

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład IV

Ciemna materia we Wszechświecie

- Pierwotna Nukleosynteza
- Rotacja galaktyk
- Formowanie struktur
- Odległe supernowe
- Gromada Pocisk (Bullet Cluster)

Ewolucja Wszechświata

Obecnie powszechnie uznanym modelem ewolucji Wszechświata jest tzw. model Λ CDM.

Zakłada on Wszechświat wypełniony:

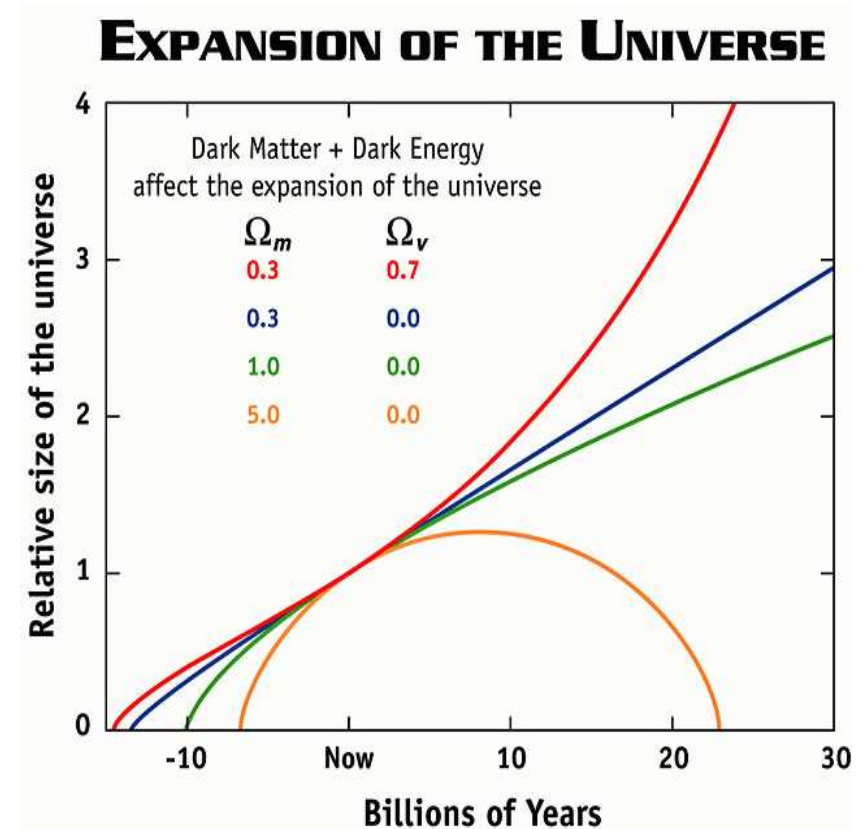
- “zwykła” materia barionowa,
- zimna ciemna materia (Cold Dark Matter - CDM)
- ciemna energia (stała kosmologiczna - Λ).

Do opisu ewolucji Wszechświata wystarczą (w najprostszym modelu) trzy parametry:

$$H, \Omega_m, \Omega_\Lambda$$

$$\text{gdzie: } \Omega_m = \Omega_b + \Omega_{CDM}$$

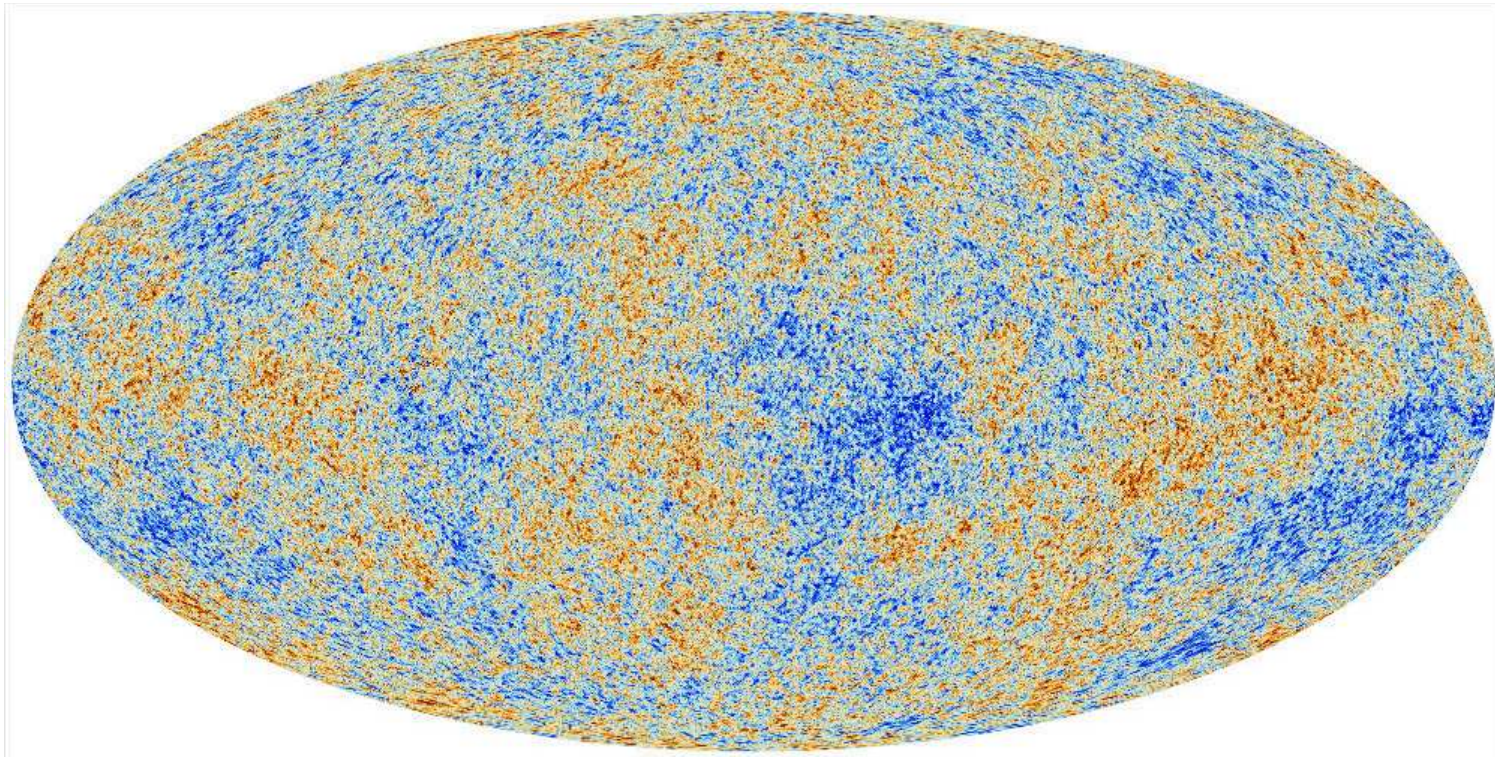
Bardziej złożony model (Planck): 6 parametrów...



Promieniowanie tła

Wyniki satelity Planck

W roku 2015 zaprezentowano pełne wyniki pomiarów anizotropii CMB przez wystrzelonego w roku 2009 satelitę Planck

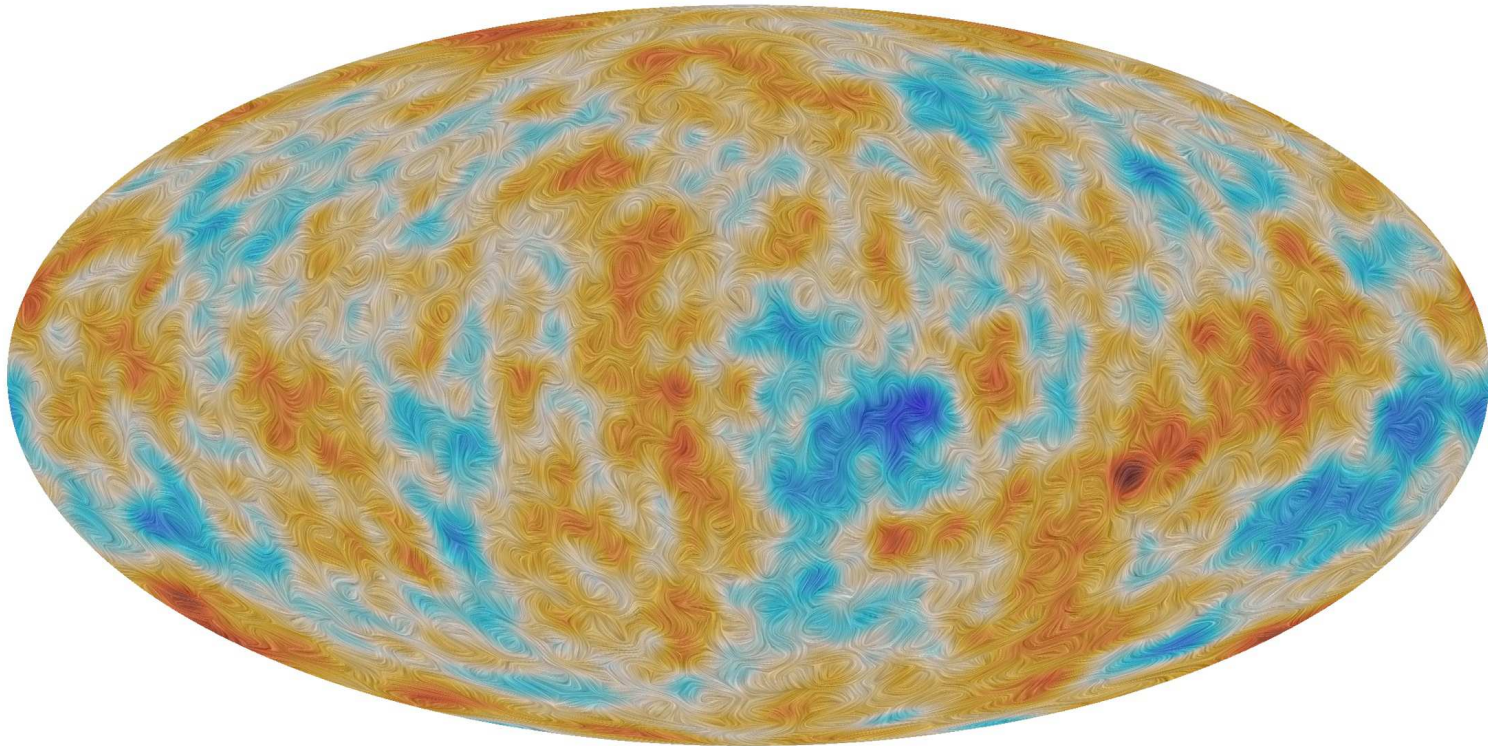


Bardzo dokładne pomiary pozwoliły na precyzyjne dopasowanie parametrów modelu...

Promieniowanie tła

Wyniki satelity Planck

Dodatkowo wyznaczona została mapa anizotropi polaryzacyjnej CMB
Dwie składowe: “gradientowa” (E) i “rotacyjna” (B).

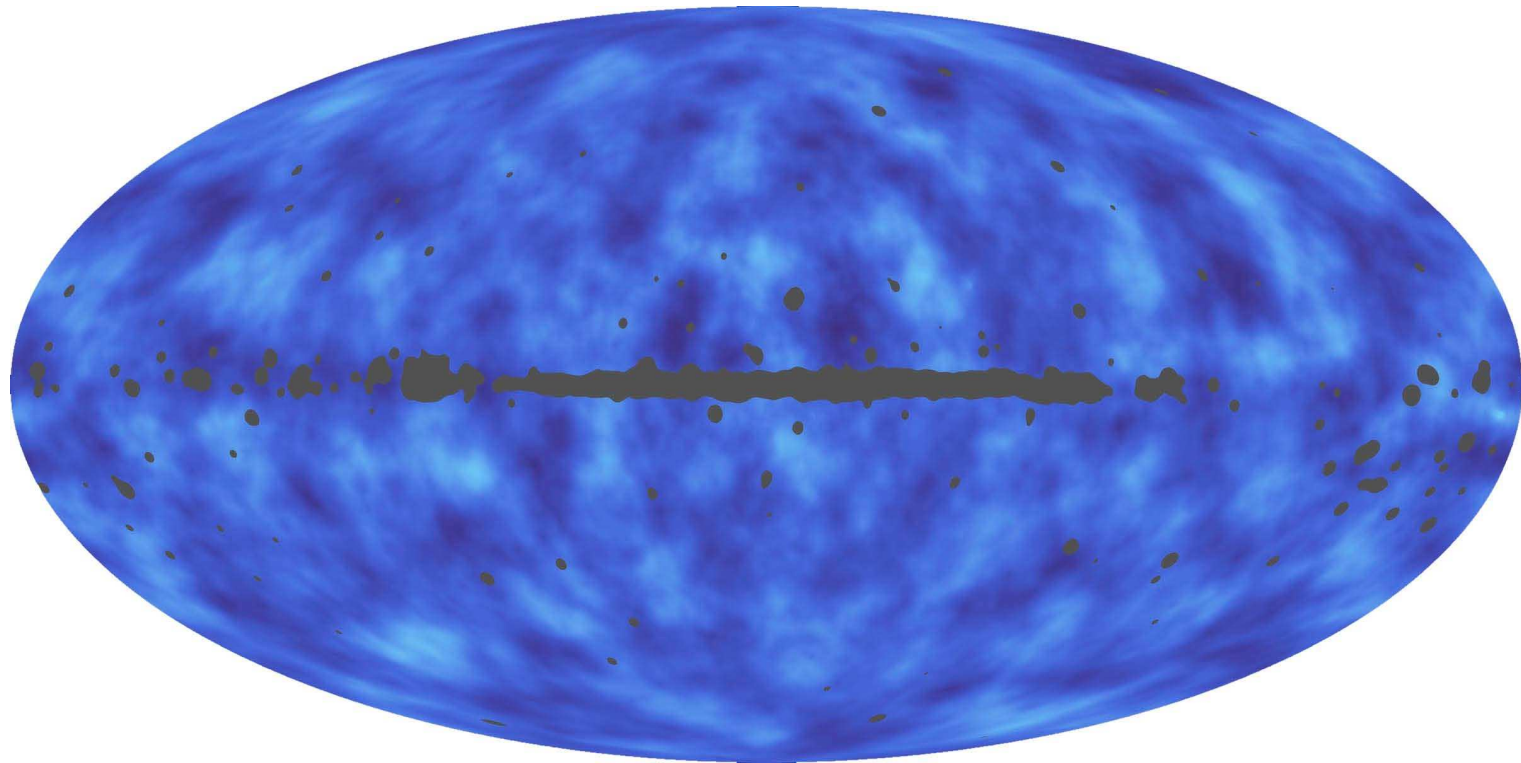


Dane polaryzacyjne oznaczane w dopasowaniach jako “lowP”

Promieniowanie tła

Wyniki satelity Planck

Na podstawie rozkładów anizotropii i polaryzacji wyznaczona została także mapa soczewkowania grawitacyjnego CMB.

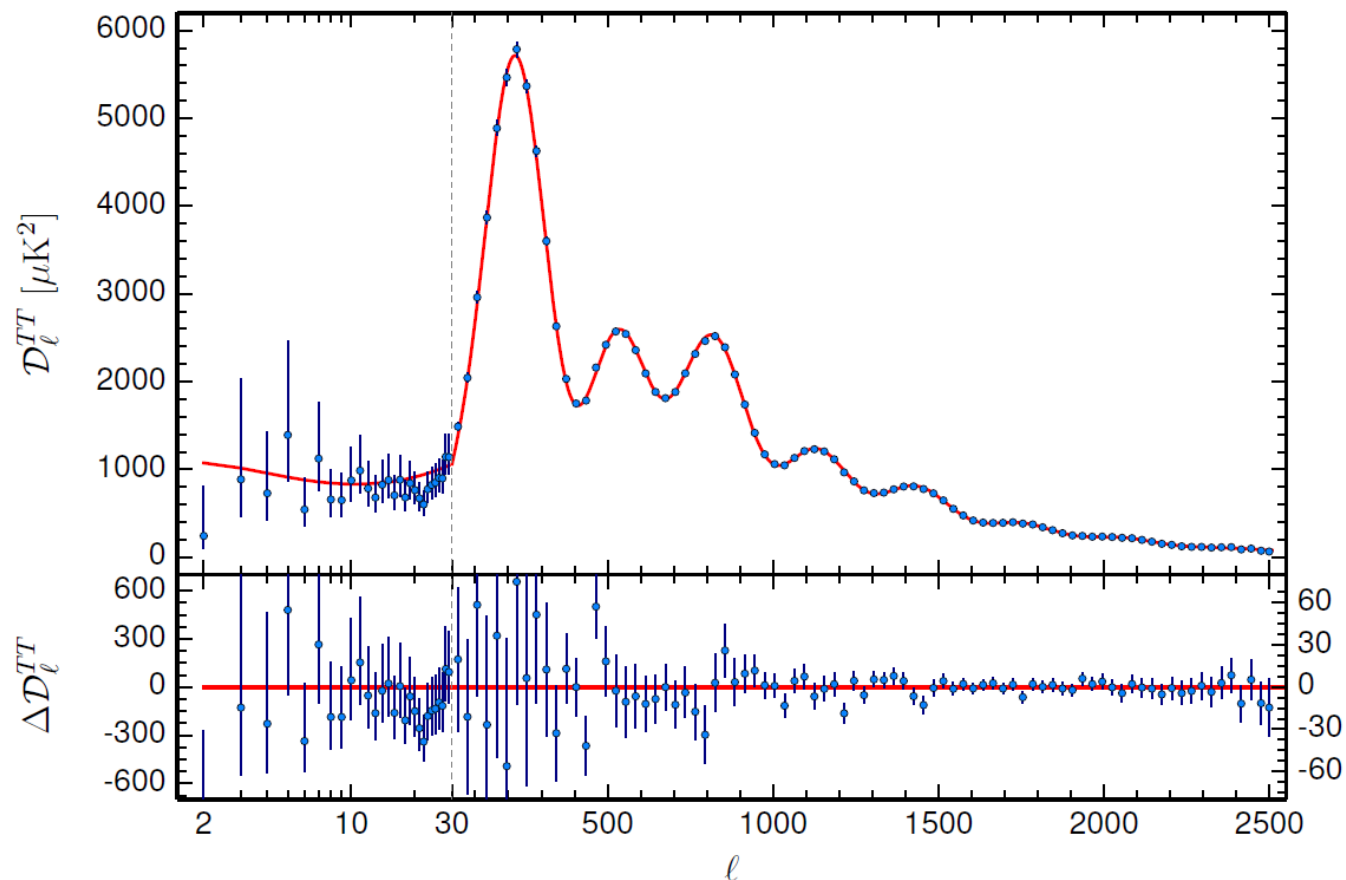


Może także być wykorzystana w modelowaniu ewolucji Wszechświata...

Promieniowanie tła

Wyniki satelity Planck

Dopasowanie modelu do widma fluktuacji promieniowania tła:

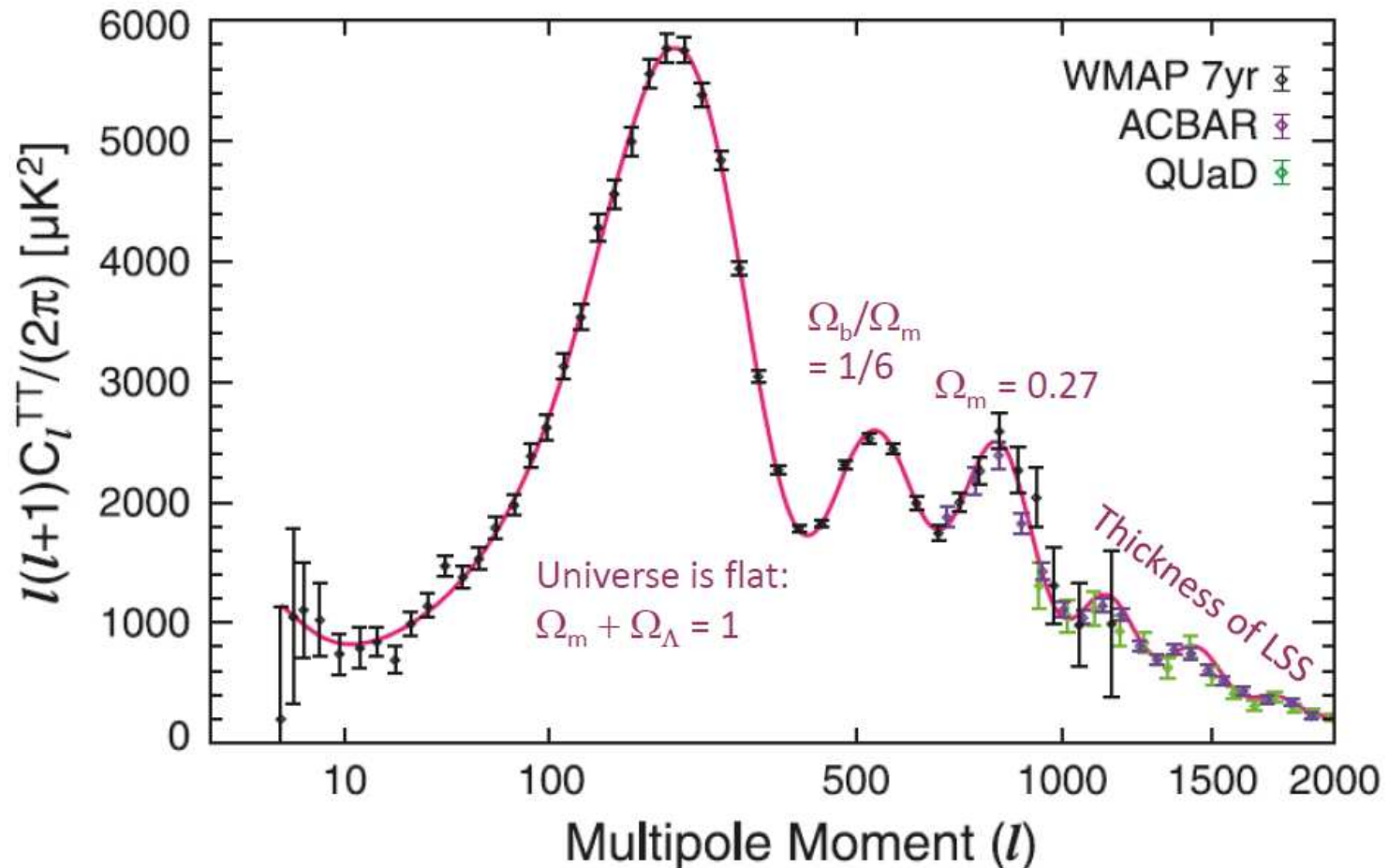


Rozmiar fluktuacji wskazuje na $\Omega_{tot} = \Omega_b + \Omega_{CDM} + \Omega_\Lambda \approx 1 \pm 0.0025$

Promieniowanie tła

Wyniki satelity Planck

Dopasowanie całego widma fluktuacji pozwala wyznaczyć także inne parametry modelu



Promieniowanie tła

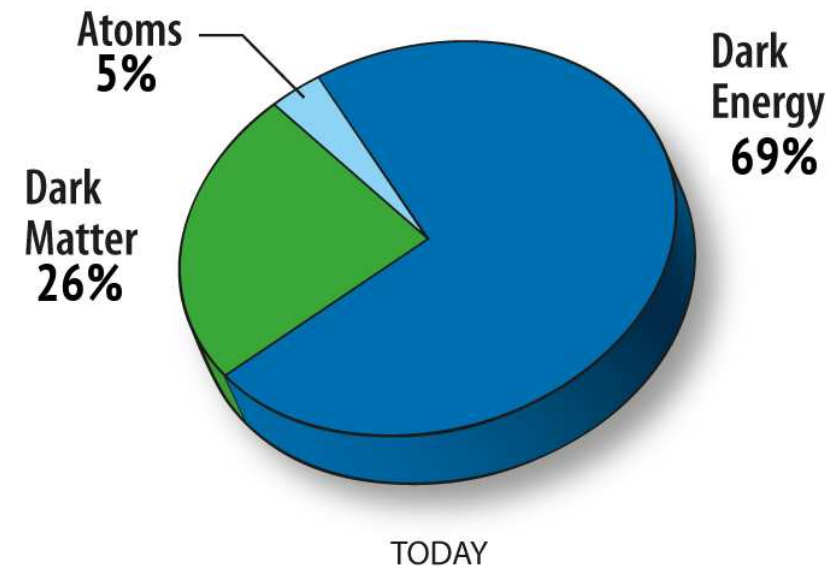
Wyniki satelity Planck

Chcąc opisać wszystkie dostępne dane musimy przyjąć, że:

- **atomy** (bariony) wypełniają tylko około **5%** Wszechświata.
- **26%** stanowi **ciemna materia**...
- **69%** to tzw. “**ciemna energia**”, którą możemy opisać poprzez **stałą kosmologiczną** (Λ)

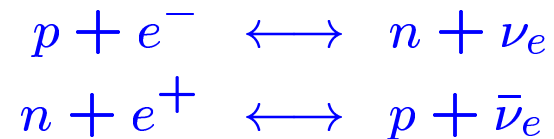
(wyniki 2016)

Ale przeprowadzone przez współpracę Planck dopasowanie wszystkich parametrów wymagało uwzględnienia także **innych pomiarów astrofizycznych**, czułych na rozkład materii we Wszechświecie...



Pierwotna nukleosynteza

Po około 10^{-5} s od Wielkiego Wybuchu kwarki sformowały nukleony: protony i neutrony. Przez kolejną sekundę były one w **stanie równowagi** dzięki zachodzącym reakcjom:



Na tych skalach czasowych neutron jest cząstką stabilną...

Po około **1 s od Wielkiego Wybuchu**:

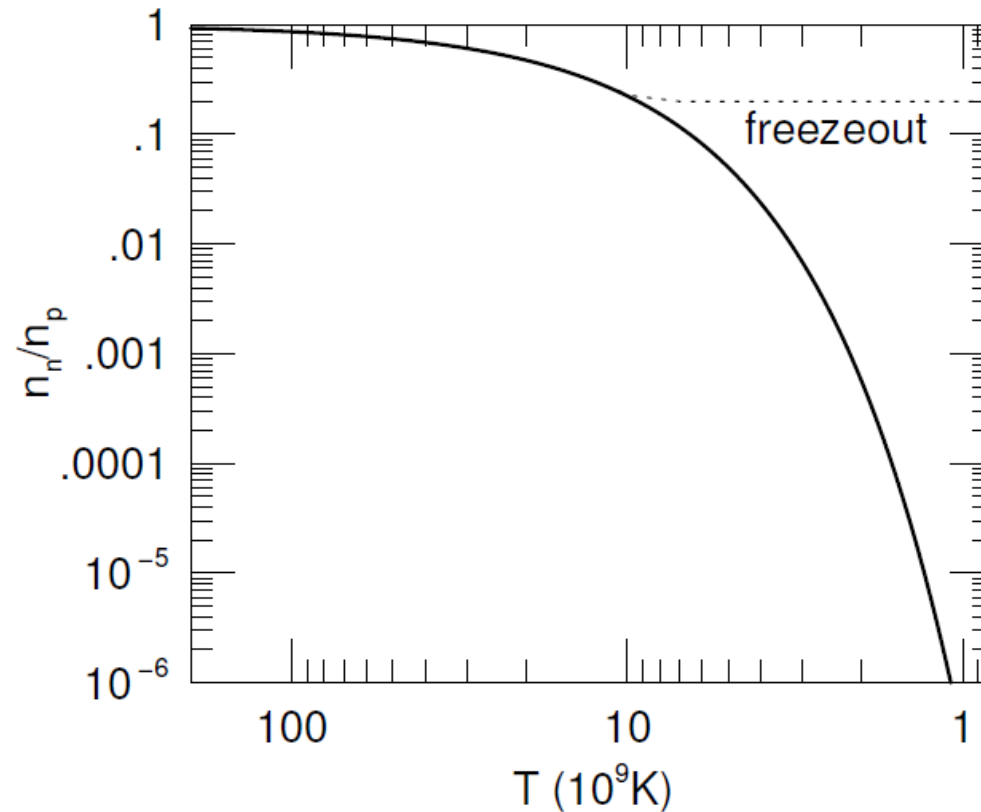
- energia termiczna staje się porównywalna z różnicą mas neutronu i protonu
- powyższe reakcje (oddziaływania słabe) przestają efektywnie zachodzić na skutek spadku gęstości (rozszerzania się Wszechświata)

Stosunek liczby **neutronów do protonów** ustala się na poziomie ok. **1 : 6**

Pierwotna nukleosynteza

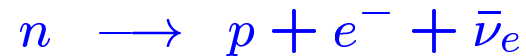
“Wymrożenie” neutronów

Zaniedbując (na rozważanych skalach czasowych) rozpad neutronu, z chwilą ustania oddziaływań między nukleonami ustala się zawartość neutronów we Wszechświecie



Pierwotna nukleosynteza

Swobodne neutrony są cząstkami nietrwałymi, rozpadają się z $\tau \approx 880$ s:



Równolegle może jednak zachodzić też proces syntezy deuteru:



choć początkowo produkowane jądra są szybko rozbijane przez wysokoenergetyczne fotony...

Zawartość deuteru zaczyna gwałtownie rosnać dopiero dla $t \sim 100$ s, gdy Wszechświat ostygnie do temperatury $kT \sim 0.1$ MeV.

Produkcja deuteru “zamraża” zawartość neutronów we Wszechświecie na poziomie ok. **1 : 7**

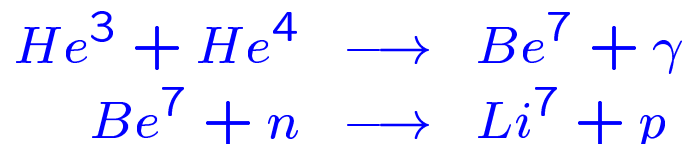
Pierwotna nukleosynteza

Gdy już powstał deuteron, otwiera się cały szereg kanałów reakcji, które prowadzą do produkcji helu:



Raz wyprodukowany hel praktycznie nie ulega rozbiciu przez promieniowanie, gdyż jego energia wiązania (28MeV) jest dużo wyższa niż w przypadku deuteru (2.2 MeV).

W niewielkim ułamku dochodzi też do produkcji cięższych jąder:



Cięższe jądra nie zdążą już powstać. Przy dalszym rozszerzaniu/ochładzaniu Wszechświata reakcje nukleosyntezy ustają ze względu na odpychanie kulombowskie...

Pierwotna nukleosynteza

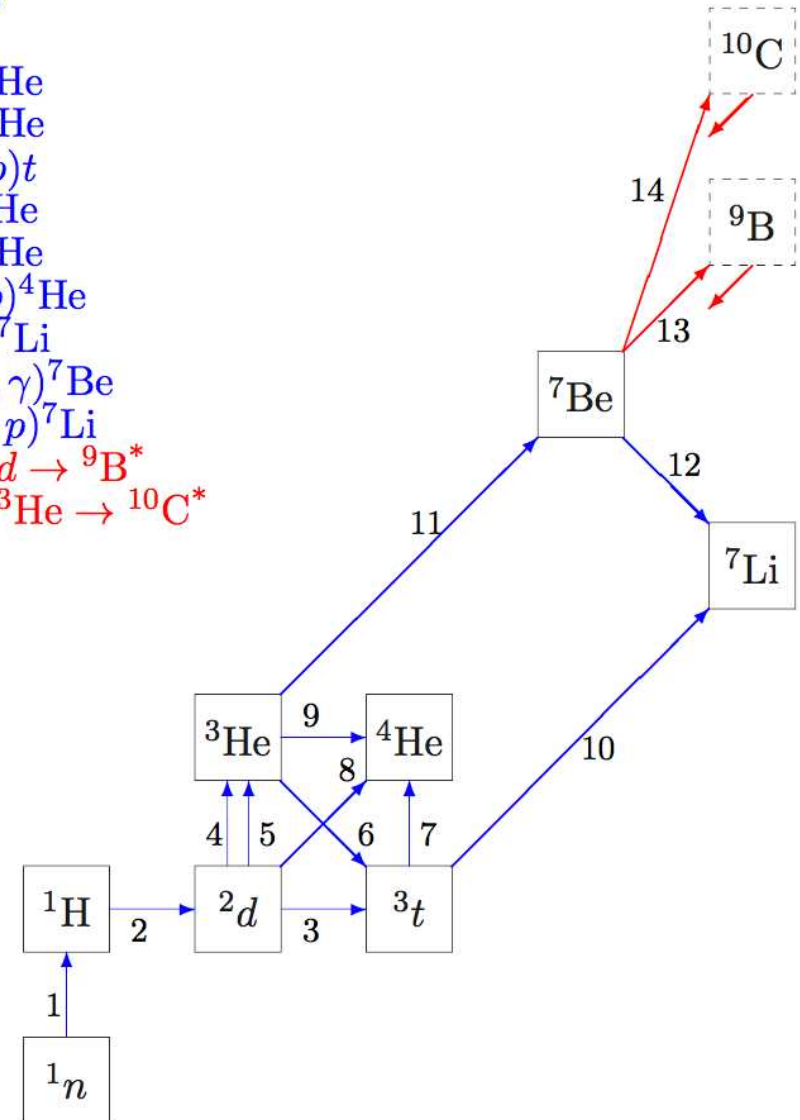
Podsumowanie

Dla kolejnych stanów mamy konkurujące procesy produkcji oraz rozpadu lub fuzji.

Tempo poszczególnych reakcji zależy od gęstości materii (barionowej).

To jak szybko nastąpi “wymrożenie” zależy od tempa ekspansji Wszechświata.

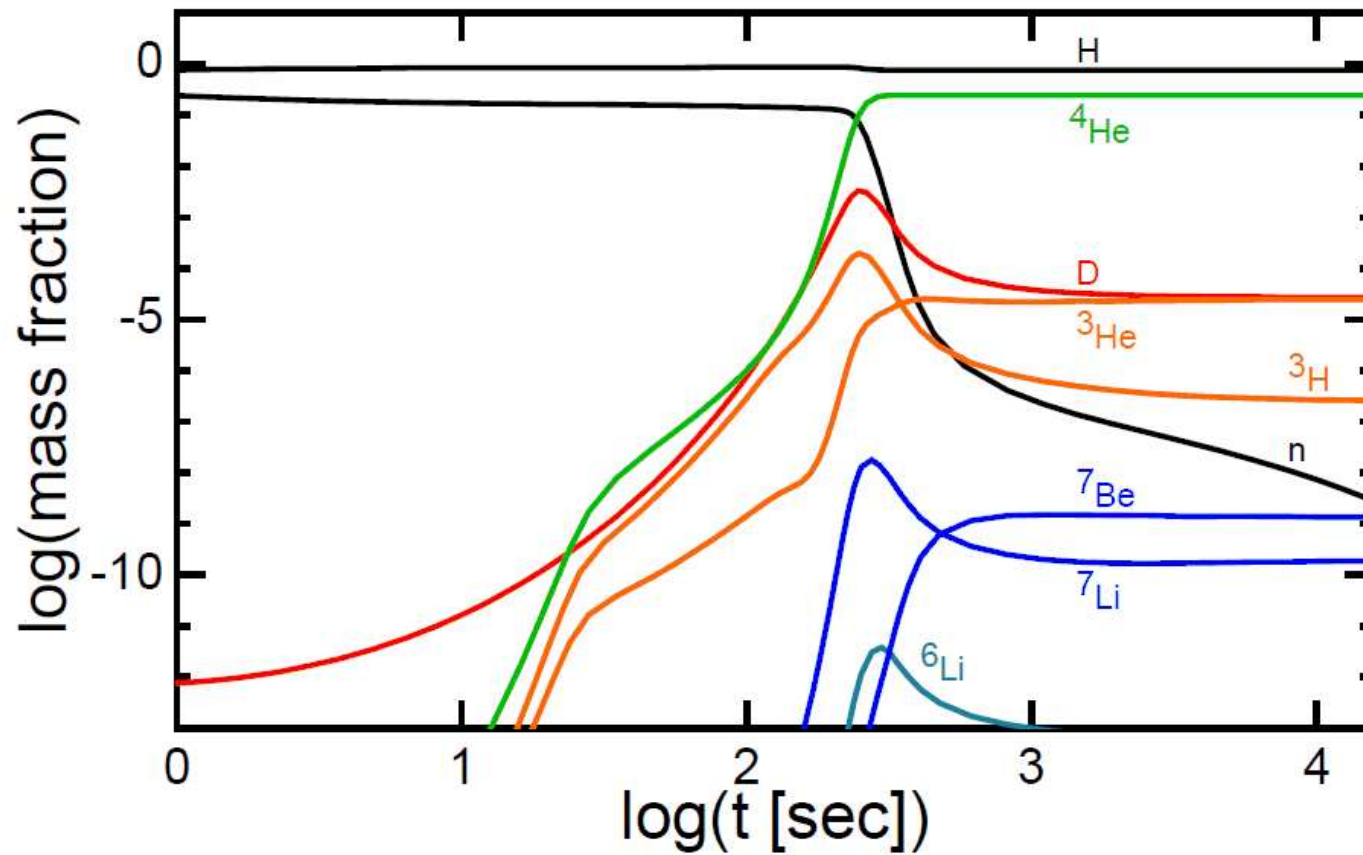
- 1: $n \rightarrow p e \nu$
- 2: $n(p, \gamma)d$
- 3: $d(d, p)t$
- 4: $d(p, \gamma)^3\text{He}$
- 5: $d(d, n)^3\text{He}$
- 6: $^3\text{He}(n, p)t$
- 7: $t(d, n)^4\text{He}$
- 8: $d(d, \gamma)^4\text{He}$
- 9: $^3\text{He}(d, p)^4\text{He}$
- 10: $t(\alpha, \gamma)^7\text{Li}$
- 11: $^4\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$
- 12: $^7\text{Be}(n, p)^7\text{Li}$
- 13: $^7\text{Be} + d \rightarrow ^9\text{B}^*$
- 14: $^7\text{Be} + ^3\text{He} \rightarrow ^{10}\text{C}^*$



Pierwotna nukleosynteza

Podsumowanie

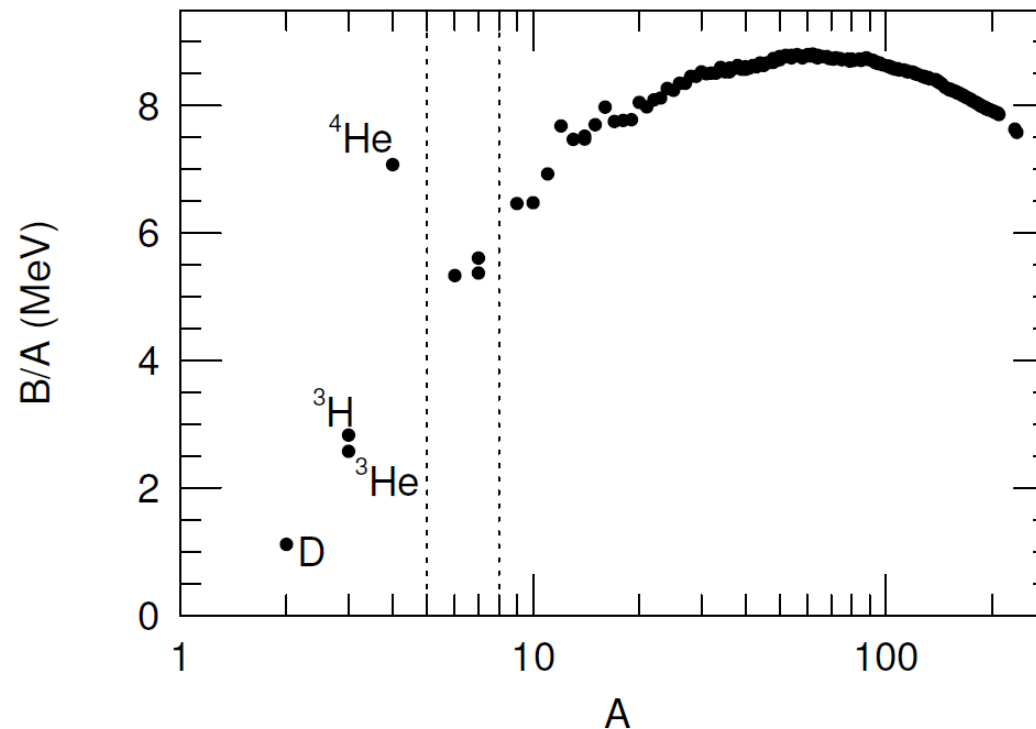
Zależność zawartości poszczególnych izotopów od czasu



Pierwotna nukleosynteza

Podsumowanie

Dominuje produkcja helu (${}^4\text{He}$) także dlatego, że odpowiada to najsilniejszemu (w obszarze lekkich jąder) wiązaniu nukleonów \Rightarrow stan **najkorzystniejszy energetycznie**



Jądra węgla (korzystniejsze energetycznie) nie są produkowane bezpośrednio...

Pierwotna nukleosynteza

Przebieg procesów nukleosyntezy silnie zależy od początkowej gęstości barionów.

Dlatego obserwowana zawartość helu:

$${}^4\text{He}/\text{H} = 0.249 \pm 0.009$$

oraz deuteru:

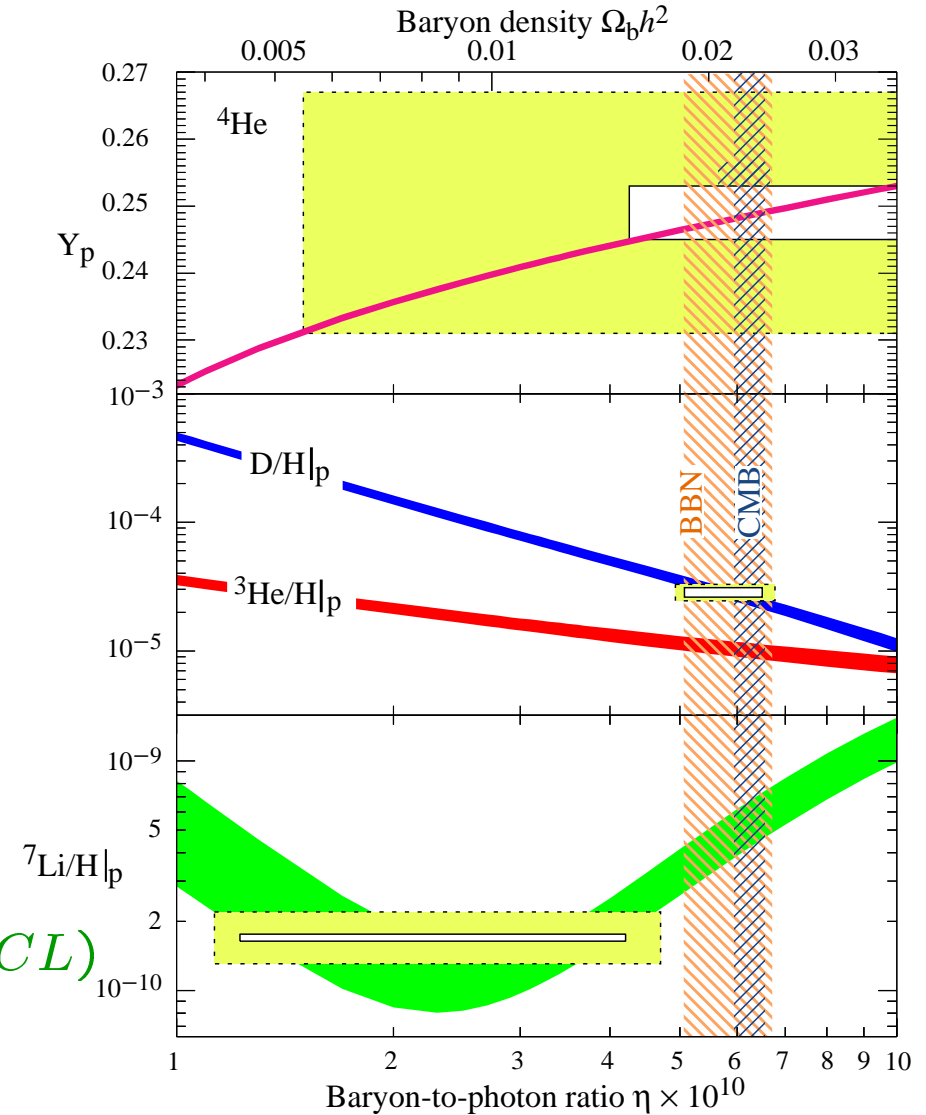
$${}^2\text{H}/\text{H} = (2.82 \pm 0.21) \times 10^{-5}$$

daje silne ograniczenia na ogólną zawartość materii barionowej we Wszechświecie.

Wyniki dopasowania:

$$0.019 \leq \omega_b = \Omega_b h^2 \leq 0.024 \quad (95\%CL)$$

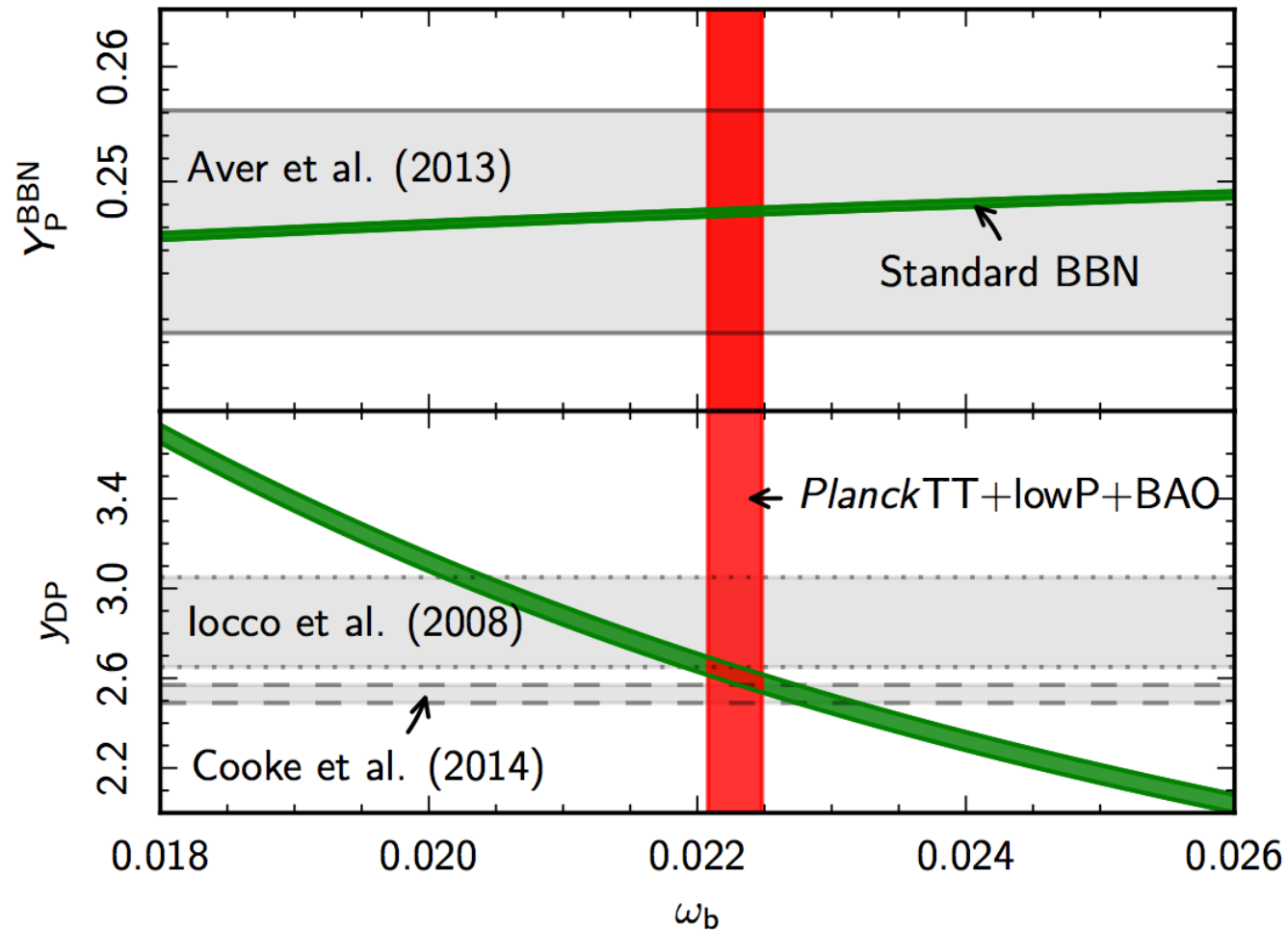
gdzie: $h = \frac{H}{100 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}} \sim 0.7$



Pierwotna nukleosynteza

Porównanie z wynikami Planck

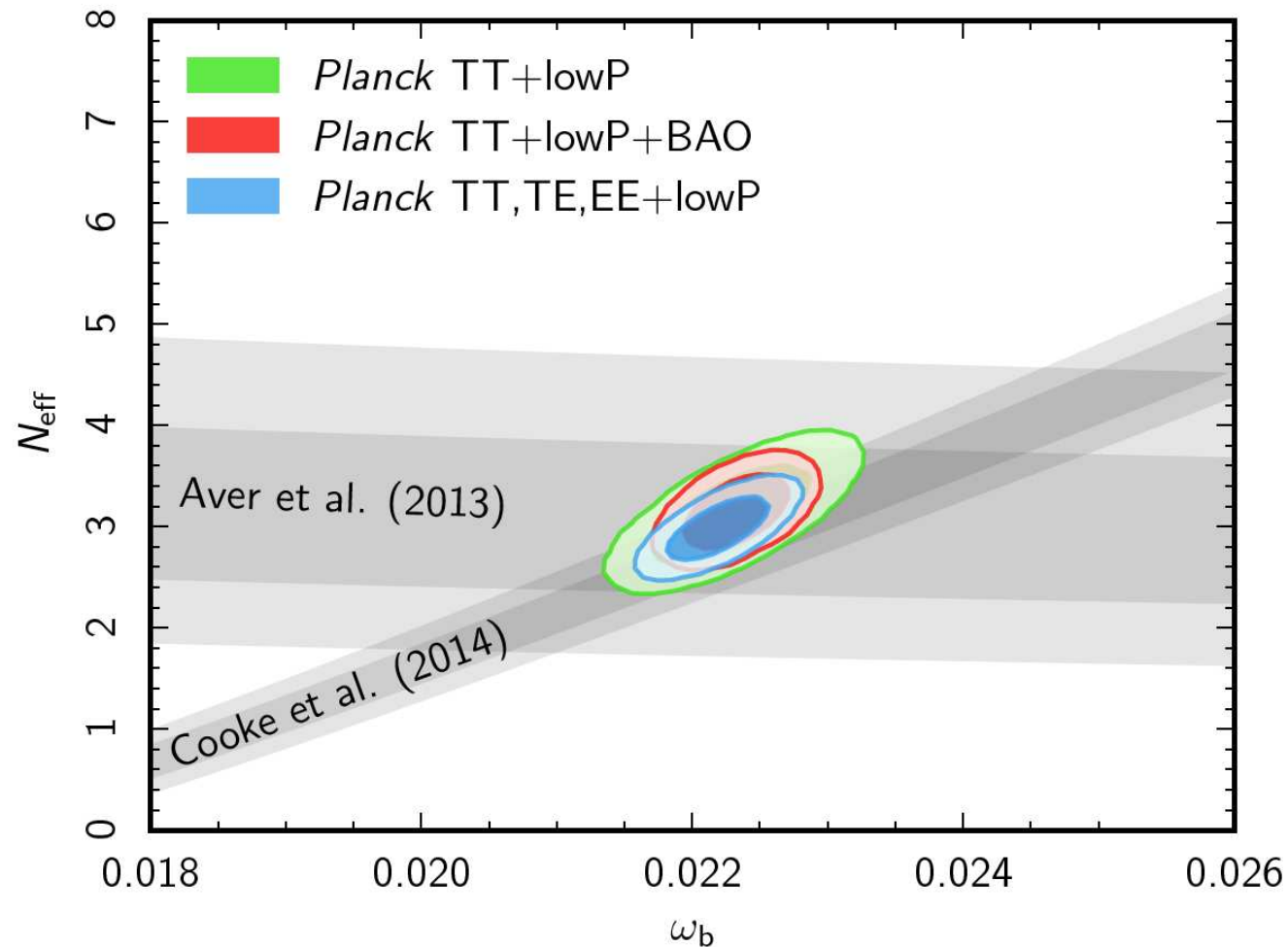
Zawartość helu i deuteru vs gęstość barionów



Pierwotna nukleosynteza

Porównanie z wynikami Planck

Liczba lekkich neutrin vs gęstość barionów

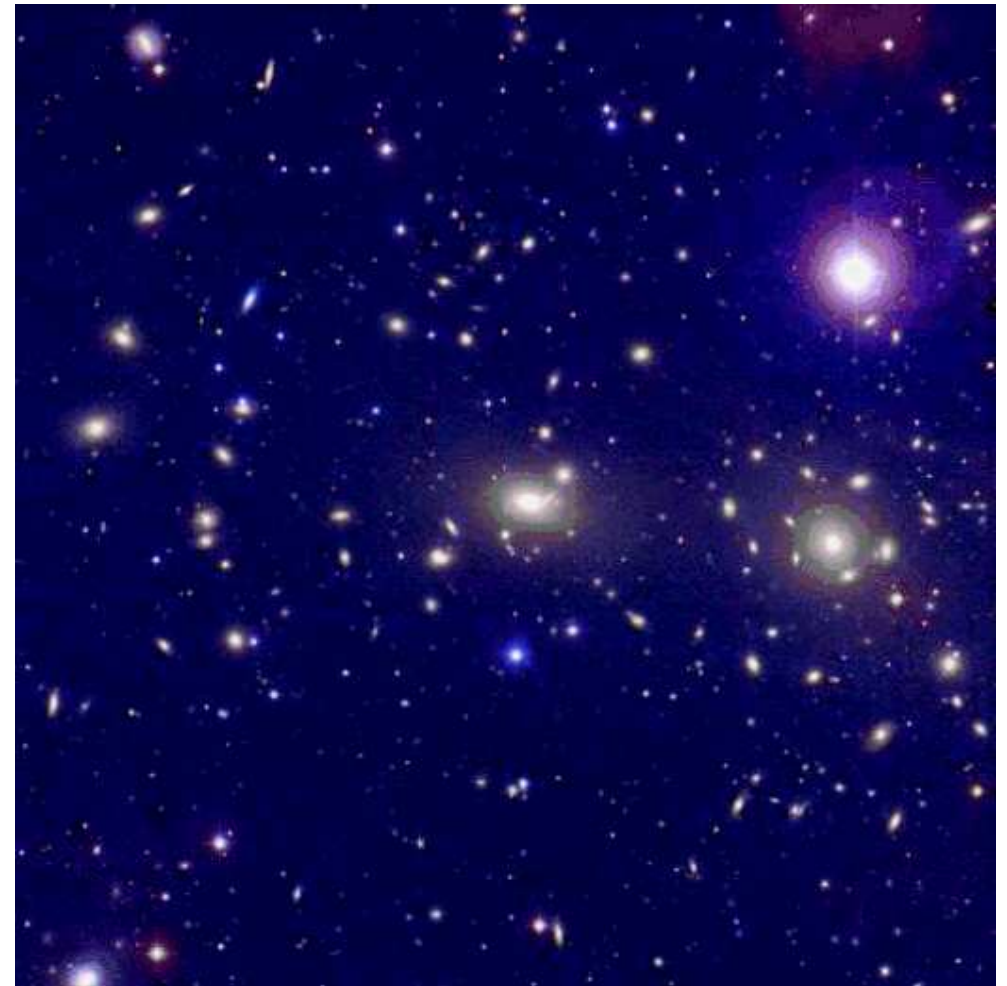


Rotacja galaktyk

W 1933 roku Fritz Zwicky opublikował wyniki pomiaru rozmycia prędkości obiektów w Gromadzie Warkocza Bereniki (Coma Cluster).

Statystycznie rozmycie prędkości jest powiązane z energią potencjalną – pozwala wnioskować o masie systemu.

Wynik był zaskakujący:
masa “grawitacyjna” była ok. 400 razy większa niż oczekiwano na podstawie obserwowanej jasności obiektów (masa “światlista”)



Rotacja galaktyk

Obecnie potrafimy bardzo dokładnie zmierzyć rozkłady prędkości gwiazd w ramionach galaktyk (z efektu Dopplera), jak również prędkości współwirującego halo (z obserwacji linii 21 cm wodoru).

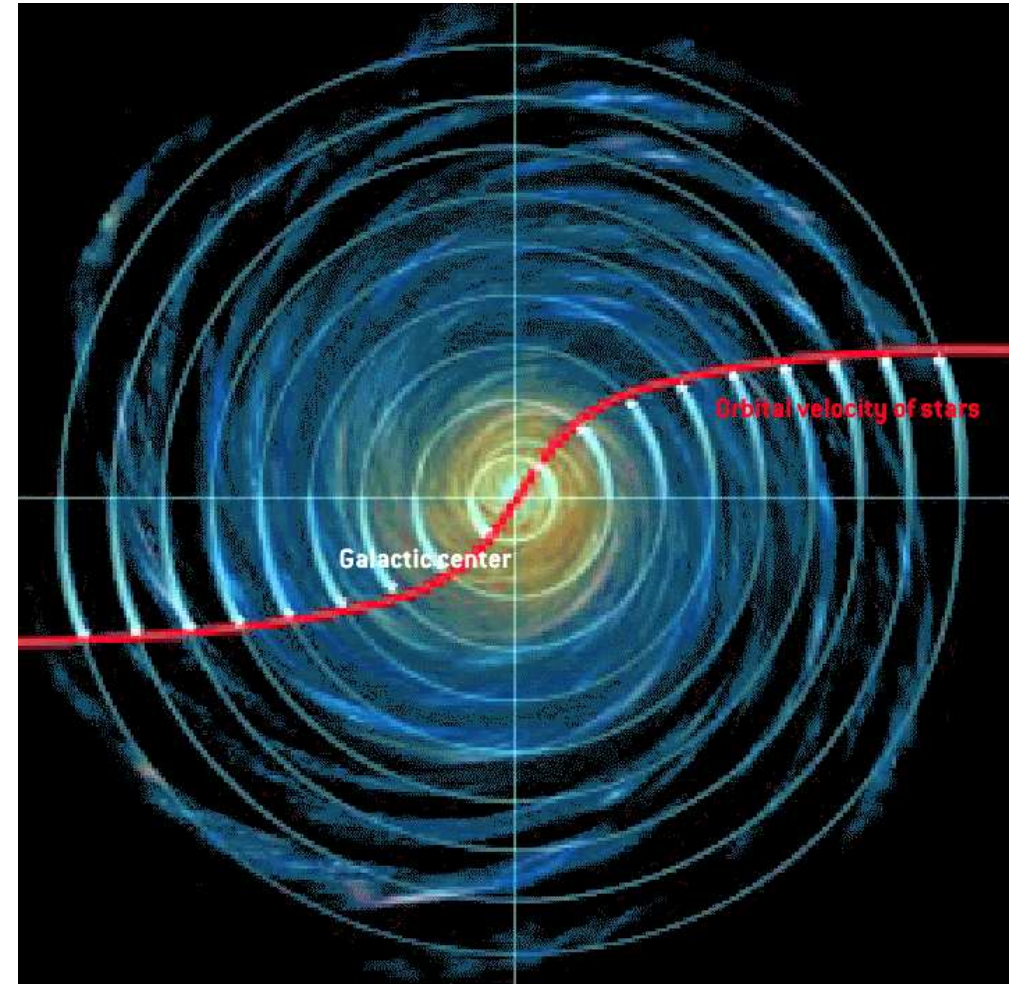
Z klasycznych równań ruchu oczekujemy

$$v_{circ} = \sqrt{\frac{G_N M(r)}{r}}$$

gdzie $M(r)$ - masa wewnątrz promienia r

Jeśli masa jest skupiona w centrum Galaktyki (zgodnie z rozkładem gwiazd):

$$v_{circ} \sim 1/\sqrt{r}$$



Rotacja galaktyk

Obecnie potrafimy bardzo dokładnie zmierzyć rozkłady prędkości gwiazd w ramionach galaktyk (z efektu Dopplera), jak również prędkości współwirującego halo (z obserwacji linii 21 cm wodoru).

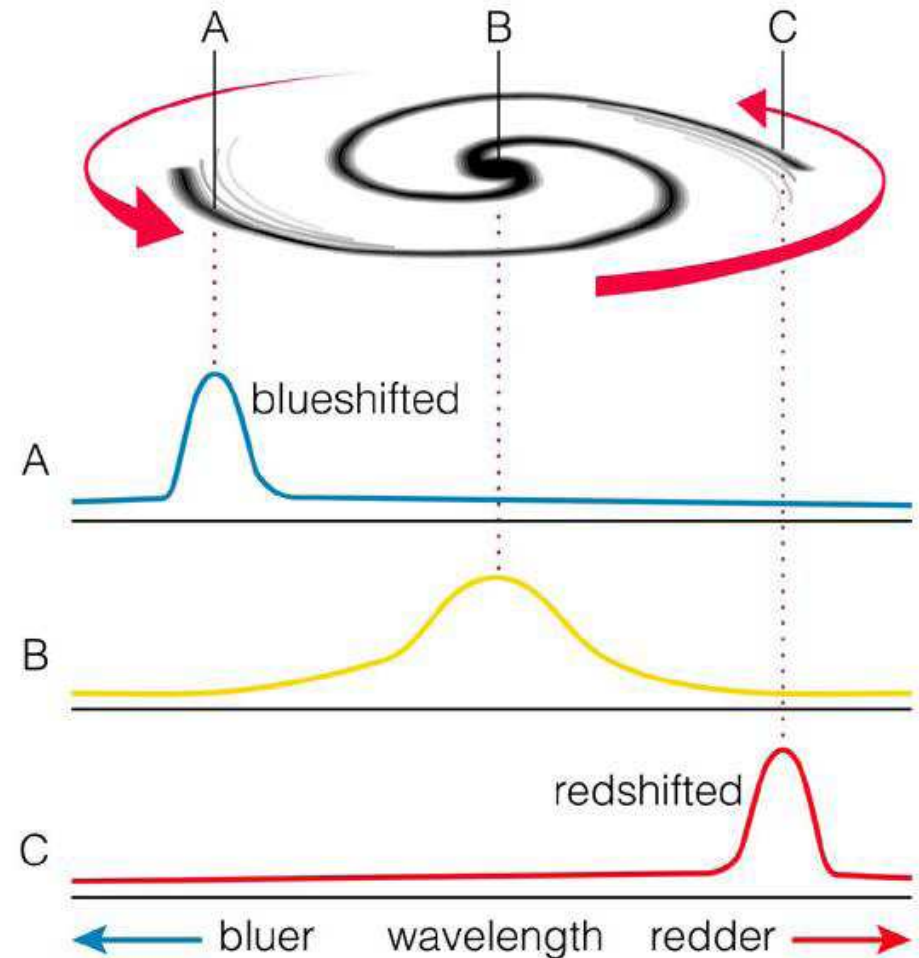
Z klasycznych równań ruchu oczekujemy

$$v_{circ} = \sqrt{\frac{G_N M(r)}{r}}$$

gdzie $M(r)$ - masa wewnątrz promienia r

Jeśli masa jest skupiona w centrum Galaktyki (zgodnie z rozkładem gwiazd):

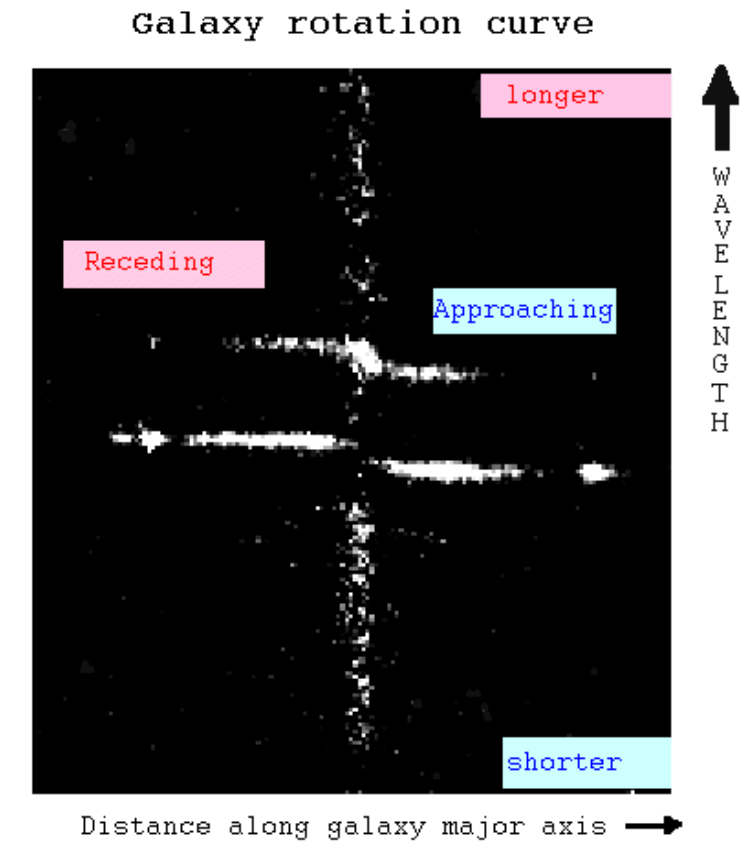
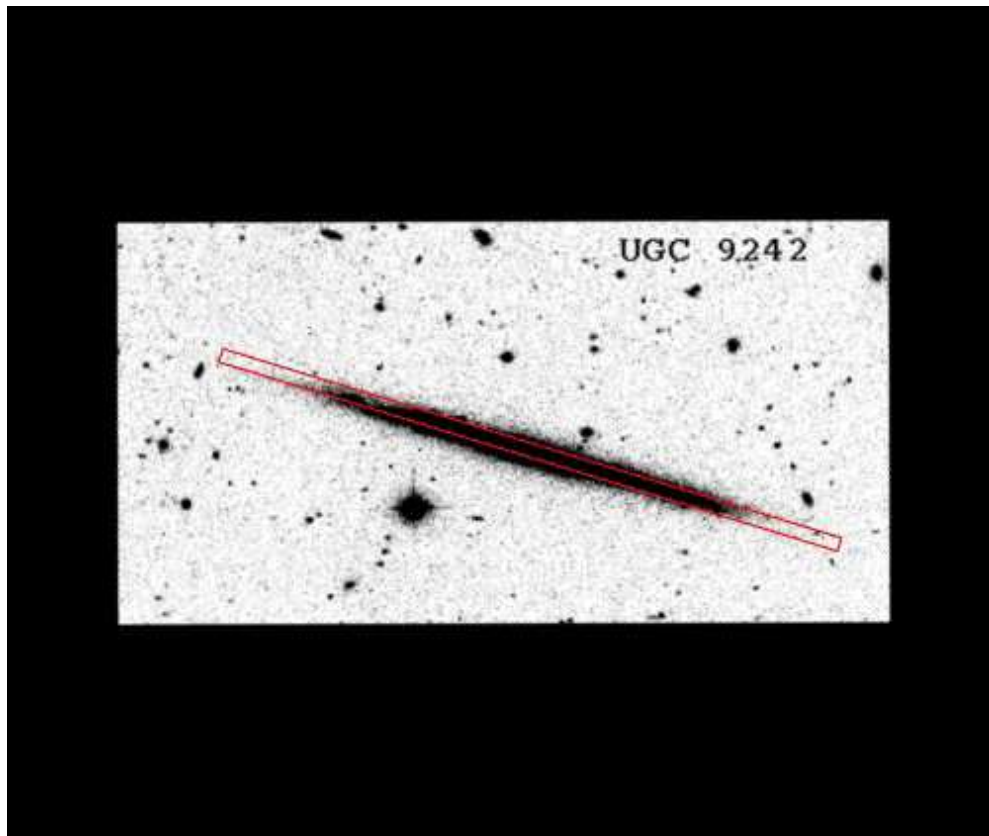
$$v_{circ} \sim 1/\sqrt{r}$$



Rotacja galaktyk

Pomiary

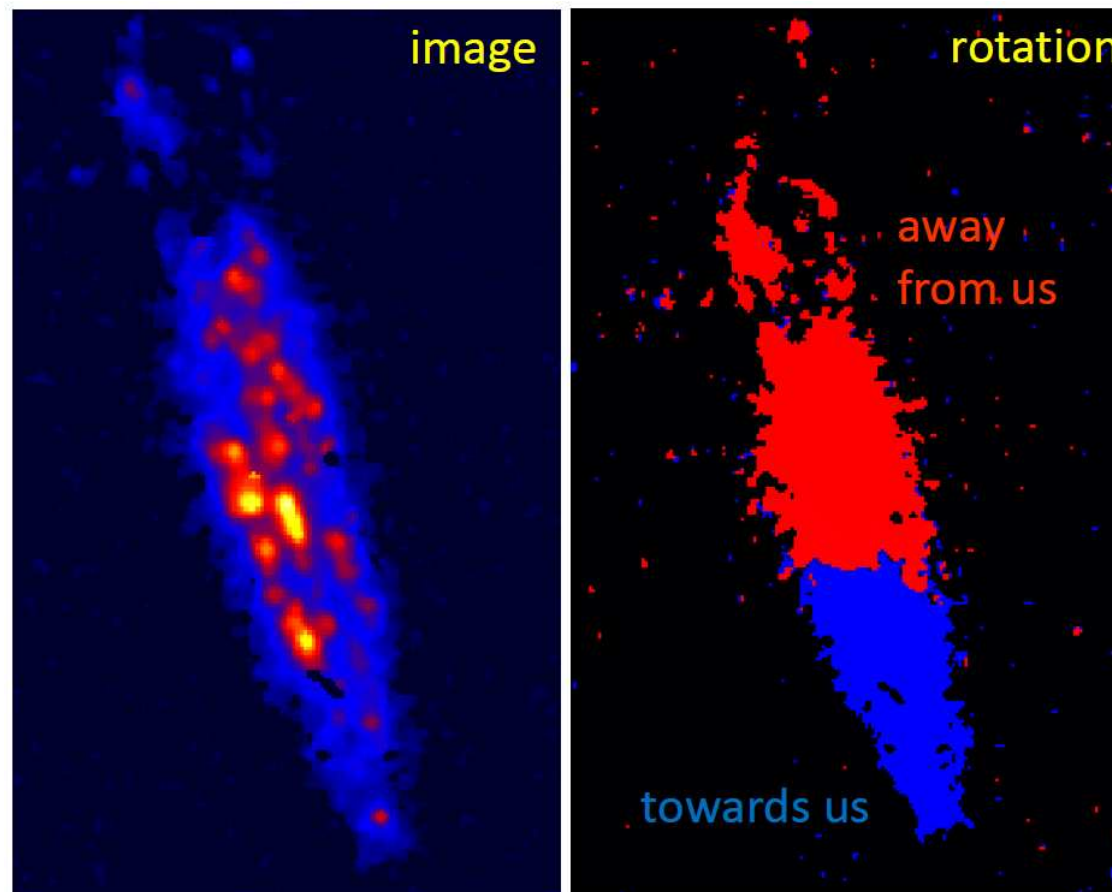
W przeszłości dedykowany pomiar był wykonywany dla każdej galaktyki osobno



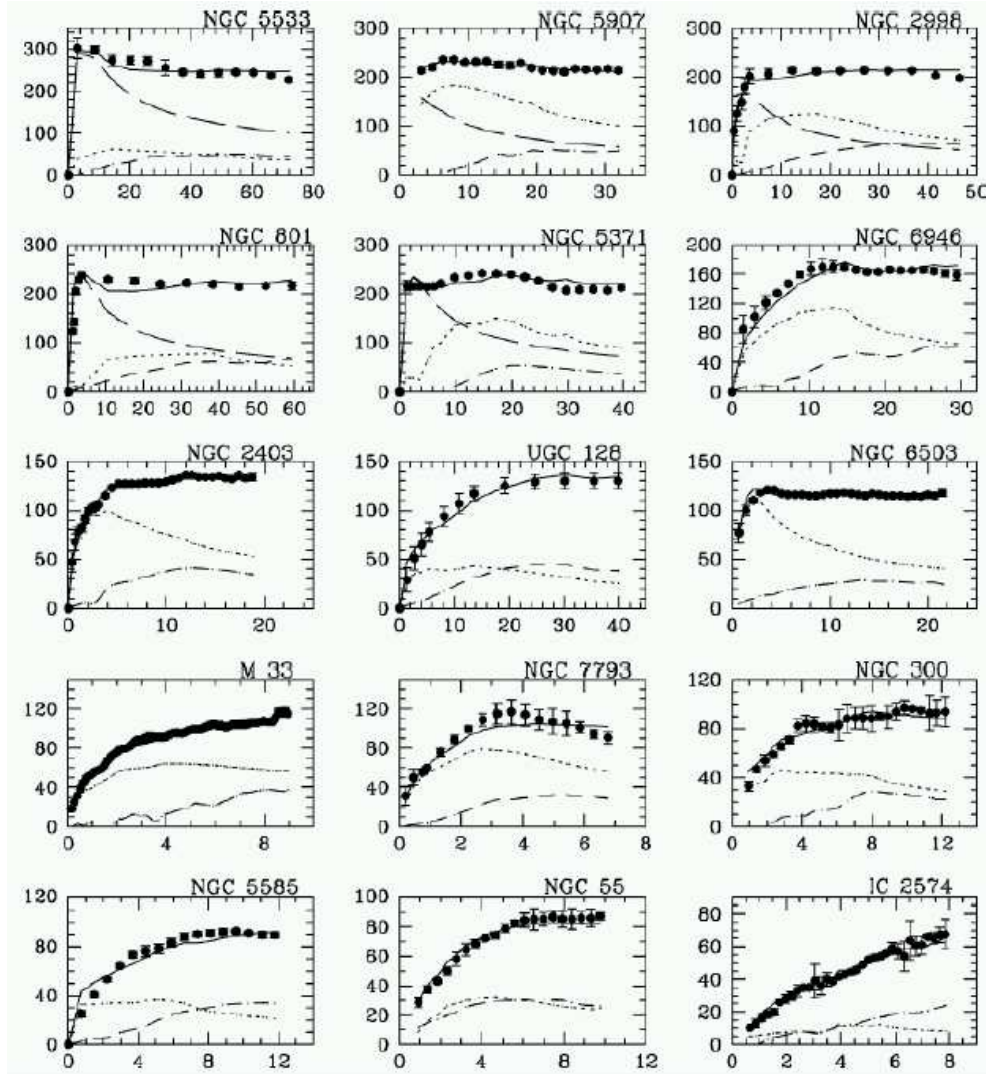
Rotacja galaktyk

Pomiary

Dzisiejsze metody obserwacyjne pozwalają uzyskać znacznie dokładniejsze wyniki, a jednocześnie badać automatycznie duże zbiory obiektów



Rotacja galaktyk

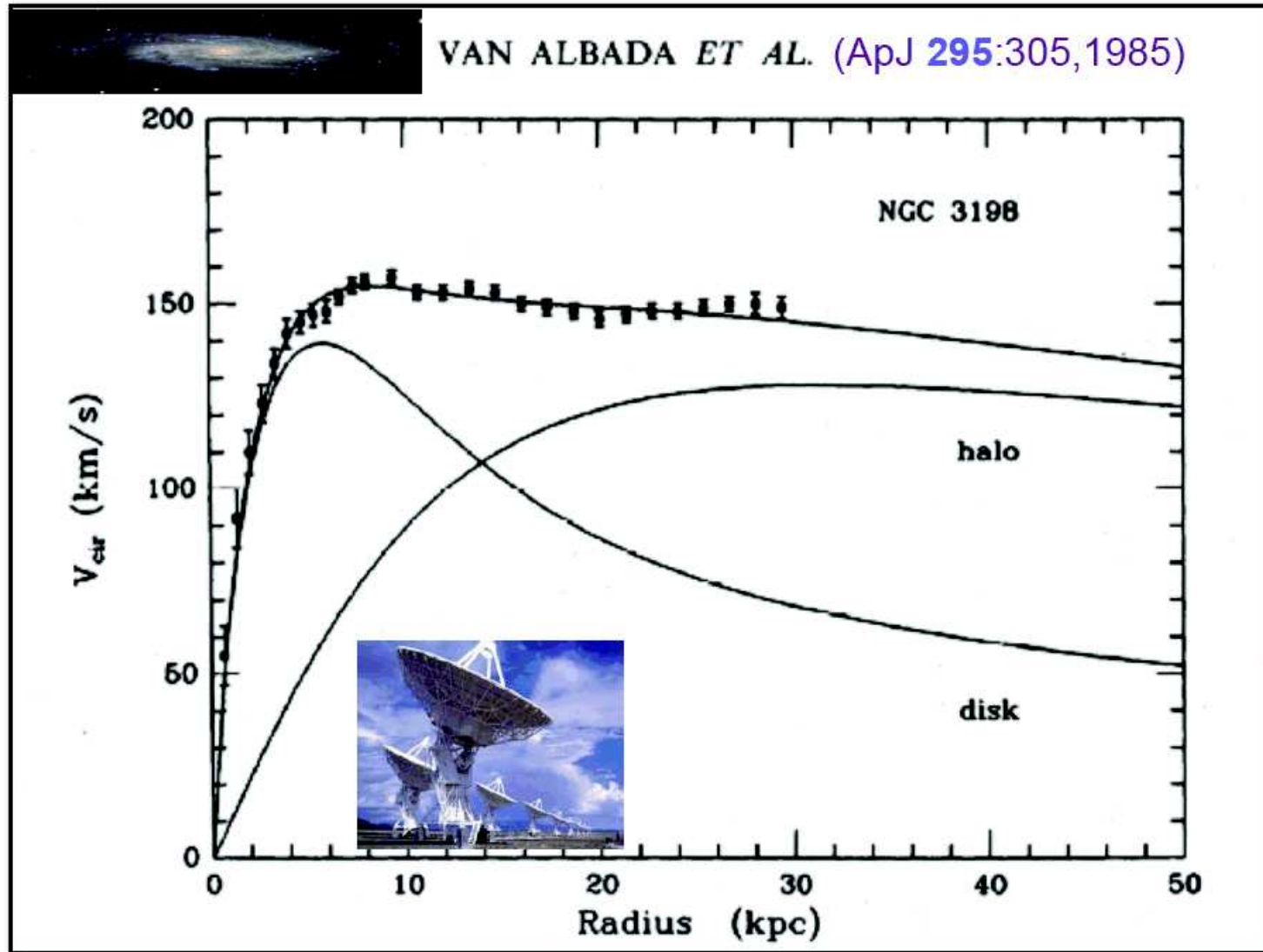


Wyniki pomiarów wskazują, że prędkość rotacji nie maleje (a czasami wręcz rośnie) z odległością od środka galaktyki.

Nie zgadza się to z przewidywaniami opartymi na rozkładzie widocznej materii.

Aby wytłumaczyć krzywe rotacji trzeba założyć, że “widoczna” galaktyka jest zanurzona w sferycznym “halo” o wielokrotnie większej masie...

Rotacja galaktyk



Formowanie struktur

Jeszcze 20 lat temu niebo było dla nas praktycznie dwuwymiarowe.

Mierzyliśmy pozycje obiektów na sferze niebieskiej...

Jedynie dla niewielkiej liczby obiektów potrafiliśmy określić ich odległość od Ziemi (z przesunięcia ku czerwieni).

W ostatnich latach dzięki dedykowanym projektom obserwacyjnym dokonał się olbrzymi postęp w tej dziedzinie.

Nauczyliśmy się szacować przesunięcie ku czerwieni z pomiaru jasności w kilku/kilkunastu filtrach (przedziałach długości fali).

Dedykowane instrumenty pozwalają na pomiar widma do 1000 obiektów jednocześnie.

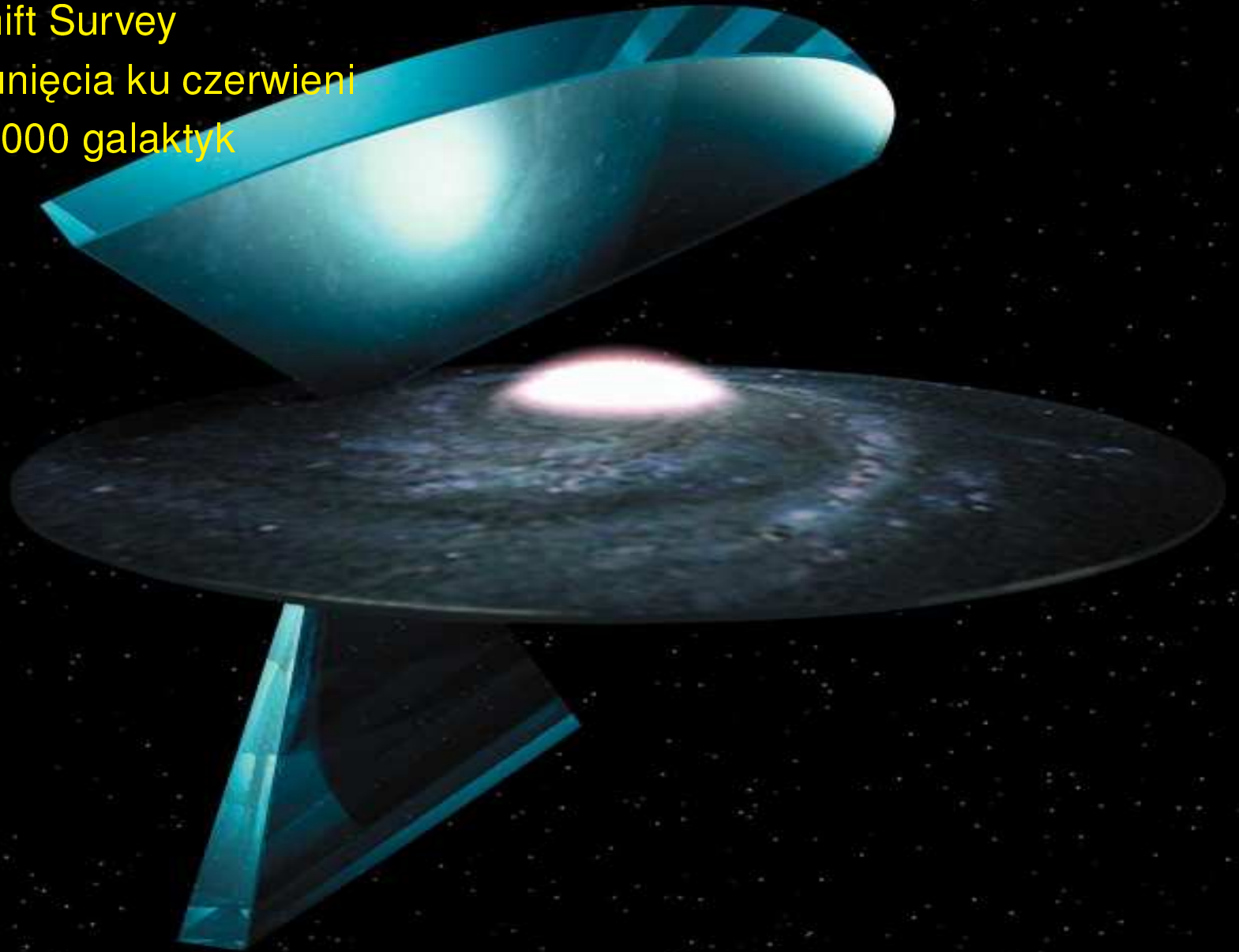
Obecnie znamy odległość do około miliona galaktyk...

Obecnie większość danych pochodzi z kolejnych faz projektu Sloan Digital Sky Survey...

Projekt 2dF

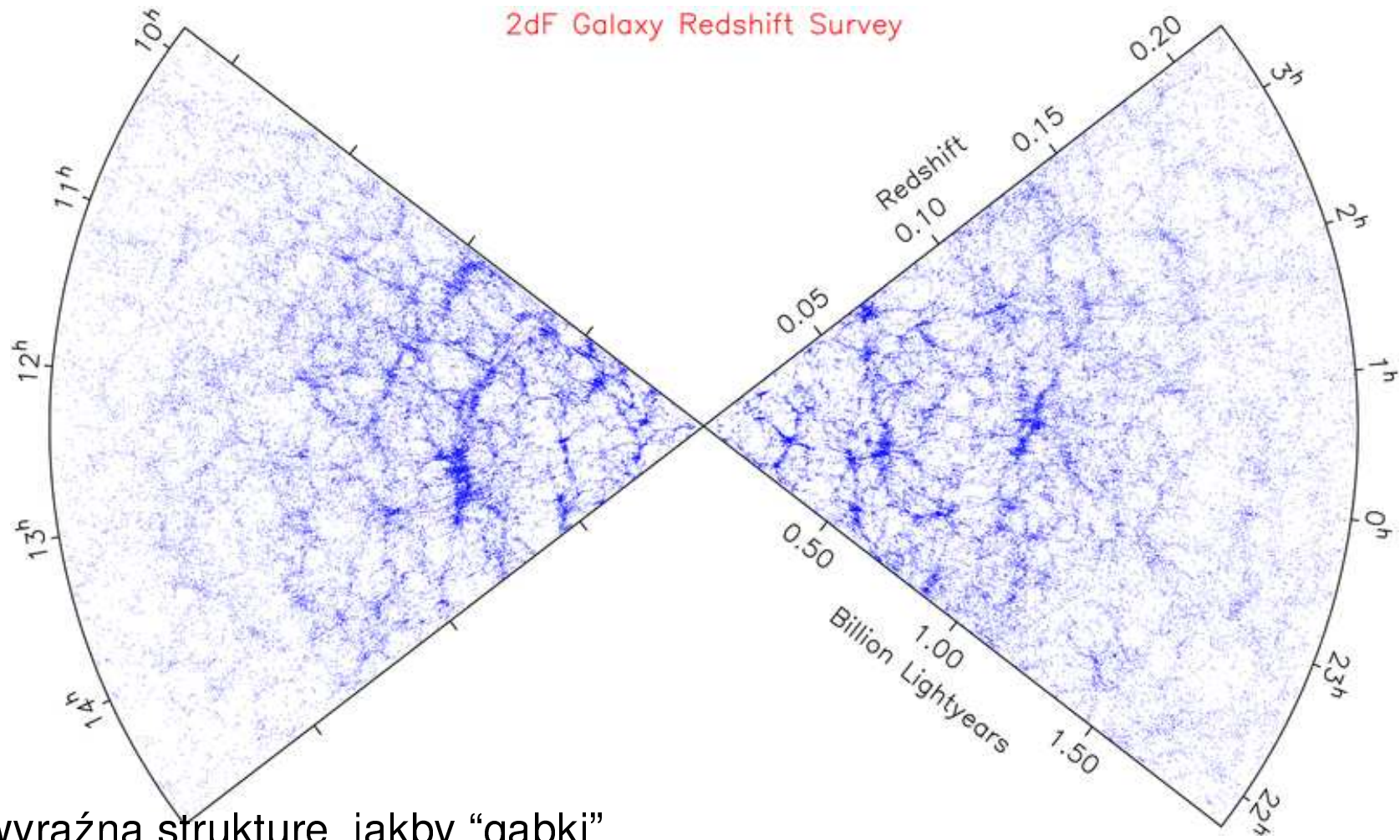
Galaxy Redshift Survey

pomiar przesunięcia ku czerwieni
dla około 250 000 galaktyk



Formowanie struktur

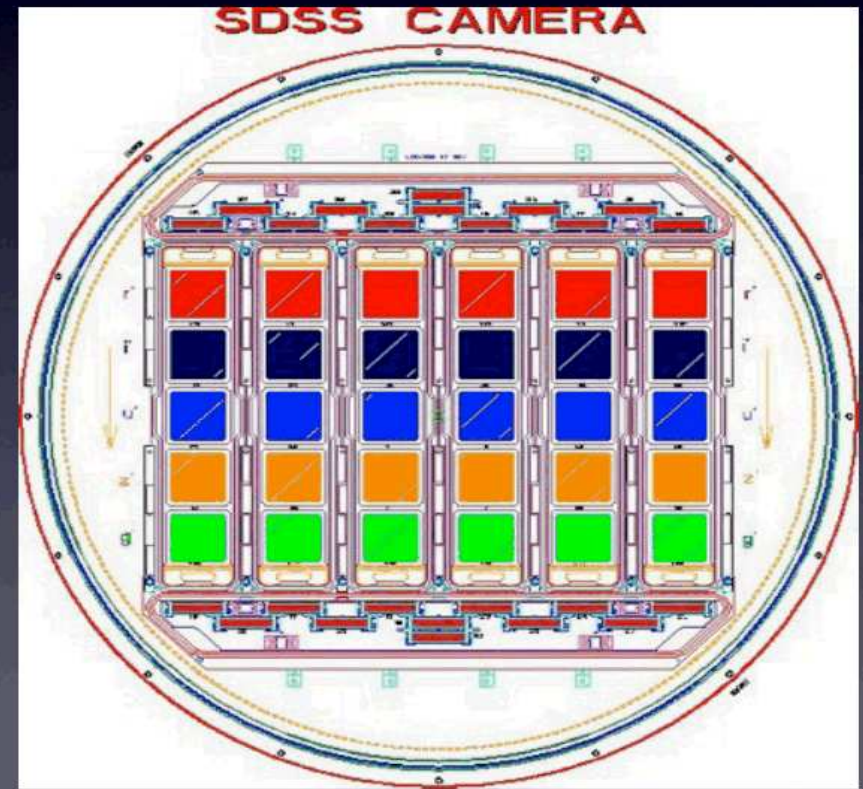
Wyniki 2dFGRS: rozkład odległości galaktyk od Ziemi



Widać wyraźną strukturę, jakby “gąbki”...

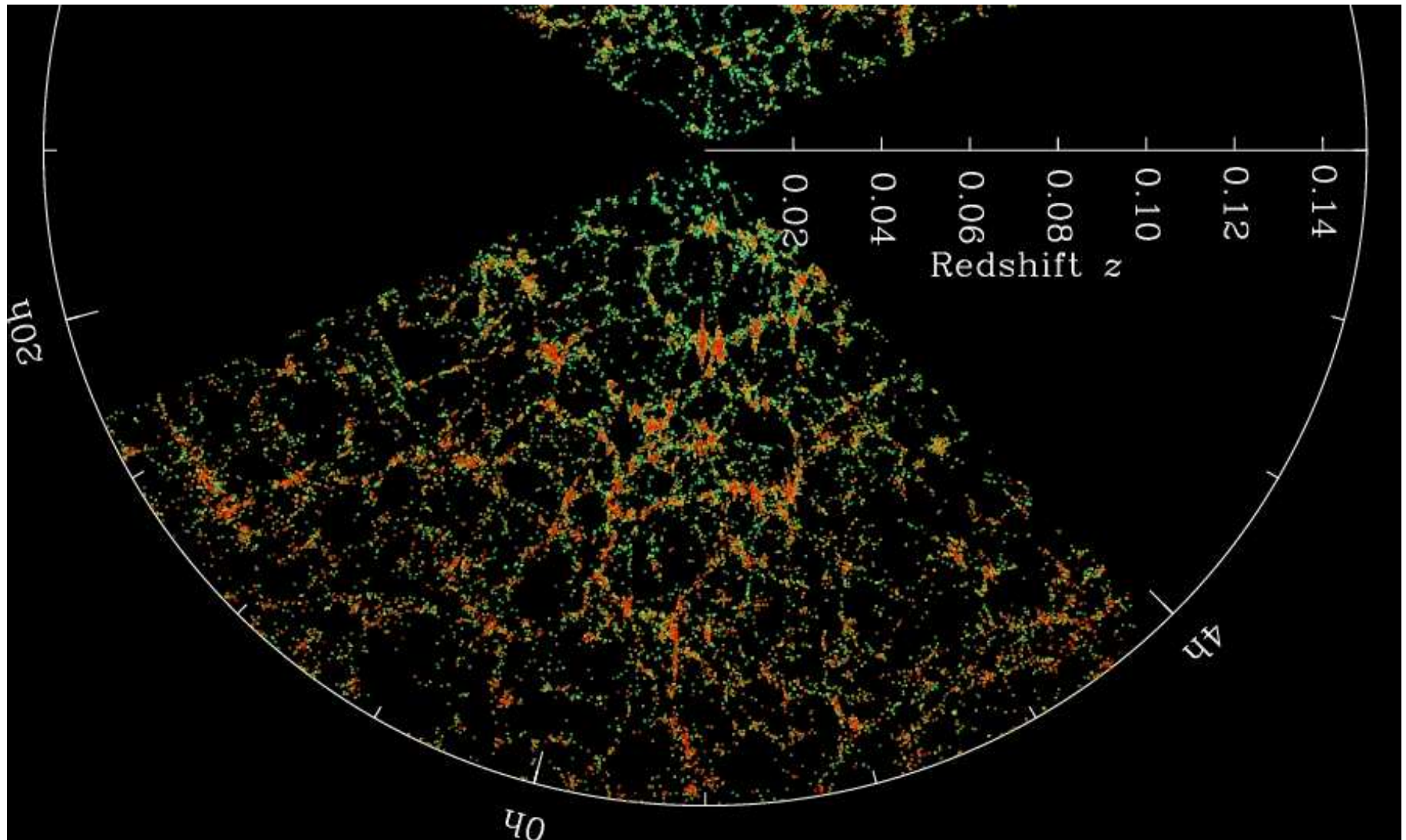
The last decade: Sloan Digital Sky Survey

- Digital sky survey with a 120 Megapix CCD camera
- Precise measurements for 400,000,000 objects
- Revolution in astronomy: public databases



Formowanie struktur

Wyniki SDSS

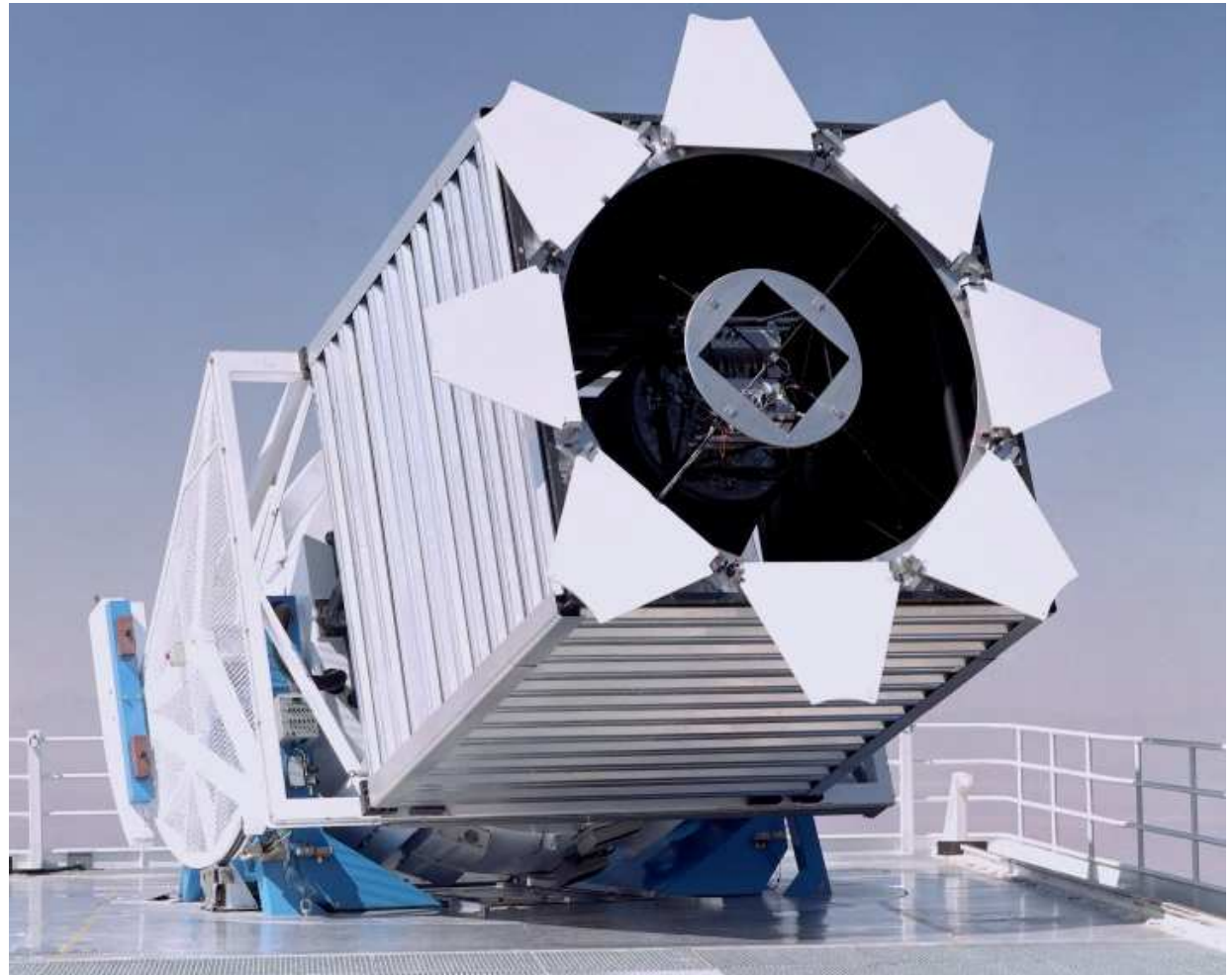


Formowanie struktur

SDSS-III

W roku 2008, w ramach kolejnej modernizacji, teleskop SDSS został rozbudowany o spektrograf mierzący jednocześnie do 1000 widm w zakresie 360 - 1000 nm.

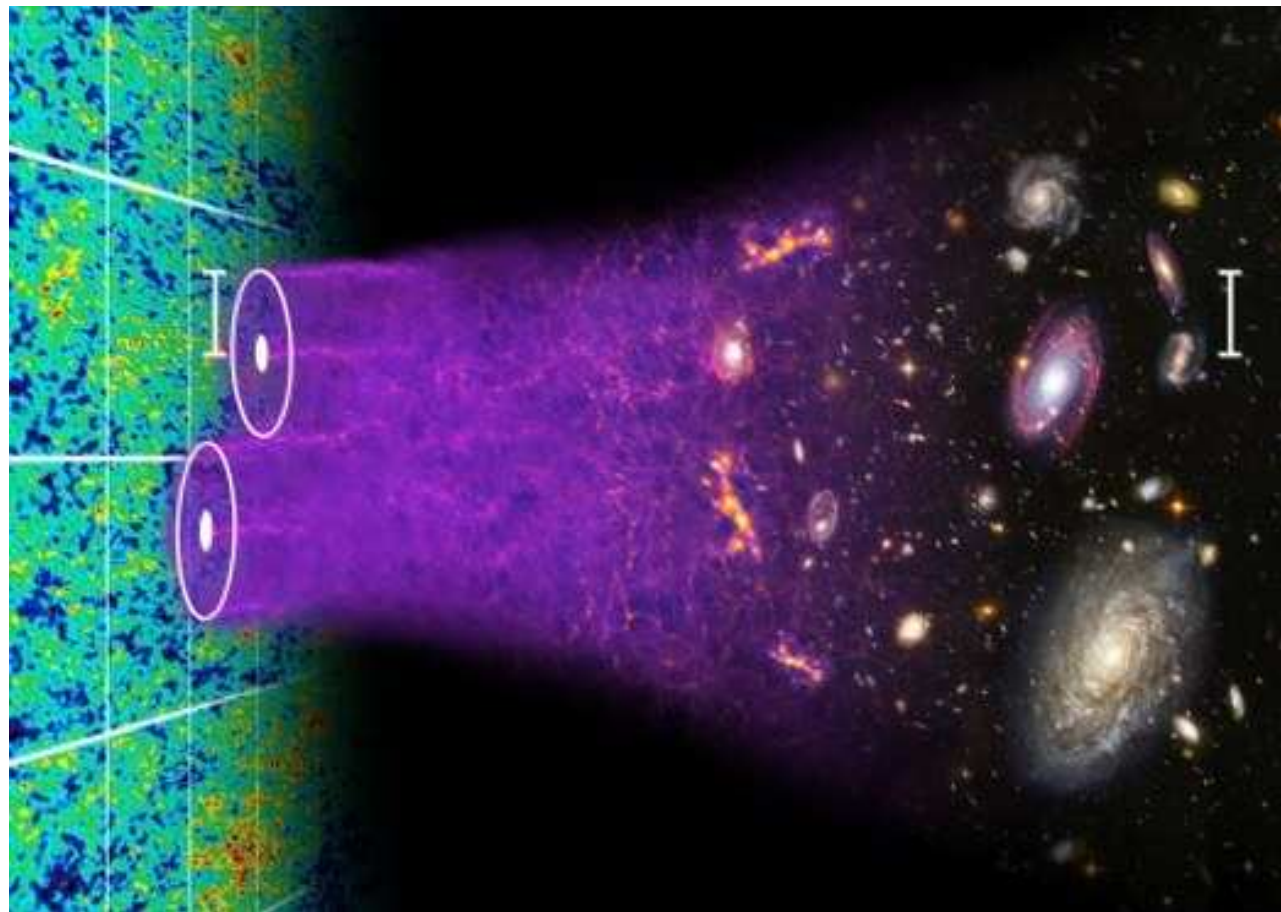
⇒ Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS)



Formowanie struktur

Barion Acoustic Oscillations

Fluktuacje gęstości materii w $t=300\,000$ lat, widoczne w CMB, mają także swoje odbicie w obecnie obserwowanych rozkładach.

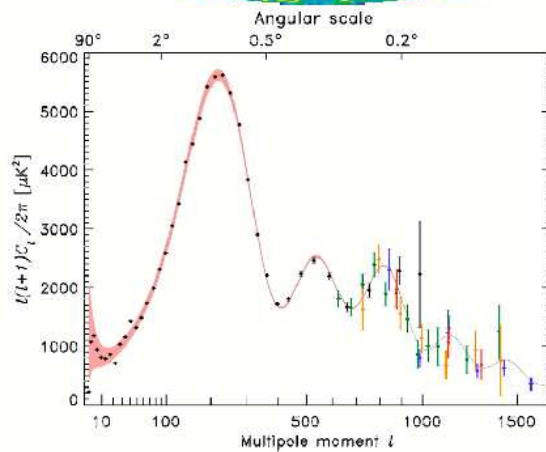
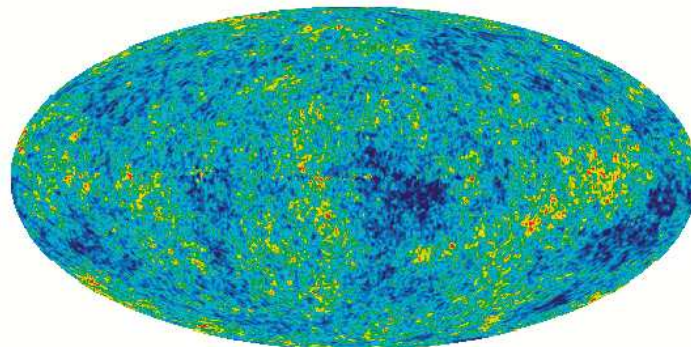


Formowanie struktur

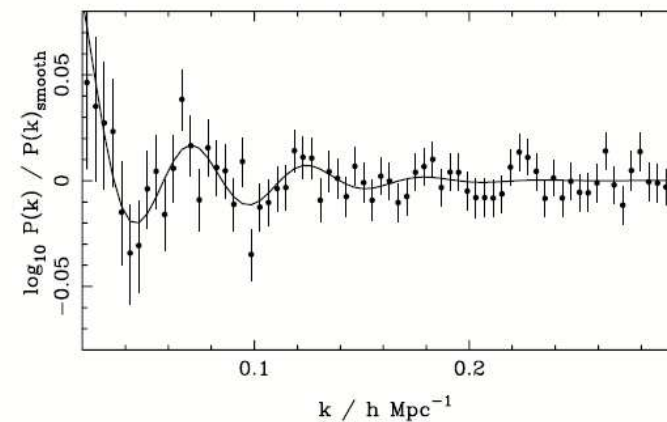
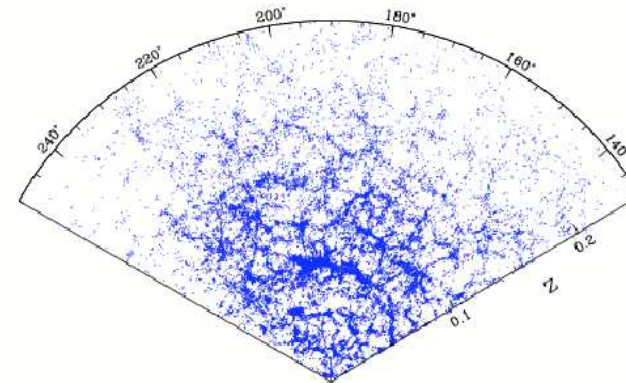
Barion Acoustic Oscillations

Fluktuacje gęstości materii w $t=300\,000$ lat, widoczne w CMB, mają także swoje odbicie w obecnie obserwowanych rozkładach.

Cosmic microwave background



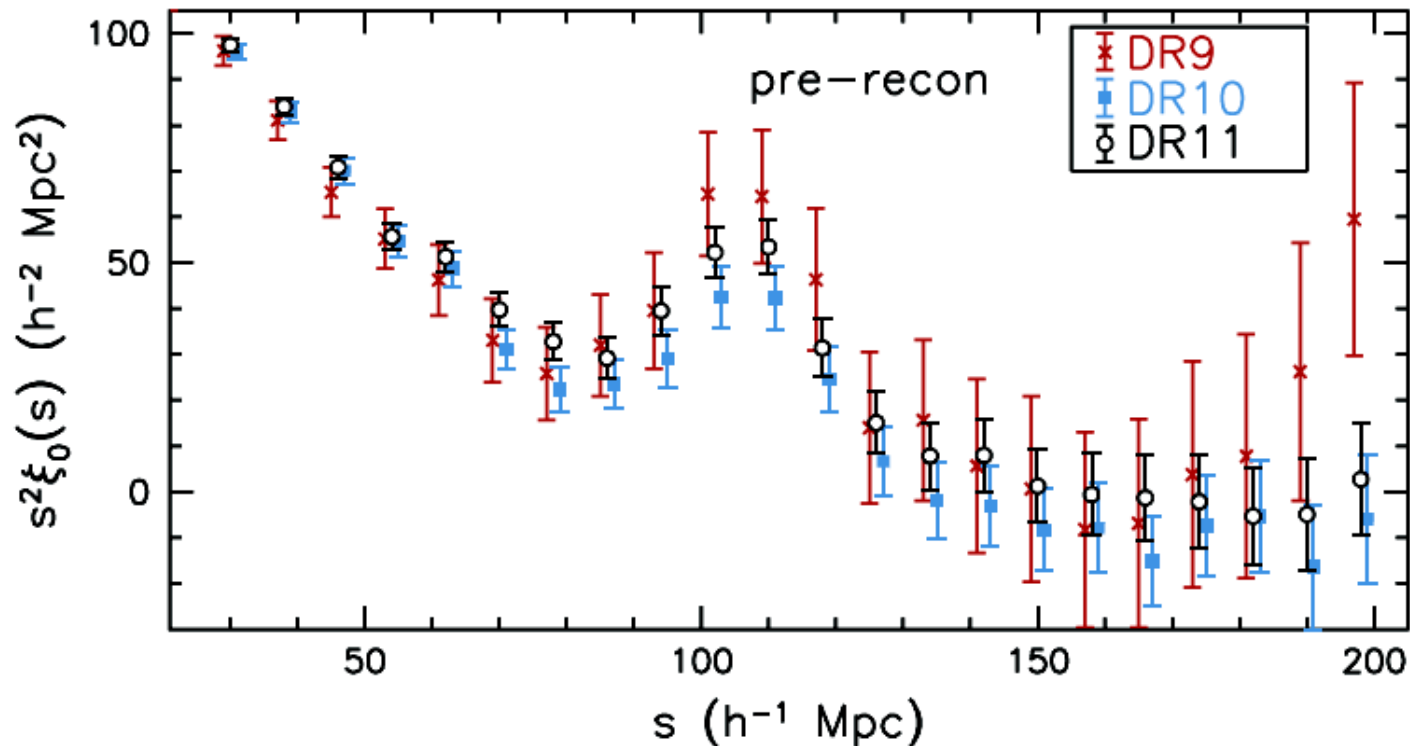
Galaxies



Formowanie struktur

Barion Acoustic Oscillations

Wyniki SDSS-BOSS 2014 (trzy sezony obserwacji)

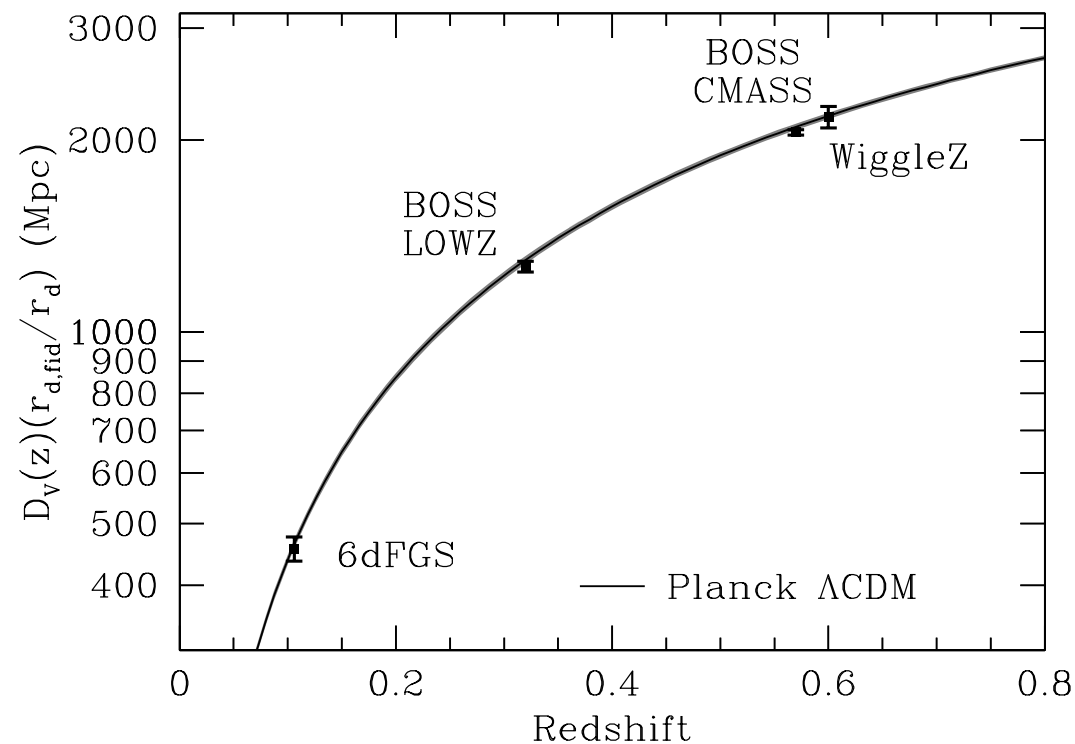


Obserwowane struktury “preferują” odległości rzędu 150 Mpc - “standardowa linijka”

Formowanie struktur

Barion Acoustic Oscillations

Zależność skali BAO od odległości (\Rightarrow czasu) zależy od ewolucji Wszechświata

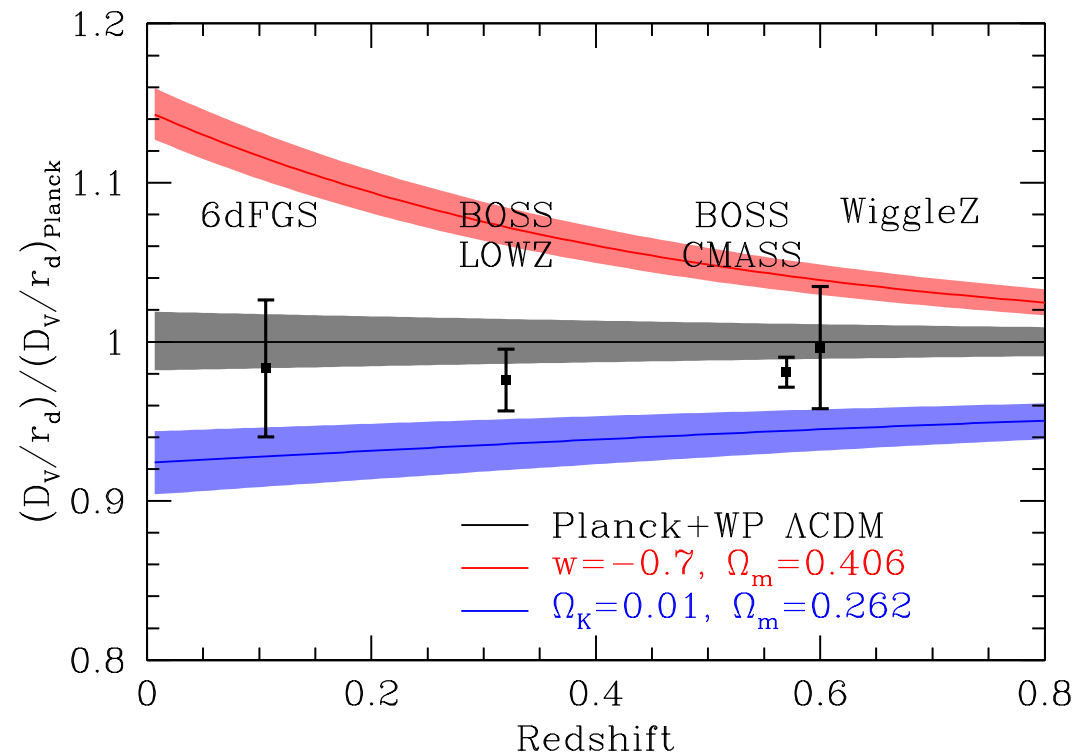


\Rightarrow dodatkowe więzy na parametry modeli kosmologicznych

Formowanie struktur

Barion Acoustic Oscillations

Zależność skali BAO od odległości (\Rightarrow czasu) zależy od ewolucji Wszechświata

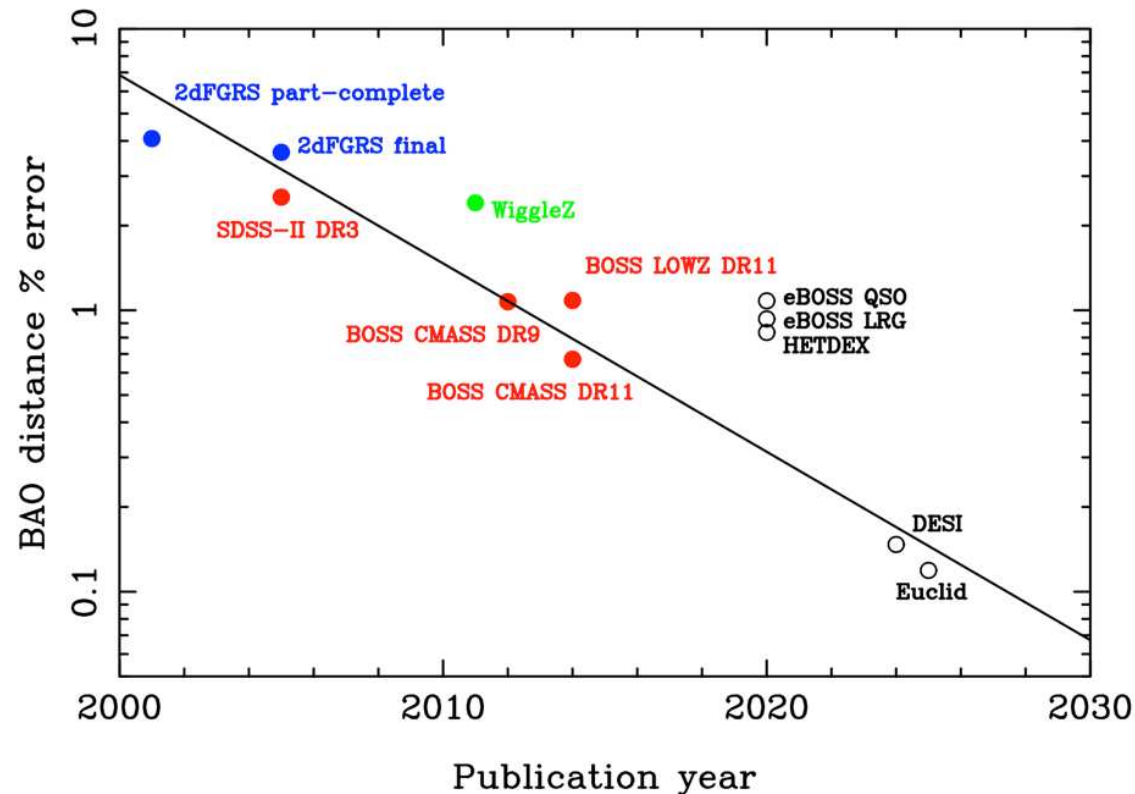


\Rightarrow dodatkowe więzy na parametry modeli kosmologicznych

Formowanie struktur

Barion Acoustic Oscillations

Pomiary SDSS-BOSS znacząco poprawiły dokładność wyznaczenia skali BAO



Planowane są już kolejne eksperymenty - nowe narzędzie badania Wszechświata

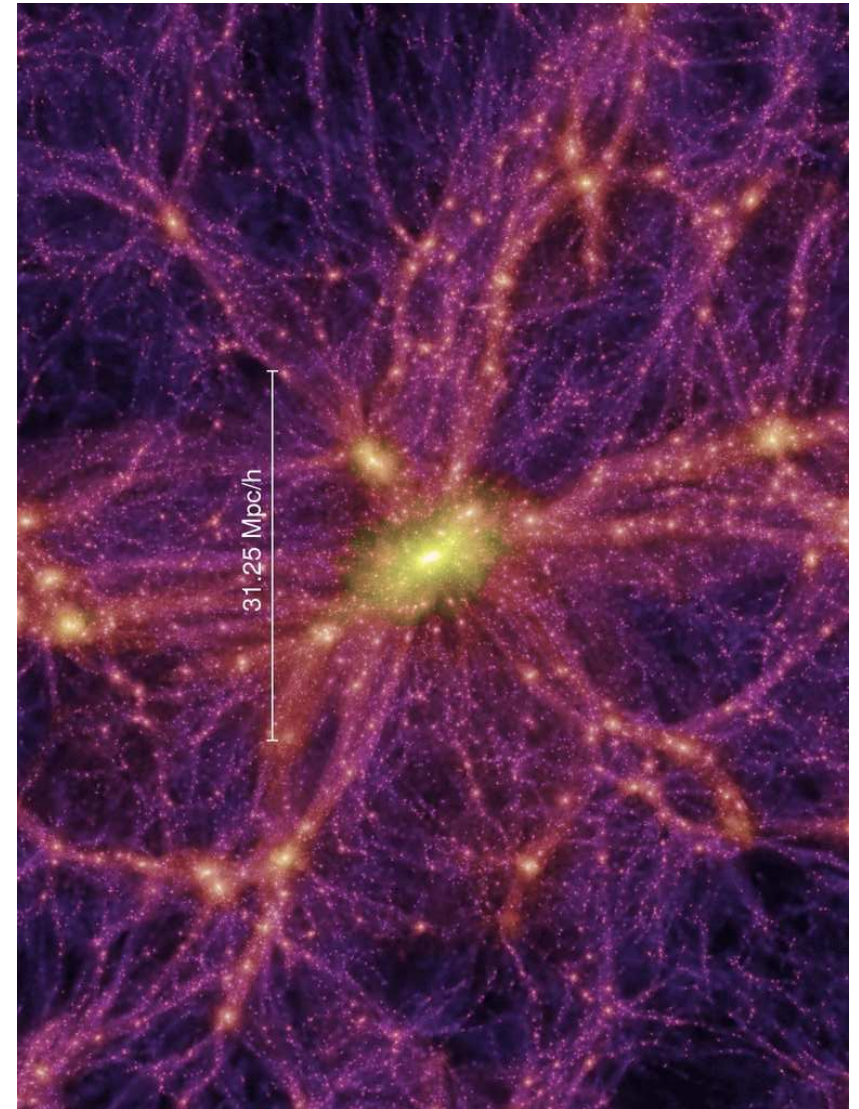
Formowanie struktur

W chwili oddzielenia CMB fluktuacje gęstości we Wszechświecie były na poziomie 10^{-5} (poziom obecnie obserwowanej anizotropii).

Oddziaływania grawitacyjne wzmacniają te niejednorodności, ale **zbyt wolno!**

Obserwowana gęstość **materii barionowej nie wystarcza** do wytłumaczenia **tworzenia się struktur** we Wszechświecie.

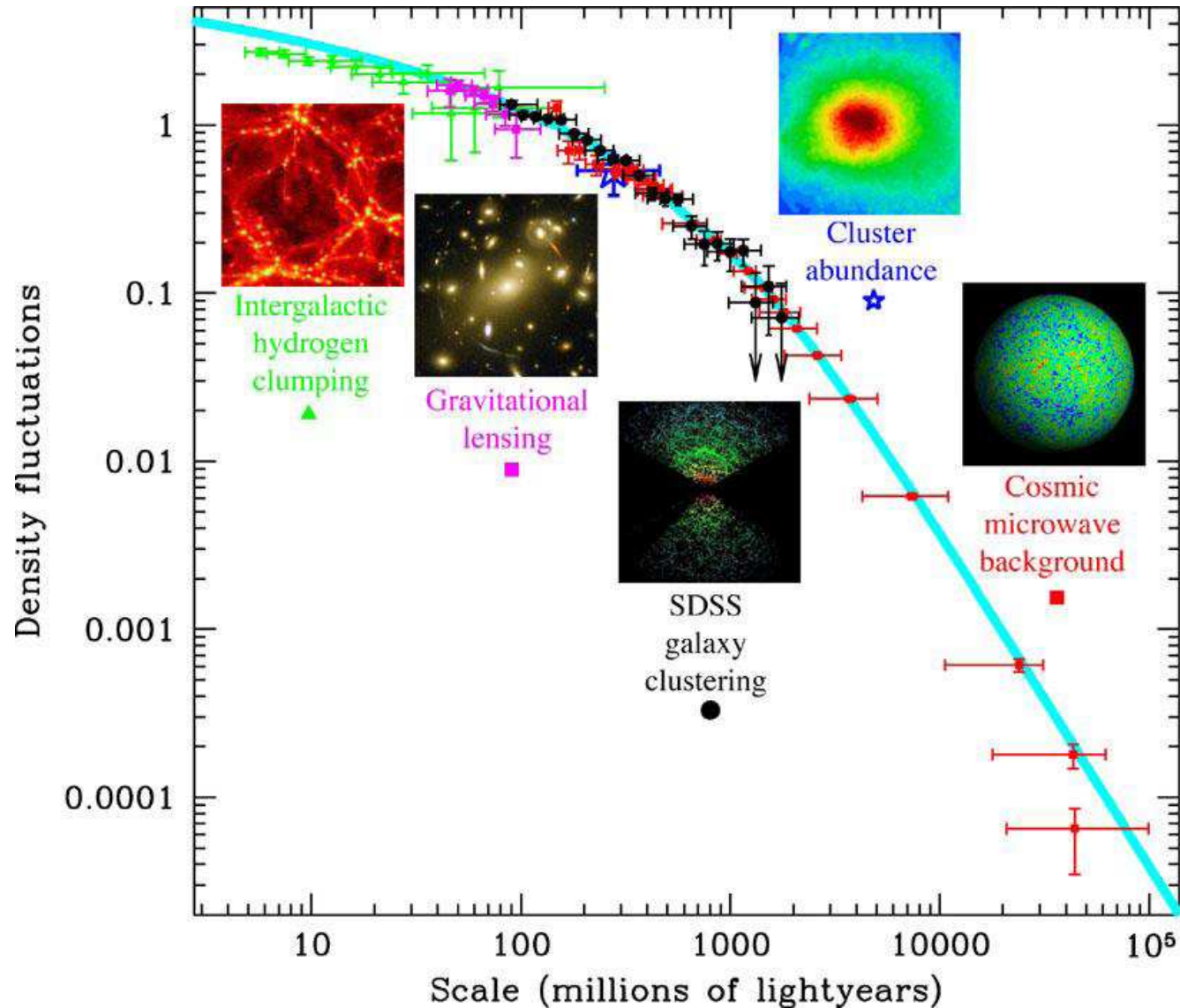
To ile potrzebne jest dodatkowo “ciemnej materii” można ocenić na podstawie symulacji komputerowych.



Formowanie struktur

Fluktuacje gęstości

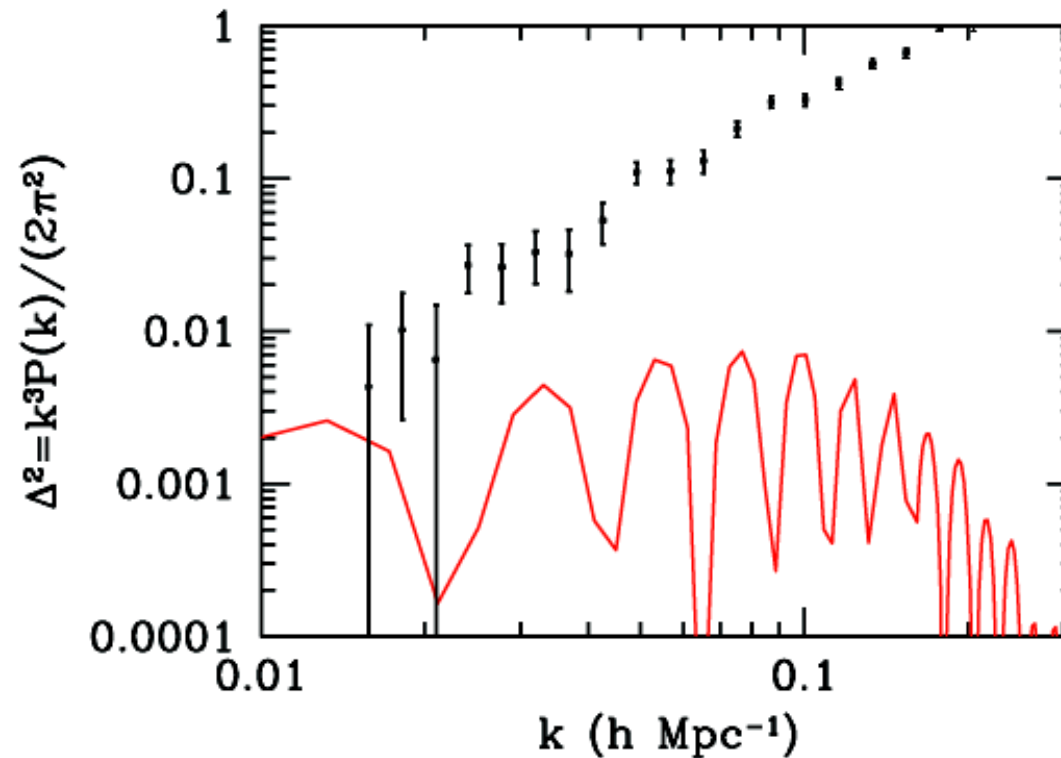
Model kosmologiczny uwzględniający tzw. zimną ciemną materię (Λ CDM) dokładnie opisuje rozmiary fluktuacji w rozkładzie materii we Wszechświecie na różnych skalach



Formowanie struktur

Fluktuacje gęstości

Jeśli przyjąć, że we Wszechświecie obecna jest tylko materia barionowa oraz ciemna energia (stała kosmologiczna) to nie jesteśmy w stanie uzyskać znaczących niejednorodności w rozkładzie materii!

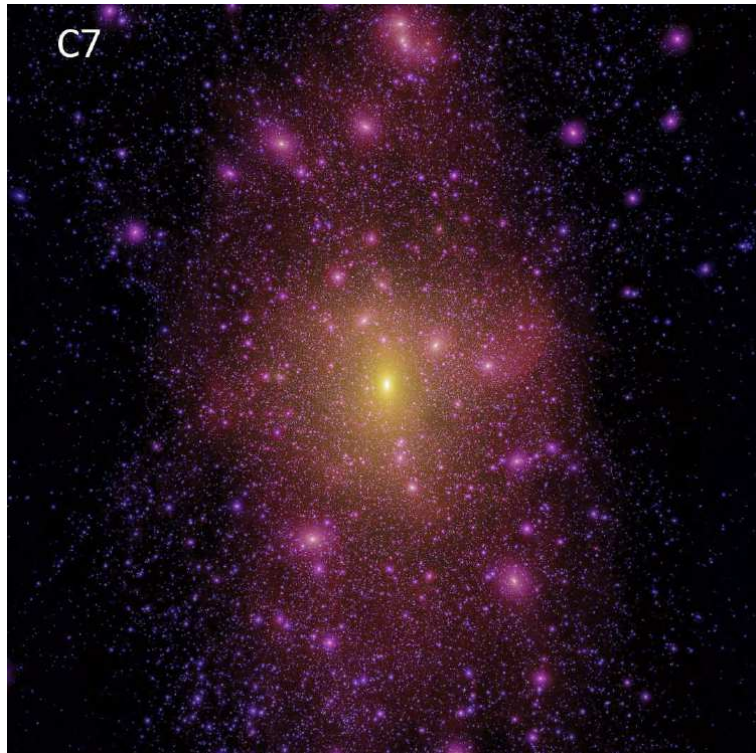


Formowanie struktur

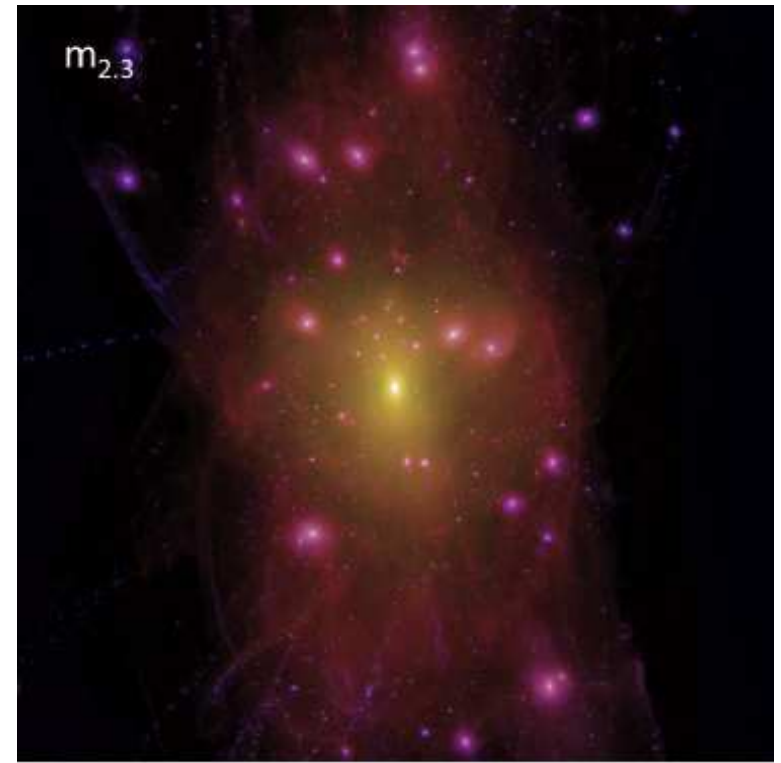
Fluktuacje gęstości

Żeby wytłumaczyć obecność drobnych struktur ciemna materia we Wszechświecie musi być “zimna” (nierelatywistyczna). Inaczej struktury będą rozmywane...

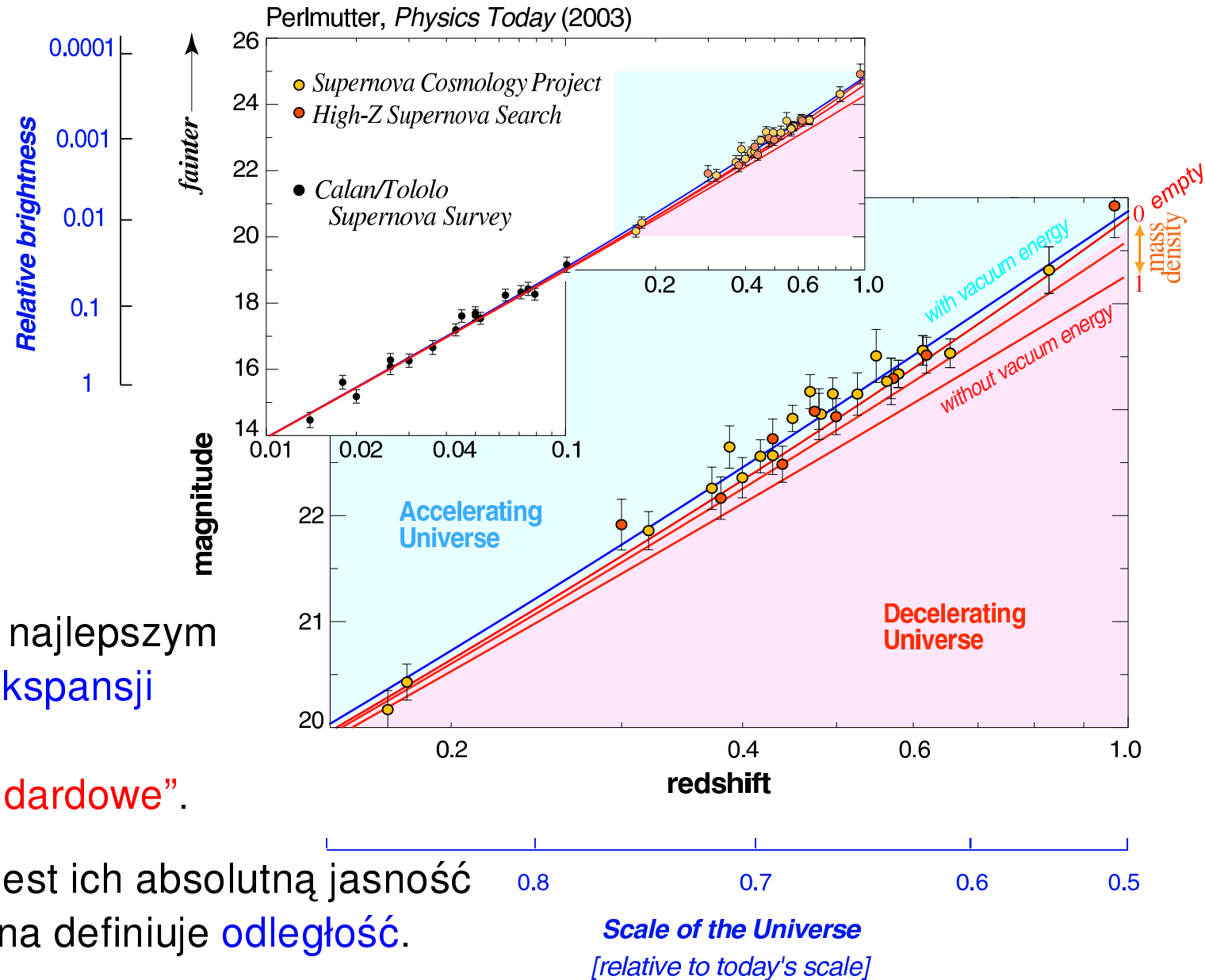
Zimna ciemna materia



Gorąca ciemna materia



Supernova Cosmology Project



Supernowe typu 1A są najlepszym obiektem do pomiaru ekspansji Wszechświata.

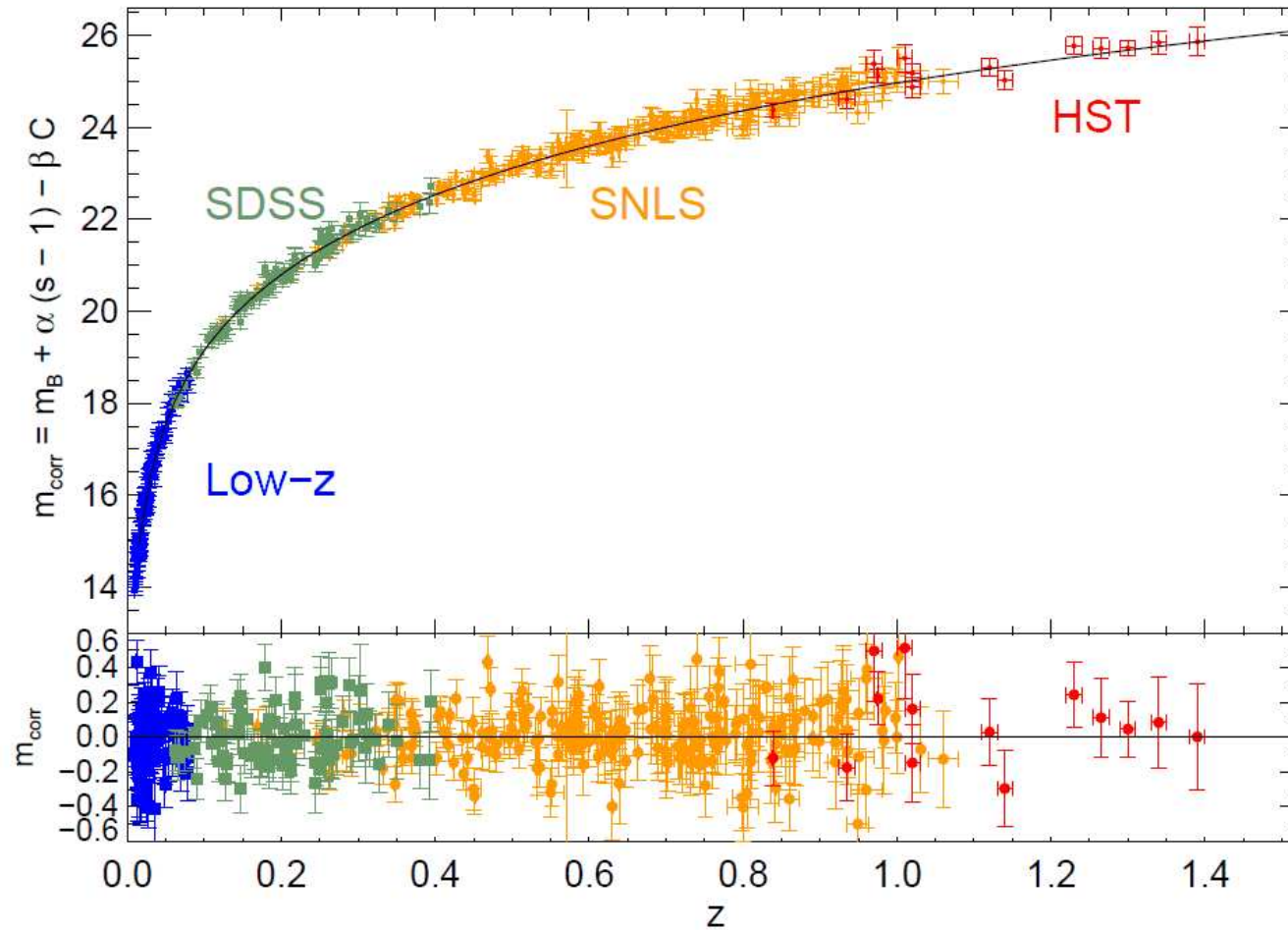
Są to tzw. "świece standardowe".

Wiemy dokładnie jaka jest ich absolutną jasność

⇒ jasność obserwowana definiuje odległość.

Odległe supernowe

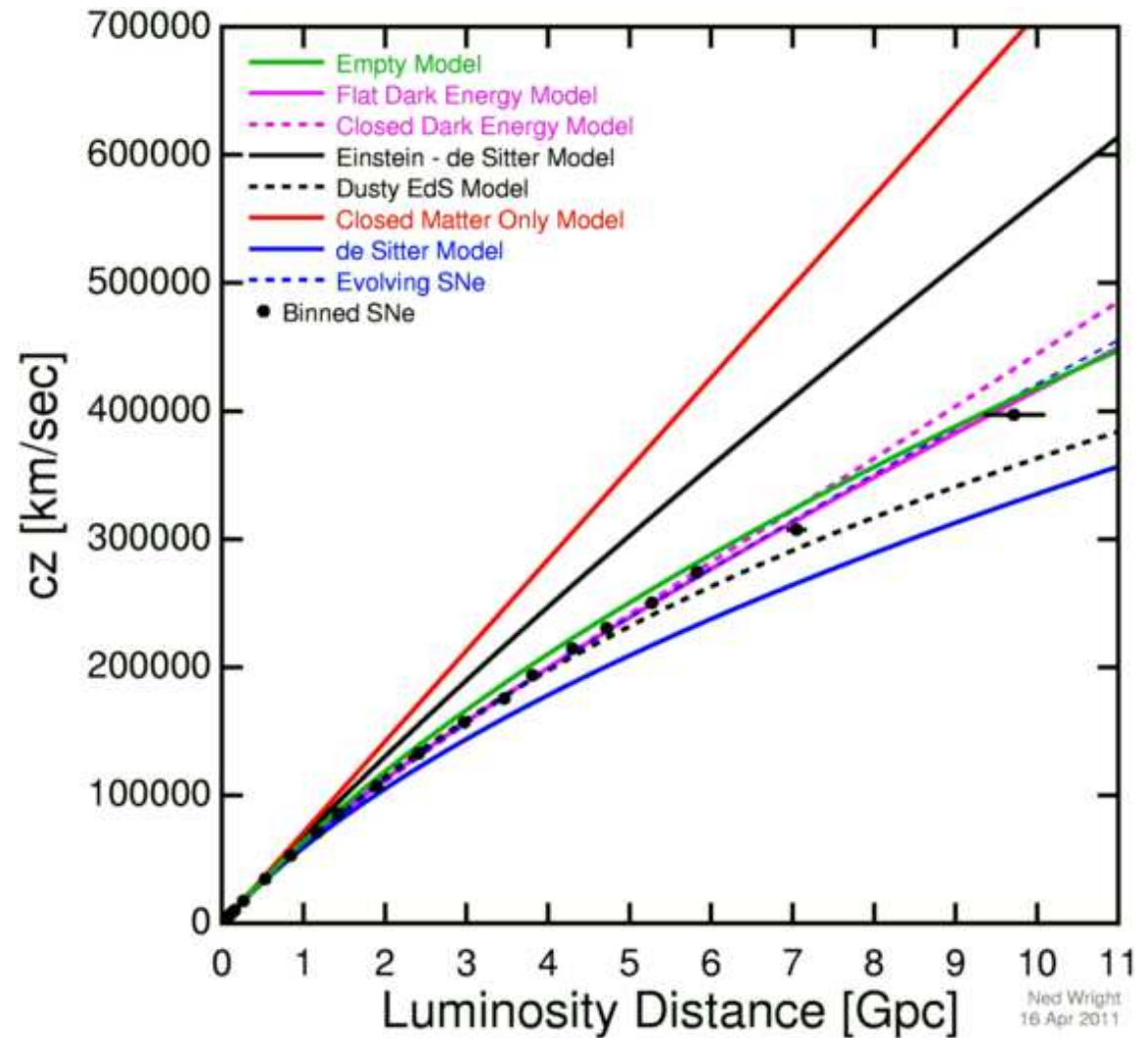
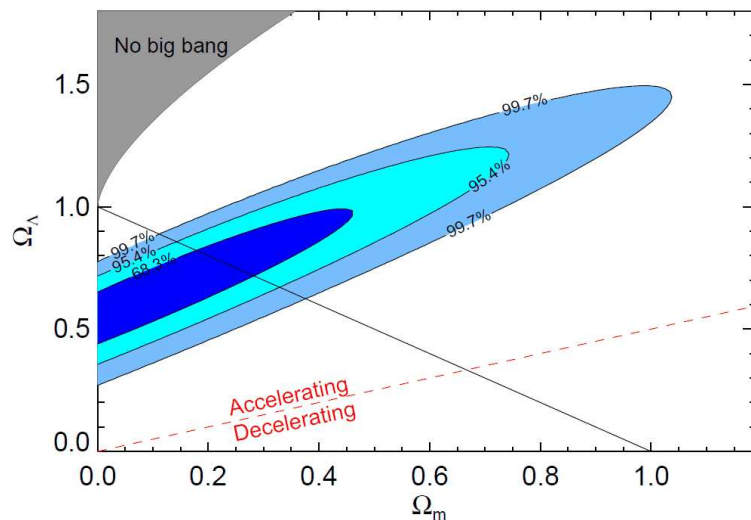
Jesteśmy w stanie obserwować coraz to dalsze obiekty



Odległe supernowe

“Redshift” bardzo odległych obiektów niesie informację o “historii”, ewolucji Wszechświata (światło wyemitowane bardzo dawno temu)

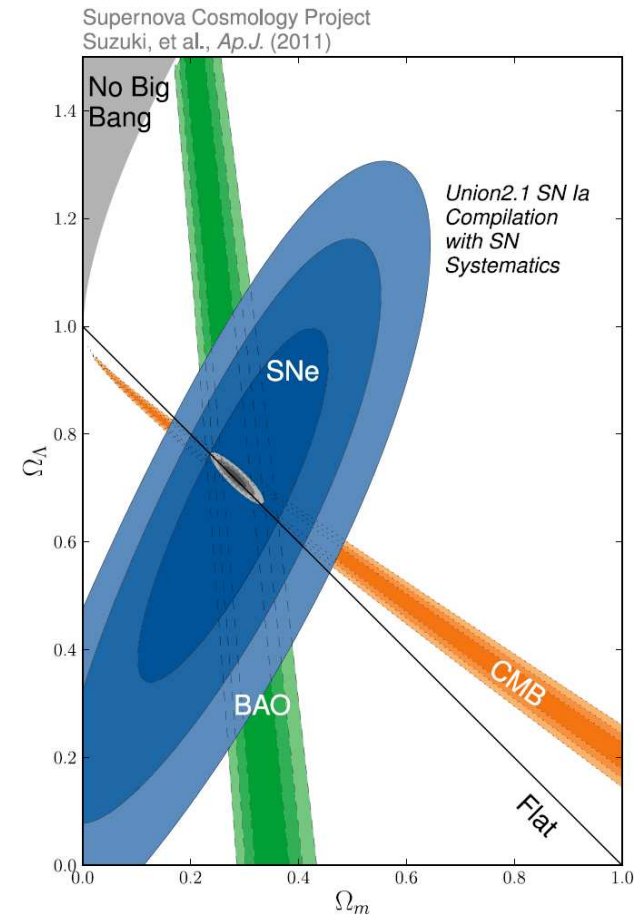
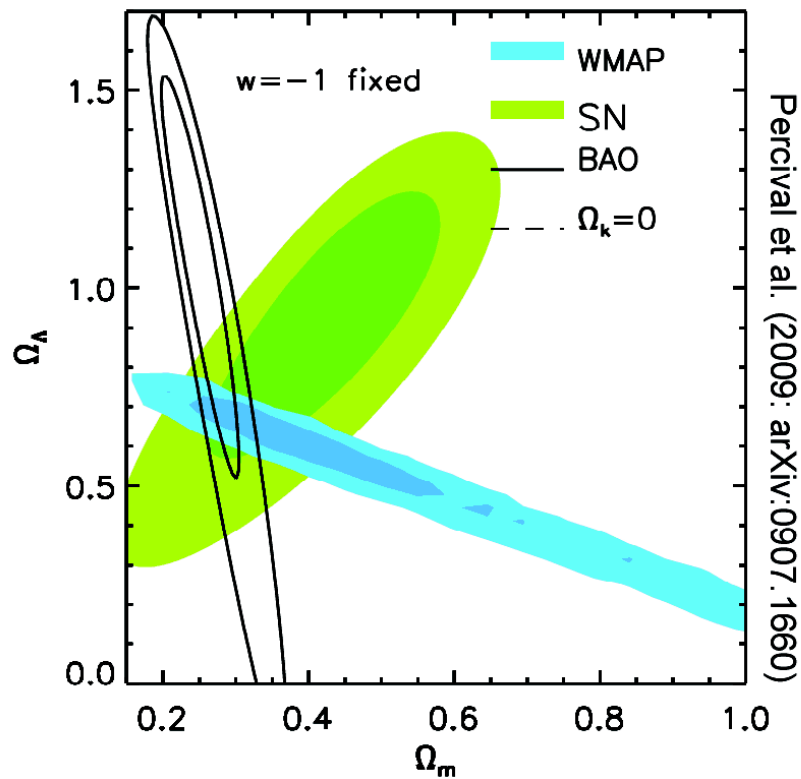
⇒ możemy próbować dopasować parametry modelu



Odległe supernowe

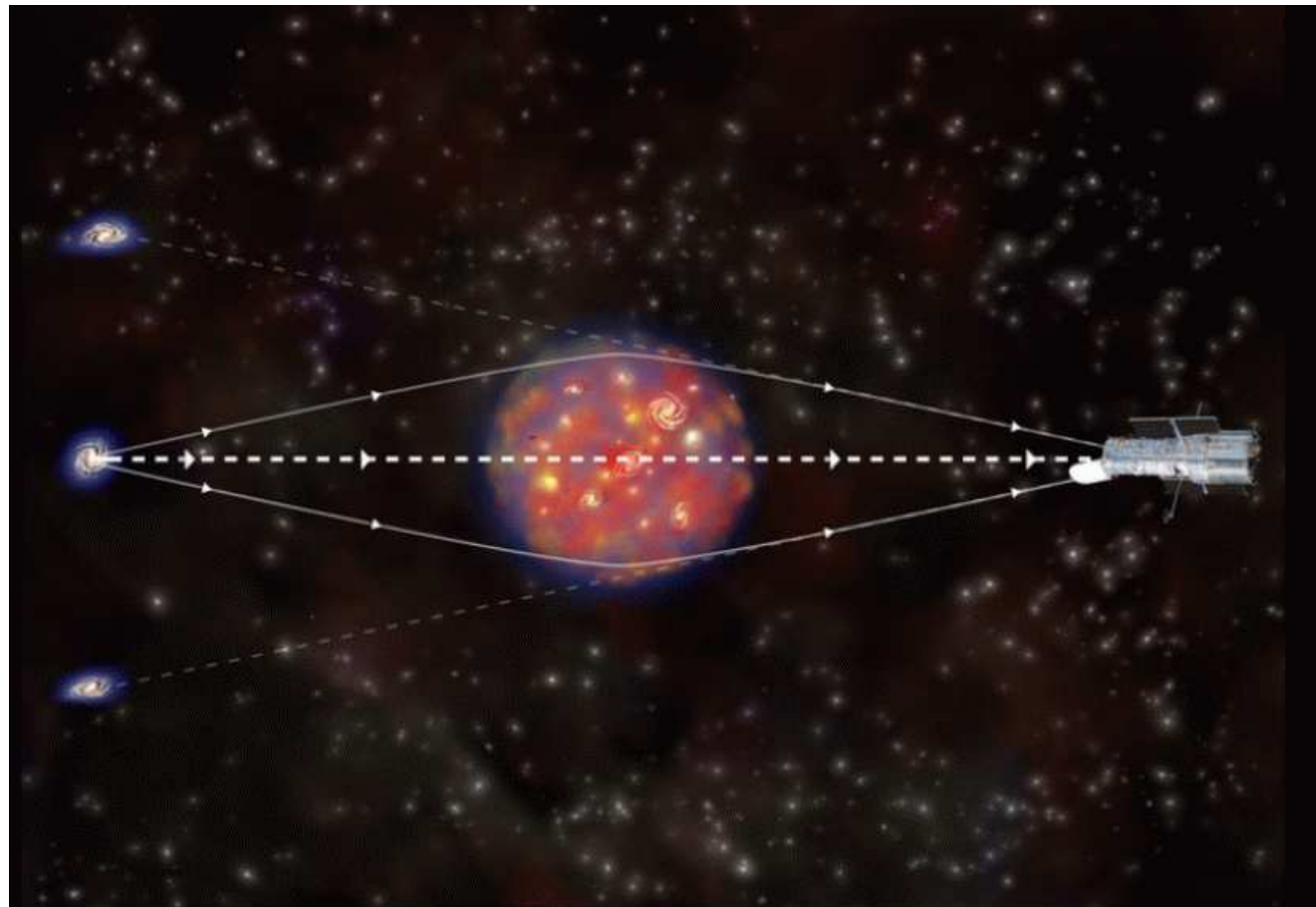
Wyniki uzyskane z pomiaru CMB, formowania struktur we Wszechświecie oraz odległych supernowych są ze sobą zgodne:

Λ CDM models with curvature



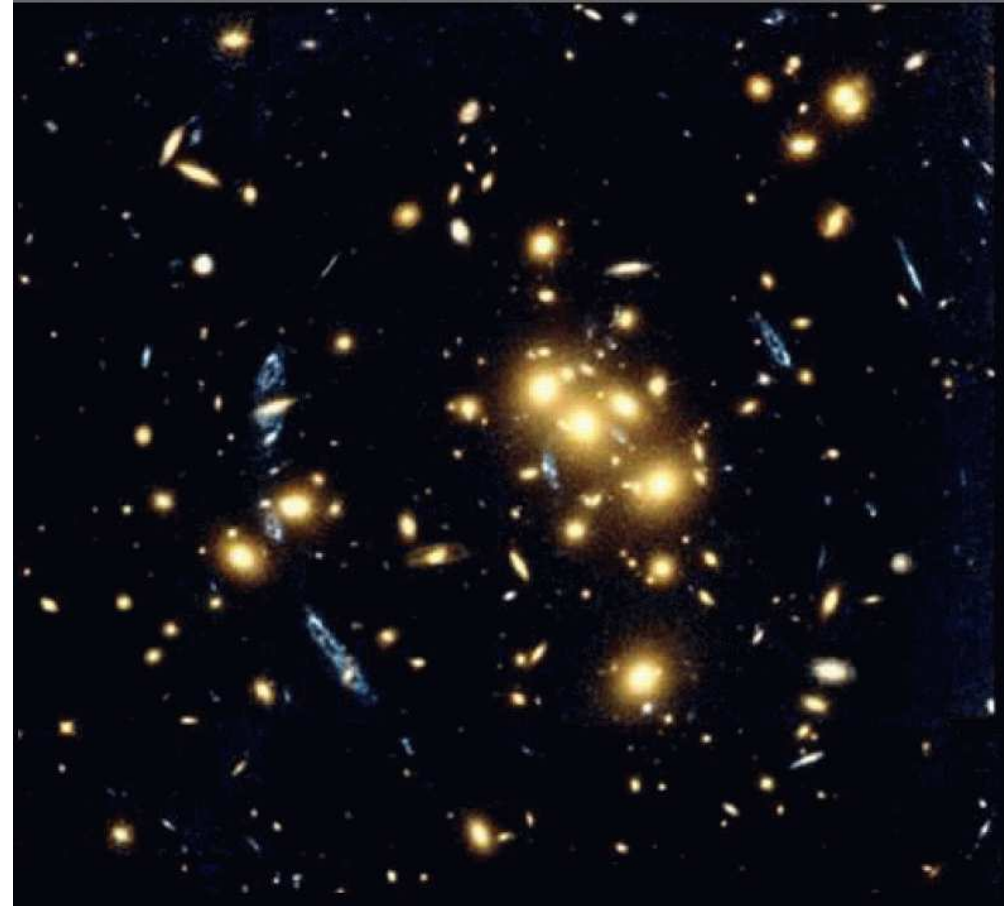
Soczewkowanie grawitacyjne

Zgodnie z OTW **materia** powoduje **zakrzywienie** czasoprzestrzeni. Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu materii i biegu **promieni światła**.

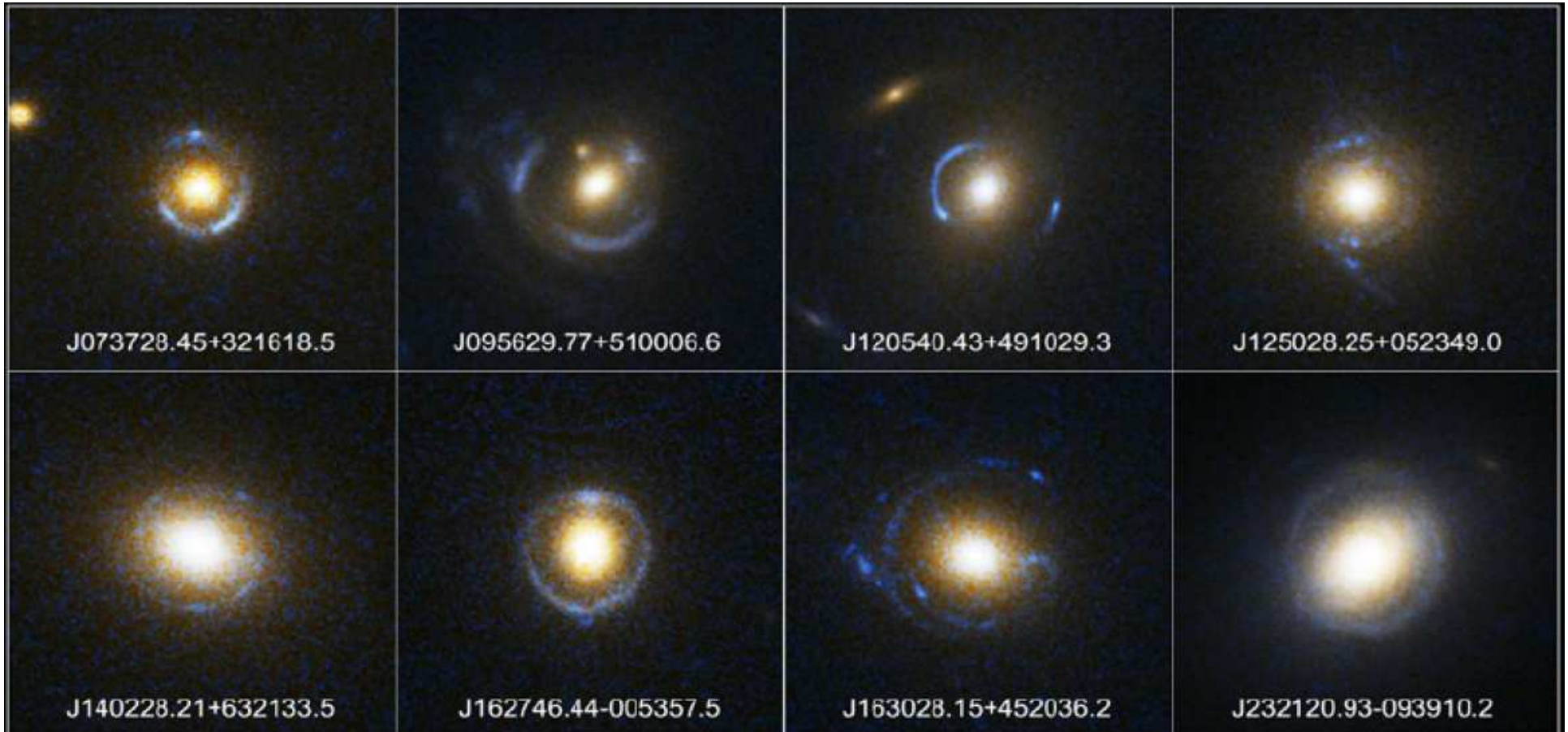


Soczewkowanie grawitacyjne

Bardzo dokładne pomiary stały się możliwe m.in. dzięki Kosmicznemu Teleskopowi Hubble'a



Soczewkowanie grawitacyjne



Einstein Ring Gravitational Lenses
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, ESA, A. Bolton (Harvard-Smithsonian CfA), and the SLACS Team

STScI-PRC05-32

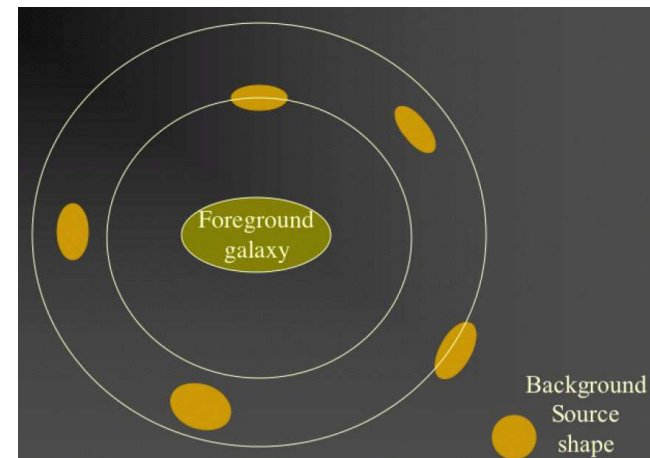
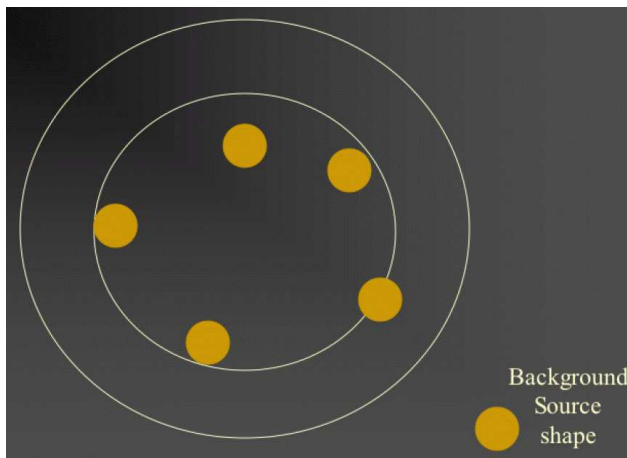
Soczewkowanie grawitacyjne

Silne soczewkowanie grawitacyjne

W przypadku dużego zakrzywienia przestrzeni możemy obserwować **wielokrotne obrazy** tego samego obiektu.

Słabe soczewkowanie grawitacyjne

W przypadku mniejszego zakrzywienia przestrzeni obserwujemy jedynie **zniekształcenie obrazu**.



W obu przypadkach możemy wnioskować o **masie** obiektów znajdujących się na drodze promieni świetlnych.

Promieniowanie rentgenowskie

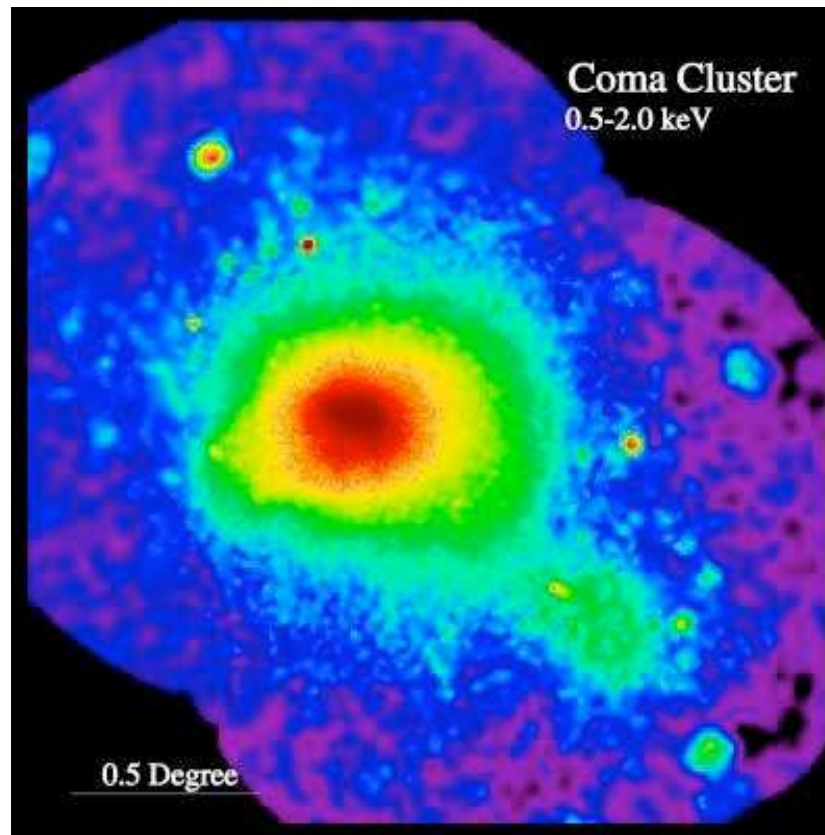
Atomy w przestrzeni międzygwiazdnej są źródłem bardzo słabego, ale mierzalnego **promieniowania rentgenowskiego**. W ostatnich latach bardzo dokładne pomiary tego promieniowania stały się możliwe dzięki wystrzeleniu teleskopu kosmicznego **Chandra**.



Promieniowanie rentgenowskie

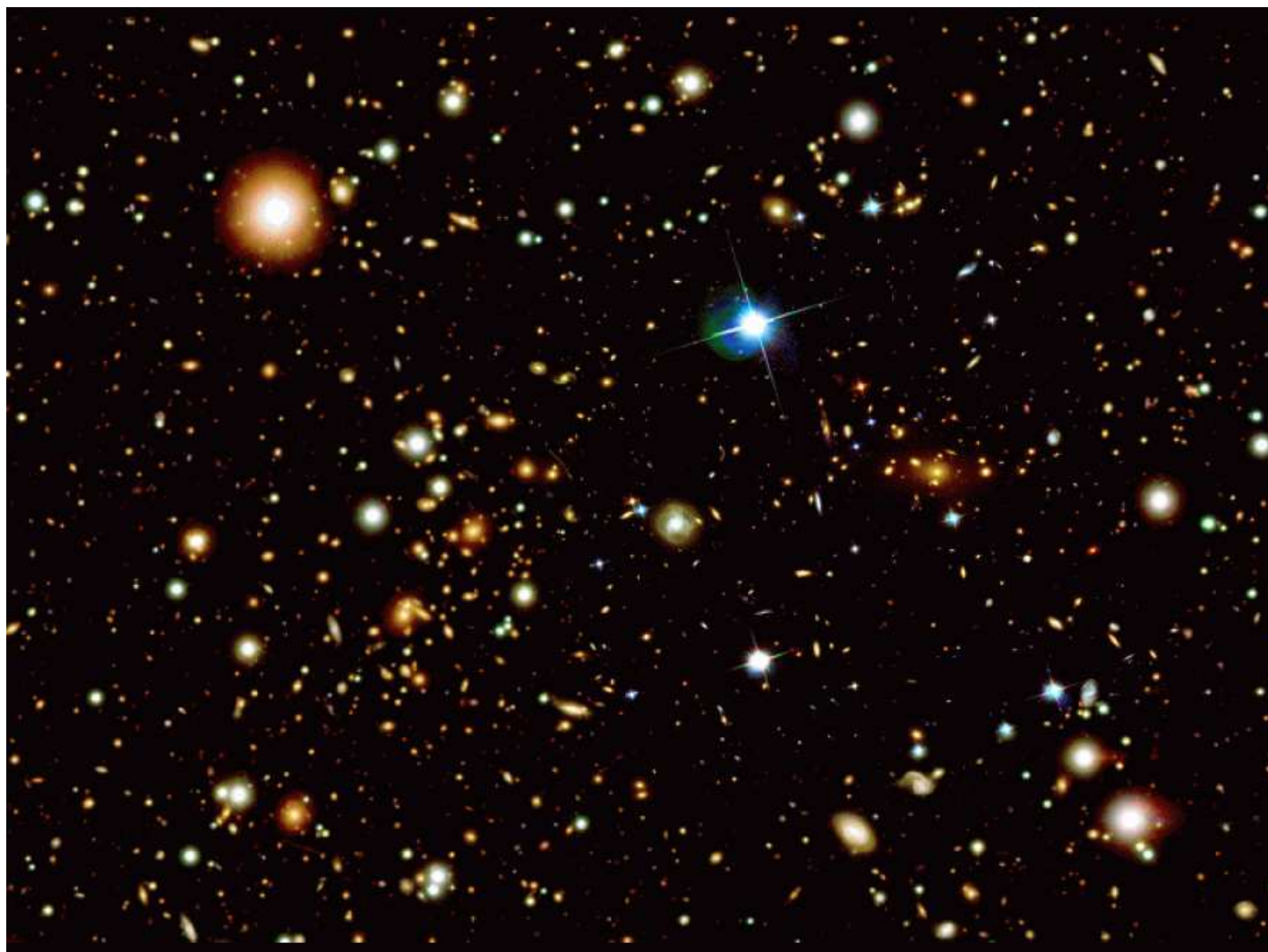
Z intensywności promieniowania możemy wnioskować o gęstości materii,
z widma o temperaturze \Rightarrow ciśnienie \Rightarrow pole grawitacyjne

Możemy oszacować całkowitą masę “grawitacyjną” utrzymującą daną strukturę.



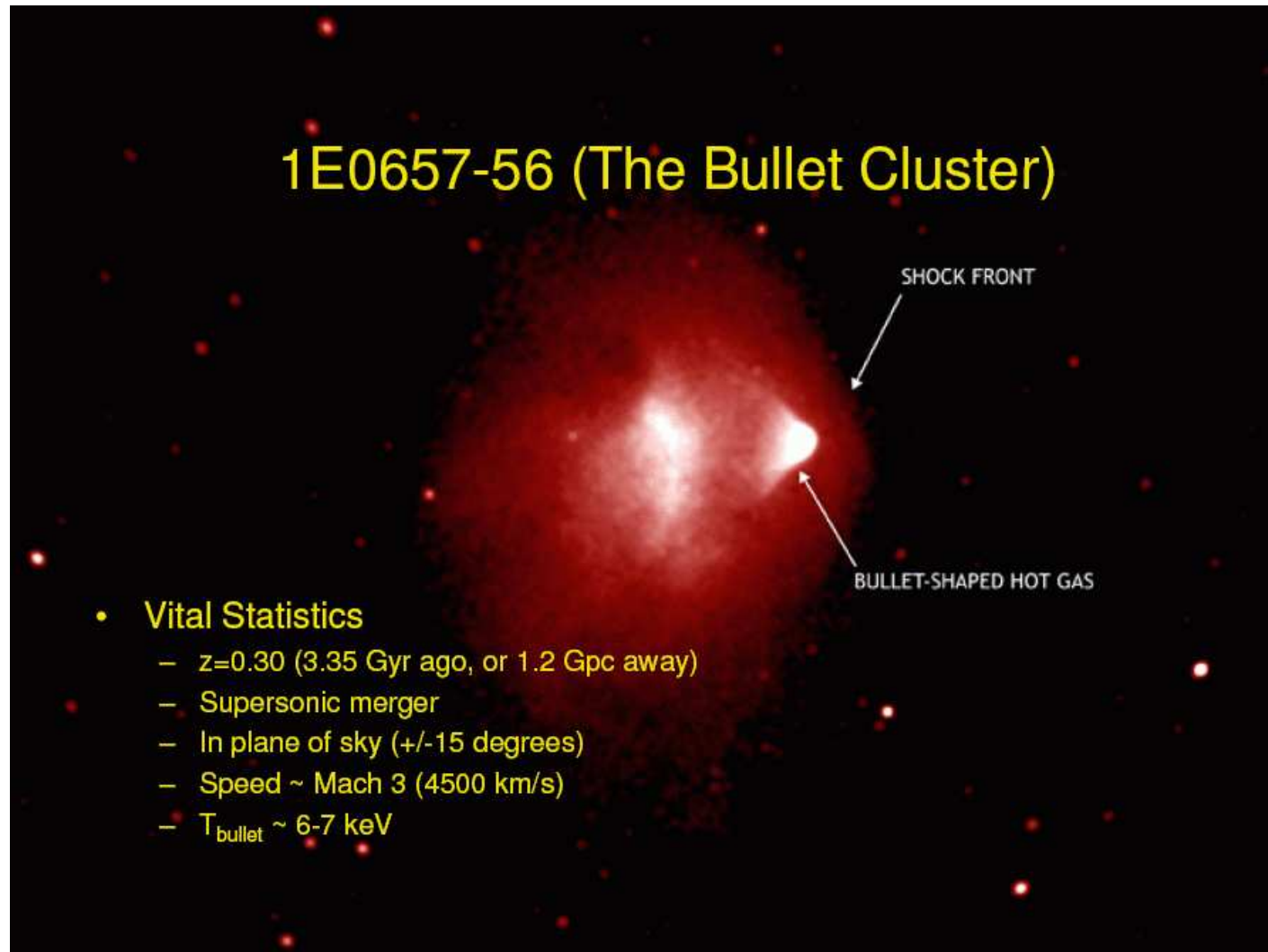
Gromada Pocisk

W zakresie widzialnym



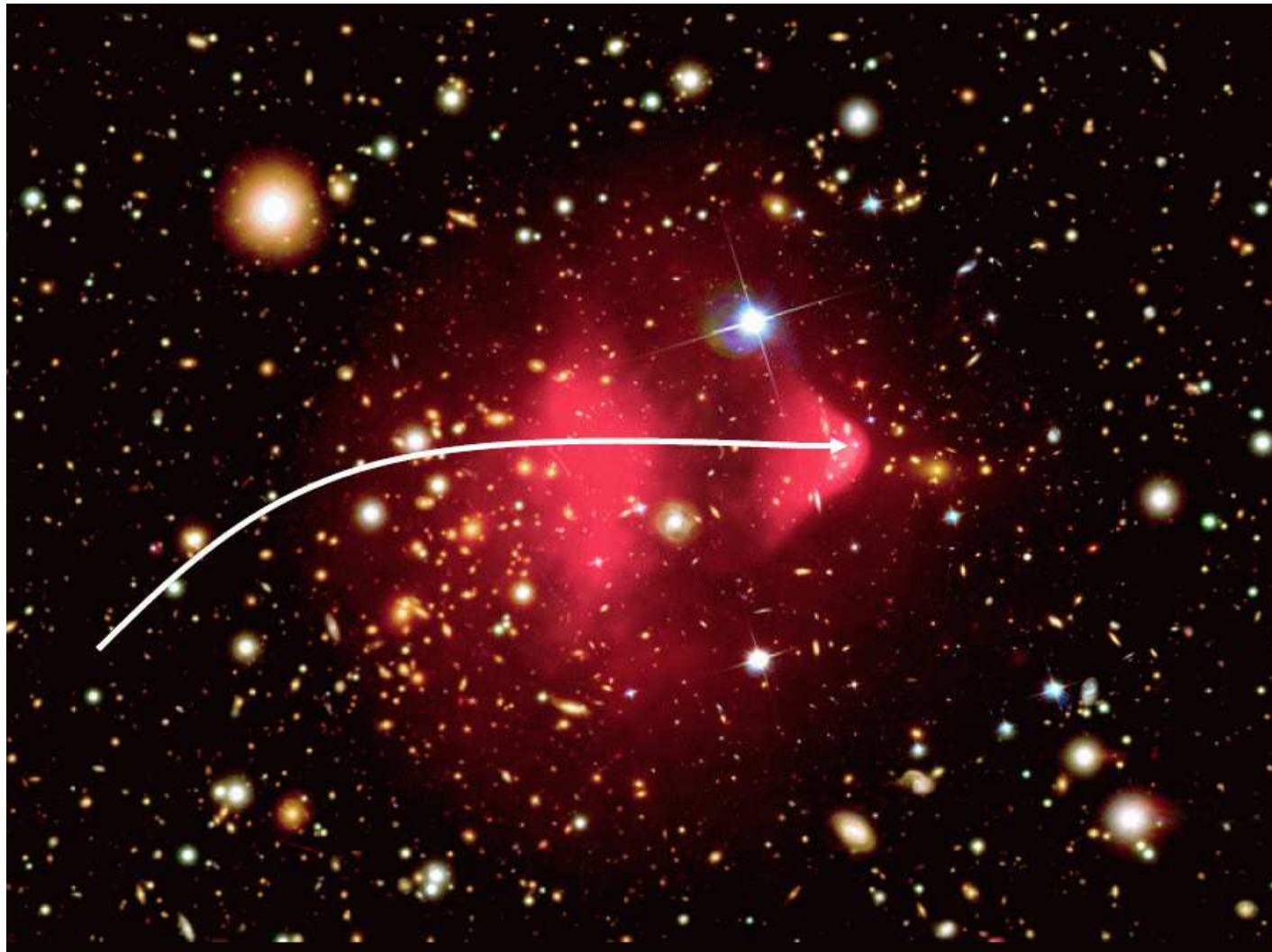
Gromada Pocisk

W promieniowaniu rentgenowskim



Gromada Pocisk

Porównanie

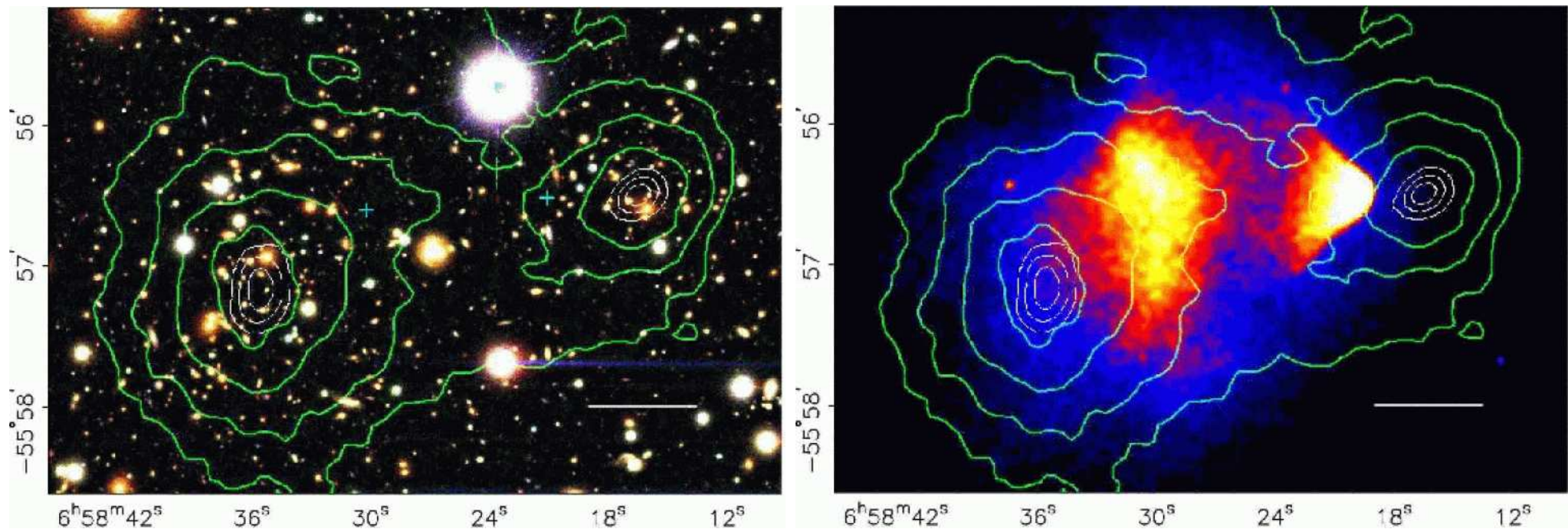


Gromada Pocisk

Na podstawie pomiarów soczewkowania grawitacyjnego można było wyznaczyć rozkład masy "grawitacyjnej" w widocznym układzie.

Rozkład ten jest zgodny z rozkładem gwiazd.

Nie zgadza się z rozkładem materii międzygwiazdnej!



Gromada Pocisk



Podsumowanie

Można na wiele sposobów próbować mierzyć gęstość materii we Wszechświecie:

$$\Omega \equiv \rho / \rho_c$$

- z pomiaru promieniowania gwiazd i materii międzygwiazdnej

⇒ materia “światlista”

$$\Omega_{lumi} \sim 0.006$$

- z pomiaru zawartości lekkich pierwiastków + model nukleosyntezy (Wielki Wybuch)

⇒ materia “barionowa”

$$\Omega_b \sim 0.05$$

- z pomiaru oddziaływań grawitacyjnych i formowania struktur

⇒ materia “grawitacyjna” (całkowita ?)

$$\Omega_m \sim 0.3$$

- z dopasowania modelu Λ CDM do wyników pomiarów CMB

Wszystkie podejścia pokazują, że oprócz materii barionowej (“zwykłych” atomów) Wszechświat zawiera też inną, “ciemną” materię...

Podsumowanie

Wiemy że ciemna materia:

- jest “zimna” (nierelatywistyczna)
- jest niebarionowa
- jest stabilna (nie rozpada się)
- bardzo słabo oddziałuje (tylko grawitacyjnie?)
- daje wkład ok. $1/4$ gęstości krytycznej ($5 \times$ materia barionowa)

Nie wiemy:

- Co się na nią składa (jedna czy wiele cząstek)?
- Jak ją bezpośrednio zaobserwować?

Jednym z głównych kandydatów jest najlżejsza cząstka supersymetryczna (LSP), którą mamy nadzieję odkryć w LHC...

Ale szukamy też na wiele innych sposobów...