

Мустафин Альхас Амирович,
доцент кафедры общеобразовательных дисциплин,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: alhas355@mail.ru

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРЕДСКАЗАНИЕ ПОЗИТРОНА:
ТРИУМФ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ**

Mustafin A.A.

**MATHEMATICAL PREDICTION OF THE POSITRON:
THE TRIUMPH OF QUANTUM THEORY**

Аннотация. В статье рассматривается история предсказания позитрона – первой античастицы, существование которой было выведено математически из релятивистского волнового уравнения. В 1928 году Поль Дирак показал, что его уравнение допускает решения с отрицательной энергией, которые он интерпретировал как дырки в море заполненных состояний, соответствующие частицам с положительным зарядом и массой электрона. В 1932 году Карл Андерсон обнаружил позитрон в космических лучах, полностью подтвердив предсказание. Работа демонстрирует мощь математической логики в квантовой физике и открывает эру физики антивещества.

Ключевые слова: позитрон, античастица, уравнение Дирака, отрицательная энергия, море Дирака, космические лучи, открытие Андерсона.

Abstract. This article examines the history of the prediction of the positron, the first antiparticle whose existence was mathematically deduced from the relativistic wave equation. In 1928, Paul Dirac demonstrated that his equation allowed solutions with negative energy, which he interpreted as holes in a sea of filled states, corresponding to particles with a positive charge and the mass of an electron. In 1932, Carl Anderson discovered the positron in cosmic rays, fully confirming the prediction. This work demonstrates the power of mathematical logic in quantum physics and ushered in the era of antimatter physics.

Keywords: positron, antiparticle, Dirac equation, negative energy, Dirac Sea, cosmic rays, Anderson's discovery.

К 1920-м годам квантовая механика успешно описывала поведение электронов в атомах, но оставалась нерелятивистской – она не согласовывалась со специальной теорией относительности. Попытки создать релятивистское волновое уравнение наталкивались на трудности: стандартное уравнение Шрёдингера было инвариантно только относительно преобразований Галилея, но не Лоренца.

В 1928 году английский физик Поль Адриен Морис Дирак предложил новое уравнение, которое сочеталось и с квантовой механикой, и с теорией относительности. Однако из этого уравнения следовал неожиданный вывод: наряду с обычными состояниями электрона существуют решения с отрицательной энергией. Это привело к предсказанию существования ранее неизвестной частицы – антиэлектрона, или позитрона. В отличие от всех предыдущих открытий элементарных частиц (которые делались случайно или в камерах Вильсона), позитрон

стал первой частицей, предсказанной чисто математически до экспериментального обнаружения [1 с. 67—102.].

Цель данной работы – восстановить логику рассуждений Дирака, описать ход открытия Андерсона и оценить научное значение этого события.

В 1926 году Эрвин Шрёдингер предложил своё знаменитое уравнение для волновой функции, которое блестяще описывало энергетические уровни атома водорода. Однако оно было нерелятивистским – то есть справедливым только для скоростей, малых по сравнению со скоростью света. Между тем для электронов в тяжёлых атомах релятивистские эффекты становились заметными: например, тонкая структура спектральных линий не объяснялась полностью без учёта теории относительности.

Попытки построить релятивистское обобщение уравнения Шрёдингера, известное как уравнение Клейна – Гордона, привели к серьёзной проблеме: оно давало отрицательные вероятности и не могло быть интерпретировано как уравнение для одной частицы. Физики оказались перед парадоксом: теория относительности требовала, чтобы энергия частицы могла быть как положительной, так и отрицательной (поскольку в формуле Эйнштейна квадрат энергии равен сумме квадратов массы и импульса, корень может быть взят со знаком плюс или минус). В классической физике отрицательные энергии просто отбрасывались, но в квантовой механике они приводили к нестабильности – любой электрон мог бы бесконечно излучать фотоны и уходить в состояние с всё более низкой энергией. Эта проблема ждала своего решения [2].

В 1928 году Дирак поставил цель: объединить квантовую механику с теорией относительности. Он искал волновое уравнение, линейное по производным по времени и по координатам, чтобы избежать отрицательных вероятностей. В результате он пришёл к системе уравнений, которые теперь называют уравнениями Дирака. Решения этого уравнения оказались многокомпонентными – волновая функция электрона описывалась не одной, а несколькими величинами, что автоматически учитывало спин электрона (его внутренний момент импульса). Однако самое неожиданное свойство уравнения Дирака заключалось в том, что оно, как и релятивистское соотношение энергии и импульса, допускало два типа решений: с положительной и с отрицательной энергией. В классической физике отрицательные энергии отбрасывали, но в квантовой теории запретить переходы электрона из положительных состояний в отрицательные было невозможно без дополнительных предположений. Возникал парадокс: если отрицательные состояния реальны, то любой электрон должен мгновенно упасть на самый низкий уровень с энергией минус бесконечность – стабильная материя не могла бы существовать.

Дирак нашёл остроумный выход в 1930 году. Он предположил, что вакуум – это не пустота, а состояние, в котором все уровни с отрицательной энергией полностью заполнены электронами (это получило название «море Дирака»).

Обычные же электроны (с положительной энергией) находятся поверх этого моря. Согласно принципу Паули, два электрона не могут занимать одно квантовое состояние, поэтому заполненные нижние уровни не позволяют положительным электронам упасть вниз – все места заняты. Однако если из моря Дирака удалить один электрон (например, подействовать фотоном достаточно высокой энергии), то возникнет дырка – отсутствие электрона в отрицательном состоянии. Такая дырка будет вести себя как частица с положительной энергией и положительным зарядом (поскольку удаление отрицательного заряда эквивалентно добавлению положительного). Масса этой дырки должна быть равна массе электрона, потому что именно электрон был удалён.

Таким образом, Дирак математически предсказал существование новой частицы – антиэлектрона, или позитрона. Он также предсказал, что при столкновении фотона с достаточно высокой энергией (порог равен удвоенной энергии покоя электрона) с ядром может родиться пара электрон-позитрон – процесс, обратный аннигиляции. Эти предсказания были чисто математическими следствиями уравнения, и в начале 1930-х годов никто ещё не наблюдал позитрона в природе. Многие физики поначалу считали дырочную теорию лишь математическим трюком. [3, 4].

В 1932 году американский физик Карл Дэйв Андерсон изучал космические лучи с помощью камеры Вильсона, помещённой в сильное магнитное поле. Камера позволяла фотографировать следы частиц, а поле искривляло траектории: положительные заряды отклонялись в одну сторону, отрицательные – в другую. Андерсон добавил в камеру свинцовую пластину, чтобы по изменению кривизны определять направление движения. 2 августа 1932 года он получил снимок следа частицы, проходящей через пластину. Кривизна указывала на положительный заряд, потери энергии – на движение снизу вверх. Протон оставил бы более толстый след и сильнее затормозился. Андерсон оценил массу частицы: она оказалась примерно равной массе электрона, но с положительным зарядом. Никакой известной лёгкой положительной частицы не существовало. Дополнительные снимки подтвердили открытие. Андерсон назвал частицу «позитроном» (от *positive electron*). Он опубликовал результаты в *Science* в сентябре 1932 года, ещё не зная о теории Дирака (позже он признал, что услышал о «дырочной» теории уже после открытия). Свойства позитрона полностью совпали с предсказаниями Дирака. В том же году группа Патрика Блэккетта в Кембридже подтвердила открытие и показала, что позитроны рождаются при взаимодействии гамма-квантов с веществом – как и предсказывал Дирак. [5].

Открытие позитрона стало триумфом математической физики. Впервые чисто теоретическое построение – волновое уравнение, полученное из соображений симметрии и принципов квантовой механики, – привело к предсказанию совершенно новой, ранее не наблюдавшейся частицы. Это кардинально изменило отношение к абстрактным математическим конструкциям в физике: если

раньше физики стремились объяснять уже известные явления, то теперь они поняли, что математика способна открывать неизведанные слои реальности. Позитрон был первой открытой античастицей. Вскоре стало ясно, что для каждой частицы должна существовать античастица: для протона – антипротон (открыт в 1955 году), для нейтрона – антинейтрон (1956) и так далее. Это привело к понятию симметрии между материей и антиматерией.

Современная квантовая теория поля строится на требовании, чтобы каждое решение релятивистских волновых уравнений влекло существование пар частица-античастица. Кроме того, открытие позитрона объяснило загадочное явление «исчезновения» электронов при столкновении с веществом – аннигиляцию. Сегодня позитроны используются в медицине (позитронно-эмиссионная томография – ПЭТ), в материаловедении, в физике высоких энергий. Сам Дирак получил Нобелевскую премию в 1933 году «за открытие новых продуктивных форм теории атома» (формулировка неявно включала предсказание позитрона), а Андерсон и Блэккетт разделили Нобелевскую премию 1936 года за экспериментальное открытие позитрона. Спор о приоритете здесь не возник, так как теория и эксперимент были явно разделены. Однако история позитрона показала, что даже самый смелый математический вывод может оказаться физической реальностью, если теория построена на глубоких принципах.

Позитрон остаётся классическим примером того, как чистая математика, следуя своей внутренней логике, может предсказать существование нового объекта природы. Уравнение Дирака было выведено из требования непротиворечивости квантовой механики и теории относительности, и оно наказало своих создателей неожиданным решением – отрицательными энергиями. Вместо того чтобы отбросить эти решения как бессмысленные, Дирак осмелился придать им физическую интерпретацию, которая через два года блестяще подтвердилась. С тех пор физики перестали бояться «лишних» решений своих уравнений – напротив, они ищут в них намёки на новые частицы и явления. Открытие позитрона открыло эру физики антивещества и навсегда изменило представление о том, что такое вакуум: не пустота, а кипящее море виртуальных частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пайс А.** Поль Дирак: аспекты его жизни и работы // Гении науки. — Москва: ИКИ, 2002. — С. 67–102.
2. **Хоффман Д.** Эрвин Шрёдингер. — Москва: Мир, 1987. — 96 с.
3. **Дирак П.** Лекции по квантовой теории поля. Москва: Мир, 1971. — 244 с.
4. **Дирак П.** Воспоминания о необычайной эпохе: сб. статей. Москва: Наука, 1990. — 200 с.
5. **Храмов Ю. А.** Андерсон Карл Дэвид // Физики. — Москва: Наука, 1983. — 400 с.