

Ewolucja Wszechświata

Wykład 1 *Wszechświat*

- Modele Wszechświata
- Początek Wszechświata a fizyka cząstek elementarnych
- Inflacja
- Nukleosynteza pierwotna
- Promieniowanie reliktowe
- Galaktyki
- Ewolucja gwiazd
- Supernowe
- Gwiazdy neutronowe
- Czarne dziury
- Kwazary
- Fale grawitacyjne
- Układ słoneczny

- A. Liddle, „Wprowadzenie do kosmologii współczesnej”
- D. H. Perkins, „Wstęp do fizyki wysokich energii”, rozdz. 9 i 10,
- J. Orear, „Fizyka”, t. 2 rozdz.30
- J. Barrow, „Początek Wszechświata”
- F. Adams, G. Laughlin, „Ewolucja Wszechświata”
- D. Goldsmith, „Największa pomyłka Einsteina”
- R. Penrose, „Makroświat, mikroświat i ludzki umysł”
- S. Hawking, „Wszechświat w skorupce orzecha”
- K. Thorne, „Czarne dziury i krzywizny czasu”
- Michał Heller, „Początek jest wszędzie”

Kolokwium zaliczeniowe na ostatnich zajęciach

lub

Prezentacja na 10-15 min przedstawiająca dowolne zagadnienia z kosmologii, astronomii, astrofizyki, astronautyki.

Mogą to być najnowsze odkrycia lub historia ważnych odkryć, wszystko, co wydaje się ciekawe i warte zaprezentowania.

Konieczne podanie źródeł informacji.

Proszę zgłaszać tematy prezentacji mailem (wosinska@if.pw.edu.pl) lub na zajęciach – ustalimy termin prezentacji.

Obecność na co najmniej **10 wykładach** oraz ocena co najmniej dobra z prezentacji zwalnia z kolokwium.

COSMOLOGY MARCHES ON



Dane obserwacyjne

długość fali

- Fale radiowe
- Mikrofale
- Podczerwień
- Światło widzialne
- Ultrafiolet
- Promieniowanie rentgenowskie
- Promieniowanie γ

częstotliwość

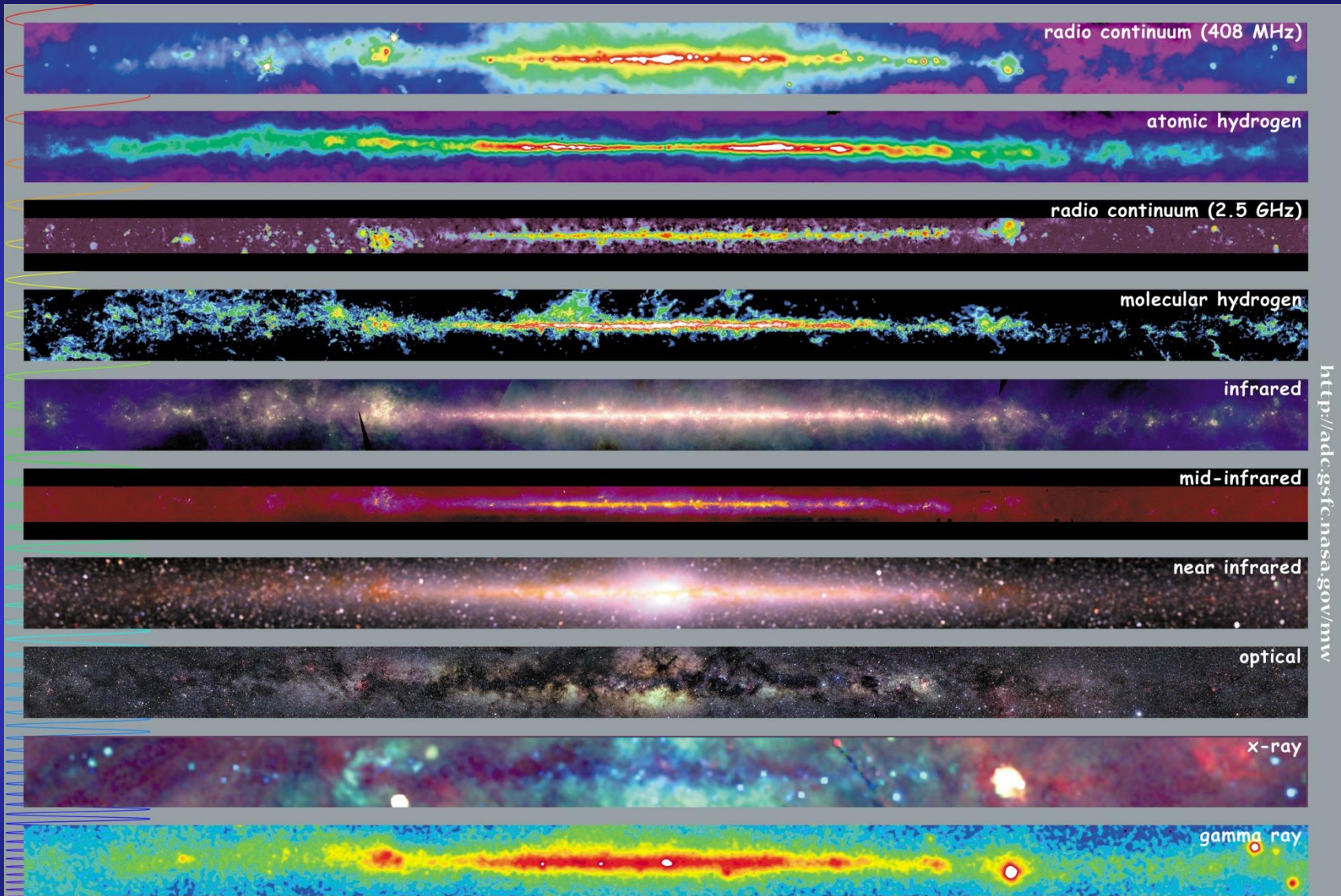
Wysokość (w kilometrach)

Promienio-
wanie γ | Promienio-
wanie X | Zakres
widzialny | Mikrofale
UV | Podczere-
wień | Fale radiowe

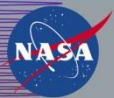
200
100
50
25
12
6
3



Obraz Drogi Mlecznej w różnych zakresach fal elektromagnetycznych



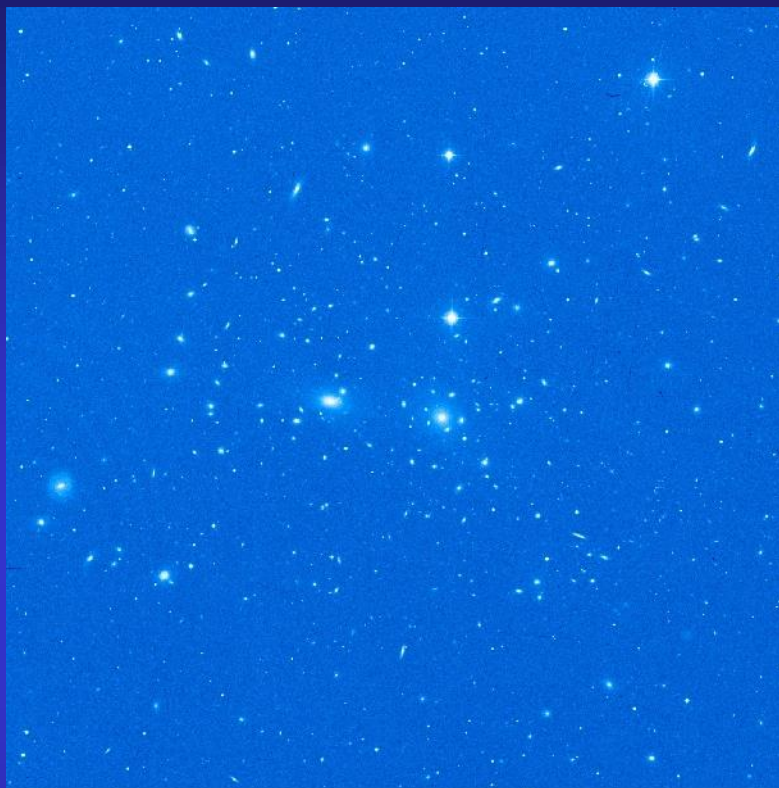
<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw>



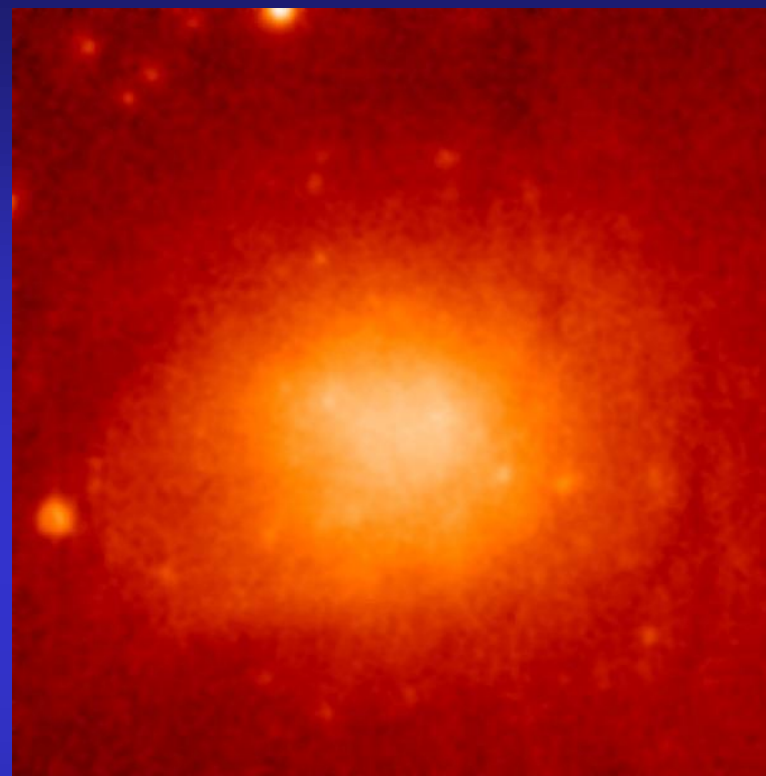
Multiwavelength Milky Way



Dane obserwacyjne



Gromada galaktyk w warkoczu Bereniki sfotografowana za pomocą teleskopu optycznego na Mt. Palomar.



Ta sama gromada galaktyk zarejestrowana w promieniowaniu rentgenowskim przez satelitę ROSAT. Cała emisja pochodzi od gorącego gazu o temp. około 100 mln K.

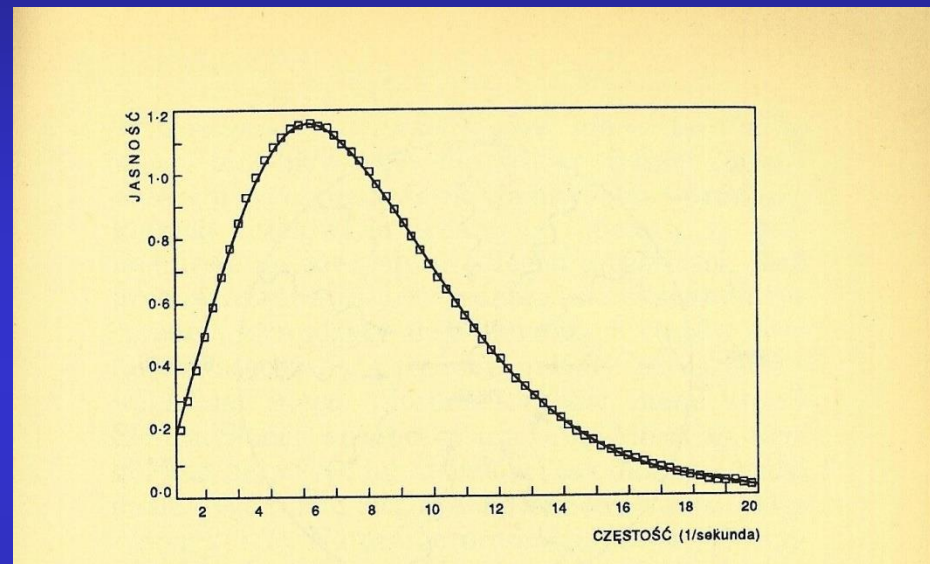
Krystyna Wosińska, WF PW



Obserwacje w zakresie mikrofal

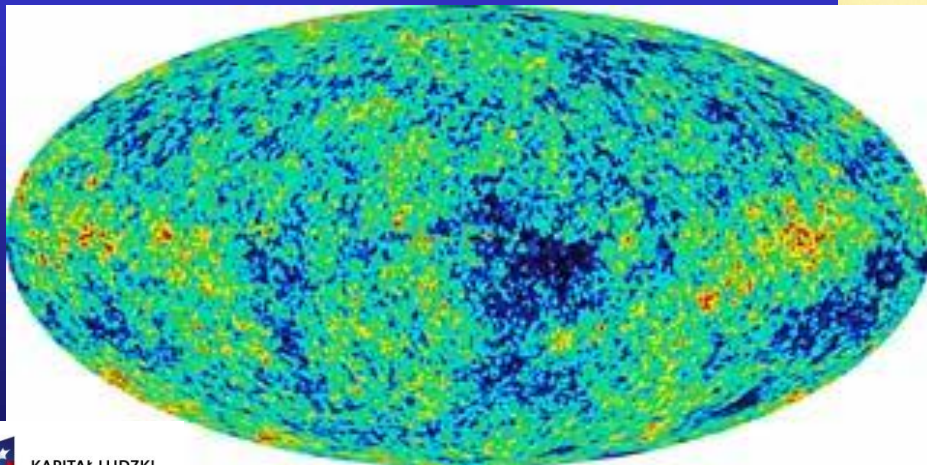
W 1964 r. Arno Penzias i Robert Wilson odkryli promieniowanie tła.

Widmo promieniowania tła zgadza się z widmem promieniowania ciała doskonale czarnego.



$$T = (2,725 \pm 0,002) \text{ K}$$

Fluktuacje temperatury promieniowania rzędu $1:10^{-5}$



Obserwacje w zakresie radiowym

Mapy bardzo odległych galaktyk

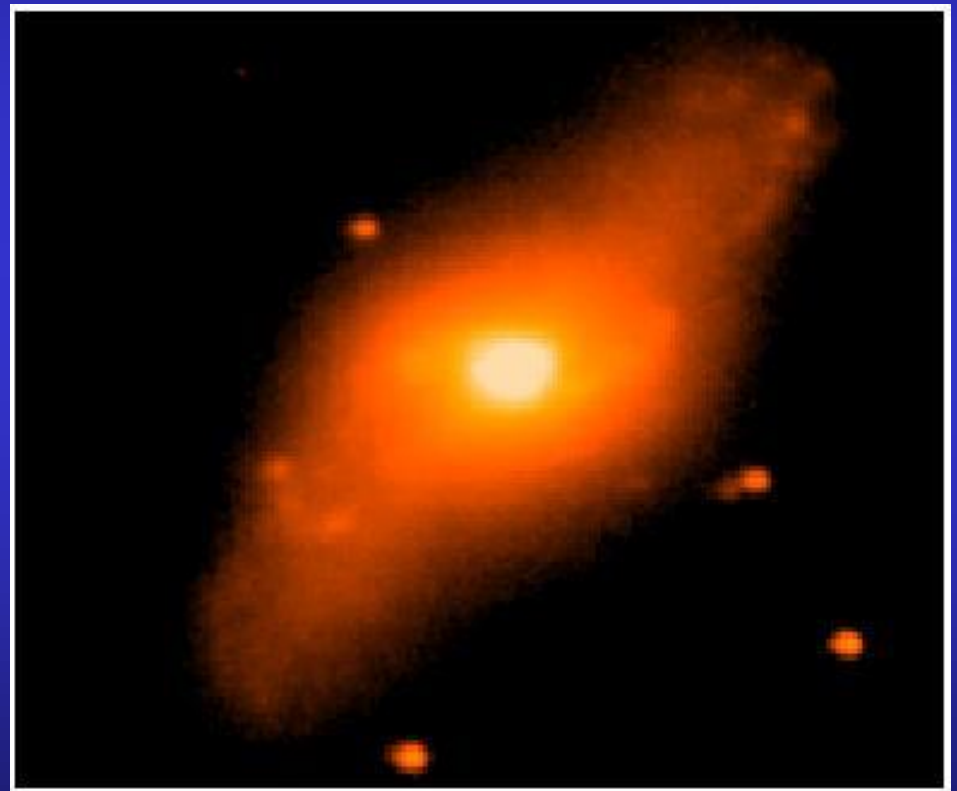


Kwazary - radioźródła odkryte na przełomie lat pięćdziesiątych i sześćdziesiątych XX w. i odpowiadające im punktowe obiekty optyczne o dużym przesunięciu ku czerwieni.

Obserwacje w podczerwieni

Katalogi galaktyk w podczerwieni – rejestracja młodych galaktyk

IRAS
InfraRed Astronomical
Satellite



Błyski gamma

1963 – Układ o zakazie prób jądrowych
w przestrzeni kosmicznej

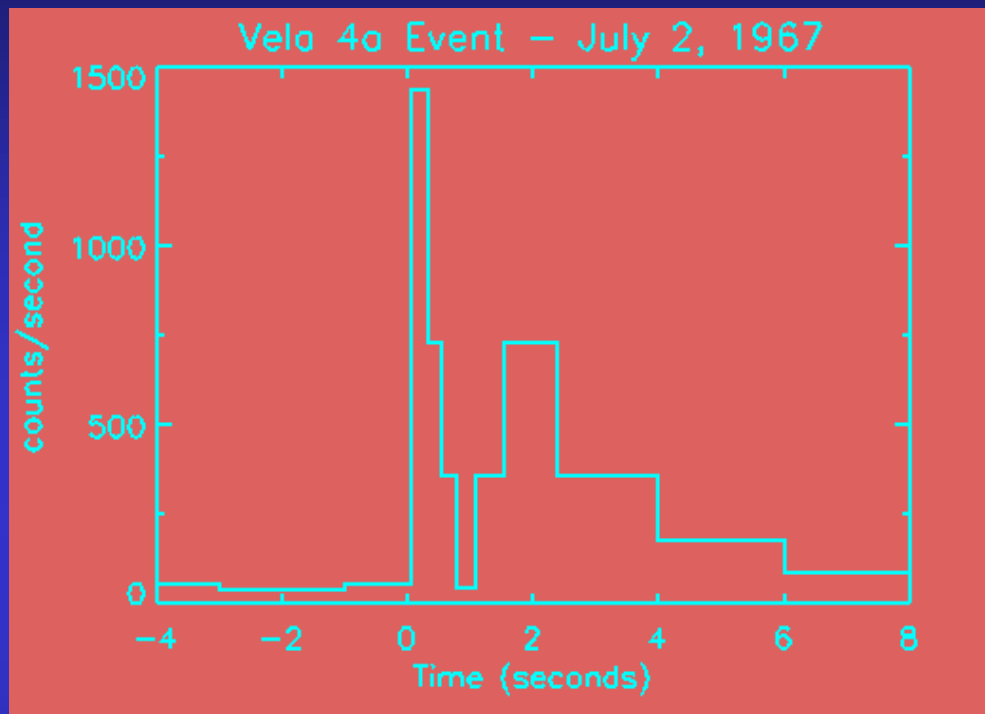
Wystrzelenie satelitów VELA

Stirling Colgate, Los Alamos National Laboratory

- wyposażone w detektory promieni γ
- zdolne wykryć wybuch jądrowy
na odwrotnej stronie Księżyca



2.6.1967 – VELA rejestrują błysk γ



**Ten sam błysk widziany przez oba statki VELA 4A i 4B
ZSRR złamało Układ?**

**Kształt impulsu inny niż dla bomby jądrowej - brak informacji
o kierunku i odległości**

1969 – Wystrzelenie VELA 5 i 6

- możliwość określenia kierunku ($\sim 5^\circ$) i odległości

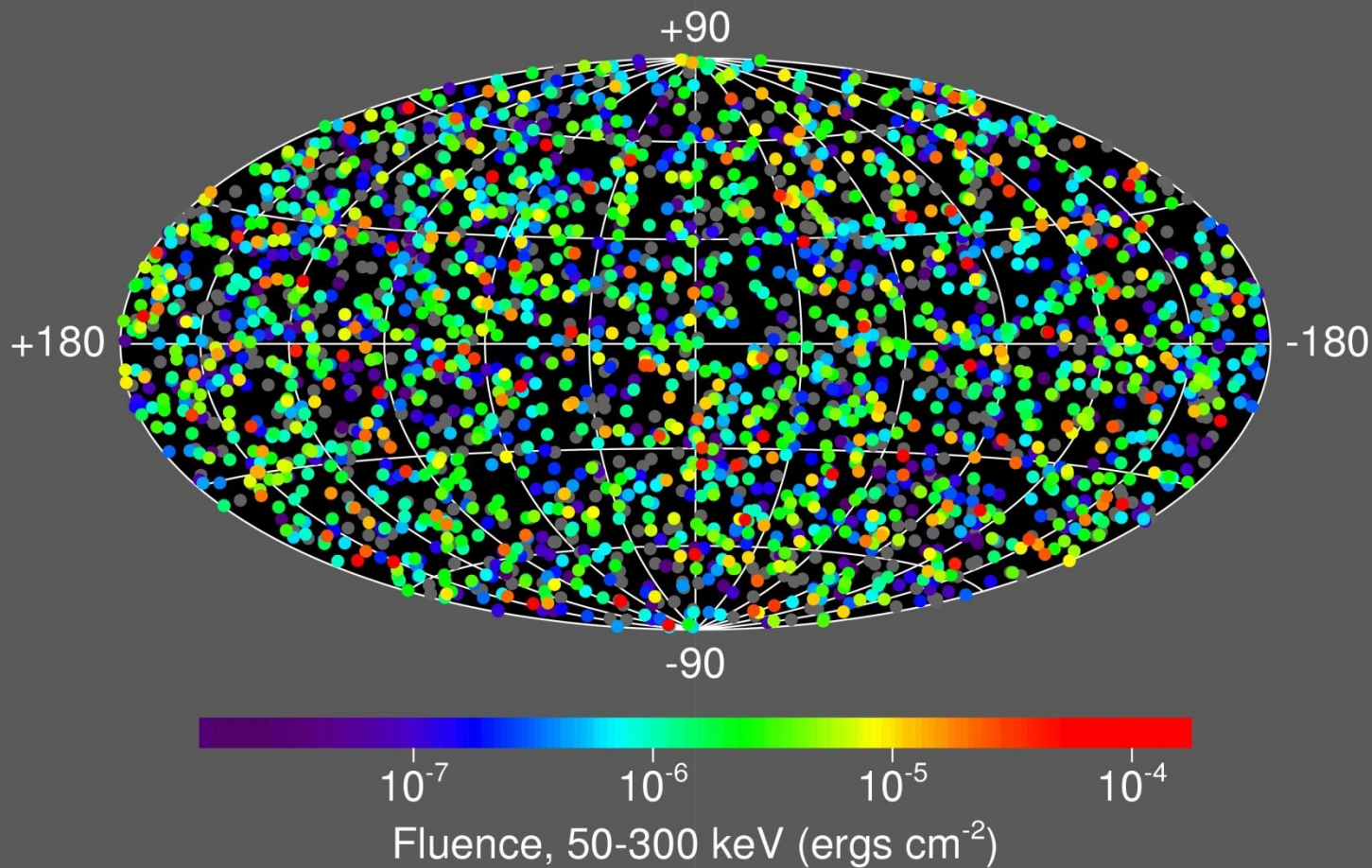
1969-73 – rejestracja
16 błysków γ

1973 – publikacja
wyników



- odległość $>$ milion km
- kierunki wykluczają Słońce i planety
- rozkład \sim izotropowy
- dziennikarze piszą o wojnie jądrowej między kosmitami
- podniecenie wśród astronomów

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



Rozkład izotropowy we współrzędnych Galaktycznych

Błyski gamma

Źródło błysków

- Długie (kilka do kilkuset sekund) – wybuch supernowej
- Krótkie (ułamki sekund) – fuzja dwóch masywnych obiektów (gwiazd neutronowych, czarnych dziur)

Ziemia – Księżyc	1 s
Ziemia – Słońce	8 min
krańce Układu Słonecznego	11 h
najbliższa Słońcu gwiazda	4 lata
średnica Galaktyki	100 000 lat
odległość do M31	2.5 mln lat
widzialny Wszechświat	15 mld lat

Ekspansja Wszechświata

Odkrycie **Hubble'a** w 1929 r.

Galaktyki oddalają się od nas z prędkościami wprost proporcjonalnymi do odległości.

Prędkości mierzymy za pomocą przesunięcia ku czerwieni – efekt Dopplera

Definicja przesunięcia ku czerwieni:

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}}$$

$$z = \frac{v}{c}$$

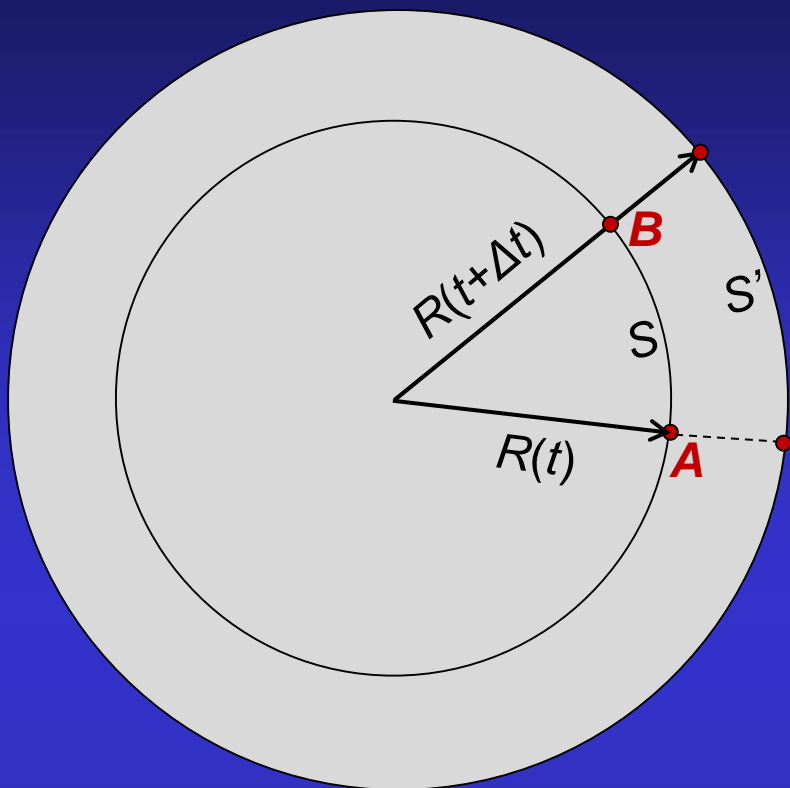
← Prędkość oddalania

← Prędkość światła

Relatywistycznie:

$$1 + z = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}}$$

Czy jesteśmy w centrum Wszechświata?



- Punkty A i B na rozszerzającej się sferze:
- w chwili t są odległe o S
 - w chwili $t + \Delta t$ są odległe o S'

$$\frac{S}{R(t)} = \frac{S'}{R(t + \Delta t)}$$

$$S' = \frac{S \cdot R(t + \Delta t)}{R(t)}$$

Odległość między punktami wzrosła o:

$$S' - S = \frac{S \cdot [R(t + \Delta t) - R(t)]}{R(t)}$$

Prędkość względna wynosi:

$$V_{AB} = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{S \cdot [R(t + \Delta t) - R(t)]}{R(t) \cdot \Delta t}$$

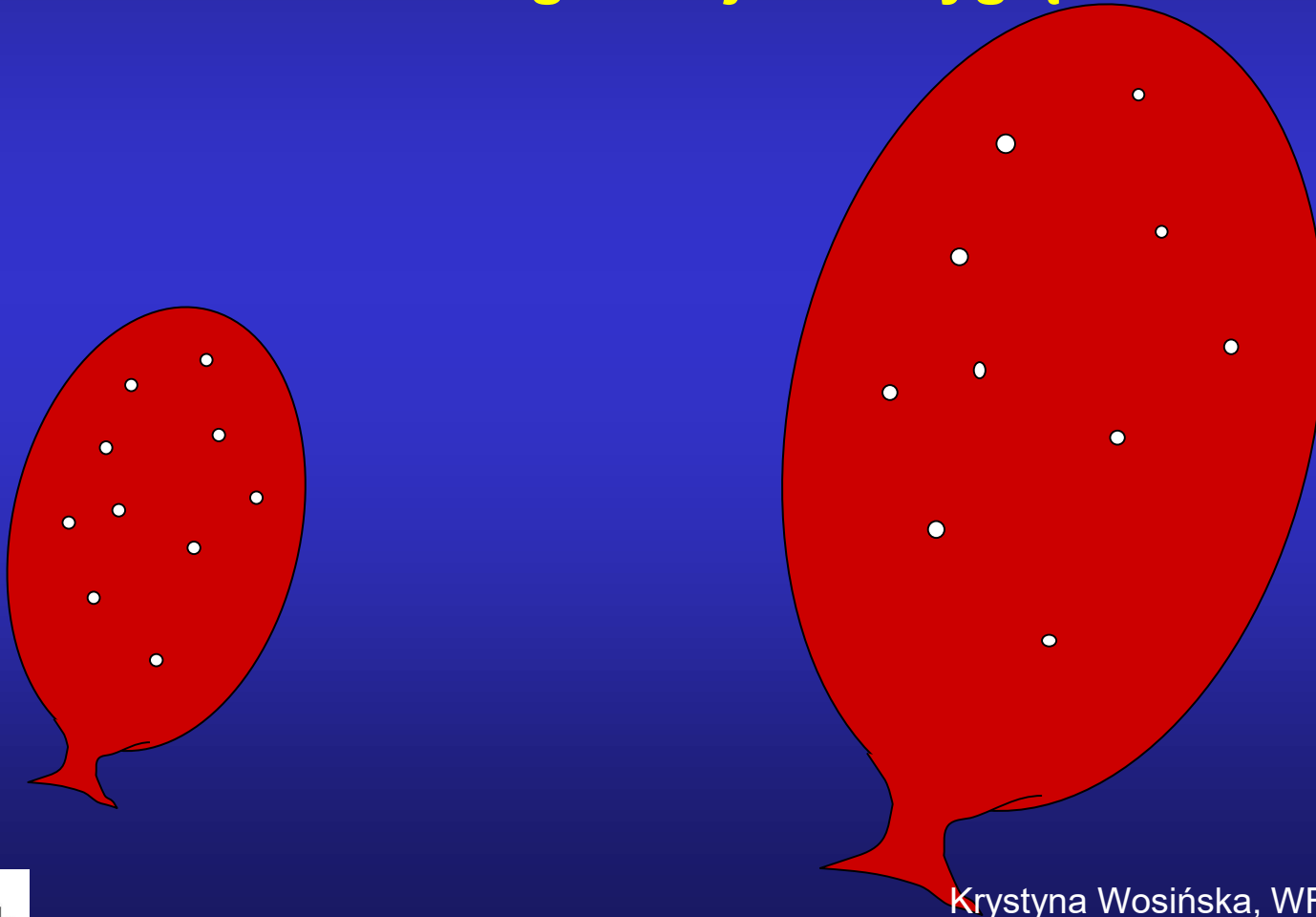
W granicy $\Delta t \rightarrow 0$:

$$V_{AB} = \frac{S \cdot \dot{R}}{R} \Rightarrow \frac{V_{AB}}{S} = \frac{\dot{R}}{R} = H$$

Prędkość względna dowolnych punktów jest wprost proporcjonalna do odległości między nimi.

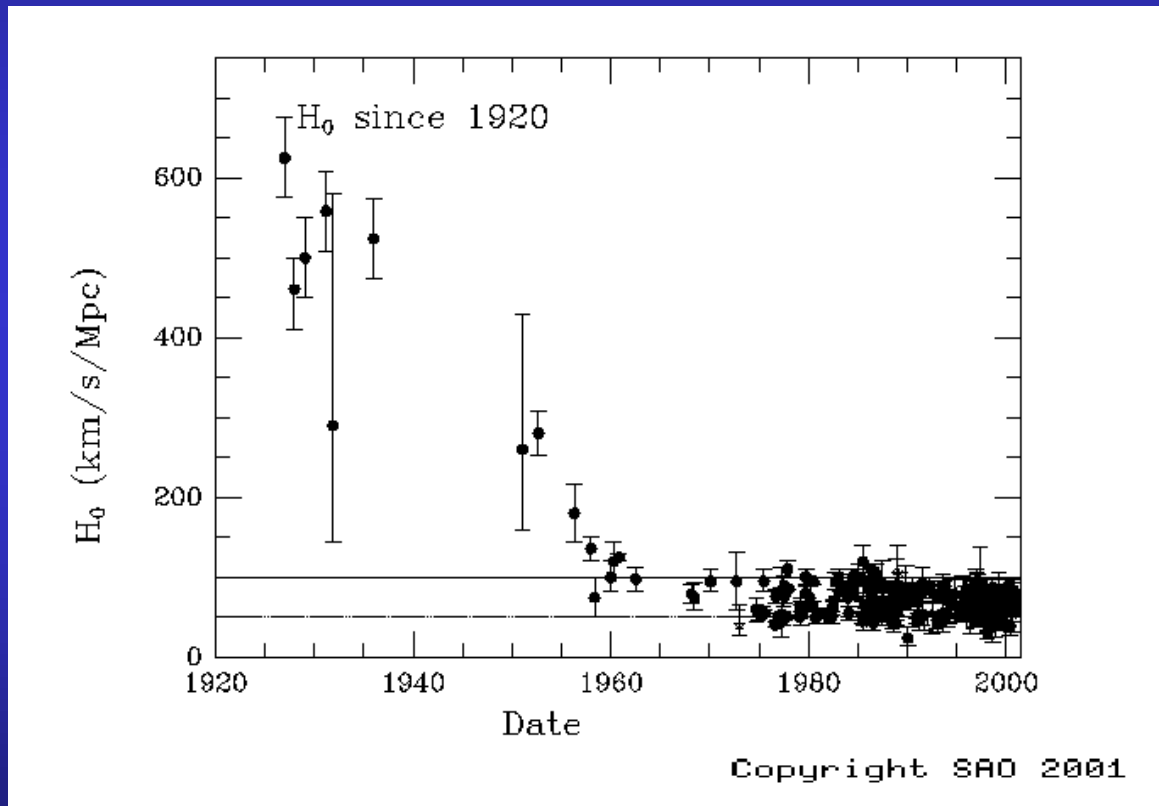
Zasada kosmologiczna:

- We Wszechświecie nie ma wyróżnionych miejsc.
- Wszechświat z każdego miejsca "wygląda" tak samo.



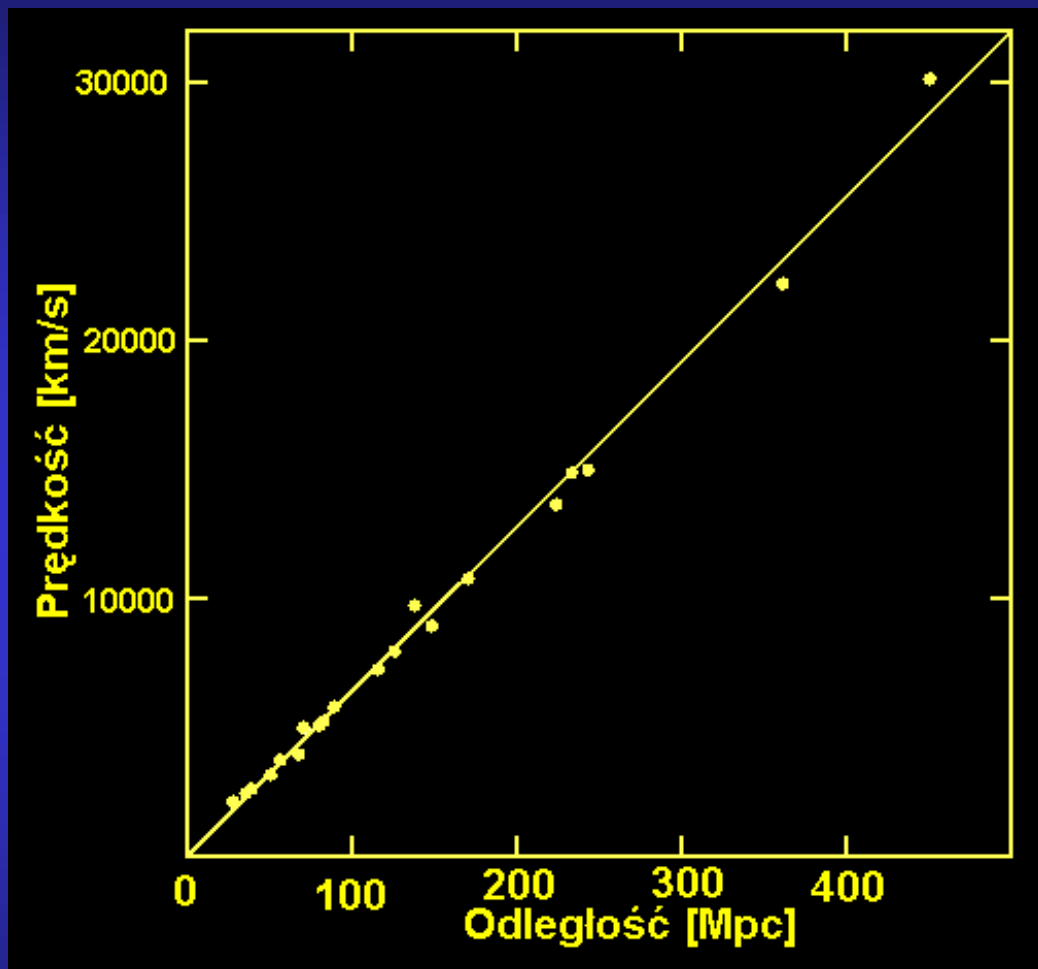
Stała Hubble'a

Ewolucja wyznaczonej wartości stałej Hubble'a.



Wartość z 2013r (misja
Planck):
 $H_0 = 67,8 \pm 0,9$ km/s/Mpc

Ekspansja Wszechświata

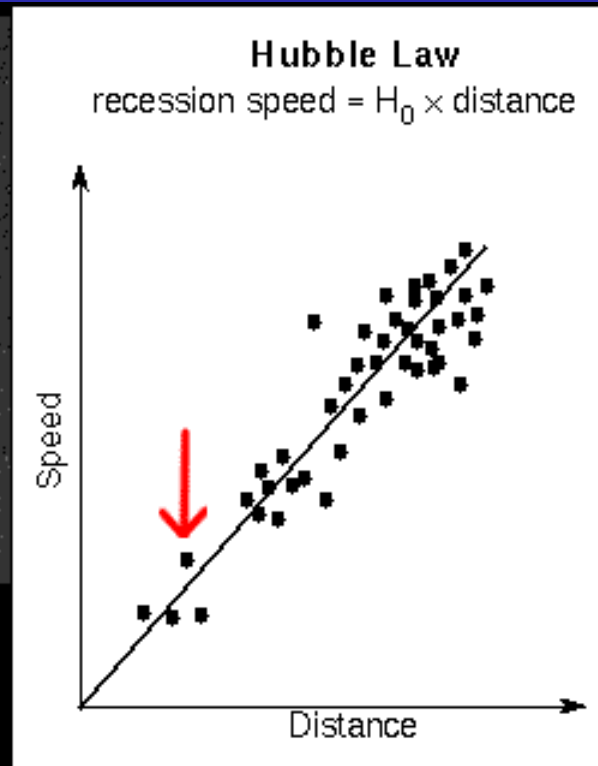
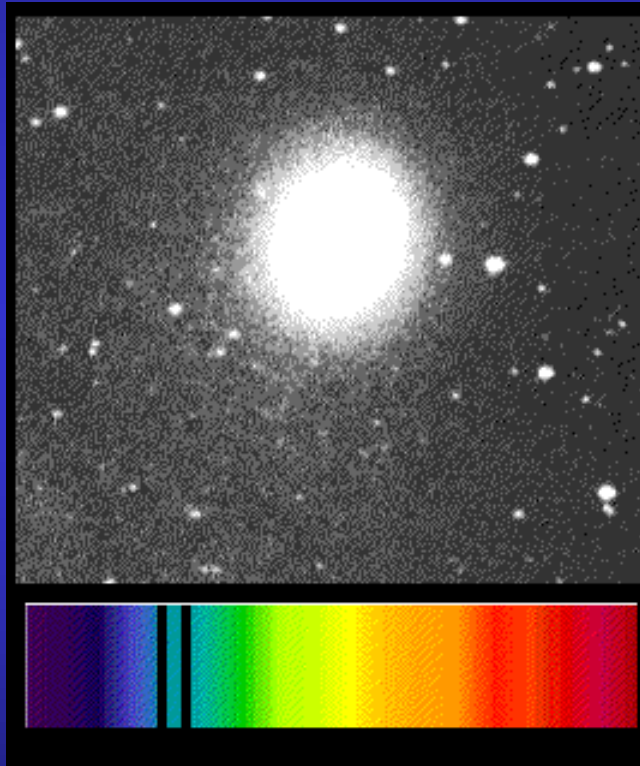


$$v = H \cdot r$$

$$r = v \cdot \frac{1}{H}$$

Parametr $\frac{1}{H}$ (i jego zmiany w czasie) wyznacza wiek Wszechświata

Ekspansja Wszechświata



Hierarchia struktur

- Gwiazdy – synteza jądrowa Słońce – masa $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30}$ kg

Najbliższe gwiazdy w odległości kilku lat świetlnych

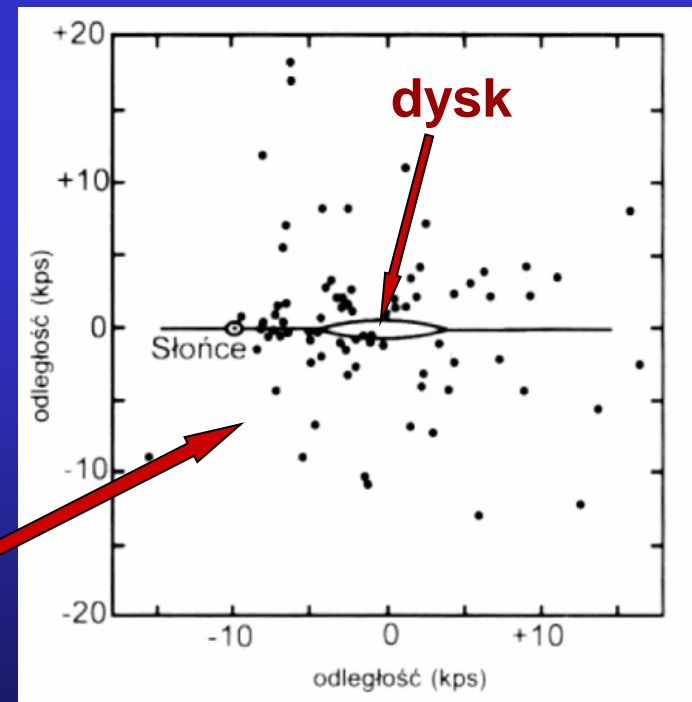
Rok świetlny $\sim 10^{16}$ m

Parsek (pc) ~ 3 lata świetlne

- Galaktyki – skupiska gwiazd

Droga Mleczna od 100 miliardów
do 400 miliardów gwiazd

Gromady kuliste



Hierarchia struktur

- Gromada galaktyk

Grupa Lokalna – grupa galaktyk (ok. 50), w skład której wchodzi Droga Mleczna

Najbliższa galaktyka – mała, nieregularna - Wielki Obłok Magellana (WOM) w odległości 50 kpc



Adromeda – galaktyka podobna do Drogi Mlecznej – odległa o 770 kpc.

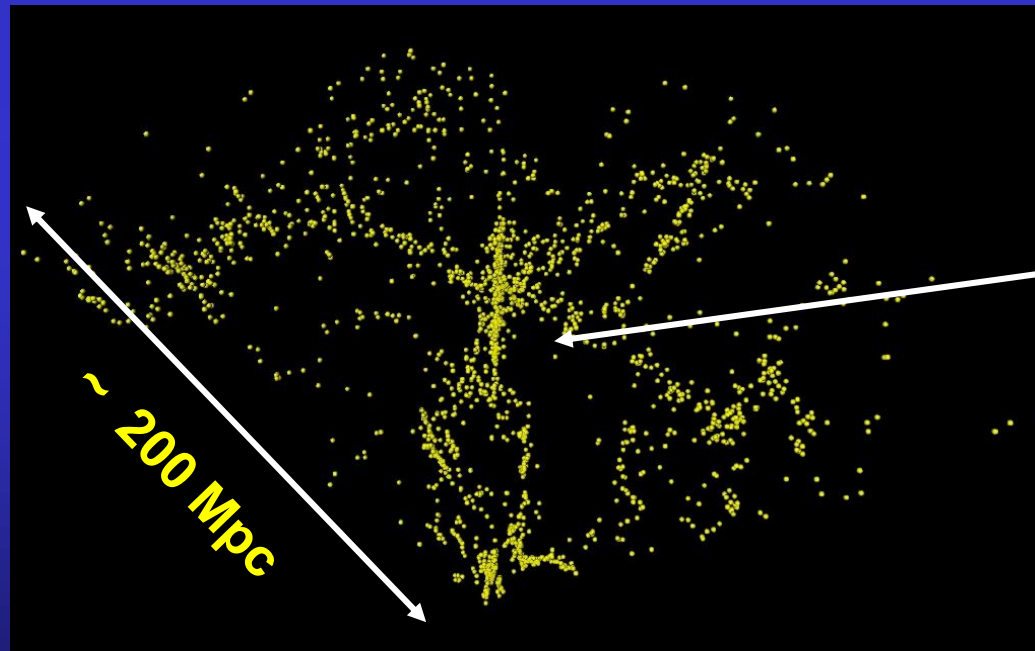


Typowa odległość między galaktykami – 1 Mpc ($\sim 3 \cdot 10^{22}$ m)

Hierarchia struktur

- Gromady galaktyk, supergromady, pustki

W skalach rzędu 100 Mpc widoczne są wielkoskalowe struktury, gromady połączone w ściany i łańcuchy galaktyk. Między nimi są pustki o rozmiarach dochodzących do 50 Mpc



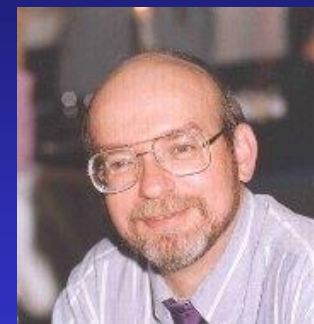
Gromada galaktyk w warkoczu Bereniki

Mapa najbliższego Wszechświata w skali około $1:10^{27}$

Wielkoskalowe struktury Wszechświata



Margaret Geller i John Huchra
z Harvardu



Długofalowy projekt sporządzenia mapy Wszechświata (lata 80).

Cel: znalezienie położenia wielu tysięcy galaktyk.

Odległości galaktyk określane przez przesunięcie dopplerowskie w widmie światła emitowanego przez galaktykę.

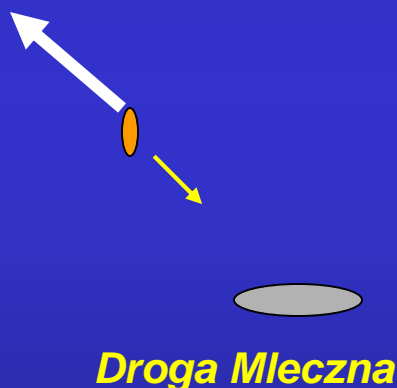
Prawo Hubble'a: $v = H \cdot r$

Przesunięcie dopplerowskie pozwala obliczyć prędkość i następnie z wzoru Hubble'a odległość.

Wielkoskalowe struktury Wszechświata

Taka metoda mierzenia odległości galaktyk obarczona jest błędem wynikającym z zaniedbania **ruchów własnych** galaktyk niezależnych od prędkości ucieczki.

Ta galaktyka jest dalej niż obliczymy z prawa Hubble'a



Ta galaktyka jest bliżej niż obliczymy z prawa Hubble'a

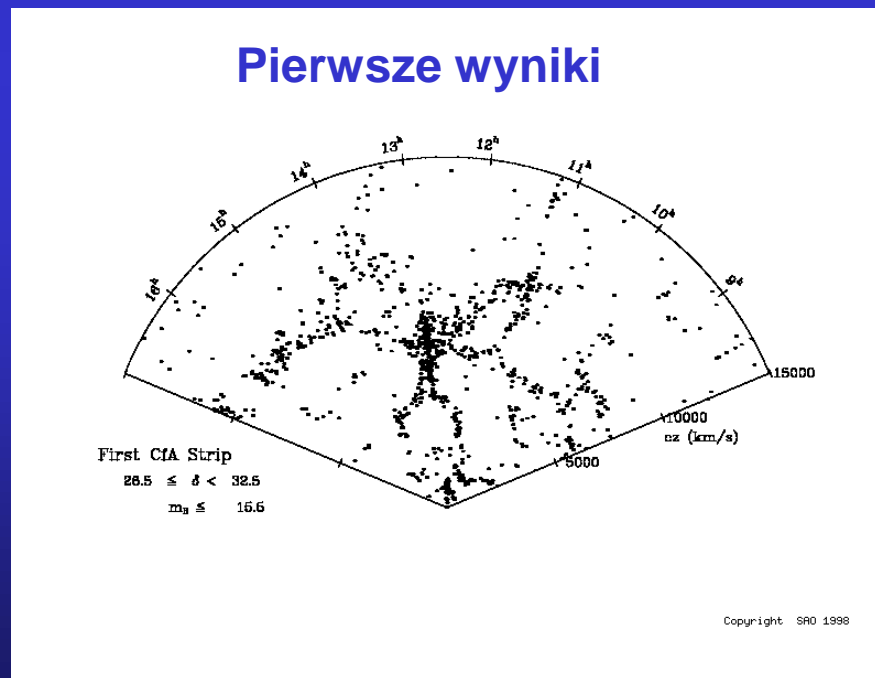


Wielkoskalowe struktury Wszechświata

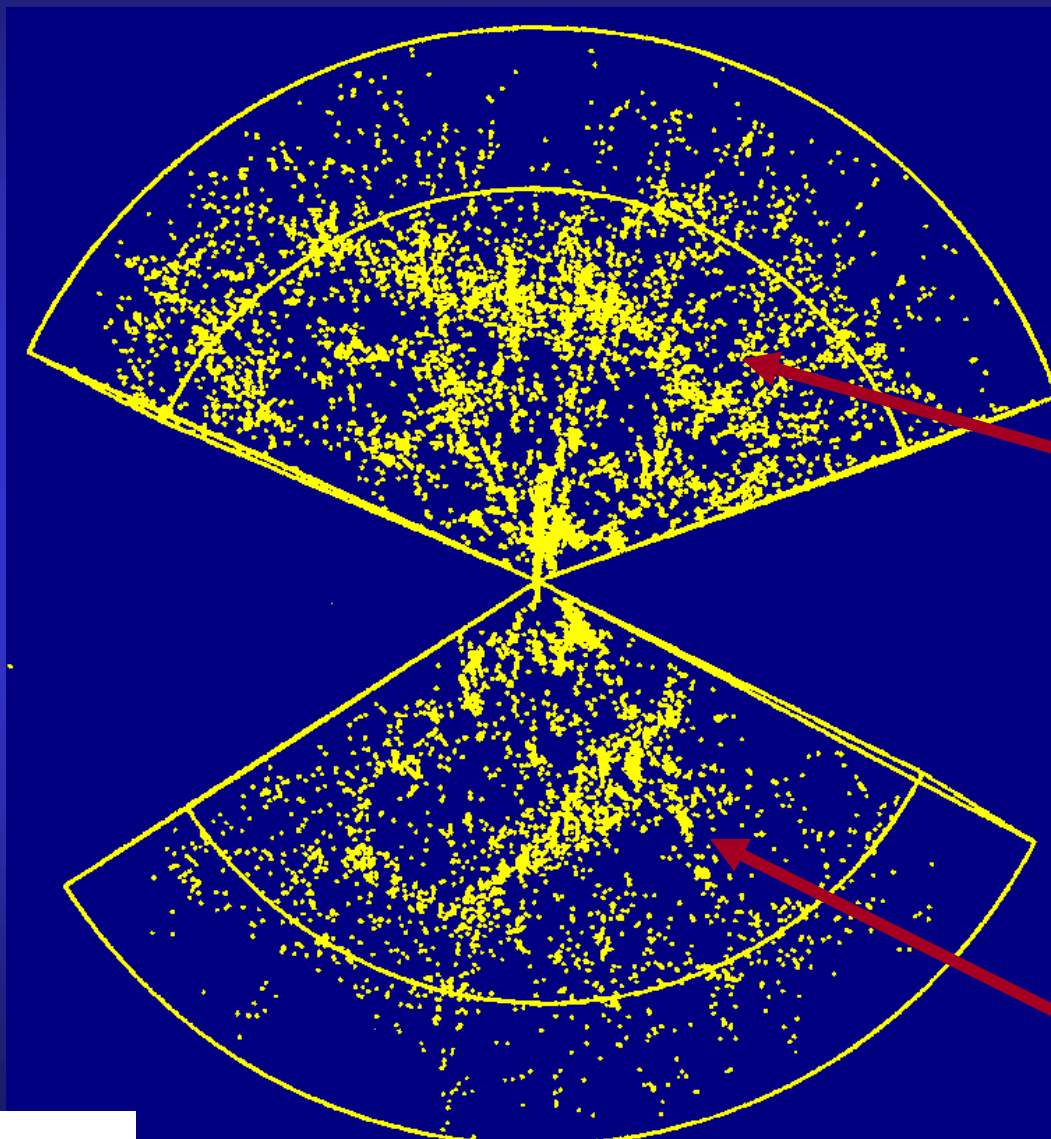
Geller i Huchra wybrali wąski wycinek nieba – pas o szerokości 6° i długości 120° , pokrywający 1/3 obwodu sfery niebieskiej.

Przez kilkanaście lat pracy wyznaczali odległości kilkunastu galaktyk w ciągu jednej nocy – **kilka tysięcy rocznie**.

**Wynik nieoczekiwany:
rozmieszczenie galaktyk
jest niejednorodne!**



Wielkoskalowe struktury Wszechświata



Galaktyki układają się w skomplikowane struktury otaczające olbrzymie puste obszary.

Wielka Ściana Galaktyk, której średnica oceniana jest na 500 milionów lat świetlnych.

Ściany skupiają około 60% galaktyk, natomiast zajmują jedynie 10% objętości Wszechświata.

„palce Boga”?

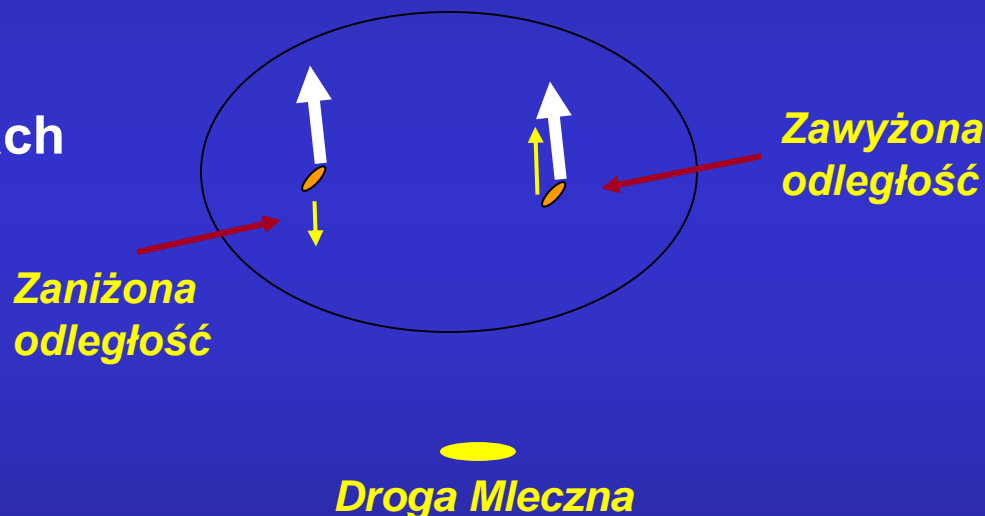
Krystyna Wosińska, WF PW

Wielkoskalowe struktury Wszechświata

„**Palce Boga**” - linie galaktyk wskazujące naszą Galaktykę – **iluzja!**

Efekt założenia, że cała prędkość ucieczki galaktyk jest skutkiem rozszerzania Wszechświata.

Galaktyki krążą po orbitach wokół centrum gromady galaktyk.



W rezultacie obraz takiej grupy galaktyk jest na mapie rozciągnięty.

Wielkoskalowe struktury Wszechświata

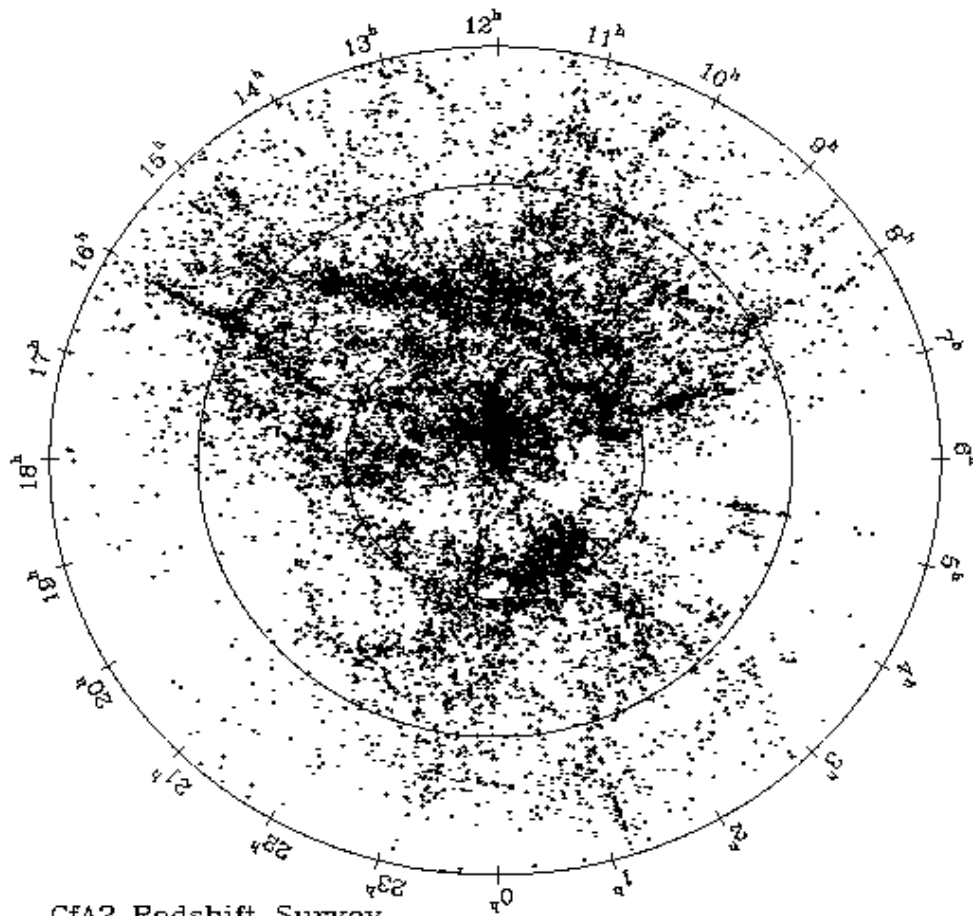
Błąd względny maleje wraz z odległością.

Prędkości **własne** galaktyk rzędu **kilkuset km/s**

Prędkość **ucieczki** najbliższych galaktyk **kilka tysięcy km/s**

Prędkość **ucieczki** najdalszych galaktyk – **kilkanaście tysięcy km/s**

Wielkoskalowe struktury Wszechświata



CIA2 Redshift Survey

Max Radius 15000
 $0 \leq h < 12000$ (km/s)
 $m_B \leq 15.5$

Puck

Copyright SAO 2001

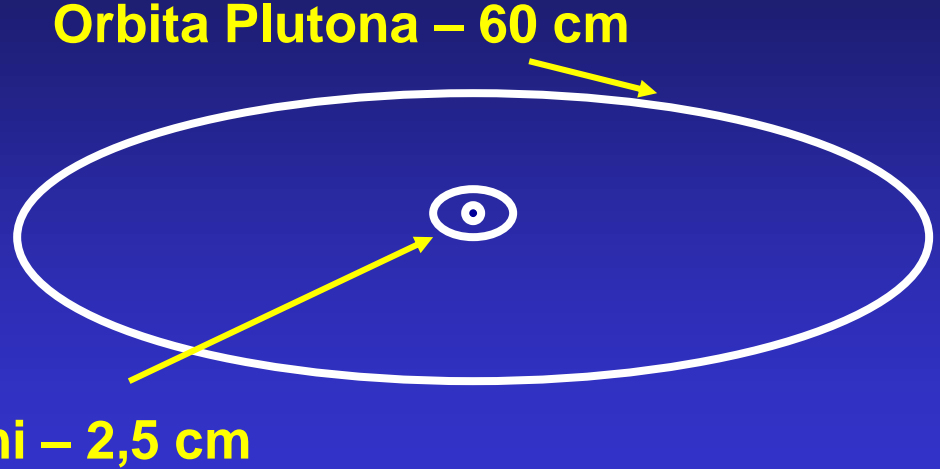
Na mapie przedstawiony wycinek Wszechświata w kształcie krążka o średnicy 30 000 km/s i grubości 12 000 km/s.

Odległości zastąpione tu są przez prędkości ucieczki: $v = H \cdot r$

Rozmiary Wszechświata

D. Goldsmith „Największa pomyłka Einsteina?”

Wyobraźmy sobie Słońce o wielkości ziarnka piasku.



Do najbliższej gwiazdy (Alfa Centauri) odległość wynosi **ponad 3 km.**

Nasza Galaktyka (Droga Mleczna) zawiera około **sto miliardów gwiazd.**



Tyle ziarenek piasku mieści się w pudełku po butach.

Wielkość Galaktyki w tej skali odpowiada odległości Księżyca od Ziemi.



Galaktykę wypełnia głównie pusta przestrzeń.

Rozmiary Wszechświata

Zmiana skali: **Droga Mleczna** wielkości dużego talerza.

Słońce

Gwiazdy widoczne gołym okiem znajdują się w odległości 3 mm od Słońca.



Najbliższa sąsiednia galaktyka, **Galaktyka Andromedy** to drugi talerz w odległości kilku metrów.

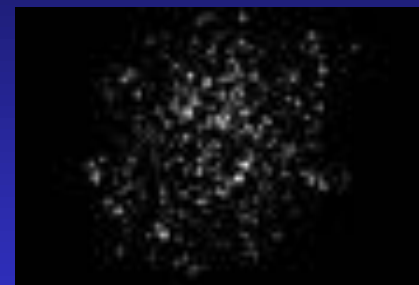


Galaktyki tworzą gromady galaktyk. Droga Mleczna należy do Grupy Lokalnej

W naszej skali: Grupa Lokalna to kilkadziesiąt tac, talerzyków itp. W odległościach kilku do kilkunastu metrów od siebie.

Rozmiary Wszechświata

Najbliższa gromada galaktyk
(**gromada w Pannie**) odległa o
kilkaset metrów.



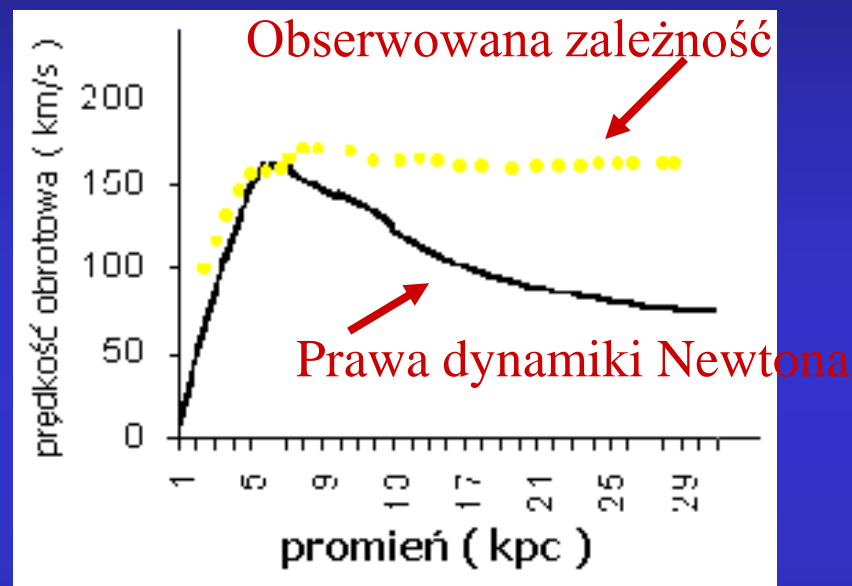
Inne gromady galaktyk: gromada
w Warkoczu Bereniki odległa o
1,5 km,
gromada w gwiazdozbiorze
Bliźniąt – **6 km**



Najdalsze zidentyfikowane gromady galaktyk są w odległości **80 km**.



Rotacja galaktyk – ciemna materia?



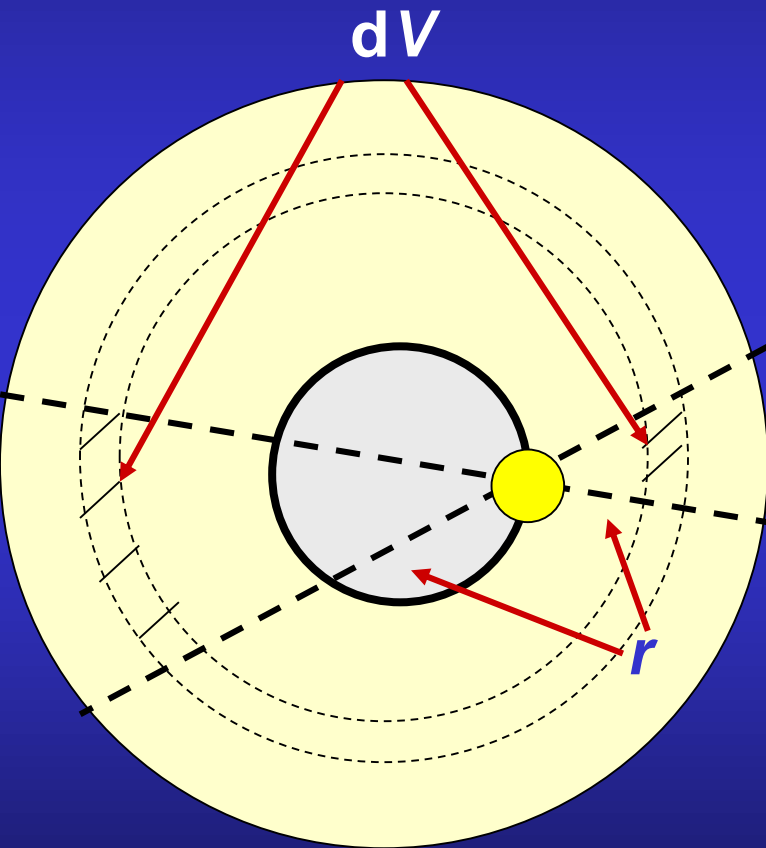
Galaktyki wirują szybciej niż pozwalają na to prawa dynamiki i grawitacji



Muszą zawierać więcej materii niż widać!

Rotacja galaktyk

W analizie ruchu gwiazdy wokół centrum galaktyki wykorzystujemy prawo grawitacji Newtona.



Całą masę galaktyki dzielimy na 2 części:

1. Leżącą bliżej środka galaktyki niż gwiazda
2. Leżącą dalej od środka galaktyki

Masa galaktyki zawarta w elemencie dV :

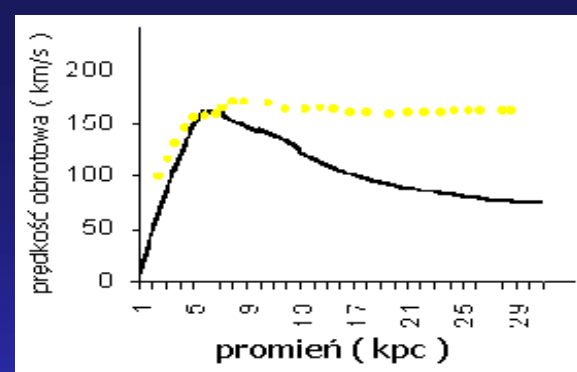
$$dM \propto \rho \cdot r^2 dr$$

Więc siła grawitacji od masy w elemencie dV działająca na gwiazdę:

$$dF \propto \frac{1}{r^2} \Rightarrow dF \propto \rho \cdot dr$$

Siły od przeciwległych elementów równoważą się

Rotacja galaktyk



Efektywna siła grawitacji pochodzi tylko od masy leżącej bliżej środka niż gwiazda.

$$\frac{mv^2}{R} = \frac{GmM(R)}{R^2}$$

Siła grawitacji jest siłą dośrodkową

$$v = \sqrt{\frac{GM(R)}{R}} = \sqrt{\frac{4}{3}G\rho\pi \cdot R}$$

Prędkość gwiazd wewnątrz galaktyki jest proporcjonalna do R .

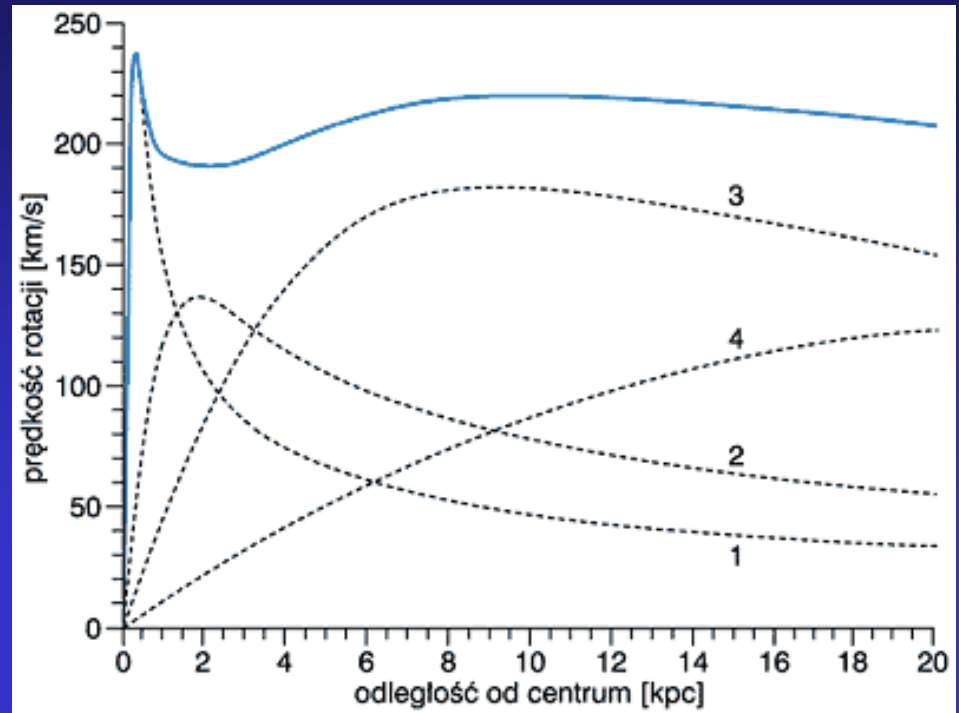
$$v = \sqrt{\frac{GM_{całk}}{R}}$$

Prędkość gwiazd na peryferiach galaktyki powinna maleć, gdy rośnie R .

Ciemna materia

Model krzywej rotacji galaktyki NGC 6946.

Niebieska linia odpowiada
całkowitej prędkości rotacji.



<http://www.wiw.pl/astronomia/1004-galaktyki.asp>

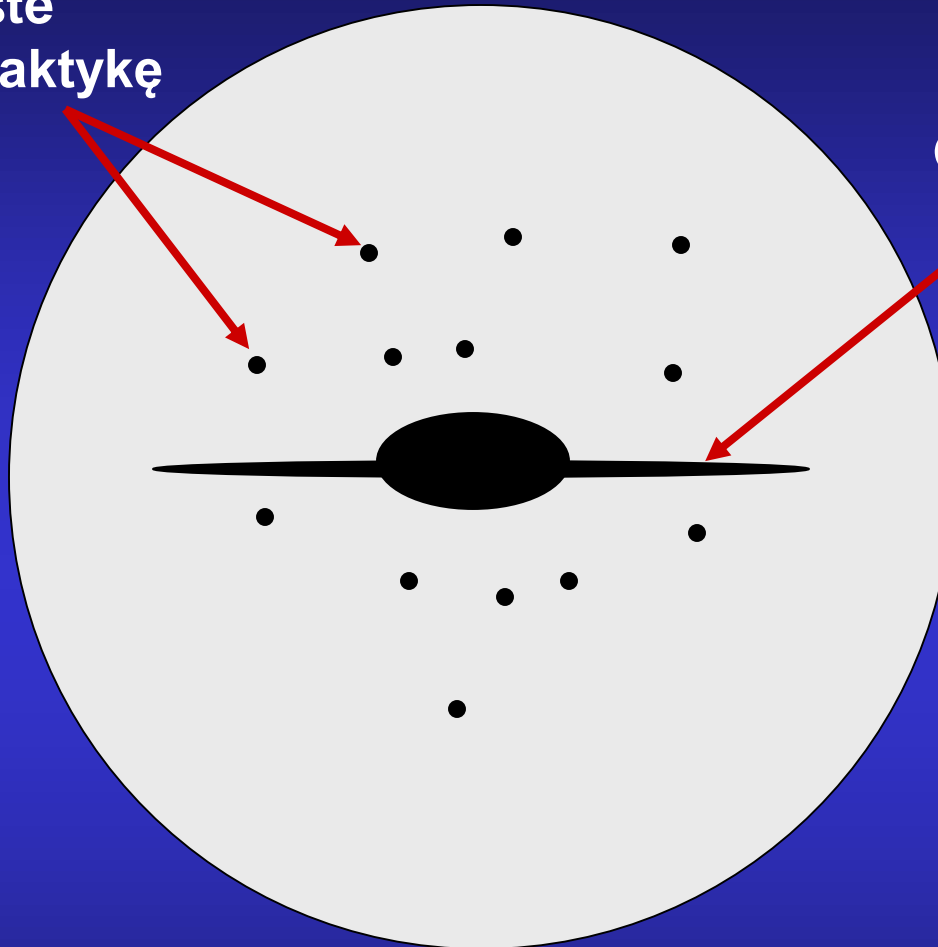
Masa galaktyki (w funkcji odległości od środka) została rozłożona na cztery składowe:

- 1 - jądro o masie 5×10^9 mas Słońca i promieniu 120 parseków (pc);
- 2 - zagęszczenie centralne o masie $1,4 \times 10^{10}$ mas Słońca i promieniu 750 parseków;
- 3 - dysk o masie $1,3 \times 10^{11}$ mas Słońca, promieniu 6 kiloparseków (kpc) i grubości 0,5 kpc;
- 4 - sferyczne halo o masie 2×10^{11} mas Słońca i promieniu 10 kpc.

Ciemna materia

Gromady kuliste
otaczające galaktykę

Galaktyka



Galaktykę otacza sferyczne halo o rozmiarach znacznie większych niż rozmiary galaktyki.

Ciemna materia

Poszukiwania ciemnej materii w dużo większej skali –
pomiar prędkości galaktyk w gromadach.



Ponad 60 lat temu Fritz Zwicky badał przesunięcia dopplerowskie galaktyk tworzących gromadę w Warkocz Bereniki.

Całkowita masa gromady okazała się kilkaset razy większa niż suma mas galaktyk oszacowana na podstawie znajomości jasności i mas pojedynczych gwiazd.



Ciemna materia

Pomiary prowadzone w ostatnich 30 latach pokazują, że wiele galaktyk ma olbrzymie, masywne halo zbudowane z ciemnej materii.

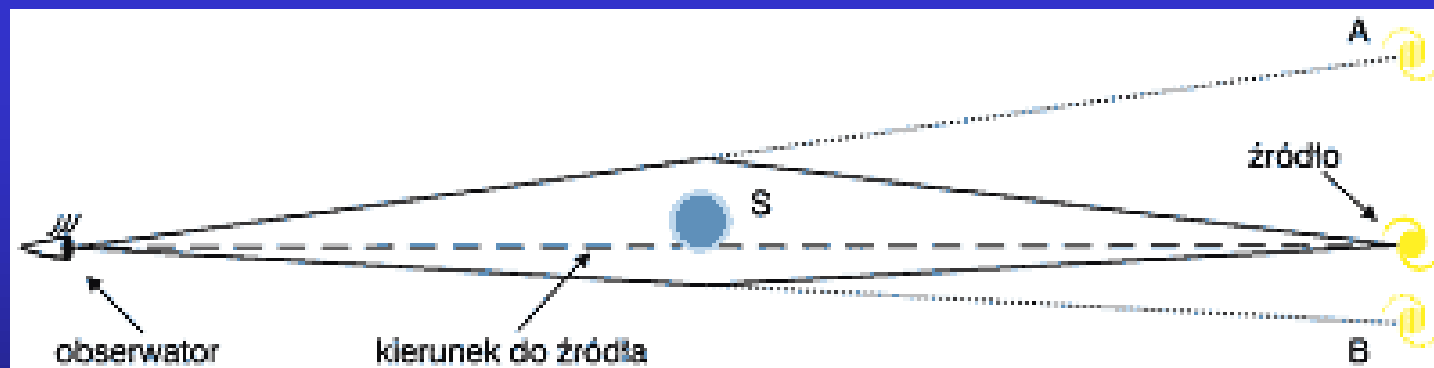
Dodatkowe potwierdzenie tej hipotezy otrzymano badając ruch dwóch położonych blisko siebie galaktyk wokół wspólnego środka masy.

Droga Mleczna i Wielka Mgławica w Andromedzie zbliżają się do siebie z prędkością względną 270 km/s – masy muszą być dużo większe niż suma mas gwiazd.

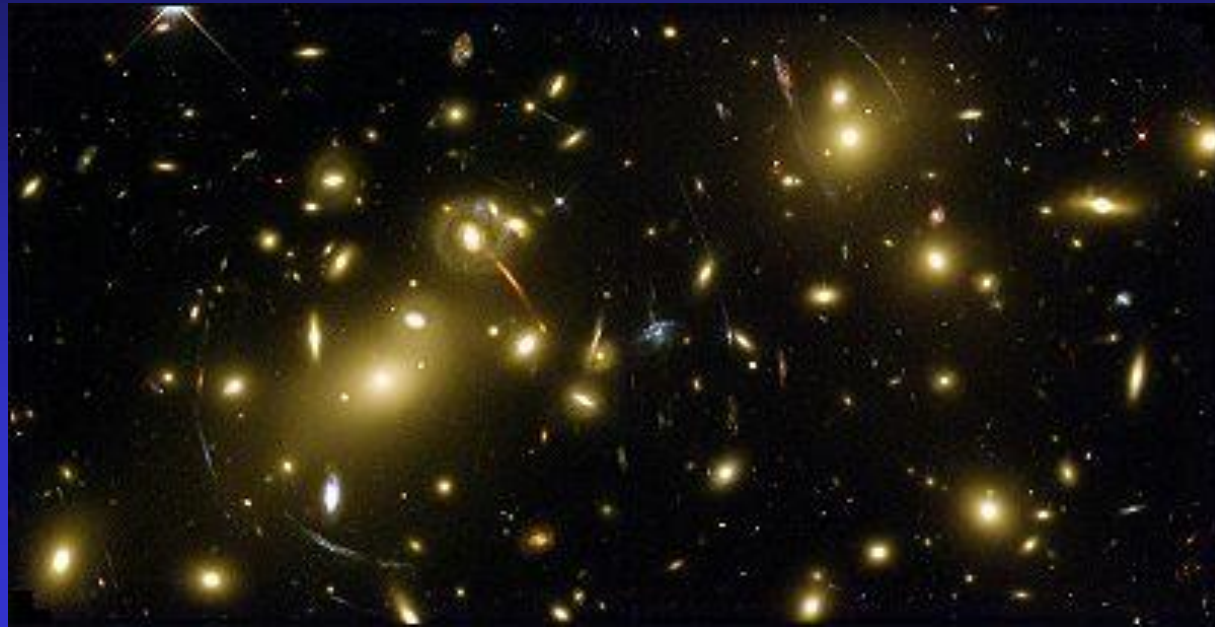
Masa ciemnej materii wydaje się być 5 – 10 razy większa niż materii widzialnej.

Soczewkowanie grawitacyjne

Niezależne potwierdzenie dużych mas gromad galaktyk uzyskuje się dzięki zjawisku soczewkowania grawitacyjnego, tj. ugięcia promieni świetlnych przez pole grawitacyjne. Ze względu na duże masy gromad, efekt ten jest stosunkowo łatwo i często obserwowany. Jednocześnie, wskutek ogniskowania wiązki światła wzmocnieniu ulega obserwowana jasność bardzo odległych galaktyk i kwazarów.



Soczewkowanie grawitacyjne



Gromada galaktyk A2218 zniekształca obrazy odległych galaktyk. Na pierwszym planie widać jasne galaktyki z gromady; cienkie świetliste łuki są wydłużonymi i zakrzywionymi koncentrycznie wokół środka masy obrazami galaktyk tła. Rozmieszczenie i kształt łuków pozwalają wyznaczyć rozkład masy tej gromady. Fot. HST/NASA.

Soczewkowanie grawitacyjne



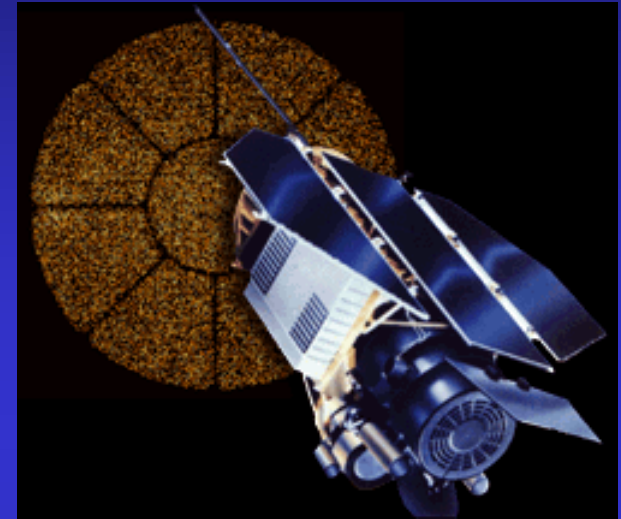
Zaginanie promieni świetlnych galaktyki spiralnej przez pole grawitacyjne gromady galaktyk CI0024+1654. Znajdujące się na pierwszym planie żółtawe galaktyki gromady uginają promienie świetlne niebieskiej galaktyki spiralnej. W wyniku tego powstało pięć oddzielnych obrazów tej galaktyki: jeden blisko środka zdjęcia, a pozostałe cztery - rozmieszczone w przybliżeniu wzdłuż okręgu "na godzinach" 4, 8, 9 i 10. Gromada CI0024+1654 znajduje się w gwiazdozbiornie Ryb, w odległości około 1500 megaparseków (Mpc); galaktyka spiralna - mniej więcej dwa razy dalej. **Fot. HST/NASA.**



Inne sposoby badania wpływu grawitacji:

Satelita **ROSAT** **RO**entgen **SAT**elite

W 1992 roku Satelita ROSAT zbadał promieniowanie rentgenowskie emitowane z grupy trzech galaktyk (NGC2300) w gwiazdozbiornie Cefeusza



Grupa jest zanurzona w obszarze emitującym promieniowanie rentgenowskie, mającym średnicę ponad miliona lat świetlnych – energia tego promieniowania jest 10 miliardów razy większa niż energia wysyłana ze Słońca w postaci światła widzialnego.

Ciemna materia

1. Promieniowanie rentgenowskie jest emitowane przez gorący gaz.
2. Natężenie i częstość promieniowania rentgenowskiego mówi o tym, ile jest tego gazu i jaką ma temperaturę.
3. Można obliczyć, jaką masę musi zawierać gromada galaktyk, aby gaz nie rozproszył się w przestrzeni.
4. Należy oszacować całkowitą masę zawartą w świecących gwiazdach.

Porównanie mas otrzymanych w 3 i 4 kroku prowadzi do wniosku, że większość masy w gromadzie NGC2300 to ciemna materia

50 razy więcej ciemnej materii niż widzialnej!

Ciemna materia

Całkowitą masę materii można ocenić również w obszarach dużo większych niż gromady galaktyk, mierząc wielkoskalowe przepływy, które odchylają ruch galaktyk od globalnego przepływu Hubble'a.

Analizy statystyczne przeprowadzone przez Marca Davisa dowodzą, że przepływy takie istnieją i świadczą o występowaniu ciemnej materii w największych skalach odległości. Jest jej co najmniej 10 razy więcej niż zwykłej materii.

Z obserwacji wynika, że ciemna materia jest rozmieszczona bardziej jednorodnie niż świecąca, choć też tworzy skupiska.

Ciemna materia

Czym jest ciemna materia?

Wiemy czym nie jest:

nie składa się z barionów i leptonów

- Obserwacje w 1994 r. wykonane przez Kosmiczny Teleskop Hubble'a wykluczyły słabo świecące czerwone karły.
- Kolejny kandydat – ciemne mniejsze ciała jak: planety, komety, planetoidy (MACHO – MASSive Compact Halo Object) również nie może stanowić głównego składnika ciemnej materii

Ciemna materia

Czym jest ciemna materia?

Neutrino i antyneutrino - cząstki o masach niewiele większych od zera – Wszechświat zawiera około miliarda razy więcej *neutrin niż protonów czy neutronów* – **neutrino stanowią nie więcej niż połowę ciemnej materii.**

Nieznane do tej pory cząstki: struny kosmiczne, cząstki supersymetryczne, monopole magnetyczne i wiele innych.

Poszukiwania tych cząstek niezwykle trudne, bo oddziałują ze zwykłą materią tylko grawitacyjnie i słabo.

Ciemna materia

Ciemnej materii poszukuje się także w laboratoriach.

Podziemne laboratorium pod tamą Oroville w Kaliforni –
poszukiwania **WIMP** (**W**eacly **I**nteracting **M**assive **P**articles)

WIMP – hipotetyczne cząstki o masie 10 – 100 GeV.

*Przypuszcza się, że w każdej sekundzie 100 000 wimpów
przechodzi przez każdy cm^2 Ziemi, w tym również przez
nasze ciała.*

„Looking for WIMPs – A Review”

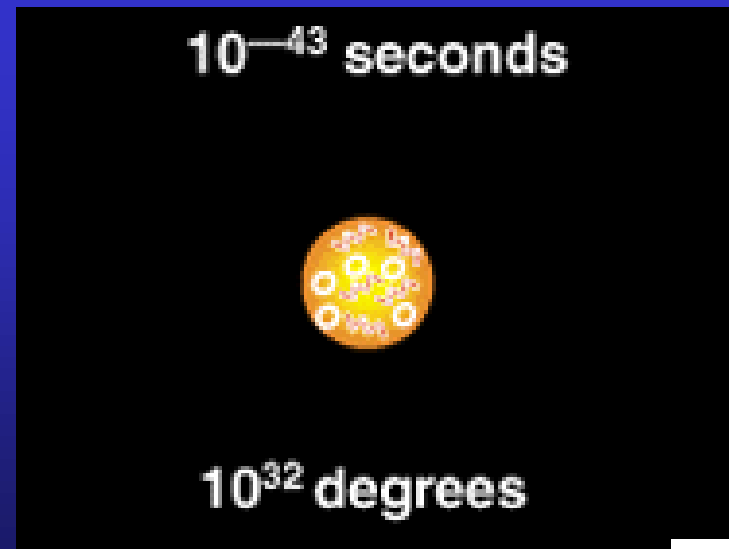
http://www.physics.umd.edu/courses/Phys798g/Paik07/Burrola_paper.pdf

Krótką historia Wszechświata

10^{-43} s

- Nie potrafimy opisać Wszechświata w tej fazie.
- Wszechświat rozszerza się bardzo szybko.
- Nierozróżnialne oddziaływania są w równowadze z materią i antymaterią.

Temperatura 10^{32} K



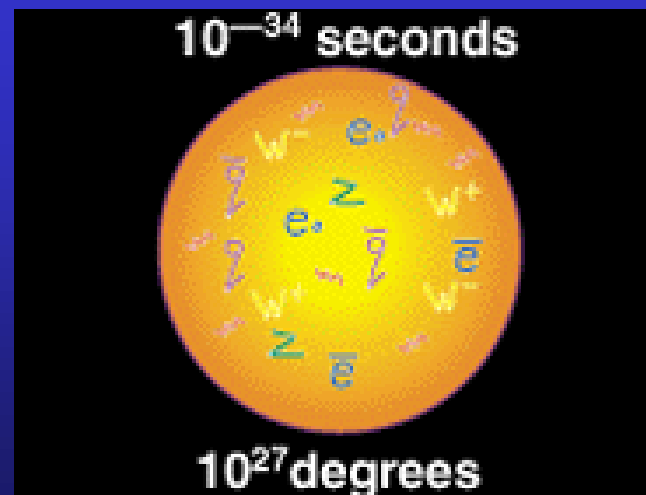
Krystyna Wosińska, WF PW

Krótką historia Wszechświata

10^{-34} s

- Dalsze rozszerzanie – maleje gęstość i temperatura.
- Oddziaływanie silne oddziela się od oddziaływań elektroslabych.
- Materia w postaci **plazmy kwarkowo-gluonowej**.

Temperatura 10^{27} K



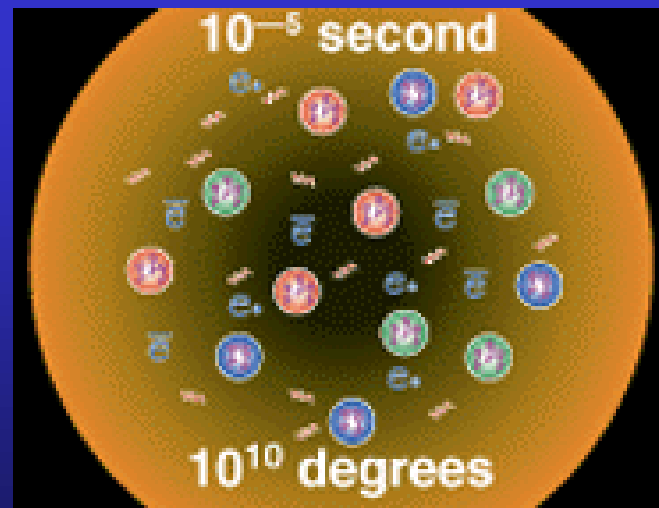
Krystyna Wosińska, WF PW

Krótką historia Wszechświata

10^{-5} s

- Kwarki łączą się w protony i neutrony.
- Antymateria zaczyna zanikać - promieniowanie ma zbyt małą energię, aby ją wytwarzać.

Temperatura 10^{10} K

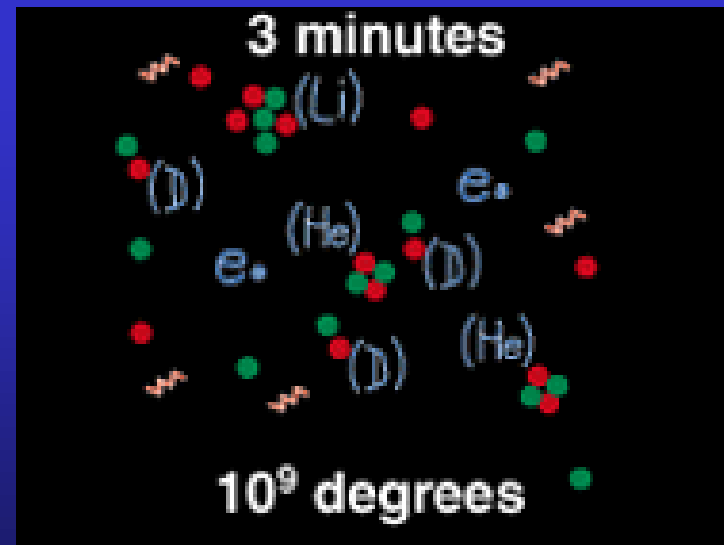


Krótką historia Wszechświata

3 minuty

- Protony i neutrony tworzą lekkie jądra (D, He, Li).
- Ustala się zawartość lekkich izotopów we Wszechświecie.

Temperatura 10^9 K

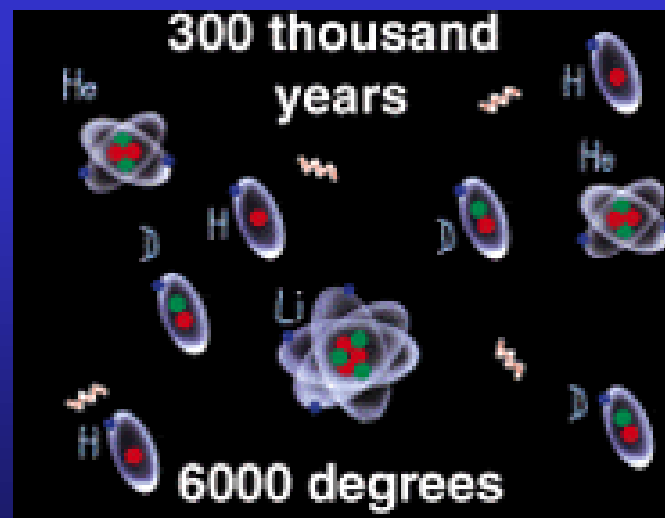


Krótką historia Wszechświata

300 000 lat

- Powstają atomy – elektrony zostają wychwycone przez jądra.
- Materia staje się przezroczysta dla fotonów.
- Z tego okresu pochodzi obserwowane obecnie promieniowanie reliktowe.

Temperatura 6000 K



Krótką historia Wszechświata

200 mln lat

- Powstawanie galaktyk i gwiazd.
- Synteza jądrowa w gwiazdach – powstawanie pierwiastków ciężkich.

Temperatura 18 K



Krystyna Wosińska, WF PW

Krótką historia Wszechświata

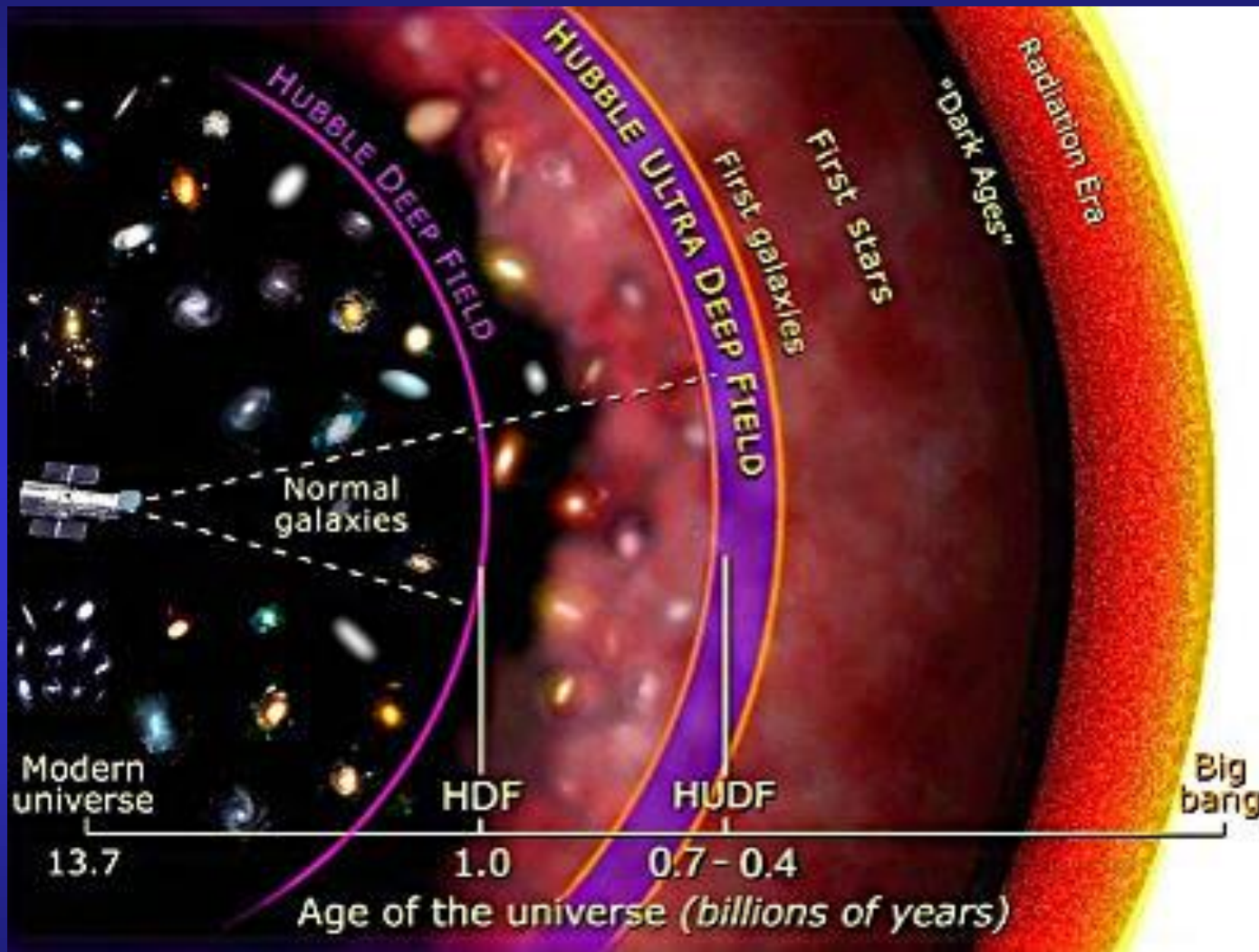
13,7 miliardów lat

- Chwila obecna

Temperatura 2,7 K



Krótką historia Wszechświata



Patrząc na odległe obiekty, widzimy przeszłość.

Krystyna Wosińska, WF PW