

где  $\Delta N$  определяется ф-лой (2),  $g(\nu)$  — плотность состояний на частоте перехода, определяющая форму и ширину линии поглощения, а величина  $W_{ij}$  пропорциональна недиагональному матричному элементу оператора магн. (электрич.) дипольного момента частицы и амплитуде соответствующей компоненты радиочастотного поля.

Стационарное поглощение веществом мощности  $P$  предполагает дальнейшую передачу энергии термостату, роль к-рого обычно выполняют степени свободы, связанные с тепловым движением (колебания кристаллич. решётки, хаотич. движение молекул жидкости, кинетич. энергия электронов проводимости и пр.). Указанный процесс называют продольной релаксацией и характеризуют постоянной времени  $\tau_1$ . При росте мощности эл.-магн. поля до значений, обеспечивающих условие  $g(\nu)|W_{ij}|^2\tau_1 \geq 1$ , продольная релаксация уже не успевает отвести в термостат поступающую энергию, происходит насыщение резонансного поглощения ( $\Delta N \rightarrow 0$ ). Насыщение используют в Р. для измерения  $\tau_1$  и получения информации о движении частиц, спин-фононных взаимодействиях и пр.

Импульсные методы получили распространение в ЯМР, ЯКР и отчасти в ЭПР. При этом вещество подвергается действию короткого мощного радиочастотного импульса, переводящего систему частиц в когерентное нестационарное квантовое состояние, являющееся суперпозицией состояний  $|\mathcal{E}_i\rangle$  и  $|\mathcal{E}_j\rangle$ . Возникающее при этом движение ансамбля частиц (в случае магн. резонанса — когерентная прецессия спинов вокруг постоянного магн. поля) генерирует в датчике сигнал свободной индукции  $F(t)$ . Взаимодействие частиц друг с другом и с разл. полями приводит к потере когерентности и затуханию  $F(t)$  с характерным временем поперечной релаксации  $\tau_2$ . Ф-ция  $F(t)$  содержит полную информацию о спектре поглощения и связана с ним преобразованием Фурье. Применение двух и более последоват. импульсов позволяет частично компенсировать потерю когерентности (см. *Спиновое эхо*), что повышает чувствительность и разрешающую способность метода.

В косвенных методах резонансное поглощение радиочастотного поля регистрируют по изменению (обычно небольшому) нек-рых макроскопич. характеристик вещества. Ими могут быть, напр., интенсивность и поляризация оптич. люминесценции (оптич. детектирование), анизотропия  $\gamma$ - и  $\beta$ -радиоакт. излучения, траектории молекулярных и атомных пучков в неоднородном внеш. поле (см. также *Раби метод*), темп-ра образца, его способность к нек-рым хим. реакциям и пр. К косвенным методам можно отнести также двойные резонансы, в к-рых поглощение квантов одной частоты регистрируют по отклику на другой частоте. Для расширения возможностей Р. используют многоквантовые и параметрич. эффекты, акустич. методы (см., напр., *Акустический парамагнитный резонанс*). В ВЧ-области диапазона радиоволн (частота выше  $10^{11}$  Гц) Р. по своим методам и объектам исследования приближается к ИК-спектроскопии (см. *Субмиллиметровая спектроскопия*).

Р. применяют в физике, химии, биологии, технике для получения детальной информации о внутр. структуре и атомно-молекулярной динамике твёрдых тел, жидкостей и газов, определения структуры и конформации молекул, измерения магн. и электрич. моментов микро-частиц, изучения их взаимодействий друг с другом и с разл. внеш. и внутр. полями. Методы Р. используют также для качеств. и количеств. хим. анализа, контроля хим. и биохим. реакций, определения структуры примесей и дефектов, измерения магн. полей, темп-ры, давления, для неразрушающего контроля материалов и изделий. В Р. было впервые получено индуциров. излучение, что привело к созданию *квантовых генераторов* и усилителей СВЧ-диапазона — *квантовых стандартов частоты* и чувствительных приёмников, а затем и

лазеров (см. также *Квантовая электроника*). Один из видов двойного резонанса — динамич. поляризацию ядер (см. *Ориентированные ядра, Оверхаузера эффект*) — применяют при создании поляризованных ядерных мишеней. Р. используют также в медицине для получения диагностич. изображений внутр. органов (см. *Томография*).

Лит.: Таунс Ч., Шавлов А., Радиоспектроскопия, пер. с англ., М., 1959; Инграм Д., Спектроскопия на высоких и сверхвысоких частотах, пер. с англ., М., 1959; Альтшулер С. А., Козырев Б. М., Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп, 2 изд., М., 1972; Абрагам А., Ядерный магнетизм, пер. с англ., М., 1963; Сликтер Ч., Основы теории магнитного резонанса, пер. с англ., 2 изд., М., 1981; Лундин А. Г., Федин Э. И., Ядерный магнитный резонанс. Основы и применения, Новосибир., 1980; Физические основы квантовой радиофизики, Л., 1985.

В. А. Азаркин.

**РАДИОТЕЛЕСКОП** — устройство для приёма радиоионизирующего космич. объектов. Состоит из трёх осн. частей: антенны, малошумящего приёмника (*радиометра*) и анализатора сигналов.

Антенна радиотелескопа собирает падающее на неё радиоионизирующее излучение с определ. участка неба, угл. размеры к-рого определяются шириной диаграммы направленности. Эффективность антенны зависит от её эфф. площади и *шумовой температуры*. Антенна находится в поле излучения Земли, к-рое соответствует шумовой темп-ре ок. 300 К. Чтобы избежать «засветки» излучением Земли, принимаются спец. меры. Используют т. н. скалярные (коррегированные) облучатели антенны. Такой облучатель представляет собой конич. рупор с ребристой поверхностью. Он обеспечивает максимально возможный приём сигнала со всей геом. поверхности зеркала антенны и минимально возможный вне его. Шумовая темп-ра антенны достигает мин. значений при использовании Кассегреновской (или Грегорианской) системы облучения (аналогичной соответствующим схемам *оптических телескопов*) в сочетании со скалярным облучателем во вторичном фокусе. В такой системе облучаемое вторичное зеркало находится на фоне неба, что уменьшает «засветку» излучением Земли. *Яркостная температура* неба в диапазоне сантиметровых и миллиметровых радиоволн составляет всего неск. градусов. Чтобы снизить потери, определяемые поглощением в атмосфере, Р. миллиметрового диапазона устанавливают высоко в горах.

Приёмник Р. имеет низкий уровень шумов. Для обеспечения минимальности шумовой темп-ры системы антенна — приёмник охлаждается не только усилитель, но и облучатель или его входная часть до 15—20 К. Шумовая темп-ра малошумящих транзисторных усилителей  $\sim 1$ —20 К и примерно равна частоте, выраженной в ГГц. На волнах миллиметрового диапазона применяются также *квантовые усилители* и *параметрические усилители*. После усиления сигнал обычно поступает на смеситель, где смешивается с сигналом гетеродина, а далее на анализатор. Это может быть просто квадратичный детектор, на выходе к-рого сигнал пропорционален измеряемой мощности (темп-ре), анализатор импульсного излучения пульсаров, спектроанализатор, система записи на широкополосный магнитофон (в случае наблюдений в режиме радиointерферометрии со сверхдлинными базами). Результаты наблюдений обрабатываются на ЭВМ.

Для снижения разл. «паразитных» эффектов при измерении слабых сигналов от космич. объектов применяют ряд методов. Расчётная чувствительность измерений шумового сигнала  $\delta T = T_c / \sqrt{\Delta f \tau}$  определяется радиометрич. выигрышем, равным  $\sqrt{\Delta f \tau}$ ; в случае широких полос пропускания  $\Delta f \sim 1$  ГГц и времени накопления сигналов  $\tau \sim 10^3$  с  $[(\Delta f \tau)^{-1/2} \sim 10^{-6}]$ ,  $\delta T \approx 20$  мкК (при  $T_c \approx 20$  К). Чтобы выделить сигнал такого малого уровня, необходимо компенсировать (вычесть) собств. шумы аппаратуры и фона, напр. при помощи источника пост. тока. Это простейший случай — компенсационный метод. Однако реальная техн. чувствительность определяется стабильностью коэф. усиления аппаратуры, флук-