

ФИЗИЧЕСКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ

З

Главный редактор
А. М. ПРОХОРОВ.

МАГНИТОПЛАЗМЕННЫЙ —
ПОЙНТИНГА ТЕОРЕМА

тичных частиц приводит к пространственному перемещению возбуждения.

Взаимодействие возбуждённой частицы с невозбуждённой может быть мультипольным (диполь-дипольным, диполь-квадрольным и т. д.) или обменным, возникающим при перекрывании электронных оболочек взаимодействующих частиц. Электронное возбуждение называется нелокализованным, если получившая энергию частица передаёт её др. частице так быстро, что за время жизни возбуждённого состояния этой частицы не успевает установиться квазиравновесие между возбуждённой частицей и окружающей средой (см. *Экситон*). В противном случае говорят о локализованном электронном возбуждении и вводят понятие скорости переноса, к-рая для обменного взаимодействия убывает с расстоянием экспоненциально; при эл.-магн. взаимодействии эта скорость $\sim R^{-3}$, где R — расстояние между взаимодействующими частицами, а $m = 6, 8, 10$ для диполь-дипольного, диполь-квадрольного и квадруполь-квадрольного взаимодействий соответственно.

Т. о., процессы М. э. характерны для сред с достаточно большой концентрацией частиц, введённых в оптически инертный растворитель (жидкость, стекло, кристалл). М. э. является одним из механизмов деполяризации люминесценции (см. *Поляризованная люминесценция*), она также проявляется в запылении спектральных провалов и уширении спектральных линий люминесценции, появляющемся после селективного воздействия возбуждающего излучения на неоднородно уширенные спектральные контуры.

М. э., сближая возбуждённые частицы с невозбуждёнными частицами др. сорта, форсирует также др. процессы безызлучательного переноса энергии — тушение люминесценции, сенсбилизацию люминесценции (см. *Кооперативная люминесценция*) и процессы взаимодействия частиц в возбуждённых состояниях. М. э. в значит. степени определяет возможности приборов на основе люминесцирующих веществ и, в частности, возможности *твердотельных лазеров*. Она играет также большую роль в биол. процессах, напр. в процессах фотосинтеза.

Лит.: Безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения, Л., 1977; Агранович В. М., Галакин М. Д., Перенос энергии электронного возбуждения в конденсированных средах, М., 1978; Бурштейн А. И., Концентрационное тушение некогерентных возбуждений в растворах, «УФН», 1984, т. 143, с. 553; Жевандров Н. Д., Оптическая анизотропия и миграция энергии в молекулярных кристаллах, М., 1987. В. А. Смирнов, И. А. Шербаков.

МИДЕЛЕВОЕ СЕЧЕНИЕ (мидель) — для движущегося в воде или воздухе тела (напр., торпеды, корпуса судна, фюзеляжа самолёта, ракеты) наибольшее по площади сечение этого тела плоскостью, перпендикулярной направлению движения. К площади М. с. обычно относят действующую на тело силу сопротивления. Под площадью М. с. понимают также площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению его движения.

МИКРО... (от греч. *mikrós* — малый) — приставка к наименованию единицы измерения для образования наименования *дольной единицы*, составляющей одну миллионную долю от исходной единицы. Обозначается **мк-**. Напр., 1 мкс (микросекунда) = 10^{-6} с.

МИКРОВОЛНОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ — область радиоспектроскопии, в к-рой спектры атомов и молекул в газовой фазе исследуют в диапазоне от дециметровых до субмиллиметровых длин волн (10^8 — 10^{12} Гц). Объектами М. с. являются вращательные и НЧ колебательные спектры молекул, молекулярных ионов, комплексов и радикалов, тонкая и сверхтонкая структура молекулярных спектров, спектры тонкой и сверхтонкой структуры атомов и ионов, электронные спектры возбуждённых атомов (см. *Молекулярные спектры*, *Атомные спектры*). В микроволновых спектрометрах используют монохроматические, перестраиваемые по частоте источники излучения — генераторы СВЧ

(напр., лампы обратной волны, генераторы на основе Ганна эффекта); микроволновые спектры атомов и молекул регистрируют приёмниками СВЧ, оптоакустич. приёмниками, детекторами атомных и молекулярных пучков и др., что обусловлено разнообразием объектов и методов и желанием достигнуть в каждом случае макс. чувствительности спектрометров.

Применение когерентных источников излучения позволяет наблюдать методами М. с. весьма узкие спектральные линии, т. е. достигать высокого спектрального разрешения. Типичные ширины линий, обусловленные столкновениями частиц в газе, — от 10 МГц до 1 МГц при давлениях от 1 до 10^2 Па. При разрежении газа ширины линий определяются *Доплера эффектом* при движении частиц и соударениями со стенками поглощающей ячейки, они составляют в микроволновом диапазоне от 1 МГц до 0,1 МГц. Для дальнейшего сужения линий применяют ряд способов устранения доплеровского уширения. Ширины линий в таких субдоплеровских спектрометрах определяются временем взаимодействия частиц с полем излучения (см. *Неопределённости соотношения*). В молекулярных и атомных пучках, перпендикулярных направлению распространения излучения, ширины линий достигают 10–0,2 КГц, а при пленении частиц в областях размером менее длины волны линии сужаются до 0,01 Гц (т. н. сужение Дикке). Отличия погрешности измерения частот спектральных линий равны 10^{-8} в газовых спектрометрах и достигают 10^{-10} и 10^{-13} в субдоплеровских спектрометрах.

Благодаря малой ширине наблюдаемых спектральных линий и высокой точности измерения частот радиометодами М. с. используют для получения наиб. точных значений ряда атомных и молекулярных констант (напр., моментов инерции молекул, величин сверхтонкого расщепления уровней энергии в атомах, дипольных моментов молекул и др.) и наблюдения малых смещений и расщеплений уровней энергии, обусловленных тонкими взаимодействиями частиц (напр., эффектов нежесткости молекул, *ламбовского сдвига* уровней в атомах, квадрупольной и магн. структуры уровней в молекулах).

В простейшем микроволновом спектрометре излучение генератора СВЧ пропускают через волноводную ячейку, заполненную исследуемым газом, и направляют на приёмник излучения, сигнал к-рого, пропорциональный принимаемой мощности, подаётся на регистрирующий прибор. Линии поглощения в газе регистрируют по уменьшению проходящей на приёмник мощности излучения определённых частот. Для повышения чувствительности спектрометров используют модуляцию частот спектральных линий, действуя на частицы электр. (*Штарка эффект*) или магн. (*Зеемана эффект*) полем и выделяя сигнал на частоте модуляции. В миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах используют модуляцию частоты излучения источника и приём сигналов от линий поглощения по модуляции давления исследуемого газа при поглощении им модулиров. излучения (см. *Субмиллиметровая спектроскопия*). Большой запас чувствительности позволяет исследовать, напр., спектры нестабильных молекул, запрещённые спектры молекул, а также применять М. с. для молекулярного и изотопного спектрального анализа. Повышения чувствительности в разл. микроволновых спектрометрах достигают также накачкой вспомогат. излучения (т. н. *двойной резонанс*), сортировкой частиц по состояниям (см. *Молекулярный генератор*) и др.

М. с. применяют для получения из вращат. спектров сведений о строении и динамике молекул, их хим. и изотопном составе, а при действии электр. или магн. полей — дипольных моментов, поляризуемостей и магн. восприимчивостей молекул. Из исследований сверхтонкой структуры молекулярных спектров получают сведения о квадрупольных и магн. моментах ядер и

о внутр. полях в молекуле. Исследования уширения и сдвига молекулярных и атомных линий при соударениях в газе дают информацию о взаимодействиях частиц. Точное измерение частот переходов в простейших квантовых системах позволяет оценить точность фундам. теорий. Микроволновые спектральные линии нек-рых молекул и атомов наблюдают в космич. пространстве с помощью радиотелескопов, они дают информацию о составе межзвёздного вещества, хим. процессах и физ. условиях в разл. областях космич. пространства.

Лит.: Таунс Ч., Шавлов А., Радиоспектроскопия, пер. с англ., М., 1959; Modern aspects of microwave spectroscopy, ed. by G. W. Chantry, L.—[a.o.], 1979; Gordy W., Cook R. L., Microwave molecular spectra, N. Y., 1984.

А. Ф. Крупнов.

МИКРОВОЛНОВОЕ ФОНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ (реликтовое излучение) — космич. излучение, имеющее спектр, характерный для абсолютно чёрного тела при темп-ре ок. 3 К; определяет интенсивность фонового излучения Вселенной в диапазоне сантиметровых, миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн. Характеризуется высочайшей степенью изотропии (интенсивность практически одинакова во всех направлениях). Открытие М. ф. и. [А. Пензиас (A. Penzias), Р. Вильсон (R. Wilson), 1965] подтвердило т. н. горячей Вселенной теорию, дало важнейшее эксперим. свидетельство в пользу представлений об изотропии расширения Вселенной и её однородности в больших масштабах (см. Космология).

Согласно теории горячей Вселенной, вещество расширяющейся Вселенной имело в прошлом намного более высокую плотность, чем ныне 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 ходе последующего расширения Вселенной темп-ра плазмы и излучения падала. Взаимодействие частиц с фотонами уже не успевало за характерное время расширения заметно влиять на спектр излучения (оптическая толщина Вселенной по тормозному излучению к этому времени стала много меньше единицы). Однако даже при полном отсутствии взаимодействия излучения с веществом в ходе расширения Вселенной чернотельный спектр излучения остаётся чернотельным, уменьшается лишь его темп-ра. Пока темп-ра превышала 4000 К, первичное вещество было полностью ионизовано, пробег фотонов от одного акта рассеяния до другого был много меньше горизонта событий во Вселенной. При $T < 4000$ К произошла рекомбинация протонов и электронов, плазма превратилась в смесь нейтральных атомов водорода и гелия. Вселенная стала полностью прозрачной для излучения. В ходе её дальнейшего расширения темп-ра излучения продолжала падать, но чернотельный характер излучения сохранился как реликт или «память» о раннем периоде эволюции мира. Это излучение было обнаружено сначала на волне 7,35 см, а затем и на др. волнах (от 0,6 мм до 50 см).

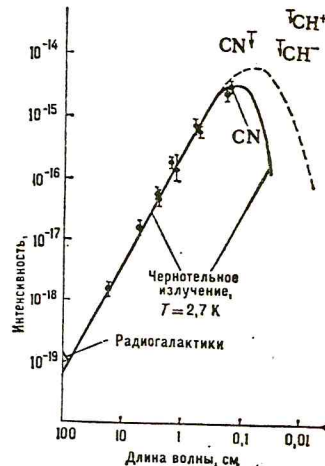
Темп-ра М. ф. и. с точностью до 10% оказалась равной 2,7 К. Ср. энергия фотонов этого излучения крайне мала — в 3000 раз меньше энергии фотонов видимого света, но число фотонов М. ф. и. очень велико. На каждый атом во Вселенной приходится $\sim 10^9$ фотонов М. ф. и. (в ср. 400—500 фотонов/см³).

Наряду с прямым методом определения темп-ры М. ф. и. — по кривой распределения энергии в спектре излучения (см. Планка закон излучения) — существует также косвенный метод — по населённости ниж. уровней энергии молекул в межзвёздной среде. При поглощении фотона М. ф. и. молекула переходит из осн. состояния в возбуждённое. Чем выше темп-ра излучения, тем выше плотность фотонов с энергией, достаточной для возбуждения молекул, и тем большая их доля находится на возбуждённом уровне. По кол-ву возбуждённых молекул (населённости уровней) можно судить

о темп-ре возбуждающего излучения. Так, наблюдения оптич. линий поглощения межзвёздного циана (CN) показывают, что его ниж. уровни энергии населены так, как будто молекулы CN находятся в поле трёхградусного чернотельного излучения. Этот факт был установлен (но не понят в полной мере) ещё в 1941, задолго до обнаружения М. ф. и. прямыми наблюдениями.

Ни звёзды и радиогалактики, ни горячий межгалактич. газ, ни переизлучение видимого света межзвёздной пылью не могут дать излучения, приближающегося по свойствам к М. ф. и.; суммарная энергия этого излучения слишком велика, и спектр его не похож ни на спектр звёзд, ни на спектр радиоисточников (рис. 1). Этим, а также практически полным отсутствием флуктуаций интенсивности по небесной сфере (мелкомасштабных угл. флуктуаций) доказывается космологич. реликтовое происхождение М. ф. и.

Рис. 1. Спектр микроволнового фонового излучения Вселенной (интенсивность в эрг/(см²·с·ср·Гц)). Эксперим. точки нанесены с указанием погрешностей измерений. Точки CN, CH соответствуют результатам определения верхней границы (показана стрелкой) температуры излучения по населённости уровней соответствующих межзвёздных молекул.



Флуктуации М. ф. и. Обнаружение небольших различий в интенсивности М. ф. и., принимаемого от разных участков небесной сферы, позволило бы сделать ряд выводов о характере первичных возмущений в веществе, приведших в дальнейшем к образованию галактик и скопления галактик. Совр. галактики и их скопления образовались в результате роста незначительных по амплитуде неоднородностей плотности вещества, существовавших до рекомбинации водорода во Вселенной (см. Первичные флуктуации во Вселенной). Для любой космологич. модели можно найти закон роста амплитуды неоднородностей в ходе расширения Вселенной. Если знать, каковы были амплитуды неоднородности вещества в момент рекомбинации, можно установить, за какое время они могли вырасти и стать порядка единицы. После этого области с плотностью, значительно превышающей среднюю, должны были выделиться из общего расширяющегося фона и дать начало галактикам и их скоплениям (см. Крупномасштабная структура Вселенной). «Рассказать» об амплитуде начальных неоднородностей плотности в момент рекомбинации может лишь реликтовое излучение. Поскольку до рекомбинации излучение было жестко связано с веществом (электроны рассеивали фотоны), 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. Когда после рекомбинации вещество перестало взаимодействовать с излучением и стало для него прозрачным, М. ф. и. должно было сохранить всю информацию о неоднородностях плотности во Вселенной в период рекомбинации. Если неоднородности существовали, то темп-ра М. ф. и. должна флуктуировать, зависеть от направления наблюдения. Однако эксперименты по обнаружению ожидаемых флуктуаций пока не дали измеримых значений. Они позволяют показать лишь верх. пределы значений флуктуаций. В малых угл. масштабах (от одной угл. минуты до шести градусов дуги) флуктуа-