

Astrofizyka promieni kosmicznych-1

Henryk Wilczyński

krótka historia

- 1912 V.Hess: odkrycie
- 1930-1940 cząstki naładowane - protony
- 1934 Baade, Zwicky: supernowe źródłem energii?
- 1938 P.Auger: $E > 10^{15}$ eV, wielkie pęki
- 1949 E.Fermi: teoria przyspieszania
- 1962 J.Linsley: $E > 10^{20}$ eV
- 1966 Greisen, Zatsepin, Kuzmin: obcięcie widma
- 1991 Fly's Eye: $E = 3.2 \cdot 10^{20}$ eV

co to są promienie kosmiczne?

„promienie kosmiczne”: **składowa korpuskularna**

- głównie jądra atomowe, od wodoru do uranu
- elektrony $\sim 1\%$
- antyprotony $\sim 10^{-4}$
- kwanty gamma?
- neutrino?

promienie kosmiczne

- **pierwotne**
 - galaktyczne
 - słoneczne
 - anomalne
- **wtórne**

składowa hadronowa



czy ważne?

Gęstość energii w Galaktyce

Promienie kosmiczne $\sim 1 \text{ eV/cm}^3$ ($\sim 10^{-10}$ cząstki/cm³)

Światło gwiazd $\sim 0.6 \text{ eV/cm}^3$

Pola magnetyczne $\sim 0.2 \text{ eV/cm}^3$

→ promienie kosmiczne istotnym elementem bilansu energii

Związek astrofizyki promieni kosmicznych z

astronomią (X, gamma, neutrino, radio)

fizyką cząstek

fizyką jądrową

kosmologią

fizyką plazmy

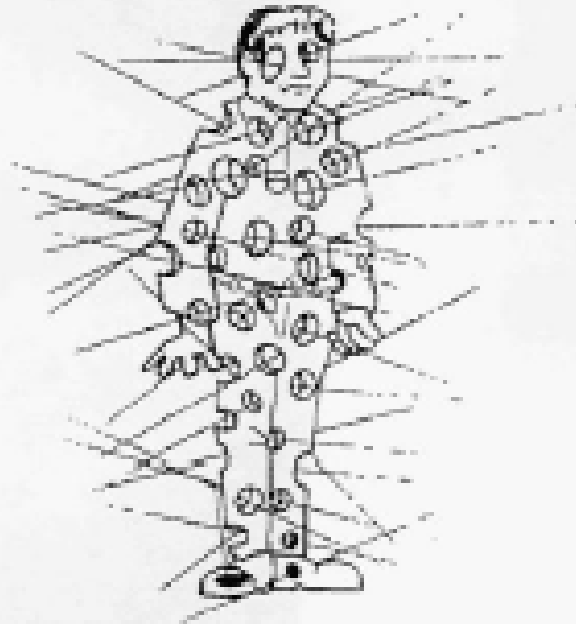
teorią transportu

geologią, kosmochronologią

geofizyką, fizyką atmosfery

...

czy ważne?



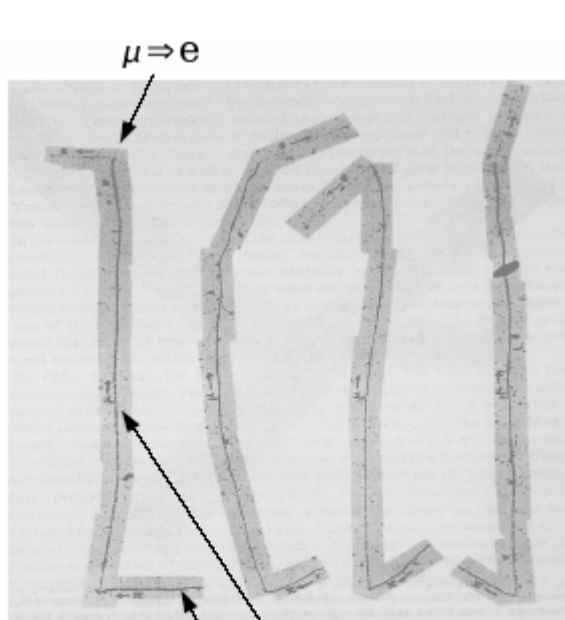
**100,000 COSMIC RAYS WILL
HIT YOU IN THE NEXT HOUR!**

promienie kosmiczne a fizyka cząstek

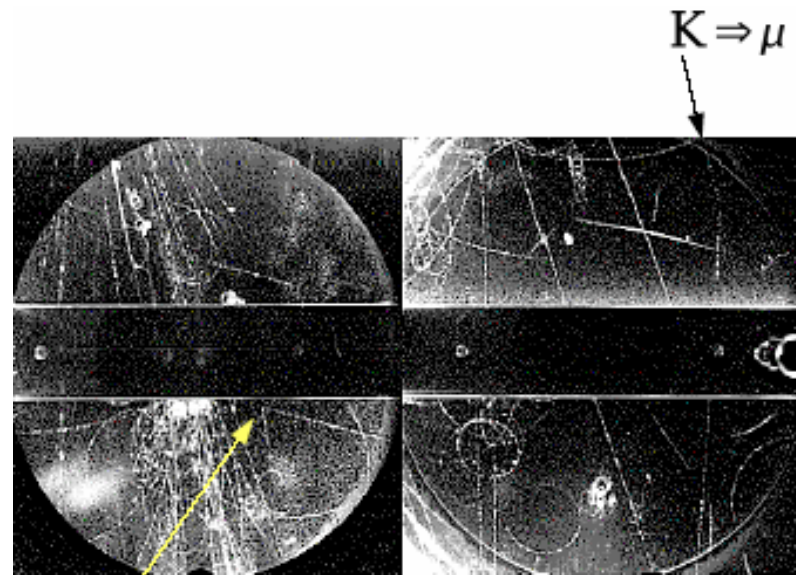
lata 40. i 50. XX w.

promienie kosm. źródłem cząstek o wysokich energiach

odkrycia w fizyce cząstek: e^+ , μ , π , anty-p, K, hiperony, ...



Powell et al 1947



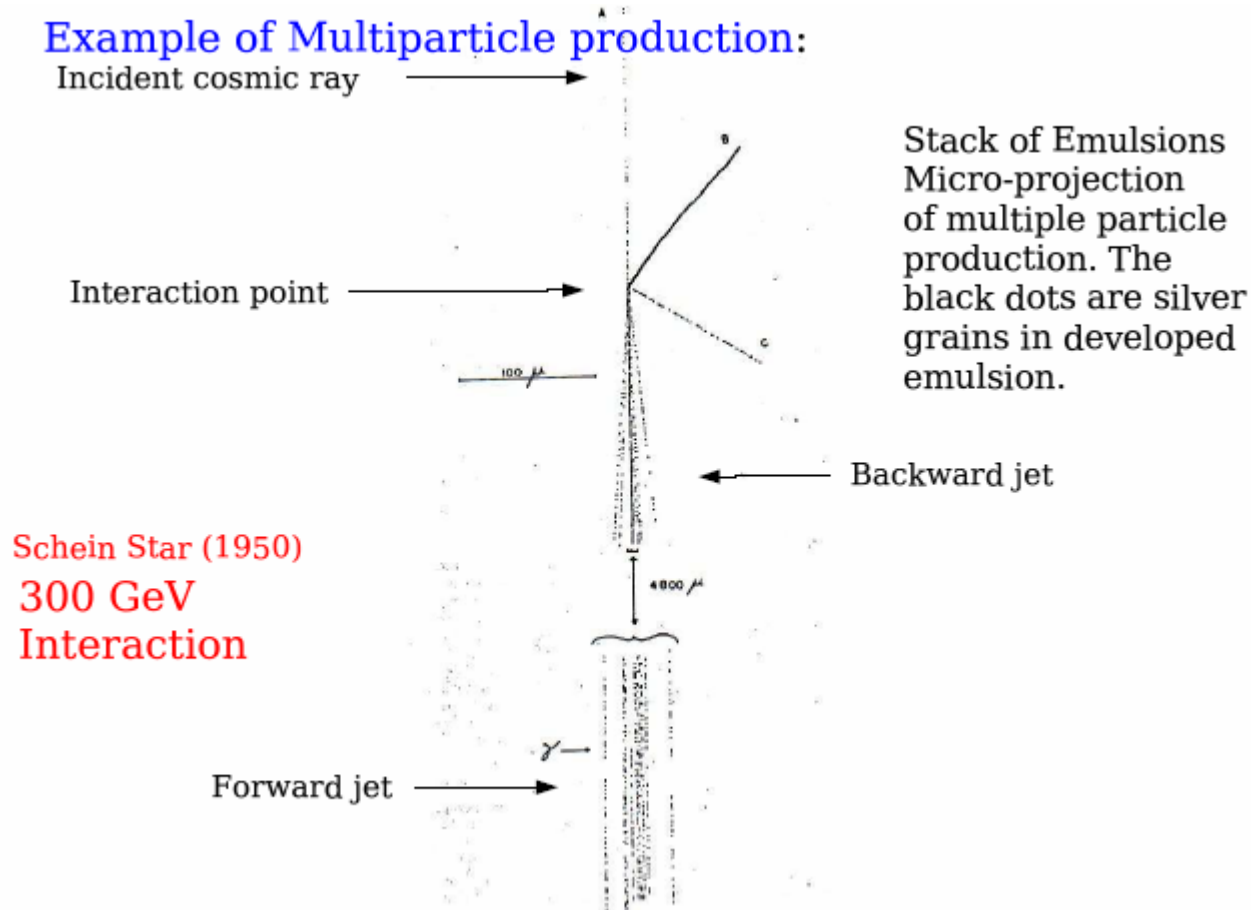
V particle

Rochester and Butler 1951

promienie kosmiczne a fizyka cząstek

oddziaływania jądrowe wysokich energii

Example of Multiparticle production:



promienie kosmiczne a fizyka cząstek

obecnie

fizyka cząstek: eksperymenty akceleratorowe

- ale energie prom. kosm. wyższe niż wiązek akceleratorów o 8 rzędów wielkości!

astrofizyka promieni kosmicznych ważnym obszarem zastosowania fizyki wysokich energii

- przekroje czynne na oddziaływania i fragmentację jąder
- produkcja fotonów w oddziaływaniach w pobliżu źródeł
- rozwój kaskad elektromagnetycznych
- ...

Skala odległości

jednostka astronomiczna: $1 \text{ au} \approx 150 \text{ mln km}$

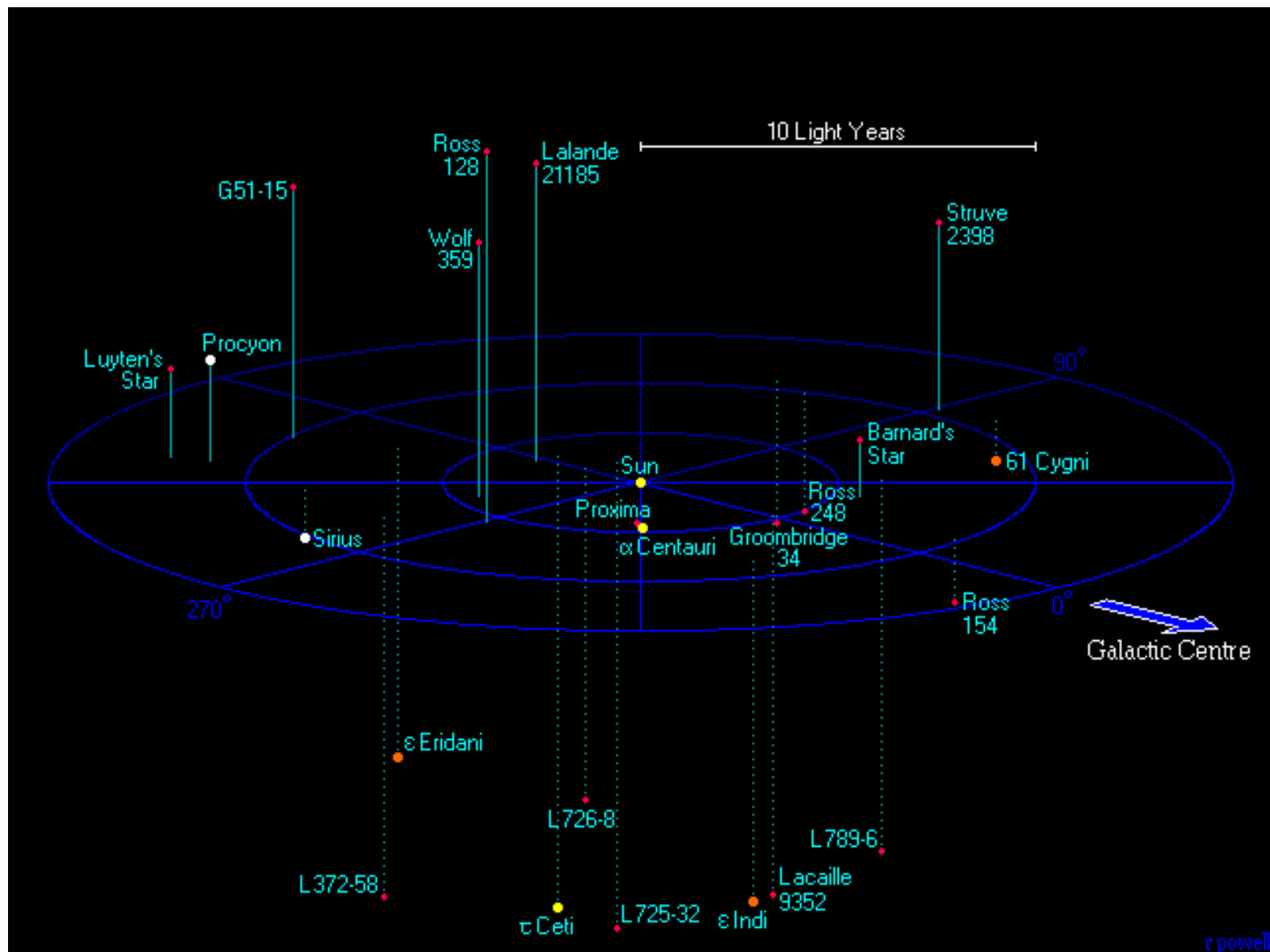
parsek: $1 \text{ pc} \approx 3.26 \text{ lat świetlnych} \approx 206\,000 \text{ au}$

średnica Galaktyki: $\sim 30 \text{ kpc}$

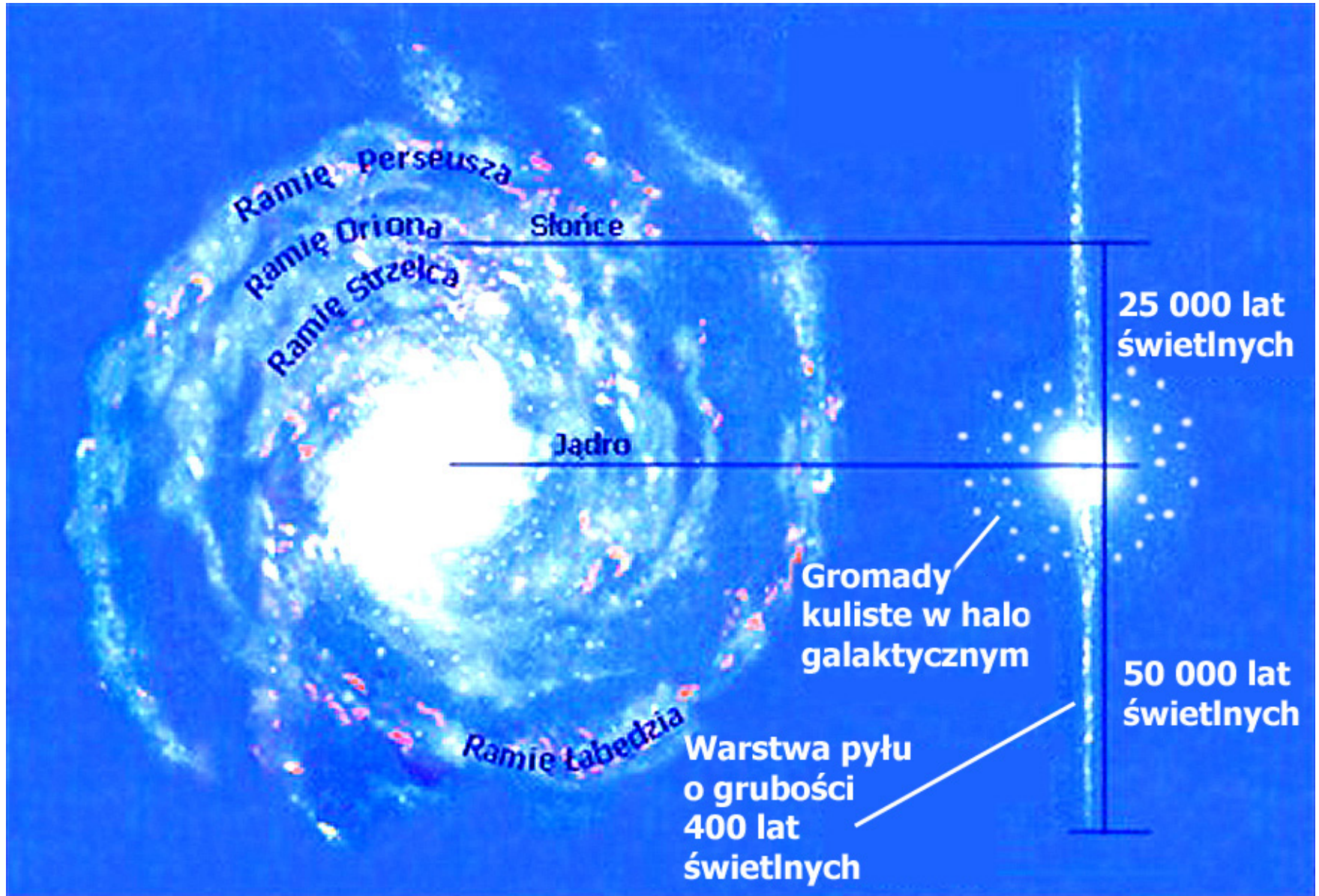
odległości do kwazarów: $> 500 \text{ Mpc}$

granica widzialnego Wszechświata: $\sim 4.5 \text{ Gpc}$

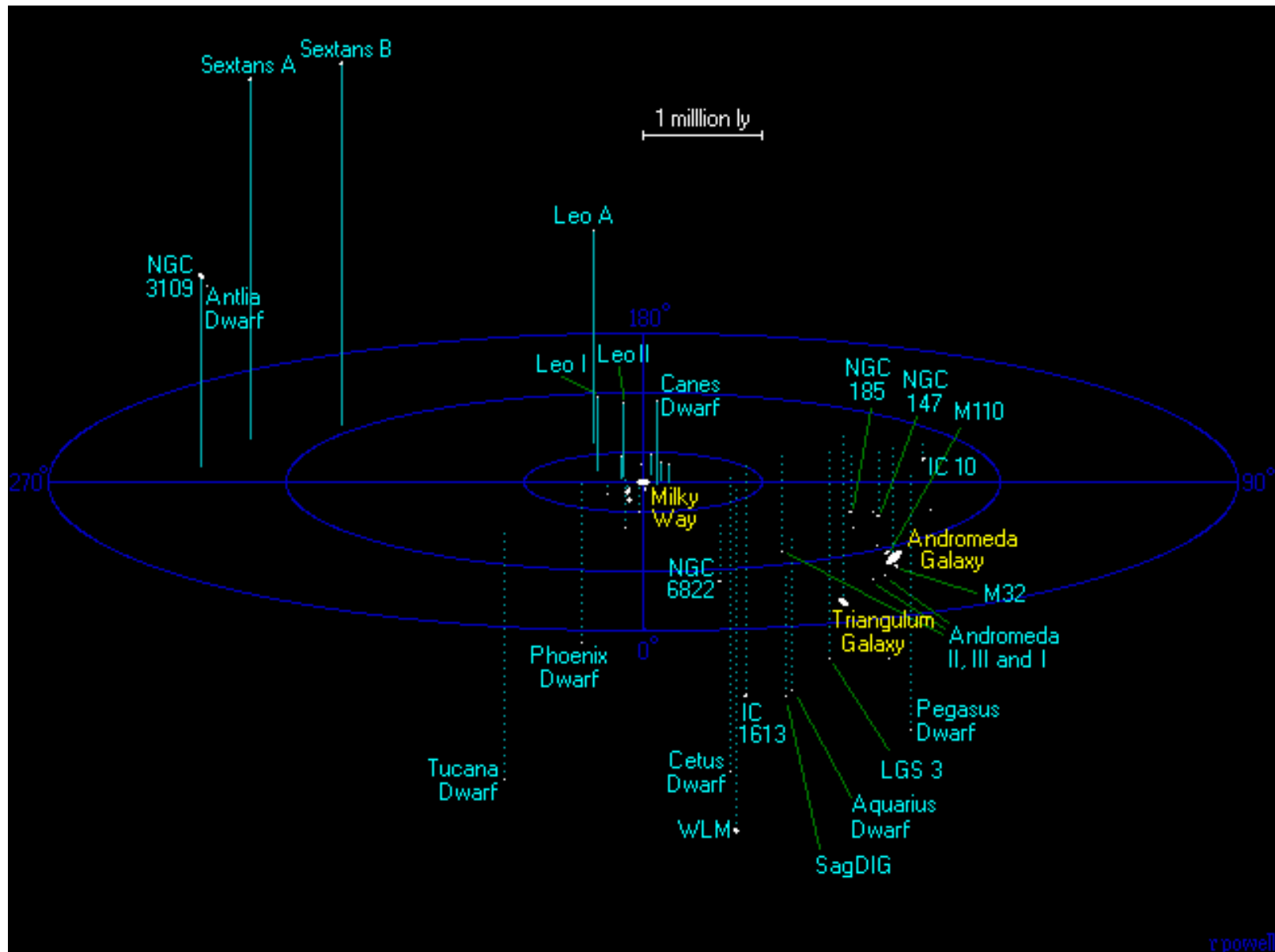
Sąsiedztwo Słońca w Galaktyce



Droga Mleczna-nasza rodzima Galaktyka



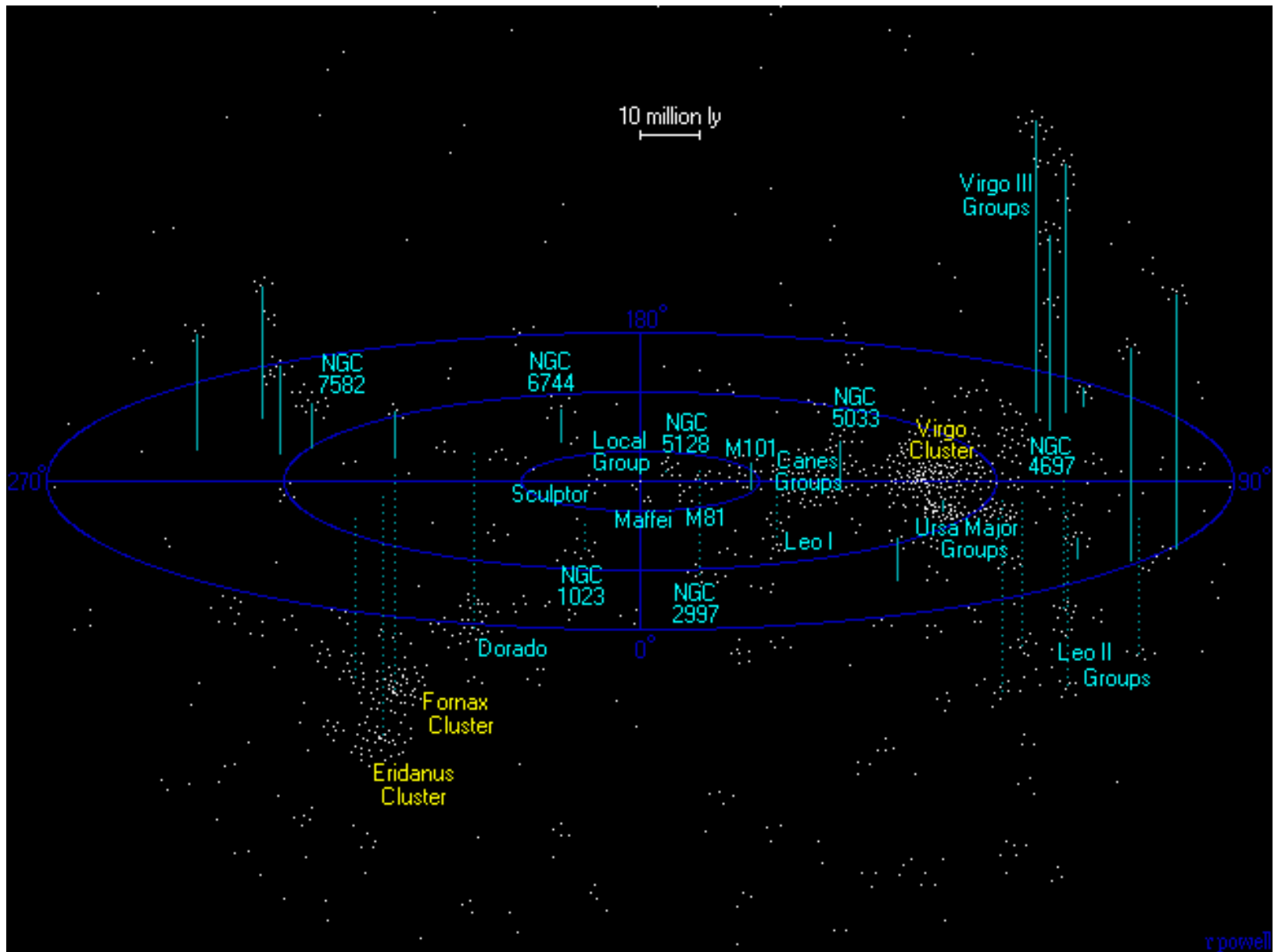
Grupa Lokalna



Wielka galaktyka w Andromedzie



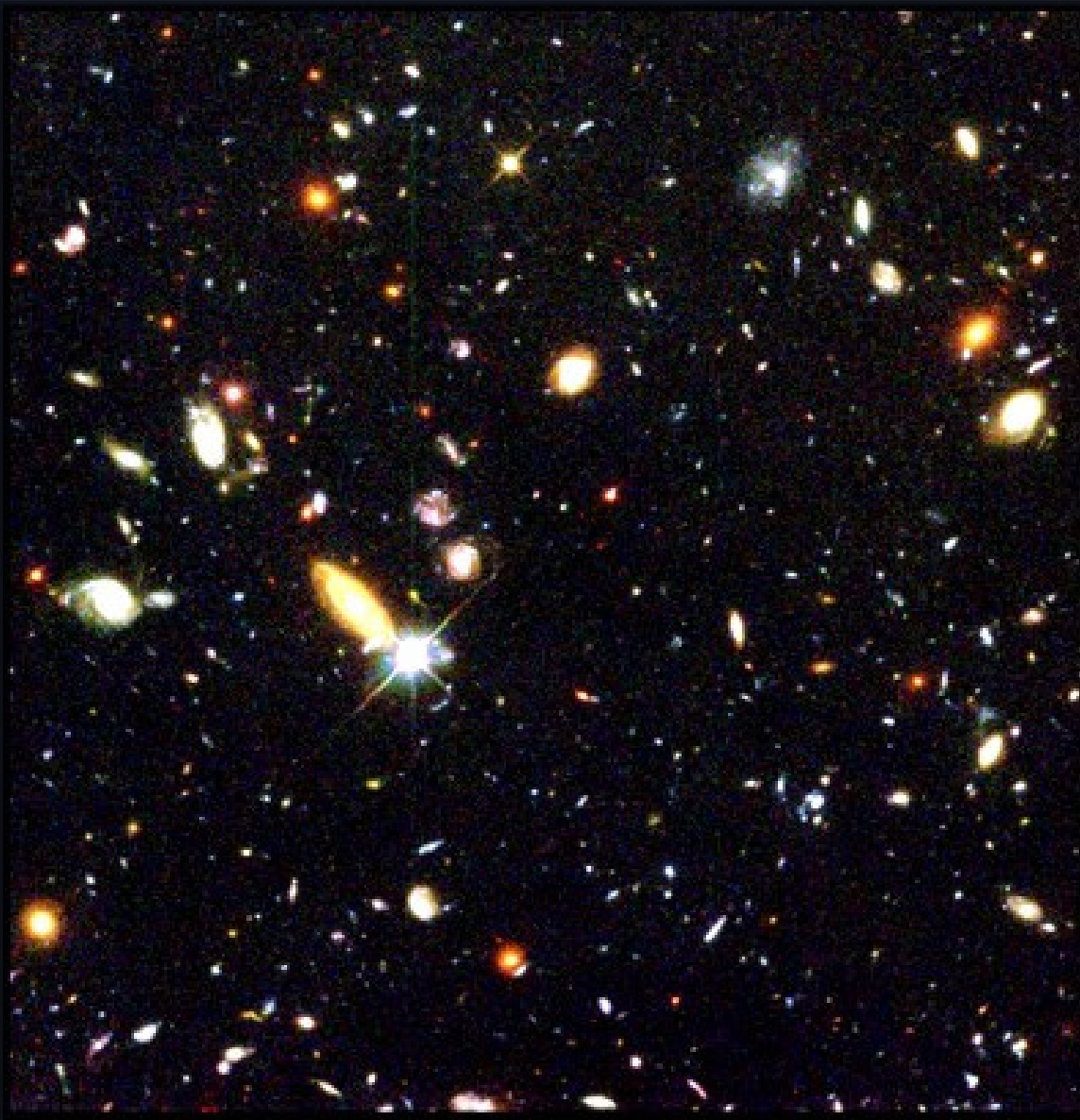
Supergromada w Pannie



Głęboki wgląd w przestrzeń Wszechświata

Zdjęcie przedstawia rezultat najgłębszego spojrzenia w przestrzeń Wszechświata. Jest niejako zaglądaniem przez dziurkę od klucza do jego najbardziej odległych zakątków.

Zdjęcie pokrywa wycinek nieba równoważny jednej trzydziestej średnicy Księżyca i choć jest to wycinek bardzo wąski, stanowi on reprezentatywną próbkę rozkładu galaktyk, gdyż Wszechświat wygląda statystycznie tak samo we wszystkich kierunkach. Obraz zawiera co najmniej 1500 galaktyk w różnych stadiach ewolucji.



Hubble Deep Field

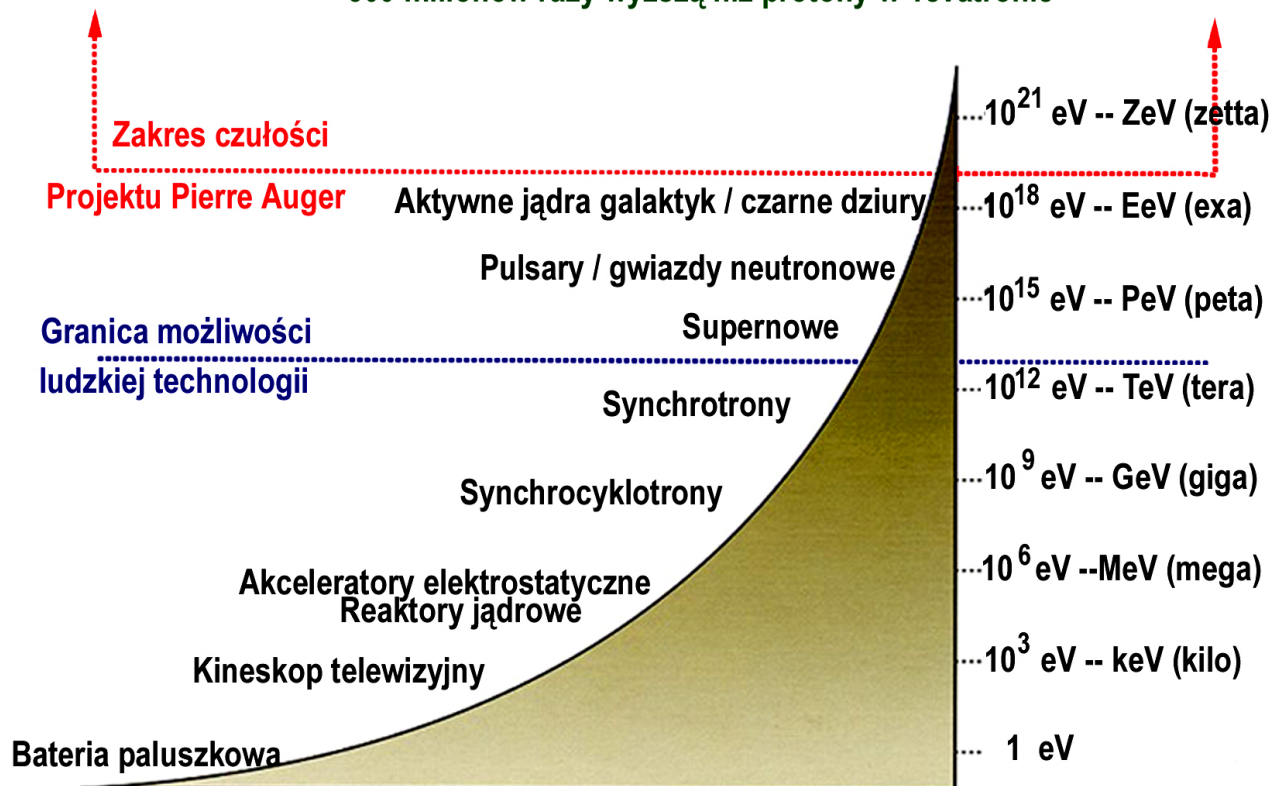
HST · WFPC2

PRC96-01a · ST ScI OPO · January 15, 1996 · R. Williams (ST ScI), NASA

Skala energii

ENERGIA	NOTACJA NAUKOWA	SKRÓT	WZGLĘDEM TEVATRONU
1 000 eV	10^3 eV	1 keV	Jedna miliardowa
1 000 000 eV	10^6 eV	1 MeV	Jedna milionowa
1 000 000 000 eV	10^9 eV	1 GeV	Jedna tysięczna
1 ... 12 zer ...	10^{12} eV	1 TeV	Jeden
1 ... 15 zer ...	10^{15} eV	1 PeV	Tysiąc razy
1 ... 18 zer ...	10^{18} eV	1 EeV	Milion razy
1 ... 20 zer	10^{20} eV	100 EeV	Sto milionów razy

Najwyższej energii cząstka promieni kosmicznych ma energię
300 milionów razy wyższą niż protony w Tevatronie



Widmo energii

$$dN = I_{Z,A}(\vec{r}, \theta, \varphi, E) dE \xrightarrow[\text{heliosfery}]{\text{Bez efektów}} I_{Z,A}(E)$$

Widmo całkowite

$$F_i(E > E_0) = \int_{E_0}^{\infty} I_i(E) dE$$

Skład chemiczny

$$I_Z(E) = \sum_A I_{Z,A}(E)$$

Widmo zbiorcze wszystkich cząstek

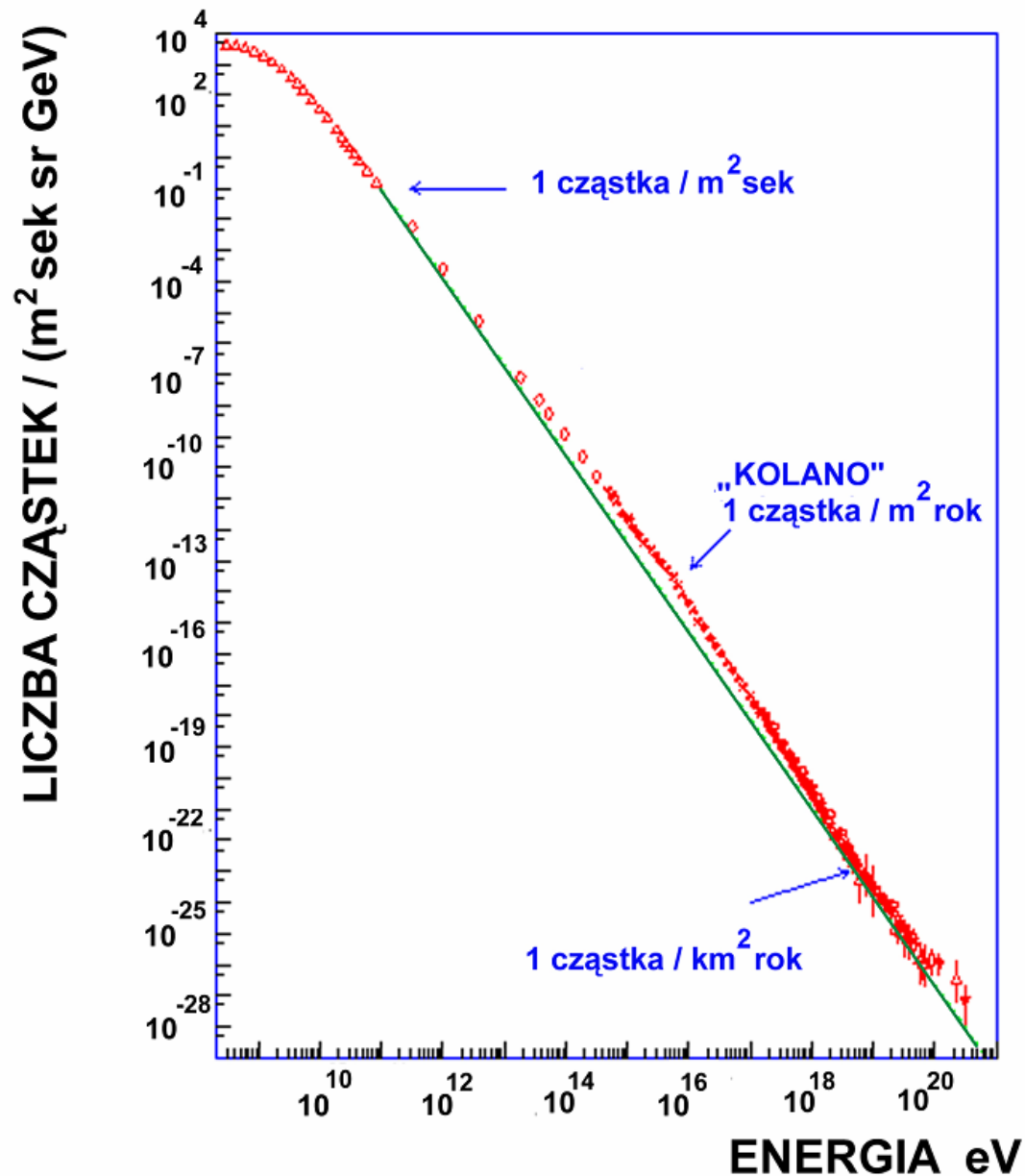
$$I(E) = \sum_{Z,A} I_{Z,A}(E)$$

Widmo energii

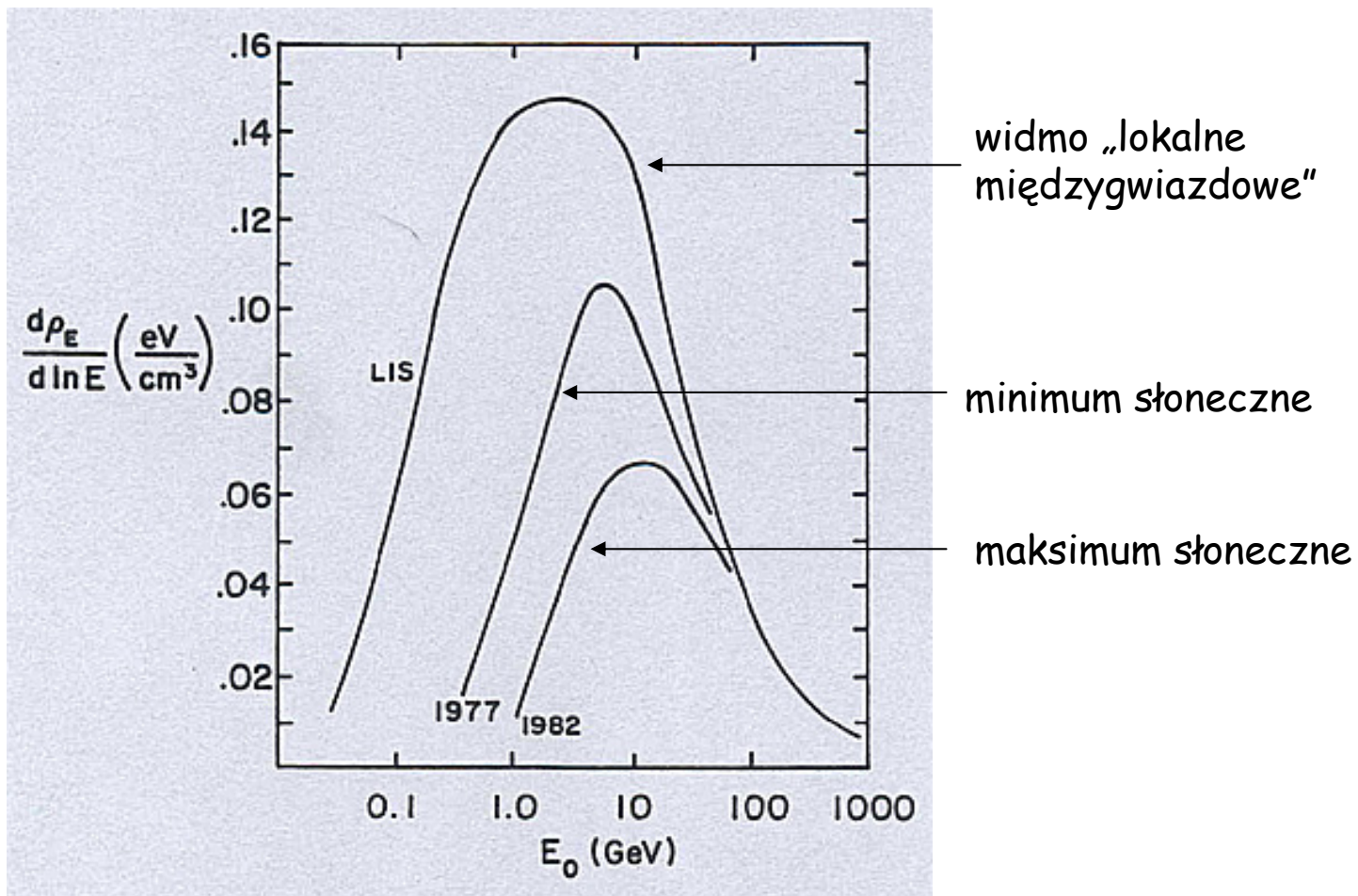
Sposoby przedstawiania widma

- w funkcji energii na nukleon E/A
(badanie propagacji)
- w funkcji sztywności magnetycznej $R=pc/Ze$
(badanie akceleracji i propagacji w polu magnetycznym)
- liczba nukleonów w funkcji energii na nukleon
(obliczanie strumienia cząstek wtórnych)
- energii całkowitej
(badanie wielkich pęków atmosferycznych)

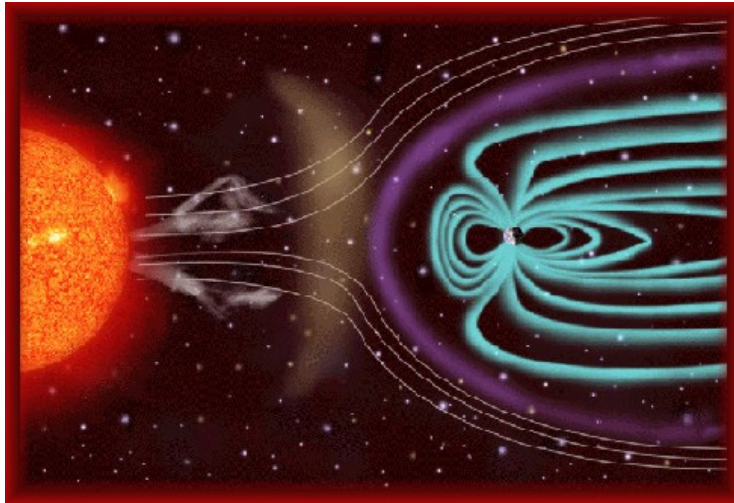
Widmo energii promieni kosmicznych



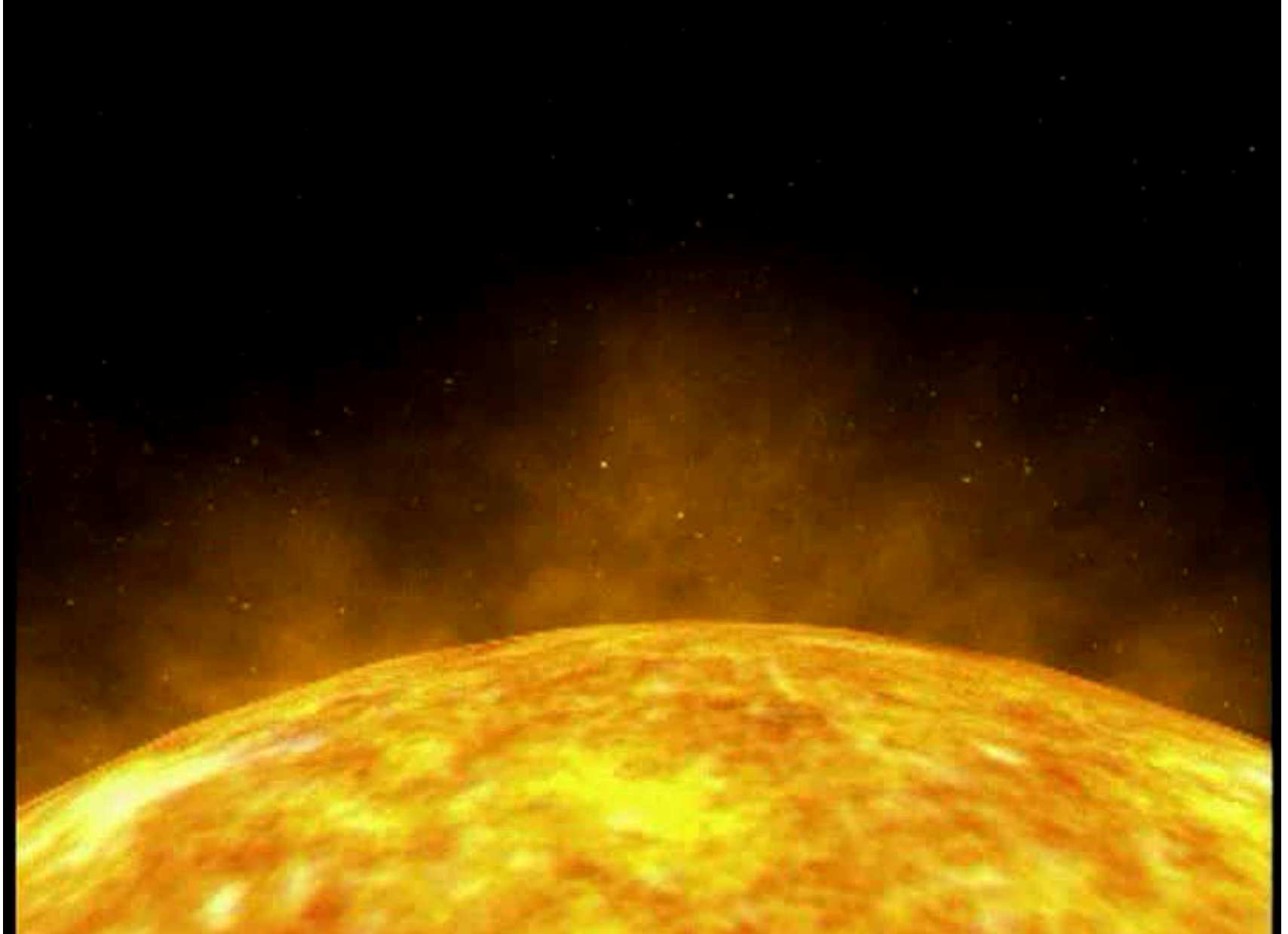
wpływ heliosfery



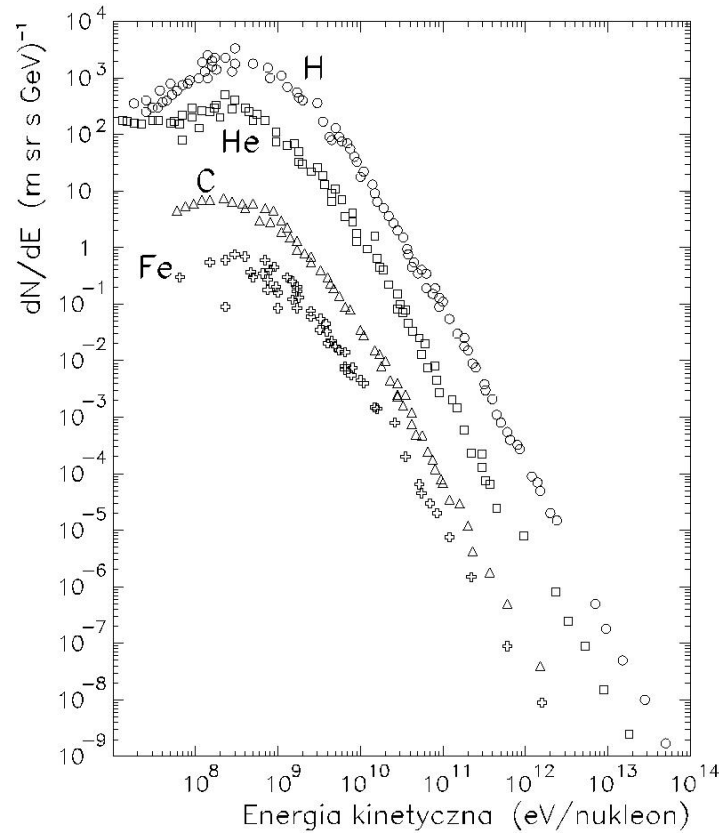
Źródła promieni kosmicznych: Słońce



Źródła promieni kosmicznych: Słońce



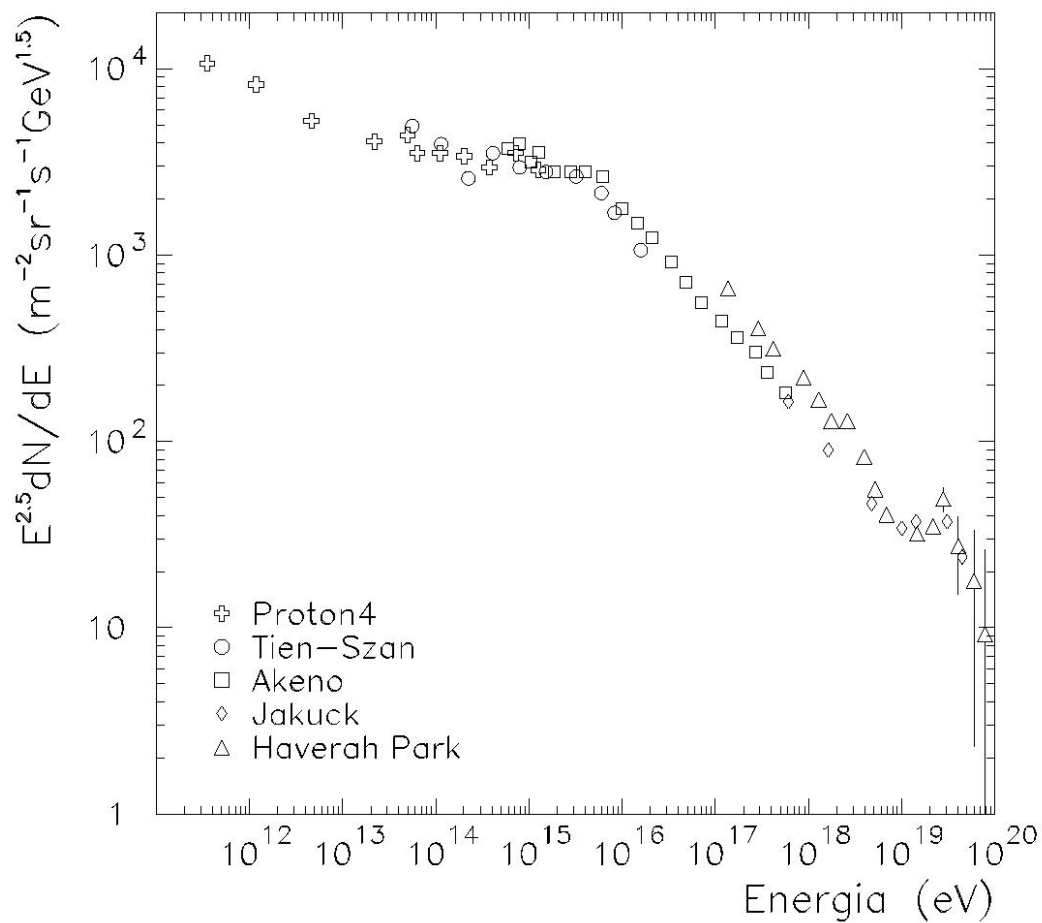
modulacja słoneczna widma



spadek potęgowy $\sim E^{-2.7}$

Modulacja słoneczna przy $E < \text{kilka GeV/nukleon}$

załamanie widma

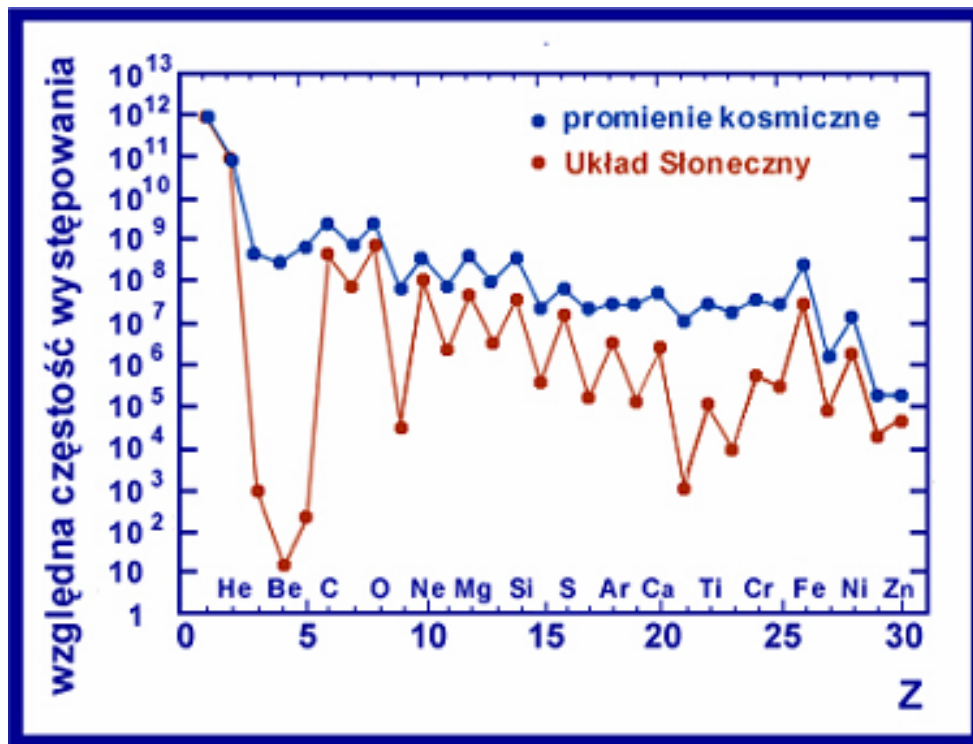


$\sim E^{-2.7}$ poniżej 10^{15} eV

$\sim E^{-3.1}$ powyżej 10^{16} eV

- wyjaśnienie???

Skład promieni kosmicznych



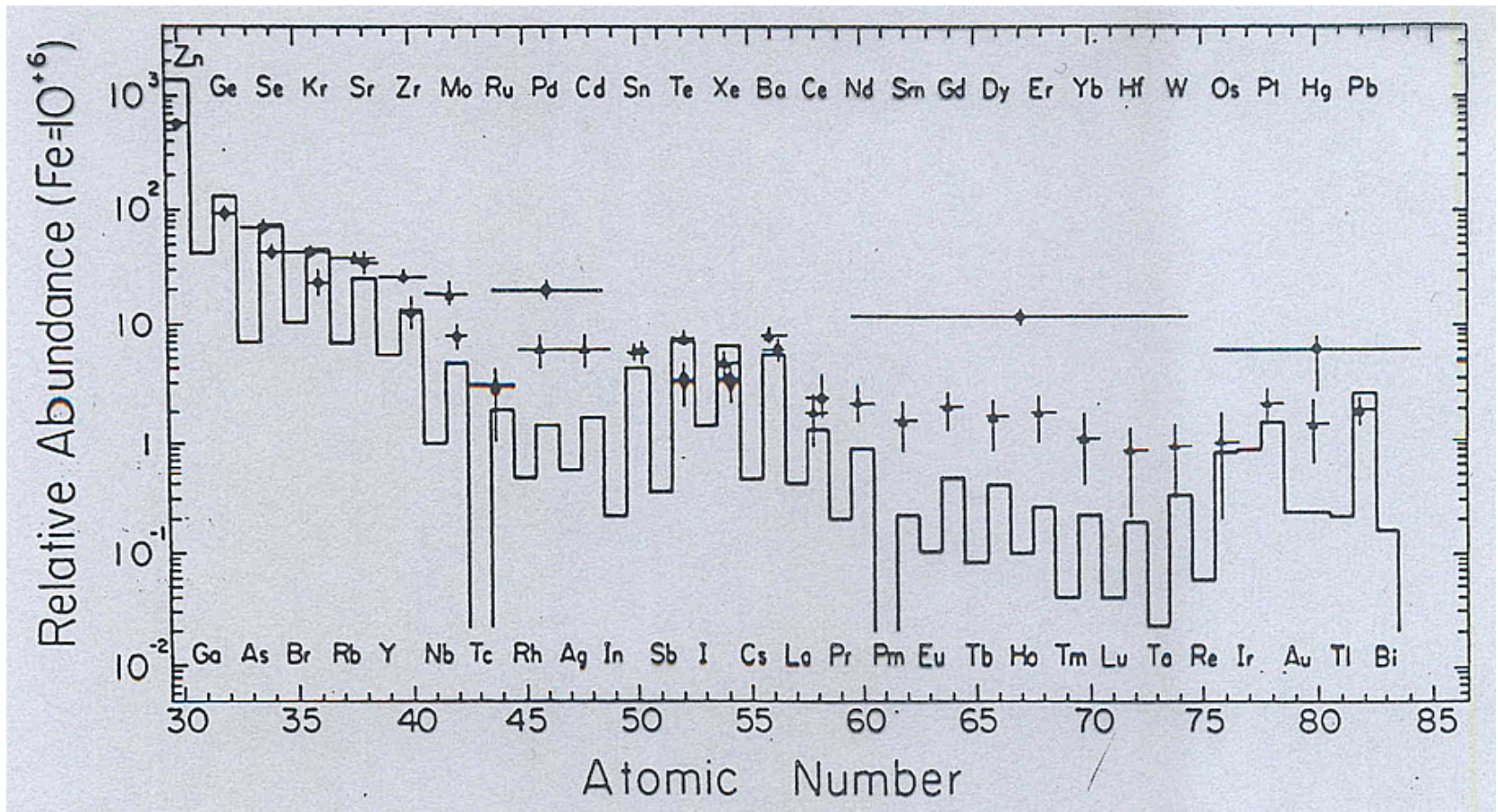
Pierwiastki pierwotne (C; Fe)
wtórne (Li, Be, B; Sc, Ti, V, Cr, Mn: „sub-Fe”)
o składzie mieszanym

Stosunek pierwiastków wtórnych do pierwotnych: B/C, sub-Fe/Fe
→ droga przebyta $\sim 5-10 \text{ g/cm}^2$ (przy 1 GeV/nukleon)

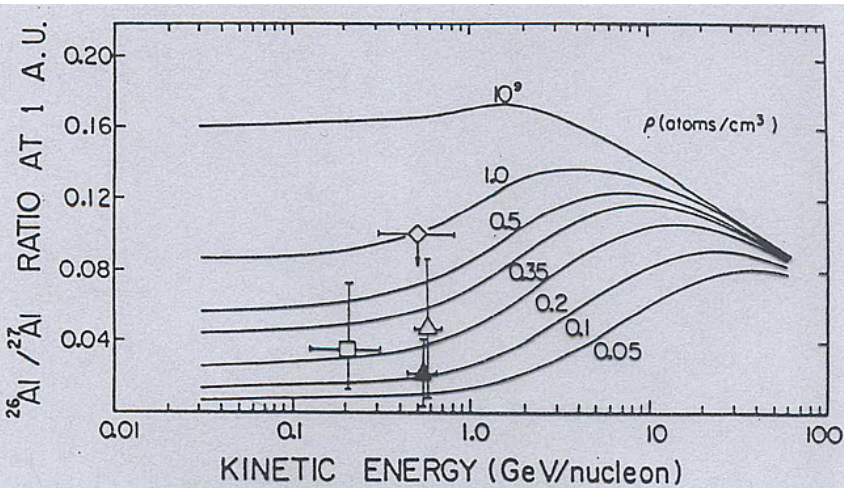
grubość dysku Galaktyki $\sim 10^{-3} \text{ g/cm}^2$!!!
→ uwięzienie w obszarach o dużej gęstości?

Skład promieni kosmicznych

ciężkie pierwiastki



Skład promieni kosmicznych



Izotopy **wtórne promieniotwórcze**: pomiar czasu propagacji

^{26}Al $\tau = 0.9$ mln lat rozpad β

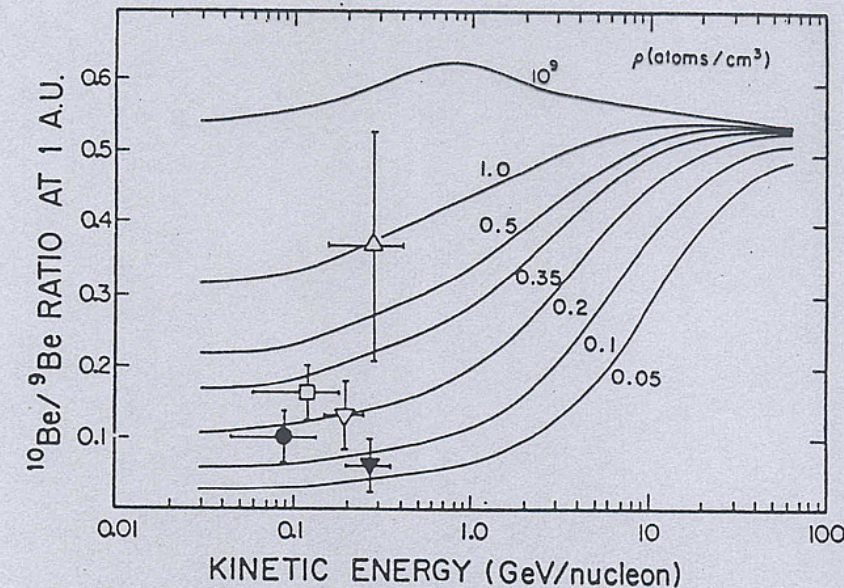
^{10}Be $\tau = 1.6$ mln lat wychwyt e^-

→ śr. gęstość przebytej materii ~ 0.2 atom/cm³

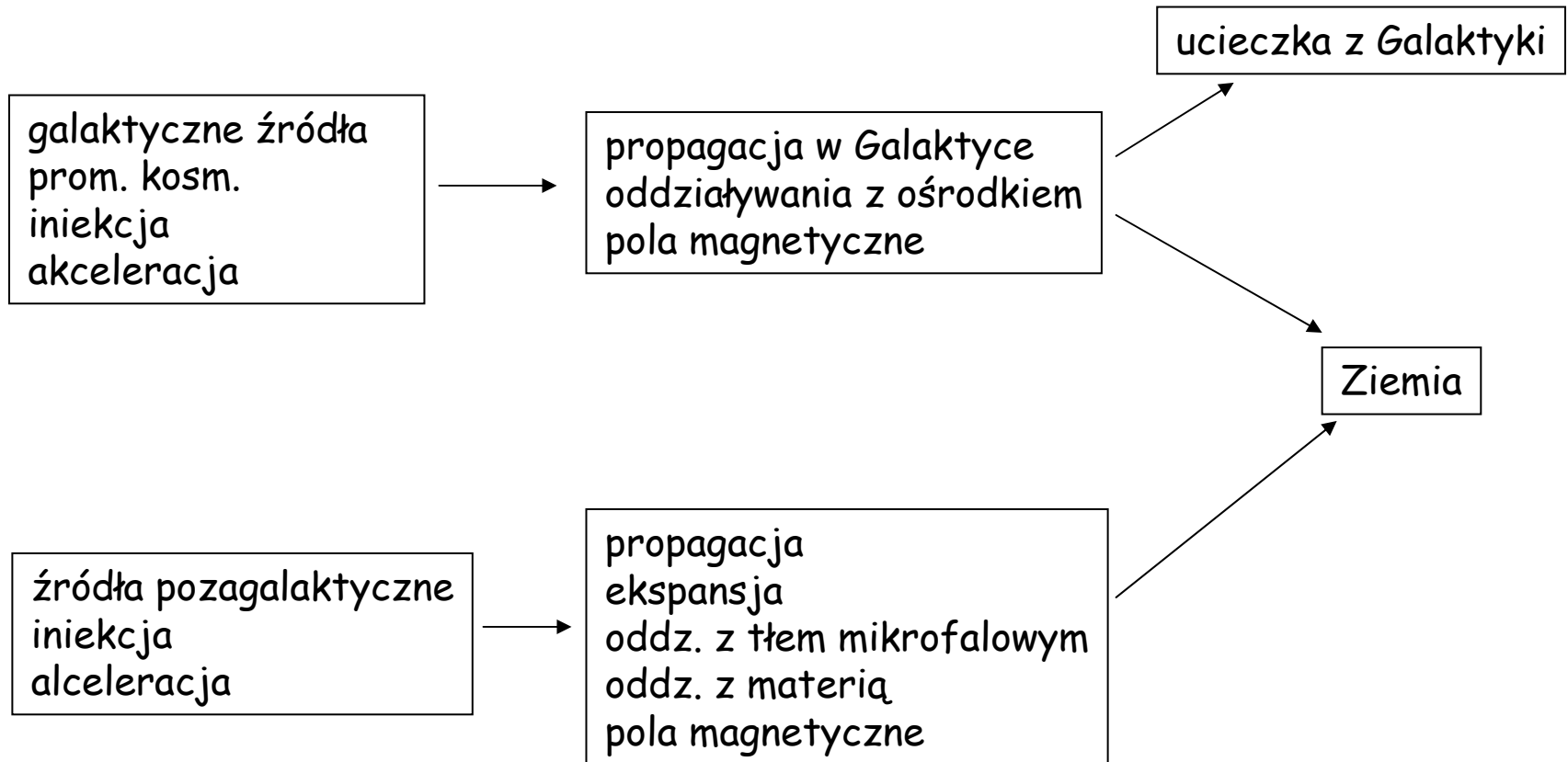
(śr. gęstość Galaktyki ~ 1 atom/cm³)

→ propagacja w halo o małej gęstości??

Czas lotu cząstek relatywistycznych ~ 10 mln lat



Źródła, akceleracja i propagacja



Propagacja

Modyfikacja energii
składu
kierunku

obserwujemy rezultaty różnych procesów uśrednione po wielu cząstkach

Model propagacji

- średnia ilość przebytej materii
- rozkład dróg swobodnych
- średnia gęstość w obszarze uwięzienia
- straty energii
- rozkład fal uderzeniowych
- szybkość ucieczki („przeciekania”)
- intensywność pól fotonów
- natężenia pól magnetycznych
- czas uwięzienia
- fragmentacja i rozpad radioaktywny jąder
- ...

→ odwikłanie własności źródła na podstawie obserwowanego składu i widma

Modelowanie propagacji

Model ciekącej puszk

„wyciekanie” cząstek z obszaru uwięzienia

$$N(E, t) = N_0(E) \exp(-t / \tau_{esc})$$

$$\lambda_{esc} = \rho \beta c \tau_{esc}$$

zależność λ_{esc} od sztywności mgt. $\rightarrow$ zależność wtórne/pierwotne od E

$$\lambda_{esc} = 10.8 \beta \left(\frac{4}{R} \right)^\delta \text{ g/cm}^2 \quad \text{dla } R > 4 \text{ GV}, \quad \delta \approx 0.6$$
$$10.8 \text{ g/cm}^2 \quad \text{dla } R < 4 \text{ GV}$$

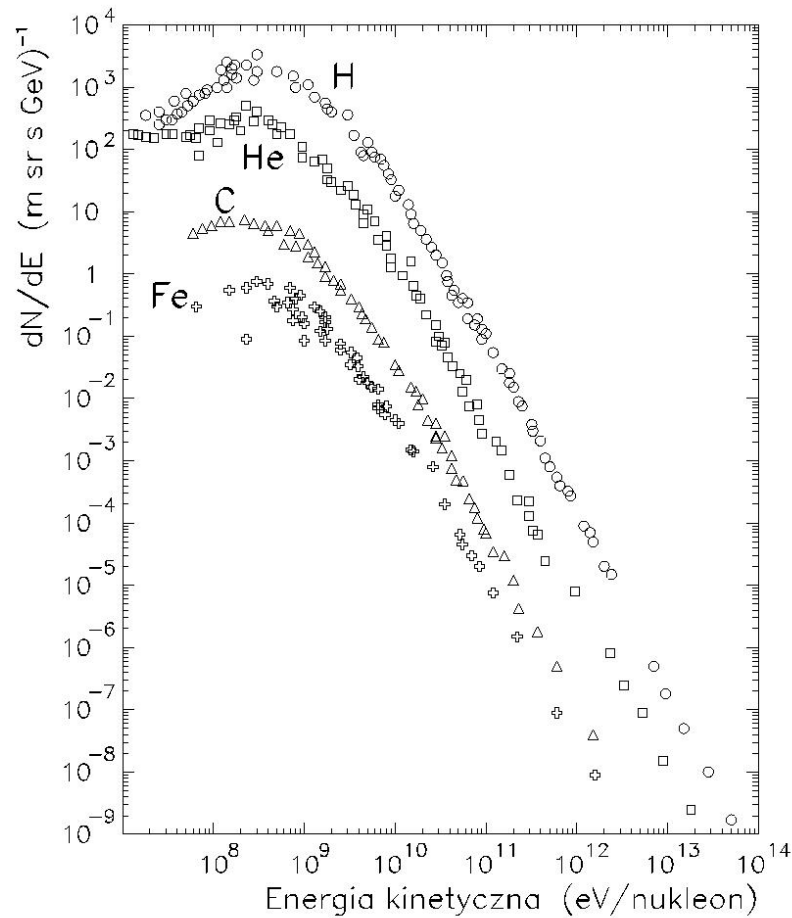
obserwowane widmo

$$I(E) = \frac{Q(E) \tau_{esc}(R)}{1 + \lambda_{esc}(R) / \lambda_{int}}$$

protony: $\lambda_{int} = 55 \text{ g/cm}^2 \gg \lambda_{esc} \Rightarrow I(E) = E^{-\gamma} \Rightarrow Q(E) = E^{-\gamma+\delta}$

Fe: $\lambda_{int} = 2.3 \text{ g/cm}^2 < \lambda_{esc} \Rightarrow Q(E) = E^{-\gamma}$

modulacja słoneczna widma



spadek potęgowy $\sim E^{-2.7}$

Modulacja słoneczna przy $E < \text{kilka GeV/nukleon}$

Modelowanie propagacji

Model ciekącej puszeki z gniazdami

Ziemia poza obszarem źródeł - $Q(E) \sim I(E)$

Model zamkniętej Galaktyki

ramię spiralne - cała Galaktyka $Q(E) = E^{-\gamma+\delta}$

Model dyfuzji

gradient gęstości prom. kosm.

- ale brak anizotropii!!

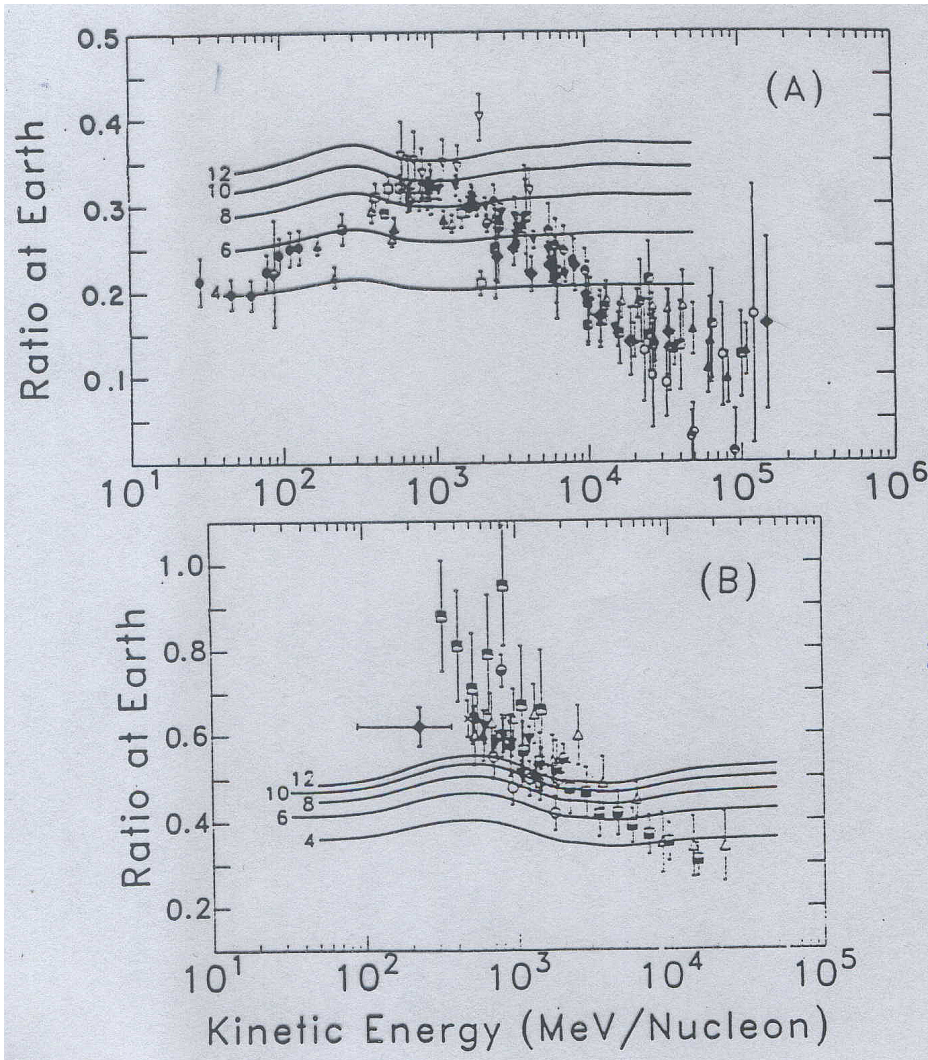
powyżej 4 GeV powinno być $A \sim E^{0.6}$

- reakceleracja?

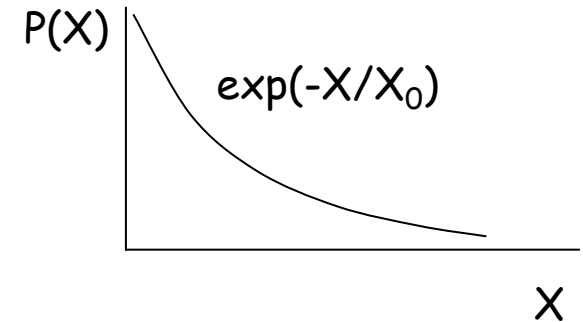
- zależność przekroju czynnego od energii?

Przykład: rozkład dróg swobodnych

Model ciekącej puszkii: eksponencjalny rozkład dróg

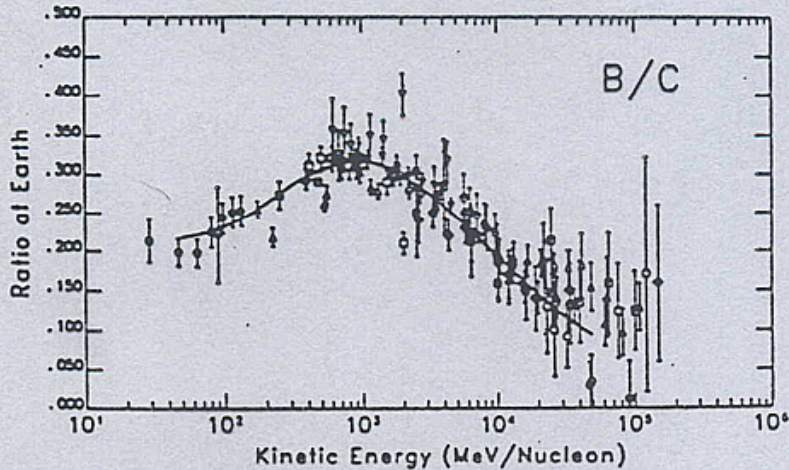


B/C



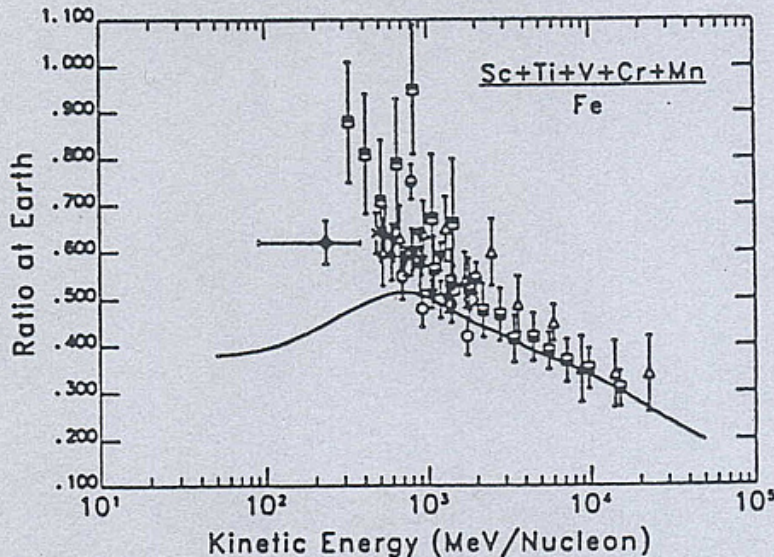
subFe/Fe

Przykład: rozkład dróg swobodnych



rozkład dróg swobodnych
zależny od energii

$$X_0 = f(E)$$



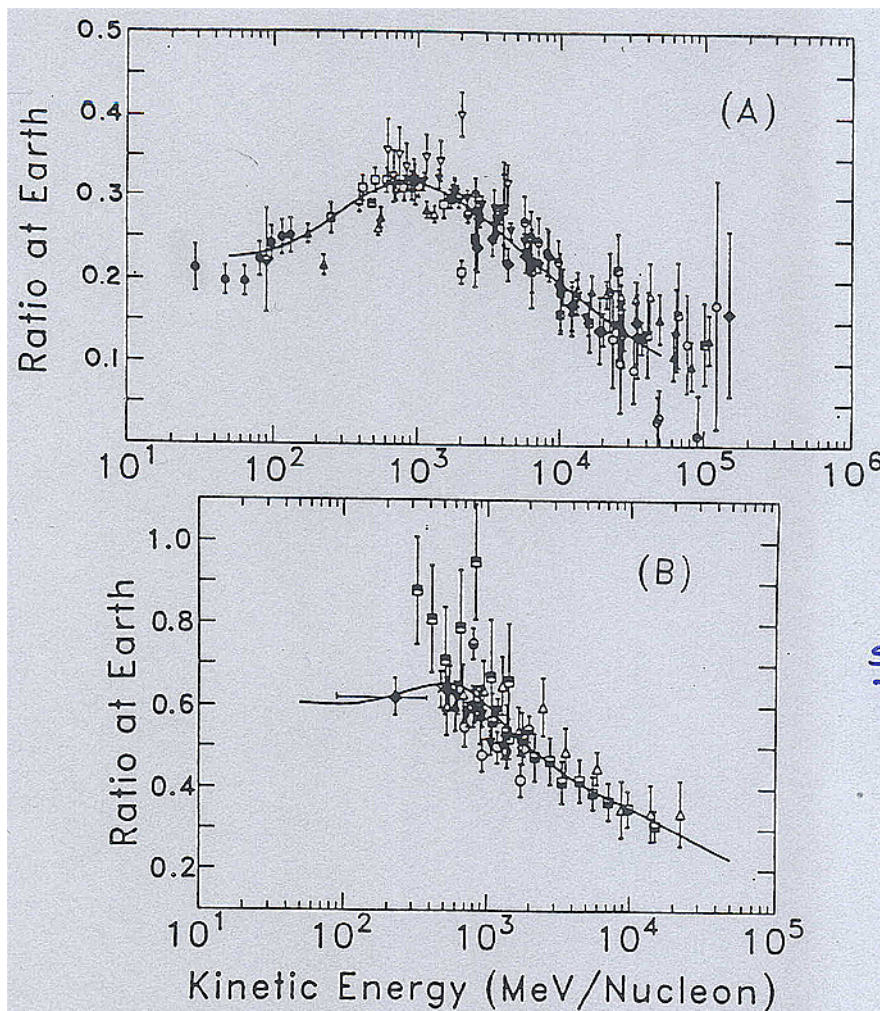
krótkie drogi?
przyspieszanie stochastyczne?

Przykład: rozkład dróg swobodnych

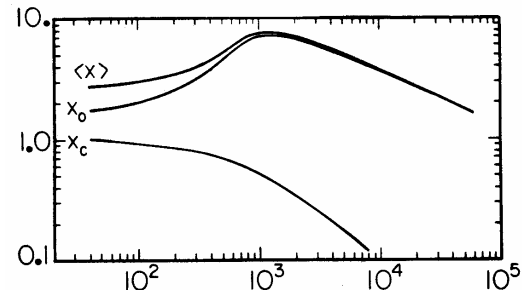
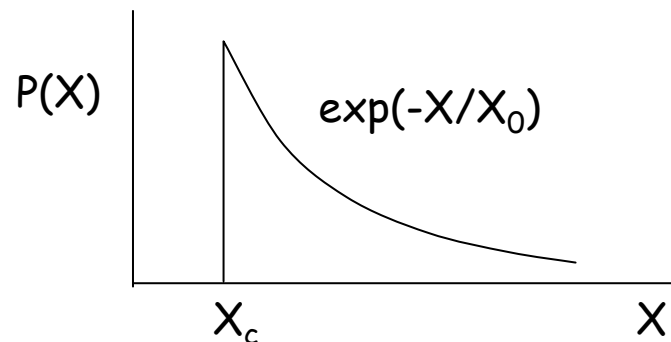
Materia wokół źródeł - brak małych dróg

- rozkład dróg swobodnych obcięty

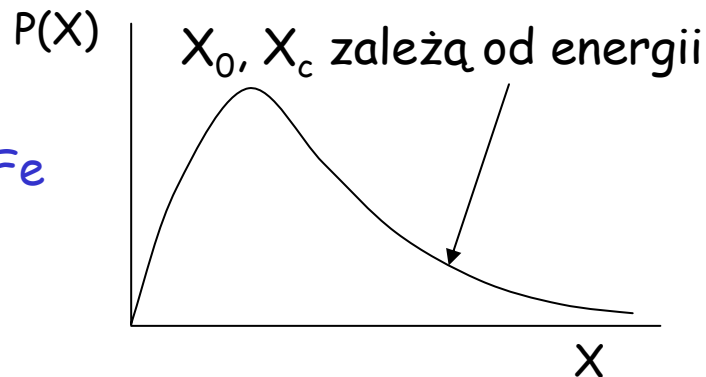
- model ciekącej puszkki z gniazdami



B/C



subFe/Fe



Akceleracja

Potrzebna ilość energii

$$\rho_E(\text{pr.kosm.}) \sim 1 \text{ eV/cm}^3$$

$$\rightarrow \text{moc źródeł: } L_{\text{CR}} = V_D \rho_E / \tau_{\text{esc}} \approx 5 \times 10^{40} \text{ erg/s}$$

zwykłe gwiazdy

$$L_{\odot(\text{CR})} = 10^{25} \text{ erg/s} \rightarrow L_{\text{Gal}(\text{CR})} = 10^{36} \text{ erg/s}$$

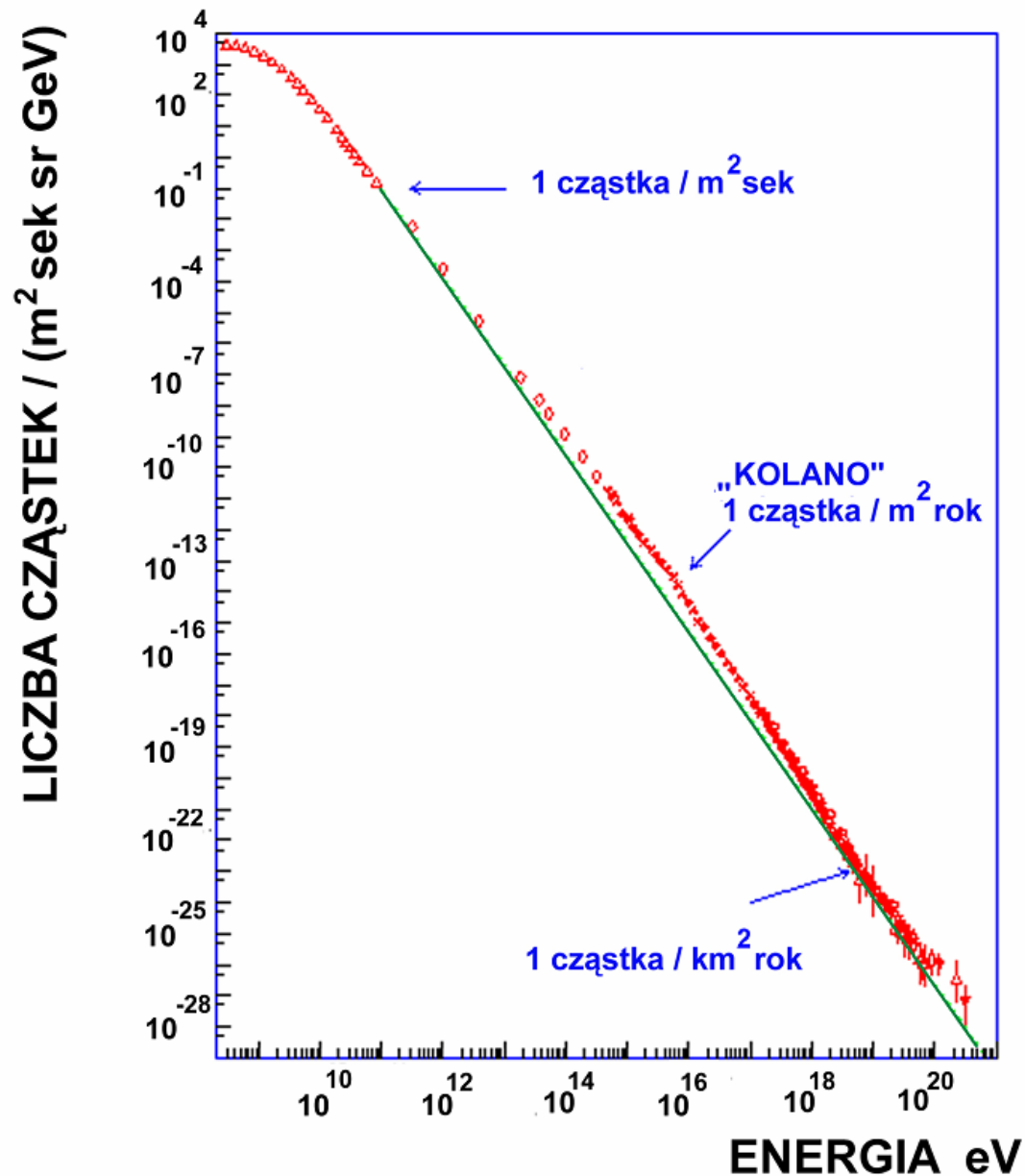
Supernowe: $10^{49} - 10^{52} \text{ erg}$, co $\sim 30 \text{ lat}$

$$\rightarrow L_{\text{SN}} \sim 10^{42} \text{ erg/s}$$

Kształt widma

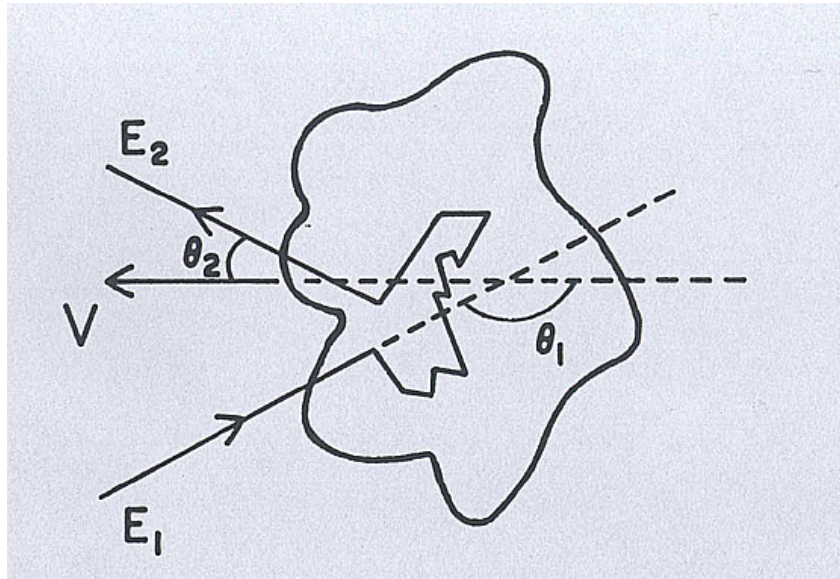
spadek potęgowy $\rightarrow$ proces Fermiego??

Widmo energii promieni kosmicznych



Proces Fermiego 2. rzędu

przyspieszanie cząstek w zderzeniach z obłokami magnetycznymi



$$E_1' = \gamma E_1 (1 - \beta \cos \theta_1)$$

$$E_2 = \gamma E_2' (1 + \beta \cos \theta_2')$$

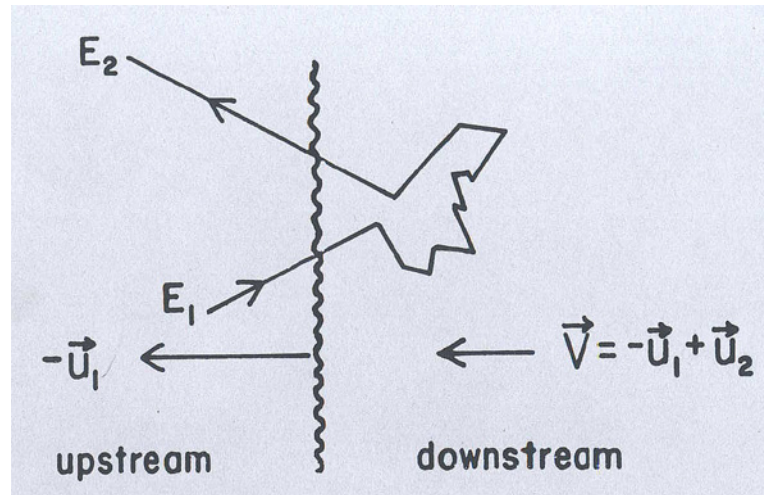
$$E_2' = E_1' \quad \beta = v/c$$

przyrost energii w jednym cyklu

$$\frac{\Delta E}{E} = \xi \propto \beta^2$$

proces powolny

Proces Fermiego 1. rzędu



$$\frac{\Delta E}{E} = \xi \propto \frac{u_1 - u_2}{c} \quad E_n = E_0 (1 + \xi)^n = E_0 (1 + \xi)^{t/T_c}$$

przyspieszanie stopniowe - limit energii

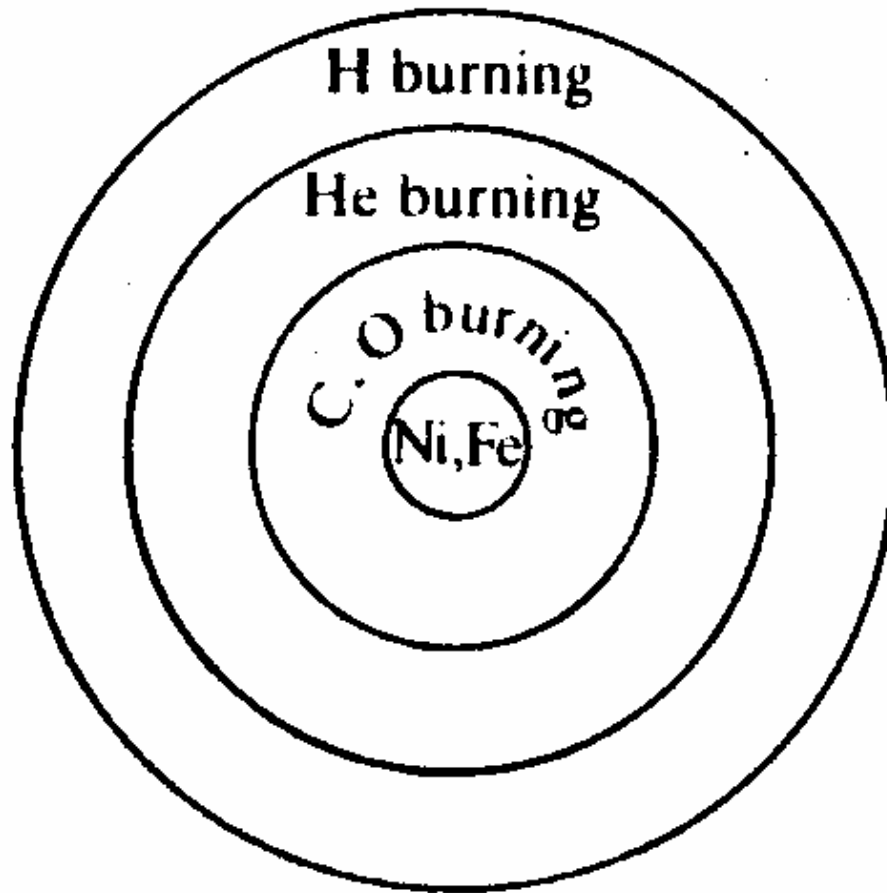
widmo całkowite $\propto E^{-\gamma+1}$

dla gazu jednoatomowego $\gamma-1 \approx 1+4/M^2$ $M=u_1/c_1$ liczba Macha

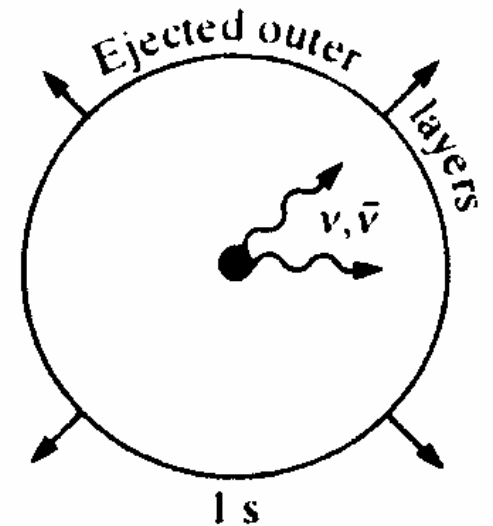
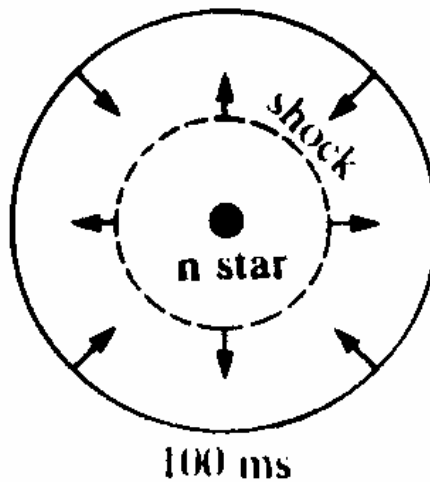
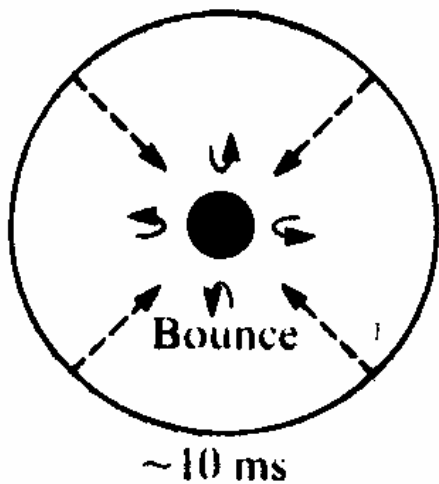
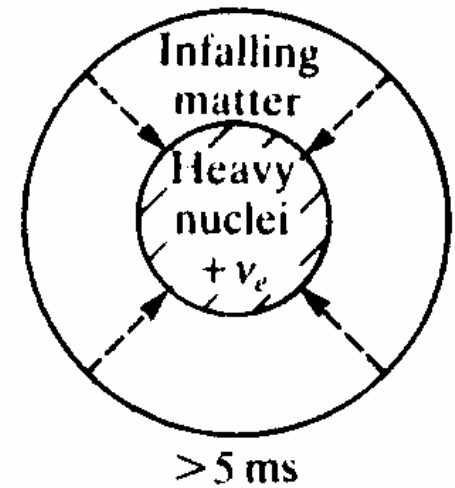
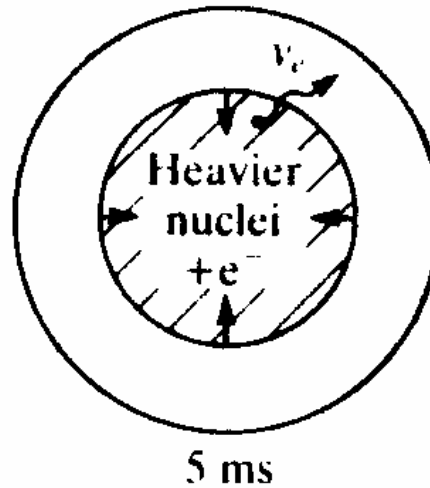
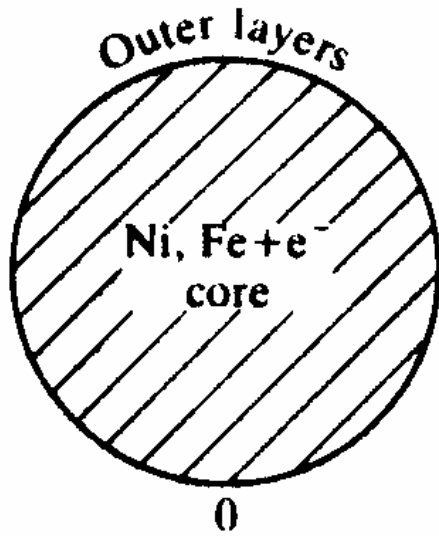
obs. $F(E) \sim E^{-1.7} \rightarrow$ u źródła $Q(E) \sim E^{-\gamma+1+\delta} \sim E^{-1.1}$

$$E_{\max} \sim Z 10^{14} \text{ eV}$$

Masywna gwiazda w późnym stadium ewolucji



Wybuch supernowej



Źródła promieni kosmicznych:

Supernowe



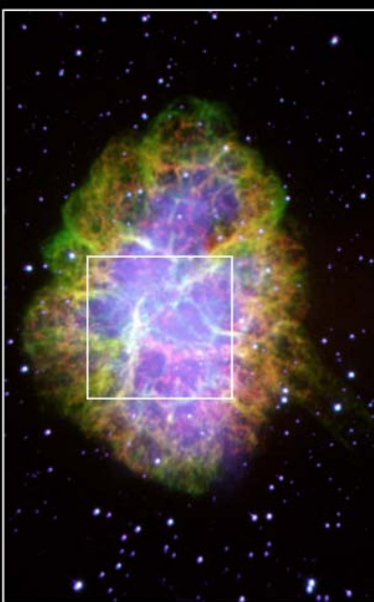
23 lutego 1987 roku wybuchła supernowa w Wielkim Obłoku Magellana .
Udało się stwierdzić, która z widocznych na wcześniejszych fotografiach nieba gwiazd wybuchła. Był to niebieski nadolbrzym, 17-krotnie masywniejszy od Słońca. Jego wiek oszacowano na około 20 milionów lat.



Supernowa w Kasjopei



Crab Nebula



Palomar

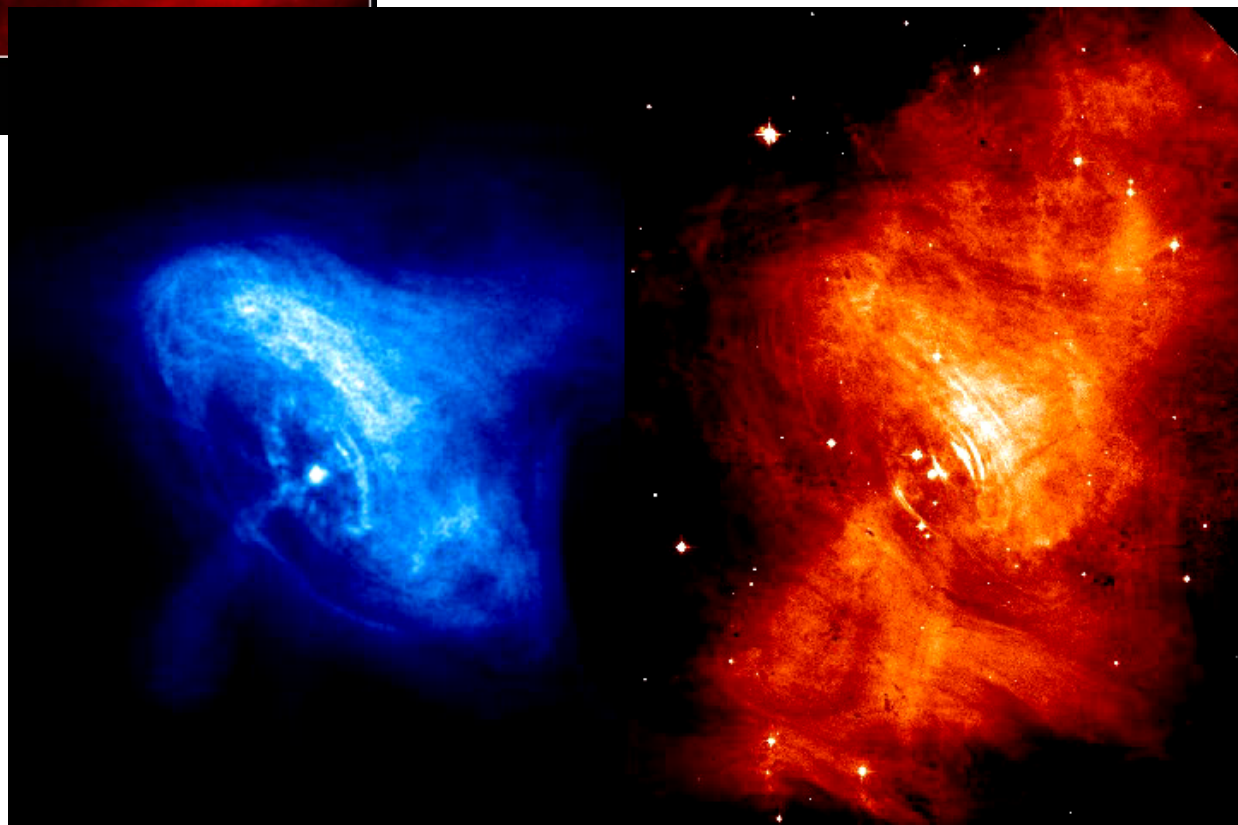
PRC96-22a · ST ScI OPO · May 30, 1996
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.) and NASA



Mgławica Krab

-to fantazyjne określenie mgławicy,
jednej z najśłynniejszych
pozostałości po wybuchu gwiazdy
supernowej

Mgławica Krab - pozostałość po
efektownej śmierci dużej
gwiazdy oddalona jest od nas o
7000 lat świetlnych.
Gwiazda która wybuchła,
rozpoczęła życie jako gwiazda o
masie około 10 mas Słońca i
zakończyła je właśnie 4 lipca
1054 roku, gdy wybuchła jako
supernowa.



Supernowe w Galaktyce

typowa supernowa

$$u_1 = 5000 \text{ km/s}$$

$$M_{\text{ejecta}} = 10 M_{\odot}$$

$$\rho_{\text{ISM}} = 1 \text{ atom/cm}^3$$

$$\frac{4}{3}\pi(u_1 T)^3 \rho_{\text{ISM}} = M_{\text{ejecta}}$$

→ czas przyspieszania
 $T \sim 1000 \text{ lat}$

→ przyspieszanie przez ~ 30
supernowych

$$E_{\text{max}} \sim Z 10^{14} \text{ eV}$$

