

МИКРОВОЛНОВОЕ ФОНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Авторы: В. Н. Лукаш, Е. В. Михеева

МИКРОВОЛНОВОЕ ФОНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ (реликтовое излучение), космич. электромагнитное излучение, имеющее спектр абсолютно чёрного тела с темп-рой $T = 2,725$

К. Даёт осн. вклад в интенсивность фонового излучения Вселенной в диапазоне сантиметровых, миллиметровых и субмиллиметровых длин волн; характеризуется высокой степенью изотропии (интенсивность одинакова во всех направлениях с точностью 10^{-5}). Открытие М. ф. и. (А. [Пензиас](#), Р. [Вильсон](#), 1964–1965; Нобелевская пр., 1978) подтвердило горячей Вселенной теорию и стало важным эксперим. свидетельством в пользу квазифридмановской модели Вселенной.

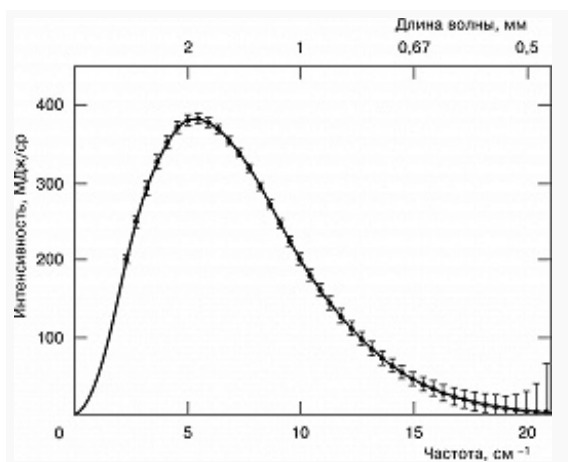


Рис. 1. Спектр микроволнового фонового излучения Вселенной (точки); погрешность экспериментальных точек увеличена в 400 раз. Сплошная линия – чернотельный планковский спектр с температурой 2,725 К.

Согласно теории горячей Вселенной, вещество расширяющейся Вселенной имело в прошлом намного более высокую плотность и чрезвычайно высокую темп-ру. При $T > 10^8$ К первичная плазма, состоявшая из протонов, ионов гелия и электронов, непрерывно излучающих, рассеивающих и поглощающих фотоны, находилась в полном термодинамич. равновесии с излучением. В процессе расширения вещества температуры плазмы и излучения падали, и начиная с некоторого момента времени взаимодействие частиц с фотонами уже не успевало за характерное время расширения заметно влиять

на спектр излучения. Пока темп-ра превышала 3000 К, первичное вещество было полностью ионизовано, пробег фотонов от одного акта рассеяния до другого был много меньше горизонта событий во Вселенной. При $T \approx 3000$ К произошла рекомбинация протонов и электронов с образованием водорода, плазма превратилась в нейтральное вещество, и Вселенная стала прозрачной для излучения. В ходе последующего расширения темп-ра излучения продолжала падать, но чернотельный характер излучения сохранился как реликт или «память» о раннем периоде эволюции Вселенной (рис. 1).

В настоящее время энергия фотонов М. ф. и. мала – в 3000 раз меньше энергии фотонов видимого света, но число фотонов этого излучения очень велико. На каждый барион во Вселенной приходится порядка 10^9 фотонов М. ф. и. Плотность числа реликтовых фотонов составляет 415 см^{-3} .

Ни звёзды и радиогалактики, ни горячий межгалактич. газ, ни переизлучение на межзвёздной пыли не могут дать излучения, приближающегося по свойствам к М. ф. и.; суммарная энергия этого излучения слишком велика по сравнению с др. видами излучений, и спектр его не похож ни на спектр звёзд, ни на спектр радиоисточников. Этим, а также высокой степенью изотропии доказывається космологич. происхождение микроволнового фонового излучения.

Спектр М. ф. и. несёт информацию о тепловой истории Вселенной. Процессы аннигиляции вещества и антивещества, диссипация мелкомасштабных движений материи, испарение первичных чёрных дыр малой массы, распад нестабильных элементарных частиц дают энерговыделение на ранних стадиях расширения Вселенной, что должно было исказить чернотельный спектр М. ф. и. Вклад в искажение спектра М. ф. и. вносит и сам процесс рекомбинации, однако число рекомбинационных фотонов крайне малó (порядка 10^{-9} от их общего числа). Отклонения спектра М. ф. и. от чернотельного не превышают сотой доли процента и пока не обнаружены.

Анизотропия микроволнового фонового излучения

Анизотропия реликтового излучения, связанная с движением Солнечной системы

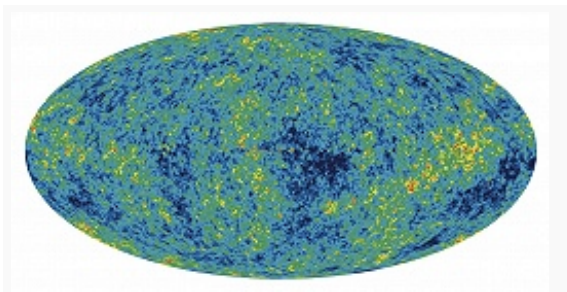


Рис. 2. Карта анизотропии микроволнового фонового излучения на небесной сфере. Составлена по результатам анализа данных за 5 лет наблюдений на спутнике WMAP. Вычтен вклад Галактики, диапазон отклонени...

относительно поля этого излучения, имеет дипольный характер. В направлении на созвездие Льва темп-ра М. ф. и. на $3,358 \cdot 10^{-3}$ К превышает среднюю, а в противоположном направлении (созвездие Водолея) на столько же ниже средней. Следовательно, Солнце (вместе с Землёй) движется относительно М. ф. и. со скоростью ок. 370 км/с по направлению к созвездию Льва. Учёт скоростей движения Солнца вокруг центра Галактики и самой Галактики в Местной группе галактик позволяет определить скорость движения Местной группы относительно М. ф. и. Она составляет ок. 600 км/с.

Компонента анизотропии М. ф. и., связанная с движением Галактики относительно этого излучения, случайна, и её нельзя предсказать из модельных соображений. Космологич. анизотропия М. ф. и. более сложно зависит от ориентации на небесной сфере, однако она не зависит от частоты. Космологич. анизотропия М. ф. и. с амплитудой 10^{-5} на угловом масштабе 10° обнаружена в 1992. Это позволило сделать важные выводы о геометрии Вселенной и доказать существование материи небарионной природы.

Распределение М. ф. и. на небесной сфере (рис. 2) свидетельствует о квазиоднородном распределении вещества и гравитац. поля в ранней Вселенной. Это означает, что геометрия Вселенной описывалась слабовозмущённой моделью Фридмана, причём главной модой возмущений, «отпечатанной» в анизотропии М. ф. и., оказалась растущая адиабатическая ветвь неоднородностей плотности, которая имела случайное (гауссово) распределение в пространстве и характерный спектр с амплитудой

$\Delta T/T \sim 10^{-5}$ и соответствующей модуляционной компонентой, связанной со звуковыми колебаниями барионов в дорекомбинационной Вселенной (сахаровские осцилляции).

Задолго до открытия анизотропии М. ф. и. теоретически было предсказано рождение таких космологич. неоднородностей из квантовых флуктуаций плотности под действием быстропеременного гравитац. поля в ранней Вселенной (параметрич. усиление, или квантово-гравитац. рождение возмущений). Далее эти малые неоднородности плотности росли из-за гравитац. неустойчивости в ходе расширения Вселенной. Если знать, каковы были амплитуды неоднородности вещества в момент рекомбинации, можно установить, за какое время они могли вырасти до единицы, после чего области с повышенной плотностью выделились из общего расширяющегося фона и дали начало галактикам, группам и скоплениям галактик (см. [Крупномасштабная структура Вселенной](#)). Дать информацию об амплитуде начальных неоднородностей плотности в момент рекомбинации может лишь М. ф. и. Поскольку до рекомбинации излучение было жёстко связано с барионным веществом (фотоны рассеивались на электронах, а те были «привязаны» к протонам через кулоновское взаимодействие), то неоднородности в пространственном распределении вещества приводили к неоднородностям плотности энергии излучения, т. е. к различию темп-ры излучения в разных по плотности областях Вселенной. После рекомбинации вещество перестало взаимодействовать с излучением и стало для него прозрачным, а М. ф. и. сохранило всю информацию о неоднородностях плотности барионов во Вселенной в период рекомбинации.

В кон. 20 – нач. 21 вв. проведено неск. экспериментов (Реликт, COBE, BOOMERanG, MAXIMA, WMAP, Planck), в ходе которых проводилось исследование космологич. анизотропии М. ф. и. В части из них (Реликт, COBE, WMAP, Planck) эксперим. комплексы были установлены на КА, длительность миссий при этом составляла неск. лет, в остальных – на баллонах, высота подъёма над земной поверхностью была около 40 тыс. км, а длительность – всего неск. недель. За открытие чернотельной формы спектра и анизотропии космического М. ф. и. Дж. [Мазеру](#) и Дж. [Смуту](#) присуждена Нобелевская пр. (2006).

Угловая анизотропия М. ф. и. может быть разложена на отд. гармоники с помощью присоединённых полиномов Лежандра, что позволяет получить амплитуду анизотропии на разл. угловых масштабах – от 90° до угловых минут; миним. ограничение связано с угловым разрешением приёмников излучения. Вид полученной

кривой даёт возможность восстановить значения важнейших космологич. параметров. Повышение точности измерения космологич. параметров (в т. ч. с помощью данных по анизотропии М. ф. и.) и расширение эксперим. базы наблюдательной космологии привело на рубеже 20–21 вв. к появлению стандартной космологич. модели (см. [Космология](#)).

Анизотропия М. ф. и. может быть вызвана не только наличием флуктуаций в распределении вещества, но и первичными гравитац. волнами, также рождающимися параметрич. образом в ходе инфляционной стадии расширения Вселенной. Выделение компоненты анизотропии, генетически связанной с гравитац. волнами, – задача ближайших лет. Пока имеется лишь верхний предел (ок. 0,1) отношения вкладов гравитац. волн и возмущений плотности в крупномасштабную анизотропию микроволнового фонового излучения.

Поляризация микроволнового фонового излучения

Реликтовое излучение частично поляризовано, и этот эффект может быть измерен. Поляризация возникает из-за рассеяния электромагнитных волн на свободных электронах космич. плазмы, вследствие чего направление вектора напряжённости электрич. поля (псевдовектор поляризации) оказывается ортогональным плоскости, в которой находились волновые векторы падающей и рассеянной волн. В случае строго изотропного фонового излучения поляризация не могла бы возникнуть в силу симметрии. Однако в реальной Вселенной потоки реликтовых фотонов анизотропны из-за наличия космологич. возмущений. В результате степень поляризации составляет ок. 10% от степени анизотропии, т. е. величину

$$\Delta T/T \sim 10^{-6}.$$

В силу малости эффекта задача детектирования поляризации М. ф. и. до конца пока не решена. Надёжно измерена только Е-мода поляризации, связанная исключительно с возмущениями плотности и преим. с электронами эпохи реионизации вещества. Если «пятно» (горячее или холодное) на карте анизотропии М. ф. и. вызвано избытком или дефицитом плотности вещества, то псевдовекторы, выстроенные на окружности вокруг «пятна», будут направлены вдоль радиуса этой окружности. Но если «пятно»

вызвано влиянием гравитац. волны, то псевдовекторы выстроятся по касательной к окружности. Это означает, что поляризация, вызванная возмущениями плотности, имеет E-компоненту, а поляризация, вызванная гравитационными волнами, обладает как E-, так и B-модой. Т. о., обнаружение B-моды стало бы и обнаружением космологич. гравитац. волн, что дало бы важную информацию о параметрах Большого взрыва.

Литература

Лит.: Насельский П. Д., Новиков Д. И., Новиков И. Д. Реликтовое излучение Вселенной. М., 2003; Лукаш В. Н., Михеева Е. В. Физическая космология. М., 2010.