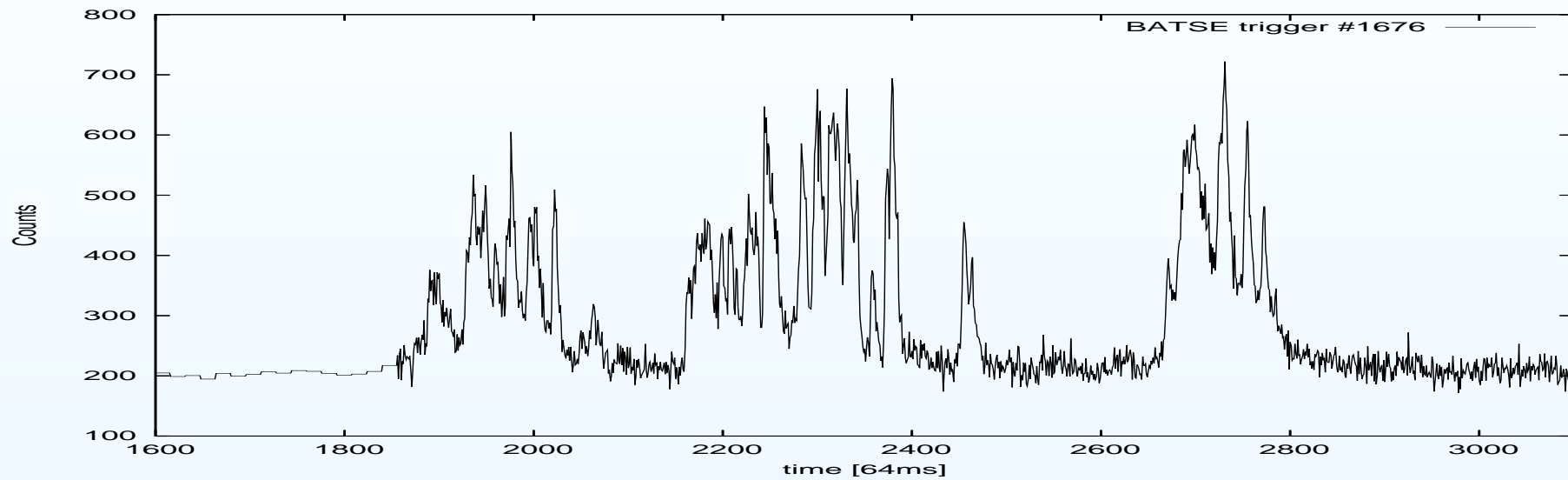
Magnetické dvojhvězdy (CV)



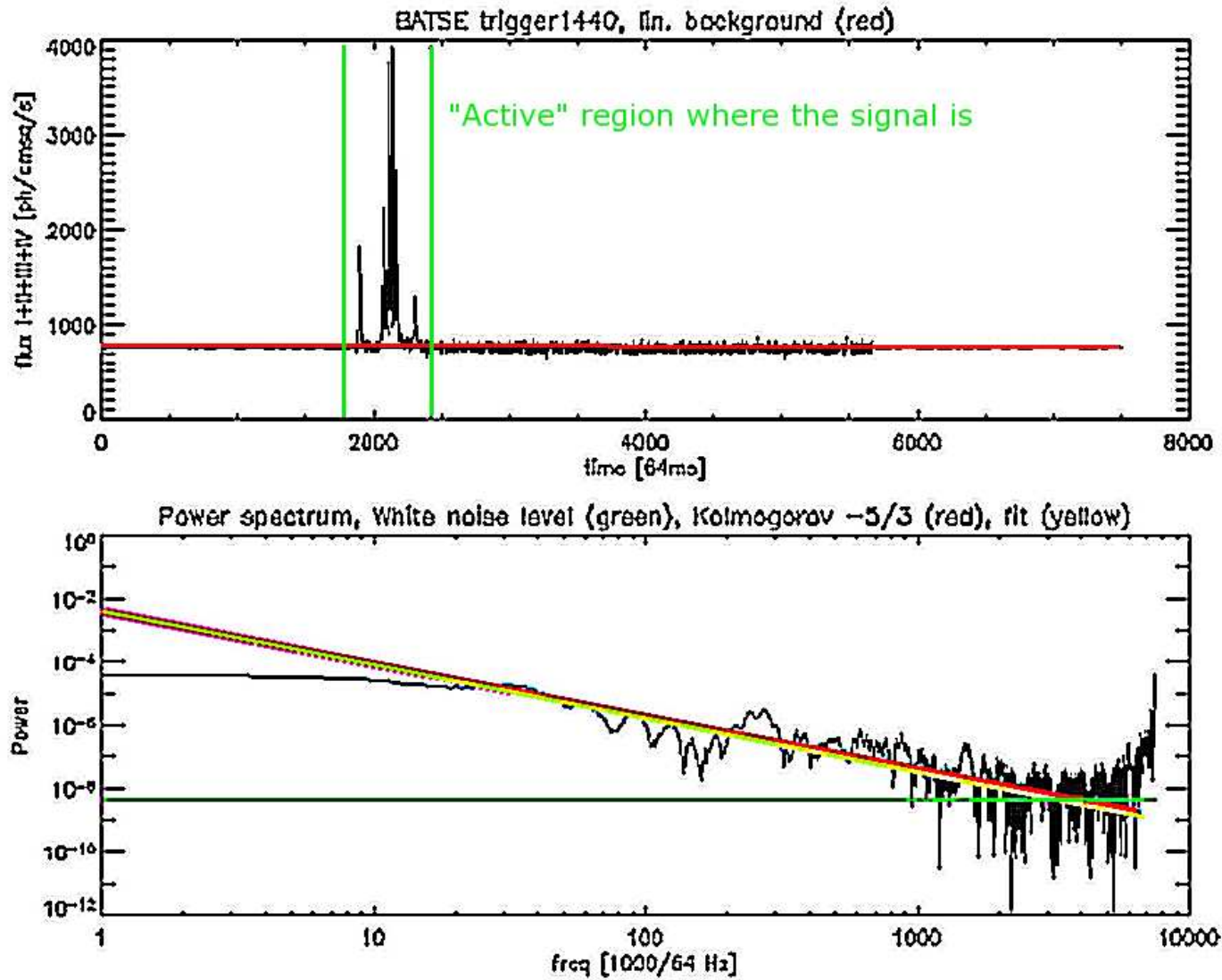
Sluneční erupce



Najdi 10 rozdílů



Fourierův obraz (PDS) světelných křivek



Co plyne z analýzy světelných křivek?

- 12 světelných křivek BATSE záblesků s mnoha pulsy
- $c\delta t \Rightarrow$ kompaktní objekt
- fit tvaru pulsů \Rightarrow sobě podobnost
- PDS $\Rightarrow -5/3 \equiv$ Kolmogorovovo turbulentní spektrum (rudý posuv nemění PDS)

1 puls je realizací 1 *stochastického* procesu operujícího blízko kritického režimu, například **MHD turbulence** a **mag. rekonexe**.

MHD rovnice

ZZH, ZZM, stavová rovnice:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \mathbf{j} \times \mathbf{B} + \nabla \cdot \mathbf{S} + \mathbf{F}_g \quad p = p(\rho)$$

ZZE:

$$\rho \frac{de}{dt} + p \nabla \cdot \mathbf{v} = \nabla \cdot (\kappa \cdot \nabla T) + (\eta_e \cdot \mathbf{j}) \cdot \mathbf{j} + Q_\nu - Q_T \quad e = \frac{p}{(\gamma - 1) \rho}$$

Faradayův zákon, Ampérův zákon, Gaussův zákon:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho_e \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

Ohmův zákon:

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \eta_e \mathbf{j}$$

MHD rovnice

ZZH, ZZM, stavová rovnice:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \mathbf{j} \times \mathbf{B} + \nabla \cdot \mathbf{S} + \mathbf{F}_g \quad p = p(\rho)$$

ZZE:

$$\rho \frac{de}{dt} + p \nabla \cdot \mathbf{v} = \nabla \cdot (\kappa \cdot \nabla T) + (\eta_e \cdot \mathbf{j}) \cdot \mathbf{j} + Q_\nu - Q_T \quad e = \frac{p}{(\gamma - 1) \rho}$$

Faradayův zákon, Ampérův zákon, Gaussův zákon:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho_e \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

Ohmův zákon:

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \eta_e \mathbf{j}$$

Ideální ($\eta = 0$) MHD

- $\mathbf{E} \cdot \mathbf{B} = 0$
- Magnetická pole nemohou navzájem interagovat a propojovat se.
- Magnetická energie (např. kinetická energie plazmy, do které je pole zamrzlé) se nemá jak uvolnit. Neexistuje inverzní proces k procesu MHD dynamika.
- Helicita (topologie) magnetického pole se nemění

$$\frac{dH}{dt} \equiv \frac{d}{dt} \int_V \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} dV = 0 \quad \mathbf{B} \equiv \nabla \times \mathbf{A}$$

Rezistivní MHD ($\eta \neq 0$)

Magnetická indukce:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \underbrace{\nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})}_{\text{zamrznutí}} + \underbrace{\eta \nabla^2 \mathbf{B}}_{\text{difúze}}$$

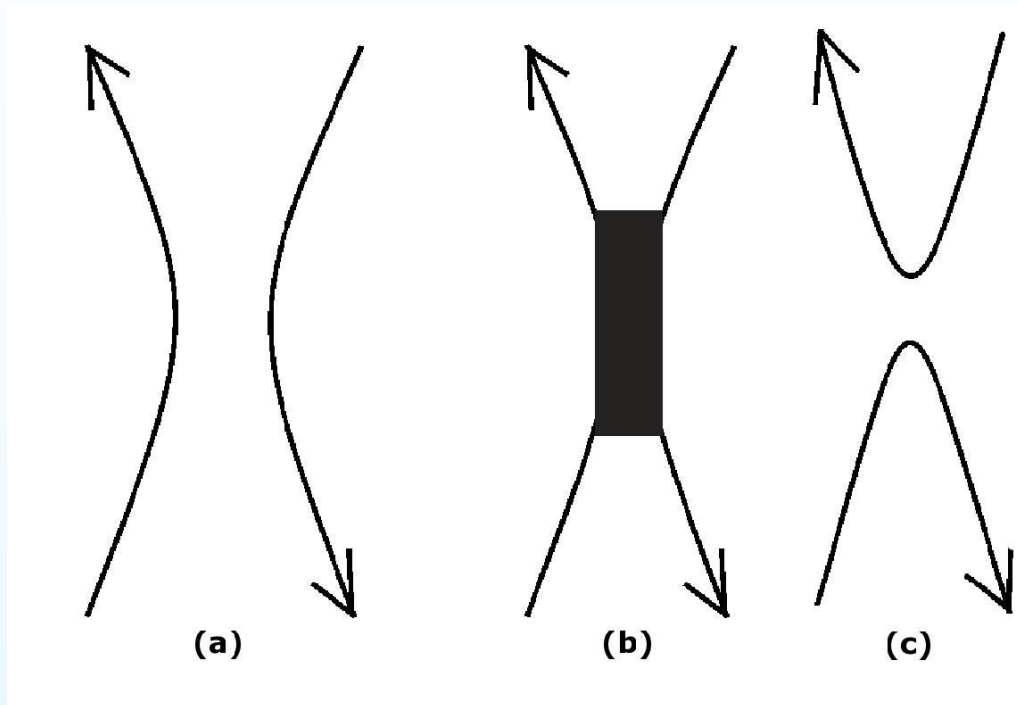
Ohmická disipace energie mag. pole o rychlosti:

$$\mathbf{j} = (c/4\pi) \nabla \times \mathbf{B} \quad \nabla p = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$

$$\frac{|\mathbf{j}|^2}{\sigma} = \frac{\eta}{4\pi} |\nabla \times \mathbf{B}|^2 \cong \frac{\eta}{4\pi} \frac{B^2}{L_y^2} \quad \eta \equiv \frac{c^2}{4\pi\sigma} = \eta_e / \mu_0 \quad \mathcal{R}_m \equiv \frac{L_0 v_0}{\eta}$$

\Rightarrow magnetické rekonexe

Magnetická rekonexe

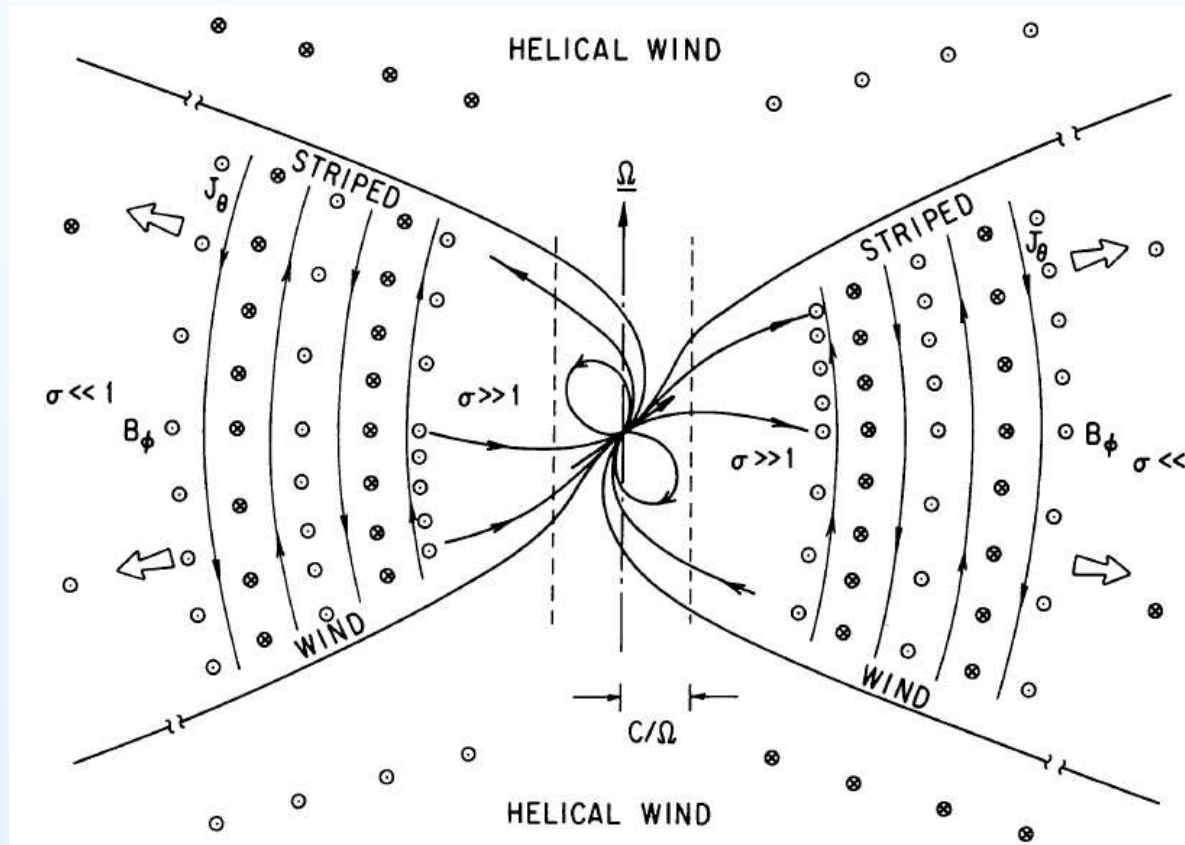


- Anti-paralelní pole, difúzní oblast (nulový X-bod) \Rightarrow proudová vrstva
- Rychlost (2D) rekonexe

$$\mathcal{M}_i \equiv \frac{v}{v_A} \approx \begin{cases} \frac{1}{\mathcal{R}_m^{1/2}} & \text{(Sweet – Parker)} \\ \frac{\pi}{8 \log \mathcal{R}_m} & \text{(Petschek)} \end{cases} \quad v_{\text{out}} = v_A = \frac{B_0}{\sqrt{4\pi\rho_0}}$$

Rekonexe v záblescích gama

- axiálně nesymetrický ms PSR, α - Ω dynamo $\rightarrow 10^{14}$ G
- $E_{\text{GRB}} \approx N \Gamma R_{\text{NS}}^3 B^2$
- „pruhovaný“ magnetický vítr za světelným kuželem



Model

Dvě mouchy jednou ranou: urychlení celkového pohybu i tepelné urychlení částic uvnitř

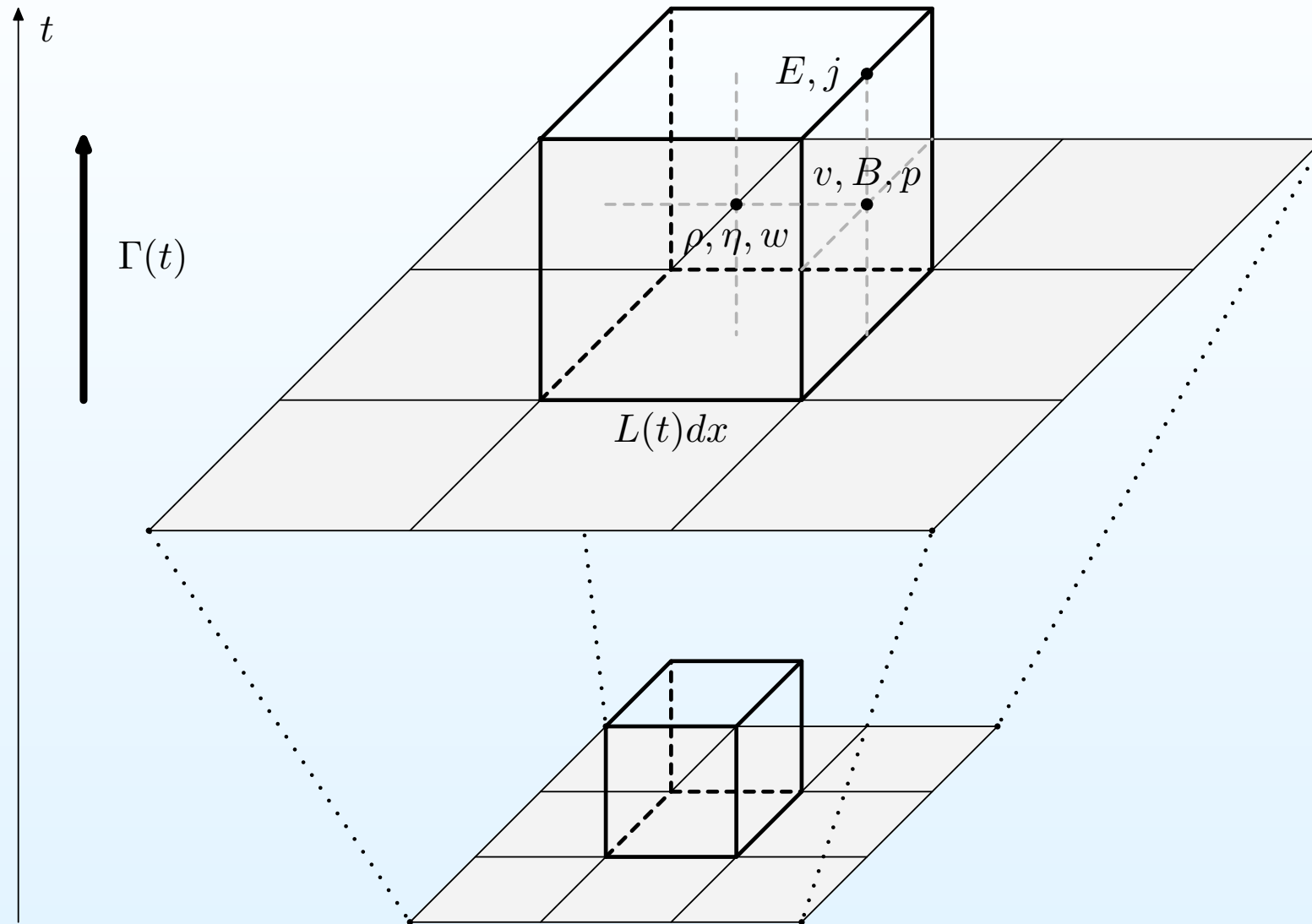
$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{S} = -\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}$$

$$S = \mathbf{v}_{\perp} B^2 / 4\pi \quad \approx \quad w_m = u_m + p_m \quad u_m = B^2 / 8\pi \quad p_m = B^2 / 8\pi$$

Disipace magnetického pole způsobí

- $\alpha \Delta w_m \equiv \Delta u_m \begin{cases} \text{rozepne slupku (ve fotosféře, } \sigma_{\gamma\gamma} \gg 1) \\ \text{vyzáří se (nad fotosférou, } \sigma_{\gamma\gamma} \ll 1) \end{cases}$
- $(1 - \alpha) \Delta w_m \equiv \Delta p_m \searrow \Rightarrow \nabla p \nearrow \Rightarrow \Gamma \nearrow$
 \Rightarrow do rovnic zavedeme *comoving* souřadnice: $x' \rightarrow L(t)x$,
kde $dL/dt \sim \Gamma$
- Lavinový efekt

Elementární buňka



Simulace (FORTRAN)

- Skutečný MHD kód (nikoli PIC), stlačitelné MHD rovnice:

$$\partial_t \rho = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) \qquad p \partial_t \mathbf{v} = -\rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \nabla p + \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$

$$\partial_t U = -\nabla \cdot \mathbf{S} \qquad \partial_t \mathbf{B} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \nabla \times (\eta \mathbf{j})$$

$$\mathbf{j} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{B} \qquad U = \rho w + \frac{\rho}{2} v^2 + \frac{B^2}{2\mu_0}$$

$$\mathbf{S} = \left(U + p + \frac{B^2}{2\mu_0} \right) \mathbf{v} - (\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}) \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} + \eta \mathbf{j} \times \frac{\mathbf{B}}{\mu_0}$$

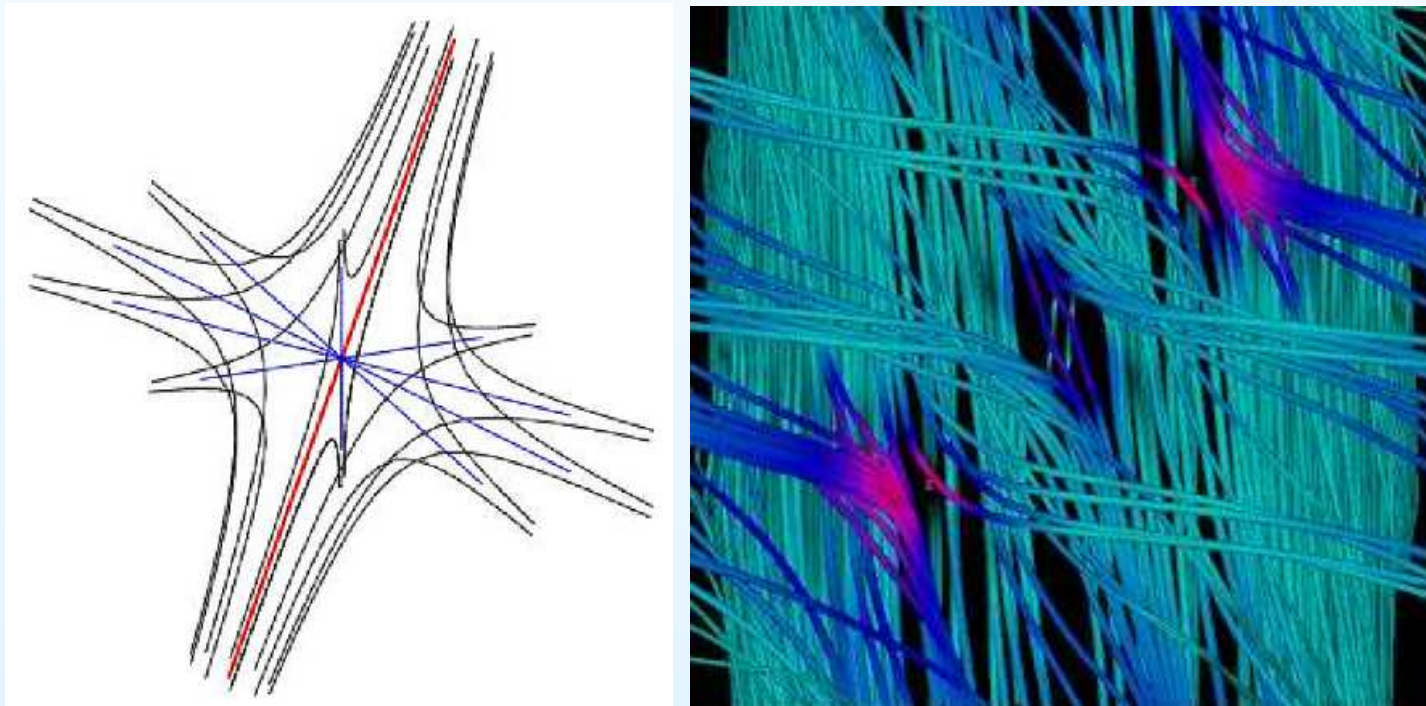
$$p = (\gamma - 1) \rho w \qquad \gamma = 5/3 \qquad \mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B} + \eta \mathbf{j}$$

Simulace (FORTRAN)

- Skutečný MHD kód (nikoli PIC), stlačitelné MHD rovnice:
- Normalizované veličiny, pseudo-STR ($\eta \rightarrow \frac{\eta}{\gamma}$, $\rho \rightarrow \gamma\rho$ etc.)

Simulace (FORTRAN)

- Skutečný MHD kód (nikoli PIC), stlačitelné MHD rovnice:
- Normalizované veličiny, pseudo-STR ($\eta \rightarrow \frac{\eta}{\gamma}$, $\rho \rightarrow \gamma\rho$ etc.)
- 2D žížala musí zemřít \rightarrow 3D \rightarrow složitější a zajímavější struktury



Simulace (FORTRAN)

- Skutečný MHD kód (nikoli PIC), stlačitelné MHD rovnice:
- Normalizované veličiny, pseudo-STR ($\eta \rightarrow \frac{\eta}{\gamma}$, $\rho \rightarrow \gamma\rho$ etc.)
- 2D žížala musí zemřít \rightarrow 3D \rightarrow složitější a zajímavější struktury
- 1-tekutinový model, ale s lokálně uměle zvýšenou rezistivitou tam, kde $|\mathbf{v}_D \equiv (m_i/e) \mathbf{j}/\rho| \geq v_{cr}$

Simulace (FORTRAN)

- Skutečný MHD kód (nikoli PIC), stlačitelné MHD rovnice:
- Normalizované veličiny, pseudo-STR ($\eta \rightarrow \frac{\eta}{\gamma}$, $\rho \rightarrow \gamma\rho$ etc.)
- 2D žížala musí zemřít \rightarrow 3D \rightarrow složitější a zajímavější struktury
- 1-tekutinový model, ale s lokálně uměle zvýšenou rezistivitou tam, kde $|\mathbf{v}_D \equiv (m_i/e) \mathbf{j}/\rho| \geq v_{cr}$
- Lax-Wendroffovo integrační schéma 2. řádu (newtonovské, transformaci z *comoving* souřadnic provedeme až na závěr). Síť $512 \times 512 \times 512 \rightarrow$ 12 GB paměti

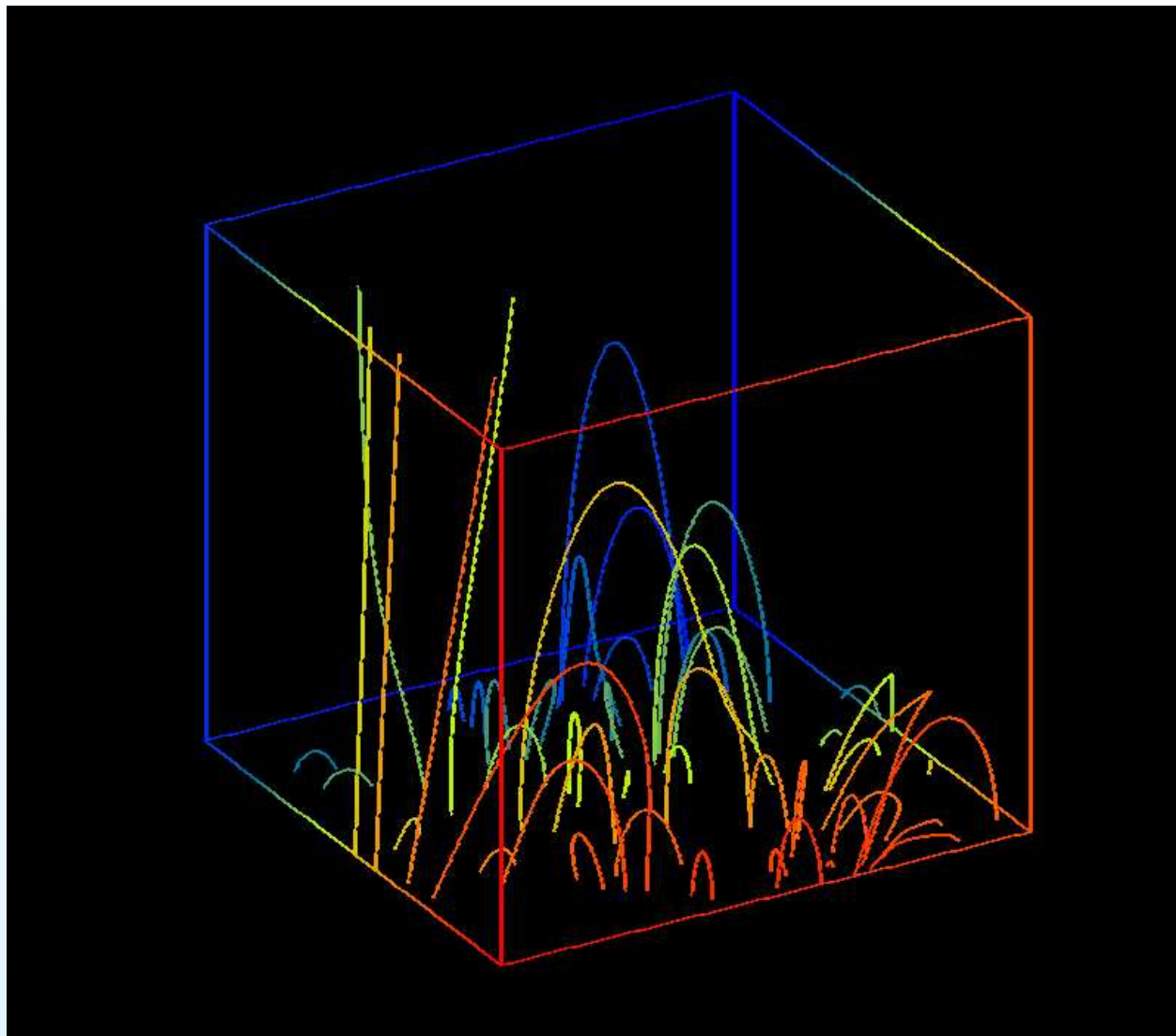
Simulace (FORTRAN)

- Skutečný MHD kód (nikoli PIC), stlačitelné MHD rovnice:
- Normalizované veličiny, pseudo-STR ($\eta \rightarrow \frac{\eta}{\gamma}$, $\rho \rightarrow \gamma\rho$ etc.)
- 2D žížala musí zemřít \rightarrow 3D \rightarrow složitější a zajímavější struktury
- 1-tekutinový model, ale s lokálně uměle zvýšenou rezistivitou tam, kde $|\mathbf{v}_D \equiv (m_i/e) \mathbf{j}/\rho| \geq v_{cr}$
- Lax-Wendroffovo integrační schéma 2. řádu (newtonovské, transformaci z *comoving* souřadnic provedeme až na závěr). Síť $512 \times 512 \times 512 \rightarrow$ 12 GB paměti
- Počáteční podmínky: dvě (a více) anti-paralelní vrstvy
 $\lambda = \Gamma 2\pi c/\Omega$

Simulace (FORTRAN)

- Skutečný MHD kód (nikoli PIC), stlačitelné MHD rovnice:
- Normalizované veličiny, pseudo-STR ($\eta \rightarrow \frac{\eta}{\gamma}$, $\rho \rightarrow \gamma\rho$ etc.)
- 2D žížala musí zemřít \rightarrow 3D \rightarrow složitější a zajímavější struktury
- 1-tekutinový model, ale s lokálně uměle zvýšenou rezistivitou tam, kde $|\mathbf{v}_D \equiv (m_i/e) \mathbf{j}/\rho| \geq v_{cr}$
- Lax-Wendroffovo integrační schéma 2. řádu (newtonovské, transformaci z *comoving* souřadnic provedeme až na závěr). Síť $512 \times 512 \times 512 \rightarrow$ 12 GB paměti
- Počáteční podmínky: dvě (a více) anti-paralelní vrstvy $\lambda = \Gamma 2\pi c/\Omega$
- Okrajové podmínky: a) „žádné“, výsledek se ořeže
b) periodické (odpovídá stochastické povaze simulovaného procesu)

Vizualizace: Chromo-stereoskopická projekce



Časová osa

2004

Léto: nápad, návrh, PDS, model, fyzikální aparát, Fortran, integrační schéma (část I.)

Podzim: J. Polcar, M. Topinka et al: *Hledání korelací mezi záblesky gama z BATSE a supernovami (A&A)*, Řím, IDL zobrazování, integrační schéma (část II.)

Zima: okrajové podmínky, počáteční podmínky

2005

Jaro: testování různých konfigurací, přepsání do *comoving* souřadnic

Léto: testování různých konfigurací

Podzim: pseudo-relativistické triky

Zima: první výsledky

2006

Jaro: piplání, pilování a ošetřování

Léto: interpretace výsledků, psaní disertace

Literatura a zdroje

BATSE web page <http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse>

Blackman E.G., Phys. Review Letters 73, 3097, 1994

Chiuderi C. & Einaudi G., *Plasma Astrophysics*, Springer, 1994

Coroniti F.V., ApJ 349, 588, 1990

Karlický M., *Plasma astrophysics*, 2004

Kirk J.G., A&A 388, L29, 2002

Lytikov M. & Blandford R.D., astro-ph/0312347

Lytikov M. & Uzdensky D., astro-ph/0210206

Piran T., Phys. Reports 314, 575, 1999

Priest E. & Forbes T., *Magnetic reconnection: MHD Theory and Applications*, Cambridge University Press, 2000

Rees M. & Meszaros P., ApJ 545, 73, 2000

Spruit H. & Drenkhahn G., astro-ph/0302468

Usov V.V., MNRAS 267, 1035, 1994

Zenitani S. & Hoshino M., ApJ 562, 63, 2001

Konec, děkuji za trpělivost

