

Ewolucja Wszechświata

Wykład 6

Mikrofalowe promieniowanie tła

Rozseparowanie materii i promieniowania

380 000 lat

Temperatura ≈ 3000 K

Protony i jądra przyłączają elektrony (rekombinacja) – tworzą się atomy.

Promieniowanie nie jest w stanie istotnie oddziaływać z materią, w efektywny sposób jonizować i wzbudzać atomów.

*Materia nie ma wpływu na promieniowanie -
promieniowanie reliktowe*

Od tej chwili temperatura promieniowania maleje wraz z ekspansją Wszechświata:

$$T \propto \frac{1}{R}$$

Obecna wartość $T = 2,73$ K



Promieniowanie reliktowe

Energia fotonu:

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

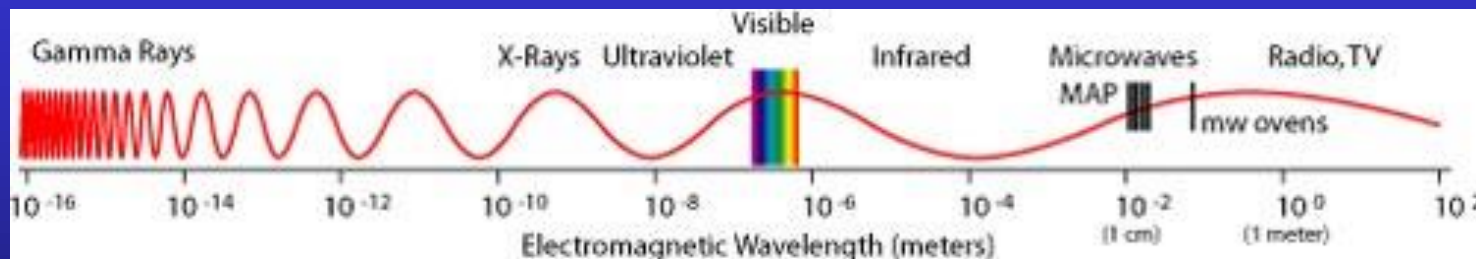
Średnia energia fotonu
zależy od temperatury:

$$\bar{E} = \text{cons} \cdot T$$

Średnia energia fotonu
maleje wraz z temperaturą



Długość fali fotonu rośnie



3000 K

2,73 K

temperatura

Promieniowanie reliktowe

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



1978

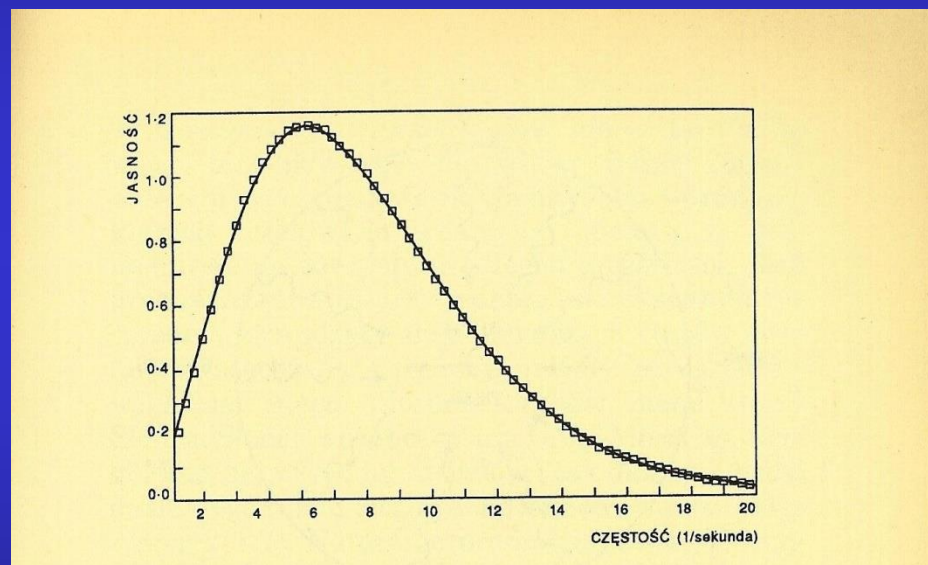
1992 r. sonda kosmiczna COBE



2006

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

→
Wyniki COBE



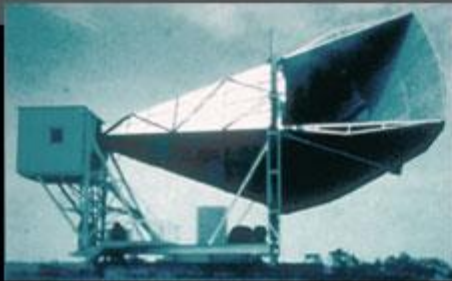
$$T = (2,725 \pm 0,002) \text{ K}$$

2001 r. sonda kosmiczna WMAP (Wilkinson Microwave Anizotropy Probe)

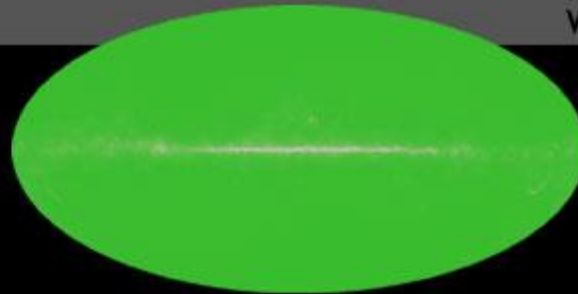


Promieniowanie reliktowe

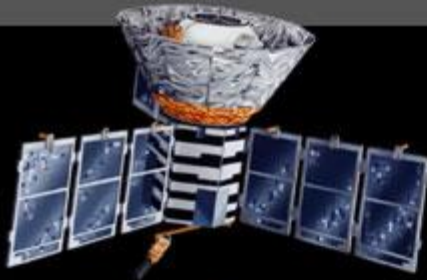
1965



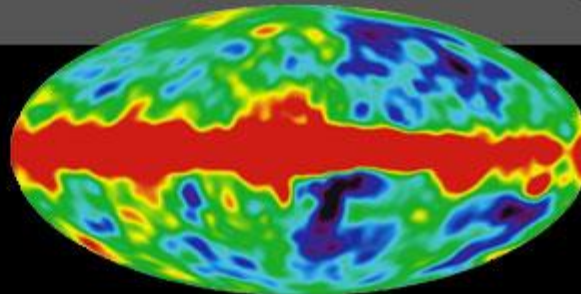
Penzias and
Wilson



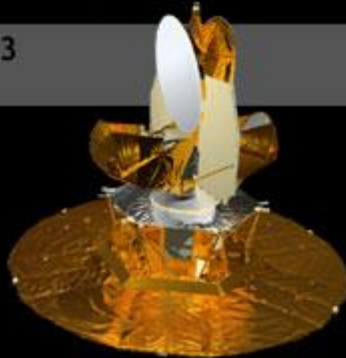
1992



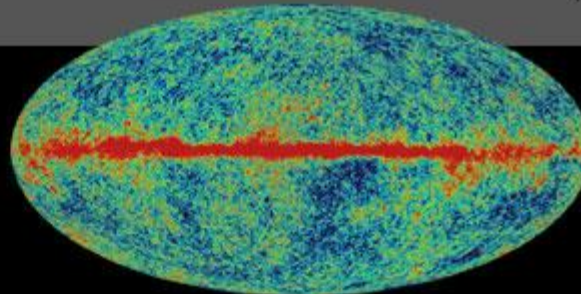
COBE



2003



WMAP



Animacja z <http://map.gsfc.nasa.gov/media/030653/index.html>

kliknij

Eksperyment WMAP

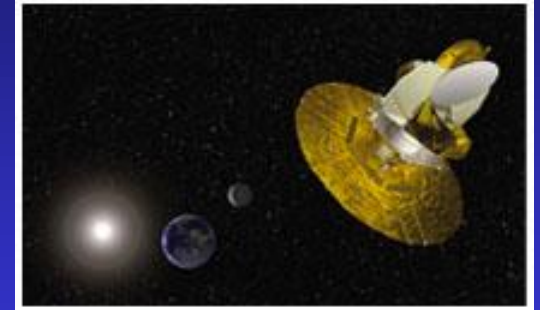
Sonda kosmiczna wystrzelona 30.06.2001 roku

Pomiar promieniowania mikrofalowego w 5 przedziałach częstości: od 23 GHz (13 mm) do 94 GHz (3,2 mm).

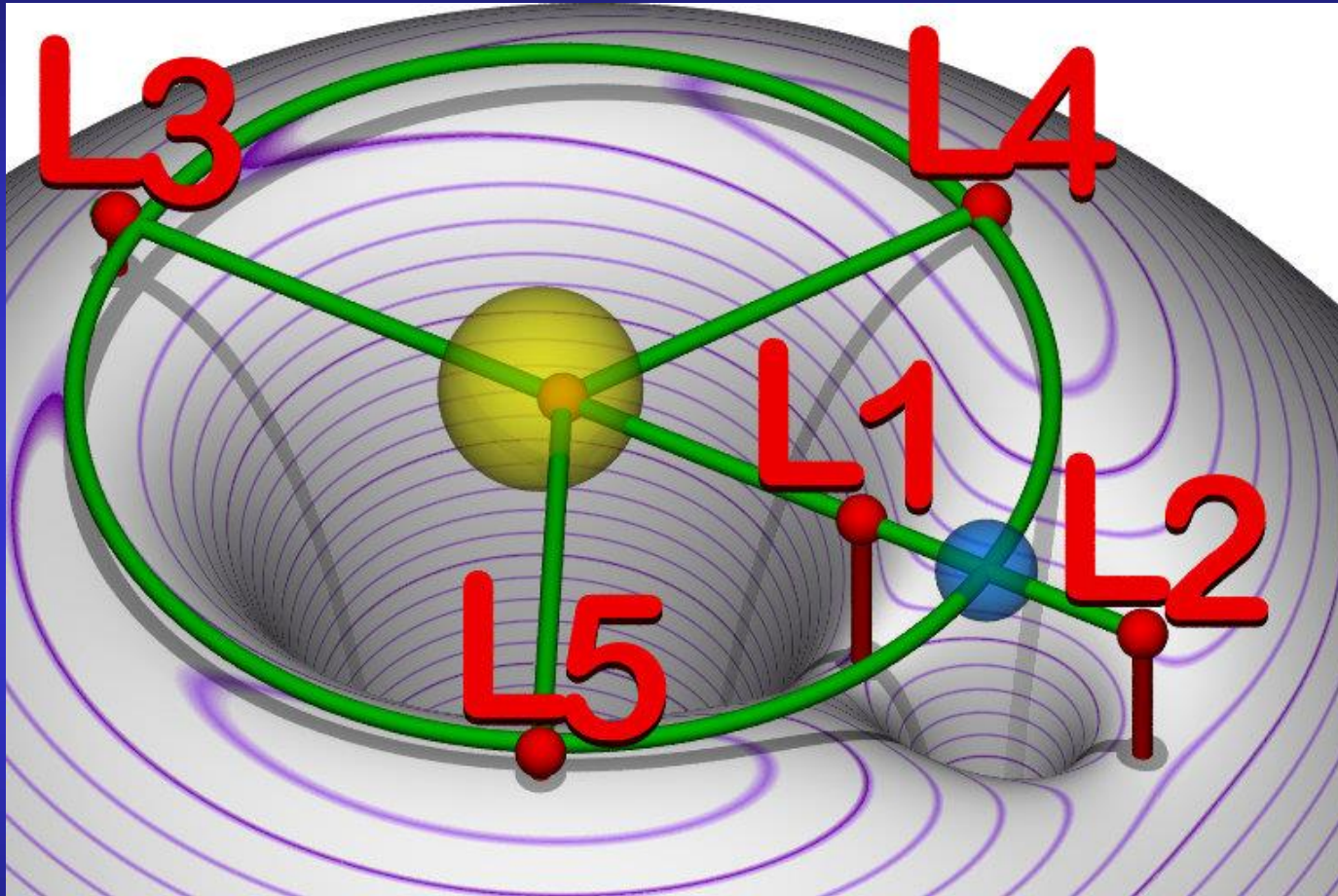
Porównanie pomiarów w różnych zakresach częstości umożliwia odjęcie tła pochodzącego od Galaktyki.

Aby zminimalizować tło pochodzące od Ziemi i Słońca sondę umieszczono na orbicie wokół tzw. punktu Lagrange'a

Quasi-stabilna konfiguracja WMAP – Ziemia -Słońce



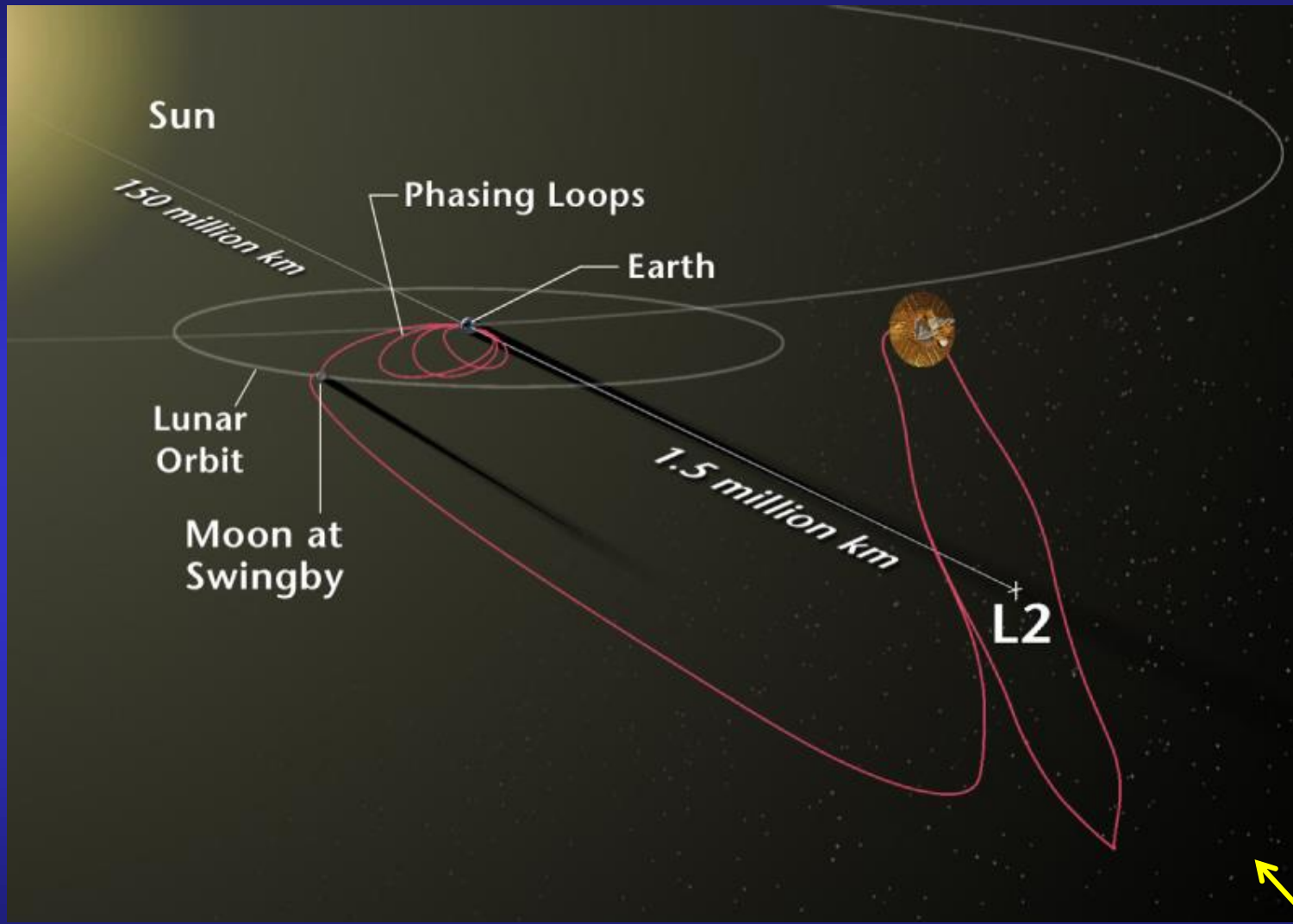
Punkty Lagrange'a w układzie Słońce - Ziemia



<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24680165>

W punktach Lagrange'a potencjał pola grawitacyjnego osiąga ekstremum

Eksperyment WMAP



Animacja z <http://map.gsfc.nasa.gov/media/990535/index.html>

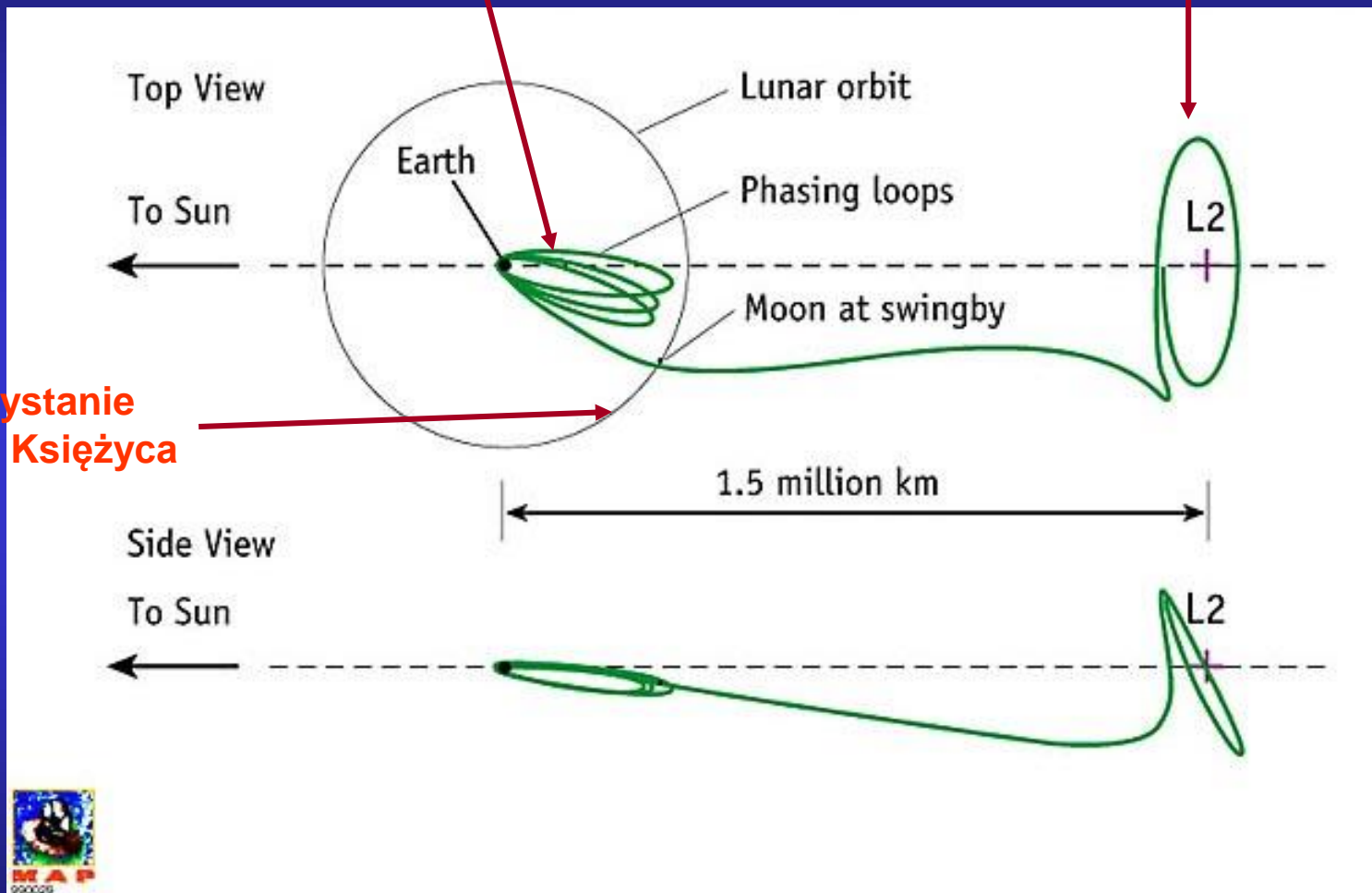
[kliknij](#)



Eksperyment WMAP

1. Trzy pętle wokół Ziemi

WMAP na orbicie –
„tyłem” do Ziemi i Słońca

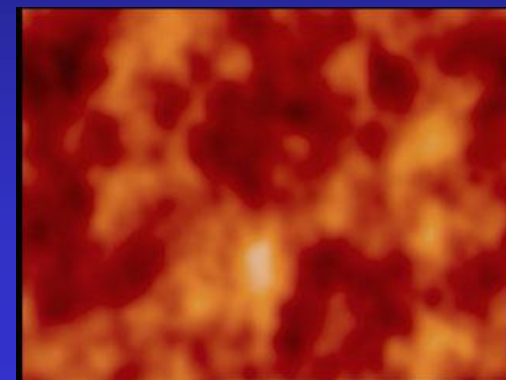


2. Wykorzystanie gravitacji Księżyca

Animacja z <http://map.gsfc.nasa.gov/media/990533/index.html>

kliknij

Podróż w czasie

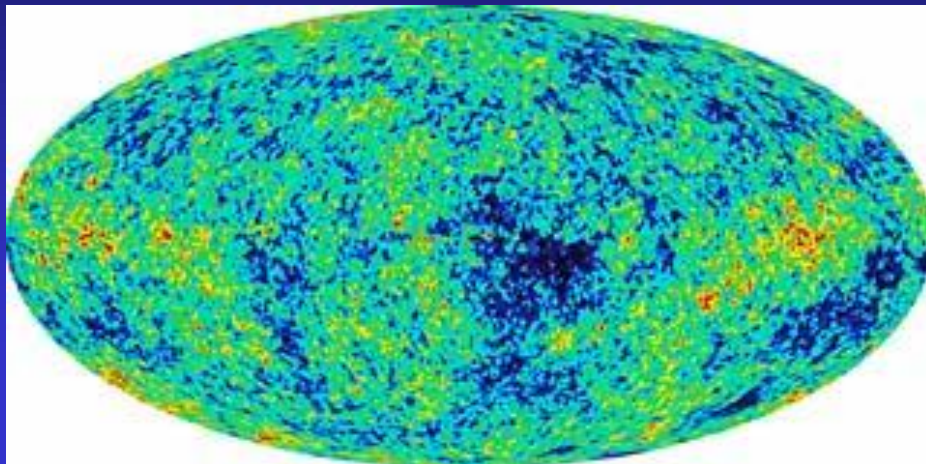


kliknij

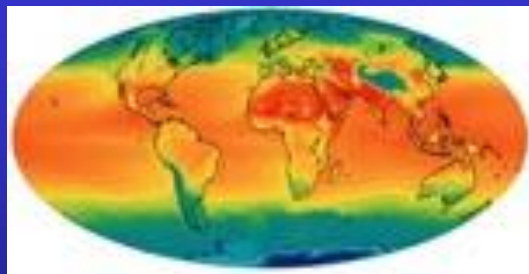
Animacja z <http://map.gsfc.nasa.gov/media/030657/index.html>

Oddalając się od Ziemi, cofamy się w czasie. Dochodzimy do momentu, gdy Wszechświat wypełniał zjonizowany gaz. Gdy jego temperatura spadła do 3000 K, powstały atomy i promieniowanie z tego momentu zarejestrował WMAP.

Eksperyment WMAP



Różne kolory oznaczają różne temperatury.



Mapa temperatur Ziemi.

Fluktuacje temperatury promieniowania tła – fotografia rozkładu materii we Wszechświecie w wieku 380 000 lat .

Bez fluktuacji gęstości nie powstałyby galaktyki.



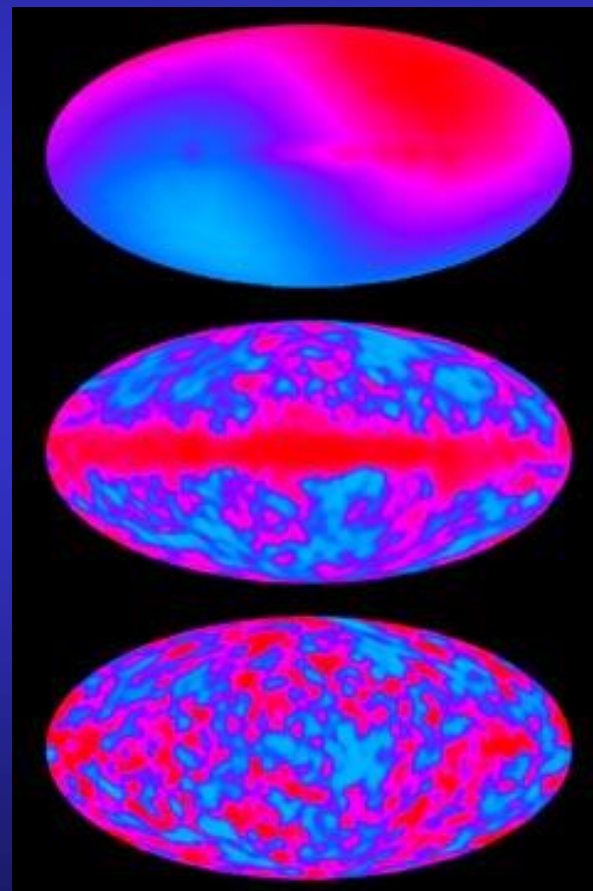
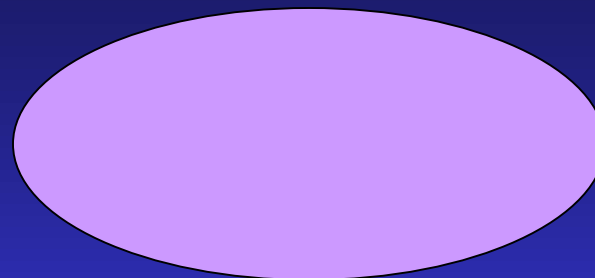
Fluktuacje temperatury

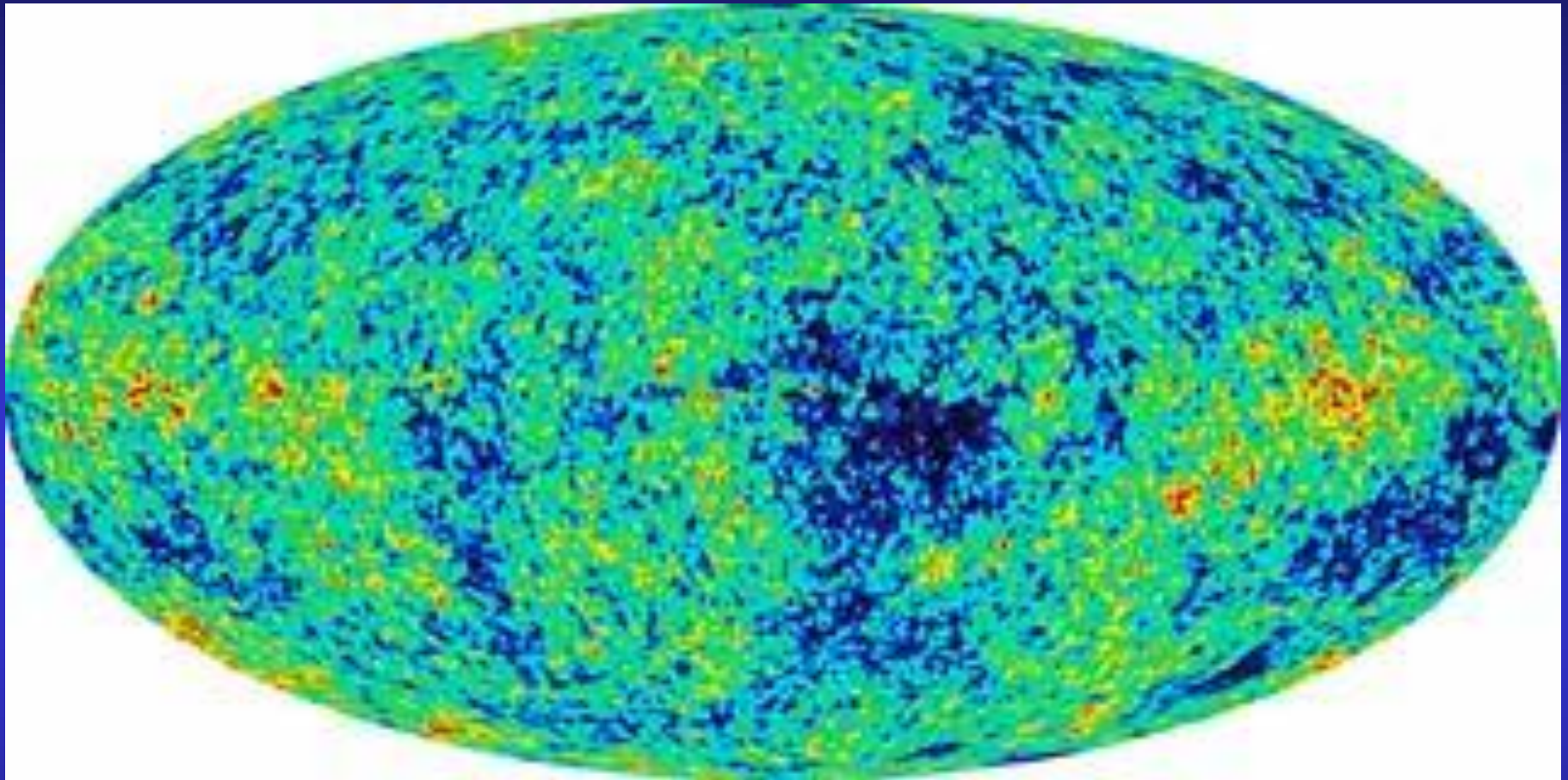
W pierwszym przybliżeniu promieniowanie jest izotropowe ($\Delta T \approx 0,1$ K)

Wpływ ruchu Ziemi względem „globalnego” układu z prędkością 337 km/s ($\Delta T \approx 1$ mK)

Po odjęciu efektu Dopplera widzimy promieniowanie naszej Galaktyki ($\Delta T \approx 200$ μ K)

Po odjęciu promieniowania Galaktyki i innych znanych źródeł ($\Delta T \approx 100$ μ K)

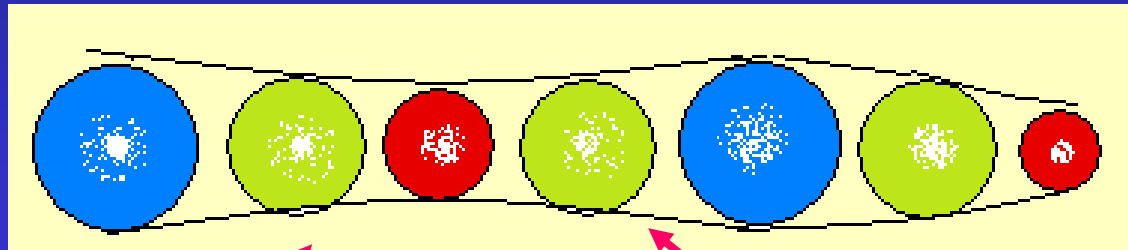




Fluktuacje temperatury promieniowania tła – fotografia rozkładu materii we Wszechświecie w wieku 380 000 lat .

Eksperyment WMAP

Przed fazą rekombinacji istniały w ośrodku fluktuacje gęstości energii (i temperatur).

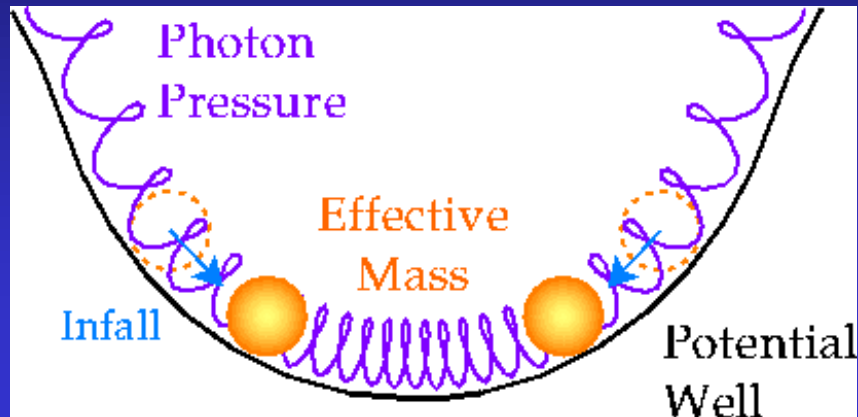


Obszary o gęstości większej niż średnia, kurczyły się pod wpływem grawitacji i nagrzewały.

Jednocześnie wzrastające z temperaturą ciśnienie promieniowania prowadziło do zahamowania kolapsu i do rozszerzania.

Obszar taki oscylował z amplitudą i częstotliwością, które związane były z warunkami fizycznymi ośrodka.

Eksperyment WMAP



sprężynki - ciśnienie fotonów
kulki - efektywna masa cieczy.

- W studni potencjału grawitacyjnego (wyznaczonego przez ciemną materię) znajduje się ciecz barionowo-fotonowa.
- Ciśnienie promieniste fotonów przeciwdziała grawitacyjnej kompresji cieczy.
- W rezultacie powstają oscylacje akustyczne w cieczy.
- WMAP mierzy maksima i minima tych oscylacji, a w konsekwencji właściwości tej cieczy oraz potencjału grawitacyjnego.

Fluktuacje

W chwili przed rozpoczęciem inflacji:

$$t = 10^{-34} \text{ s}, \quad kT \cong 10^{14} \text{ GeV}$$

Maksymalna odległość między punktami połączonymi przyczynowo: $ct \cong 10^{-26} \text{ m}$

Zasada nieoznaczoności $\Delta E \cdot \Delta t \cong \hbar$ spowoduje wystąpienie różnic temperatury rzędu:

$$\Delta(kT) \cong \frac{\hbar c}{ct} \cong \frac{6,6 \cdot 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{10^{-26} \text{ m}} \cong 10^{10} \text{ GeV}$$

Fluktuacje temperatury i gęstości:

$$\frac{\Delta(kT)}{kT} \cong 10^{-4}$$

Fluktuacje

Kwantowe fluktuacje pola inflatonowego, wzmocnione ekspansją inflacji, utworzyły początkowe zaburzenia o amplitudach w przybliżeniu jednakowych we wszystkich skalach.

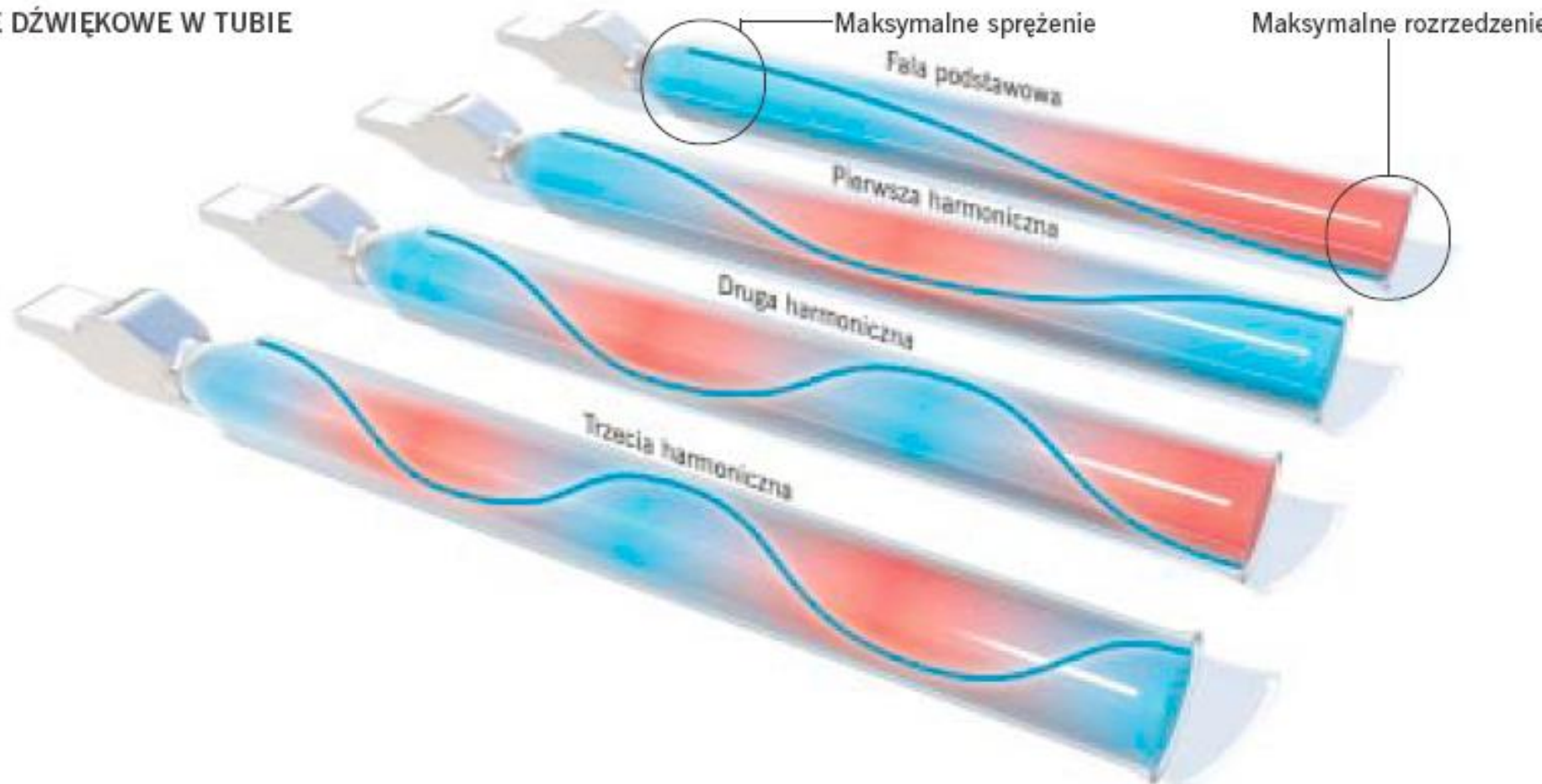
Inflacja wywołała wszystkie zaburzenia jednocześnie.



Fazy fal dźwiękowych były zsynchronizowane.

Powstało widmo podobne do widma dźwięków instrumentów muzycznych

FALE DŹWIĘKOWE W TUBIE



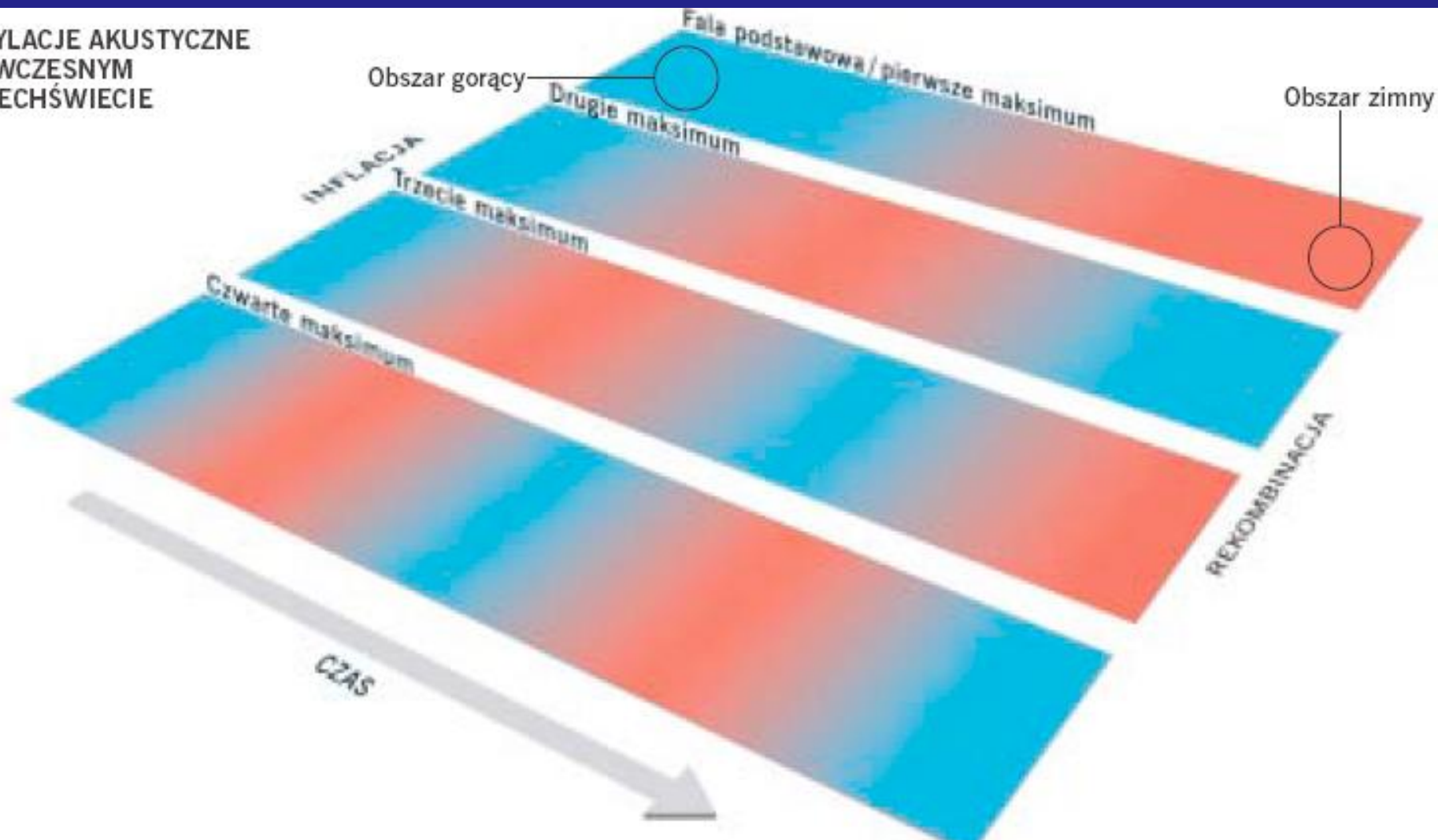
Świat Nauki 03-2004

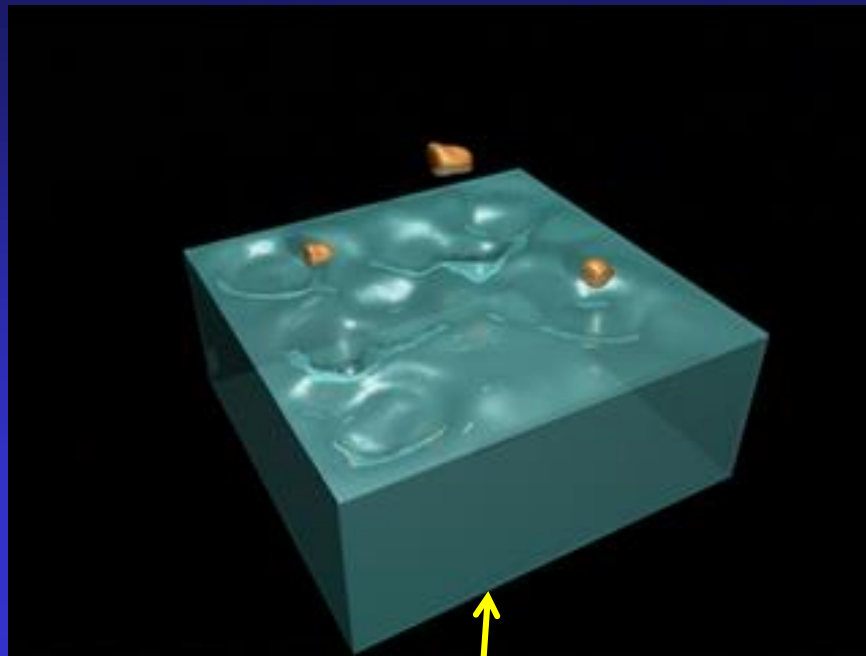
Wyższe harmoniczne
oscyłowały 2, 3 i więcej razy
szybciej niż fala podstawowa



W epoce rekombinacji maksima i
minima temperatury pojawiły się w
mniejszych obszarach.

OSCYLACJE AKUSTYCZNE
WE WCZESNYM
WSZECHŚWIECIE





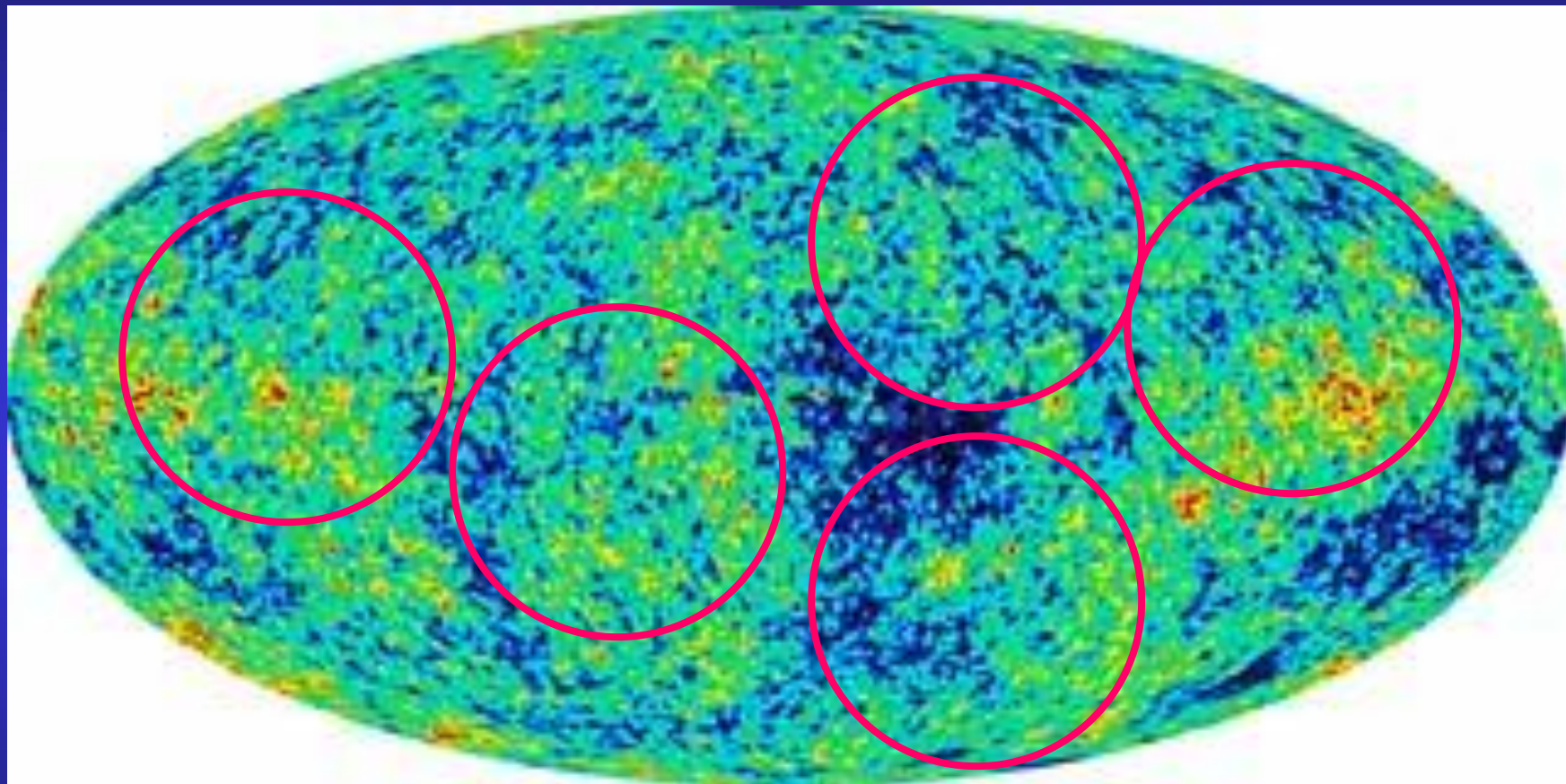
kliknij

Powstanie niejednorodności zjonizowanej materii Wszechświata można porównać do powstawania zmarszczek w cieczy.

Animacja z <http://map.gsfc.nasa.gov/media/030658/index.html>

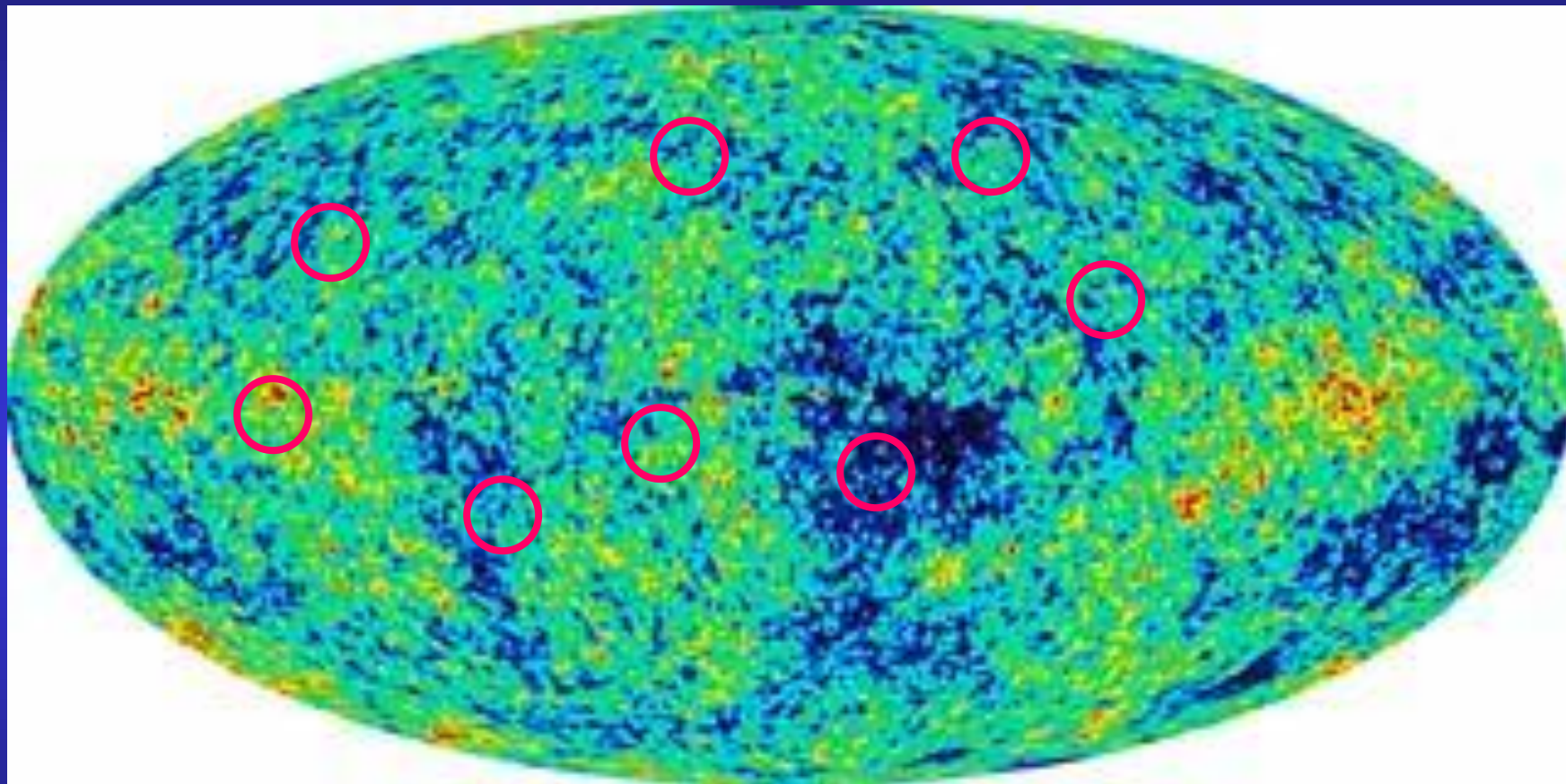


Eksperyment WMAP



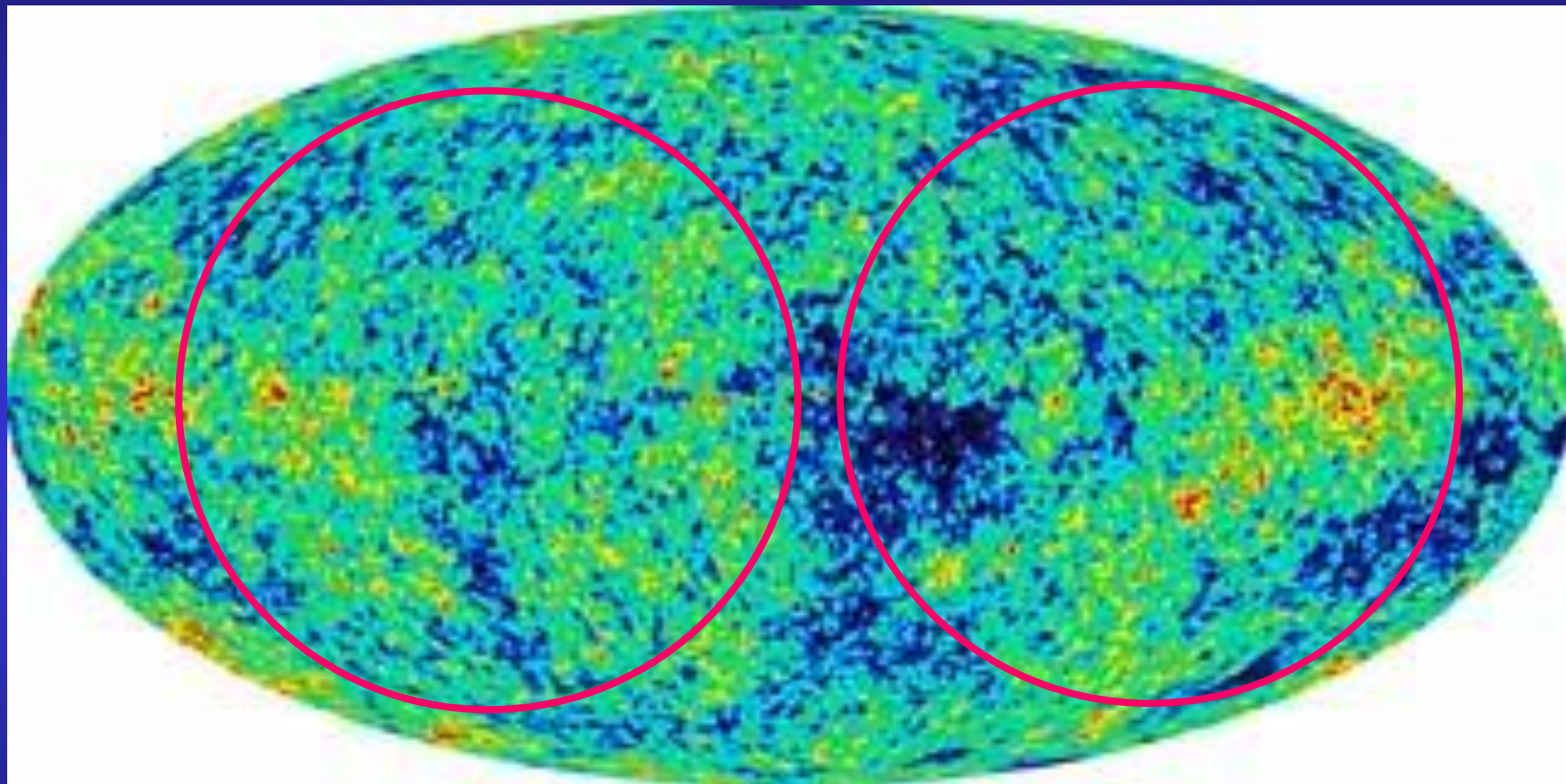
Analiza statystyczna fluktuacji – odstępstwa od średniej temperatury w obszarach o różnej skali.

Eksperyment WMAP



Analiza statystyczna fluktuacji – odstępstwa od średniej temperatury w obszarach o różnej skali.

Eksperyment WMAP

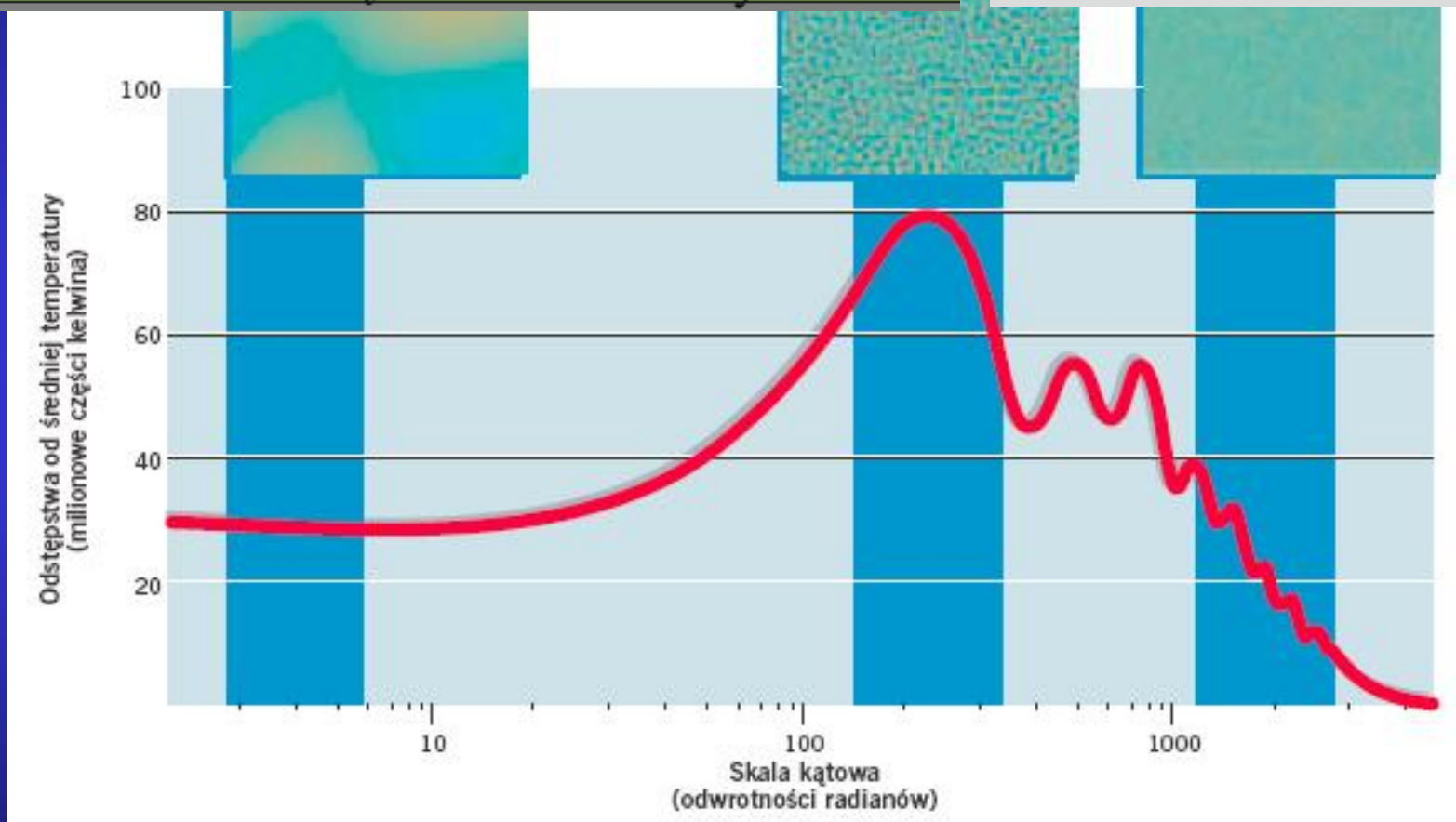


Analiza statystyczna fluktuacji – odstępstwa od średniej temperatury w obszarach o różnej skali.

Eksperyment WMAP

Analiza danych polega na rozłożeniu fluktuacji na f. sferyczno-harmoniczne. Współczynniki rozkładu tworzą tzw. rozkład mocy CMB.

$$\Delta(\theta, \varphi) = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta, \varphi)$$



90°

2°

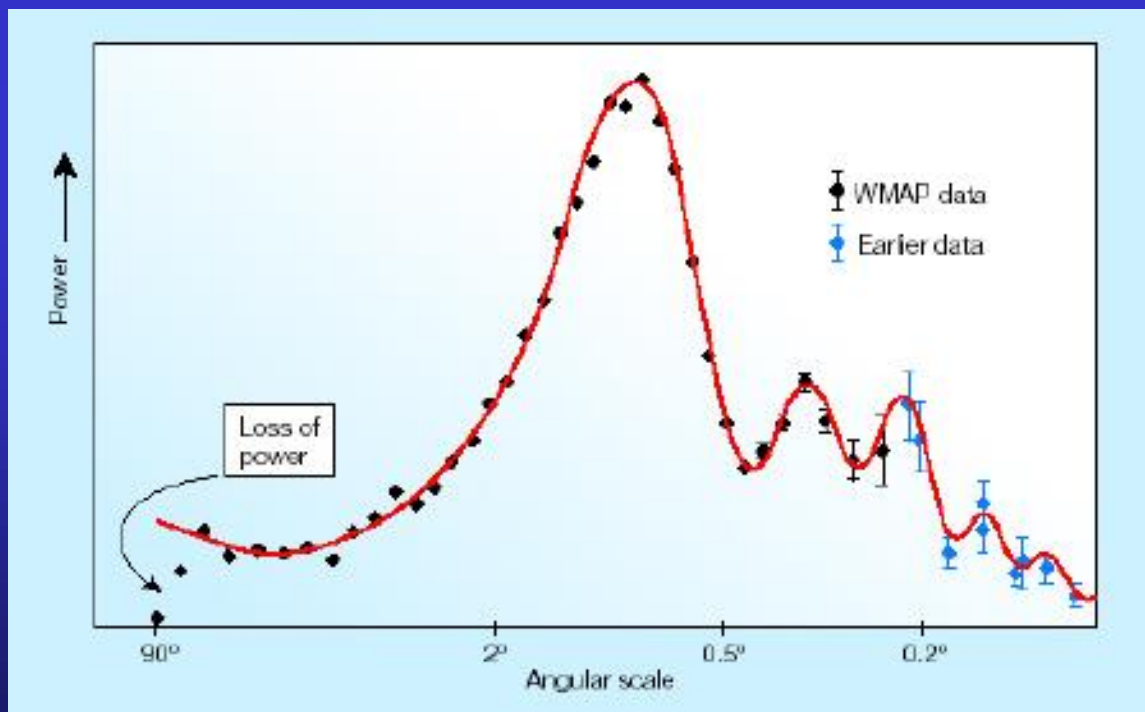
0,5°

0,2°

Pierwszy (największy) pik odpowiada modom fluktuacji o rozmiarach porównywalnych z rozmiarami horyzontu akustycznego w czasie ostatniego rozproszenia.

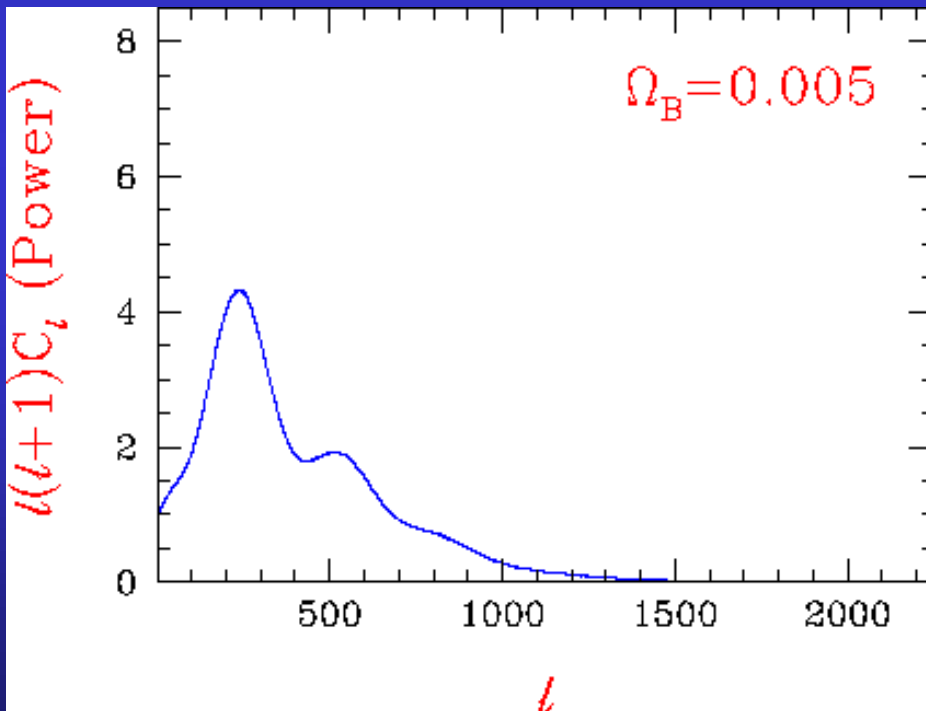
droga jaką może przebiec dźwięk w ciągu ok. 380 000 lat

Obszary największych odchyłeń zajmują na niebie około 1° łuku (2 średnice Księżyca) w momencie rekombinacji obszary te miały rozmiar około miliona lat świetlnych - teraz miliard lat świetlnych.

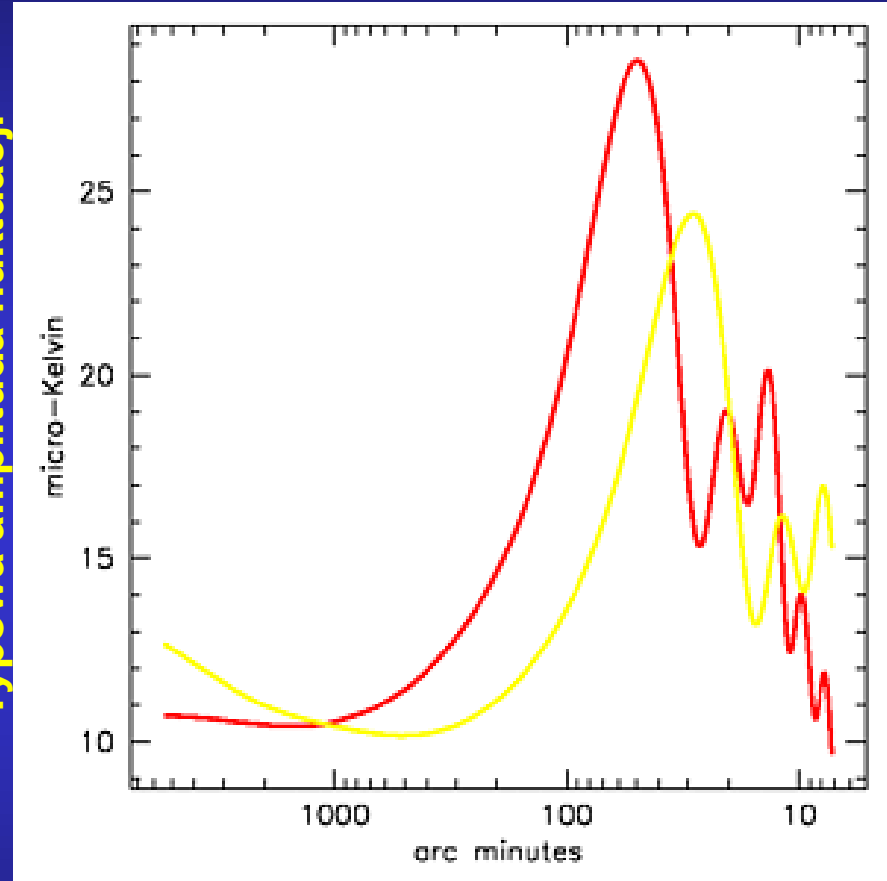


Eksperyment WMAP

Dwie krzywe teoretyczne obliczone dla różnych gęstości materii Wszechświata.



Typowa amplituda fluktuacji

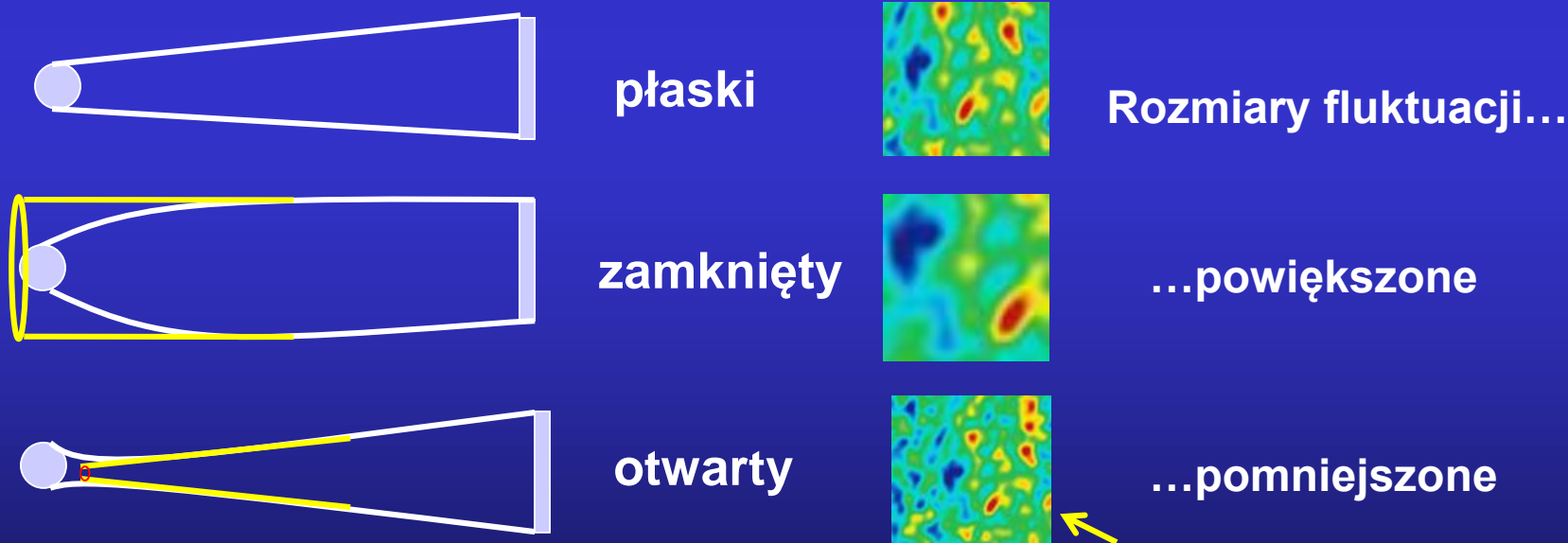


Kątowe rozmiary fluktuacji

Eksperyment WMAP

Typowe rozmiary fluktuacji odpowiadają „horyzontowi akustycznemu” — czyli rozmiarowi, jaki może przebiec dźwięk w ciągu ok. 380 000 lat.

Rozmiar takiego „horyzontu” można teoretycznie oszacować i policzyć, jakie powinny być rozmiary kątowe horyzontu, rzutowane dzisiaj na sferę niebieską. Wynik zależy od geometrii Wszechświata.



Animacja z <http://map.gsfc.nasa.gov/media/030639/index.html>

[kliknij](#)

Eksperyment WMAP

Precyzyjny pomiar korelacji kątowych w promieniowaniu tła umożliwił jednoczesne dopasowanie wielu parametrów.

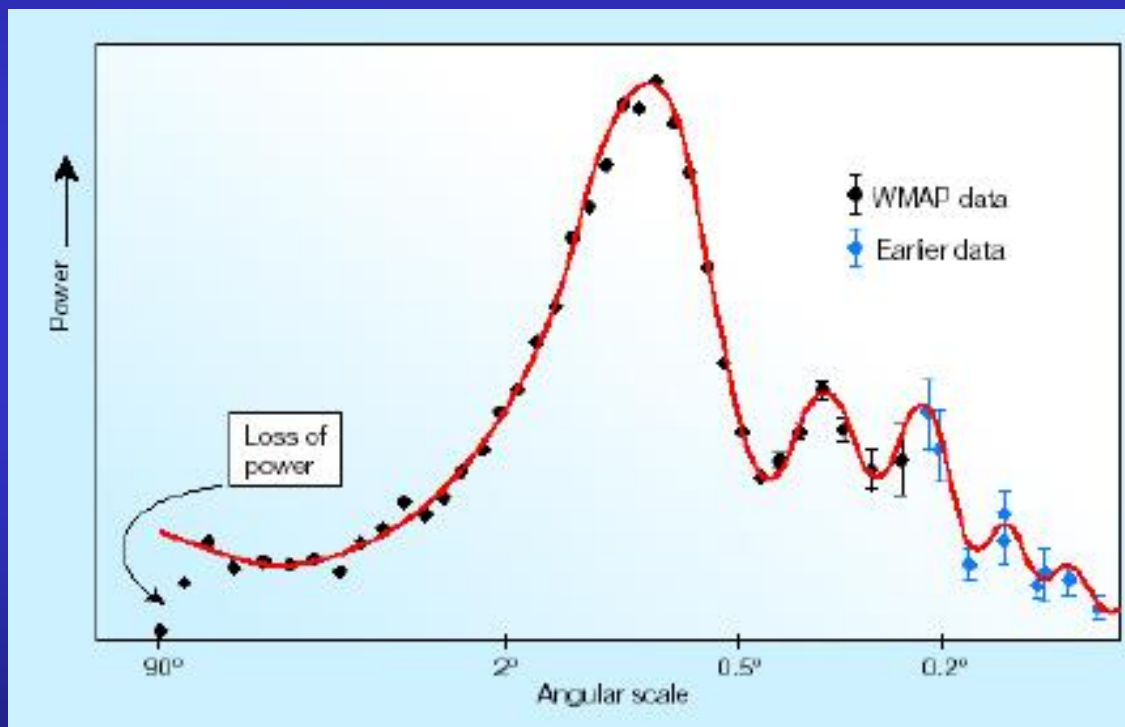
Dominują fluktuacje o rozmiarach kątowych rzędu $0,8^\circ$.



$$\Omega_{tot} = 1,02 \pm 0,02$$

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_k}$$

Wszechświat jest płaski!



Ciemna materia moduluje sygnały akustyczne w promieniowaniu tła.

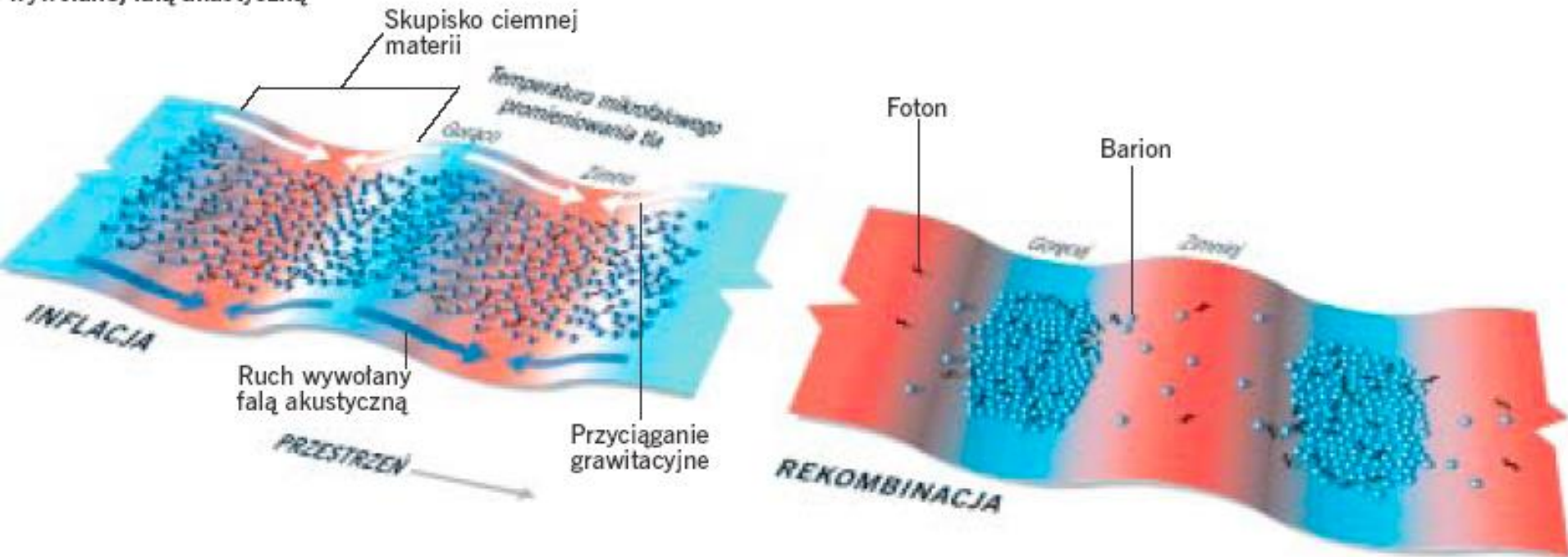
Pierwsze maksimum:

Po inflacji gęstsze obszary ciemnej materii wciągają siłami grawitacji bariony i fotony.

W epoce rekombinacji efekty grawitacji i fali akustycznej sumują się.

PIERWSZE MAKSYMUM

Współdziałanie grawitacji i prędkości
wywołanej falą akustyczną



Drugie maksimum:

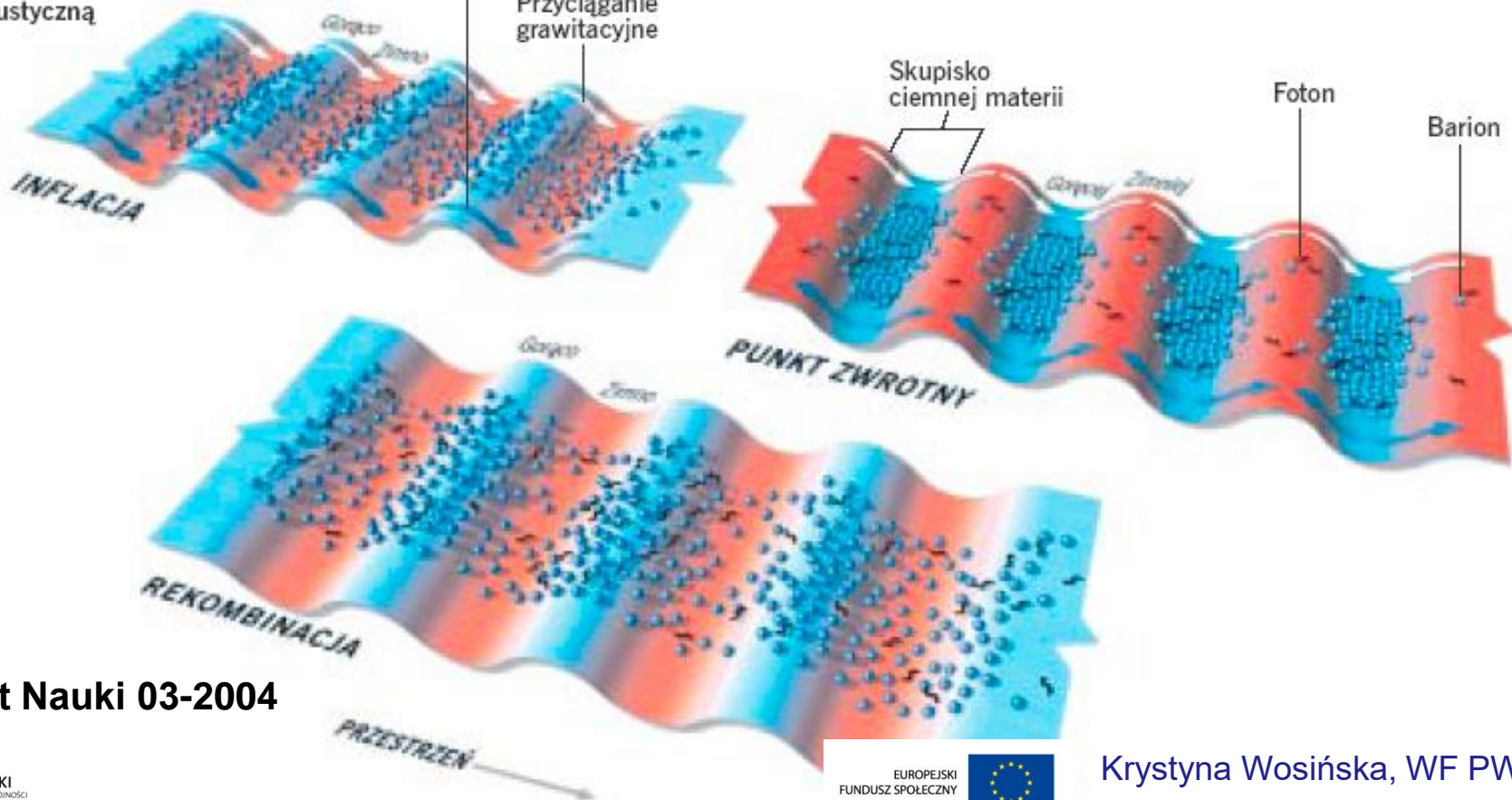
Skupiska ciemnej materii odpowiadające fali drugiego maksimum na długo przed rekombinacją maksymalizują temp. promieniowania w dolinach. Jest to punkt zwrotny – ciśnienie gazu zaczyna wypychać bariony i fotony z dolin. Efekt – drugie maksimum jest niższe.

DRUGIE MAKSYMUM

Grawitacja przeciwdziała ruchowi wywołanemu falą akustyczną

Ruch wywołany falą akustyczną

Przyciąganie grawitacyjne



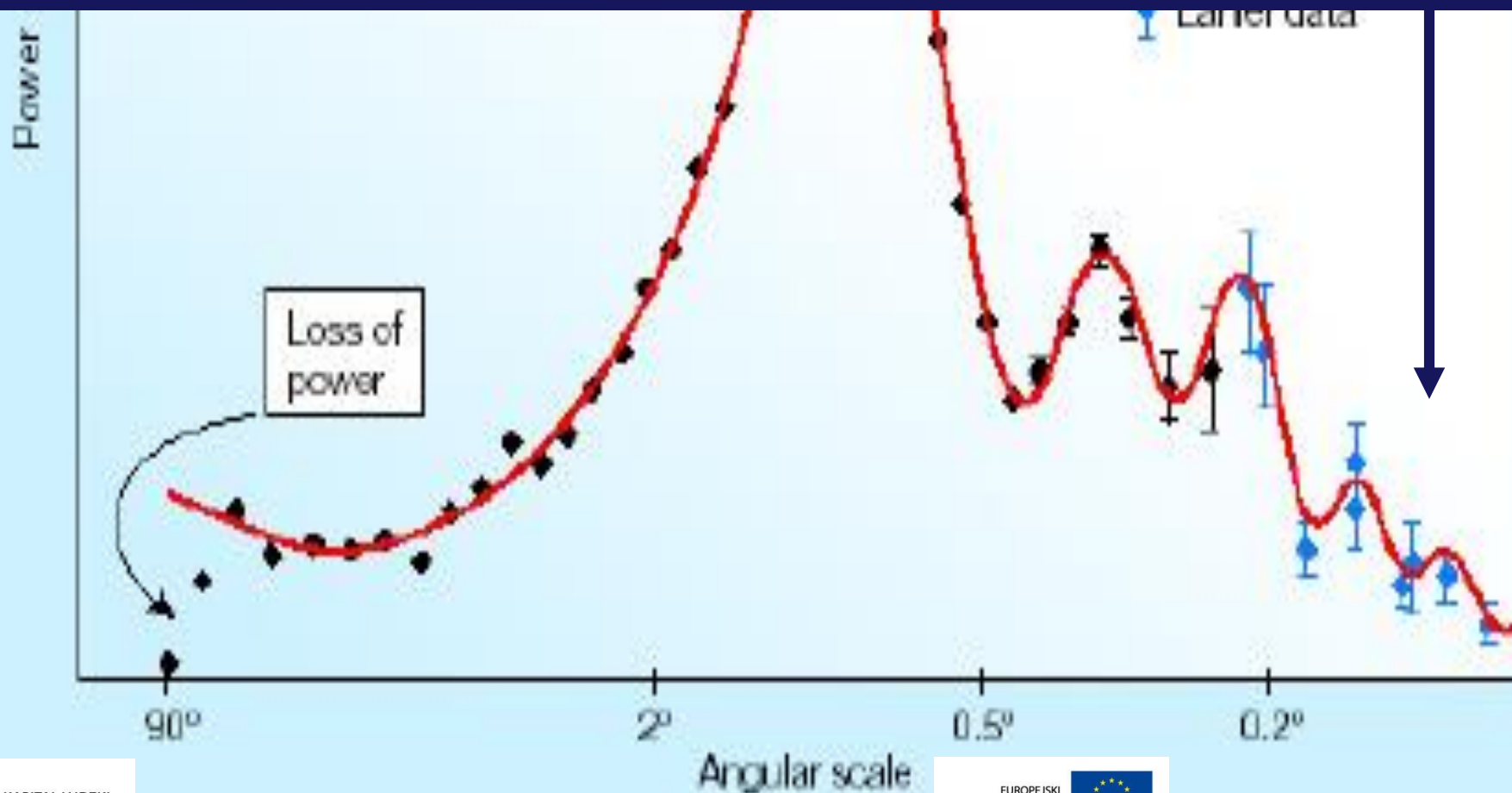
Świat Nauki 03-2004

Efekt ten wyjaśnia dlaczego pierwsze maksimum jest wyższe niż drugie.



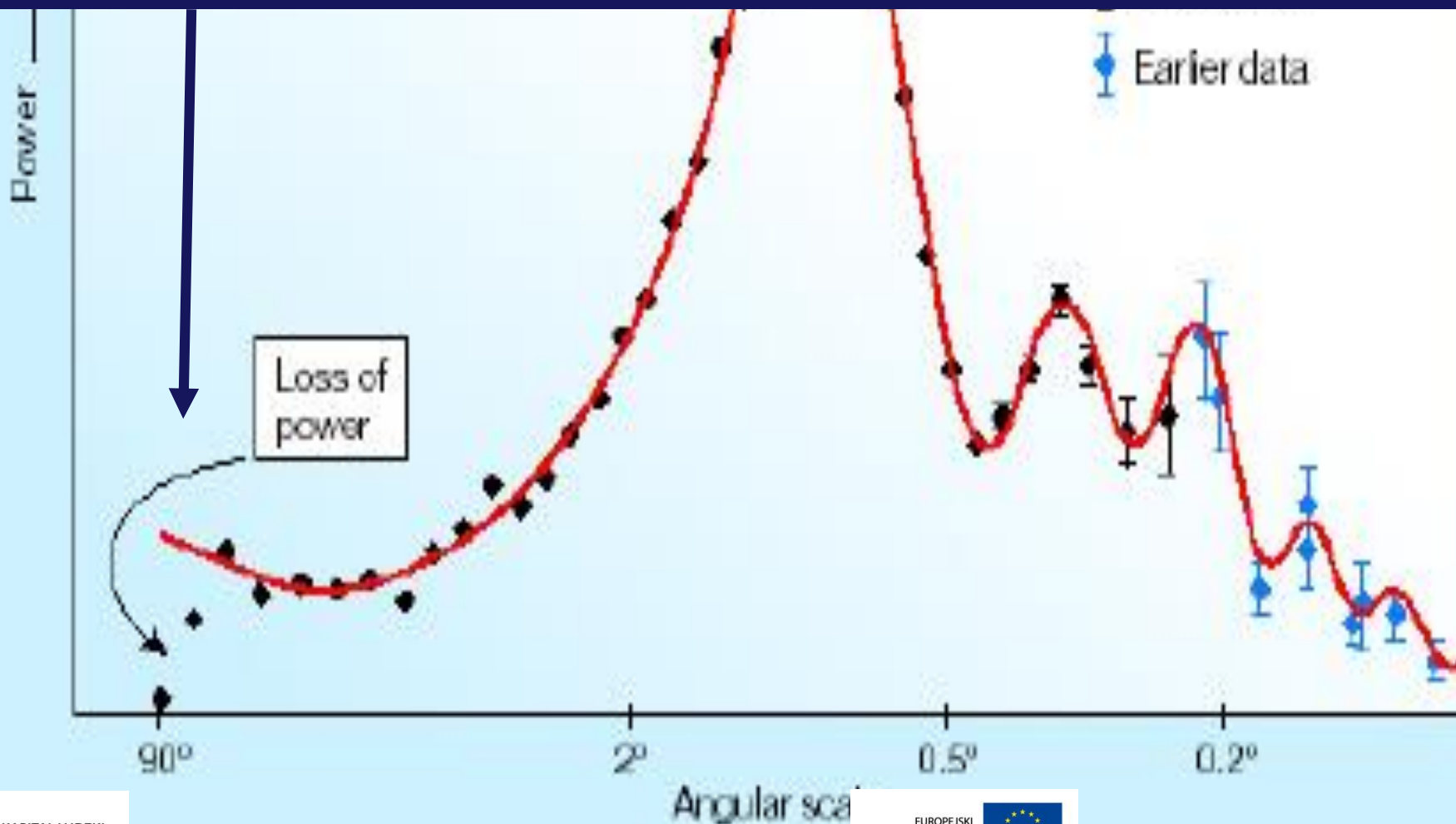
Porównując amplitudy maksimów można wyznaczyć gęstość materii barionowej i ciemnej materii.

Szybki spadek fluktuacji poza trzecim maksimum można wytłumaczyć tłumieniem fal dźwiękowych. W ośrodku nie mogą rozchodzić się fale o długości mniejszej niż średnia droga swobodna cząsteczek. W pierwotnej plazmie wynosiła ona około 10 tys. lat świetlnych. Tłumienie zaczynało się w skalach 10 razy większych – dziś odpowiadają im odległości rzędu 100 mln lat świetlnych.

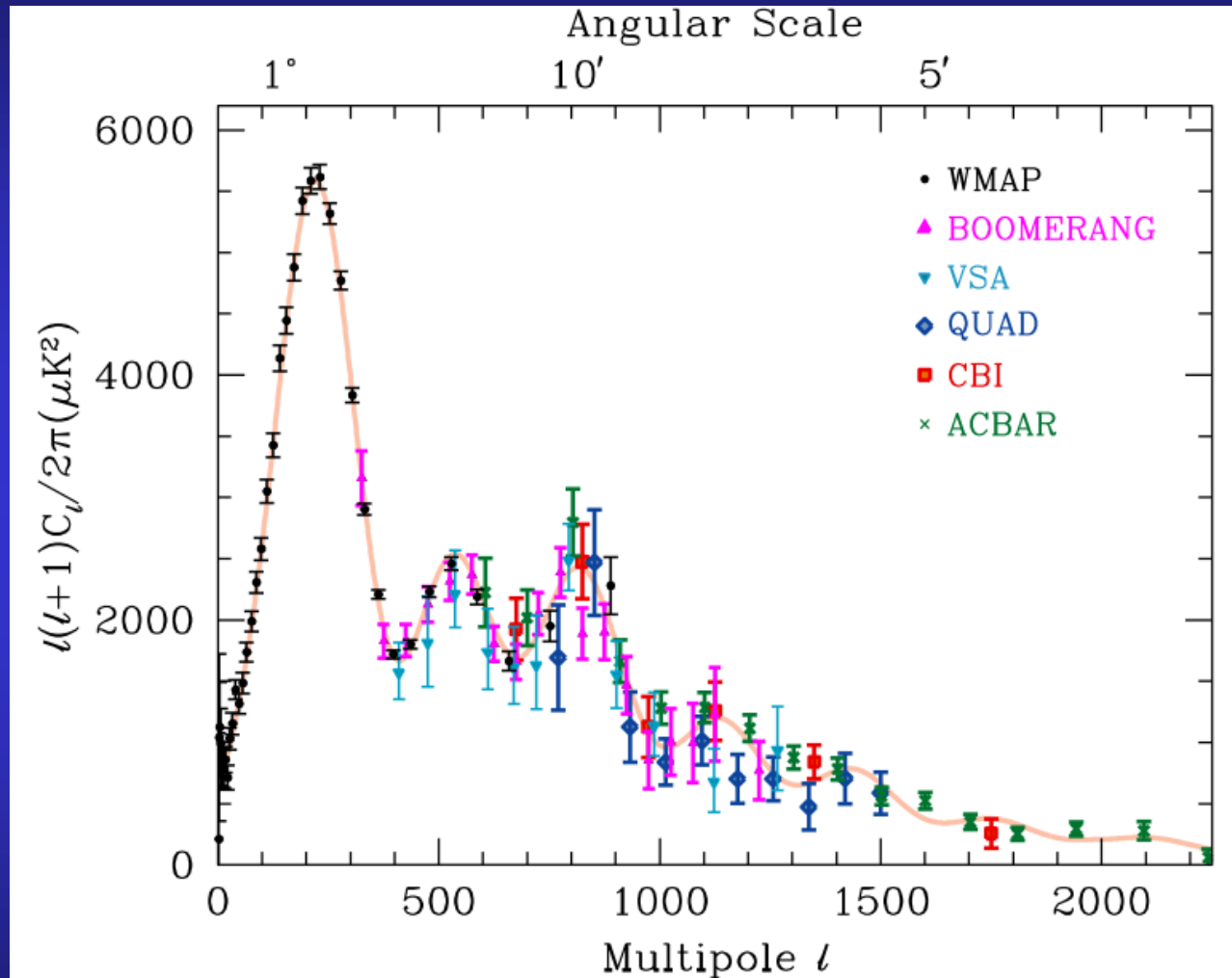


Fluktuacje mniejsze od przewidywanych.

- Fluktuacja statystyczna spowodowana małą liczbą rozłącznych obszarów o dużych rozmiarach?
- Niedoskonałość teorii inflacji, topologii Wszechświata itp.?



Podsumowanie różnych eksperymentów



Eksperyment WMAP

Stwierdzono polaryzację promieniowania mikrofalowego w dużych skalach kątowych na niebie.

Polaryzacja spowodowana rozpraszaniem na cząstkach naładowanych.

Kilkaset milionów lat po Wielkim Wybuchu około 17% fotonów promieniowania relikтового było rozpraszanych przez zjonizowany gaz.

Powstał on w wyniku powtórnej jonizacji kosmicznego wodoru i helu przez promieniowanie pochodzące z pierwszego pokolenia bardzo masywnych i gorących gwiazd.

Wniosek:

Pierwsze gwiazdy w epoce około 300 mln lat po Wielkim Wybuchu.

Eksperyment WMAP

Wyniki:

Atomy (bariony) wypełniają tylko 4%
Wszechświata.

23% stanowi ciemna materia

73% to „ciemna energia”, którą
opisujemy przez stałą kosmologiczną.

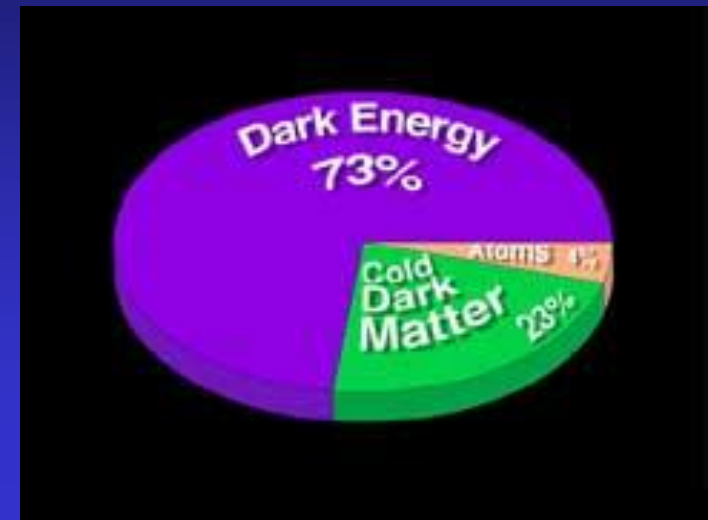
„Ciemna energia” powoduje
przyspieszenie ekspansji Wszechświata!

Wiek Wszechświata – 13,7 mld lat (z dokł. 1%)

Promieniowanie reliktowe pochodzi z okresu 379 000 lat po Big Bang

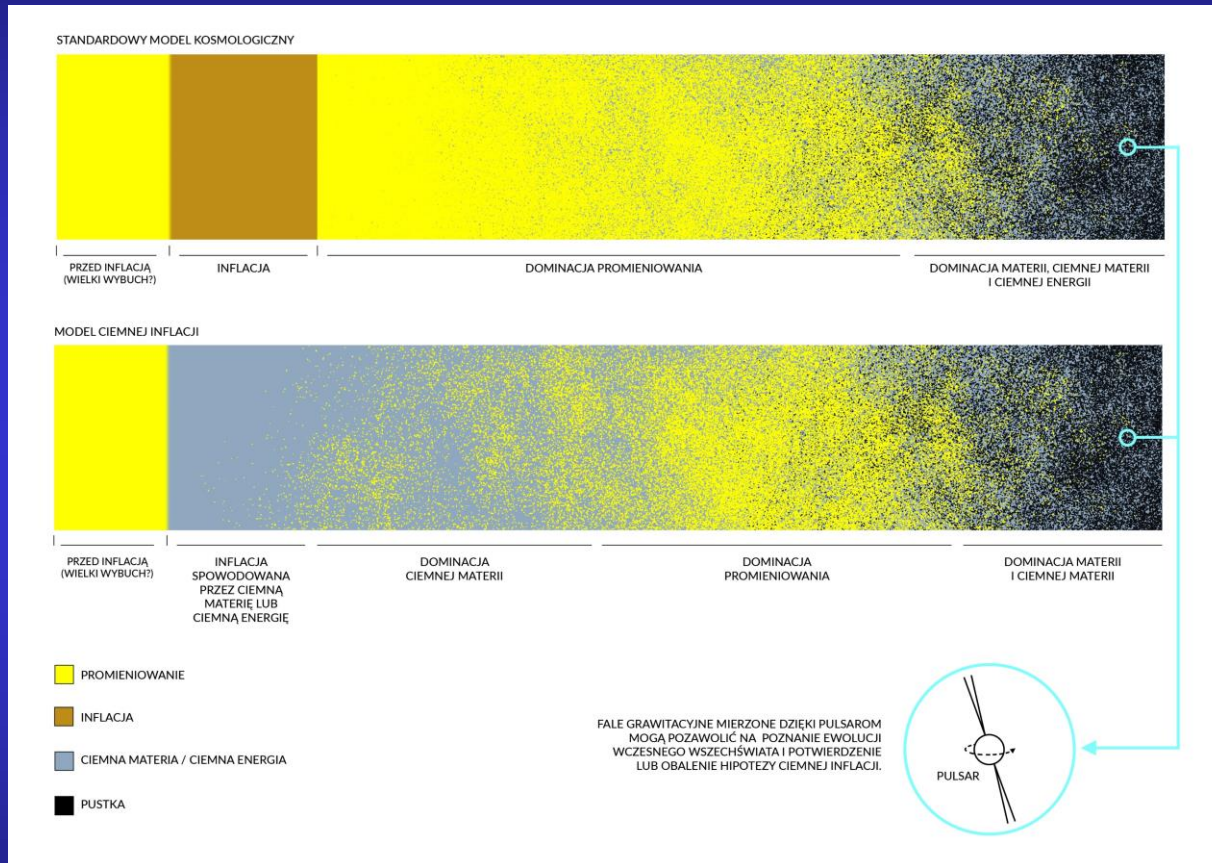
Pierwsze gwiazdy powstawały 300 mln lat po Big Bang

Polaryzacja promieniowania – dodatkowy dowód teorii inflacji.



Nowy model ciemnej inflacji

...zapropnowany przez teoretyków z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.



Pierwotne fale grawitacyjne możliwe do obserwacji!

„Gravitational wave signals and cosmological consequences of gravitational reheating”

M. Artymowski, O. Czerwińska, Z. Lalak, M. Lewicki

Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, Volume 2018, April 2018; DOI:

10.1088/1475-7516/2018/04/046

Eksperyment Planck

2009 - 2013



- Mapa promieniowania z rozdzielczością 5 - 10 minut kątowych z rozdzielczością ($\Delta T/T$) rzędu 10^{-6} – pozwala to wyznaczyć fundamentalne parametry (krzywizna Wszechświata, stała Hubble'a, gęstość barionowa) z dokładnością kilku procent.

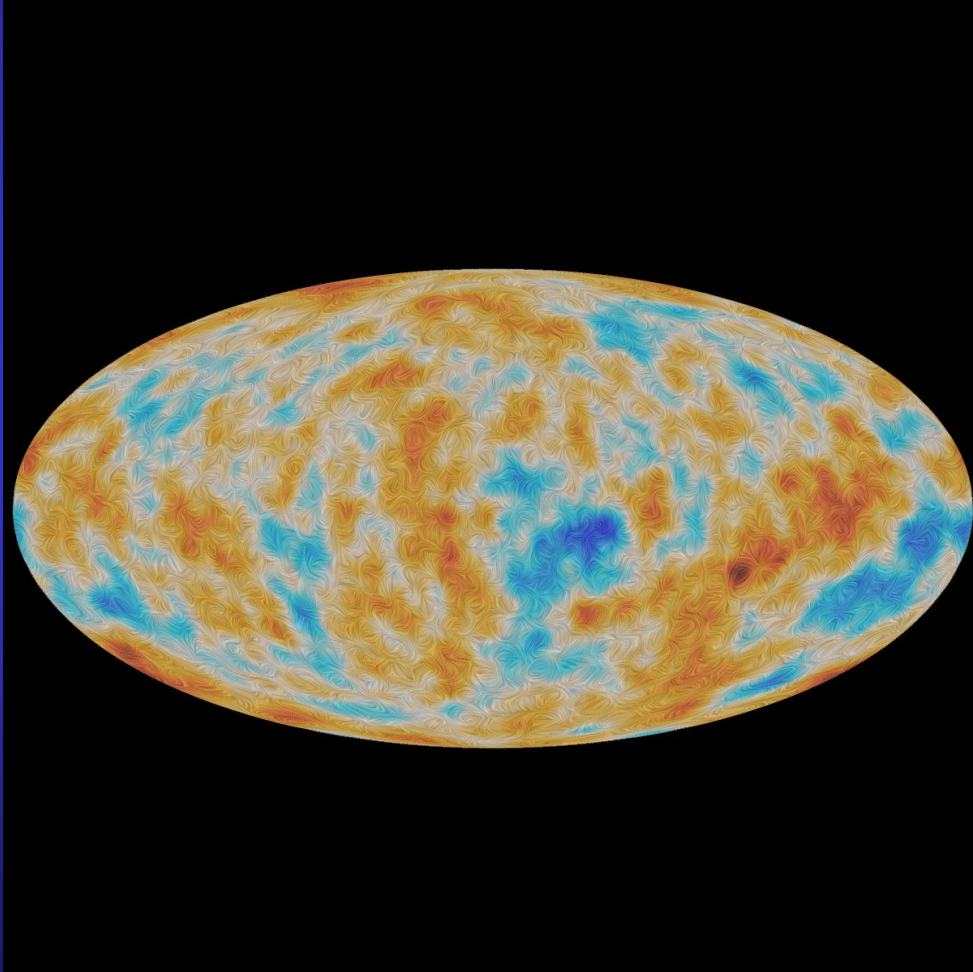
kliknij

Animacja z <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=30968>



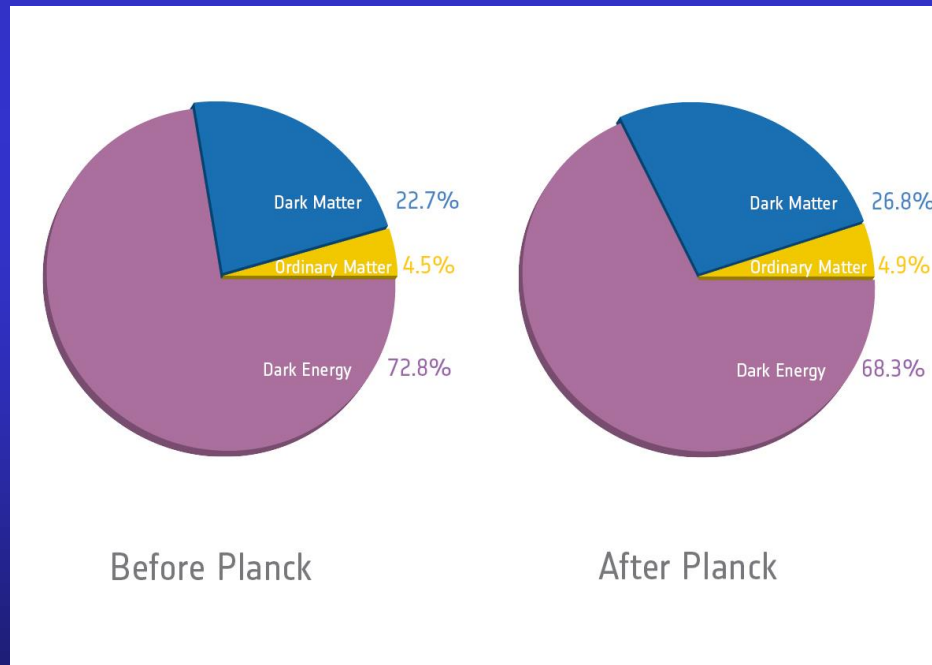
Eksperyment Planck

- Polaryzacja promieniowania – test teorii inflacji.



Eksperyment Planck

- **Wiek Wszechświata: $13,799 \pm 0,038$ mld lat (dokładność do 0,3%)**
- **Stała Hubble'a: $67,8 \pm 0,9$ km/s/Mpc (mniej niż 73 km/s/Mpc z supernowych Ia)**
- **Pierwsze gwiazdy powstawały 450 mln lat po Big Bang**



ESA and the Planck Collaboration

Pierwsze gwiazdy

Nature, 28 February 2018

Promieniowanie ultrafioletowe pierwszych gwiazd zmieniało obsadzenia nadsubtelnych poziomów energetycznych w atomach wodoru.

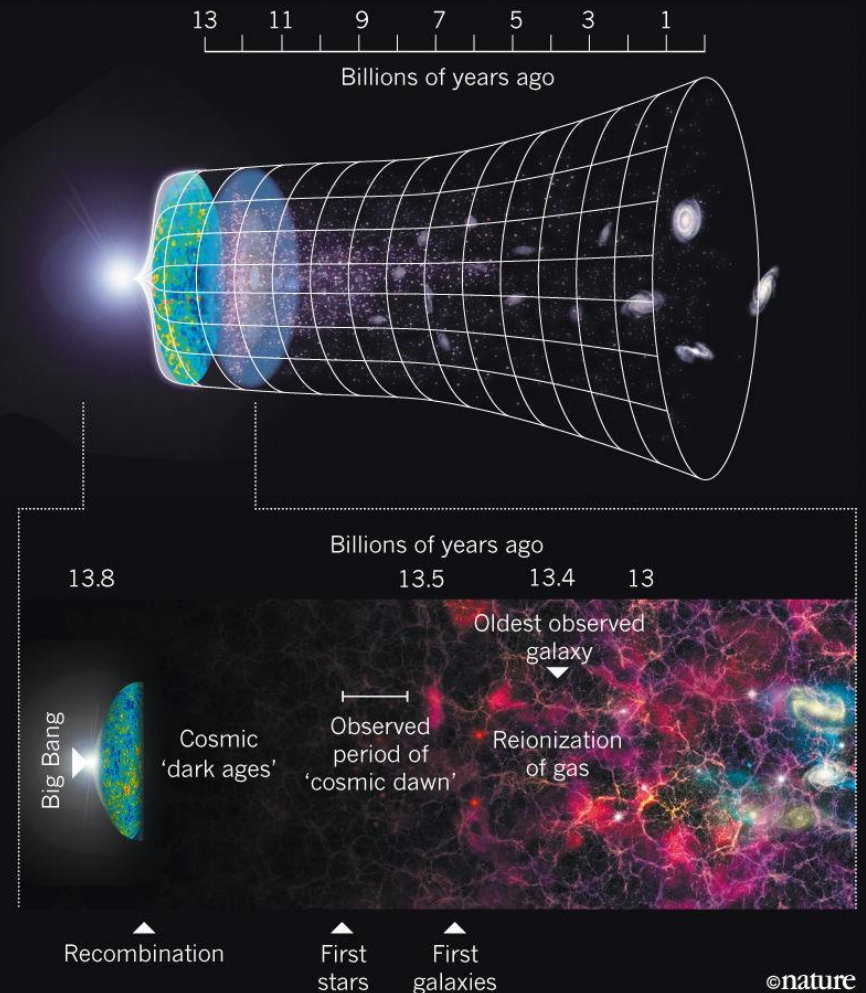


Wodór pochłaniał z mikrofalowego promieniowania tła falę o długości 21 cm (1420 MHz)

<https://www.nature.com/articles/d41586-018-02616-8>

DAWN'S EARLY LIGHT

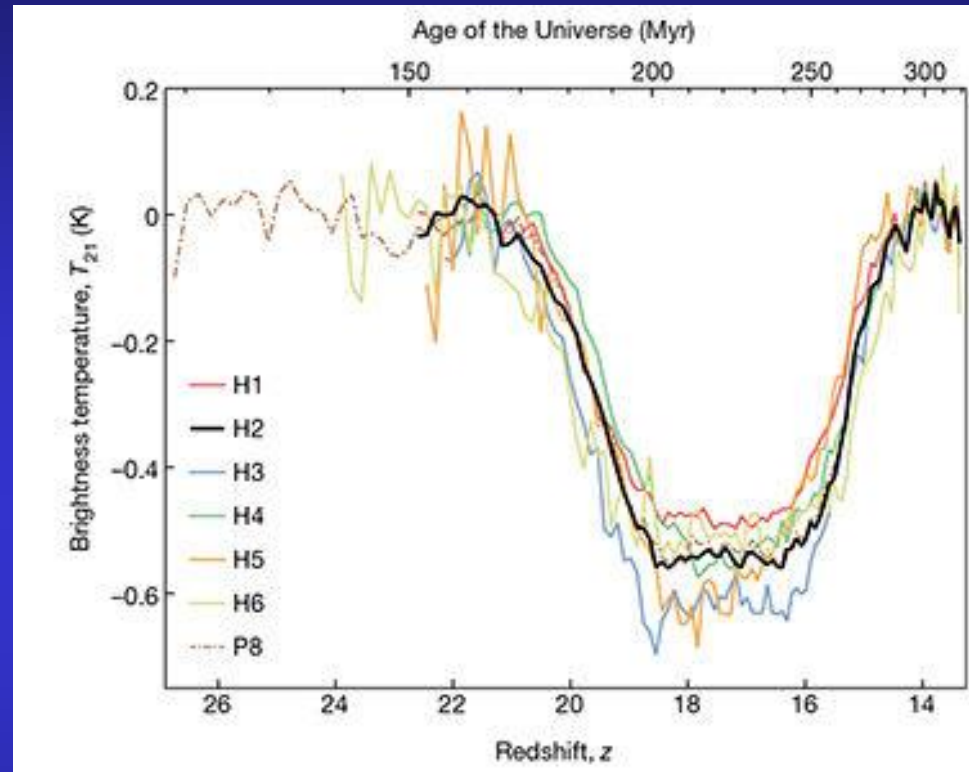
The Big Bang produced electrons and protons. As the Universe expanded and matter cooled, after around 380,000 years these formed into neutral hydrogen gas ('recombination'). Eventually gravity caused hydrogen to clump together enough to form the first stars and galaxies, a period known as the cosmic dawn. Light from these early stars would have radically altered the properties of the remaining gas, allowing it to absorb radiation from the afterglow of the Big Bang and creating a dip in the background radiation that astronomers believe they have seen. Eventually, energetic light from the stars heated the gas, quelling the signal, before ionizing all the remaining hydrogen ('reionization').



Pierwsze gwiazdy



Dwumetrowy radioteleskop w zachodniej Australii odebrał sygnał od najstarszych gwiazd.



Minimum w promieniowaniu tła dla częstotliwości 78 MHz – powstało 180 mln lat po Big Bang.

Głębokość minimum 2x większa niż oczekiwano – wodór był 2x chłodniejszy niż wynika z modeli ewolucji Wszechświata.

Historia Wszechświata



→ COSMIC HISTORY



10⁻³² seconds

1 second

100 seconds

380 000 years

300–500 million years

Billions of years

13.8 billion years

Beginning
of the
Universe



Inflation

Accelerated expansion of the Universe

Formation of light and matter

Light and matter are coupled

Dark matter evolves independently; it starts clumping and forming a web of structures

Light and matter separate

- Protons and electrons form atoms
- Light starts travelling freely; it will become the Cosmic Microwave Background (CMB)

Dark ages

Atoms start feeling the gravity of the cosmic web of dark matter

First stars

The first stars and galaxies form in the densest knots of the cosmic web

Galaxy evolution

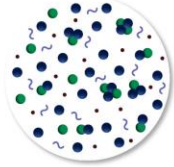
The present Universe



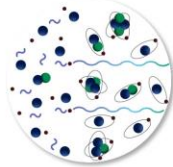
- *Tiny fluctuations: the seeds of future structures*
- *Gravitational waves?*



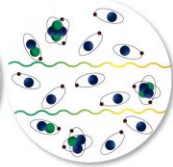
Frequent collisions between normal matter and light



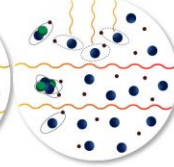
As the Universe expands, particles collide less frequently



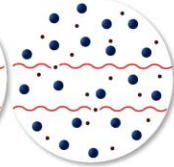
Last scattering of light off electrons
→ **Polarisation**



The Universe is dark as stars and galaxies are yet to form



Light from first stars and galaxies breaks atoms apart and "reionises" the Universe



Light can interact again with electrons
→ **Polarisation**

Historia Wszechświata

