

Солнечные нейтрино



Нейтрино

Нейтри́но (итал. *neutrino* — нейтрончик, уменьшительное от *neutrone* — нейтрон) — нейтральная фундаментальная частица с полуцелым спином, участвующая только в слабом и гравитационном взаимодействиях и относящаяся к классу лептонов.

История открытия

Одной из основных проблем в ядерной физике 20-30-х годов XX века была проблема бета-распада: спектр электронов, образующихся при β -распаде, измеренный английским физиком Джеймсом Чедвиком ещё в 1914 году, имеет непрерывный характер, то есть, из ядра вылетают электроны самых различных энергий.

С другой стороны, развитие квантовой механики в 1920-х годах привело к пониманию дискретности энергетических уровней в атомном ядре: это предположение было высказано австрийским физиком Лизой Мейтнер в 1922 году. То есть спектр вылетающих при распаде ядра частиц должен быть дискретным и показывать энергии, равные разнице энергий уровней, между которыми происходит переход при распаде. Таковым, например, является спектр энергий альфа-частиц при альфа-распаде.

Таким образом, непрерывность спектра электронов β -распада ставила под сомнение закон сохранения энергии. Вопрос стоял настолько остро, что в 1931 году знаменитый датский физик Нильс Бор на Римской конференции выступил с идеей о несохранении энергии. Однако было и другое объяснение — «потерянную» энергию уносит какая-то неизвестная и незаметная частица.

Гипотезу о существовании чрезвычайно слабо взаимодействующей с веществом частицы выдвинул 4 декабря 1930 г. Паули — не в статье, а в неформальном письме участникам физической конференции в Тюбингене.

Нейтрино малой энергии чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом: так, нейтрино с энергией порядка 3-10 МэВ имеют в воде длину свободного пробега порядка 10^{18} м (около 100 св. лет). Каждую секунду через площадку на Земле площадью в 1 см^2 проходит около $6 \cdot 10^{10}$ нейтрино, испущенных Солнцем, однако их влияние на вещество практически никак не ощущается. В то же время нейтрино высоких энергий успешно обнаруживаются по их взаимодействию с мишенями.

Такааки Кадзита и Артур Макдональд получили Нобелевскую премию по физике 2015 года «за открытие нейтринных осцилляций, показывающих, что нейтрино имеют массу».



Свойства нейтрино

- Каждому заряженному лептону соответствует своя пара нейтрино/антинейтрино:
 - электронное нейтрино/электронное антинейтрино;
 - мюонное нейтрино/мюонное антинейтрино
 - тау-нейтрино/анти-тау-нейтрино
- Различные виды нейтрино могут преобразовываться друг в друга — это так называемые нейтринные осцилляции ; считается, что это происходит из-за того, что нейтрино обладают ненулевой массой.

Свойства нейтрино

- В экспериментах с рождением ультрарелятивистских частиц, показано, что нейтрино обладают отрицательной спиральностью, а антинейтрино — положительной.
- Существуют теоретические предпосылки, предсказывающие существование четвёртого типа нейтрино — стерильного нейтрино. Однозначного экспериментального подтверждения их существования (например в проектах MiniBooNE (англ.), LSND (англ.)) пока нет.
- Неизвестно, является ли нейтрино античастицей самой себе (см. майорановский фермион).
- Неизвестно, нарушается ли CP-инвариантность при нейтринных осцилляциях.

Нейтрино имеют ненулевую массу, но эта масса крайне мала. Верхняя экспериментальная оценка суммы масс всех типов нейтрино составляет всего 0,28 Электронвольт. Разница квадратов масс нейтрино разных поколений, полученная из осцилляционных экспериментов, не превышает $2,7 \cdot 10^{-3}$ эВ.

Информация о точном значении массы нейтрино важна для объяснения феномена скрытой массы в космологии, так как, несмотря на её малость, возможно, концентрация нейтрино во Вселенной достаточно высока, чтобы существенно повлиять на среднюю плотность.

Поиск источников внутренней энергии Солнца

Такой источник был указан английским астрофизиком [А. Эдингтоном](#), который заметил, что масса ядра ${}^4\text{He}$ меньше, чем сумма масс четырех протонов и двух электронов, и поэтому их слияние в ядро гелия должно сопровождаться, согласно формуле [А. Эйнштейна](#), выделением энергии $\Delta E = (4m_p + 2m_e - m({}^4\text{He}))c^2 \approx 26 \text{ МэВ}$. (В то время считалось, что ядра состоят из протонов и электронов.) Для поддержания светимости Солнца требуется, чтобы за секунду происходило $N = L_{\odot} / \Delta E \approx 10^{38} \text{ с}^{-1}$ реакций синтеза, то есть сгорало бы $M \approx 4m_p N \approx 6 \cdot 10^6 \text{ т/с}$ водорода ($m_p \approx 1.6 \cdot 10^{-24} \text{ г}$ - масса протона). Отсюда, учитывая, что Солнце на 3/4 состоит из водорода, можно заключить, что даже одной десятой его хватает на 10 млрд лет.

Перспективы использования

Одно из перспективных направлений использования нейтрино — это нейтринная астрономия. Нейтрино несут важную информацию о ранних стадиях расширения Вселенной. Кроме того, известно, что звёзды, кроме света, излучают значительный поток нейтрино, которые возникают в процессе ядерных реакций. Поскольку на поздних стадиях звёздной эволюции за счёт нейтрино уносится до 90 % излучаемой энергии (нейтринное охлаждение), то изучение свойств нейтрино (в частности — энергетического спектра солнечных нейтрино) помогает лучше понять динамику астрофизических процессов. Кроме того, нейтрино без поглощения проходят огромные расстояния, что позволяет обнаруживать и изучать ещё более удалённые астрономические объекты.

Нейтринный телескоп



Другим (практическим) применением является развиваемая в последнее время нейтринная диагностика промышленных ядерных реакторов. Проведённые в конце XX века физиками Курчатовского института эксперименты показали перспективность этого направления, и сегодня в России, Франции, Италии и других странах ведутся работы по созданию нейтринных детекторов, способных в режиме реального времени измерять нейтринный спектр реактора и тем самым контролировать как мощность реактора, так и композитный состав топлива (включая наработку оружейного плутония).

Теоретически потоки нейтрино могут быть использованы для создания средств связи (нейтринная связь), что привлекает интерес военных: частица теоретически делает возможной связь с подводными лодками, находящимися на глубине, или передачу информации сквозь Землю.

Нейтрино, образующиеся в результате распада радиоактивных элементов внутри Земли, могут использоваться для изучения внутреннего состава Земли. Измеряя потоки геологических нейтрино в разных точках Земли, можно составить карту источников радиоактивного тепловыделения внутри Земли.

Посмотрите видео лекции:

- Широков Е. В. Физика нейтрино.
<https://www.youtube.com/watch?v=8zzm681h3OI>
- Евгений Литвинович, Солнечные нейтрино
<https://postnauka.ru/video/82259>

Литература

1. Воронцов-Вельяминов, Б.А. Астрономия. Базовый уровень. 11 класс: учебник. / Б. А. Воронцов-Вельяминов, Е. К. Страут. – 5-е изд., пересмотр. – М.: Дрофа, 2018.
2. Засов, А.В. Астрономия: 10-11 классы / А.В. Засов, В.Г. Сурдин. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2019
3. Кондакова, Е.В. Астрономия. Тетрадь-практикум. 10-11 классы: учеб. пособие для общеобразоват. организаций: базовый уровень // Е.В. Кондакова, В.М. Чаругин. – М.: Просвещение, 2018.
4. Левитан, Е.П. Астрономия. 11 класс: учеб. пособие для общеобразоват. организаций: базовый уровень. – М.: Просвещение, 2018.
5. Чаругин, В.М. Астрономия. 10-11 классы: учеб. пособие для общеобразоват. организаций: базовый уровень. – М.: Просвещение, 2018.