

Наблюдательные основы космологии

ЛЕКЦИИ 5-6

Микроволновое фоновое реликтовое излучение и его анизотропия

д.ф.-м.н. Сажина Ольга Сергеевна

cosmologia@yandex.ru



Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

МФК-2020/2021

Программа курса

ЛЕКЦИЯ 1. Предмет науки космологии. Расширение Вселенной

ЛЕКЦИЯ 2. Поиск темной материи методами наблюдательной космологии.

Гравитационное линзирование (ЧАСТЬ I)

ЛЕКЦИЯ 3. Поиск темной материи методами наблюдательной космологии.

Гравитационное линзирование (ЧАСТЬ II)

ЛЕКЦИЯ 4. Темная энергия в ранней Вселенной и в современной Вселенной: теория инфляции и ускоренное расширение современной Вселенной

ЛЕКЦИЯ 5. Микроволновое фоновое реликтовое излучение и его анизотропия (ЧАСТЬ I)

ЛЕКЦИЯ 6. Микроволновое фоновое реликтовое излучение и его анизотропия (ЧАСТЬ II)

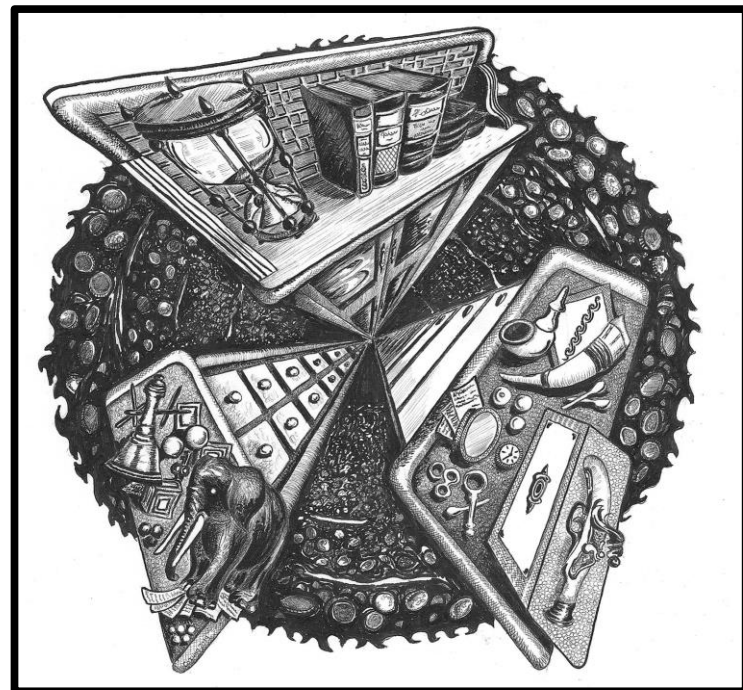
ЛЕКЦИЯ 7. Иерархия объектов во Вселенной.

Крупномасштабная структура Вселенной

ЛЕКЦИЯ 8. Распространенность легких химических элементов. За пределами Стандартной модели физики частиц

ЛЕКЦИЯ 9. Гравитационные волны. Открытие гравитационных волн в двойных системах черных дыр и нейтронных звезд. Поиск космологических гравитационных волн

ЛЕКЦИЯ 10. Космические струны



Пять ключевых наблюдательных тестов Стандартной космологической модели

1. Расширение Вселенной

2. Реликтовое излучение

3. Крупномасштабная структура Вселенной

4. Распространенность легких химических элементов

5. Анизотропия реликтового излучения

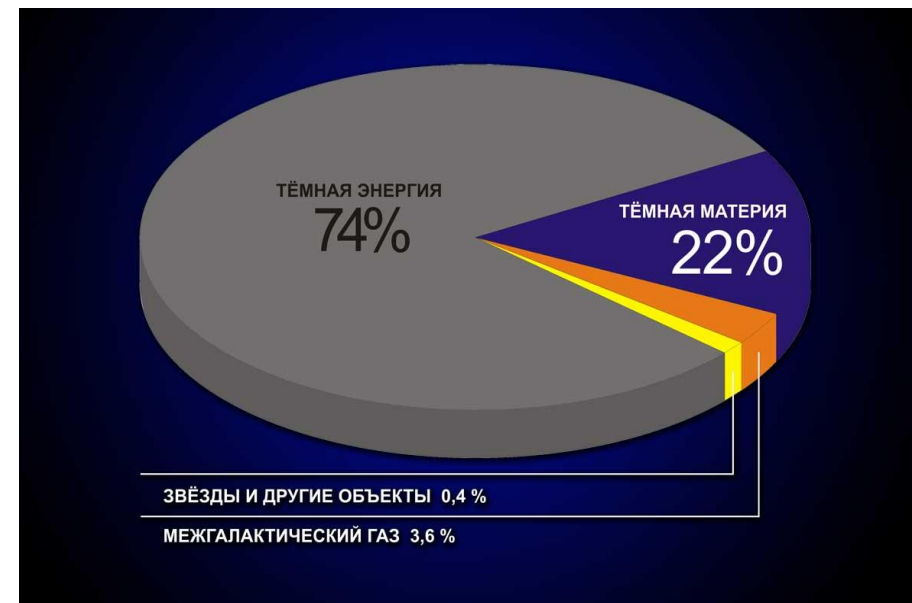
Λ CDM

6*. Темная материя

7*. Темная энергия

8*. Космологические

гравитационные волны?



Ранняя Вселенная представляла собой плазму из барионов, электронов и фотонов, в которой длина свободного пробега фотонов была мала, поскольку они рассеивались на свободных электронах.

По мере того, как Вселенная расширялась и остывала, электроны связывались с ядрами легких химических элементов (дейтерий, гелий, водород, литий) в электрически-нейтральные атомы, в результате чего фотоны получили возможность распространяться свободно. Эти свободные фотоны составляют **фоновое микроволновое реликтовое излучение**. Момент его образования – **момент рекомбинации** (ок. 380 тыс. лет с момента Большого взрыва). Источник реликтового излучения – **поверхность последнего рассеяния**.

Реликтовое излучение приходит к наблюдателю со всех сторон неба. В момент рекомбинации температура реликтового излучения была порядка 3000 К. Из-за расширения Вселенной длины волн реликтовых фотонов увеличились, сместившись в длинноволновую область. Смещение длины волны для одного фотона означает изменение температуры для ансамбля фотонов со спектром абсолютно чёрного тела.

Современная температура микроволнового фонового реликтового излучения составляет 2.726 К (по измерениям космической обсерватории COBE), потому что с момента рекомбинации масштабный фактор Вселенной увеличился примерно в 1000 раз.

Реликтовое излучение изотропно и однородно с точностью лучше 0.1%.

Открытие реликтового излучения (СМВ — Cosmic Microwave Background radiation)

Бонди, Голд, Хойл

К середине XX-го века космологи разработали две разные теории, призванные объяснить рождение нашей Вселенной.



Одни поддерживали **СТАЦИОНАРНУЮ ТЕОРИЮ ВСЕЛЕННОЙ** — это т.н. **«steady-state»-теория** (Бонди, Голд, Хойл и др.), согласно которой Вселенная всегда существовала и будет существовать всегда.

Открытие реликтового излучения (СМВ — Cosmic Microwave Background radiation)

Другие придерживались **ТЕОРИИ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА** (Альфер, Гамов и др.), согласно которой Вселенная родилась в результате взрывоподобного процесса миллиарды лет назад (как было позже установлено, около 13.5 млрд лет назад).

Гамов



Альфер

Открытие реликтового излучения (CMB — Cosmic Microwave Background radiation)

В 1955 году **Т.А. Шмаонов** (Пулковская обсерватория) провел измерения космического радиоизлучения на длине волны **32 см** и обнаружил фоновое излучение с температурой **4 ± 3 К**. Интенсивность излучения не зависела от времени и от направления на небе.



*О наблюдении
реликтового излучения*

Т.А.Шмаонов
Институт общей физики РАН

Открытие реликтового излучения (CMB — Cosmic Microwave Background radiation)

В 1964 году радионженеры лаборатории «Белл» **А. Пензиас** и **Р. Вильсон** при настройке радиоантенны обнаружили избыточную шумовую температуру.

Этот “фоновый шум” приходил со всей небесной сферы и не имел никакого конкретного источника.



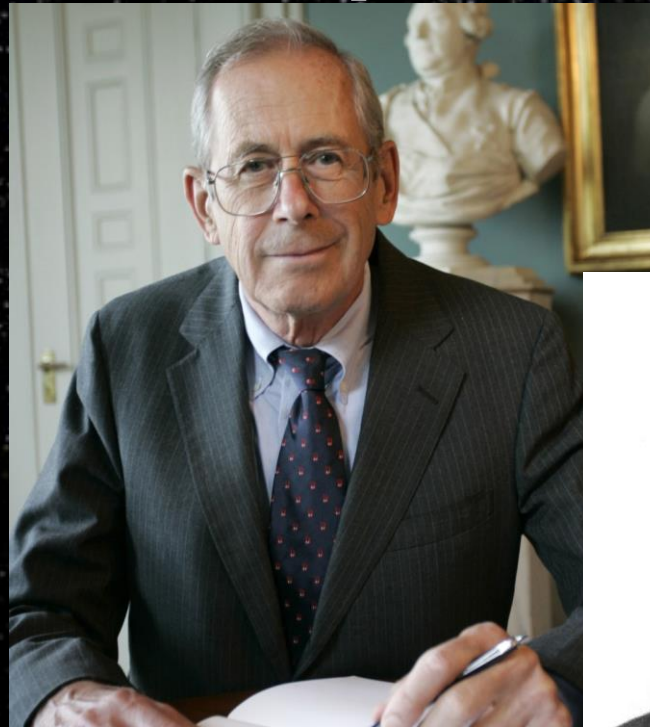
Лаборатория «Белл» (*Bell Telephone Company*) в Мюррей Хилл (Нью-Джерси, США)

Открытие реликтового излучения (СМВ — Cosmic Microwave Background radiation)

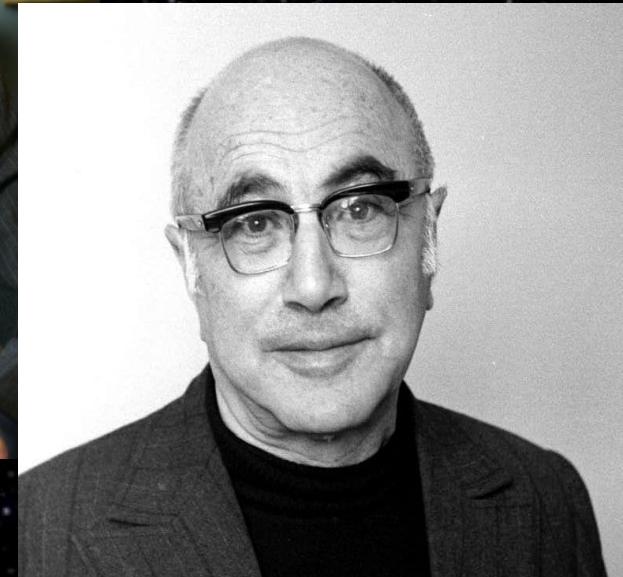
Случайно обнаруженное фоновое излучение было отождествлено с теоретически предсказанным реликтовым излучением (Г. Гамов, Р. Дикке, Д. Пиблс, Я.Б. Зельдович и др.), которое подтверждало гипотезу Большого взрыва.



Р. Дикке

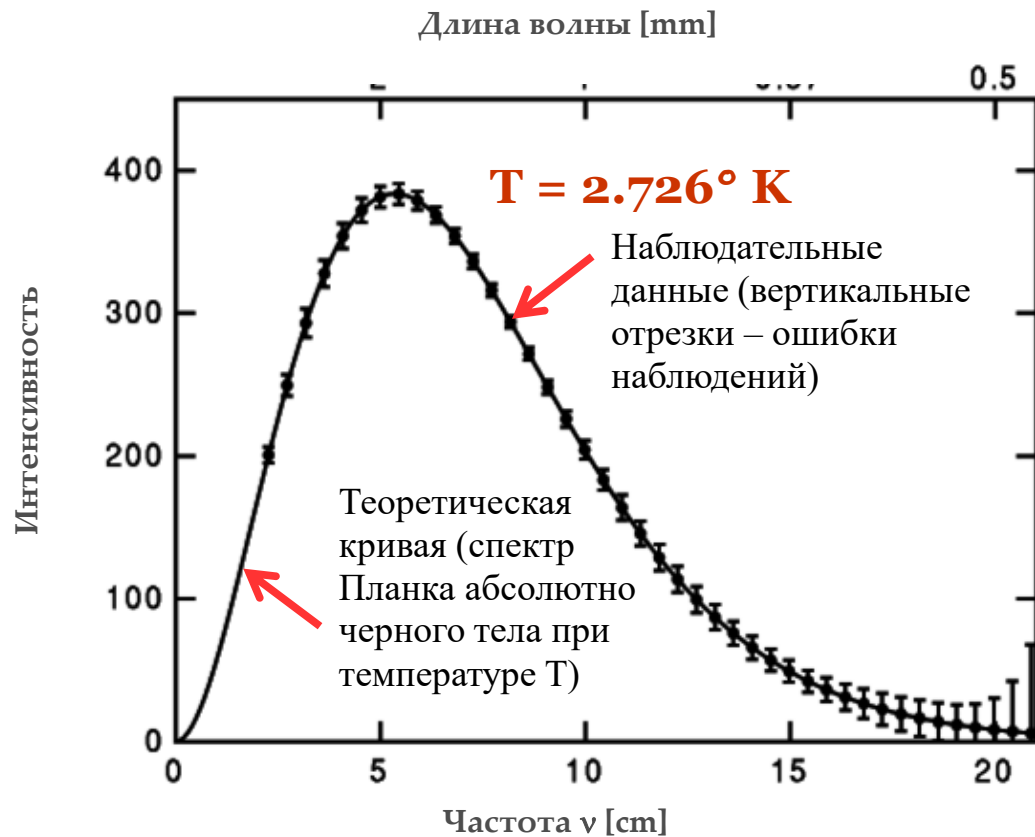


Д. Пиблс



Я.Б. Зельдович

Реликтовое излучение



Реликтовое излучение – излучение черного тела при температуре $T = 2.726 \text{ K}$.

Излучение черного тела находится в термодинамическом равновесии с окружающим веществом, потому что долгое время поглощалось и рассеивалось в непрозрачной плазме. Его интенсивность определяется только температурой.

Свойством черного тела обладает, например, Солнце. Максимум энергии излучения Солнца приходится примерно на длину волны 450 нм, что соответствует температуре его внешних слоев 6000 K.

Реликтовое излучение — остаток самых ранних эпох развития нашей Вселенной, важнейшее наблюдательное доказательство модели «Горячей Вселенной», на основе которой строится современная Стандартная космологическая модель.

Реликтовое излучение находится в равновесии с окружающим веществом, и плотность числа фотонов $n(\nu)$ определяется выражением:

$$n(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

частота
зарегистрированного
излучения $\rightarrow \nu_0 = \nu \frac{a}{a_0}$ $\nwarrow$ частота испущенного излучения

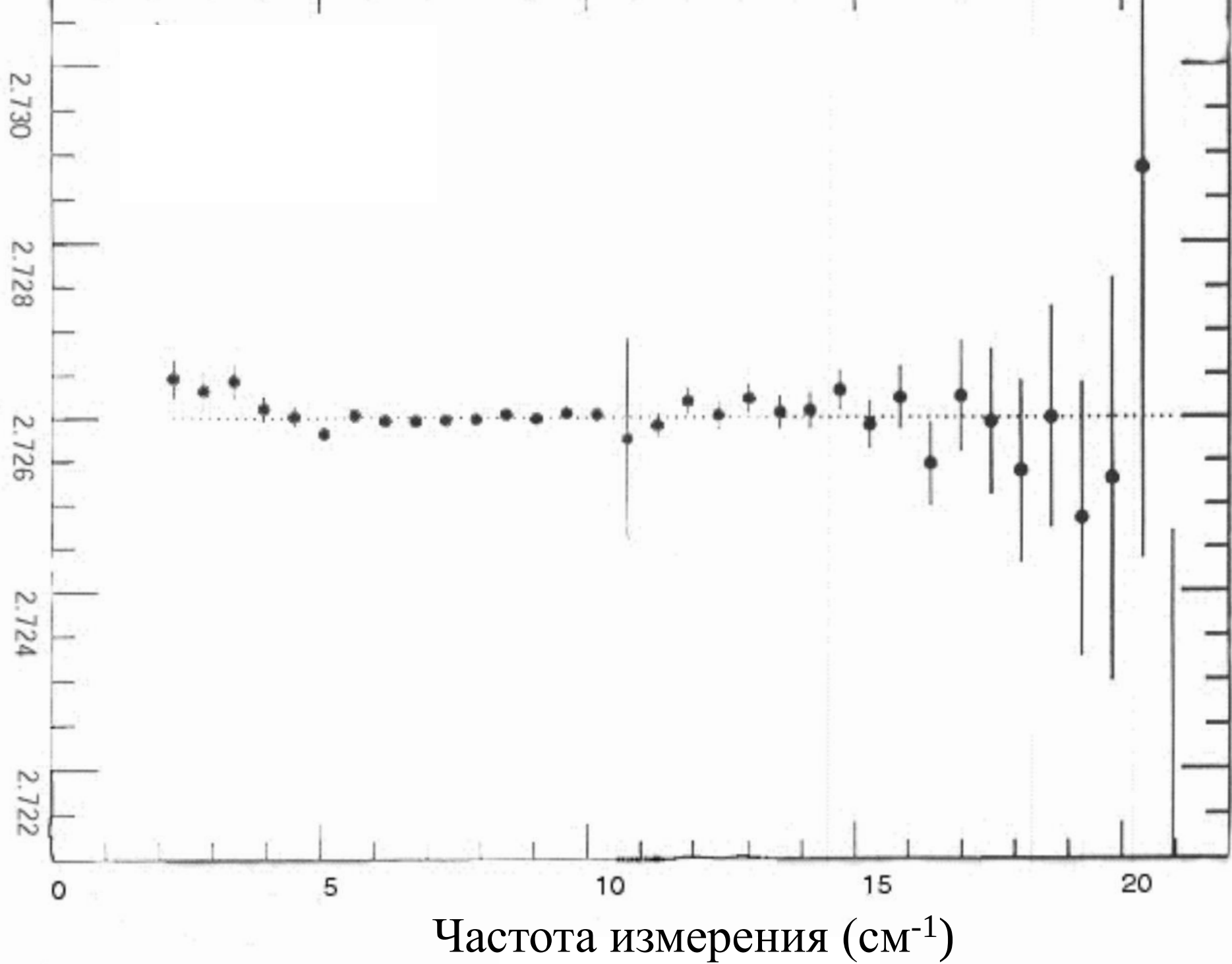
Частота фотонов подвержена красному смещению из-за расширения Вселенной

$$n(\nu, t) = \left(\frac{a_0}{a}\right)^3 n(\nu_0, t_0) = \left(\frac{a_0}{a}\right)^3 n\left(\nu \frac{a}{a_0}, T(t_0)\right)$$

Форма спектра сохраняется, если зависимость температуры от времени есть:

$$T(t) = T(t_0) \frac{a_0}{a}$$

Температура реликтового излучения (К)



Для установления равновесия в горячей плазме при температуре, например, $T = 1 \text{ МэВ}$ требуется $t = 10^{-17}$ а время характерной эволюции плотности Вселенной таких температурах составляет несколько секунд.

Следовательно, в горячей плазме устанавливается термодинамическое равновесие.

Термодинамическое равновесие между электронами фотонами прекращается при красном смещении

Анизотропия реликтового излучения

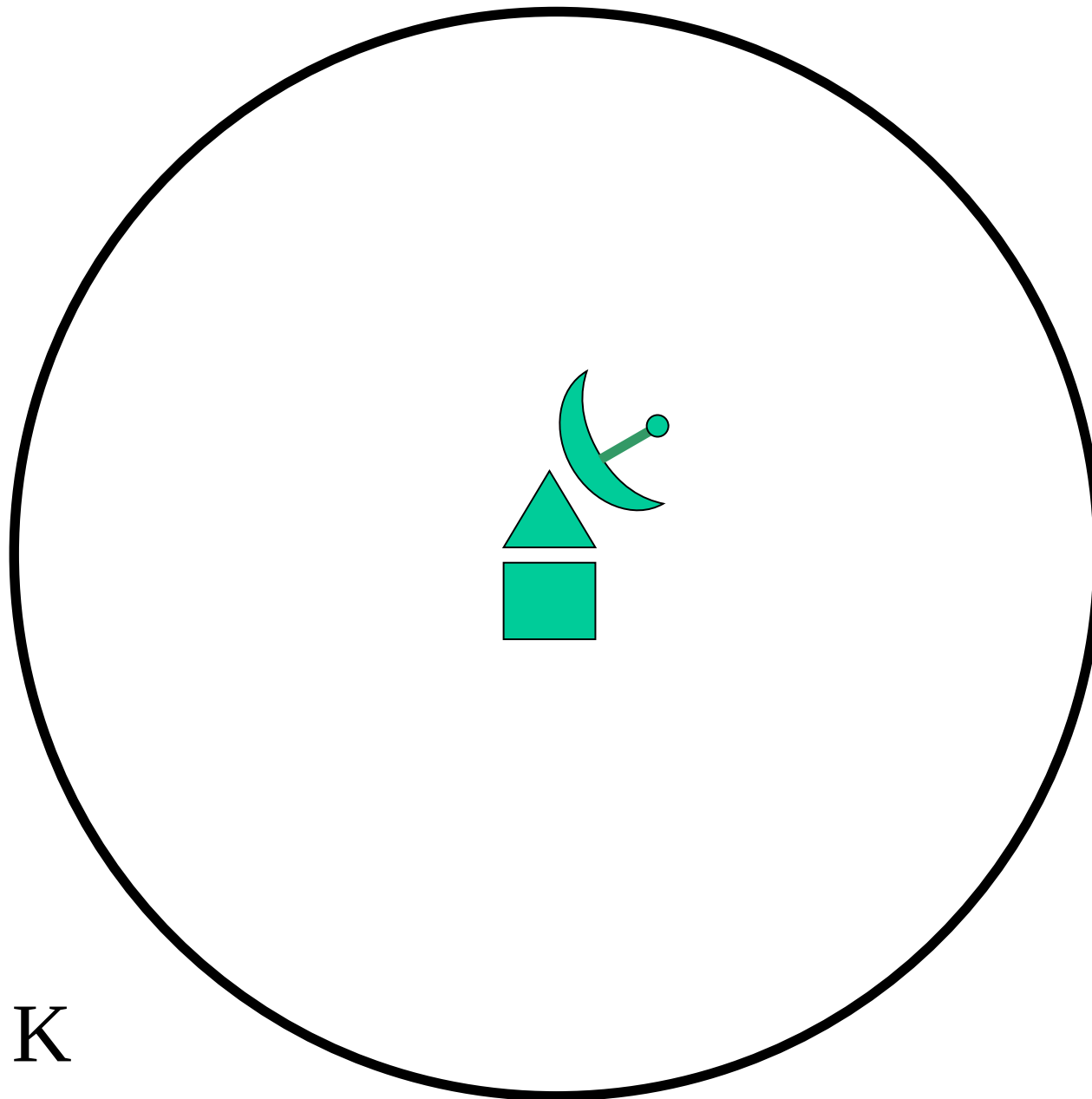
Реликтовое излучение очень однородно и изотропно. Его температура однородна с точностью до 10^{-3} . Но небольшая анизотропия (неоднородность, разница температур в разных точках на небе) все-таки существует. Она несет важнейшую информацию о ранней Вселенной и определяет космологические параметры.

Анизотропия температуры реликтового излучения (или просто “анизотропия реликтового излучения”) складывается из нескольких вкладов:

1) движение Земли, Солнечной системы, Галактики сквозь реликтовое излучение (за счет эффекта Доплера впереди нас, по ходу движения, температура чуть выше, а позади – чуть ниже). Эта т.н. **“кинетическая составляющая”** равна примерно 0.003 К.

2) **“потенциальная составляющая”**, обусловленная гравитационными полями очень больших масштабов, сравнимых с расстоянием до космологического горизонта.

Однородное реликтовое излучение

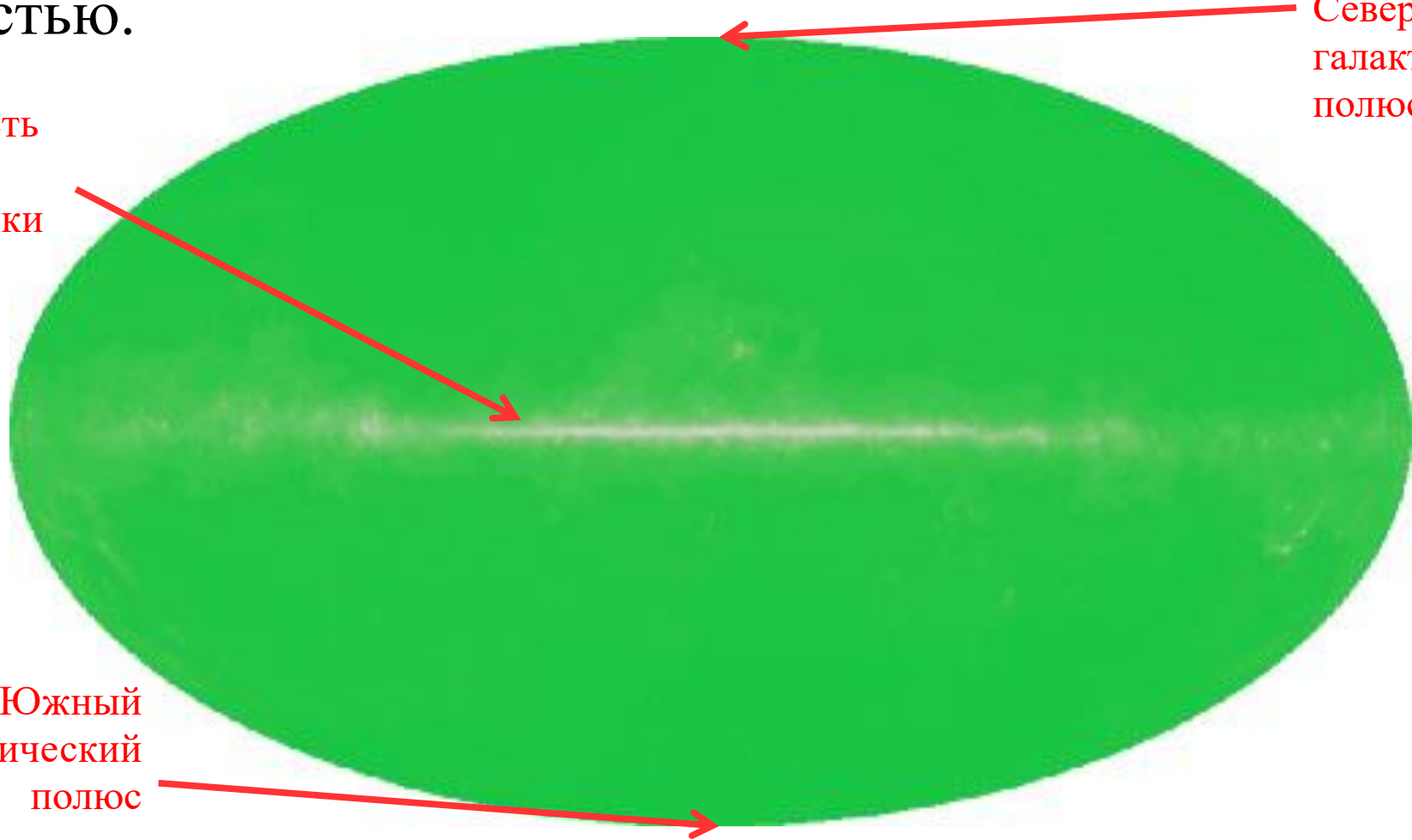


$T \sim 2.7 \text{ K}$

Реликтовое излучение однородно и изотропно с большой точностью.

плоскость
нашей
Галактики

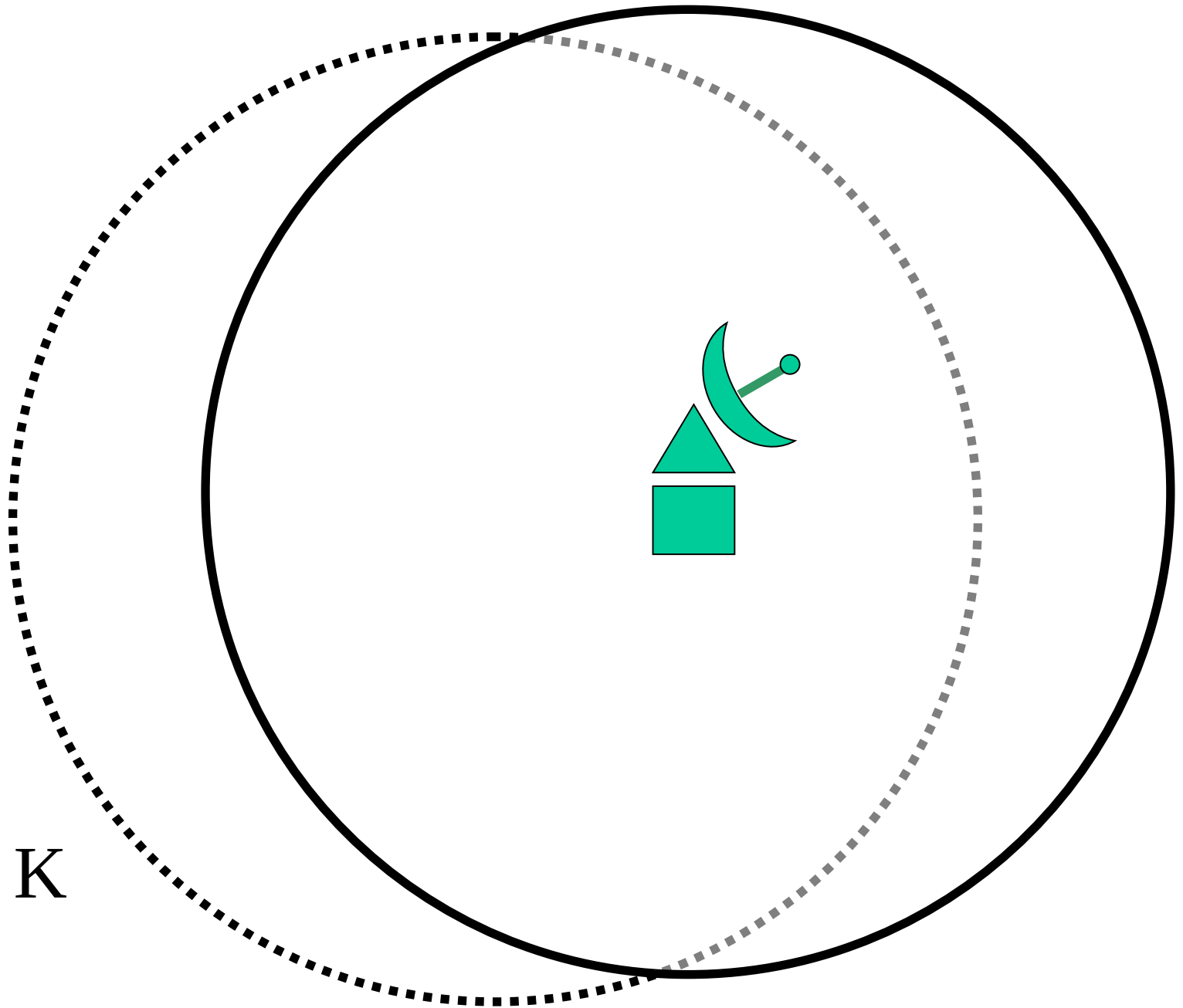
Северный
галактический
полюс



Южный
галактический
полюс

Имитация вида температурной карты реликтового излучения, какую могли бы получить Пензиас и Вильсон, если бы наблюдали все небо целиком (температурная карта представлена в т.н. проекции **Мольвейде** небесной сферы; посередине видно излучение плоскости нашей Галактики)

Анизотропия реликтового излучения, обусловленная движением наблюдателя относительно поверхности последнего рассеяния, которая испускает это излучение

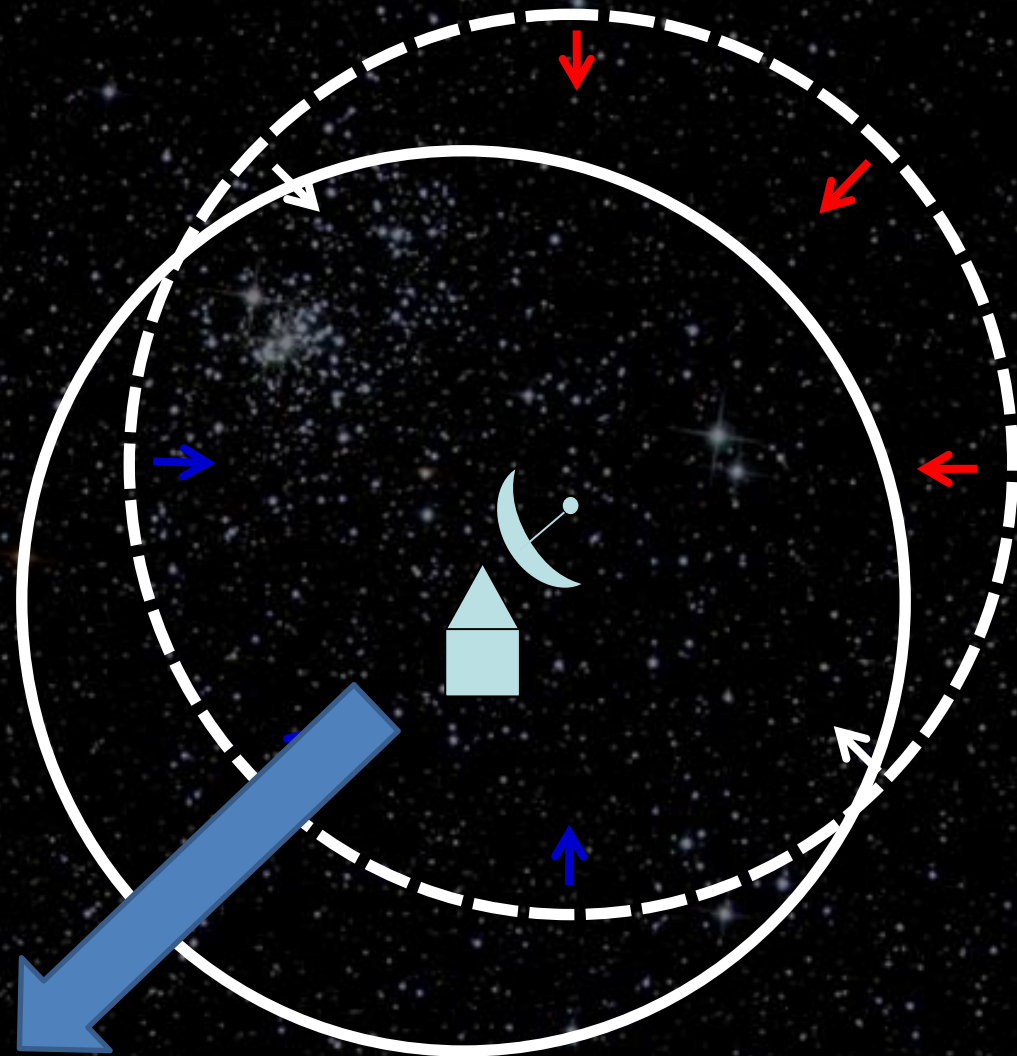


$T \sim 0.003 \text{ K}$
(3 мК)

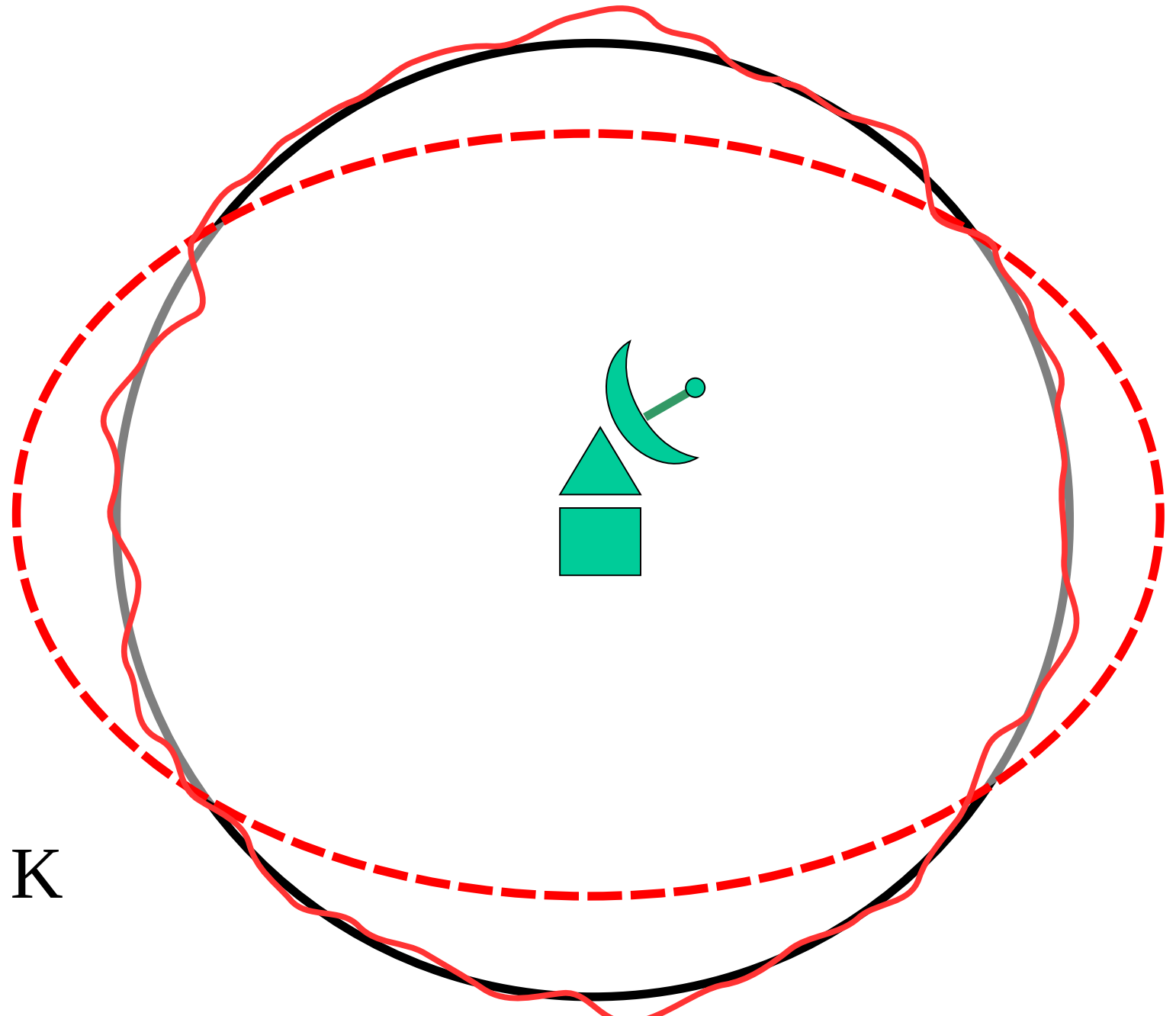
ПОВЕРХНОСТЬ ПОСЛЕДНЕГО РАССЕЯНИЯ – окружающая наблюдателя сфера, состоящая из реликтовых фотонов, которые стали распространяться свободно при достаточном остывании ранней Вселенной.

Согласно обработке данных по реликтовому излучению, местная группа галактик (скопление галактик, которому принадлежит и Млечный путь), движется со скоростью 627 ± 22 км/с относительно системы отсчета – поверхности последнего рассеяния в направлении $l = 263.99^\circ \pm 0.14^\circ$, $b = 48.26^\circ \pm 0.03^\circ$ (галактические координаты).

Открытие этой т. н. **дипольной анизотропии** стало первым указателем на существовании крупномасштабной анизотропии нашей Вселенной.



Анизотропия реликтового излучения, обусловленная крупномасштабными гравитационными полями



$T \leq 0.0003 \text{ K}$
($300 \mu\text{K}$)

Анизотропия реликтового излучения

Основное уравнение анизотропии реликтового излучения:

$$\frac{\text{Вариация температуры } T}{T} =$$
$$= \text{”эффект Сакса-Вольфа”} + \text{”эффект Силка”} + \text{”эффект Доплера”}$$

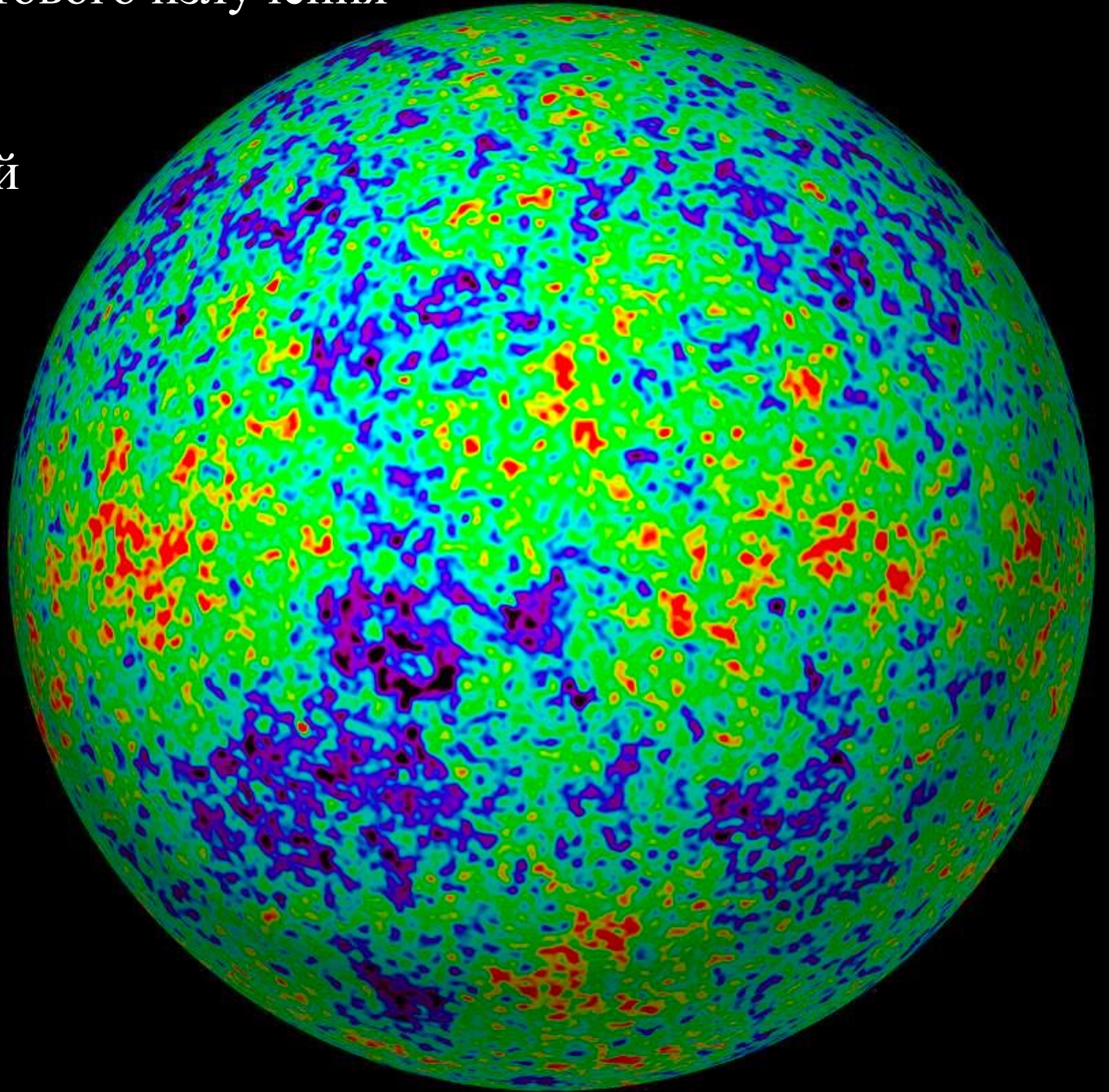
фотоны, двигаясь в переменном гравитационном потенциале, либо приобретают, либо теряют энергию.

на поверхности последнего рассеяния есть флуктуации плотности; там, где есть флуктуации плотности барионов, есть и флуктуации плотности фотонов.

эффект Доплера; вещество на поверхности последнего рассеяния может двигаться, и если часть вещества движется к нам, то фотоны, которые излучаются с этой поверхности, голубеют, а если часть вещества движется от нас, то фотоны краснеют. Голубое или красное смещение порождает анизотропию температуры.

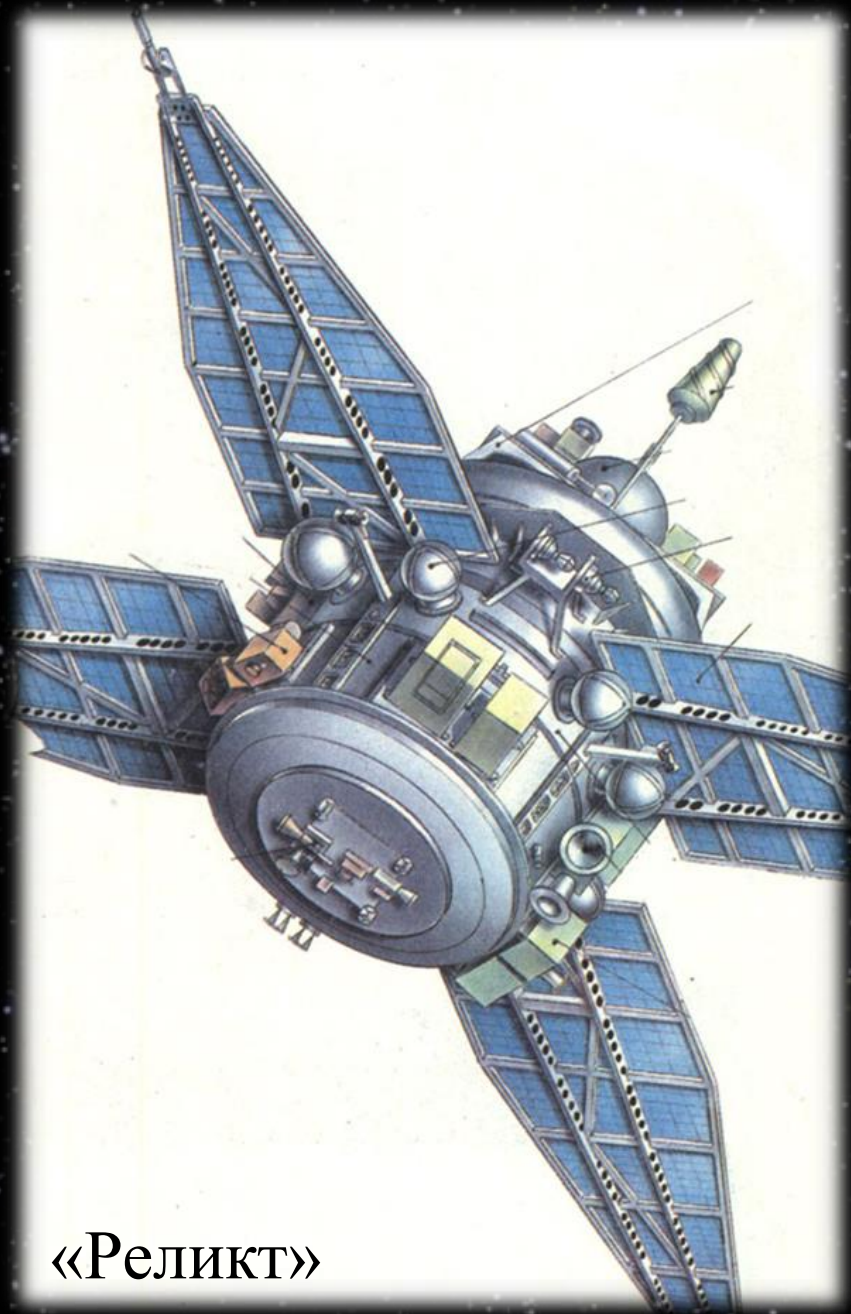
Анизотропия реликтового излучения

Цветом отмечены
области пониженной
(синий)
и повышенной
(красный)
яркости



Анизотропия реликтового излучения

Открыта в 1992 г. двумя группами: «Реликт» и COBE



«Реликт»

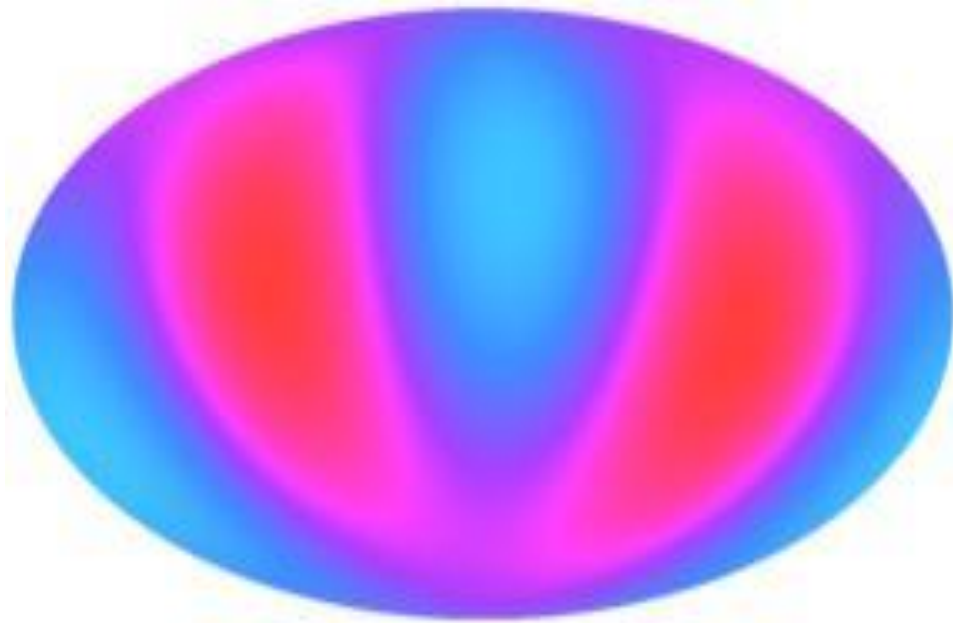


COBE

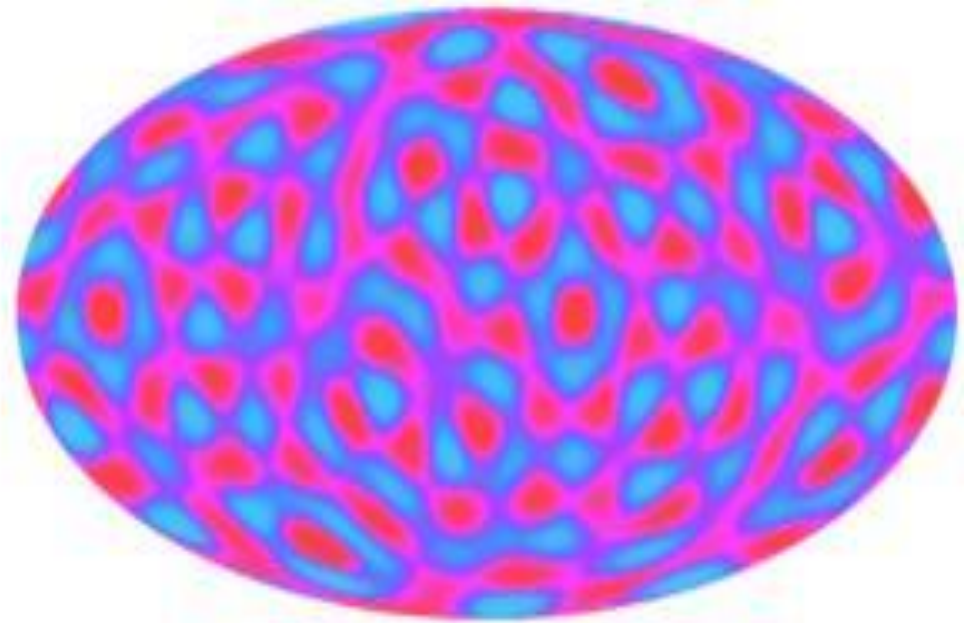
Анизотропию реликтового излучения принято представлять в виде **углового энергетического спектра**, который содержит информацию об образовании Вселенной и о ее современном состоянии.

Спектр показывает, как сильно от точки к точке на небе меняется температура (*переменная оси y*) в зависимости от мультиполя (“угловой частоты”) L (*переменная оси x*).

Например, $L=10$ означает, что имеется 10 циклов флуктуации на площади всего неба, тогда как $L=100$ означает, что имеется 100 циклов на всем небе.

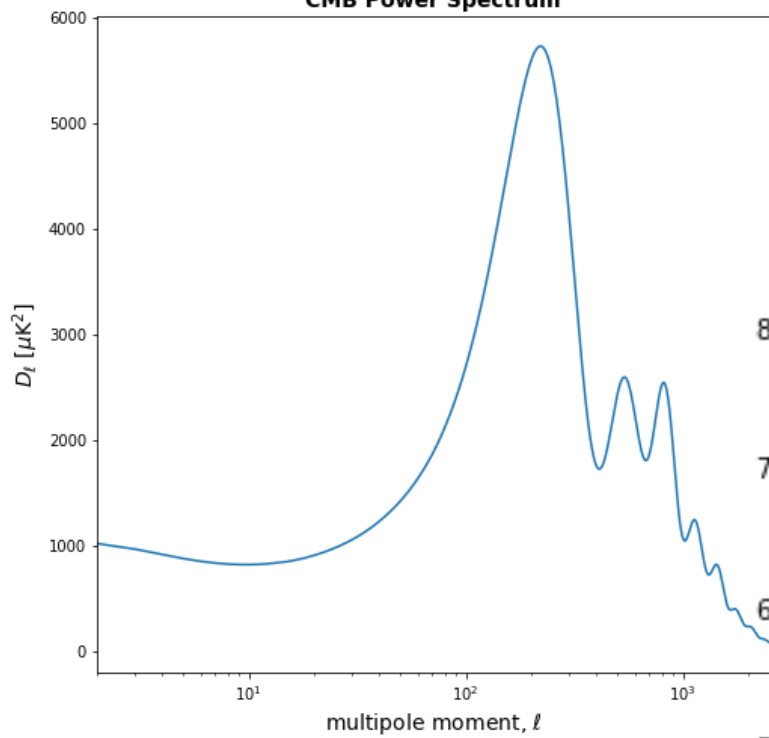


$L = 2$

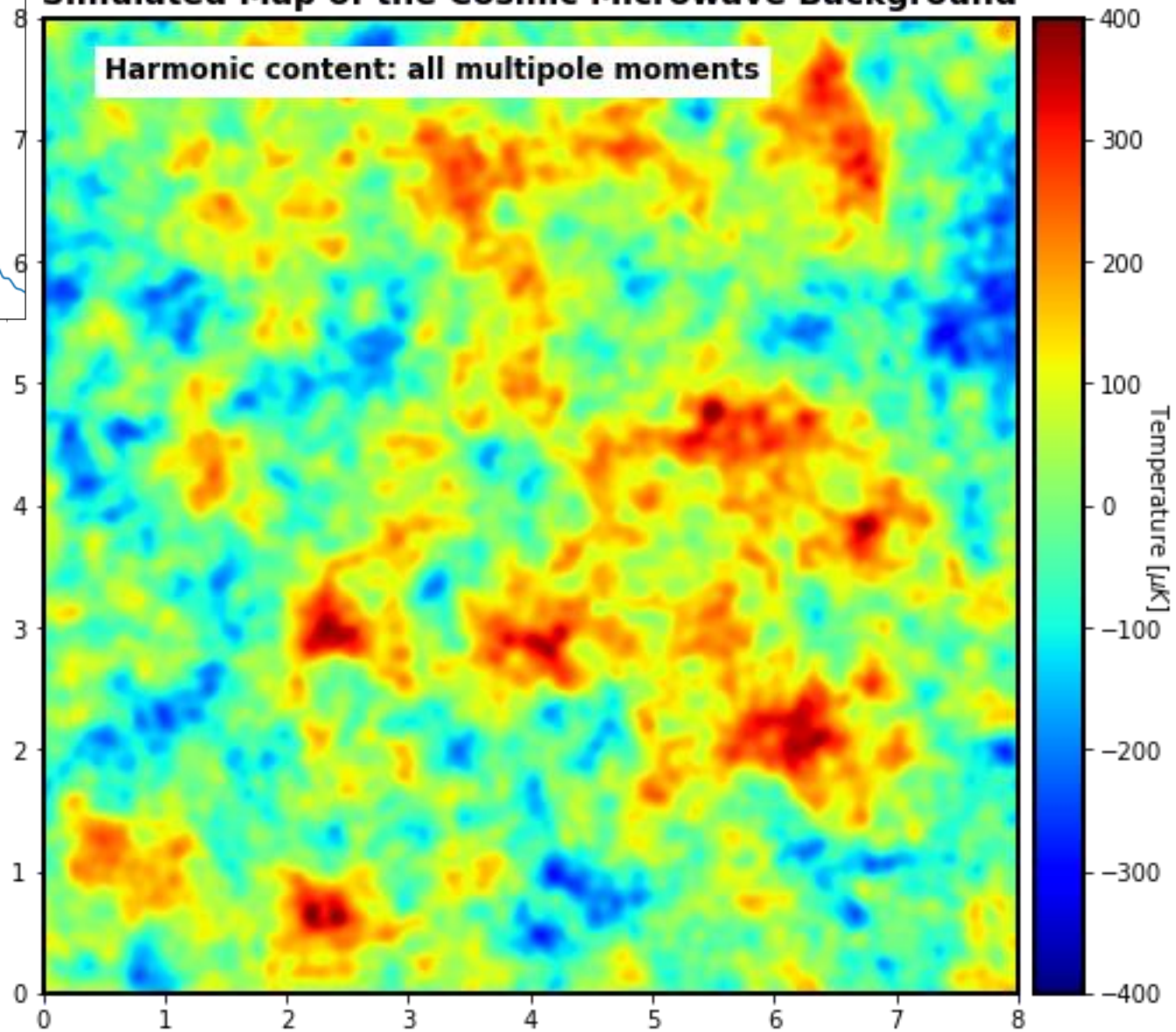


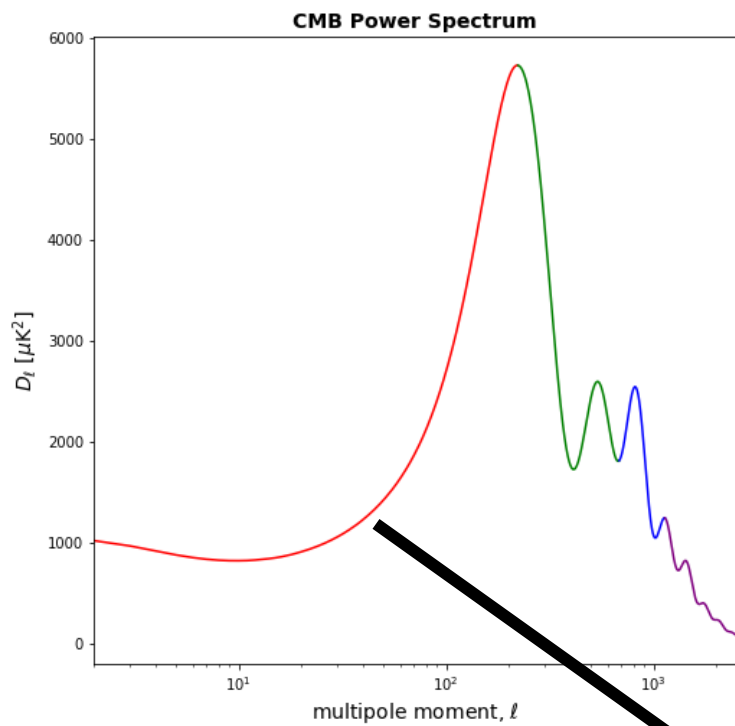
$L = 16$

CMB Power Spectrum

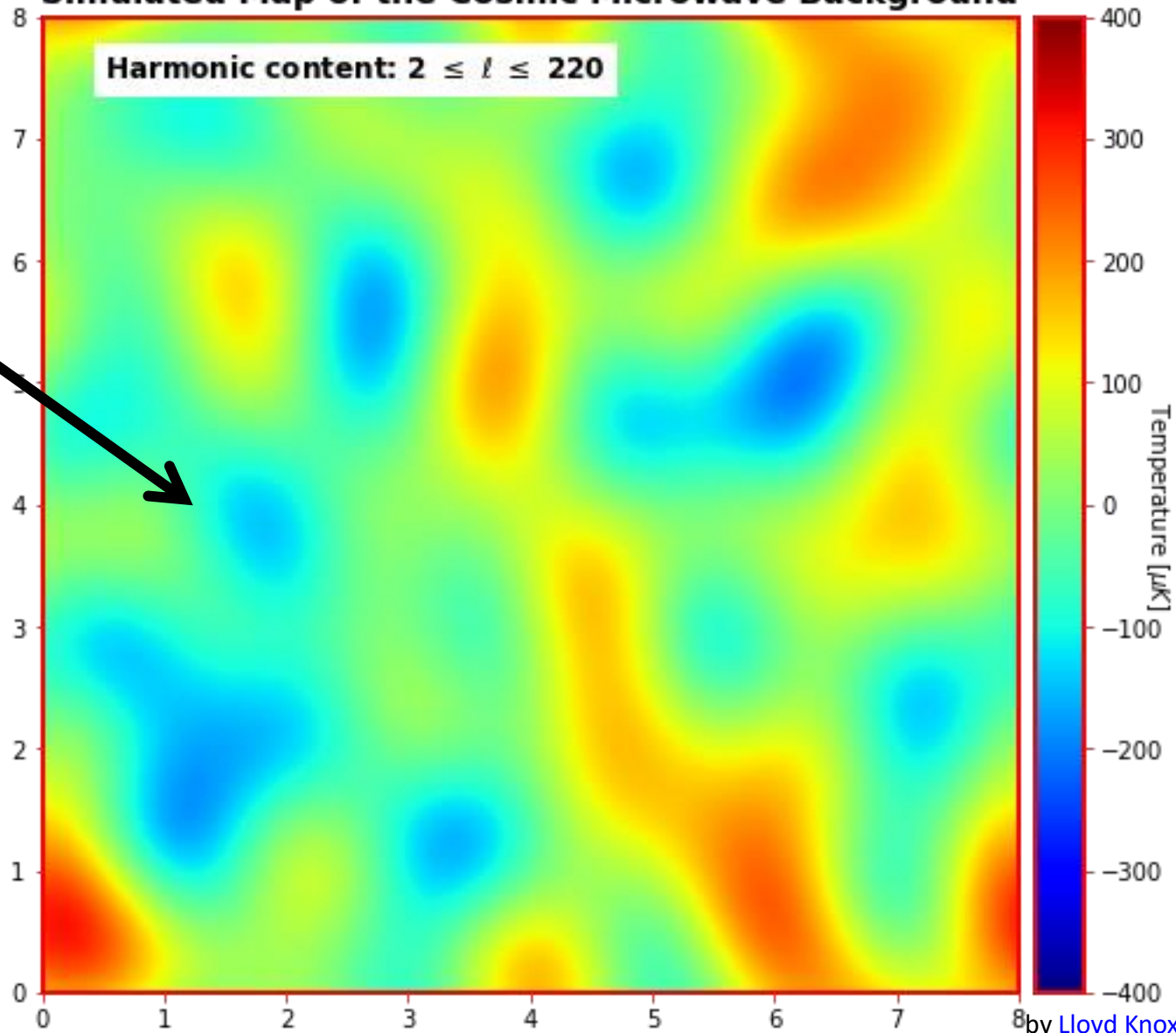


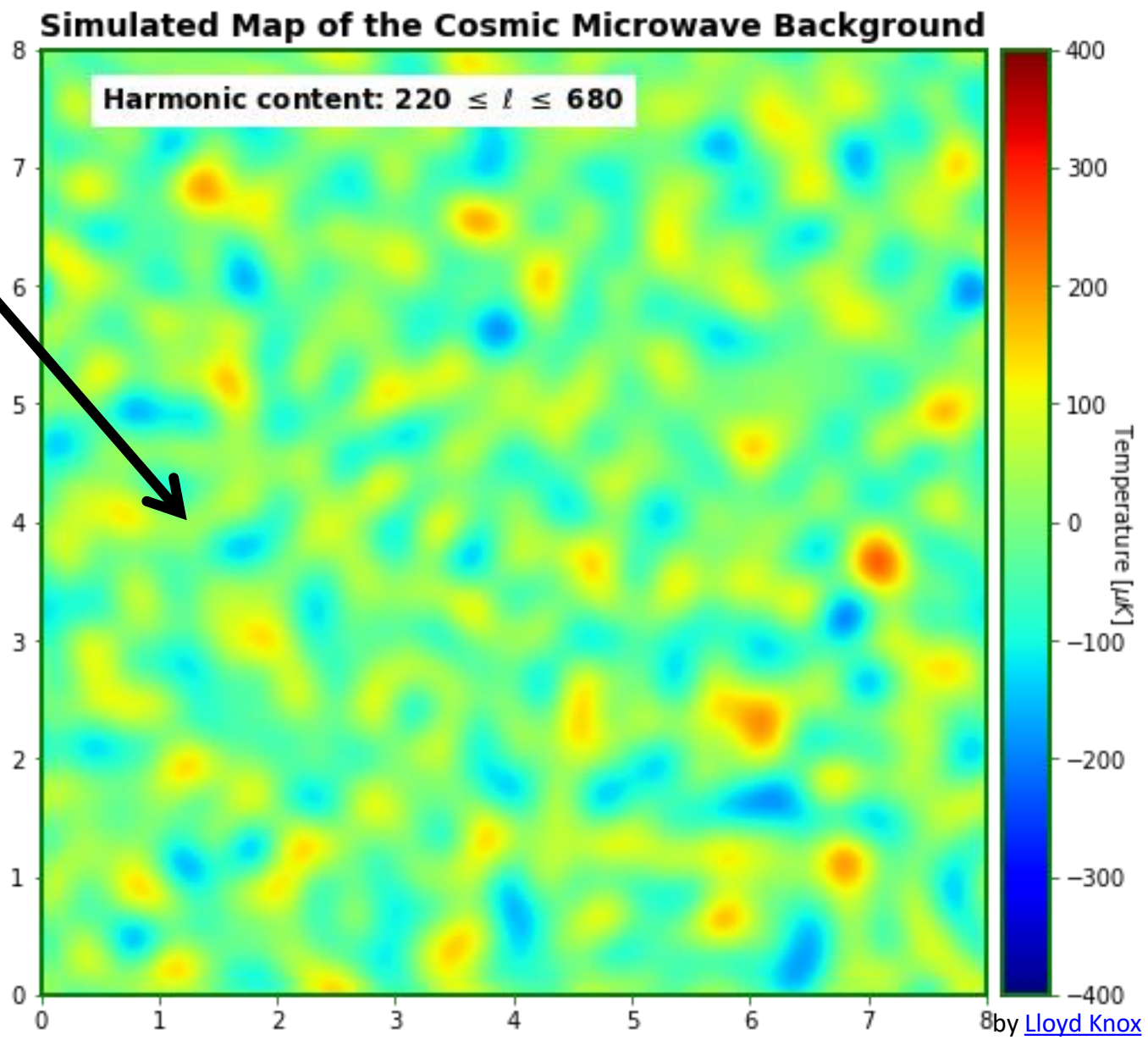
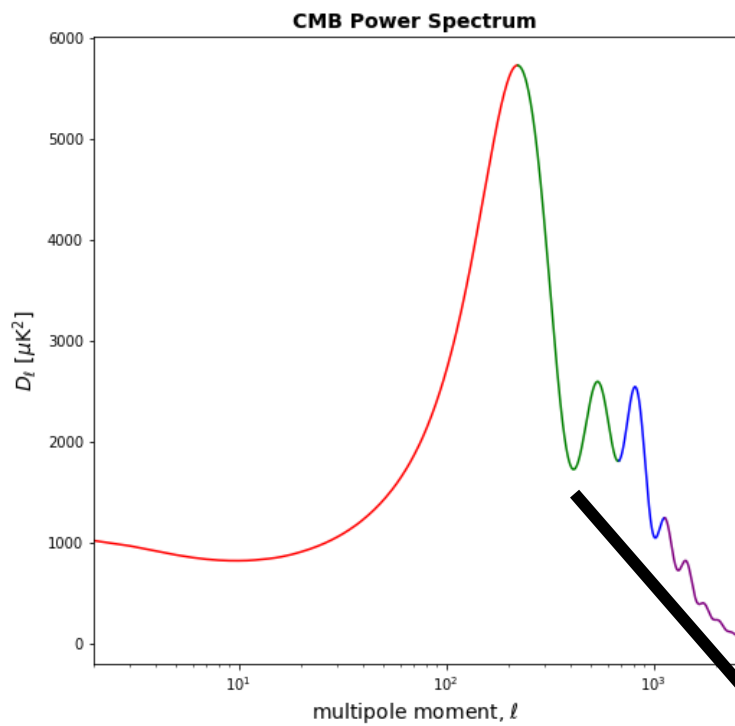
Simulated Map of the Cosmic Microwave Background

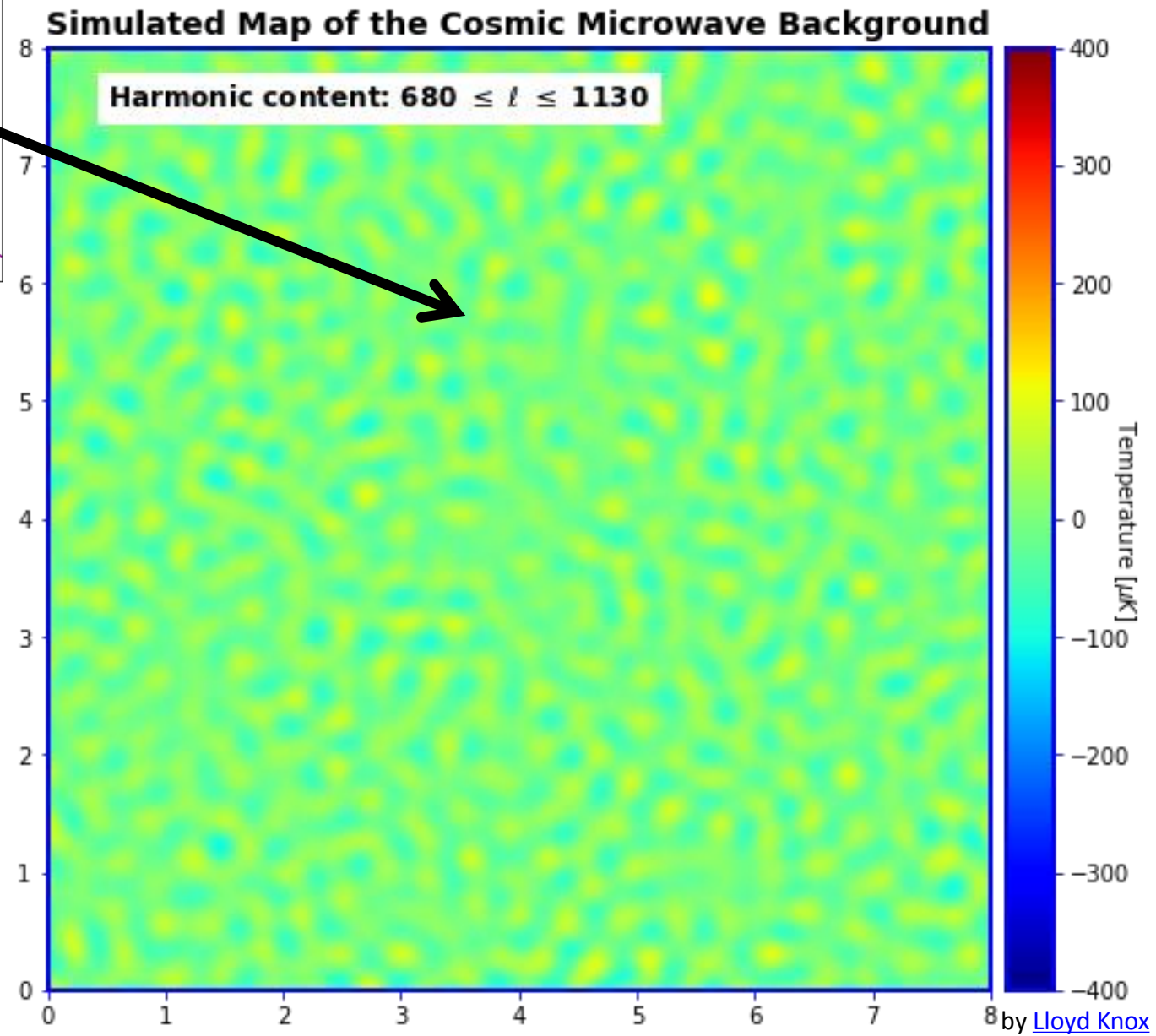
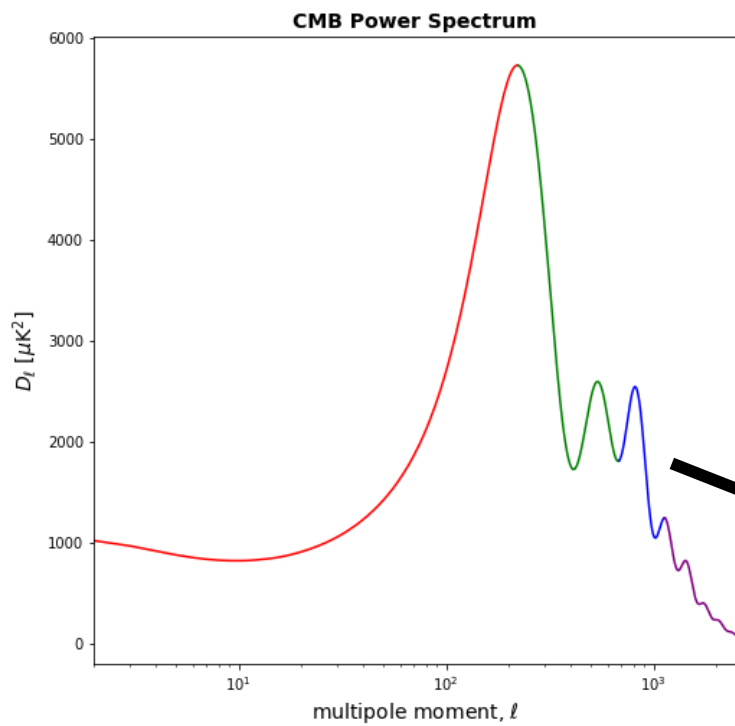


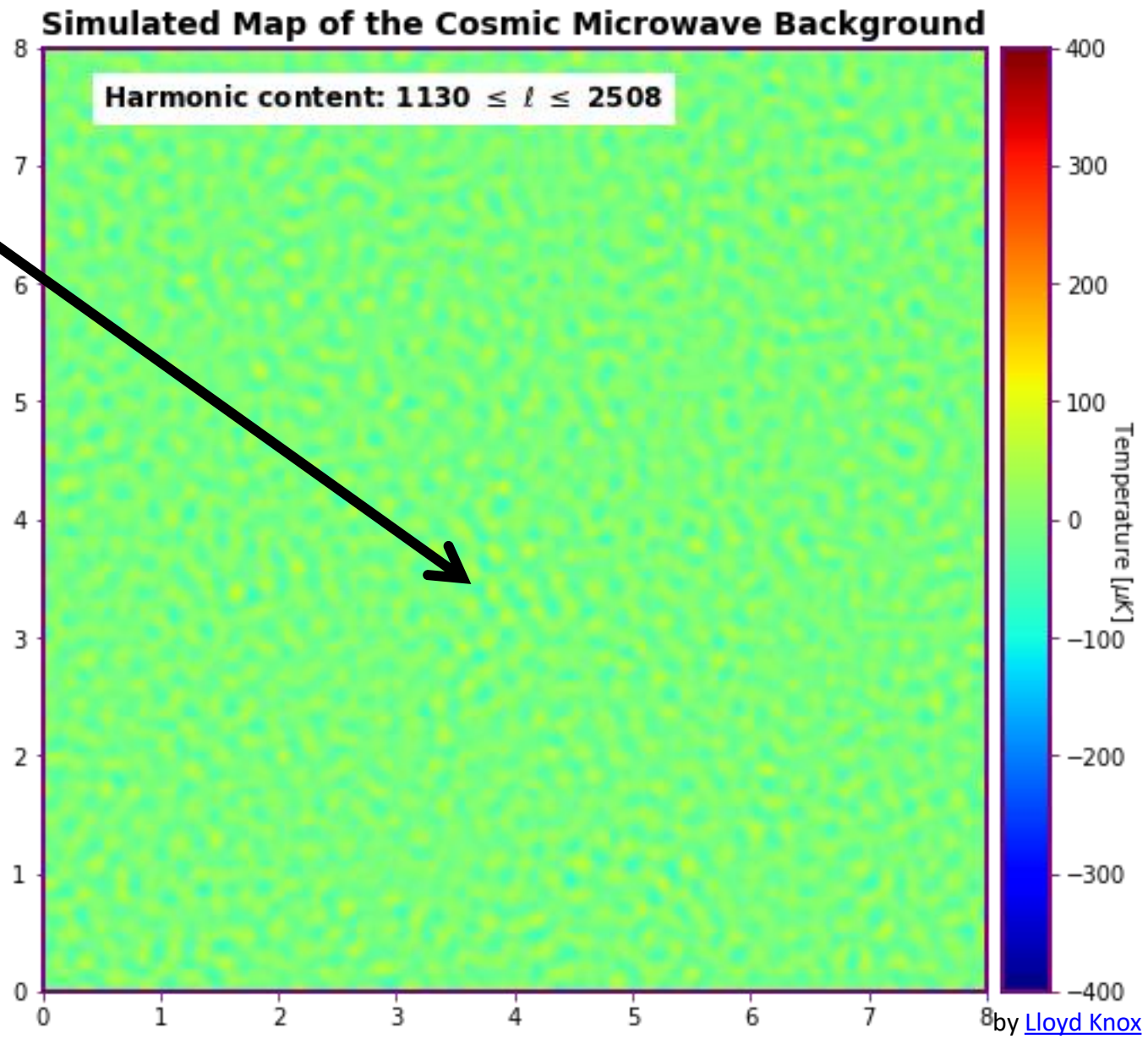
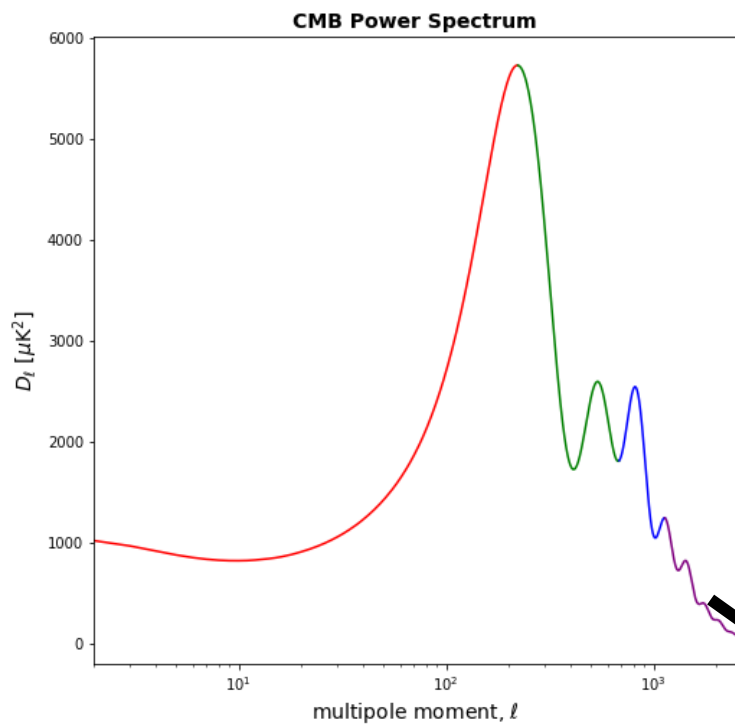


Simulated Map of the Cosmic Microwave Background

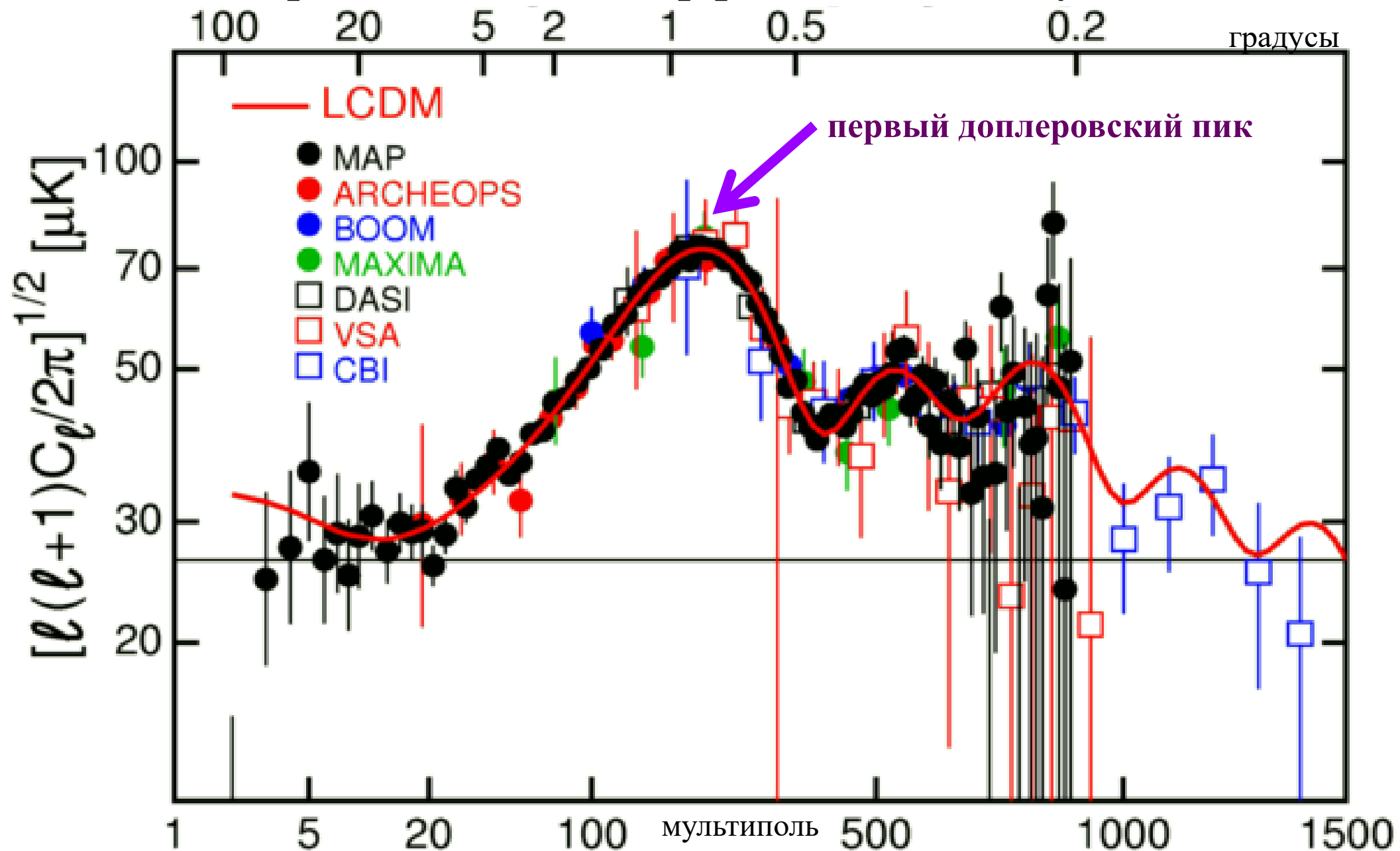








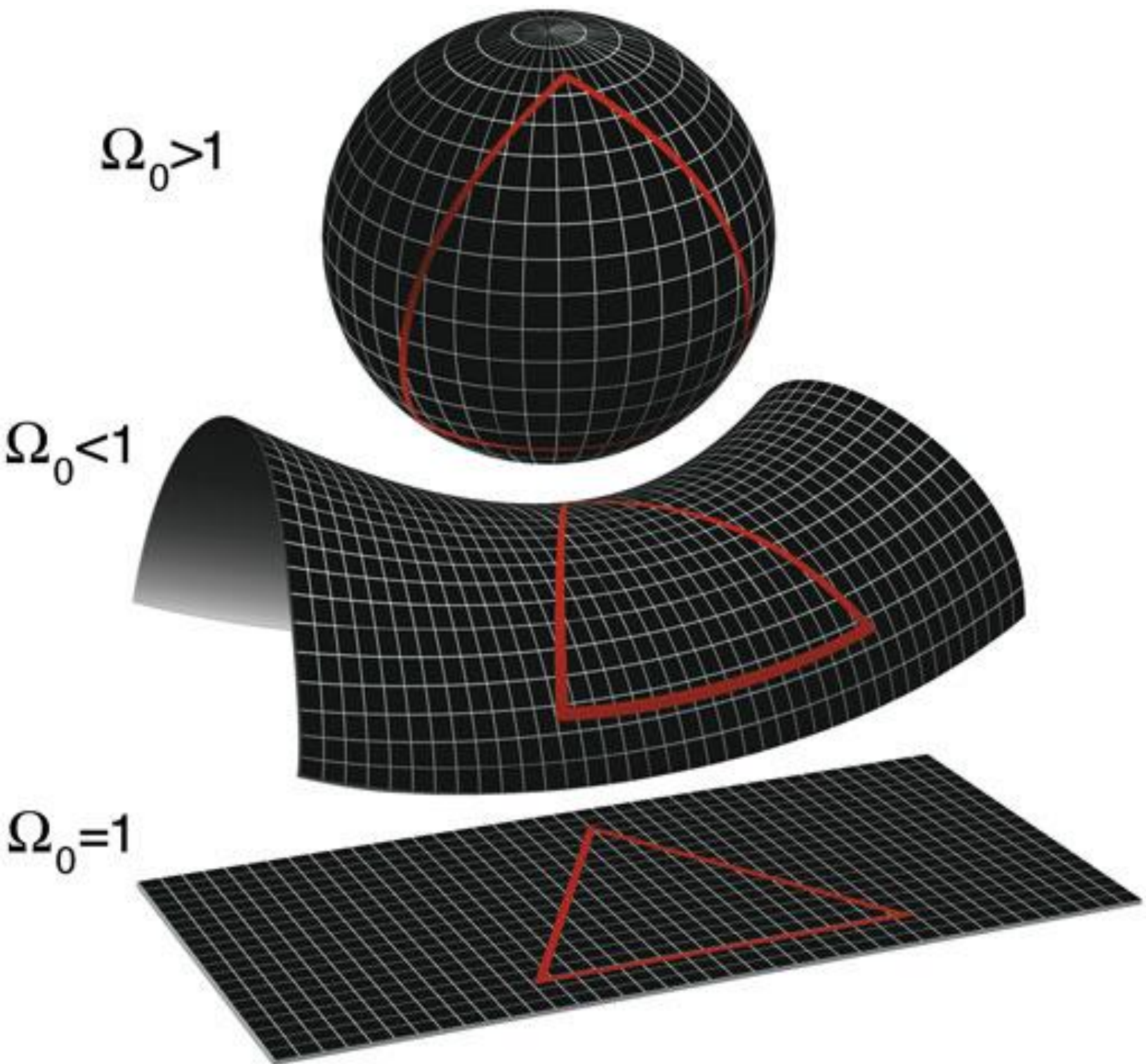
Угловой энергетический спектр реликтового излучения



Информация о Вселенной из анализа углового спектра распределения температуры реликтового излучения

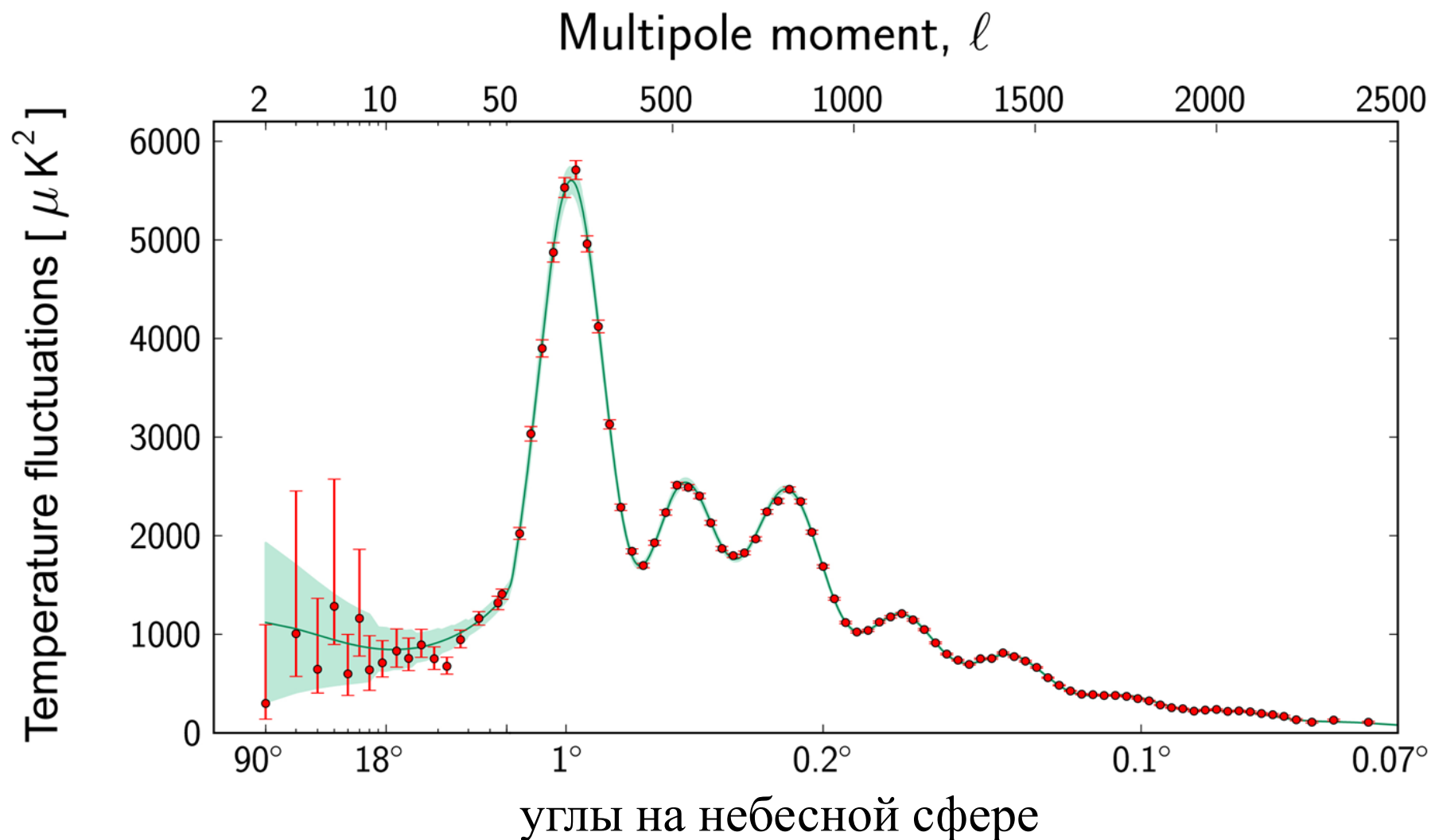
- спектр флуктуаций во Вселенной
- полная плотность Вселенной, параметр Ω_0
(определяется положением первого доплеровского пика)
- составляющие полную плотность Вселенной: вклад барионов (определяется амплитудой первого доплеровского пика), темной материи, темной энергии и др.

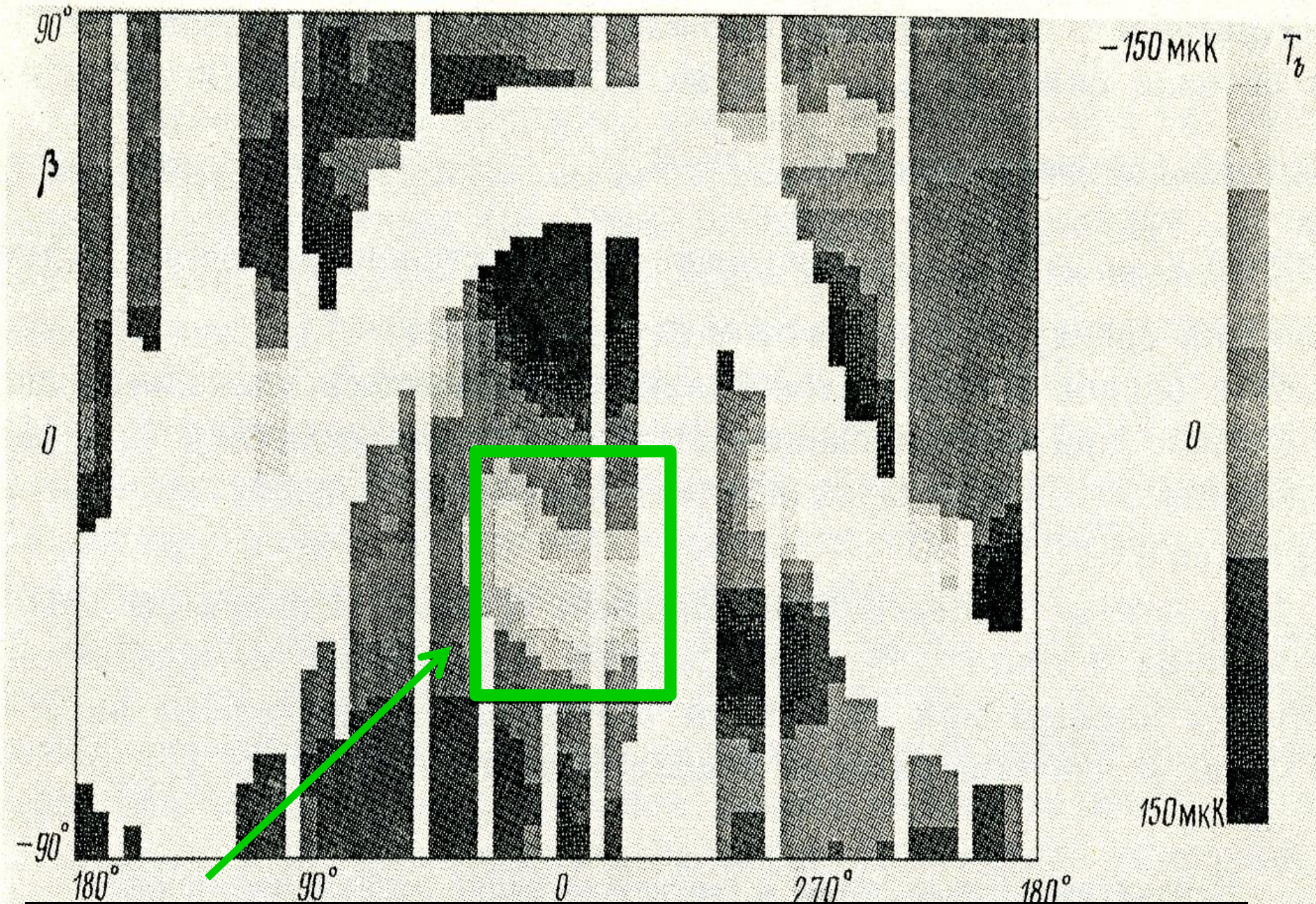
Двумерные аналогии геометрии трехмерной Вселенной



Угловой энергетический спектр реликтового излучения (данные космической обсерватории Planck)

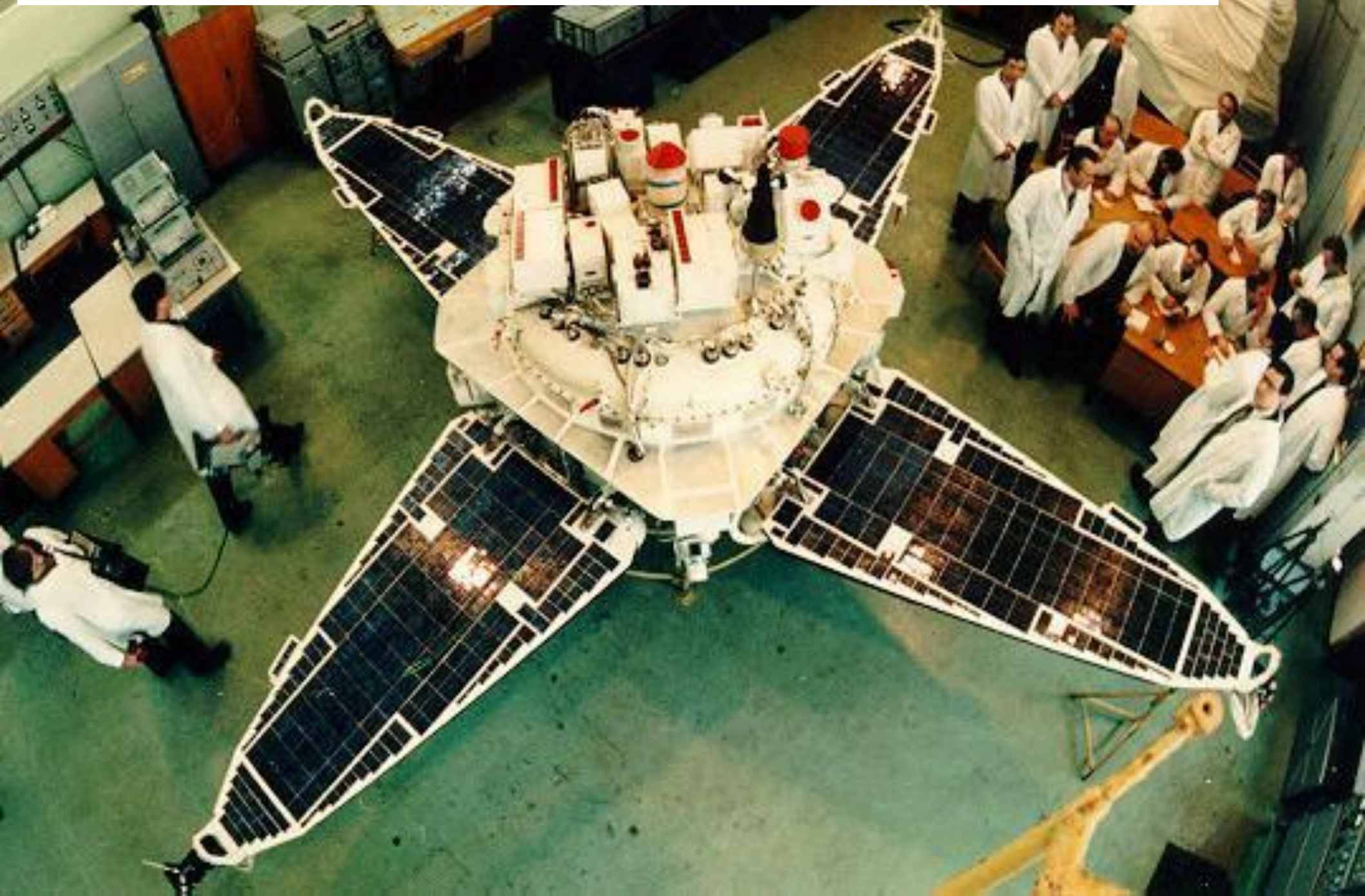
мультиполь L





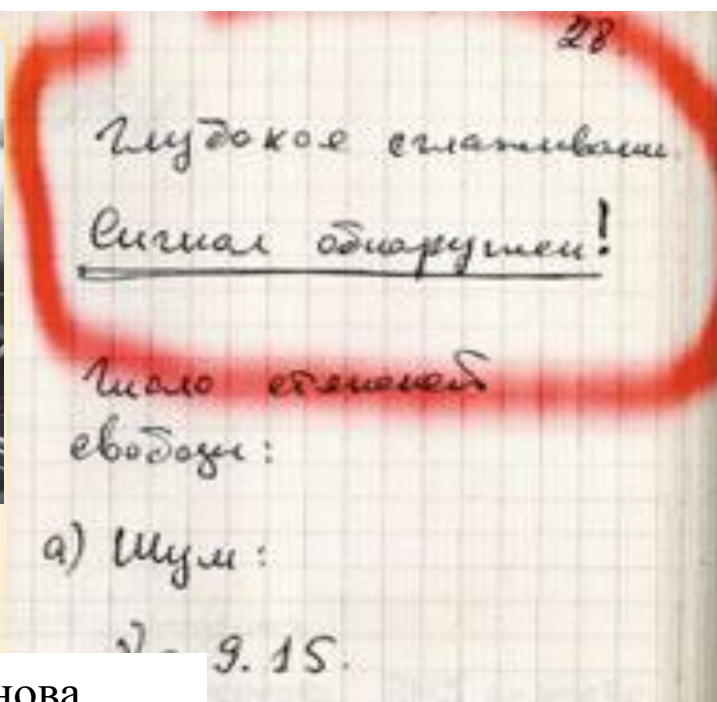
Первый сигнал анизотропии реликтового излучения, полученный советской космической миссией "Реликт" (1992 г.)

Спутник «Прогноз», на котором была установлена аппаратура проекта «Реликт», в монтажном цеху. Фото с сайта www.iki.rssi.ru





А.А. Брюханов



Из научного дневника А.А. Брюханова



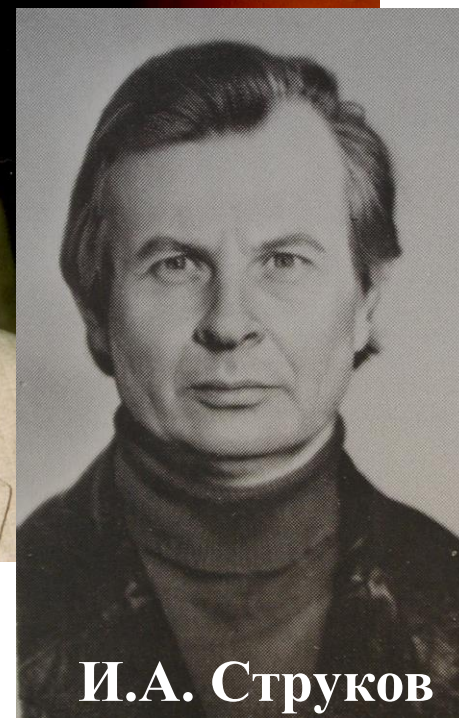
Д.П. Скулачев

Состав научной группы “Реликт”:

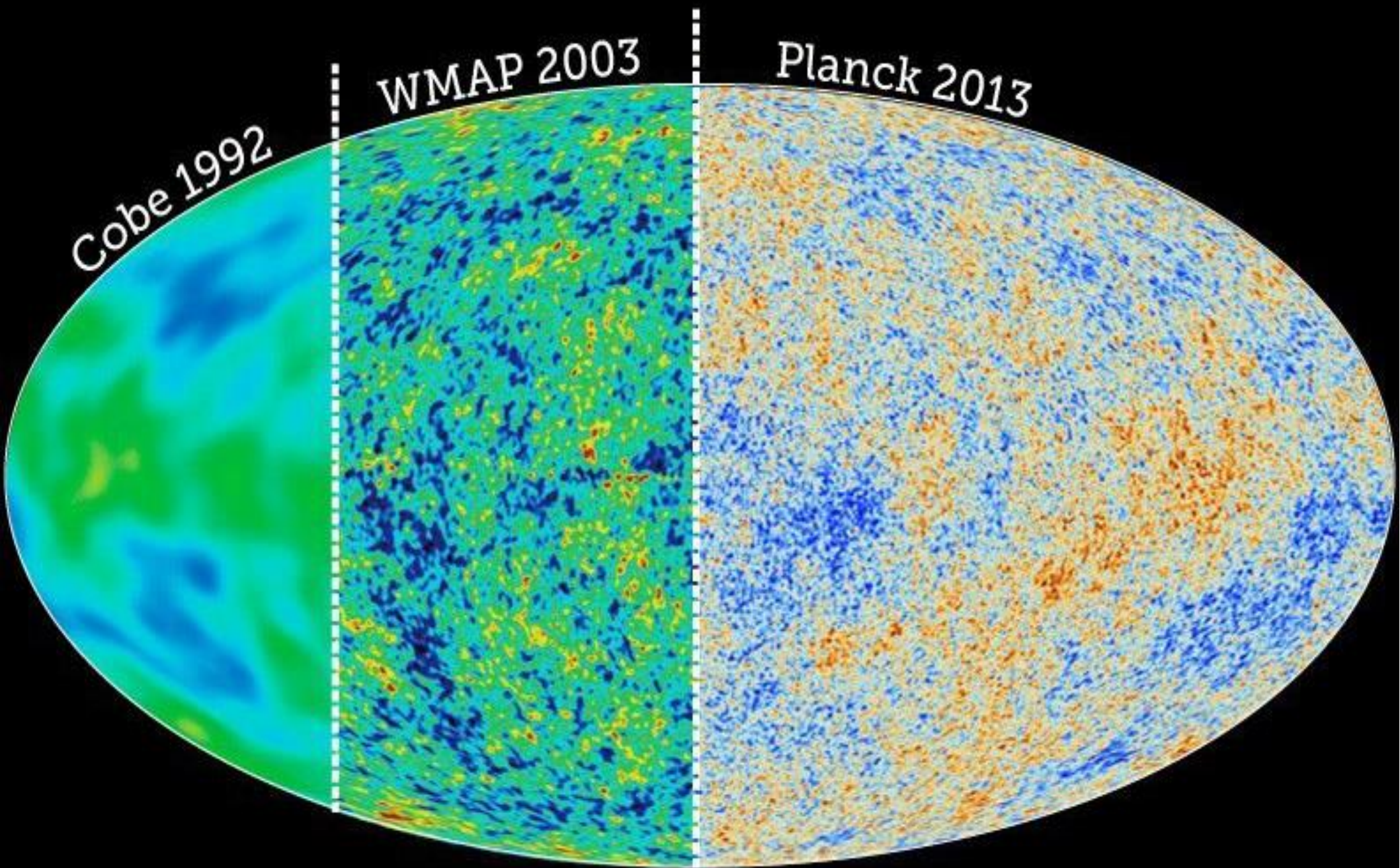
**И.А. Струков,
А.А. Брюханов,
М.В. Сажин,
Д.П. Скулачев**



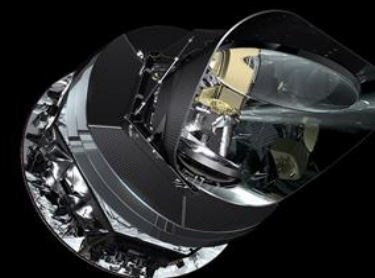
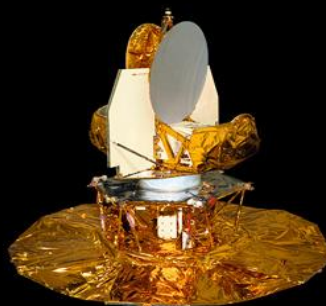
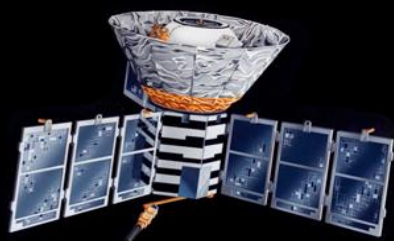
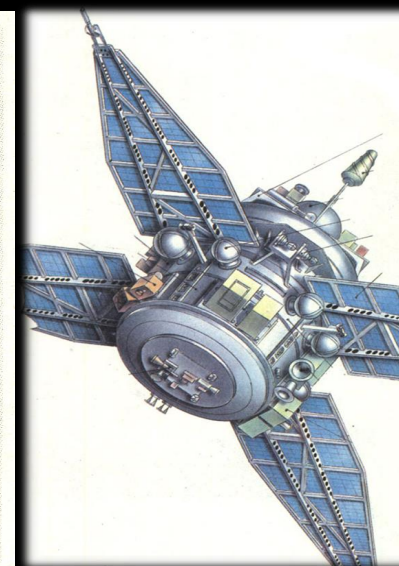
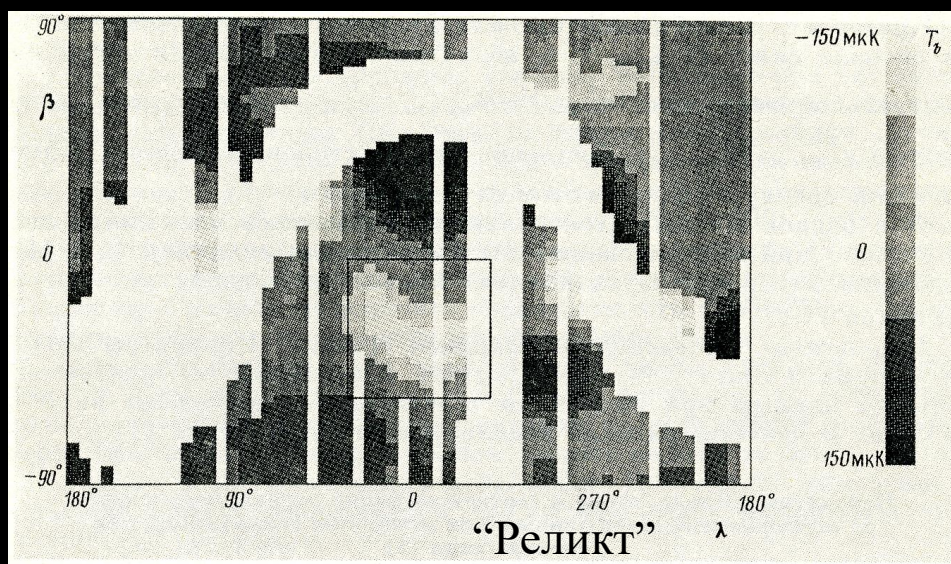
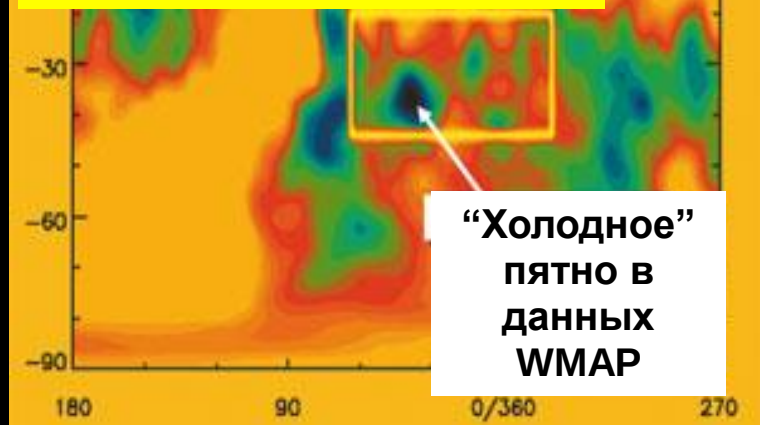
М.В. Сажин



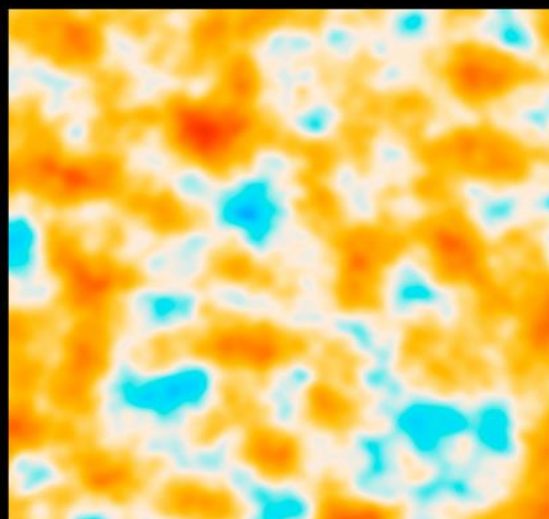
И.А. Струков



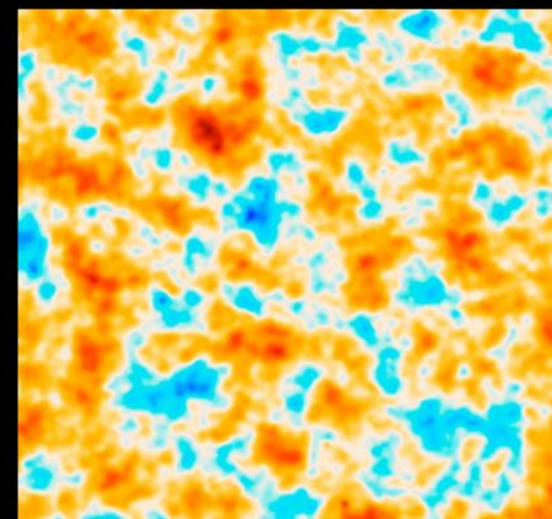
Область “холодного”
пятна в данных “Реликта”



COBE



WMAP



Planck

Наземный баллонный эксперимент по исследованию анизотропии реликтового излучения BOOMERanG

В 1998 году в Антарктике был осуществлен баллонный эксперимент «BOOMERanG» (*Ballon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geomagnetics*).

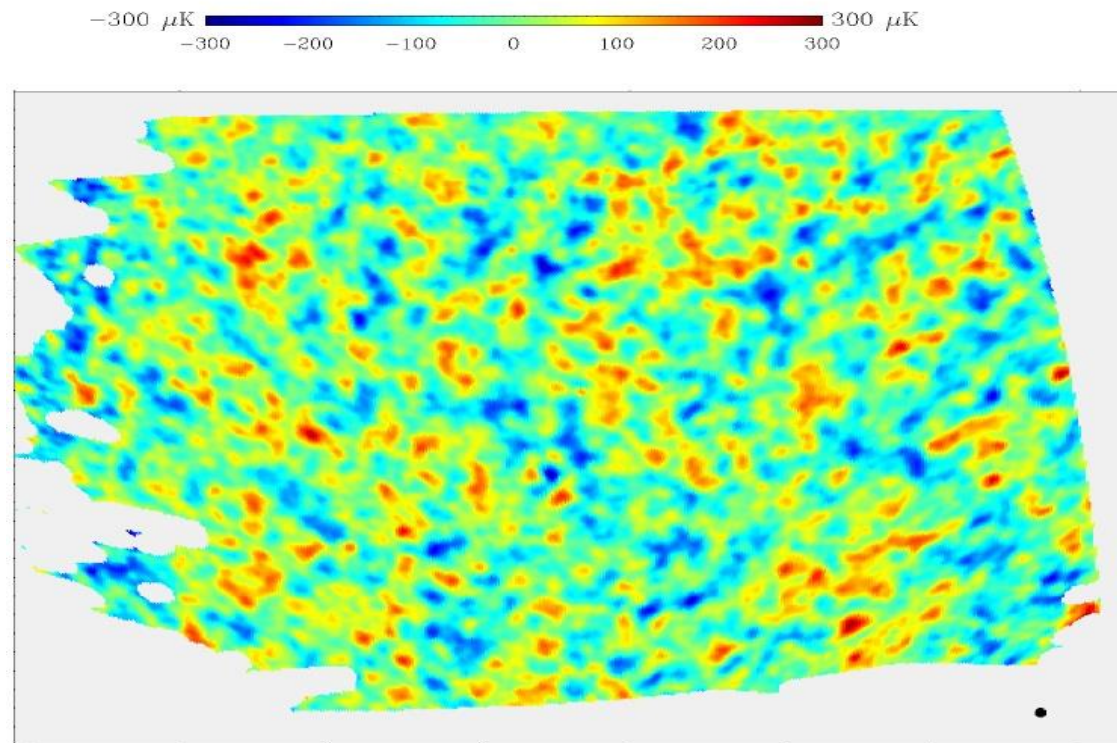
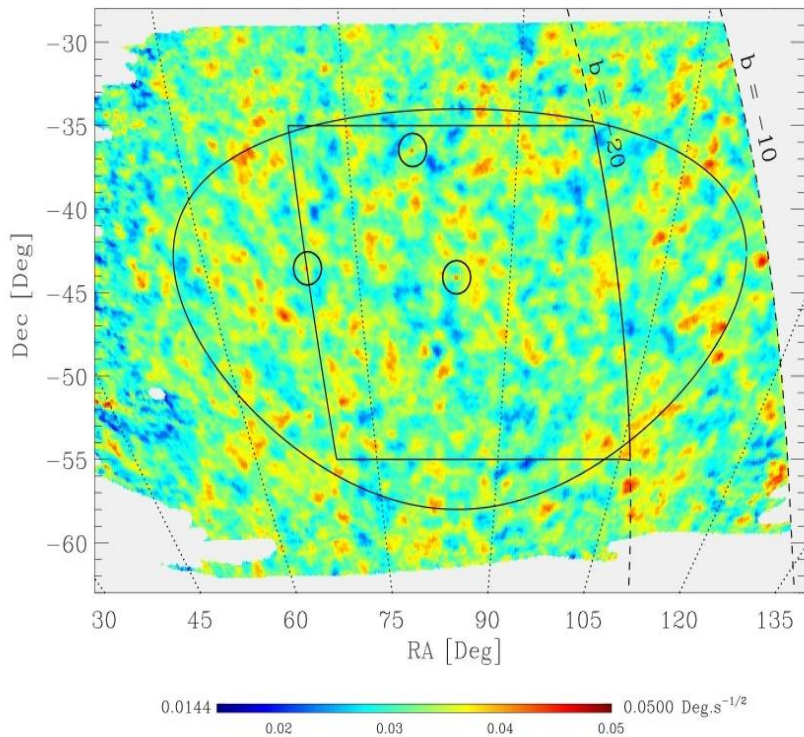
Задача эксперимента: построение углового спектра анизотропии реликтового излучения.

Основная цель эксперимента: измерение мощности углового спектра анизотропии реликтового излучения в районе первого из трех доплеровских пиков ($50 < L < 800$, что соответствует угловому диапазону на небе от нескольких градусов до 10 угловых минут).

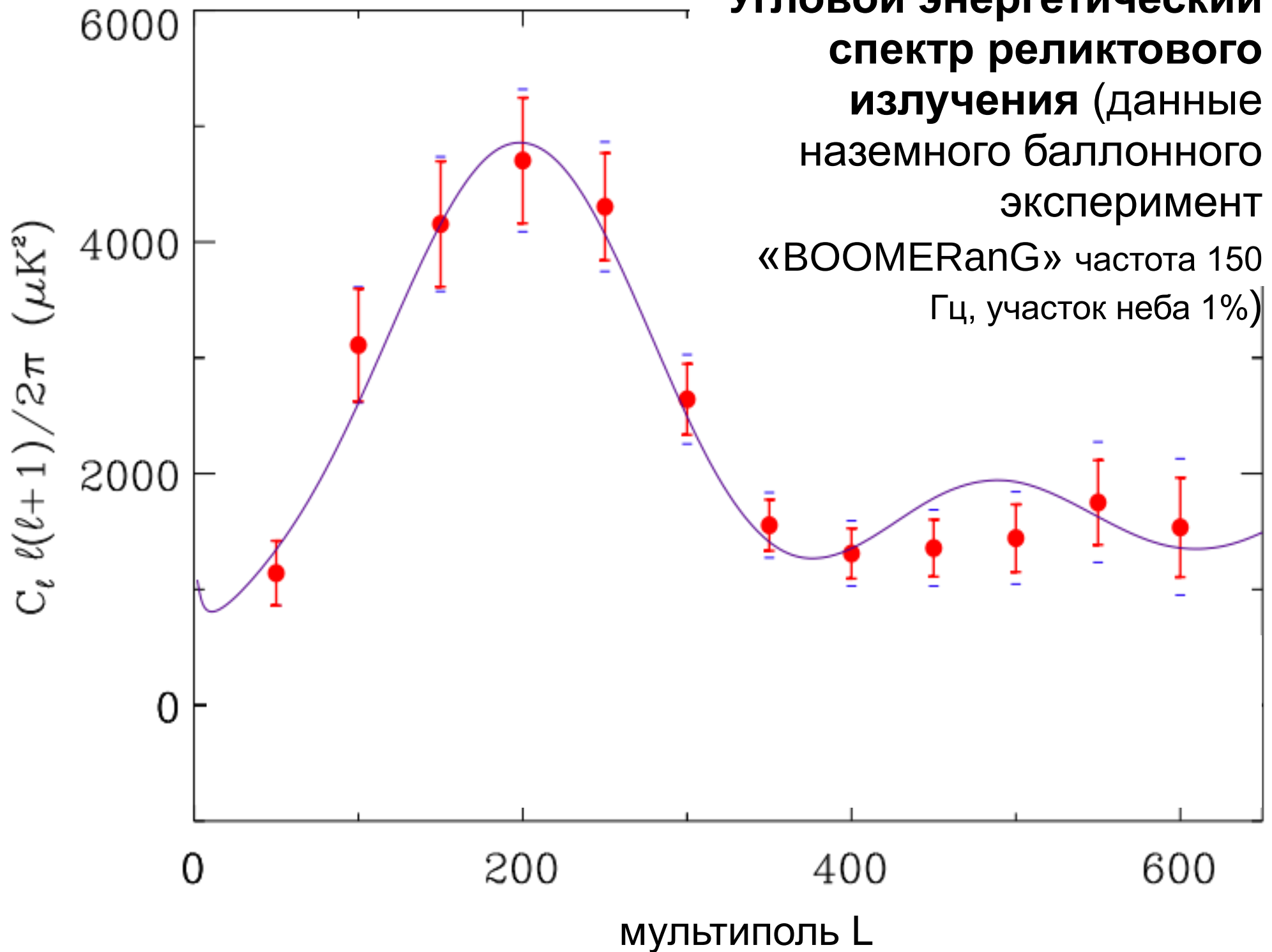


Проект «BOOMERanG» подготовили астрономы и физики нескольких стран, основной вклад был со стороны итальянских астрономов, а также астрономов из США и Великобритании. Глава проекта: астроном из римского университета "La Sapienza" **Паоло де Бернардис.**

В результате эксперимента «BOOMERanG» была получена новая радиокарта анизотропии реликтового излучения общей площадью около 5% неба



**Угловой энергетический
спектр реликтового
излучения (данные
наземного баллонного
эксперимент
«BOOMERanG» частота 150
Гц, участок неба 1%)**

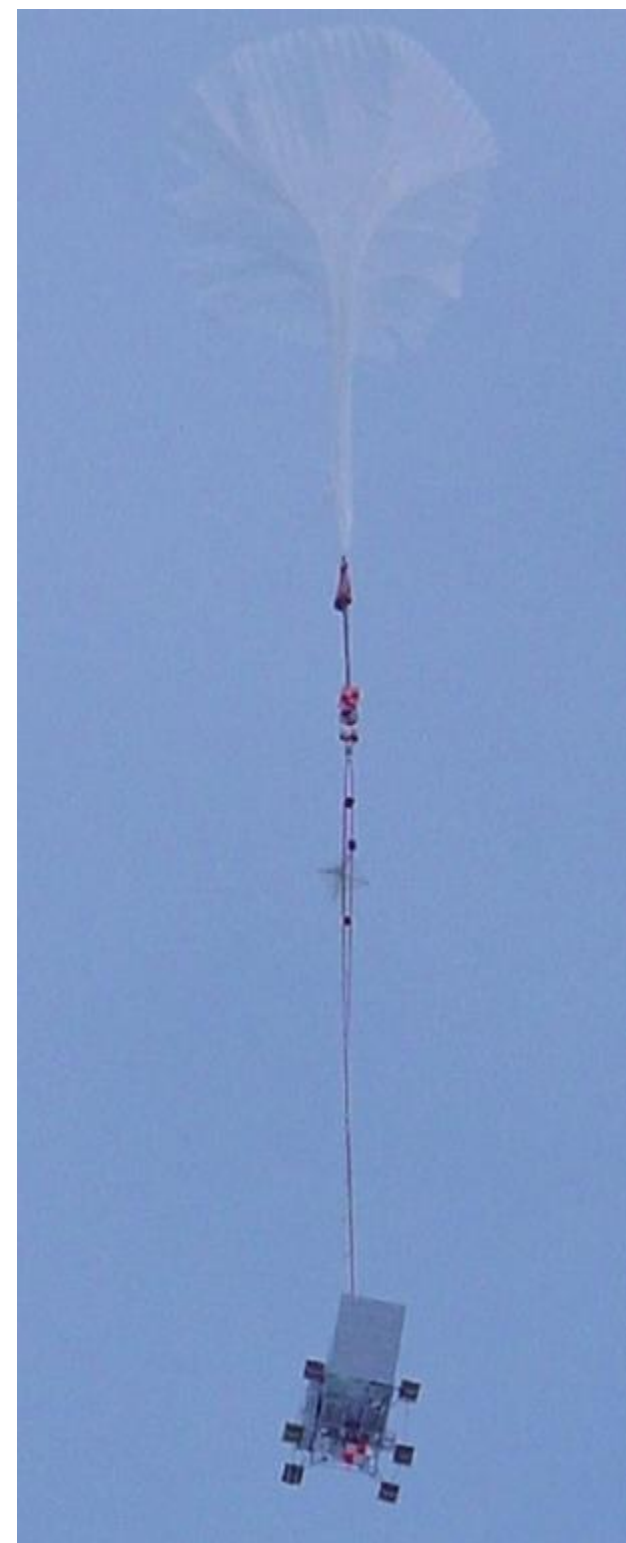


Наземный баллонный эксперимент по исследованию анизотропии реликтового излучения Archeops

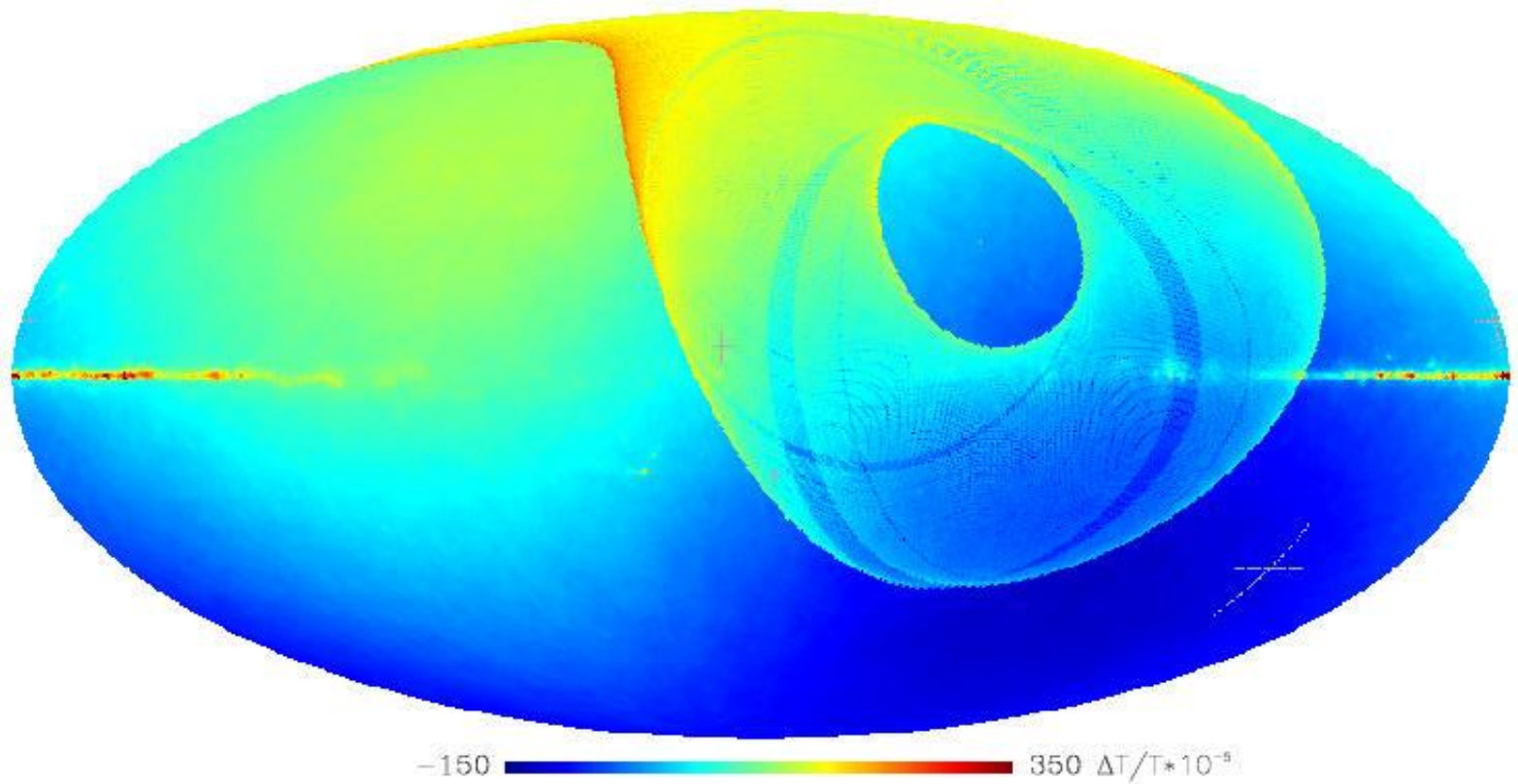
- Эксперимент **Archeops** был предназначен для измерения анизотропии и поляризации реликтового излучения в диапазоне значений мультипольного числа $15 < L < 350$.
- Эксперимент был разработан во Франции при участии многих европейских исследователей, включая российских космологов А.А. Старобинского и И.А. Струкова.



• **Archeops** — предшественник высокочастотной части эксперимента **Planck**.

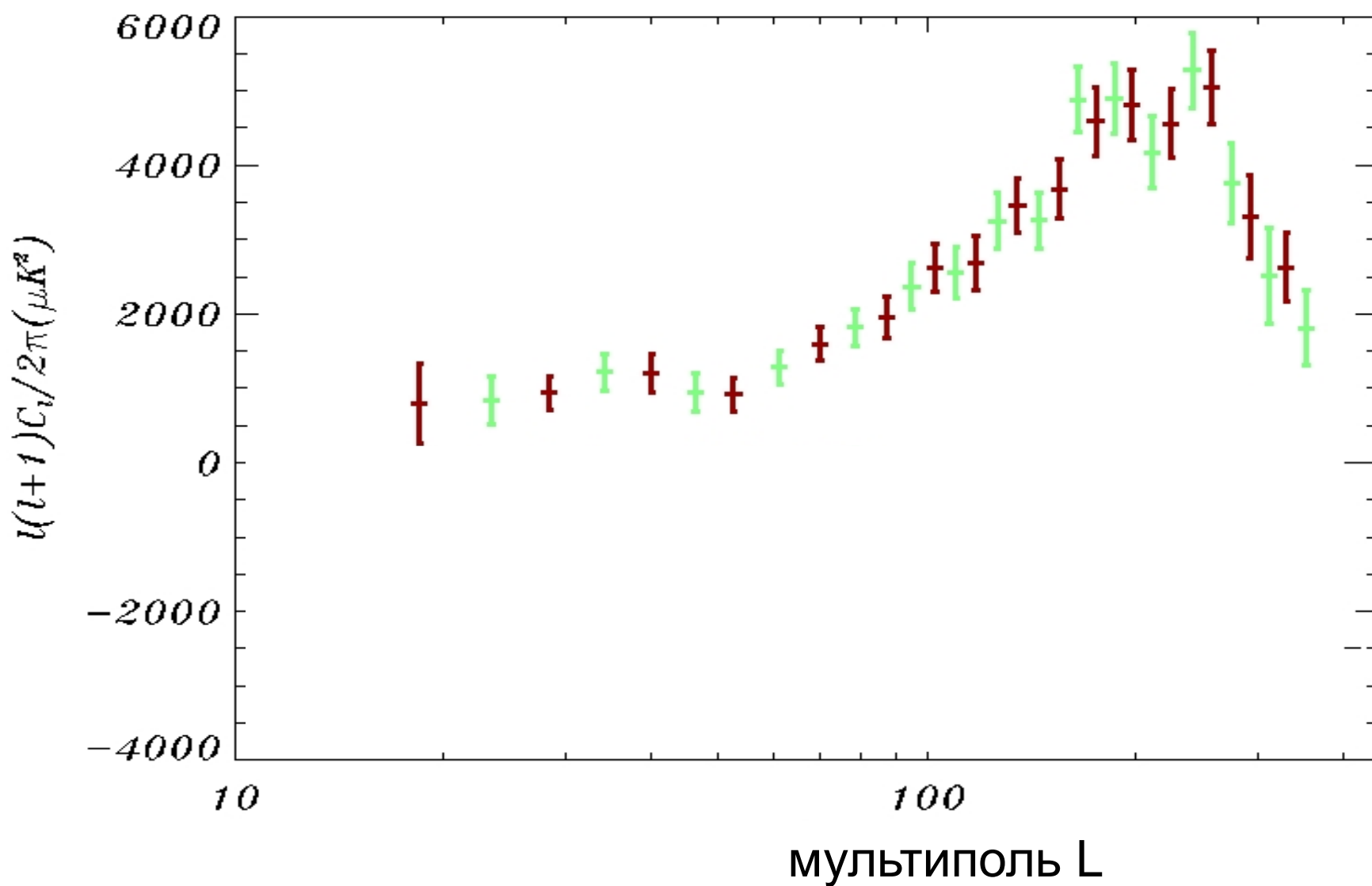


Наземный баллонный эксперимент по исследованию анизотропии реликтового излучения Archeops



.Эксперимент **Archeops** был проведен в течение **февраля 2002 года**. Воздушный шар был запущен в Швеции (Кируна), достиг высоты примерно 34 км и спустя 21 час был подобран около г. Норильск. .В результате наблюдений была составлена карта неба, которая покрывает 30% всей сферы с угловым разрешением 8 минут дуги на частоте **143 ГГц** и **217 ГГц**.

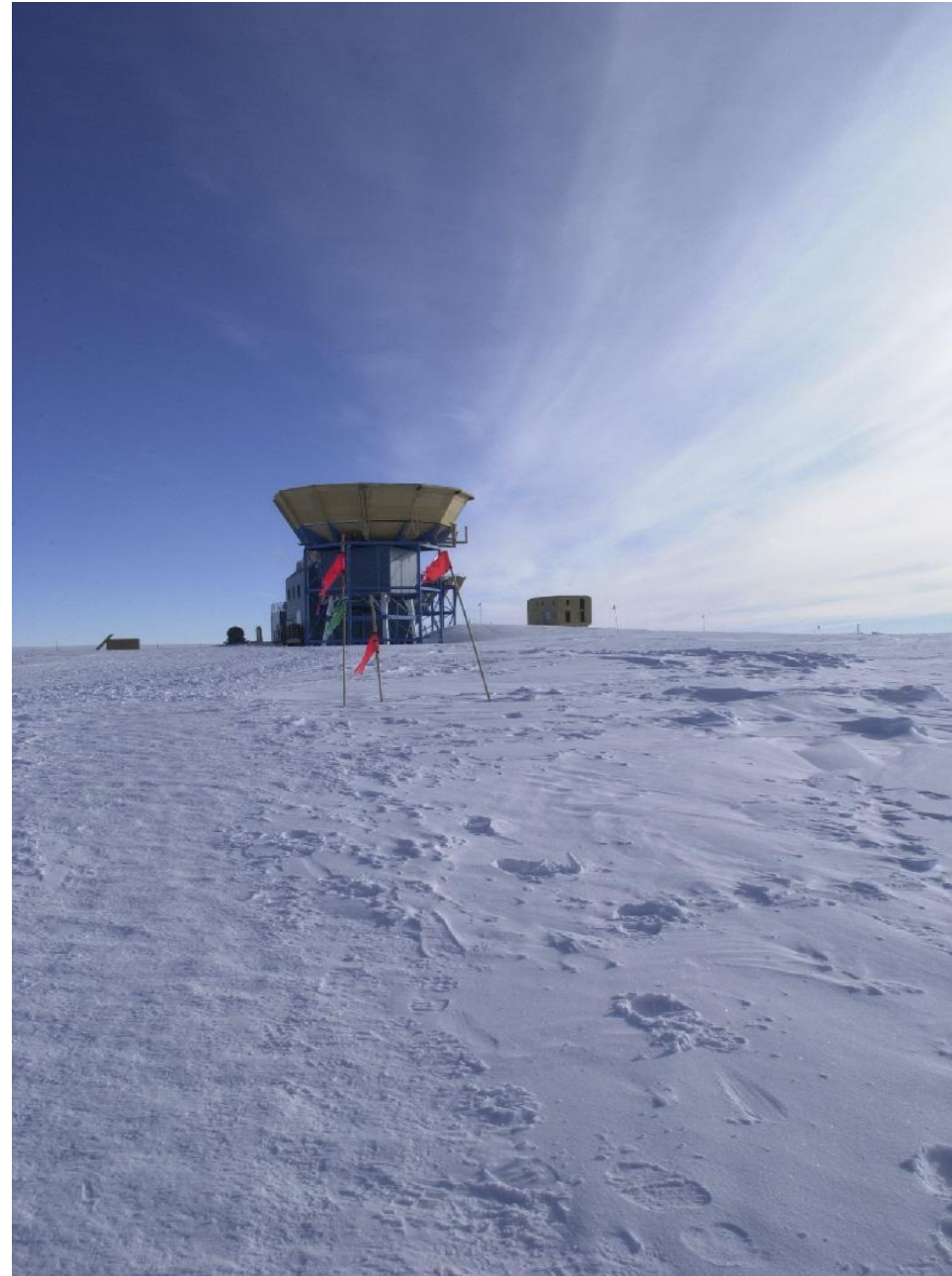
**Угловой энергетический
спектр реликтового
излучения (данные
наземного баллонного
эксперимент Archeops)**



DASI

В конце 2002 года группа астрономов, проводивших эксперимент **DASI** (*Degree Angular Scale Interferometer*, Южный полюс) объявила о детектировании поляризации реликтового излучения.

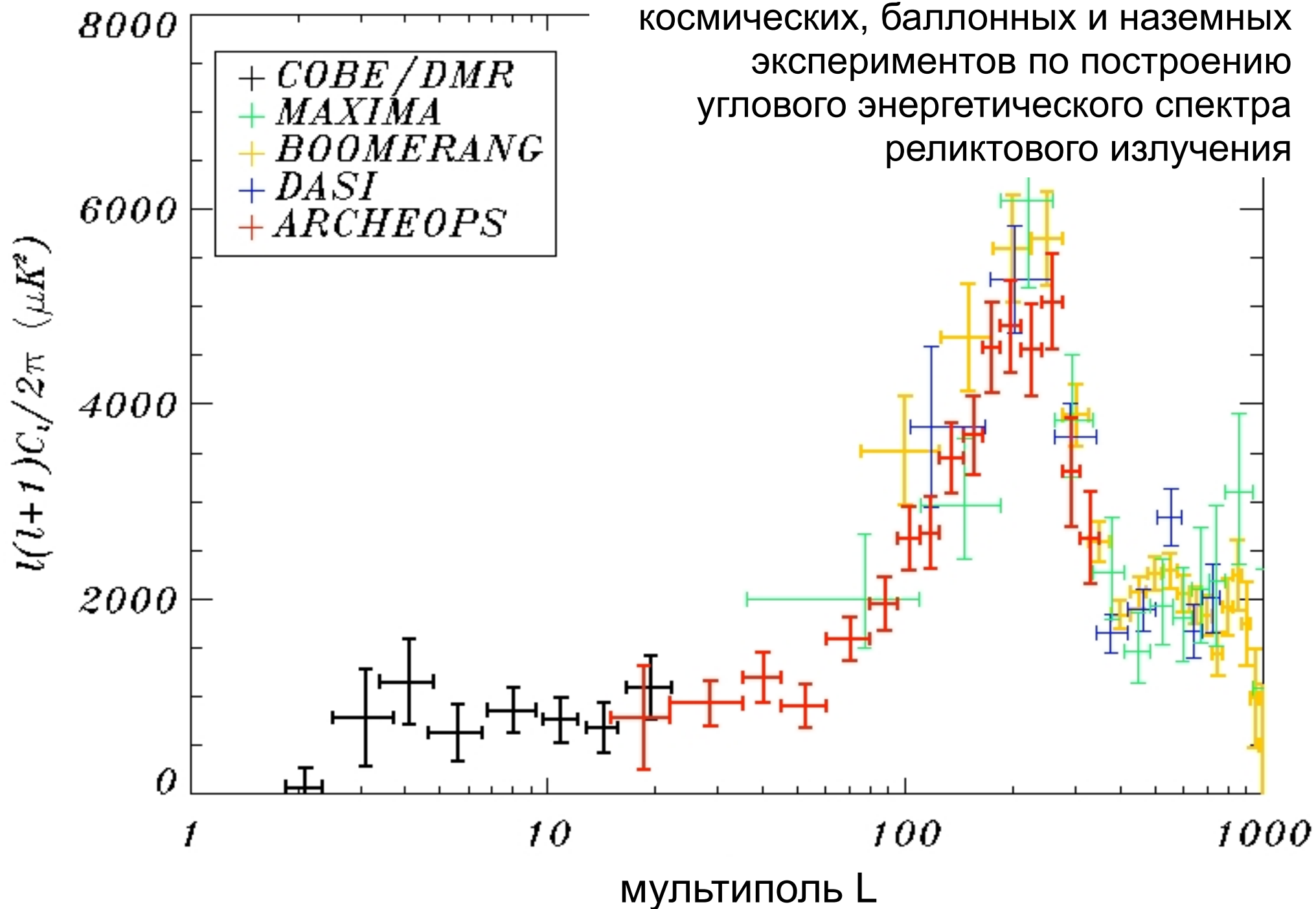
Анизотропия реликтового излучения обладает *поляризацией*, измерение которой позволяет различать вклад возмущений плотности и вклад от космологических гравитационных волн. Последние не найдены (в отличие от обнаруженных гравитационных волн от сливающихся массивных звезд и черных дыр). Исследования продолжаются.

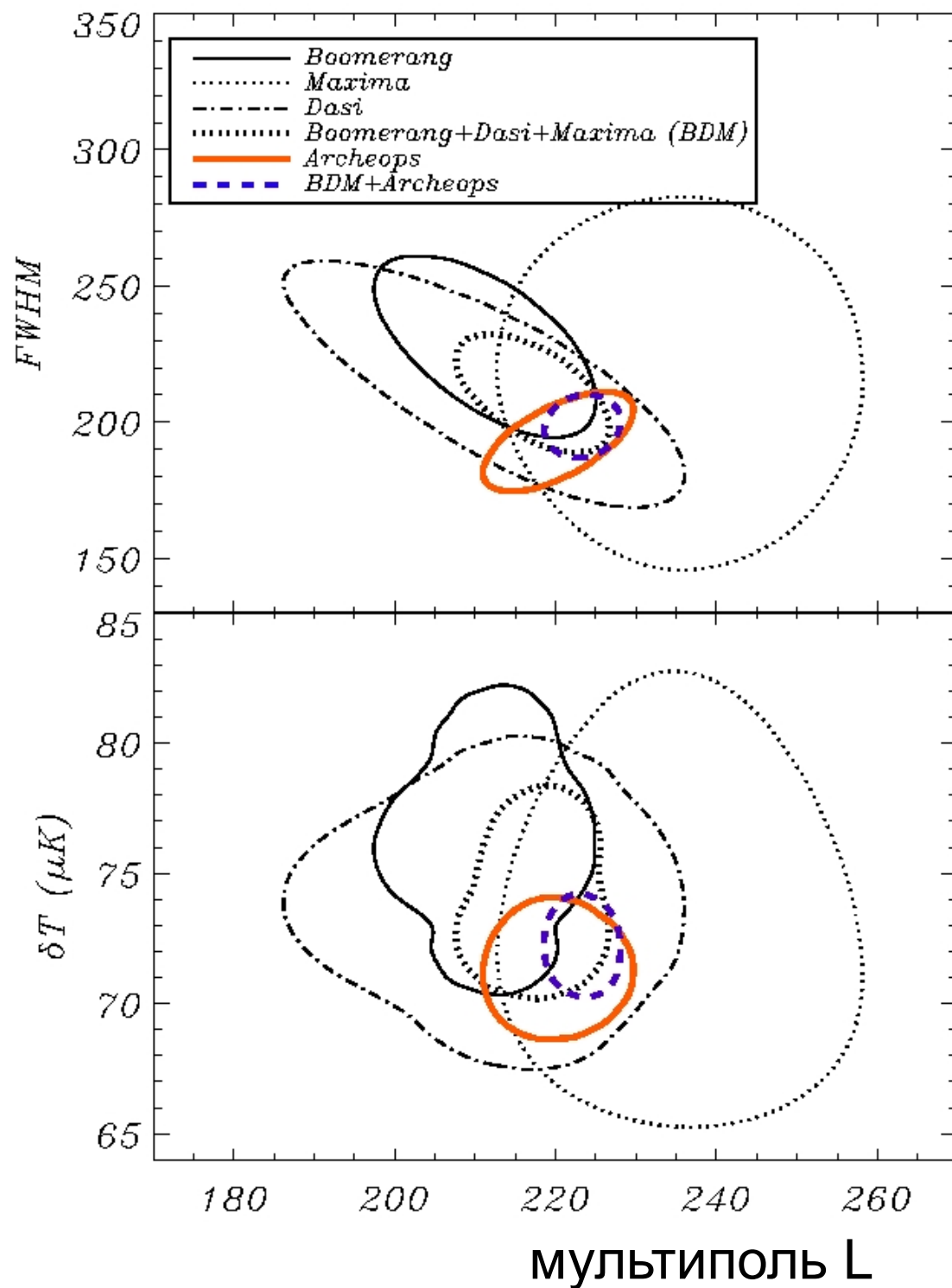


DASI

Радиоинтерферометр **DASI** для изучения анизотропии и поляризации реликтового излучения — это набор из 13 небольших радиотелескопов. Каждый телескоп состоит из антенны в виде рупора диаметром 20 см, окруженного кожухом для подавления взаимодействия между отдельными рупорами. Радиометры работали на 10 частотах каждая полосой в 1 ГГц и в интервале частот 26 — 36 ГГц. Расстояние между рупорами изменялось в интервале от 25 см до 121 см, что соответствовало разрешению 22 угловых минуты или максимуму чувствительности в интервале мультипольных коэффициентов **$140 < L < 900$** .

Совместные результаты первых
космических, баллонных и наземных
экспериментов по построению
углового энергетического спектра
реликтового излучения

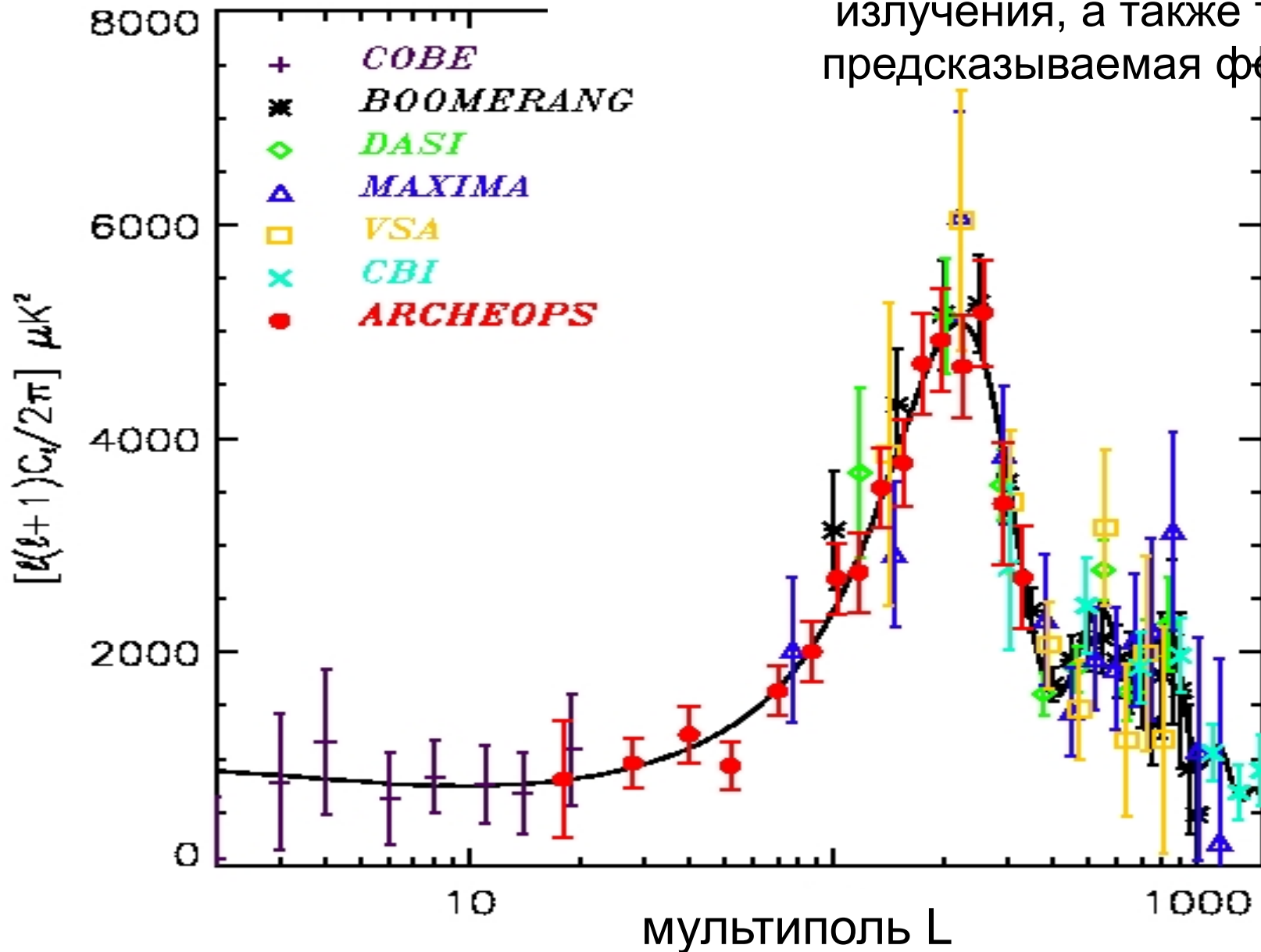




Ширина первого доплеровского пика в разных наблюдательных данных.

Амплитуда первого пика как функция положения в разных наблюдательных данных.

Совместные результаты первых космических, баллонных и наземных экспериментов по построению углового энергетического спектра реликтового излучения, а также теоретически предсказываемая форма спектра

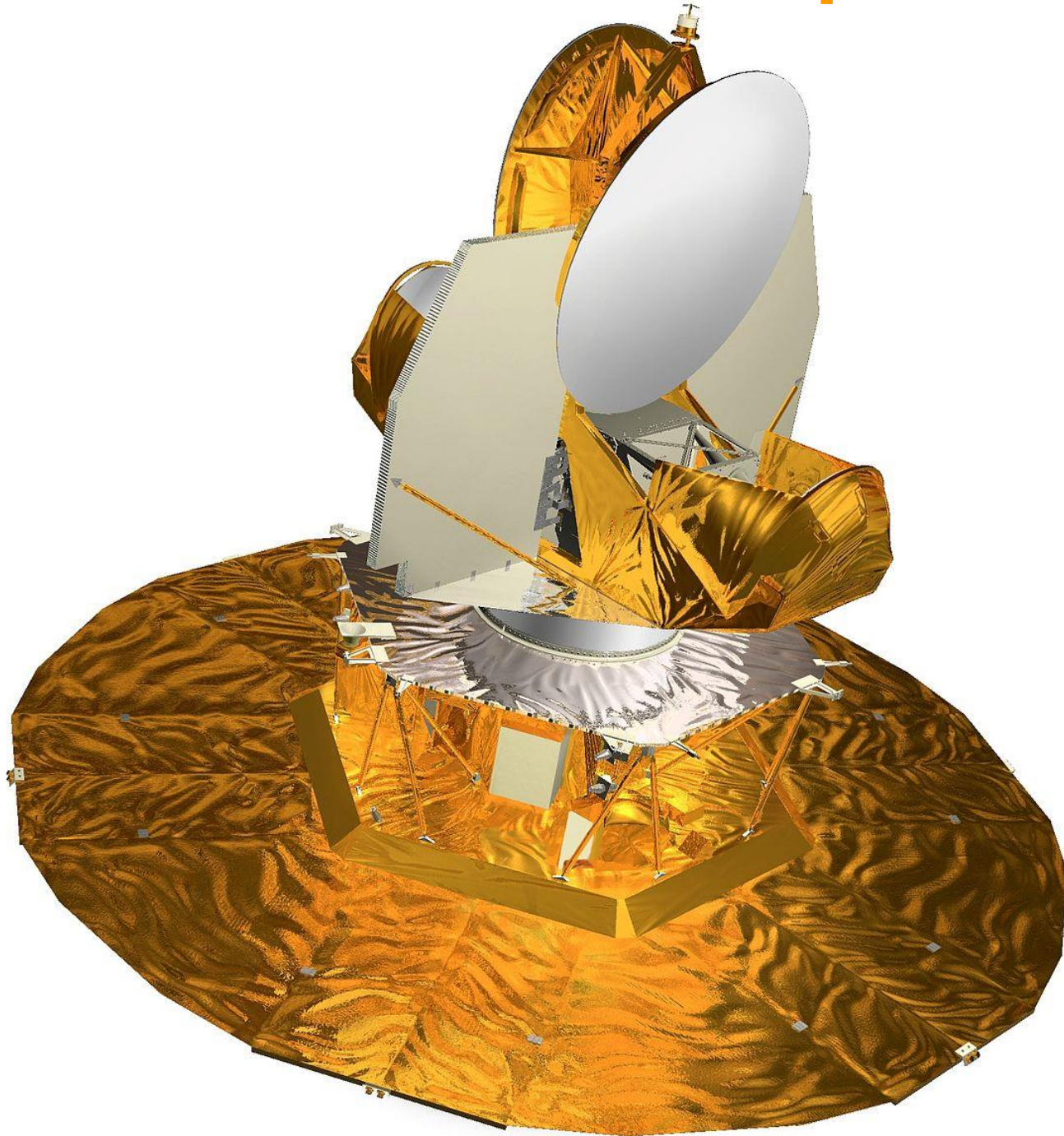


WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) и **Planck** –

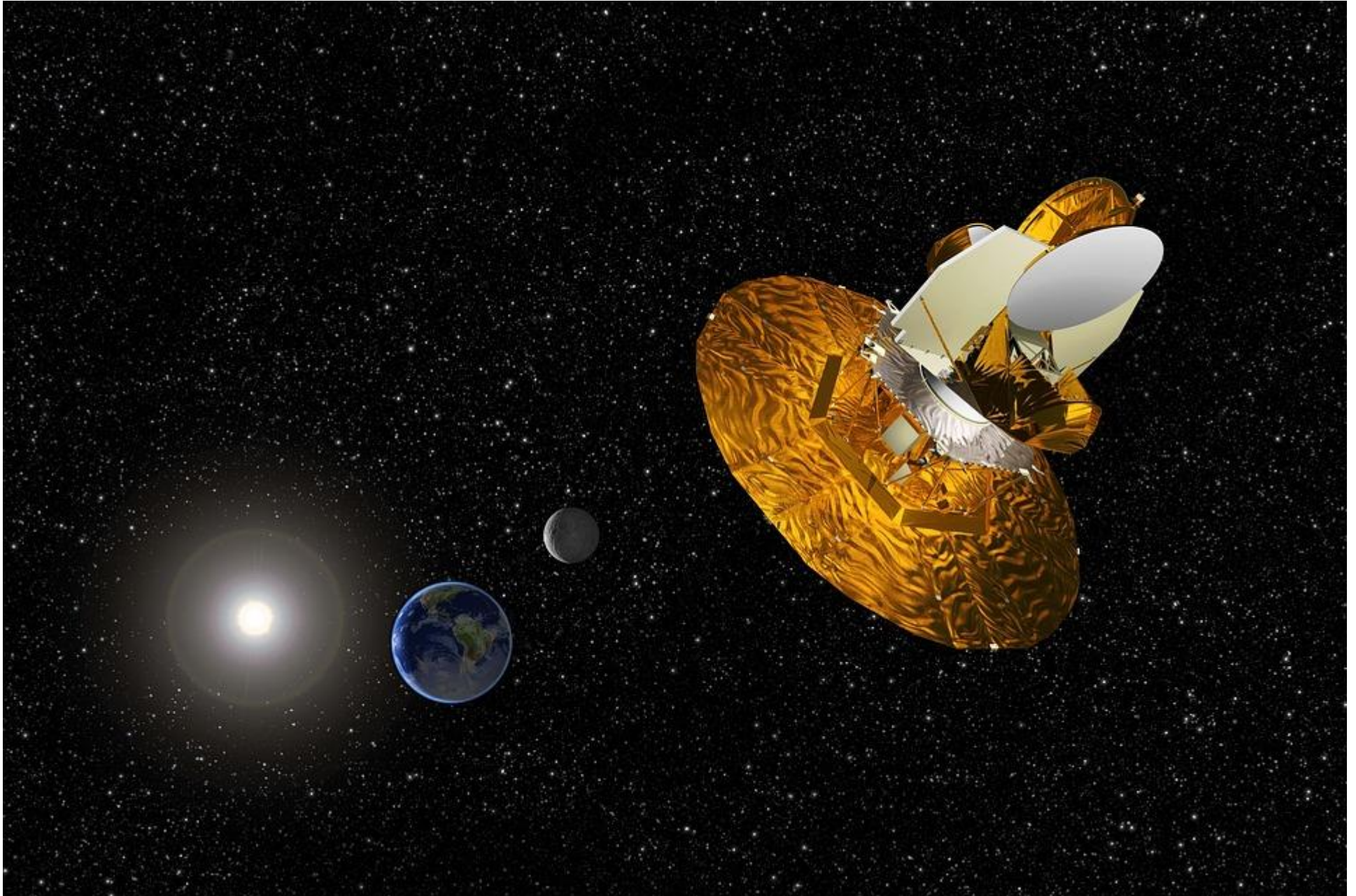
космические обсерватории, на данных которых основываются современные знания о реликтовом излучении и его анизотропии и поляризации.

Совместно с данными по **сверхновым**, по **крупномасштабной структуре Вселенной**, по **распространенности химических элементов**, по оценкам количества **темной материи** эти данные позволяют получить значения космологических параметров, характеризующих законы эволюции Вселенной.

WMAP: космическая обсерватория



WMAR: космическая обсерватория



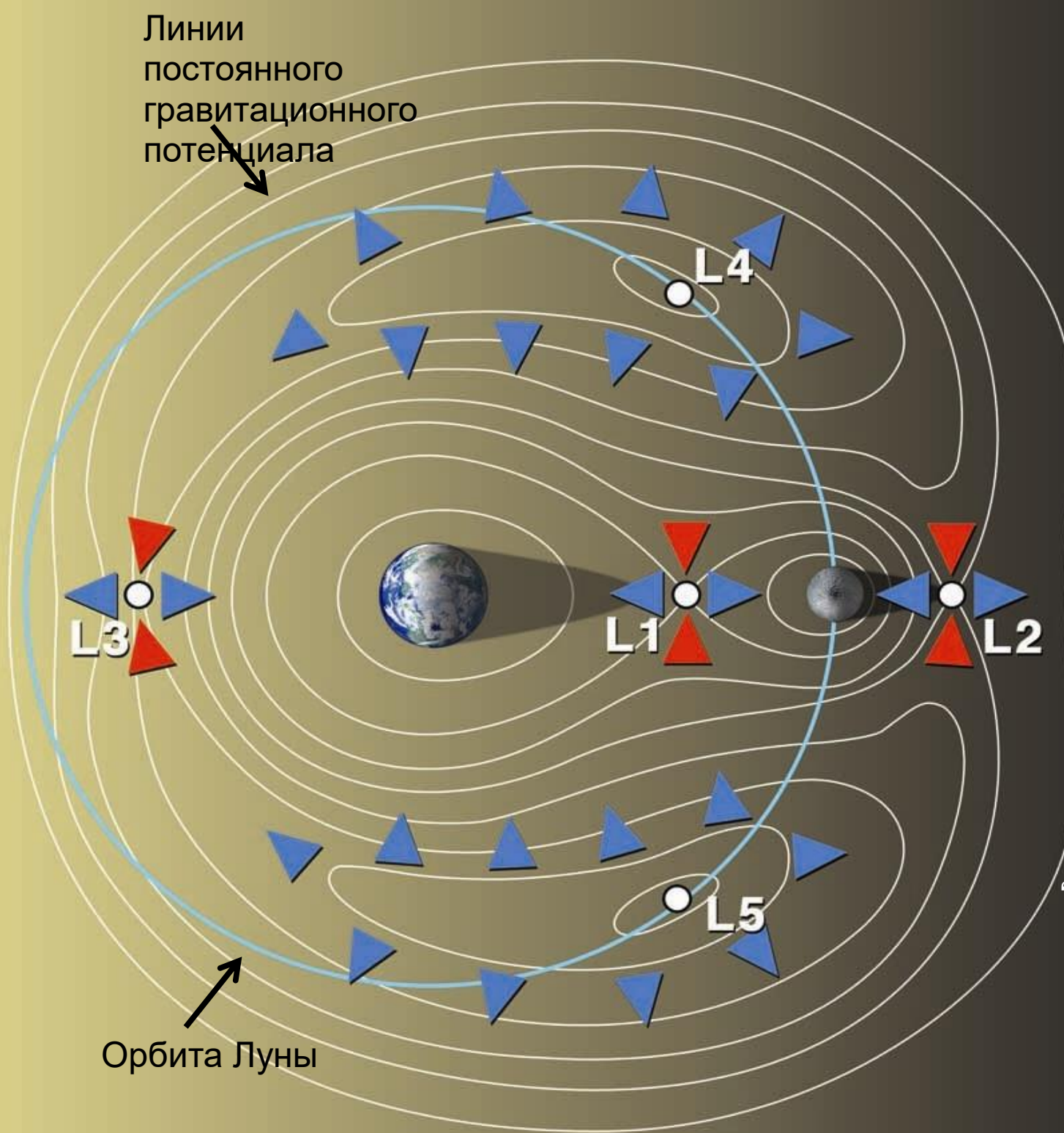
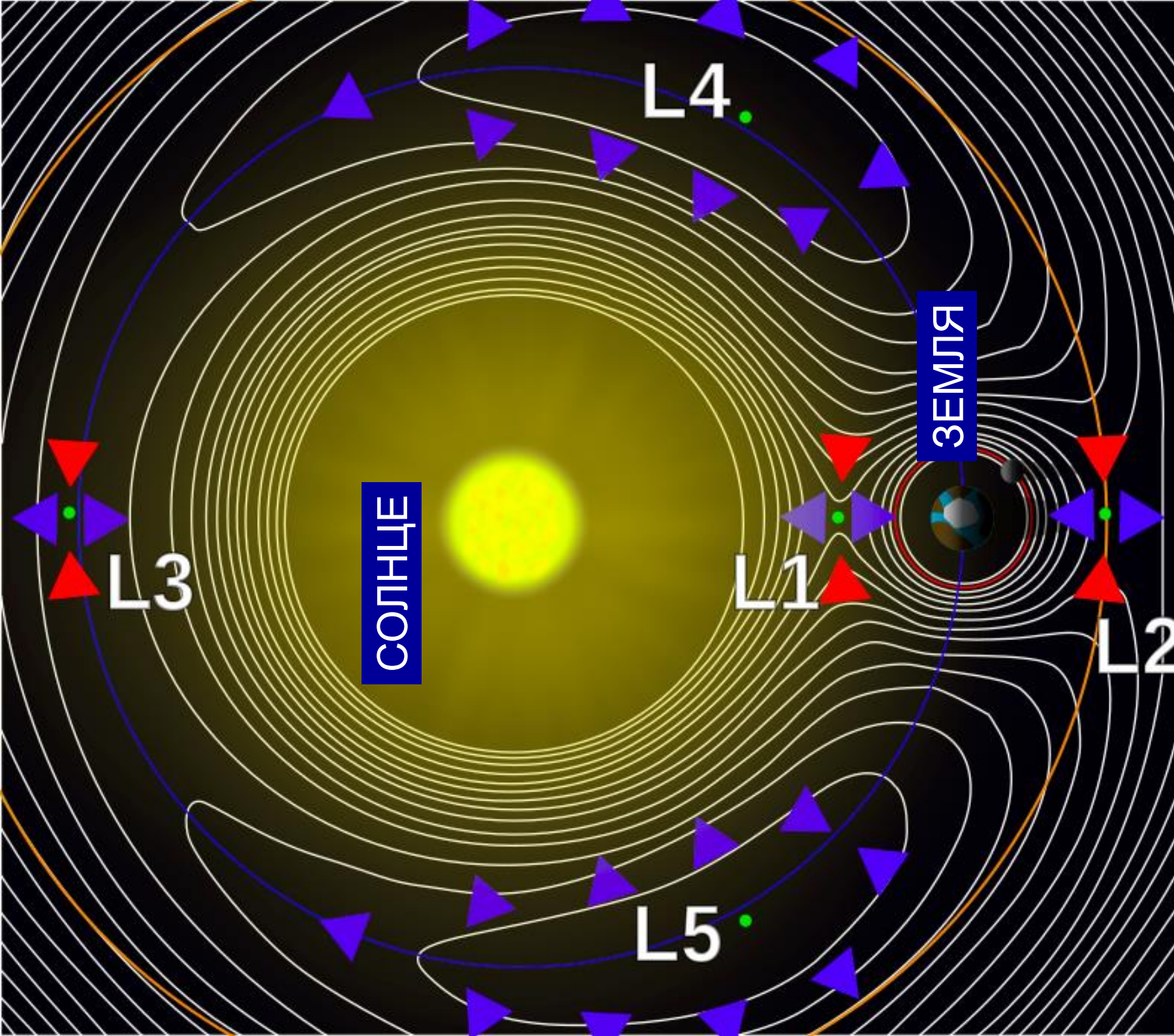


Схема расположения
т.н. **точек Лагранжа**
в гравитационно-
связанной системе,
состоящей из Земли и
Луны.

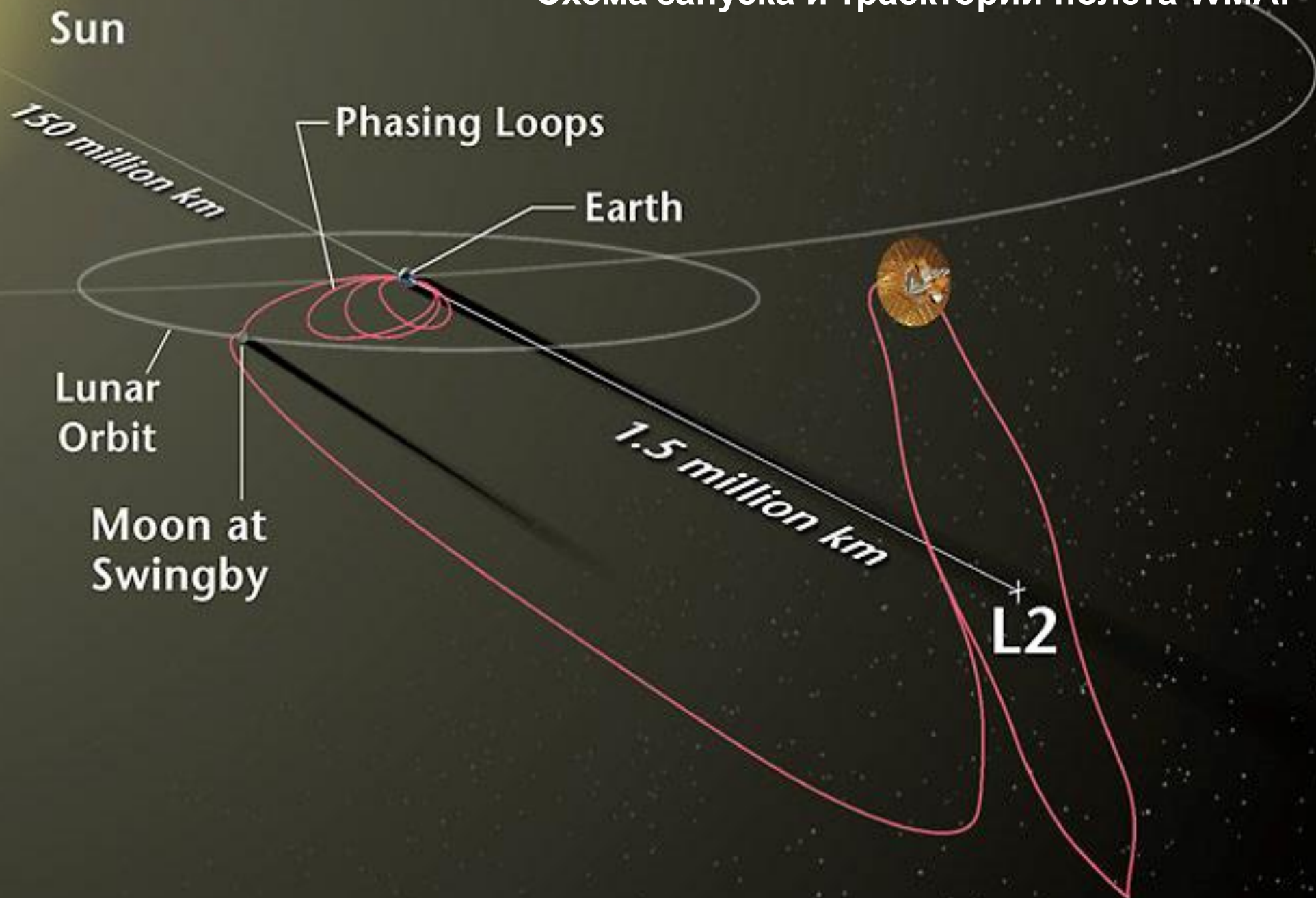
Стрелками указано
направление действия
гравитационного поля.

Космический аппарат,
находящийся вблизи
одной из точек
Лагранжа **L1, L2, L3**
ведет себя так, как
будто вращается по
устойчивой
орбите вокруг массы,
помещенной в эти
точки. Такой
“воображаемый эффект”
присутствия массы
создается
конфигурацией
гравитационных полей
системы “Земля-Луна”



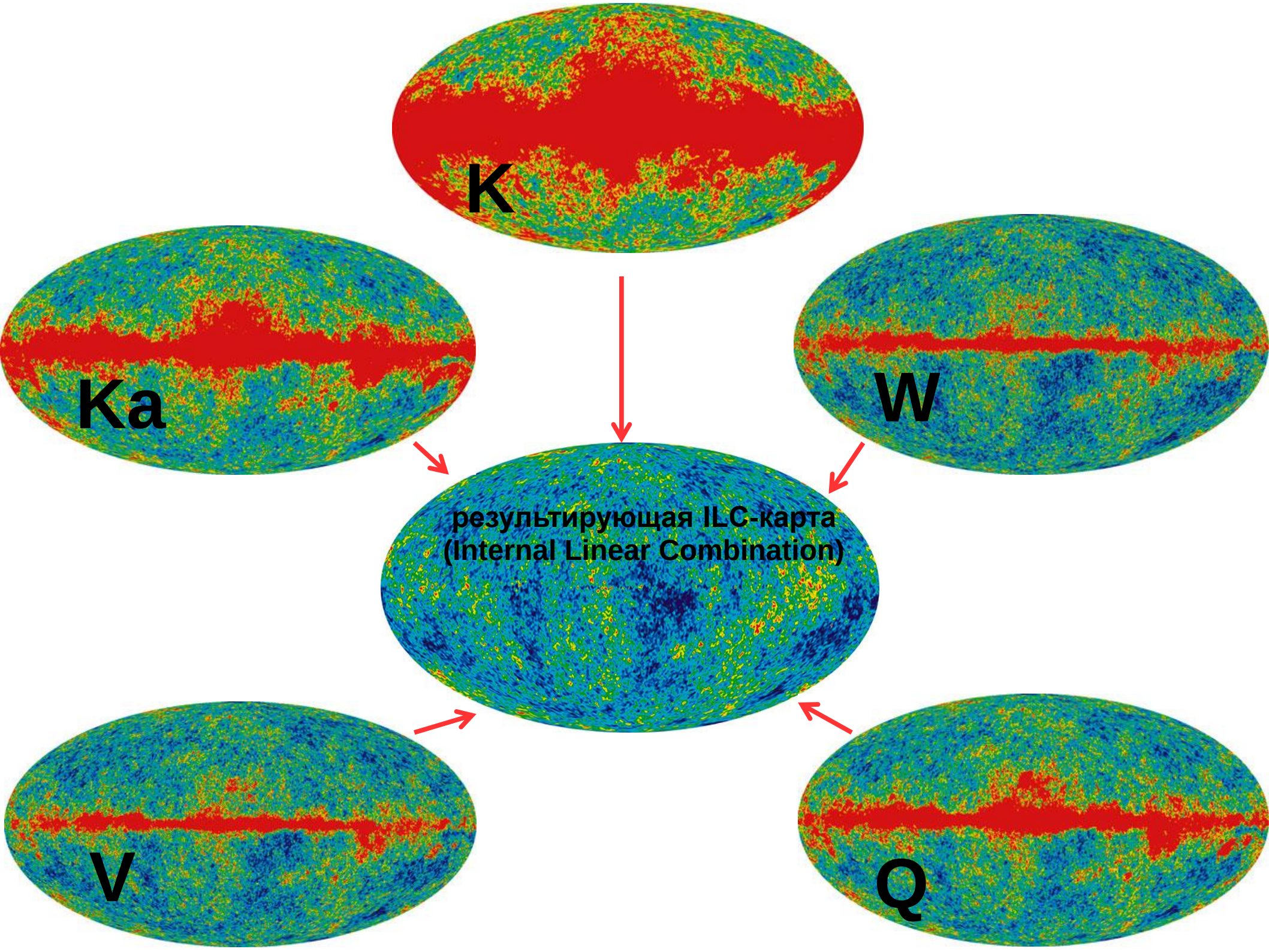
Аналогично
можно
определить
точки
Лагранжа для
гравитационн
о-связанной
системы
“Солнце-
Земля”

Схема запуска и траектории полета WMAP

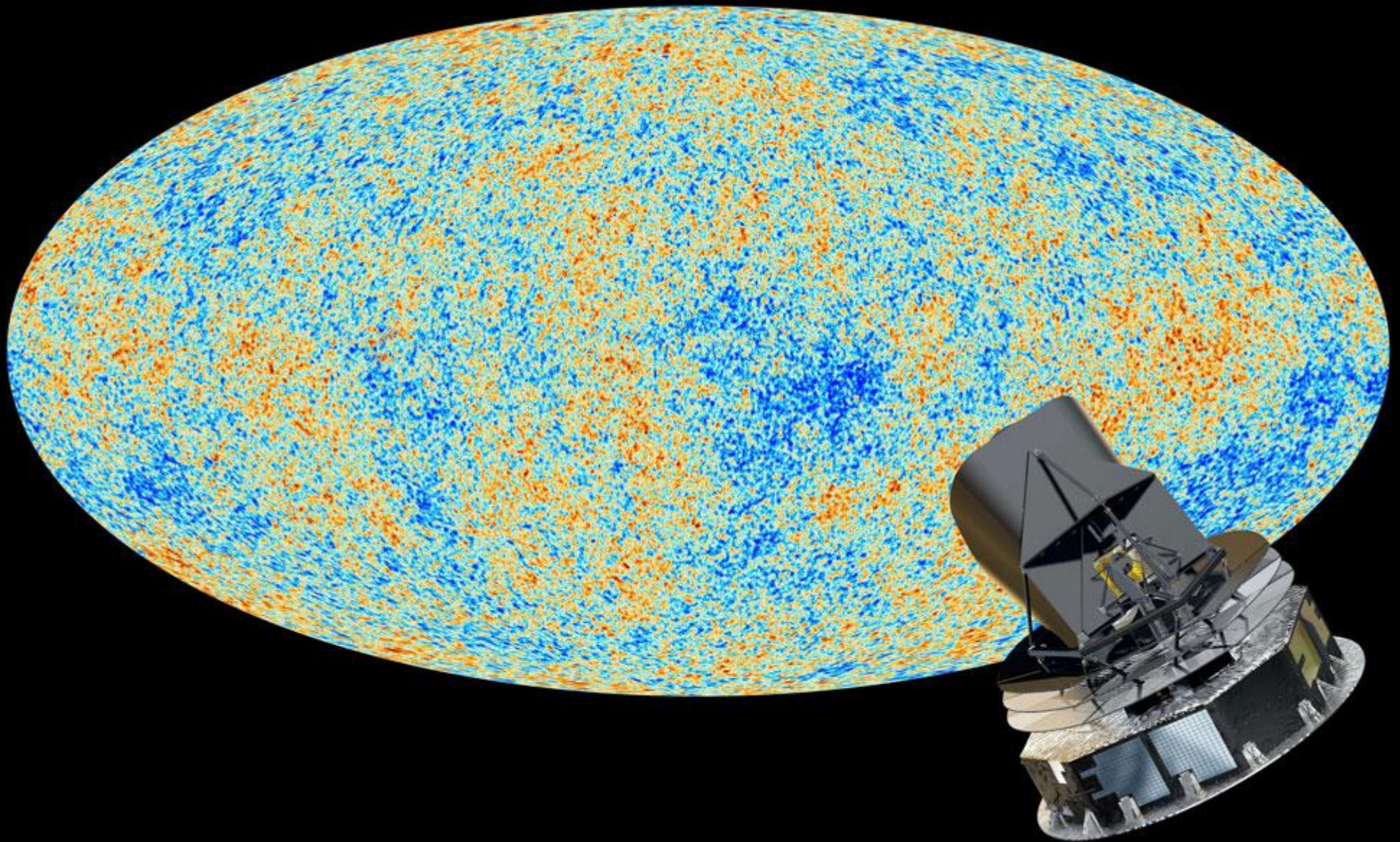


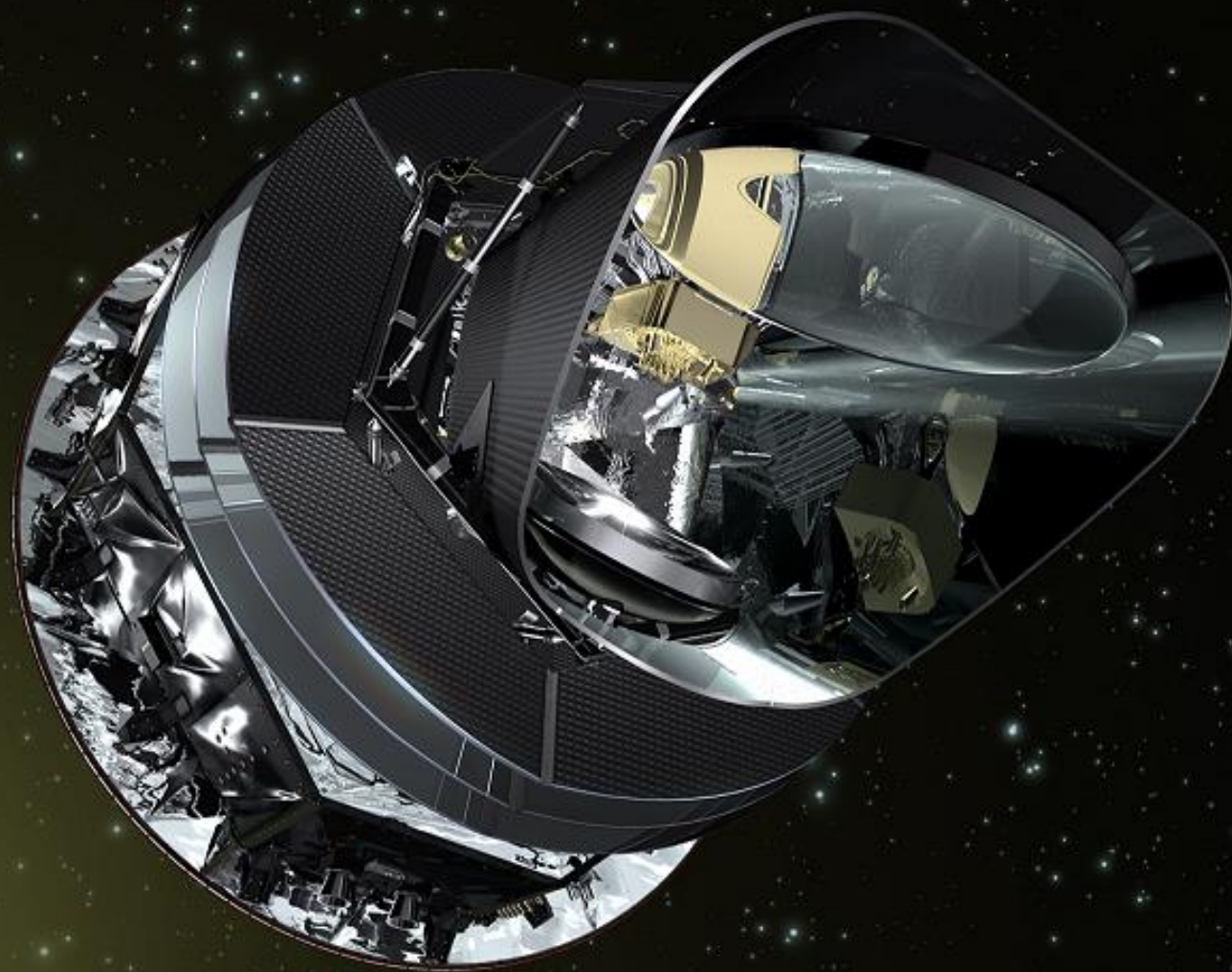
Получение и обработка данных анизотропии реликтового излучения включает в себя следующие основные этапы

- Регистрация данных (космические радиообсерватории “Реликт”, COBE, WMAP, Planck; баллонные обсерватории BOOMERanG, Archeops, DASI и др.)
- Построение карты анизотропии путем сопоставления температуры пронумерованным пикселям.
- Разделение сигнала анизотропии реликтового излучения и других сигналов: **синхротронного излучения, излучения пыли, излучения ускоряющихся электронов, излучения точечных источников, возможного излучения экзотических объектов (космических струн).**
- Построение **углового энергетического спектра**, представляющего собой зависимость мощности излучения от номера мультиполя (“колебания” поверхности последнего рассеяния, что вызвано как кинематическими эффектами, так и потенциальными эффектами, т.е. неоднородностью распределения крупномасштабных гравитационных полей и неоднородностью распределения вещества на поверхности последнего рассеяния).
- Статистический анализ сигнала анизотропии.

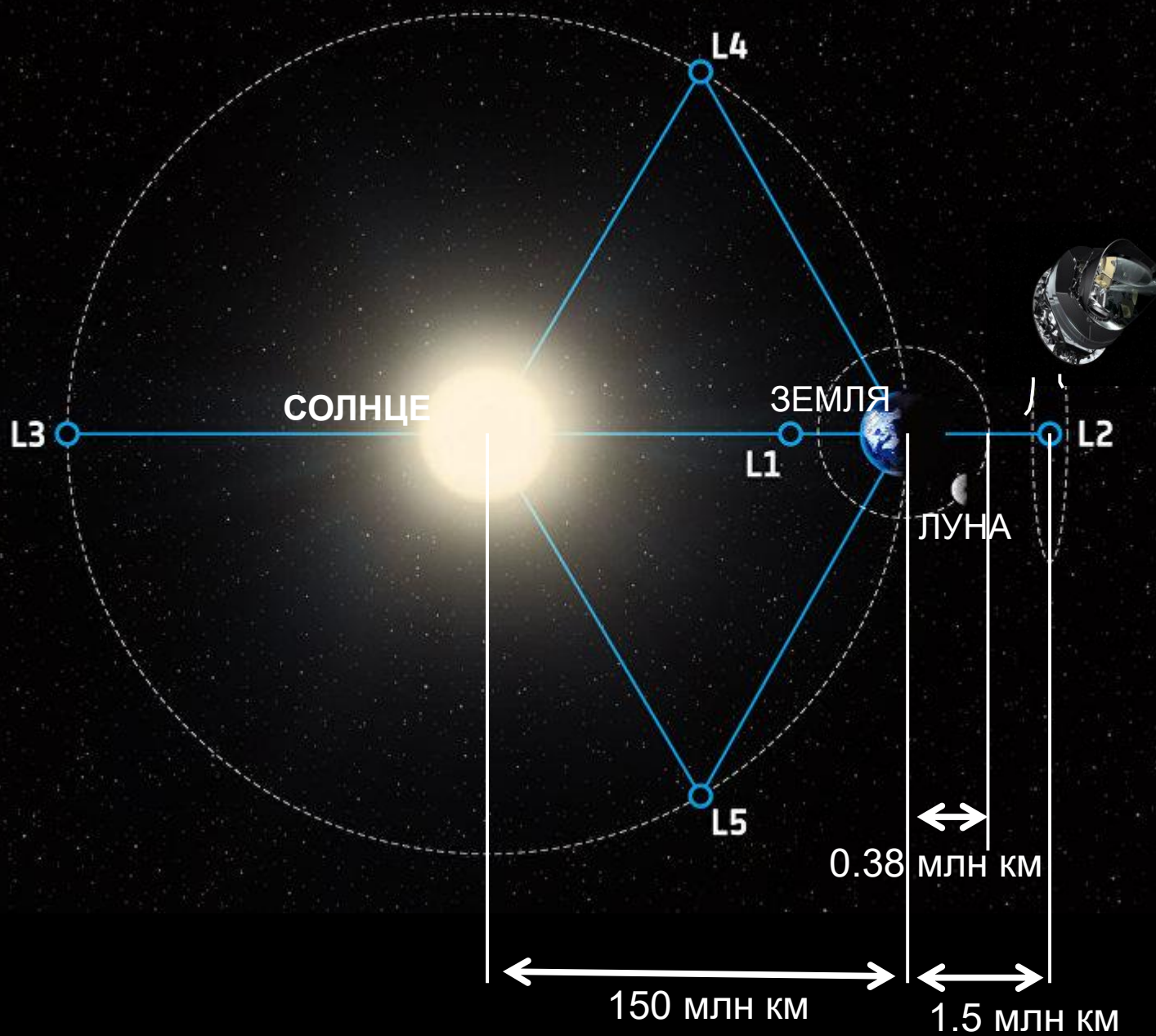


Planck и полученная им карта анизотропии реликтового излучения



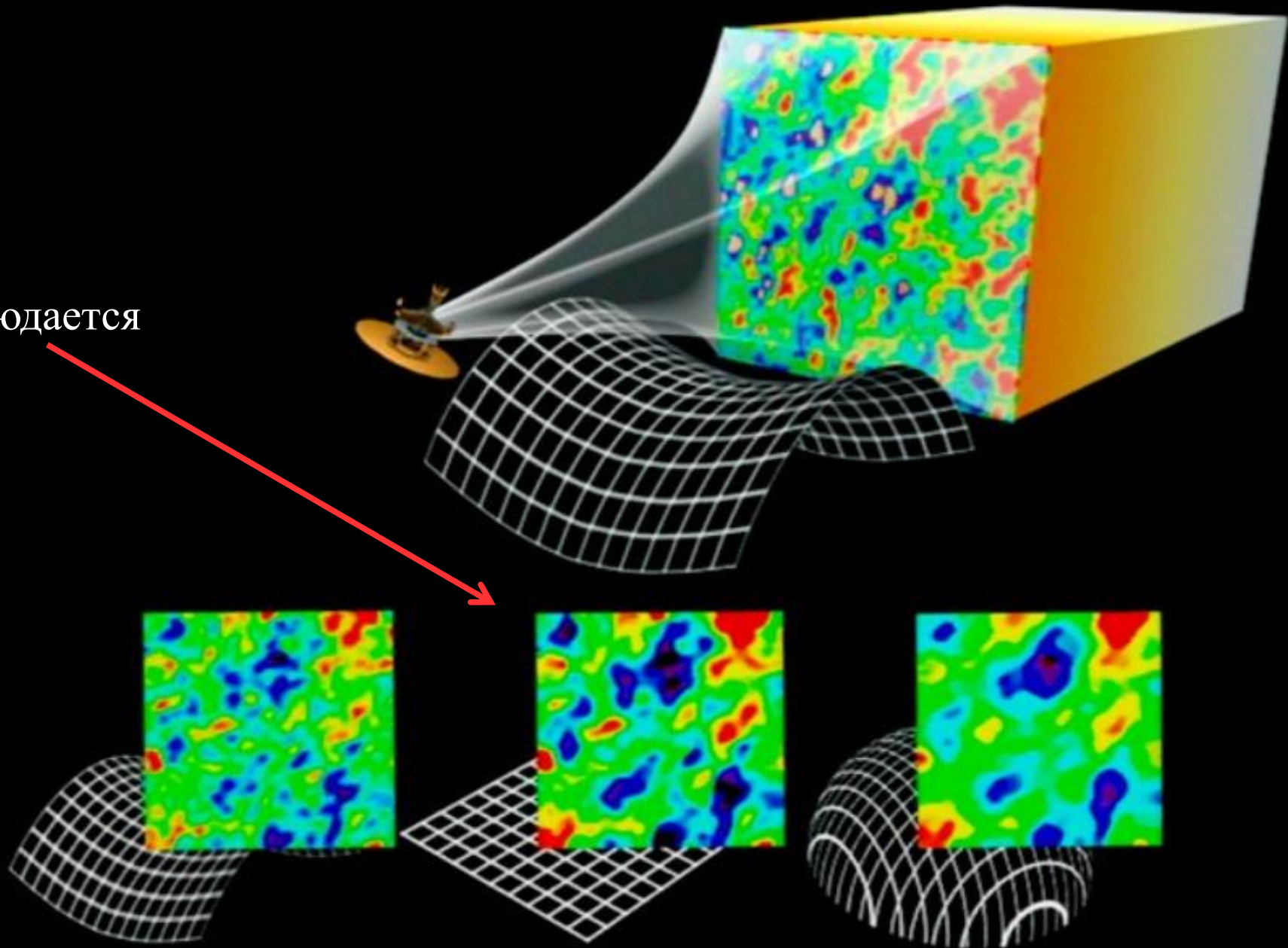


Planck: космическая обсерватория



Определение геометрии Вселенной по данным анизотропии реликтового излучения

наблюдается



Сравнение величин некоторых космологических параметров, полученных WMAP, Planck и другими независимыми экспериментами при использовании Λ CDM-модели

Величина	Полная плотность Вселенной Ω_{tot}	плотность барионов Ω_b	плотность барионов и темной материи Ω_m	плотность темной энергии Ω_Λ	параметр уравнения состояния темной энергии w
Значение	$1.001^{+0.002/-0.001}$	0.048	0.315 ± 0.007	0.685 ± 0.007	-1.03 ± 0.03
Метод измерения	Цефеиды (Freedman, et al. 2001)	Сверхновые звезды типа Ia (Riess, et al. 2011)	Анизотропия реликтового излучения (Aganim, et al. 2018)	Метод Тулли–Фишера (Tully, 1999)	Гравитационные линзы (Cardone, 2002)
Значение параметра Хаббла H_0 км/с/Мпк	71 ± 2 (случайная ошибка) ± 6 (систематическая ошибка)	73.24 ± 1.74	67.4 ± 0.5	82 ± 16	$58^{+17/-15}$
Нерешенная проблема расхождения величины параметра Хаббла в разных наблюдениях					

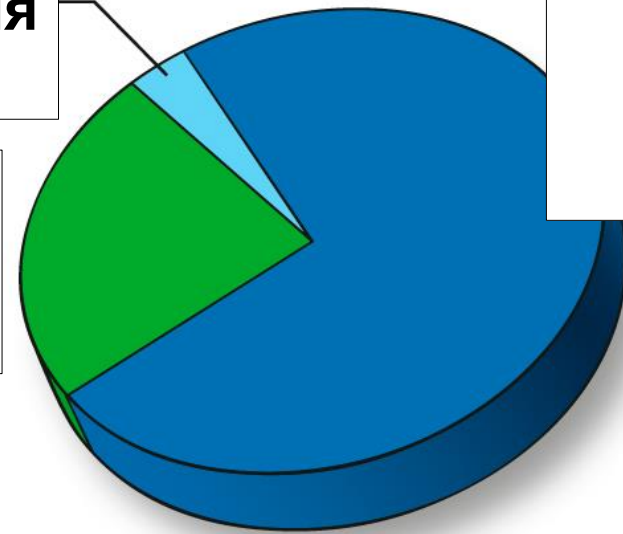
*данные 9 лет
работы
космической
обсерватории
WMAP*

**Современный
относительный
состав Вселенной**

**барионная материя
4.6%**

**темная
материя
23%**

**темная
энергия
72%**



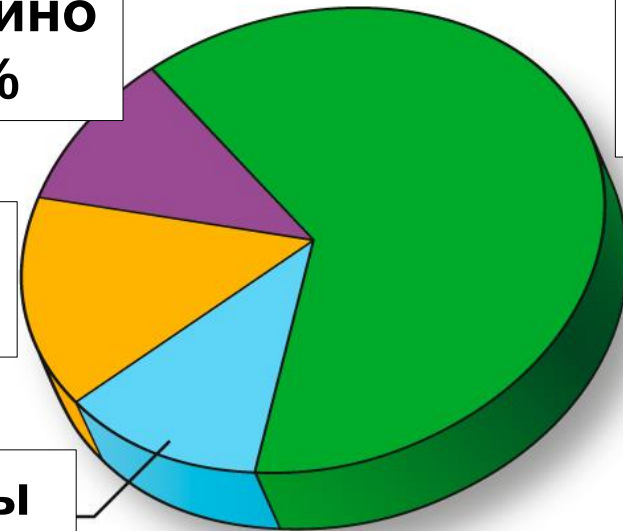
**Состав ранней
Вселенной через 380
тыс. лет после
Большого взрыва**

**нейтрино
10%**

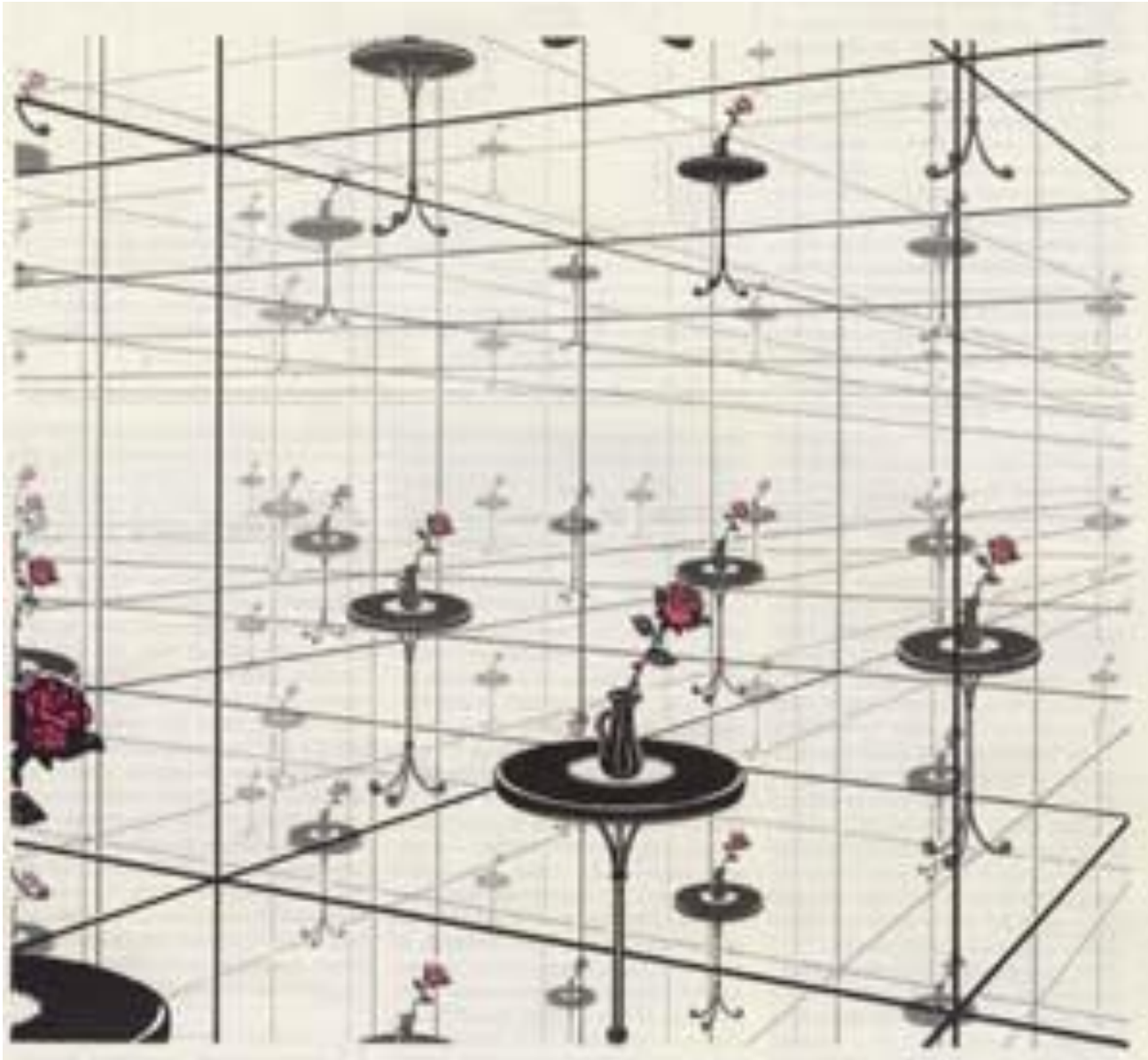
**фотоны
15%**

**атомы
12%**

**темная
материя
63%**



Одна из возможностей отхода от Стандартной космологической модели: модель циклического пространства

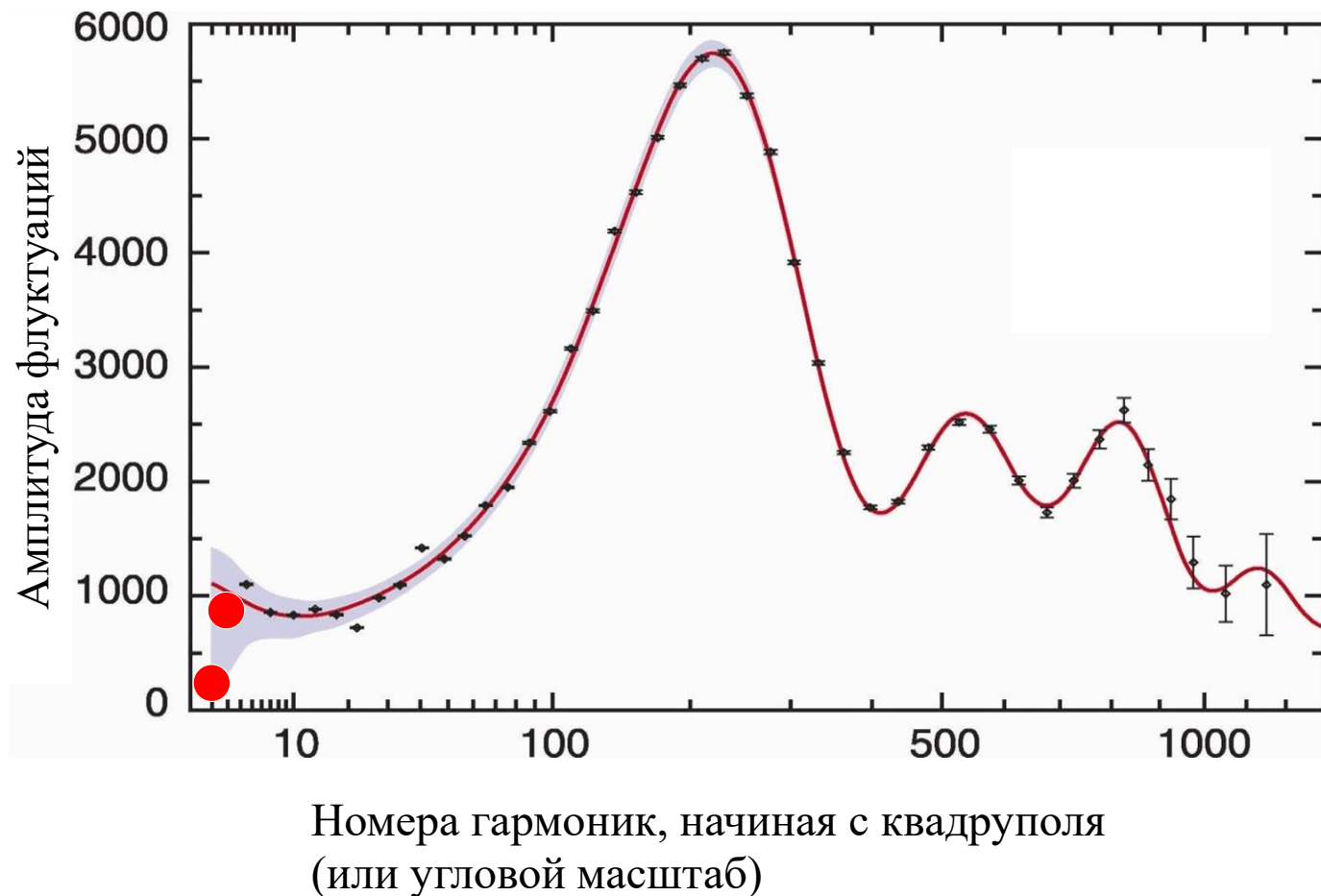
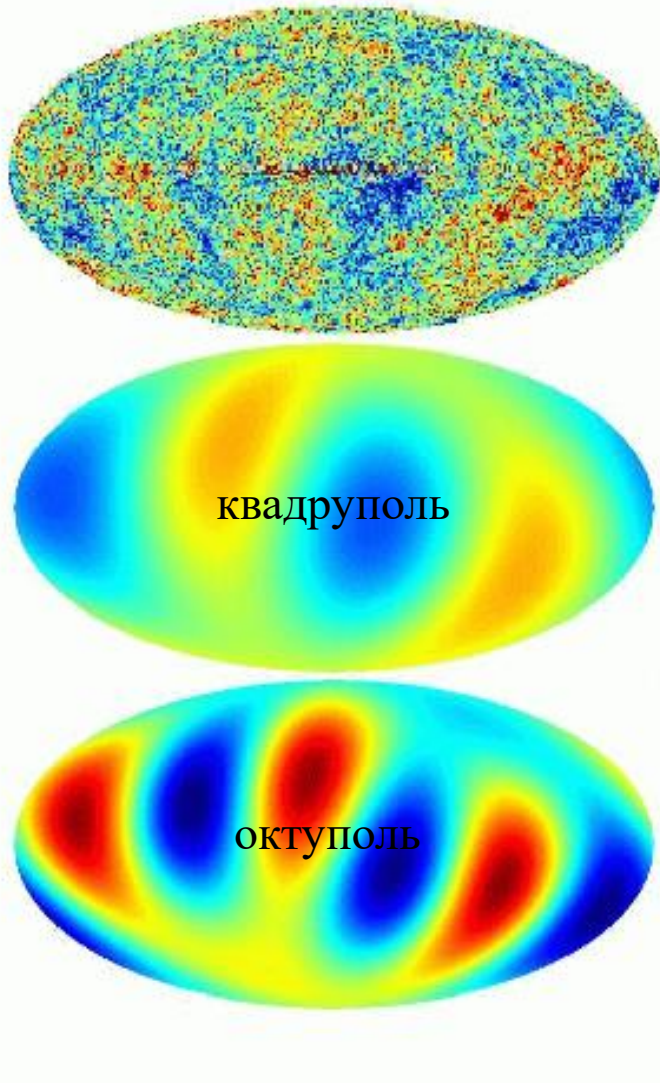


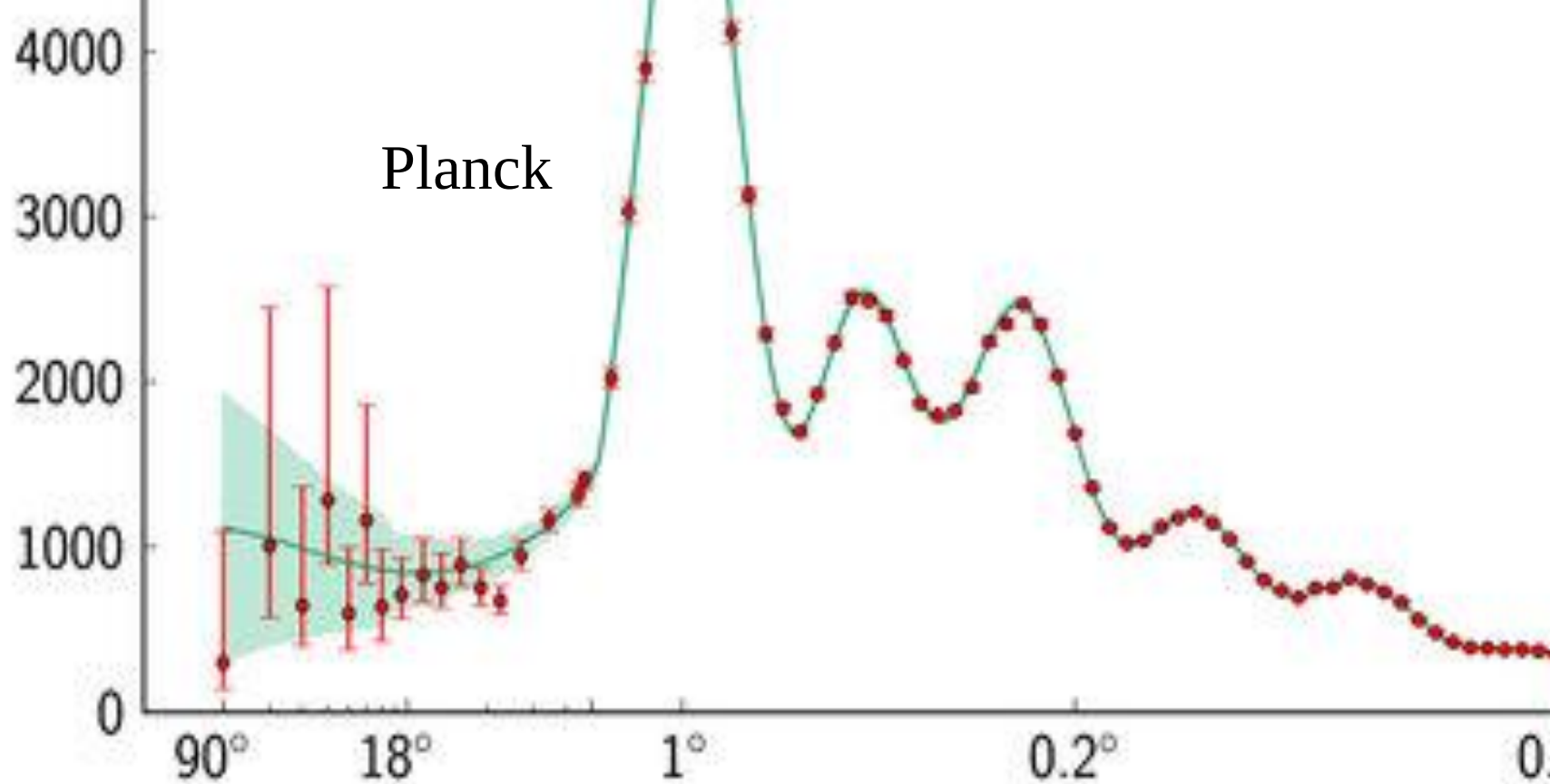
Циклическое пространство Вселенной можно наглядно представить в виде комнаты с зеркальными стенами.

Это довольно точная аналогия, потому что наблюдателю недоступна ни одна область за гранями.

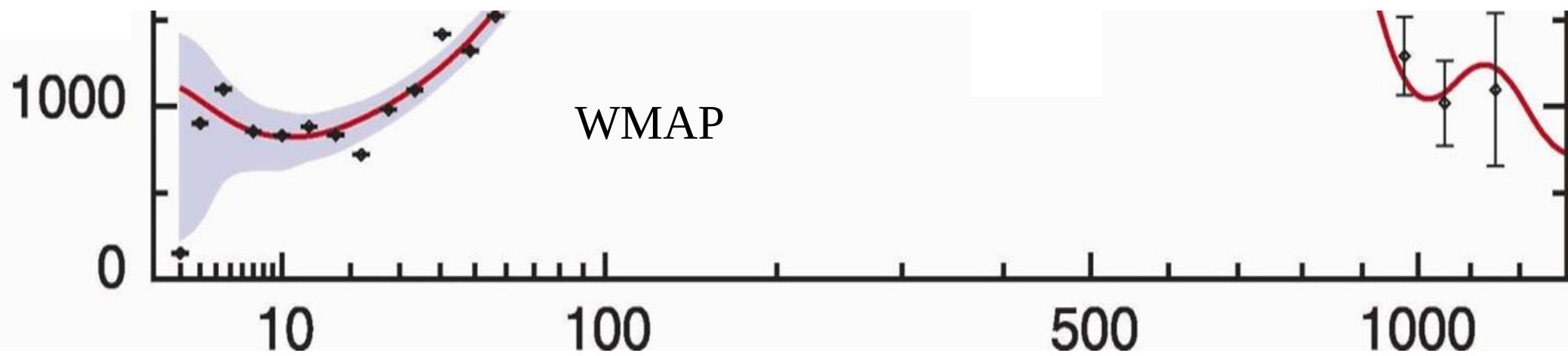
Циклическое пространство — наблюдательные свидетельства?

Спектр мощности угловых флуктуаций
реликтового излучения (по данным WMAP).



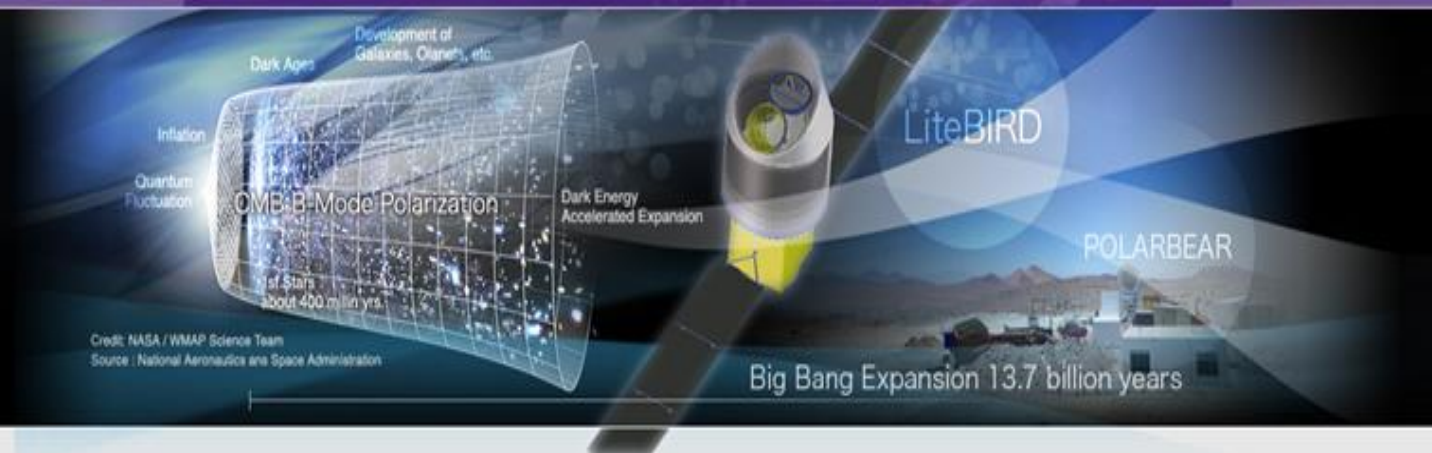


Существует модель циклической Вселенной, хорошо соответствующая наблюдательным данным на низких мультиполях



Будущие эксперименты по изучению анизотропии и поляризации реликтового излучения

Космический эксперимент LiteBIRD



Глобальная наземная обсерватория CMB-S4, которая объединит инструменты на Южном полюсе и в пустыне Атакама.

CMB-S4
Next Generation CMB Experiment



ЛЕКЦИЯ 7

Иерархия объектов во Вселенной. Крупномасштабная структура Вселенной

