Urychlování částic ve vesmíru

aneb

záhadné extrémně energetické kosmické záření

Pozorování kosmického záření

Kosmické záření je proud převážně nabitých částic, které dopadá na zeměkouli z kosmického prostoru. (Ale i gama záření s energiemi nad 100 keV, díky korpuskulárnímu chování.)

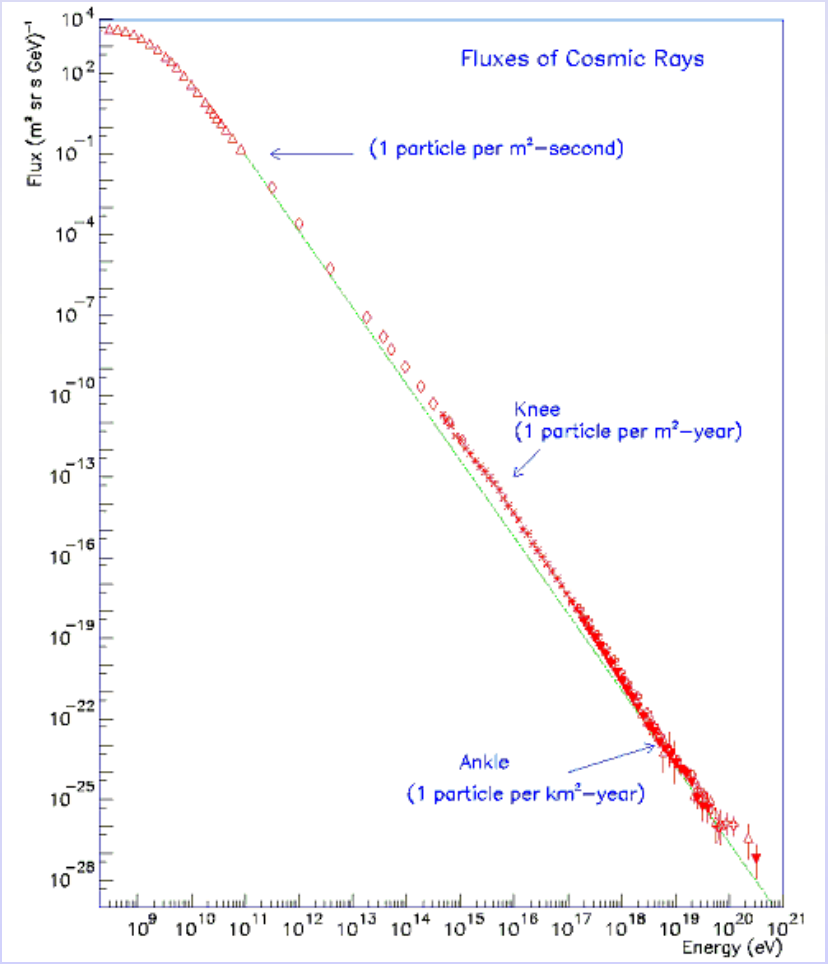
Jednotka energie 1 eV = 1.6 * 10^(-19) J

Co pozorujeme:

1. Intenzitu (energetické spektrum)
2. Anizotropii
3. Chemické složení

Energetické spektrum

- Mocninný pokles intenzity
- vliv Slunce (< 10^10 eV)
- koleno (3*10^15 eV)
- kotník (6*10^18 eV)
- konec spektra ?

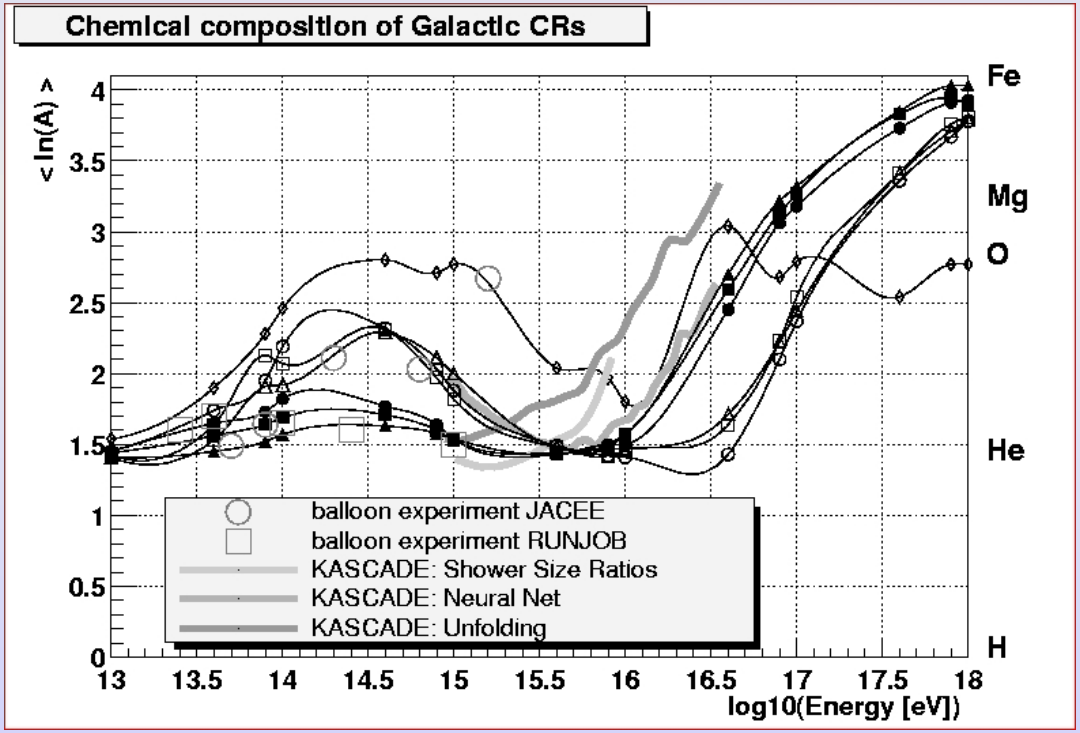


Vznik kolena v energetickém spektru

- nedávný výbuch supernovy
- konec spektra jednoho typu zdroje
- unikání z magnetického pole Galaxie

Mé výsledky:

- jednoduchý model
- objevuje se koleno
- předpověď změny v zastoupení atomů



Anisotropie

Odchylka od isotropie $$\delta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100\%$$

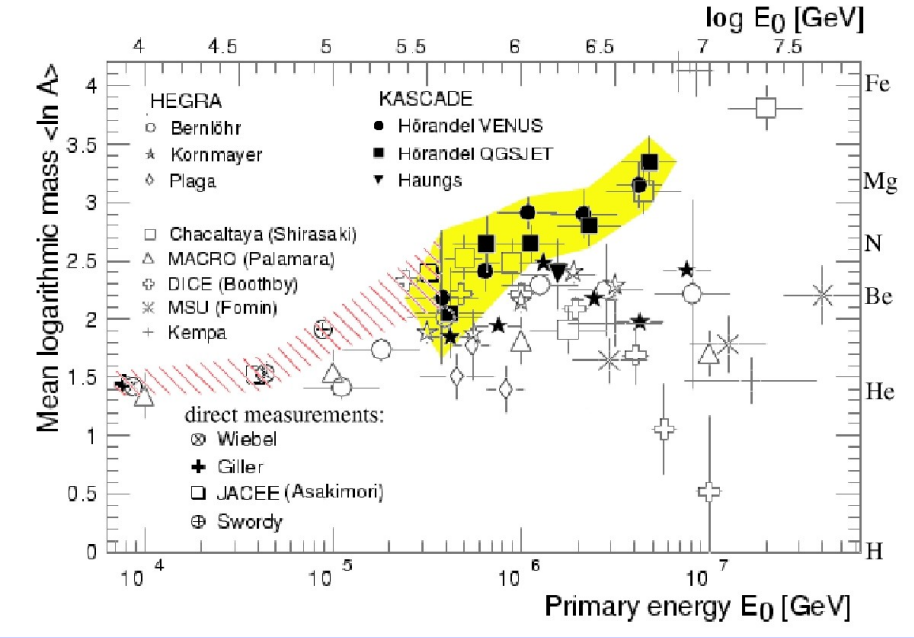
kde I_{max} a I_{min} jsou maximální a minimální intenzity jako funkce směru příchodu kosmického záření

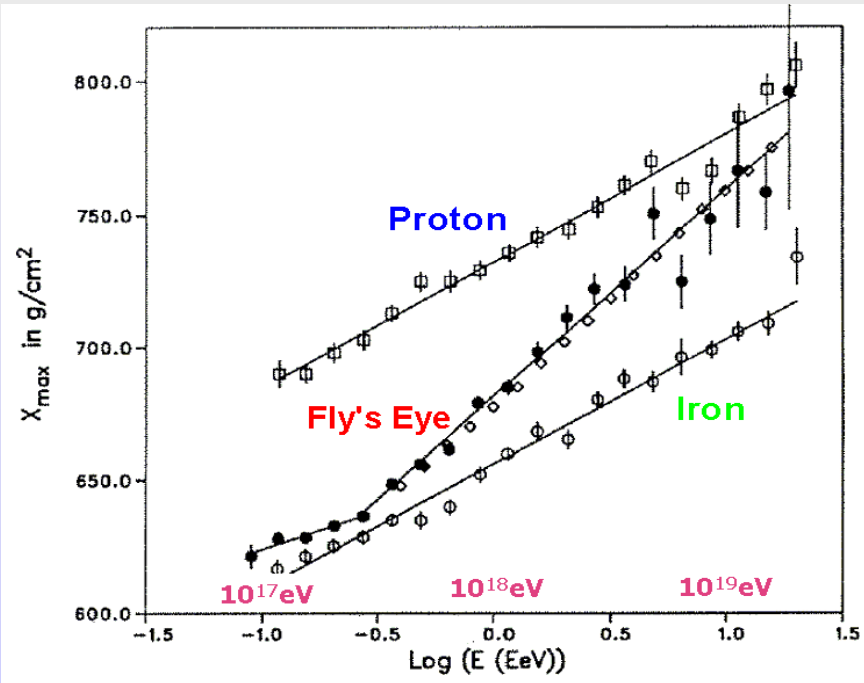
- Velmi slabá korelace s rovinou Galaxie a Supergalaxie (vyloučení blízkých astrofyzikálních objektů ?)
- Statistika pro nejvyšší energie se opírá o malé množství dat => korelace s astrofyzikálními objekty nejsou průkazná

Chemické složení

- Přímá detekce satelity a balóny do 10^15 eV
- Při vyšších energiích odvozování ze zastoupení sekundarních částic v atmosférické sprše a z hloubky spršky X_{max} [g/cm^2]
- funkce průměrné hmotnosti

$$< \ln A >= \frac{\sum_i n_i (\ln A_i)}{\sum_i n_i}$$





Co je třeba vzít v úvahu

Magnetická pole

Deformují dráhy nabitých částic, ty se pohybují prostorem po spirálách a zobrazení případného zdroje se rozmazává.

Larmorův poloměr $$r_L[\mathrm{kpc}] = \frac{E\ [\mathrm{EeV}]}{Z\ B[\mu\mathrm{G}]}$$

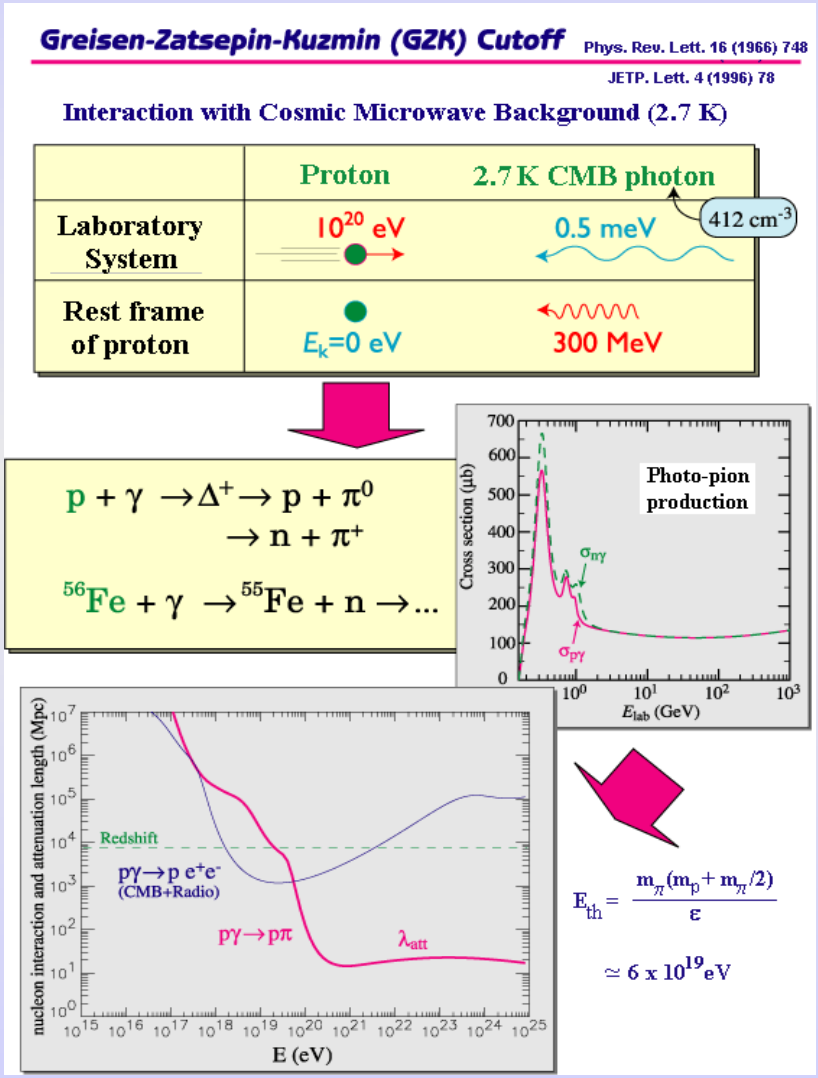
A) Pravidelné struktury (zasahují do velkých vzdáleností)

Galaxie ~ μ G (v okolí Slunce 2-3 μ G)

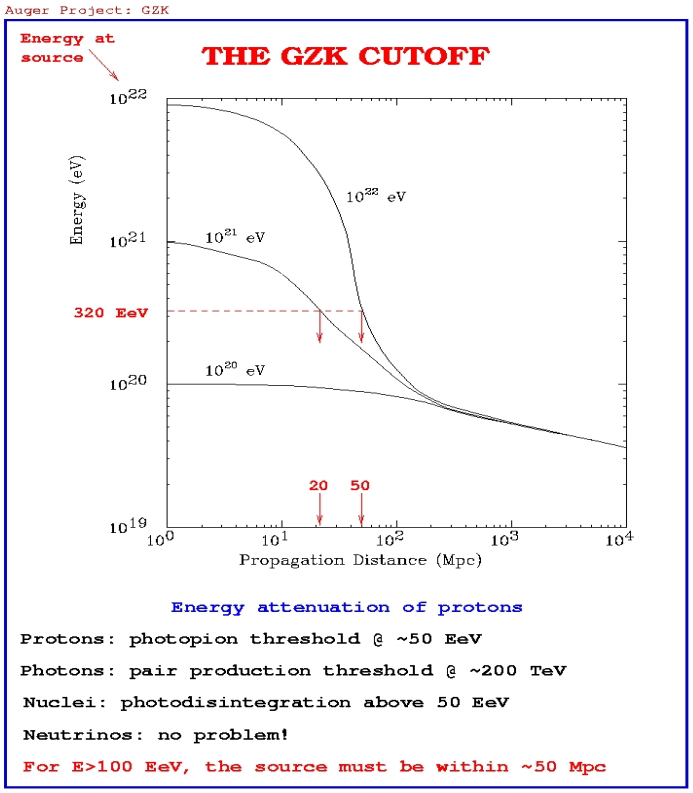
Mezigalaktický prostor ~ nG

B) Turbulentní složky až třikrát větší intenzita pole s náhodnou orientací

Interakce s reliktním zářením

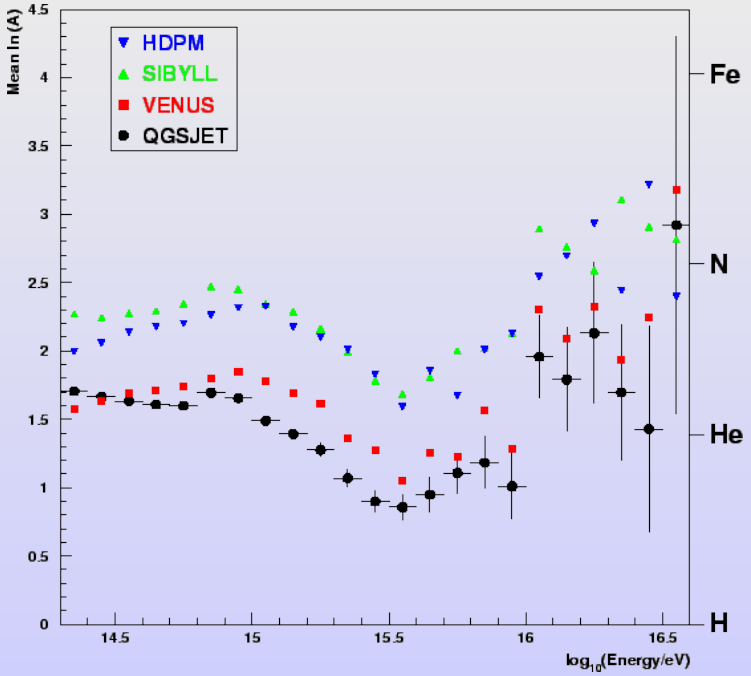


Zdroje musí ležet blíže než 50 Mpc !
(vzdálenost kupy galaxií v Panně je 17 Mpc)



Nejasnosti v interakcích při vysokých energiích

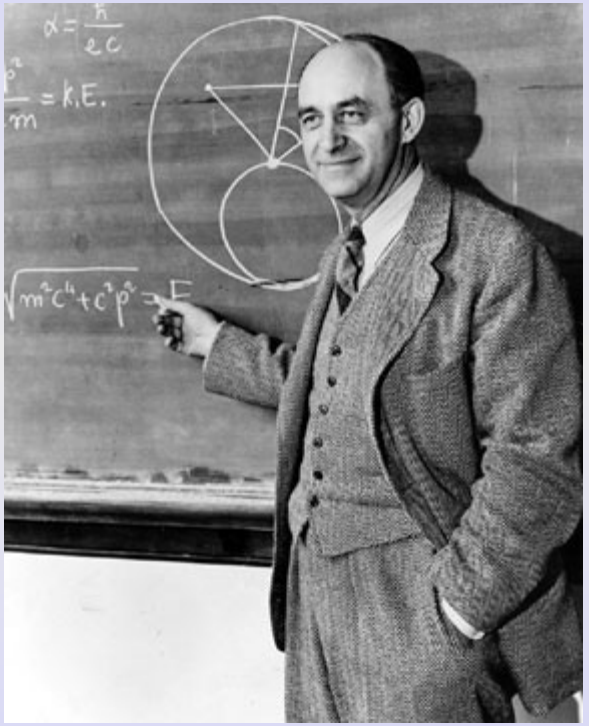
- Nejednoznačná identifikace primárních částic detekovaných pomocí atmosférických sprškek
- Programové simulace není možné ověřit na urychlovačích (Tevatron ~ 10^15 eV, budovaný LHC v CERN ~ 10^17 eV)

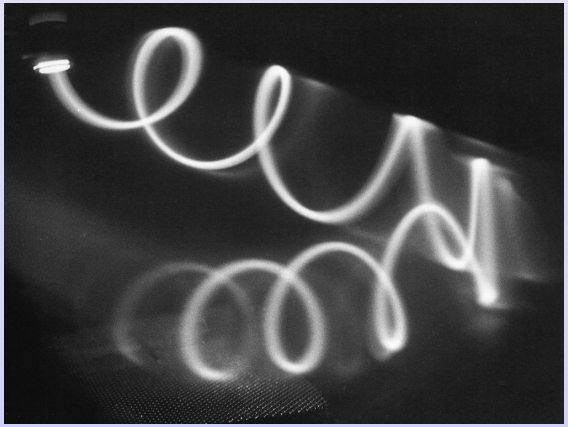


Procesy urychlování

Fermiho mechanismus

Enrico Fermi (1949): Částice pomocí pružných odrazů na nahodných nehomogenitách magnetického pole v mezihvědných oblacích získávají energii.



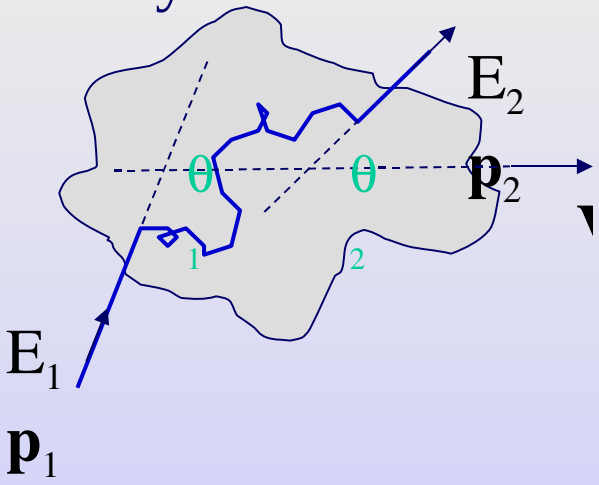


Jak to funguje?

- Poněvadž jsou změny magnetické pole v průběhu srážky zanedbatelnéné, je tato kolize ekvivalentní nárazu rychlého míčku s pomalu se pohybující zdí.
- Pohyb částice uvnitř pole lze brát jako náhodný.
- Pravděpodobnost čelních srážek částice s magnetickou nehomogenitou je vyšší než nárazů částice do vlny zezadu.

- Energetický zisk $\Delta E / E \sim (V/c)^2$

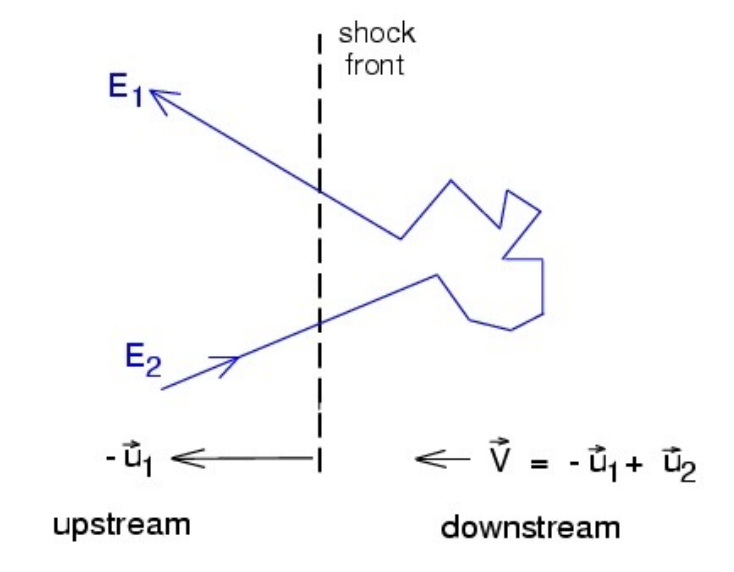
kde V je rychlost oblaku (typická rychlost zvuku v mezihvězdném prostředí ~ 10 km/s)



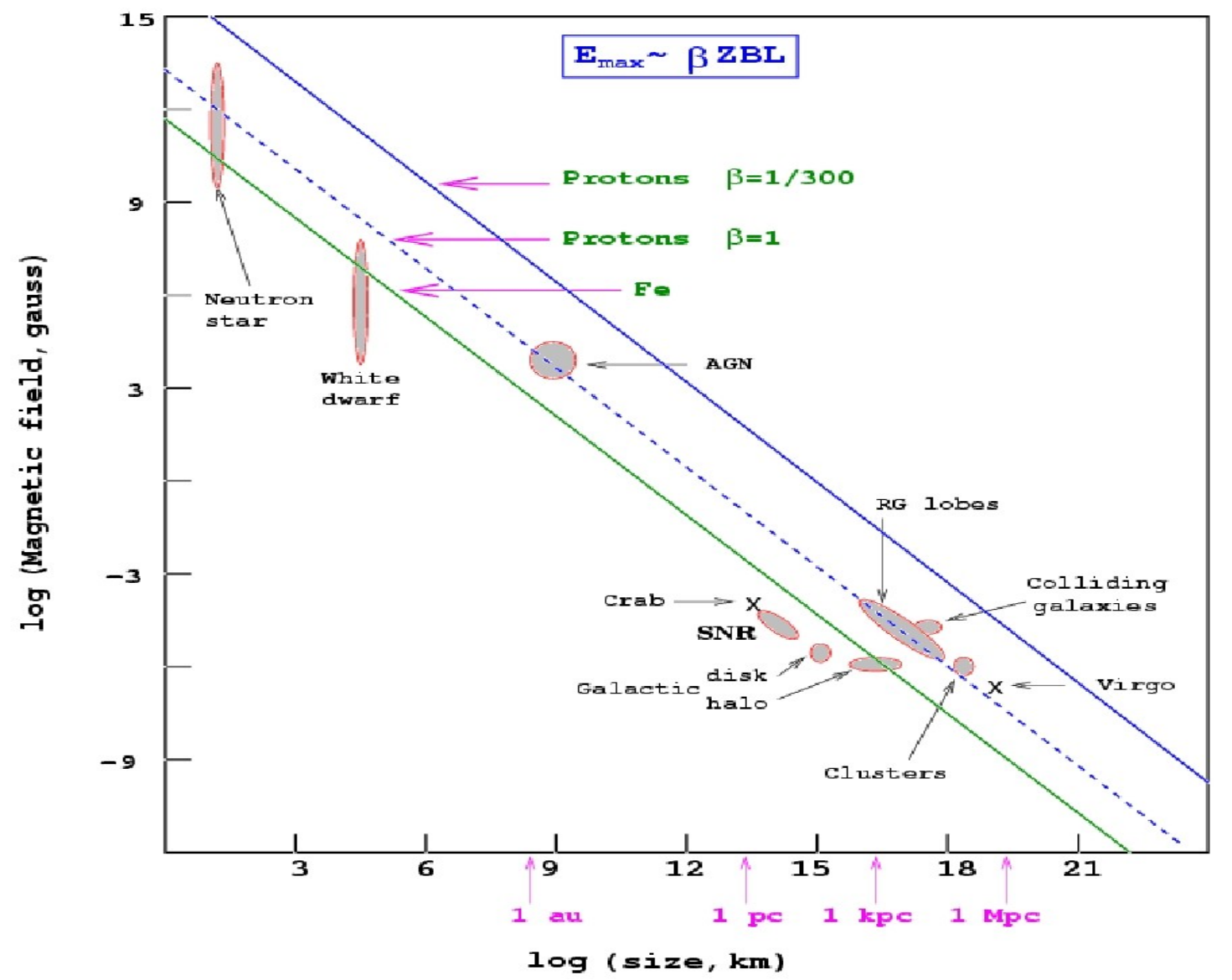
Tento případ nazýváme urychlování druhého řádu.
Doba potřebná k urychlení na požadovanou energii je příliš dlouhá!

Urychlování rázovými vlnami

- Rychle se pohybující rázové vlny (materiál vyvržený při výbuších supernov má rychlost V ~ 10 000 km/s)
- Mnohem účinnější (pohyby nejsou náhodné)
- Energetický zisk $\Delta E / E \sim \beta$
- Tento případ nazýváme urychlování prvního řádu.
- Stačí ~ 1 měsíc na urychlení



Maximální dosažitelná energie



Klady:

- produkuje mocninné spektrum $N(E)\mathrm{d}E \propto E^{-x}\mathrm{d}E$

  s indexerm $x = 1 + \frac{P_{esc}}{\Delta E / E} = \frac{r+2}{r-1}$

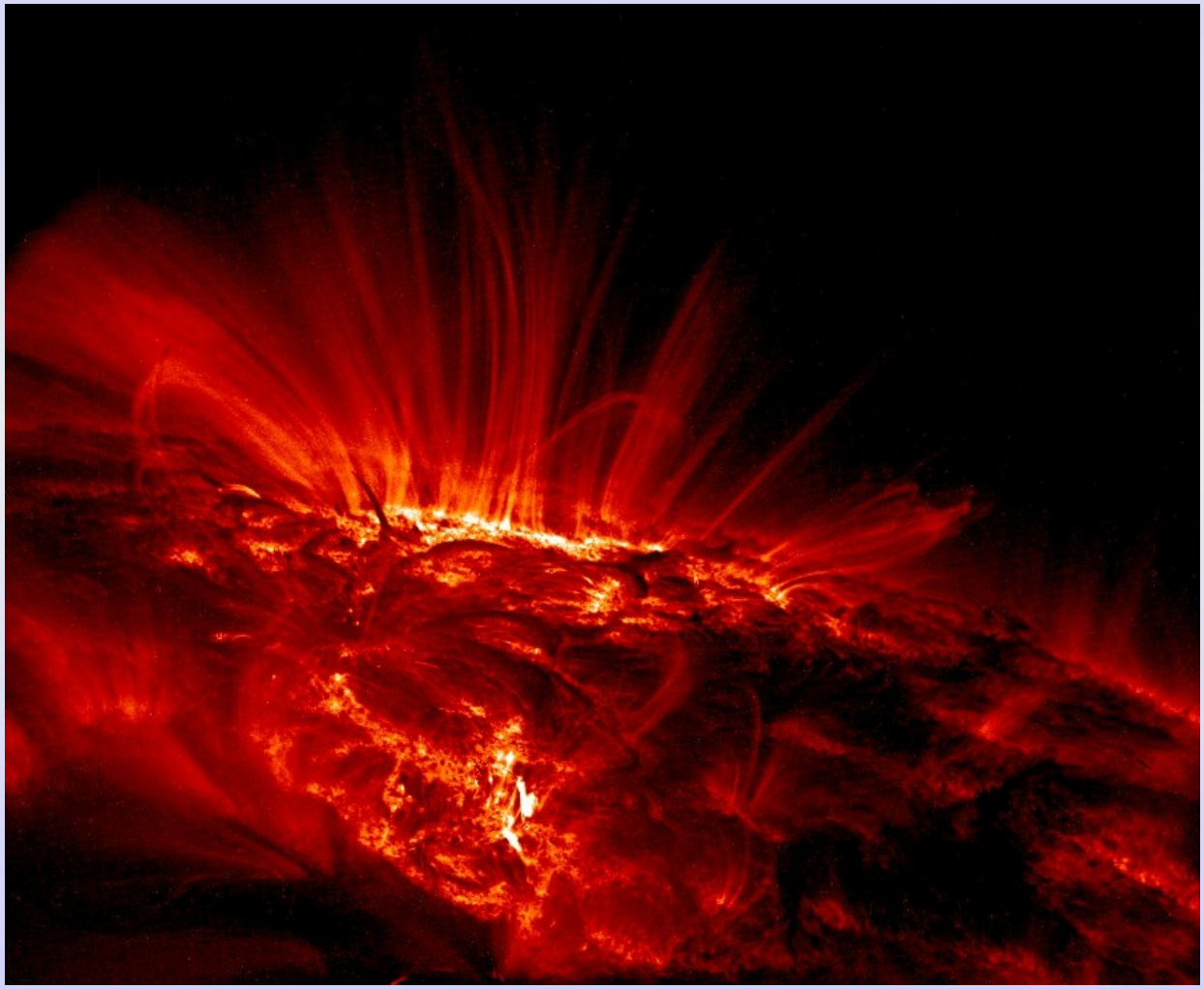
- pozorováno u Slunce (družice Pioneer 10)

Problémy:

- chybí potvrzení laboratorními pokusy
- nebyly pozorovány silné turbulence v rázových vlnách
- nejvyšších energií se u astronomických objektů se dociluje jen při potlačení energetických ztrát

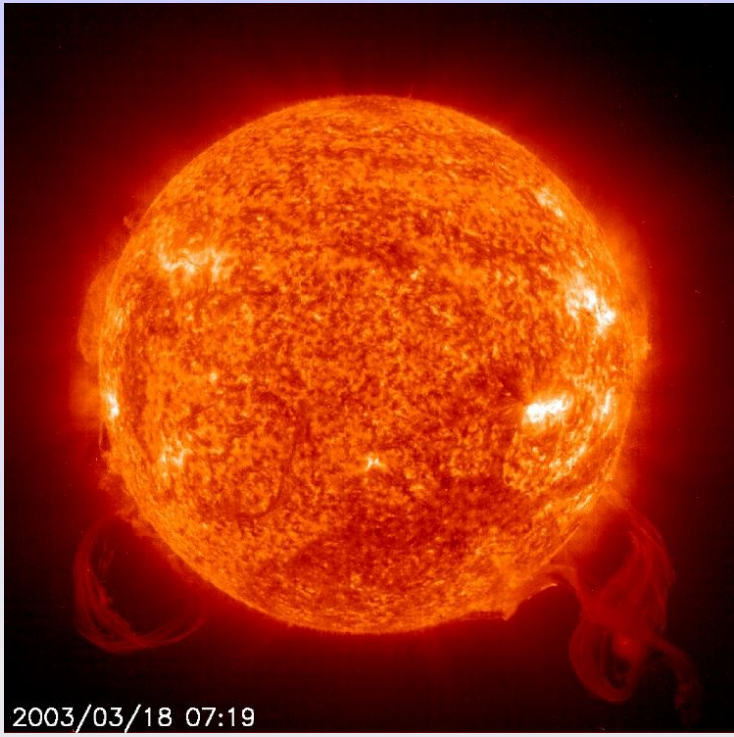
Magnetická rekonexe

(řešení záhady ?)



Klady:

- “Denně” pozorována na Slunci
- Zdá se, že k ní dochází kdekoli v magnetizované plazmě
- Úspěšné experimenty v laboratořích



Obtíže:

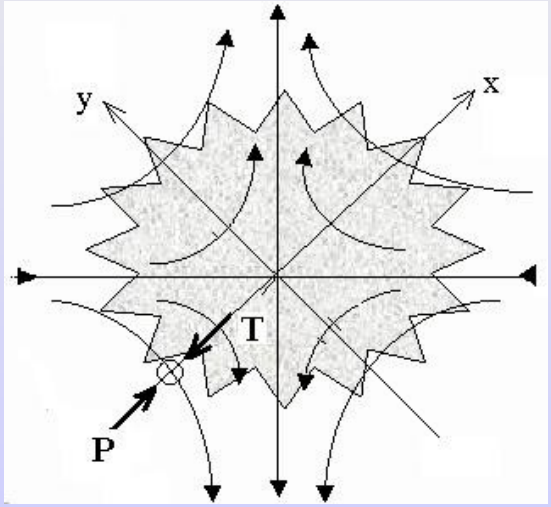
- Složité modelování magnetohydrodynamickými rovnicemi
- Nejasné energetické ztráty urychlovaných částic
- Dokáže produkovat mocninné spektrum ?

Vznik magnetické rekonexe

• Magnetická rekonexe je lokální narušení podmínky zamrznutí magnetického pole v plazmatu (není ideálně vodivé).

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

• Nastává v oblasti, kde se propojují opačně orientované siločáry magnetického pole (tzv. X-point nebo nulový bod). Vyskytují se u multipólových zdrojů.



- V nulovém bodě je magnetické pole velmi slabé:
  $B_x = y$, $B_y = x$ (magnetické siločáry jsou hyperboly)
- Sílu magnetického napětí T působící na libovolný element plazmy vyrovnává síla magnetického tlaku P. Výsledná Lorentzova síla je nulová:

$$\mathbf{j} \times \mathbf{B} = \frac{1}{\mu}(\mathbf{B} \cdot \nabla)\mathbf{B} - \nabla\left(\frac{B^2}{2\mu}\right).$$

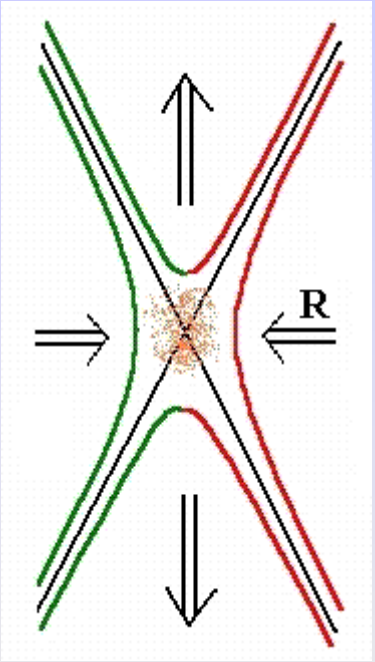
- Malá porucha: $B_x = y$, $B_y = \alpha\ x$, kde $\alpha > 1$
- Ampérův zákon $\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{j}$ z čehož plyne $j_z = \frac{\alpha - 1}{\mu}$

a výsledná Lorentzova síla

$$\vec{j} \times \vec{B} = -\frac{(\alpha^2 - 1)\alpha^2 x}{\mu}\,\hat{x} + \frac{(\alpha^2 - 1)y}{\mu}\,\hat{y}$$

způsobuje narůstání původní perturbace (“uzavírání nůžek”), což znamená, že původní rovnovážné uspořádání není stabilní

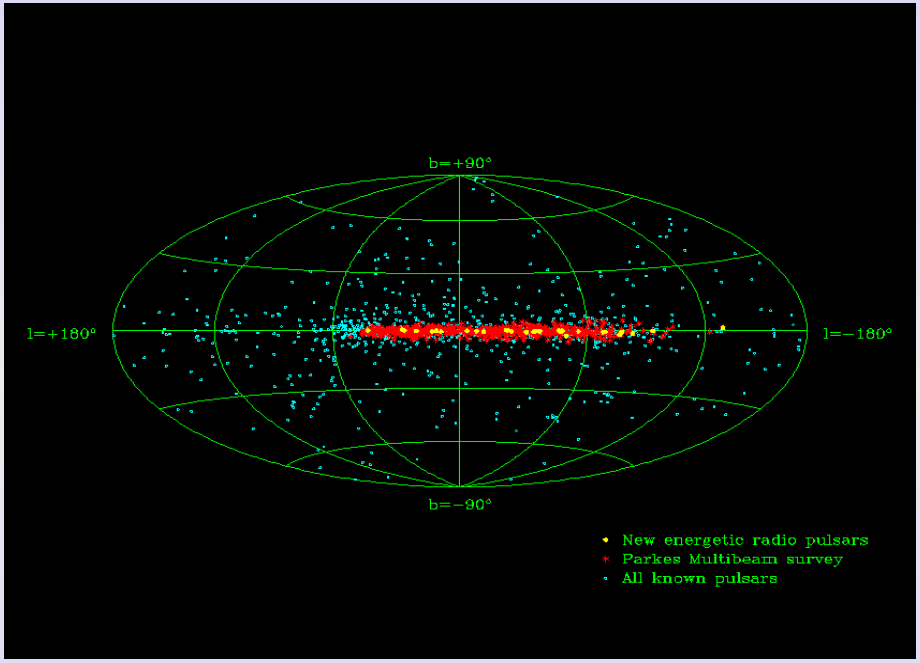
Lorentzova síla má velikost R = P - T



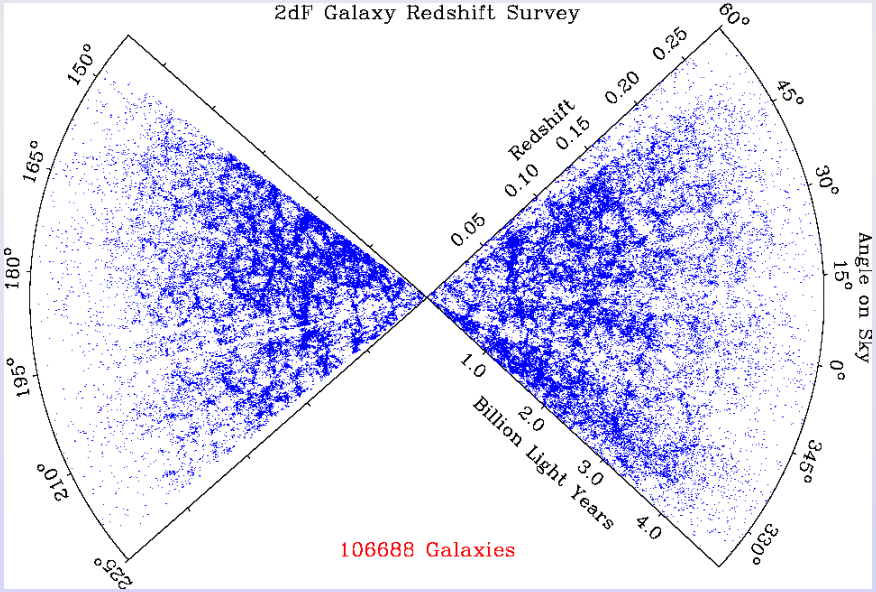
Výsledkem celého procesu je vznik silného proudu ve směru osy z, jenž má za následek vytvoření elektrického pole.

Polohy zdrojů

- Galaktické - koncetrované k disku Galaxie



- Extragalaktické zdroje

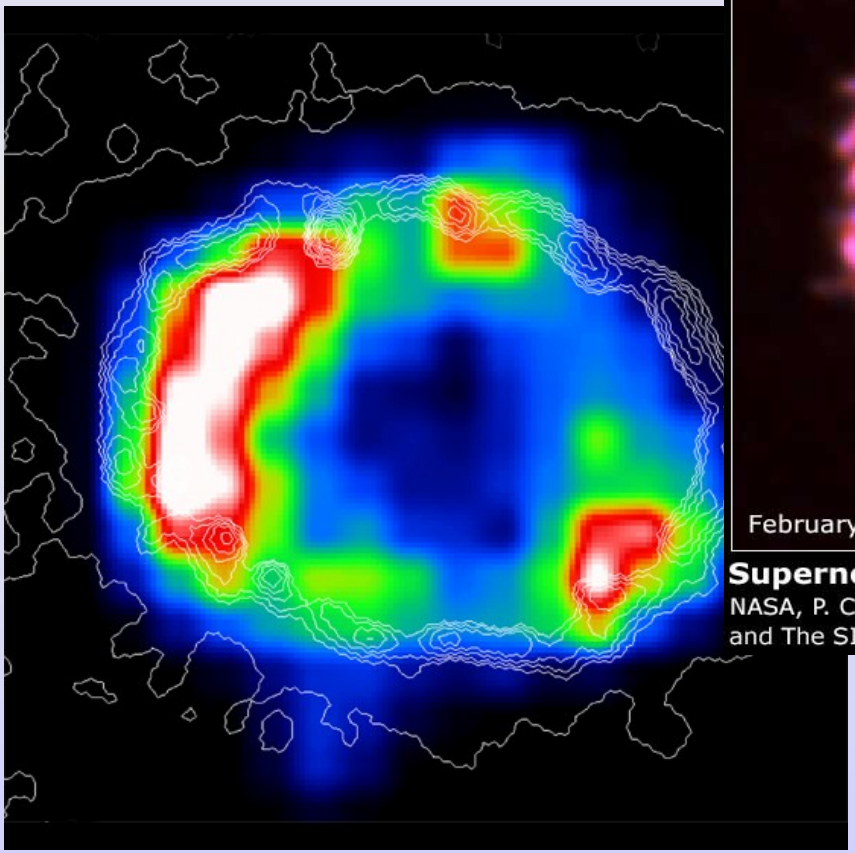


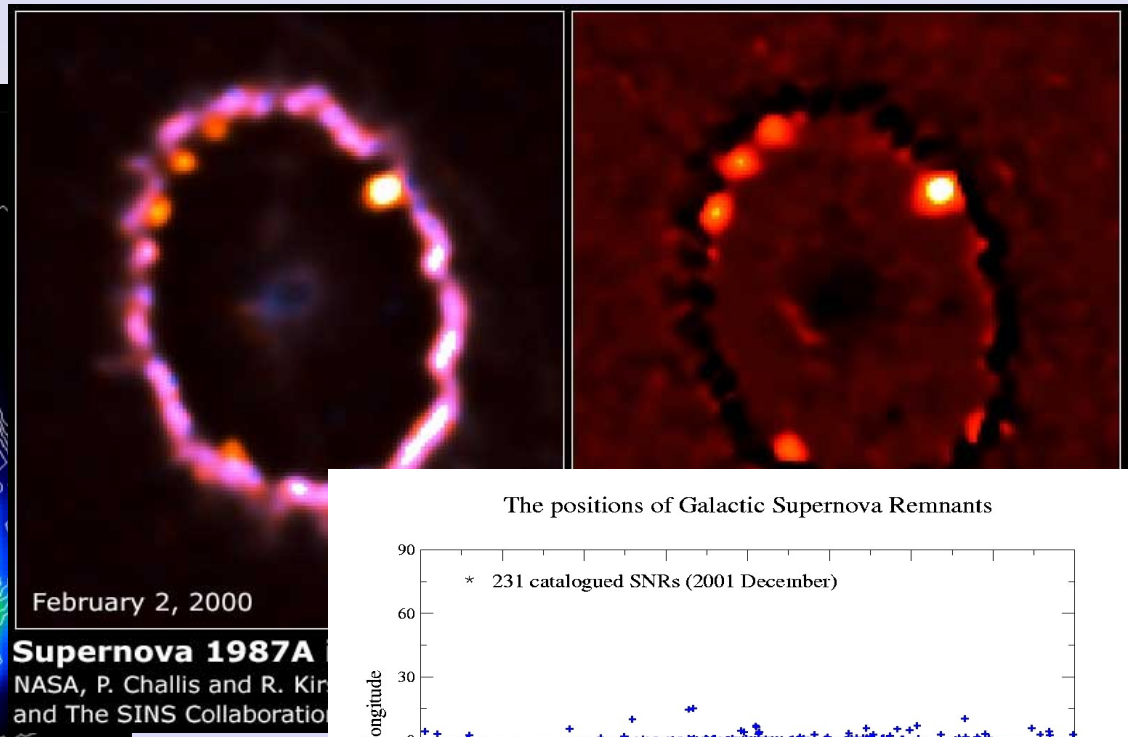
Galaktické zdroje

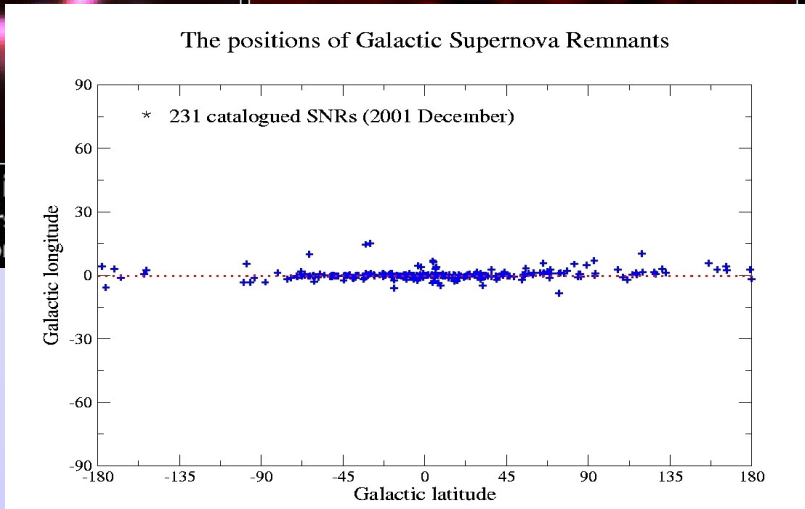
- Zbytky supernov
- Neutronové hvězdy
- Ranné hvězdy typu T Tauri
- Těsné dvojhvězdy (s neutronovou hvězdou nebo černou dírou)

Zbytky po výbuchu supernov

- určitě do oblasti kolene (3 výbuchy za 100 let)
- energie do 10^18 eV ?

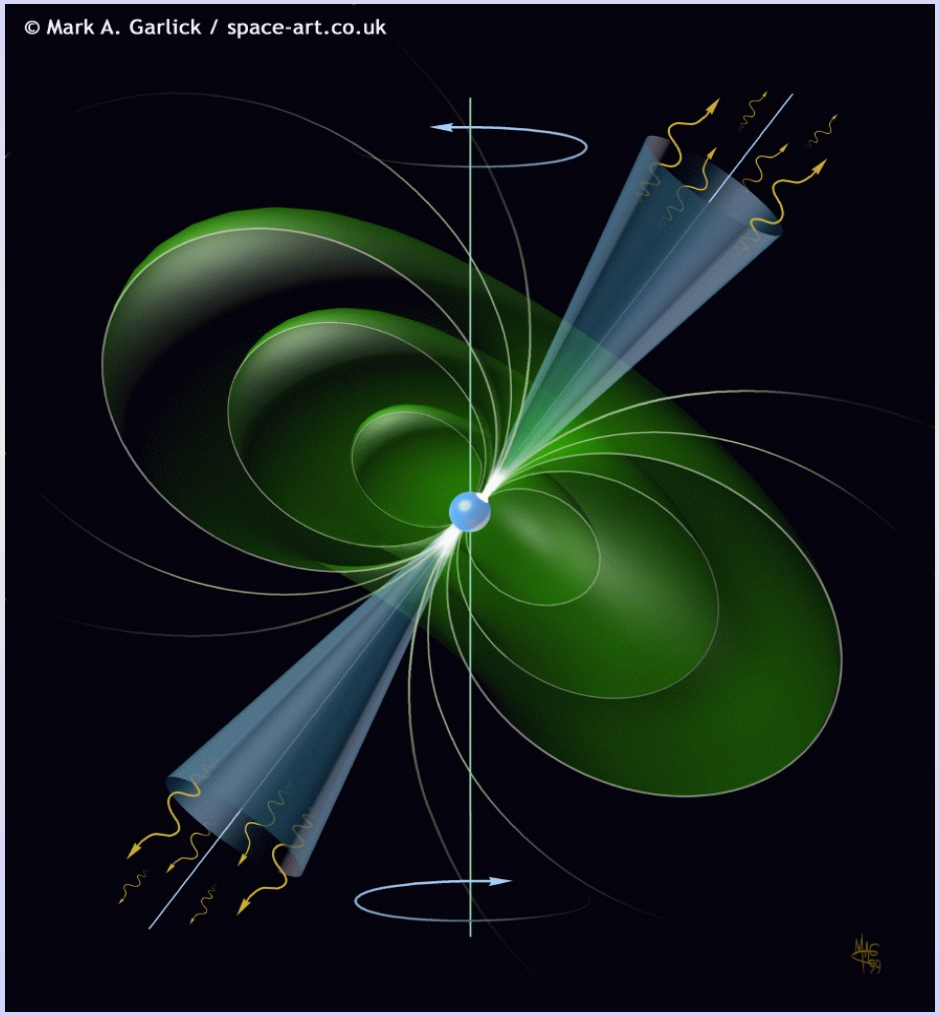




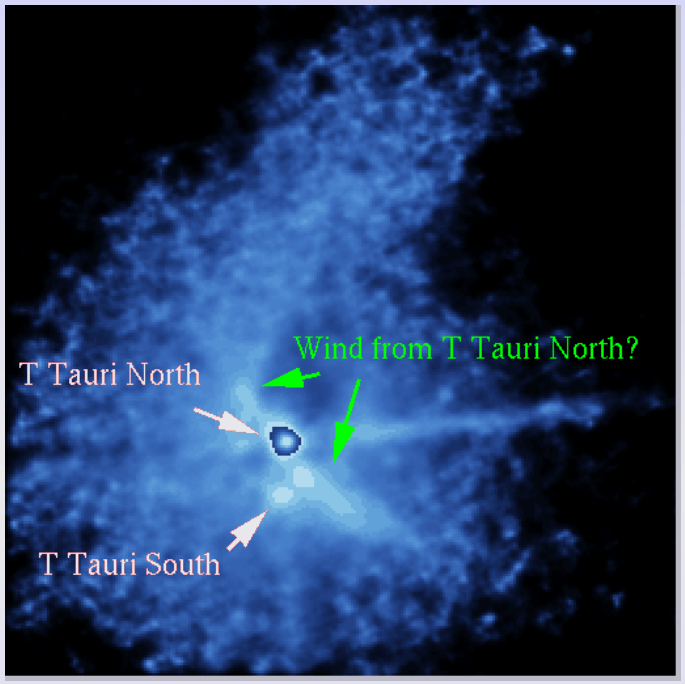


Neutronové hvězdy

- silné magnetické pole (až 10^15 eV)
- rychlá rotace (< 10 ms)
- korelace s gal. diskem (velikost mag. pole Galaxie)
- převážně atomy Fe



Hvězdy typu T Tauri



Těsné dvojhvězdy

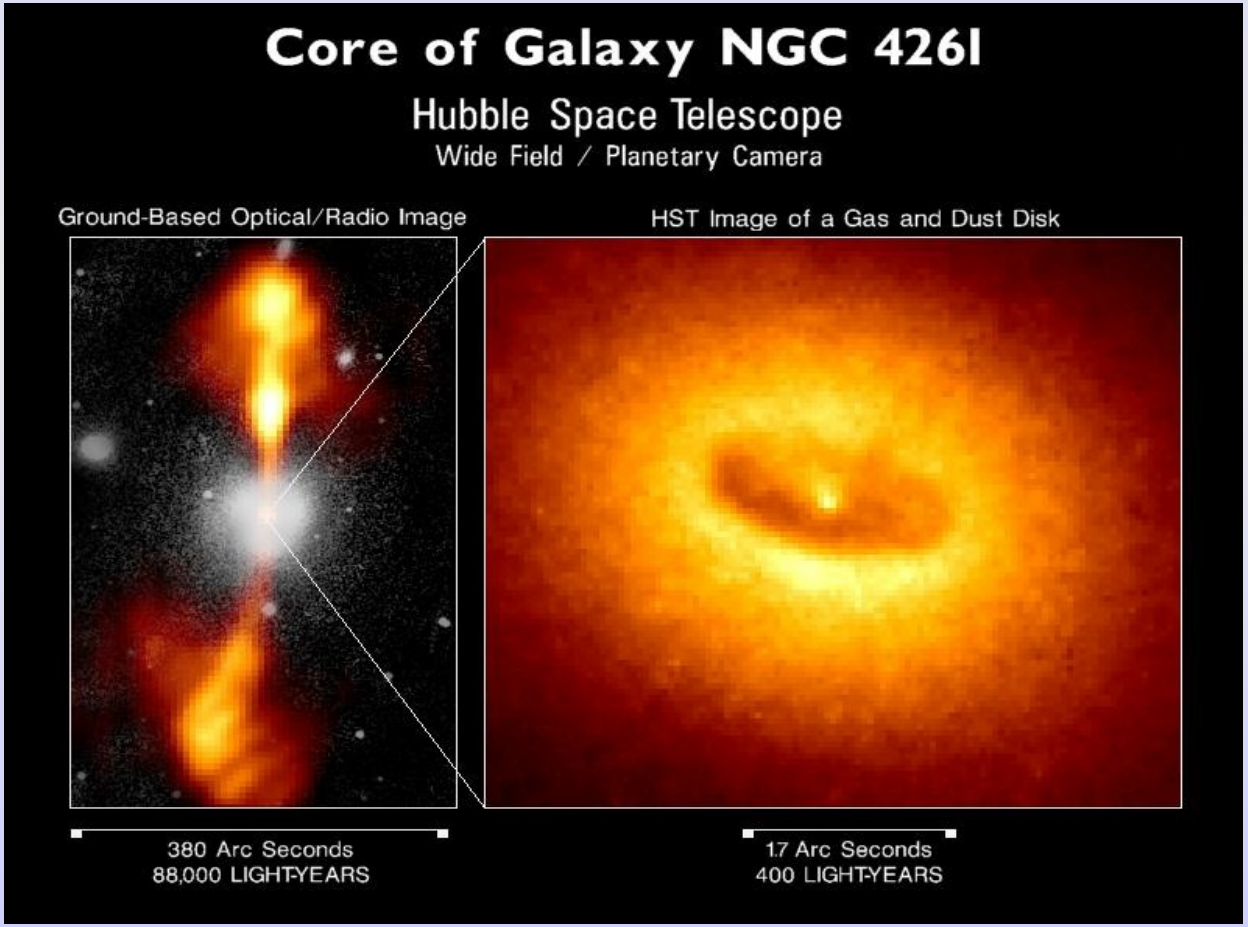
obdoba aktivních galaktických jader v malém měřítku

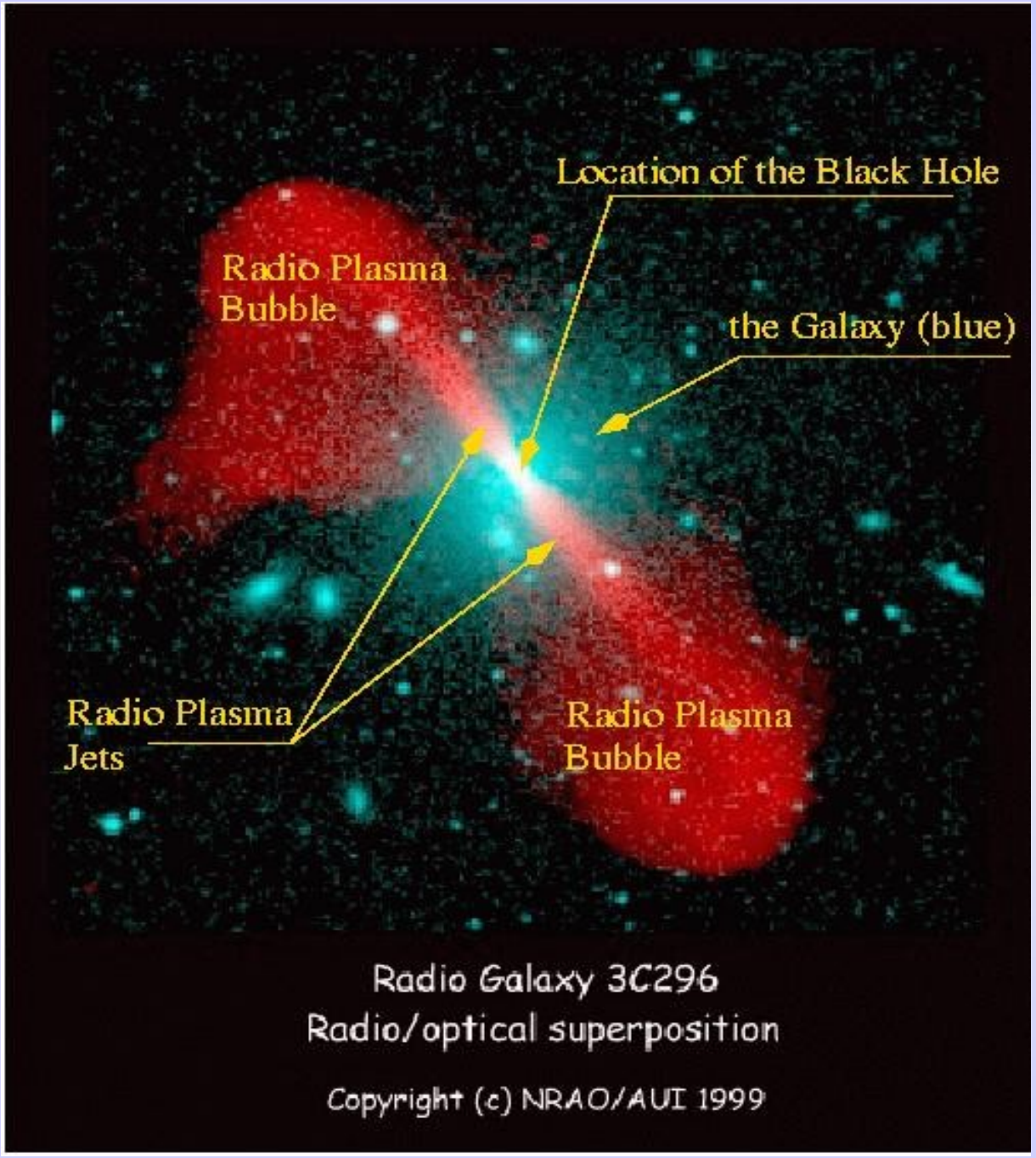
Mimogalaktické zdroje

(Buď “lokální“ nebo tvrdé spektrum)

- Aktivní jádra galaxií
- Astrofyzikální výtrysky
- Horké skvrny rádiových laloků v radiogalaxiích
- Srážky galaxií
- Velkorozměrné struktury galaxií
- Záblesky gama záření
- Neaktivní kvasarv

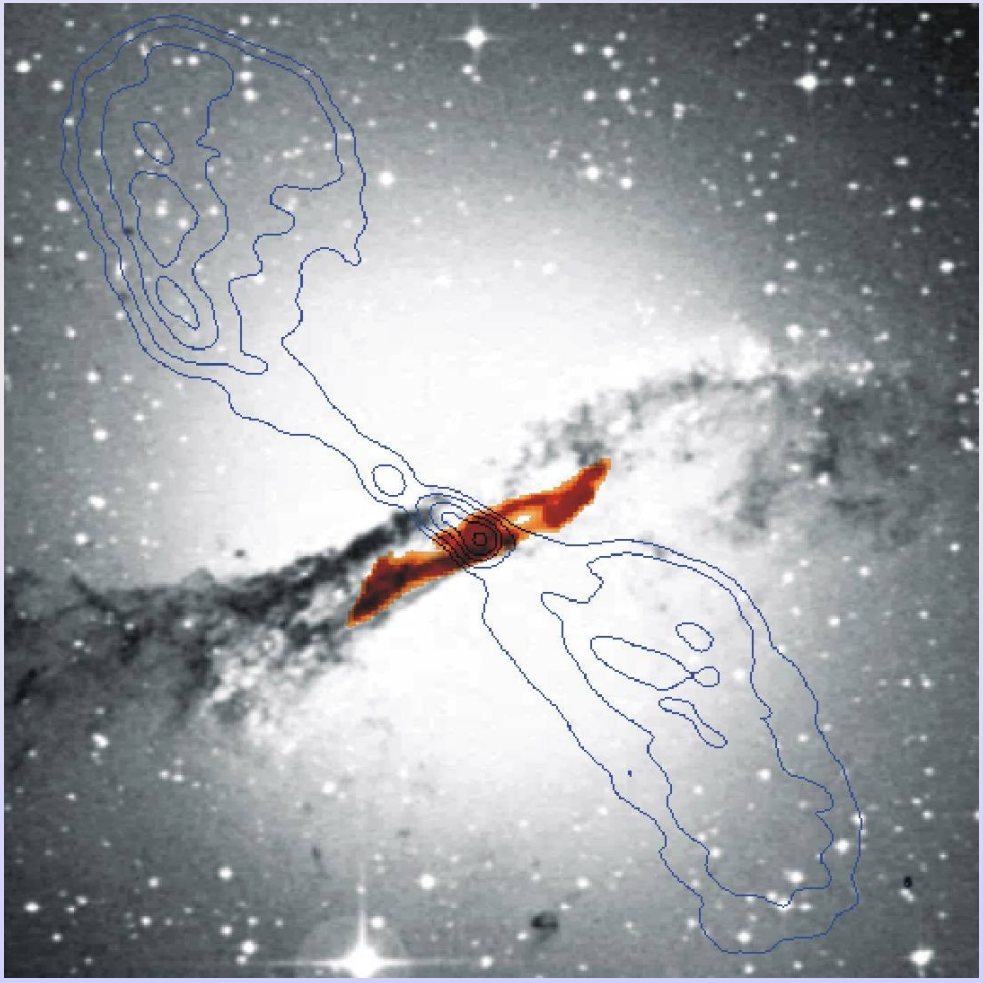
- neznáme přesné parametry (mag. pole, hustota, ...)
- ztráty energie při velké svítivosti objektu
- spinflip (proton - neutron - proton) řeší jen < 10^19 eV)
- rekonexe v akrečním disku




Location of the Black Hole
Radio Plasma Bubble
the Galaxy (blue)
Radio Plasma Jets
Radio Plasma Bubble
Radio Galaxy 3C296
Radio/optical superposition
Copyright (c) NRAO/AUI 1999

Radiogalaxie

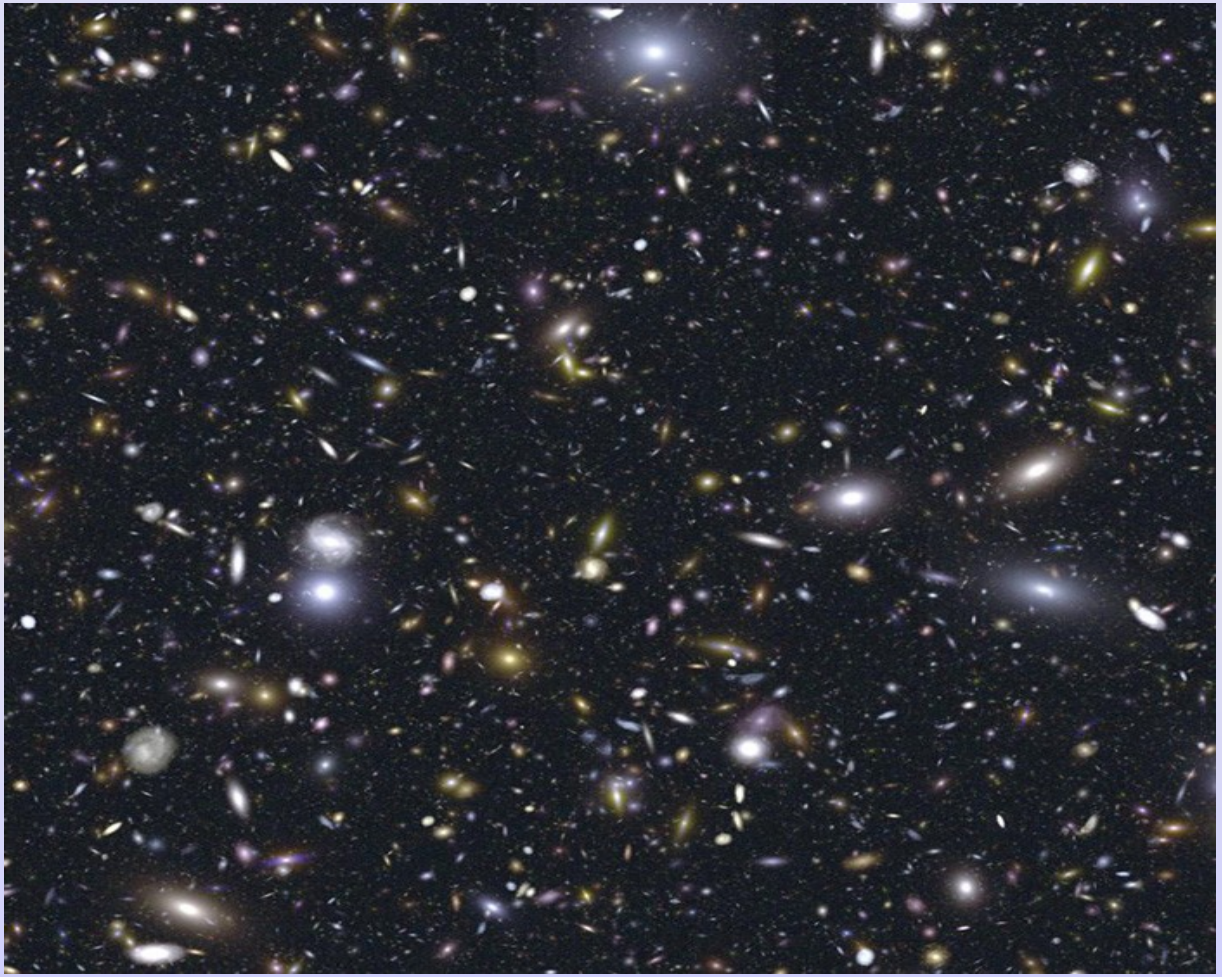
- konce jetů do mezigalaktickém prostoru
- dříve favorizovaný zdroj
- částice uniká do “volného prostoru“



Colliding Galaxies NGC 4038 and NGC 4039 HST • WFPC2

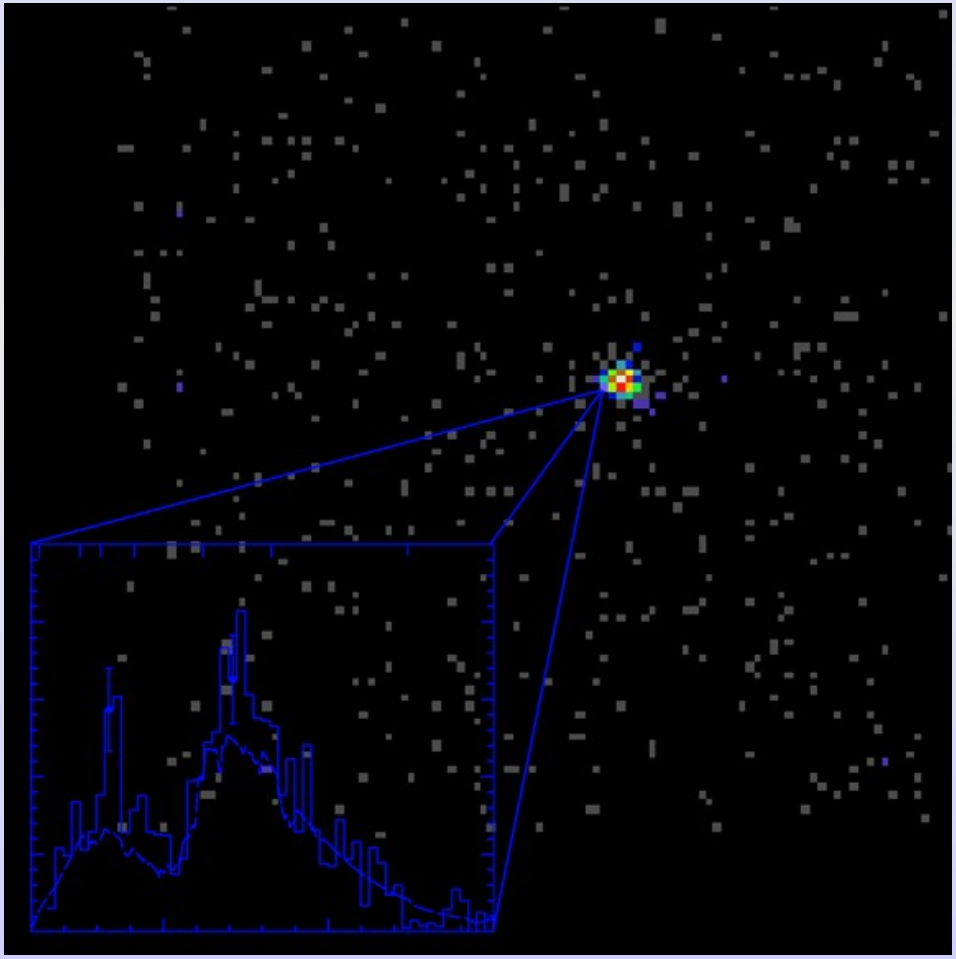
PRC97-34a • ST ScI OPO • October 21, 1997 • B, Whitmore (ST ScI) and NASA

- shluky galaxií
- vzniknou během vývoje po Velkém třesku (pokud je temná hmota “chladná“)



GRBs:

- nejenergetičtější proces ve vesmíru
- zdroje neznámé (kolaps neutronové hvězdy, hypersupernovy)
- kosmologické vzdálenosti



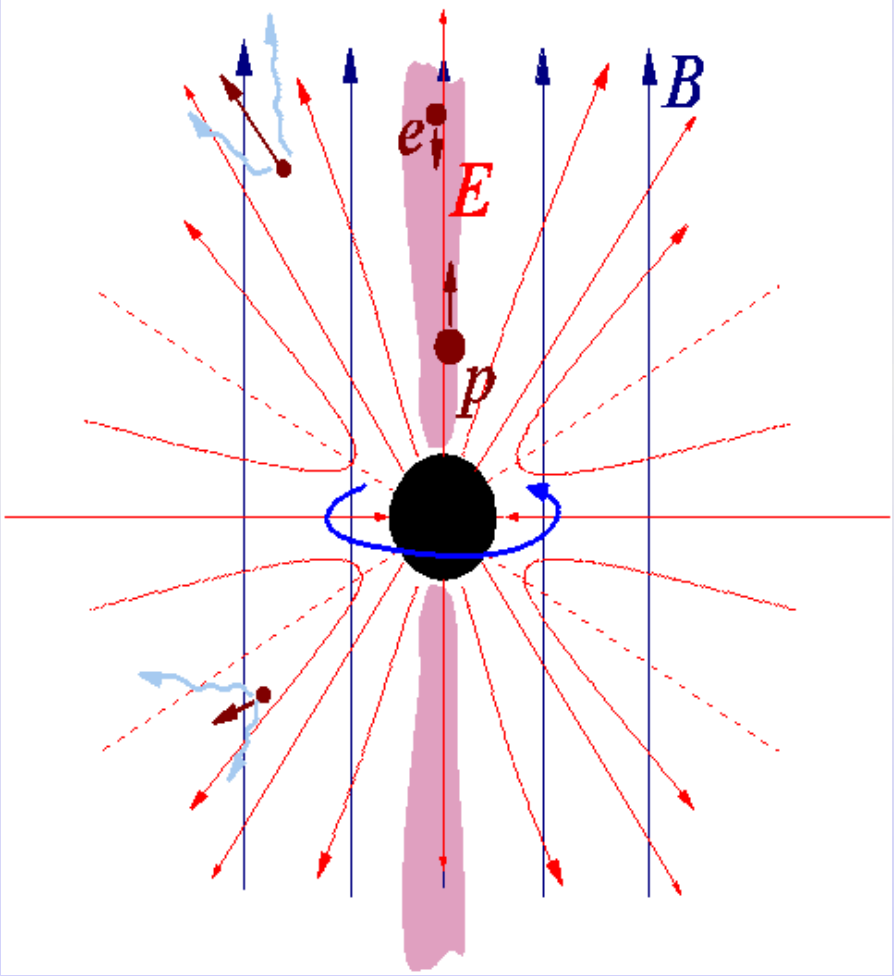
Supermasivní černé díry jako lineární urychlovače

Urychlení podél rotační osy

=> malé energetické ztráty

S. Colgate předpokládá rekonexi spirálovitých magnetických polí vzniklých v průběhu formování galaxií:

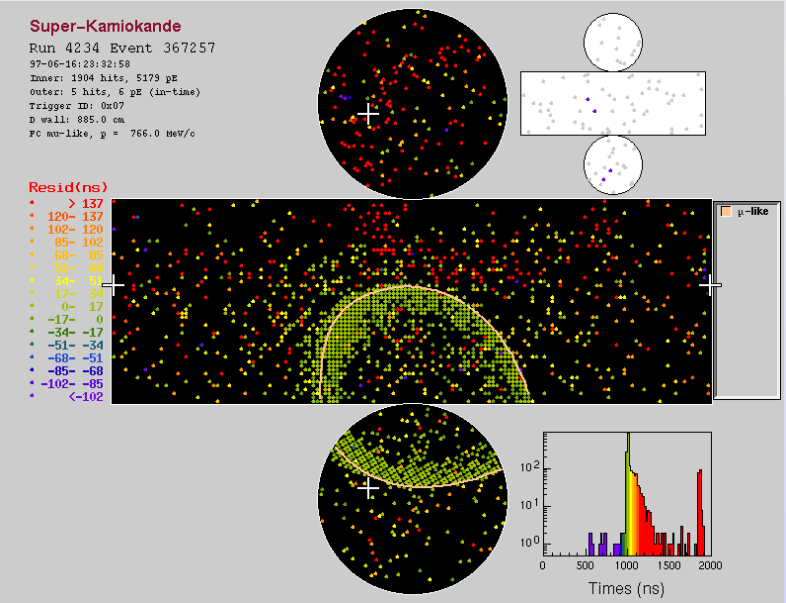
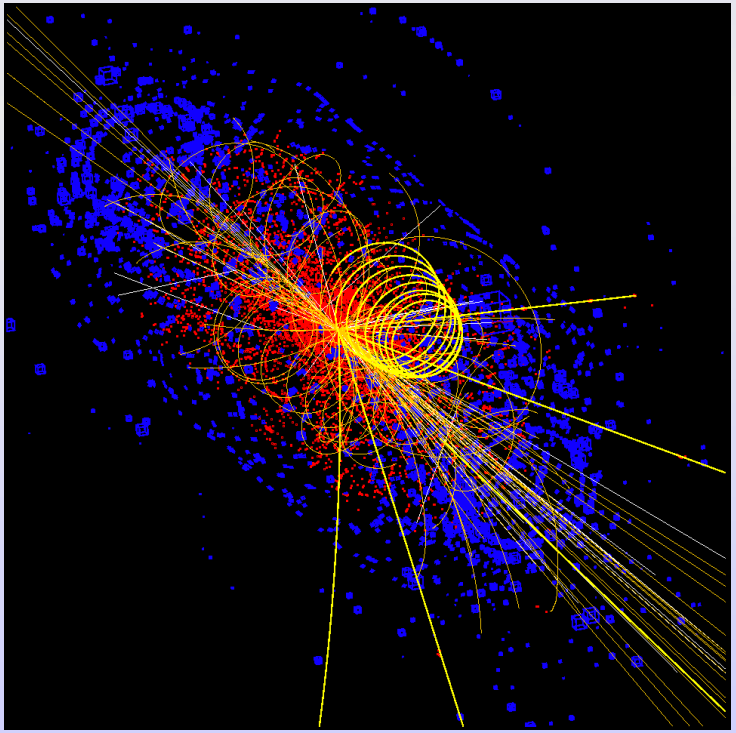
$$E_{\max} = 10^{20} \left(\frac{M_{\mathrm{bh}}}{10^{8} M_{\mathrm{sun}}} \right) \left(\frac{B}{10^{4}\,\mathrm{G}} \right) \mathrm{eV}$$



Jiné teorie o původu extrémně energetických částic

- Rozpady supertěžkých částic
- Z-bursty
- Vypařování primordiálních černých děr
- spousty dalších

Předpovídají převahu neutrin a gama fotonů oproti protonům (nejsou zastoupena těžší jádra).

Rozpady supertěžkých částic

- Zbytky inflačního rozpínání po Velkém třesku.
- Doba života nepřímoúměrná hmotnosti.
- Dnes mají být tvořeny z objektů vzniklých během narušení symetrií na konci inflace.