

О СТИМУЛИРОВАННОМ РАДИОИЗЛУЧЕНИИ МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ

В.С.Летохов

I. В последнее время был обнаружен ряд аномалий в радиоизлучении молекулы OH в межзвездной среде (аномальное отношение интенсивностей линий [1-3], сильная круговая поляризация излучения при отсутствии поляризации поглощения [4], весьма малая ширина спектра [1-4]). Темпера-

тура излучения по последним измерениям [5] на частоте 1665 Мгц источника W3 более $2 \cdot 10^6$ °К. Естественно, в качестве основного механизма объяснения этих аномалий был предложен механизм когерентного усиления радиоизлучения за счет инверсной заселенности между уровнями сверхтонкой структуры молекулы OH [2-4], причем полное усиление может достигать, например, 10^7 [4]. Возможность когерентного усиления в межзвездной среде при оптической накачке рассматривалась также в [6].

Цель данного письма - показать возможность генерации радиоизлучения в усиливающей межзвездной среде за счет обратной связи при рассеянии на свободных электронах или частицах космической пыли¹⁾. Свойства "космического мазера" существенно отличаются от свойств "космического мазерного усилителя", что делает возможным объяснение наблюдаемых аномалий.

2. Источники аномального радиоизлучения OH находятся в областях с высокой степенью ионизации водорода [1-4]. В них относительно высока концентрация электронов и межзвездной пыли, которые способны рассеивать радиоизлучение. Рассеяние излучения в обратном направлении может привести к самовозбуждению и генерации усиливающей области межзвездной среды. Условие самовозбуждения имеет вид:

$$e^{\alpha L} = \frac{\alpha}{\mathcal{K}}, \quad (1)$$

где α и \mathcal{K} - коэффициенты усиления и обратного рассеяния среды на единицу длины, L - размер генерирующей области.

3. Томсоновское рассеяние на электронах. Коэффициент обратного рассеяния на электронах определяется выражением:

$$\mathcal{K} \approx N_e \Omega_{\text{ген}} \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 \frac{\Delta \omega_\alpha}{\Delta \omega_s + \Delta \omega_\alpha}, \quad (2)$$

где N_e - плотность электронов, $\Omega_{\text{ген}}$ - телесный угол генерации, определяемой формой области генерации, а последний множитель учитывает уширение спектра излучения при обратном рассеянии на электронах. При доплеровском уширении линии усиления $\Delta \omega_\alpha$ и спектра рассеянного излучения $\Delta \omega_s$ можно считать, что $\Delta \omega_s \gg \Delta \omega_\alpha$ (масса усиливающей молекулы $M \gg m$) и

$$\frac{\Delta \omega_{\alpha}}{\Delta \omega_{\beta} + \Delta \omega_{\alpha}} \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{m T_M}{M T_e}},$$

где T_M и T_e - кинетические температуры усиливающих молекул и электронов, соответственно. Например, для случая молекул OH и

$T_e \approx 10 T_M$ получаем

$$\chi \approx 0,5 \cdot 10^{-9} N_e Q_{\text{ген}} \text{ пс}^{-1}. \quad (3)$$

При $N_e = 10^3 \text{ см}^{-3}$ и $Q_{\text{ген}} \approx 1$ стер для самовозбуждения области с размером $L = 1$ пс, согласно (1), достаточно полного усиления $e^{\alpha L} \approx 3 \cdot 10^7$.

4. Рассеяние на космической пыли. Данные о частицах пыли в космических облаках являются весьма приближенными [8]. Для оценки рассмотрим космическую пыль в виде диэлектрических сферических частиц диаметра D с диэлектрической проницаемостью ϵ и концентрацией N_q . Коэффициент обратного рассеяния равен:

$$\chi = N_q Q_{\text{ген}} \frac{\pi^5}{3} \frac{D^6}{\lambda^4} \left(\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right)^2, \quad (4)$$

причем в этом случае $\Delta \omega_{\beta} \ll \Delta \omega_{\alpha}$, так как масса частиц пыли $M_q \gg M$. Если допустить, что существуют области весьма богатые пылью, например, области с концентрацией пыли на три порядка выше средней концентрации вблизи плоскости Галактики $\langle N_q \rangle \approx 4 \cdot 10^{-14} \text{ см}^3$ [8] и диаметром частиц $D \approx 10^{-3} \text{ см}$, то в принципе возможно самовозбуждение области с размером $L = 1$ пс лишь при полном усилении $e^{\alpha L} \approx 3 \cdot 10^{15}$ ($Q_{\text{ген}} = 1$ стер, $\lambda = 18,5 \text{ см}$, $\epsilon \approx 2$). Обратная связь на частицах пыли является менее эффективной, чем на свободных электронах. Однако существование плотных областей с более крупными частицами пыли может существенно облегчить условие самовозбуждения.

5. Имеется существенное отличие обратной связи на электронах и на космической пыли. В первом случае, при обратном рассеянии, происходит сильное уширение спектра излучения ($\Delta \omega_{\beta} \gg \Delta \omega_{\alpha}$) и поэтому сужение спектра происходит только за один проход области усиления: ширина спектра излучения $\Delta \omega_{\alpha, \text{пл}} \approx \Delta \omega_{\alpha} / \sqrt{\alpha L}$. Во втором случае, при отсутствии турбулентности рассеивающих частиц, $\Delta \omega_{\beta} \ll \Delta \omega_{\alpha}$ и происходит непрерывное сужение спектра за много проходов области генера-

ции ($\Delta\omega_{u_{3A}} \approx \Delta\omega_{\alpha} / \sqrt{\alpha s t}$, t - время) [9], вплоть до предельной ширины $\Delta\omega_{u_{3A}} \approx \Delta\omega_{\alpha} / \sqrt{\alpha L}$. При турбулентном движении рассеивающих частиц, когда уширение спектра при обратном рассеянии $\Delta\omega_{\beta} > \Delta\omega_{\alpha}$, ширина спектра излучения в обоих случаях одинакова.

6. Проведенные оценки показывают, что источники аномального радиоизлучения ОН могут работать в режиме генерации. Наличие порога в режиме генерации, в отличие от режима усиления, может резко изменить свойства излучения: спектр, направленность, поляризацию и зависимость интенсивности от времени. Например, небольшая зависимость коэффициента обратного рассеяния или поглощения межзвездной среды от поляризации может сильно изменить поляризацию генерируемого излучения. При внезапном превышении порога (при импульсном возрастании усиления или уменьшении потерь) возможно экспоненциальное нарастание интенсивности излучения с последующим испусканием "гигантского" импульса.

7. Роль предложенного механизма в испускании аномального радиоизлучения в межзвездной среде может быть выяснена также по наблюдениям плотности электронов и космической пыли в источниках аномального излучения, зависимости интенсивности излучения от времени и др.

Автор глубоко благодарен академику Н.Г.Басову, Г.А.Аскар'яну и А.Г.Молчанову за обсуждение вопроса и ценные замечания.

Физический институт

им. П.Н.Лебедева

Академии наук СССР

Поступило в редакцию

21 октября 1966 г.

Литература

- [1] H.Weaver at al. Nature, 208, 29, 1965.
- [2] S.Weinreb at al. Nature, 208, 440, 1965.
- [3] R.X.Mcgee, B.J.Robinson, F.F.Gargner, J.G.Bolton. Natur., 208, 1193, 1965.
- [4] A.H.Barrett, A.E.E.Rogers. Nature, 210, 188, 1966.
- [5] A.E.E.Rodgers at al. Phys. Rev. lett., 17, 450, 1966.
- [6] Д.А.Варшавович. Письма ЖЭТФ, 4, 180, 1966.

- [7] Р.В.Амбарцумян, Н.Г.Басов, П.Г.Крюков, В.С.Летохов. Письма ЖЭТФ, 3, 262, 1966.
- [8] С.А.Каплан, С.Б.Пикельнер. Межзвездная среда, Физматгиз, 1963.
- [9] Р.В.Амбарцумян, П.Г.Крюков, В.С.Летохов. ЖЭТФ, 51, 1669, 1966.

1) Лазер с обратной связью на рассеивающих частицах предложен и осуществлен в работе [7].