

Elementy Astronomii i Astrofizyki
- skrót z wykładu VIII

Krzysztof Radziszewski
Instytut Astronomiczny UWr

Wykład VIII - Wrocław, 16 kwietnia 2026 r.

Podstawowe równania elektromagnetyczne

Prawo Coulomba

$$\vec{F} = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

Czyli - siła \vec{F} oddziaływania dwóch ładunków punktowych q_1 i q_2 jest wprost proporcjonalna do wielkości każdego z ładunków i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości r między nimi.

k - współczynnik proporcjonalności wyrażany (zależy od układu jednostek)

$$\Rightarrow \text{w układzie SI mamy: } k = \frac{1}{4\pi\epsilon} \quad \text{lub} \quad k = \frac{1}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0}$$

ϵ - przenikalność elektryczna ośrodka;

ϵ_r - względna przenikalność elektryczna ośrodka;

ϵ_0 - przenikalność elektryczna próżni.

Podstawowe równania elektromagnetyczne

Równania Maxwella (dla źródeł w próżni)

$$\nabla \cdot \vec{E} = 4\pi\rho$$

$$\nabla \times \vec{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} \vec{J}$$

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

\vec{E} - natężenie pola elektrycznego

ρ - gęstość ładunku elektrycznego

\vec{B} - indukcja pola magnetycznego

\vec{J} - gęstość prądu elektrycznego

c - prędkość światła

t - czas

$\nabla \cdot$ - dywergencja

$\nabla \times$ - rotacja

Podstawowe równania elektromagnetyczne

Równania Maxwella (dla źródeł w próżni) - INTERPRETACJA

$$\nabla \cdot \vec{E} = 4\pi\rho$$

<= Prawo Gaussa dla elektryczności
Ładunki elektryczne są źródłem pola elektrycznego

$$\nabla \times \vec{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} \vec{J}$$

<= Prawo Ampère'a
(zmodyfikowane przez Maxwella)
Pole magnetyczne jest wytwarzane przez przepływający prąd oraz zmienne pole elektryczne

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$$

<= Prawo indukcji elektromagnetycznej Faradaya
Zmienne w czasie pole magnetyczne wytwarza pole elektryczne

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

<= Prawo Gaussa dla magnetyzmu
Pole magnetyczne jest bezźródłowe

Podstawowe równania elektromagnetyczne

Równania Maxwella zawierają w sposób niejawni **równanie ciągłości**:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J} = 0$$

które wiąże gęstość ładunku ρ z gęstością prądu \vec{J} .

UWAGA - równanie pochodzące z prawa Ampèr'a jest „wadliwym” równaniem, ponieważ zostało ono wprowadzone dla prądów stacjonarnych, dla których spełniony jest warunek: $\nabla \cdot \vec{J} = 0$.

Ogólnym wyrażeniem na dywergencję gęstości prądu jest **równanie ciągłości**, które wiąże prąd z ładunkiem.

Podstawowe równania elektromagnetyczne

Do rozpatrywania ruchu cząstek naładowanych niezbędne jest dodatkowo równanie na **siłę Lorenza**:

$$\vec{F} = q \left(\vec{E} + \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{B} \right)$$

wyrażające siłę działającą na ładunek q w obecności pól elektromagnetycznych.

\vec{v} - prędkość cząstki

UWAGA:

Wszystkie powyższe równania napisane są w układzie jednostek Gaussa (CGS), który jest układem jednostek elektromagnetycznych.

Plazmowy parametr β (*Plasma β -parameter*)

Pole magnetyczne B wywiera siłę na naładowane cząstki (- jest to siła Lorentz'a).

W koronie słonecznej, składającej się z elektronów i jonów, powoduje to ruch spiralny wzdłuż linii pola magnetycznego (*ang.: gyromotion*).

Ucieczka z ich „żyro-orbit” możliwa jest jedynie w przypadku, gdy energia kinetyczna cząstek przekracza wartość energii pola magnetycznego w którym się znajdują (np: wysoka temperatura i słabe pole magnetyczne). W takim przypadku cząstki mogą dyfundować w poprzek pola magnetycznego.

Krytycznym parametrem jest plazmowy parametr β .

Plazmowy parametr β (*Plasma β -parameter*)

Parametr plazmowy β określa stosunek ciśnienia termicznego plazmy p_{th} do ciśnienia magnetycznego p_m .

$$\beta = \frac{p_{th}}{p_m}$$

Plazmowy parametr β (*Plasma β -parameter*)

Parametr plazmowy β określa stosunek ciśnienia termicznego plazmy p_{th} do ciśnienia magnetycznego p_m .

$$\beta = \frac{p_{th}}{p_m} = \frac{2\xi n_e k_B T_e}{B^2 / 8\pi}$$

ξ - stopień jonizacji ($\xi = 1$ dla korony; $\xi = 0.5$ dla fotosfery)

n_e - gęstość elektronowa

T_e - temperatura elektronowa

B - pole magnetyczne

k_B - stała Boltzmann

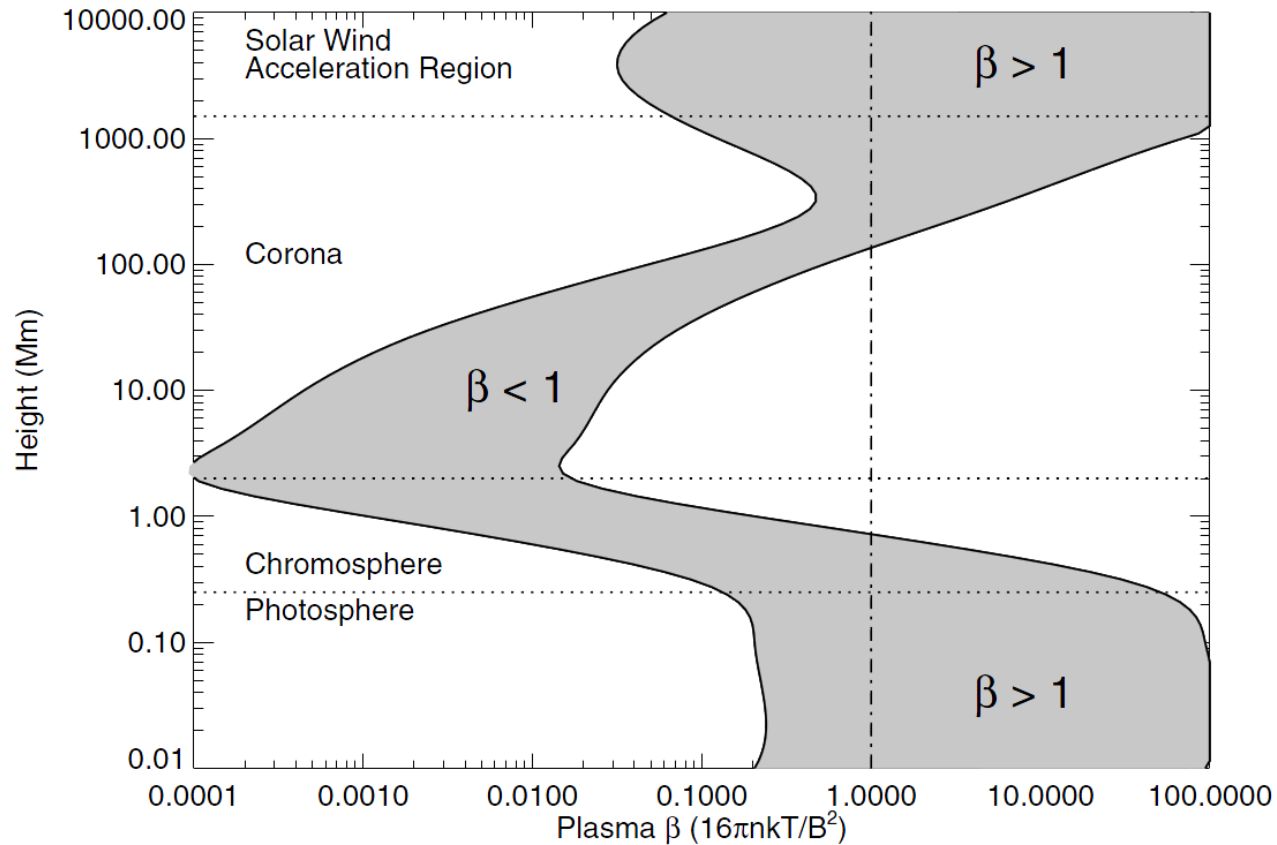
Plazmowy parametr β (*Plasma β -parameter*)

Table 1.1: The plasma- β parameter in the solar atmosphere.

Parameter	Photosphere	Cool corona	Hot corona	Outer corona
Electron density n_e (cm^{-3})	2×10^{17}	1×10^9	1×10^9	1×10^7
Temperature T (K)	5×10^3	1×10^6	3×10^6	1×10^6
Pressure p (dyne cm^{-2})	1.4×10^5	0.3	0.9	0.02
Magnetic field B (G)	500	10	10	0.1
Plasma- β parameter	14	0.07	0.2	7

Przyczyny powstawania rozbłysków słonecznych

Plazmowy parametr β (*Plasma β -parameter*)

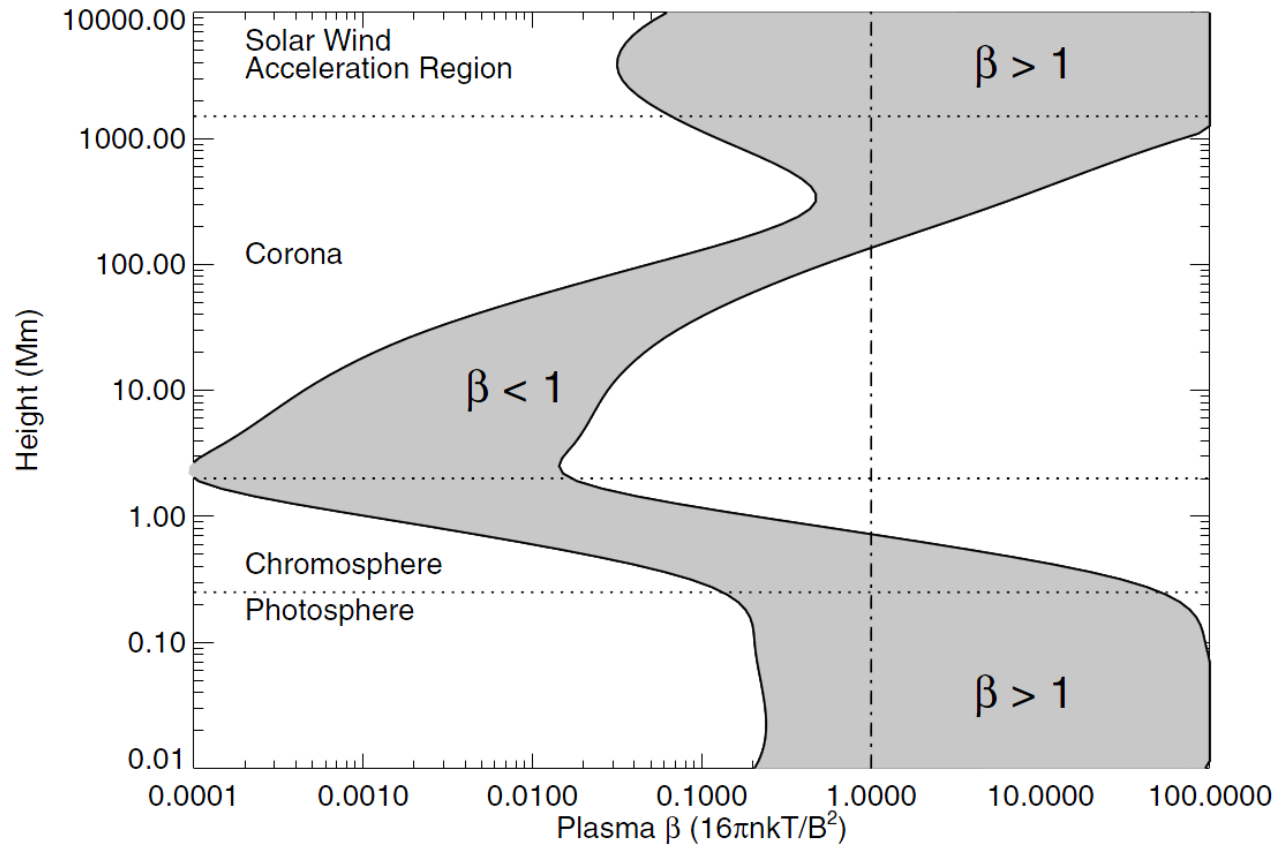


(Gary, 2001)

Zależność plazmowego parametru β dla korony słonecznej przy założonych dwu wartościach pola magnetycznego: 100 Gs i 2500 Gs.

Przyczyny powstawania rozbłysków słonecznych

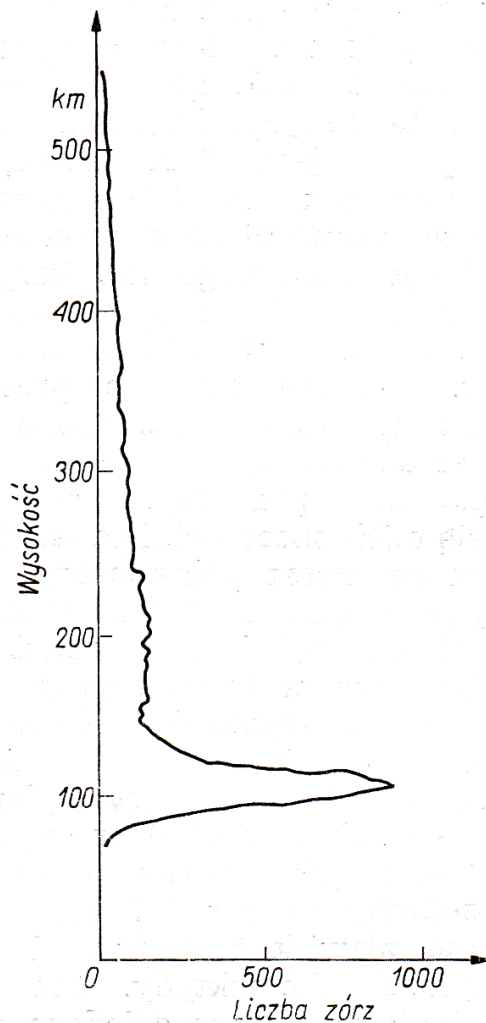
Plazmowy parametr β (*Plasma β -parameter*)



- => Dla **większej części korony** plazmowy parametr β przyjmuje wartość $\beta < 1$.
- => Dlatego większa część korony jest **magnetycznie „ograniczona”** (gdy $\beta < 1$). Często używa się stwierdzenia, że **pole magnetyczne „rządzi” plazmą**.

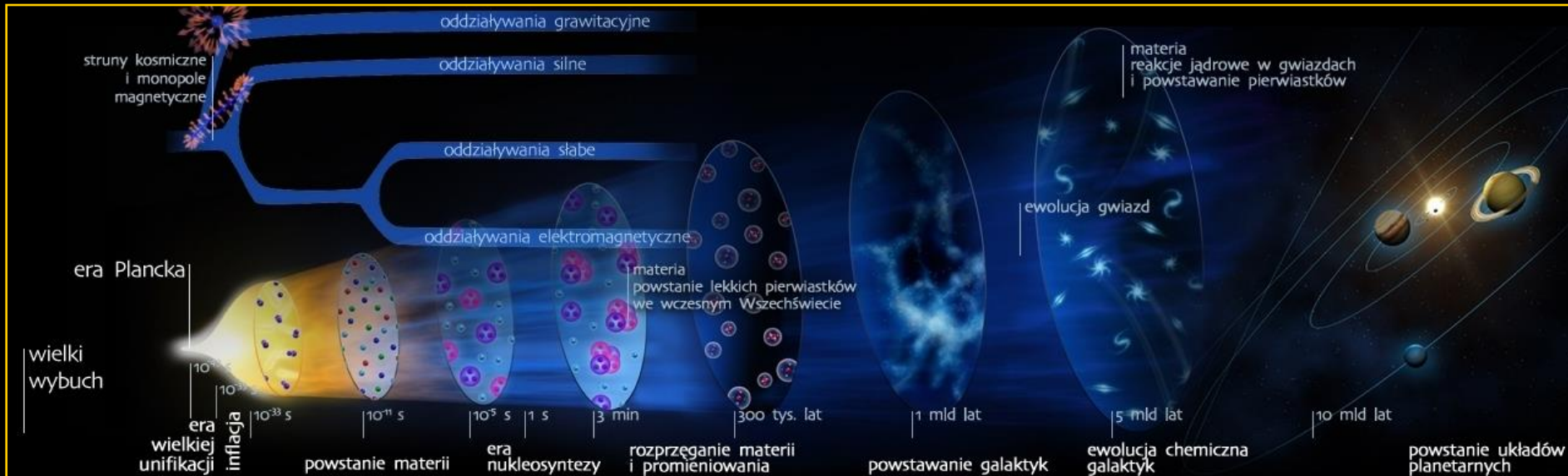
Skutki rozbłysków słonecznych oraz ich wpływ na Ziemię i jej otoczenie

Występowanie zórz polarnych na różnych wysokościach (nad powierzchnią Ziemi).



50. Częstość występowania zórz polarnych na różnych wysokościach w latach 1911—1944 (wg F. C. M. Störmera)

Ewolucja Wszechświata



Ery ewolucji Wszechświata:

1. bardzo wczesny Wszechświat ($t < 10^{-32}$ s)

- era Planck'a ($t < 10^{-43}$ s), inflacja, oddzielenie się oddziaływań

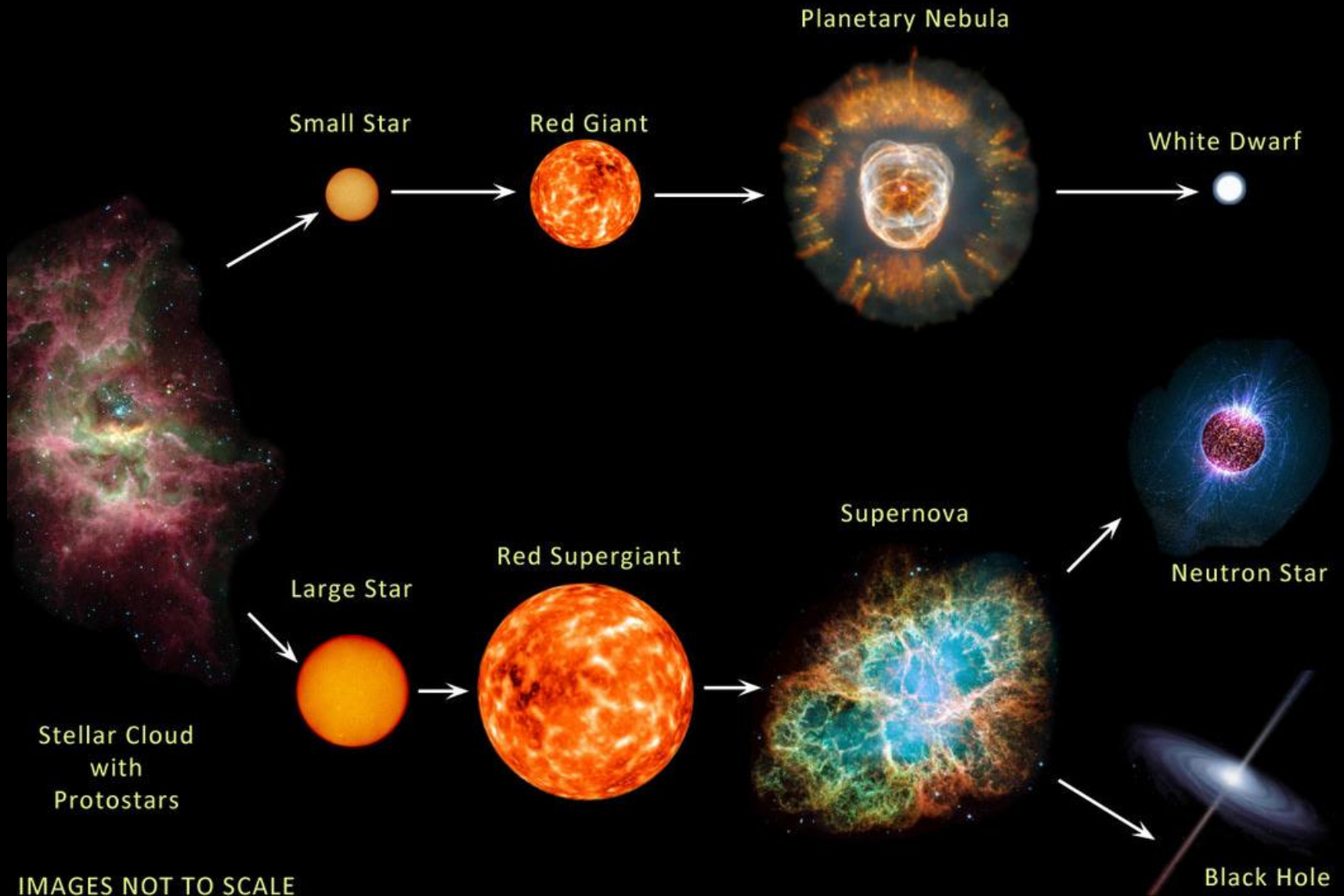
2. wczesny Wszechświat

- epoka kwarkowo-gluonowa ($10^{-32} - 10^{-6}$ s)
- epoka hadronowa ($10^{-6} - 1$ s) – powstają protony, neutrony
- epoka leptonowa (1 s – 3 min) – przewaga lekkich cząstek (elektron)
- epoka fotonowa (3 min – 380 000 lat) – przewaga fotonów, pierwotna nukleosynteza, materia zjonizowana (Wszechświat nieprzezroczysty), promieniowanie tła

3. era gwiazd (380 000 lat – dziś)

- powstawanie gwiazd, formowanie się obecnej struktury Wszechświata

Ewolucja gwiazd



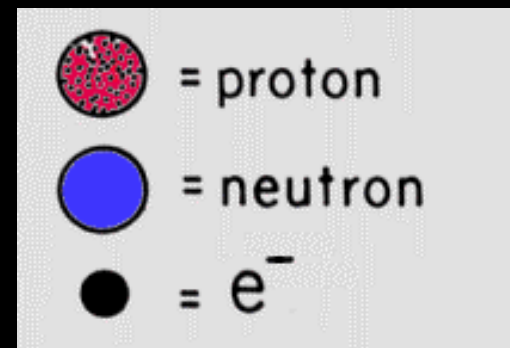
IMAGES NOT TO SCALE

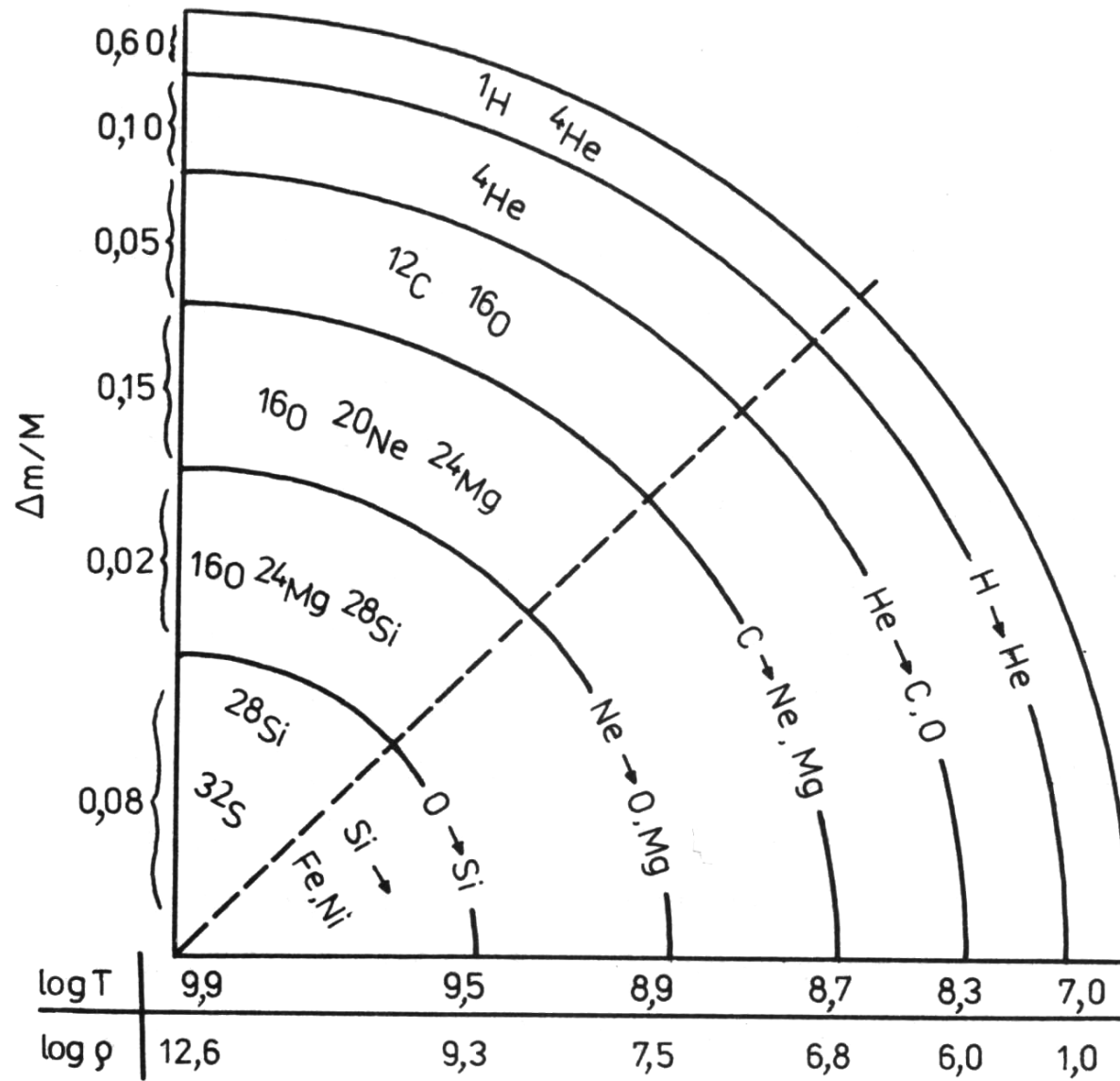
Z czego składa się Wszechświat ?

- Materia świecąca ~ 4%
- Ciemna materia ~ 23%
- Ciemna energia ~ 73%

Podstawowe „cegielki” tworzące materię,
z której się składamy to:

- protony (=> kwarki i gluony)
- neutrony (=> kwarki i gluony)
- elektrony





Schemat warstwowego modelu gwiazdy masywnej bardzo zaawansowanej ewolucyjnie.

- Wielki Wybuch / *Big Bang* /
 - wodór (H) ~ 77 %
 - hel (He) ~ 23 %
 - inne pierwiastki - śladowe ilości

- Synteza jądrowa we wnętrzach gwiazd
 - pierwiastki do żelaza (Fe) włącznie

- Supernowe
 - pierwiastki cięższe od żelaza (Fe)