1970 г. Июнь *Том 101, вып. 2*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

530.145.1

ПРОБЛЕМА ИЗМЕРЕНИЙ

Д. Вик

В представившемся нам сейчас случае мне кажется весьма уместным начать обсуждение с рассмотрения проблемы измерений. Это кажется разумным ввиду точного характера нашей науки. Галилео Галилей всегда подчеркивал необходимость разработки надежных и точных методов измерения и уделял этому вопросу постоянное внимание на протяжении всей своей жизни. Вряд ли кому-либо из присутствующих здесь нужно напоминать как о том, что в своих работах Галилей неоднократно обращался, например, к вопросу о точном измерении времени, который решал с незаурядной изобретательностью, так и о том, насколько велика его заслуга в тех огромных успехах, которых достигла техника измерений.

Для развития физики и астрономии характерно, что проблемы измерения времени и достижения все возрастающей степени точности при измерении продолжительных интервалов, как и все большей разрешающей способности при измерении ультракоротких интервалов времени, являются и по сей день предметом постоянного внимания физиков.

Однако время — это лишь одна из характеристик, присущих окружающему нас миру, но если мы коснемся других измерений, то снова обнаружим, что и тут Галилею принадлежит роль основоположника: ему принадлежат первые наблюдения едва различимых деталей очень удаленных объектов. И теперь мы снова видим, что в изучении пространственной структуры физических объектов — будь то участки протяженностью в несколько метров на Луне или же детали порядка 10^{-14} *см* в структуре ядерных частиц — проблемы достижения все возрастающей разрешающей способности и сегодня выступают на первый план.

Я — теоретик. Поэтому, говоря о проблемах измерений, я, естественно, вспоминаю специфические вопросы измерений, которые связаны с открытой Планком квантованностью действия и описываются гейзенберговским принципом неопределенности или, в более общем виде, концепцией дополнительности Бора [1]. Как теоретик, я чувствую себя обязанным какую-то часть предоставленного мне времени посвятить этим вопросам. Однако при этом я хотел бы быть больше экспериментатором, чтобы уделить достойное внимание другим аспектам обсуждаемой проблемы.

Принцип дополнительности устанавливает ограничение на точность, с которой могут быть одновременно измерены два или более описывающих

---

*) G.-C. Wick, The Extention of Measurement, Suppl. al Nuovo Cimento 4 (2), 309 (1966). Речь на юбилейной сессии, посвященной 400-летию со дня рождения Галилея. Перевод И. И. Ройзена.

Профессор Джанкарло Вик — сотрудник Брукхейвенской национальной лаборатории (США).

систему параметра. Представляется естественным, однако, начать с обсуждения той точности, которая достижима с помощью современных методов при измерении каждой переменной по отдельности. В частности, можно начать с вопроса об измерении времени. Когда Бете и Гейгер впервые осуществили свой классический эксперимент по проверке законов сохранения энергии и импульса в каждом отдельном акте рассеяния γ-кванта, для регистрации совпадения событий рассеяния кванта и вылета под соответствующим углом электрона отдачи использовались одновременно два самописца на бегущей ленте. Позднее Росси придумал схему совпадений, в результате чего с помощью существовавшей в то время электронной аппаратуры, стали доступны измерению времена порядка 10^{-4} *сек*. Фотоумножители и современная электроника позволили понизить эту цифру до величины, заведомо меньшей одной наносекунды. При благоприятных обстоятельствах можно было пойти еще значительно дальше. Частица, летящая со скоростью, близкой к скорости света, проходит путь длиной в один микрон за время порядка $3\cdot10^{-15}$ *сек*. Таким образом, если пробег частицы в эмульсии до распада около одного микрона, то измеряется время жизни как раз названного выше порядка. Другим фактором, помогающим нам продвинуться еще дальше, является релятивистское замедление времени. Интересующей нас величиной является собственное время жизни, т. е. время жизни в системе покоя изучаемой частицы. В то же время длина трека, оставляемого частицей, связана с ее временем жизни в лабораторной системе, которое в γ раз больше. Если, скажем, $\gamma = 30$, то мы можем измерить время жизни порядка 10^{-16} *сек*. Хорошо известно, что таким путем удалось определить время жизни нейтрального пиона. Разумеется, косвенным путем, по данным о ширине резонансов, можно получить информацию об еще значительно меньших временах. Скажем, если частица наблюдается как резонанс в какой-то реакции, ширина которого порядка 1 *Мэв* $= 1{,}6\cdot10^{-6}$ *эрг*, то из соотношения неопределенности мы находим, что среднее время ее жизни

$$\tau = \hbar/\Gamma = 10^{-27}/1{,}6\cdot10^{-6} \approx 0{,}6\cdot10^{-21} \text{ сек}.$$

Однако было бы неправильно сказать, что этот временной интервал доступен непосредственному измерению.

Посмотрим теперь на другую сторону этой проблемы — насколько точно мы умеем измерять временны́е интервалы. Огромный прогресс в этом направлении был достигнут благодаря использованию атомного эталона времени, т. е. атомных часов, мазеров и т. п. Наиболее показательным в этом отношении является пример водородного мазера [2], который я хотел бы вкратце описать.

Пучок атомов водорода фокусируется на маленьком зазоре кварцевой колбы, расположенной в центре микроволнового резонатора, настроенного на частоту колебаний, отвечающую переходу между уровнями сверхтонкой структуры атомов водорода. Эта частота соответствует разности между энергиями уровней основного состояния водородного атома с параллельно и антипараллельно направленными спинами электрона и протона:

$$\nu = 1{,}42\cdot10^{9} \text{ гц (или } \lambda = 21 \text{ см)}.$$

Я не стану вам рассказывать, в каком режиме работает резонатор, и описывать магнит, с помощью которого фокусируется пучок. Достаточно сказать только, что магнит настроен так, чтобы фокусировать на отверстии колбы только атомы, находящиеся на верхнем энергетическом уровне. После входа в колбу атомы многократно отражаются, прежде чем снова попасть в это отверстие и вылететь наружу. Давление внутри колбы поддерживается настолько низким, что атомы испытывают соударения только

со стенками. Покрывая их тефлоном, удается достигнуть того, что из-за отражения от стенок ориентации спинов в атомах существенно не изменяются, хотя каждый атом, прежде чем выйти наружу, сталкивается со стенками около десяти тысяч раз. Предположим на минуту обратное, что при каждом отражении от стенки ориентация спина полностью нарушается. При скорости $v \approx 2 \cdot 10^5$ *см/сек* и диаметре, скажем, 20 *см*, среднее время между последовательными отражениями $\tau \approx 10^{-4}$ *сек*. В этом случае, согласно классической теории, ширина линии, соответствующей переходу между уровнями сверхтонкой структуры, была бы порядка $\Delta\nu \approx \tau^{-1} \approx 10$ *кгц*. Но в соответствии со сказанным выше можно считать, что время τ равно продолжительности пребывания атома в колбе, т. е. $\tau \approx 1$ *сек*; поэтому очевидно, что ширина этой линии должна быть порядка 1 *гц*.

Работа мазера основана на превращении энергии возбуждения атомов в колебания одной из мод резонатора. Это может происходить, в частности, вследствие спонтанного излучения, однако вероятность такого механизма крайне мала, так как соответствующее среднее время жизни порядка 10^8 лет (такое большое время жизни обусловлено магнитным дипольным характером излучения.) Поэтому основную роль играет индуцированное излучение, которое становится преобладающим, если только имеется хотя бы слабое внешнее поле. Точность, которая достигается при использовании водородного мазера в качестве часов, помимо этого, разумеется, связана с фантастической узостью соответствующей линии перехода. Можно было бы опасаться, например, что из-за хаотичности движения атомов сильно скажется обычное допплеровское уширение, однако удается показать, что ввиду многократного изменения направления движения атомов за время их пребывания в колбе, а также по ряду других причин, эффект хаотичности их движения практически полностью устраняется и допплеровское уширение становится пренебрежимо малым. У этого прибора есть еще много других тонких и интересных особенностей, на которых я не могу сейчас останавливаться. Водородный мазер позволил получить для частоты перехода между уровнями сверхтонкого расщепления значение [3]

$$\Delta\nu(H) = (1\,420\,405\,751{,}800 \pm 0{,}028)\ \text{гц}, \tag{1}$$

и при этом еще нужно отметить, что источником ошибок в этом фантастически точном измерении почти полностью является недостаточная точность генератора стандартных сигналов, с которыми сравнивалась изучаемая линия. Точность согласования друг с другом двух водородных мазеров значительно выше.

Я хотел бы напомнить вам, что достижение подобных сказочных точностей, конечно же, не является самоцелью. Как подчеркивал еще Галилей, точность представляет собой один из существенных факторов, необходимых для новых важных открытий. В частности, примером этого может служить изучение малых нерегулярностей во вращении Земли, что стало возможным благодаря развитию, наряду со всем остальным, методов точного измерения времени. В результате мы получили важную информацию о процессах, происходящих в ее недрах. Примером из совершенно другой области является точное измерение лэмбовского сдвига и сверхтонкой структуры атома водорода, которое дало нам много важных сведений, касающихся реальности вакуумных флуктуаций электромагнитного поля, распределения магнитного момента внутри элементарных частиц и т. п.

До сих пор речь шла об измерении времени. Остановимся теперь на ряде других интересных вопросов. Увеличение разрешающей способности наших приборов, вероятно, лучше всего иллюстрируется наименьшим

доступным измерению значением α углового размера звезды. В грубом приближении для телескопа величина α определяется соотношением $\alpha \approx \lambda\!\!\!^{-}/d$, где $\lambda\!\!\!^{-}$ — приведенная длина световой волны, а d — диаметр линзы телескопа. Общеизвестно — это показал Майкельсон,— что для дальнейшего увеличения разрешающей способности нет необходимости изготовлять линзы чудовищных размеров. Существенным фактором в этом деле является степень когерентности между светом, падающим, скажем, на противоположные концы диаметра линзы (рис. 1). Свет, излучаемый звездой с угловым размером α, можно представить как суперпозицию плоских волн. Волны, приходящие от каждой точки звезды, направлены определенным образом, причем малый угол между направлениями волн, излучаемых ее противоположными краями, равен α. Две такие волны представлены линиями AB и AB' (фронты этих волн) в верхней части рис. 1. Если фазы этих волн одинаковы, скажем, на левом краю линзы, то на правом разность фаз $\varphi = \alpha d/\lambda\!\!\!^{-}$. Таким образом, параметр φ характеризует степень когерентности световых пучков, падающих на противоположные края линзы. Это простое обстоятельство является, по существу, основой предложенного Майкельсоном интерференционного метода определения угловых размеров звезд. Короче говоря, в этом методе измеряется корреляционная функция

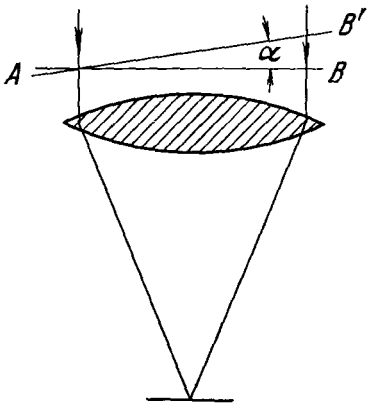

Рис. 1.

$$\langle A_1(t)\, A_2(t)\rangle \qquad (2)$$

между амплитудами A_1 и A_2 световых волн, падающих на две точки P_1 и P_2, лежащие в плоскости, перпендикулярной направлению распространения света, и удаленные друг от друга на расстояние d.

Идея метода Майкельсона одинаково понятна как с чисто классической, так и с квантовомеханической точек зрения на природу света. В последнем случае световые волны следует рассматривать как волны вероятности, отнесенные к одному световому кванту, а максимумы и минимумы в интерференционной картине — просто как максимумы и минимумы вероятности попадания этого кванта.

В этой связи я хотел бы вкратце сказать о создании Хэнбери-Брауном и Твиссом [4] нового типа интерферометра для изучения звезд. Этот интерферометр одинаково хорош как для радиоастрономических, так и для обычных оптических наблюдений и открывает перспективу значительного увеличения достижимой в экспериментах базы d, а следовательно, и разрешающей способности.

В основу этого метода положена корреляция между временами прихода *различных* световых квантов. Он несколько сложнее для понимания, чем метод Майкельсона, что и послужило причиной ряда недоразумений. В действительности, явление, о котором идет речь, представляет собой просто один весьма своеобразный пример характерных свойств бозонов, формулировка которых тесно связана с именем Эйнштейна. Экспериментальная сторона дела состоит в измерении корреляции, скажем, между токами, возникающими в двух фотоумножителях, расположенных на расстоянии d друг от друга (рис. 2). Флуктуации этих токов в соответствующей полосе частот усиливаются, после чего перемешиваются в специальном смесителе. Средняя величина их произведения как раз и является мерой корреляции между флуктуациями токов.

Чтобы понять смысл этих корреляций, мы на минутку отвлечемся и рассмотрим, следуя Перцеллу [5], флуктуации в одном единственном счетчике. Вычислим интеграл по времени T от интенсивности падающего на счетчик светового потока. При этом мы, разумеется, получим величину, пропорциональную полной энергии E света, действовавшего на счетчик в течение времени T. Если кванты этого света имеют частоту, равную ν, то

$$E = nh\nu,$$

где n — число квантов. Если эти кванты статистически независимы, то при многократном повторении измерения их числа за время T флуктуации величины n будут определяться обычным выражением $(\Delta n)^2 = n$, откуда следует, что

$$\overline{(\Delta E)^2} = Eh\nu. \qquad (3)$$

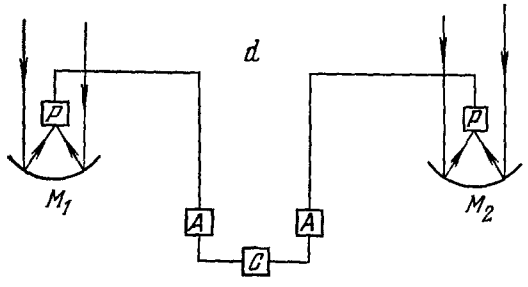

Рис. 2. M_1, M_2 — зеркала; P — фотоумножители; A — усилители, C — коррелятор.

Однако эти кванты не являются статистически независимыми, поэтому флуктуации несколько превышают значение, предсказываемое соотношением (3). Мы помним, что знаменитая формула для вычисления флуктуаций, полученная Эйнштейном в 1906 г. применительно к несколько иному случаю, содержит два члена, один из которых аналогичен правой части формулы (3). Как было отмечено Лоренцем, второй член в этой формуле легче понять, описывая свет на языке волн. То же самое имеет место и в нашем случае. Предположим для определенности, что изучается узкая линия оптического спектра с частотой ν и шириной $\Delta\nu \ll \nu$. Чем определяется эта ширина — самим ли источником света или же фильтром,— несущественно. Амплитуду световой волны в фиксированной точке P как функцию времени можно описать посредством синусоидальной волны частоты ν, амплитуда и фаза которой медленно изменяются во времени. Зависимость амплитуды от времени можно описать как «биения», обусловленные наложением слегка различающихся частот, присутствующих на «ширине» линии. Характерное время этих биений $\tau \approx (\Delta\nu)^{-1}$. Очевидно, что в некоторые моменты времени происходит почти полное погашение, а в другие — взаимное усиление различных компонент спектра. Другими словами, должны наблюдаться весьма сильные флуктуации интенсивности. Действительно, считая, что фурье-компоненты световой волны распределены случайным образом по нормальному закону, мы находим, что среднеквадратичная флуктуация ΔI интенсивности I равна $(2I)^{1/2}$. Нет нужды доказывать, что эти флуктуации будут обнаружены регистрирующим прибором. Для грубой оценки предположим, что измеряется интеграл от интенсивности по времени $T \gg \tau$. Можно считать, что излучение приходит цугами продолжительности τ, число цугов равно T/τ, а энергия каждого из них равна $E\tau/T$. Эти цуги играют роль, аналогичную той, которую в формуле (3) играют кванты $h\nu$. Такое рассмотрение, конечно, является очень грубым, поскольку цуги неодинаковы по длине. Пренебрегая этим обстоятельством и следуя аналогии со старой формулировкой Эйнштейна, мы должны добавить к квантовым флуктуациям, описываемым формулой (3), флуктуации, обусловленные биениями, в результате чего получим

$$\overline{(\Delta E)^2} = Eh\nu + (E^2\tau/T). \qquad (4)$$

Это и есть mutatis mutandis формула, выведенная Перцеллом [5].

Теперь мы можем рассмотреть флуктуации энергий E_1 и E_2, возникающие одновременно в двух независимых счетчиках. У нас нет оснований считать, что между флуктуациями типа (3) в этих счетчиках существует какая бы то ни было корреляция. Однако со вторым эффектом дело обстоит совсем иначе. Если расстояние d между счетчиками таково, что степень когерентности между световыми волнами пренебрежимо мала, то корреляция будет отсутствовать. Если же счетчики расположены очень близко друг к другу, то ясно, что классические амплитуды волн, принимаемых этими счетчиками, одинаковы, поскольку цуги достигают счетчиков одновременно. Таким образом, между их показаниями должна существовать корреляция

$$\langle \Delta E_1 \Delta E_2 \rangle \neq 0. \tag{5}$$

Стоит отметить, что это будет корреляция между квадратами амплитуд A_1 и A_2, а не между самими амплитудами, как в соотношении (2). Успешное наблюдение Хэнбери-Брауном и Твиссом этих эффектов послужило весьма значительным вкладом в развитие астрономии, и мы вправе думать, что Галилей был бы этому очень рад.

Теперь мы обратимся к другой стороне проблемы и посмотрим, какие успехи имеются в изучении экстремально малых размеров. Здесь мы идем по стопам Аббé, Рэлея и других, кто впервые показал, что минимальный размер доступных наблюдению в микроскоп деталей тесно связан с используемой для этого длиной волны. Однако по мере продвижения в область все более малых размеров и, следовательно, все меньших и меньших длин волн возникают некоторые специфические особенности, которые могут в конечном счете полностью изменить саму постановку вопроса. Для того чтобы понять, в чем дело, сравним постановку экспериментов при изучении структур малых объектов с помощью микроскопа и структуры кристаллической решетки с помощью рентгеновских лучей.

Аналогия между этими экспериментами выступает особенно отчетливо, если, следуя Аббé, считать, что изучаемый малый объект представляет собой плоскую решетку, облучаемую когерентным светом снизу. Тогда, как отмечал сам Аббé, можно сказать, что роль объектива сводится к созданию в фокальной плоскости позади линзы изображения картины фраунгоферовой дифракции на этой решетке. Оно представляет собой совокупность спектров всех порядков n ($n = 0, 1, 2, \ldots$) вплоть до некоторого максимального значения и, разумеется, сильно отличается от оптического изображения решетки, создаваемого последовательно расположенными линзами. Тем не менее ясно, что эти спектры содержат всю информацию, необходимую для последующего получения оптического изображения. Когда же мы работаем с рентгеновскими лучами, мы просто-напросто измеряем интенсивности пятен в дифракционной картине. Существенная разница однако, состоит в том, что в последнем случае дело ограничивается измерением интенсивностей, в то время как в первом в результате линейной суперпозиции спектров различных порядков в конечном счете получается оптическое изображение объекта, что означает, по существу, учет не только интенсивностей, но и относительных фаз различных амплитуд. Неизвестность фаз приводит к потерям информации, с которыми, как хорошо известно, в ряде случаев связаны серьезные проблемы при рентгеноструктурном анализе.

Ясно, что те же самые проблемы возникают и в том случае, когда мы изучаем структуру системы посредством экспериментов по рассеянию. Все, что мы в этом случае делаем, состоит в измерении угловой зависимости интенсивности рассеянного излучения. Однако, согласно волновой механике, существенную роль играют и, в принципе, подлежат измерению

также относительные фазы волн, рассеивающихся под различными углами. Недавно Гольдбергер, Льюис и Ватсон[6] задались вопросом, как их можно было бы измерить, и пришли к ряду интересных выводов. Идея состоит в облучении исследуемого объекта излучением сразу от двух источников и одновременным измерением посредством двух детекторов. Тогда из данных о корреляции между флуктуациями интенсивностей в этих детекторах можно будет извлечь информацию об относительных фазах амплитуд при различных углах рассеяния.

Хотя эта идея пока еще не воплотилась на практике, я полагаю, что примыкающие сюда вопросы представляют значительный интерес. Однако я вижу здесь и другое отличие от оптического случая, которое может иметь фундаментальное значение. Ввиду того, что между волновыми и корпускулярными свойствами излучения существует соотношение де Бройля, для того чтобы изучать все меньшие и меньшие объекты, необходимо использовать частицы все больших и больших импульсов. Это обстоятельство приводит не только к хорошо известному соотношению дополнительности *) между координатой и импульсом, но также влияет и на постановку вопроса об определении фаз рассеянных волн. Только в том случае, когда можно пренебречь отдачей рассеивающего объекта, есть основание рассчитывать на возможность сравнивать каким-либо простым способом фазы амплитуд рассеяния под различными углами. Не говоря уже о других трудностях, представляется очевидным, что именно это обстоятельство послужит серьезным ограничением на пути реализации предложения Гольдбергера, Льюиса и Ватсона при работе со сравнительно низкоэнергетическими рентгеновскими лучами.

Отдача рассеивателя приводит и к другому важному следствию, относящемуся к интерпретации экспериментальных данных о рассеянии. При обычных условиях, когда на атоме рассеиваются, скажем, рентгеновские лучи или электроны с энергией в несколько сот килоэлектрон-вольт или меньше, интенсивность волны, рассеянной под определенным углом, очень просто связана с квадратом фурье-компоненты распределения заряда в этом атоме. За исключением небольших поправок, обусловленных тепловыми колебаниями, в этом случае можно считать, что как до, так и после рассеяния атом находится в стационарном состоянии. Это перестает быть справедливым, когда передача импульса становится достаточно большой, чтобы сообщить рассеивателю значительную скорость. Ясно, что в последнем случае обычная интерпретация формфактора, как и непосредственно измеряемых величин (например, фурье-компонент чисто статического распределения заряда), будет неправильной. Прежде всего определение изменения состояния системы в процессе соударения включает существенную неоднозначность, связанную с выбором системы отсчета, в которой измеряется упомянутое распределение. Но помимо этого еще существует лоренцево сокращение масштабов в направлении движения, которое проявляется в том, что, основываясь на минимальном доступном изучению размере деталей, определяемом в соответствии с соотношением неопределенностей формулой $l \approx h/\Delta p$, можно фактически сильно завысить истинную максимальную разрешающую способность. В известном смысле можно сказать, что минимальный размер деталей «структуры частицы в системе, где она покоится», о которых еще возможно говорить, определяется комптоновской длиной волны $\hbar/Mc$ рассеивающей системы. Это обстоятельство, разумеется, привело меня к вопросу об естественных пределах

*) В советской литературе более принято называть его соотношением неопределенностей. (*Прим. перев.*)

измерений — тому самому вопросу, который после создания квантовой механики послужил объектом бесконечных дискуссий.

Единственным более или менее общепринятым ограничением измерений является принцип дополнительности. Будучи совершенно очевидным образом связана с вопросами интерпретации опытных данных, дополнительность постоянно претендует на включение в философские теории. В очень глубокой статье [7], посвященной проблемам измерения, Вигнер допускал, что при обсуждении этого вопроса физики стоят на очень шаткой платформе. В то же время и платформа философов, быть может, является даже еще более шаткой, но по другим причинам. В целом ситуация весьма неблагоприятна. И действительно, неопровержимый факт состоит в том, что после Бора очень мало кому удавалось сказать что-либо интересное о принципе дополнительности.

Оставив в стороне глубокие философские вопросы, мы, вне всякого сомнения, имеем еще достаточно других заслуживающих обсуждения проблем. Математическая теория измерений в квантовой механике была блестяще сформулирована фон Нейманом [8] еще тридцать лет тому назад и, возможно, теперь могла бы быть несколько улучшена. Предложенное им математическое описание процесса измерения, по всей вероятности, представляет собой наиболее простую последовательную схему, которую только можно придумать. Однако по этой самой причине оно, по-видимому, не обладает достаточной гибкостью для описания некоторых ситуаций, которые, по существу, интересны. В современной литературе можно найти описание ряда успешных попыток сформулировать проблемы измерений так, чтобы это в большей степени отвечало реально существующей экспериментальной ситуации [6].

Другой любопытный аспект теории измерений фон Неймана состоит в том, что из нее вытекает ряд следствий, которые часто оказываются нереальными с экспериментальной точки зрения. Так, скажем, существование законов сохранения для некоторых величин, имеющих дискретный спектр (таких, как, например, угловой момент, электрический заряд и т. п.), налагает определенные ограничения на допустимую точность измерения других величин M, которые не коммутируют с сохраняющейся величиной [9].

Если буквально следовать строгой формулировке теории измерений, то из этого факта вытекает, по существу, парадоксальный вывод, что величины M вообще нельзя измерить. Сейчас я хотел бы посвятить несколько минут тому, чтобы продемонстрировать, что́ может измениться, если опустить некоторые требования, фигурирующие в общем доказательстве.

Предположим, система Σ, свойства которой подлежат измерению, находится в состоянии ψ_μ, соответствующем собственному значению μ измеряемой величины M. В идеализированном неймановском описании процесса измерения считается, что изучаемая система Σ взаимодействует в течение некоторого времени с другой системой, называемой измерительным прибором, которая вначале находится в состоянии ξ. Для простоты будем считать, что состояние ξ известно точно и всегда одно и то же. Тогда вся составная система в целом находится первоначально в состоянии $\psi_\mu\xi$. Взаимодействие между двумя ее частями описывается унитарным преобразованием состояния, которое, однако, *не изменяет значения величины* M. Таким образом, мы можем написать, что

$$\psi_\mu\xi \xrightarrow[U]{} \sum_\rho \psi_{\mu\rho}X_{\mu\rho}, \tag{6}$$

где $\psi_{\mu\rho}$ — состояния системы Σ с одним и тем же собственным значением μ величины M. Правая часть соотношения (6) соответствует состоянию

всей составной системы в целом после того, как расстояние между системой Σ и измерительным прибором станет настолько большим, что состояние больше уже изменяться не будет. Аналогично этому, если вначале система Σ находилась в состоянии μ', где μ' — какое-либо другое собственное значение величины $M(\mu' \neq \mu)$, то соответствующее преобразование будет иметь вид

$$\psi_{\mu'}\xi \underset{U}{\longrightarrow} \sum \psi_{\mu'\rho'} X_{\mu'\rho'}. \tag{7}$$

Основное предположение фон Неймана — и совершенно очевидно, что какое-то предположение подобного типа необходимо,— состоит в том, что коль скоро значение конечного состояния *измерительного прибора* должно быть достаточно для определения величины μ (или μ'), состояния $X_{\mu\rho}$ и $X_{\mu'\rho'}$ должны быть различными (и, следовательно, ортогональными), т. е. необходимо, чтобы

$$(X_{\mu\rho} X_{\mu'\rho'}) = 0 \quad \text{при} \quad \mu' \neq \mu. \tag{8}$$

Допустим теперь, что существует некоторая сохраняющаяся величина L, которая, очевидно, должна быть аддитивной, когда взаимодействие между двумя системами отсутствует, т. е. что

$$L = L_1 + L_2, \tag{9}$$

где L_1 и L_2 — ее значения для системы Σ и измерительного прибора соответственно. Предположив, что операторы L_1 и M не коммутируют, мы приходим к противоречию. Поскольку величина L сохраняется, т. е.

$$L = U^{-1} L U,$$

ее матричные элементы, соответствующие переходам между левыми частями соотношений (6) и (7) и между их правыми частями, должны быть одинаковы. В то же время, согласно (9), при $\mu' \neq \mu$

$$(\psi_\mu \xi,\ L\psi_{\mu'}\xi) = (\psi_\mu,\ L_1 \psi_{\mu'}),$$

так как из-за ортогональности состояний ψ_μ и $\psi_{\mu'}$ вклад от L_2 обращается в нуль. Рассматривая матричные элементы между правыми частями, мы убеждаемся, что вклад L_2 обращается в нуль из-за ортогональности $\psi_{\mu\rho}$ и $\psi_{\mu'\rho'}$ $(\mu \neq \mu')$, и точно так же в силу соотношения (8) в нуль обращается и вклад L_1. Таким образом, оказывается, что при $\mu \neq \mu'$

$$(\psi_\mu,\ L\psi_{\mu'}) = 0, \tag{10}$$

откуда вытекает, что

$$[L_1,\ M] = 0.$$

В результате мы приходим к выводу, что если операторы L_1 и M не коммутируют, то, строго говоря, величина M вообще не может быть измерена точно. Более реалистическое предположение состоит в том, что величину M можно измерить сколь угодно точно при условии, что значение «L-величины» измерительного прибора является в высшей степени неопределенным.

Легко видеть, что в тех случаях, когда заведомо известно, что величина M поддается точному измерению последнее предположение является весьма разумным. В качестве конкретного примера можно рассмотреть измерение компонент спина атома в молекулярном пучке, где сохраняющейся величиной может быть какая-либо компонента полного углового момента. В то же время, если под величиной L понимать, скажем, электрический заряд Q или барионное число B, предположение о том, что для

измерительного прибора эта величина является крайне неопределенной, представляется совершенно неестественным. В этой связи, вероятно, не следует удивляться, что мы не знаем ни одного способа измерения собственных значений каких-либо квантовомеханических операторов, не коммутирующих с Q или B. Это можно выразить и как то, что мы имеем дополнительные основания полагать, что они вообще не могут быть точно измерены.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. W. Heisenberg, Zs. Phys. **43**, 172 (1927); N. Bohr, Nature **121**, 580 (1928); Naturwiss. **17**, 483 (1929).
2. H. M. Goldenberg, D. Kleppner, N. F. Ramsey, Phys. Rev. Lett. **5**, 361 (1960), Phys. Rev. **126**, 603 (1962).
3. S. B. Crampton, D. Kleppner, N. F. Ramsey, Phys. Rev. **31**, 338 (1963).
4. R. Hanbury-Brown, R. W. Twiss, Phil. Mag. **45**, 663 (1954); Nature **177**, 27 (1956); **178**, 1046, 1447 (1956).
5. E. M. Purcell, Nature **178**, 1449 (1956).
6. M. L. Goldberger, H. W. Lewis, K. M. Watson, Phys. Rev. **132**, 2764 (1963); M. L. Goldberger, K. M. Watson, Phys. Rev. **134**, 919 (1964).
7. E. P. Wigner, Amer. J. Phys. **31**, 6 (1963).
8. J. von Neumann, Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik, Berlin, 1932 (см. перевод: М., «Наука», 1964).
9. E. P. Wigner, Zs. Phys. **133**, 101 (1952); H. Araki, M. M. Yanase, Phys. Rev. **120**, 622 (1960).

ДИСКУССИЯ

Дж. Чу. По существу, мне хотелось бы задать несколько вопросов, но Джанкарло *) предупредил меня, что это противоречило бы установленному порядку и что я имею право только делать замечания, а не задавать вопросы; поэтому я попытаюсь пойти на своего рода компромисс. Я хотел бы поговорить с присутствующими здесь о том, какая связь существует между характером физических взаимодействий и процессов измерения как таковых.

Разумеется, всякое измерение всегда происходит посредством взаимодействия изучаемого объекта с прибором. Однако тридцать лет тому назад, когда процесс измерения впервые стал объектом серьезного обсуждения, ученые еще не очень-то задумывались о взаимодействиях, обусловленных короткодействующими силами. И, вероятно, по этой причине не было оснований для размышлений на тему о том, что специфическая природа электромагнитного взаимодействия, быть может, теснейшим образом связана с самой возможностью существования физики вообще. Говоря это, я имею в виду, что физика — это описание результатов измерений, и, следовательно, невозможность осуществления измерений означает одновременно отсутствие и самой физики как таковой. Но для того чтобы измерения были возможными необходимо, как мне кажется, прежде всего иметь в своем распоряжении изолированные системы, поскольку само понятие измерения предполагает, что одна система может наблюдать за другой и получать благодаря этому информацию о свойствах последней. Если вы не располагаете веществом, для которого характерно конденсироваться таким образом, что образуются отдельные независимые объекты, то само понятие измерения становится совершенно бессмысленным. Кроме того, сами экспериментальные понятия пространства и времени, вероятно, основаны на существовании каких-то объектов, подобных твердым телам. Если бы электромагнитные взаимодействия вообще отсутствовали и в природе было бы только лишь одно короткодействие, то представляется весьма сомнительным, чтобы материя находилась в состоянии, пригодном для измерений.

Это, разумеется, довольно скользкие аргументы, обсуждения которых как раз и хотел избежать Джанкарло. Вы могли бы возразить мне, сказав, что физика принимает возможность проведения измерений как аксиому и потому мы, физики, вообще не обязаны дискутировать подобные вопросы, однако трудно удержаться от искушения мысленно представить себе Вселенную без электромагнитного поля, в которой существовали бы, скажем, одни только сильные взаимодействия между частицами (последние, как мы теперь знаем, обязательно существуют). В этом случае имелось бы, на мой взгляд, четыре или даже пять различных обстоятельств, исключающих возможность

*) Джанкарло — имя Вика. (*Прим. перев.*)

измерении Я уже упоминал о том, что тогда отсутствовали бы причины, ответственные за конденсацию материи в отдельные твердые тела. Более того, совсем не очевидно, что в таком мире вообще существовал бы классический предел, поскольку, хотя мы и говорим часто, что так или иначе этого предела можно достигнуть, устремив постоянную Планка $\hbar$ к нулю, сама-то эта постоянная является размерной величиной. Поэтому ее точное численное значение не имеет какого-либо абсолютного смысла. Напротив, такими величинами, позволяющими различать между собой классические и квантовые системы, должны быть какие-то малые (или большие) безразмерные константы типа постоянной тонкой структуры или же отношения массы протона к массе электрона. В этом вопросе у меня очень много неясности, и он относится к числу тех, о которых мне хотелось бы услышать мнение моих коллег

Далее, мне кажется, что понятие измерения находится в прямой зависимости от способности одной системы наблюдать за другой, не изменяя при этом полностью структуры последней. Так, например, если я дотронусь до стола, а затем уберу свой палец обратно, то мой палец по-прежнему останется пальцем, а стол — столом. Вероятно, причина этого в том, что они взаимодействуют друг с другом очень слабо, а именно электромагнитно Если бы это взаимодействие было ядерным, то далеко не очевидно, что измерительный прибор и объект, подвергающийся измерению, сохранили бы после него свою прежнюю индивидуальность Другой особенностью электромагнитных сил, конечно, является дальнодействие, которое тесно связано с их слабостью. Представляется весьма правдоподобным, что сочетание этих двух специфических особенностей электромагнитного взаимодействия — нулевой массы протона и малости постоянной тонкой структуры — как раз и обеспечивает такую ситуацию, в которой понятие измерения имеет смысл

Я поднял все эти вопросы безо всякой претензии на их понимание. Однако они навели меня прежде всего на подозрение, что, если специфические свойства электромагнитного взаимодействия действительно ответственны за процесс измерения, нельзя надеяться на возможность предсказания величины постоянной тонкой структуры без включения в физику теории измерений Мне кажется очень сомнительным, чтобы мы смогли понять, почему $\alpha = 1/137$, прежде чем расширим само наше обычное представление о том, что же такое физика

Кроме того, затронутые вопросы подчеркивают глубокое различие между электромагнитным и сильным взаимодействиями, которое подчас стремятся затушевать во многих подходах к описанию последнего. Основная идея Юкавы базировалась на аналогии между этими взаимодействиями, и значительная часть последующих теоретических разработок покоилась на этой аналогии, используя ее по возможности в наиболее полном объеме Если же, однако, само понятие «измерение» придает электромагнетизму особую выделенную роль, то аналогия может оказаться такой поверхностной, что ей нельзя следовать слишком далеко

Р Фейнман Я хотел бы сделать только несколько частных замечаний. Мне представляется бессмысленным обсуждать вопрос об универсальности электромагнитных взаимодействий С тем же основанием можно было бы утверждать, что если бы не было биологии, не было человека, то, разумеется, нельзя было бы говорить о каких бы то ни было измерениях вообще просто-напросто из-за отсутствия адекватного языка. Этот вопрос следует анализировать очень осторожно Объективный факт состоит в том, что электромагнетизм существует, и мы должны с этим считаться при формулировке положений физики Это еще не означает, что если бы его не было, мы не могли бы производить измерения и что, следовательно, само понятие «измерение» отсутствует или же подлежит пересмотру, коль скоро речь идет о сильных взаимодействиях. Правда, мы можем использовать пузырьковые камеры для наблюдения за треками частиц все еще потому, что существуют порождающие их электромагнитные взаимодействия Это, очевидно, означает только то, что мы никогда не измеряем интересующие нас физические величины непосредственно— теория выявляет, что подлежит измерению, и соответствующие величины подчас оказываются совершенно различными: скажем, трек в пузырьковой камере — это далеко не то же самое, что импульс и т п ,— или же волновая функция Для того чтобы до конца проследить механизм измерения, нужно восстановить все многообразие сопутствующих ему явлений, и не видно каких-либо непосредственных причин, почему бы все это могло оказаться неверным применительно к сильным взаимодействиям в том смысле, что те измерения, которые мы производим, используя обычные методы типа наблюдения треков в пузырьковых камерах и т п , нельзя было бы проанализировать с помощью соответствующих теоретических методов, позволяющих предсказывать все те же самые результаты. Я не вижу никакого смысла в каком бы то ни было обсуждении вопроса о том, как выглядели бы измерения в мире, где вообще отсутствует электромагнитное взаимодействие В то же время совершенно очевидно, что, познакомившись ближе со свойствами сильных взаимодействий, мы, подобно тому, как это неоднократно случалось ранее, обнаружим, что наши физические представления, или, точнее, философские основы физики, подлежат пересмотру, в частности и в том отношении, что фактически изменится само понятие измерения Однако мне не кажется, что мы можем прийти к этому на основе одних только простых

соображений, вроде тех, что если бы не существовало электромагнитных измерений, не нашлось бы людей, способных проводить какие бы то ни было измерения вообще.

Дж. Чу. Мне кажется, что вы неверно интерпретировали мои высказывания. Я вовсе не хотел сказать, что в применении к сильным взаимодействиям следовало бы вообще отказаться от концепции измерений. Я только имел в виду, что если электромагнитные взаимодействия действительно играют в процессе измерения особую роль, то такой тесной аналогии между электромагнетизмом и сильными взаимодействиями, какая часто предполагается, может и не быть.

Р. Фейнман. Да, такой большой аналогии может не быть, но по другим причинам.

Дж. Чу. Вы допускаете, что возможен процесс измерения, основанный на одних только сильных взаимодействиях?

Р. Фейнман. Я не знаю, что такое процесс измерения, но если под тем, что вы говорите, следует понимать «можем ли мы осуществить эксперимент, основанный исключительно на одних только сильных взаимодействиях», с технической точки зрения это действительно чрезвычайно трудно сделать, поскольку во все наши измерительные приборы входят электроны. Мне кажется, что это вопрос чисто практический. Я не понимаю, чтó означает ваш вопрос,— я не могу даже представить себе измерения, целиком основанного на использовании одних только сильных взаимодействий.

Дж. Чу. Это совершенно верно, ибо само слово «представление» уже подразумевает использование электромагнитных измерений. Да, теперь я согласен со всем, что вы сказали.

Р. Фейнман, Конечно, я все же допускаю, что изучение сильных взаимодействий может привести к значительному изменению наших физических представлений, но думаю, что аргументация типа той, что, если бы не было электромагнетизма, мир был бы совершенно иным, не имеет прямого отношения к делу.

Дж. Чу. Хорошо, позвольте мне тогда сделать в этой связи еще одно замечание: согласны ли вы с тем, что если бы в природе не существовало слабых взаимодействий, то, насколько мы можем судить в настоящее время, мир, в котором мы живем, не выглядел бы совершенно иначе. Конечно, известные изменения имелись бы, однако это были бы изменения несравненно меньшего масштаба.

Р. Фейнман. Я не знаю, так ли это, если говорить, к примеру, об энергии звезд, связанной со слабыми взаимодействиями. В этом случае, я не понимаю, насколько больших изменений вы хотите; возможно я не понимаю, чтó вы имеете в виду, когда говорите о похожем и непохожем на наш мирах. Одна из величайших загадок, один из самых поразительных аспектов всего нашего миропонимания состоит в том, что по мере все большего и большего накопления детальных физических познаний те свойства, которые представляются как раз наиболее важными, кажутся обусловленными почти неуловимым стечением различных случайных обстоятельств. Специфические свойства углерода, те конкретные, а не какие-нибудь другие процессы, которые протекают на Солнце, обусловлены таким, казалось бы, незначительным обстоятельством, как резонанс у атомов C^{12}. Решающую роль при образовании тяжелых элементов сыграл тот факт, что электрическое и магнитное распределения (или формфакторы) оказались такими, что нейтроны лишь чуть-чуть тяжелее протонов. Это обстоятельство радикальным образом повлияло на строение Вселенной. Поэтому я не верю, что мы действительно можем разобраться в происхождении всех деталей структуры мира, в котором живем. Да, опираясь на наши физические познания, мы можем понять многое; да, мы можем рассчитать, что нейтрон должен быть тяжелее протона, однако детали, которые действительно ответственны за то, что мир таков, какой он есть, представляются непостижимо случайными. Даже после всех наших усилий, направленных на раскрытие объективных закономерностей, мы не можем охватить всего этого многообразия случайностей. В этой связи постановка вопроса «что случилось бы, если бы мы только очень незначительные явления изменили бы лишь очень немного» психологически очень вредна, ибо все это столь чувствительно к различного рода случайным обстоятельствам.

М. Конверзи. Можно также отметить, что без гравитационных сил мир выглядел бы совсем по-другому, хотя они и являются самыми слабыми из всех известных.

Ф. Лоу (почти неслышно). Они являются также и наименее изученными из всех.

Р. Фейнман. Нет, я не имел в виду, что мы вообще не способны понять чего-либо. Мы можем легко объяснить свойства углерода; сложно, но в принципе тоже возможно понять органическую химию или же скорости слабых распадов, которыми определяются процессы, происходящие в звездах, и т. д. Мы, в определенном смысле, поймем также и то, почему мир такой, какой он есть; однако в другом смысле слова «понимать», не в том, который подразумевается обычно, а в другом смысле понимания, мир выглядит — во всяком случае, так кажется — ужасным нагромождением случайностей. Я сейчас пытаюсь подчеркнуть то обстоятельство, что все происходящие в больших масштабах явления, те явления, которые произошли в действительности, казалось бы вопреки управляющим ими законам,— думается, что все эти реально имевшие место явления очень сильно зависят от точного характера законов. Но когда кто-либо начинает гадать, что могло бы случиться, если бы законы были лишь только чуть-чуть

иными, мне становится очень трудно продолжать подобную дискуссию — вот все, что я хотел сказать.

Дж. Бернардини. Мне хотелось бы только задать один вопрос в связи с той частью речи Вика, которая касалась неймановской теории измерений и соображений Вигнера. Можно ли утверждать, что на сегодняшний день основное различие, скажем, между сильными и электромагнитными взаимодействиями состоит в том, что первые допускают лишь измерения, основанные на принципах симметрии и законах сохранения? Когда мы рассматриваем любые внутренние степени свободы (внутренние параметры) частицы — такие, как спин, изоспин, странность,— мы всегда используем для их описания законы сохранения, поскольку вообще не знаем другого способа их измерения. Напротив, при изучении электромагнитных взаимодействий (и в этом смысле слабые взаимодействия являются исключением) мы получаем интересующую нас информацию, используя старый критерий качества измерения, который состоит в том, что изучаемый объект должен в процессе измерения подвергнуться по возможности наиболее слабому воздействию со стороны прибора. Верно это или нет? Другими словами, я хотел бы понять, состоит ли основное различие в измерениях, как они понимаются в случае электромагнитного взаимодействия, являющегося дальнодействием, и в случае сильного взаимодействия, в том, что в первом случае мы не вынуждены ограничиваться законами сохранения, как это пока что имеет место во втором. Я прошу Фейнмана о любезности разъяснить мне этот вопрос.

Р. Фейнман. Мне кажется, что различие, о котором идет речь,— в будущем может выясниться, что оно является весьма фундаментальным, но будем пока что говорить только о том, что нам известно на сегодняшний день,— мне кажется, что основное различие между сильными и слабыми взаимодействиями состоит в том и только в том, что мы не знаем законов, управляющих сильными взаимодействиями. И когда мы измеряем, скажем, дифференциальные сечения, угловые распределения и т. п. или же тонкие особенности изменения сечения в зависимости от энергии, мы получаем множество кривых и не знаем, что с ними делать. Таким образом, существует множество измерений, не привязанных непосредственно к законам сохранения; это — детальные распределения, зависимости и т. п., которые мы не в состоянии использовать за неимением теории. В то же время, например, рамзауеровское рассеяние электронов ядрами или атомами (или что-либо в этом роде), при котором происходит весьма значительное возмущение движения электронов, поддается однозначной интерпретации и может быть использовано — и действительно используется — как средство измерения характеристик атомов и т. д. Трудность состоит в том, что у нас пока нет последовательной динамической теории сильных взаимодействий. Однако мы все же располагаем кое-какой информацией подобного типа, а именно теми самыми свойствами симметрии, которые представляются сейчас приближенно верными. По этой причине мы и ловим себя на том, что все время ограничиваемся проверкой этих свойств. Но это определяется всего лишь современным состоянием теории и является определенным историческим этапом на пути ее развития, и потому я думаю, что такая ситуация просто отражает уровень наших познаний и возможностей в настоящее время. Мне не кажется, что с этим обстоятельством связано глубокое различие в характере измерений, хотя, разумеется, может статься, что он будет сильно отличаться от всего того, что мы могли бы сейчас ожидать.

Дж. Уилер. Для каждого, кто занимается проблемами проверки общей теории относительности, вопрос измерения становится еще более запутанным, чем он был когда-либо прежде. Я говорю это только для того, чтобы выразить мои собственные затруднения, а вовсе не потому, что могу дать на него какой-либо определенный ответ. Этот вопрос очень тесно перекликается с тем, о чем ясно сказал профессор Вик сегодня утром, а именно, что, производя измерения, мы всегда используем то, что наблюдатель и наблюдаемый объект отделены один от другого. Однако, коль скоро речь идет обо всей Вселенной, у нас не остается точки наблюдения, с которой можно было бы рассматривать Вселенную как внешний объект, не существует места вне ее, с которого можно было бы произвести какое-либо измерение. Когда мы имеем дело с атомом, находящимся в каком-то энергетическом состоянии, мы посредством измерения узнаем, на каком уровне находится электрон; затем можно произвести измерение вторично, когда атом будет уже в другом энергетическом состоянии, и определить новую электронную орбиту. Продолжая этот процесс неограниченно, мы можем получить информацию о каком угодно наборе энергетических состояний. В то же время пригодного для наблюдения места вне Вселенной не существует, и мы не можем заставить ее перейти из одного состояния в другое; поэтому неясно даже, какой смысл вообще можно вкладывать в понятие об ее различных квантовых состояниях. Я поднимаю этот вопрос, но ответа на него не знаю, я лишь обращаю внимание на всю необычность ситуации. Однако, разумеется, теперь каждый спросит себя, не значит ли это, что Вселенная может находиться только в одном квантовом состоянии? Не значит ли это также, что все понятия физики приобретают другой смысл, когда мы говорим о Вселенной как целом, чем тот, к которому мы привыкли, имея дело с ее частями? И, наконец, не должны ли мы по каким-либо причинам теологического порядка отказаться от попыток

рассматривать Вселенную как целое? Или же, быть может, неправомерно ставить вопрос об общей теории относительности и динамике Вселенной в целом в квантовой теории, несмотря даже на то, что нам не приходится вдаваться во всякие теологические тонкости, когда мы говорим о замкнутой Вселенной с классической точки зрения? Это опять же остается для меня загадкой, но не приходится сомневаться в том, что упомянутые вопросы имеют глубокий смысл с общефизической точки зрения. Общая физическая картина явлений природы, каковой мы привыкли представлять ее себе со времен Галилея, покоится на идее о том, что для их описания необходимо и достаточно знать начальные условия и уравнения движения. И если первые оказываются подчас довольно сложными, то вторые, как мы знаем, достаточно просты. Однако же, если нам приходится размышлять об одном единственном квантовом состоянии всей Вселенной в целом, не должны ли мы отказаться от обычного разделения начальных условий и уравнений движения? Я могу сформулировать этот вопрос также и другим образом. Имея дело с любой динамической системой обычного типа, мы классифицируем ее состояния по квантовым числам, самыми привычными из которых являются энергия и угловой момент. Однако известно, что для замкнутой Вселенной энергию нельзя даже определить. Мы знаем, что в этом случае закон сохранения энергии вырождается в тождество — нуль равен нулю. Кроме того, не существует и никакого обобщенного понятия, обладающего неотъемлемыми свойствами энергии, как и углового момента; поэтому, если бы у Вселенной существовали квантовые состояния — различные квантовые состояния,— мы не могли бы даже как-либо «поместить» их. В этой связи снова возникает вопрос, может ли Вселенная находиться более чем в одном квантовом состоянии. Я могу только еще раз сказать, что не знаю более глубокого вопроса или принципа, имеющего отношение к понятию измерения, чем упомянутая мной сейчас проблема, каков смысл квантовой физики применительно ко всей Вселенной в целом.

А. Лэттес. Не может ли профессор Вик пояснить, что он имел в виду, говоря о том, что какая-то величина, скажем, угловой момент, строго сохраняется. Сформулируйте, пожалуйста, это утверждение более конкретно.

Д. Вик. Простите, повторите, пожалуйста, свой вопрос?

А. Лэттес. Не можете ли вы сформулировать, что вы понимаете под строго сохраняющейся величиной? Я просил пояснить это, скажем, на примере углового момента, и мне хотелось бы услышать конкретную формулировку этого утверждения, т. е., в частности, в каких единицах может быть выражено то число, которое вы считаете строго сохраняющимся? Есть ли это измерение какой-либо величины?

Д. Вик. Быть может, я выразился не точно. Я хотел сказать только то, что у всей системы в целом, включая изучаемый объект и измерительный прибор, может быть сохраняющаяся величина, скажем, угловой момент. В этом нет никакого более глубокого смысла.

А. Лэттес. Но когда вы выражаете ее в определенных единицах, какие единицы вы имеете в виду?

Д. Вик. Любые.

А. Лэттес. В частности, единицы CGS?

Д. Вик. Да.

А. Лэттес. В этом случае, если Вы говорите, например, что спин частицы сохраняется в единицах CGS, то вы с таким же успехом можете сказать, что величина ($г \cdot см^2/сек$) сохраняется в единицах h, поскольку эти единицы значительно более сложные.

Дж. Бернардини. Очень жаль, но мне кажется, что Вик не уловил смысла вашего вопроса, и я тоже разделяю его недоумение. Поэтому я предложил бы следующее: мы сейчас отложим его обсуждение, и вы тем временем постараетесь сформулировать свой вопрос более ясно. А пока у нас на очереди Ли и Оппенгеймер, а после их выступлений мы возобновим прерванную дискуссию (профессор Лэттес переформулировал свой вопрос в письменной форме; он изложен в конце дискуссии).

Т. Ли. Я хотел бы коснуться вопроса о смысле коммутирующих и некоммутирующих операторов в рамках подхода Вигнера и фон Неймана, обсуждавшегося профессором Виком. Итак, мы можем рассмотреть строго сохраняющуюся величину Q, которая является полным зарядом системы, и операцию зарядового сопряжения C, которая не коммутирует с оператором Q и, строго говоря, не является инвариантом системы (я говорю о чисто зарядовом сопряжении, опуская вопрос о пространственной четности P). На сегодняшний день ситуация такова, что собственное значение оператора C можно измерить точно только для такой системы, у которой $Q = 0$. Приведу один пример. Пусть имеется некоторое число N позитронов и, вообще говоря, другое число N' электронов. Рассмотрим сначала случай, когда эти числа одинаковы, $N = N'$. В этом случае собственное значение оператора C всей системы определяется очень просто — нужно только подождать, пока электроны и позитроны полностью проаннигилируют, а затем подсчитать число родившихся в результате этого протонов. Если оно окажется четным, то $C = +1$, если нечетным, то $C = -1$. Другого способа определения собственного значения оператора C у нас нет. Тем не менее, в принципе, можно

было бы представить себе некоторую систему, в которой числа N и N' различны, описываемую суперпозицией набора состояний с амплитудами $A(N, N')$. Тогда, подобрав соответствующим образом знаки амплитуд $A(N, N')$ при различных значениях аргументов, можно было бы математически построить систему, которая характеризовалась бы определенным собственным значением оператора зарядового сопряжения. Однако очень трудно представить себе, каким образом оно могло бы быть измерено. Я думаю, что, как заметил в разговоре со мной Фрэнсис Лоу, это обстоятельство связано с правилом суперотбора (superselection rule) для заряда, поскольку для различных зарядов фазы оказываются совершенно неопределенными. Таким образом, хотя математически и можно определить конкретную смесь состояний, это не имеет практической ценности. Поэтому упомянутая характерная особенность, состоящая в том, что собственное значение оператора C можно точно измерить только в том случае, когда $Q=0$, вероятно, должна найти свое отражение в основах теории измерений, поскольку это ограничение действительно является весьма строгим.

Д. Вик. Я не обдумывал этого примера, поэтому не знаю, по существу, что сказать. Однако доктор Ли привел здесь пример, когда определение собственного значения оператора C возможно,— я имею в виду случай, когда числа N и N' одинаковы. Но теперь я нахожусь в некотором затруднении, поскольку в соответствии с приведенными ранее аргументами это могло бы означать...

Р. Оппенгеймер. ...предсказание того, что равенство матричных элементов углового момента нулю несовместимо с угловыми моментами. В этом случае вы можете его измерить.

Д. Вик. Вывод, к которому я пришел, состоит в том, что, коль скоро мы в состоянии измерить собственное значение оператора C, использованный мною ранее аргумент мог бы быть истолкован как указание на то, что заряд измерительного прибора является полностью неопределенным.

Р. Оппенгеймер. Нет. Аргумент Вигнера несомненно является строгим, но он совершенно пуст в том случае, когда угловой момент системы, которую, насколько мне помнится, Вы обозначили буквой Σ, равен нулю. Дело в том, что тогда кажущееся противоречие превращается в тождество. Просто-напросто матричный элемент мог быть действительно равен нулю, хотя Вы этого и не хотели. Это ничему не противоречит, если нулю равен и сам угловой момент.

Похоже, что пока никто выступать не собирается. В этом случае, мне кажется, что я тоже мог бы принести некоторую пользу при обсуждении вопроса о так называемой теории измерений в квантовой механике, рассказав об ее истории, начиная с самого зарождения, имея в виду как то, что́ она могла и чего она не могла сказать об измерениях в физике, так и то, какое значение мог бы иметь этот исторический экскурс для людей, которые вообще интересуются проблемами человеческого познания. Нет нужды доказывать, что эта теория измерений была в истории современной физики, по существу, единственным объектом, подвергавшимся серьезной критике на протяжении долгих лет изучения волновых и корпускулярных аспектов физических явлений, и вызывавшей беспокойство с самого начала квантовой физики, когда только еще возникали первые представления о квантовых переходах, мыслившихся тогда как движение по каким-то траекториям, как и очень важное понятие о стационарных энергетических уровнях, описывавшихся на языке электронных орбит. Единственная цель, которую преследовал в своей многолетней деятельности в этом направлении Бор, а также многие другие физики, состояла в доказательстве того, что новые принципы, обусловленные квантованностью действия, не приводят к серьезным затруднениям, если опираться на многократно проверенный общеизвестный опыт классической физики. Бор никогда не уставал это подчеркивать. Он не пытался дать определение того, что́ такое измерение, а также сказать, что́ может быть измерено, а что́ нет,— он лишь задавался вопросом, какие понятия, привычные при описании свойств обычных систем, когда квантовыми эффектами можно пренебречь, неприменимы к атомной системе из-за конечности постоянной Планка. Я полагаю, что его удовлетворил бы ответ, состоящий в том, что квантовая теория применима только к отдельным объектам, отдельным частям вещества, и, быть может, дальнейшее изучение природы также покажет, что все, что мы знаем и можем узнать, ограничивается только свойствами отдельных частей, а не систем в целом. Я думаю, что он никогда не стал бы задаваться вопросом, что́ мы стали бы делать, если бы не было столов, стульев, линз, фотопленок, ибо его не интересовало это, как не интересовало никого другого. Мне кажется, что Джанкарло согласится со мной, но это, конечно, не значит, что фундаментальный вопрос о том, что́ измеримо и что́ вообще можно надеяться узнать, изучая природные явления, никогда не затрагивался на тех прежних дискуссиях.

В то же время из прошлого мы знаем, что философские интересы Бора проявились еще задолго до изучения им атомной физики или же создания своей собственной атомной теории и конечно же, волновой механики, квантовой механики и что, будучи молодым, он пытался писать об этом, используя примеры не из физики, а из математики. Конечно, тогда ему было проще не писать книгу на эту тему, и она была написана им только много лет спустя. Из разговоров с ним, а также со многими другими, я знаю,

что во всей истории человеческого познания можно найти лишь очень немного примеров, когда бы ситуация была полностью аналогична той, с которой мы встречаемся в квантовой теории, где не только можно сказать, что две точки зрения являются взаимно дополнительными, но можно также построить и определенную количественную схему, найти некоторую меру для измерения этой дополнительности. Хорошей иллюстрацией сказанному может послужить решительное изменение точки зрения Бора на ситуацию в биологии. Вначале он считал, что раз для изучения биологической системы нам приходится убивать ее, т. е. в известной степени разрушать, а само ее существование возможно только постольку, поскольку она не изолирована, то в понятии жизни существует нечто такое, что не сводится к одной только физике и химии. Позднее, в своей последней лекции, он ограничился замечанием, что, когда речь идет о жизни, мы должны считать правомерным говорить о функциях и целях и что эти понятия, строго говоря, выходят за рамки физики и химии. Мне кажется, что это указывает на плодотворность, но в то же время и на неполноту аналогий между квантовой теорией и множеством других дополнительных ситуаций. Это всегда хорошо понимали западные философы. Для Бора выяснение этих аналогий стало делом всей жизни. Я думаю, что они во многом обогатили наше понимание фундаментальных проблем познания, но и думаю также, что их никогда не удастся сформулировать в законченном и количественном, а следовательно, удовлетворительном с логической точки зрения виде, за исключением тех случаев, когда, как в физике, существуют настоящая теория и аппарат, позволяющие производить соответствующие расчеты. Другими словами, мне не кажется удивительным, что это не послужило значительным толчком в развитии философии.

Сам же Бор надеялся только на то, что эти общие идеи, которые он нашел очень плодотворными в применении ко всевозможным проблемам,— я не стану сейчас приводить хорошо известный перечень их — займут большее место в умах западных мыслителей, чем одна только та система теоретических концепций, которую мы — это теперь становится ясным, если оглянуться на прошлое — унаследовали от этих основополагающих идей.

Я полностью согласен с Чу в одном — в том, что точка зрения Юкавы на сильные взаимодействия включает такие аналогии с электромагнетизмом, которые могут оказаться и несостоятельными. Коль скоро константа связи не мала, мы вступаем в такую область, где понятие невзаимодействующей частицы, столь плодотворное в нерелятивистской квантовой механике, теряет смысл. Мерой изменения электрона в результате взаимодействия является лэмбовский сдвиг; он очень мал и может рассматриваться как весьма ценная поправка, но прежде чем на нее обратили внимание, прошло двадцать лет. Это понятие и то, что при электромагнитных измерениях мы в состоянии, если можно так выразиться, распорядиться сколь угодно большим пространством для описания движения, а также не ограничены в выборе зарядов, пробных тел и всего остального,— все это исключается короткодействием сил при сильных взаимодействиях.

Теперь я хотел бы вернуться к тому, о чем говорил Вик: мы хотим получить ответ на вопрос, что́ мы измеряем, когда мы знаем, что при этом происходит. Я полагаю, что на сегодняшний день остается в высшей степени неоднозначным, каков будет этот ответ, и у сидящих здесь имеется на этот счет множество различных мнений. К примеру, формфакторы опишут структуру и свойства протона, даже если Вы сможете найти их посредством аналитического продолжения, но, конечно же, это не то же самое, что получить эту информацию, непосредственно изучая соударения частиц.

У меня есть еще одно очень маленькое замечание, относящееся к проблеме, отмеченной Вигнером. Простейшее доказательство того, что измерительный прибор — не Σ, а ξ характеризуется более или менее неопределенными сохраняющимися квантовыми числами, состоит в том, что он является макроскопическим, и это также есть неотъемлемая часть всякого измерения. Всегда на каком-то этапе должно быть нечто, что вы можете увидеть своими собственными глазами или взвесить, или же зарегистрировать каким-либо столь же простым способом. И в большинстве экспериментов, прежде чем получить окончательный ответ, вы обязательно используете какой-нибудь объект, могущий явиться источником сколь угодно большого углового момента или любого другого параметра, исключая правила суперотбора (и это неизбежно). Так обстоит дело. Мне кажется, что это замечательное и очень важное обстоятельство оживило критическое обсуждение работ фон Неймана. Однако я не думаю, чтобы оно было для физики практически таким важным, как могло бы показаться на основе некоторых смелых утверждений.

Я надеюсь, что, пока я говорил, кто-нибудь уже собрался с мыслями и может высказаться.

Д. Вик. Как раз в этой связи я могу сказать, что положение, согласно которому процесс измерения следует обсуждать, основываясь на предположении, что измерительный прибор можно рассматривать как классическую систему, разумеется, было одним из неотъемлемых пунктов, которые Бор всегда подчеркивал, обсуждая этот вопрос. Иногда, по соображениям математической простоты, можно остановиться

и раньше, но мне кажется, что привлекательной стороной аргументации Вигнера является то, что она попадает в самую нужную точку. Она говорит нам кое-что — и я думаю, можно сказать кое-что количественно — о том, насколько неопределенной должна быть соответствующая величина, и потому могла бы послужить естественным продолжением нашей дискуссии. Теперь я хотел бы рассказать вам одну глупую шутку. Она дает представление о характере тех «если», которые фигурировали в вопросе, поднятом Чу. Это итальянская шутка о рассуждениях в сослагательном наклонении и звучит она так: «Если бы у моей бабушки было четыре колеса, она была бы автобусом». Но в то же время, я хорошо понимаю Чу, поскольку, как мне кажется, мы очень часто делаем утверждения в таком сослагательном наклонении, классическим примером чему может служить постановка вопроса об изотопическом спине. Что мы понимаем под законом сохранения изотопического спина? Мы говорим по этому поводу: «Если пренебречь электромагнитными взаимодействиями, то можно считать, что он сохраняется». Поэтому, я думаю, что найдется ряд очень почетных прецедентов постановки вопроса в том же духе, что и вопрос Джеффа *).

Дж. Торральдо ди Франсиа. У меня есть несколько кратких замечаний по поводу методов Хэнбери-Брауна и Твисса, представляющих собой одну из наиболее изящных и интересных разработок, имевших место в физике за последние годы и играющих, на мой взгляд, первостепенную роль в теории измерений, что, разумеется, уже было отмечено профессором Виком. Прежде всего я хотел бы поделиться с присутствующими некоторой информацией, которая, быть может, окажется для них интересной. Я как раз недавно вернулся из Австралии, где встречался с Хэнбери-Брауном и видел в Нарабри большой интерферометр, предназначенный для измерения корреляции между флуктуациями интенсивности. Он состоит из двух составных зеркал диаметром около шести метров. Каждое из них составлено из 250 сферических зеркал. Это возможно благодаря тому, что целью является собирание световой энергии, а не сохранение фазы. Величины интенсивности, поступающие от двух фотодетекторов, оказываются скоррелированными. Большие зеркала вращаются по окружности диаметром около 180 *м*. В настоящее время с помощью этого инструмента уже можно измерять диаметры некоторых звезд — к ним относятся Вега, Бета Южного Креста и т. п.,— и его разрешающая сила, если я не ошибаюсь, достигает 0,0002 *угл. сек.* Конечно, это поразительно по сравнению с обычными возможностями классической оптики. Но в то же время, насколько я могу судить, применимость этого метода требует выполнения ряда очень существенных условий, поскольку он использует флуктуации как средство точных измерений. Последние представляют собой не что иное, как шум, а идея использования шума для проведения точных измерений представляется внутренне противоречивой. Здесь где-то должна быть ловушка. И действительно она есть. Она связана с одним предположением, которое молчаливо делается при выполнении измерений и получении окончательных результатов. В обычном майкельсоновском звездном интерферометре, как уже отмечалось Виком, вы измеряете величину

$$\langle A_1 A_2 \rangle = \gamma.$$

Эта корреляция между двумя сигналами, которую мы обозначили буквой γ, является, вообще говоря, величиной комплексной. Будучи измерена для различных направлений, эта величина позволяет получить необходимую информацию о форме источника излучения. Когда же мы имеем дело с интенсивностным интерферометром, то, разумеется, измеряется корреляция между интенсивностями $\langle I_1 I_2 \rangle$.

Но поскольку интенсивность I пропорциональна квадрату модуля амплитуды, последняя величина представляет собой по отношению к амплитуде корреляцию четвертого порядка, в то время как величина γ — это корреляция второго порядка. Обычное предположение, которое делается далее, состоит в том, что принимаемое излучение обладает стационарными гауссовыми свойствами. Последнее означает, что вероятность обнаружения какого-либо значения амплитуды в любой заданный момент времени описывается не зависящим от времени гауссовым распределением. Это, разумеется, справедливо как в случае излучения черного тела, так и в случае любого теплового излучения вообще. При этом удается показать, что корреляция четвертого порядка $\langle I_1 I_2 \rangle$ простым образом выражается через квадрат модуля корреляции второго порядка $|\gamma|^2$. В этом и состоит причина того, что, измеряя величину $\langle I_1 I_2 \rangle$, вы получаете определенную информацию о значении γ. Однако, во-первых, за это приходится платить предположением о гауссовом характере излучения, которое оправдано в очень многих случаях, но далеко не всегда. Во-вторых, при этом теряется информация о фазе величины γ, поскольку удается определить только $|\gamma|^2$. Последнее приводит к тому, что для определения диаметра или формы источника излучения приходится сделать еще одно предположение, которое обычно состоит в том, что считается, что излучающий объект считается центрально-симметричным. В частности, он может иметь форму круга, как, например, в случае звезд. Однако далеко не ясно, насколько оправданным

*) Чу зовут Джеффри, и Вик его называет здесь сокращенным именем. (*Прим. перев.*)

можно считать это предположение применительно к астрофизическим исследованиям более общего характера. Существуют примеры (скажем, синхротронное излучение), когда предположение о гауссовом распределении излучения может оказаться довольно сомнительным.

Я мог бы в этой связи также отметить, что измерения подобного типа могут быть использованы в спектроскопии. Нетрудно убедиться в том, что в случае излучения гауссов а типа корреляция между интенсивностью в два различных момента времени содержит информацию об его спектральном составе. Фактически в результате таких измерений как раз и получается фурье-представление излучаемой мощности. Но это опять же основано на гипотезе о «гауссовости» излучения. Это справедливо для теплового излучения света и не оправдано, скажем, для света, излучаемого лазером. Насколько мне известно, экспериментальная ситуация в этом вопросе пока еще не очень ясна. Наиболее вероятно, что в случае лазера мы имеем дело с чем-то вроде собственного состояния поля, подобного тому, которое недавно обсуждалось Глаубером.

Перечисленные соображения привели меня к такой общей точке зрения. Измерение всегда служит средством накопления какой-либо информации об изучаемом объекте и сопоставления ее с уже имеющейся, причем последняя может оказаться как действительной, так и всего лишь воображаемой. Однако это предполагает наличие теории: мы должны сопоставлять результаты реального физического эксперимента с какой-то своей теорией. Это как раз тот аспект всей проблемы, понимание которого оставляет, на мой взгляд, желать много лучшего. Измерение в наше время уже далеко не такая простая вещь, каким оно было во времена Евклида. Теперь оно представляет собой нечто несравненно более сложное, и его успех зависит не только от точности эксперимента, но также и от того, насколько оправданы наши предположения, т. е. насколько они соответствуют реальности.

Д. Вик. Каковы расстояния?

Дж. Торальдо ди Франсиа. На большом интерферометре в Наррабри расстояние может достигать 618 футов. В силу неизбежных нестабильностей ничего подобного в интерферометре Майкельсона быть не может. Атмосферные разряды также являются в этом случае источником шума. Когда же используется интенсивный интерферометр, эти разряды не играют существенной роли, так как у флуктуаций интенсивности имеются характерные периоды, которые значительно меньше, чем у атмосферных флуктуаций.

Д. Вик. Насколько я понимаю, речь идет о частотах выше, скажем, 3 *Мгц*, что исключает помехи от атмосферных разрядов. Это так?

Дж. Торальдо ди Франсиа. Да, в типичном случае ширина полосы порядка 100 *Мгц*. Это характерно для осцилляций интенсивности в высокой степени монохроматического светового потока.

Л. Ван-Хов. Мне хотелось бы остановиться на вопросе о дальнейших перспективах измерения длин в том тривиальном смысле, насколько далеко мы можем продвинуться в направлении измерения экстремально больших и экстремально малых длин. Хорошо известно одно любопытное рассуждение, показывающее, что наши возможности в измерении очень больших расстояний могут оказаться ограниченными естественным пределом. Это связано с так называемым законом Хаббла, согласно которому скорость удаления какой-либо галактики пропорциональна расстоянию до нее. Если выразить этот факт посредством формулы $v = c(R/R_H)$, где c — скорость света, то видно, что появляется некоторая характерная длина R_H. В наиболее примитивных моделях Вселенной из этого обстоятельства можно было бы сделать вывод о том, что заглянуть на расстояние, превышающее величину порядка R_H, вообще невозможно. Действительно это так, или же сильно зависит от неизвестных пока динамических свойств очень больших систем, но тем не менее можно представить себе Вселенную, в которой невозможно выйти за этот горизонт. Возможно, что аналогичным образом обстоит дело с экстремально малыми расстояниями. Правомерно поставить вопрос о том, не существует ли некоторого предельного расстояния, дальше которого проникнуть вообще нельзя. Разумеется, мы пока не знаем ответа на него, но этот вопрос имеет прямое отношение к трудностям теории поля. Наиболее обычной панацеей от этих трудностей является введение обрезания. Мы производим обрезание на больших импульсах, но для того, чтобы оправдать это, должны предположить, что в системе покоя частицы излучение, частота которого превосходит частоту обрезания, с частицей уже не взаимодействует. Если бы это действительно было так, то можно было бы представить себе динамическую модель, в которой частицы вообще нельзя было бы ускорить до энергий, бо́льших некоторого предела, и вследствие этого для максимальной энергии, достижимой с помощью обычной ускорительной техники, существовал бы абсолютный предел, связанный с обрезанием. В силу соотношения неопределенностей это означало бы, далее, что существует нижний предел доступных изучению расстояний. В этом понимании математическая процедура обрезания, которую можно перефразировать на языке фундаментальной длины, определяло бы ее в том же самом смысле, что и упоминавшаяся выше величина R_H. Она являлась бы горизонтом со стороны малых расстояний. Это, по существу, все, что я хотел сказать, и в заключение только

замечу, что все сказанное мною находится в определенной связи с тем беспокойством и вопросами, которые высказал Бернардини, когда он выразил такую озабоченность по поводу дальнейшей судьбы физиков и их будущей деятельности. Два предела, о которых я говорил, пока еще не достигнуты, и хотя, разумеется, по мере приближения к ним исследования становятся все более дорогостоящими, тот факт, что мы их еще не достигли, остается фактом первостепенной важности, и потому нет ничего более естественного, чем стремление людей продвигаться в этом направлении дальше. Я полагаю, что этот утешительный аргумент мы никогда не должны забывать. Мы можем проводить бессонные ночи в раздумьях о соотношении, пропорции в развитии научных исследований и о тех путях, по которым нужно идти дальше, но стремление продвигаться в этих двух направлениях пока остается законным правом научной любознательности, ибо пределы еще не достигнуты, а быть может, их и нет вовсе.

Х. Казимир. Я хотел бы сделать два небольших замечания. Одно из них связано с поднятым Торальдо ди Франсиа вопросом об экспериментах Хэнбери-Брауна и Твисса. Он уже подчеркивал то обстоятельство, что эти эксперименты позволяют получать нужную информацию, если в выделенной вами полосе приходящий световой сигнал обладает гауссовыми свойствами, что в известном смысле эквивалентно отсутствию корреляции между фазами различных фурье-компонент или чему-то в этом роде. В этой связи, вероятно, было бы полезно обратить внимание на ту разницу, которая существует в классической физике между осциллятором и тем, что можно было бы назвать шумовым свистом — явлением, хорошо известным в акустике. Если пропустить белый шум через узкополосный частотный фильтр шириной в несколько периодов, то на выходе мы получим сигнал гауссова типа в определенной полосе частот, который с чисто акустической точки зрения обладает одной специфической особенностью — помимо того, что этот звук имеет определенную высоту, он еще сопровождается каким-то странным свистом. Вы могли бы также взять генератор с периодически изменяющейся частотой, скажем, скрипичную струну, и добиться того, чтобы в двух разных случаях фурье-анализ за достаточно длительный период времени привел к абсолютно совпадающим полосам частот. В то же время для слуха звучание будет различным, как и весьма различными будут результаты интерференционного эксперимента обсуждаемого типа. Точно так же, если взять старый искровой радиопередатчик и пропустить излучаемый им сигнал через узкополосный фильтр, то электромагнитный сигнал на выходе получится отличным от того, который излучается осциллятором, даже если частота последнего весьма нестабильна. Обстоятельство, которое я хочу подчеркнуть, состоит в том, что, коль скоро у вас есть источники света, даже характеризующиеся очень узкими спектральными линиями, например электрический разряд в сильно разреженном газе,— все они в том смысле, в каком я определил выше, относятся к очень узкополосным источникам шумового типа. Однако же при работе с лазером и индуцированным излучением мы сталкиваемся, я полагаю, впервые с сигналом, электромагнитным сигналом, излучаемым атомной системой, которая представляет собой генератор совсем другого типа. Если задаться вопросом, в чем же все-таки состоит различие, то выяснится, что в большинстве оптических экспериментов большого различия между упомянутыми источниками света нет, ибо это почти всегда одноквантовые эксперименты, в которых вы имеете дело с каким-либо квантовым переходом, когда разница, о которой идет речь, действительно не сказывается. И нужно достаточно основательно подумать, чтобы отыскать эксперименты, в которых она должна проявиться. Мне кажется, что таковыми как раз являются эксперименты обсуждаемого типа, и, если я не ошибаюсь, подобные эксперименты уже имели место применительно к природным источникам, а также к лазерам, и в результате действительно было обнаружено существенное отличие в корреляционных свойствах светового излучения обычных высокомонохроматических источников света и лазеров. Разумеется, в том, что я сказал, нет ничего нового, но мне кажется, что, вероятно, поучительно взглянуть на все это с такой точки зрения. На этом кончается мое первое замечание.

Второе замечание относится к измерениям угловой апертуры. Мне хотелось бы обратить внимание на то, что, оперируя такими понятиями, как $\Delta\varphi$, Δd и т. п., в некоторых случаях нужно соблюдать известную осторожность. Это связано с тем, что при очень прецизионных численных измерениях иногда можно, казалось бы, выйти за пределы простого соотношения неопределенностей. Особенно это относится к тем случаям, когда о том, что вы изучаете, вам уже кое-что известно. Хорошо известно, что если вы наперед знаете, что спектральная линия состоит из трех компонент,— вы знаете, что они присутствуют, но не знаете, где они расположены,— то посредством скрупулезных вычислений вы можете определить их положение и интенсивности даже в том случае, когда в вашем распоряжении имеется только лишь оптический прибор, разрешающая способность которого заведомо слишком мала для подобного измерения. Не менее хорошо известно также и то, что на этом пути очень легко получить ошибочный ответ. Но все же сделать это можно. И тут я хочу привлечь ваше внимание к той любопытной ситуации с численным значением апертуры, которая связана с устройствами, которые иногда называют сверхнаправленными антеннами. Если есть какая-то антенна, которая может иметь вид зеркала с диполем в центре или же представлять

собой какое-то весьма сложное хитросплетение проволочного типа, то обычно говорят, что с ее помощью можно получить угловое разрешение

$$\alpha \sim \lambda/d,$$

и это верно как для передатчика, так и для приемника. Мы знаем также, что если поместить антенну на пути электромагнитного излучения, то площадь A ее взаимодействия с излучением будет пропорциональна d^2. Однако мы знаем также и то, что последнее не всегда верно, и в тех случаях, когда мы работаем вблизи резонанса и имеем, скажем, резонирующий диполь, эта площадь оказывается порядка λ^2 и может стать значительно больше, чем площадь самой антенны. Это имеет место, как мы хорошо знаем, не только в случае антенны дипольного типа в электромагнетизме, но также, скажем, и для ядерных взаимодействий в резонансной области. Здесь любопытно то, что эти правила, будучи очень хорошими, строго говоря, неверны, и я хочу обратить на это ваше внимание, ибо тут как раз и становится очевидной необходимость соблюдать известную осторожность при использовании подобной аргументации. Прежде всего, согласно хорошо известной теореме, возможно получение сколь угодно острого — в сысле угловой направленности — электромагнитного излучения с помощью антенн сколь угодно малого размера. Математически лучше всего сформулировать это утверждение следующим образом. Пусть имеется большая сфера, внутри ее распределение электрических токов некоторой частоты ν, которой соответствует определенная диаграмма направленности электромагнитного излучения. Тогда, взяв другую концентрическую сферу меньшего радиуса, всегда можно подобрать распределение токов так, чтобы они, будучи локализованы внутри ее, полностью воспроизводили прежнее электромагнитное излучение вне большей сферы (т. е. давали бы в этой области в точности такую же диаграмму направленности). Показать это очень просто. Любое поле излучения можно разложить вне внешней сферы по мультиполям, определив таким образом все его составляющие. В то же время внутри второй сферы всегда можно подобрать токи и заряды таким образом, чтобы получить то же самое распределение по мультиполям. Это означает, в частности, что, увидев в сферической клетке слона, вы никогда не можете быть уверены, если находитесь только вне ее и не заходите внутрь, что там действительно есть слон, поскóльку это мог бы быть оптический трюк, создаваемый специфическим распределением токов и зарядов. Пока что все это было показано для случая, хотя и произвольной, но одной частоты, и, следовательно, слон не мог бы быть белым, а только, скажем, розовым. Я в этом не уверен. Эта теорема, несомненно, верна, и поэтому в силу общей теоремы взаимности верно также и то, что можно придумать антенну сколь угодно малых размеров, обладающую очень высокой разрешающей способностью. Можно также рассчитать эффективное сечение взаимодействия этой антенны с излучением и, поскольку для принимающей антенны это означает по существу добавление во внешней области некоторой электромагнитной волны, которая частично компенсирует приходящий сигнал, снова становится совершенно очевидным, что, будучи поставлена как преграда на пути излучения, такая маленькая антенна может вне некоторой сферы действовать точно так же, как очень большое зеркало. Первой напрашивается мысль, что такая ситуация, когда действительные размеры системы значительно меньше, чем сечение ее взаимодействия, противоречит обычной трактовке принципа неопределенности. Разумеется, это не так, поскольку остается справедливым тот факт, что нельзя определить поперечные размеры лучше чем с точностью порядка λ, что и дает для площади взаимодействия значение порядка λ^2. Однако, имея дело с системой, обладающей очень острой диаграммой направленности, мы располагаем только волнами с очень малой поперечной компонентой, и поэтому точность определения становится порядка λ/d, а соответствующая эффективная площадь взаимодействия — порядка λ^2/d^2, как и получается в действительности, и при этом не возникает каких-либо трудностей с принципом неопределенности. И в самом деле, хорошо известно, что, когда имеются мультиполи l-го порядка, в знаменателе выражения для площади взаимодействия возникает множитель l^{-1}, а после подходящего суммирования по различным мультиполям может появиться даже множитель l^{-2}. К сожалению, на практике это обстоятельство не удается реально использовать в полной мере, так как оказывается, что при попытках построить подобную систему мы сталкиваемся прежде всего с тем, что для этого токи должны быть настолько большими и требуется так много компенсирующих токов в различных направлениях, что тепловые потери начинают превосходить все разумные пределы. Конечно в этом пункте можно было бы возлагать надежды на сверхпроводимость. Однако и тогда неизбежны трудности, поскольку очень скоро геометрические требования, предъявляемые к точности изготовления систем, возрастут настолько, что допустимые отклонения станут меньше атомных размеров. Все сказанное относится, в частности, к попыткам создать сверхнаправленную систему, комбинируя диполь с квадруполем, и, я полагаю, ко всему тому, что большинству людей удалось когда-либо сделать. Для достижения таких фантастических точностей можно было бы привлечь еще октуполи, чего не было пока сделано на практике. Таким образом, хотя поначалу мы могли бы сказать нашим друзьям радиоастрономам, что, строя огромные телескопы, они поступают весьма

неразумно, поскольку все требуемые угловые разрешения и эффективные площади взаимодействия они могли бы получить и с помощью зеркал или систем малого размера, практический вывод состоит в том, что, хотя принципиально упомянутая теорема и очень интересна, опираясь на нее, не удается достичь очень многого. Тем не менее я все же склонен рассматривать это как определенное предупреждение, что, повышая точность и совершенствуя вычислительную технику и т. п., иногда можно продвинуться значительно дальше того, что при поверхностном анализе кажется на первый взгляд пределом допустимой разрешающей способности. И поскольку при использовании больших вычислительных машин и всего прочего вычисления, казавшиеся прежде немыслимыми, становятся реально осуществимыми, я думаю, что в измерительной технике можно взглянуть на такие вещи с несколько более общих позиций. Может выясниться, что на этом пути продвинуться очень далеко, как правило, нельзя, ибо в большинстве случаев по мере выхода за естественные пределы требования, предъявляемые к точности, возрастают невероятно быстро, но могут быть также и ситуации, когда можно достигнуть значительного выигрыша, оставаясь в пределах разумной разрешающей способности, но выполняя измерения чрезвычайно тщательно и производя затем теоретическую обработку результатов эксперимента. В этом состоит мое второе замечание.

Д. Вик. Эти замечания, вне сомнения, весьма интересны, на мой взгляд, прежде всего потому, что опыт показывает, что все не противоречащее положениям теории в конце концов становится реальностью. Поэтому, вопреки всем стоящим на этом пути трудностям, подобные системы, быть может, все же осуществимы, хотя я по этому поводу ничего сказать не могу.

Меня заинтересовало замечание о свойствах профильтрованного шума, поскольку я никогда не слышал, как звучит шум, прошедший через фильтр,— я полагаю, что там, где живет и работает доктор Казимир, такое явление может происходить очень часто,— и весьма озадачен утверждением, что его звучание так сильно отличается от звучания, скажем, осциллятора. Я понимаю, в чем состоит особенность первого из них. Вы только что сказали, что он состоит из набора независимых компонент, амп-амплитуды и фазы которых распределены по гауссовому закону. Чем же характеризуется последнее — звучание, которое на слух всем нам более знакомо, как вы описываете осциллятор, который каким-то образом движется в поле?

Х. Казимир. Мы можем представить себе это, написав, что амплитуда изменяется периодически, а частота слабо зависит от времени. Но при этом очень существенно, что амплитуда всегда приближается к своему максимальному значению, проходя через нуль и становясь попеременно то отрицательной, то положительной, причем за каждый период ее величина изменяется лишь незначительно, в то время как в случае профильтрованного шума полная амплитуда слагается из отдельных групп волн и становится то большой, то малой. Разница тут очень велика. Если описывать эти процессы графически, то в одном случае вы обнаружите, что основное изменение полной амплитуды во времени сопровождается всевозможными вариациями, в то время как в другом, скажем, при звучании скрипичной струны, поведение амплитуды всегда следует общему закону синусоидального типа.

Д. Вик. Вы считаете, что амплитуда не изменяется очень сильно?

Х. Казимир. Нет, но точки пересечения с осью времени не вполне эквидистантны, расстояние между ними незначительно изменяется, то увеличиваясь, то уменьшаясь, в то время как в другом случае сама амплитуда то велика, то мала.

Д. Вик. Говоря о цугах, я собирался упомянуть об одном обстоятельстве, но забыл. Оно состоит в том, что флуктуации, о которых шла речь, фактически достаточно велики. Действительно, этот факт очень легко выразить математически. Если взять, скажем, интенсивность I, то, согласно простой теореме для процессов гауссова типа, $\overline{(\Delta I^2)} = 2I^2$. Другими словами, среднеквадратичная флуктуация равна $\sqrt{2}I$. Отсюда видно, насколько она велика: коэффициент на деле равен 2, а не, скажем, 0,1. В то же время вы сказали, что для осциллятора это число было бы значительно меньше.

Х. Казимир. Если у вас есть, скажем, радиопередатчик без амплитудной модуляции, но с некоторой частотной модуляцией, то в течение всего времени колебаний его амплитуда достигает приблизительно одного и того же максимального значения, а затем, проходя через нуль,— снова минимального; то же самое справедливо и для акустических инструментов, по крайней мере в большинстве случаев.

Дж. Торальдо ди Франсиа. Я очень рад, что Казимир поднял вопрос о сверхнаправленных антеннах, который в течение некоторого времени оставался для многих загадкой. Причиной тому было кажущееся противоречие с гейзенберговским принципом неопределенности. Действительно, если вы возьмете гейзенберговский микроскоп со сверхразрешающим объективом, то вы, казалось бы, получите возможность измерять сопряженные величины более точно, чем допускается соотношением неопределенностей. Тут, однако, как подчеркнул Казимир, дело в том, что при этом обязательно должны возникнуть колоссальные реактивные токи. Последнее означает, что эти процессы уже нельзя рассматривать как однофотонные. Процессы с участием сколь угодно большого

числа фотонов, когда ситуация кардинально отличается от той, с которой приходится иметь дело в атомной физике, являются объектом пристального внимания в оптике и в еще большей степени в теории антенн. Другое свойство, присущее сверхразрешающим устройствам, состоит в том, что классический предел их разрешающей способности, вне всякого сомнения, может быть превзойден по той простой причине, что он основан на недоразумении. Истинное положение вещей характеризуется тем, что объектив ограниченных размеров способен принять только ограниченное количество информации. Однако мы располагаем еще возможностью выбирать по своему усмотрению из электромагнитного сигнала именно ту информацию, которая нам нужна. Если нам известно об излучающем объекте все, за исключением только лишь каких-то его специфических свойств, скажем, если мы не знаем, является ли изучаемая звезда простой или же двойной, то эта недостающая информация может быть получена с помощью объектива сколь угодно малых размеров. Если же, наоборот, вы хотите иметь одинаково точную информацию обо всех свойствах изучаемого поля, то классический предел оправдан и его необходимо принимать во внимание.

Р. Оппенгеймер. Вступая в область релятивистской физики, мы очень скоро, по существу, вообще теряем возможность говорить о частице как таковой. Так было с позитронами, но в этом случае из-за малости постоянной тонкой структуры понятие частицы все же осталось. В физике элементарных частиц мы этого, вообще говоря, не имеем. Единственный законный вопрос — это можем ли мы вообще что-либо описать в рамках пространственно-временнóго формализма — будь то плотность заряда или плотность поля слабых сил, или же, скажем, плотность поля сильного взаимодействия. Этот вопрос пока остается открытым, но ясно одно, что возможность описывать все это, опираясь на свойства свободных частиц, утрачивается сразу же, как только мы начинаем рассматривать сильные взаимодействия и энергии, большие или порядка масс покоя частиц. Поэтому я думаю, что в действительности мы располагаем информацией, которая может иметь отношение к очень малым пространственно-временнýм интервалам, но это не те интервалы, которыми описываются статические свойства протона.

Д. Вик. Я совершенно согласен с этим и хотел бы только внести ясность в определения. Насколько я понял, замечания Ван-Хова относятся к вопросу о пределах измеримости длин. В таком случае это, в известном смысле, подобно давнишним высказываниям Гейзенберга. И здесь действительно может оказаться большая доля истины, но ее-то как раз мы и должны выяснить. Говоря о комптоновской длине волны, я не вправе сказать, что она и является минимальной измеримой длиной. И, разумеется, я так не думаю. Но в то же время я рассматриваю ее как своего рода рубеж, выше которого экспериментальные данные поддаются обычной простой интерпретации, а ниже, как уже отметил профессор Оппенгеймер — и я к нему присоединяюсь,— их смысл менее прозрачен.

Ф. Перрэн. Считаете ли вы, что, измеряя электромагнитные формфакторы посредством анализа экспериментов по рассеянию, мы можем получить разную информацию о формфакторе, скажем, протона, используя для этого фотоны, электроны и мюоны различной энергии? Не кажется ли вам, что с помощью электронов можно получить бóльшую информацию, чем с помощью мюонов, или же наоборот?

Д. Вик. Да. С практической точки зрения подобная разница, возможно, и существует. Это означает, что, используя электроны, возможно, мы в состоянии извлечь больше информации, скажем, просто по той причине, что, располагая более интенсивными электронными пучками, мы можем достичь большей точности. Однако, насколько мне известно, пока что нет никаких оснований ожидать какой-либо разницы в самом характере этой информации. В то же время по существу, этот вопрос в настоящее время остается открытым, поскольку эксперименты с участием мюонов еще не закончены, а их результаты еще не обработаны. И хотя я мог бы рискнуть сделать предсказание, более серьезным будет сказать, что когда эти эксперименты завершатся, тогда и увидим. Но тем не менее я не ожидаю, или по крайней мере сейчас нет никаких оснований ожидать, от них каких-либо существенно иных результатов. Насколько мне известно, значительное различие могло бы возникнуть только в том случае, если бы существовала какая-то разница во взаимодействии.

Ф. Перрэн. Нет. Если даже считать, что взаимодействие одинаково, то из-за различия масс еще имеется разница в соответствующих соотношениях между энергией и длиной волны.

Д. Вик. По этому поводу я могу сказать только следующее: если здесь есть кто-нибудь, кому известна разница, обусловленная различием масс,— прошу! Может быть, Ван-Хов...

Л. Ван-Хов. По мере продвижения в область очень больших передач импульса вполне может оказаться, что процессы, обусловленные двухфотонным обменом, станут вносить весьма заметный вклад, может быть, даже не менее существенный, чем процессы однофотонные. Тогда разница масс мюона и электрона действительно начнет играть роль. Можно полагать, что при таких передачах импульса было бы очень поучительно располагать результатами как электронных, так и мюонных экспериментов для того, чтобы, сравнивая их, использовать в большей мере информацию, связанную с разно-

стью масс. Однако до тех пор, пока мы имеем дело с такими передачами импульса, при которых еще имеется уверенность в том, что однофотонный обмен играет доминирующую роль, эти эксперименты полностью эквивалентны.

Д. Вик. Таким образом, вы хотите сказать, что, поскольку всегда очень трудно дать численную оценку вклада процессов двухфотонного обмена, было бы лучше использовать частицу, для которой последний играет меньшую роль, так как соответствующие экспериментальные данные поддавались бы более простой интерпретации.

Л. Ван-Хов. Да, но в то же время здесь содержится и бóльшая информация. Возьмем, к примеру, комптоновское рассеяние на протонах. Это очень запутанный вопрос. Здесь также существует область, которую можно изучать экспериментально и где результаты можно пытаться интерпретировать на языке величин, описывающих структуру протона. Вместе с тем, вы можете в некоторый момент захотеть дополнить имеющуюся у вас экспериментальную информацию о комптоновском рассеянии на протонах сведениями о тех ситуациях, когда с протоном взаимодействуют два виртуальных фотона, т. е. о процессах двухфотонного обмена между электроном и протоном. В то же время именно это явление может оказаться интересным для более глубокого понимания структуры протона. В таком случае будет полезно одновременно иметь данные о рассеянии на протонах как электронов, так и мюонов.

С. Дэванс. Меня озадачило замечание Вика по поводу невозможности изучения фаз в задачах рассеяния. Я полагаю, что, говоря это, вы имели в виду разности фаз, поскольку всегда приходится иметь дело именно с этой величиной. Я могу привести множество противоположных примеров, одним из которых может служить наблюдаемая обычно интерференция между, скажем, кулоновским рассеянием на малые углы и некулоновской частью амплитуды. Далее, в современной оптике вряд ли кто-нибудь еще пользуется простой просветленной оптикой или обычными микроскопами — все работают с интерференционными микроскопами, позволяющими по интерференции с рассеянием определять амплитуды вместе с фазами. Обычно в изучаемую сложную структуру вводят какой-то тяжелый элемент, с которым связана определенная и притом большая амплитуда с известной фазой, и затем наблюдают ее интерференцию со всей остальной амплитудой. Точно так же обстоит дело с дифракцией рентгеновских лучей. Фактически именно таким путем была недавно расшифрована сложная структура белка. Поэтому мне не очень понятно, чтó сверх этого вы имели в виду, говоря о возможном осуществлении в будущем, наряду с измерениями интенсивностей, также и фазовых измерений. Не могли бы ли вы пояснить это?

Д. Вик. Разумеется в ряде случаев мы действительно можем, используя соответствующую аппаратуру, измерять фазы, и интерференция с кулоновской амплитудой может служить хорошим примером того, почему полезны подобные измерения. Однако в общем случае, когда вы изучаете, скажем, рассеяние на тридцать и на шестьдесят градусов, у вас нет прямых путей сделать то же самое. Говоря это, я имею в виду, что в процессе этих измерений вы определяете интенсивности при тридцати и шестидесяти градусах, но не получаете информации об относительных фазах этих амплитуд.

С. Дэванс. Да, это как раз то, что в этом эксперименте, возможно, удалось бы измерить с помощью интерференции.

Д. Вик. О нет, в оптике-то я наверняка знаю, что это возможно. Я хотел именно подчеркнуть контраст между двумя этими случаями.

Р. Мёссбауэр. Я хотел бы высказать ряд комментариев по последнему вопросу. В статье Гольдбергера, Льюиса и Ватсона фактически было предложено использовать эти корреляции интенсивности для решения старой проблемы физики рентгеновских лучей, когда имеется сложный кристалл с неоднородной структурой и мы хотим знать хотя бы связанную с этим относительную фазу. Для этого и было предложено использовать упомянутые корреляции интенсивностей. Конечно, для этого существует, как уже было только что отмечено, целый ряд других методов, но, по-видимому, ни один из них не является в случае рентгеновских лучей универсальным.

Дж. Яух. Мне хотелось бы сделать несколько замечаний, имеющих отношение к одной весьма старой квантовомеханической проблеме, но раз уже мы на этой юбилейной сессии затронули ряд фундаментальных вопросов, я смею надеяться, что буду прощен за то, что позволил себе поднять ее. То, что я хочу сказать, связано с вопросами, которые обсуждались Виком ныче утром, однако имеет более непосредственное отношение к вопросу о возможности или невозможности рассмотрения скрытых переменных в рамках квантовой механики. Все вы, конечно, знаете, что эта проблема уже была объектом интенсивного обсуждения еще тридцать лет тому назад и что существует знаменитая теорема — так называемая теорема фон Неймана, которая претендует на доказательство невозможности введения их в квантовую механику.

В настоящее время это доказательство подверглось весьма серьезной критике, которая, я полагаю, в известной степени оправдана. Мы предприняли попытку разобраться в принципиальных пунктах этого доказательства и посмотреть, не может ли оно быть усовершенствовано таким образом, чтобы в конечном счете стать несколько менее риторичным, чем прежде. Критика идет в основном по трем направлениям.

Прежде всего имеются два возражения против тех предположений, на которые опирается доказательство фон Неймана.

Первое из них формулируется в виде постулата, что любой без исключения наблюдаемой квантовомеханической величине можно поставить в соответствие некоторый самосопряженный оператор, и наоборот. Таким образом устанавливается взаимно однозначное соответствие между наблюдаемыми и самосопряженными операторами.

Второе предположение фон Неймана состоит в том, что математически состояние системы можно описать с помощью функций наблюдаемых. Это то, что обычно называют математическим ожиданием, причем для него имеет место свойство аддитивности. Это предположение легко оправдать только в том случае, когда вы имеете дело с наблюдаемыми, операторы которых коммутируют, поскольку в этом случае существует понятие одновременной измеримости соответствующих величин. Однако фон Нейман пользуется аддитивностью применительно к некоммутирующим переменным, когда нет совершенно никаких эмпирических фактов, подтверждающих это предположение.

Наконец, в-третьих, теорема фон Неймана сводится к утверждению, что существование у системы скрытых переменных несовместимо с квантовой механикой. Последнее означает, что их присутствие должно было бы повлечь за собой появление каких-то наблюдаемых эффектов в квантовомеханических предсказаниях, в тех или иных приложениях — где-то обязательно должно было бы появиться наблюдаемое отличие от того случая, когда таких переменных нет. Однако фон Нейман, как и никто другой, никогда не формулировал на языке измеряемых величин, за какие именно наблюдаемые эффекты могут быть ответственны скрытые переменные, введенные тем или иным образом в теорию. В этой связи я спрашиваю, в чем же все-таки состоит наблюдаемое различие? Сейчас мы можем улучшить это доказательство, устранив перечисленные возражения.

Совершенно очевидно, что при выводе своей теоремы фон Нейман не ставил себе целью дать максимально строгое доказательство. Он лишь сформулировал определенные утверждения, доказуемые при конкретных предположениях. Его доказательство, несомненно, правильно, но положенные в его основу предположения не являются самыми слабыми из всех возможных, ибо это и не входило в его намерения. В этой связи мы занялись поисками путей ослабления этих предположений, так сказать, тех краеугольных камней, которые абсолютно необходимы для достижения результатов, принципиально столь же строгих, как те, которые были получены фон Нейманом. И, помимо этого, мы стремились показать, что наблюдаемое различие, о котором только что шла речь, действительно существует. Я не могу сейчас вдаваться в детали и хотел бы лишь вкратце обрисовать в основных чертах то, что мы делаем.

Прежде всего мы попытались забыть все, что мы знаем о квантовой механике, и исходить из идеи, которая тоже принадлежит фон Нейману и была высказана им в другой связи, а именно, в связи с аксиоматической формулировкой квантовой механики, которая была дана им совместно с Биркгофом в статье, опубликованной в 1935 г.

В этой статье основным критерием теории провозглашались эксперименты типа «да — нет». Фон Нейман и Биркгоф подчеркивали, что при построении общих теоретических основ квантовой механики неудобно иметь дело с обычными наблюдаемыми, скажем, координатой, импульсом или т. п., а более удобно использовать наблюдаемые специального типа, а именно «да — нет-эксперименты». Из самого названия ясно, что это такие эксперименты, которые предусматривают получение только одного из двух возможных ответов. Экспериментом такого типа является, например, выяснение вопроса, находится ли интересующая нас частица внутри данного элемента объема. Это наблюдение можно, в принципе, выполнить, поместив туда счетчик, эффективность которого равна 100%, и следя за его показаниями. Счетчик либо сработает, либо нет. Это типичный «да — нет-эксперимент». Несколько более сложно показать, что посредством соответствующего анализа измерение всех наблюдаемых величин может быть сведено к серии «да — нет-экспериментов». Типичным устройством такого типа является многоканальный анализатор, с помощью которого вы можете найти распределение какой-либо величины типа, скажем, энергии или импульса посредством серии «да — нет-экспериментов», причем результат будет получен в виде событий в наборе каналов, которые использовались вами для этого анализа. Таким образом, весьма существенно прежде всего то, что все измерения можно в конечном счете свести к «да — нет-экспериментам», и, во-вторых, то, что в результате таких экспериментов мы получаем информацию в сравнительно простой форме. Действительно, в этом случае свойства физической системы удается описать посредством серии «да — нет-экспериментов» и вся информация, как уже отмечалось фон Нейманом и Биркгофом, содержится в получающейся в результате *решетке*. При этом нам приходится учитывать три возможных обстоятельства. Прежде всего, в серии «да — нет-экспериментов» существует частичное упорядочение, обозначаемое как $a \subset b$, которое с экспериментальной точки зрения означает, что если «да — нет-эксперимент» типа «a» верен, то верен также и аналогичный эксперимент типа «b». Подобная ситуация реализуется, если, скажем, «b» — это наблюдение локализации частицы в некотором объеме V_b, а «a» — то же самое, но для объема V_a, который целиком в нем содержится. В этом случае измерение является непротиворечивым, если положительный ответ в эксперименте «a» всегда влечет за собой такой же ответ в эк-

сперименте «b». Это частичное упорядочение ведет к определенным соотношениям: появляется возможность ввести наибольшую нижнюю границу $a \cap b$ и наименьшую верхнюю — $a \cup b$. Эта наибольшая нижняя граница интерпретируется как «да — нет-эксперимент» «a» и «b», в то время как соотношение $a \cup b$ соответствует «да — нет-эксперименту» «a» *или* «b». И, кроме этого, еще существует отрицание «a», обозначающее «не-a». Эти три операции формируют структуру решетки, изучая которую можно определить физические свойства наблюдаемой системы. Центральным пунктом всего этого подхода, уже обсуждавшимся в известной степени Биркгофом и фон Нейманом, является вопрос о взаимосовместимости «да — нет-экспериментов».

В обычной квантовой механике мы хорошо знаем, что это значит: взаимосовместимы эксперименты по измерению коммутирующих величин. Но так обстоит дело в обычной квантовой механике, которую я только что призывал вас забыть. Теперь же у нас нет понятия коммутативности, поскольку мы не имеем дела с гильбертовым пространством. Тем не менее, опираясь на перечисленные выше три структурных свойства, все же оказывается возможным сформулировать обобщение обычного квантовомеханического понятия взаимосовместимости применительно к «да — нет-экспериментам». Новое условие взаимосовместимости, которое мы будем обозначать посредством символа $a \sim b$,— я не стану сейчас приводить конкретную формулу, выражающую это условие на языке структурных свойств,— физически означает, что два эксперимента «a» и «b» типа «да — нет» можно выполнить с помощью одного измерения, которое даст ответ сразу на оба вопроса,— эксперимента, при котором измерение одной из интересующих вас наблюдаемых не препятствует измерению другой. Наконец, мы должны дать определение того, что мы понимаем под состоянием системы и под системой, допускающей существование скрытых переменных. Состояние системы определяется весьма просто, так как оно является функцией элементарных тестов, иначе говоря, функцией $p(a)$, которую мы называем вероятностью и которая в точности совпадает с обычным математическим ожиданием. Разумеется, при этом мы не имеем обычной волновой функции Шрёдингера.

Будучи математическим ожиданием, величина $p(a)$ должна подчиняться неравенствам

$$0 \leqslant p(a) \leqslant 1, \tag{1}$$

т. е. являться вещественным числом из интервала [0, 1].

Далее, если «a» и «b» взаимосовместимы, то относительно них функция состояния аддитивна, так что должно иметь место утверждение следующего типа: если $a \sim b$, то

$$p(a \cup b) = p(a) + p(b) - p(a \cap b), \tag{2}$$

откуда вытекает, что применительно к совместимым измерениям функция $p(a)$ имеет смысл обычной вероятности.

И, наконец, если достоверно известно, что каждое из свойств «a» и «b» определенно имеет место, то из этого должно следовать, что имеет место также и «a» и «b», т. е. если $p(a) = 1$ и $p(b) = 1$, то и

$$p(a \cap b) = 1. \tag{3}$$

Это те три постулата относительно свойств состояния, которые необходимо сделать для того, чтобы оно поддавалось физической интерпретации. В то время как соотношения (1) и (2) — не что иное, как обычные основные свойства распределения вероятности, соотношение (3), которое для обычной вероятности является тривиальным следствием условия (2), в рамках обобщенной квантовой механики, по существу, оказывается новым постулатом, вытекающим из требования, чтобы теория допускала возможность физической интерпретации. Теперь, разумеется, все зависит от того, как определить понятие скрытых переменных. Для того чтобы сделать это, необходимо сформулировать, что́ мы понимаем под *чистым состоянием* системы. Последнее определяется как такое состояние, которое обладает тем или иным свойством с вероятностью, равной либо нулю, либо единице. Понятие дисперсии $\sigma(a)$ определяется посредством соотношения $\sigma(a) = \overline{p^2(a)} - (\overline{p(a)})^2$. Если состояние является чистым, то функция $\sigma(a)$ обращается тождественно в нуль. Другими словами, $\sigma(a) = 0$, если для любого «a» вероятность $p(a)$ равна либо нулю либо единице, т. е. если всегда достоверно известно, обладает система интересующим нас свойством или же нет. В таком случае системой, допускающей присутствие скрытых переменных, будет такая, каждое состояние которой представляет собой смесь чистых состояний, т. е. для которой

$$p(a) = \sum_i \lambda_i p_i(a),$$

где $\lambda_i \geqslant 0$, $\sum_i \lambda_i = 1$, а каждое из p_i соответствует чистому состоянию. Это и есть то свойство, которым характеризуется система, допускающая скрытые переменные: в этом случае возможна интерпретация, согласно которой система обладает

внутренними переменными — они-то как раз и обозначены индексом i,— которые, как и принято считать, недоступны измерению, но которые зато позволяют по крайней мере описывать систему на языке чистых состояний. Центральная теорема, которую мы теперь можем сформулировать (уже в чисто математическом виде), состоит в следующем: если система допускает введение скрытых переменных, то для нее любые два теста взаимосовместимы, т. е. для любых «a» и «b» в решетке выполняется условие «a» $\sim$ «b». Это является прямым обобщением теоремы фон Неймана. По существу, он доказал принципиально ту же самую теорему, но только при значительно более сильных предположениях. Теперь же я сформулировал эту теорему, опираясь лишь на перечисленные только что гипотезы. Причина, по которой эта теорема представляет интерес, состоит в следующем: в то время, как в каждом конкретном случае непосредственное решение вопроса, могут ли у сложной системы быть скрытые переменные, является весьма сложной задачей, выяснить, будут ли все возможные тесты взаимосовместимыми, значительно проще. Поскольку, как я уже говорил, взаимосовместимость связана только лишь со свойствами решетки, а последние в свою очередь проявляются в эмпирических наблюдениях над системой, их можно выразить через наблюдаемые величины и, таким образом, непосредственно связать вопрос о существовании скрытых переменных с наблюдаемыми эффектами. Следуя по этому пути, очень легко привести примеры, показывающие, что действительно есть такие системы, для которых некоторые тесты несовместимы. Это служит основанием для заключения, что в указанном смысле у таких систем не может быть скрытых переменных.

Х. Казимир. Не пытаясь найти изъян в изложенных только что аргументах, я полагаю, что общее правило состоит в том, что, стремясь доказать теорему о нереализуемости чего-либо, необходимо всегда соблюдать чрезвычайную осторожность. Пусть, скажем, даже действительно удалось доказать, что существование каких-то скрытых переменных невозможно. Тогда это означает, как совершенно верно отметил Яух, что не может быть только скрытых переменных именно этого определенного типа, переменных, вписывающихся в рамки вполне определенного формализма. Однако, основываясь на том, чему учит нас весь наш опыт, я думаю, что очень трудно доказать с полной достоверностью отсутствие каких бы то ни было других возможных вариантов теории. Очень часто в ходе доказательства теоремы нереализуемости какой-либо ситуации, даже анализируя поставленный вопрос настолько придирчиво и взыскательно, насколько это только возможно, вы делаете ряд явных, а подчас вдобавок еще и неявных, предположений, оправданность которых кажется совершенно самоочевидной, но которые тем не менее могут не выдержать испытания временем. И по этой причине, хотя подобный анализ общих принципов измерения и вопроса о недопустимости скрытых переменных и т. п. несомненно представляет большую ценность для прояснения самого существа наших идей, я всегда ощущаю известный скептицизм, как только в результате такого анализа возникают предсказания о невозможности существования тех или иных теорий вообще, ибо я всегда опасаюсь того, что наш ум недостаточно всеобъемлющ, чтобы точно предвидеть все многообразие мыслимых парадоксальных ситуаций. Конечно, они не разрушили бы изложенного здесь математического доказательства — они просто стояли бы вне его рамок. И, опираясь на факты, я думаю, что для выяснения того, насколько все это хорошо, следует подождать результатов дальнейших теоретических и экспериментальных исследований. Это ни коим образом не значит найти изъян в изложенных аргументах — это просто общее ощущение того, что, предсказывая недопустимость какой-либо ситуации, нужно быть предельно осторожным. Вы однозначно предсказываете невозможность определенного класса теорий, однако может оказаться, что существуют другие, непредусмотренные вами формулировки, выпадающие из рамок вашей аргументации.

Д. Вик. Я полагаю, что вы имели в виду также сказать в этой связи, что все хлопоты по доказательству возможности существования удовлетворительной теории, допускающей присутствие скрытых переменных, являются делом тех, кто верит в это,— мы же будем отвергать эту возможность до тех пор, пока они не докажут обратного. Однако согласитесь, что это во всех отношениях лишь простейший выход.

Х. Казимир. Да, с этим нельзя не согласиться. Конечно, существует ряд совершенно бесспорных доказательств негативного типа, подобных, скажем, невозможности квадратуры круга или чему-то в этом роде. Однако когда речь идет об описании явлений природы, ситуация, на мой взгляд, является несколько более сложной, чем в упомянутом примере или вопросе о вечном двигателе, и доказательства становятся не столь убедительными.

Дж. Яух. Мне кажется, что в тех аксиомах, которые мы выбираем, нет ничего сакраментального: они мотивируются физической интерпретацией теории. Разумеется, каждый свободен выбрать вместо них другую систему аксиом и извлечь из них свои следствия. Однако, делая это, вы обязаны решить, какой из перечисленных аксиом следует пожертвовать, хотя все они достаточно хорошо аргументированы. Отмечу одно интересное обстоятельство. Когда я обсуждал эти вопросы с профессором Беллом, который очень хорошо знаком с проблемой скрытых переменных в квантовой механике, он привел контрпример, казалось бы, не укладывающийся в рамки нашей

теоремы, который мы подвергли очень тщательному анализу. Разумеется, если все правильно, то такой контрпример должен был бы противоречить хотя бы одной из аксиом, но сразу было совсем не очевидно, какой именно. По существу, этот контрпример являлся не чем иным, как моделью Бома применительно к значительно более простой ситуации. Нарушенной оказалась аксиома 3 об определении того, что́ понимается под состоянием системы, так что, на первый взгляд, казалось, что в обычной квантовой механике возможна модель со скрытыми переменными. Все другие аксиомы при этом выполнялись. Это, вероятно, может служить иллюстрацией того, насколько велика в этом вопросе степень свободы выбора. Возможно, я должен к этому добавить, что в основном нашей целью было усмотреть, как не следует поступать при попытках обобщения квантовой механики. Лично меня очень интересуют проблемы подобного обобщения, но для того чтобы найти путь в огромном лабиринте возможностей, мне кажется весьма полезным предельно ограничить множество, подлежащее рассмотрению.

ПРИЛОЖЕНИЕ *)

А. Лэттес. Поясните, пожалуйста, для физиков-экспериментаторов, что вы имеете в виду, говоря, что какая-то величина, к примеру L, угловой момент атома, строго сохраняется. Прав ли я, полагая, что под этим вы понимаете сохранение определенного числа, которое получается в результате эксперимента и выражается в определенной системе единиц? Если это так, то скажите, пожалуйста, какую систему единиц вы имели в виду, говоря о сохранении величины L?

Если величина, которая сохраняется (и которую можно измерить экспериментально), есть просто число L ($г \cdot см^2/сек$), то с таким же основанием можно выбрать в качестве единицы само L (скажем, $\hbar$) и сказать, что сохраняется величина $г \cdot см^2/сек$.

Мне кажется, что в действительности мы должны говорить о сохранении отношения $L/$(соответствующая единица).

Единицы CGS являются весьма сложными и во многом субъективного происхождения. Последнее связано, в частности, с очень сложной динамикой солнечной системы (а также приливами и отливами, движением льдов и т. п.). Поэтому, если осуществить прецизионные измерения, пользуясь системой CGS, то могло бы обнаружиться, что в течение достаточно продолжительных интервалов времени отношение $L/(см^2г/сек)$ уже *не сохраняется*. Тогда вы можете выбрать естественную систему единиц, как, например,

$$L_e = e^2/mc^2 \quad \text{для длины,}$$
$$T_e = e^2/mc^3 \quad \text{для времени,}$$
$$m_e \quad \text{для массы,}$$

и может оказаться, что отношение $\hbar/m_e L_e^2 T_e^{-1}$ сохраняется даже для очень больших интервалов времени. Ответ на этот вопрос может быть получен и, в принципе, на него можно ответить уже сейчас, если добиться точности на порядок выше той, которая уже достигнута в экспериментальной технике на сегодняшний день.

Если в качестве основных единиц выбрать

$$L = \sqrt{\hbar G C^{-3}}, \quad T = \sqrt{\hbar G C^{-5}}, \quad M = \sqrt{\hbar G^{-1} C},$$

то отношение $\hbar^1/ML^2T^{-1} = \hbar^1/h = 1$ и сохраняется по определению.

*) Профессор Вик не дал какого-либо определенного ответа на этот вопрос профессора Лэттеса. (*Примечание редактора сборника*).