

# KU POCZĄTKOWI WSZECHŚWIATA

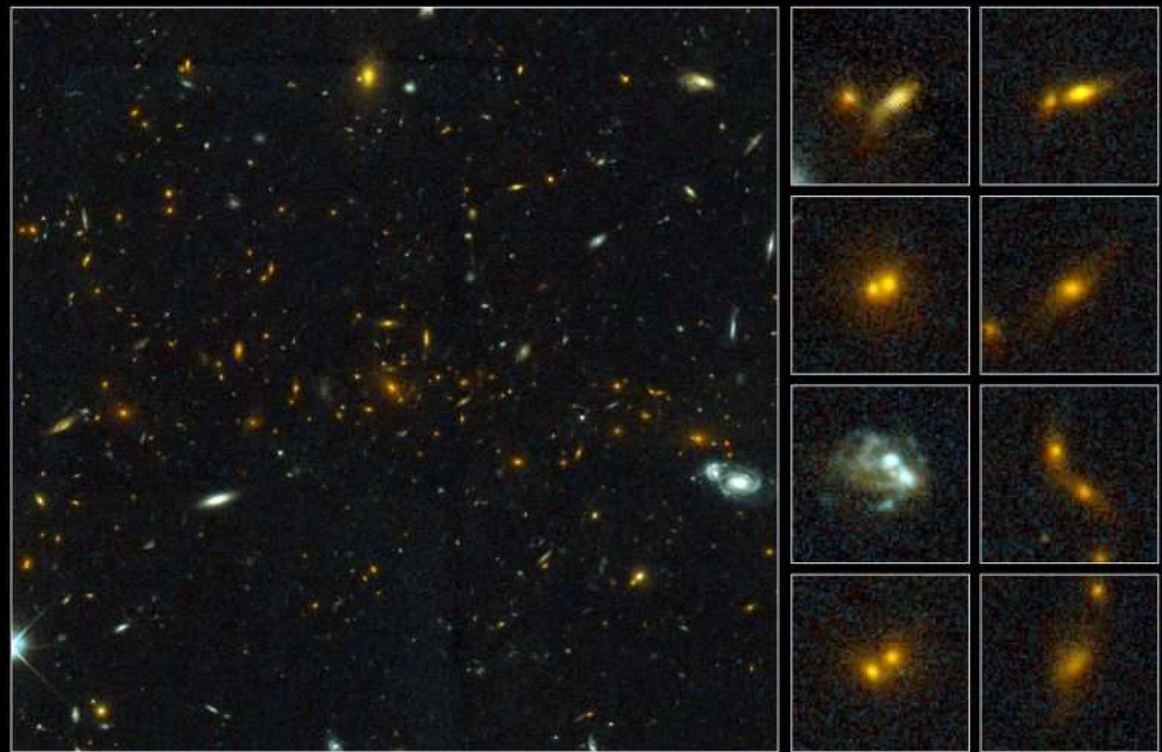
[CZ. 1]

EKSPANDUJĄCY WSZECHŚWIAT

**ZALEDWIE OD STU LAT WIEMY O ISTNIENIU WE  
WSZECHŚWIECIE WIELKICH STRUKTUR (SKUPISK  
MATERII) ZWANYCH GALAKTYKAMI.  
ODLEGŁOŚCI MIĘDZYGALAKTYCZNE WYRAŻA SIĘ W  
WIELU MILIONACH LAT ŚWIETLNYCH**



M100 © Anglo-Australian Observatory  
Photo by David Malin



**Galaxy Cluster MS1054-03**

Hubble Space Telescope • Wide Field Planetary Camera 2

PRC99-28 • STScI OPO • P. van Dokkum (University of Groningen), ESA and NASA

***Spróbujmy więc poznać bliżej wielkoskalową strukturę oraz ewolucję WSZECHŚWIATA tak jak je dziś postrzegamy. Zajmuje się tym KOSMOLOGIA.***

***Kosmologia zajmuje się  
strukturą i ewolucją  
Wszechświata jako całości.***

***Jest to dziedzina  
interdyscyplinarna na  
pograniczu astronomii, fizyki,  
matematyki a także filozofii.***

## **Podstawowe pytania, na które kosmologia miała dać odpowiedź:**

- **Czy Wszechświat jest przestrzennie skończony czy nieskończony?**
- **Czy Wszechświat jest skończony czy nieskończony w czasie (czy miał jakiś początek i czy będzie jakiś koniec jego trwania)?**
- **Czy Wszechświat jako całość jest statyczny (niezmienny) czy też podlega jakiejś ewolucji?**

# PRÓBY ODPOWIEDZI NA POPRZEDNIE PYTANIA FORMUŁOWANE W JĘZYKU FIZYKI NEWTONOWS- KIEJ PROWADZIŁY DO RÓŻNYCH PARADOKSÓW.

Np. jeśli Wszechświat zajmuje skończony obszar przestrzeni to:

- (a) dlaczego cała materia (wszystkie gwiazdy) z tego skończonego Wszechświata nie spadną przyciągnięte grawitacyjnie na jego centrum (środek masy),
- (b) co jest tam dalej za tym obszarem?

A co jest tutaj  
na zewnątrz?



# PRÓBY ODPOWIEDZI NA POPRZEDNIE PYTANIA FORMUŁOWANE W JĘZYKU FIZYKI NEWTONOWS- KIEJ PROWADZIŁY DO RÓŻNYCH PARADOKSÓW.

Np. jeśli Wszechświat zajmuje skończony obszar przestrzeni to:

- (a) dlaczego cała materia (wszystkie gwiazdy) z tego skończonego Wszechświata nie spadną przyciągnięte grawitacyjnie na jego centrum (środek masy),
- (b) co jest tam dalej za tym obszarem?

A co jest tutaj  
na zewnątrz?



**TUTAJ JEST PIEKŁO DLA TYCH CO  
ZADAJĄ TAKIE GŁUPIE PYTANIA!!!**

# PRÓBY ODPOWIEDZI NA POPRZEDNIE PYTANIA FORMUŁOWANE W JĘZYKU FIZYKI NEWTONOWS- KIEJ PROWADZIŁY DO RÓŻNYCH PARADOKSÓW.

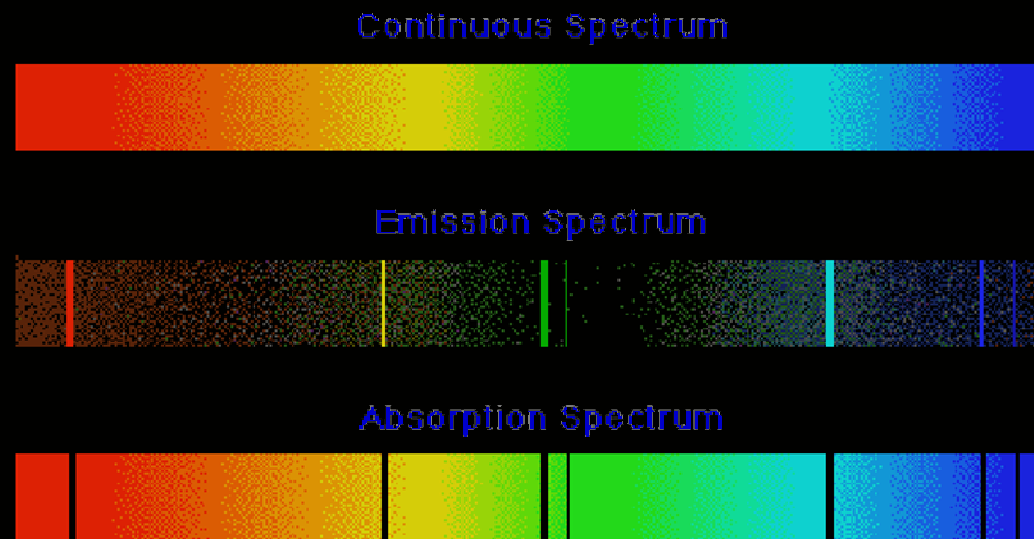
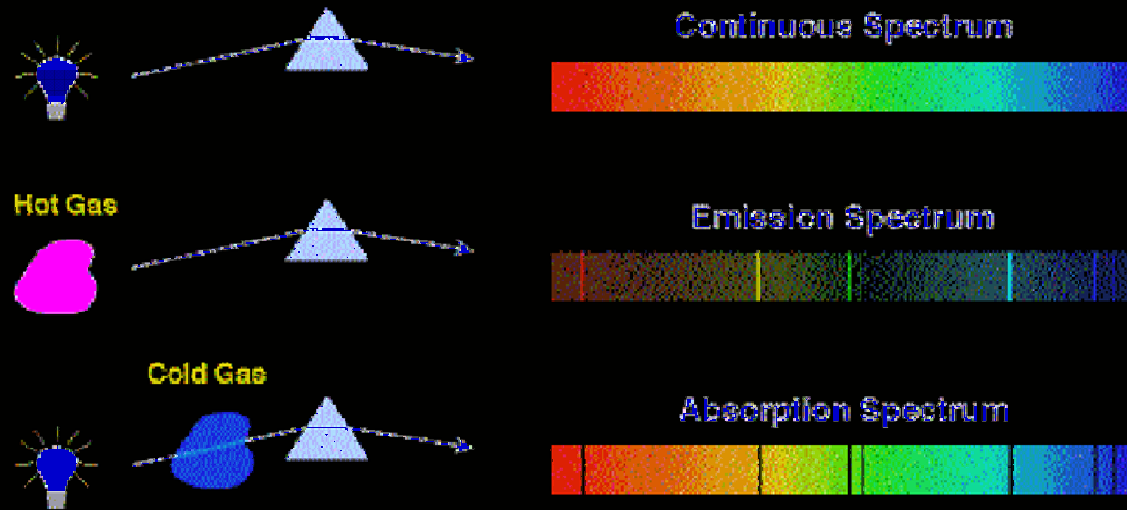
Jeśli zaś Wszechświat jest przestrzennie nieskończony to dlaczego, mimo nieskończonej liczby gwiazd nocne niebo jest ciemne zamiast świecić jak powierzchnia gwiazdy?

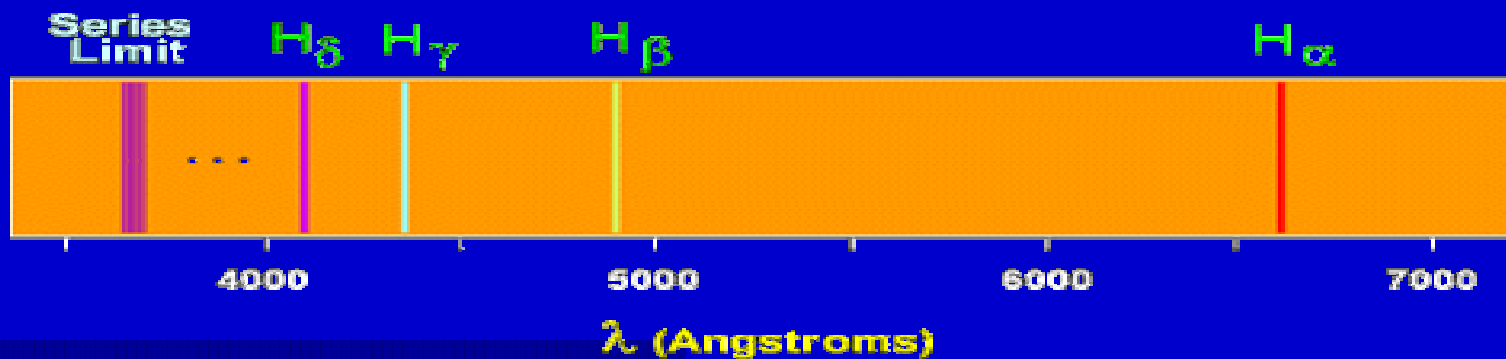
2009-02-25





# WIELE INFORMACJI O OBIEKTACH KOSMICZNYCH DOSTARCZA ANALIZA ICH WIDM, ZWŁASZCZA LINIE ABSORPCYJNE PIERWIASTKÓW.

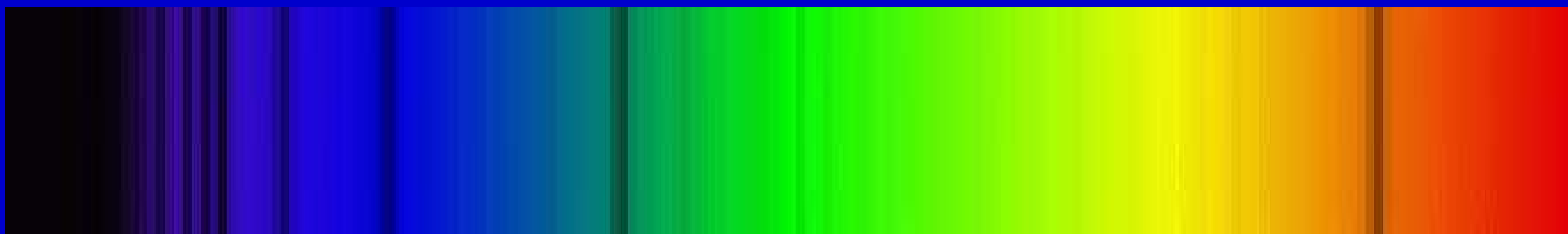




**CHARAKTERYSTYCZNE LINIE WIDMOWE WODORU – TZW. SERIA BALMERA.**

**KAŻDY PIERWIASTEK MA CHARAKTERYSTYCZNY DLA SIEBIE ZBIÓR LINII WIDMOWYCH O DOBRZE ZNANYCH DŁUGOŚCIACH FALI**

**ZA POMOCĄ SPEKTROGRAFU WSPÓŁPRACUJĄCEGO Z TELESKOPEM ROBI SIĘ WIDMA OBIEKTÓW KOSMICZNYCH I IDENTYFIKUJE W NICH LINIE WIDMOWE PIERWIASTKÓW.**



2009-02-25

**(PRZYKŁADOWE WIDMO GWIAZDY)**

# HISTORII CIĄG DAJSZY

**1916 - 17** EINSTEIN FORMUŁUJE SWOJĄ OGÓLNĄ TEORIĘ WZGLĘDNOŚCI I NA JEJ BAZIE PIERWSZY - TZW. STATYCZNY MODEL KOSMOLOGICZNY.

**1922** FRIEDMAN ZNAJDUJE DYNAMICZNE (DOPUSZCZAJĄCE EKSPANSJĘ) ROZWIĄZANIA KOSMOLOGICZNE.  
EINSTEIN POCZĄTKOWO TRAKTUJE Z NIECHĘCIĄ WYNIK FRIEDMANA.

# ODKRYCIE HUBBLE'A (1929)

- Hubble zauważył, że linie widmowe pierwiastków w widmach galaktyk są przesunięte względem laboratoryjnych długości fali w stronę fal dłuższych.
- Wielkość tego przesunięcia („redshift”) definiujemy:

$$z := \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{lab}}}{\lambda_{\text{lab}}} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{lab}}}$$

**Okazało się ono wprost proporcjonalne do odległości „r” do badanej galaktyki**

## ODKRYCIE HUBBLE'A (c.d.)

Przesunięcie to zinterpretowano jako efekt Dopplera czyli jako oddalanie się galaktyk od nas.

Dla małych przesunięć ( $z < 0.15$ ) stosować można

nie relatywistyczny wzór Dopplera:

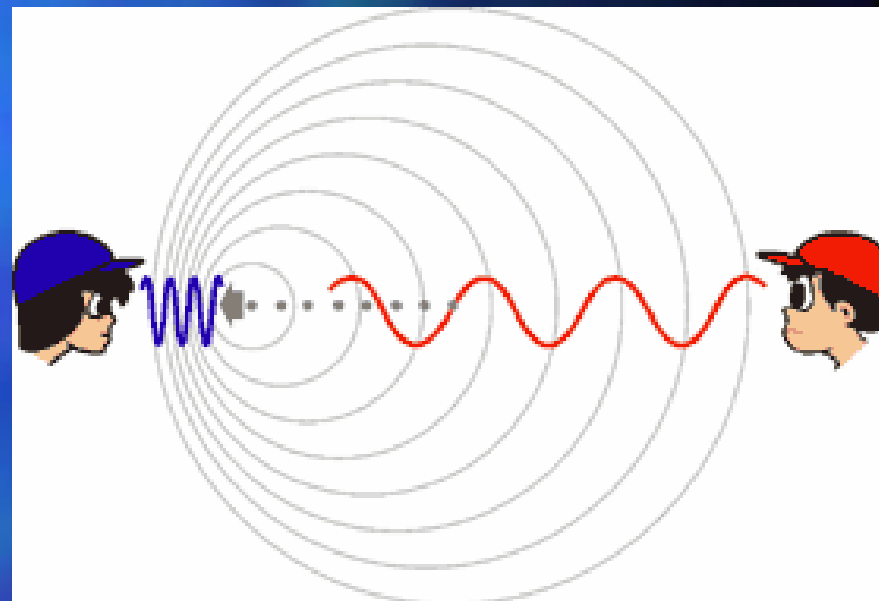
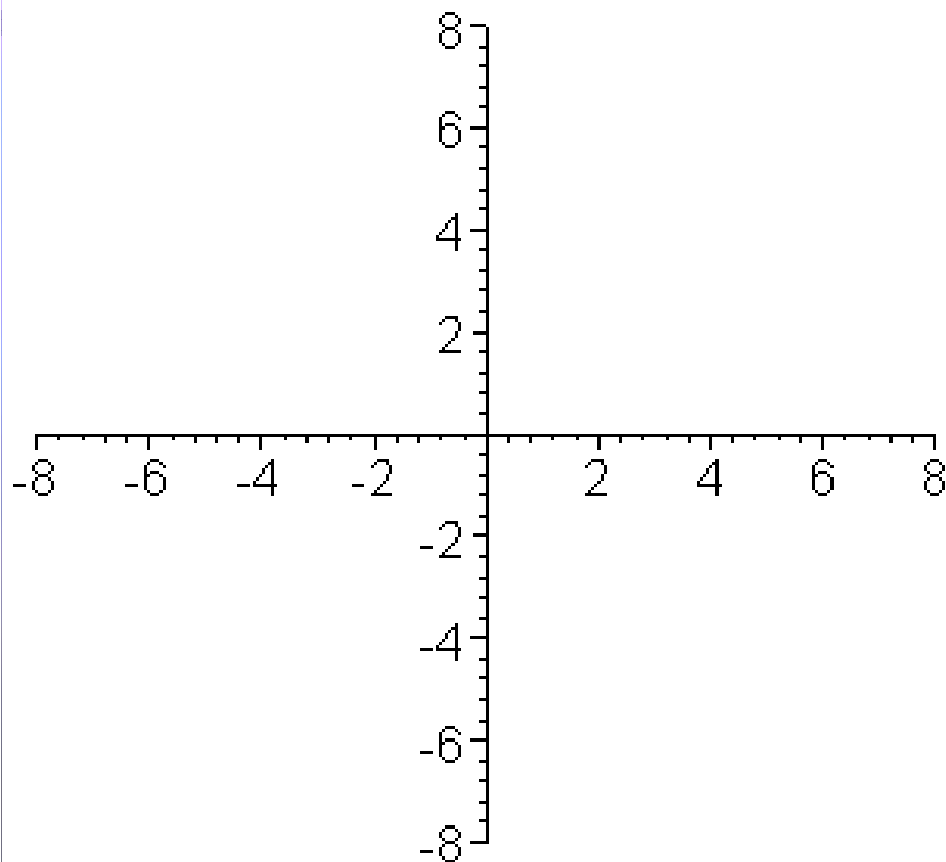
$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{lab}}} = \frac{v}{c}$$

Przy większych wartościach przesunięć należy stosować pełny relatywistyczny wzór:

$$z = \frac{1 + \frac{v_r}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1$$

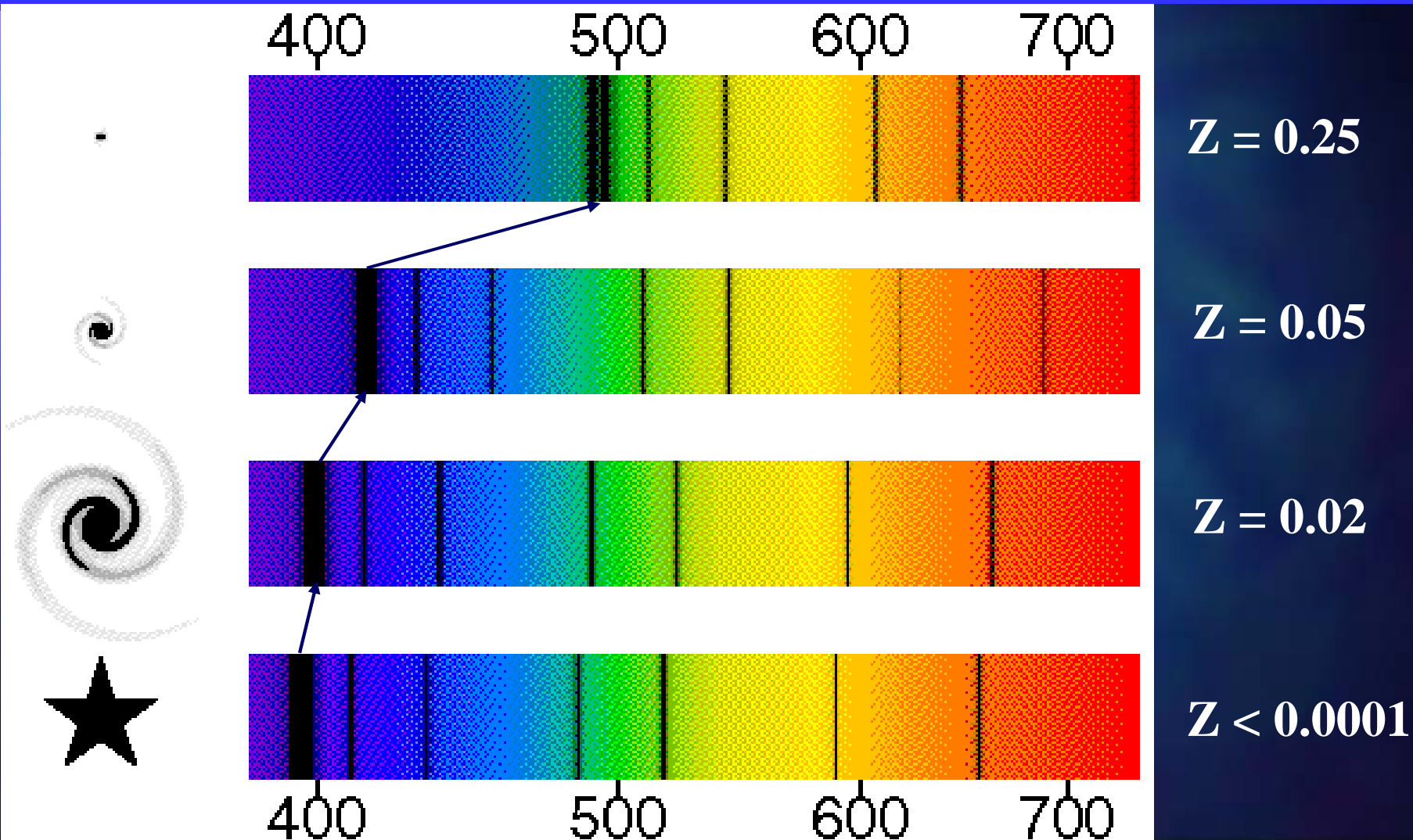
## ODKRYCIE HUBBLE'A (c.d.)

Przesunięcie to zinterpretowano jako efekt Dopplera czyli jako oddalanie się galaktyk od nas.



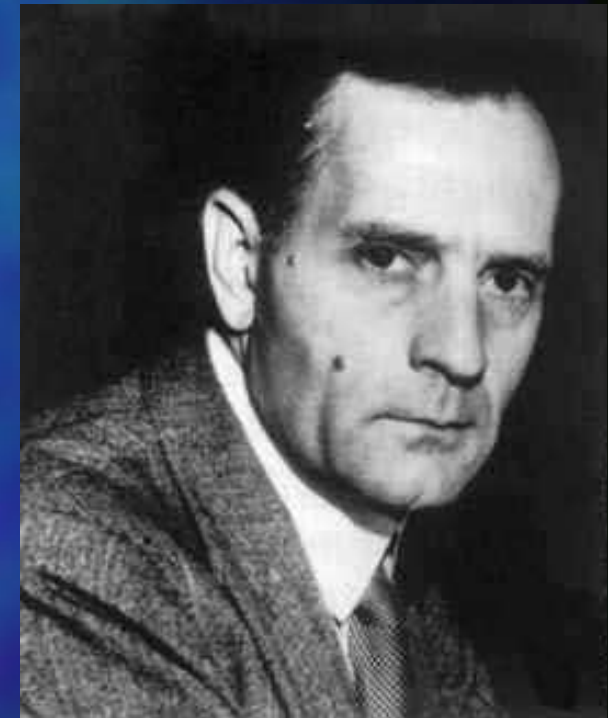
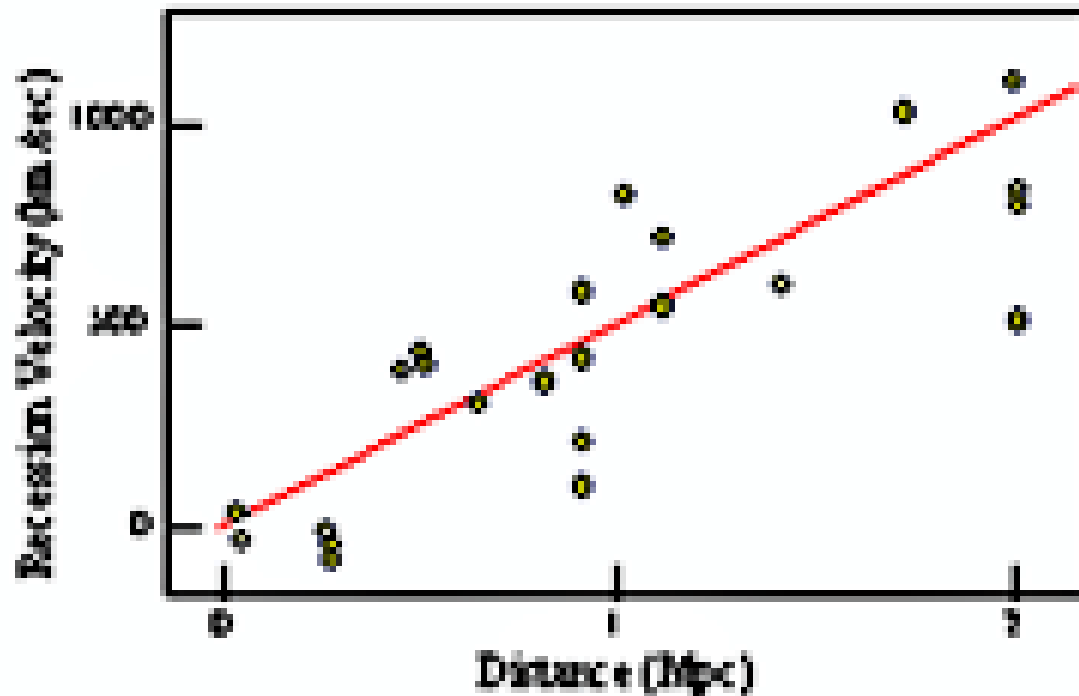
*Ch. Doppler*

# ILUSTRACJA PRZESUNIĘCIA LINII ABSORPCYJNYCH W WIDMACH ODDALAJĄCYCH SIĘ OBIEKTÓW



# REZULTAT PRACY HUBBLE'A (1929)

## Hubble's Data (1929)



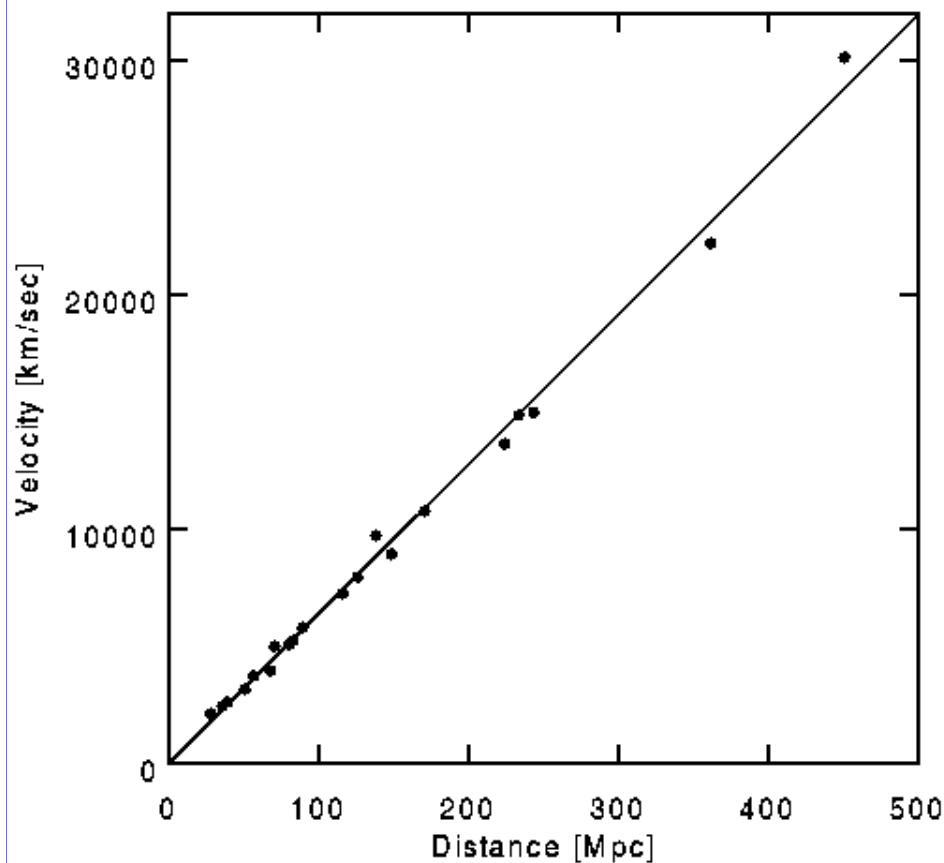
E. Hubble

**Dane obserwacyjne Hubble'a były mało dokładne a rezultat miał charakter bardziej jakościowy niż ilościowy.**



# E. HUBBLE SFORMUŁOWAŁ SWOJE SŁYNNNE PRAWO KOSMOLOGICZNEJ EKSPANSJI W 1929r :

**GALAKTYKI ODDALAJĄ SIĘ WZAJEMNIE OD SIEBIE Z PRĘDKOŚCIĄ 'V' PROPORCJONALNĄ DO ODLEGŁOŚCI 'd' MIĘDZY NIMI, CZYLI:**



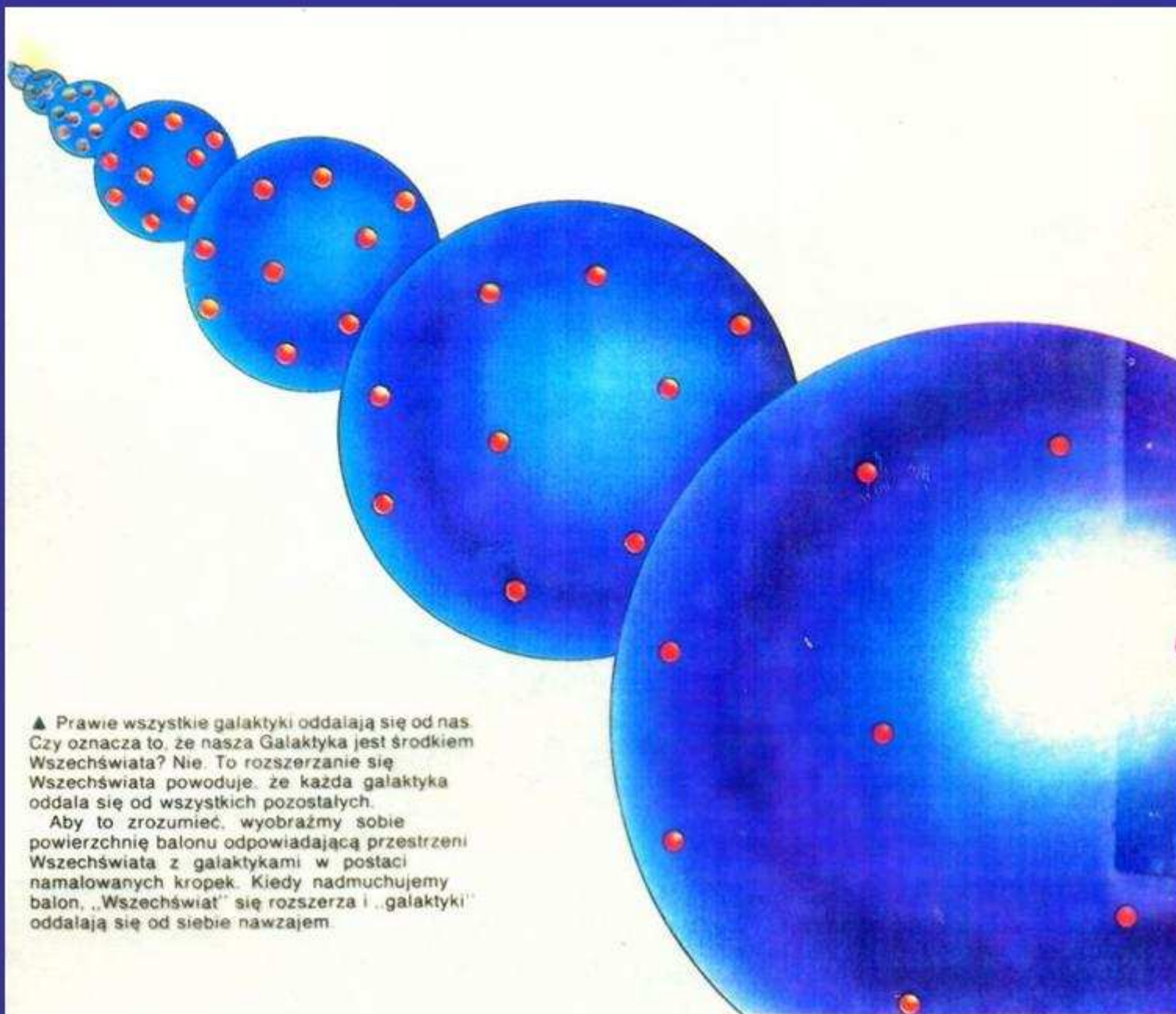
$$v = H * d$$

współczynnik proporcjonalności  
nazwano STAŁĄ HUBBLE'A

*Jak zobaczymy później, wielkość „H”  
nie jest stała lecz zmienia się w  
kosmologicznej skali czasu czyli  
 $H = H(t)$ .*

**PRAWO HUBBLE'A WEDŁUG DZISIEJSZYCH  
DANYCH OBSERWACYJNYCH**

## METAFORYCZNA ILUSTRACJA EKSPANSJI KOSMOLOGICZNEJ



▲ Prawie wszystkie galaktyki oddalają się od nas. Czy oznacza to, że nasza Galaktyka jest środkiem Wszechświata? Nie. To rozszerzanie się Wszechświata powoduje, że każda galaktyka oddala się od wszystkich pozostałych.

Aby to zrozumieć, wyobraźmy sobie powierzchnię balonu odpowiadającą przestrzeni Wszechświata z galaktykami w postaci namalowanych kropek. Kiedy nadmuchujemy balon, „Wszechświat” się rozszerza i „galaktyki” oddalają się od siebie nawzajem.

# PRAWO HUBBLE'A [c.d.]

Z formuły Hubble'a  $V = H \cdot r$  wynika, że parametr  $H = V/r$  ma wymiar  $[(m/s)/m] = [1/s]$ .

W takim razie odwrotność parametru Hubble'a -  $1/H$  ma wymiar czasu  $[s]$  i jest co do rzędu wielkości równa wiekowi Wszechświata.

Według obecnych danych obserwacyjnych wartość parametru  $H$  pozwala oszacować wiek Wszechświata na ok.  $14 (+/-1)$  mld. lat.

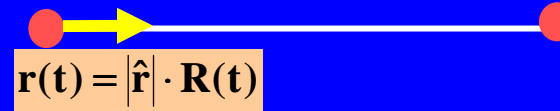
# PRAWO HUBBLE'A [c.d.]

Odległość  $r(t)$  między dwoma punktami (galaktykami) we Wszechświecie można zapisać  $r(t) = |\hat{r}| \cdot R(t)$  gdzie  $|\hat{r}| = 1$  to wektor jednostkowy zaś  $R(t)$  to tzw. mnożnik skalujący.



# PRAWO HUBBLE'A [c.d.]

Odległość  $r(t)$  między dwoma punktami (galaktykami) we Wszechświecie można zapisać  $r(t) = |\hat{r}| \cdot R(t)$  gdzie  $|\hat{r}| = 1$  to wektor jednostkowy zaś  $R(t)$  to tzw. mnożnik skalujący.

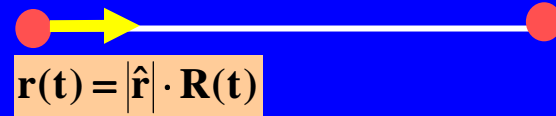


Po czasie  $\Delta t$  odległość zwiększy się na skutek ekspansji i będzie:  $r'(t + \Delta t) = |\hat{r}| \cdot R(t + \Delta t)$



# PRAWO HUBBLE'A [c.d.]

Odległość  $r(t)$  między dwoma punktami (galaktykami) we Wszechświecie można zapisać  $r(t) = |\hat{r}| \cdot R(t)$  gdzie  $|\hat{r}| = 1$  to wektor jednostkowy zaś  $R(t)$  to tzw. mnożnik skalujący.



Po czasie  $\Delta t$  odległość zwiększy się na skutek ekspansji i będzie:  $r'(t + \Delta t) = |\hat{r}| \cdot R(t + \Delta t)$



Napiszmy proporcję:

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



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

# PRAWO HUBBLE'A [c.d.]

**Zmiana odległości między obiektami:**

$$\Delta r = r' - r = r \cdot \left( \frac{R(t + \Delta t) - R(t)}{R(t)} \right) = r \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

**zaś tempo wzajemnego oddalania się**

$$V = \frac{\Delta r}{\Delta t} = \left( \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta t} \right) \cdot r$$

**Porównując z obserwacyjnie otrzymanym prawem  $V = H \cdot r$  widać, że tzw. „stała Hubble'a” jest jednak**

$$H(t) = \frac{1}{R(t)} \frac{\Delta R}{\Delta t} \text{ funkcją czasu}$$

# PODSTAWOWE RÓWNANIE KOSMOLOGII

OPISUJE ONO MOŻLIWE LOSY EKSPANSJI KOSMOLOGICZNEJ  
CZYLI WIELKOŚĆ  $R(t)$ .

$$H^2 - \frac{8\pi G\rho}{3} = -\frac{kc^2}{R^2} \quad (*)$$

$$H(t) = \frac{1}{R(t)} \frac{\Delta R}{\Delta t}$$

gdzie  $k = 0$  lub  $+1$  lub  $-1$  w zależności od znaku lewej strony równania.

**PRZEBIEG EKSPANSJI ZALEŻY OD:**  
**ŚREDNIEJ GĘSTOŚCI MATERII WE WSZECHŚWIECIE;**  
**WARTOŚCI PARAMETRU HUBBLE'A  $H(t)$ .**

**PIERWSZE DYNAMICZNE ROZWIĄZANIA KOSMOLOGICZNE  
ZOSTAŁY ZNALEZIONE PRZEZ FRIEDMANA.**



# MODELE KOSMOLOGICZNE

Z równania (\*) widać, że przebieg funkcji  $R(t)$  zależy od średniej gęstości materii we Wszechświecie -  $\rho$ . Istnieje wartość krytyczna -  $\rho = \rho_c$  przy której lewa strona równania (\*)

równa się zero (przypadek  $k = 0$ ).

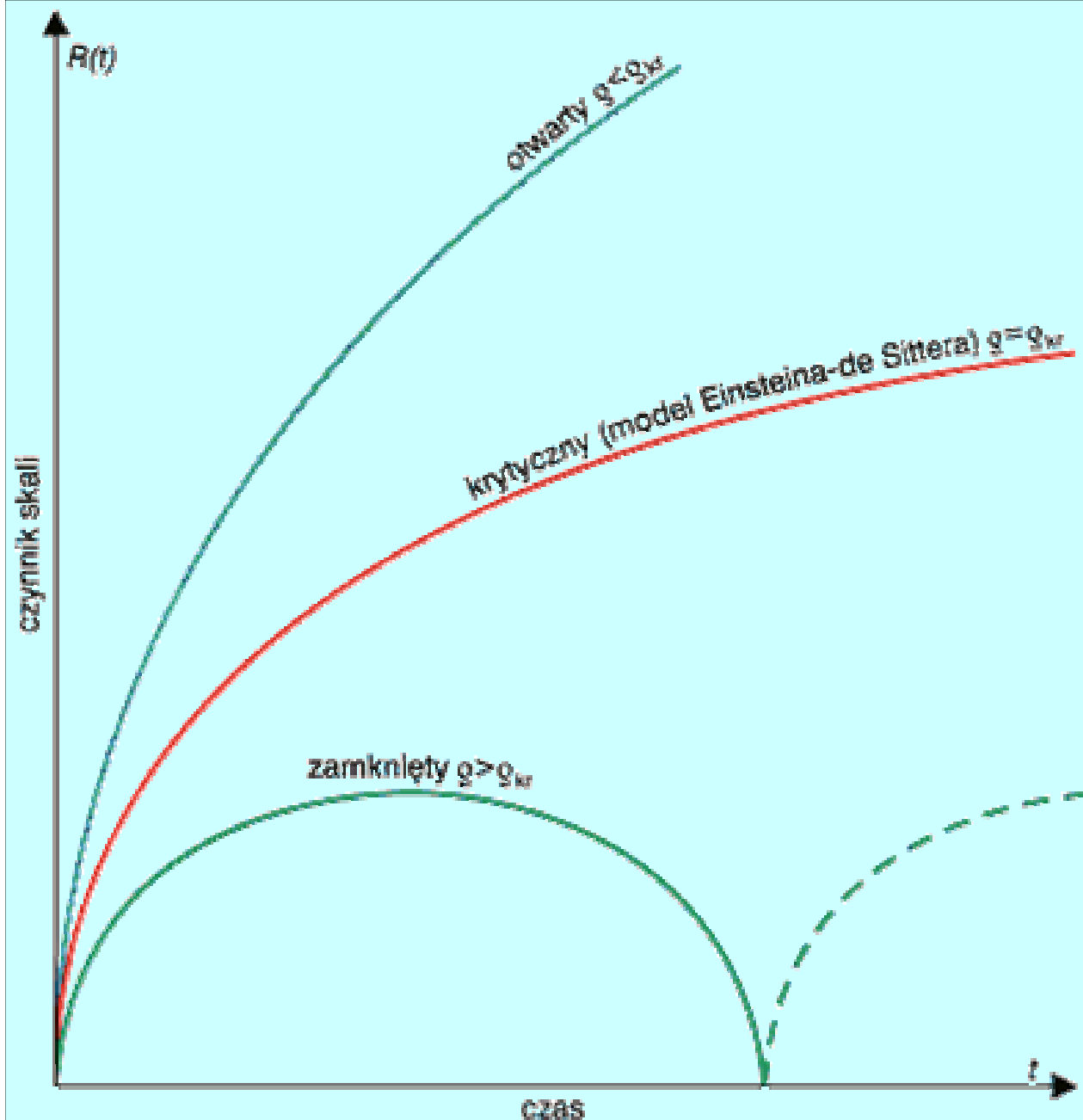
$$H^2 - \frac{8\pi G\rho}{3} = 0$$

Stąd 
$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

Pozostałe dwie możliwości to  $\rho > \rho_c$  ( $k = +1$ ) oraz  $\rho < \rho_c$  ( $k = -1$ ).

Graficzne przedstawienie zależności  $R(t)$  na następnym slajdzie.

# MODELE KOSMOLOGICZNE FRIEDMANA



**TRZY MOŻLIWE  
PRZYSZŁE LOSY  
WSZECHŚWIATA  
I EKSPANSJI  
KOSMOLOGICZNEJ**

# MODELE KOSMOLOGICZNE a globalna geometria Wszechświata [1]



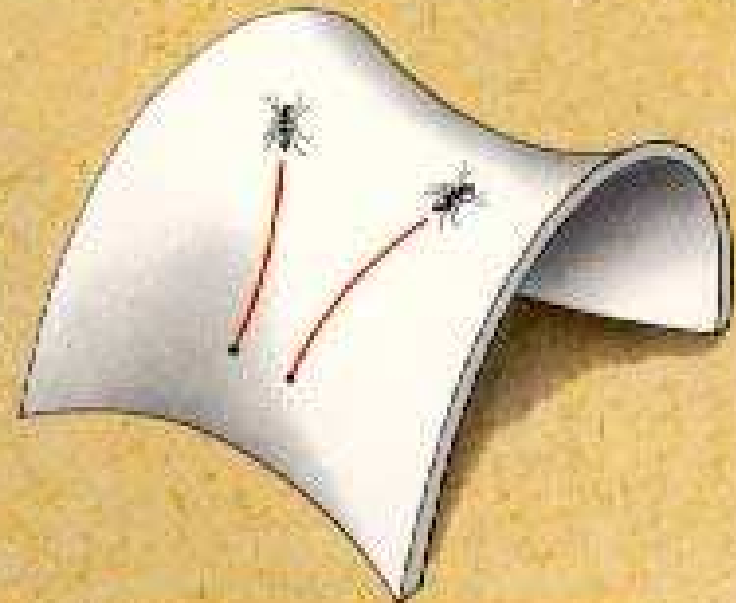
ZERO CURVATURE

$$\rho = \rho_c$$



POSITIVE CURVATURE

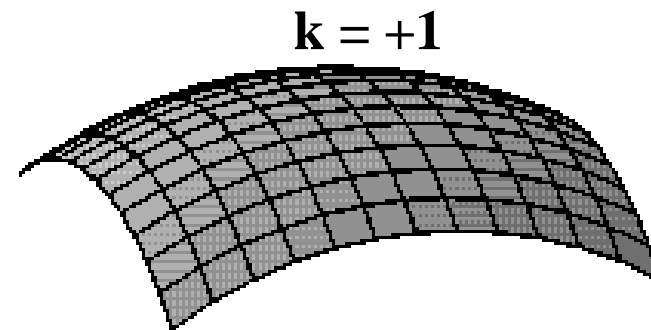
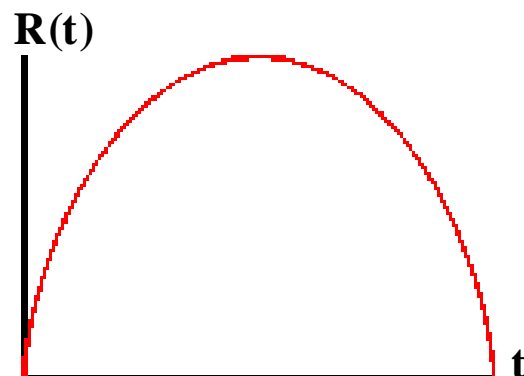
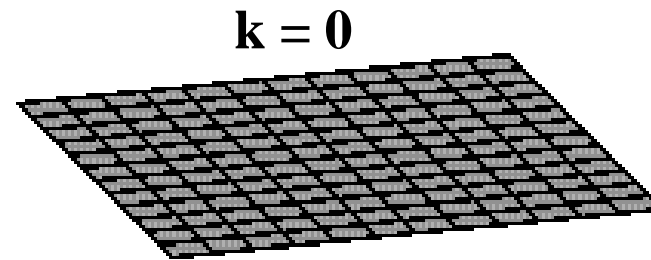
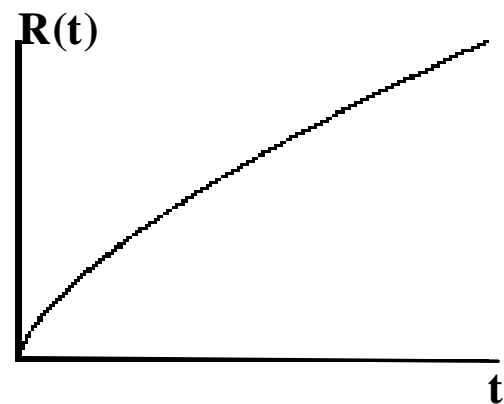
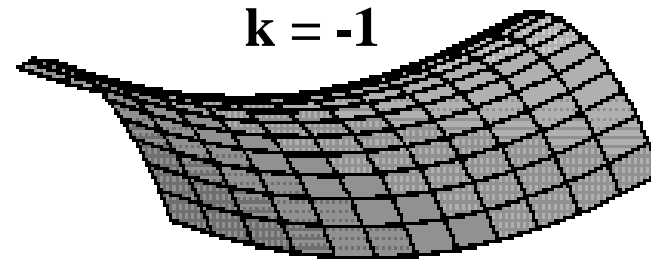
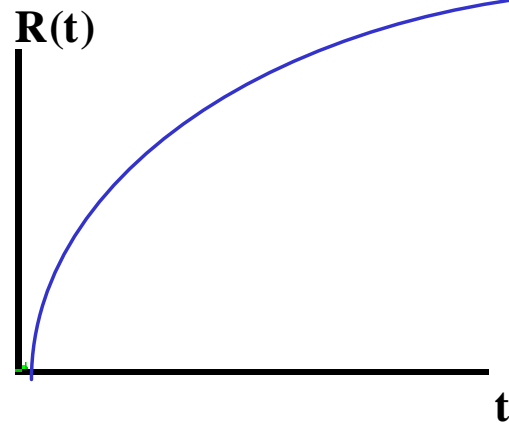
$$\rho > \rho_c$$

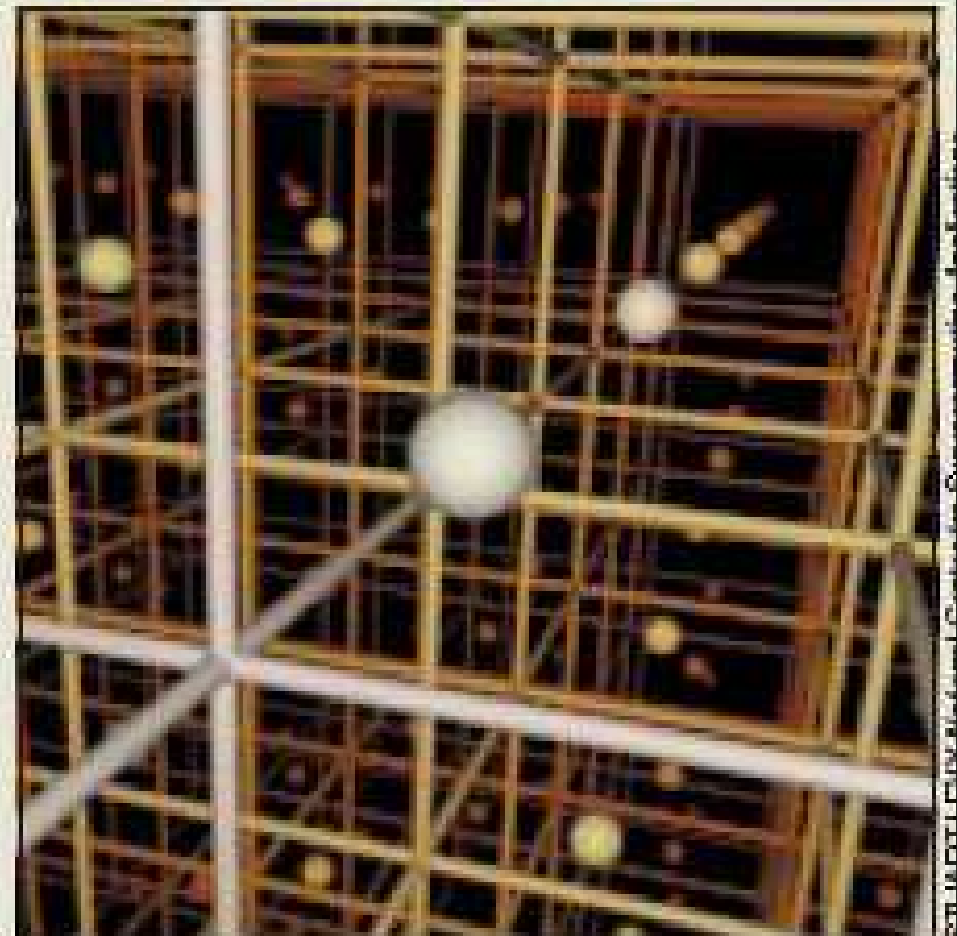
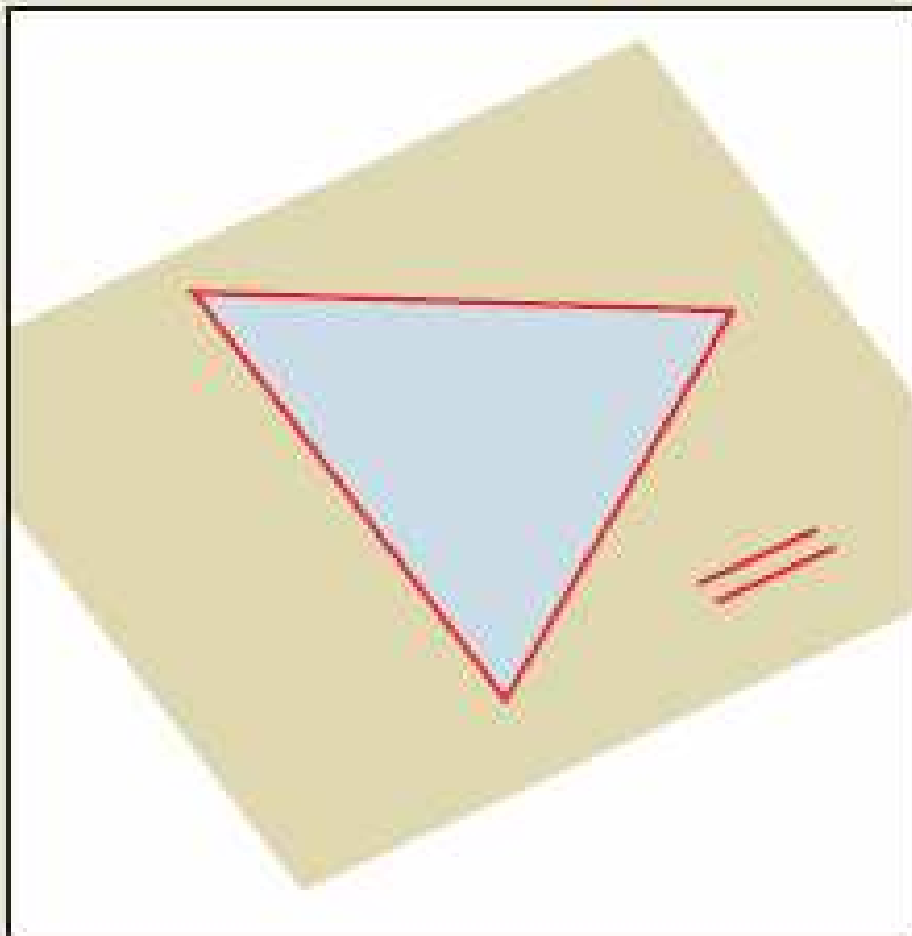


NEGATIVE CURVATURE

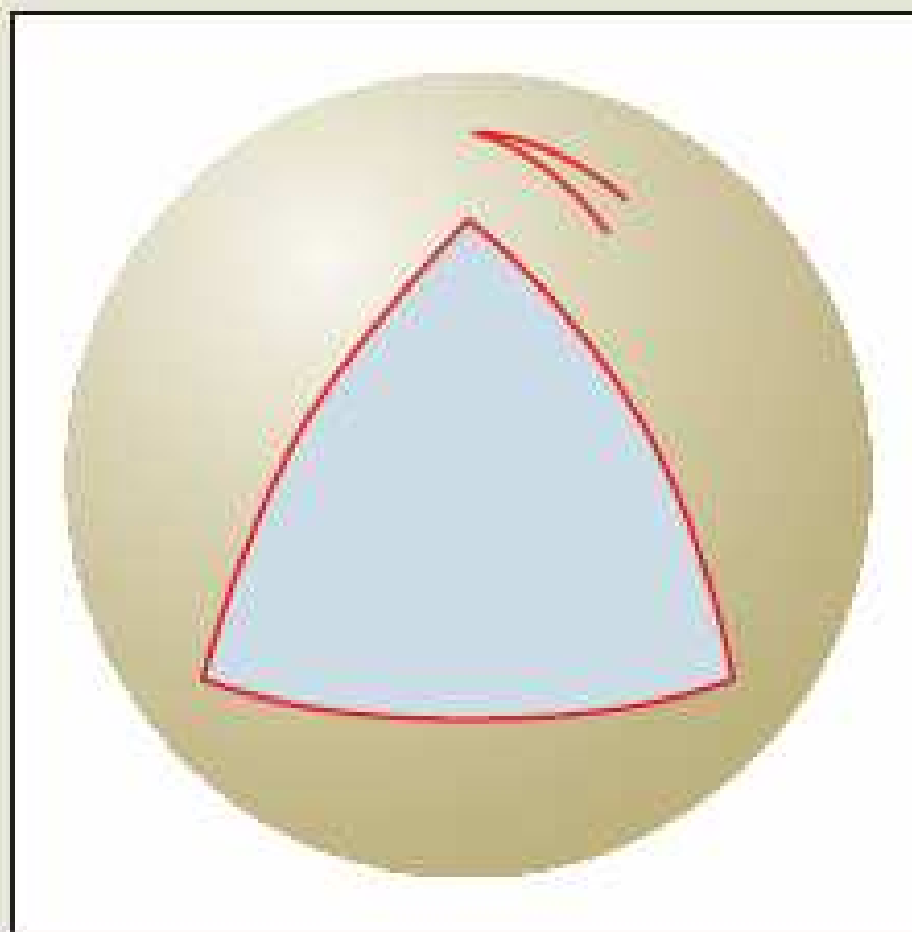
$$\rho < \rho_c$$

# MODELE KOSMOLOGICZNE a globalna geometria Wszechświata [2]

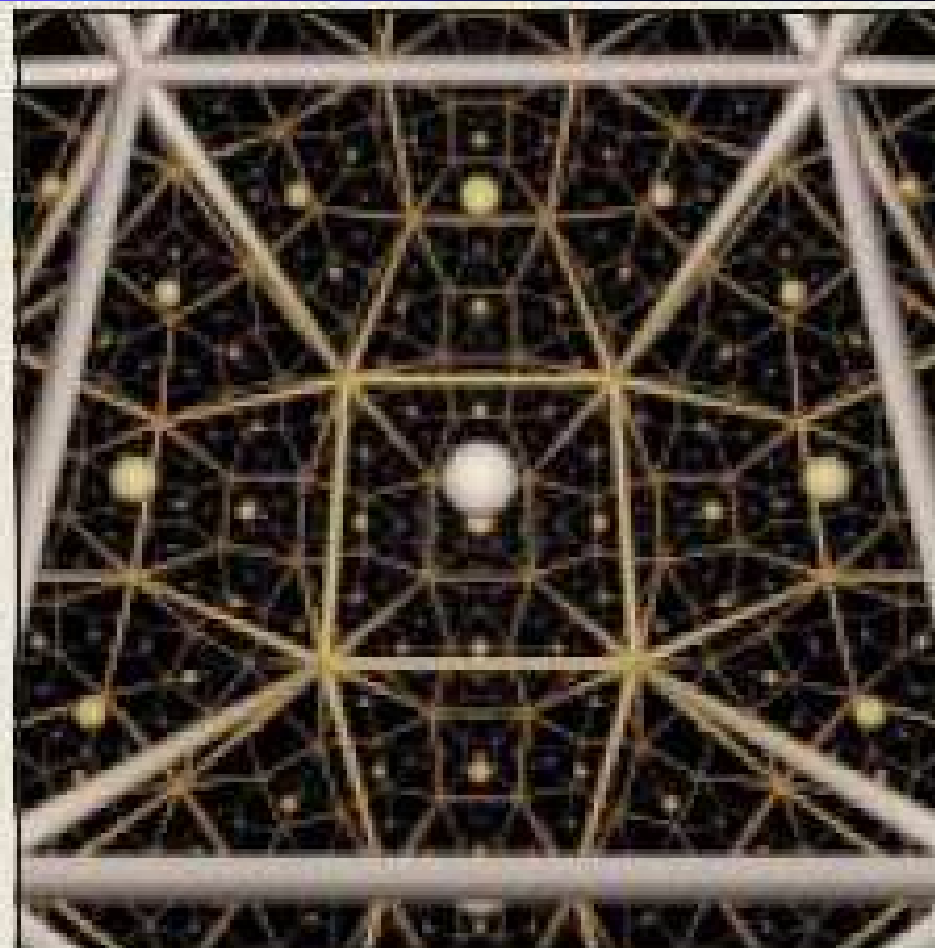
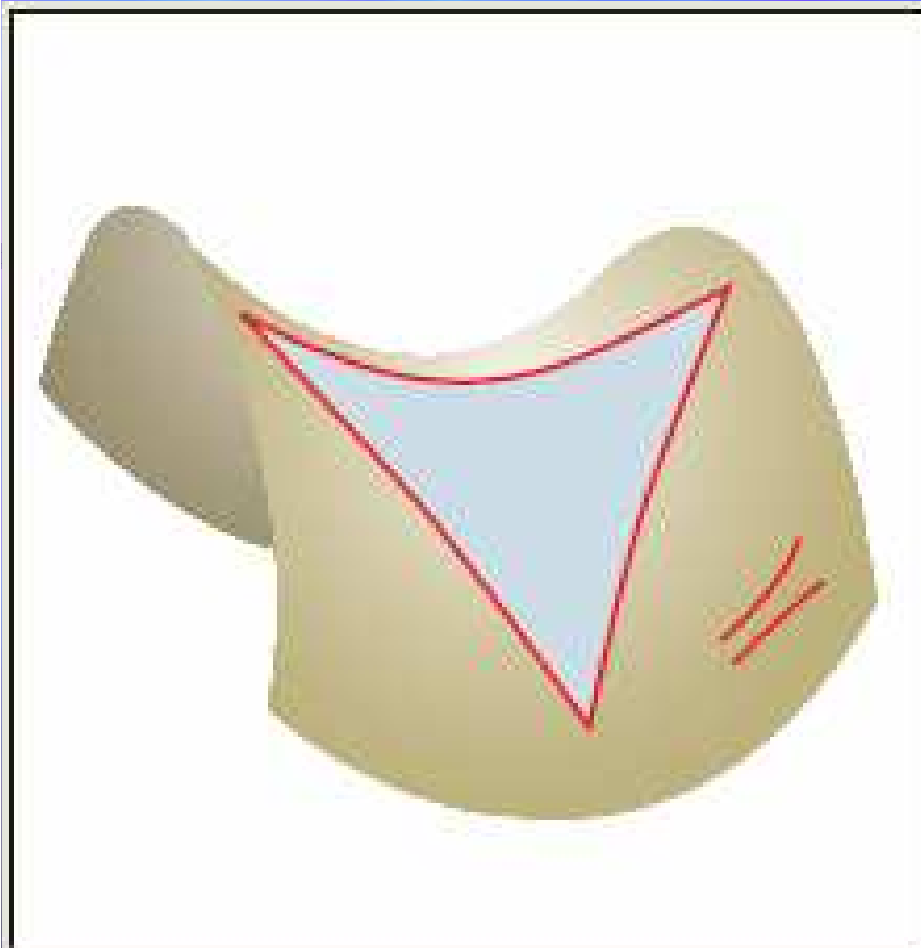




W płaskiej przestrzeni obowiązują znane prawa geometrii Euklidesa. Rozmiar kątowy identycznych sfer jest odwrotnie proporcjonalny do odległości – to zwyczajna perspektywa oddalającego się punktu, której naucza się na lekcjach rysunku.



Przestrzeń sferyczna ma własności geometryczne globusa. Wraz ze wzrostem odległości sfery początkowo wydają się coraz mniejsze. Osiągają minimalne rozmiary pozorne, a następnie zaczynają wydawać się coraz większe. (Podobnie jest z południkami na globusie: wychodzą z bieguna, maksymalnie oddalają się od siebie na równiku, a następnie zbiegają się w przeciwległym biegunie). Taki układ tworzy dodekahedron.



Przestrzeń hiperboliczna ma geometrię siodła. Rozmiary kątowne kurczą się o wiele szybciej wraz z odległością niż w przestrzeni euklidesowej. Ponieważ kąty są bardziej ostre, wokół każdego z wierzchołków mieści się pięć sześciennopodobnych obiektów zamiast jedynie czterech.

# MODELE KOSMOLOGICZNE -WNIOSKI

Obserwowana ekspansja kosmologiczna wygląda tak samo z każdego miejsca we Wszechświecie. Nie znajdujemy się w żadnym wyróżnionym punkcie (środku), od którego inne galaktyki oddalają się (*zasada kosmologiczna*).

Ekspansja kosmologiczna nie polega na ruchu galaktyk w przestrzeni. Jest ona raczej „rozdymaniem się” samej przestrzeni i na skutek tego rozdymania zwiększają się wzajemne odległości między galaktykami.

(uwaga - same galaktyki, gwiazdy, planety itp.. nie „rozduymają się” na skutek tej ekspansji).



# MODELE KOSMOLOGICZNE -WNIOSKI [c.d]

Ekspansja Wszechświata miała swój początek w czasie.  
Nazwano ten moment (niezbyt fortunnie) „Wielkim Wybuchem”.

Tzw. Wielki Wybuch nie zaszedł w jakimś konkretnym miejscu istniejącej wcześniej przestrzeni.

Wielki Wybuch niejako generuje powstanie samej przestrzeni i czasu a także materii wypełniającej przestrzeń oraz inicjuje ekspansję kosmologiczną.

**SKORO KOSMOLOGICZNA EKSPANSJA MIAŁA  
POCZĄTEK PRZED OK. 14 MLD. LAT TO SPRÓBUJ-  
MY W WYOBRAŹNI PUŚCIĆ TEN FILM WSTECZ  
I PRZEŚLEDZIĆ (WEDŁUG DZISIEJSZEJ WIEDZY)  
WCZESNE ETAPY EWOLUCJI WSZECHŚWIATA.**

**BĘDZIE TO TEMATEM DRUGIEJ CZĘŚCI  
NASZYCH ROZWAŻAŃ.**

# KONIEC CZ. 1

J. SIKORSKI, IFD  
UNIWERSYTET GDAŃSKI