

Резонанс Хойла и тройной альфа-процесс: почему во Вселенной вообще существует углерод

Дата публикации: 12.06.2026

Одним из самых удивительных вопросов астрофизики остается происхождение химических элементов, из которых состоят планеты, живые организмы и сами люди. Если водород и гелий появились вскоре после Большого взрыва, то более тяжелые элементы должны были возникнуть позже внутри звезд. Однако на пути к образованию углерода существует серьезное препятствие, которое долгое время ставило ученых в тупик.

Гелий состоит из двух протонов и двух нейтронов. Углерод содержит шесть протонов и шесть нейтронов. На первый взгляд кажется очевидным, что достаточно объединить три ядра гелия, чтобы получить углерод. Но в квантовом мире все намного сложнее. Когда два ядра гелия сталкиваются, они образуют бериллий-8. Проблема заключается в том, что этот изотоп крайне нестабилен. Он существует примерно одну стомиллионную миллиардной доли секунды и почти мгновенно распадается обратно на два ядра гелия.

Из-за этого долгое время было непонятно, каким образом во Вселенной вообще мог появиться углерод. Простое последовательное наращивание массы не работало. Теоретические расчеты показывали, что вероятность одновременного столкновения сразу трех ядер гелия чрезвычайно мала даже в раскаленных недрах звезд.

Ответ был найден в механизме, который получил название тройной альфа-процесс. Он начинает играть важную роль на поздних стадиях звездной эволюции, когда в ядре накапливается большое количество гелия и температура достигает сотен миллионов градусов. В таких условиях два ядра гелия успевают образовать бериллий-8. Пока этот нестабильный изотоп существует крошечное мгновение, третье ядро гелия иногда успевает столкнуться с ним и образовать углерод-12.

Даже при звездных температурах такой трехчастичный процесс остается крайне маловероятным. Если бы физика ограничивалась только этим механизмом, углерода во Вселенной было бы очень мало. Однако природа приготовила неожиданное решение.

В 1953 году британский астрофизик Фред Хойл пришел к выводу, что в ядре углерода-12 должен существовать особый возбужденный энергетический уровень. Исходя из наблюдаемого количества углерода во Вселенной, он

рассчитал, что этот уровень должен находиться около значения 7,7 мегаэлектронвольт. Такой резонанс резко увеличивал вероятность реакции и делал образование углерода достаточно эффективным.

Идея выглядела настолько смелой, что многие физики сначала отнеслись к ней скептически. Тем не менее Хойл убедил известного экспериментатора Вилли Фаулера проверить предсказание в лаборатории. Результат оказался поразительным. Резонанс действительно существовал. Измеренная энергия составила около 7,65 мегаэлектронвольт. Расхождение с расчетом оказалось меньше одного процента.

Сегодня этот энергетический уровень известен как резонанс Хойла. Его обнаружение считается одним из самых впечатляющих примеров успешного предсказания в истории астрофизики. Именно благодаря этому резонансу скорость тройного альфа-процесса возрастает в огромное число раз, позволяя звездам синтезировать значительные количества углерода.

На этом история не заканчивается. Резонанс Хойла привел ученых к размышлениям о так называемой тонкой настройке Вселенной. Расчеты показывают, что если бы энергия этого уровня была немного иной, всего на доли процента выше или ниже, последствия оказались бы драматическими. В одном случае тройной альфа-процесс замедлился бы настолько, что углерод почти не образовывался бы. В другом углерод слишком быстро превращался бы в кислород. В обоих сценариях привычная углеродная химия оказалась бы невозможной.

Удивительно, что похожие примеры обнаруживаются и в других областях физики. Огромную роль играют сила гравитации, сила сильного ядерного взаимодействия, отношение масс протона и нейтрона. Даже небольшие изменения этих параметров могут сделать невозможным образование звезд, галактик, планет и сложных химических структур.

Эти факты привели к появлению антропного принципа. Его слабая версия утверждает, что мы наблюдаем именно такую Вселенную потому, что в иной Вселенной наблюдателей просто не существовало бы. Сильная версия идет гораздо дальше и предполагает, что фундаментальные параметры каким-то образом связаны с возможностью появления разумного наблюдателя. Такой подход находится на границе науки и философии и до сих пор вызывает оживленные дискуссии.

Существует и другая возможность. Некоторые физики считают, что значение энергии резонанса Хойла может иметь естественное объяснение в рамках пока неизвестной физики. В различных вариантах многомировой интерпретации

квантовой механики или в моделях, основанных на ландшафте теории струн, допускается существование огромного числа вселенных с разными фундаментальными параметрами. В таком случае мы просто живем в одной из немногих вселенных, где образование углерода оказалось возможным.

Интерес к тройному альфа-процессу не ослабевает и сегодня. Современные эксперименты на ускорителях продолжают уточнять параметры реакции с беспрецедентной точностью. В 2025 году исследовательские программы в Гран-Сассо и Гейдельберге позволили получить новые данные о сечении тройного альфа-процесса. Результаты подтверждают, что резонанс Хойла действительно играет ключевую роль в производстве углерода внутри звезд. Одновременно ученые изучают возможность существования дополнительных резонансных состояний, которые могут внести важные поправки в современные модели звездного нуклеосинтеза.

Тройной альфа-процесс и резонанс Хойла остаются одним из самых ярких примеров того, насколько тесно существование жизни связано с фундаментальными законами природы. Каждый атом углерода в человеческом организме когда-то возник в недрах древней звезды благодаря удивительному совпадению параметров микромира. Независимо от того, объясняется ли это антропным принципом, неизвестной физикой или особенностями устройства Вселенной, сам факт существования такого механизма показывает, насколько тонко связаны космология, ядерная физика и происхождение жизни.