

КОГЕРЕНТНОЕ УСИЛЕНИЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В КОСМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Д.А.Варшалович

У атомов водорода, помещенных в направленный поток неполяризованного ультрафиолетового излучения со сплошным спектром в области $\lambda \sim 1216 - 912 \text{ \AA}$, устанавливается инверсная заселенность уровней сверхтонкой структуры основного состояния $1S_{1/2}$. Вследствие анизотропии углового распределения падающего излучения спин атома в состоянии $F=1$ ($1S_{3/2}$) ориентируется - выстроится вдоль направления потока, так что заселенности магнитных подуровней $R(FM)$ будут различными

$$\frac{R(F=1, M=0)}{R(F=0, M=0)} = 0,987. \quad \frac{R(F=1, M=\pm 1)}{R(F=0, M=0)} = 1,013; \quad (I)$$

Это соответствует спиновым температурам

$$T_{S_0} = +5,2^\circ K, \quad T_{S_{\pm 1}} = -5,2^\circ K.$$

Приведенные значения получены в предположении, что заселенности уровней целиком определяются взаимодействием атомов с излучением, а столкновения не играют роли. Такая ситуация характерна для многих областей межзвездной среды, особенно вблизи источников излучения. Специфика космической среды состоит в отсутствии термодинамического равновесия, в том, что ее плотность ничтожно мала, а поток излучения от ближайших звезд достаточно велик.

Возникновение инверсной заселенности уровней атомов $H I$ должно приводить к тому, что космическое радиоизлучение $\lambda = 21 \text{ см}$, соответствующее переходу $F=1 \rightarrow F=0$ ($1S_{3/2}$), при прохождении через такую среду будет испытывать когерентное усиление, т.е. космическая

среда может обладать свойствами квантового усилителя или генератора (мазера). Коэффициент усиления радиоизлучения будет зависеть от частоты ν и угла ϑ между направлением ориентирующего излучения и направлением распространения радиоволны

$$\tau(\nu, \vartheta) = Q_1 n \ell \cos^2 \vartheta \exp[-6,6 \cdot 10^{-8} (\nu - \nu_0)^2], \quad (2)$$

где ℓ — длина пути радиоволны в инверсной среде в парсеках, n — число атомов HI в см^3 (кинетическая температура принята равной $T_k = 150^\circ\text{K}$). При $\nu = \nu_0$, $\vartheta = 0^\circ$, $n = 10^2 \text{ см}^{-3}$ интенсивность излучения возрастает в e^{10^2} раз. Заселенности (I), использованные при вычислении τ , соответствуют постоянному спектру ориентирующего излучения. Если же спектр излучения растет ($\frac{dI}{d\nu} > 0$), то степень инверсной заселенности будет еще выше.

Такая ситуация должна иметь место не только для атомов HI , но и для других атомов и молекул космической среды, в частности для молекул OH . Именно когерентным усилением, обусловленным оптической накачкой, можно объяснить наблюдаемые в ряде случаев аномальные интенсивности компонент космического радиоизлучения $\lambda = 18,5 \text{ см}$, соответствующего переходам между уровнями Λ -дублета OH .

Отметим, что заселенности подуровней основного состояния OH очень чувствительны к виду спектра оптического излучения, отчасти это обусловлено тем, что ряд спектральных линий практически совпадает с резонансными частотами OH . (Например, линия $\lambda = 3063 \text{ \AA}$ NI совпадает с резонансным переходом ${}^2\Sigma^+_{\nu=0, k=3, j=5/2} \rightarrow {}^2\Pi_{3/2, \nu=0, k=1, j=3/2}$.)

Когерентное усиление космического радиоизлучения прежде всего следует ожидать в областях, непосредственно примыкающих к зоне ионизации горячих звезд.

Отличие такого естественного космического мазера от лабораторных установок прежде всего состоит в том, что в астрофизических системах отсутствуют отражатели и резонаторы и не устанавливаются стоячие волны. По существу это когерентные усилители на бегущей волне. Усиление излучения достигается не за счет многократного прохождения луча через один и тот же ограниченный объем газа, а за счет

гигантских размеров усилительной системы. В лабораторных установках наличие резонаторов и отражателей приводит к значительным потерям энергии излучения. В астрофизических условиях эти потери отсутствуют. Поэтому даже небольшая степень инверсной заселенности оказывается достаточной для эффективного усиления.

Итак, при стационарном режиме усиления часть энергии оптического диапазона будет непрерывно перерабатываться в энергию радиоизлучения. Особенно значительный эффект усиления может наблюдаться при вспышках новых и сверхновых звезд. В этом случае накопленная атомами и молекулами энергия возбуждения может выделиться в виде кратковременного, но весьма интенсивного всплеска радиоизлучения. Это явление можно было бы обнаружить при сравнении кривых, характеризующих изменение со временем интенсивности оптического и радиоизлучения в начальной стадии вспышки.

Изложенное выше дает основание думать, что когерентное усиление излучения - широко распространенное явление во Вселенной.

Выражаю благодарность за полезное обсуждение и ценные советы доктору физ.-мат. наук А.З.Долгинову. Благодарю участников семинара ГАИШ и особенно докт. физ.-мат. наук И.С.Шкловского за обсуждение результатов работы и за идеи применения полученных результатов к объяснению аномалии в космическом радиоизлучении ОН.

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
17 июня 1966 г.

Литература

- [1] R. X. McGee, B. J. Robinson, F. F. Gardner, J. G. Bolton. *Nature*, 208, 1193, 1965.