

ISSN 0130-2221

2022 · №11-12

ноябрь-декабрь

КВАНТ

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЙ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



КВАНТ

НОЯБРЬ-
ДЕКАБРЬ 2022

№11-12

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЙ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1970 ГОДА

В номере:

УЧРЕДИТЕЛИ

Российская академия наук

Математический институт
им. В.А.Стеклова РАН

Физический институт
им. П.Н.Лебедева РАН

Московский
физико-технический институт
Московский центр непрерывного
математического образования

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

А.А.Гайфуллин

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Н.Н.Андреев, Л.К.Белопухов,
М.Н.Бондаров, А.А.Варламов,
С.Д.Варламов, А.П.Веселов,
А.Н.Виленкин, Н.П.Долбилин,
С.А.Дориченко, В.Н.Дубровский,
А.А.Заславский, А.Я.Канель-Белов,
П.А.Кожевников, С.П.Коновалов,
К.П.Кохась, А.А.Леонович, Ю.П.Лысов,
А.Б.Минеев, В.Ю.Протасов,
А.М.Райгородский, А.Б.Сосинский,
А.Л.Стасенко, В.Г.Сурдин,
В.М.Тихомиров, В.А.Тихомирова,
А.В.Устинов (заместитель главного
редактора), А.И.Черноуцан
(заместитель главного редактора)**

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

**А.В.Анджанс, В.И.Берник,
А.А.Боровой, В.В.Козлов,
С.П.Новиков, А.Л.Семенов,
С.К.Смирнов, А.Р.Хохлов**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1970 ГОДА

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

И.К.Кикоин

ПЕРВЫЙ ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

А.Н.Колмогоров

**Л.А.Арцимович, М.И.Башмаков, В.Г.Болтянский,
И.Н.Бронштейн, Н.Б.Васильев, И.Ф.Гинзбург,
В.Г.Зубов, П.Л.Капица, В.А.Кириллин,
Г.И.Косоуров, В.А.Лешковцев, В.П.Лишевский,
А.И. Маркушевич, М.Д.Миллионщиков,
Н.А.Патрикеева, Н.Х.Розов, А.П.Савин,
И.Ш.Слободецкий, М.Л.Смолянский,
Я.А.Сморodinский, В.А.Фабрикант, Я.Е.Шнайдер**

- 2 Нобелевская премия 2022 года. *Л.Белопухов*
14 Путешествия по графам. *Д.Фомин*

ЗАДАЧНИК «КВАНТА»

- 22 Задачи М2722–М2729, Ф2729–Ф2736
24 Решения задач М2697, М2710–М2713,
Ф2717–Ф2720

КАЛЕЙДОСКОП «КВАНТА»

- 32 Физика+биология

ИНФОРМАЦИЯ

- 34 Премия имени Александра Беляева

«КВАНТ» ДЛЯ МЛАДШИХ ШКОЛЬНИКОВ

- 35 Задачи
36 Статистически высший класс. *К.Кохась*

КОНКУРС ИМЕНИ А.П.САВИНА

- 40 Задачи 9–16

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТАТИВ

- 42 Бум и шшш... *Л.Ашкинази*

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- 43 Физико-математическая олимпиада «Физтех»

НАШИ НАБЛЮДЕНИЯ

- 49 Секреты новогодней красавицы. *С.Салихов,
Д.Ливанов*

ЛАБОРАТОРИЯ «КВАНТА»

- 53 Что такое свежий воздух. *А.Князев, А.Князев (мл.)*

- 58 Ответы, указания, решения
62 Напечатано в 2022 году

Памяти Ж.М.Раббота (41)

Вниманию наших читателей (21)

НА ОБЛОЖКЕ

- I *Иллюстрация к статье «Секреты новогодней красавицы»*
II *Коллекция головоломок*
III *Шахматная страничка*
IV *Прогулки с физикой*

Нобелевская премия 2022 года

Л. БЕЛОПУХОВ

НОБЕЛЕВСКАЯ ПРЕМИЯ ПО ФИЗИКЕ этого года присуждена «за эксперименты со спутанными фотонами, которые продемонстрировали нарушение неравенств Белла и дали начало квантовой информатике».

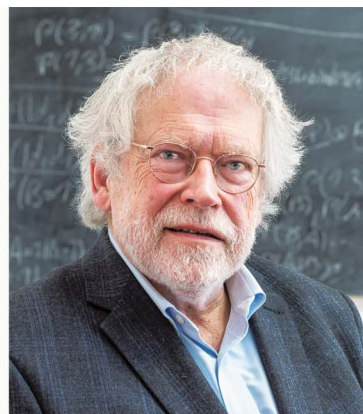
Вспомним слова из завещания Нобеля: «... назначение его <фонда> – ежегодное награждение денежными премиями тех лиц, которые в течение предыдущего года сумели принести наибольшую пользу человечеству». С самого начала присуждения премий не соблюдалось условие «в течение предыдущего года». И уже первая Нобелевская премия по физике была присуждена в 1901 году К.Рентгену за открытие, которое было сделано за 4 года до этого. Но польза применения рентгеновского излучения несомненна, она была доказана американскими врачами через месяц после публикации об открытии. А вторая премия по физике была присуждена Х.Лоренцу и Т.Зееману «за исследование влияния магнетизма на процессы излучения», или, как это сейчас формулируется, за «открытие и объяснение тонкой структуры спектров». В этом случае «польза человечеству» не очень проглядывается.

Стало ясно, что если в открытиях по медицине, по химии, по экономике, как и в премиях мира, можно четко представить «пользу человечеству» от достижений лауреатов, то по отношению к физике это сделать нелегко (так же, кстати, как и для премий по литературе). По одной из версий считается, что Нобель потому и не включил в перечень номинаций математику, что в математических достижениях только посвященные могут усмотреть конкретную полезность для людей, а не только для самой математики.

Из 22 премий по физике, присужденных в этом веке, пожалуй, только в двух случаях конкретная польза легко просматривается. Это – премия 2014 года за энерго-сберегающие светодиоды и премии 2009 года за полупроводниковые схемы для формирования изображений и за новые материалы для волоконной оптической связи. С натяжкой можно распространить термин «польза» на те достижения, которые расширяют кругозор людей и удовлетворяют любопытство по отношению к природе. Таковы премии за доказательство ускоренного расширения Вселенной (2011), за открытие гравитационных волн (2017), за экзопланеты (2019), за черные дыры (2020). Остальные премии присуждены за теоретические и экспериментальные достижения по отдельным проблемам современной физики и поэтому вызывают интерес прежде всего только у самих физиков.

На этом фоне последняя нобелевская премия представляет собой особое явление. С одной стороны, суть проблемы, в решение которой внесли свой вклад лауреаты, понятна лишь небольшому числу физиков-теоретиков, занимающихся обоснованием квантовой механики. Даже на физических факультетах университетов эта проблема затрагивается только в некоторых магистерских программах. Большинство же физиков, если и слышали о ней, то глубоко в нее не вникали. А с другой стороны, в последние годы в научно-популярной прессе стали часто появляться термины «запутанные фотоны», «квантовая телепортация», «квантовые компьютеры». К этим терминам стали привыкать, не очень понимая, что это такое.

Буквально с первых же дней после присуждения премии в интернете стали появляться статьи, в которых делались попыт-



Лауреаты Нобелевской премии по физике 2022 года (слева направо): Ален Аспе, Джон Клаузер и Антон Цайлингер

ки объяснить, за что же она дана. И наряду с серьезными материалами появились и не очень вразумительные, но зато носящие кричащие или игривые заголовки. Вот только некоторые из них: «Эйнштейн был не прав», «Бог играет в эти игры», «Что доказали ученые и почему это касается именно тебя», «Бог существует – научное доказательство», «В миллиарды раз быстрее света», «Страсть на расстоянии», «Квантовая запутанность и квантовая телепортация – хайп», «Когда носок становится правым». Серьезные же материалы стали появляться задолго до премии, с 2007 года.

Так кто же стали лауреатами?

Американский физик **Джон Фрэнсис Клаузер** (John F. Clauser) родился в 1942 году в Пасадене. Он закончил Калифорнийский технологический институт, в котором на курсе обучается всего лишь 200 студентов, а профессоров, которые их учат, – не меньше. С этим вузом связан 31 нобелевский лауреат (теперь – 32). В 29 лет Клаузер стал доктором наук, защитив диссертацию в Колумбийском университете. После этого он работал и продолжает работать в нескольких престижных научных лабораториях США.

Французский физик **Ален Аспе** (Alain Aspect) родился в 1947 году в маленьком городке Ажен. Учился он в одном из парижских университетов, в другом защитил докторскую диссертацию и работал в

парижских научных учреждениях. Основные его исследования были связаны с квантовой оптикой – применением лазеров в различных физических экспериментах.

Австрийский физик **Антон Цайлингер** (Anton Zeilinger) родился в 1945 году в небольшом австрийском городе Рид. Он закончил Венский университет, стал там же в 1971 году доктором наук, всю жизнь проработал в этом университете и сейчас является его почетным профессором. Занимался он вначале нейтронной интерферометрией, а потом уже квантовой оптикой.

Из этих кратких биографических данных видно, что лауреаты – почти ровесники солидного возраста (75, 77 и 80 лет). Свои эксперименты со спутанными фотонами они начали несколько десятков лет назад (Клаузер – в 1972, Аспе – в 1981, Цайлингер – в 1997 году). В 2010 году все трое были отмечены премией Вольфа. Эта премия по физике считается по престижности второй после нобелевской. В 2004 году она была присуждена российскому физика Виталию Гинзбургу, в 2007 году – знаменитому английскому физика Стивену Хокингу. Значение премии Вольфа особенно велико по тем номинациям, которых нет в нобелевской премии, – по математике, сельскому хозяйству, по искусству и культуре.

Вот формулировка обоснования премии Вольфа Аспе, Клаузеру и Цайлингеру –

«за фундаментальный концептуальный и экспериментальный вклад в основы квантовой физики, в частности за серию возрастающих по сложности проверок неравенства Белла (или расширенных версий этого неравенства) с использованием запутанных квантовых состояний». Это обоснование отличается от обоснования нобелевской награды отсутствием упоминания о квантовой информатике.

Но, пожалуй, главное в обосновании вольфовской премии – это слова «вклад в основы квантовой физики». И именно тогда, в 2010 году в научной прессе прозвучали слова о «Второй Квантовой Революции». Именно так, прописными буквами. Нобелевский комитет тоже нашел торжественные слова в более подробном обосновании премии: «Мы вступаем в новую эру благодаря современным инструментам для управления системами запутанных частиц, разрабатываем совершенно новые способы для хранения, передачи и обработки информации».

Для того чтобы хоть немного разобраться во второй квантовой революции, нужно вернуться к первой, к появлению сто лет назад квантовой механики. На страницах журнала «Квант» и в книгах «Библиотечки «Квант» печатались прекрасные научные обзоры (А.Б.Мигдал, М.И.Каганов, И.К.Кикоин, Я.Б.Зельдович). Последний по времени обзор – это 122-й выпуск «Библиотечки» (А.З.Долгинов. «Строение материи: от атомов до Вселенной»). В этой книге уже есть глава «Квантовая телепортация». А перед ней изложено содержание первой квантовой революции. Автор, известный российский физик-теоретик в области космологии и астрофизики, по-видимому счел это совершенно необходимым перед рассказом о квантовой телепортации и о новейших успехах в постижении Вселенной.

Первая квантовая революция

Этой революции предшествовало рождение квантовых представлений об электромагнитном излучении (М.Планк, А.Эйнштейн, А.Комптон). Нильс Бор первым решился квантовать механические харак-

теристики атомного электрона и получил хорошее согласие с опытом для спектра атома водорода. Но применение его метода квантования к многоэлектронным атомам и простейшим молекулам не давало согласия с опытными данными. Бор прекрасно понимал, что все дело в нелогичности его подхода. Квантование энергии и других характеристик атомного электрона недопустимо с точки зрения законов классической физики, основанной на математических выражениях, в которых все величины должны быть непрерывными. Именно таковы законы ньютоновской механики, термодинамики и электродинамики, которые Бор использовал в своих расчетах и которые были многократно проверены на опыте – на их основе работают станки, двигатели паровозов, поездов и автомобилей, электрическое освещение, телеграф, телефон и радио. Но одновременно с этим Бор «волевым порядком» ввел квантование характеристик состояния электрона вместо их непрерывности. Это было нелогично, но необходимо для выводов.

Бор интуитивно понимал, что классические законы создавались и применялись в так называемом макромире (соразмерном с размерами человека и возможностями его органов чувств). А для микромира, прежде всего для электронов с их ничтожной массой, нужны другие законы. Он понимал, конечно, что новая механика будет не похожа на классическую физику, но какой она должна быть с математической стороны, он не знал. И еще ему было ясно, что новые законы не должны отменить старые. Классические законы должны вытекать из новых законов для объектов достаточно большой массы.

Случилось так, что в середине 20-х годов прошлого столетия активно проявили себя несколько физиков-теоретиков, которые решительно подошли к проблеме описания поведения микрочастиц. Луи де Бройль ввел представление о волновых свойствах объектов, имеющих массу. Эрвин Шрёдингер ввел понятие о волновой функции объекта волна-частица и постулировал уравнение для нахождения этой функции. Вернер Гейзенберг и Макс Борн пошли еще дальше

— они ввели для микрообъектов принцип вероятностного детерминизма. В классической физике знание состояния объекта в данный момент времени определяет точное состояние объекта в последующие моменты. А в новой (квантовой) механике можно предсказать, рассчитать только вероятности состояния, например, исходя из решения уравнения Шрёдингера. А измеряемыми в опытах величинами могут быть лишь средние величины, находимые по правилам математической статистики, и флуктуации — отклонения от этих средних.

Гейзенберг сформулировал правило, когда нужно использовать квантовый подход к механике микромира. Этот принцип получил название «соотношение неопределенностей». В связи с этим впервые в физике возникла необходимость разобраться с философским вопросом, что такое реальность. В классической физике макромира символы реальности — масса, скорость, энергия, характеристики электрического и магнитного поля — всегда допускают экспериментальную проверку. Точность измерений при этом зависит только от совершенства прибора. Но в микромире привычные характеристики состояния, например координата и скорость, оказались принципиально не измеряемыми точно, даже самыми совершенными приборами, если эти измерения производить одновременно. Критерием перехода к такому принципу стала постоянная Планка, интуитивно введенная ранее Максом Планком, Альбертом Эйнштейном и Нильсом Бором для решения конкретных задач (теории теплового излучения, корпускулярного поведения электромагнитного излучения, поведения атомного электрона). Оказалось, что постоянная Планка — это мировая константа, которую всегда необходимо учитывать при решении задач в микромире.

Бор пошел еще дальше. Анализируя принцип неопределенности, он пришел к убеждению, что сам факт измерения какой-либо величины так изменяет состояние микрообъекта, что его дальнейшее поведение становится отличным от того, какое было бы без этого измерения. Такой подход к микромиру получил в истории

физики название «копенгагенский», поскольку именно в этом городе, где жил Бор, и проходили регулярные и очень частые встречи физиков-новаторов для обсуждения новых принципиальных вопросов.

Несмотря на теоретические сложности применение новой механики оказалось очень полезным. Были подтверждены и предсказаны все более точные измерения спектров химических элементов и соединений. При этом в квантовой теории родилось понятие спина электрона, подтвержденное уточнением квантовых подходов, сделанное Полем Дираком. Вольфганг Паули ввел принцип подхода к коллективу — «ансамблю» частиц, обладающих одинаковым характерным спином ($1/2$), и показал, как с помощью квантовой механики можно понять структуру периодической системы элементов, т.е. структуру электронных оболочек атомов. Это не требовало решения принципиальных вопросов о вероятностной причинности и физической реальности и стало первым крупным достижением квантовой механики.

Вскоре последовало квантовое объяснение химической связи в молекуле — родилась квантовая химия. И только на ее основе удалось понять строение «молекул жизни» ДНК и РНК. Появилась квантовая физика твердого тела, которая была использована для создания полупроводниковых материалов. Пожалуй, именно это применение квантовой механики сегодня является самым значимым для людей. Ведь без квантовой механики не были бы изобретены и созданы все те электронные приборы, которые нас окружают, — от карманных гаджетов, так сильно изменивших возможности и особенности общения и познания, до суперкомпьютеров. Были объяснены «таинственные» явления ферромагнетизма и сверхпроводимости. И, наконец, квантовая механика оказалась совершенно необходимой в ядерной физике.

Сомневаться в истинности квантовой механики невозможно, она так же необходима человечеству, как когда-то стали необходимыми классическая механика (ньютоновская) и классическая электродинамика (максвелловская).

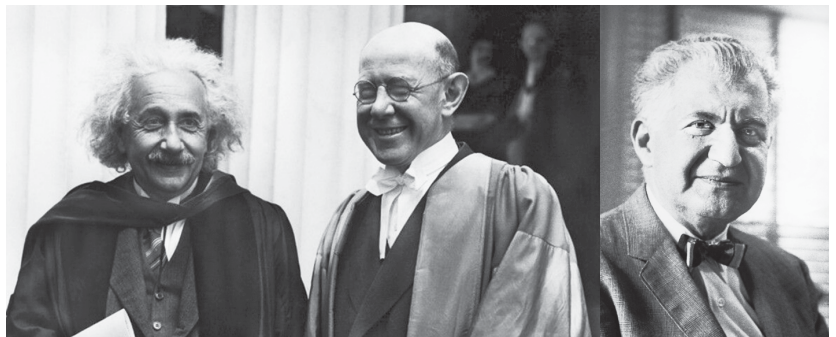
Скрытые параметры в квантовой механике

Однако, несмотря на успехи квантовой механики не все физики были согласны с принципиальным отсутствием наглядности и возможности точных предсказаний в квантовой механике. В их числе были и де Бройль, и Шрёдингер, и Эйнштейн. В 1932 году математик Джон фон Нейман в фундаментальной монографии «Математические основы квантовой механики» привел теорему, интерпретацией которой стало отсутствие «скрытых параметров». Так были названы некие, пока неизвестные характеристики состояния квантовой частицы (системы), которые позволяли бы определить ее состояние однозначно, а не вероятностно. Эйнштейн назвал это принципом локальной реальности, и он верил в существование таких параметров. Тем более, что математики нашли в доказательствах фон Неймана некоторые неточности.

А главное, Эйнштейн не был согласен с «копенгагенской» интерпретацией квантовой механики, заключавшейся в обязательном влиянии процесса измерения на объект. На международных конгрессах физиков и в переписке он вступил в полемику с Бором, предлагая мысленные реальные эксперименты, в которых, по его мнению, можно было обнаружить скрытые параметры и обойти тем самым требования соотношений неопределенностей и вероятностную трактовку поведения микрообъектов. «Бог не играет в кости» — стало для Эйнштейна лозунгом в этой полемике. А в одном из диалогов Бор сказал Эйнштейну: «По-моему, вы навязываете Богу свои правила игры!» Однажды на вечерней прогулке после заседания Эйнштейн заметил Бору: «Неужели вы считаете, что если смотреть на Луну в телескоп, то она изменит свое состояние?» Бор ответил: «Но ведь Луна

не микрообъект». Полемика Эйнштейна с Бором длилась больше 20 лет. Бор каждый раз находил ошибку в мысленных экспериментах Эйнштейна. Но это противостояние не мешало Бору заниматься проблемами ядерной физики, а Эйнштейну — поисками единой теории поля. Может быть, именно его неверие в истинность квантовой механики не позволило ему достичь успеха в этой грандиозной задаче, которая не имеет пока своего решения.

В 1935 году появилась статья Эйнштейна, написанная совместно с ассистентом Принстонского университета Натаном Розеном и Борисом Подольским, за несколько лет до этого руководившим отделом теоретической физики Харьковского физико-технического института. Это тройное авторство впоследствии во всех ссылках обозначалось краткой аббревиатурой ЭПР. Статья называлась «Можно ли считать квантово-механическое описание физической реальности полным?» В мысленном эксперименте показывалось, что если состояние двух частей системы было взаимозависимым, например подчинялось закону сохранения импульса, то после пространственного разделения этих частей взаимозависимость должна оставаться однозначной и допускать локальную реальность любых одновременных измерений. А согласно соотношению неопределенностей, если измерять, например, скорость частицы как можно точнее, то ее положение в пространстве становится все более и более неопределенным. По мнению ЭПР, «никакое разумное определение реальности не должно, казалось бы, допускать этого». В



Альберт Эйнштейн, Натан Розен, Борис Подольский