

КВАНТОВЫЙ ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ В ЗВЕЗДНОМ НУКЛЕОСИНТЕЗЕ

Сиз Р.В., Шейко Д.В., студенты гр.418302

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

Чаевский В.В. - кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики

Аннотация. Данная работа посвящена изучению влияния квантового туннельного эффекта в ядерном синтезе в звёздах. Рассматриваются способы, благодаря которым квантовое туннелирование помогает атомным ядрам преодолевать кулоновский барьер, и его влияние на скорость термоядерных реакций, например, протон-протонной цепочки и CNO-цикла. Цель исследования – оценить вклад квантового туннелирования в процессы образования химических элементов, что критически важно для понимания общей динамики звёзд и эволюции Вселенной.

Звёздный нуклеосинтез, процесс образования химических элементов в недрах звёзд посредством термоядерных реакций, является фундаментальным для понимания эволюции Вселенной и происхождения элементов тяжелее водорода и гелия. Протекание этих реакций в звёздных ядрах, характеризующихся высокими температурами и плотностями, сталкивается с необходимостью преодоления кулоновского барьера. Для преодоления этого барьера требуются температуры миллиарды Кельвин по сравнению с наблюдаемыми в ядрах звезд (около 15 миллионов Кельвин в центре Солнца). Столь высокие температуры в звездах главной последовательности не достигаются. Несмотря на то, что кинетическая энергия ядер в звёздных ядрах обычно недостаточна для классического преодоления этого барьера, ядерные реакции синтеза происходят благодаря квантовому туннельному эффекту [1].

Квантовое туннелирование представляет собой квантовомеханическое явление, при котором частица имеет ненулевую вероятность пройти через потенциальный барьер, даже если ее энергия меньше высоты барьера. В контексте звёздного нуклеосинтеза, это означает, что атомные ядра могут сблизиться на расстояния, необходимые для действия сильного ядерного взаимодействия, ответственного за слияние ядер, даже при энергиях, недостаточных для преодоления кулоновского отталкивания согласно классической физике [2]. Без квантового туннелирования, звезды не могли бы поддерживать термоядерные реакции при наблюдаемых температурах, как, например, в случае протон-протонного цикла в Солнце, где туннелирование позволяет протонам преодолевать кулоновский барьер [3]. Вероятность туннелирования экспоненциально зависит от высоты и ширины барьера, а также от массы и энергии туннелирующей частицы. Именно сочетание высоких температур (дающих некоторым ядрам достаточную энергию для заметной вероятности туннелирования в области пика Гамова) и чрезвычайно высокой плотности вещества в звёздных недрах (обеспечивающей огромное число столкновений ядер в единицу времени) делает суммарную скорость термоядерных реакций достаточной для энерговыделения звезд и поддержания их светимости.

В звёздных ядрах происходят различные термоядерные реакции, приводящие к синтезу широкого спектра элементов. Одной из важнейших является протон-протонная (pp) цепочка, доминирующая в звёздах с массой, сравнимой с Солнцем. Первый, наиболее медленный этап этой реакции включает слияние двух протонов с образованием дейтерия, позитрона и нейтрино. Вероятность этого процесса критически зависит от квантового туннелирования, позволяющего протонам преодолеть кулоновский барьер. В более массивных звездах значительную роль играет CNO-цикл (углеродно-азотно-кислородный цикл), в котором углерод, азот и кислород выступают в качестве катализаторов превращения водорода в гелий. И в этом цикле квантовое туннелирование необходимо для слияния протонов с ядрами катализаторов. Точно так же, туннелирование играет важнейшую роль и в дальнейших этапах горения в более крупных звездах, например, в синтезе углерода из гелия (тройная альфа-реакция) и в процессах горения более тяжелых элементов.

Вероятность туннелирования количественно описывается так называемым фактором Гамова, названным в честь Георгия Гамова, который одним из первых применил квантовую механику для объяснения как альфа-распада, так и возможности термоядерных реакций при звёздных температурах, который определяет вероятность сближения двух ядер на расстояние действия сильного ядерного взаимодействия. Фактор Гамова учитывает заряды взаимодействующих ядер и их относительную энергию, которая зависит от температуры. Именно эта вероятность преодоления кулоновского барьера за счёт туннельного эффекта определяет скорость большинства термоядерных реакций в звёздах [1, 4]. Концепция пика Гамова определяет энергетический диапазон, в котором вероятность ядерного синтеза максимальна, представляя собой результат компромисса между экспоненциально падающим числом частиц с высокой энергией (согласно распределению Максвелла-Больцмана) и экспоненциально растущей вероятностью туннелирования с увеличением энергии (описываемой

фактором Гамова). Именно в этом узком энергетическом окне происходит основная часть реакций синтеза.

Влияние квантового туннелирования на скорость ядерных реакций в звёздах является определяющим. Более высокая вероятность туннелирования приводит к экспоненциальному увеличению скорости реакций синтеза. Эта скорость чрезвычайно чувствительна к температуре в ядре звезды, что во многом определяет структуру и эволюцию звезды, а также ее способность к саморегуляции. Это обеспечивает энерговыделение, необходимое для поддержания гидростатического равновесия звезды. Скорость протон-протонной реакции, лимитирующая туннелированием, определяет продолжительность жизни звёзд главной последовательности. Таким образом, квантовое туннелирование является фундаментальным процессом, лежащим в основе звездного нуклеосинтеза и, как следствие, существования звёзд и формирования химического разнообразия во Вселенной и, в конечном счете, появления элементов, из которых состоит наша планета и мы сами.

Список использованных источников:

1. *Астронет > 6.2 Особенности ядерных реакций в звездах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.astronet.ru/db/msg/1170612/6lec/node3.html>. – Дата доступа: 01.04.2025.*
2. *The Role of Quantum Effects in Nuclear Fusion | by Boris (Bruce) Kriger | GLOBAL SCIENCE NEWS | Medium [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://medium.com/global-science-news/the-role-of-quantum-effects-in-nuclear-fusion-376dad65258e>. – Дата доступа: 01.04.2025.*
3. *Квантовое туннелирование, телепортация, квантовый интернет. Фантастика или реальность? // Habr [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/764018/>. – Дата доступа: 02.04.2025.*
4. *Постнов К.А. Лекции по общей астрофизике. 2-е изд., испр. и доп. М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2011. 288 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://xray.sai.msu.ru/astrores/books/zasov_av_postnov_ka_obshchaia_astrofizika.pdf. – Дата доступа: 02.04.2025.*