

МЕГАМАЗЕРЫ В КОСМОСЕ

Левицкий М.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Иванов М.А. — канд. физ.-мат. наук, доцент

Анализируются условия работы природных безрезонаторных мазеров в больших газовых облаках и возникновение инверсной населённости за счет внешнего излучения. Отдельное внимание уделяется мегамазерам, которые представляют собой мощные источники вынужденного изотропного излучения, обнаруженные в галактиках с высокой активностью и избытком молекулярного газа.

Термин мазер происходит от акронима MASER: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation (усиление микроволн с помощью вынужденного излучения). Рассмотрим систему атомов или молекул с различными энергетическими состояниями; атом или молекула могут поглотить фотон и перейти на более высокий энергетический уровень, или же фотон может индуцировать излучение другого фотона с той же энергией в результате перехода атома или молекулы на более низкий энергетический уровень.

Функционирование мазера требует наличия инверсной заселённости, в рамках которой большее количество атомов/молекул находится на более высоких уровнях энергии. В подобном состоянии больше фотонов будет создано индуцирующим излучением, чем поглощено.

Такая система не находится в тепловом равновесии; необходим источник энергии, способствующий переходу атомов или молекул в возбуждённое состояние. При достижении состояния инверсной населённости фотон с энергией, равной разности энергий между двумя энергетическими уровнями, может индуцировать возникновение другого фотона с той же энергией. Атом или молекула при этом перейдут на более низкий энергетический уровень.

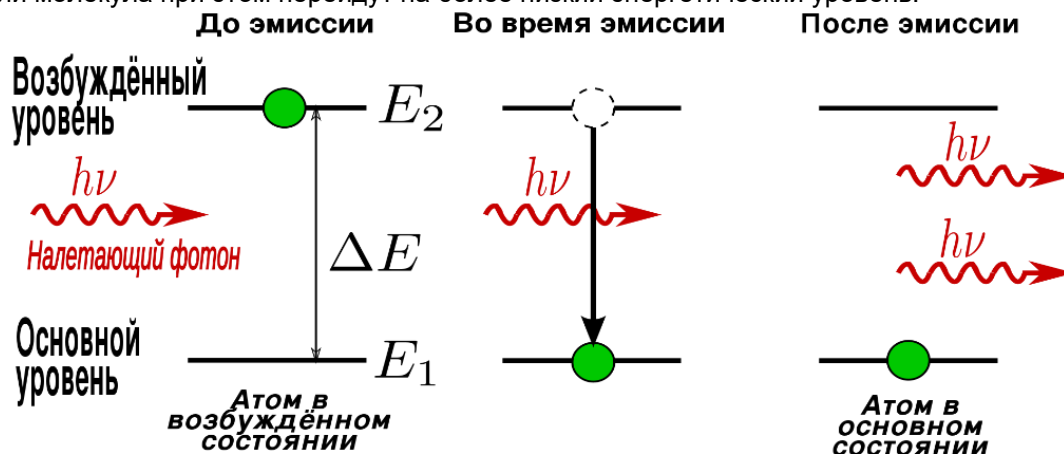


Рисунок 1- Вынужденное испускание фотонов

В космосе равновесные условия крайне редки. Чем больше система выведена из равновесия, тем более ярким является феномен, ответственный за релаксацию последней к состоянию равновесия. Неравновесные условия могут поддерживаться достаточно долго, если имеется сторонний источник возмущения. К таким объектам относятся галактические и внегалактические мазеры на молекулах OH, H₂O, SiO, H₂CO и др.

Мегамазер — это тип астрофизического мазера, представляющего собой природный источник вынужденного излучения. Еще в 70-х годах от галактик M82 и NGC 253 было обнаружено мазерное радиоизлучение OH, тогда их называли супермазерами, так как их изотропная светимость на 1—2 порядка превышала светимость галактических объектов. Изотропная же светимость мегамазеров составляет $L \sim (10 - 10^3)L_{\odot}$ (где $L_{\odot} \equiv 3.828 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$) при красном смещении этих галактик $z \sim (0,01 - 0,03)$.

Внегалактическое мазерное излучение молекул H₂O в радиодиапазоне впервые было обнаружено от галактики M33, а наиболее мощные мазеры были обнаружены от галактики NGC 3079, NGC 4258, NGC 1068 с изотропной светимостью $L \sim (10^2 - 10^3)L_{\odot}$.

Галактики, в которых наблюдаются мегамазеры, богаты молекулярным газом и имеют огромную светимость в ИК диапазоне $L \sim (10^{11} - 3 \cdot 10^{12})L_{\odot}$. Выделяют эти галактики также исключительной силы всплески звездообразования и мощные потоки в ультрафиолетовом диапазоне.

Но самые интересные свойства этих галактик — это их инфракрасные характеристики. Впервые, в галактиках с мазерной эмиссией обнаружен сильный избыток инфракрасного излучения на 25 и 60 мкм. Кроме того, эти галактики имеют исключительно крутой спектр в области среднего инфракрасного диапазона и необычно пологий спектр в далекой инфракрасной области, что наряду с

активным ядром и протяженными областями звездообразования отличает эти галактики от нормальных спиралей.

Из 10 наиболее ярких IRAS галактик со светимостью $L > 10^{12}L_{\odot}$, пять являются мегамазерами ОН. Светимость IRAS галактик в $10^{12}L_{\odot}$ сравнима со светимостью квазара, что наводит на мысль об эволюционной связи этих объектов.

В нашей Галактике слабым аналогом мазерного излучения внегалактических молекул ОН, вероятно, может служить аномальное излучение в главных радиолиниях от пылевых облаков, кинетическая температура в которых ~ 10 К.

Если гидроксильные мегамазеры существенно отличаются от галактических гидроксильных мазеров, то водные мегамазеры не проявляют признаков радикального отличия условий возникновения по сравнению с галактическими водными мазерами. Водные мегамазеры можно описать той же функцией светимости, что и галактические водные мазеры.

Некоторые внегалактические водные мазеры существуют в областях звездообразования, как и галактические водные мазеры, но более мощные мазеры наблюдаются в областях около активных ядер галактик. Их изотропная светимость составляет от нескольких единиц до нескольких сотен светимостей Солнца, подобные объекты обнаружены как в близких галактиках, например в M51, так и в более далёких, например в NGC 4258.

Гидроксильные мегамазеры возникают в области ядер ярких инфракрасных галактик и являются индикатором стадии формирования галактики. Поскольку гидроксильное излучение не подвержено экстинкции межзвёздной пылью в своей галактике, то гидроксильные мегамазеры могут быть показателями условий звездообразования в галактике.

При красном смещении $z \sim 2$ существуют яркие инфракрасные галактики, которые являются более мощными, чем аналогичные галактики в окрестностях Млечного Пути. Наблюдаемое соотношение между светимостью в линии гидроксила и светимостью в далеком инфракрасном диапазоне позволяет сделать вывод, что мегамазеры в таких галактиках в 10—100 раз мощнее по светимости, чем мазеры, найденные в более близких к нам галактиках.

Наблюдения за гидроксильными мегамазерами в этих далёких галактиках дают возможность более точных измерений красного смещения и могут дать важную информацию о процессах звездообразования.

Наблюдения водных мазеров можно использовать для получения точных расстояний до далёких галактик. Если предположить, что орбиты мазерных пятен кеплеровы, и измерить их центростремительное ускорение и скорость, то можно определить диаметр области, огибаемой мазером. Сравнение линейного размера с угловым даёт оценку расстояния до мазера. Данный метод применим для водных мазеров, поскольку они занимают малую область вокруг активного ядра галактики и обладают малой шириной линий. Данный метод определения расстояний используется для получения независимой оценки постоянной Хаббла. Метод имеет ограничения, поскольку известно лишь малое число водных мегамазеров в области, где применим закон Хаббла.

Галактические и внегалактические мазеры, особенно мегамазеры, представляют собой значимые астрофизические объекты, которые предоставляют уникальные возможности для изучения космических процессов. Эти явления, возникающие в условиях, далёких от равновесия, подчёркивают важность неравновесной динамики в астрофизике и служат мощными инструментами для понимания процессов звездообразования, эволюции галактик и взаимодействия между различными космическими объектами.

Особенность мегамазеров в том, что они могут действовать как индикаторы условий в галактиках, в которых они возникают, обеспечивая ценную информацию об их структуре, кинетике и эволюционном статусе. Благодаря их способности излучать мощные мазерные сигналы, которые могут проходить через межзвёздную пыль без значительного ослабления, мегамазеры открывают новые перспективы для астрономии, позволяя проводить детальные исследования даже в отдалённых уголках Вселенной.

Список использованных источников:

1. Griffiths D. // *Introduction to Electrodynamics*, 1999. p. 350—351.
2. Lo, K. Y. *Mega-Masers and Galaxies* // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* : journal. — 2005. — Vol. 43. — P. 625—676.
3. Churchwell E., Witzel A., Huchtmeier W., Sieber W. // *Astron. And Astrophys*, 1977. p. 969
4. Elitzur, Moshe. *Astronomical Masers*. — Springer, 1992. p. 656—657.