

В. г. резонатор помещён в двухступенчатый термостат и защищён трёхслойным магн. экраном.

**Теоретическое описание.** Работу В. г. можно объяснить в рамках квантового описания ансамбля атомов водорода и классич. описания высокочастотного эл.-магн. поля в резонаторе. Для ансамбля атомов вводится макроскопич. вектор поляризации  $P$ , вычисляемый квантовомеханически. Если разность населённостей уровней (1,0) и (0,0)  $\Delta N = N_1 - N_2$ , напряжённость  $H_1$  высокочастотного магн. поля и поляризация  $P$  постоянны внутри резонатора, то ур-ния, приближённо описывающие связь этих величин, имеют вид:

$$\ddot{P} + \frac{2}{\tau} \dot{P} + \omega_d^2 P = - \frac{2M^2 \omega_0}{\hbar} H N; \quad (1)$$

$$\Delta \dot{N} + \frac{1}{\tau} (\Delta N - \Delta N_0) = 2H \dot{P} / \hbar \omega_0; \quad (2)$$

$$\ddot{H} + \frac{\omega_p}{Q_p} \dot{H} + \omega_p^2 H_1 = - 4\pi \dot{P}. \quad (3)$$

Здесь  $\tau$  — время релаксации, т. е. ср. время, за к-рое атомы водорода в резонаторе переходят из состояния (1,0) в состояние (0,0) при  $H_1 = 0$ . Величина  $\tau$  близка к времени пребывания атома в накопит. ячейке;  $\omega_0 = 2\pi\nu_0$ ,  $\omega_d^2 = \omega_0^2 + \frac{1}{\tau^2}$  — угловая частота, соответствующая вершине спектральной линии;  $M$  — матричный элемент магн. дипольного квантового перехода (1,0)  $\rightarrow$  (0,0);  $\omega_p$ ,  $Q_p$  — резонансная частота и нагруженная добротность резонатора;  $\Delta N_0$  — разность населённостей атомов водорода в отсутствие эл.-магн. поля в резонаторе ( $H_1 = 0$ ).

Решение ур-ний (1) — (3) приводит к след. выражениям для  $H_1^2$  и угловой частоты генерации:

$$H_1^2 = \frac{4\pi Q_p \hbar}{\tau} \left\{ \Delta N_0 - \frac{\hbar}{4\pi Q_p M^2 \tau} (1 + \delta^2 \tau^2) \right\}; \quad (4)$$

$$\omega = \omega_d (1 - \delta); \quad \delta = \frac{2Q_p}{\omega_p \tau} (\omega_d - \omega_p). \quad (5)$$

Ф-ла (4) определяет пороговую разность населённостей в единице объёма резонатора  $(\Delta N_0)_p$ , при превышении к-рой наступает самовозбуждение В. г.:

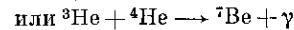
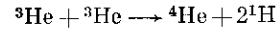
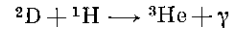
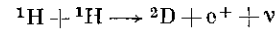
$$(\Delta N_0)_p = \frac{\hbar}{4\pi Q_p M^2 \tau} (1 + \delta^2 \tau^2). \quad (6)$$

Условие самовозбуждения  $\Delta N \geq (\Delta N_0)_p$ . Пучок атомов, влетающих в накопит. ячейку, состоит из осн. из атомов в состоянии (1,0), т. е.  $(\Delta N_0)_p$  определяется кол-вом атомов  $n_p$ , влетающих в накопит. ячейку в 1 с;  $n_p = V_p / \eta \tau (\Delta N_0)_p$ , где  $V_p$  — объём резонатора,  $\eta$  — коэф.,

на то, что для В. г. выполняются условия  $Q_p / Q_d \ll 1$  и  $|(\omega_d - \omega_p) \omega_d| \ll 1$ ,  $\omega$  отличается от  $\omega_d$ . В В. г., работающих в составе квантовых стандартов частоты, принимаются спец. меры по настройке резонатора на частоту  $\omega_d$ , обеспечивающие относит. воспроизводимость частоты  $\sim 10^{-13}$ .

*Лит.:* Ельшиевич М. А., Атомная и молекулярная спектроскопия, М., 1962; Орасьский А. Н., Молекулярные генераторы, М., 1964; Григорьяни В. В., Жаботинский М. Е., Золин В. Ф., Квантовые стандарты частоты, М., 1968; Гайгеров Б. А. и др., Квантовая мера частоты на водородном генераторе, «Измерительная техника», 1972, № 11; Страховский Г. М., Успенский А. В., Основы квантовой электроники, М., 1973. *Е. Н. Базров.*

**ВОДОРОДНЫЙ ЦИКЛ** (протон-протонная цепочка) — последовательность *термоядерных реакций* в звёздах, приводящая к превращению водорода в гелий без участия катализаторов. В. ц. — осн. источник энергии звёзд с массой  $M < 1,2 M_\odot$  (масс Солнца) на нач. стадиях их существования (см. *Эволюция звёзд*). Наиб. важные реакции В. ц.:



В. ц. начинается реакцией столкновения двух протонов ( ${}^1\text{H}$  или  $p$ ) с образованием ядра дейтерия ( ${}^2\text{D}$ ). Дейтерий реагирует с протоном, образуя изотоп гелия  ${}^3\text{He}$  с испусканием  $\gamma$ -фотона. Два ядра  ${}^3\text{He}$  при столкновении образуют  ${}^4\text{He}$  с отщеплением двух протонов либо  ${}^3\text{He}$  соединяется с  ${}^4\text{He}$  и даёт ядро  ${}^7\text{Be}$ . Последнее в свою очередь захватывает либо электрон ( $e^-$ ), либо протон, и возникает спёт одно разветвление протон-протонной цепочки реакций. В результате В. ц. может идти тремя разл. путями I, II и III.

В табл. приведены осн. параметры реакций В. ц.:  $Q$  — полное энерговыделение;  $\tau$  — характерное время протекания реакций; энергия испускаемых нейтрино

Параметры реакций водородного цикла

Реакции	$Q$ , МэВ	$\tau$ , лет	$\epsilon_\nu$ , МэВ; $X$
${}^1\text{H} (p, e^+) {}^2\text{D} \dots$	1,44	$8,2 \cdot 10^9$	$\epsilon_\nu = 0,26$ ; $\epsilon_{\nu, \text{макс}} = 0,42$
${}^2\text{D} (p, \gamma) {}^3\text{He} \dots$	5,49	$4,4 \cdot 10^{-8}$	$X ({}^2\text{D}) = 2,7 \cdot 10^{-10}$
${}^3\text{He} ({}^3\text{He}, 2p) {}^4\text{He} \dots$	12,86	$2,4 \cdot 10^9$	$X ({}^3\text{He}) = 1,6 \cdot 10^{-5}$
${}^3\text{He} ({}^4\text{He}, \gamma) {}^7\text{Be} \dots$	1,59	$9,5 \cdot 10^3$	$X ({}^7\text{Be}) = 1,2 \cdot 10^{-11}$
${}^7\text{Be} (e^-, \gamma) {}^7\text{Li} \dots$	0,862	0,30	$\epsilon_\nu = 0,862 (90\%)$ ; $0,383 (10\%)$ ; $\bar{\epsilon}_\nu = 0,81$
${}^7\text{Li} (p, {}^4\text{He}) {}^4\text{He} \dots$	17,348	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$X ({}^7\text{Li}) = 1,5 \cdot 10^{-15}$
${}^7\text{Be} (p, \gamma) {}^8\text{B} \dots$	0,137	$1,0 \cdot 10^2$	$X ({}^8\text{B}) = 4 \cdot 10^{-21}$
${}^8\text{B} (e^+, \nu) {}^8\text{Be}^* \dots$	15,08	$3,0 \cdot 10^{-8}$	$\bar{\epsilon}_\nu = 7,3$ ; $\epsilon_{\nu, \text{макс}} = 14,06$
${}^8\text{Be}^* \rightarrow 2 {}^4\text{He} \dots$	2,99		
$4 {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + 2\nu \dots$	26,73		$\bar{\epsilon}_\nu = 0,6$

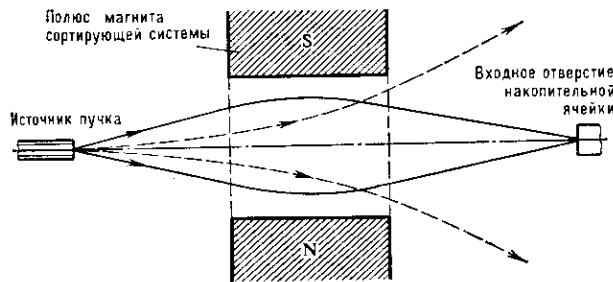


Рис. 5. Траектории движения атомов водорода; в состоянии (1,0) — сплошные линии, в состоянии (0,0) — пунктир.

учитывающий неоднородность напряжённости поля  $H_1$  в объёме резонатора и то, что накопит. ячейка занимает только часть объёма резонатора. Макс. мощность генерации В. г.  $P = \hbar \omega_d (n - n_p)$ . При  $n = 10^{14} - 10^{12}$  атомов/с и  $n \gg n_p$   $P \sim 10^{-10} - 10^{-12}$  Вт.

Из (5) следует, что отклонение частоты генерации  $\omega$  от  $\omega_d$  зависит от погрешности настройки резонатора на частоту  $\omega_d$  из-за *затягивания частоты*. Несмотря

$\epsilon_\nu$  и её ср.  $\bar{\epsilon}_\nu$  и макс.  $\epsilon_{\nu, \text{макс}}$  значения в случае, когда нейтрино испускаются с энергией в интервале  $0 < \epsilon_\nu < \epsilon_{\nu, \text{макс}}$ , а также концентрации промежуточных атомных ядер (по массе  $X$ ), устанавливающиеся в процессе В. ц. Величины  $\tau$  и  $X$  рассчитаны для физических условий, близких к ожидаемым в центре Солнца: при температуре  $T \approx 15 \cdot 10^8$  К, плотности  $100 \text{ г/см}^3$  и равных концентрациях водорода и гелия по массе  $X_{\text{H}} = X_{\text{He}} = 0,5$ . Скорости промежуточных