

микроколичествах либо в виде порошка, либо в виде капель. В плазме вещество диссоциирует на атомы, к-рые частично возбуждаются и излучают. По спектральному составу излучения определяется элементный состав вещества. Этот метод, наз. эмиссионным спектральным анализом, имеет долгую историю и применяется для анализа металлов и сплавов; он позволяет надёжно определять содержание примесей в кол-ве, превышающем 10^{-3} — 10^{-2} %.

В др. способе элементного анализа исследуемое вещество также вводится в плазма или в проточную плазму газового разряда, к-рые находятся между двумя электродами. Плазма или плазма облучаются излучением перестраиваемого лазера, и протекающий через плазму ток измеряется как функция длины волны излучения. Как только излучение попадает в резонанс с переходами атомов, находящихся в плазме, то изменяются условия ионизации атомов и, следовательно, разрядный ток. Этот эффект наз. оптогальваническим; чувствительность методов, использующих этот эффект, на неск. порядков выше, чем в эмиссионном спектральном анализе.

6. Н. п. земной атмосферы и Солнца

Н. п. присутствует в окружающей нас природе. На небольших высотах плазма может возникать под действием электрич. полей, существующих в атмосфере. В результате конвективных течений в атмосфере происходит разделение заряда и возникают электрич. поле со ср. напряжённостью у поверхности Земли ~ 100 В/м, а также электрич. токи.

Одно из проявлений разделения заряда в атмосфере связано с возникновением молний. В момент прохождения осн. тока молнии её канал представляет типичную Н. п., напоминающую плазму дуги высокого давления и плазмотронов. Темп-ра плазмы в канале молнии достигает 30 000 К, плотность заряд. частиц $\sim 10^{17}$ см $^{-3}$ при диаметре канала порядка 1 мм.

Ионизов. газ верх. атмосферы — *ионосфера* возникает в осн. под действием излучения Солнца. Ионосферу принято делить на ряд слоёв (D , E , F_1 , F_2), расположенных на высотах 50—90, 90—140, 140—200 и 200—400 км.

Ср. концентрация заряд. частиц в слое D составляет $\sim 10^3$ см $^{-3}$. Отрицат. заряд в этом слое создаётся в осн. разл. отрицат. ионами; наиб. распространённым положит. ионом является кластерный ион $H_3O^+ \cdot H_2O$.

Заряд. частицы в слое E образуются в результате фотоионизации газа под действием УФ-излучения. Эти заряд. частицы дрейфуют в нижние слои атмосферы и служат источником плазмы в D -слое ионосферы. Плотность электронов в E -слое $\sim 10^6$ см $^{-3}$, отрицат. ионы в этом слое практически отсутствуют; типы положит. ионов — O_2^+ и O^+ . Гибель заряд. частиц в слое E обусловлена диссоциативной рекомбинацией электронов и ионов и уходом частиц в нижние слои.

Плотность электронов в слоях F_1 и F_2 $\sim 10^5$ — 10^6 см $^{-3}$, осн. тип положит. ионов O^+ . Заряд. частицы в слоях F образуются в результате ионизации атомарного кислорода под действием УФ-излучения Солнца. Гибель заряд. частиц определяется фоторекомбинацией электронов с ионом кислорода, фотоприлипанием электрона к атому кислорода, а также уходом заряд. частиц в нижние слои.

Слой E и F ионосферы отражают радиоволны, обеспечивая связь на КВ и ср. волнах на большие расстояния. Поскольку плазма этих слоёв создаётся под действием излучения Солнца, параметры плазмы могут существенно меняться на протяжении суток и времени года, что влияет на распространение радиоволн. На высотах E и F слоёв работают также ИСЗ. На этих высотах чаще всего развивается *полярное сияние*, возникающее при проникновении потока солнечных протонов в атмосферу.

Околоземная плазма на больших высотах, а также межпланетная плазма создаются *солнечным ветром*, и структура магнитосферы определяется взаимодействием солнечного ветра с магн. полем Земли. Электроны, захваченные магн. полем Земли, образуют *радиационные пояса* Земли.

Параметры солнечной плазмы, как и атмосферной, резко различаются в зависимости от области Солнца. Во внутр. части Солнца темп-ра достаточно высока, так что там находится сильноионизованная плазма. На поверхности Солнца и в окрестности Солнца степень ионизации плазмы невысока, т. е. здесь содержится Н. п. Поверхностный слой Солнца толщиной ~ 1000 км, из к-рого испускается осн. часть эл.-магн. излучения Солнца, наз. *фотосферой*. Плотность атомарного водорода в фотосфере $\sim 10^{17}$ см $^{-3}$, плотность заряд. частиц $\sim 10^{14}$ см $^{-3}$, темп-ра равновесной плазмы ~ 6000 К. Это излучение определяется в осн. процессом фотоприлипания электрона к атому водорода. Образаемые при этом отрицат. атомы водорода далее быстро разряжаются при столкновениях, так что отрицат. заряд фотосферной плазмы образуется в осн. электронами.

Разреженная область плазмы над поверхностью Солнца — *солнечная корона*. Плотность плазмы в короне резко падает по мере удаления от Солнца. Особенностью солнечной короны является её высокая темп-ра ($\sim 10^6$ К). Поэтому солнечная корона испускает жёсткое (рентгеновское) излучение. Кроме того, она является источником солнечного ветра.

Лит.: Пикельнер С. Б., Основы космической электродинамики, 2 изд., М., 1966; Акасофу С. И., Чепмен С., Солнечно-земная физика, пер. с англ., ч. 1—2, М., 1974—75; Смирнов Б. М., Введение в физику плазмы, 2 изд., М., 1982; Арцимович Л. А., Сагдеев Р. З., Физика плазмы для физиков, М., 1979; Биберман Л. М., Воробьёв В. С., Якубов И. Т., Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы, М., 1982; Райзер Ю. П., Физика газового разряда, М., 1987.

Б. М. Смирнов.

НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕОРЕМЫ в квантовой теории поля — устанавливают соотношения для амплитуд разл. процессов в пределе нулевого или малого 4-импульса частицы, источником к-рой является сохраняющийся или частично сохраняющийся ток. Такими частями являются, напр., фотон, к-рый взаимодействует с сохраняющимся *электромагнитным током*, π -мезон, связанный с частично сохраняющимся *аксиальным током* (см. также *Аксиальный ток частиц — сохранение*), *гравитон*, взаимодействующий с сохраняющимся тензором энергии-импульса. Н. т. являются следствием симметрии лагранжиана теории, причём преобразования симметрии нелинейны, т. е. меняют число частиц. Низшее по энергии состояние (вакуум) при этом бесконечно вырождено.

Наиб. известные примеры таких симметрий — симметрии относительно *калибровочных преобразований* в квантовой электродинамике и симметрии относительно киральных преобразований, отвечающих группе $SU(2) \otimes SU(2)$, в *квантовой хромодинамике*. В первом случае преобразование симметрии имеет вид

$$\delta A_\mu = \partial_\mu \Lambda, \quad (1)$$

где δA_μ — вариация 4-потенциала фотона, $\partial_\mu \Lambda$ — производная от произвольной ф-ции Λ ($\partial_\mu \equiv \partial/\partial x_\mu$, $\mu = 0, 1, 2, 3$). На квантовом языке преобразование (1) меняет число т. н. скалярных и продольных фотонов в вакууме.

Н. т. особенно полезны в теориях с сильной связью, напр. в электродинамике адронов или π -мезонной физике, где точное вычисление амплитуд невозможно.

Исторически первой Н. т. являлся теорема Лоу (F. E. Low, 1954) о том, что первая поправка по частоте фотона к амплитуде испускания мягких фотонов может быть найдена модельно-независимым образом заменой $p_\mu \rightarrow p_\mu - eA_\mu$ (e — электрич. заряд частицы, p_μ — её 4-импульс) в амплитуде нерадиац. процесса (без испускания мягкого фотона). В частности, в случае рас-