

Elementy Astronomii i Astrofizyki
- skrót z wykładu IX

Krzysztof Radziszewski
Instytut Astronomiczny UWr

Wykład IX - Wrocław, 23 kwietnia 2026 r.

Katalog Messiera

Jako pierwszy obiekty rozmyte (mgławice) skatalogował francuski astronom Charles Messier, który w ten sposób chciał uniknąć pomyłek w wykrywaniu nowych komet. Jego katalog zawiera obecnie 110 różnych obiektów, spośród których mamy:

- 40 galaktyk
 - 57 gromad gwiazd
 - 7 mgławic rozmytych
 - 4 mgławice planetarne
 - 1 pozostałość po supernowej (Mgławica Kraba),
 - 1 gwiazda podwójna.
-
- Katalog Messiera wydany w 1784 zawierał 103 obiekty.
 - Następnie zostało dodanych 6 obiektów rozciągłych (odkrytych przez Messiera i Pierre'a Méchaina).
 - 110-ty obiekt w katalogu został dodany w 1966 roku.

Katalog Messiera

Systematyczne poszukiwania i badanie natury mgławic zainicjował William Herschel, a kontynuował później jego syn John. Zawdzięczamy im odkrycie ponad 5 tys. mgławic, które weszły w skład katalogu NGC.

Pomimo usilnych badań, jeszcze sto lat temu nie było zgody, czy wszystkie obserwowane mgławice należą do naszej Galaktyki, czy też część z nich jest odrębnymi, równie licznymi zbiorowiskami gwiazd.

Dopiero identyfikacja cefeidy w mgławicy M31 przez Edwina Hubble'a uzmysłowiła wszystkim z jak odległym obiektem mamy do czynienia.

To właśnie Hubble'owi zawdzięczamy podstawową klasyfikację galaktyk na podstawie ich wyglądu, zwaną widelcem Hubble'a.

Oprócz galaktyk eliptycznych, spiralnych i spiralnych z poprzeczką, wyróżnia się również galaktyki nieregularne i osobliwe, zwane też aktywnymi.

Wielka Debata (1920): Shapley vs. Curtis

Waszyngton - 26 kwietnia 1920

Shapley: wszystkie widoczne mgławice należą do jednego systemu gwiazd tzw. Wielkiej Galaktyki o średnicy 300 000 lat świetlnych.

Curtis: mgławice spiralne są skupiskami gwiazd podobnymi do naszej Galaktyki, czyli są odrębnymi galaktykami.

Edwin Powell Hubble (1924): zidentyfikował cefeidę w M31 i oszacował odległość do niej na 900 000 lat świetlnych.

=> rzeczywista odległość do M31 to około 2 500 000 l. św.



Galaktyki aktywne

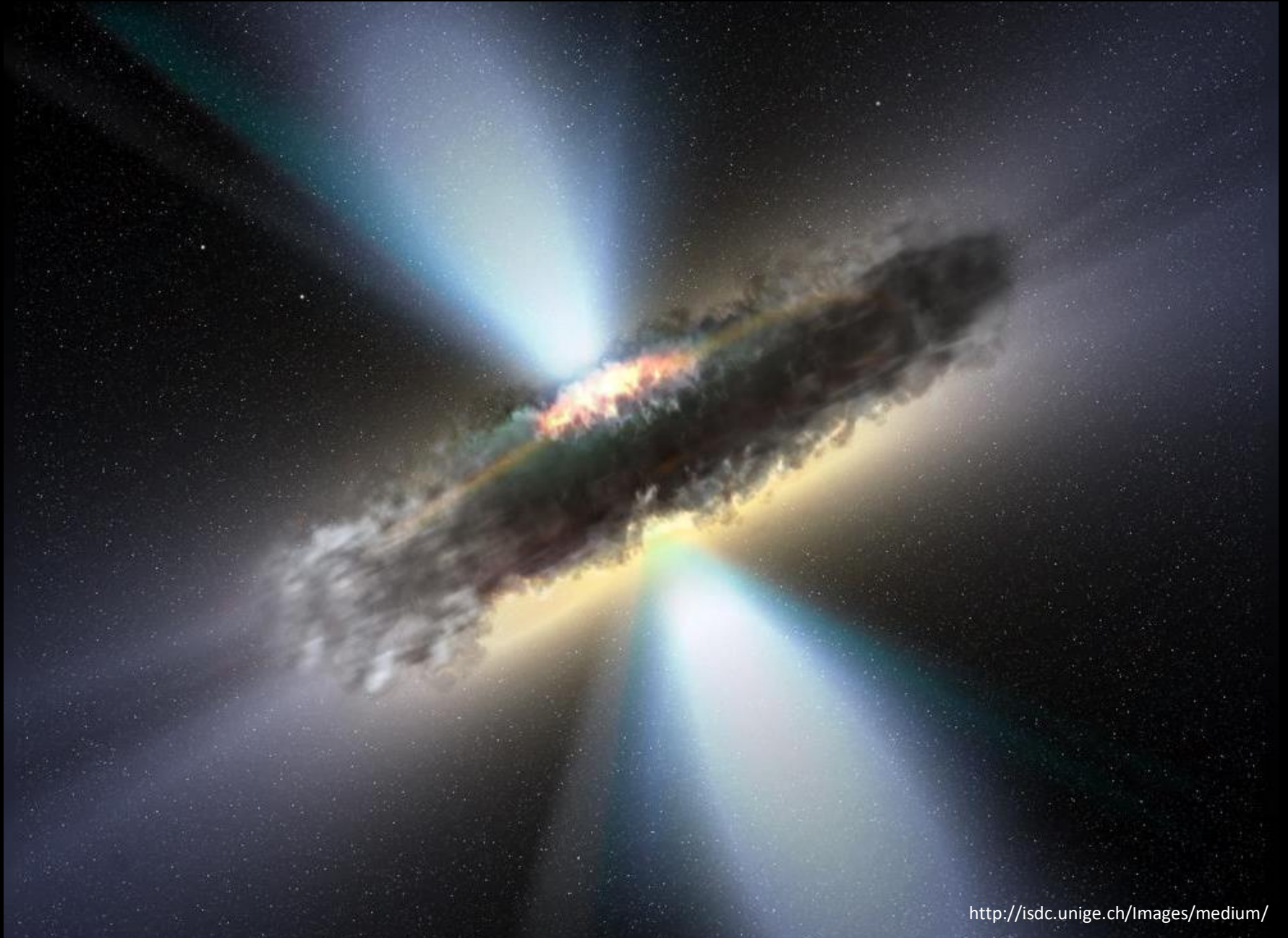
Intensywne zasilanie supermasywnych czarnych dziur przez materię stanowi klucz do zrozumienia odrębności galaktyk aktywnych. O ile pozostałe galaktyki świecą przede wszystkim światłem swoich gwiazd, to emisja galaktyk aktywnych jest zdominowana przez nietermiczne procesy zachodzące w pobliżu horyzontu zdarzeń supermasywnej czarnej dziury.

Prostopadle do osi rotacji czarnej dziury znajduje się nieprzeźroczysty torus pyłowy, a w wąskim stożku wokół osi rotacji emitowana jest wąska struga relatywistycznej materii zwana dżetem.

W zależności od tego pod jakim kątem patrzymy na wspomniany układ, rozpoznajemy diametralnie różne charakterystyki obserwacyjne zdefiniowane jako np. radiogalaktyki, lacertydy, kwazary, galaktyki Seyferta.

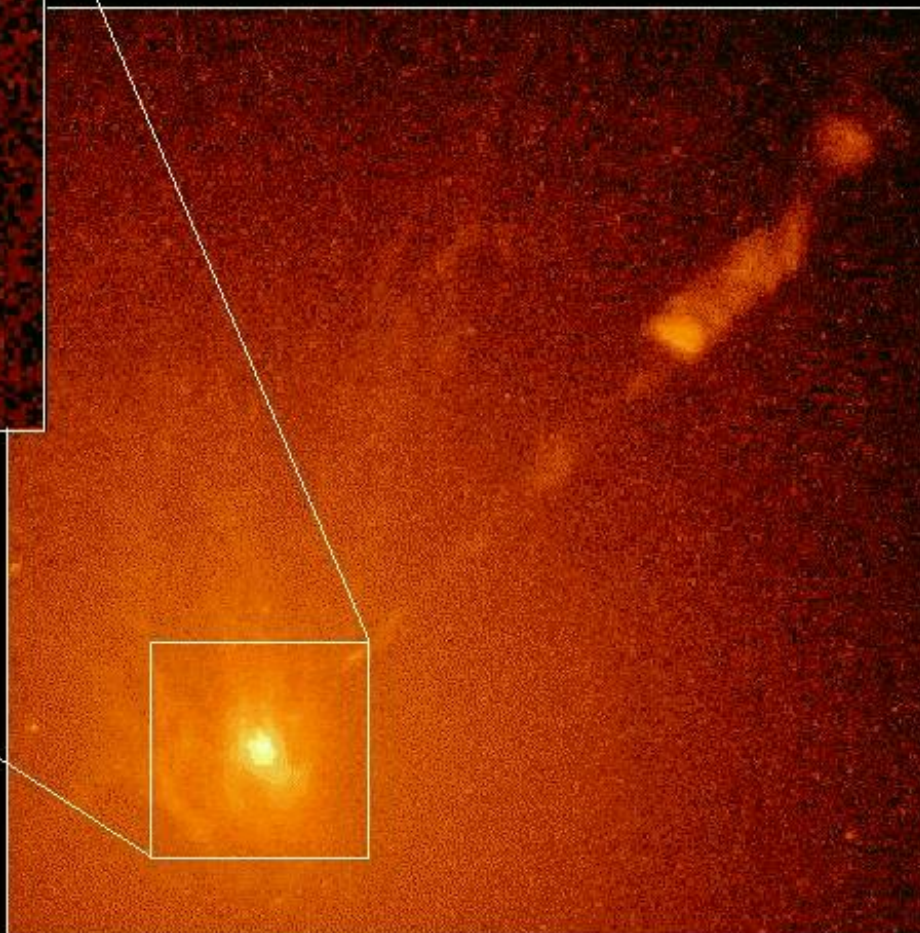
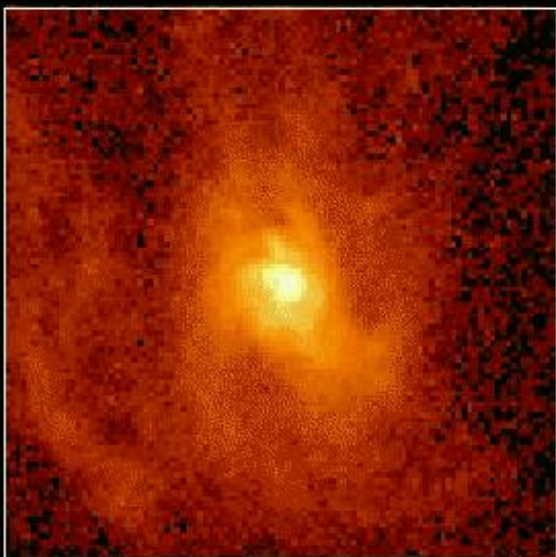
Ze względu na to, że większość galaktyk aktywnych obserwujemy z bardzo dużych odległości, przyjmuje się, że przez stadium aktywności przechodzą wszystkie stosunkowo młode galaktyki.

Galaktyki aktywne - dżet, torus



Galaktyki aktywne - dżet

Gas Disk in Nucleus of Active Galaxy M87



Hubble Space Telescope
Wide Field Planetary Camera 2



Kolizje galaktyk

Obserwujemy liczne przypadki kolizji pomiędzy galaktykami. Nie ulega wątpliwości, że proces ten ma istotne znaczenie dla wprowadzonej wcześniej klasyfikacji morfologicznej.

Zapewne wszystkie galaktyki nieregularne są wynikiem takich kolizji. Wydaje się również, że znaczny procent galaktyk eliptycznych ma podobny rodowód.

W przypadku galaktyk eliptycznych bierze się również pod uwagę scenariusz, w którym intensywne procesy gwiazdotwórcze doprowadziły do wykorzystania całej materii rozproszonej. Taki układ będzie się składał niemal wyłącznie ze starych gwiazd rozmieszczonych sferycznie, z wyraźną koncentracją ku centrum.

Za około 3 mld lat nasza Galaktyka zderzy się z galaktyką M31 (Galaktyka Andromedy).

Próby zliczenia wszystkich galaktyk, prowadzą do oszacowań, że w dostępnej obserwacjom części Wszechświata ich liczba jest rzędu kilkuset miliardów!

Kolizje galaktyk

Strumienie gwiazd i pyłu
wyglądają jak czułki
owadów

The Antennae Galaxies
NGC 4038 & NGC 4039
[Czułki lub Galaktyki Antenowe]

Galaktyki - wielkoskalowe struktury

Galaktyki wykazują tendencję do grupowania się w strukturach zorganizowanych hierarchicznie. Wyróżniamy kolejno: grupy, gromady i supergromady galaktyk oraz pustki oddzielone ścianami.

Grupy zawierają nie więcej niż 50 galaktyk i nie stanowią trwałego związku grawitacyjnego. Nasza Galaktyka należy do Lokalnej Grupy Galaktyk, w której wraz z galaktyką M31 jest największym składnikiem.

Gromady zawierają do kilku tysięcy galaktyk i tworzą stabilny układ związany grawitacyjnie.

Supergromady składają się z setek tysięcy galaktyk, a ich rozmiary przekraczają nawet 100 Mpc. Supergromada, do której należymy nosi nazwę Lokalna albo Virgo, ze względu na usytuowanie centralnej gromady w gwiazdozbiornie Panny.

Lokalna Grupa Galaktyk

~ 40 galaktyk

$2R = 3 \text{ Mpc}$

$M \sim 2 \times 10^{12} M_{\odot}$

- Galaktyka + 13 galaktyk satelitarnych
(m. in. Wielki i Mały Obłok Magellana)
- Wielka Mgławica w Andromedzie (M31) + 14 galaktyk satelitarnych
- galaktyka M33 w gwiazdozbiornie Trójkąta + 1 galaktyka satelitarna
- 10 innych galaktyk karłowatych

Wielkoskalowa struktura Wszechświata

Masowe przeglądy fotometryczne nieba doprowadziły do odkrycia na przełomie XX i XXI w. jeszcze większych struktur zwanych włóknami albo ścianami. Tworzą je supergromady galaktyk, które otaczają olbrzymie bąble zwane pustkami, w których gęstość występowania galaktyk jest znacznie niższa.

Pustki i ściany w powszechnym przekonaniu są największymi strukturami, którymi jednolicie wypełniony jest cały Wszechświat. Uważa się je za pozostałość po tzw. barionowych oscylacjach akustycznych, które zachodziły w bardzo wczesnym stadium ewolucji Wszechświata.

Wielkoskalowa struktura Wszechświata

W 1929 r. powszechnie zakorzenioną koncepcję stacjonarnego Wszechświata obaliły obserwacje wykonane przez Edwina Hubble'a.

Zauważył on, że im galaktyka znajduje się w większej odległości od nas, tym oddala się z większą prędkością. Na tej podstawie sformułował prawo nazwane jego nazwiskiem, które wykorzystywane jest standardowo do wyznaczania odległości w skali kosmologicznej.

Skoro galaktyki oddalają się od siebie, to kiedyś w przeszłości musiał nastąpić tzw. Wielki Wybuch (*ang. Big Bang*), który zainicjował ten proces. Warto podkreślić, że ekspansja Wszechświata wygląda identycznie w każdym jego punkcie, dlatego nie należy z faktu oddalania się od nas galaktyk wyciągać wniosku o jakimś naszym szczególnym usytuowaniu w strukturze Wszechświata.

Dokładne wyznaczenie stałej Hubble'a pozwala na oszacowanie wieku Wszechświata, który według współczesnych pomiarów wynosi 13.8 mld lat.

Prawo Hubble'a

1929 rok

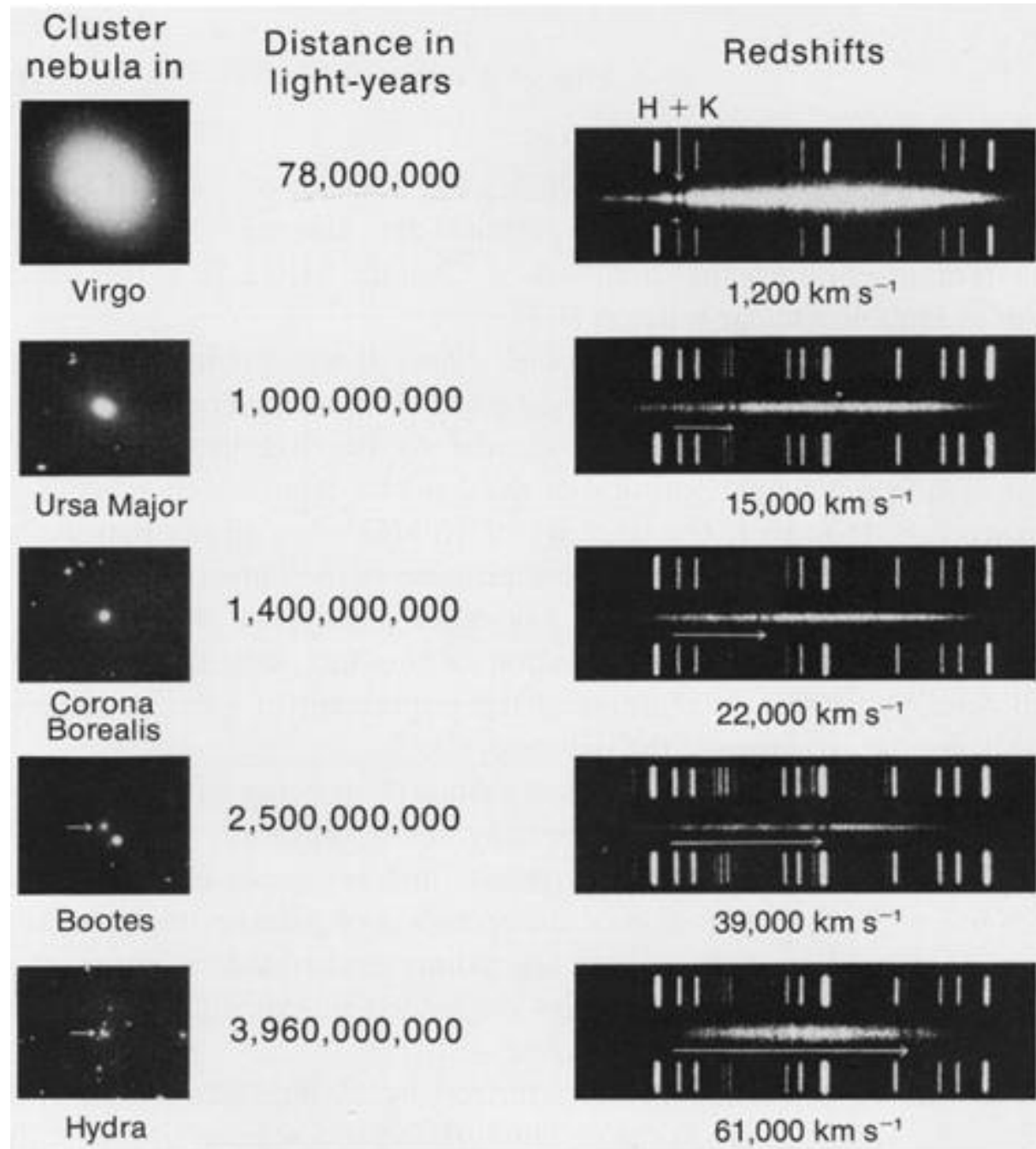
$$v = H_0 \cdot D$$

v - prędkość ucieczki [km/s]
 H_0 - stała Hubble'a [km/s/Mpc]
 D - odległość do galaktyki [Mpc]

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

z - przesunięcie ku czerwieni,
 wyznacza relację pomiędzy
 promieniem Wszechświata R
 w chwili wyemitowania fotonu
 i dzisiejszym R_0

$$1 + z = \frac{R_0}{R}$$



Ewolucja stałej Hubble'a

HST (2009) - 240 cefeid (w 7 galaktykach) $\Rightarrow H_0 = \mathbf{74,2} \pm 3,6$ (km/s)/Mpc

HST (2010) - soczewkowanie grawitacyjne $\Rightarrow H_0 = \mathbf{72,6} \pm 3,1$ (km/s)/Mpc

WMAP (2010) - CMB $\Rightarrow H_0 = \mathbf{71,0} \pm 2,5$ (km/s)/Mpc

WMAP (2010) - CMB oraz wcześniejszych wyników $\Rightarrow H_0 = \mathbf{70,4} \pm 1,4$ (km/s)/Mpc

Teleskop Spitzera (2012) - obserwacje w podczerwieni $\Rightarrow H_0 = \mathbf{74,3} \pm 2,1$ (km/s)/Mpc

Planck (2013) - CMB $\Rightarrow H_0 = \mathbf{67,15}$ (km/s)/Mpc

Soczewkowanie grawitacyjne supernowej Refsdala (2023) $\Rightarrow H_0 = \mathbf{66,6}$ (km/s)/Mpc

Kosmiczne promieniowanie tła (CMB)

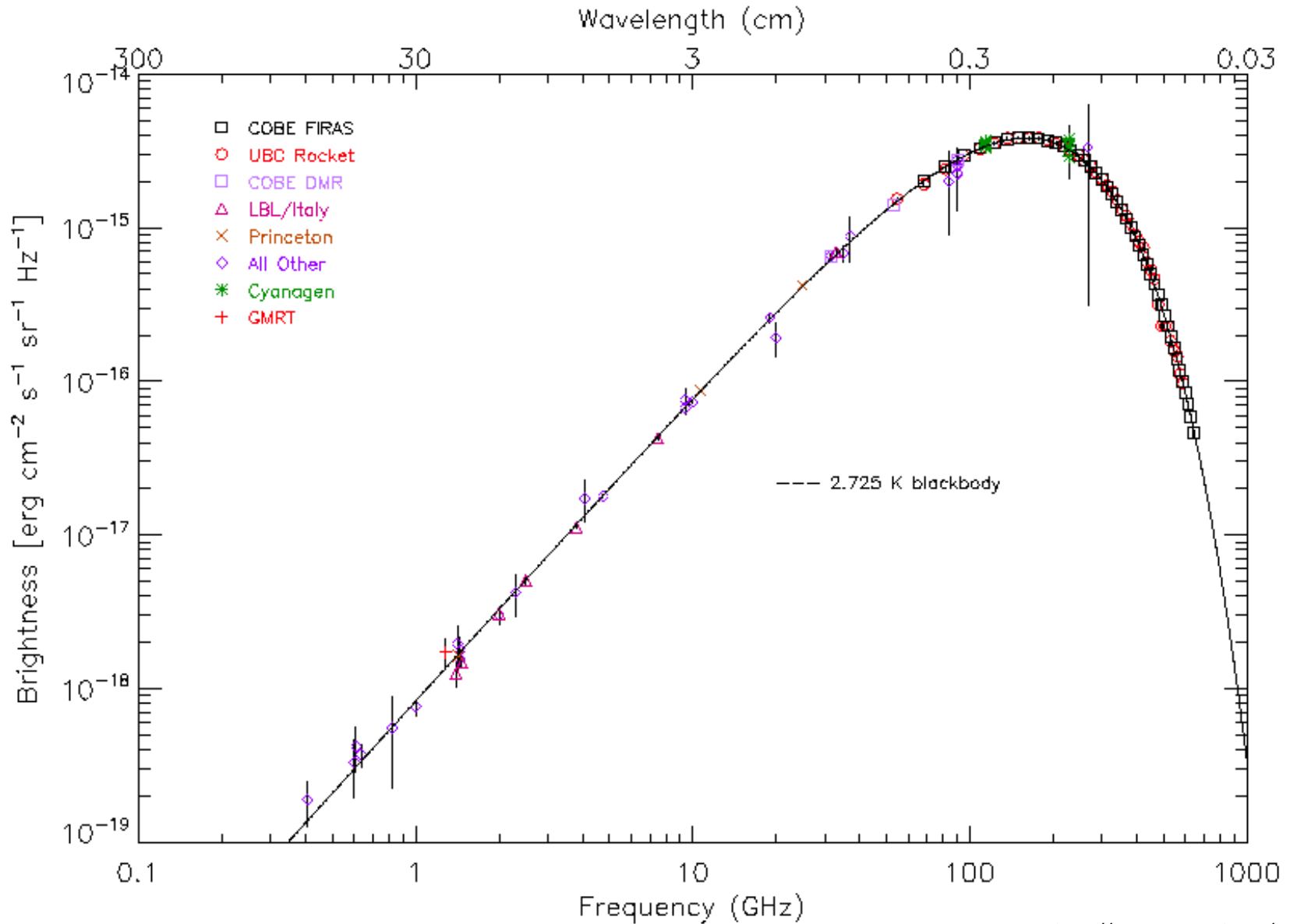
W 1965 r. stwierdzone zostało istnienie tzw. mikrofalowego promieniowania tła, zwanego też promieniowaniem reliktowym. Bez względu na to, w którym kierunku skierujemy radioteleskop, rejestrujemy promieniowanie o rozkładzie planckowskim odpowiadającym temperaturze 2.725 K.

Odkrycie to potwierdza teorię Wielkiego Wybuchu, według której wraz z ekspansją Wszechświata następuje spadek jego temperatury. Powstanie promieniowania relikowego wiąże się z chwilą, gdy temperatura Wszechświata spadła poniżej 3000 K. Możliwa stała się wówczas rekombinacja wodoru, która spowodowała oddzielenie promieniowania od materii.

Dopóki temperatura była wyższa fotony efektywnie oddziaływały z cząstkami materii, po rekombinacji ich średnia droga swobodna stała się porównywalna z rozmiarami Wszechświata.

Ocenia się, że wspomniany proces nastąpił około 380 000 lat po Wielkim Wybuchu i uwolnione wówczas promieniowanie wypełniło cały Wszechświat, stopniowo dostosowując swoje parametry do zmian, którym podlegał.

Kosmiczne promieniowanie tła (CMB)



Kosmiczne promieniowanie tła (CMB)

Szczegółowe badanie rozkładu mikrofalowego promieniowania tła daje nam unikalną szansę oglądania Wszechświata 380 tys. lat po Wielkim Wybuchu.

Podejrzewano, że już wówczas musiały istnieć pewne fluktuacje w rozkładzie gęstości, z których w przyszłości ukształtowały się znane nam dzisiaj galaktyki i ich zgrupowania.

Kolejne misje satelitarne (COBE, WMAP, Planck) takie fluktuacje w rozkładzie promieniowania znalazły. Na mapach Wszechświata uzyskanych z tych misji, miejsca o podwyższonej temperaturze odpowiadają lokalnym zagęszczeniom materii.

Analiza rozmieszczenia fluktuacji w różnych skalach kątowych stanowi dzisiaj jedno z najważniejszych narzędzi testowania modeli kosmologicznych. Dostarcza nam również bezcennej wiedzy o wieku Wszechświata i jego strukturze.

Rozmiary i wiek Wszechświata

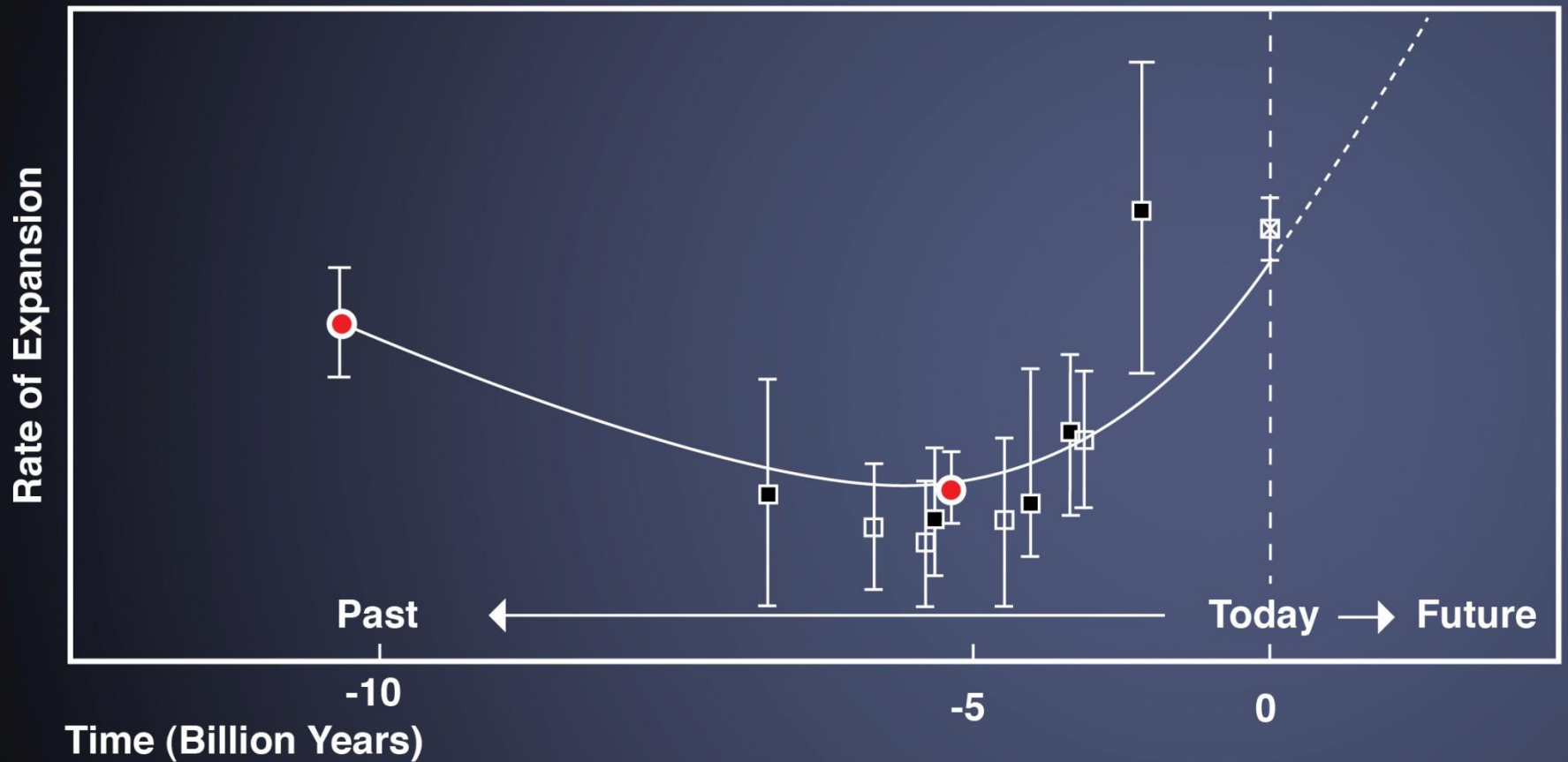
Systematyczne poszukiwania supernowych w odległych galaktykach i wykorzystanie typu Ia jako świecy standardowej, dostarczyły w 1998 r. przesłanek dla twierdzenia, że ekspansja Wszechświata się zwiększa. Zaobserwowane supernowe znajdowały się dalej, niżby to wynikało z prawa Hubble'a, przez co świeciły zbyt słabo.

Za to odkrycie Saul Perlmutter oraz Brian P. Schmidt i Adam G. Riess uhonorowani zostali w roku 2011 nagrodą Nobla.

Wykorzystanie jako świec standardowych błysków promieniowania gamma pozwoliło sięgnąć na jeszcze większe odległości. Tym razem okazało się, że obserwowane obiekty świecą zbyt jasno, jak na odległość wynikającą z prawa Hubble'a, co oznacza, że wcześniej ekspansja Wszechświata ulegała spowolnieniu.

Zebrany dotychczas materiał obserwacyjny sugeruje, że zmiana trendu od spowolnienia do przyśpieszenia nastąpiła około 5 mld lat temu.

Rozmiary i wiek Wszechświata - tempo ekspansji



Rozmiary i wiek Wszechświata

Jako przyczynę rosnącego tempa ekspansji Wszechświata uważa się ciemną energię. Jest to, ciągle hipotetyczna, forma energii wypełniająca całą przestrzeń i wywierająca na nią ujemne ciśnienie, przez co wywołuje efekt grawitacyjnego odpychania.

Stacyczna interpretacja ciemnej energii to stała kosmologiczna (Λ), zaproponowana *ad hoc* przez Einsteina w rozwiązaniu ogólnej teorii względności, w celu zapewnienia stacjonarności rozważanemu wówczas modelowi Wszechświata.

Przy założeniu niezmienności stałej kosmologicznej, zgodność z obserwacjami można uzyskać przyjmując, że średnia gęstość materii we Wszechświecie spadła na skutek jego ekspansji poniżej gęstości ciemnej energii właśnie około 5 mld. lat temu.

Trudniejsza, z punktu widzenia oceny dalszej ewolucji Wszechświata, jest dynamiczna interpretacja ciemnej energii, zakładająca, że mamy do czynienia z polem kwantowym zwanym kwintesencją. W takim przypadku możliwe stają się zmiany w czasie i przestrzeni będące np. reakcją na zmieniające się charakterystyki Wszechświata.

Rozmiary, wiek i kształt Wszechświa

$$\Omega < 1$$

ujemne zakrzywienie - Wszechświat otwarty hiperboliczny

$$\Omega = 1$$

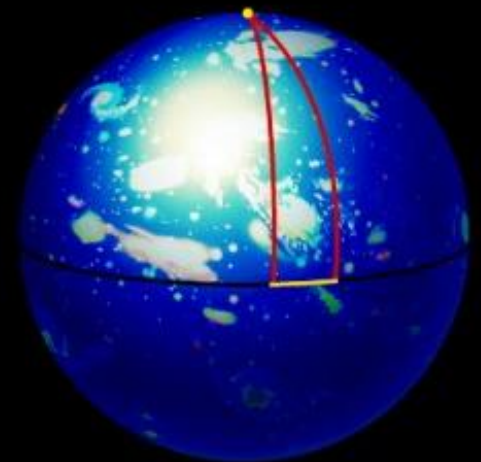
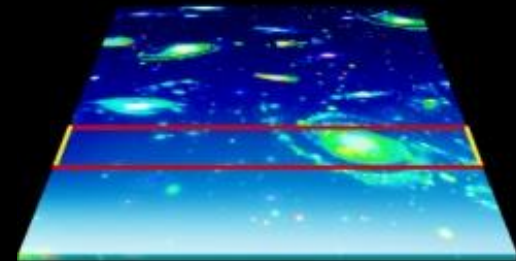
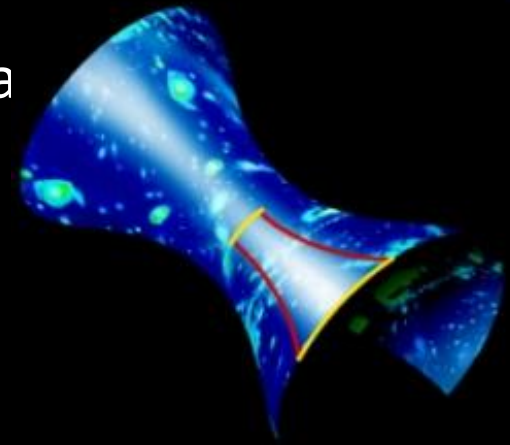
zerowe zakrzywienie - Wszechświat płaski geometria euklidesowa

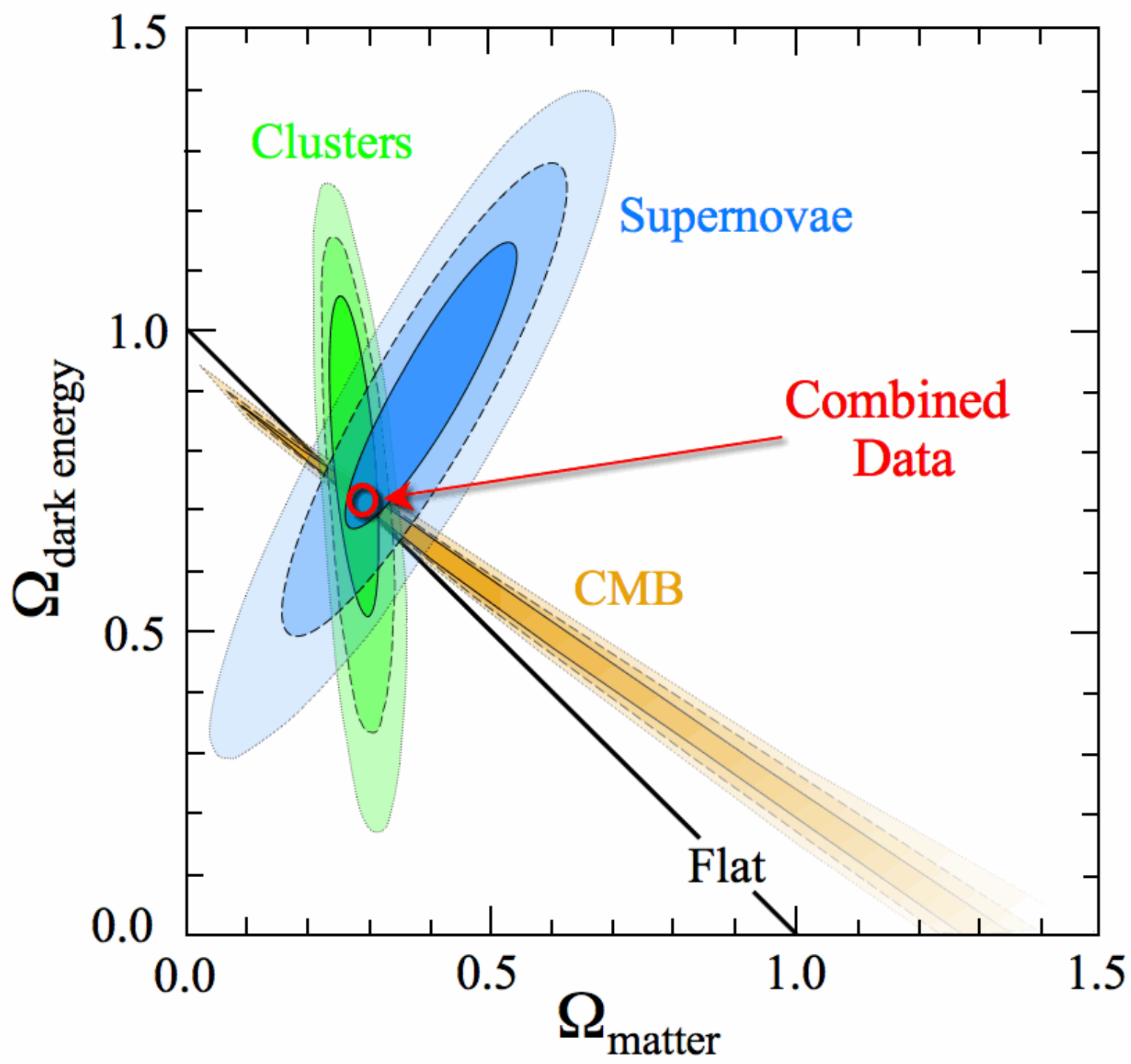
$$\Omega > 1$$

dodatnie zakrzywienie - Wszechświat zamknięty sferyczny

Parametr Ω - bezwymiarowa wielkość określająca gęstość materii i energii we Wszechświecie w relacji do tzw. gęstości krytycznej.

Parametr użyty w równaniach Friedmana, który determinuje geometrię (płaskość lub krzywiznę) oraz ostateczny los Wszechświata (kolaps lub wieczna ekspansja).





Rozmiary, wiek i przyszłość Wszechświata

Schemat przebiegu ewolucji Wszechświata przebiega od Wielkiego Wybuchu, poprzez fazę szybkiego rozszerzania zwaną inflacją, spowolnienie ekspansji i jej powtórne przyśpieszenie.

Co będzie dalej? Brane pod uwagę są trzy warianty:

- **Big Rip** (rozdarcie) - utrzymujący się wzrost tempa ekspansji spowoduje, że część Wszechświata, z której możliwe będzie otrzymanie sygnału zacznie się sukcesywnie zawężać;
- **Big Freeze** (zamrożenie) - powolniejszy wariant ekspansji, w którym średnia temperatura Wszechświata dąży do zera absolutnego;
- **Big Crunch** (zmiażdżenie) - ekspansja zamieni się w kolaps skutkujący powrotem do początkowej osobliwości.