

Wprowadzenie do kosmologii klasycznej: Część druga

Szymon Kozłowski

Uniwersytet Warszawski

2022-2024



Ewolucja czynnika skali w czasie

$$a(t) \propto t^{\frac{1}{2}} \quad \text{dla ery promieniowania} \quad (1)$$

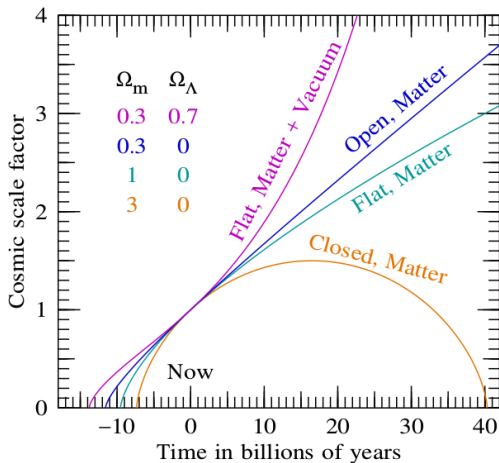
$$a(t) \propto t^{\frac{2}{3}} \quad \text{dla ery materii} \quad (2)$$

$$a(t) \propto e^{\sqrt{\frac{\Lambda}{3}}t} \quad \text{dla ery ciemnej energii} \quad (3)$$

Cofnijmy się w czasie

Dla $t \rightarrow 0$ czynnik skali $a(t) \rightarrow 0$. Wszechświat w momencie powstania musiał być bardzo mały – punktowy? osobliwość?

Historia ewolucji Wszechświata



https://jila.colorado.edu/~ajsh/courses/astr2010_22/evol.html

Gęstość materii, promieniowania i ciemnej energii

$$\rho_M = \frac{\rho_{M,0}}{a^3} \quad (4)$$

$$\rho_R = \frac{\rho_{R,0}}{a^4} \quad (5)$$

$$\rho_\Lambda = \text{const.} \quad (6)$$

Energia fotonów

$$E_R = \frac{hc}{\lambda} \propto \frac{1}{a} \quad (7)$$

Na początku:

$$\rho_M \propto \frac{1}{a^3} \rightarrow \infty \quad \text{dla} \quad a \rightarrow 0 \quad (8)$$

$$\rho_R \propto \frac{1}{a^4} \rightarrow \infty \quad \text{dla} \quad a \rightarrow 0 \quad (9)$$

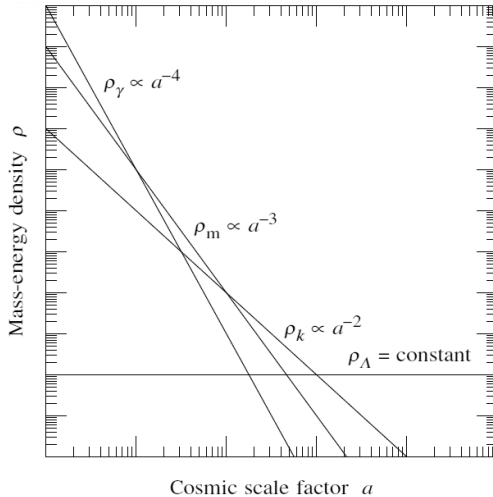
$$\rho_\Lambda = \text{const.} \quad (10)$$

Energia fotonów:

$$E_R \propto \frac{1}{a} \rightarrow \infty \quad \text{dla} \quad a \rightarrow 0 \quad (11)$$

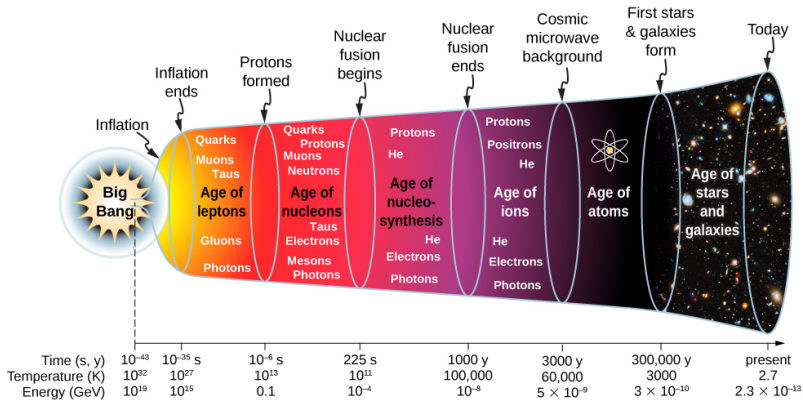
Kiedy Wszechświat był bardzo mały ($a \rightarrow 0$), czyli w momencie Wielkiego Wybuchu, był on bardzo gorący i bardzo gęsty.

Historia ewolucji Wszechświata



https://jila.colorado.edu/~ajsh/courses/astr2010_22/evol.html

Historia ewolucji Wszechświata



Historia ewolucji Wszechświata

Początek – $t \approx 0$ s – fizyka załamuje się przy:

Nazwa	Wartość	Definicja	Wielkość w jednostkach	
			naturalnych	SI
długość Plancka	długość	$l_P = c t_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$	1 L	$1,61623 \times 10^{-35}$ m
masa Plancka	masa	$m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$	1 M	$2,17647 \times 10^{-8}$ kg
czas Plancka	czas	$t_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$	1 T	$5,39116 \times 10^{-44}$ s
ładunek Plancka	ładunek elektryczny	$q_P = \sqrt{\hbar c 4\pi\epsilon_0}$	1 Q	$1,8755459 \times 10^{-18}$ C
temperatura Plancka	temperatura	$T_P = \frac{m_P c^2}{k} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G k^2}}$	1 Θ	$1,41681 \times 10^{32}$ K

Co badamy?

Mimo że, nie możemy zbadać początków Wszechświata empirycznie, możemy porównać przewidywania naszych modeli kosmologicznych z obserwacjami Wszechświata w czasach późniejszych.

Prawa fizyki – czy są niezmiennie?

Zakłada się, że prawa fizyki są niezmiennie w czasie. Nie wiadomo czy tak jest, ale jeśli jakieś parametry/stałe fizyczne uległy zmianie w czasie, pomiary kosmologiczne mogą być jedynym sposobem, aby się tego dowiedzieć (np. pomiar stałej struktury subtelnej z kwazarów).

Osobliwość początkowa

Ekstrapolacja ekspansji Wszechświata wstecz w czasie za pomocą ogólnej teorii względności (lub fizyki newtonowskiej) daje nieskończoną gęstość i temperaturę (osobliwość, ang. singularity) w skończonym czasie w przeszłości ($t = 0$ s).

Prawa fizyki

Prawa fizyki załamują się dla długości mniejszych niż długość Plancka i/lub temperaturach większych niż temperatura Plancka.

“Źródło Wszechświata”

Skąd się wziął? Dlaczego? Nie wiemy!

Cztery oddziaływania

Oddziaływanie jądrowe silne

Oddziaływanie to wiąże kwarki w obrębie hadronów (proton, neutron). Silnie oddziałują kwarki i antykwarki. Przenoszone przez gluony.

Oddziaływanie jądrowe słabe

Rozpad promieniotwórczy. Przenoszone jest za pomocą jednej z trzech masywnych cząstek (bozonów).

Oddziaływanie elektromagnetyczne

Odpowiada za siły działające między cząstkami posiadającymi ładunek elektryczny. Przenoszone przez fotony.

Oddziaływanie grawitacyjne

Wszystkie obiekty posiadające masę wzajemnie się przyciągają (wymiana grawitonów).

Era Plancka

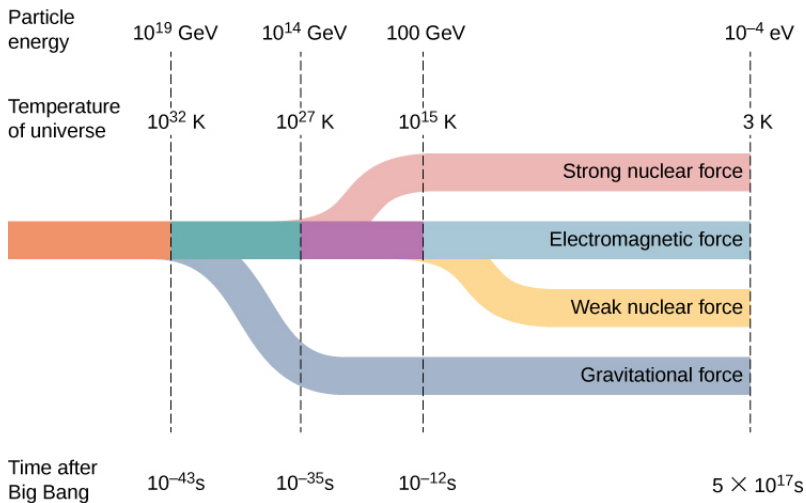
Etap ewolucji Wszechświata od $t = 0\text{s}$ do $t = 10^{-43}\text{s}$.

Niewiele wiadomo o fizyce w tak gigantycznej temperaturze ($T > 10^{32}\text{ K}$).

Wszystkie oddziaływania połączone w jedno.

Kończy się gdy grawitacja oddziela się od pozostałych trzech oddziaływań (elektromagnetycznego, jądrowego silnego i słabego).

Historia ewolucji Wszechświata



Era GUT

Etap ewolucji Wszechświata od $t = 10^{-43}$ s do $t = 10^{-36}$ s.

Unifikacja oddziaływań

Przy gęstościach kilka rzędów do gęstości Plancka i temperaturach kilku rzędów do temperatury Plancka teorie wielkiej unifikacji (GUT z ang. Grand Unification Theory) przewidują połączonego oddziaływania silnego, słabego i elektromagnetycznego w jedno zunifikowane oddziaływanie.

Kosmiczna Inflacja

Etap ewolucji Wszechświata od $t = 10^{-36}$ s do $t = 10^{-32}$ s.

Powstanie teorii

Alan Guth opublikował pracę naukową w styczniu 1981 roku. Zaproponował nazwę procesu jako “inflacja”.

Antygravitacja

Energia próżni w tym stanie miałaby właściwości odpychające!
Antygravitacja! (analogicznie do ciemnej energii, równanie stanu $p = -\rho c^2$)

Kosmiczna Inflacja

Wszechświat na początku jest w stanie fałszywej próżni. Ponieważ energia próżni jest dodatnia, tworzy się ujemne ciśnienie, które powoduje, że przestrzeń rozszerza się coraz szybciej, a gęstość nie zmienia się. Nastąpił wykładniczy wzrost rozmiarów Wszechświata. W wyniku rozpadu w procesie kwantowego tunelowania z fałszywej powstaje prawdziwa próżnia.

Gdyby Wszechświat rozwijał się zgodnie z tym modelem, to byłby całkowicie jednorodny i gładki. Jednakże podczas ewolucji Wszechświata musiały utworzyć się pewne zaburzenia gęstości tak, aby z obszarów o większej gęstości powstały galaktyki i gromady galaktyk.

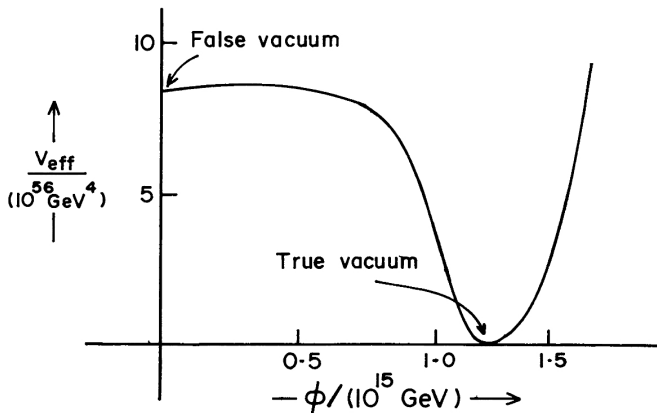


Figure 4 The Coleman-Weinberg potential that was used in the first major revision of the inflationary model.

Kosmiczna Inflacja

Kosmiczna inflacja

To proces, w którym w bardzo krótkim czasie ($10^{-36} < t < 10^{-32}$ s) dochodzi do eksponencjalnej ekspansji Wszechświata z powodu antygrawitacyjnych właściwości energii próżni przy tych gęstościach.

Rozmiar

Wszechświat z obiektu mikroskopijnego (rozmiar Plancka) rośnie do rozmiaru 10 cm (pomarańcza) – zmiana rozmiaru przynajmniej o 10^{26} razy.

Temperatura

Temperatura spada około 100000 x, z około 10^{27} K do 10^{22} K.

Fluktuacje kwantowe a struktury we Wszechświecie

Fluktuacje kwantowe w mikroskopijnym obszarze inflacyjnym, powiększone do kosmicznych rozmiarów, stają się załączkiem wzrostu struktury we Wszechświecie.

Kosmiczna inflacja

Przyspieszająca ekspansja przestrzeni rozciąga wszelkie początkowe zmiany gęstości lub temperatury na bardzo duże skale długości.

Zasadniczą cechą inflacji jest to, że wygładza niejednorodności i anizotropie oraz zmniejsza krzywiznę przestrzeni. To popycha Wszechświat do stanu, gdzie jedynymi znaczącymi niejednorodnościami są niewielkie fluktuacje kwantowe.

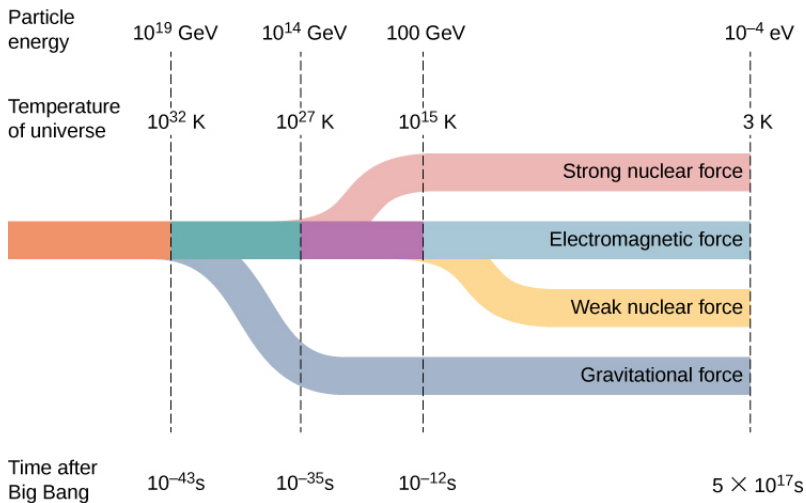
Koniec inflacji

Nastąpił w momencie oddzielenia oddziaływania silnego od pozostałych dwóch.

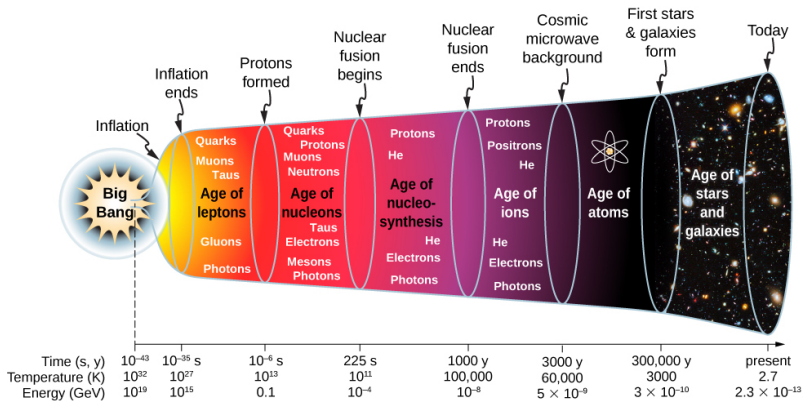
Reheating / termalizacja

Po zakończeniu inflacji temperatura powraca do temperatury sprzed inflacji. Duża energia potencjalna pola inflacyjnego rozpada się na cząstki i wypełnia Wszechświat cząstkami Modelu Standardowego.

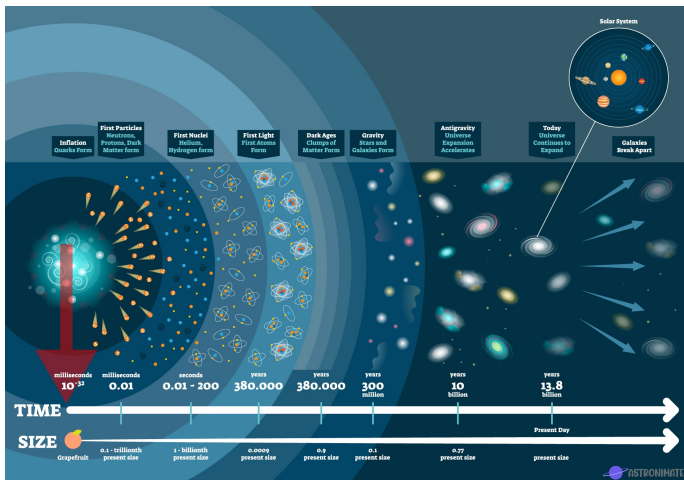
Historia ewolucji Wszechświata



Historia ewolucji Wszechświata



Historia ewolucji Wszechświata



Era oddziaływań elektroślabych

Era oddziaływań elektroślabych

Etap ewolucji Wszechświata od $t = 10^{-32}$ s do $t = 10^{-12}$ s.

Cząstki

Wszechświat wypełniony jest plazmą kwarkowo-gluonową.

Koniec ery

Zakończyła się w momencie rozdzielenia się oddziaływania elektroślabeego na elektromagnetyczne i jądrowe słabe. Od tej pory we Wszechświecie istnieją oddzielnie cztery oddziaływania fundamentalne.

Era kwarków

Era kwarków

Etap ewolucji Wszechświata od $t = 10^{-12}$ s do $t = 10^{-6}$ s.

Cząstki

Wszechświat wypełniony był gęstą, gorącą plazmą kwarkowo-gluonową, zawierającą kwarki, leptoni (elektrony, taony, miony i neutrino) i ich antycząstki.

W chwili $t = 10^{-12}$ s gęstość materii spada do 10^{25} g/cm³, a temperatura do 10^{15} K.

Koniec ery

Zakończyła się w momencie gdy energia spadła do tego stopnia, że kwarki mogły się połączyć w hadrony.

Era hadronowa

Etap ewolucji Wszechświata rozpoczęty w chwili $t = 10^{-6}$.

Kwarki nie mogą już istnieć samodzielnie. Łączą się w hadrony (bariony i mezony), sklejone ze sobą gluonami (bozony oddziaływań silnych).

Głównymi składnikami materii były wówczas znajdujące się w stanie równowagi termodynamicznej, hadrony (mezony, protony, neutrony) i antyhadrony.

Bariogeneza

Proces bariogenezy – proces powstawania protonów i neutronów. Obserwowana we Wszechświecie nierównowaga pomiędzy liczbą cząstek materii a antymaterii jest niewyjaśniona. Naturalną hipotezą jest, że powstający Wszechświat powinien zawierać równą liczbę cząstek i antycząstek. Pojawia się zatem problem utworzenia – z początkowo symetrycznego stanu Wszechświata – obserwowanego obecnie stanu asymetrii pomiędzy materią i antymaterią.

Gdy temperatura spadnie poniżej dwukrotności masy spoczynkowej nukleonu, anihilacja hadronów-antyhadronów przewyższa kreację, a gęstość nukleonów dramatycznie spada, co prowadzi do ery leptonów.

Koniec ery hadronów

Era hadronowa kończy się w chwili $t = 1$ s, gdy gęstość maleje do 10^{14} g/cm³, a temperatura do 10^{12} K.

Era leptonowa

Etap ewolucji Wszechświata od $t = 1$ s do $t = 10$ s. Dwa ważne wydarzenia związane z leptonami (neutrinami i elektronami).

- oddzielenie się neutrin od materii (neutrino decoupling)
- anihilacja elektron-pozytron

Koniec ery

10 sekund po Wielkim Wybuchu temperatura Wszechświata spadła do punktu, w którym pary elektron-pozyton uległy stopniowej anihilacji.

Oddzielenie się neutrin od materii

Neutrino decoupling

Gdy temperatura spadła do około 2,5 MeV ($T = 17 \cdot 10^9$ K), neutrina odłączyły się od reszty materii, wszystkie interakcje leptonów i fotonów z neutrinami zostały zatrzymane. Neutrina przestają oddziaływać z materią barionową i tworzą kosmiczne tło neutrinowe ($t = 1$ s).

Kosmiczne tło neutrinowe (C ν B lub CNB)

CNB to promieniowanie cząstek tła Wszechświata złożone z neutrin, nazywanych neutrinami reliktowymi. Ich obecna temperatura wynosi $T = 1.95$ K.

Neutrino decoupling

Pośredni pomiar oddzielenia neutrin jest możliwy dzięki roli, jaką oddzielenie się neutrin odgrywa w stosunku liczby neutronów do protonów. Przed oddzieleniem liczba neutronów i protonów jest utrzymywana w równowadze dzięki oddziaływaniom słabym, w szczególności rozpadowi beta i wychwytowi elektronów (lub odwrotnemu rozpadowi beta) zgodnie z

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (12)$$

$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e \quad (13)$$

Neutrino decoupling

Kiedy Wszechświat ma kilka sekund, w $T \approx 10^{10}$ K, protony i neutrony znajdują się w równowadze termicznej, a ich stosunek określa równanie Boltzmann. W niższej temperaturze równowaga ta nie może być utrzymana, a stosunek neutronów do protonów “zamarza” w postaci

$$\frac{n_n}{n_p} = e^{\frac{-(m_p - m_n)c^2}{kT}} = 0.22 \quad (14)$$

Dalszy rozpad wolnych neutronów daje $\frac{n}{p} = 0.16$.

Przebieg

Gdy temperatura spadnie poniżej 500 keV (lub $5 \cdot 10^9$ K przy $t \approx 5$ s), gęstość fotonów o energiach powyżej limitu produkcji par próg $m_e = 511 \text{ keV}/c^2$ jest niewystarczająca do utrzymania reakcji

$$e^- + e^+ \leftrightarrow \gamma + \gamma \quad (15)$$

Reakcja przebiega teraz preferencyjnie w kierunku anihilacji par e-p, pozostawiając tylko niewielką liczbę elektronów, aby zrównoważyć liczbę protonów wytworzanych przez bariogenezę (nasz Wszechświat jest elektrycznie neutralny).

Skład

Nie ma kwarków i antykwarków, które połączyły się wcześniej w hadrony i antyhadrony. Hadrony i antyhadrony (np. proton-antyproton) anihilowały tworząc fotony. Nie ma elektronów i antyelektronów, które anihilowały tworząc fotony. Zachowały się śladowe ilości hadronów, elektronów. Wszechświat wypełniony jest przede wszystkim fotonami ($n_f/n_b = 10^9$).

Pierwotna Nukleosynteza

Najważniejszym wydarzeniem ery promieniowania jest połączenie swobodnych neutronów z protonami w jądra helu, które stanowią 25% materii nukleonowej (pozostałe 75% to protony – jądra wodoru) oraz śladowe ilości deuteru i litu.

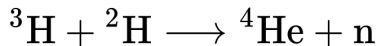
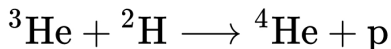
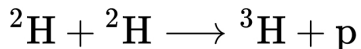
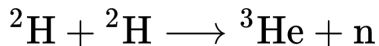
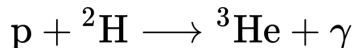
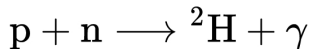
Pierwotna Nukleosynteza

Rozpoczęła się $t \approx 20$ s po Wielkim Wybuchu, kiedy Wszechświat ostygł na tyle, aby jądra deuteru mogły przetrwać rozerwanie przez wysokoenergetyczne fotony.

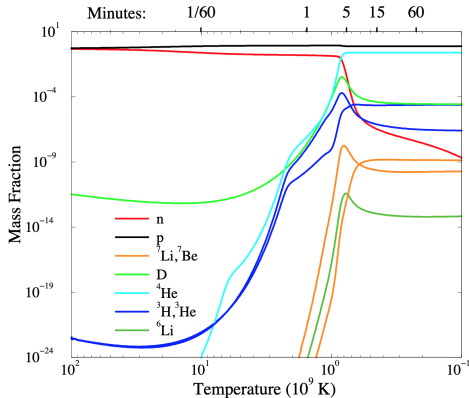
Hel

W tym czasie na każdy neutron przypadało około sześciu protonów, ale niewielka część neutronów rozpada się przed fuzją w ciągu następnych kilkuset sekund, więc pod koniec nukleosyntezy na każdy neutron przypada około siedmiu protonów, a prawie wszystkie neutrony są w jądrach helu-4.

Reakcje



Pierwotna Nukleosynteza



Burles, Nollett, & Turner 1999

<https://arxiv.org/abs/astro-ph/9903300>

Skład Wszechświata

Po zakończeniu nukleosyntezy w czasie $t \approx 300$ s i temperaturze $T \approx 8 \cdot 10^8$ K (0.06 MeV), Wszechświat jest “termiczną zupą” fotonów, protonów, jąder helu, śladowych innych lekkich pierwiastków, a także elektronów, neutrin i prawdopodobnie nieznanymi cząstek ciemnej materii.

Gęstość

Gęstość energii ρ jest zdominowana przez komponent relatywistyczny (ρ_R , era promieniowania) – fotony i neutrina.

Prawo Stefana-Boltzmana

$$\rho_R \propto \sigma T^4 \quad (16)$$

Ewolucja gęstości

$$\rho_R \propto \frac{1}{a^4} \quad a(t) \propto t^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

Ewolucja temperatury

$$T \propto a^{-1} \propto t^{-\frac{1}{2}} \quad (18)$$

Era promieniowania

Temperatura

Z wyjątkiem neutrin i hipotetycznych cząstek ciemnej materii, które nie oddziałują z plazmą, wszystkie rodzaje cząstek mają tę samą temperaturę – wynika ona z interakcji naładowanych cząstek z fotonami (termalizacja).

Rozpraszanie Thomsona

Fotony oddziałują głównie z elektronami poprzez rozpraszanie Thomsona ($h\nu \ll m_e c^2 \rightarrow 0.06 \text{ MeV} < 0.5 \text{ MeV}$):

$$\gamma + e^- \leftrightarrow \gamma + e^- \quad (19)$$

czyli promieniowanie elektromagnetyczne (fotony) są rozpraszane przez swobodne naładowane cząstki.

Koniec ery promieniowania $t = 50000$ lat.

Gęstość

Era materii rozpoczyna się gdy gęstość promieniowania spadnie poniżej gęstości materii ($t = 50000$ lat, $z = 3380$).

Ewolucja gęstości

$$\rho_R \propto \frac{1}{a^4} \quad a(t) \propto t^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

$$\rho_M \propto \frac{1}{a^3} \quad a(t) \propto t^{\frac{2}{3}} \quad (21)$$

Rekombinacja

Rekombinacja zachodzi, gdy temperatura fotonów spadła na tyle nisko, że nie ma już wystarczającej liczby fotonów o wysokiej energii, aby utrzymać jonizację wodoru.

Jonizacja wodoru ($E > 13.6\text{eV}$)

$$\gamma + H \rightarrow p^+ + e^- \quad (22)$$

Rekombinacja wodoru ($E < 13.6\text{eV}$)

$$p^+ + e^- \rightarrow H + \gamma \quad (23)$$

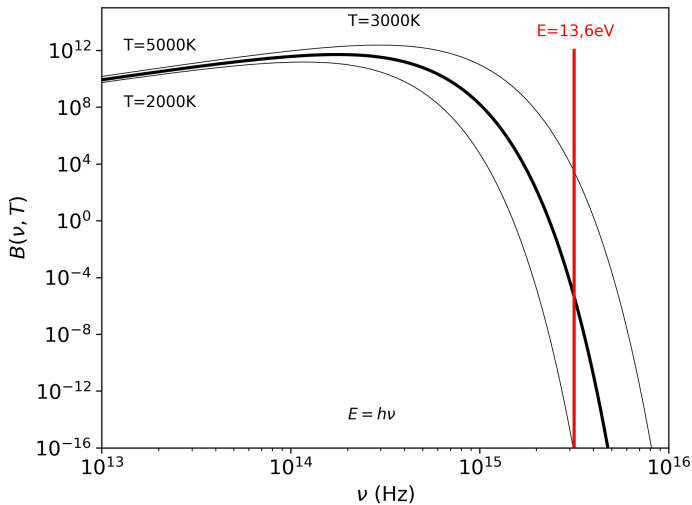
Rekombinacja

Chociaż energia jonizacji wodoru wynosi 13,6 eV (13.59844 eV $\rightarrow T \approx 1,58 \cdot 10^5$ K), rekombinacja zachodzi przy $T \approx 3000$ K.

(przelicznik: 1 eV = $11,6 \cdot 10^3$ K)

Tak niską temperaturę można wytłumaczyć faktem, że na każdy proton we Wszechświecie przypada miliard fotonów. Pozwala to wysokoenergetycznemu ogonowi rozkładu Plancka fotonów na utrzymywanie zjonizowanej stosunkowo niewielkiej liczby atomów wodoru, aż do temperatur i energii znacznie niższych niż 13,6 eV.

Rozkład Plancka



Decoupling

W kosmologii “decoupling” odnosi się do okresów w rozwoju Wszechświata, kiedy różne typy cząstek przestają być ze sobą w równowadze termicznej.

Rekombinacja i decoupling

Biorąc pod uwagę wszystkie istotne procesy, rekombinacja atomów wodoru i uwolnienie fotonów nastąpiło gdy $z_{\text{dec}} = 1090$, dla $T_{\text{dec}} = 2971 \text{ K}$ i $t_{\text{dec}} = 372000 \text{ lat}$.

Po ostatnim rozproszeniu na elektronach, fotony mogły już bez przeszkód podróżować po Wszechświecie. Są to fotony kosmicznego mikrofalowego tła (CMB), które otrzymujemy dzisiaj. Nadal mają rozkład ciała doskonale czarnego, teraz przesunięty ku czerwieni o współczynnik 1091.

Jaka temperatura dzisiaj T_0 ?

$$E = h \frac{c}{\lambda} \propto kT \quad \rightarrow \quad 1 + z = \frac{a_0}{a} = \frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{T}{T_0} \quad (24)$$

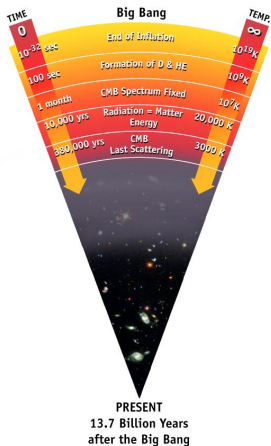
$$T_0 = \frac{T}{1 + z} = \frac{2971K}{1 + 1090} = 2.72K \quad (25)$$

$$\lambda_0 = 1.06mm \text{ (Planck}_\lambda\text{)} \text{ lub } \lambda_0 = 1.9mm \text{ (Planck}_\nu\text{)} \quad (26)$$

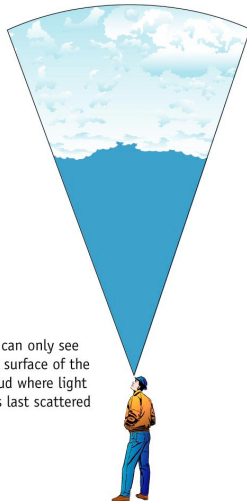
UWAGA na dwie funkcje Plancka!

$B(\lambda, T) = B(\nu, T) * \nu^2/c$ – dwa peaki w różnych miejscach!

Powierzchnia ostatniego rozproszenia



The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatterer" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.



Compton scattering

Zjawisko rozpraszania promieniowania elektromagnetycznego o dużej częstotliwości (tj. energii, $E = h\nu$), na swobodnych elektronach, w wyniku którego następuje zwiększenie długości fali promieniowania (tj. zmniejszenie ich energii).

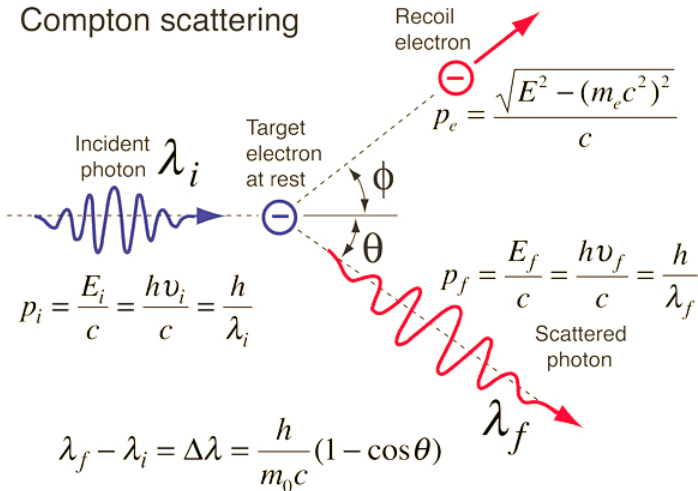
Fotony przekazują energię elektronom.

Zwiększenie długości fali rozproszonego fotonu, zwane przesunięciem Comptona, zależy od kąta rozproszenia fotonu zgodnie ze wzorem:

$$\Delta\lambda = (\lambda_{\text{rozproszone}} - \lambda_{\text{padające}}) = \lambda_C(1 - \cos\theta) \quad (27)$$

Rozpraszanie Comptonowskie

Compton scattering



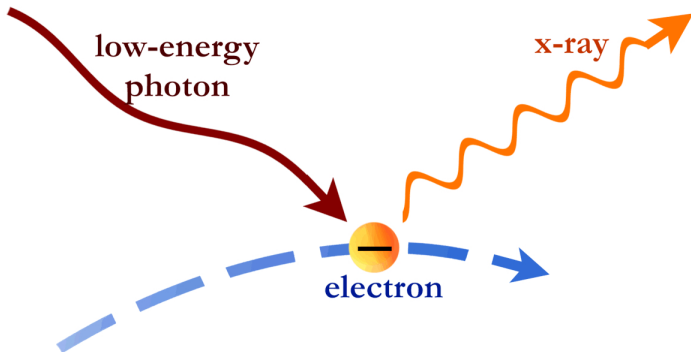
Inverse Compton scattering

Zjawisko zwiększenia częstotliwości (zmniejszenie długości) fali promieniowania elektromagnetycznego przez swobodne elektrony o dużych prędkościach.

Elektrony przekazują energię fotonom.

Ważne dla CMB (efekt Suniajewa-Zeldowicza), AGNów (korona), itp.

Odwrotne Rozpraszanie Comptonowskie



Thomson scattering

Zjawisko rozpraszania promieniowania elektromagnetycznego – fotonów na swobodnych elektronach. Fotony mają energię DUŻO mniejszą niż elektrony ($h\nu < mc^2$), w wyniku czego NIE następuje zmiana długości fali promieniowania.

Fotony NIE przekazują energii elektronom.

Pole elektryczne fali padającej (fotonu) przyspiesza naładowaną cząstkę, powodując, że z kolei emituje ona promieniowanie o tej samej częstotliwości co fala padająca, a zatem fala ulega rozproszeniu.

Kosmiczne Promieniowanie Tła (CMB)

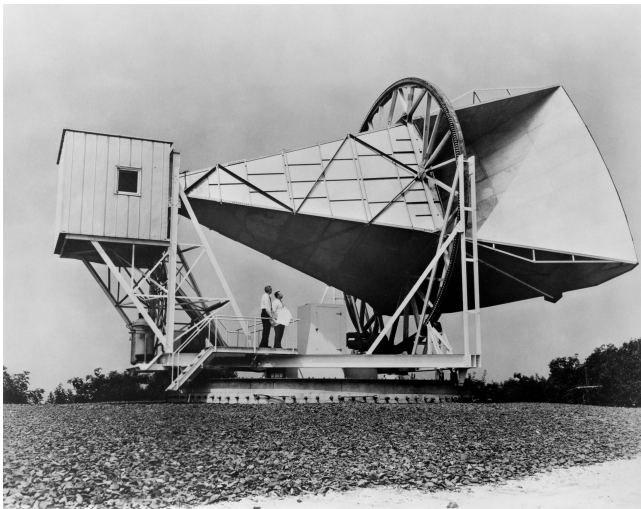
Przewidywania

Jeśli Wszechświat powstał w Wielkim Wybuchu i się rozszerza, to wypełnia go promieniowanie o $T = 5$ K – Ralph Alpher, Robert Herman i George Gamov (1948).

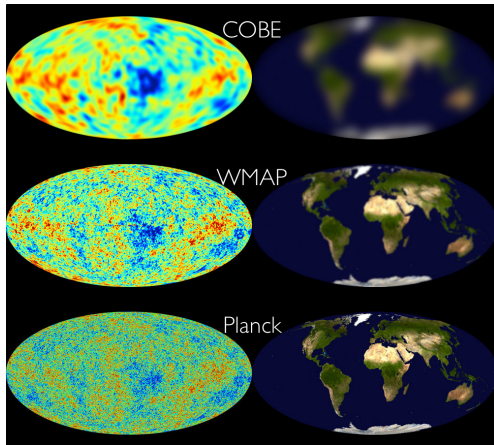
Odkrycie CMB

W 1965 roku amerykańscy astrofizycy Arno Penzias i Robert Wilson wykryli istnienie fal docierających do anteny z każdego kierunku. Spostrzeżenie zostało potwierdzone w zakresie długości fal od 0,6 mm do 60 cm, a jego natężenie odpowiadało “promieniowaniu cieplnemu” o temperaturze $T = 3$ K. Otrzymali za swoje odkrycie Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki w roku 1978.

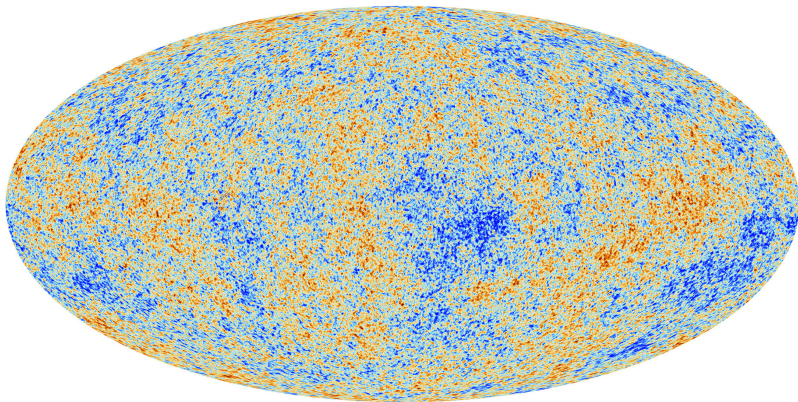
Kosmiczne Promieniowanie Tła (CMB)



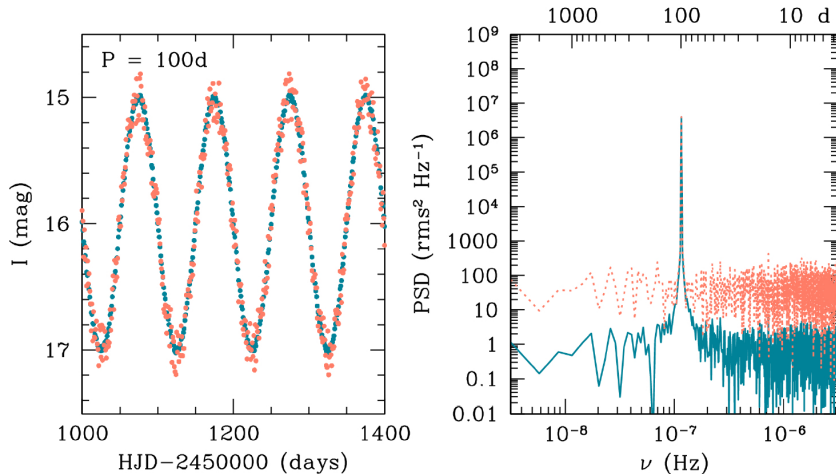
Kosmiczne Promieniowanie Tła (CMB)



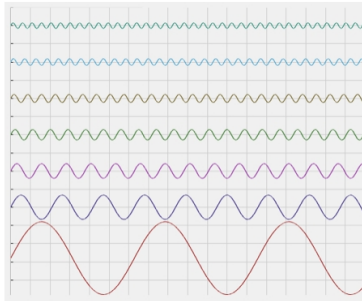
Kosmiczne Promieniowanie Tła (CMB)



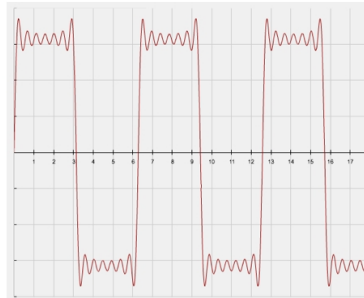
PERIODIC OBJECT



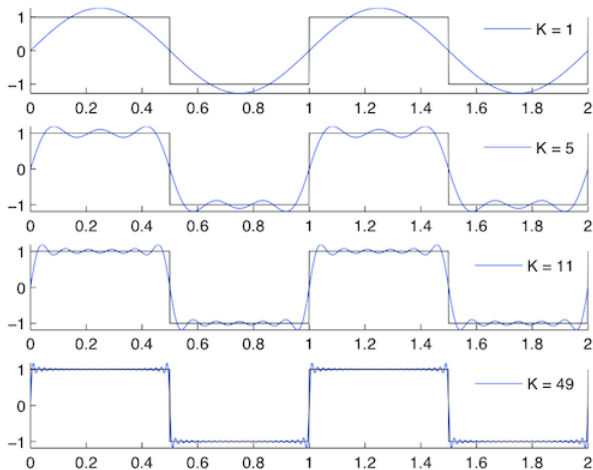
Widmo mocy



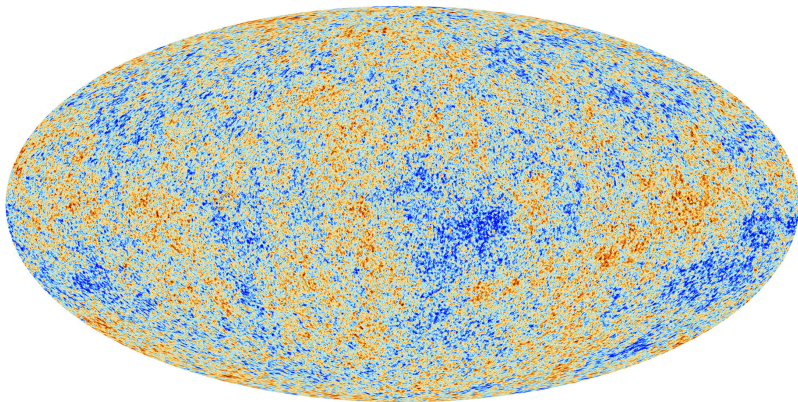
=



Widmo mocy



Kosmiczne Promieniowanie Tła (CMB)



Harmoniki sferyczne $Y_m^l(\theta, \phi)$

$$\frac{\Delta T}{T}(\theta, \phi) = \frac{T(\theta, \phi) - T}{T} \quad (28)$$

$$\frac{\Delta T}{T}(\theta, \phi) = \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_m^l(\theta, \phi) \quad (29)$$

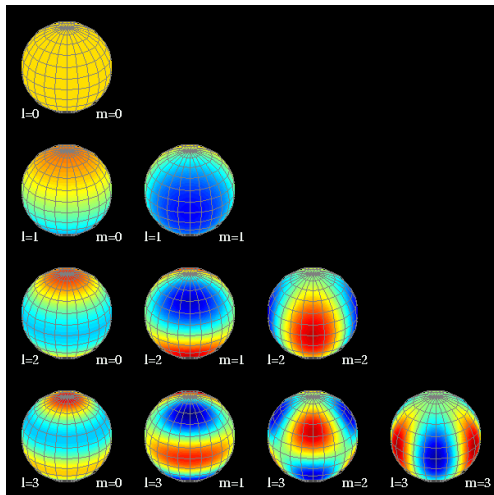
$Y_m^l(\theta, \phi)$ – opisuje liczbę i/lub “rozmiar plam”

a_{lm} – opisuje amplitudę, czyli czy $Y_m^l(\theta, \phi)$ jest “obecne”

$C_l = \langle |a_{lm}|^2 \rangle$ – amplituda widma mocy

rozmiar plamy = $180^\circ/l$

Kosmiczne Promieniowanie Tła (CMB)



Kosmiczne Promieniowanie Tła (CMB)

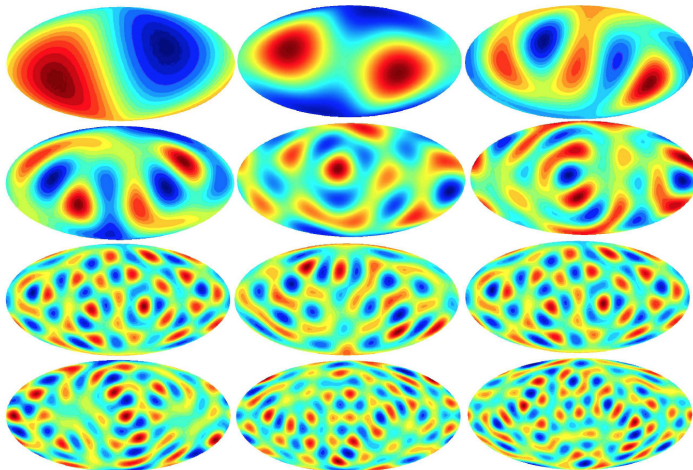
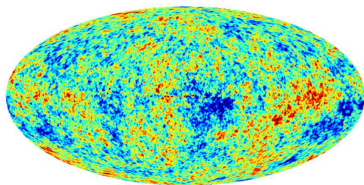
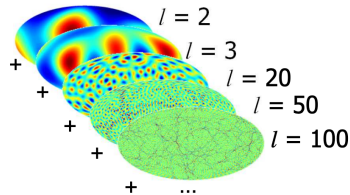


Figure 13: Randomly generated skies containing only a single multipole ℓ . Starting from top left: $\ell = 1$ (dipole only), 2 (quadrupole only), 3 (octupole only), 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12. Figure by Ville Heikkilä.

Kosmiczne Promieniowanie Tła (CMB)



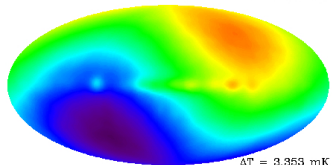
=



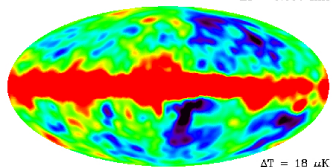
Kosmiczne Promieniowanie Tła (CMB)



$T = 2.728 \text{ K}$

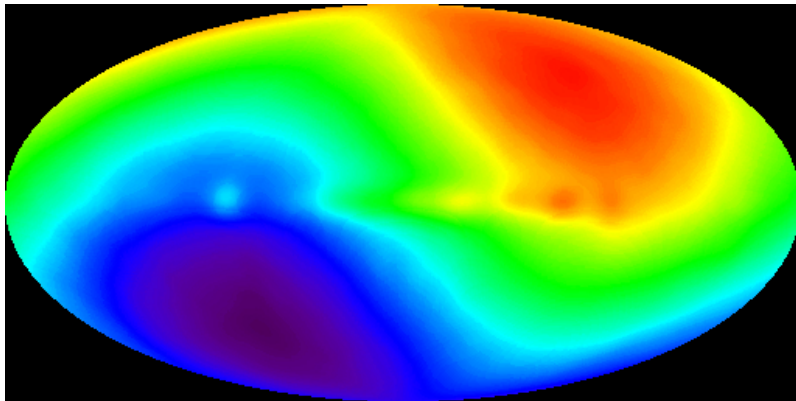


$\Delta T = 3.353 \text{ mK}$

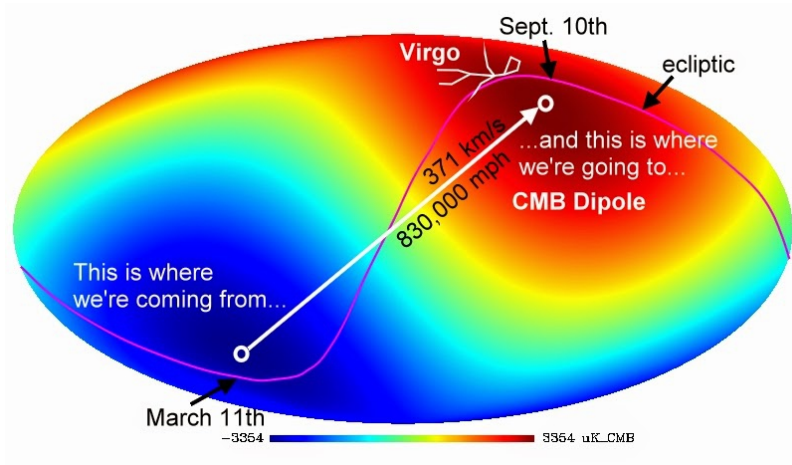


$\Delta T = 18 \text{ } \mu\text{K}$

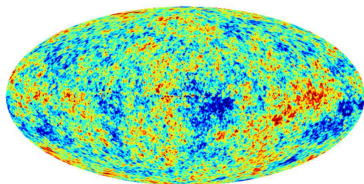
Kosmiczne Promieniowanie Tła (CMB)



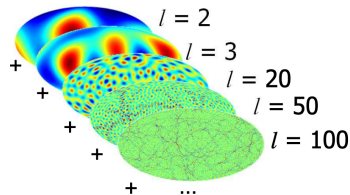
Kosmiczne Promieniowanie Tła (CMB)



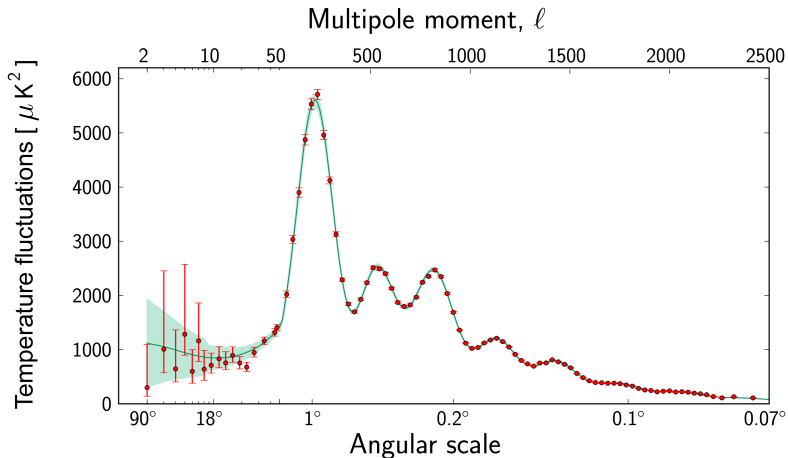
Kosmiczne Promieniowanie Tła (CMB)



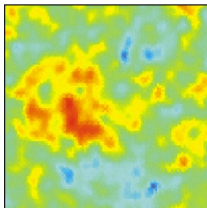
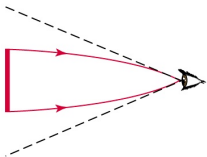
=



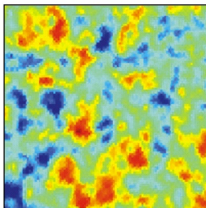
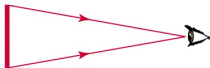
Kosmiczne Promieniowanie Tła (CMB)



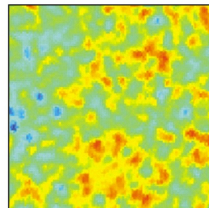
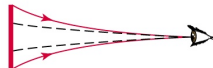
Kosmiczne Promieniowanie Tła (CMB)



a If universe is closed, “hot spots” appear larger than actual size

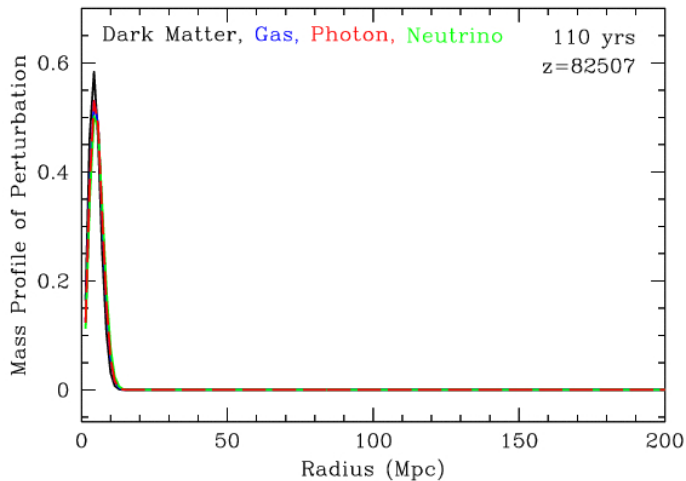


b If universe is flat, “hot spots” appear actual size

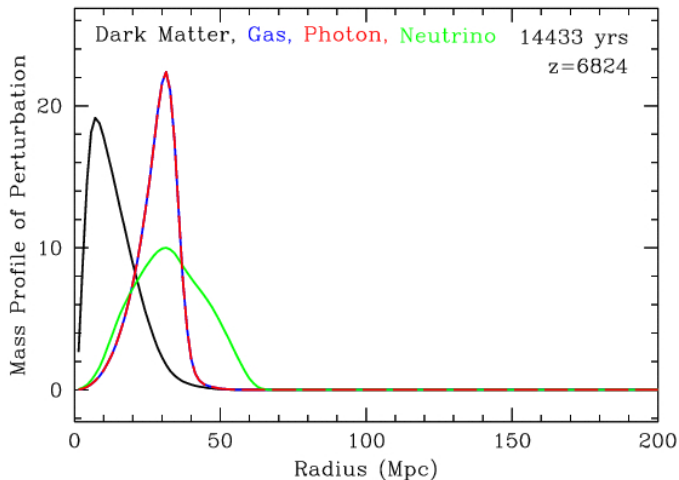


c If universe is open, “hot spots” appear smaller than actual size

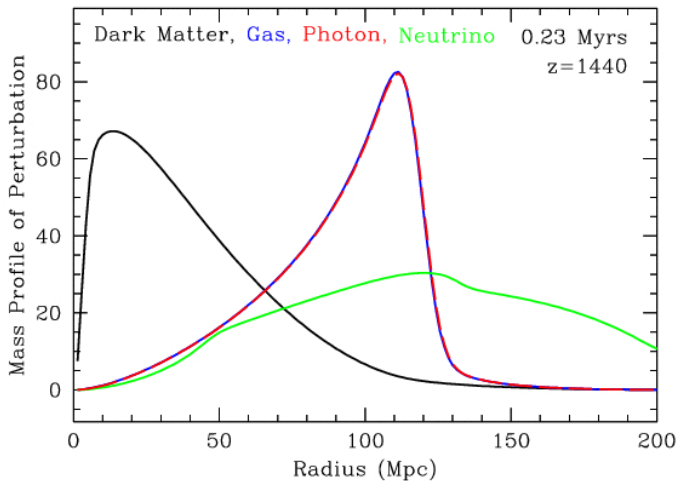
Baryonic Acoustic Oscillations (BAO)



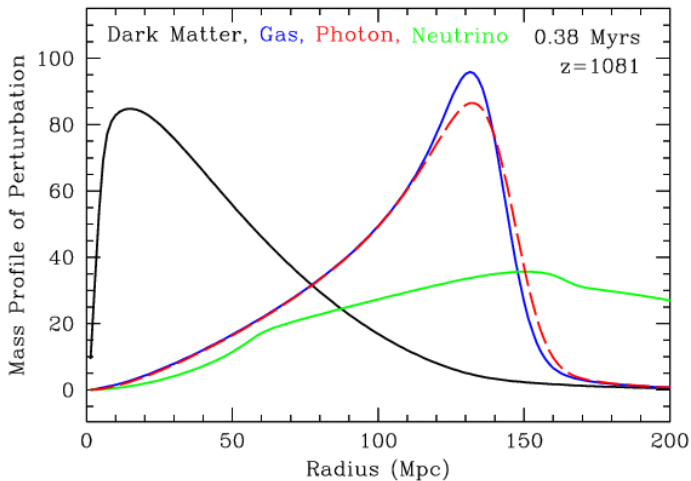
Baryonic Acoustic Oscillations (BAO)



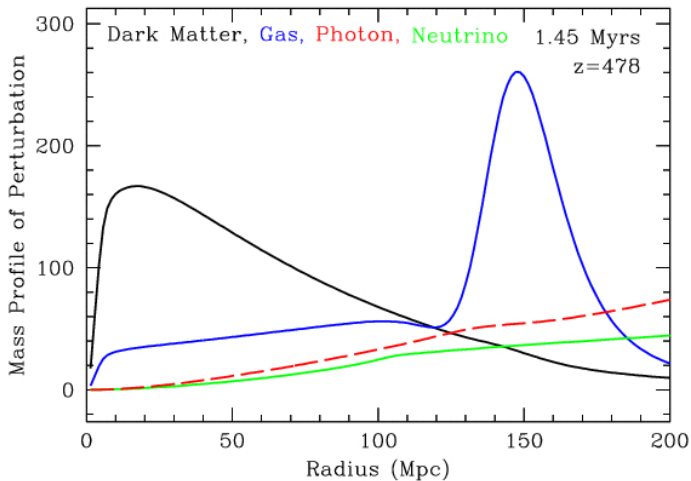
Baryonic Acoustic Oscillations (BAO)



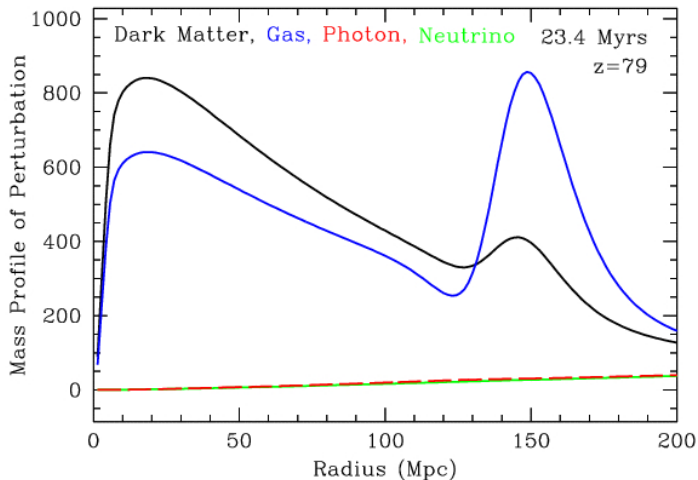
Baryonic Acoustic Oscillations (BAO)



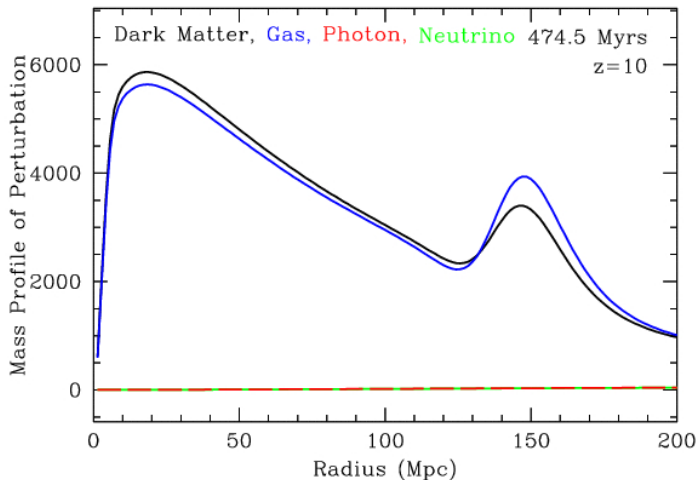
Baryonic Acoustic Oscillations (BAO)



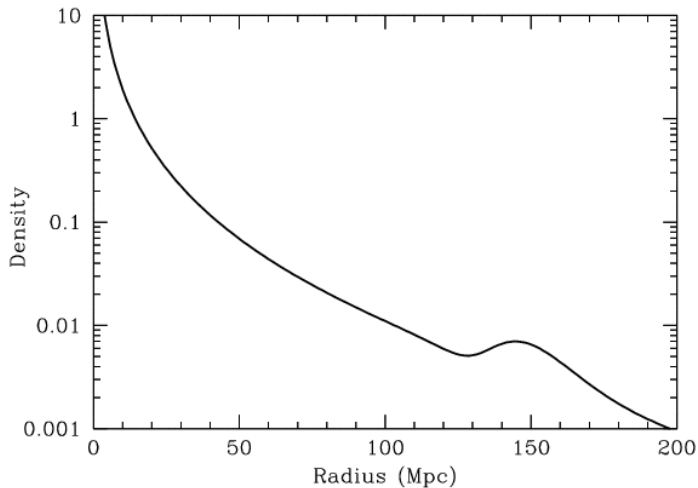
Baryonic Acoustic Oscillations (BAO)



Baryonic Acoustic Oscillations (BAO)



Baryonic Acoustic Oscillations (BAO)



Baryonic Acoustic Oscillations (BAO)

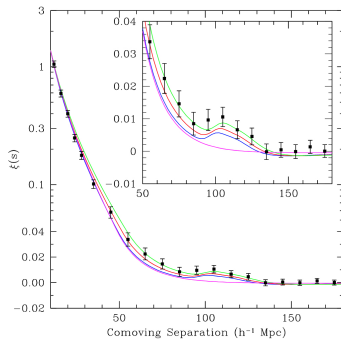
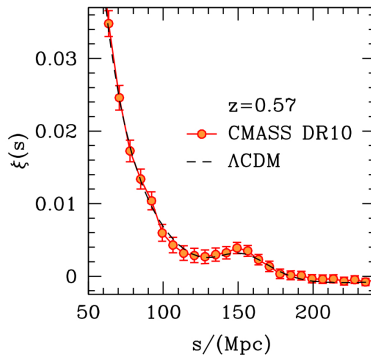
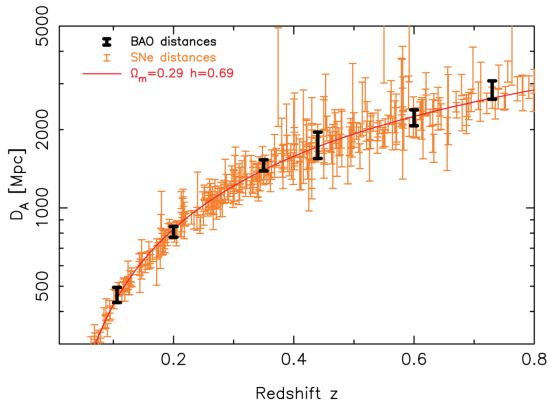


FIG. 2.— The large-scale redshift-space correlation function of the SDSS LRG sample. The error bars are from the diagonal elements of the mock-catalog covariance matrix; however, the points are correlated. Note that the vertical axis mixes logarithmic and linear scalings. The inset shows an expanded view with a linear vertical

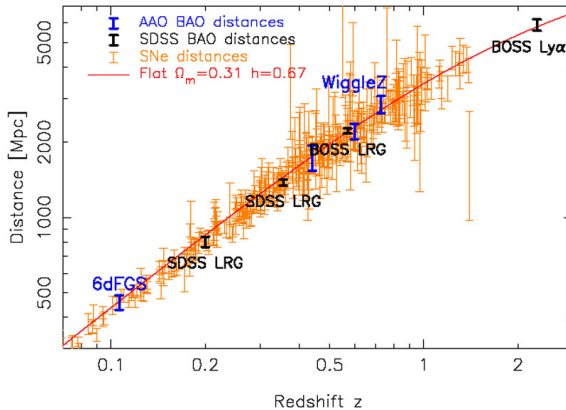


BAO na Diagramie Hubble'a

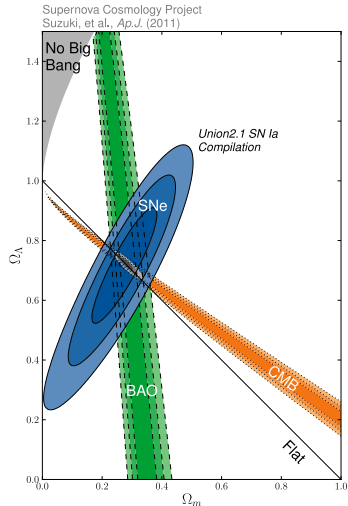


WiggleZ – Blake et al. (2011), MNRAS, 418, 1707

BAO na Diagramie Hubble'a

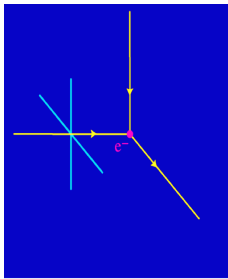


Parametry Kosmologiczne

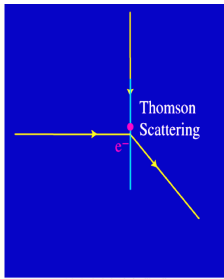


Union 2.1 – Suzuki et al. (2012), *ApJ*, 746, 85

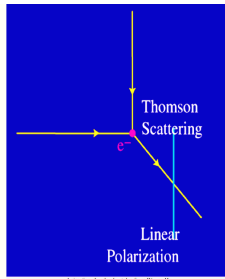
Polaryzacja Kosmicznego Promieniowania Tła (CMB)



Unpolarized radiation



excited electron

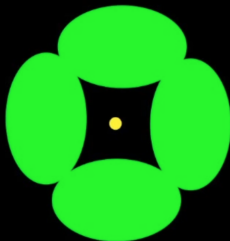


perpendicular scattering

autor: prof. Wayne Hu

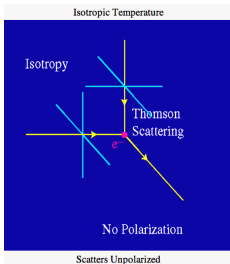
Polaryzacja Kosmicznego Promieniowania Tła (CMB)

Environment around electrons at $t=380,000$ years
can lead to polarization

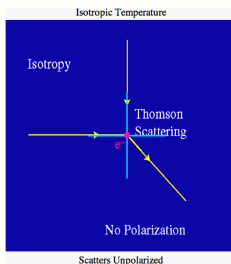


Uniform “glow” around electron $\Rightarrow$
all polarizations emitted equally.

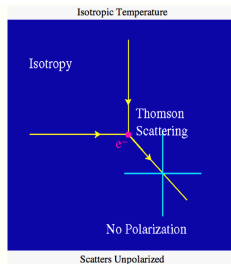
Polaryzacja Kosmicznego Promieniowania Tła (CMB)



Two unpolarized waves



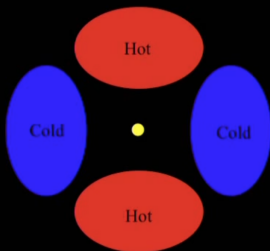
excited electron



scattered: half + half

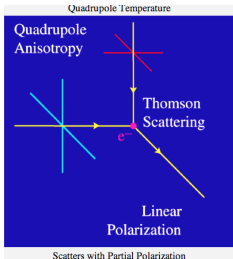
Polaryzacja Kosmicznego Promieniowania Tła (CMB)

Environment around electrons at $t=380,000$ years
can lead to polarization

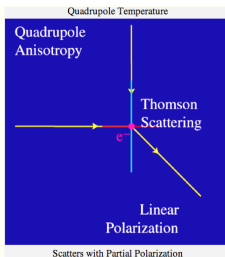


Non-uniform “glow” around electron $\Rightarrow$
emission is polarized.

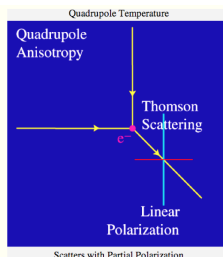
Polaryzacja Kosmicznego Promieniowania Tła (CMB)



Two unpolarized waves



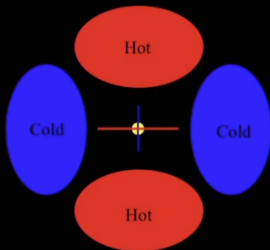
excited electron



scattered: unequal

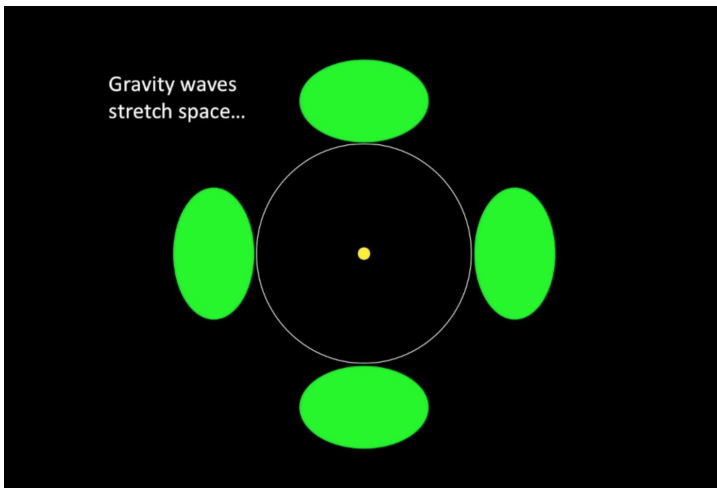
Polaryzacja Kosmicznego Promieniowania Tła (CMB)

Environment around electrons at $t=380,000$ years
can lead to polarization

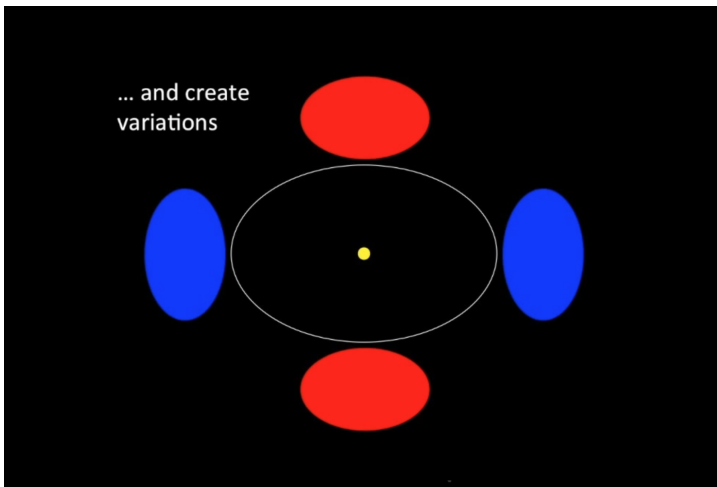


Non-uniform “glow” around electron $\Rightarrow$
emission is polarized.

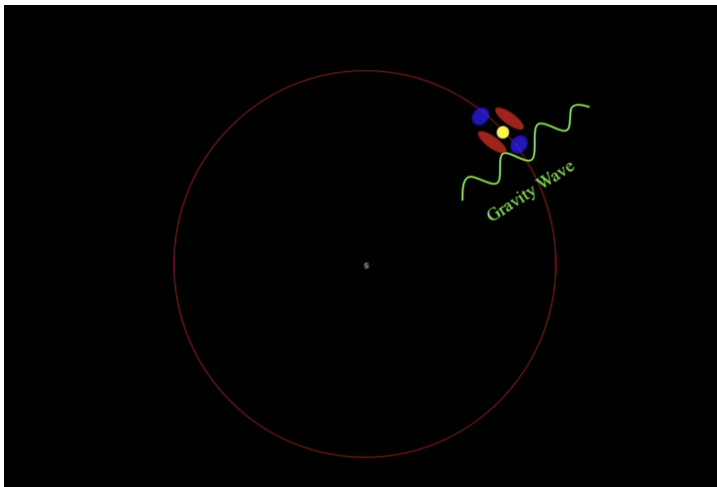
Polaryzacja Kosmicznego Promieniowania Tła (CMB)



Polaryzacja Kosmicznego Promieniowania Tła (CMB)



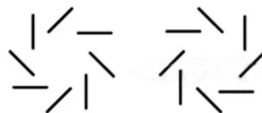
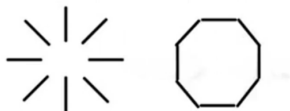
Polaryzacja Kosmicznego Promieniowania Tła (CMB)



Polaryzacja Kosmicznego Promieniowania Tła (CMB)

- E-modes arise from scalar perturbations
- B-modes arise from tensor perturbations
- r : tensor-to-scalar ratio

E modes: even parity



B modes: odd parity

Polaryzacja Kosmicznego Promieniowania Tła (CMB)

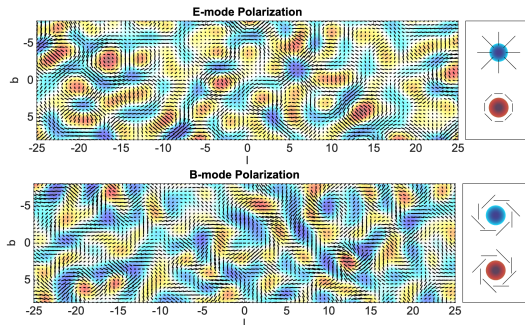


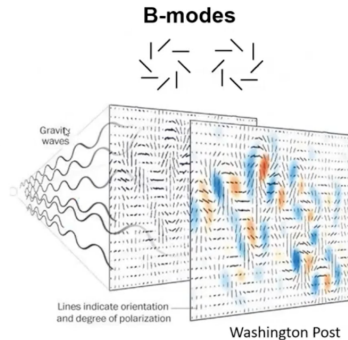
Figure 6

In the top figure we show a polarization pattern composed only of E modes and in the bottom one composed only of B modes. As indicated on the right, it is seen that around hot spots (red) the polarization pattern of the E mode is tangential and radial around cold spots (blue). The polarization pattern surrounding hot and cold spots of the B mode show a characteristic swirling pattern (with different orientation around hot and cold spots).

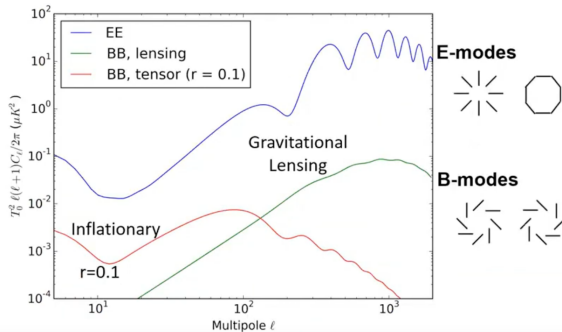
Kamionkowski & Kovetz (2016), Ann. Rev. Astron. Astrophys. ARAA:1–45

Cosmology from B-mode Polarization

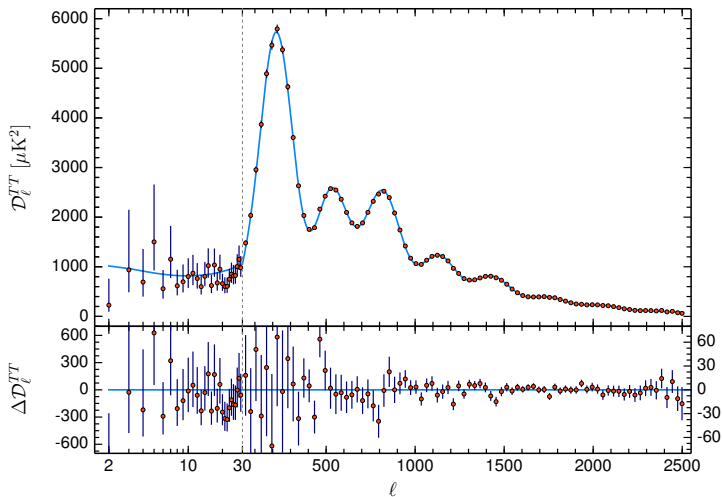
- Two sources of B-mode polarization in cosmic microwave background
 - **Inflationary signature in primordial CMB**
 - Gravitational lensing



Predicted polarization power spectrum

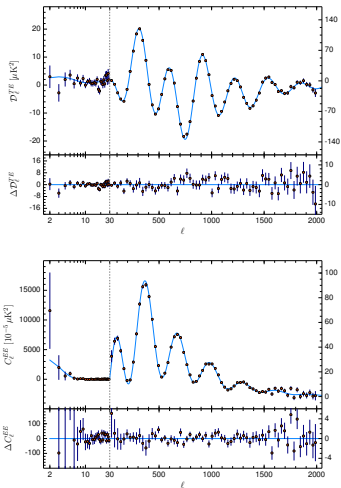


Kosmiczne Promieniowanie Tła (CMB)



Planck 2018 Results – Planck et al. (2020), A&A 641, A6

Kosmiczne Promieniowanie Tła (CMB)



Planck 2018 Results – Planck et al. (2020), A&A 641, A6

Kosmiczne Promieniowanie Tła (CMB)

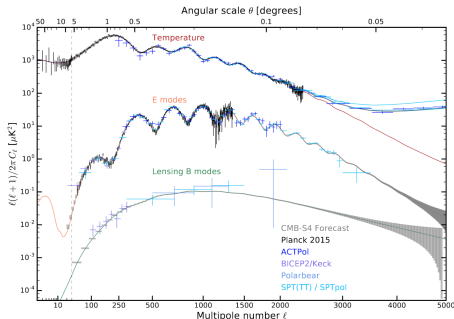
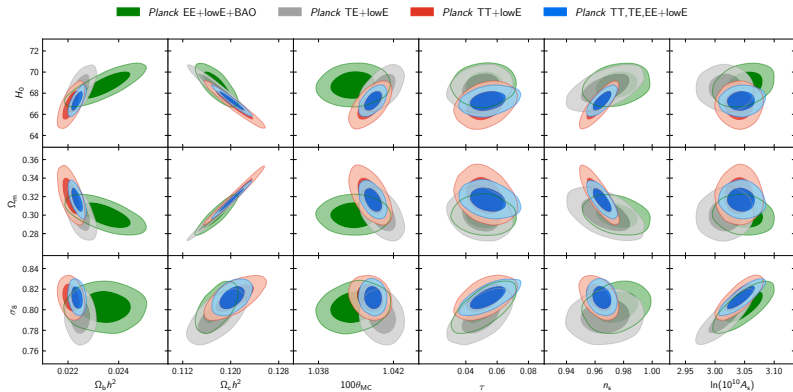


Figure 1. Current measurements of the angular power spectrum of the CMB temperature and polarization anisotropy. The horizontal axis is scaled logarithmically in multipole ℓ left of the vertical dashed line ($\ell < 30$) and as $\ell^{0.6}$ at higher multipole. Best-fit models of residual foregrounds plus primary CMB anisotropy power for TT datasets are also plotted. To illustrate the expected improvements with CMB-S4, the projections for a strawman instrumental configuration are shown in grey (binned with $\Delta\ell = 5$ for TT and EE spectra and $\Delta\ell = 30$ for BB) for a Λ CDM with $r = 0$ cosmological model.

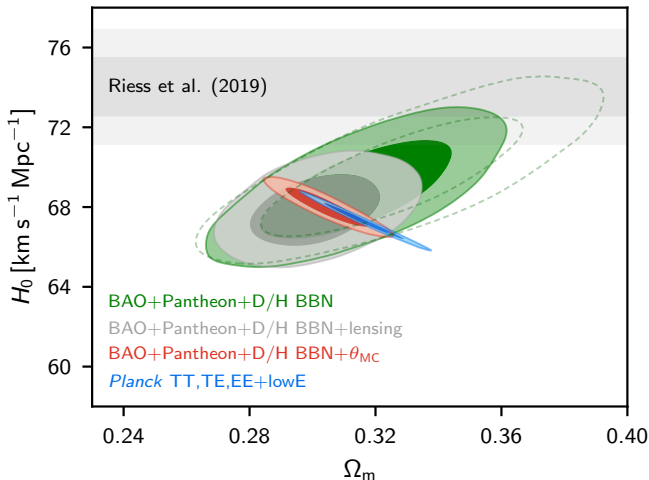
CMB-S4 – arXiv:1610.02743

Kosmiczne Promieniowanie Tła (CMB)



Planck 2018 Results – Planck et al. (2020), A&A 641, A6

Kosmiczne Promieniowanie Tła (CMB)



Planck 2018 Results – Planck et al. (2020), A&A 641, A6

Nieintegrowany efekt Sachsa-Wolfe'a

Powstaje na powierzchni ostatniego rozproszenia. Fotony w gęstszych rejonach muszą wydostać się ze studni potencjału, tracąc przy tym energię. Wydają się być one poczerwienione (gravitational redshift).

Zintegrowany późny efekt Sachsa-Wolfe'a

Światło poruszając się przez Wszechświat, napotyka gromady galaktyk. Przyspieszona ekspansja spowodowana ciemną energią powoduje, że studnie potencjału zanikają w czasie potrzebnym fotonowi na pokonanie ich. Foton nabiera energii wpadając do studni potencjału (supergromady) i zatrzymuje część tej energii po wyjściu, po rozciągnięciu i spłyceciu studni.

Efekt Sunajewa-Zeldowicza

Większość barionów nie znajduje się w galaktykach, ale w gorącym gazie wewnątrz gromad (IntraCluster Medium). Galaktyki i gaz poruszają się w ramach tego samego potencjału grawitacyjnego (dostarczanego głównie przez ciemną materię). Gaz wewnątrz gromad ma bardzo wysokie temperatury, do $T \approx 10^8$ K, a zatem jest w pełni zjonizowany. Jego obecność objawia się emisją promieniowania rentgenowskiego.

Elektrony w ICM mogą przenosić energię do fotonów CMB poprzez odwrotne rozpraszanie Comptona. Mimo że rozpraszanie zmienia kierunek, w którym przemieszczają się fotony CMB, izotropia kosmicznego tła sprawia, że średnio całkowita liczba docierających do nas fotonów CMB pozostaje niezmienną.

Efekt Sunajewa-Zeldowicza



Figure 10.11: *Left:* The galaxy cluster Abell 1689 observed with the *Hubble Space Telescope* Advanced Camera for Surveys. This cluster is one of the largest concentrations of matter in the local Universe ($z = 0.1828$), with a mass $M \simeq 10^{15} M_{\odot}$. *Right:* The X-ray image of the cluster (shown here superimposed on the *HST* image taken in visible light) obtained by the *Chandra* observatory shows diffuse emission from intracluster gas at temperatures $T \sim 10^8$ K.