ции рассеянного света, а следовательно, к появлению в нём новых спектральных компонент (стоксовых и антистоксовых с частотами ν_c и ν_{ac} соответственно). Однако в отличие от спонтанного *рассеяния света* при В. р. с. происходит взаимодействие излучения накачки и рассеянного света через среду, поэтому элементарные возбуждения становятся когерентными [1, 2, 3].

Наиб. характерные признаки В. р. с.— это резкое возрастание интенсивности и сужение диаграмм на-

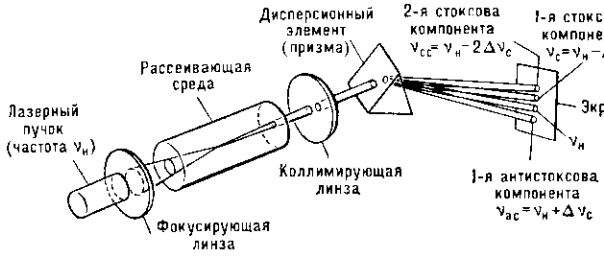

Рис. 1. Типичная схема опыта по наблюдению вынужденного комбинационного рассеяния света.

правленности стоксовых и антистоксовых компонент. В случае В. р. с. интенсивности рассеянных компонент сравнимы с интенсивностью излучения накачки (при спонтанном рассеянии они составляют $\sim 10^{-5}\div 10^{-6}$ интенсивности рассеиваемой волны).

Классическая теория. На классич. языке В. р. с. проще всего объяснить на примере одного из наиб. важных типов — вынужденного комбинац. рассеяния (ВКР) на колебат. переходах молекул [4]. Описание взаимодействия света с внутримолекулярными движениями основывается на учёте зависимости электронной *поляризуемости* молекул α от ядерной конфигурации, определяемой координатами ядер, а именно амплитудой их колебаний q_i (подробнее см. *Комбинационное рассеяние света*). В простейшем одномерном случае ($i=1$)

$$\alpha(q)=\alpha_0+\left(\frac{\partial\alpha_1}{\partial q}\right)_0 q+\ldots, \qquad (1)$$

где α_0 — линейная поляризуемость. Наличие члена $(\partial\alpha_1/\partial q)_0$ в (1) является причиной модуляции света молекулярными колебаниями: в наведённой световой волной поляризации P появляются новые частотные компоненты, сдвинутые на частоту колебаний ядер (т. е. на собственную частоту колебаний молекулы):

$$P=\alpha(q)\,E=\alpha_0 E+(\partial\alpha/\partial q)_0\,qE+\ldots\,. \qquad (2)$$

В условиях, когда q определяется тепловыми движениями в среде, (2) описывает спонтанное комбинац. рассеяние.

Зависимость $\alpha(q)$ является одновременно причиной обратного воздействия световых волн на молекулярные колебания. Действительно, энергия взаимодействия W молекулы со световой волной выражается в виде

$$W=-PE=-\alpha(q)\,E^2,$$

и, следовательно, при $\partial\alpha/\partial q\neq 0$ в световом поле возникает сила

$$F=-\frac{\partial W}{\partial q}=\frac{\partial\alpha}{\partial q}E^2, \qquad (3)$$

действующая на колебания. Если световое поле, падающее на среду, такой частоты $\nu_н$, что $\nu_н=\Omega+\nu_c$, где Ω — собственная частота молекулярных колебаний, ν_c — стоксова компонента, то эта сила может привести к резонансной раскачке колебаний частоты ν_c, возникновению *параметрической неустойчивости*, т. н. распадной неустойчивости. В этих условиях на хаотич. внутримолекулярное движение накладываются регулярные вынужденные колебания, фазы к-рых в разл. молекулах определяются фазами компонент светового поля (происходит фазирование молекулярных колебаний во всём объёме, занятом световыми полями). Неустойчивость возникает, если интенсивность $I_н$ световой волны превышает нек-рое пороговое значение: $I_н\geqslant I_{пор}$. В этом случае низкочастотная стоксова компонента экспоненциально усиливается по мере распространения через среду: $I_c(x)=I_{c0}\exp(gI_н x)$. Здесь $gI_н$ — *инкремент* усиления, g — коэф. усиления, x — длина возбуждённой части среды. В практич. случаях $gI_н$ может достигать величины $\sim 10^2$.

В силу (3) амплитуда возбуждённых световой волной молекулярных колебаний $q\sim E^2$ и, следовательно, для поляризации среды можно записать, согласно (2),

$$P=P_{лин}+P_{нл}=\chi^{(1)}E+\chi^{(3)}E^3, \qquad (4)$$

где $\chi^{(3)}\sim(\partial\alpha/\partial q)^2$ — кубич. нелинейная восприимчивость. Именно она является универсальной характеристикой среды, описывающей явления В. р. с. (см. *Нелинейная оптика*).

Квантовая теория. В. р. с. рассматривается как результат взаимодействия фотонов накачки с рассеявшимися фотонами. При спонтанном рассеянии рассеявшийся фотон может оказаться в любой моде, характеризующейся частотой, поляризацией и направлением распространения фотона. Вероятность рассеяния в данную моду в единицу времени $w_{сп}$ ($с^{-1}$) пропорциональна интенсивности $I_н$ (Вт/см^2) света накачки: $w_{сп}=\sigma I_н/Mh\nu_н$, где σ (см^2) — сечение рассеяния, а величина $M=(8\pi\nu_c^2/v_c^3)\,V\Delta\nu_д$ представляет собой число мод в облучаемом объёме V, $\Delta\nu_д$ — ширина спектральной линии спонтанного рассеяния, v_c — скорость рассеянного света в нелинейной среде. Полная вероятность спонтанного рассеяния $W_{сп}=M\cdot w_{сп}=\sigma I_н/h\nu_н$. Рассеяние становится вынужденным, если в данной моде уже находится $m\gtrsim 1$ рассеявшихся фотонов. В соответствии со статистикой Бозе — Эйнштейна, к-рой подчиняются фотоны, рассеивающийся фотон стремится попасть в ту моду, где уже есть аналогичные фотоны.

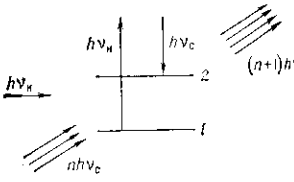

Рис. 2. Схема вынужденного комбинационного рассеяния: $h\nu_н$ — фотон накачки; $h\nu_c$ — стоксов фотон; *1* — основное состояние; *2* — возбуждённое состояние системы.

Это приводит к тому, что вероятность w_{m+1} рассеяния $(m+1)$-го фотона в данную моду (в частности, в данном направлении, рис. 2), где уже имеется m фотонов, будет в $(m+1)$ раз больше вероятности спонтанного рассеяния: $w_{m+1}=(m+1)\,w_{сп}=w_в+w_{сп}$, где $w_в=mw_{сп}$ — вероятность В. р. с. в данную моду. Т. к. $m\sim I_c$, где I_c — интенсивность рассеянного в данную моду света, и $w_{сп}\sim I_н$, то $w_в\sim I_c\cdot I_н$, т. е. вероятность В. р. с. пропорциональна произведению интенсивностей накачки ($I_н$) и рассеянного света (I_c). Учитывая, что

$$w_{m+1}\sim\frac{d}{dt}m\equiv\left(\frac{\partial}{\partial t}+v_c\frac{\partial}{\partial x}\right)m, \qquad (5)$$

можно показать, что при $m\gg 1$ для стационарного случая (т. е. при $\partial/\partial t=0$) имеет место уравнение $dI_c/dx=gI_нI_c$, описывающее экспоненциальное усиление рассеянного света, как и при классическом рассмотрении.

Основные виды В. р. с. Каждому виду спонтанного рассеяния можно сопоставить соответствующее В. р. с. Поэтому классификация В. р. с. аналогична классификации видов спонтанного рассеяния. По причинам историч. характера рассеяние, определяемое квантовыми микросистемами (молекулами, атомами, электронами), наз. комбинационным, а рассеяние, определяемое макроскопич. флуктуациями среды (плотности, темп-ры и др. термодинамич. параметров), а также ориентацией молекул в газах, твёрдых телах, жидкостях, наз. мо-