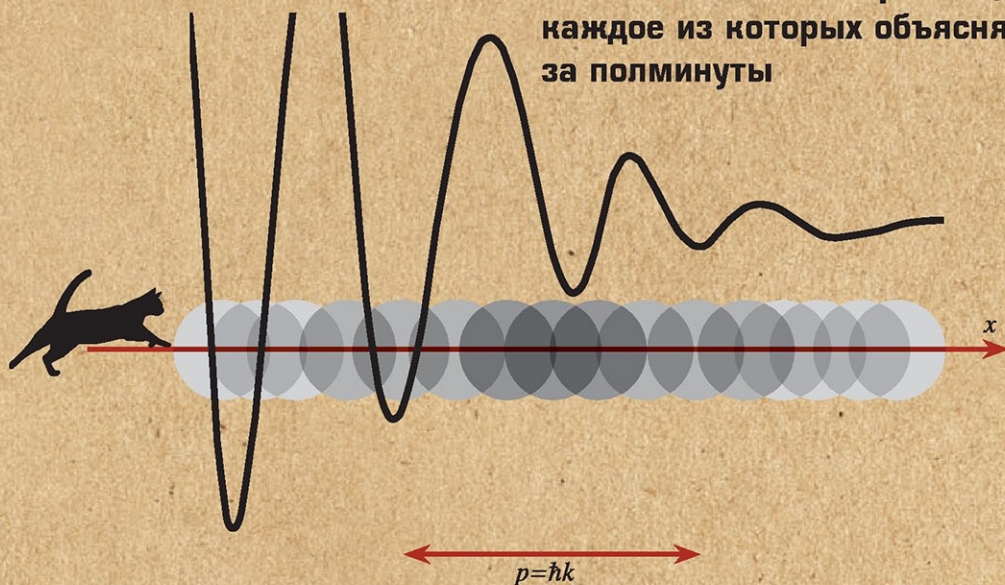


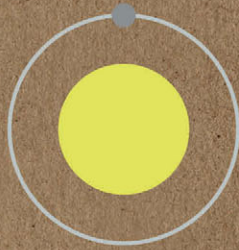
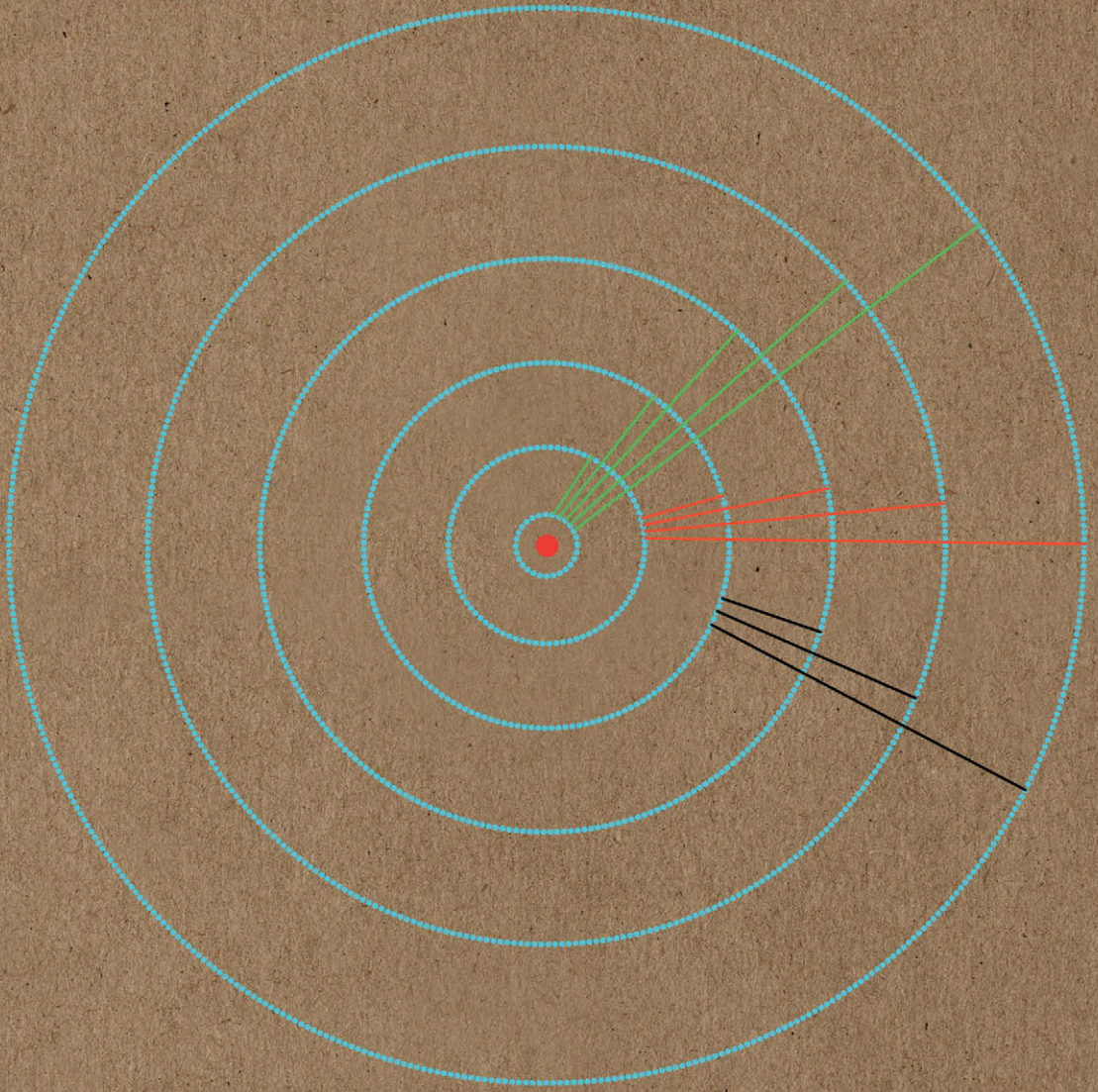
КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ за 30 секунд

50 самых важных и любопытных явлений квантовой физики, каждое из которых объясняется за полминуты



Редактор
Брайан Клегг

КВАНТОВАЯ
ТЕОРИЯ за **30** секунд



КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ за 30 секунд

50 самых важных и любопытных
явлений квантовой физики,
каждое из которых объясняется
за полминуты

Редактор
Брайан Клегг

Авторы
Филип Болл
Брайан Клегг
Леон Клиффорд
Фрэнк Клоуз
Софи Хэбден
Александр Хеллеманс
Шэрон Энн Холгейт
Эндрю Мэй



РИПОД
КЛАССИК

Москва, 2014

УДК 530.1
ББК 22.3
К48

Перевод с английского О. И. Перфильева

Клегг, Б.

К48 Квантовая теория / Б. Клегг ; [пер. с англ. О. И. Перфильева]. — М. : РИПОЛ классик, 2014. — 160 с. : ил.

ISBN 978-5-386-07920-8

**УДК 530.1
ББК 22.3**

ISBN 978-5-386-07920-8

© 2014 by Ivy Press Limited

© Перевод. Перфильев О. И., 2014

© Издание на русском языке, перевод на русский язык, оформление. ООО Группа Компаний «РИПОЛ классик», 2014

Научно-популярное издание

Клегг Брайан

Квантовая теория

Генеральный директор издательства
С. М. Макаренков

Шеф-редактор *Е. Олейник*
Ведущий редактор *А. Хацаева*
Научный редактор *А. Нурматов*
Редактор *В. Тетевин*

Выпускающий редактор *Л. Данкова*
Художественное оформление: *Н. Дмитриева*
Компьютерная верстка: *А. Дятлов*
Корректор *И. Кулюхина*

Creative Director Peter Bridgewater
Publisher Susan Kelly
Editorial Director Caroline Earle
Art Director Michael Whitehead
Project Editor Jamie Pumfrey
Designer Ginny Zeal
Illustrator Ivan Hissey
Glossaries Text: Brian Clegg

Издание содержит научную / научно-техническую / статистическую информацию.
В соответствии с пунктом 2 статьи 1
Федерального закона от 29.12.2010 г.
№ 436-ФЗ знак информационной продукции
не ставится.

Подписано в печать 10.09.2014 г.
Формат 180×230. Гарнитура «FuturaLight»
Усл. печ. л. 12,9
Тираж 3500 экз.
Заказ № 2579

Адрес электронной почты: info@ripol.ru
Сайт в Интернете: www.ripol.ru

ООО Группа Компаний «РИПОЛ классик»
109147, г. Москва, ул. Большая Андроньевская, д. 23

Отпечатано в 1010 Printing International Limited
26/FI, 625 King's Road
North Point, Hong Kong
Tel:(852) 8226 1010 Fax:(852) 2156 8039

СОДЕРЖАНИЕ

- 6 Предисловие
- 13 **Рождение теории**
- 14 ГЛОССАРИЙ
- 16 Ультрафиолетовая катастрофа
- 18 Гипотеза Планка о квантах
- 20 Эйнштейн объясняет фотоэлектрический эффект
- 22 Формула Бальмера
- 24 Атом Бора
- 26 Портрет: НИЛЬС БОР
- 28 Корпускулярно-волновой дуализм
- 30 Волны де Бройля
- 32 Эксперимент с двойной щелью
- 35 **Основы**
- 36 ГЛОССАРИЙ
- 38 Квантовый спин
- 40 Матричная механика
- 42 Уравнение Шрёдингера
- 44 Портрет: ЭРВИН ШРЁДИНГЕР
- 46 Кот Шрёдингера
- 48 Принцип неопределенности Гейзенберга
- 50 Коллапс волновой функции
- 52 Декогеренция
- 55 **Физика света и материи**
- 56 ГЛОССАРИЙ
- 58 Принцип Паули
- 60 Уравнение Дирака
- 62 Портрет: ПОЛЬ ДИРАК
- 64 Квантовая теория поля
- 66 Основы КЭД
- 68 Опасности перенормировки
- 70 Диаграммы Фейнмана
- 72 Назад во времени
- 75 **Квантовые явления и их интерпретации**
- 76 ГЛОССАРИЙ
- 78 Оптические делители пучка
- 80 Туннельный эффект
- 82 Сверхсветовые эксперименты
- 84 Копенгагенская интерпретация
- 86 Интерпретация Бом
- 88 Портрет: ДЭВИД БОМ
- 90 Коллапс сознания
- 92 Многомировая интерпретация
- 95 **Квантовая запутанность**
- 96 ГЛОССАРИЙ
- 98 Парадокс Э. П. Р.
- 100 Неравенство Белла
- 102 Портрет: ДЖОН БЕЛЛ
- 104 Квантовое шифрование
- 106 Кубиты
- 108 Квантовые компьютеры
- 110 Квантовая телепортация
- 112 Квантовый эффект Зенона
- 115 **Квантовая физика на практике**
- 116 ГЛОССАРИЙ
- 118 Лазер
- 120 Транзисторы
- 122 Электронный микроскоп
- 124 Магнитно-резонансные томографы
- 126 Контакты Джозефсона
- 128 Портрет: БРАЙАН ДЖОЗЕФСОН
- 130 Квантовые точки
- 132 Квантовая оптика
- 135 **Квантовые крайности**
- 136 ГЛОССАРИЙ
- 138 Энергия нулевой точки
- 140 Сверхпроводники
- 142 Сверхтекучесть
- 144 Конденсат Бозе — Эйнштейна
- 146 Портрет: ШАТЬЕНДРАНАТ БОЗЕ
- 148 Квантовая хромодинамика
- 150 Квантовая биология
- 152 Квантовая гравитация
- 154 Источники
- 156 Об авторах
- 158 Указатель
- 160 Благодарности

ПРЕДИСЛОВИЕ

Брайан Клегг

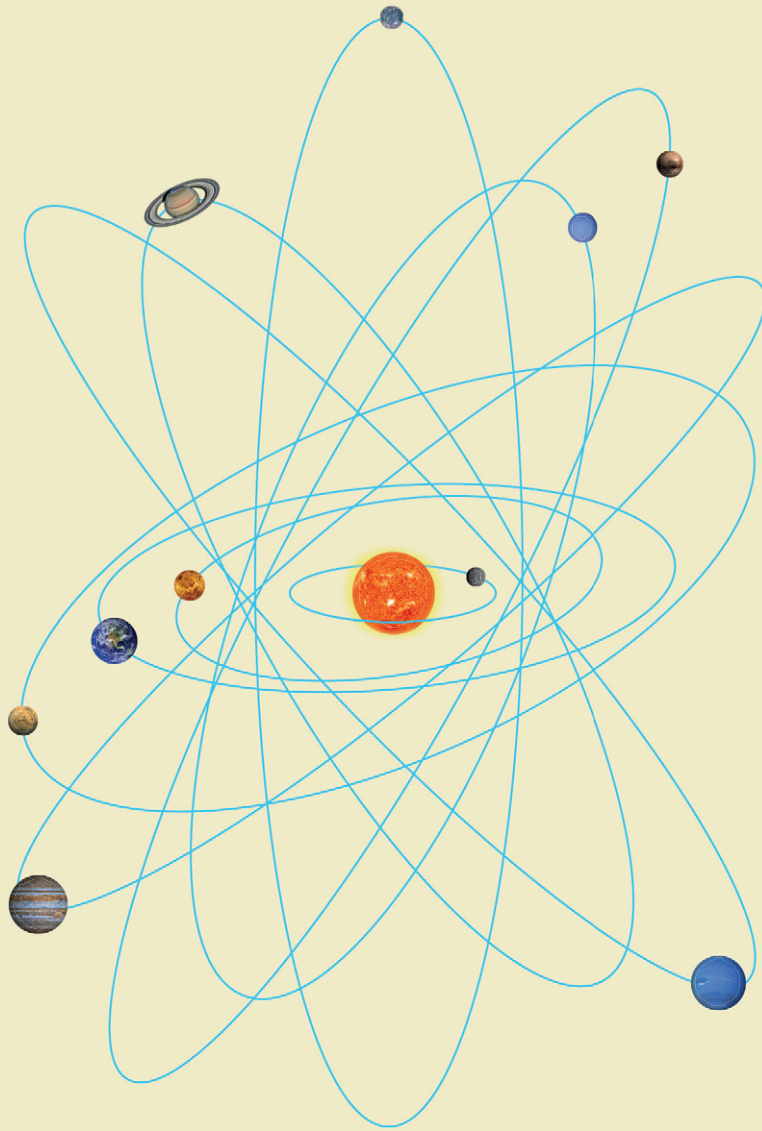
Та физика, которую мы изучаем в школе, бывает, честно говоря, довольно скучной. Это, в основном, такая солидная наука XIX столетия, в которой нет места случайностям и потрясениям основ. Какая жалость, что мы с самого начала не знакомим детей с ее самым интересным и захватывающим разделом — квантовой физикой!

Удивительный микромир

Предположение о том, что все в мире состоит из крошечных частиц, уходит корнями в античные времена, но идеи первых древнегреческих атомистов (само слово атом происходит от греческого слова *atomos*, что значит «неделимый») долгое время находились в тени других идей, например, теории о том, что все в мире состоит из четырех элементов — земли, воздуха, огня и воды. К концу XIX века атом занял прочное место в науке, как теоретическая концепция, помогающая объяснить многие физические и химические явления, хотя ученые и не имели точного представления о том, что же это такое. К их удивлению, атомы оказались не только реальностью, теми самыми крошечными частицами, из которых состоит все существующее во Вселенной, от человека до пылинки, но при этом еще и весьма странными частицами с необычными свойствами. Изначально предполагалось, что атомы и их части ведут себя, как обычные предметы, которые мы видим вокруг себя, только в меньшем масштабе. Поэтому ученые считали, что они пролетают сквозь пространство подобно теннисному мячу, только очень маленькому. Когда было сделано открытие, что атомы имеют свою внутреннюю структуру, первым делом была предложена теория о том, что они похожи на булочку с изюмом, в которой изюминки — это отрицательно заряженные частицы, равномерно расположенные по всему положительному «тесту». Но позже выяснилось, что основная масса атома сосредоточена в его ядре, и тогда была предложена модель миниатюрной «Солнечной системы».

Квантовая революция

К разочарованию защитников старой доброй физики (и к нашему общему восхищению) такая модель оказалась невозможной. Атом, устроен-



ный как Солнечная система, в которой вокруг Солнца-ядра вращаются планеты-электроны, был бы нестабилен, а квантовые частицы отказывались бы вести себя предсказуемым образом, подобно теннисному мячу. По мере развития квантовой теории становилось ясно, что между макроскопическим и микроскопическим миром имеется огромная разница. Теннисные мячи передвигаются по определенным траекториям в зависимости от своей массы и сил, которые на них действуют. Поведение же квантовых частиц возможно рассчитать только с известной долей вероятности. В самой их сути заложен принцип неопределенности, и, пока их не обнаружили, нельзя было с уверенностью предполагать, как они себя поведут в том или ином случае.

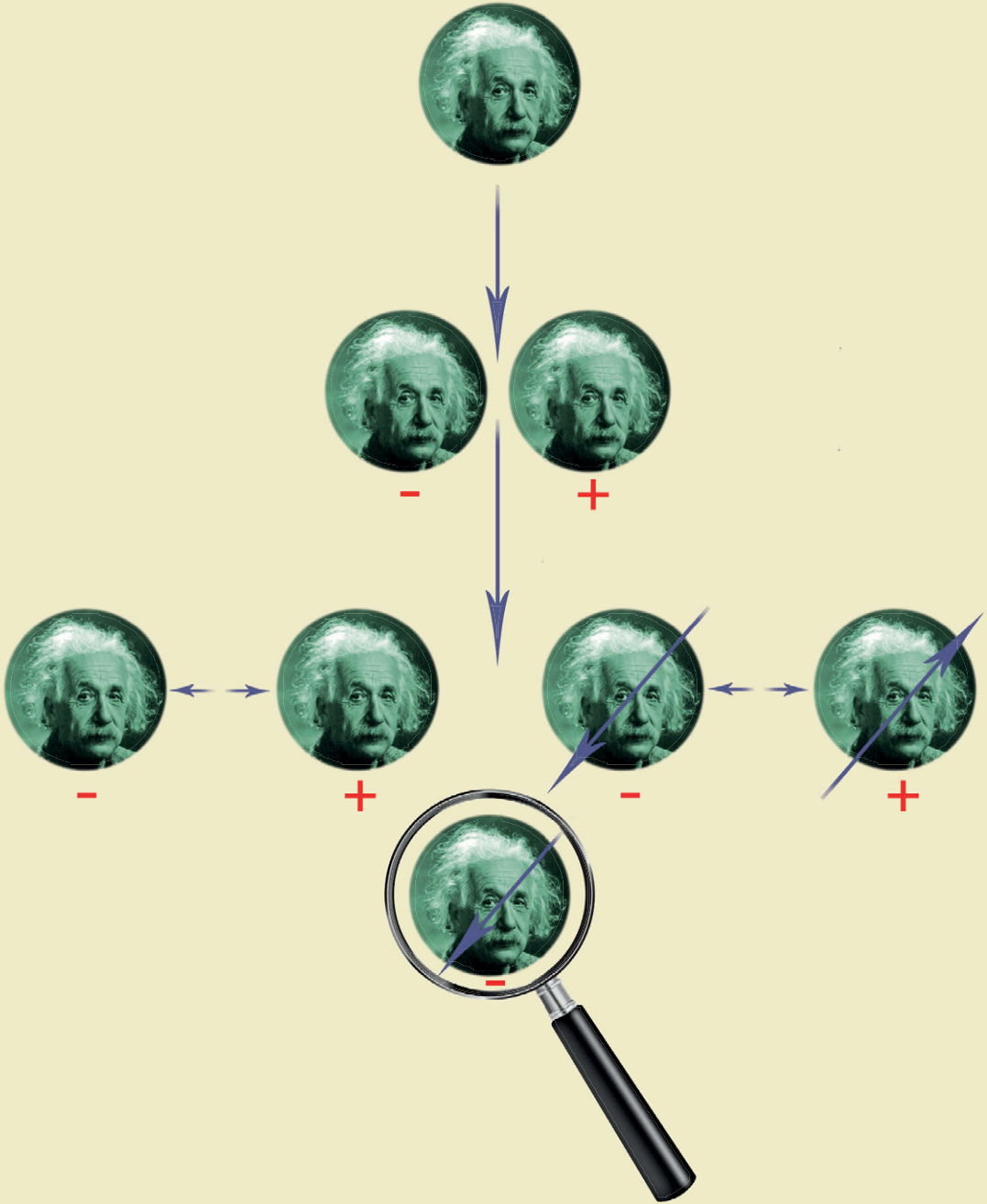
Это озадачило Эйнштейна, который писал: «Я нахожу довольно неприемлемой идею о том, что электрон под воздействием излучения по своей свободной воле выбирает не только время движения, но и его направление. В таком случае мне бы лучше было быть сапожником или служащим в игорном доме, чем физиком». Знаменитым стало его высказывание «Бог не играет в кости». Но другие ученые нашли эту идею довольно занимательной.

Великий американский физик Ричард Фейнман заявил: «Я расскажу вам, что такое Природа — и если вам это не понравится, то вы, возможно, этого не поймете... Квантовая физика описывает Природу абсурдной с точки зрения здравого смысла. И это полностью подтверждается экспериментами. Поэтому я надеюсь, что вы примете Природу такой, какая она есть, то есть абсурдной». Надеюсь, эта книга поможет вам почувствовать то же изумление и восхищение перед абсурдностью квантового мира, какие испытывал Ричард Фейнман.

Теория по кусочкам

Вряд ли какая-нибудь другая тема более достойна того, чтобы преподнести ее небольшими, доступными для быстрого усвоения фрагментами, чем квантовая физика. Пятьдесят тем, затронутых в данной книге, распределены по семи разделам, каждый из которых посвящен какой-то отдельной области. Начинаем мы, что вполне объяснимо, с **«Рождения теории»**, где описывается, как классические представления о том, что атомы не отличаются от других наблюдаемых нами объектов, разрушились в результате более точных наблюдений и как ученые попытались объяснить стабильность атомов, что потребовало совершенно иного подхода по сравнению с классической физикой.

Далее мы обратимся к **«Основам»**, то есть ключевым понятиям квантовой физики, некоторые из которых, вроде принципа неопределенности Гейзенберга, вышли за пределы физики и стали частью современной



жизни. Уяснив эти основы, мы сможем объяснить с научной точки зрения практически всё, с чем сталкиваемся в повседневной практике, о чем и идет речь в разделе **«Физика света и материи»**. Квантовая электродинамика, то есть теория, объясняющая всё, — от того, как согревает нас свет и до того, почему мы не проваливаемся сквозь стул, — требует совершенно иного подхода к квантовому миру. Она стала наиболее удачной теорией с точки зрения точности предсказания наблюдаемых явлений.

После мы перейдем к некоторым ключевым **«Квантовым явлениям и их интерпретациям»**. В этом разделе объясняется, как мы можем смотреть сквозь окно и видеть в нем отражения, как квантовый туннельный эффект поддерживает работу Солнца, а также затронем рискованную тему квантовой интерпретации. Квантовая физика в этом отношении почти уникальна. Она прекрасно позволяет предсказать то, что мы наблюдаем, но никто до сих пор точно не знает, что же представляют собой эти явления. Такие интерпретации, как копенгагенская, многомировая или интерпретация Бома, пытаются подвести под наблюдаемые явления какое-то теоретическое обоснование и построить каркас для понимания «глубинного смысла» квантовой физики, но единого мнения на этот счет до сих пор нет. Выбор той или иной интерпретации остается, скорее, вопросом личных предпочтений, а не научной логики.

В следующем разделе мы встретимся с самым любопытным феноменом квантовой физики, так называемой **«Квантовой запутанностью»**, которую Эйнштейн (надеявшийся с помощью этой концепции дискредитировать квантовую физику) описывал, как «жуткое дальнее действие»; согласно этому принципу квантовые частицы могут воздействовать на другие квантовые частицы мгновенно и на любом расстоянии, что вступает в противоречие с постулируемой специальной теорией относительности конечностью скорости света. И все же, эксперименты за экспериментами подтверждают существование такой запутанности, и на ней основаны практические применения квантовой теории, такие, как квантовое шифрование и квантовые компьютеры.

Последние два раздела посвящены вторгающимся в нашу повседневную жизнь квантовым технологиям и крайним случаям, возможным с точки зрения квантовой физики. В **«Квантовой физике на практике»** мы рассмотрим лазер, транзистор, магнитно-резонансный томограф и другие приборы. Понятно, что каждый раз, пользуясь электричеством, мы тем самым пользуемся квантовыми феноменами, но в последнее время в области электроники квантовые принципы применяются настолько явно, что, согласно некоторым оценкам, примерно треть VPN — выделен-

ных линий Интернета развитых стран приходится на технологии, имеющие отношение к квантовой физике.

Что касается **«Квантовых крайностей»**, то здесь мы рассмотрим любопытные, почти фантастические концепции, такие как энергия нулевой точки (говорящая о том, что даже в вакууме нет полной пустоты), необычные явления при экстремально низких температурах, а также постараемся распространить принципы квантовой физики на атомные ядра, гравитацию и даже биологию.

Скачок в теорию

Каждая тема, сопровождаемая превосходными иллюстрациями, поделена еще на несколько удобных для восприятия частей. Основное описание теории, рассчитанное на 30 секунд, сопровождается кратким изложением факта за 3 секунды. Если вы пожелаете узнать больше, то вам будет предложено подумать об особенно любопытных аспектах данной темы в «Размышлениях на 3 минуты». Естественно, что для каждой темы есть другие, связанные с ней темы, а «3-секундные биографии» расскажут о том, какие ученые внесли свой вклад в развитие этой темы.

Сам формат «Квантовой теории за 30 секунд» разбивает описываемую теорию на своеобразные «кванты», благодаря чему знакомство с этой поразительной и будоражащей воображение областью современной науки превращается в увлекательное занятие. В основе всего, что мы наблюдаем вокруг себя и чем занимаемся, лежат квантовые частицы — и при этом они поразительным образом отличаются от всего, к чему мы привыкли. В этом и заключается восхитительный парадокс квантовой физики, с которой вам предстоит познакомиться.

РОЖДЕНИЕ ТЕОРИИ

РОЖДЕНИЕ ТЕОРИИ ГЛОССАРИЙ

Длина волны

Расстояние, за которое волна проходит полный цикл и возвращается в исходную точку цикла. Длина волны равна скорости, поделенной на частоту.

Излучение Хокинга

Квантовый эффект, предсказанный Стивеном Хокингом и заключающийся в быстром появлении и исчезновении виртуальных частиц в пространстве. Обычно они не оставляют следов, но если это происходит у горизонта событий черной дыры, то одну частицу может затянуть в черную дыру, а другая может при этом отлететь, испуская излучение. (Поэтому черные дыры и не такие уж «черные»). Излучение Хокинга — это пример излучения черного тела, эквивалентного излучению черного тела при температуре, обратно пропорциональной массе черной дыры.

Квант

Неделимая порция какой-либо величины в физике, название которой произошло от латинского слова *quantum* (что буквально означает «сколько»). Таким образом, квантовая физика изучает мельчайшие частицы материи и энергии и их поведение. Все изменения квантовых величин носят дискретный, то есть «порционный», характер. В качестве примера можно привести

среднестатистическую семью, в которой 2,3 ребенка, но дети в каждой конкретной семье появляются дискретно, то есть их количество выражается целым числом.

Квантовый скачок

Скачкообразный переход квантовой системы из одного состояния в другое и с одного уровня энергии на другой — например, переход электрона с одной орбиты на другую. Вопреки распространенным в массовом сознании образам, представляет собой крайне малое изменение.

Лептоны

Фундаментальные частицы с полуцелым ($1/2$) спином, наиболее известная из которых — электрон. К лептонам также принадлежат мюоны, тау-частицы и три типа нейтрино.

Постоянная Планка

Фундаментальная постоянная природы, с теоретической точки зрения — «квант действия», где под действием подразумевается математическая модель энергии системы, движущейся по определенной траектории. Эта постоянная, которую сам Планк обозначал как h , связывает энергию фотона с его частотой (цветом). Она очень мала: всего лишь немногим более $6,6 \times 10^{-34}$ джоулей в секунду.

Принцип дополнительности

Поскольку в квантовой физике процесс измерения влияет на результаты измерения, часто бывает так, что различные наблюдения и измерения противоречат друг другу. Так, например, в зависимости от способа наблюдения свет может показаться либо волной, либо частицей, но не одновременно тем и другим. Согласно принципу дополнительности в реальности наблюдаемому явлению присущи сразу все эти свойства, а не какое-то одно.

Формула Планка

Отношение между энергией фотона и его частотой, выражаемое в виде формулы $E = h\nu$, где h — это постоянная Планка, а ν — частота.

Фотоны

Квантовые частицы света, переносчики электромагнитного излучения. До XX века считалось, что свет имеет волновую природу, но как эксперименты, так и теория показали, что свет также состоит из не имеющих массы частиц.

Частота

Количество повторений или изменений какого-либо явления за единицу времени.

Часто используется при описании волновых явлений, и при этом частота измеряется в герцах (1 Гц = одно колебание в секунду). Частота волны — это скорость, разделенная на длину волны. Для квантовых объектов частота пропорциональна энергии объекта.

Черная дыра

Область, в которой материя настолько сконцентрирована, что сжимается под действием собственного гравитационного притяжения. Чаще всего черные дыры образуются при сжатии массивной звезды. Границей черной дыры считается «горизонт событий», расположенный на таком расстоянии от ее центра, на котором ничто не может вырваться за ее пределы, в том числе и свет. Сама по себе черная дыра представляет собой сингулярность, то есть точку без размеров.

Черное тело

Гипотетический объект, поглощающий весь падающий на него свет (электромагнитное излучение) любой частоты и направления. При постоянной температуре спектр излучаемого черным телом света (спектр излучения) зависит исключительно от температуры, а не от его состава.

УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ КАТАСТРОФА

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Планк выдвинул гипотезу о том, что энергия излучается отдельными порциями («квантами»), чтобы разрешить парадокс ультрафиолетовой катастрофы.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Идеальное черное тело кажется довольно странным теоретическим построением, но на самом деле это всего лишь условная конструкция, объясняющая поведение любого нагретого объекта. Основная идея заключается в том, что чем больше температура тела, тем короче длина волны испускаемого им электромагнитного излучения. Схожим образом ведут себя и электрический обогреватель, и звезды. Подобно черному телу ведут себя даже черные дыры, испуская так называемое излучение Хокинга.

В популярной истории квантовой механики большое внимание уделяется так называемой «ультрафиолетовой катастрофе». В конце XX века ученые, строившие свои теории на основе классической физики, пришли к выводу, что мощность электромагнитного излучения черного тела — которое можно представить, как теплый и полностью поглощающий свет объект — должна становиться бесконечной по мере сокращения длины волны от видимой к ультрафиолетовой части спектра. Но, очевидно, это не так, и в 1900 году Макс Планк постарался разрешить эту «катастрофу», предположив, что колеблющиеся атомы черного тела могут испускать энергию только дискретными порциями — квантами, — пропорциональными частоте их вибраций. Буквой h он обозначил коэффициент пропорциональности, называемый постоянной Планка. До сих пор не ясно, какой смысл в понятие «кванты» вкладывал сам Планк, но, по всей видимости, он долгое время отказывался признавать «реальность» своего предположения, считая их всего лишь удобной математической конструкцией. Позднее выяснилось, что они действительно помогают разрешить ультрафиолетовую катастрофу, накладывая ограничения на то, каким образом могут излучать атомы темного тела, колеблющиеся с большой частотой. За эту идею в 1918 году Планк получил Нобелевскую премию.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

ГИПОТЕЗА ПЛАНКА
О КВАНТАХ
(с. 18)

ЭЙНШТЕЙН ОБЪЯСНЯЕТ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ
ЭФФЕКТ
(с. 20)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

МАКС ПЛАНК
(1858—1947)

Ученый, в начале XX века считавшийся самым видным представителем немецкой физики

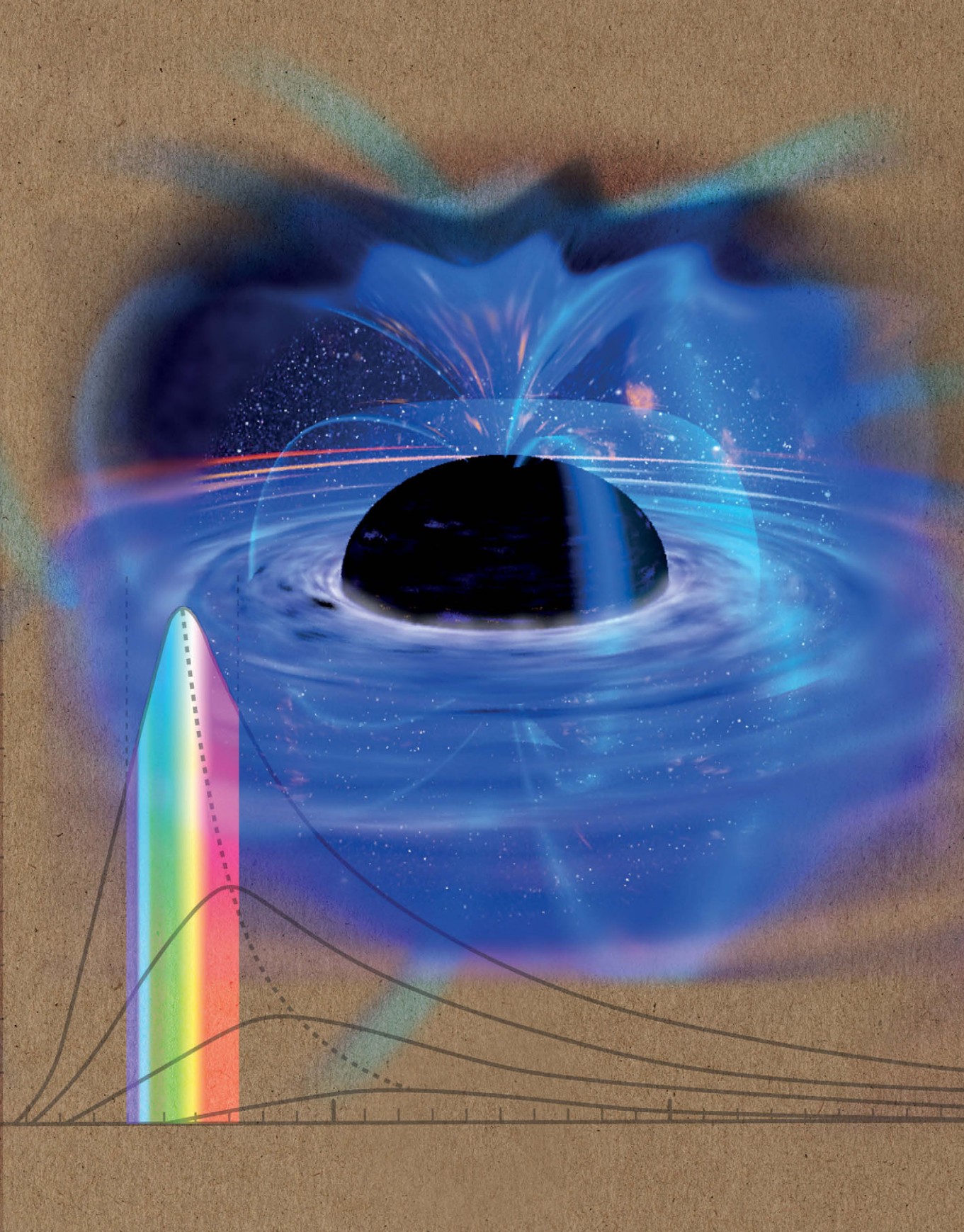
ВИЛЬГЕЛЬМ ВИН
(1864—1928)

Немецкий физик, открывший зависимость интенсивности и длины волны излучения черного тела от температуры

АВТОР СТАТЬИ

Филип Болл

Если бы свет не был поделен на кванты, излучение черного тела менялось бы неконтролируемым образом.



ГИПОТЕЗА ПЛАНКА О КВАНТАХ

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Планк открыл тот факт, что энергия выделяется или поглощается материей дискретными порциями, или квантами, и это его открытие изменило всю физику.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Изначально Планк воспринимал кванты всего лишь в качестве математической модели. Физики мало обращали внимания на эту модель до 1905 года, когда Эйнштейн использовал идею квантов для объяснения фотоэлектрического эффекта и предложил считать свет состоящим из частиц с определенной энергией. Реальная природа квантов получила дальнейшее объяснение у Бора, который объяснил, почему электроны могут находиться только на определенных орбитах вокруг атомного ядра, причем каждый раз, переходя на другую орбиту, они поглощают или испускают фотон.

В конце 1890-х годов немецкий производитель электрических ламп попросил молодого физика Макса Планка рассчитать энергию, выделяемую нитями накаливания. Таким образом, перед Планком поставили задачу, решить которую не могли даже ведущие ученые того времени: вывести формулу зависимости длины волны света и ультрафиолетового излучения от температуры черного тела. Планк попытался применить всё, что могла предложить физическая теория, но безуспешно. Отчаявшись, он предположил, что излучение черного тела испускается не непрерывно, подобно текущей из крана воде, а порциями, подобно тому, как вода капает из неисправного закрытого крана. Эти порции, которые позже получили название «квантов», он назвал «энергетическими элементами». Согласно предположению Планка, энергия этих порций должна быть обратно пропорциональной длине их волны. Формула, выражающая зависимость длины волны квантов от их энергии получила название «Формула Планка». Применяв ее для расчета длины волны света, излучаемого нагретыми телами, Планк обнаружил, что она прекрасно подтверждает лабораторные эксперименты.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ
КАТАСТРОФА
(с. 16)

ЭЙНШТЕЙН ОБЪЯСНЯЕТ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ
ЭФФЕКТ
(с. 20)

ФОРМУЛА БАЛЬМЕРА
(с. 22)

АТОМ БОРА
(с. 24)

3-СЕКУНДНАЯ БИОГРАФИЯ

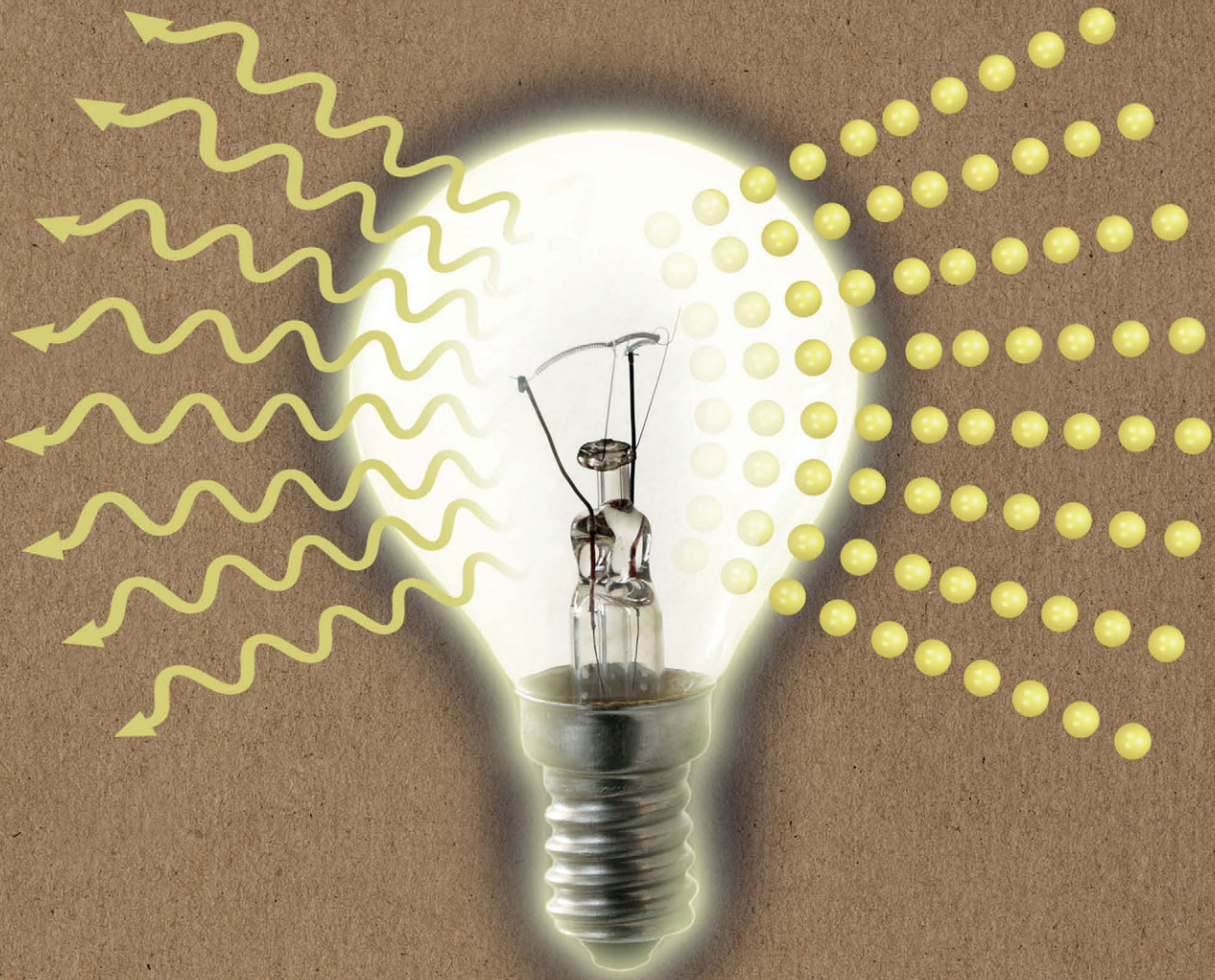
НИЛЬС БОР
(1885–1962)

Датский ученый,
основоположник
квантовой физики

АВТОР СТАТЬИ

Александр Хеллеманс

*Планк предположил,
что свет испускается
не непрерывным
потокком,
а отдельными
порциями —
квантами.*



ЭЙНШТЕЙН ОБЪЯСНЯЕТ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Квантовая теория за 30 секунд

В 1905 году могло показаться, что все революционные идеи в физике исходят от Эйнштейна. За пять лет до того Планк предложил модель, согласно которой электромагнитное излучение (в том числе и свет) испускается отдельными порциями, или квантами, энергия которых пропорциональна их частоте. Для самого Планка эта модель была всего лишь математической абстракцией, позволявшей проводить вычисления. Но Эйнштейн предположил, что квантование энергии — это не какое-то удобное математическое построение, а фундаментальное свойство самого света: свет представляет собой не равномерный поток, а поток дискретных частиц, называемых фотонами. Многим ученым такое заявление показалось бы слишком смелым и даже дерзким. Однако Эйнштейн постарался представить доказательства своей гипотезы. В начале 1900-х годов Филипп Ленард проводил эксперименты, в ходе которых металлические пластины под действием света испускали электроны. Это был пример уже известного фотоэлектрического эффекта. Согласно новой модели Эйнштейна это имело смысл: в более ярком луче больше фотонов, хотя каждый имеет такую же энергию, как и раньше. После того, как предсказания Эйнштейна были подтверждены на практике Робертом Милликеном, Эйнштейн за свою работу был в 1921 году удостоен Нобелевской премии.

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Предположив, что свет состоит из отдельных частиц, фотонов, Эйнштейн смог объяснить загадочные особенности фотоэлектрического эффекта.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Милликен целых десять лет проверял теорию Эйнштейна в ходе кропотливых экспериментов, требовавших очень чистой металлической поверхности; сам он при этом был убежден в том, что Эйнштейн не прав. Но даже когда эти эксперименты подтвердили верность предположений Эйнштейна, Милликен продолжал их критиковать, утверждая, что уравнение Эйнштейна «не имеет удовлетворительного теоретического обоснования». Так бывает со многими революционными идеями.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ
КАТАСТРОФА
(с. 16)

ГИПОТЕЗА ПЛАНКА
О КВАНТАХ
(с. 18)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

ФИЛИПП ЛЕНАРД
(1862—1947)

Немецкий физик,
нобелевский лауреат
1905 г.

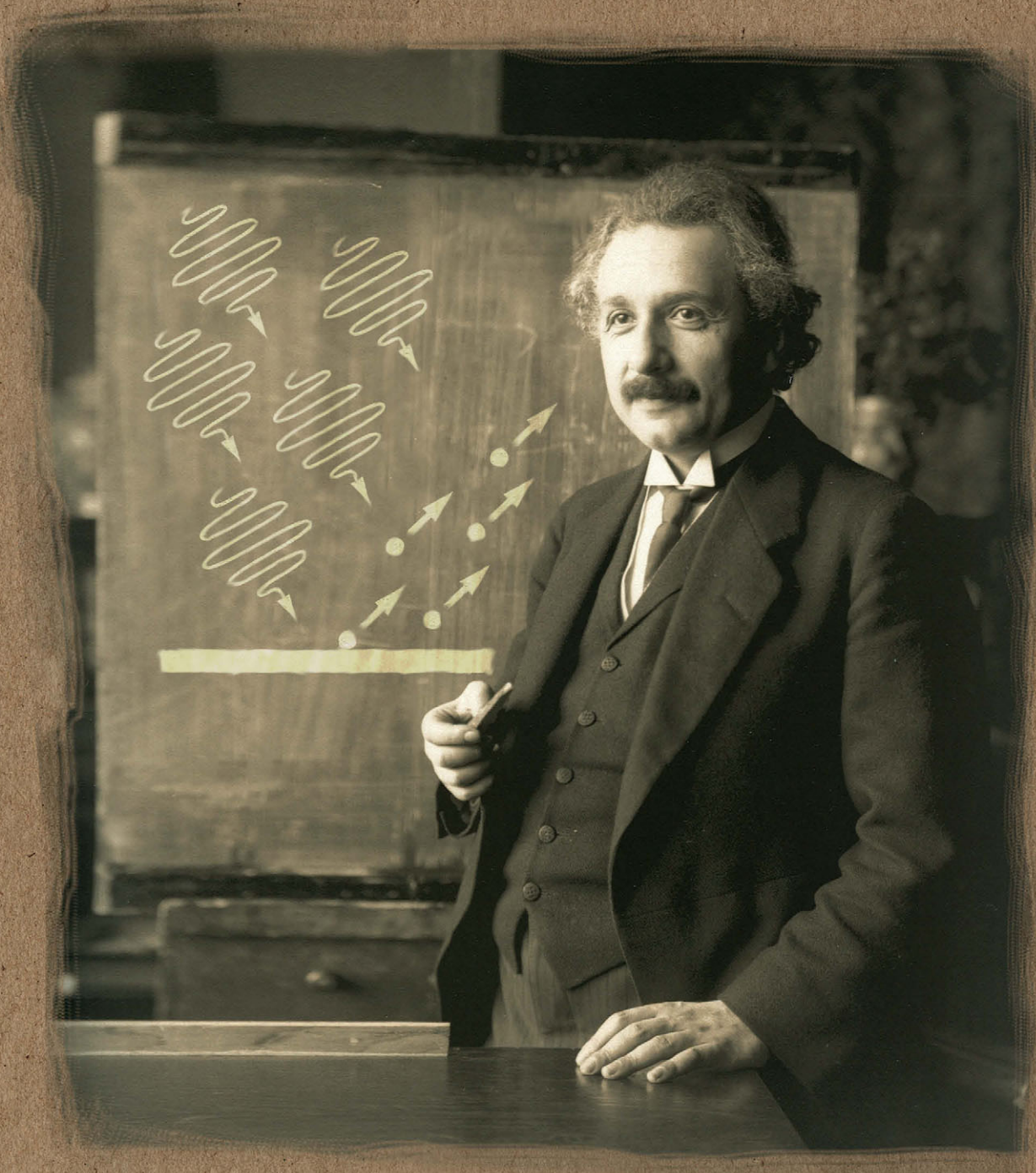
АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН
(1879—1955)

Физик-теоретик,
разработавший
специальную и общую
теории относительности
и внесший значительный
вклад в развитие
квантовой физики

АВТОР СТАТЬИ

Филип Болл

Эйнштейн понял, что в фотоэлектрических экспериментах электроны испускаются под воздействием энергии отдельных квантов света.



ФОРМУЛА БАЛЬМЕРА

Квантовая теория за 30 секунд

Работая над моделью атома,

Нильс Бор поставил себе целью объяснить стабильность структуры, в которой электроны находятся вокруг центрального, положительно заряженного ядра. В феврале 1913 года он обратил внимание на работу, опубликованную за 28 лет до этого школьным учителем Иоганном Бальмером. Однажды в разговоре коллега Бора Ханс Хансен упомянул, что Бальмер уже предложил формулу, описывающую и предсказывающую расположение линий в спектре водорода. При нагревании каждый отдельный химический элемент излучает не полный спектр света, а отдельные линии. Бальмер обнаружил, что распределение линий водорода подчиняется простой математической формуле. До этого Бор считал, что атомы испускают свет с частотой, соответствующей скорости вращений электрона — такова была общепринятая теория того времени. Благодаря формуле Бальмера Бор понял, что частота света, зависящая от энергии фотонов, согласно простой формуле Планка, соответствует различным энергетическим промежуткам между фиксированными орбитами электронов. Новая модель Бора не только объясняла, почему атомы стабильны, но и почему в их спектре заметны только отдельные частоты.

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Благодаря знакомству с ранее выведенной формулой, Бор понял, каким образом объяснить стабильность своей новой модели атомов и характер энергии излучаемых ими фотонов.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Как Бор рассказывал физику Леону Розенфельду: «Как только я увидел формулу Бальмера, мне тут же всё стало ясно... Я ничего не знал о спектральной формуле. Потом посмотрел на нее... И понял, что в спектре водорода всё очень просто». Формула была в учебнике, по которому Бор учился, поэтому он должен был видеть ее, но благодаря замечанию Ханса он обратил на нее особое внимание и внес огромный вклад в развитие атомной теории.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ
КАТАСТРОФА
(с. 16)

АТОМ БОРА
(с. 24)

УРАВНЕНИЕ ДИРАКА
(с. 60)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

ИОГАНН ЯКОБ БАЛЬМЕР
(1825—1898)

Швейцарский учитель,
преподававший
математику в Базельском
университете

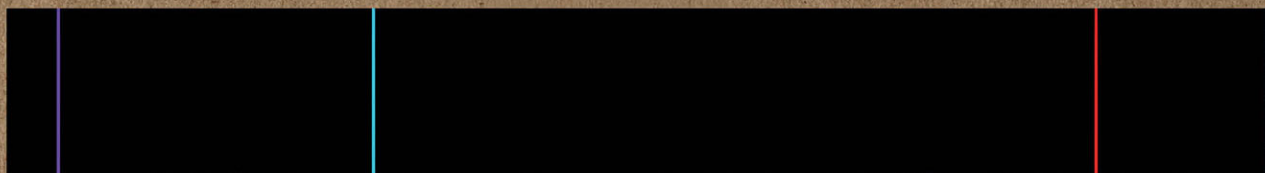
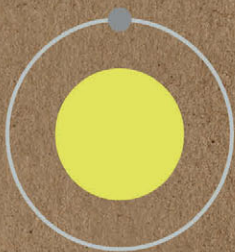
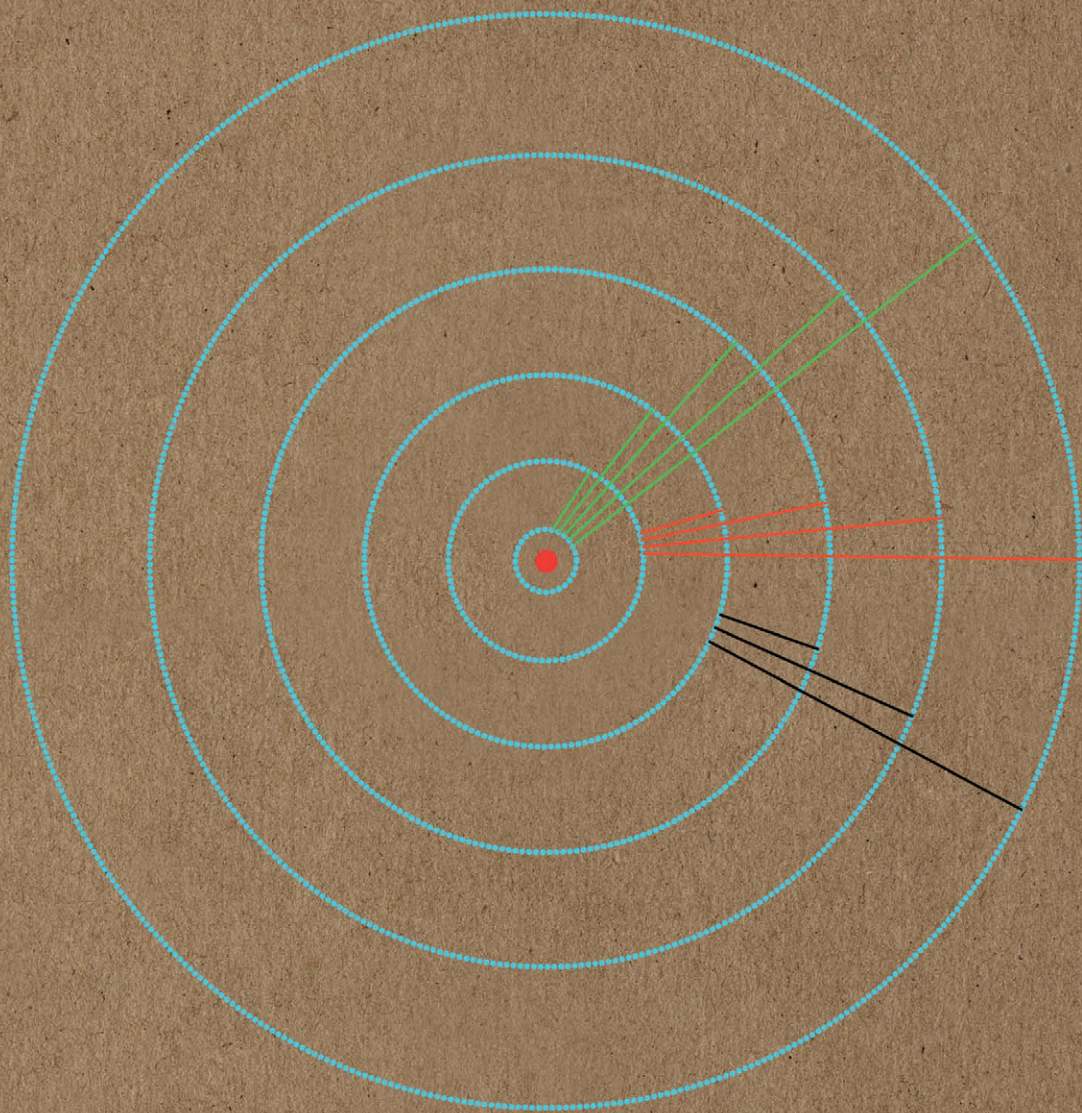
ЛЕОН РОЗЕНФЕЛЬД
(1904—1974)

Бельгийский физик-
теоретик

АВТОР СТАТЬИ

Брайан Клегг

**Электроны,
перепрыгивающие
с одной орбиты
на другую,
испускают энергию,
соответствующую
отдельным линиям
спектра.**



АТОМ БОРА

Квантовая теория за 30 секунд

В 1911 году, когда Нильс Бор, получив стипендию, приехал в Англию на стажировку, строение атома оставалось загадкой. Переехав в Манчестер, в лабораторию Эрнеста Резерфорда, Бор принялся разрабатывать модель атома, объяснявшую наличие у атомов открытого Резерфордом ядра. Если электроны находятся вне этого ядра, то нужно каким-то образом объяснить стабильность всего атома. Сначала Бор предположил, что электроны связаны с ядром эластичными связями, а кванты Планка ограничивают частоту их возможных колебаний, но это не соответствовало наблюдениям. Уже было ясно, что модель статичных электронов нестабильна, но альтернативная модель, согласно которой электроны вращались вокруг ядра по орбитам, словно планеты вокруг Солнца, тоже не была лишена противоречий. При ускорении (а любое движущееся по орбите тело имеет ускорение) заряженное тело испускает электромагнитное излучение. Электроны в таком случае должны были терять энергию и по спирали устремляться к ядру, что привело бы к разрушению атома. Бор предположил, что они могут находиться только на строго фиксированных орбитах или перепрыгивать с одной орбиты на другую.

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

В модели атома Бора электроны занимают строго определенные орбиты, что мешает им устремляться к ядру.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Большое влияние на теорию Бора оказало то, что он описывал, как «механизм излучения, предложенный Планком и Эйнштейном», то есть идея о том, что атомы могут испускать свет только определенными порциями, или квантами. Бор предположил, что, перепрыгивая с одной орбиты на другую (при так называемом «квантовом скачке»), электроны поглощают или выделяют энергию, равную энергии соответствующего фотона.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

ГИПОТЕЗА ПЛАНКА
О КВАНТАХ
(с. 18)

ФОРМУЛА БАЛЬМЕРА
(с. 22)

ПАРАДОКС Э. П. Р.
(с. 98)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

ДЖОЗЕФ ДЖОН
ТОМСОН
(1859–1940)

Английский ученый,
открывший электрон

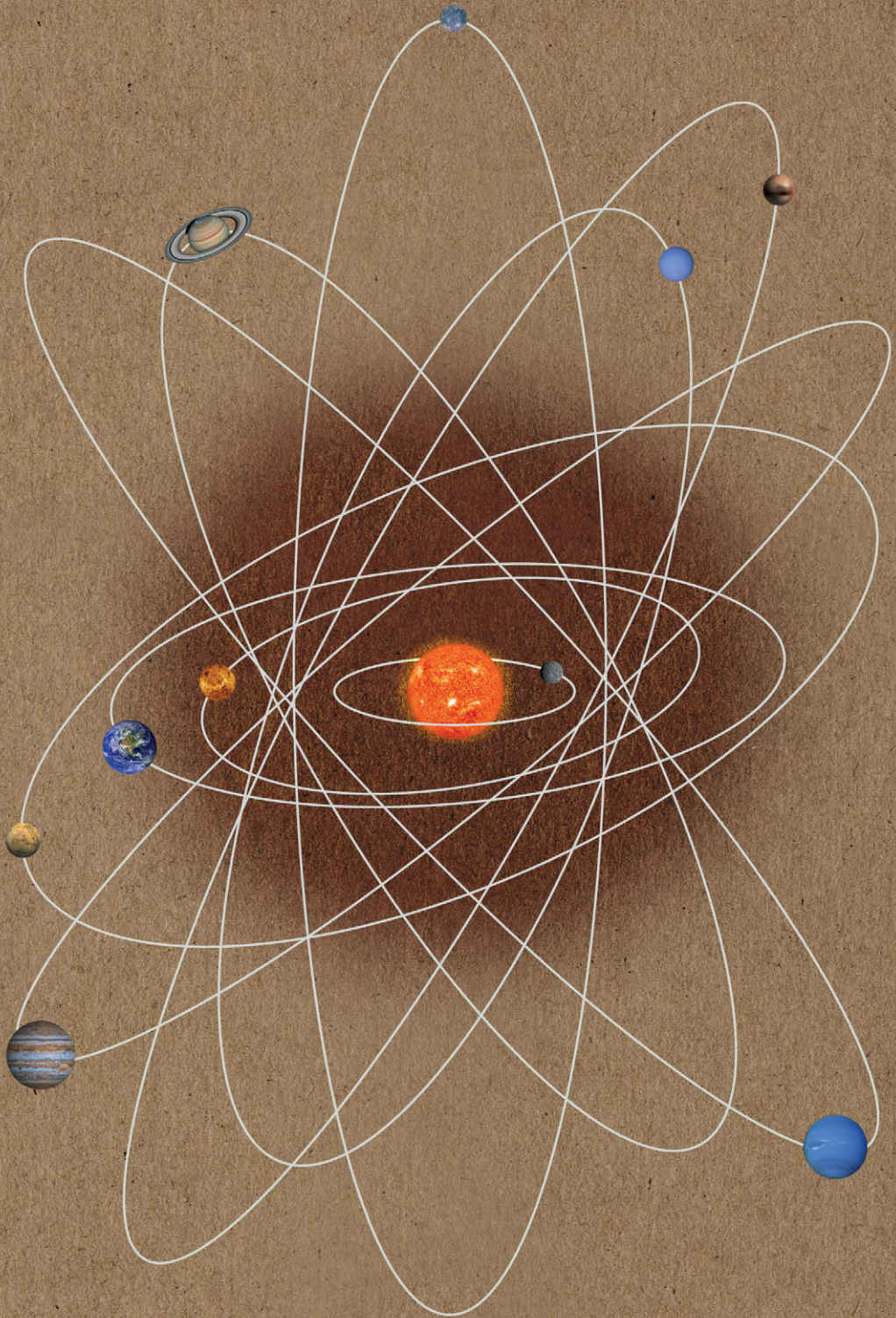
ЭРНЕСТ РЕЗЕРФОРД
(1871–1937)

Ученый, открывший
процесс радиоактивного
распада и атомное ядро

АВТОР СТАТЬИ

Брайан Клегг

**В отличие от планет,
электроны в модели
атома Бора
занимают строго
определенные
орбиты и не могут
занимать промежутки
между ними.**



7 октября 1885 года

Родился в Копенгагене, в семье профессора физиологии Христиана Бора и его жены Эллен Адлер

1908

Публикует работу о поверхностном натяжении в бюллетене Датского королевского общества

1911

Получает степень доктора Копенгагенского университета

1911—1912

Проводит год стажировки в Англии, в Кембридже и Манчестере, где у него и зарождается теория «квантового атома»

1912

Женится на Маргарет Норлунд, которая становится его секретарем

1913

Публикует статью «О строении атомов и молекул»

1913

Читает лекции по физике в Копенгагенском университете

1914

Читает лекции по физике в Манчестерском университете

1916

Становится профессором теоретической физики Копенгагенского университета

1920

Назначен главой нового Института теоретической физики Копенгагенского университета

1922

Получает Нобелевскую премию за заслуги в изучении строения атома

Середина 1920-х

Закладывает основы современной квантовой механики и так называемой копенгагенской интерпретации; его идеи служат источником споров между ним и Эйнштейном

1931

Переезжает с семьей в резиденцию Карлсберг в копенгагенском районе Вальбю

Начало 1930-х

Интересуется строением атомного ядра

1943

Избегает ареста со стороны нацистов, переправившись в Швецию, а затем в Англию и США. Служит консультантом при создании атомной бомбы

18 ноября 1962 года

Умирает в Копенгагене

1965

Датский Институт теоретической физики переименовывается в Институт Нильса Бора

1997

107-й элемент получает название «борий»



НИЛЬС БОР

В сентябре 1911 года из Копенгагена в Кембридж приехал молодой, только что получивший степень доктора датский ученый Нильс Бор. К своей стажировке он приступил под началом знаменитого Дж. Дж. Томсона, открывателя электрона. Но их отношения не заладились с первой же встречи, во время которой Бор указал на ошибку в одной из работ Томсона. Через некоторое время Бору предложили переехать в Манчестер, в лабораторию Эрнеста Резерфорда, где Бор активно включился в работу над моделью атома, учитывая сделанное Резерфордом открытие атомного ядра и принципы квантовой теории. Еще через некоторое время Бор опубликовал работу, коренным образом изменившую научное представление об атоме.

Бор был выдающимся ученым, но иногда со стороны могло сложиться впечатление, что он недалекого ума человек и слишком долго думает, прежде чем выразить свое мнение. Его коллега Джеймс Фрэнк вспоминал: «Лицо его становилось пустым, руки безвольно повисали, и невозможно было сказать, видит ли он хоть что-нибудь перед собой. Его можно было даже принять за идиота. В нем не оставалось ни капли жизни. Затем внутри него загоралась искра, и он говорил: „Теперь я понимаю“».

Бор заложил основы квантовой физики, наряду со Шрёдингером, де Бройлем и Гейзенбергом. В отличие от Эйнштейна, его нисколько не тревожили необъяснимые противоречия сильной, но весьма загадочной теории, объяснявшей поведение атомов, электронов и протонов. Эйн-

штейну была ненавистна сама мысль о вероятности, лежащей в основе квантовой теории; он много думал над ней и во время встреч на различных конференциях пытался разрушить эту теорию, описывая Бору вытекающие из нее различные парадоксы и задавая хитрые вопросы. Бор обычно немного размышлял над проблемой, а на следующий день приходил с уже готовым решением.

На протяжении многих лет Бор возглавлял Институт теоретической физики в Копенгагене, где работал над квантовой теорией и разрабатывал принцип дополнительности, согласно которому само наблюдение над квантовыми частицами неизбежно влияет на результат такого наблюдения. В 1931 году ему, как человеку, наиболее прославившему Данию, предложили переехать в почетную резиденцию Карлсберг в Копенгагене — на виллу основателя пивной компании «Карлсберг» Карла Якобсена.

В середине 1930-х Бор значительно переработал «капельную модель ядра» Карла Вайцеккера, согласно которой протоны и незадолго до этого открытые нейтроны представляют своего рода нераздельную жидкость; на основании этой модели можно было рассчитывать силу, связывающую ядро воедино, и потому она оказалась полезной для ученых, открывших деление ядер. В середине 1940-х Нильсу Бору, мать которого была еврейкой, стало небезопасно жить в оккупированной нацистами Дании, и он был вынужден бежать в Англию, а оттуда переехать в США.

Брайан Клегг

КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Де Бройль, предположив, что частицы ведут себя, как волны, а волны, как частицы, разрешил парадокс, смущавший последователей квантовой теории.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Эксперименты вскоре показали, что можно либо измерить свойства света, как частиц, либо его свойства, как волны, но одновременно сделать это нельзя. На основании этого Бор сформулировал свой принцип дополнительности: свет ведет себя, как частицы, когда измеряют его энергию (например, при фотоэлектрическом эффекте), и как волна в экспериментах на дифракцию. Принцип дополнительности, включающий в себя также принцип неопределенности Гейзенберга, лег в основу копенгагенской интерпретации квантовой механики.

В 1905 году Эйнштейн объяснил фотоэлектрический эффект, предположив, что свет состоит из частиц, выбивающих из металла электроны. Эйнштейн понял, что эти частицы света связаны с квантами энергии, описанными Планком. Но сама идея частиц света, названных впоследствии фотонами, противоречила другим наблюдаемым свойствам света, в частности интерференции, благодаря которой пучок белого цвета разлагается на пучки разных цветов, и дифракции, благодаря которой лучи света, проходящие через две щели, в некоторых участках могут гасить друг друга. Такие свойства можно объяснить, только если предположить, что свет имеет волновую природу. Это противоречие беспокоило и самого Эйнштейна до 1923 года, когда Луи де Бройль выдвинул гипотезу о том, что если свет ведет себя одновременно и как волна, и как частица, то это может быть верно и в отношении других частиц, таких как электроны. Ухватившись за эту идею, Эрвин Шрёдингер, рассматривая электроны как волны в атомах, рассчитал длину волны испускаемого ими света. В 1927 году Джордж Паджет Томсон и Клинтон Дэвиссон экспериментально показали, что узконаправленный поток электронов при прохождении через тонкую металлическую фольгу или кристалл, приводит к появлению дифракционной картины в виде концентрических кругов, и тем самым подтвердили теорию Бройля.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

ГИПОТЕЗА ПЛАНКА
О КВАНТАХ
(с. 18)

ЭЙНШТЕЙН ОБЪЯСНЯЕТ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ
ЭФФЕКТ
(с. 20)

АТОМ БОРА
(с. 24)

ВОЛНЫ ДЕ БРОЙЛЯ
(с. 30)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

ЭРВИН ШРЁДИНГЕР
(1887—1961)

Австрийский физик, основоположник квантовой механики

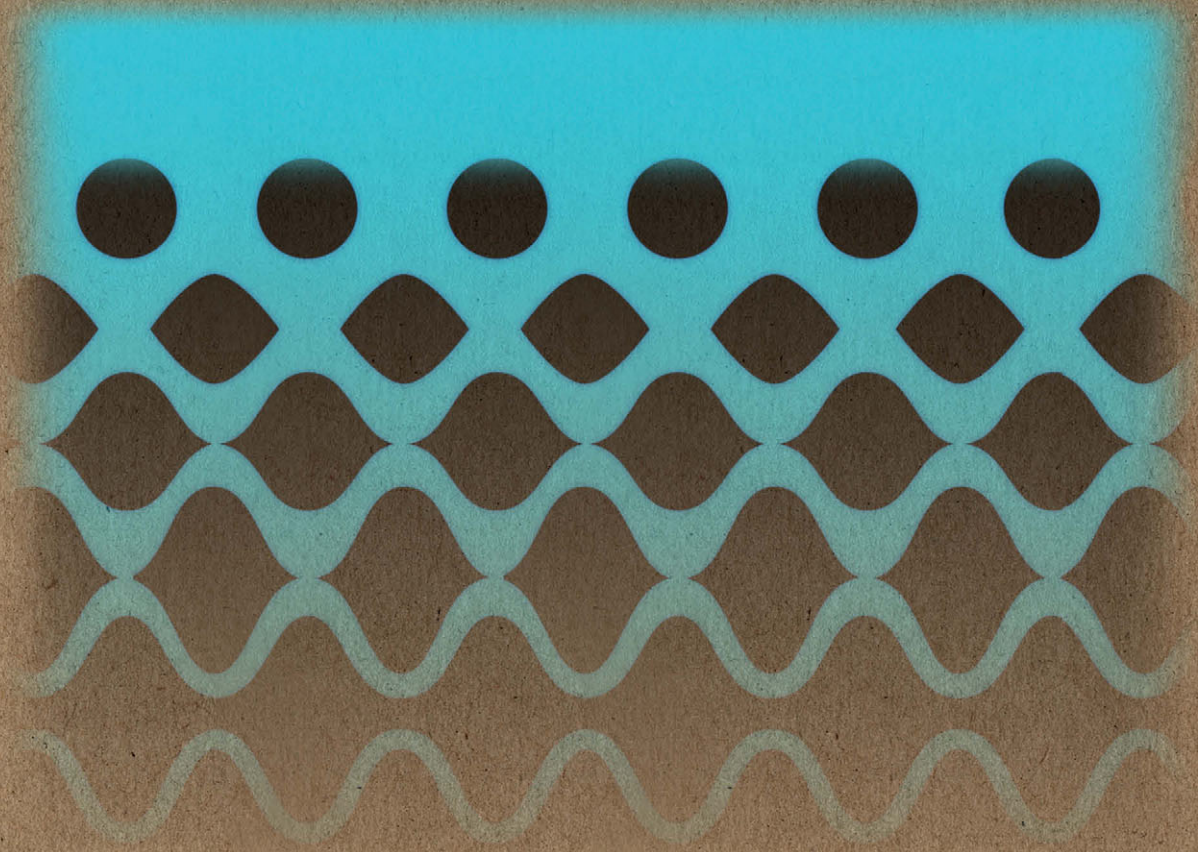
ЛУИ ДЕ БРОЙЛЬ
(1892—1987)

Французский физик, автор гипотезы о волновых свойствах частиц

АВТОР СТАТЬИ

Александр Хеллеманс

В зависимости от процесса, квантовые объекты ведут себя либо как волны, либо как частицы.



ВОЛНЫ ДЕ БРОЙЛЯ

Квантовая теория за 30 секунд

Если волны света могут вести

себя, как частицы, как это показал Эйнштейн, то могут ли частицы материи вести себя, как волны? В 1923 году Луи де Бройль решил проверить, насколько верно такое предположение, и разработал теорию волн материи. Он предположил, что если бы частицы, такие как электроны, могли вести себя, как волны, то у них бы была своя частота и длина волны, и они бы демонстрировали интерференцию и дифракцию, свойственные волнам. Исходя из этого, де Бройль вычислил, что длина волны частицы с известной массой связана с ее скоростью и что частота этой частицы пропорциональна ее энергии. Его идеи нашли подтверждение в открытии дифракции электронов в ходе независимых экспериментов Джорджа Томсона в Великобритании и Клинтона Дэвиссона и Лестера Джермера в США в 1927 году. В обоих случаях было доказано, что электроны, направляемые на твердые мишени, ведут себя как волны и показывают дифракционную картину. Дальнейшим подтверждением теории стал эксперимент с двойной щелью и интерференцией электронов. С тех пор дифракция и интерференция были подтверждены для различных молекул, некоторые из которых настолько велики, что их можно разглядеть в электронные микроскопы. Открытие волновой природы электронов ознаменовало собой новый этап в развитии квантовой физики.

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Де Бройль показал, что частицы могут вести себя как волны, подобно тому, как волны ведут себя, как частицы.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Длина волны частицы, называемая длиной волны де Бройля, обратно пропорциональна импульсу частицы. Ее можно рассчитать для атома, молекулы и, в принципе, для гораздо больших объектов, хотя из-за большой массы длина волны крупного объекта по сравнению с длиной волны элементарной частицы настолько мала, что ее невозможно наблюдать.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

ЭЙНШТЕЙН ОБЪЯСНЯЕТ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ
ЭФФЕКТ
(с. 20)

КОРПУСКУЛЯРНО-
ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ
(с. 28)

ЭКСПЕРИМЕНТ
С ДВОЙНОЙ ЩЕЛЬЮ
(с. 32)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

КЛИНТОН ДЭВИССОН
(1881—1958)

Американский физик,
открывший дифракцию
электронов в кристалле
никеля

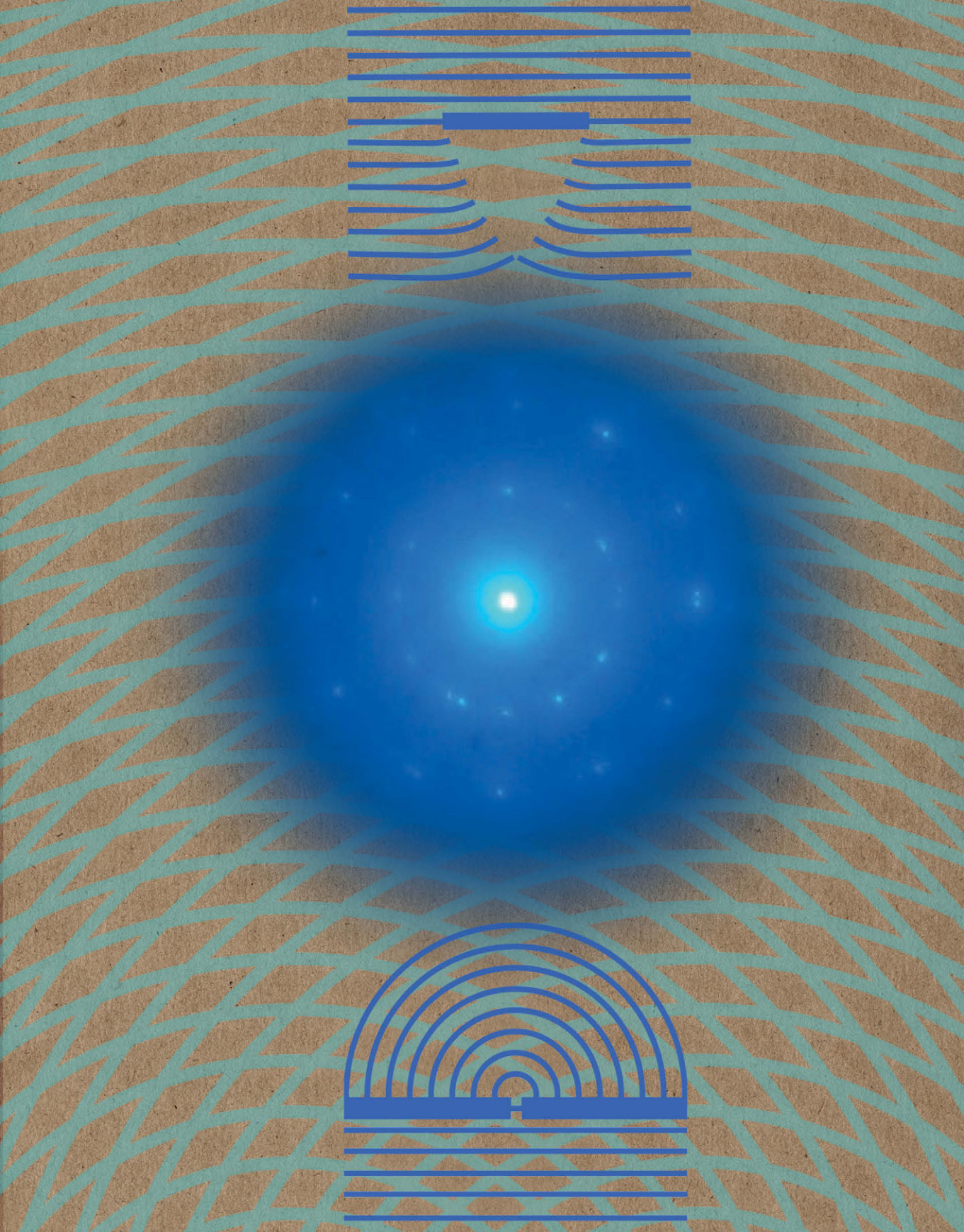
ДЖОРДЖ ПАДЖЕТ
ТОМСОН
(1892—1975)

Английский физик,
открывший дифракцию
электронов
в металлической
фольге

АВТОР СТАТЬИ

Леон Клиффорд

Картина дифракции электронов показывает, что они ведут себя, как волны, а не как обычные частицы.



ЭКСПЕРИМЕНТ С ДВОЙНОЙ ЩЕЛЬЮ

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Эксперимент с двойной щелью показывает двойную природу света, который одновременно является и волной и потоком частиц.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Если на пути света расположить детектор фотонов, чтобы экспериментатор знал, в какую из двух щелей направляется отдельный фотон, то интерференционная картина пропадает. Свет начинает вести себя, как поток частиц, а не как волна. В предложенной Уилером версии эксперимента с «отложенным выбором», решение исследовать корпускулярные или волновые свойства принимается уже после того, как фотон прошел через щель, но в итоге получаемая картина все равно зависит от того, какие его свойства изучают.

За столетие до того, как Планк

и Эйнштейн продемонстрировали, что свет испускается и поглощается в виде частиц-фотонов, Томас Юнг провел знаменитый эксперимент, доказывающий совершенно обратное. Если луч света направить на экран с двумя узкими щелями, а позади него поставить другой экран, то, казалось бы, на втором экране должны быть заметны только две узкие полоски света. Но в действительности на втором экране наблюдается рисунок из нескольких расположенных близко друг к другу полос. Обычно так себя ведут пересекающиеся друг с другом волны. Но ведь свет доходит до щелей в форме дискретных фотонов! Эксперимент с двойной щелью — очень зрелищное и убедительное доказательство двойной природы света: он распространяется, как волна, но взаимодействует с частицами, как поток частиц. То же самое верно и в отношении других частиц: подобный эксперимент с двойной щелью дает примерно ту же картину и для направленного на экран потока электронов. Даже если направлять на экран электроны по одному, то все равно возникает интерференционная картина. Получается, что один-единственный электрон ведет себя, как волна, которая может интерферировать сама с собой! Изначально это был «мысленный эксперимент», предложенный Ричардом Фейнманом, но впоследствии он был доказан на практике.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ (с. 28)

КОЛЛАПС ВОЛНОВОЙ ФУНКЦИИ (с. 50)

ОПТИЧЕСКИЕ ДЕЛИТЕЛИ ПУЧКА (с. 78)

КВАНТОВАЯ ОПТИКА (с. 132)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

ТОМАС ЮНГ
(1773—1829)

Английский ученый, основоположник различных научных теорий

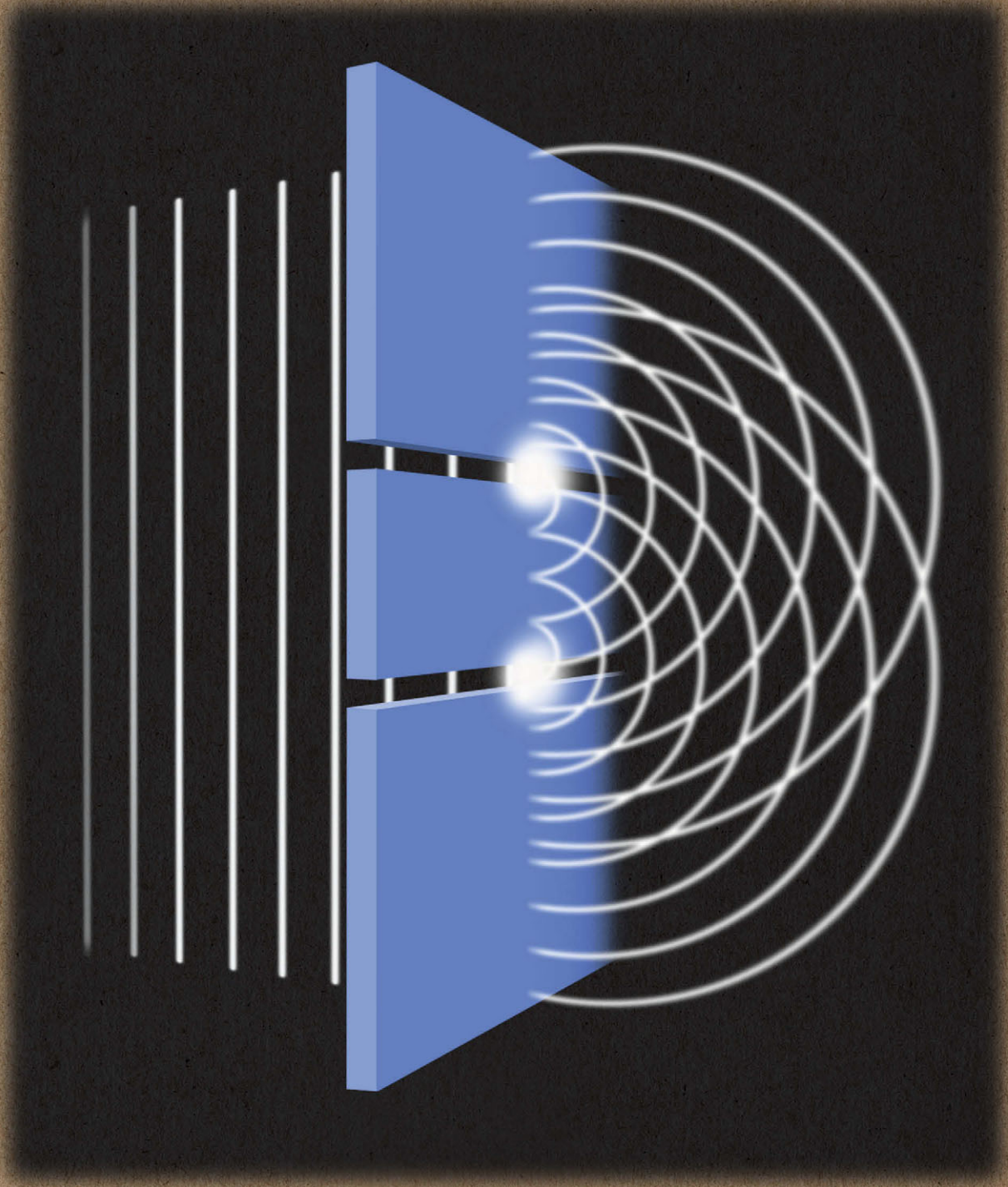
РИЧАРД ФЕЙНМАН
(1918—1988)

Американский физик, лауреат Нобелевской премии

АВТОР СТАТЬИ

Эндрю Мэй

**Эксперимент
с двумя щелями
и интерференцией
на примере
классических волн.**



ОСНОВЫ 

ОСНОВЫ ГЛОССАРИЙ

Виртуальные частицы

КЭД объясняет некоторые квантовые процессы, вводя понятие так называемых «виртуальных частиц», которые никогда не наблюдаются, но которые должны принимать участие в таких процессах. Так, например, электромагнитное взаимодействие заставляет электрон свернуть со своей траектории, и это объясняется тем, что он поглощает виртуальный фотон.

Волновая функция

В квантовой физике волновая функция — это математическая формула, описывающая квантовое состояние частицы, меняющееся со временем согласно волновому уравнению Шрёдингера. При этом распространяющаяся со временем волна описывает не саму частицу, а скорее, вероятность квантового состояния — например, вероятность нахождения частицы в конкретном месте. Такая вероятность равна квадрату значения волновой функции.

Дополнительные переменные

Принцип неопределенности Гейзенберга утверждает, что квантовые частицы обладают свойствами, которые невозможно измерить одновременно. Наиболее известный пример таких характеристик, называемых дополнительными переменными — это положение и импульс электрона или энергия и время. Чем точнее мы рассчитываем значение одной переменной, тем менее точной становится другая.

Квантовая электродинамика

Квантовая электродинамика, или КЭД, это теория взаимодействия света и материи (обычно в виде электрона). Это релятивистская квантовая теория поля, поскольку она учитывает специальную теорию относительности, исследует квантовые объекты и имеет отношение к электромагнитному полю. В качестве одной из простых конструкций, помогающих представить себе поведение частиц, используется образ быстро вращающихся часов, сопровождающих каждую частицу.

Квантовые состояния

Наборы характеристик квантовых частиц. Состояние может быть «чистым» — например, при измерении выясняется, что частица имеет спин, направленный «вверх» или «вниз» — или «смешанный», в таком случае говорят о вероятности — например, вероятность в 40% того, что спин направлен «вверх», и вероятность в 60% того, что спин направлен «вниз».

Классическая физика

Физические теории, главенствовавшие в науке до начала 1900 годов, то есть до появления теории относительности и квантовой физики. Типичный пример классической теории — законы Ньютона о движении, применимые в повседневной практике до сих пор, хотя в теории относительности есть свои законы, более точные.

Матрица

Математический объект, совокупность чисел в строках и столбцах, часто расположенных в прямоугольнике, хотя матрицы могут иметь любое количество измерений. Матрицы используются для вычисления нескольких уравнений одновременно.

Нерелятивистские уравнения

Уравнения, не учитывающие принцип относительности («релятивизма»). Примером нерелятивистского уравнения является второй закон Ньютона (сила = масса \times ускорение). Для скоростей, гораздо меньших, чем скорость света, такое уравнение вполне корректно, но по мере увеличения скорости становятся более заметными релятивистские эффекты, и масса объекта с увеличением скорости увеличивается.

Пространство-время (пространственно-временной континуум)

В теории относительности время воспринимается, как четвертое измерение. При этом никакого абсолютного времени, как и абсолютных точек в пространстве нет, потому что движение объектов влияет на их положение во времени.

Суперпозиция

Когда квантовая частица может находиться, скажем, в двух вероятных состояниях, говорят о том, что она не находится в каком-то конкретном состоянии, а находится в состоянии суперпозиции. При измерении ее свойств

состояние принимает какую-то конкретную форму, и говорят о том, что суперпозиция «коллапсирует» в конкретное состояние.

Угловой момент, или импульс

Импульс в физике — это мера движения тела, произведение его массы на скорость. Угловой момент — это импульс вращающегося тела, и его величина зависит не только от массы и скорости, но и от расстояния до оси вращения.

Черное тело

Гипотетический объект, поглощающий весь падающий на него свет (электромагнитное излучение) любой частоты и направления. При постоянной температуре спектр излучаемого черным телом света (спектр излучения) зависит исключительно от температуры, а не от его состава.

Ускорители частиц

Основной инструмент современной физики. Ускорители разгоняют заряженные элементарные частицы до скоростей, близких к скорости света, а затем сталкивают их между собой или с другими объектами. В результате столкновения рождаются новые частицы. На сегодняшний день самый большой из подобных механизмов — это Большой адронный коллайдер (БАК), построенный на границе Швейцарии и Франции. БАК представляет собой кольцевой туннель длиной в 27 км, в котором в противоположных направлениях разгоняются, а после сталкиваются между собой пучки протонов.

КВАНТОВЫЙ СПИН

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Именно благодаря спину действуют магниты, а ученые могут отличать частицы друг от друга.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Свойство, называемое «спином», получило такое название, потому что имеет некоторое сходство с классическим угловым моментом, но ничто нам не говорит о том, что оно имеет отношение именно к вращению частиц вокруг своей оси (что трудно представить для таких точечных частиц, как электрон), тем более, что спин может принимать полуцелые значения и быть при этом направленным «вверх» или «вниз».

Квантовый спин (от англ. *spin* — «вертеться, вращаться») — это причина магнетизма в повседневном мире. Под спином подразумевается присущая элементарным частицам характеристика, один из ключевых параметров, необходимых для описания частицы, и одно из ее четырех свойств, необходимых для определения квантового состояния электрона в атоме. Спин, как и всё в квантовом мире, может принимать строго определенные и дискретные значения; у каждой частицы всегда имеется значение спина, выражаемое спиновым числом. Спиновое число есть у всех субатомных частиц, хотя у некоторых оно равно нулю. Спин связан с угловым моментом частицы, то есть с физическим свойством вращающихся объектов, и влияет на измерение угловых моментов в атомах. Эффекты спина впервые были замечены в отношении электронов. Электроны, обращаясь вокруг ядер атомов, придают угловой момент этим атомам. Явление спина открыли немецкие физики Отто Штерн и Вальтер Герлах в 1922 году, в ходе экспериментов, результаты которых указывали на то, что электроны в атомах также обладают собственным угловым моментом вдобавок к тому, что образуется в результате их орбитального движения. В упрощенном виде это можно представить, как вращение электрона вокруг собственной оси в дополнение к вращению вокруг атомного ядра.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

ПРИНЦИП ПАУЛИ
(с. 58)

УРАВНЕНИЕ ДИРАКА
(с. 60)

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ
ПОЛЯ
(с. 64)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

ВОЛЬФГАНГ ПАУЛИ
(1900–1958)

Австрийский физик, основоположник теории квантового спина

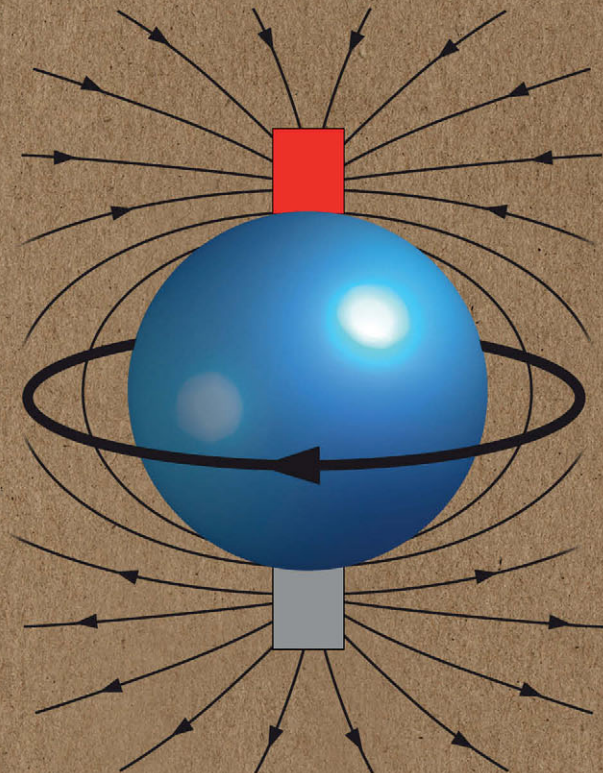
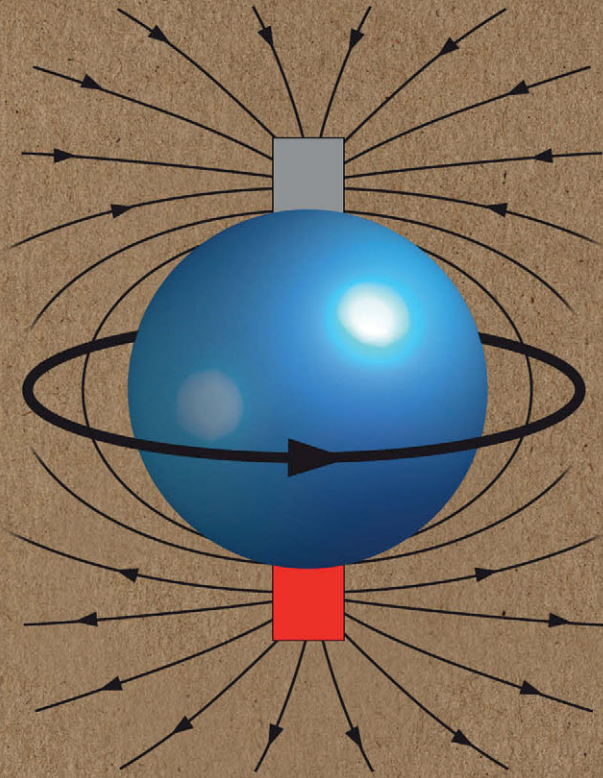
ДЖОРДЖ УЛЕНБЕК
И СЭМЮЭЛ ГАУДСМИТ
(1900–1988, 1902–1978)

Нидерландские физики, авторы первой научной работы о спине электрона

АВТОР СТАТЬИ

Леон Клиффорд

**Направление
спина частицы
определяет
ее магнитную
ориентацию.**



МАТРИЧНАЯ МЕХАНИКА

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Принцип, лежащий в основе матричной механики, помог Гейзенбергу привести в квантовую механику идею неопределенности.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Матрицы Гейзенберга предложили физикам новую и необычную модель описания квантовых состояний, не имеющую аналогов в наблюдаемом нами мире. Но этот метод противоречил более традиционному методу дифференциальных уравнений, которого, помимо прочих, придерживался и Шрёдингер. В каком-то смысле, это стало очередным проявлением корпускулярно-волнового дуализма: дифференциальные уравнения можно соотнести с протяженными в пространстве волнами, тогда как матрицы кажутся более дискретными, похожими на частицы. В 1930 году оба эти метода объединил Дирак.

Матричная механика — это способ описания квантовых систем при помощи математического метода, известного под названием «матричная алгебра». Этот способ разработали в 1925 году немецкие физики Вернер Гейзенберг, Макс Борн и Паскуаль Йордан, занимавшиеся анализом спектральных линий атомов. Ему противостоит метод Эрвина Шрёдингера, который описывал квантовые системы при помощи дифференциальных уравнений. Особенность матричной механики состоит в том, что порядок, в котором проводятся вычисления, влияет на результат. В обычной математике, например, произведение двух чисел одно и то же, независимо от их порядка: $2 \times 3 = 3 \times 2$. Но в матричных вычислениях это не так. Если положение частицы задано одной матрицей, а импульс той же частицы задан другой, то произведение этих двух матриц будет разным, в зависимости от того, в каком порядке их умножали. Получается, что произведение матрицы положения на матрицу импульса не равно произведению матрицы импульса на матрицу положения. Разница между этими результатами и привела к формулировке принципа неопределенности Гейзенберга.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

УРАВНЕНИЕ
ШРЁДИНГЕРА
(с. 42)

ПРИНЦИП
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ
ГЕЙЗЕНБЕРГА
(с. 48)

КОЛЛАПС ВОЛНОВОЙ
ФУНКЦИИ
(с. 50)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

МАКС БОРН
И ПАСКУАЛЬ ЙОРДАН
(1882—1970, 1902—1980)

Немецкие физики,
развившие метод
матричной механики

ВЕРНЕР ГЕЙЗЕНБЕРГ
(1901—1976)

Немецкий
основоположник
квантовой механики

АВТОР СТАТЬИ

Леон Клиффорд

**Матричная
механика
Гейзенберга
использует метод
матриц для описания
квантовых явлений.**

$$q = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & \dots \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & \dots \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}; \quad p = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & \dots \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \dots \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$



УРАВНЕНИЕ ШРЁДИНГЕРА

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Уравнение Шрёдингера позволяет рассчитать поведение квантовых частиц как «волн вероятности», то есть предсказать их местонахождение в пространстве.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Уравнение Шрёдингера — не единственный математический метод представления квантовой теории. В 1920-х годах, когда Шрёдингер разрабатывал свой метод, другой ученый, Вернер Гейзенберг, разработал метод описания квантового состояния в виде математических матриц. Матричная механика используется и до сих пор, но предпочтение отдается волнам Шрёдингера, отчасти потому, что они позволяют более интуитивно представить «картину» квантовых состояний.

В 1924 году де Бройль предположил, что такие частицы, как электроны, могут вести себя, как волны, и исходя из этого Эрвин Шрёдингер разработал математический механизм описания квантовых состояний, в котором координаты и поведение частицы вычисляются как волновая функция Ψ («пси»). Это волна, но не в том смысле, в каком мы воспринимаем обычные звуковые волны. Волновая функция — это, скорее, вероятность: значение этой функции (точнее, квадрат значения волновой функции Ψ^2) считается вероятностью нахождения частицы в той или иной точке пространства. В математике волны описываются дифференциальными уравнениями, которые показывают, насколько размер колебаний меняется со временем. Но уравнение Шрёдингера не похоже на обычные волновые уравнения; в нем больше сходства с уравнением, описывающим диффузию или концентрацию вещества в зависимости от координат и времени. В принципе, оно позволяет вычислить волновую функцию любой квантовой системы и, как следствие, вероятность ее координат, при условии, что известны масса и энергия. На практике вычислять эту функцию бывает очень сложно и приходится довольствоваться лишь приблизительными значениями. Тем не менее уравнение Шрёдингера стало отправной точкой для изучения поведения электронов в атомах, молекулах и в разных материалах.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ (с. 28)

ВОЛНЫ ДЕ БРОЙЛЯ (с. 30)

МАТРИЦНАЯ МЕХАНИКА (с. 40)

3-СЕКУНДНАЯ БИОГРАФИЯ

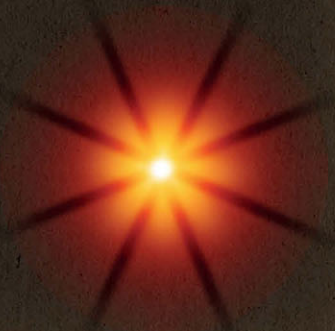
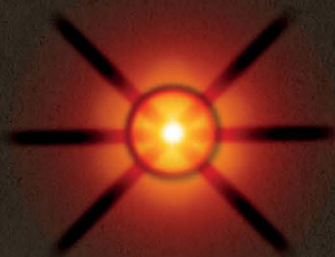
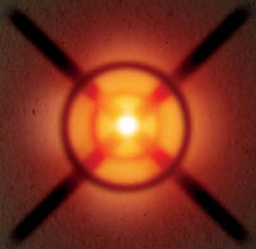
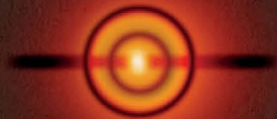
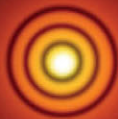
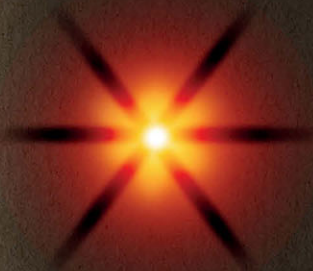
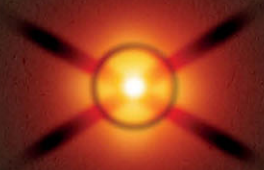
ЭРВИН ШРЁДИНГЕР (1887—1961)

Австрийский физик, занимавшийся квантовой физикой и космологией

АВТОР СТАТЬИ

Филип Болл

С помощью волновой функции можно определить местонахождение электрона на разных орбитах атома водорода.



12 августа 1887 года

Родился в Вене, Австрия

1910

Получил степень доктора в Венском университете

1914—1918

Во время Первой мировой войны служил в австрийской армии офицером-артиллеристом

1921

Назначен профессором теоретической физики Цюрихского университета

1926

Уравнение Шрёдингера ложится в основу волновой механики

1927

Становится профессором Берлинского университета, сменив Макса Планка

1933

Добровольно покидает нацистскую Германию и переезжает в Оксфорд; в этом же году получает Нобелевскую премию по физике совместно с англичанином Полем Дираком

1935

Выходит работа «О текущем состоянии квантовой механики», в которой описан парадокс кота

1939

Назначен директором Отделения теоретической физики Дублинского института высших исследований

1944

В издательстве Кембриджского университета выходит книга «Что такое жизнь?»

1956

Оставляет пост в Дублине и возвращается в Вену

4 января 1961 года

Умирает в Вене



ЭРВИН ШРЁДИНГЕР

Эрвин Шрёдингер, родившийся и выросший в Вене, с ранних лет проявлял интерес к науке, особенно к физике. В начале 1920-х, когда Шрёдингер занял свой первый пост профессора в Цюрихе, он уже был убежденным сторонником идеи о волновой природе материи. Эти убеждения нашли отражение в теории волновой механики — полной и самодостаточной формулировке квантовой физики, которая считается его величайшим достижением.

Волновое уравнение Шрёдингера для квантовой физики значит то же, что для классической физики — законы Ньютона. Практическую и прогностическую ценность уравнения Шрёдингера немедленно признали его коллеги-физики, но, к сожалению, почти никто из них не разделял его энтузиазма по поводу волн. Сам же Шрёдингер преобладавшую в то время копенгагенскую интерпретацию, во главе которой стоял Нильс Бор, с ее разговорами о «корпускулярно-волновом дуализме» и «коллапсе волновой функции» считал «псевдонаучной белибердой». Получив поддержку от Эйнштейна, одного из немногих, кто тогда разделял его взгляды, Шрёдингер описал мысленный эксперимент, который должен был доказать абсурдность копенгагенской интерпретации. Так появился «кот Шрёдингера» — пожалуй, самый известный образ, связанный с квантовой теорией.

Ещё до начала Второй мировой войны Шрёдингеру удалось уехать из беспокойной континентальной Европы в нейтральную Ирландию. Его бабушка по матери была англичанкой, и по-английски он говорил почти так же свободно, как по-немецки. Он приехал в Ирландию по личному приглашению Имона де Валера, премьер-министра Ирландии, и был назначен директором Отдела теоретической физики только что созданного Дублинского института высших исследований — в этой должности он проработал 17 лет. Позже он описывал дублинский период своей жизни, как самый счастливый. Самой известной работой Шрёдингера того периода стала книга «Что такое жизнь?», в которой он демонстрировал, как положения квантовой теории и другие концепции фундаментальной физики можно применить к живым организмам. Когда несколько лет спустя Фрэнсис Крик и Джеймс Уотсон раскрыли структуру ДНК, оба они признавали, что многим обязаны книге Шрёдингера.

На фоне остальных своих коллег Шрёдингер отличался и необычным образом жизни. Он писал стихи, интересовался философией и восточным мистицизмом; у него были любовницы и за сорок лет совместного проживания с женой Энни у него родились три внебрачных ребенка. Похоже, Энни смирялась с периодическим непостоянством мужа и оставалась рядом с ним вплоть до его смерти в Вене в 1961 году.

Эндрю Мэй

КОТ ШРЁДИНГЕРА

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Эксперимент с котом показывает, насколько неочевидны и непонятны положения квантовой теории: квантовая система, которая может одновременно находиться в двух состояниях, определяет жив кот или мертв.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Можно ли экспериментально проверить, жив кот Шрёдингера или нет? Поддерживать квантовую суперпозицию в большой системе, которая может вместить в себя кота, практически невозможно, но изолировать от внешних возмущений микроскопического кота — бактерию или вирус — уже легче. Исследователи из Германии предложили провести эксперимент, в котором в состоянии квантовой суперпозиции можно привести вирус, захваченный лазерным лучом.

Наиболее известная иллюстрация

того, к каким парадоксам приводят попытки понять реальность, лежащую в основе квантовых теорий, была предложена в 1935 году Эрвином Шрёдингером. Он исходил из того, что допускается возможность каким-то образом связать состояние макроскопического объекта — допустим, кота в ящике, живого или мертвого — с состоянием микроскопического квантового явления, такого как распад атома. Допустим, имеется устройство, которое вследствие распада — случайного квантового события — приводит в действие молот, который разбивает колбу с ядом, убивающим кота. Проблема в том, что распадающийся атом может находиться в суперпозиции, то есть в смешении двух состояний, и, таким образом, кот может быть одновременно живым и мертвым. Квантовые суперпозиции обычно устраняются посредством измерения квантового объекта, поэтому, как только мы откроем крышку ящика, мы увидим, что кот находится либо в одном состоянии, либо в другом. Но это ничего не говорит нам о состоянии кота до того, как мы подняли крышку. Некоторые ученые считают, что должно произойти нечто, благодаря чему состояние кота будет определено вне зависимости от того, наблюдаем мы за ним или нет. Другие довольствуются тем, что признают для кота суперпозицию «живой-мертвый».

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

УРАВНЕНИЕ
ШРЁДИНГЕРА
(с. 42)

КОЛЛАПС ВОЛНОВОЙ
ФУНКЦИИ
(с. 50)

ДЕКОГЕРЕНЦИЯ
(с. 52)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

ЮДЖИН ВИГНЕР
(1902–1995)

Венгерский физик, связавший парадокс кота Шрёдингера с проблемой сознания

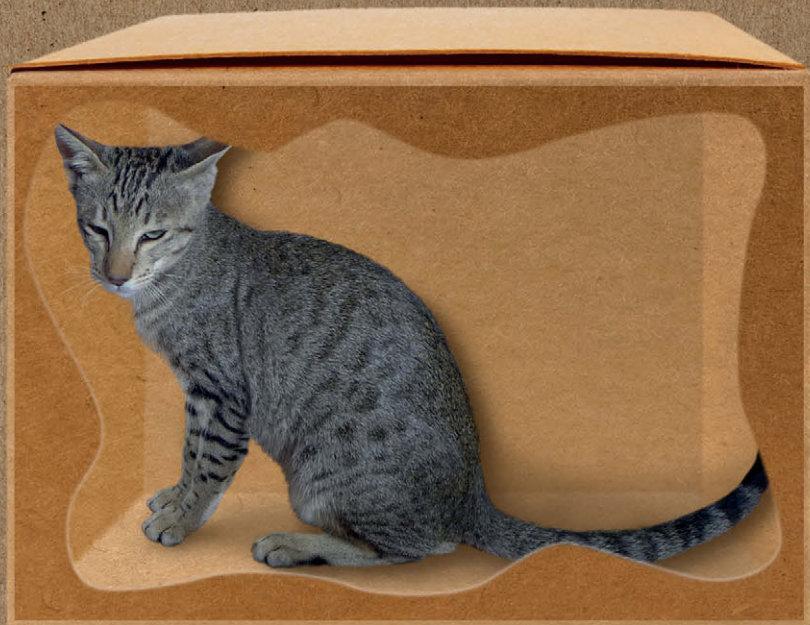
ХУАН ИГНАСИО СИРАК
(1965)

Испанский физик, предложивший провести эксперимент с котом Шрёдингера на микроскопических организмах

АВТОР СТАТЬИ

Филип Болл

До наблюдения кот Шрёдингера находится в суперпозиции «живой-мертвый».



ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ГЕЙЗЕНБЕРГА

Квантовая теория за 30 секунд

В 1927 году немецкий физик-теоретик Вернер Гейзенберг сформулировал принцип неопределенности — фундаментальное свойство квантовых систем. Согласно этому принципу, невозможно одновременно измерить с большой точностью некоторые парные свойства атома или частиц — например, одновременно рассчитать их координаты и импульс или точно измерить их энергию в определенный момент времени. Чем выше точность измерения одного свойства, тем ниже точность другого. Эффект этого явления настолько мал, что в повседневной практике им можно пренебречь, но в микроскопическом мире он настолько значителен, что на нем основана вся квантовая механика, описывающая движение и взаимодействие субатомных частиц. Принцип неопределенности естественным образом ограничивает наши наблюдения над квантовыми явлениями; это не недостаток измерительных приборов, это фундаментальное свойство квантовой теории. Одним из следствий этого является тот факт, что общая энергия частицы в течение недолгого времени t может отклоняться на некоторую величину E , при условии, что произведение Et не больше результата деления постоянной Планка на 4π . Это, в свою очередь, означает, что закон сохранения энергии на очень краткий период времени можно обойти.

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Частицы ведут себя, как политики: чем сильнее вы пытаетесь припереть их к стене, тем быстрее они меняют свою позицию.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Из-за принципа неопределенности приходится сооружать такие огромные ускорители частиц, как Большой адронный коллайдер. Чтобы исследовать поведение частиц на расстояниях, в тысячу раз меньших, чем размер протона, требуются придать пучкам энергию, в триллионы раз превышающую их энергию при комнатной температуре. Для разгона частиц и строят такие большие сооружения.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

УРАВНЕНИЕ
ШРЁДИНГЕРА
(с. 42)

УРАВНЕНИЕ ДИРАКА
(с. 60)

ДИАГРАММЫ
ФЕЙНМАНА
(с. 70)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

ЭРВИН ШРЁДИНГЕР
(1887—1961)

Австрийский физик

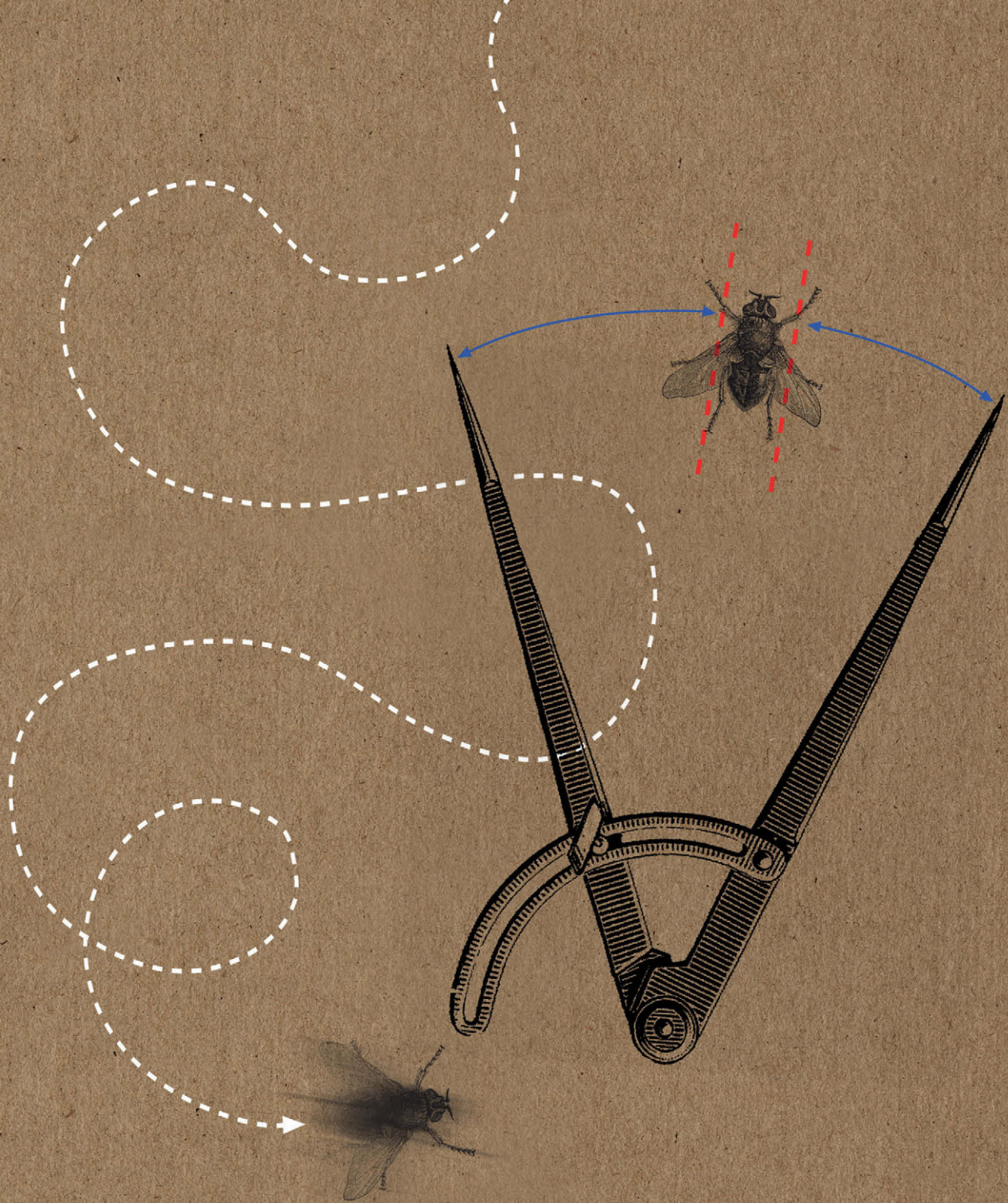
ВЕРНЕР ГЕЙЗЕНБЕРГ
(1901—1976)

Немецкий физик,
сформулировавший
принцип
неопределенности

АВТОР СТАТЬИ

Фрэнк Клоуз

Чем точнее мы определяем положение квантовой частицы в пространстве, тем меньше мы знаем о ее импульсе (и наоборот).



КОЛЛАПС ВОЛНОВОЙ ФУНКЦИИ

Квантовая теория
за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Коллапс волновой функции устраняет суперпозицию и сводит состояние квантовой системы до конкретного.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Другую интерпретацию коллапса волновой функции предложил американский физик Дэвид Бом, основываясь на теории «волны-пилота» де Бройля, согласно которой квантовые частицы сопровождаются и направляются волнами. Предполагается, что существует единая волновая функция, регулирующая всю Вселенную; на самом деле она не коллапсирует, а просто создает видимость коллапса на локальном уровне из-за декогерентности между волновой функцией в локальном масштабе и в масштабе всей остальной Вселенной.

Уравнение Шрёдингера, охва-

тывающее всё, что мы можем знать о данной квантовой системе в форме волновой функции, может только предсказывать вероятность ее нахождения в определенном состоянии, тогда как измерение дает нам четкий ответ на то, в каком именно состоянии находится эта квантовая система. Похоже, что сам акт измерения отсекает все другие вероятности. Это и называется коллапсом волновой функции. Каким образом происходит такой коллапс, зависит от того, как происходит измерение. В связи с этим возникла большая философская проблема, ставшая своего рода камнем преткновения для ученых, занимавшихся квантовой физикой на заре ее становления. Предполагается, что наука описывает изучаемые явления объективно, но в данном случае результат наблюдения зависит от самого факта наблюдения. В этом и заключается так называемая «проблема измерения». Так что же такое коллапс волновой функции — математическая формальность, или за ней стоит какая-то реальность? Общепринятая «копенгагенская интерпретация» квантовой теории настаивает на том, что состояние системы не известно, пока не осуществлено наблюдение за ней. Некоторые считают, что коллапс волновой функции — это иллюзия, а разные вероятные исходы реализуются в разных мирах. Другие называют коллапс волновой функции процессом, на который может влиять сила гравитации.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

УРАВНЕНИЕ
ШРЁДИНГЕРА
(с. 42)

КОТ ШРЁДИНГЕРА
(с. 46)

ДЕКОГЕРЕНЦИЯ
(с. 52)

КОЛЛАПС СОЗНАНИЯ
(с. 90)

3-СЕКУНДНАЯ БИОГРАФИЯ

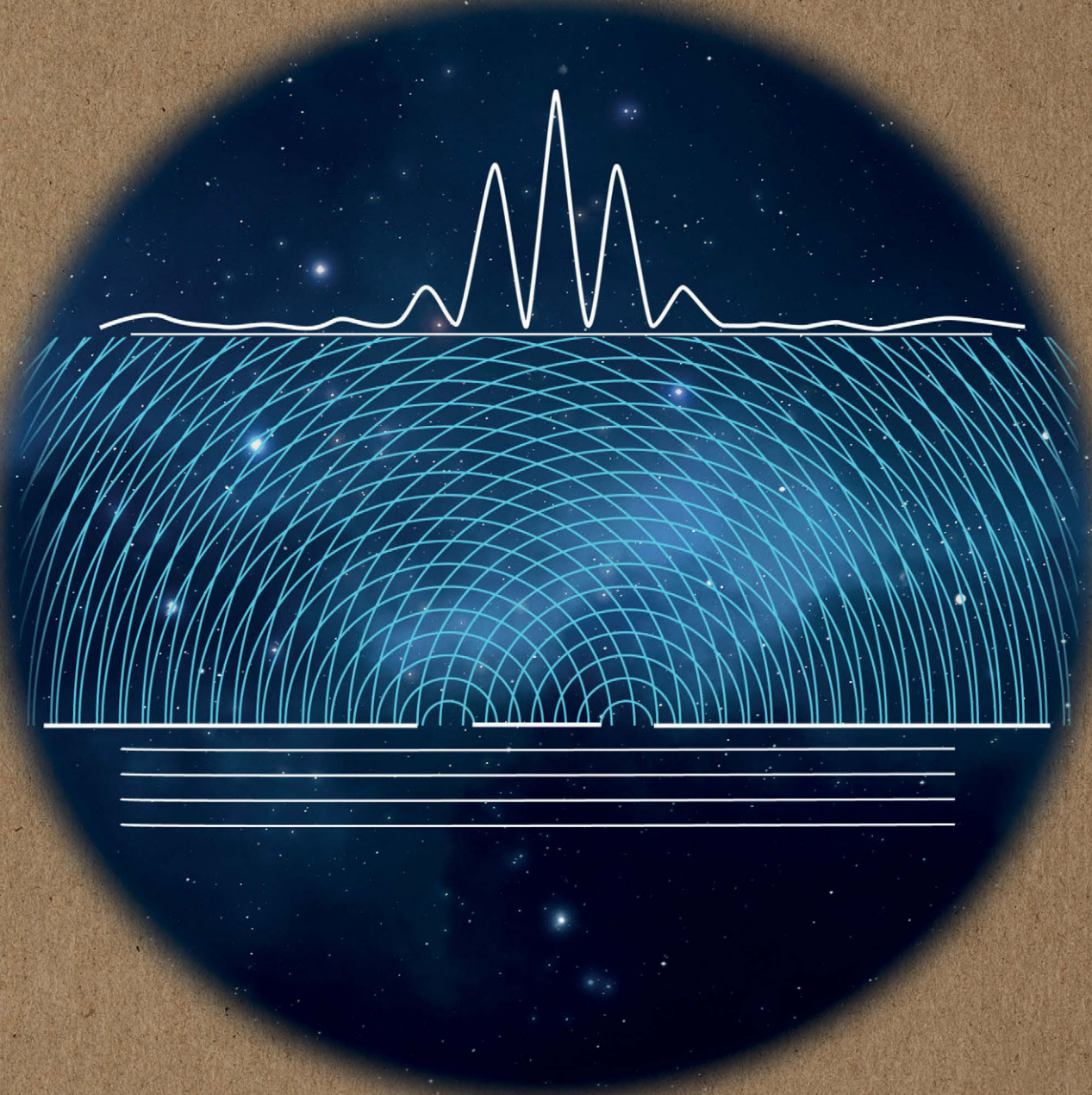
РОДЖЕР ПЕНРОУЗ
(1931)

Английский физик

АВТОР СТАТЬИ

Филип Болл

В квантовых системах частицы существуют в виде вероятностной волны, из-за чего происходят интерференция и другие явления.



ДЕКОГЕРЕНЦИЯ

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Декогеренция — это утрата системой квантовых свойств из-за взаимодействия ее частиц с окружением.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Насколько большими могут быть квантовые системы, прежде чем проявится эффект декогеренции и система начнет вести себя согласно правилам классической физики? Волновые свойства, вроде интерференции, демонстрируют некоторые довольно большие молекулы, как молекула C₆₀ из шестидесяти атомов углерода, но при ее прохождении через газ эти свойства исчезают. Предполагается, что вскоре можно будет наблюдать квантовые суперпозиции вибрирующих состояний в крохотных осциллирующих пучках, видимых в электронный микроскоп.

Микроскопическим миром управляют правила квантовой физики, но к повседневному миру бильярдных шаров и чайников применимы правила классической физики. На каком этапе квантовая физика превращается в классическую? Где пролегает граница между квантовой и классической реальностью? Согласно распространенному мнению, квантовые эффекты «устраняются» благодаря взаимодействию между квантовыми частицами и окружением. Такое явление называется декогеренцией. Это взаимодействие означает, что частица и ее окружение становятся «сцепленными», иными словами, свойства частицы уже не являются ее собственными свойствами, а зависят от окружения. Чтобы в системе проявились квантовые эффекты, нужно устранить декогеренцию и изолировать эту систему от возможного влияния со стороны окружения. Вот почему такие явления вроде суперпозиции обычно наблюдаются только в лабораторных экспериментах: чистоту эксперимента легко нарушает декогеренция. Декогеренция — необратимое явление, как только она наступила, обратного пути нет. Скорость декогеренции, то есть скорость, с которой исчезают квантовые суперпозиции, увеличивается экспоненциально с увеличением частиц в системе, поэтому большие объекты практически мгновенно начинают вести себя согласно правилам классической физики.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

КОТ ШРЁДИНГЕРА
(с. 46)

КОЛЛАПС ВОЛНОВОЙ
ФУНКЦИИ
(с. 50)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

ХАЙНЦ-ДИТЕР ЦЕ
(1932)

Немецкий физик, в 1970 г. установивший причину декогеренции

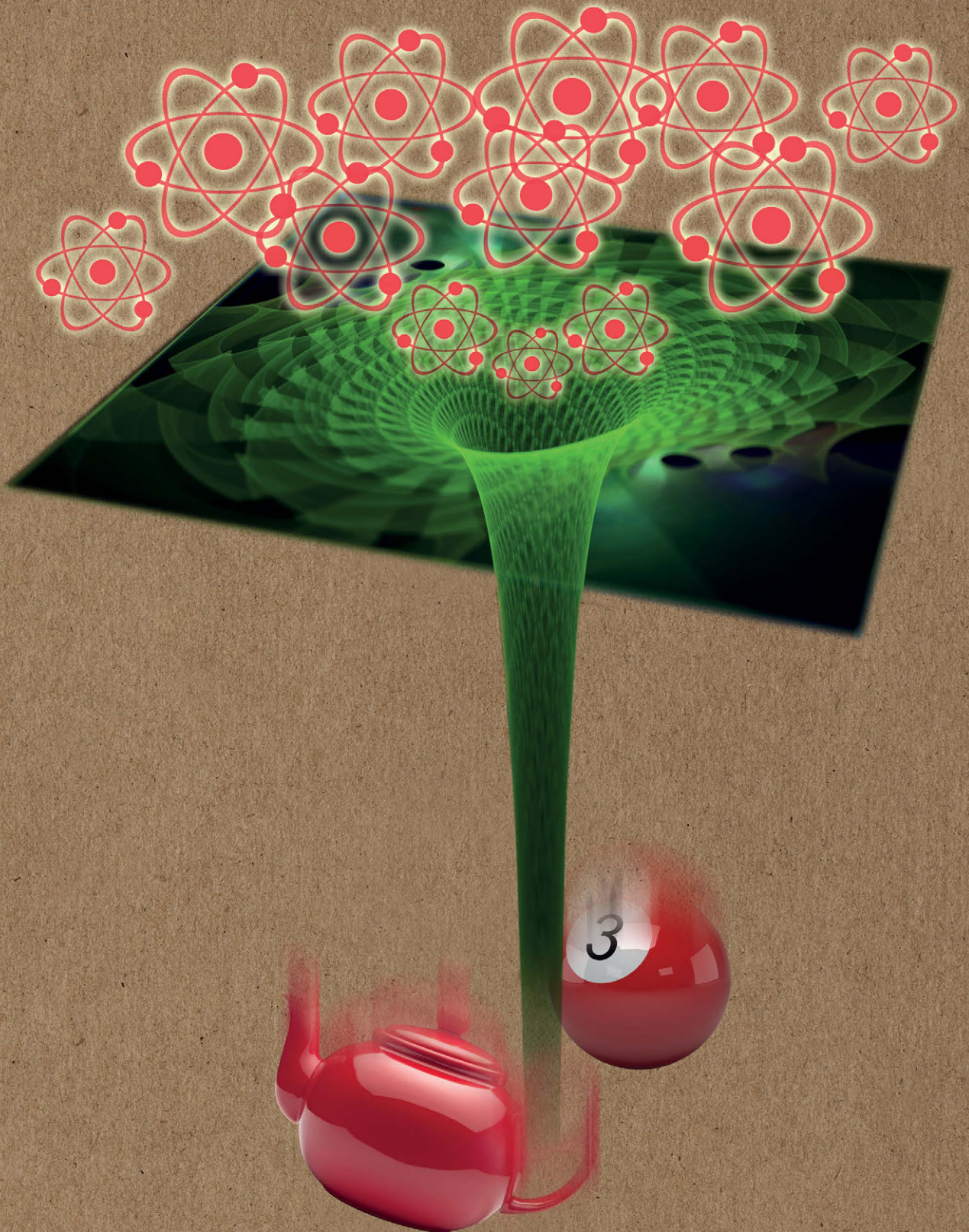
ВОЙЦЕХ ЗУРЕК
(1951)

Американский физик, объяснивший, как декогеренция «выбирает» некоторые классические свойства

АВТОР СТАТЬИ

Филип Болл

**Квантовые частицы
находятся
в суперпозиции, но
из-за декогеренции
повседневные
объекты остаются
в классических
состояниях.**



ФИЗИКА СВЕТА И МАТЕРИИ



ФИЗИКА СВЕТА И МАТЕРИИ

ГЛОССАРИЙ

Антивещество

Английский физик Поль Дирак высказал предположение, что должна существовать частица, аналогичная электрону, но с положительным зарядом; позже такую частицу действительно обнаружили и назвали позитроном. Это был первый пример «антивещества» — позже аналоги «античастиц» были найдены для всех элементарных частиц.

Бозоны

Частицы, подчиняющиеся статистике Бозе — Эйнштейна (в отличие от фермионов). Типичные бозоны — это частицы, осуществляющие взаимодействие, такие как протоны и прославленный бозон Хиггса, но этим же термином обозначают и атомные ядра с четным количеством частиц.

Волновая механика

Одно из первых формульных выражений квантовой теории, предложенное Шрёдингером, в котором частицы трактуются, как «волны материи». Волновую функцию, описанную в уравнении Шрёдингера, Макс Борн интерпретировал, скорее, не как показатель нахождения, а как вероятность нахождения в пространстве.

Квантовые числа

Показатели квантового состояния частицы, принимающие только целые или полуцелые значения. Электрон в атоме описывается четырьмя квантовыми числами, соответствующими энергетическому

уровню, угловому моменту, магнитному моменту и спину.

Матричная механика

Одно из первых формульных выражений квантовой теории, предложенное Гейзенбергом, который не ставил себе целью показать наглядно происходящие процессы, но просто старался найти формулы, показывающие взаимоотношения меняющихся физических величин.

Нейтронные звезды

Результат сжатия старой звезды, масса которой превышает массу Солнца в 1,4–3,2 раза. Нейтронная звезда состоит из плотно сжатых нейтронов и потому обладает огромной плотностью. Кусочек нейтронной звезды размером с виноградину весил бы примерно 100 миллионов тонн.

Нейтроны

Частицы, не имеющие электрического заряда, состоящие из трех кварков и входящие в состав атомного ядра. У отдельного химического элемента может быть несколько изотопов в зависимости от количества нейтронов в его ядре.

Обращенные во времени волны

Уравнения Максвелла, описывающие электромагнитное поле, имеют два решения и допускают как существование волн, идущих от передатчика к приемнику (запаздывающие волны), так и от приемника к передатчику (опережающие волны).

Традиционно ученые игнорировали опережающие волны, но они полезны при решении математических проблем, связанных с отскакиванием электрона при испускании фотона.

Позитроны

Античастицы электронов, имеющие положительный заряд.

Поля (квантовые поля)

Поле — это математическая конструкция, в которой каждой точке пространства-времени соответствует некое значение. В качестве аналогии можно привести трехмерную карту Земли, в которой каждой точке местности соответствует своя высота. Квантовое поле обладает теми же свойствами, что и квантовые объекты, то есть оно может находиться в суперпозиции, и для его описания требуется более сложная математическая модель, чем для описания классических полей.

Постоянная тонкой структуры

Одна из фундаментальных постоянных физики, имеющая значение примерно $1/137$. Постоянная тонкой структуры отражает силу электромагнитного взаимодействия и контролирует связь электронов с атомами и молекулами.

Пространство-время (пространственно-временной континуум)

В теории относительности время воспринимается, как четвертое измерение.

Отсюда и потребность воспринимать пространство и время, как нечто единое.

Расходящиеся ряды

Числовые последовательности, сумма которых бесконечна. Примером расходящегося ряда является последовательность $1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + 1/5 \dots$ (где «...» означает продолжение серии до бесконечности). В противоположность им сумма сходящихся рядов стремится к конечному числу. Сумма ряда $1 + 1/2 + 1/4 + 1/8 \dots$ равна 2, даже если сам ряд включает бесконечное количество членов, потому что каждый последующий член приближает ее к 2, и она никогда не превысит это число.

Фермионы

Один из двух главных типов элементарных частиц (другой тип — бозоны). К фермионам принадлежат частицы вещества (электроны, кварки, протоны и нейтроны) и нейтрино. Фермионы подчиняются статистике Ферми-Дирака и принципу Паули (см. стр. 58), согласно которому два и более фермиона не могут находиться в тождественном состоянии.

Электронные оболочки

Электроны могут занимать только строго определенные орбиты вокруг ядра атома; переход с одной орбиты на другую обычно сопровождается поглощением или выделением фотона — это квантование электрона. Возможные уровни, на которых могут располагаться электроны, часто называются оболочками, особенно в химии.

ПРИНЦИП ПАУЛИ

Квантовая теория за 30 секунд

В 1913 году Нильс Бор объяснил, как атомы испускают или поглощают фотоны определенной длины волны, когда электроны, обращающиеся вокруг ядра, перескакивают на другую орбиту из числа строго фиксированных. Этим орбитам назначен номер в виде целого квантового числа (1, 2, 3...), называемого главным квантовым числом. Эта модель верна для водорода, простейшего элемента, но в случае с более сложными атомами модель не принимает во внимание дополнительные длины волн, отображаемые в спектре этих атомов. В 1915 году немецкий физик Арнольд Зоммерфельд предположил, что за характер распределения этих линий отвечает некое число, которое позже назвали постоянной тонкой структуры. В магнитном поле электроны также ведут себя, как крошечные магниты, а кроме этого имеют спин, поэтому физики добавили третье и четвертое квантовые числа. Этими четырьмя квантовыми числами определяется энергия каждого электрона. В том же году Вольфганг Паули выяснил, что электроны, обладающие одинаковым набором квантовых чисел, не могут обращаться по одной и той же орбите атома. Этот принцип, называемый также «принципом запрета», объясняет, почему электроны распределяются по нескольким оболочкам, даже когда атом находится в самом низком энергетическом состоянии; от такого распределения зависят и химические свойства элемента.

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Принцип Паули объясняет, почему электроны в атомах всегда занимают несколько орбит, а не просто самый низкий энергетический уровень.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Поскольку электроны распределены по нескольким оболочкам вокруг атомного ядра, а не просто занимают ближайшую, атомы имеют свой минимальный размер, и их нельзя сжать вместе. Это объясняет, почему обычная материя занимает определенное место в пространстве и стабильна. Нейтроны, как и электроны, являются фермионами и имеют полуцелый спин. Поскольку принципу Паули подчиняются все фермионы, нейтроны в нейтронной звезде не сливаются, и звезда не сжимается дальше под действием силы притяжения такой огромной массы.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

АТОМ БОРА
(с. 24)

КОПЕНГАГЕНСКАЯ
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ
(с. 84)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

НИЛЬС БОР
(1885—1962)

Датский ученый, предложивший научно обоснованную модель атома

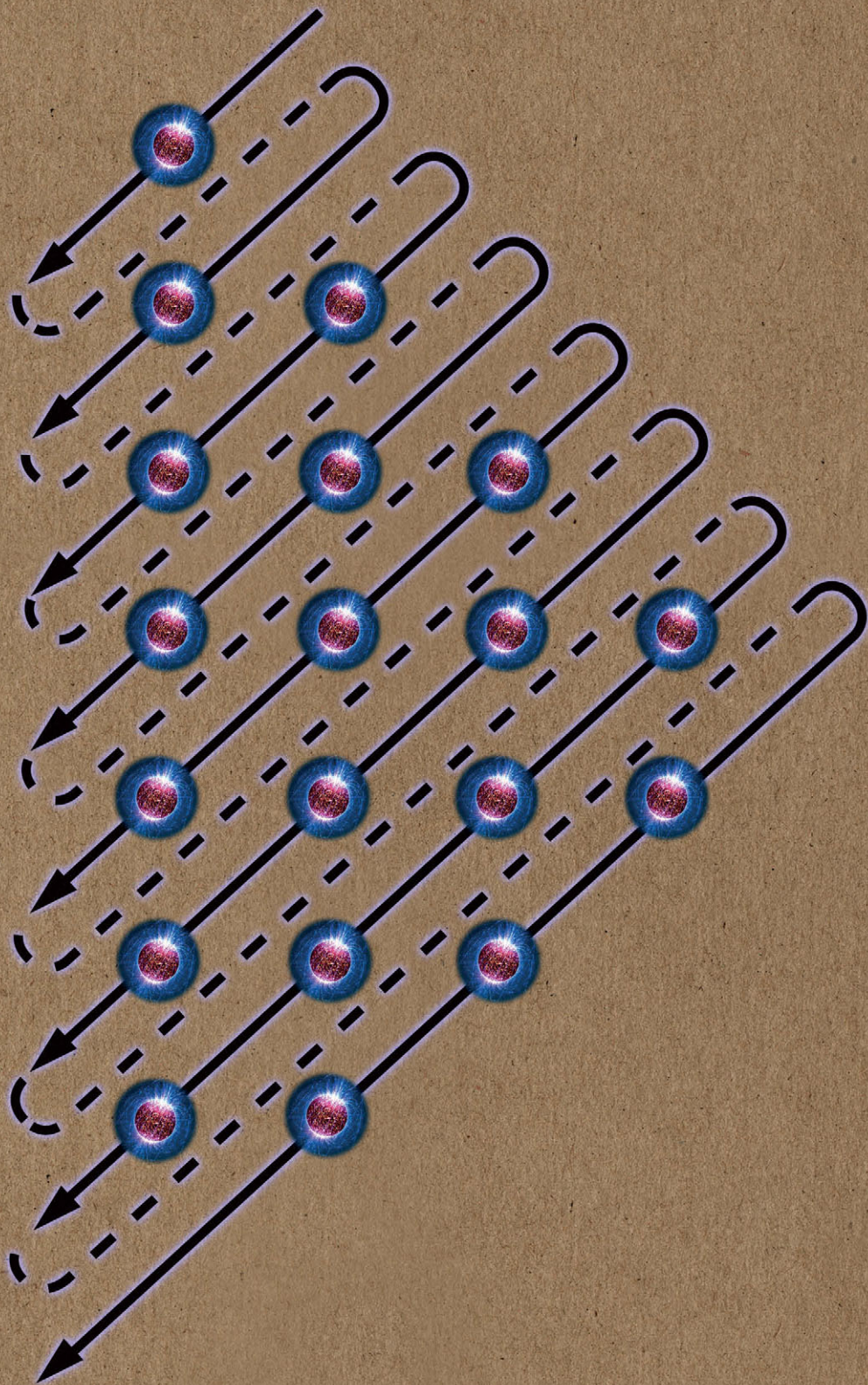
ВОЛЬФГАНГ ПАУЛИ
(1900—1958)

Австрийский физик, автор «принципа запрета»

АВТОР ТЕКСТА

Александр Хеллеманс

Принцип Паули объяснил, почему элементы со сходными химическими свойствами распределяются по столбцам Периодической таблицы.



УРАВНЕНИЕ ДИРАКА

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Чтобы получить свое уравнение, Дираку пришлось объединить физику очень малых частиц с физикой очень больших скоростей.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Уравнение Дирака имело значение гораздо большее, чем развитие квантовой теории поля: на основе математических вычислений было предсказано существование новой фундаментальной частицы — «электрон с отрицательной энергией» Дирака вполне мог быть эквивалентом электрона с положительным зарядом. В 1932 году Карл Андерсон открыл позитрон — частицу, удовлетворявшую такому описанию, а это означает, что математика неразрывно вплетена в саму ткань Вселенной.

В 1913 году Нильс Бор предположил, что характерные спектральные линии химических элементов возникают оттого, что атомы поглощают и выделяют фотоны разной длины волны по мере того, как электроны перескакивают с одной орбиты на другую. Проблема заключалась в том, что наблюдаемый спектр водорода не полностью согласовывался с теорией Бора. Летом 1927 года английский физик-теоретик Поль Дирак попытался решить эту загадку, проанализировав поведение электронов. Для этого он совместил волновое уравнение квантовой механики Шрёдингера и релятивистские уравнения движения на скоростях, приближающихся к скоростям света, выведенные в рамках специальной теории относительности. Другие физики пытались сделать нечто подобное, но трудность представлял тот факт, что нужно было учитывать еще и спин электронов. Дирак преодолел эту трудность с помощью хитрого алгебраического метода и матриц четыре на четыре. В результате он получил релятивистское квантовое волновое уравнение, ныне носящее его имя, применимое для электронов как с положительной, так и с отрицательной энергией и предсказывающее существование антивещества. Блестящие находки Дирака привели к развитию квантовой теории поля, основе современной физики частиц.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

АТОМ БОРА
(с. 24)

КВАНТОВЫЙ СПИН
(с. 38)

УРАВНЕНИЕ
ШРЁДИНГЕРА
(с. 42)

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ
ПОЛЯ
(с. 64)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

УИЛЬЯМ КЛИФФОРД
(1845–1879)

Английский математик, автор метода, который позже использовал Дирак

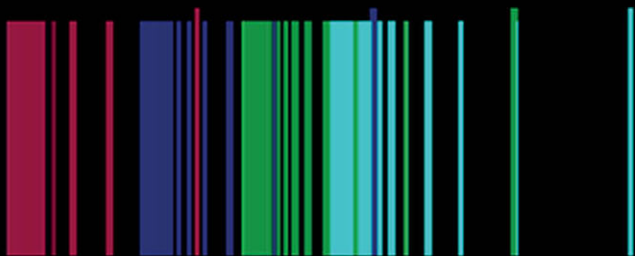
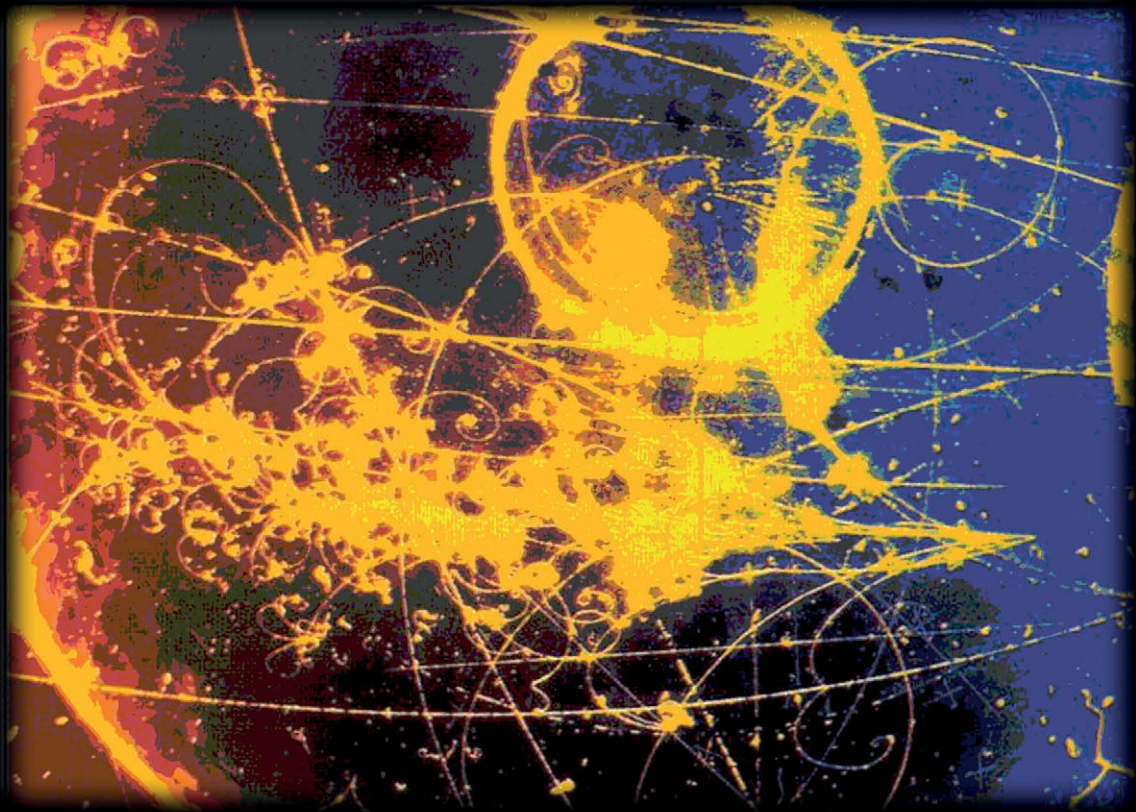
КАРЛ АНДЕРСОН
(1905–1991)

Американский физик, обнаруживший антиэлектрон в космических лучах

АВТОР ТЕКСТА

Леон Клиффорд

Дирак ввел в квантовую теорию принципы теории относительности.





5 августа 1902 года

Родился в Бристоле в семье учителя Шарля Дирака и библиотекарши Флоренс Холтен

1921

Заканчивает инженерный факультет Бристольского университета

1923

Получает диплом по математике Бристольского университета и поступает в аспирантуру Кембриджского университета

1926

Становится членом Колледжа Святого Иоанна в Кембридже

1928

Выводит уравнение Дирака, описывающее релятивистское движение электрона

1930

Предлагает концепцию бесконечного «моря» электронов с отрицательной энергией и предсказывает существование антивещества

1932–1969

Становится Лукасовским профессором математики в Кембридже

1933

Получает Нобелевскую премию по физике (вместе со Шрёдингером) за открытия в атомной теории

1937

Женится на Марджит Вигнер (сестре физика Юджина Вигнера)

1952

Получает медаль Копли и медаль Макса Планка

1969

Уходит в отставку и принимает почетный пост во Флоридском университете

20 октября 1984 года

Умирает в Таллахасси, Флорида

1995

В Вестминстерском аббатстве воздвигается памятник в его честь

ПОЛЬ ДИРАК

Английский физик Поль Дирак

родился в Бристоле, в семье швейцарца и британки; говорят, что на его характер наложило отпечаток строгое воспитание: отец заставлял его говорить исключительно по-французски, причем в совершенстве, и чтобы не делать ошибок в речи, Поль предпочитал молчать. Но, скорее всего, у Дирака были некоторые признаки аутизма, и именно этим объясняются его недостаточно развитые социальные навыки.

В Бристольском университете Дирак сначала изучал инженерное дело, но благодаря растущему интересу к прикладной математике получил вторую ученую степень и отправился в аспирантуру в Кембридж, где вскоре приступил к исследованиям в области теории относительности и только что зародившейся квантовой физики. Здесь он расширил уравнение Шрёдингера, описывающее вероятность нахождения частицы в определенном месте, он привнес в него элементы теории относительности для движения на скоростях, приближающихся к скорости света.

Уравнение Дирака было симметричным, то есть частицы могли обладать как положительной, так и отрицательной энергией. Это представляло серьезную проблему, поскольку обычный электрон мог только переходить в более низкие энергетические состояния, испуская фотон. Дирак предположил наличие как бы пустого про-

странства, содержащего бесконечное «море» электронов отрицательной энергии, занимающих все возможные состояния отрицательной энергии. Он предсказал, что в этом море могут находиться «дырки» — отсутствующие электроны с отрицательной энергией, эквиваленты антиэлектронов с положительной энергией, или позитроны. Таким образом, он предвидел существование антивещества еще до того, как оно было открыто.

Дирак также совершил большой прорыв в квантовой теории, доказав, что матричная механика Гейзенберга и волновая механика Шрёдингера, казалось бы не связанные между собой, не только согласуются, но и эквивалентны, и служат разными способами описания одной и той же квантовой механики.

По своему характеру Дирак в чем-то был похож на одного из прежних Лукасовских профессоров математики Кембриджа, Исаака Ньютона. Как и Ньютон, он был необщительным, сторонился людей и давал как можно более краткие ответы на вопросы. Ходят различные истории о его почти бесплодных попытках поддерживать общение, особенно во время встреч с разговорчивым американским физиком Ричардом Фейнманом. Говорят, что после одной из своих типичных долгих пауз Дирак произнес: «У меня есть уравнение. А у вас?» Но в его математической гениальности сомневаться не приходилось.

Брайан Клегг

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Квантовая теория поля старается описать все силы и все частицы природы в терминах взаимодействия таких полей.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Пока что квантовая теория поля не смогла предложить полностью последовательного описания гравитации — силы, действующей на очень больших расстояниях. Включение гравитации позволило бы создать единую теорию поля, объединяющую все силы и частицы нашего мира. Благодаря такому революционному достижению мы бы сделали шаг навстречу «универсальной теории всего».

Квантовая теория поля (КТП) —

основа современной физики частиц и математическая основа для нашего понимания природы реальности. Она построена на фундаменте квантовой механики посредством расширения предмета исследований от отдельных частиц до систем с большим количеством частиц. Эта теория описывает поведение полей — физических сущностей, имеющих какое-то значение в каждой точке пространства, таких как электромагнитное поле, в котором распространяются световые и радиоволны. На квантовом уровне эти поля ведут себя не так, как в классической физике. К тому же теория квантовых полей позволяет физикам описывать поведение частиц и полей в одних и тех же формулах. Она трактует волны и частицы, как возмущения соответствующего поля: например, свет — это нечто вроде «ряби» в электромагнитном поле, а электрон — это особое возбужденное состояние электромагнитного поля. Таким образом теория объясняет корпускулярно-волновой дуализм природных явлений, совмещая волновые и корпускулярные свойства света и электронов, а также других сочетаний сил и частиц, в едином математическом описании поля.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ (с. 28)

КВАНТОВАЯ ХРОМОДИНАМИКА (с. 148)

КВАНТОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ (с. 152)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

МАРТИНУС ВЕЛТМАН
(1931)

Нидерландский физик и один из основоположников КТП

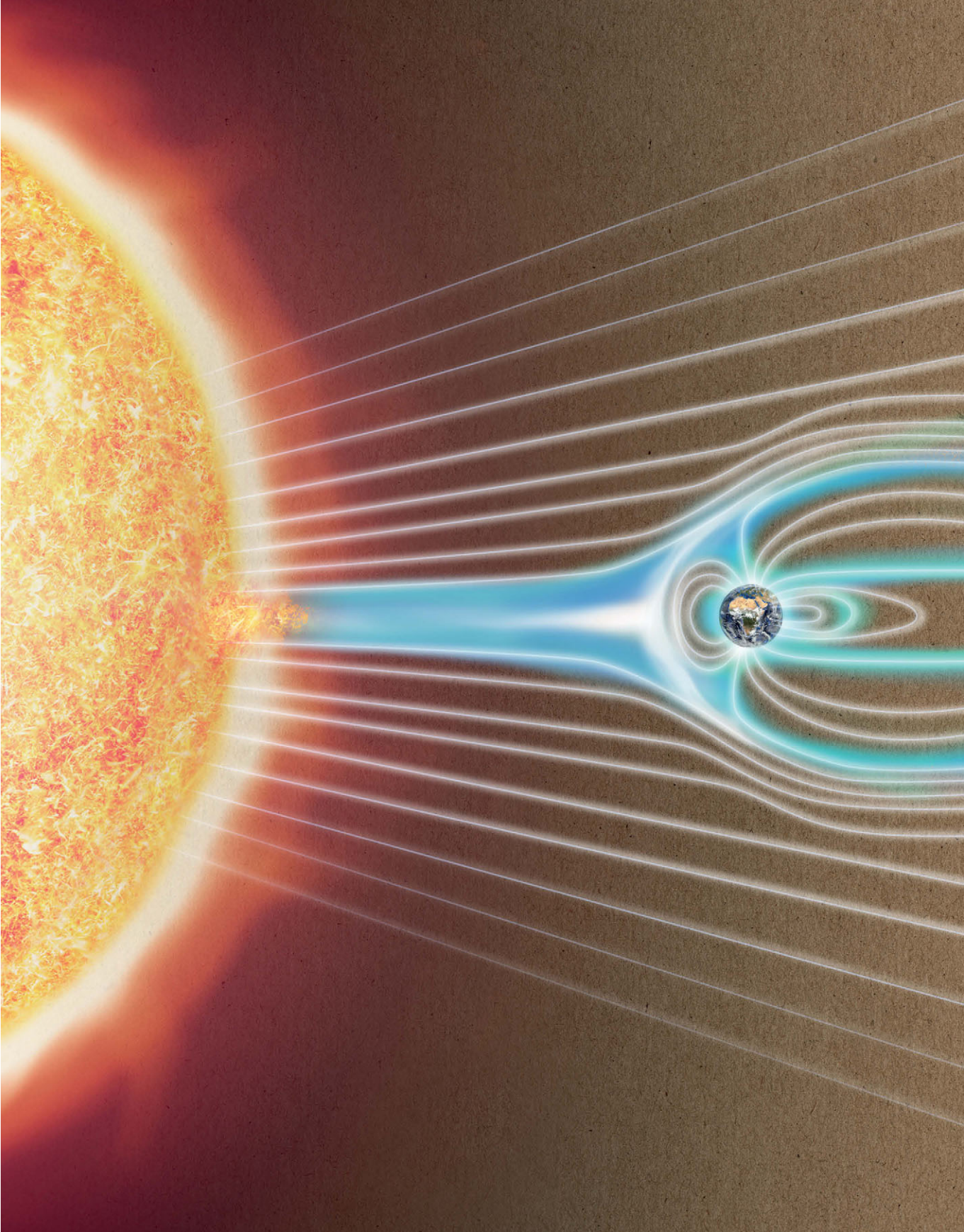
ГЕРАРД Т'ХООФТ
(1946)

Нидерландский физик, исследовавший природу слабого ядерного взаимодействия

АВТОР ТЕКСТА

Леон Клиффорд

Описать природу магнитного поля, защищающего Землю от солнечного ветра, можно при помощи квантовой теории поля.



ОСНОВЫ КЭД

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Благодаря работам Поля Дирака классическая теория электромагнетизма была приспособлена к научным представлениям квантовой эры.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Историю физики во многих отношениях можно рассматривать, как историю слияния различных теорий и понятий. Максвелл в электродинамике объединил теории электричества, магнетизма и света. Эйнштейн в специальной теории относительности объединил пространство со временем, а в квантовой механике объединяются волны и частицы. Дирак же объединил специальную теорию относительности с квантовой механикой, которые, в свою очередь, были объединены с классической электродинамикой в рамках КЭД.

КЭД представляет собой совмещение принципов классической теории электромагнетизма, разработанной в XIX веке Джеймсом Клерком Максвеллом с принципами квантовой механики и специальной теорией относительности. Классическая электродинамика объясняет поведение электрических потоков и электромагнитного излучения, такого как свет и радиоволны, с помощью понятия электромагнитного поля; но эта теория была разработана до открытия электрона, переносчика электрического заряда, и фотона, переносчика света. Квантовая механика объясняет, как движутся и ведут себя электроны и фотоны, но неспособна столь же удачно объяснить природу электромагнитных полей. Такое же ее слабое место — поведение электронов на орбитах вокруг атомных ядер, где их скорость приближается к скорости света и потому требует применения принципов специальной теории относительности. Основы КЭД заложил Поль Дирак, в уравнении которого были учтены принципы квантовой механики и специальной теории относительности. Но существование антивещества, предсказанного Дираком, породило очередную проблему. Оно подразумевало возможность аннигиляции частиц и античастиц с высвобождением энергии, которая могла бы породить многие возможные комбинации новых частиц. Дирак понял, что этот вопрос требует развития новой теории, объясняющей эти частицы, и так появилась КЭД.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

УРАВНЕНИЕ ДИРАКА
(с. 60)

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ
ПОЛЯ
(с. 64)

КВАНТОВАЯ
ХРОМОДИНАМИКА
(с. 148)

3-СЕКУНДНАЯ БИОГРАФИЯ

ДЖЕЙМС КЛЕРК
МАКСВЕЛЛ
(1831–1879)

Британский ученый, объединивший представления об электричестве, магнетизме и свете в рамках одной теории

АВТОР ТЕКСТА

Леон Клиффорд

Дирак расширил классическую теорию электромагнетизма Максвелла на квантовые частицы.



ОПАСНОСТИ ПЕРЕНОРМИРОВКИ

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Перенормировка — удобный математический трюк, позволяющий решить некоторые крупные проблемы, но Ричард Фейнман, называл ее «игрой в наперстки».

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Перенормировка определено работает, но Ричард Фейнман так до конца и не примирился с методом, который сам же и разрабатывал. Поль Дирак также предостерегал против этого метода. Следует помнить, что Дирак предсказал существование антивещества, отказавшись игнорировать некоторые из кажущихся странными решений его собственного уравнения. А вдруг те самые бесконечные ряды, которые кажутся такими неудобными при математических вычислениях, имеют какой-то глубинный смысл и говорят нечто важное о природе реальности?

Перенормировка — математический метод решения проблемы, возникающей в таких квантовых теориях поля, как КЭД и квантовая хромодинамика. Эта проблема заключается в том, что при вычислении формул возникают неудобные бесконечные последовательности чисел, и без определенных операций над этими числами невозможно находить разумные решения теоретических уравнений. Бесконечные последовательности возникают в силу того, что в отдельной квантовой системе за очень короткий промежуток времени возникают и пропадают пары частиц и античастиц. Любая попытка учесть взаимодействие этих частиц быстро приводит к тому, что математики называют расходящимися рядами. Говоря упрощенно, перенормировка подразумевает выделение некоторых элементов, расходящихся до бесконечности, и их взаимозачет с другими подобными элементами; оставшийся в уравнении недостаток заменяется произвольной постоянной, значение которой можно определить экспериментально. При условии, что количество таких переменных конечно и что значение каждой из них можно определить, говорят, что теория может быть перенормируемой. Для того чтобы в научном сообществе признали какую-то теорию поля, она должна быть перенормируемой. Пока что теория квантовой гравитации не выдерживает этой проверки.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ
ПОЛЯ
(с. 64)

ОСНОВЫ КЭД
(с. 66)

ДИАГРАММЫ
ФЕЙНМАНА
(с. 70)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

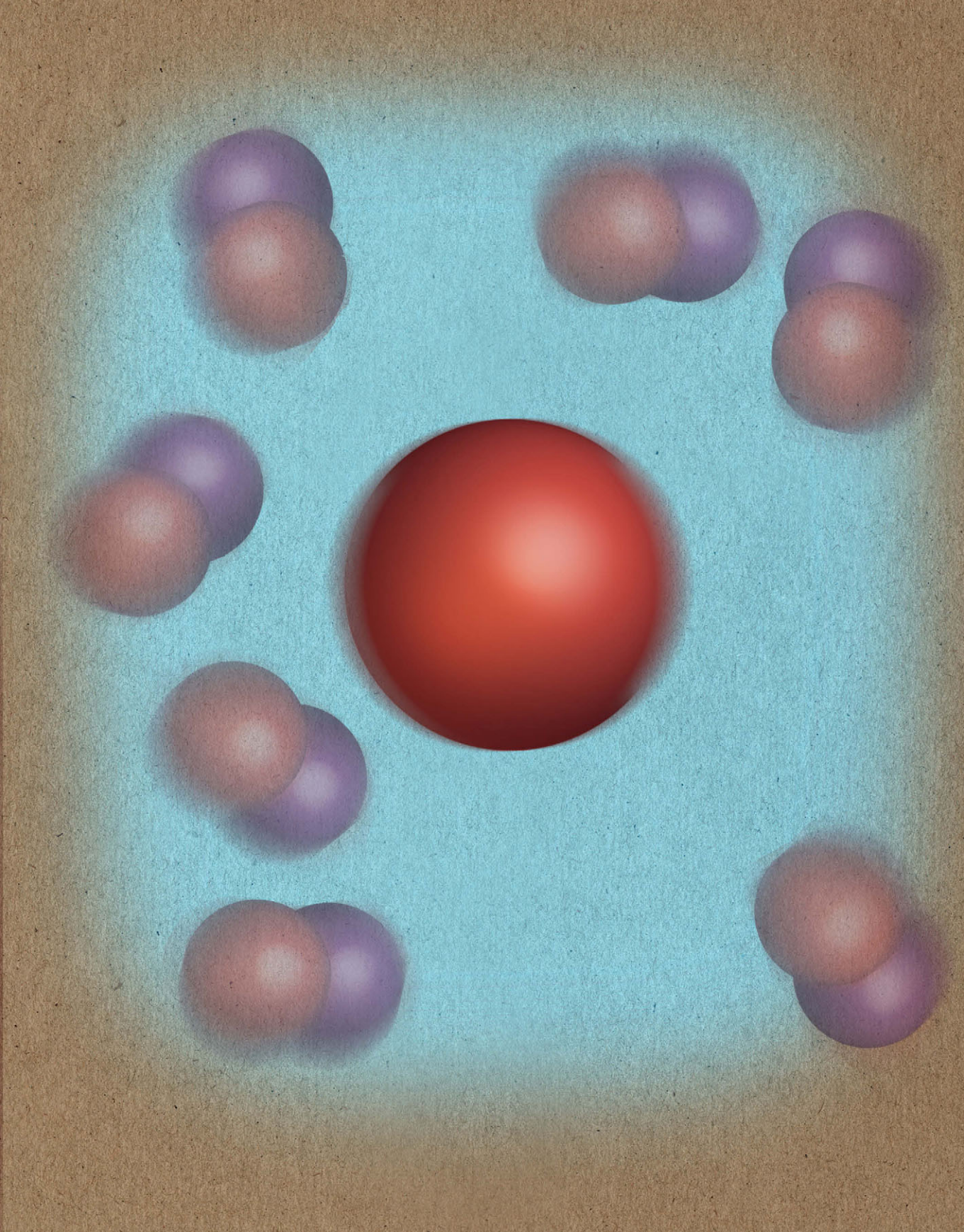
ДЖУЛИАН ШВИНГЕР
(1918—1994)
Американский физик,
занимался
перенормировкой КЭД

СИНЪИТИРО
ТОМОНАГА
(1906—1979)
Японский физик,
независимо
разработавший метод
перенормировки

АВТОР ТЕКСТА

Леон Клиффорд

**Пары частиц-
античастиц приводят
в вычислениях
к бесконечностям.**



ДИАГРАММЫ ФЕЙНМАНА

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ

ЗА 3 СЕКУНДЫ

Диаграммы Фейнмана иллюстрируют мир квантовой физики с помощью графиков, показывающих взаимодействие частиц во времени и пространстве.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Влияет ли способ, каким мы представляем себе физические процессы, на то, что мы о них думаем? Диаграммы Фейнмана представляют собой довольно удобное средство, помогающее соотнести некоторые положения квантовой физики с привычными нам понятиями, при этом они подразумевают, что мы имеем дело с отдельными материальными частицами. Тем самым они противостоят концепции протяженного поля, описываемой в теории квантового поля.

Американский физик Ричард

Фейнман в 1940-х годах разработал очень простой и наглядный способ представления того, как в квантовом мире происходят различные процессы, — так называемые диаграммы Фейнмана. В основе этих диаграмм лежат теоретические положения квантовой электродинамики, изучающей взаимодействие между протонами и фотонами. Они также служат эффективным способом изображения процессов для всех областей квантовой теории поля, и благодаря им ученым удалось провести некоторые из самых сложных расчетов в физике высоких энергий. Каждая диаграмма Фейнмана подчиняется определенным правилам. Все они состоят из сочетаний прямых и волнистых линий, соответствующих разным частицам, и точек, в которых эти линии встречаются между собой, соответствующих взаимодействию этих частиц. Диаграммы Фейнмана могут отображать одно или несколько взаимодействий; одна ось означает пространство, а другая время; таким образом, линии, идущие по диагонали обозначают движение частицы во времени и пространстве. Любопытно, что на диаграммах Фейнмана движение античастиц по сравнению с движением частиц показано в обратном направлении по оси времени. Это можно интерпретировать в том смысле, что античастица представляет собой эквивалент обычной частицы, только движущейся обратно во времени.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ
ПОЛЯ
(с. 64)

ОСНОВЫ КЭД
(с. 66)

ОПАСНОСТИ
ПЕРЕНОРМИРОВКИ
(с. 68)

КВАНТОВАЯ
ХРОМОДИНАМИКА
(с. 148)

3-СЕКУНДНАЯ БИОГРАФИЯ

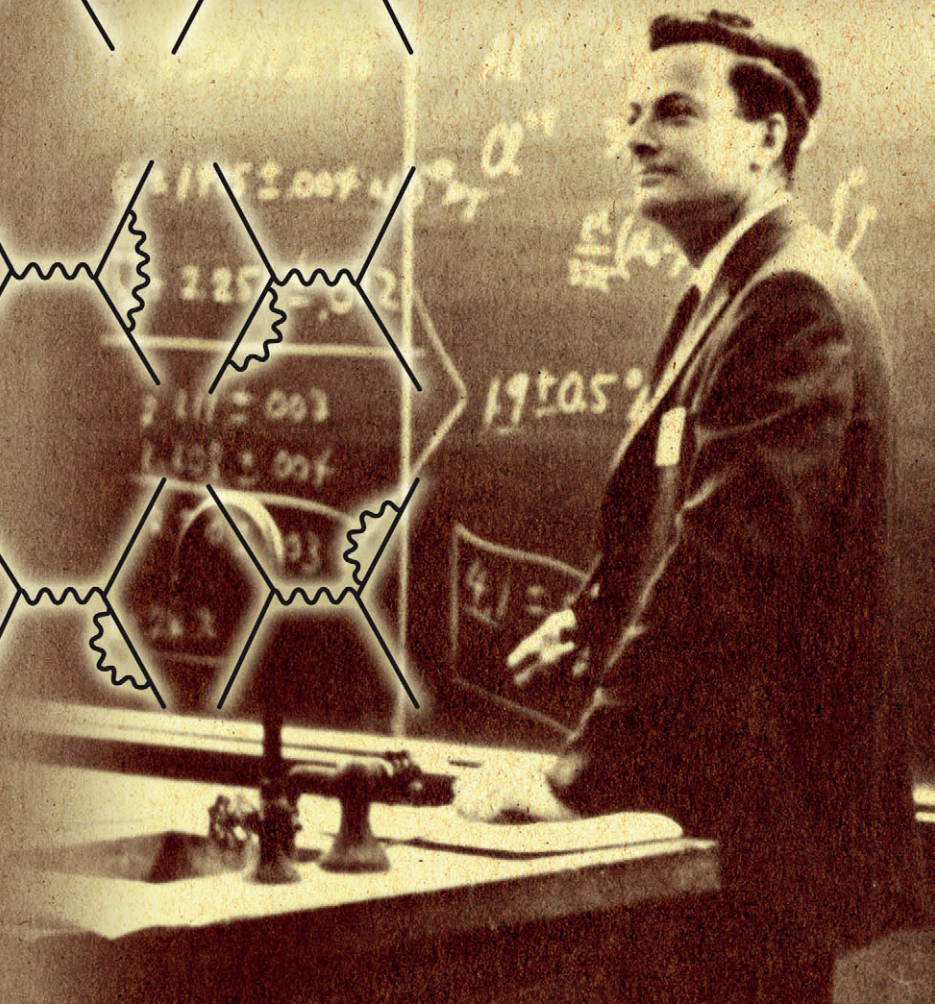
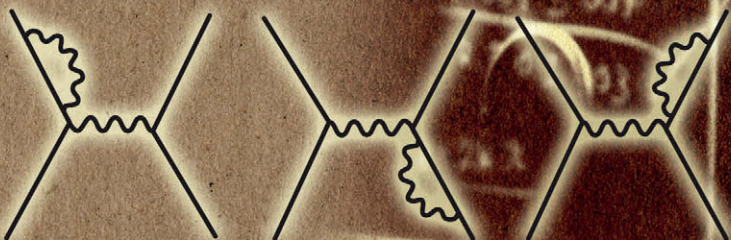
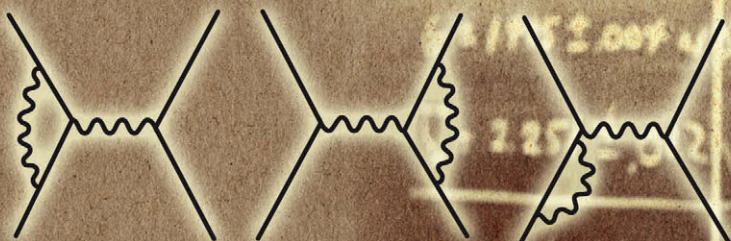
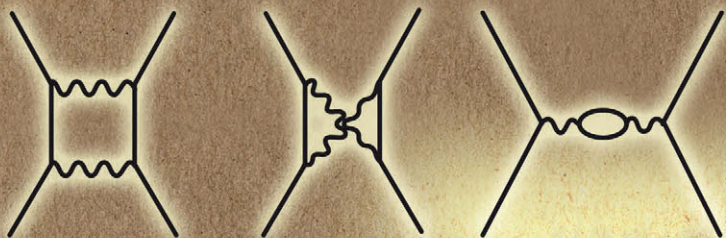
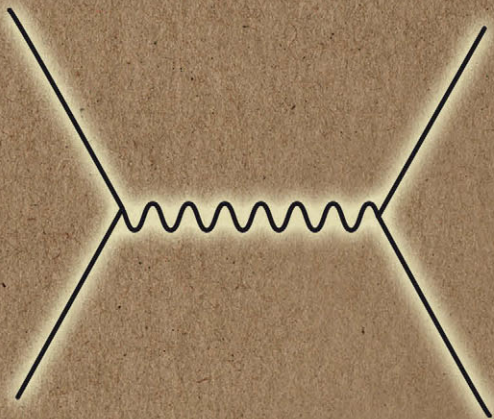
РИЧАРД ФЕЙНМАН
(1918—1988)

Американский физик

АВТОР ТЕКСТА

Леон Клиффорд

*Элегантные
диаграммы
Фейнмана доказали
свою полезность
для осознания
процессов,
происходящих
в рамках квантовой
электродинамики.*



НАЗАД ВО ВРЕМЕНИ

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

В квантовой механике время — это улица с двусторонним движением, и волны могут распространяться как вперед во времени, так и назад.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Если было бы возможно обнаружить опережающие волны, то, в принципе, можно было бы посылать сигналы в прошлое, направив передатчик в ту точку пространства, в которой находилась Земля в определенный момент прошлого. Какие бы последствия имело такое явление?

Существование волн, идущих

назад во времени, допускается знаменитыми формулами электродинамики, разработанными Джеймсом Клерком Максвеллом, и это предположение было перенесено в квантовую механику. Согласно математическим расчетам, событие, создающее волну, которая распространяется вперед по времени, может одновременно создавать и волну, распространяющуюся по времени назад. Такие идущие назад по времени волны называются «опережающими», поскольку они опережают свое создание. Обычно решения математических формул, касающиеся опережающих волн игнорируют, но это не значит, что они не существуют. Одна из интерпретаций квантовой механики предполагает существование опережающих волн, взаимодействующих с соответствующими им волнами, идущими по времени вперед. Но еще никто не наблюдал опережающие волны. Одно из объяснений заключается в том, что это происходит из-за второго закона термодинамики и из-за того, что обе волны возникают парами, как и предсказывает формула. Действие второй волны подразумевает, что идущая вперед по времени волна должна будет поглотиться в какой-то точке будущего, и это неизбежно приводит к стиранию всех проявлений опережающей волны.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

КОПЕНГАГЕНСКАЯ
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ
(с. 84)

МНОГОМИРОВАЯ
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ
(с. 92)

ПАРАДОКС Э. П. Р.
(с. 98)

3-СЕКУНДНАЯ БИОГРАФИЯ

ДЖЕЙМС КЛЕРК
МАКСВЕЛЛ
(1831—1879)

Британский ученый, объединивший представления об электричестве, магнетизме и свете в рамках одной теории

АВТОР ТЕКСТА

Леон Клиффорд

Ненаблюдаемые опережающие волны идут обратно во времени и доходят до источника в момент их испускания.



**КВАНТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ
И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИИ**



КВАНТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЛОССАРИЙ

Альфа-частицы, альфа-распад

Альфа-частицы — это положительно заряженные частицы, идентичные ядру атома гелия-4, состоящие из двух протонов и двух нейтронов. Наряду с бета-частицами и гамма-радиацией это один из трех основных типов излучения, возникающих в процессе радиоактивного распада, когда ядро атома теряет часть своей массы с освобождением энергии.

Бомовская диффузия

Процесс выравнивания концентрации частиц плазмы (совокупности заряженных ионов) под воздействием магнитного поля. Этот процесс более сложен, чем диффузия газов, но он описывается простой формулой, в которой учитываются только температура, напряженность магнитного поля и определенная постоянная.

Волновая функция

В квантовой физике волновая функция — математическая формула, описывающая квантовое состояние частиц, меняющееся со временем согласно уравнению Шрёдингера. Данная волна,

распространяющаяся со временем, представляет собой не собственно частицу, а, скорее, вероятность того, что квантовое состояние примет определенное значение — например, с помощью данной формулы можно вычислить вероятность нахождения частицы в разных точках пространства. Вероятность представляет собой квадрат волновой функции.

Манхэттенский проект

Программа союзников по разработке ядерного оружия во время Второй мировой войны в ответ на донесения разведки о том, что в Германии предпринимаются подобные попытки. Программа осуществлялась на территории США, но значительный вклад в нее внесли также Великобритания и Канада. Свое название она получила в честь временной штаб-квартиры, располагавшейся на Бродвее в нью-йоркском Манхэттене, но основные разработки проводились в Лос-Аламосе в штате Нью-Мексико. Первое испытание атомной бомбы под кодовым названием «Тринити» прошло в месте, которое теперь называется Испытательным полигоном Уайт-Сэндс, 16 июля 1945 года,

менее, чем за четыре недели до взрыва атомной бомбы в Японии.

Мысленный эксперимент

Эксперимент, не выполненный на практике, а лишь предложенный в качестве иллюстрации предположения или идеи. Самым известным мысленным экспериментом, пожалуй, можно назвать эксперимент с котом Шрёдингера (см. стр. 46). Мысленные эксперименты придумывал и Эйнштейн в своих попытках развенчать квантовую теорию. Его знаменитый мысленный эксперимент, ныне известный, как «Парадокс Эйнштейна — Подольского — Розена» (см. стр. 98), послужил основой для практических экспериментов, демонстрирующих явление квантовой запутанности.

Суперпозиция

Фундаментальное явление квантовой физики, не имеющее аналогов в макромире наблюдаемых нами объектов. Если квантовая частица может находиться, скажем, в двух вероятных состояниях (например, у нее может быть спин «вверх» или спин «вниз»),

то она теоретически может находиться сразу в обоих этих состояниях с определенной долей вероятности; и только после измерения или коллапса волновой функции можно выяснить, в каком именно состоянии она находится.

Туннелирование с нулевым временем

Поскольку квантовая частица не находится в какой-то конкретной точке до измерения, то она может проходить через препятствия, через которые теоретически проходить не должна. Этот процесс называется квантовым туннелированием или туннельным эффектом. В экспериментах, в которых измеряют частицу, проходящую по траектории через барьер, складывается впечатление, что она преодолевает этот барьер мгновенно, отсюда и «туннелирование с нулевым временем».

Фотон

Квантовая частица света и переносчик электромагнитного взаимодействия. До начала XX века предполагалось, что свет — это волна, но как теория, так и эксперименты доказали, что его можно воспринимать и как частицу без массы.

ОПТИЧЕСКИЕ ДЕЛИТЕЛИ ПУЧКА

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Стекло — это оптический делитель потока, пропускающий сквозь себя определенное количество фотонов. Это ставило в тупик Ньютона, не знавшего о вероятностной природе квантовых частиц.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

С помощью оптического делителя пучков можно получить запутанные (сцепленные) частицы и даже группы частиц. Процесс начинается с того, что через делитель пропускается ненаблюдаемый фотон. Он находится в суперпозиции состояний, и мы можем определить лишь вероятность того, что он отразится или пройдет насквозь. Каждая траектория позволяет ему взаимодействовать с разными облаками атомов. Затем он проходит через поляризационный делитель, выбирающий направление поляризации.

Каждый из нас имел дело с таким квантовым устройством, как оптический делитель пучка (или луча), поскольку прекрасным примером такого делителя служит обычное оконное стекло. Встаньте ночью перед окном и включите свет в комнате. Вы увидите в окне свое собственное отражение. Но если выйти наружу и посмотреть через окно в дом, то увидишь только освещенную комнату. Какой-то свет из комнаты отражается — процентов 5 — но, в основном, он проходит сквозь стекло. (Так происходит все время, просто ночью на темном фоне отражение виднее). Это ставит довольно любопытную проблему. Ньютон считал, что свет состоит из частиц, но не мог объяснить, почему отдельные частицы отражаются или проходят сквозь стекло. Он предполагал, что причиной тому могут быть несовершенства на поверхности стекла, хотя экспериментально это не подтверждается. Теперь же мы знаем, что это происходит из-за квантовой природы фотонов. Мы не можем утверждать, что определенный фотон отразится или пройдет сквозь стекло, существует лишь вероятность того или иного события. Эффект тем более любопытен, что процент отраженных от внутренней поверхности частиц зависит от толщины стекла. Проходящие сквозь стекло фотоны, будучи квантовыми частицами, распределяются во всей своей массе и взаимодействуют не только с поверхностью стекла, но и со всем его объемом.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

ЭКСПЕРИМЕНТ
С ДВОЙНОЙ ЩЕЛЬЮ
(с. 32)

ПАРАДОКС Э. П. Р.
(с. 98)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

ИСААК НЬЮТОН
(1642—1727)

Английский физик, прославившийся тем, что сформулировал закон всемирного тяготения и три закона механики

МАЙКЛ ХОРН
(1943)

Американский физик в области квантовой теории, также эксперт по делителям пучков

АВТОР СТАТЬИ

Брайан Клегг

Почти весь свет проходит сквозь стекло, но часть его отражается, и Ньютон не мог объяснить это явление.



ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Туннельный эффект — это прохождение квантовой частицы через барьер, даже если у нее недостаточно энергии для преодоления этого барьера.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Туннельный эффект полезен в полупроводниковой микроэлектронике, но он же представляет собой и помеху. По мере того как транзисторы на кремниевых микросхемах становятся все меньше и меньше, изолирующие слои, разделяющие между собой разные компоненты микросхемы, тоже становятся меньше и достигают толщины всего в несколько атомов. Это делает их вполне преодолимыми барьерами для электронов.

Если у шара, который катится

вверх по склону холма, недостаточно энергии, он никогда не преодолеет вершину и не достигнет другой стороны. Это кажется очевидным, но в квантовой физике все по-другому. Квантовый объект, такой как электрон или фотон, может преодолевать барьер, даже если, согласно классической физике, у него недостаточно энергии для этого. Так называемый туннельный эффект является следствием того, что квантовые частицы не имеют строго определенного положения в пространстве, а волновая функция описывает только вероятность их нахождения в той или иной точке. Наличие барьера ограничивает вероятности, но не сводит к нулю даже вероятность нахождения на противоположной стороне: всегда существует, пусть малая, но возможность того, что объект обнаружится и там. Туннельный эффект играет важную роль в различных природных явлениях. Именно он позволяет альфа-частицам преодолеть сильное взаимодействие частиц атомного ядра при радиоактивном распаде; благодаря ему осуществляются химические процессы в холодном межзвездном пространстве. В технике он используется, например, в некоторых диодах, в которых электроны преодолевают изолирующий барьер между двумя типами полупроводников.

СОПУТСТВУЮЩАЯ ТЕМА

КОНТАКТЫ
ДЖОЗЕФСОНА
(с. 126)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

ФРИДРИХ ХУНД
(1896—1997)

Немецкий физик, основоположник квантовой химии

ГЕОРГИЙ ГАМОВ
(1904—1968)

Американский физик русского происхождения, выяснивший роль туннельного эффекта в радиоактивном распаде с выделением альфа-частиц

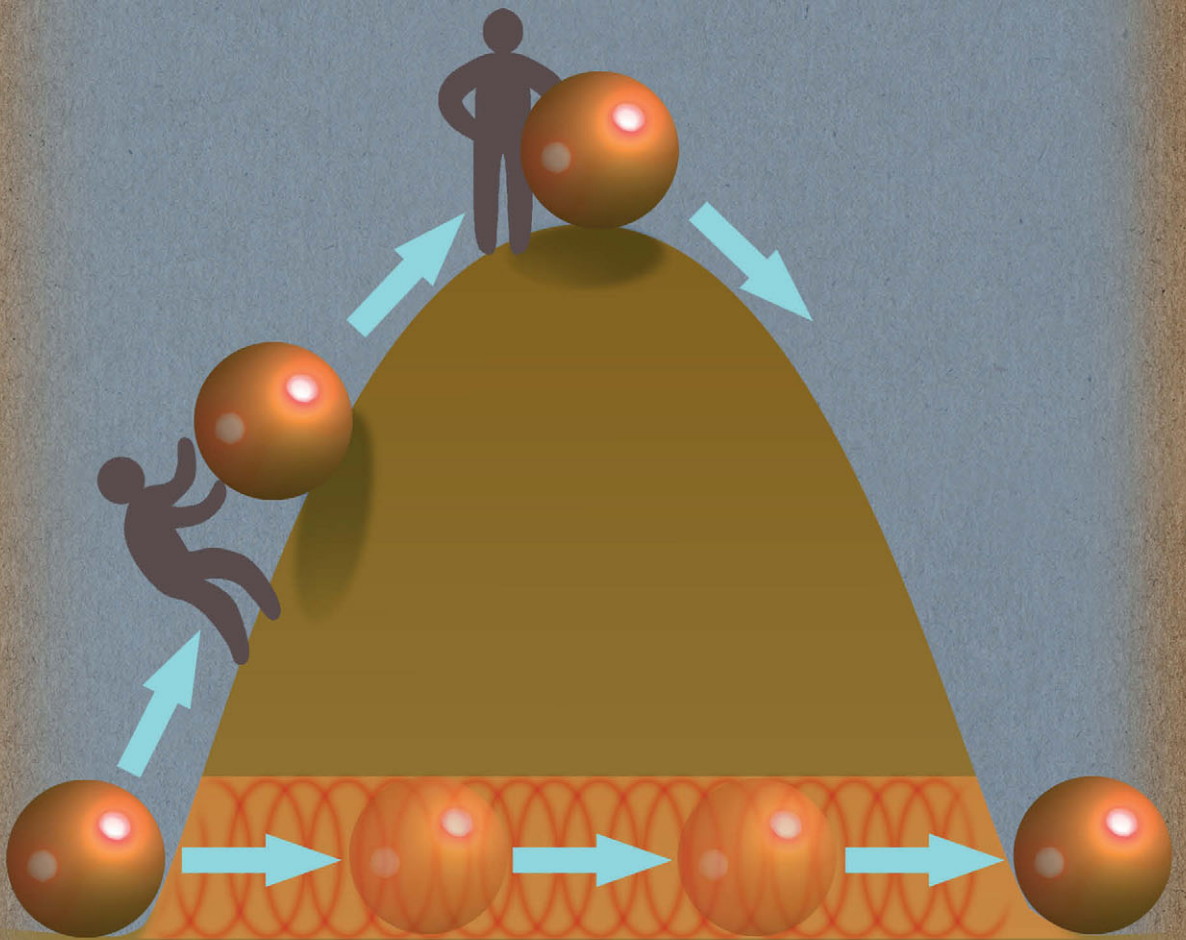
ГЕРД БИННИГ
И ГЕНРИХ РОРЕР
(1947 и 1933—2013)

Немецкий и швейцарский физики, изобретатели сканирующего туннелирующего микроскопа, за который в 1986 г. получили Нобелевскую премию

АВТОР СТАТЬИ

Филип Болл

*Туннелирующая
частица преодолевает
барьер,
не преодолевая
расстояние.*



СВЕРХСВЕТОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Поскольку квантовые частицы преодолевают барьер мгновенно, создается впечатление, что туннелирующие фотоны движутся со сверхсветовой скоростью.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

В большинстве ранних экспериментов использовались такие технически изощренные барьеры, как «волноводы уменьшенного размера» и «фотонные решетки». Нимц часто использовал пример туннелирования, открытый Ньютоном, — «испорченное» полное внутреннее отражение. Когда луч света падает на призму под определенным углом, он отражается от ее внутренней поверхности. Ньютон обнаружил, что если поставить совсем рядом, но не вплотную, другую призму, то часть луча не отразится, а пройдет насквозь.

Любопытным следствием квантовых явлений служит тот факт, что фотоны могут двигаться быстрее скорости света. В ходе «сверхсветовых» экспериментов фотоны направляли на препятствия, которые они не должны были преодолеть. Квантовая теория говорит о том, что местонахождение частицы не фиксировано и что существует небольшая вероятность того, что она обнаружится позади барьера. Некоторые фотоны действительно оказывались за препятствиями и продолжали свой путь. Если ширина препятствия равна 1 единице длины, а до и после препятствия фотон преодолевает также по 1 единице длины, то получается, что он проходит 3 единицы за то время, за которое свет обычно проходит всего лишь 2. Таким образом, он перемещается со скоростью, в 1,5 раза превышающей скорость света. Рэймонд Чиао, одним из первых проводивший подобные эксперименты, настаивает на том, что таким образом невозможно передавать сигналы, потому что фотоны проходят через барьеры случайным образом. Но в 1995 году Гюнтеру Нимцу удалось модулировать туннелирующий пучок, и он продемонстрировал это, передав с его помощью запись Сороковой симфонии Моцарта со скоростью, в четыре раза превышавшей скорость света.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

УРАВНЕНИЕ ШРЁДИНГЕРА (с. 42)

ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ (с. 80)

КОНТАКТЫ ДЖОЗЕФСОНА (с. 126)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

ИСААК НЬЮТОН (1642–1727)

Английский физик, сформулировал закон всемирного тяготения и три закона механики

ГЮНТЕР НИМЦ (1936)

Немецкий физик, исследовавший сверхскоростные эффекты туннелирования

РЭЙМОНД ЧИАО (1940)

Американский физик, специалист по квантовой оптике

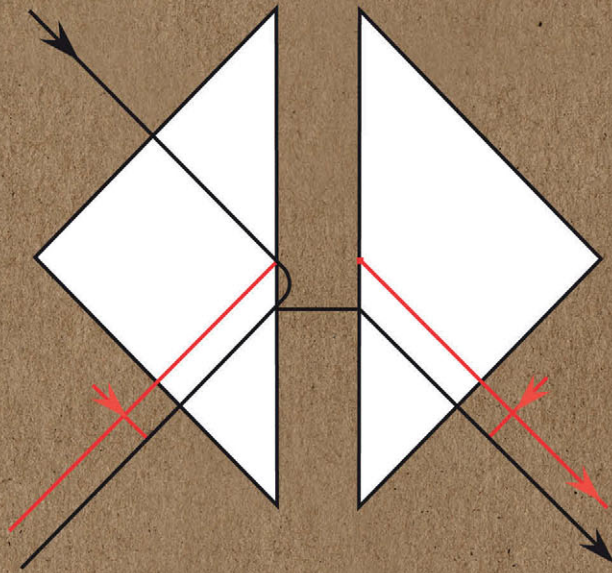
АВТОР СТАТЬИ

Брайан Клегг

Нимц передал сигналы с записью симфонии Моцарта быстрее скорости света.

Musical score system 1, featuring a treble and bass clef with a key signature of two flats and a 6/8 time signature. The piece begins with a piano (*p.*) dynamic. The treble staff contains a half note chord, and the bass staff contains a half note chord.

Musical score system 2, continuing the piece with a treble and bass clef. The treble staff contains a half note chord, and the bass staff contains a half note chord.



Musical score system 3, featuring a treble and bass clef with a key signature of two flats and a 3/4 time signature. The piece begins with a forte (*f.*) dynamic. The treble staff contains a half note chord, and the bass staff contains a half note chord.

Musical score system 4, featuring a treble and bass clef with a key signature of two flats and a 3/4 time signature. The treble staff contains a half note chord, and the bass staff contains a half note chord.

КОПЕНГАГЕНСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Копенгагенская интерпретация утверждает, что бессмысленно размышлять о чем-то более фундаментальном в отношении квантовых систем, чем то, что мы способны измерить.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Центральное понятие копенгагенской интерпретации — принцип дополнительности Бора, согласно которому одни эксперименты отвечают на одни вопросы, а другие — на другие, но вместе они не обязательно дают согласованные результаты. В одном эксперименте физическое явление ведет себя, как частицы, в другом — как волна. Ни один из них не «вернее» другого, для полной картины мира нужны оба.

По мере того как в 1920-х годах оформлялась квантовая теория, она приобретала всё более и более странные очертания. Из уравнения Шрёдингера следовало, что частицы могут вести себя, как волны. Квантовые частицы даже могли находиться в состоянии суперпозиции. Гейзенберг сформулировал свой принцип неопределенности. Возникал вопрос — что все это значит? Работавший в Копенгагене Нильс Бор и другие помогавшие ему физики, исходя из убеждения, что наука должна объяснять реальность, постарались разработать последовательное и логичное объяснение квантовой теории, известное ныне под названием «копенгагенская интерпретация». Она допускает, что в квантовой теории могут оставаться белые пятна, а одни эксперименты не согласовываться с другими. Все знания об окружающем мире мы получаем путем измерений и экспериментов. Если не задаваться вопросом, через какую из двух щелей проходят фотоны, то мы на выходе получаем типичную картину интерференции. Но если на пути фотонов установить устройство, позволяющее определить, по какой траектории они направляются, то картины интерференции не возникает. Так через какую же щель они проходят «на самом деле», когда за ними не наблюдают? Согласно копенгагенской интерпретации, задавать подобные вопросы бессмысленно.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

ЭКСПЕРИМЕНТ
С ДВОЙНОЙ ЩЕЛЬЮ
(с. 32)

КОРПУСКУЛЯРНО-
ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ
(с. 28)

УРАВНЕНИЕ
ШРЁДИНГЕРА
(с. 42)

ПРИНЦИП
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ
ГЕЙЗЕНБЕРГА
(с. 48)

3-СЕКУНДНАЯ БИОГРАФИЯ

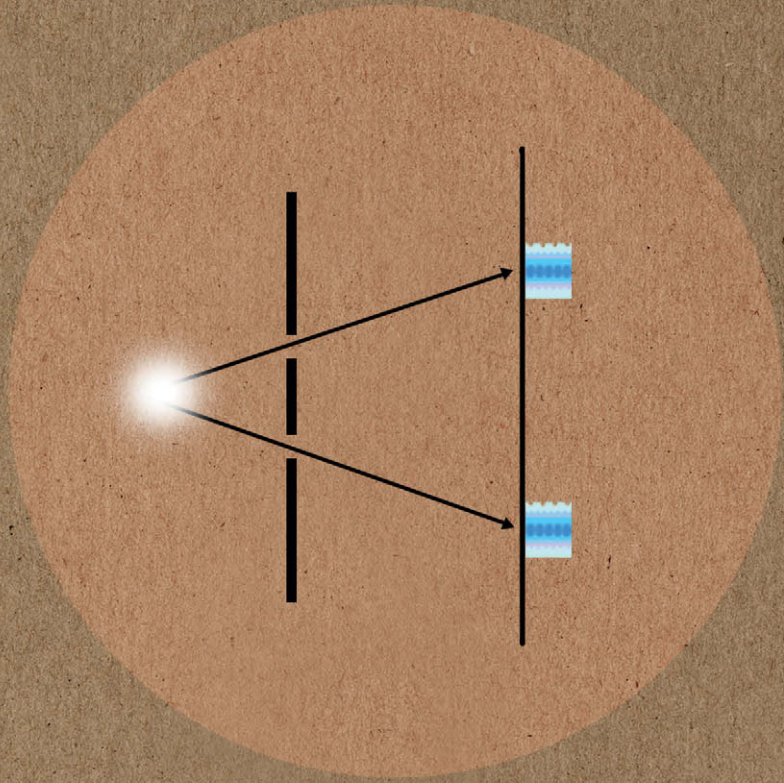
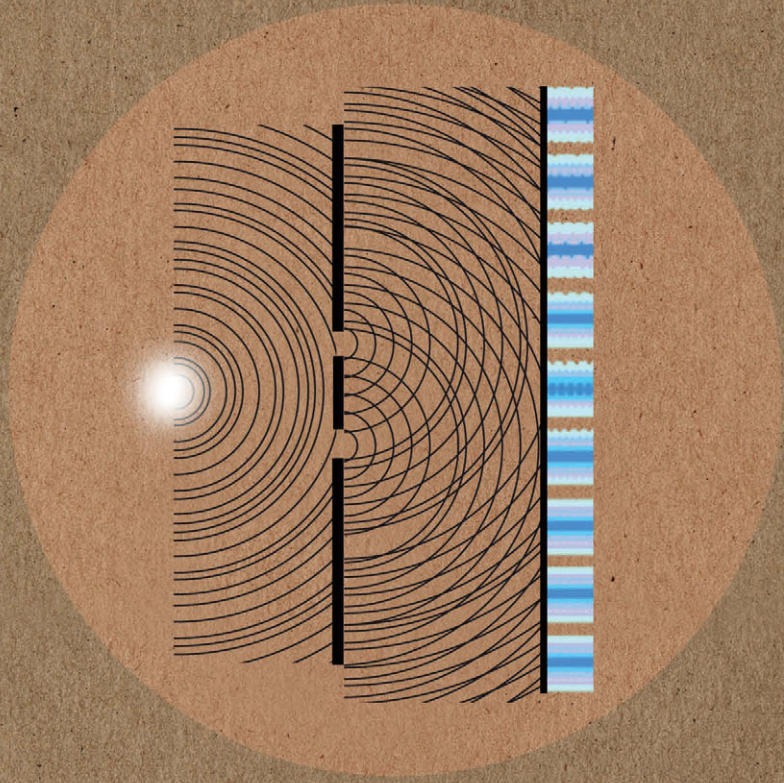
ДЭВИД МЕРМИН
(1935)

Физик, выразивший смысл копенгагенской интерпретации фразой «Заткнись и вычислай!»

АВТОР СТАТЬИ

Филип Болл

*Согласно принципу
дополнительности
свет может вести
себя и как волны
(наверху), и как
частицы (внизу),
но только
не одновременно.*



ИНТЕРПРЕТАЦИЯ БОМА

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Бом попытался устранить из квантовой механики элемент случайности, бросив вызов общепризнанной теории.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Если реальность действительно построена по жесткому причинно-следственному принципу, то всё в этом мире предопределено строгими физическими законами, включая и деятельность нашего мозга. Может ли в таком мире существовать свобода воли?

Существует и иная, альтернативная копенгагенской, интерпретация того, что происходит при попытке измерить квантовую систему, отчего волновая функция коллапсирует. Она утверждает, что такой проблемы в квантовой физике нет, потому что в любое отдельное мгновение частицы находятся в одной определенной точке пространства, даже если никто за ними не наблюдает. Например, в эксперименте с двойной щелью частицы не проходят одновременно через две щели, каждая частица проходит через одну щель. В этой модели волновая функция служит способом вычислить распределение частиц под конец эксперимента, а кажущийся коллапс волновой функции — это всего лишь результат отдельного измерения в отдельный момент времени по отношению к отдельным дискретным частицам, которые уже проследовали по определенной траектории. Такой причинно-следственный детерминизм в квантовой теории противоречит более распространенным вероятностным трактовкам. Этот радикальный взгляд называется интерпретацией Бом в честь сформулировавшего его Дэвида Бом, физика-теоретика американского происхождения.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

КОПЕНГАГЕНСКАЯ
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ
(с. 84)

МНОГОМИРОВАЯ
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ
(с. 92)

ПАРАДОКС Э. П. Р.
(с. 98)

НЕРАВЕНСТВО БЕЛЛА
(с. 100)

3-СЕКУНДНАЯ БИОГРАФИЯ

ЛУИ ДЕ БРОЙЛЬ
(1892—1987)

Физик, основоположник
детерминистского подхода
в квантовой механике

АВТОР СТАТЬИ

Леон Клиффорд

*Интерпретация Бом
возвращает к жизни
модель Вселенной,
как «заводного
механизма»,
в котором всё
предопределено.*



20 декабря 1917 года

Родился в Уилкс-Барре, штат Пенсильвания, США

1939

Получает степень бакалавра в колледже штата Пенсильвания

1940

Поступает в аспирантуру Калифорнийского университета в Беркли под началом Роберта Оппенгеймера

1943

Получает степень доктора по физике за исследование ядерного рассеивания. Занимается вычислениями для Манхэттенского проекта.

1947

Переезжает в Принстон, где становится ассистент-профессором, сотрудничает с Альбертом Эйнштейном и занимается исследованиями в области плазмы, а также квантовой механикой

1949

Открывает закон диффузии плазмы в магнитных полях, ныне называемой бомовской диффузией

1951

Переезжает в Бразилию и публикует свою первую книгу «Квантовая теория»

1957

Переезжает в Великобританию и публикует книгу «Причинно-следственная связь и случайность в современной физике»

1959

Вместе с Якиром Аароновым открывает эффект Ааронова — Бома, доказывающий, что электромагнитный потенциал реальность, а не просто математическая условность

1980

Публикует книгу «Целостность и скрытый порядок», в которой излагает идеи о глубинных принципах строения Вселенной

1990

Избран членом Королевского общества

27 октября 1992 года

Умирает в Лондоне

1993

Посмертно выходит книга «Нераздельная Вселенная: Онтологическая интерпретация квантовой теории», написанная в соавторстве с Бейзилем Хайли, в которой излагается его интерпретация



ДЭВИД БОМ

Жизнь Дэвида Бома, подвергшего сомнению копенгагенскую интерпретацию, прошла в постоянных поисках глубинного порядка мироздания. Эти поиски побудили его заняться квантовой механикой, в поздние годы заинтересовали восточным мистицизмом, а в 1930-е годы склонили к поддержке коммунизма, из-за чего ему и пришлось покинуть Соединенные Штаты, свою родину, и остаток жизни провести за границей.

В 1949 году Бом отказался свидетельствовать в конгрессе США против своего бывшего научного руководителя Роберта Оппенгеймера, подозреваемого в симпатиях к коммунизму. Бома арестовали и предъявили обвинение в неуважении к конгрессу. Позже его оправдали, но руководство Принстона успело его уволить. В 1951 году Бом уехал в Бразилию, а в 1955 году переехал в Израиль. Окончательно он осел в Великобритании в 1957 году, а в 1961 году стал профессором теоретической физики в Брикбекском колледже Лондонского университета, где в подробностях разработал свою интерпретацию квантовой теории.

На взгляды Бома повлияло его знакомство с двумя выдающимися личностями: физиком Альбертом Эйнштейном в Принстоне и философом Джидду Кришнамурти в Лондоне; оба этих человека по-своему помогли ему искать порядок в науке и обществе. Упрямое нежелание Эйн-

штейна соглашаться с основными постулатами квантовой физики и его высказывание «Бог не играет в кости», несомненно, нашли отклик в душе молодого Бома, а идеи Кришнамурти о единстве всего сущего заставили задуматься о философском осмыслении теории.

Бом пришел к мнению, что в основе Вселенной лежит некий глубинный принцип и что воспринимаемый нами мир сродни призраку настоящего мира, иллюзии, за которой прячется реальность. Бом считал, что к реальности на короткое время можно прикоснуться лишь тогда, когда сознание освобождается от различных ловушек, созданных в процессе мышления. Согласно его интерпретации, наблюдаемая нами Вселенная — Вселенная времени, пространства, частиц и квантовой механики — естественным образом вырастает из этой глубинной реальности, которую он называл скрытым порядком.

В результате таких размышлений Бом создал новую интерпретацию квантовой механики, в которой волновая функция описывает всю Вселенную, эволюционирует согласно уравнению Шрёдингера и по своей природе детерминистична, то есть определяет траекторию каждой существующей частицы. Такой причинно-следственный детерминистский подход ярко контрастирует с вероятностным толкованием копенгагенской интерпретации.

Леон Клиффорд

КОЛЛАПС СОЗНАНИЯ

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Похоже, что на квантовый мир можно повлиять одним лишь взглядом на него, но требуется ли для этого сознание?

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Возможность того, что наше сознание каким-то образом взаимодействует с квантовым миром, поднимает вопрос о том, не может ли наше сознание само быть квантовым явлением. В конце концов, наш мозг состоит из атомов, и по нему идут электрические сигналы, подчиняющиеся законам физики. Сможет ли квантовая механика когда-нибудь раскрыть загадку человеческого сознания?

При попытке измерить состояние квантовой системы, волновая функция коллапсирует, и из всех возможных состояний квантовой системы наблюдается только одно. Этот феномен привел к формулированию различных интерпретаций квантовой механики — копенгагенской, многомировой и интерпретации Боба. Но остается вопрос — что заставляет волновую функцию коллапсировать, и в какой именно момент процесса измерения происходит действительный коллапс. Среди возможных предположений высказывалось и такое (ныне уже широко не разделяемое), согласно которому коллапс происходит только тогда, когда в процессе участвует сознательный наблюдатель. Сознательный наблюдатель может воспринимать окружающий мир только одним определенным способом, и сам он одновременно не может находиться в нескольких состояниях; именно из-за того, что сознание вынуждено находиться в одном определенном состоянии, и происходит коллапс волновой функции. Для иллюстрации этой идеи физик Юджин Вигнер предложил аналог мысленного эксперимента Шрёдингера с котом, в котором вместе с котом в ящик помещают друга наблюдателя. Вигнер предположил, что наличие сознания у друга заставит волновую функцию коллапсировать внутри ящика и определить состояние кота — живого или мертвого.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

КОТ ШРЁДИНГЕРА
(с. 46)

КОЛЛАПС ВОЛНОВОЙ
ФУНКЦИИ
(с. 50)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

ЮДЖИН ВИГНЕР
(1902—1995)

Венгерский физик, первый предположил, что коллапс волновой функции происходит в результате взаимодействия с нашим сознанием

ДЖОН ФОН НЕЙМАН
(1903—1957)

Венгерский математик

АВТОР СТАТЬИ

Леон Клиффорд

Некоторые физики предположили, что для коллапса волновой функции требуется сознательный наблюдатель, вроде человека.



МНОГОМИРОВАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Теория, которая ныне носит название «многомировой интерпретации», предполагает существование бесконечного числа параллельных Вселенных.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Если многомировая интерпретация верна, то парадокс кота Шрёдингера уже не является парадоксом. В одном мире кот жив, а в другом мертв. В одном и том же мире он не может быть одновременно живым и мертвым. Все возможные результаты квантовых состояний существуют в своих ответвлениях реальности. Но многие физики считают, что сложность многомировой интерпретации, требующей появления нового мира всякий раз, как одна-единственная частица во Вселенной меняет свое поведение, слишком большая плата за преодоление странностей копенгагенской интерпретации.

Многие физики соглашаются

с копенгагенской интерпретацией квантовой физики, согласно которой частицы действительно могут находиться более чем в одном состоянии одновременно и что волна вероятности, предсказывающая их положение в пространстве, позволяет им вести себя так, как если бы они находились в нескольких точках сразу. Но Хью Эверетт решил объяснить странное поведение квантовых частиц каким-нибудь более рациональным и логичным образом. В своей докторской диссертации он предложил теорию, которая и определила его научную карьеру, — многомировую интерпретацию. Из нее исключается понятие коллапса волновой функции, приводящего квантовую систему к какому-то одному наблюдаемому состоянию. Вместо этого каждый раз, как квантовая частица получает возможность находиться в разных состояниях, происходит расщепление Вселенной. В одной версии Вселенной частица находится в одном состоянии, а в другой версии — в другом. В каждой версии Вселенной частица следует по одной траектории. Это значит, что можно уже не ломать голову по поводу того, каким образом фотон или электрон интерферируют сами с собой, проходя через две щели — в одной Вселенной частица проходит через одну щель, а в другой — через другую.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

КОТ ШРЁДИНГЕРА
(с. 46)

КОПЕНГАГЕНСКАЯ
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ
(с. 84)

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ БОМА
(с. 86)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

ХЬЮ ЭВЕРЕТТ III
(1930—1982)

Американский физик,
автор многомировой
интерпретации

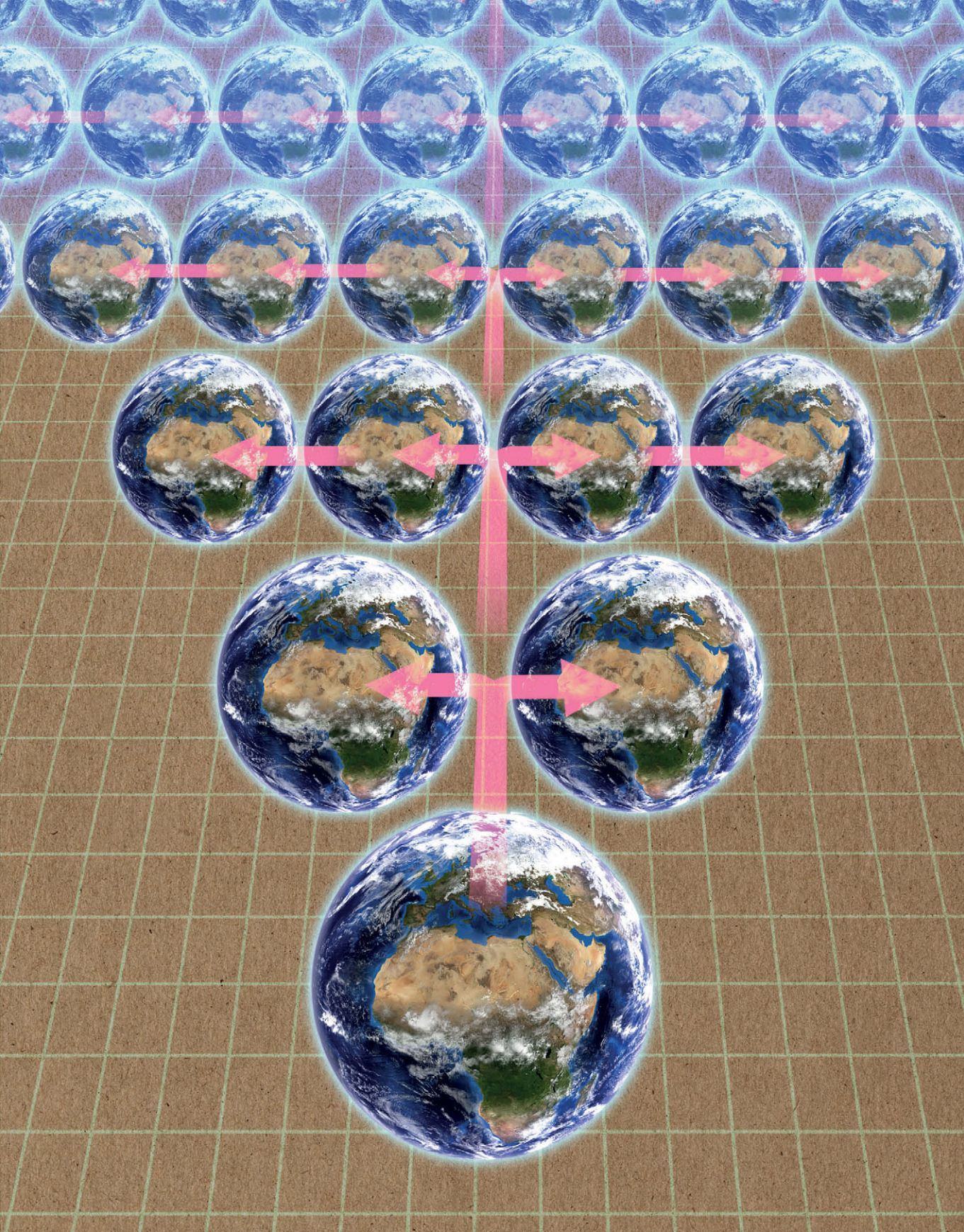
БРАЙС ДЕВИТТ
(1923—2004)

Американский физик

АВТОР СТАТЬИ

Брайан Клегг

Многомировая интерпретация: всякий раз, когда есть вероятность более чем одного исхода события на квантовом уровне, появляются несколько миров.



КВАНТОВАЯ ЗАПУТАННОСТЬ



КВАНТОВАЯ ЗАПУТАННОСТЬ

ГЛОССАРИЙ

Бит

Сокращение от английского выражения *binary digit* («двоичное число»).

Основная единица информации, принимающая значение 0 или 1.

Квантовая запутанность

Фундаментальное положение квантовой теории: две (или более) квантовые частицы могут быть связаны (сцеплены или «запутаны») между собой таким образом, что при изменении состояния одной частицы мгновенно меняется и состояние другой частицы, на каком бы расстоянии друг от друга они не находились.

Эйнштейн считал, что такое невозможно, поскольку в таком случае «обмен информацией» между этими частицами осуществлялся бы быстрее скорости света; но эксперименты подтвердили верность этого положения.

Квантовые точки

Наночастицы в полупроводниках, действующие, как искусственные атомы. Квантовые точки применяют при производстве разных квантовых устройств, особенно электроники и солнечных фотоэлементов; в качестве кубитов они используются в квантовых компьютерах.

Кубит

Эквивалент бита в квантовых компьютерах. Если бит может принимать значения 0 или 1,

то кубит может находиться в суперпозиции состояний, то есть с какой-то вероятностью находиться в состоянии 1 или 0. Кубиты также могут быть связаны («запутаны») друг с другом, что увеличивает число состояний, поэтому по сравнению с тем же числом битов, кубиты обрабатывают гораздо больше информации.

Магнитно-резонансный томограф (МРТ)

Медицинское устройство, ранее называемое «ядерным магнитно-резонансным сканером», в котором мощные сверхпроводящие магниты используются для изменения квантового спина протонов в ядрах водорода, содержащихся в молекулах воды, из которой в большой степени состоят все живые организмы. При выключении магнитного поля протоны возвращаются в исходное состояние, а разница в энергии высвобождается в виде фотона, который регистрируют датчики.

Микроволновый

(сверхвысокочастотный) резонатор

Металлическая камера, в которой происходят электромагнитные колебания микроволновой части спектра. Камера действует, как резонатор, подобно тому, как в случае со звуковыми волнами вибрирует струна определенной длины, только в резонаторе между двумя металлическими стенками вибрирует электромагнитная волна определенной длины.

Одноразовый блокнот

Система шифрования, разработанная в 1918 году. Каждая буква шифруется путем добавления к числовому эквиваленту этой буквы определенного случайного числа. Конечное послание носит случайный характер, и потому его невозможно расшифровать. Но широкого применения этот метод не нашел, потому что список случайных чисел («блокнот») должен быть известен обеим сторонам, а в процессе передачи его могут перехватить.

Принцип локального реализма

Концепция, согласно которой квантовые частицы оказывают влияние лишь на расположенные поблизости от них другие частицы с реальными параметрами. Мысленный эксперимент Эйнштейна — Подольского — Розена был попыткой доказать абсурдность некоторых положений квантовой теории, согласно которым принцип локального реализма для квантовых частиц оказывается неприменимым.

Скрытые параметры

Эйнштейн и некоторые другие физики сомневались в вероятностной природе квантовой теории. Они считали, что существуют некие параметры состояния частиц, которые невозможно измерить, но которые, тем не менее, носят точный, а не вероятностный характер.

Такие неизмеримые, но точные параметры называются скрытыми параметрами.

Сохранение импульса

Импульс равен произведению массы тела на его скорость. Импульс всех тел или частиц системы постоянен, поэтому если, например, статичная частица (с нулевым импульсом) делится на две движущиеся частицы, то они должны обладать равными по величине, но противоположными импульсами.

Суперпозиция

Когда квантовая частица может находиться, скажем, в двух вероятных состояниях, говорят о том, что она не находится в каком-то конкретном состоянии, а находится в состоянии суперпозиции. При измерении ее свойств состояние принимает какую-то конкретную форму, и говорят о том, что суперпозиция «коллапсирует» в конкретное состояние. Частицу в состоянии суперпозиции можно сравнить с монеткой, которую мы подбросили, но еще не посмотрели на результат этого броска. Отличие здесь в том, что монетка действительно находится в каком-то конкретном состоянии («орел» или «решка»), даже если мы на нее не смотрим. Но у квантовой частицы нет конкретных показателей, а только вероятность, то есть суперпозиция.

Шифрование

Использование различных систем кодировок для сокрытия информации.

ПАРАДОКС Э. П. Р.

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ

ЗА 3 СЕКУНДЫ

ЭПР-парадокс должен был доказать абсурдность квантовой теории, но эксперименты показали, что Эйнштейн был неправ.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Формулировка ЭПР-парадокса может немного сбивать с толку, поскольку в ней говорится об измерении сразу двух параметров, импульса и положения частицы, что служит напоминанием о принципе неопределенности. Но суть ЭПР-парадокса осталась бы неизменной, если бы речь шла и только об одном параметре. Когда на это указал Шрёдингер, сказав, что смысл такого мысленного эксперимента не в измерении сразу двух параметров, а в «мгновенной» передаче информации о параметре, Эйнштейн ответил: «Мне на это совершенно наплевать».

В 1935 году Эйнштейн в сотрудничестве с более молодыми коллегами Борисом Подольским и Натаном Розеном написал статью, в которой надеялся развеять ошибочные, по его мнению, положения квантовой теории. В статье, озаглавленной «Можно ли считать квантово-механическое описание физической реальности полным?» речь шла о мысленном эксперименте, или парадоксе, который теперь называется парадоксом Эйнштейна — Подольского — Розена (ЭПР-парадоксом). Суть его состоит в том, что существует частица, распадающаяся на две частицы, разлетающиеся в противоположных направлениях. Квантовая теория утверждает, что через какое-то время для этих частиц будет неизвестен их точный импульс, а лишь известна вероятность того, что импульс примет какие-то значения. Допустим, мы измеряем импульс одной частицы, и он принимает конкретное значение. Как бы далеко не разошлись друг от друга эти частицы, согласно закону сохранения импульса, импульс второй частицы должен быть равен импульсу первой. Измерив координаты второй частицы, можно получить оба точных показателя, что, как утверждали авторы статьи, согласно квантовой теории, невозможно. Эйнштейн с коллегами пришли к заключению: «Предполагается, что этого не может допустить никакое разумное определение реальности». Но, как показали эксперименты, Эйнштейн ошибался.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

УРАВНЕНИЕ ШРЁДИНГЕРА (с. 42)

ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ГЕЙЗЕНБЕРГА (с. 48)

НЕРАВЕНСТВО БЕЛЛА (с. 100)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН
(1879—1955)

Физик, внесший немалый вклад в развитие квантовой теории

БОРИС ПОДОЛЬСКИЙ
(1896—1966)

Американский физик, который и сформулировал ЭПР-парадокс

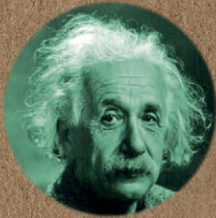
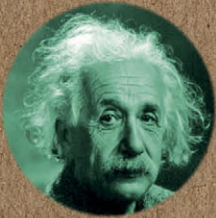
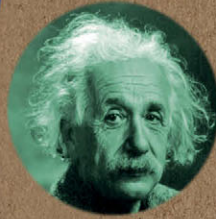
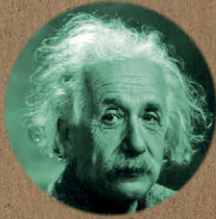
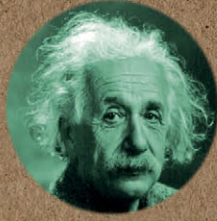
НАТАН РОЗЕН
(1909—1995)

Ученый, принявший участие в формулировке ЭПР-парадокса

АВТОР СТАТЬИ

Брайан Клегг

*Наблюдение
за параметрами
одной частицы
тут же сказывается
на состоянии другой.*



НЕРАВЕНСТВО БЕЛЛА

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Эйнштейн не соглашался с концепцией Шрёдингера о квантовой запутанности, но он не дожидаясь до экспериментального подтверждения идей Шрёдингера.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Запутанные квантовые частицы можно воспринимать, как один объект, даже если их разделяют световые годы. Квантовая запутанность будет играть очень важную роль в компьютерных и шифровальных технологиях будущего. В настоящее время биты информации передаются с помощью электрических импульсов, но кубиты будут сцеплены между собой на уровне субатомных частиц.

Основная идея парадокса о коте Шрёдингера заключается в том, что возможна суперпозиция квантовых состояний, то есть, и ядра атома, и кот в ящике могут находиться в двух состояниях одновременно. Если открыть коробку, то будет видно, умер кот или еще живой, а также можно узнать, распался атом или еще нет. Выражаясь терминами квантовой физики, кот и атомное ядро «запутаны», или «сцеплены», между собой. Обычно запутанными бывают две идентичные частицы, созданные в результате одного процесса; они остаются сцепленными между собой, даже когда удалятся на большое расстояние. Обе они находятся в суперпозиции состояний, но если измерить одну из них, то тут же можно определить и состояние другой частицы. Эйнштейн утверждал, что если такие частицы удалены друг от друга на большое расстояние, то физическое взаимодействие между ними должно осуществляться быстрее скорости света, что противоречит теории относительности. В 1964 году Джон Белл доказал, что можно провести эксперимент, в ходе которого удастся подтвердить или опровергнуть наличие «скрытых параметров», то есть параметров, теоретически поддающихся измерению до разделения частиц; такой эксперимент также может подтвердить, действительно ли имеет место запутанность. В 1984 году Ален Аспе провел такой эксперимент на фотонах и получил экспериментальное доказательство запутанности.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

КОТ ШРЁДИНГЕРА
(с. 46)

КОПЕНГАГЕНСКАЯ
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ
(с. 84)

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ БОМА
(с. 86)

КВАНТОВЫЕ
КОМПЬЮТЕРЫ
(с. 108)

3-СЕКУНДНАЯ БИОГРАФИЯ

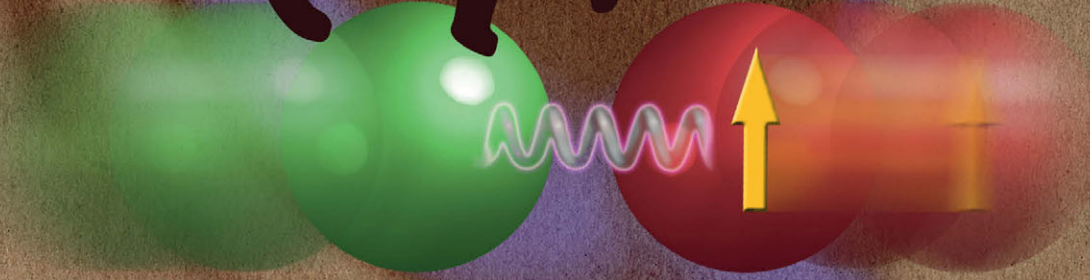
АЛЕН АСПЕ
(1947)

Французский физик,
продемонстрировавший
квантовую запутанность

АВТОР СТАТЬИ

Александр Хеллеманс

Многострадальный кот в мысленном эксперименте Шрёдингера «сцеплен» с ядром распадающегося атома.





28 июня 1928 года

Родился в Белфасте в семье Джона Белла и Энни Браунли

1948

Заканчивает обучение в Королевском университете со специализацией в экспериментальной физике

1949

Получает диплом по математической физике в Королевском университете и поступает на работу в Британский департамент исследований атомной энергии в Харвелле

1954

Сочетается браком с Мэри Росс

1956

Защищает докторскую диссертацию в Бирмингемском университете

1960

Переезжает работать в ЦЕРН под Женевой

1964

Публикует работу «О парадоксе Эйнштейна — Подольского — Розена», в которой формулирует неравенство, названное его именем

1972

Группа американских ученых проводит первый эксперимент, подтверждающий теорему Белла и доказывающий верность квантовой теории, но их метод сопряжен с некоторыми недостатками

1982

Французский физик Ален Аспе ликвидирует все сомнения и при помощи теоремы Белла доказывает правоту квантовой теории

1987

Избран почетным членом Американской академии искусств и наук

1 октября 1990 года

Умирает в Женеве, Швейцария

2008

Учреждается премия Джона Стюарта Белла за фундаментальные исследования в области квантовой механики

ДЖОН БЕЛЛ

Братья и сестра Джона Белла

бросили школу в 14 лет, так что родные с удивлением восприняли желание юного Стюарта (в семье его звали по среднему имени, чтобы не путать с отцом) поступить в университет и стать ученым. Тем не менее мать поддержала сына в его устремлениях, надеясь, что «профессор» разбогатеет настолько, что «будет носить воскресный костюм всю неделю».

Специальное образование Белл получал в Высшей технической школе Белфаста и Королевском университете. После окончания университета из-за финансовых трудностей он не продолжил занятия, а поступил на работу в Британский департамент исследований атомной энергии в Харвелле. Там он познакомился со своей будущей женой, шотландским физиком Мэри Росс, а позже они вместе переехали на работу в ЦЕРН — Европейский центр атомных исследований под Женевой.

Хотя физика частиц была для Белла основной работой, предоставленный ему в 1963 году творческий отпуск позволил поработать над тем, что всегда занимало его больше всего. Белл с симпатией относился к мнению Эйнштейна, который сомневался в некоторых основных положениях квантовой теории и считал, что под внешней случайностью должна быть какая-то система. Однажды он сказал о квантовой физике: «Мне не хотелось думать, что

я ошибаюсь, но я знал, что все это крайне сомнительно».

«ЭПР-парадокс» показал, что либо в квантовой теории существует огромный пробел, либо принцип локального реализма неверен. Этот принцип утверждает, что физические законы не зависят от случайности и что объекты, находящиеся на больших расстояниях, не взаимодействуют между собой мгновенно. Белл предложил свой мысленный эксперимент, в котором с помощью измерения можно было бы установить, какой из возможных выводов верен. Но он не был экспериментатором и не знал, как провести этот эксперимент на практике, хотя и сформулировал его принципы в своей «теореме Белла», с помощью которой оказалось возможным проверить некоторые из самых важных утверждений квантовой теории. Если бы выяснилось, что результаты эксперимента находятся вне определенных рамок — так называемого «неравенства Белла», — то теорема Белла оказалась бы верной, а принцип локального реализма неверным.

Позднее были проведены эксперименты, подтвердившие то, что Эйнштейн ошибался. Квантовая теория оказалась верной, а принцип локального реализма нарушался. Скоропостижная смерть, наступившая на шестьдесят третьем году жизни, прервала блестящую карьеру замечательного ученого.

Брайан Клегг

КВАНТОВОЕ ШИФРОВАНИЕ

Квантовая теория за 30 секунд

Сколько существует письменность, столько люди пытаются зашифровать письменные послания. Со временем появлялись все более сложные коды и системы, но и их в итоге удавалось взломать. Существует, правда, один полностью надежный метод — так называемый «одноразовый блокнот». К числовому показателю каждой буквы прибавляется случайное число и на выходе получается полностью случайный текст, но его можно расшифровать при помощи ключа. На практике таким методом пользуются редко, потому что ключ легко раздобыть обычными методами разведки. Но квантовая физика позволяет преодолеть эту проблему. Основы квантовой криптографии заложили Чарльз Беннетт и Жиль Brassar, использовавшие в качестве ключа поляризацию отдельных фотонов. Таким образом они получали одноразовую последовательность случайных чисел, но столкнулись с техническими трудностями, из-за которых этот код можно было перехватить. Тем не менее квантовая запутанность позволяет создать ключ, который не существует на момент отсылки сообщения. Обычно случайный характер показателей, передаваемых мгновенно с помощью квантовой запутанности, мешает различным практическим применениям этого явления. Но в данном случае сама случайность служит надежным ключом, позволяющим декодировать сообщение сразу же, как оно было закодировано.

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Квантовые частицы, особенно «сцепленные» между собой, позволяют передавать зашифрованную информацию, поскольку сами же передают свой ключ.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

В 2004 году Антон Цайлингер, один из ведущих физиков-экспериментаторов в области квантового запутывания, продемонстрировал возможности квантового «одноразового блокнота» в эксперименте, превзошедшем по зрелищности все лабораторные испытания. Он проложил 500-метровый кабель по канализации между мэрией и отделением Австрийского банка в Вене и (конечно же с разрешения банка) при помощи закодированного методами квантового шифрования сообщения перевел 3000 евро из фондов мэрии на счет университета.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

КВАНТОВЫЙ СПИН
(с. 38)

ПАРАДОКС Э. П. Р.
(с. 98)

НЕРАВЕНСТВО БЕЛЛА
(с. 100)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

ЧАРЛЬЗ Х. БЕННЕТТ
(1943)

Американский физик и специалист в области информатики

АНТОН ЦАЙЛИНГЕР
(1945)

Австрийский физик, специалист в области квантового запутывания

ЖИЛЬ БРАССАР
(1955)

Франко-канадский ученый, специалист по информатике и криптографии

АВТОР СТАТЬИ

Брайан Клегг

Методы квантового шифрования были использованы во время перевода денег в Вене в 2004 г.



6XHRXVJZ820Yxc
49V1
6TYE8E9E
+EJwQ
DWUw
BDV
ds
84
XB
wPyn
E7nwUm
zEJne673UEU9
6IMMfMORMtXbQ
49V1
6TYE8E9E
+EJwQ
DWUw
BDV
ds
84
XB
wPyn
E7nwUm
zEJne673UEU9
6IMMfMORMtXbQ

КУБИТЫ

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Кубиты не только принимают значение 0 или 1, но и могут находиться одновременно в двух состояниях.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Кубиты — это основа квантовых компьютеров будущего. В качестве кубита может использоваться любая частица или система, принимающая два или более квантовых состояния. Исследователи создают кубиты разными способами. Например, они могут блокировать электроны в квантовых точках и управлять их спином при помощи лазерного пучка. Спином атомных ядер можно управлять при помощи радиоволн, как это делается в магнитно-резонансных томографах. Серж Арош, один из исследователей кубитов, разработал способ хранения информации при помощи фотонов, захваченных в микроволновые резонаторы.

Электроны обладают свойством

под названием «спин» («вращение»), которое может принимать различные значения («по часовой» или «против часовой» стрелки). Спин электрона может меняться под воздействием некоторых материалов с магнитными свойствами. При облучении электронов пучком лазерного света электроны могут оказаться в состоянии суперпозиции, то есть, предположительно, одновременно в нескольких состояниях. В таких случаях вместо указания конкретного спина говорят, что существует вероятность того, что электрон находится в том или ином состоянии. Разным направлениям спина можно присвоить разные показатели, например, 0 и 1, соответствующие показателям обычного компьютерного бита. По аналогии с компьютерными битами такую единицу называют квантовым битом, или «кубитом», но суперпозиция и соответствующие ей вероятности подразумевают, что кубиты могут содержать больше информации, чем обычные биты. Примерами кубитов могут служить фотоны с горизонтальной или вертикальной поляризацией или атомные ядра, принимающие одновременно два спиновых состояния. Суперпозиция — очень деликатное и непостоянное свойство, потому что малейшие возмущения системы приводят к тому, что суперпозиция исчезает и система принимает конкретное состояние — это явление называется декогеренцией.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

КОТ ШРЁДИНГЕРА
(с. 46)

ДЕКОГЕРЕНЦИЯ
(с. 52)

КВАНТОВЫЕ
КОМПЬЮТЕРЫ
(с. 108)

МАГНИТНО-
РЕЗОНАНСНЫЕ
ТОМОГРАФЫ
(с. 124)

КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ
(с. 130)

3-СЕКУНДНАЯ БИОГРАФИЯ

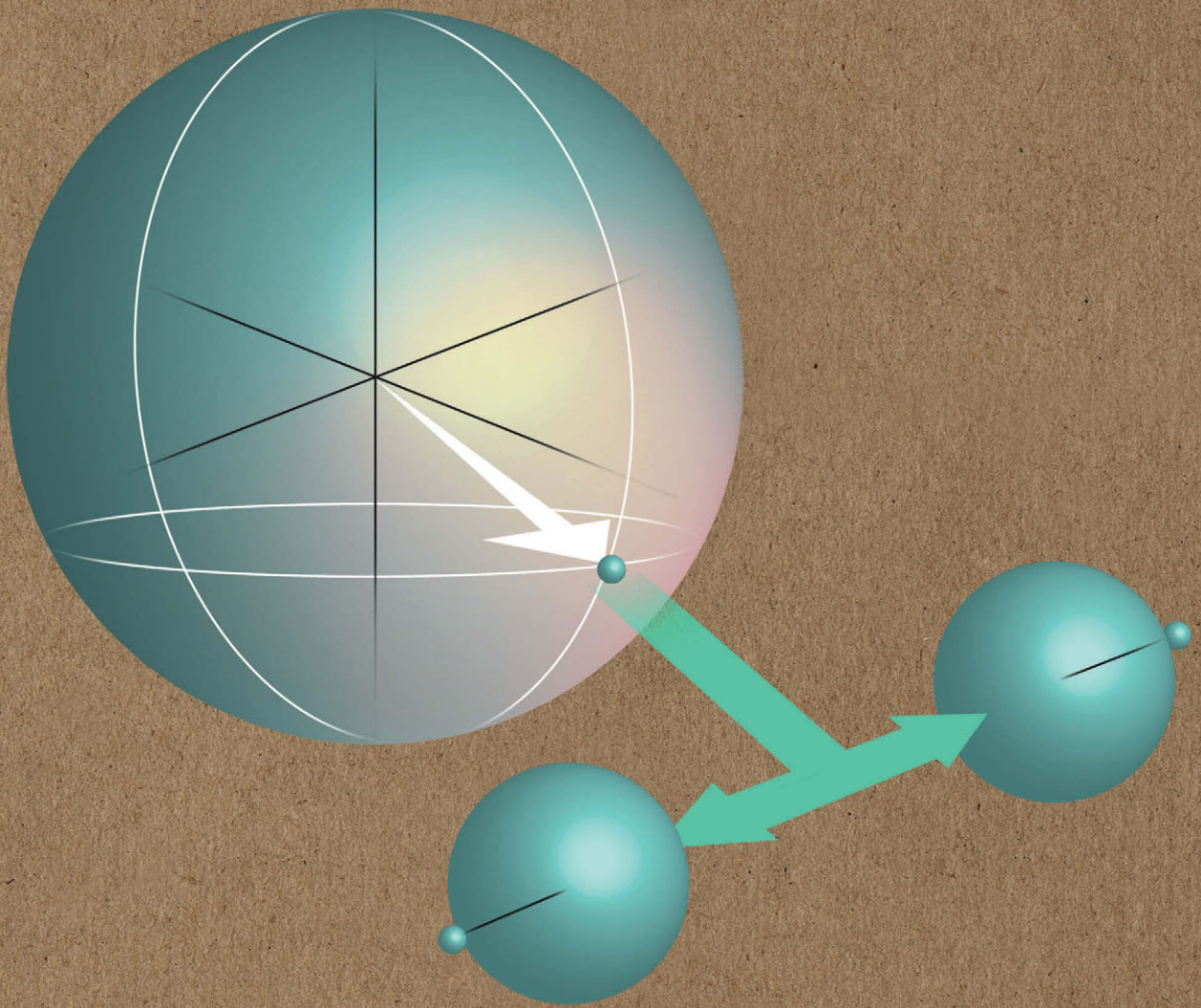
СЕРЖ АРОШ
(1944)

Французский физик, удостоенный в 2012 году Нобелевской премии по физике

АВТОР СТАТЬИ

Александр Хеллеманс

При измерении спин всегда принимает конкретные значения; и эти значения зависят от присущего кубиту вероятностного состояния.



КВАНТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ

Квантовая теория за 30 секунд

Современные компьютеры состоят из миллионов крохотных транзисторов, которые хранят информацию в виде двоичных битов. Наличие электрического заряда соответствует единице, а отсутствие — нулю. Информация в компьютере закодирована в виде двоичных чисел — например, десятичные числа от 0 до 7 представлены в следующем виде: 0000, 0001, 0010, 0011, 0100, 0101, 0111 и 1000. Обычные компьютеры обрабатывают эти числа по очереди, по одному за единицу времени. Но кубиты, которые помимо двух положений, нуля и единицы, могут находиться и в суперпозиции нуля и единицы, могут одновременно кодировать восемь чисел, и эти числа могут обрабатываться одновременно. При увеличении количества кубитов поразительным образом увеличивается и вычислительная мощность квантовых компьютеров. Уже десять кубитов позволяют одновременно обрабатывать 10^{23} числа, двадцать кубитов — проводить миллион вычислений, а 40 кубитов — проводить до миллиона миллионов вычислений одновременно. И хотя для сохранения квантовой запутанности потребуются новые усовершенствованные технологии, исследователи надеются в ближайшем будущем значительно увеличить способности компьютеров.

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Кубиты позволяют значительно увеличить вычислительную мощность квантовых компьютеров.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Ричард Фейнман предположил, что крошечные механические квантовые компьютеры смогут моделировать квантовые системы. Но помимо модуляции сложных физических процессов, они смогут поставить и рекорды в математических вычислениях — например, разложить число из 400 знаков на простые множители за несколько секунд, а это позволит очень быстро взломать код, используемый в банковских системах.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

КВАНТОВЫЙ СПИН (с. 38)
ДЕКОГЕРЕНЦИЯ (с. 52)
НЕРАВЕНСТВО БЕЛЛА (с. 100)
КУБИТЫ (с. 106)
КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ (с. 130)

3-СЕКУНДНАЯ БИОГРАФИЯ

РИЧАРД ФЕЙНМАН
(1918—1988)
Американский физик, высказавший идею создания квантовых компьютеров

АВТОР СТАТЬИ

Александр Хеллеманс

В квантовых компьютерах аналогами обычных битов служат кубиты, позволяющие проводить параллельные вычисления.



КВАНТОВАЯ ТЕЛЕПОРТАЦИЯ

Квантовая теория за 30 секунд

Темной безлунной ночью

2012 года ученые, направив лазерный луч из одного места на Канарских островах в другое, поставили рекорд квантовой телепортации: 144 километра. Фотоны в этом пучке были «сцеплены» между собой благодаря квантовой запутанности, то есть любое действие, произведенное над одним фотоном пары, немедленно влияло на состояние другого фотона из этой пары, на каком бы расстоянии он ни находился. Коллектив исследователей под руководством Антона Цайлингера из Венского университета направил один из «парных» фотонов в приемник, расположенный на другом острове. Затем они использовали эту пару в качестве квантового канала связи для отправки информации о другом квантовом объекте, который был воссоздан на другом конце канала. Само название «квантовая телепортация» звучит, как нечто из области фантастики, поэтому, когда в 1993 году ученый Чарльз Беннетт с коллегами предложили эту концепцию, она сразу же привлекла внимание общественности. В наше время — это серьезное направление практических исследований, имеющее большое значение для развития информатики и телекоммуникаций. С тех пор экспериментально удалось осуществить квантовую телепортацию в разных системах, в том числе в облаках атомов цезия и в электрических цепях.

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

При квантовой телепортации информация о квантовом объекте считывается и передается на новое место с помощью запутанных частиц, служащих крайними точками канала связи.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Квантовая телепортация не позволяет передавать информацию быстрее скорости света, потому что для воссоздания объекта на дальнем конце нужно передать инструкцию о том, как это сделать, по классическим каналам связи. Но при этом обходится запрет на клонирование, то есть воссоздание точной копии квантового объекта. При телепортации информация о квантовом объекте переносится из одной точки в другую, а оригинал уничтожается.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ
ПОЛЯ
(с. 64)

НАЗАД ВО ВРЕМЕНИ
(с. 72)

ТРАНЗИСТОРЫ
(с. 120)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

ЧАРЛЬЗ Б. БЕННЕТТ
(1943)

Американский физик, занимающийся исследованиями на стыке физики и информатики

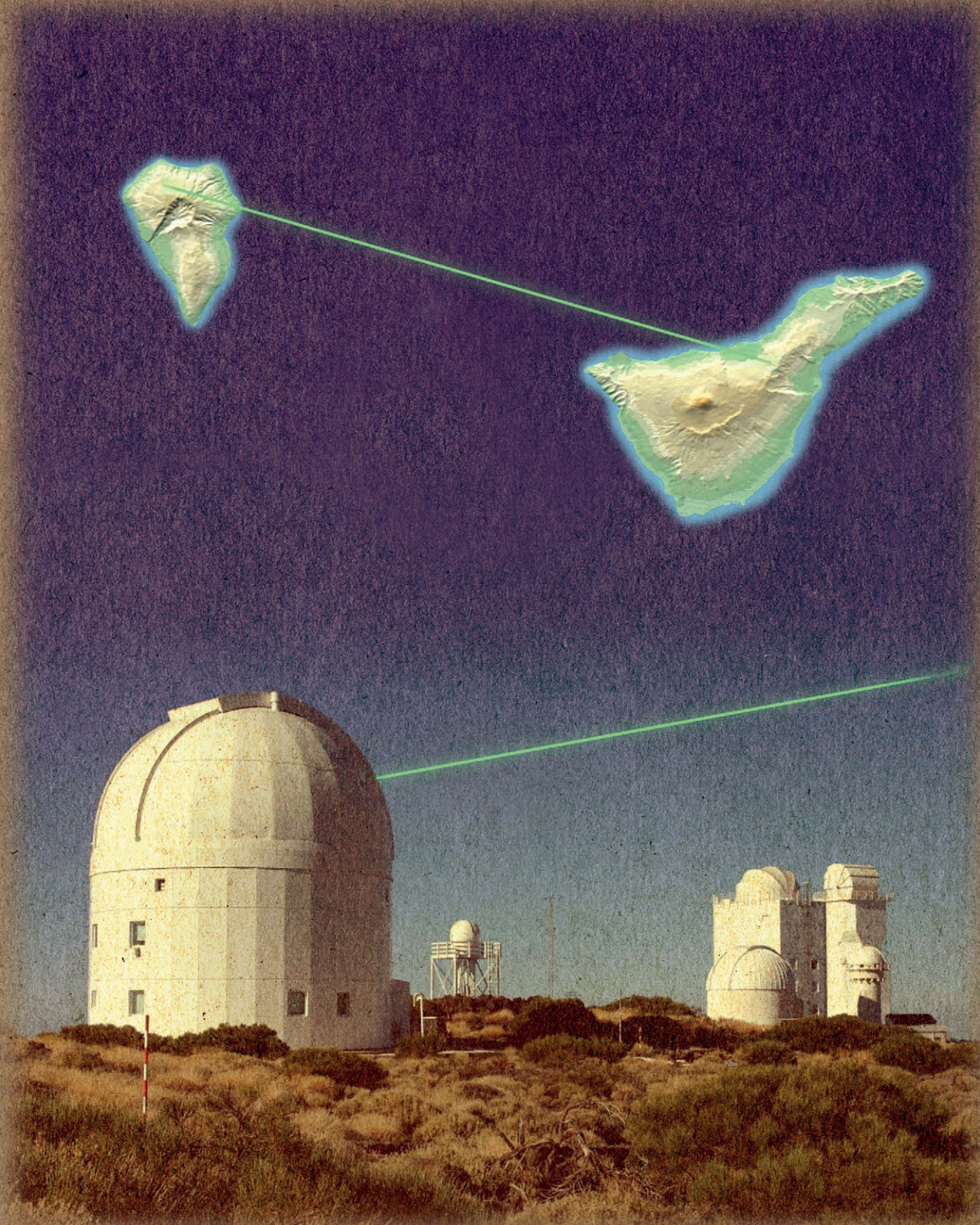
АНТОН ЦАЙЛИНГЕР
(1945)

Австрийский специалист по квантовой физике и руководитель научной группы, занимающейся квантовой телепортацией

АВТОР СТАТЬИ

Софи Хэбден

Квантовая телепортация между Канарскими островами — предшественник квантовой связи между спутниками.



КВАНТОВЫЙ ЭФФЕКТ ЗЕНОНА

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Если за квантовой системой наблюдать достаточно часто, то она никогда не изменит свое состояние.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

С тех пор, как был обнаружен квантовый эффект Зенона, физики пытались найти ему практическое применение. Но, похоже, природа и в этом нас опередила. Согласно одной теории перелетные птицы ориентируются по магнитному полю Земли при помощи пар запутанных электронов в своих глазах. Неясно, правда, каким образом птицы поддерживают состояние запутанности достаточно долго, чтобы с их помощью можно было ориентироваться. Вполне вероятно, что тут задействован квантовый эффект Зенона.

Древнегреческий философ Зенон

сформулировал ряд парадоксов, призванных доказать невозможность движения. В рамках классической физики эти парадоксы легко объясняются, как ошибочные суждения. Но в 1977 году Джордж Сударшан с коллегами из Техасского университета провели параллель между парадоксом Зенона о полете стрелы (которая, якобы, не движется, если наблюдать за ней в каждый отдельный момент времени) и малоизвестным квантовым феноменом, который ныне носит название «квантовый эффект Зенона». Поскольку в реальном мире явления довольно сложны, то лучше проиллюстрировать этот эффект на примере мысленного эксперимента. Вероятность того, что атом радиоактивного вещества распадется в заданный интервал времени, часто считается постоянной, но это не совсем так. Сразу после того, как было произведено наблюдение за нераспавшимся атомом, вероятность его распада равна нулю, хотя она быстро принимает «постоянное» значение. Но если до распада провести еще одно измерение, то вероятность снова возвращается к нулю... и так до бесконечности, пока проводятся наблюдения. То, что чайник, на который смотрят, никогда не закипит, это, конечно шутка, но то, что атом никогда не распадется, если за ним постоянно наблюдать — это доказанный факт!

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

КОЛЛАПС ВОЛНОВОЙ
ФУНКЦИИ
(с. 50)

КОЛЛАПС СОЗНАНИЯ
(с. 90)

КВАНТОВЫЕ
КОМПЬЮТЕРЫ
(с. 108)

КВАНТОВАЯ БИОЛОГИЯ
(с. 150)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

ЗЕНОН ЭЛЕЙСКИЙ
(Ок. 5 века до н. э.)

Древнегреческий
философ

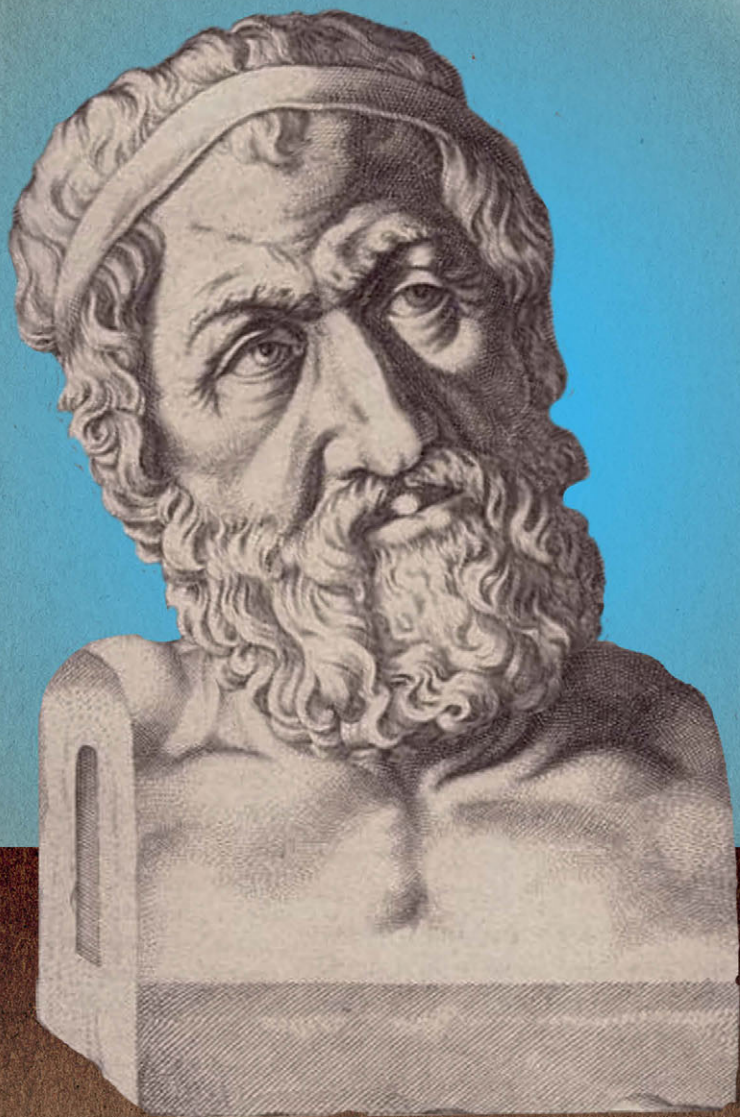
Э. Ч. ДЖОРДЖ СУДАРШАН
(1931)

Индийский физик,
внесший вклад в развитие
квантовой оптики
и фундаментальной
физики

АВТОР СТАТЬИ

Эндрю Мэй

*Рассматривая
движущуюся стрелу
в каждое отдельное
мгновение, мы думаем,
что она не движется.*



КВАНТОВАЯ ФИЗИКА НА ПРАКТИКЕ



КВАНТОВАЯ ФИЗИКА НА ПРАКТИКЕ ГЛОССАРИЙ

Валентная зона

Зона электронов в атоме, связанных с этим атомом и ответственных за многие химические свойства этого атома.

Вынужденное излучение

Явление, лежащее в основе лазера. При облучении светом или под воздействием электрического тока атомы переходят в возбужденное состояние. При столкновении с фотоном атом испускает другой фотон такой же частоты. Отличается от спонтанного излучения, которое происходит самопроизвольно, без воздействия фотонов.

Диодный лазер

Лазер, испускающий свет благодаря вынужденному излучению полупроводника. Используется в телекоммуникациях, в проигрывателях компакт-дисков, лазерных указках и лазерных принтерах.

Допирование

Введение примеси в полупроводник для изменения его электрических свойств. Так легче проследить за тем, чтобы электроны попали в нужную зону проводимости или в валентную зону.

Закон Мура

Наблюдение, сделанное в 1965 году Гордоном Муром, согласно которому вычислительная мощность электронных устройств за год удваивается. В поздних поправках этот срок равен 18 месяцам или двум годам, что довольно точно

описывает развитие электроники, хотя в настоящее время оно замедляется.

Зона проводимости

Диапазон энергии электронов, принадлежащих атомам материала, позволяющей электронам свободно перемещаться по этому материалу.

Интегральная микросхема (также «микрочип»)

Тонкая пластинка полупроводника, обычно кремния, с изготовленной на ней электронной схемой.

Коллиматорная линза

Линза для получения параллельных пучков света.

Контакты Джозефсона

Пара полупроводников, разделенных тонким слоем диэлектрика. При пропускании через них тока возникают высокочастотные электрические колебания, позволяющие чрезвычайно точно измерять напряжение.

Куперовская пара

Пара фермионов (обычно электронов), действующих, как одна частица, и взаимодействующих между собой благодаря колебаниям в материале, через который они проходят. Такие пары ответственны за явление низкотемпературной сверхпроводимости.

Метаматериал

Специально созданный материал с необычными электромагнитными свойствами.

У многих метаматериалов отрицательный показатель преломления, вследствие чего из них получаются необычайно мощные линзы, или с их помощью удастся маскировать объекты благодаря преломлению направленных на них лучей света.

Наночастицы

Крошечные фрагменты материала размером примерно от 1 до 100 нанометров. Физические свойства объектов такого размера сильно отличаются от физических свойств более крупных объектов из того же материала.

ПЗС-камера

Камера на основе прибора с зарядовой связью, состоящего из матрицы микроэлементов, каждый из которых получает электрический заряд при столкновении с фотоном.

Показатель преломления

Степень, с какой преломляется луч света, проходящий через границу одного вещества с другим. Связан со скоростью света в данных веществах.

Полупроводниковый лазер

См. диодный лазер.

Принцип Паули (принцип запрета)

Принцип, согласно которому два фермиона одного типа не могут одновременно находиться в одном квантовом состоянии.

Например, электроны в одном атоме не могут иметь одинаковые квантовые числа. См. стр. 58.

Резонанс

Усиление колебаний в системе при определенной частоте. Резонанс наблюдается в таких объектах, как колокол, органная труба или лазерный оптический резонатор.

Сверхпроводимость

Способность некоторых материалов при крайне низких температурах проводить электрический ток без сопротивления и вытеснять электромагнитное поле.

СКВИД (англ. SQUID)

Сверхпроводящий лазерный интерферометр, в котором при помощи контактов Джозефсона регистрируются мельчайшие изменения напряжения, генерируемого меняющимся магнитным полем.

Фотоника

Наука о контроле и управлении, переключении и усилении света. Оптический аналог электроники.

Фотонные решетки (кристаллы)

Материал с особой структурой, которая на свет действует примерно так же, как полупроводники на электроны. Используются для производства высококачественных линз.

ЛАЗЕР

Квантовая теория за 30 секунд

Лазеры прочно вошли в нашу

повседневную жизнь: с их помощью читают штрих-коды на кассах супермаркетов, и они же служат ключевым компонентом в проигрывателях компакт-дисков. Многие читатели с любопытством узнают, что это квантовые устройства, поскольку их работа зависит от уникальных энергетических уровней атомов. Поглощая энергию в виде света или тепла, электроны в атомах «возбуждаются» и переходят с одних фиксированных орбит на другие. Атом не может постоянно оставаться в возбужденном состоянии, поэтому рано или поздно выделяет энергию в виде фотона света определенной частоты и возвращается в свое основное состояние. Но что произойдет, если фотон столкнется с уже возбужденным атомом? Вместо того чтобы поглотить его, а потом испустить в случайное время и в случайном направлении, возбужденный атом под влиянием своего рода резонанса испускает второй фотон. Этот фотон имеет те же энергию, частоту и импульс, что и первый фотон, то есть они когерентны друг другу. В лазерах атомы приводятся в возбужденное состояние благодаря «накачке» электрическим током, так что число атомов в возбужденном состоянии превышает число атомов в основном состоянии. В процессе отражения от зеркал в оптическом резонаторе поток фотонов усиливается, и так создается более мощный лазерный луч.

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Лазер — это источник света, в котором благодаря вынужденному или индуцированному излучению создается строго упорядоченный поток фотонов с согласованным фронтом импульса.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Лазер, которым орудует Доктор Зло в фильме «Остин Пауэрс», в качестве активного вещества, скорее всего, использует диоксид углерода, потому что он испускает лучи в инфракрасном диапазоне, способные поджаривать всё, на что направлены. Большинство реальных лазеров в электронных устройствах и в телекоммуникациях относятся к типу менее мощных диодных лазеров. Обычно они испускают лучи красного цвета.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

ГИПОТЕЗА ПЛАНКА
О КВАНТАХ
(с. 18)

ФОРМУЛА БАЛЬМЕРА
(с. 22)

АТОМ БОРА
(с. 24)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

ГОРДОН ГОУЛД
(1920—2007)

Американский физик, придумал термин «лазер» (от англ. *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*)

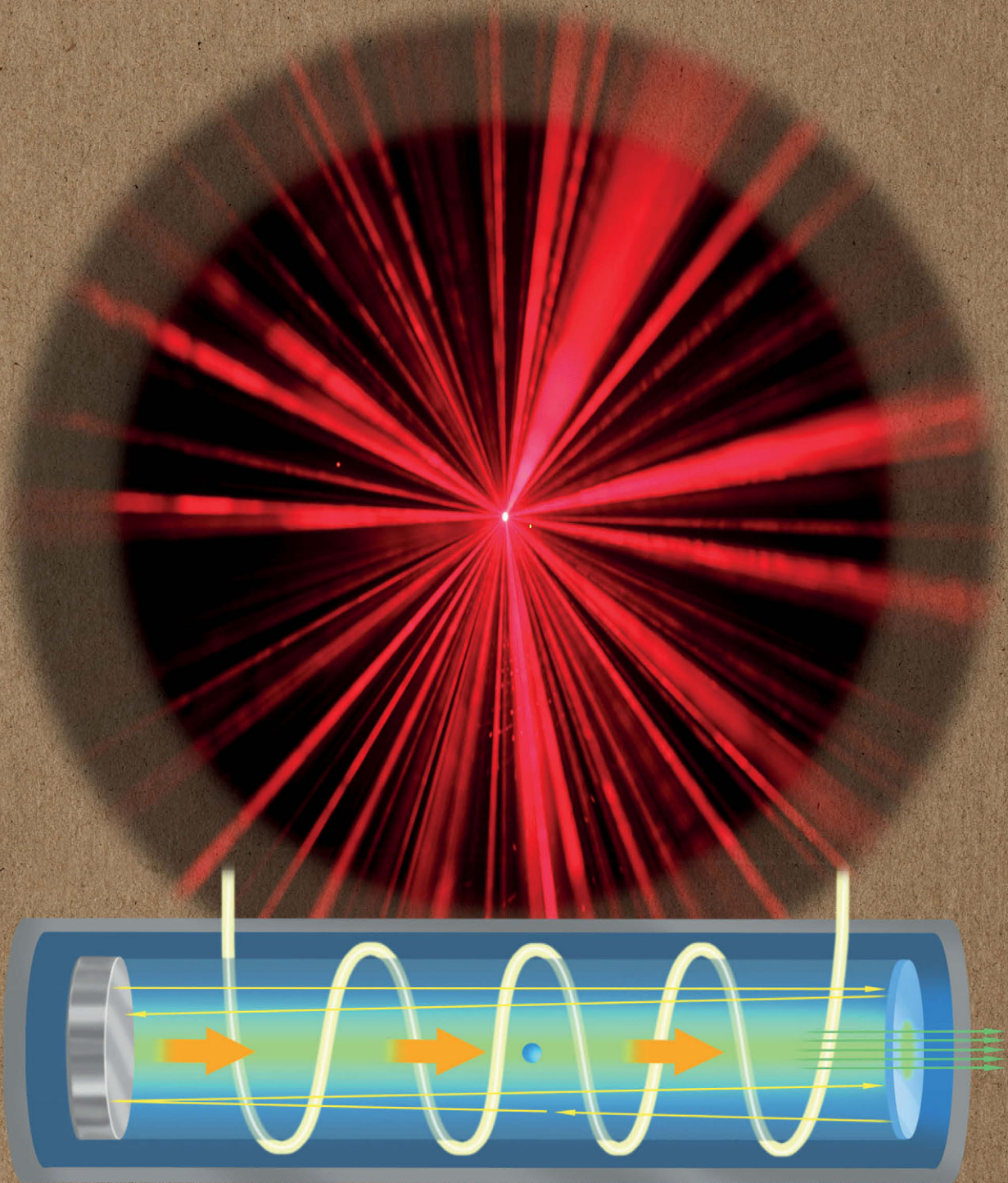
ТЕОДОР МЕЙМАН
(1927—2007)

Американский физик, которому приписывают изобретение первого оптического лазера

АВТОР СТАТЬИ

Софи Хэбден

**В лазерах
используются
оптические
резонаторы.**



ТРАНЗИСТОРЫ

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Действие транзисторов основано на принципе квантизации энергетического состояния электронов в полупроводниковых материалах.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Первые промышленные транзисторы из германия в 1960-х годах стоили несколько долларов каждый и были шириной до 12 мм. Миниатюризация кремниевых транзисторов достигла такой степени, что сейчас на одной интегральной микросхеме их можно разместить до 2 миллиардов по цене 0,0001 цента за штуку. Такое падение цены — одно из следствий закона Мура, согласно которому количество транзисторов на одной микросхеме удваивается каждые 18 месяцев.

Такие необычные явления кван-

товой физики, как неопределенность, суперпозиция и сверхпроводимость, обычно обнаруживаются лишь при определенных условиях, в частности, при сверхнизких температурах. Но последствия дискретной квантовой организации энергетических уровней заметны во многом, например — в связях между атомами и в цветах окружающих нас объектов. Одно из важнейших практических применений такой квантизации — это транзисторы, или электронные устройства из полупроводников, лежащие в основе всех современных компьютерных технологий. Полупроводниковый материал содержит электроны, расположенные в «зоне квантовых энергетических состояний»; зона запрещенной энергии отделяет их от другой зоны электронов, и тока не возникает. Но если электроны получают достаточно энергии, чтобы преодолеть запрещенную зону, то возникнет электрический ток. В обычных температурных условиях получить достаточную энергию удастся лишь отдельным электронам, а это значит, что электрическим током можно управлять при помощи допирования — добавления электронов в «резервуар» или их удаления посредством добавления в полупроводник примесей — или при помощи электромагнитного поля. Таким образом, транзистор, который позволяет контролировать проходящий через него электрический ток, может служить переключателем или усилителем для цифровых электронных схем.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

ЛАЗЕР
(с. 118)

КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ
(с. 130)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

УОЛТЕР БРАТТЕЙН,
ДЖОН БАРДИН,
УИЛЬЯМ ШОКЛИ
(1902—1987, 1908—1991,
1910—1989)

Американские физики, создавшие первый действующий транзистор в 1947 г., за что в 1956 г. были удостоены Нобелевской премии по физике

АВТОР СТАТЬИ

Филип Болл

Транзисторы, позволившие создавать интегральные микросхемы, коренным образом преобразили электронику.

ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Поскольку длина волны электронов меньше длины волны фотонов, то и увеличение электронных микроскопов больше, чем у их оптических аналогов.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

На примере электронного микроскопа заметна двойственная природа электрона. Когда электроны проходят через магнитные линзы, их траектории отклоняются, и они ведут себя, как частицы. Проходя через образец, электроны подвергаются дифракции, то есть «обходят» препятствия, и тем самым ведут себя, как волны. При этом их дифракция меньше, чем дифракция света, и конечное изображение получается четче. Поэтому электронные микроскопы так важны для науки: биологи, например, могут рассматривать различные компоненты клетки, невидимые в оптические микроскопы.

Электронный микроскоп действует примерно по тому же принципу, что и оптический микроскоп. В оптических микроскопах коллиматорные линзы фокусируют свет на стеклянной пластинке с образцом, затем свет попадает в объектив, увеличивающий изображение и фокусирующий его на ПЗС-камере. В электронном микроскопе вместо лучей света и стеклянных линз используются потоки электронов и направляющие их магниты. Нагретый катод испускает электроны, которые затем ускоряются в электрическом поле катодно-лучевой трубки. Магнитный коллиматор фокусирует электроны на образце, а электроны, проходящие сквозь образец, с помощью другого набора магнитных линз фокусируются на флуоресцентном экране и создают видимое нами изображение. Разрешение оптического микроскопа ограничено длиной волны света, а увеличение достигает 2000; всё, что меньше длины волны света, например, вирусы, остается невидимым. Электроны же ведут себя одновременно и как частицы, и как волны. Их длина волны гораздо меньше длины волны света, и потому электронные микроскопы увеличивают до 10 миллионов раз, и с их помощью можно «разглядеть» не только вирусы, но и отдельные атомы.

СОПУТСТВУЮЩАЯ ТЕМА

КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ (с. 28)

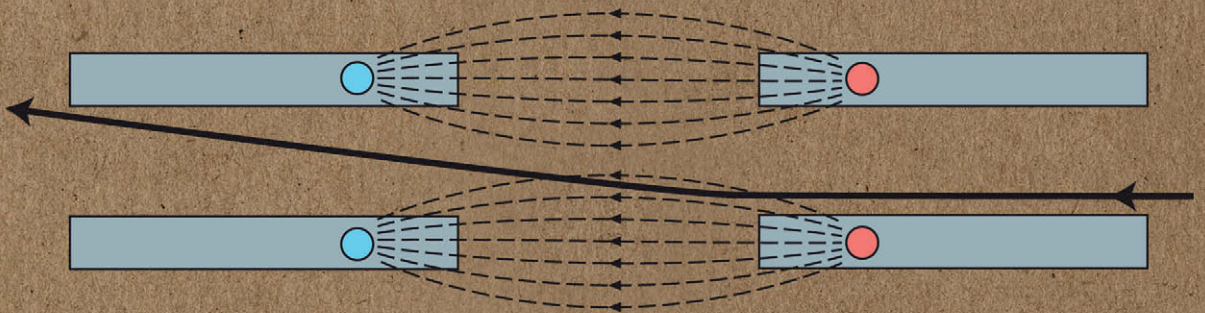
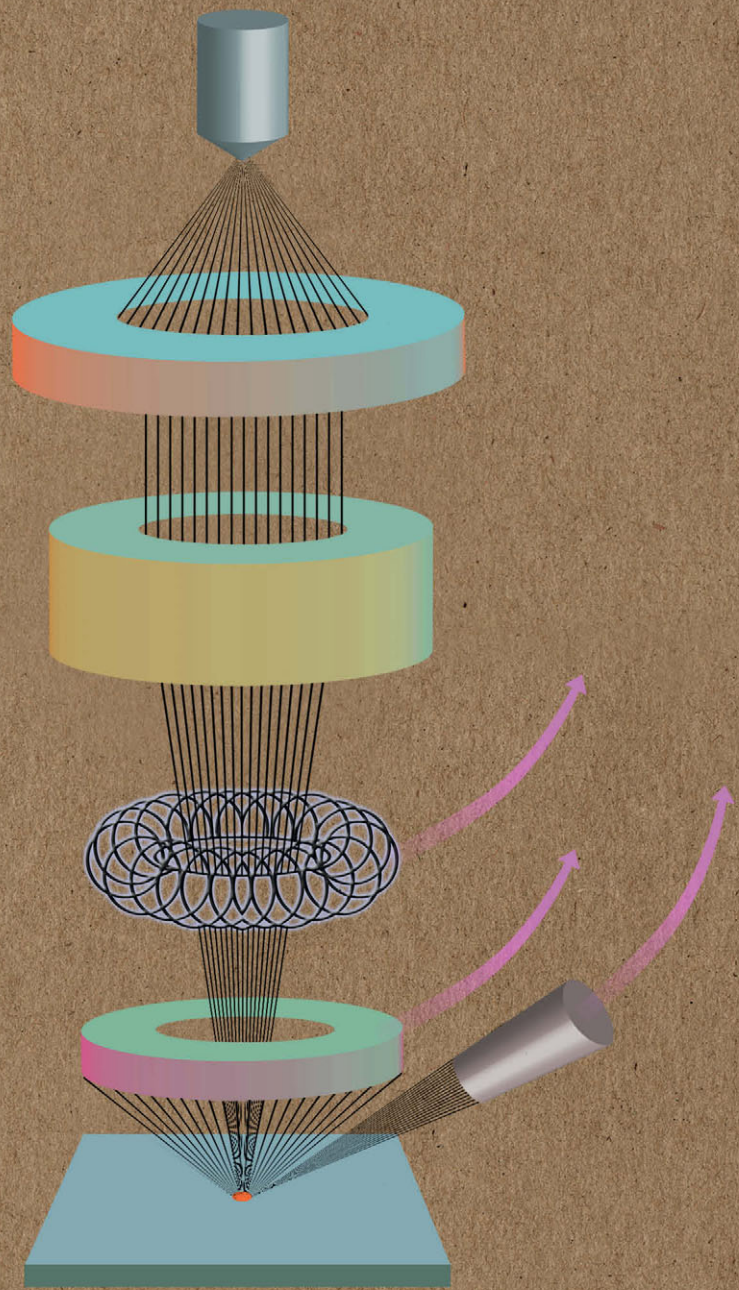
3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

МАКС КНОЛЬ
И ЭРНСТ РУСКА
(1897–1969, 1906–1988)
Немецкие инженер
и физик

АВТОР СТАТЬИ

Александр Хеллеманс

Магнитное поле электронного микроскопа фокусирует потоки электронов, подобно тому как линза фокусирует лучи видимого света.



МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНЫЕ ТОМОГРАФЫ

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Подробные изображения внутренних органов, получаемые с помощью МРТ, коренным образом изменили лечение многих заболеваний.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Разновидность МРТ, известная как функциональный МРТ, или фМРТ, позволяет увидеть, как меняется активность головного мозга, когда мы двигаем той или иной частью тела или рассматриваем изображения. Иногда с помощью фМРТ разрабатывают план операции на мозге, чтобы не задеть важные зоны при удалении злокачественной опухоли или поврежденных участков.

В 1970-х годах различные исследователи, в том числе американский физик Реймонд Дамадиан, американский химик Пол Лотербур и английский физик Питер Мэнсфилд сформулировали и усовершенствовали метод создания изображений с помощью магнитного резонанса. Благодаря этому методу можно нехирургическим путем исследовать мягкие ткани организма и диагностировать самые разнообразные заболевания и повреждения, от рака до разрыва связок. Пациента при этом помещают в камеру, в которой поддерживается магнитное поле, превышающее по напряженности магнитное поле Земли от 30 000 до 60 000 раз. Оно образуется в результате действия сверхпроводимого электромагнита. Наш организм на 65% состоит из воды, а каждый атом водорода в молекулах воды содержит протон со спином, действующий благодаря этому «вращению», как микроскопический магнит. Под действием сильного магнитного поля протоны приобретают определенный спин. Затем пациента облучают радиоволнами, которые меняют спин протонов и, тем самым, их магнитный момент на противоположный. После выключения радиоволн протоны возвращаются в исходное положение, а испускаемые при этом сигналы записываются при помощи электронного оборудования. Компьютеры обрабатывают поступающую информацию и превращают их в изображения, на которых можно разглядеть различные ткани внутри организма.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

КВАНТОВЫЙ СПИН (с. 38)

СВЕРХПРОВОДНИКИ (с. 140)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

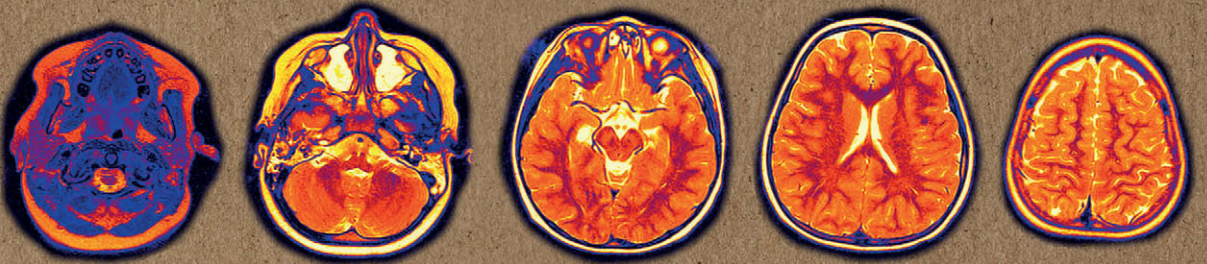
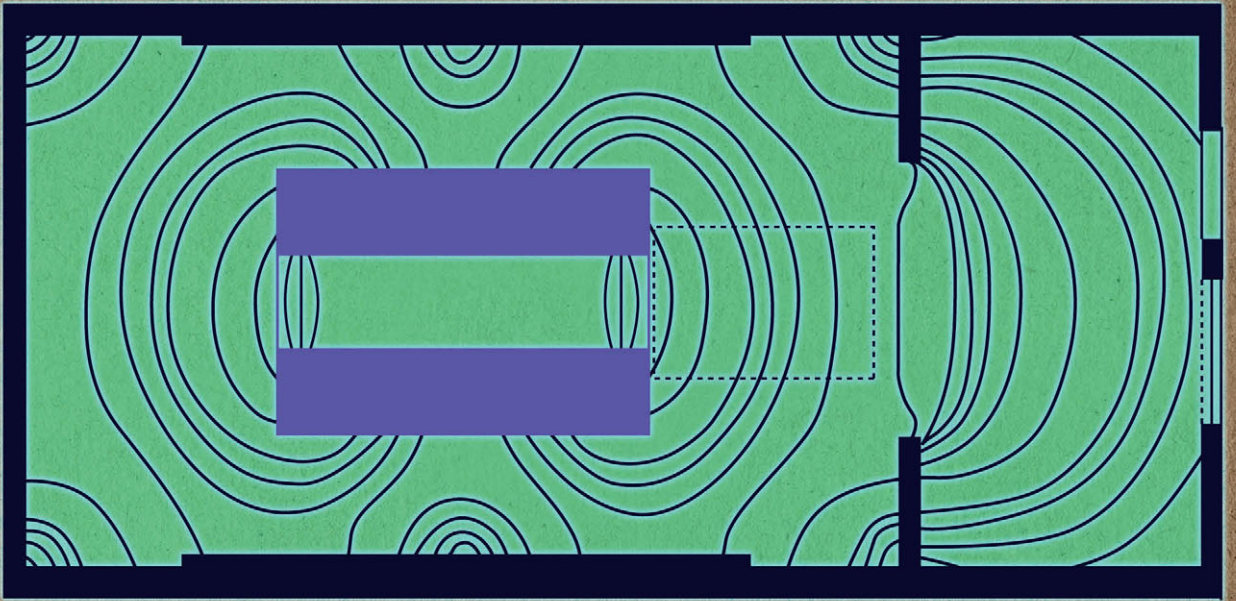
ХЕЙКЕ КАМЕРЛИНГ-ОННЕС (1853—1926)
Голландский физик

ПОЛ ЛОТЕРБУР И ПИТЕР МЭНСФИЛД (1929—2007, 1933)
Ученые, разделившие в 2003 г. Нобелевскую премию за изобретение метода магнитно-резонансной томографии

АВТОР СТАТЬИ

Шэрон Энн Холгейт

МРТ создают изображения внутренних органов благодаря протонам в атомах водорода, которые меняют свой спин под воздействием мощных магнитных полей и радиоволн.



КОНТАКТЫ ДЖОЗЕФСОНА

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Поведение сверхпроводящего тока, проходящего через два разделенных тонким слоем диэлектрика контакта, оказалось весьма полезным на практике.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Поскольку контакты Джозефсона могут использоваться как очень быстрые логические элементы, ученые исследуют их возможное применение при создании сверхбыстрых компьютеров. Любопытное квантовое свойство контактов Джозефсона состоит в том, что в сверхпроводящей цепи может возникать суперпозиция — ток течет одновременно в двух направлениях. В настоящее время ведутся исследования с целью выяснить, как такие крохотные сверхпроводящие цепи можно соединить вместе для создания квантового компьютера.

В 1962 году Брайан Джозефсон предположил, что куперовские пары — пары связанных между собой электронов, которые перемещаются по сверхпроводнику без сопротивления, — могут также туннелировать через непроводящее вещество или через диэлектрический барьер между двумя проводниками. Это явление уже было известно, но в отличие от электронов, перепрыгивающих с одного проводника на другой при комнатной температуре, куперовским парам не требуется магнитное поле для преодоления барьера. Все куперовские пары в сверхпроводнике разделяют одну волновую функцию, и разница в фазе волновой функции с каждой стороны диэлектрического барьера заставляет их спонтанно туннелировать сквозь него. Но если между проводниками установить напряжение, то ток Джозефсона превратится в колебательный ток очень высокой частоты. Поскольку колебания можно измерить с гораздо большей точностью, чем напряжение, то контакты Джозефсона используются в высокоточных вольтметрах. Если контакт Джозефсона входит в замкнутую цепь, то напряжение в нем меняется даже при очень слабом магнитном поле. Подобные устройства, называемые СКВИДами («сверхпроводящий квантовый интерферометр»), регистрируют магнитные поля, генерируемые мозгом человека.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ
(с. 80)
КУБИТЫ
(с. 106)
КВАНТОВЫЕ
КОМПЬЮТЕРЫ
(с. 108)
СВЕРХПРОВОДНИКИ
(с. 140)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

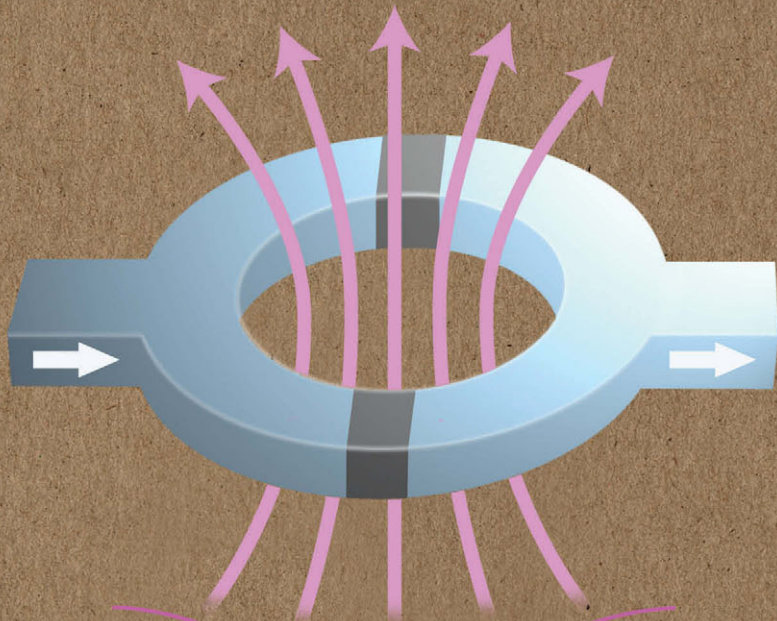
ЛЕО ЭСАКИ И ИВАР ЙЕВЕР
(1925, 1929)

Физики, которые вместе с Брайаном Джозефсоном в 1973 г. разделили Нобелевскую премию за исследования в области туннелирования электронов

АВТОР СТАТЬИ

Александр Хеллеманс

СКВИД может улавливать малейшие колебания магнитных полей, в том числе и генерируемых человеческим мозгом.



4 января 1940 года

Родился в городе Кардифф

1960

Окончил Кембриджский университет по специализации в естественных науках

1962

Публикует в журнале «Физические записки» работу о том, что позже будет названо «эффектом Джозефсона»

1964

Получает степень доктора в Кембриджском университете

1964

Изобретен сверхпроводящий квантовый интерферометр — чрезвычайно чувствительный магнетометр, в котором используются контакты Джозефсона

1965

Работает ассистент-профессором в исследовательском центре Иллинойского университета

1967

Возвращается в Кембридж и занимает пост заместителя директора отдела исследований

1972

Становится старшим лектором по физике в Кембридже

1973

Делит Нобелевскую премию по физике с Лео Эсаки и Иваром Йевером

1974

Становится профессором физики Кембриджского университета

1983

Выступает перед комитетом конгресса США на тему «высших состояний сознания»

1988

Возглавляет проект по объединению разума и материи в Кембридже

2007

Уходит в отставку и прекращает читать лекции, но продолжает заниматься исследованиями



БРАЙАН ДЖОЗЕФСОН

Как и многие другие великие физики, Брайан Джоозефсон с ранних лет схватывал все, связанное с наукой, на лету. Обучаясь в Кембридже, он удивлял преподавателей своими познаниями, и к тому времени, как получил свою первую степень — в удивительно раннем двадцатилетнем возрасте, — он уже успел опубликовать свои первые исследовательские работы. Решив остаться в Кембридже, он стал писать докторскую диссертацию на интересовавшую его тему: явление сверхпроводимости, наблюдаемое при сверхнизких температурах. Еще не закончив работу над диссертацией, он опубликовал свою самую известную статью под названием «Возможные новые эффекты в сверхпроводимом туннелировании». В квантовой теории был известен туннельный эффект, при котором электроны преодолевали, казалось бы, непреодолимый барьер, но Джоозефсон продемонстрировал, к каким неизвестным последствиям может он привести в сверхпроводниках — позже это явление назвали «эффектом Джоозефсона». Это было одно из первых квантовых явлений, которое удалось использовать в макроскопических масштабах, и оно легло в основу ныне хорошо налаженного производства контактов Джоозефсона.

Джоозефсону было всего тридцать три года, когда он в 1973 году разделил Нобелевскую премию по физике с двумя другими исследователя-

ми, работавшими в той же области квантового туннелирования. И хотя Джоозефсон среди них был самым молодым, он получил половину премии, тогда как двое других — по четверти. Полноправным профессором физики в Кембриджском университете Джоозефсон стал лишь на следующий год и после этого занимался преподавательской деятельностью до 2007 года.

К концу 1970-х годов Джоозефсон разочаровался в официальной физике и пришел к мысли, что она не обращает внимания на перспективные области исследований, благодаря которым можно было бы значительно дополнить и усовершенствовать квантовую теорию. Заодно он заинтересовался восточной философией, медитацией и пробуждением сознания. В 1988 году, в том же Кембриджском университете, он основал «Проект объединения разума и материи», в рамках которого затрагивались различные темы, такие, как язык, музыка и интеллект — сами по себе достойные изучения в других научных дисциплинах, но редко становящиеся объектом интереса теоретической физики. В последнее время Джоозефсон писал на явно неакадемические темы, в том числе о телепатии и гомеопатии, что осложнило его отношения с более традиционно настроенными коллегами. Сам Джоозефсон утверждает, что всегда открыт так называемой «еретической науке».

Эндрю Мэй

КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Квантовые точки — это наночастицы, часто размещаемые в субстрате или на активной поверхности, которые обладают квантовыми свойствами, представляющими интерес для технологии.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Способность квантовых точек испускать два электрона одновременно при столкновении с одним фотоном подразумевает, что они могут увеличивать мощность солнечных фотоэлементов. А поскольку их можно настроить на любую частоту спектра, то исследователи выясняют, каким образом их можно использовать в дисплеях и светодиодах.

Один из факторов, ограничивающих дальнейшую миниатюризацию электронных микросхем — это мешающие их работе квантовые эффекты. Например, когда проводники располагаются слишком близко друг к другу, электроны благодаря туннельному эффекту перепрыгивают с одного проводника на другой. Но некоторые исследователи стараются обратить эти эффекты себе на пользу. Они разработали так называемые «квантовые точки» — крошечные наночастицы из полупроводниковых материалов, таких как кремний, селенид кадмия, сульфид кадмия и арсенид индия, — специально предназначенные для использования квантовых эффектов. Эти крошечные частицы обладают размерами в 5–10 атомов (2–10 нанометров) и ведут себя подобно атомам, поэтому их иногда называют «искусственными атомами». Электроны в зоне проводимости начинают занимать дискретные квантовые уровни согласно принципу Паули, а поскольку наночастицы состоят из полупроводниковых материалов, то между зоной проводимости и наивысшей разрешенной зоной наблюдается большой разрыв (запрещенная зона). Фотоны возбуждают электроны в валентной зоне и выталкивают их в зону проводимости. Затем эти электроны испускают фотон и возвращаются в валентную зону. Разницу в энергии между зоной проводимости и зоной валентности можно регулировать, изменяя размеры наночастиц.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

ПРИНЦИП ПАУЛИ
(с. 58)

КВАНТОВЫЕ
КОМПЬЮТЕРЫ
(с. 108)

ТРАНЗИСТОРЫ
(с. 120)

3-СЕКУНДНАЯ БИОГРАФИЯ

ВОЛЬФГАНГ ПАУЛИ
(1900–1958)

Австрийский физик, сформулировал принцип запрета

АВТОР СТАТЬИ

Александр Хеллеманс

*Квантовые точки
можно будет
использовать для
производства
дисплеев небывалой
ранее четкости.*



КВАНТОВАЯ ОПТИКА

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Особые квантовые оптические материалы, такие как метаматериалы и фотонные решетки, позволяют манипулировать фотонами не так, как обычная оптика.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Благодаря отрицательному показателю преломления метаматериалы могут преломлять лучи света вокруг объекта таким образом, что он станет невидимым. Для небольших объектов это уже достижимо, хотя и в ограниченных масштабах, потому что материалы поглощают слишком много света, чтобы объект оставался совсем незаметным. Но разработаны и другие методы, позволяющие либо усилить оптические свойства метаматериалов, либо использовать фотонные кристаллы для дифракции света.

В каком-то смысле можно утверждать, что все оптические устройства работают на квантовом уровне, поскольку взаимодействие между фотонами света и такими объектами, как зеркала и линзы, объясняется в рамках квантовой электродинамики. Но в последнее время наблюдается рост непосредственного применения квантовой теории в оптике, и эту область науки и техники называют иногда «фотоникой». Среди самых захватывающих разработок — квантовые линзы из материалов, в которых фотоны ведут себя не так, как в обычных линзах. Взять для примера метаматериалы. Это вещества сложной структуры, состоящие из слоев решеток или металлических листов с рядами крошечных дырок и обладающие необычными свойствами, например отрицательным показателем преломления, отчего лучи света преломляются самым причудливым образом. Сама структура позволяет метаматериалам фокусироваться на гораздо более мелких объектах, чем традиционные линзы, и из них получаются так называемые «суперлинзы». Другой пример квантовой оптической структуры — фотонная решетка, которая воздействует на фотоны примерно так же, как полупроводник на электроны. В будущем фотонные решетки предполагается использовать для производства оптических компьютеров.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

ОСНОВЫ КЭД
(с. 66)

ДИАГРАММЫ
ФЕЙНМАНА
(с. 70)

ОПТИЧЕСКИЕ ДЕЛИТЕЛИ
ПУЧКА
(с. 78)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

ВИКТОР ВЕСЕЛАГО
(1929)

Российский физик, первым описавший материалы с отрицательным показателем преломления

ДЖОН ПЕНДРИ
(1943)

Английский физик

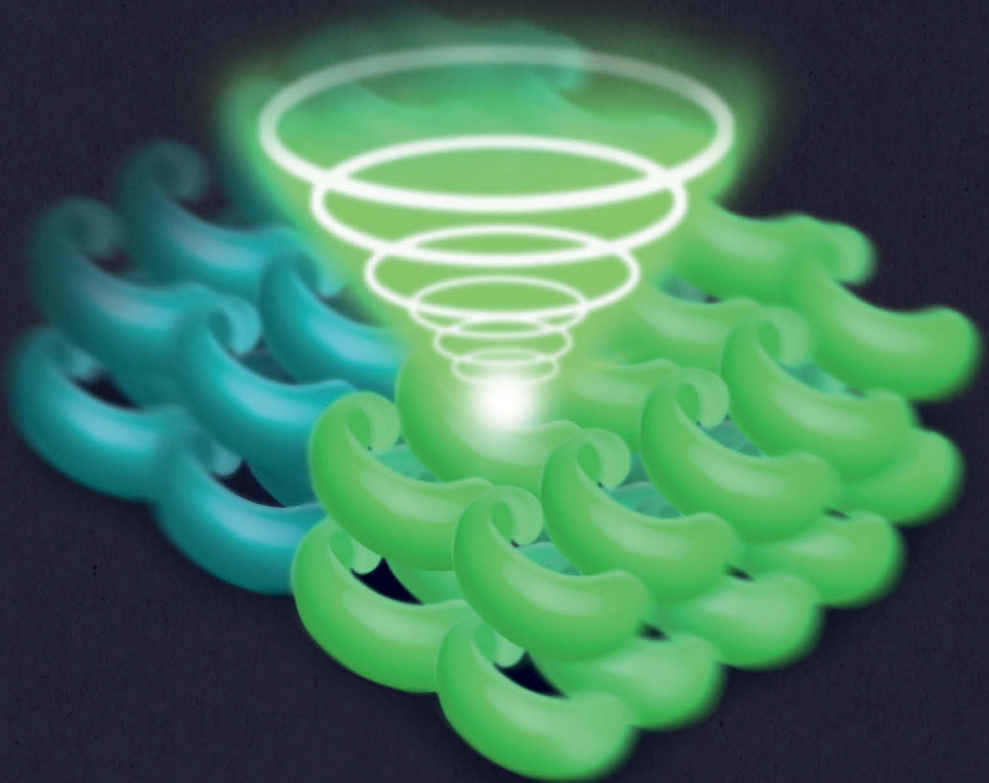
УЛЬФ ЛЕОНАРДТ
(1965)

Немецкий физик, работавший над практической реализацией плащей-невидимок

АВТОР СТАТЬИ

Брайан Клегг

Фотонные решетки пропускают фотоны особым образом.





КВАНТОВЫЕ КРАЙНОСТИ

КВАНТОВЫЕ КРАЙНОСТИ ГЛОССАРИЙ

Абсолютный нуль

Минимальный предел температуры, при которой атомы вещества находятся в наименьшем энергетическом состоянии. На практике абсолютный нуль недостижим. Температура абсолютного нуля равна $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (0°K).

Антикварки

Античастицы по отношению к кваркам, фундаментальным частицам, из которых состоят нейтроны и протоны, и, следовательно, основная часть материи. Каждому кварку соответствует антикварк, идентичный ему, но с противоположным зарядом и «цветом» (дополнительной характеристикой кварка).

Асимптотическая свобода

Необычное проявление сильного взаимодействия между кварками, которое слабеет при уменьшении расстояния между ними и увеличивается при увеличении расстояния.

Бозоны

Частицы, подчиняющиеся статистике Бозе — Эйнштейна (в отличие от фермионов). Типичные бозоны — это частицы, осуществляющие взаимодействие, такие как протоны и прославленный бозон Хиггса, но этим же термином обозначают и атомные ядра с четным количеством частиц. В отличие от фермионов многие бозоны могут находиться в одном состоянии в одно время.

Глюоны

Элементарные частицы-бозоны, переносчики сильного взаимодействия между кварками, подобно тому, как фотоны являются переносчиками электромагнитного взаимодействия между заряженными частицами. В отличие от фотонов, у которых нет электрического заряда, глюоны бывают разных «цветов».

Глюоний

Гипотетическая частица, состоящая исключительно из глюонов.

Гравитон

Гипотетическая частица, переносчик гравитационного взаимодействия в квантовой теории гравитации, подобно тому, как фотон является переносчиком электромагнитного взаимодействия.

Кварки

Фундаментальные частицы, из которых состоят нейтроны и протоны и, следовательно, основная часть материи. Кварки бывают шести разных «ароматов»: верхнего, нижнего, странного, очарованного, прелестного и истинного (эти названия не имеют особого значения). Нейтроны и протоны состоят из разных комбинаций трех верхних и нижних кварков, другие частицы состоят из пар кварков.

Лямбда-точка

Температура, ниже которой гелий переходит из жидкого состояния в состояние сверхтекучести.

Сверхпроводимость

Способность некоторых материалов при крайне низких температурах проводить электрический ток без сопротивления и вытеснять электромагнитное поле.

Сингулярность

Область пространства-времени, в которой показатели свойств становятся бесконечными (чаще всего имеется в виду черная дыра, в которой бесконечной становится гравитация) и все современные теории лишаются смысла. Сингулярность расположена в центре черной дыры.

Темное состояние

Состояние, в котором атом не может поглощать или испускать фотоны, и которое может приводить к состоянию конденсата Бозе — Эйнштейна, при котором свет оказывается «в ловушке».

Удельная теплоемкость

Количество тепловой энергии, которую необходимо передать определенной массе вещества, чтобы его температура увеличилась на определенное значение.

ЦЕРН

Европейская организация ядерных исследований (центр ядерных исследований), штаб-квартира которой находится под Женевой в Швейцарии. На территории ЦЕРНа расположен Большой адронный коллайдер и другие исследовательские

комплексы, в том числе занимающиеся исследованием античастиц.

Черная дыра

Область, в которой материя настолько сконцентрирована, что сжимается под действием собственного гравитационного притяжения. Чаще всего черные дыры образуются при сжатии массивной звезды. Границей черной дыры считается «горизонт событий», расположенный на таком расстоянии от ее центра, на котором ничто не может вырваться за ее пределы, в том числе и свет. Сама по себе черная дыра представляет сингулярность, то есть точку без размеров.

Эффект Казимира

Квантовый эффект, заключающийся во взаимном притяжении между двумя параллельными пластинами, расположенными очень близко друг к другу, который можно объяснить меньшим образованием виртуальных частиц в промежутке по сравнению с внешними границами пластин, отчего возникает своеобразное давление. Также его можно объяснить при помощи энергии нулевой точки — энергии пустого пространства.

Эффект Мейснера

Полное вытеснение магнитного поля из сверхпроводника (одно из характерных свойств сверхпроводимости); благодаря этому эффекту магнит может парить над сверхпроводником.

ЭНЕРГИЯ НУЛЕВОЙ ТОЧКИ

Квантовая теория за 30 секунд

Формула зависимости энергии

от времени, выражающая принцип неопределенности Гейзенберга, допускает существование флуктуаций энергии, действующих в течение короткого периода времени. Одним из следствий этого является тот факт, что любая квантовая система обладает минимальным энергетическим состоянием, известным под названием «энергия нулевой точки», ниже которого энергия опускаться не может. Энергия нулевой точки есть даже у квантовых полей в вакууме. Поэтому пустое пространство на самом деле не пустое! Его можно представить в виде постоянно волнующегося моря «виртуальных частиц», на мгновение появляющихся и тут же возвращающихся в небытие. Никто не знает, сколько на самом деле энергии содержится в вакууме: согласно некоторым теоретическим предположениям ее должно быть огромное количество, хотя наблюдения за крупномасштабной структурой Вселенной говорят о том, что ее гораздо меньше. Несмотря на то, что этот вопрос остается нерешенным, эксперименты подтверждают наличие энергии нулевой точки в вакууме. Часто при этом упоминается эффект Казимира, благодаря которому притягиваются расположенные близко друг к другу металлические пластины. Этот эффект, предсказанный Хендриком Казимиром в 1948 году, уже неоднократно был подтвержден в лабораториях. Но доказывает ли он существование энергии нулевой точки?

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Из принципа неопределенности Гейзенберга следует, что пустого пространства не бывает — даже в вакууме кишат «виртуальные» частицы.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Можно ли решить стоящие перед миром энергетические проблемы с помощью энергии нулевой точки? Большинство физиков утверждают, что это невозможно — как извлекать энергию из того, что по определению является минимальным энергетическим состоянием? Тем не менее в 1984 году Роберт Л. Форвард предложил мысленный эксперимент, основанный на эффекте Казимира, который показал возможность создания «вакуумной флуктуационной батареи», хотя на практике такое устройство потребляло бы больше энергии, чем генерировало.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ГЕЙЗЕНБЕРГА (с. 48)

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ (с. 64)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

ХЕНДРИК КАЗМИР (1909—2000)
Голландский физик

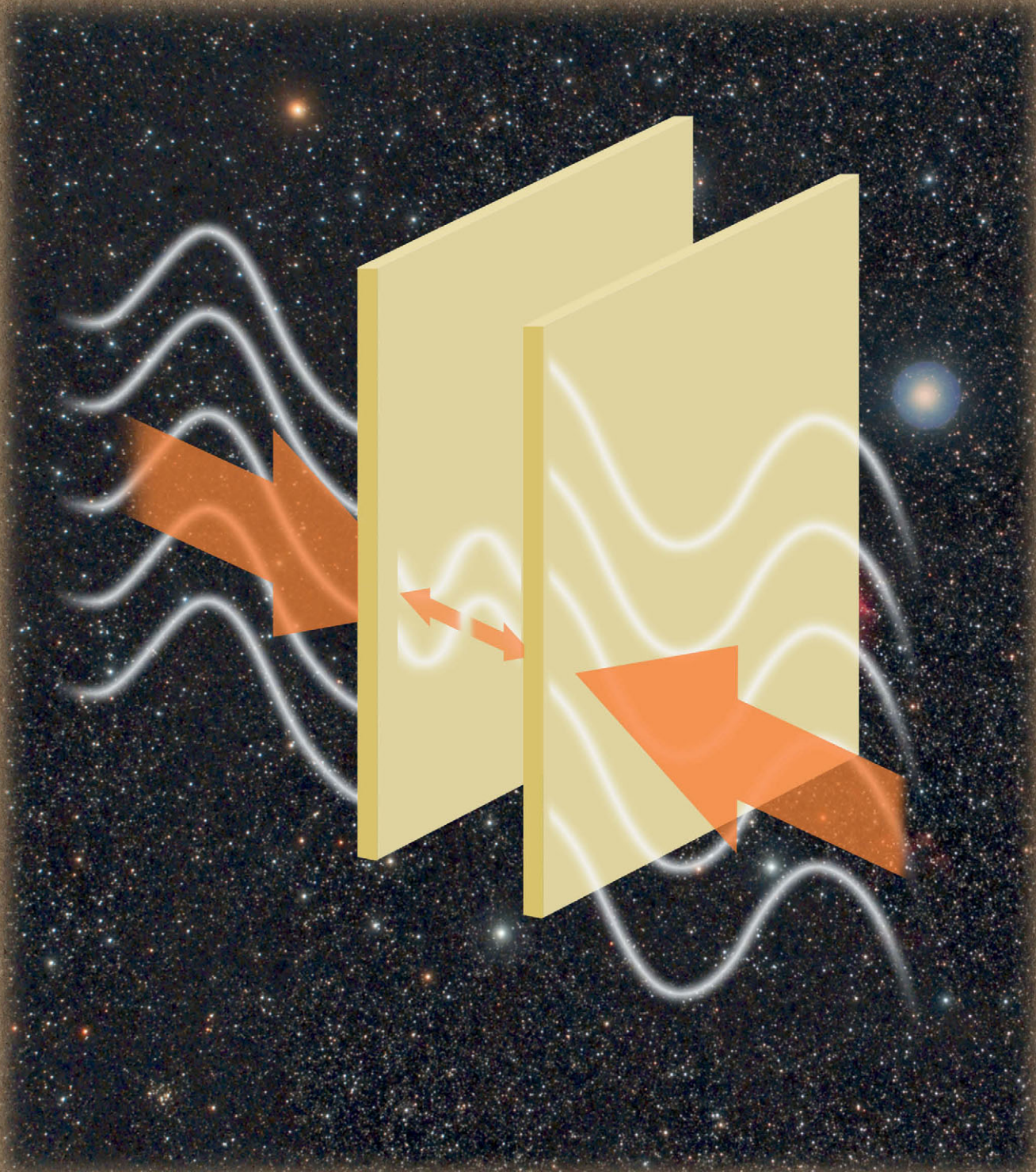
РОБЕРТ Л. ФОРВАРД (1932—2002)

Американский физик, специалист по ракетостроению и писатель-фантаст

АВТОР СТАТЬИ

Эндрю Мэй

Согласно эффекту Казимира, две расположенные в вакууме близко друг к другу металлические пластины притягиваются.



СВЕРХПРОВОДНИКИ

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

При очень низких температурах квантовое состояние электронов меняется таким образом, что они могут перемещаться, не встречая никакого сопротивления.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Куперовские пары проявляют свои необычные свойства только при очень низких температурах, и какое-то время ученые предполагали, что сверхпроводимость невозможна при температурах выше $-234,15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Но в 1980-х годах были открыты «высокотемпературные» сверхпроводники, действующие при $-138,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, и с тех пор появилась надежда, что сверхпроводимости удастся добиться и при комнатной температуре.

В 1911 году голландский физик

Хейке Камерлинг-Оннес исследовал свойства ртути при низких температурах. К его удивлению при температуре $-268,95\text{ }^{\circ}\text{C}$ ее электрическое сопротивление просто-напросто исчезло! Если в такой «сверхпроводник» подать ток, то он будет течь вечно, пока материал будет оставаться достаточно холодным. Это было доказано в 1950-х годах американскими физиками Джоном Бардином, Леоном Купером и Джоном Шриффером. Они выяснили, что при низких температурах электроны образуют так называемые «куперовские пары» — пары, связанные между собой, как одна частица-бозон. Такие частицы, как и фотоны, могут образовывать группы, находясь в одном и том же состоянии, в отличие от фермионов, таких как электроны, которые не могут находиться в тождественном состоянии в одном и том же месте. При очень низких температурах образуется «конденсат» — совокупность куперовских пар, ведущих себя, как единое целое. Вместо отдельных электронов, перемещающихся в проводнике, по сверхпроводнику перемещается сразу весь этот конденсат, не встречая сопротивления от атомов материала. Сверхпроводимость позволяет создавать сверхмощные магниты для магнитно-резонансных томографов и ускорителей частиц. Благодаря ей также наблюдается эффект Мейснера, когда магнит парит над сверхпроводником, потому что сверхпроводник полностью вытесняет из себя магнитное поле.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

КОНТАКТЫ
ДЖОЗЕФСОНА
(с. 126)

СВЕРХТЕКУЧЕСТЬ
(с. 142)

КОНДЕНСАТ
БОЗЕ — ЭЙНШТЕЙНА
(с. 144)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

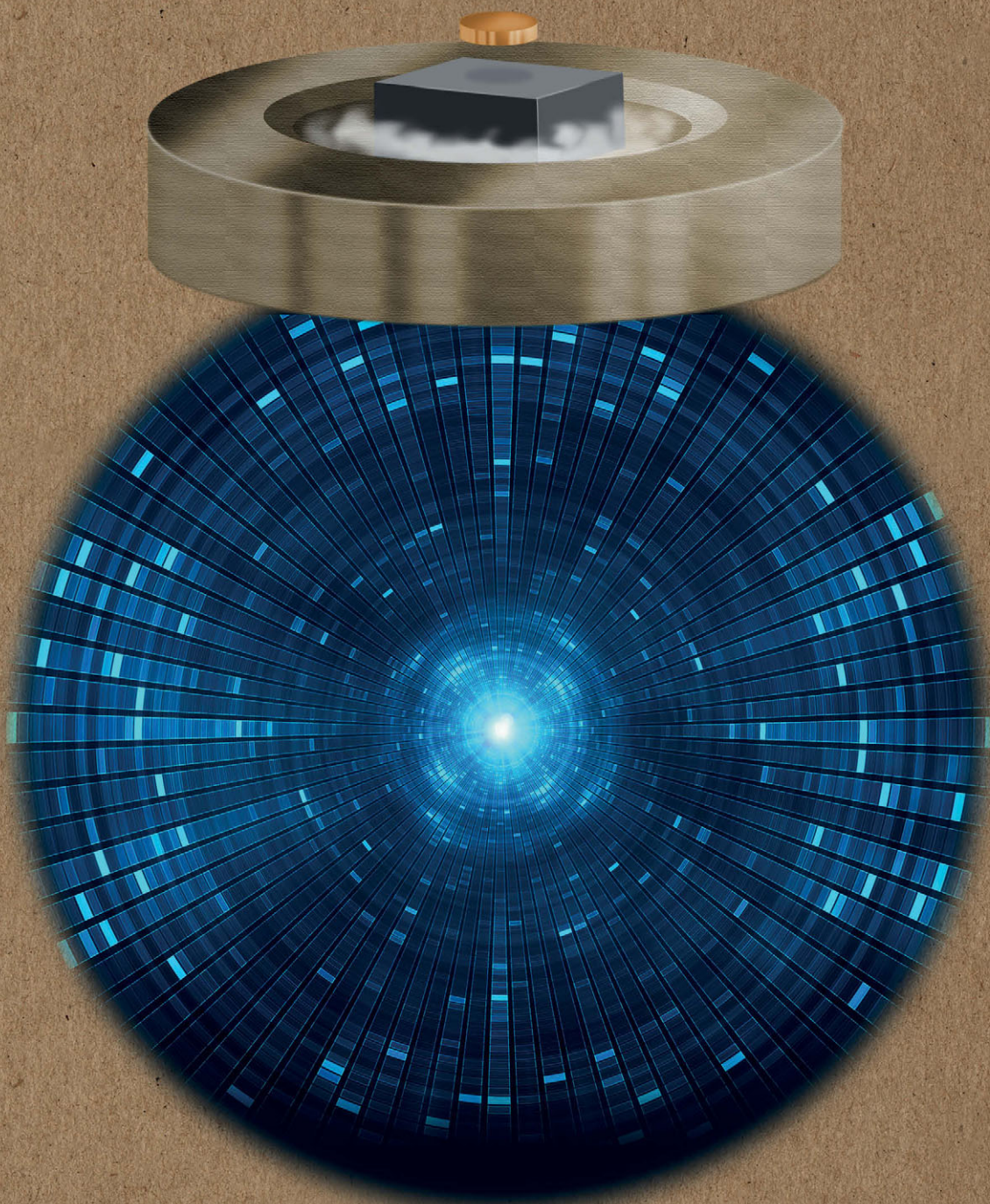
ХЕЙКЕ
КАМЕРЛИНГ-ОННЕС
(1853—1926)
Голландский физик,
первым получивший
жидкий гелий и открывший
его сверхпроводимость

ДЖОН БАРДИН,
ЛЕОН Н. КУПЕР
И ДЖОН Р. ШРИФФЕР
(1908—1991, 1930, 1931)
Американские физики,
разделившие в 1972 году
Нобелевскую премию
за теорию
сверхпроводимости

АВТОР СТАТЬИ

Брайан Клегг

**С помощью
сверхпроводимых
магнитов можно
и продемонстрировать
«левитацию».**



СВЕРХТЕКУЧЕСТЬ

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

При размешивании сверхтекучая жидкость будет вращаться вечно.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Сверхжидкий гелий — это настоящий «Гудини». Из-за полного отсутствия трения жидкость будет перетекать через кромку сосуда, в котором она содержится, и проникать через мельчайшее отверстие в несколько атомов шириной. Сверхтекучий гелий впервые использовали для охлаждения зеркала телескопа на космической орбитальной обсерватории в 1983 году. Благодаря диффузии сквозь медные затычки, жидкий гелий поддерживал температуру в $-271,55$ °C.

Хейке Камерлинг-Оннес, открывший сверхпроводимость, также первым из физиков получил жидкий гелий. В 1911 году он установил, что при температуре ниже $-270,98$ °C теплопроводность гелия радикальным образом меняется. Эта температурная точка получила название «лямбда-точки» из-за графика зависимости теплопроводности от температуры. Почему так происходит, оставалось загадкой до 1938 года, когда советский физик Петр Капица и английские физики Джон Аллен и Дональд Майзнер выяснили, что при температуре ниже лямбда-точки вязкость жидкого гелия полностью исчезает. Объяснение этого феномена имеет много общего с объяснением феномена сверхпроводимости в металлах. В некоторых сверхпроводниках электроны, будучи бозонами, образуют пары и не испытывают никакого сопротивления. Атомы гелия-4 образуют конденсат Бозе — Эйнштейна, в котором все атомы разделяют одну волновую функцию и теряют способность к трению. Любопытно, что гелий-3, который состоит из фермионов и подчиняется принципу Паули, не может образовывать бозе-конденсат, но также становится сверхтекучим при температуре на 0,002 градуса выше абсолютного нуля. Здесь механизм еще ближе к тому, что ответственен за явление сверхпроводимости. Атомы гелия-3 образуют пары-бозоны, выравнивая свои магнитные моменты.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

СВЕРХПРОВОДНИКИ
(с. 140)

КОНДЕНСАТ
БОЗЕ — ЭЙНШТЕЙНА
(с. 144)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

**ХЕЙКЕ
КАМЕРЛИНГ-ОННЕС**
(1853—1926)
Голландский физик, разработавший методы исследования материалов при сверхнизких температурах

ПЕТР КАПИЦА
(1894—1984)
Советский физик, совершил открытие сверхтекучести; параллельно с ним это открытие сделали канадские физики Джон Аллен и Дональд Майзнер

АВТОР СТАТЬИ

Александр Хеллеманс

У сверхтекучей жидкости нет трения, и если ее размешать, то она будет вращаться вечно.



КОНДЕНСАТ БОЗЕ — ЭЙНШТЕЙНА

Квантовая теория за 30 секунд

На уроках физики в школе мы

узнаем, что существуют три состояния вещества — твердое, жидкое и газообразное. Возможно, нас учат еще, что существует плазма, похожая на газ, но из заряженных ионов. Но современная физика признает еще одно, исключительно квантовое, состояние — конденсат Бозе — Эйнштейна. Он образуется при охлаждении определенного вещества почти до абсолютного нуля. Атомы вещества могут быть либо фермионами, которые (как электроны и протоны) должны находиться в уникальных состояниях рядом друг с другом, либо бозонами (как фотоны света), которые способны принимать одинаковые состояния в одной группе. Конденсат Бозе — Эйнштейна состоит из бозонов, причем из-за чрезвычайно низкой температуры они находятся преимущественно в самом низком энергетическом состоянии и ведут себя вместе, как одна большая квантовая частица. В результате у них появляются необычные свойства, вроде сверхтекучести; кроме того, с ними могут происходить процессы, которые обычно происходят с отдельными частицами, вроде интерференции. До сих пор практического применения конденсатам Бозе — Эйнштейна не нашли, хотя было высказано предположение, что их можно использовать для обнаружения «стелс»-самолетов, наблюдая за тем, как небольшие изменения в гравитации влияют на квантовую интерференцию.

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Конденсат Бозе — Эйнштейна — пятое состояние вещества, получаемое в результате сжатия газа бозонов до чрезвычайно низкой температуры.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Ученые из Гарварда использовали конденсат Бозе — Эйнштейна для замедления скорости света до скорости пешехода. В конденсат были направлены два лазерных луча; обычно в таком случае он остается непрозрачным, но структура первого лазера была такова, что она замедляла второй луч и сокращала его скорость до одного метра в секунду. Когда мощность первого «парного» лазера уменьшили, второй луч остался в ловушке из смешанного состояния вещества и света и освободился только при включении парного лазера.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

ЭКСПЕРИМЕНТ
С ДВОЙНОЙ ЩЕЛЬЮ
(с. 32)

ПРИНЦИП ПАУЛИ
(с. 58)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН
(1879—1955)

Родившийся в Германии физик-теоретик; получив работу Бозе на данную тему, распространил его идею на атомы

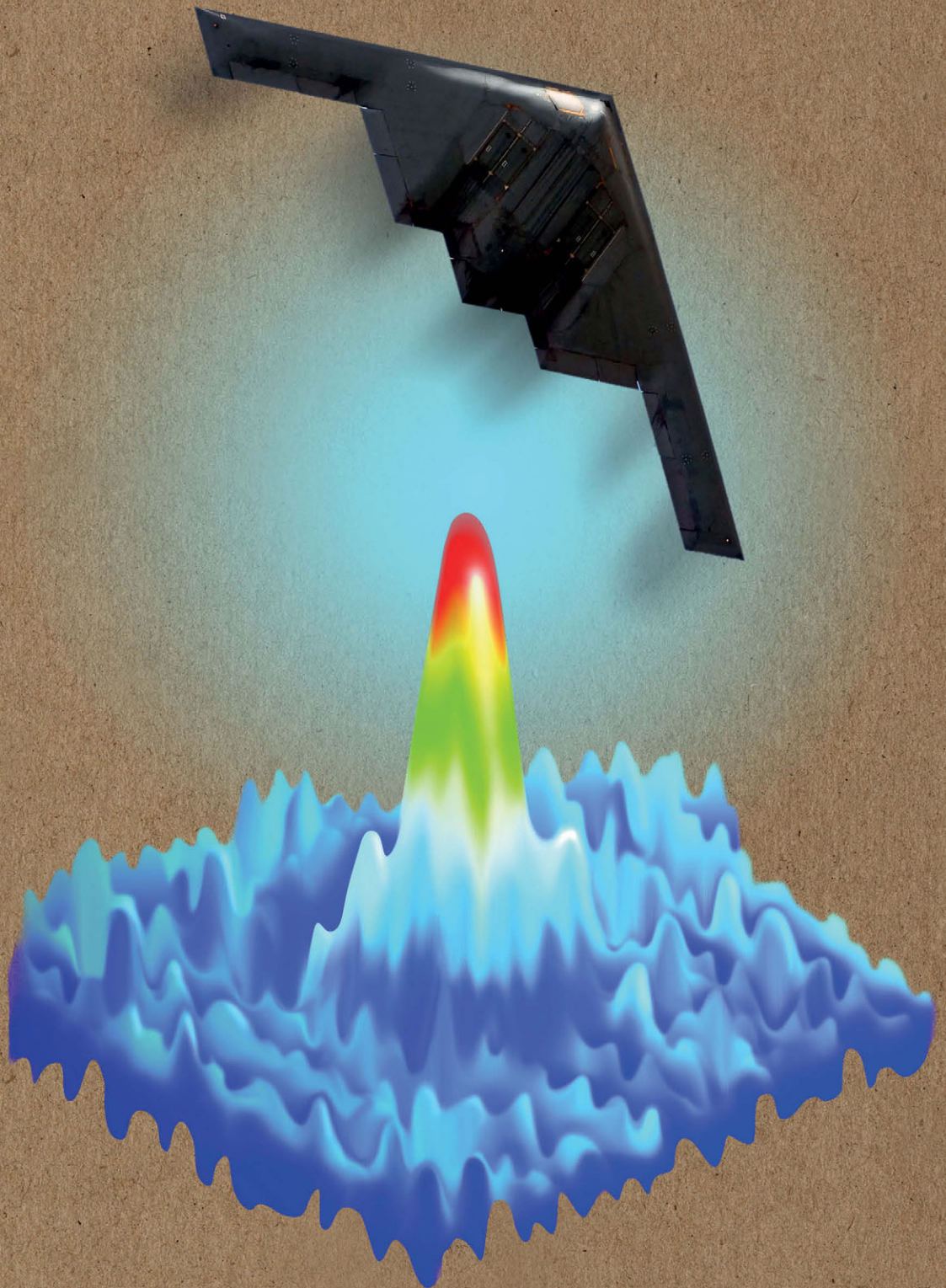
ЛЕНЕ ВЕСТЕРГААРД ХАУ
(1959)

Датский физик, руководитель эксперимента по замедлению и остановке света

АВТОР СТАТЬИ

Брайан Клегг

Волновая функция взаимодействующих конденсатов дает картину интерференции, и потому с ее помощью можно обнаруживать малозаметные «стелс»-самолеты.



1 января 1894 года

Родился в Калькутте, в семье Сурендранатха и его жены Амодини

1913

Заканчивает обучение в Калькуттском университете

1917

Начинает читать лекции в Калькуттском университете

1919

Переводит на английский работы Эйнштейна о теории относительности

1921

Становится преподавателем физики в университете Дакки

1924

Публикует работу о неразличимости идентичных квантовых частиц

1925

Посещает Европу, где работает с Марией Кюри и встречается с Эйнштейном

1926

Становится профессором и главой физического факультета университета Дакки

1945

Становится профессором физики в Калькуттском университете и президентом Индийского физического общества

1948

Основывает Научную ассоциацию Бенгалии

1954

Избирается в верхнюю палату индийского парламента. Индийское правительство удостоивает его второй из высших гражданских наград — титула Падма Вибхушан

1958

Избирается членом Королевского общества

4 февраля 1974 года

Умирает в Калькутте



ШАТЬЕНДРАНАТ БОЗЕ

Лауреат различных премий,

математик и физик, Шатьендранат Бозе был всесторонне развитой личностью, в том числе и знатоком многих языков. В 1919 году, читая лекции по физике в Калькуттском университете, Бозе и его коллега Мегхнад Саха впервые перевели работы Эйнштейна об относительности на английский язык. Пять лет спустя, работая в университете Дакки, в возрасте тридцати лет, Бозе совершил свое великое открытие.

В 1900 году Макс Планк предположил, что нагретое тело испускает энергию отдельными порциями, или «квантами». И хотя это предположение объясняло распределение энергии по спектру теплового излучения, некоторые математические доказательства, которыми пользовался Планк для подтверждения своей теории — закона Планка, — казались не совсем убедительными. Бозе решил эти проблемы, сформулировав закон Планка немного по-другому. Если Планк предполагал, что отдельные кванты можно отличать друг от друга, то Бозе предположил, что они неразличимы. Его идея о неразличимости квантовых частиц стала одним из основных положений квантовой теории.

В 1924 году Бозе, получив отказ от одного английского научного журнала, послал свою работу на эту тему Альберту Эйнштейну. Эйнштейн высоко оценил ее и перевел на немецкий язык. Вскоре она была опубликована в журнале *Zeitschrift für Physik*. Эйнштейн допол-

нил теорию Бозе своими идеями и вместе их работа стала известной под названием «Статистика Бозе — Эйнштейна». Частицы, подчиняющиеся статистике Бозе-Эйнштейна, называются «бозонами» в честь Бозе, внесшего значительный вклад в развитие квантовой физики.

Эйнштейн также помог Бозе получить визу для поездки в Европу. В Париже Бозе работал вместе с Марией Кюри, а в Берлине встретился с Эйнштейном и другими основателями квантовой физики, в том числе с Бором, Гейзенбергом и Шрёдингером.

Несмотря на свой выдающийся интеллект, как в повседневной, так и в профессиональной жизни Бозе мог показаться неорганизованным и безалаберным. Он бросался от одной идеи к другой; в одежде тоже не отличался постоянством. Но в общении он был приятным собеседником, хорошо знал поэзию и литературу, играл на индийском музыкальном инструменте эсрадже. Чтобы повысить авторитет Индии в научном мире, он призывал вести обучение на национальных языках и основал Научную ассоциацию Бенгалии, которая ежемесячно публиковала научный журнал.

Бозе оказал большое влияние на развитие физики в XX веке. В 1995 году впервые на практике при охлаждении почти до абсолютного нуля был получен конденсат Бозе — Эйнштейна — большая совокупность атомов, подчиняющихся статистике Бозе — Эйнштейна и ведущая себя, как один гигантский атом.

Шэрон Энн Холгейт

КВАНТОВАЯ ХРОМОДИНАМИКА

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Цветовой заряд — характеристика, похожая на электрический заряд; его переносчиком являются кварки и глюоны.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

КХД объясняет, почему ядерные силы, связывающие между собой нейтроны и протоны, так велики, тогда как силы, связывающие между собой кварки и глюоны, относительно слабы на коротких расстояниях. Она позволяет физикам анализировать столкновения между протонами с точки зрения взаимодействия между кварками и глюонами, и благодаря ей был открыт бозон Хиггса. КХД предполагает существование частиц глюония, но поскольку они должны скрываться среди частиц, состоящих из кварков, то их трудно изолировать.

Сильное ядерное воздействие

на протоны и нейтроны не поддавалось теоретическому описанию примерно до 1970 года, когда был открыт более глубокий уровень реальности и выяснилось, что протоны и нейтроны состоят из кварков. Кварки переносят электрический заряд и еще одну разновидность заряда, которую решено было произвольно назвать «цветом». Этот цвет — источник силы, связывающей кварки между собой в группы, из которых образованы нейтроны и протоны, и, как следствие, атомные ядра. Релятивистская квантовая теория взаимодействия между частицами, которые служат переносчиками цвета, называется «квантовой хромодинамикой» (КХД). Эта теория схожа с квантовой электродинамикой, описывающей взаимодействие между электрически заряженными частицами и светом. Свет сам по себе описывается как состоящий из частиц — фотонов. По аналогии, КХД описывает взаимодействие между частицами-переносчиками цвета и глюонами (аналогами фотонов). Но если фотоны не имеют электрического заряда и перемещаются независимо один от другого, то глюоны имеют цветовой заряд и во время перемещения взаимодействуют между собой. Поэтому описываемые в КХД силы ведут себя немного по-другому, чем электромагнитная сила КЭД.

СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕМЫ

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ (с. 64)

ОСНОВЫ КЭД (с. 66)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

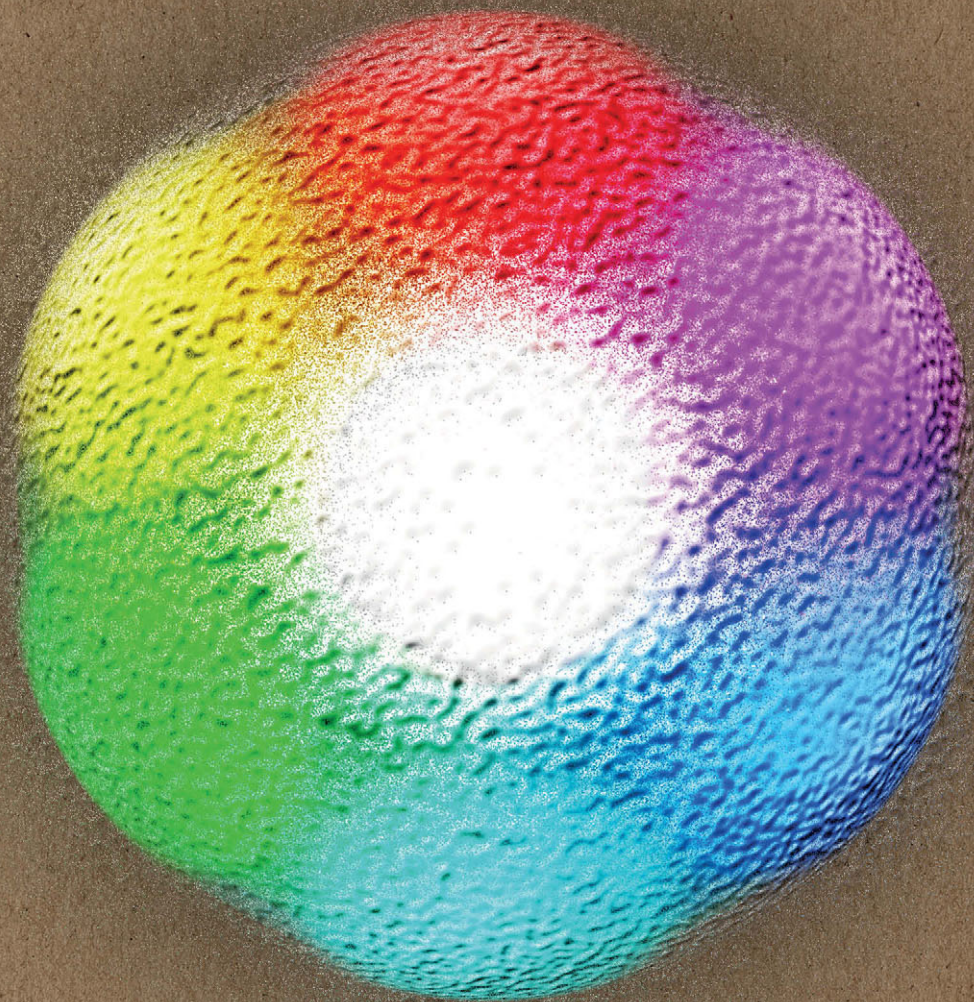
ДЭВИД ГРОСС,
Х. ДЭВИД ПОЛИТЦЕР
И ФРЭНК ВИЛЬЧЕК
(1941, 1949, 1951)

Американские физики, лауреаты Нобелевской премии

АВТОР СТАТЬИ

Фрэнк Клоуз

Цвета квантовой хромодинамики — это не видимые нами оптические цвета, а свойство, похожее на электрический заряд.



КВАНТОВАЯ БИОЛОГИЯ

Квантовая теория за 30 секунд

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Обнаружено, что такие явления квантовой механики, как туннельный эффект, суперпозиция и запутанность, играют важную роль в некоторых биологических процессах.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Спорную теорию о роли квантовых эффектов в биологии в 1990-х годах выдвинули физик Роджер Пенроуз и нейробиолог Стюарт Хамерофф. Они предположили, что человеческое сознание является следствием суперпозиции квантовых состояний белковых волокон в нейронах, называемых «микротрубочками». В этих состояниях, как утверждают ученые, волновая функция коллапсирует, и мозг выполняет своего рода квантовые вычисления, которые позволяют получать ответы на вопросы, неразрешимые с точки зрения формальной логики.

Играют ли квантовые эффекты

какую-либо роль в биологии? На первый взгляд кажется, что вряд ли, потому что они происходят в крайне малом масштабе, в изолированных условиях и при низких температурах, тогда как живые организмы большие, теплые и не имеют никакого отношения к лабораторным физическим экспериментам. Но в биологических системах наблюдаются квантовые эффекты, и их изучение даже положило начало новой дисциплине: квантовой биологии. Многие биохимические реакции, регулируемые ферментами, происходят при переходе ионизированного водорода — иона протона — от одной молекулы к другой. Протон настолько легок, что может преодолевать энергетический барьер в силу туннельного эффекта. Неясно только, происходит ли такое туннелирование случайным образом, или оно как-то участвовало в процессе естественного отбора. Еще более удивителен пример улавливающих свет молекул, задействованных в процессе фотосинтеза усваивающими свет бактериями; похоже, что энергия света распределяется в суперпозиции квантовых волн, которые по очереди перемещаются к месту, где происходит изначальная реакция фотосинтеза, и таким образом увеличивают эффективность такой передачи энергии. В биомагнитном компасе, с помощью которого птицы ориентируются в полете по магнитному полю Земли, может быть задействовано явление квантовой запутанности между электронами.

СОПУТСТВУЮЩАЯ ТЕМА

ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ
(с. 80)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

ГРЭМ ФЛЕМИНГ
(1949)

Американский физик, первым обнаруживший квантовую когеренцию при переносе энергии, полученной в процессе фотосинтеза

ПОЛ ДЭЙВИС
(1946)

Английский физик, интересующийся широким спектром тем

АВТОР СТАТЬИ

Филип Болл

**Способность
некоторых птиц
ориентироваться
по магнитным полям,
возможно,
объясняется
действием квантовых
эффектов.**



КВАНТОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ

Квантовая теория за 30 секунд

Разработка теории квантовой гравитации — одна из величайших задач, стоящих перед физиками наших дней. В предполагаемой «теории всего» ученые надеются объединить два столпа современной физики: теорию Эйнштейна об искривлении пространства-времени и квантовую теорию, описывающую субатомные процессы. Удачная «теория всего» могла бы описать первые мгновения после Большого взрыва и то, что происходит в центре черной дыры. Но создать такую теорию нелегко. Если в формулах квантовой теории время и пространство описываются как постоянный, неменяющийся фон, на котором происходит взаимодействие частиц, то в теории относительности они, как и следует ожидать, относительны. Что еще хуже, для проверки теорий квантовой гравитации требуются такие невероятные энергии и расстояния, какие в настоящее время в лабораторных условиях недоступны. Тем не менее некоторые физики разрабатывают различные предположения. Наиболее популярное из них — теория струн, которая описывает элементарные частицы как крошечные колеблющиеся энергетические петли, занимающие пространство из 9 или 10 измерений. Согласно другой теории, теории петлевой квантовой гравитации, пространство представляет собой компактную структуру из дискретных ячеек, соединяемых между собой посредством узлов и образующих спиновую сеть.

ФАКТ ЗА 3 СЕКУНДЫ

Теория квантовой гравитации — это попытка совместить друг с другом общую теорию относительности и квантовую физику субатомных частиц.

РАЗМЫШЛЕНИЯ НА 3 МИНУТЫ

Многие концепции квантовой гравитации основаны на идее дискретной структуры пространства-времени, совокупное влияние которой на частицы, преодолевающие огромные расстояния во Вселенной, может быть наблюдаемым. Если гравитация и в самом деле носит квантовый характер, то доказательством этому должно стать обнаружение квантовой единицы гравитации — гравитона. Но гравитация — это слабейшее взаимодействие из всех фундаментальных взаимодействий природы, поэтому обнаружить гравитон чрезвычайно трудно.

СОПУТСТВУЮЩАЯ ТЕМА

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ
(с. 64)

3-СЕКУНДНЫЕ БИОГРАФИИ

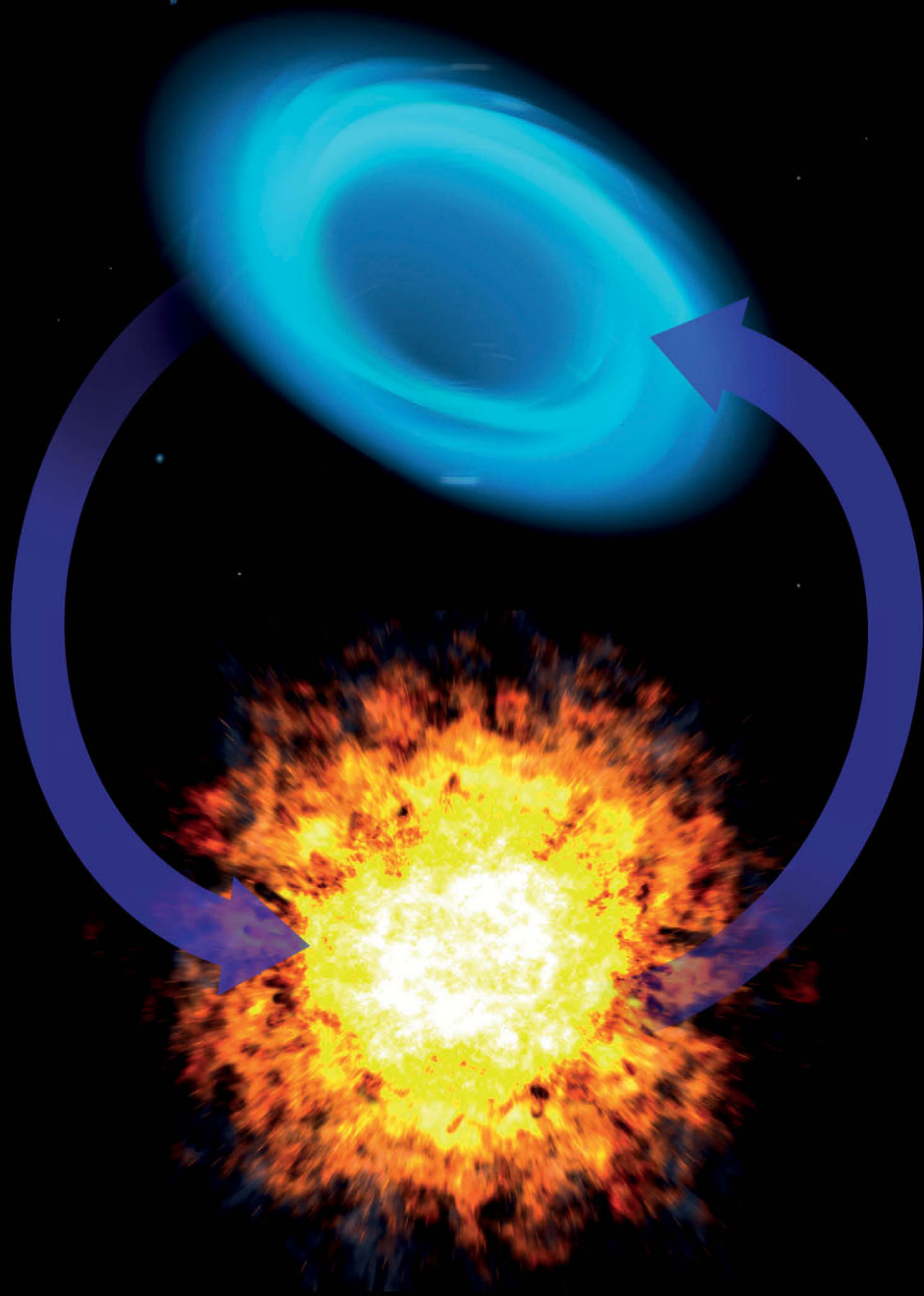
ПОЛЬ ДИРАК
(1902—1984)
Английский физик

АБЭЙ АШТЕКАР
(1949)
Индийский физик, переформулировал общую теорию относительности и приблизил ее математический язык к математическому языку, используемому в квантовой физике

АВТОР СТАТЬИ

Софи Хэбден

Без квантовой теории гравитации невозможно точно описать Большой взрыв и черные дыры.



ИСТОЧНИКИ

КНИГИ

Paradox: The Nine Greatest Enigmas in Physics

Jim Al-Khalili
(Black Swan, 2013)

The Many Worlds of Hugh Everett III

Peter Byrne
(Oxford University Press, 2010)

Quantum Theory Cannot Hurt You

Marcus Chown
(Faber & Faber, 2008)

The God Effect: Quantum Entanglement

Brian Clegg
(St Martin's Griffin, 2009)

The Quantum Age

Brian Clegg
(Icon Books, 2014)

Antimatter

Frank Close
(Oxford University Press, 2010)

The Infinity Puzzle: Renormalisation and Quantum Theory

Frank Close
(Oxford University Press, 2011)

Nothing

Frank Close
(Oxford University Press, 2009)

The Quantum Universe

Brian Cox & Jeff Forshaw
(Allen Lane, 2011)

QED: The Strange Theory of Light and Matter

Richard Feynman
(Penguin, 1990)

Computing with Quantum Cats

John Gribbin
(Bantam, 2013)

Erwin Schrödinger and the Quantum Revolution

John Gribbin
(Black Swan, 2013)

Beam: The Race to Make the Laser

Jeff Hecht
(Oxford University Press, 2010)

The Amazing Story of Quantum Mechanics

James Kakalios
(Duckworth, 2010)

Quantum

Manjit Kumar
(Icon Books, 2009)

СТАТЬИ И ВЕБ-САЙТЫ

Biography of Sir Peter Mansfield
www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2003/mansfield-bio.html

The Higgs boson: One year on
By CERN particle physicist Pauline Gagnon
home.web.cern.ch/about/updates/2013/07/higgs-boson-one-year

Information for the public on the 2001 Nobel Prize in Physics for Bose-Einstein condensation from the official website of the Nobel Prize
www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2001/popular.html

Institute of Physics: Quantum Physics
www.quantumphysics.iop.org

Jim Al-Khalili - Quantum life (video)
www.richannel.org/jim-al-khalili--quantum-life-how-physics-can-revolutionise-biology

New Scientist 'Quantum World' topic guide
www.newscientist.com/topic/quantumworld

Quantum physics news
www.sciencedaily.com/news/matter_energy/quantum_physics/

Robert Peston learns quantum physics:
www.brianclegg.blogspot.co.uk/2013/08/peston-physics.html

Royal Society – why is quantum physics important?
invigorate.royalsociety.org/ks5/the-bestthings-come-in-small-packages/why-is-quantum-physics-important.aspx

Scientific American
www.scientificamerican.com/topic/quantum-physics/

S N Bose Project by Bose's grandson Falguni Sarkar
www.snbose.org

ОБ АВТОРАХ

Филип Болл — автор-фрилансер, а также редактор журнала *Nature*. Изучал химию в Оксфордском университете и физику в Бристольском университете; регулярно публикует статьи и выступает в средствах массовой информации. Автор таких книг, как «Н₂О: Биография воды», «Яркая Земля: Искусство и изобретение цвета», «Музыкальный инстинкт: Как работает музыка, и почему мы не можем обходиться без нее» и «Любопытство: Как наука стала интересовать всем». Его книга «Критическая масса: Как из одного следует другое» в 2005 году получила премию «Авентис» за лучшую научно-популярную книгу. Филип Болл также лауреат премии Грейди-Стака Американского химического общества за популяризацию химии и первый лауреат премии Лагранжа за доступное изложение сложных научных теорий.

Брайан Клегг — читал лекции по естественным наукам, преимущественно по экспериментальной физике, в Кембриджском университете. Разработал ряд технологических усовершенствований для компании *British Airways*; совместно с экспертом по творческому мышлению Эдвардом де Боно основал консультационное агентство, в которое за советами обращаются различные организации, от *BBC*

до метеорологической службы. Автор статей в *Nature*, *Times* и *Wall Street Journal*; выступал в Оксфордском и Кембриджском университетах и в Королевском институте. Редактор сайта книжных обзоров www.popularscience.co.uk, автор книг «Краткая история бесконечности» и «Как построить машину времени».

Леон Клиффорд — писатель и консультант, основная специализация которого — делать из сложного простое. Бакалавр физики и астрофизики, член Ассоциации британских научных писателей. Много лет проработал журналистом, освещавшим темы науки, техники и бизнеса; автор статей в многочисленных изданиях, в том числе *Electronics Weekly*, *Wireless World*, *Computer Weekly*, *New Scientist* и *Daily Telegraph*. Интересуется всеми аспектами физики, особенно климатологией, астрофизикой и физикой частиц.

Фрэнк Клоуз — профессор физики Оксфордского университета и член Эксетерского колледжа в Оксфорде. Бывший глава отдела теоретической физики в Лаборатории Резерфорда — Эплтона и глава отдела коммуникаций и общественного образования в ЦЕРНе. Занимается исследованиями в области кварков и глюонной

структуры ядерных частиц и опубликовал более 200 научных статей на эту тему. Член Американского физического общества и Британского института физики; в 1996 году был удостоен медали Кельвина за большой вклад в популяризацию физики. Автор книг, в том числе «Нейтрино», бестселлера «Наследие Люцифера: Значение асимметрии» и вышедшей недавно «Загадки бесконечности».

Софи Хэбден — писатель-фрилансер, проживающая в Мэнсфилде, Великобритания. Помимо написания статей и книг по физике занимается воспитанием двух детей. Ее статьи были опубликованы в журнале *New Scientist* и изданиях Института фундаментальных вопросов. Бывший редактор новостей сайта SciDev.net. Имеет докторскую степень по физике космической плазмы.

Александр Хеллеманс — научный писатель, статьи которого печатаются в *Science*, *Nature*, *Scientific American*, *BBC Focus*, *Guardian*, *New Scientist*, *The Scientist*, *IEEE Spectrum*, *Chemical and Engineering News* и других изданиях. Совместно с Брайаном Банчем автор книги «История науки и технологии: Справочник по великим открытиям, изобретениям и выдающимся людям от начала времен до современности».

Ранее эти авторы написали книги «Историческая шкала науки: Хронология наиболее важных событий и великих ученых в истории науки» и «Историческая шкала технологии: Хронология наиболее важных достижений и их авторов в истории техники».

Шэрон Энн Холгейт — писатель-фрилансер и диктор, дипломированный специалист по физике. Ее статьи печатаются в различных изданиях, в том числе *New Scientist* и *Focus*. Ведущая программ на канале *BBC Radio 4* и мини-серий *BBC World Service*. Соавтор детской книги «Как работает наука», выдвинутой на премию «Авентис» за лучшую научно-популярную литературу. В 2006 году Шэрон Энн была удостоена титула Профессионального физика Юнга за популяризацию физики.

Эндрю Мэй — технический консультант и писатель-фрилансер на различные темы, от астрономии и квантовой физики до обороны и военных технологий. В 1970-х читал лекции по естественным наукам в Кембриджском университете и получил степень доктора по астрофизике в Манчестерском университете. С тех пор более тридцати лет проработал в академической науке, в государственных учреждениях и частных компаниях.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Аронов, Якир 88
Аллен, Джон 142
Альфа-частицы 76, 80
Андерсон, Карл 60, 62
Антивещество 56, 60, 63,
66, 68
Арош, Серж 106
Асле, Ален 100, 102
Атомная бомба 76
Атомы 6
Аштекар, Абэй 152

Б

Бальмер, Иоганн Якоб 22
Бардин, Джон 120, 140
Белл, Джон 100, 102–103
Беннетт, Чарльз Х. 104,
110
Бинниг, Герд 80
Бозе, Шатъендранат
146–147
Бозон 56, 136, 140, 142,
144, 147
Бозон Хиггса 56, 136, 148
Большой адронный
коллайдер (БАК) 37, 48,
137
Большой Взрыв 152
Бом, Дэвид
Диффузия Бомы 76
Эффект Ааронова —
Бомы 88
Интерпретация Бомы 8,
50, 86, 89, 90
Бор, Нильс
Атомные спектры 60
Встреча
с Шатъендранатом
Бозе 147
Квантовая модель атома
18, 22, 24, 58
Копенгагенская
интерпретация 26, 28,
45, 50, 84
Принцип
дополнительности 15,
27, 28, 84
Борий 26
Борн, Макс 40, 56
Брассар, Жиль 104

В

Вайцеккер, Карл 27
Велтман, Мартинус 64
Веселаго, Виктор 132
Вигнер, Юджин 46, 62, 90
Вильчек, Фрэнк 148
Вин, Вильгельм 16
Волновая функция 36,
42, 50, 76, 80, 90,
150

Г

Гамма-излучение 76
Гаудсмит, Сэмюэл 38
Гейзенберг, Вернер и Бор
27, 84
Матричная механика 40,
42, 56
Встреча с Бозе 147
Принцип
неопределенности
Гейзенберга 8, 36, 40,
48, 84, 138
Герлах, Вальтер 38
Германий 120
Глюоний 136, 148
Глюоны 137, 148
Гоулд, Гордон 118
Гравитация 11, 50, 64, 137,
152
Гросс, Дэвид 148

Д

Де Бройль, Луи 27, 28, 30,
42, 50, 86
Де Валера, Имон 45
Декогеренция 52, 106
Детерминизм 86, 89
Джермер, Лестер 30
Джозефсон, Брайан
Выступление
в конгрессе США
на тему «высших
состояний сознания»
128
Контакты Джозефсона
116, 126, 128
Куперовские пары 116,
126, 140
Научная степень в 20 лет
129

Проект по объединению
разума и материи 128,
129

Дирак, Поль
Антивещество 56, 63
КЭД 66
Перенормировка 68
Попытка квантизировать
общую теорию
относительности 152
Уравнение Дирака 60, 66
Допирование 116, 120
Дэвиссон, Клинтон 28, 30
Дэйвис, Пол 150

З

Закон Мура 116, 120
Зенон Элейский 112
Зоммерфельд, Арнольд 58

И

Игнасио, Хуан 46
Излучение Хокинга 14, 16
Изотоп 56
Импульс, сохранение 97, 98

Й

Йордан, Паскуаль 40

К

Казимир, Хендрик 137, 138
Камерлинг-Оннес, Хейке
124, 140, 142
Капица, Петр 142
Квант 14, 16, 18, 24
Квантовая запутанность 10,
52, 77, 78, 96, 100, 104,
106, 110, 112, 150
Квантовая механика 16
Квантовая суперпозиция 37,
46, 52, 57, 77, 78, 84,
96, 97, 100, 106, 120,
126, 150
Квантовые точки 106, 130
Квантовые числа 56, 58
Квантовый скачок 14, 24
Кварки 56, 57, 136, 137, 148
Клиффорд, Уильям 60
Компьютеры и компьютерные
технологии 10, 96, 100,
106, 108, 126

Конденсат Бозе — Эйнштейна
137, 142, 144, 147

Копенгагенская
интерпретация 26, 28, 45,
50, 84
Кремний 120, 130
Крик, Фрэнсис и Уотсон,
Джеймс 45
Кришнамурти, Джидду 89
Кубит 96, 100, 106, 108
Купер, Леон Н. 140
Куперовские пары 116, 126,
140
Кюри, Мария 146, 147

Л

Ленард, Филипп 20
Леонардт, Ульф 132
Лептон 14
Лотербур, Пол 124

М

Майзнер, Дональд 142
Максвелл, Джеймс Клерк
56, 66, 72
Манхэттенский проект 76,
88
Мейман, Теодор 118
Мермин, Дэвид 84
Микроэлектроника 80
Милликен, Роберт 20
Многомировая
интерпретация 10, 90, 92
Моцарт, Вольфганг Амадей
82
МРТ (магнитно-резонансный
томограф) 96, 124, 140
Мур, Гордон 116
Мэнсфилд, Питер 124

Н

Нанотехнологии 117, 122
Нейтрон 56, 57, 58, 76,
136, 148
Неравенство Белла 100,
103
Нимц, Гюнтер 82
Нобелевская премия по
медицине
2003 Пол Лотербур
и Питер Мэнсфилд 124

Нобелевская премия по физике
1918 Макс Планк 16
1921 Альберт Эйнштейн 20
1933 Эрвин Шредингер и Поль Дирак 62
1956 Джон Бардин, Уолтер Браттейн и Уильям Шокли 120
1972 Джон Бардин, Леон Н. Купер и Джон Р. Шриффер 140
1973 Лео Эсаки, Брайан Джозефсон и Ивар Йевер 128
1978 Петр Капица 142
1986 Герд Бинниг и Генрих Рорер 80
2004 Дэвид Гросс, Х. Дэвид Политцер и Фрэнк Вильчек 148
2012 Серж Арош и Дэвид Дж. Вайнленд 106

Ньютон, Исаак 45, 63, 78, 82

О
Общая теория поля 64
Оппенгеймер, Роберт 88, 89
Ориентирование птиц 112, 150
Отношение Планка 18

П
Паули, Вольфганг 38, 58
Пендри, Джон 132
Пенроуз, Роджер 50, 150
Планк, Макс 14, 15, 16, 18, 20, 32, 147
Плащневидка 132
Подольский, Борис 98
Позитрон 56, 57, 60, 63
Политцер, Х. Дэвид 148
Полупроводники 80, 116, 120, 130, 132
Постоянная Планка 15, 16, 48
Принцип Паули 58, 117, 130, 142
«Проблема измерения» 50

Пространство-время 37, 57, 137, 152
Протон 56, 70, 76, 96, 124, 136, 144, 148, 150

Р
Радиоактивный распад 46, 76, 80, 112
Резерфорд, Эрнест 24
Розен, Натан 98
Розенфельд, Леон 22
Рорер, Генрих 80

С
Сверхпроводимость и сверхпроводники 117, 120, 124, 126, 129, 137, 140, 142
Свобода воли 86
Сингулярность 15, 137
СКВИДы 117, 126
Сознание человека 90, 150
Сударшан, Э. Ч. Джордж 112

Т
Т'Хоофт, Герард 64
Теорема Белла 102, 103
Теория петлевой квантовой гравитации 152
Теория струн 152
Томонага, Синьитиро 68
Томсон, Дж. Дж. 24, 27
Томсон, Джордж 28, 30
Туннелирование с нулевым временем 77
Туннельный эффект 77, 80, 82, 126, 130, 150

У
Угловой момент 37, 38
Уилер, Джон Арчибалд 32, 72
Уленбек, Джордж 38
Уолтер Браттейн 120
Уравнения Максвелла 56
Ускоритель частиц 36, 48

Ф
Фейнман, Ричард 8, 32, 63, 68, 70, 108

Фермионы 56, 57, 58, 116, 117, 136, 140, 142, 144
Флеминг, Грэм 150
Фон Нейман, Джон 90
Форвард, Роберт Л. 138
Формула Планка 15, 18, 22
Фотон 15, 18, 20, 22, 24, 28, 32, 57, 60, 63, 66, 70, 77, 78, 82, 84, 96, 106, 110, 118, 122, 130, 132, 136, 137, 140, 148
Фотонная решетка 82, 117, 132
Фотосинтез 150
Фотоэлектрический эффект 20, 28
Фрэнк, Джеймс 27

Х
Хамерофф, Стюарт 150
Хан, Лене Вестергаард 144
Хокинг, Стивен 14, 16

Ц
Цайлингер, Антон 104, 110
Це, Хайнц-Дитер 52
ЦЕРН 102, 103, 137, 152, 156

Ч
Черная дыра 14, 15, 137, 152
Черное тело 14, 15, 16, 18
Чиао, Реймонд 82

Ш
Швингер, Джулиан 68
Шифрование 10, 97, 100, 104
Шокли, Уильям 120
Шредингер, Эрвин 27, 28, 40, 42, 44–45, 48, 60, 62, 100
Волновое уравнение 36, 45, 50
Восточный мистицизм и философия 45
Встреча с Шатъендранатом Бозе 147

Директор отделения теоретической физики Дублинского университета 45
Критика ЭПР-парадокса 98
Квантовая запутанность 100
Кот Шредингера 44–45, 46, 77, 90, 92, 100
Матричная механика 40, 42, 56, 63
Шриффер, Джон Р. 140
Штерн, Отто 38

Э
Эйнштейн, Альберт
«Бог не играет в кости» 8
Друг и коллега Дэвида Бомы 88–89
Квантовая запутанность 96, 100
Конденсат Бозе — Эйнштейна 144, 147
Общая теория относительности 20, 152
Фотоны 28, 32
Фотоэлектрический эффект 20
ЭПР-парадокс 77, 97, 98
Эксперимент с двойной щелью 32, 84, 86, 92
Электроника 116, 117, 120
Электронные оболочки 58
Электроны 8, 14, 20, 22, 24, 27, 28, 30, 32, 36, 38, 42, 56, 57, 63, 80, 106, 116, 118, 120, 122, 126, 130, 136, 140, 142, 144, 150
Элементы 6
Энергия нулевой точки 137, 138
Эффект Казимира 138

Ю
Юнг, Томас 32

Я
Якобсен, Карл 27

БЛАГОДАРНОСТИ

СПИСОК ИЛЛЮСТРАЦИЙ

Издатели выражают благодарность следующим людям и организациям за разрешение на публикацию в книге принадлежащих им иллюстраций. Мы сделали все возможное, чтобы упомянуть всех, но выражаем сожаление, если о ком-то забыли.

Все изображения, за исключением особо упомянутых ниже, принадлежат агентствам Shutterstock, Inc./www.shutterstock.com и Clipart Images/www.clipart.com.

Bettmann/Corbis: 44, 62, 67.

Немецкий федеральный архив: 41.

H. Raab: 111.

Kelvin Fagan/Лаборатория Кавендиша: 128.

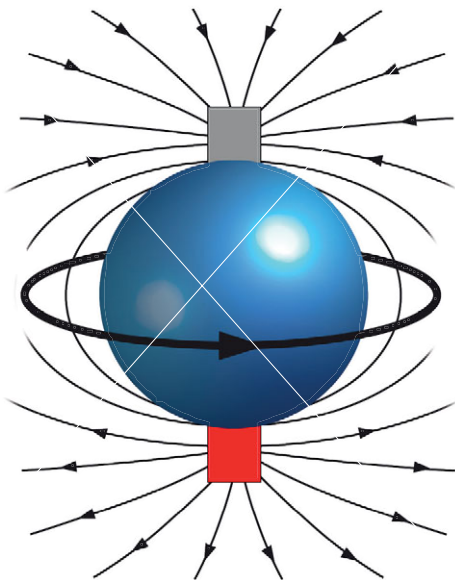
Keystone/Getty Images: 88.

Библиотека конгресса США: 26, 99.

NASA: 59.

Университет Квинс в Белфасте: 102.

SSPL/Getty Images: 71.



Про кота Шрёдингера знают, пожалуй, все, но знаете ли вы про уравнение Шрёдингера? Как устроены лазеры, транзисторы и электронные микроскопы? Чем опасна перенормировка? Почему жидкость становится сверхтекучей? На что способен квантовый компьютер? Великолепный справочник по квантовой физике предлагает вам познакомиться с историей величайших открытий современной науки и понять ее основные идеи и принципы.

«Квантовая теория за 30 секунд» посвящена самой любопытной и поразительной области современной науки и предлагает читателю краткое описание основных ее 50 идей и концепций. В наше время о достижениях квантовой физики говорят все — новые открытия моментально попадают в заголовки новостей, а люди вокруг увлеченно обсуждают их возможное применение на практике. Полученные из этой книги знания помогут вам поддержать беседу о параллельных мирах, волновой функции или о принципе неопределенности, а также высказать свое мнение о загадках квантовой запутанности.

Редактор Брайан Клегг читает лекции по экспериментальной физике в Кембриджском университете, а также выступает в Оксфордском университете и в Королевском институте. Его статьи печатаются в изданиях *Nature*, *Times* и *Wall Street Journal*. Среди его публикаций — книги *«A Brief History of Infinity»*, *«How to Build a Time Machine»*.

УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ КАТАСТРОФА
ГИПОТЕЗА ПЛАНТА О КВАНТАХ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ
ФОРМУЛА БАЛЬМЕРА
АТОМ БОРА
КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ
ВОЛНЫ ДЕ БРОЙЛЯ
ЭКСПЕРИМЕНТ С ДВОЙНОЙ ЩЕЛЬЮ
КВАНТОВЫЙ СПИН
МАТРИЧНАЯ МЕХАНИКА
УРАВНЕНИЕ ШРЁДИНГЕРА
КОТ ШРЁДИНГЕРА
ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ГЕЙЗЕНБЕРГА
КОЛЛАПС ВОЛНОВОЙ ФУНКЦИИ
ДЕКОГЕРЕНЦИЯ
ПРИНЦИП ПАУЛИ
УРАВНЕНИЕ ДИРАКА
КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ
ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ
ОПАСНОСТИ ПЕРЕНОРМИРОВКИ
ДИАГРАММЫ ФЕЙНМАНА
НАЗАД ВО ВРЕМЕНИ
ОПТИЧЕСКИЕ ДЕЛИТЕЛИ ПУЧКА
ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ
СВЕРХСВЕТОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ
КОПЕНГАГЕНСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ БОМА
КОЛЛАПС СОЗНАНИЯ
МНОГОМИРОВАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ
ПАРАДОКС ЭЙНШТЕЙНА — ПОДОЛЬСКОГО — РОЗЕНА
НЕРАВЕНСТВО БЕЛЛА
КВАНТОВОЕ ШИФРОВАНИЕ
КУБИТЫ
КВАНТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ
КВАНТОВАЯ ТЕЛЕПОРТАЦИЯ
КВАНТОВЫЙ ЭФФЕКТ ЗЕНОНА
ЛАЗЕР
ТРАНЗИСТОРЫ
ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП
МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНЫЕ ТОМОГРАФЫ
ЭФФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА
КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ
КВАНТОВАЯ ОПТИКА
ЭНЕРГИЯ НУЛЕВОЙ ТОЧКИ
СВЕРХПРОВОДНИКИ
СВЕРХТЕКУЧЕСТЬ
КОНДЕНСАТ БОЗЕ — ЭЙНШТЕЙНА
КВАНТОВАЯ ХРОМОДИНАМИКА
КВАНТОВАЯ БИОЛОГИЯ
КВАНТОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ

ISBN 978-5-386-07920-8



9 785386 079208



РИПОД
КЛАССИК