

ком большой неахронности вращения частиц, приводящей к их быстрому выходу из резонанса. Поэтому в релятивистской области энергий с гиротроном начинает конкурировать др. разновидность МЦР, в к-рой фазовая скорость волны близка к  $c$  и изменение  $\omega_c$  компенсируется соответствующим изменением доплеровской поправки (авторезонанс). В таком МЦР частота генерации может во много раз превышать  $\omega_c$  (режим лазера на свободных электронах).

Первые предложения об использовании вынужденного циклотронного излучения для СВЧ-генерации были высказаны в 1959 независимо А. В. Гапоновым-Греховым, Дж. Шнайдером (J. Schneider) и Р. Пантеллом (R. Pantell), а гиротрон был предложен и реализован в сер. 60-х гг. в СССР.

Лит.: Гапонов А. В., Петелин М. И., Юппатов В. К., Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике, «Изв. ВУЗов. Радиофизика», 1967, т. 10, № 9/10, с. 1414; Гапонов-Грехов А. В., Петелин М. И., Мазеры на циклотронном резонансе, в кн.: Наука и человечество, М., 1980, с. 283; Гиротрон. Сб. науч. трудов, под ред. А. В. Гапонова-Грехова, Горький, 1981.

В. Л. Братман, Н. С. Гинзбург.

**МАЗЕРНЫЙ ЭФФЕКТ** в космосе — усиление проходящего через космич. среду радиоизлучения за счёт индуктированных испусканий фотонов возбуждёнными атомами и молекулами среды. Наблюдается М. э. только в отд. радиолиниях в межзвёздной среде и околозвёздных оболочках (космические, или межзвёздные, мазеры). Все космич. мазеры (КМ) работают в непрерывном режиме.

Открыты КМ в 1965 [Х. Уивер (H. Weaver) и др.] при исследовании радиоизлучения нек-рых космич. источников (туманность Ориона, Стрелец В2, W3, W49 и др.). В спектрах этих источников на частотах 1665 и 1667 МГц были обнаружены очень узкие интенсивные линии излучения (длина волны  $\lambda \approx 18$  см), принадлежащие молекулам гидроксила ОН. Обнаруженные линии обусловлены энергетич. переходами между компонентами  $\Lambda$ -дуплета осн. состояния молекулы ОН [см. Лямбда-удвоение (расщепление) уровней энергии молекул]. Позже сильный М. э. был обнаружен в др. радиолиниях ОН, в линии перехода между вращат. уровнями энергии осн. электронно-колебат. состояния молекул воды  $H_2O$  (22235 МГц,  $\lambda = 1,35$  см), в неск. радиолиниях молекул метилового спирта  $CH_3OH$  ( $\lambda \approx 1,2$  см) и при переходах между вращат. уровнями в возбуждённых колебат. состояниях молекул монооксида кремния  $SiO$  (2—7 мм). Всего в Галактике и соседних галактиках открыты многие сотни сильных КМ. Слабый мазерный эффект наблюдается в радиолиниях нек-рых др. молекул, а также в дециметровом и более длинноволновом диапазоне на рекомбинационных радиолиниях водорода с гл. квантовым числом ок.  $n = 200$ .

Сильные КМ связаны чаще всего с областями звездообразования (мазеры ОН 1-го типа и мазеры  $H_2O$ ). Мощность излучения в радиолинии  $H_2O \sim 10^{27-33}$  эрг/с, в линиях ОН  $\sim 10^{27-30}$  эрг/с,  $SiO \sim 10^{26}$  эрг/с,  $CH_3OH \sim 10^{27}$  эрг/с.

Источниками излучения являются отдельные пятна (конденсации) размером  $\sim 10^{14}$  см, которые собраны в «гнёзда» размером  $\sim 10^{16-17}$  см. Число конденсаций в гнезде 10—100, число звёзд в КМ 1—10. По частоте излучения отд. конденсации можно определить её лучевую скорость с точностью 0,1—2 км/с. Разброс лучевых скоростей конденсаций составляет 100—300 км/с. Яркость темп-ра излучения в линии достигает  $10^{15}$  К для  $H_2O$ ,  $10^{12}$  К для ОН,  $10^{10}$  К для  $SiO$ . Наблюдения показали, что интенсивность, ширина, профиль спектральной линии конденсации, а также её лучевая скорость переменны в интервалах времени от неск. минут до  $\geq 20$  лет. Компоненты линий ОН,  $SiO$  обычно сильно (до 100%) циркулярно поляризованы; умеренная линейная поляризация наблюдается в линиях  $H_2O$  и ОН.

Ещё более мощный М. э. (до  $10^{36}$  эрг/с) обнаружен от ядер нек-рых галактик (т. н. мегамазеры), но КМ этого типа немногочисленны.

Более распространены слабые КМ (КМ ОН 2-го типа), находящиеся в растекающихся холодных оболочках переменных звёзд — сверхгигантов типа Миры Кита и VY Большого Пса. Мощность КМ на молекулах  $H_2O$  и ОН (1612 МГц) составляет  $\sim 10^{24-28}$  эрг/с, а на  $SiO \sim 10^{26-27}$  эрг/с. Мощность КМ в оболочках звёзд коррелирует с ИК-излучением этих звёзд.

Редкими являются КМ на молекулах ОН (1720 МГц), находящиеся в областях взаимодействия ударных волн остатков вспышек сверхновых звёзд с молекулярными облаками.

М. э. в рекомбинац. радиолиниях возникает на периферии областей ионизов. водорода.

В атмосферах Марса и, возможно, Венеры имеется слабая инверсия и усиление ИК-излучения в колебат. полосе  $CO_2$ , т. е. там, по-видимому, «работает» слабый естеств. лазер.

Существование М. э. в космосе свидетельствует о длит. поддержании в естеств. условиях сильно неравновесной заселённости энергетич. уровней атомов и молекул. Это возможно лишь в условиях постоянно действующей накачки энергии, поддерживающей инверсию населённости сигнальных уровней (1,2 на рис.). Цикл накачки включает неск. последовательных переходов: собственно накачки (в простейшем случае переход между уровнями 1 и 3) и стока энергии (переход

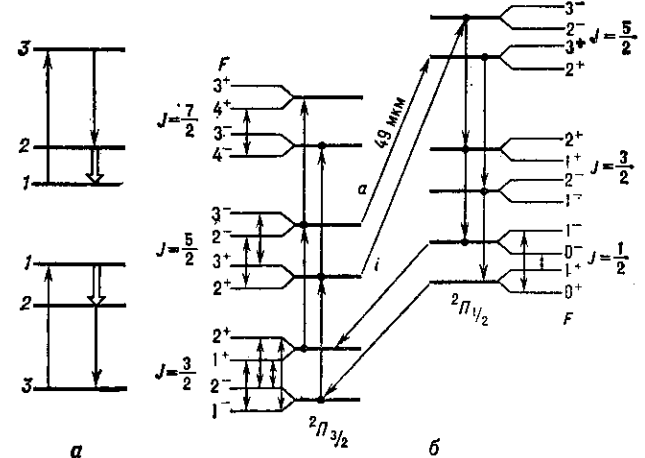


Схема накачки космического мазера на молекулах ОН. а — принципиальная трёхуровневая схема: переход 1-3 — накачка, 2-3 — сток, 1-2 — мазерный переход. б — схема RR-накачки в сильных мазерах ОН. Показана цепочка ИК-переходов, которая приводит к инверсии населённости  $\Lambda$ -дуплета основного состояния ОН.  ${}^2\Pi_{3/2}$  и  ${}^2\Pi_{1/2}$  — вращательные уровни, соответствующие двум возможным ориентациям проекции спина на неспаренный электрон на ось молекулы (тонкое расщепление). Каждый вращательный уровень расщеплён на два: + и — (т. н.  $\Lambda$ -удвоение). Линии сверхтонкого расщепления обозначены буквой F. Прямые линии a, i — процесс ИК-накачки; двойными стрелками в рамках обозначены переходы, наблюдаемые в космических мазерах.

между уровнями 2 и 3). Механизмы накачки и стока в КМ обозначают символами: RR, RC, CR, CC (первый символ указывает характер накачки: R — радиационный, C — столкновительный, второй символ — вид стока энергии). Тип переходов, обуславливающих накачку, указывают в виде индекса справа внизу: r — вращательный, v — колебательный, e — электронный. В сильных мазерах ОН 1-го типа преобладает, видимо, RR-накачка (рис.), в молекулах  $H_2O$ , вероятно, CR- или CC-накачка.

Необходимая для М. э. неравновесность заселённости уровней достигается за счёт мощного ИК-излучения рождающихся массивных звёзд (протозвёзд) в областях