

ТЕПЛОВАЯ ДЕКОГЕРЕНЦИЯ (АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ГРУППЫ ЦАЙЛИНГЕРА)

Если заглянуть в стандартный курс квантовой механики, то в нём нет и намёка на понятие «декогеренция». Многие авторитетные учёные (например, Л. Д. Ландау) считали размышления на такую тему, как «через какую щель прошёл электрон *на самом деле*», занятием праздным и ненужным. В 90-х гг. XX века положение стало меняться. Развитие квантовой информатики и квантовых технологий привело к увеличению интереса к концептуальным проблемам квантовой механики, в частности, к декогеренции — процессу, ограничивающему появление квантовых эффектов и превращающему их в классические явления. Начиная с 1991 года, после выхода первого варианта статьи В. Зурека [1], этот процесс оказался в центре пристального внимания физиков-теоретиков, инженеров и философов.

При декогеренции нарушается когерентность суперпозиционного состояния из-за взаимодействия квантовой системы с окружающей средой. Окружение «закручивает» две части системы — молекулу и окружающую среду — и распределяет квантовую когерентность среди огромного числа степеней свободы, что делает её практически ненаблюдаемой. В. Зурек говорит о «растворении системы в её окружении» [1]. Большие молекулы, вроде фуллерена, особенно подходят для исследования квантово-классического перехода. Они обладают большим запасом энергии в многочисленных внутренних степенях свободы. Их внутренняя энергия может быть преобразована в тепловое излучение (в энергию тепловых фотонов), что и приводит к *тепловой декогеренции*. Такой же механизм декогеренции характерен для всех макроскопических тел.

Суть явления декогеренции можно пояснить на примере известного эксперимента, называемого в литературе «щели Юнга». Опыт с двумя щелями описан во многих источниках (см., например, [2]). Напомним кратко его суть. Схема такого мысленного эксперимента показана на рис. 1. Электронная пушка или источник фотонов испускает моноэнергетические электроны (т. е. электроны, имеющие одинаковую кинетическую энергию) или фотоны. Ниже расположен непрозрачный экран с двумя щелями А и В, ещё ниже — *детектор* электронов или фотонов, роль которого может играть сцинтиллирующий экран, фотопластинка, счётчик Гейгера, фотоумножитель и т. п. Детектор перемещается вдоль экрана (вдоль оси Ox) и регистрирует число частиц, попавших на него за одну секунду. Отношение этого числа к общему числу испущенных частиц есть вероятность $P(x)$ обнаружить частицу в данном месте экрана (в точке с координатой x). Опыт заключается в сравнении кривых $P(x)$ при одной открытой щели и при обеих открытых щелях.

Если открыта одна щель (А), то наблюдается распределение А, если другая щель (В) — распределение В. Если открыты обе щели, — то интерференционное распределение С. Если оставаться на классических позициях, то такой результат совершенно не понятен, ибо при двух открытых щелях картина должна представлять сумму вкладов от обеих щелей, и распределение должно иметь вид А+В.

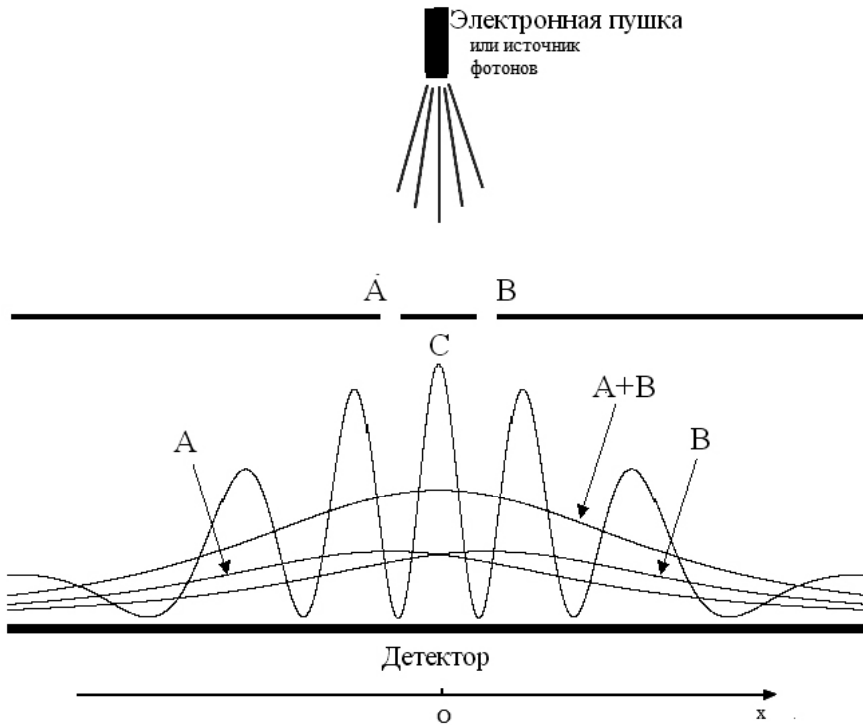


Рис. 1. Двухщелевой эксперимент

Анализ результатов двухщелевого эксперимента позволяет понять фундаментальные принципы *квантовой механики*. Обозначим *вектор состояния* при одной открытой щели $|1\rangle$, а при другой открытой щели $|2\rangle$. Тогда при двух открытых щелях частица находится в суперпозиционном состоянии

$$|1\rangle = a|1\rangle + b|2\rangle,$$

где a и b — комплексные числа (амплитуды состояний), удовлетворяющие условию нормировки

$$|a|^2 + |b|^2 = 1.$$

Амплитуда вероятности при двух открытых щелях равна сумме амплитуд каждого канала, и вероятность события (вероятность попадания частицы в данное место экрана) равна квадрату амплитуды:

$$P(x) = |a|2\rangle + b|2\rangle|^2.$$

Если поставить около щели *пролётный детектор* (на рисунке не показан; не путать с детектором, регистрирующим попадание частицы на экран!), позволяющий установить, через какую именно щель прошёл электрон, то суперпозиция немедленно превращается в смесь, и

$$P(x) = P_1 + P_2 = |a|^2 + |b|^2.$$

В таком случае результат будет таким, как предсказывает классическая теория.

С учётом сказанного, приходится признать, что до **взаимодействия с пролётным детектором электрон находится в нелокальном состоянии и не существует в обычном смысле слова (т. е. в пространстве и времени) как объект классиче-**

ской реальности. В результате взаимодействия с пролётным детектором происходит декогеренция, и суперпозиция переходит в смесь.

«... в подобном опыте вместо электронов можно использовать свет; это ничего бы не изменило», — утверждает Фейнман [2]. Далее мы покажем, что это не совсем так. Оказывается, поведение фотонов в таких опытах существенно отличается от поведения электронов, атомов и молекул.

Впервые двухщелевой опыт, но не с электронами, а со светом, осуществил английский физик Томас Юнг (1803). Опыт Юнга описан в любом курсе оптики. К. Д. Дэвиссон и Л. Х. Джермер наблюдали дифракцию и интерференцию при отражении электронов от монокристалла никеля (1927). Кристаллическая решётка в этих опытах играла роль дифракционной решётки. Д. П. Томсон (Англия) и П. С. Тартаковский (СССР) наблюдали дифракционную картину при прохождении электронов сквозь металлическую фольгу (1927). Л. М. Биберман, Н. Г. Сушкин и В. А. Фабрикант получили интерференционную картину, используя очень слабый пучок электронов, когда электроны проходили через прибор по одному (СССР, 1949). О. Штерн и И. Эстерман показали, что дифракция свойственна и атомным пучкам (Германия, 1929).

И, наконец, несколько лет тому назад в Венском университете исследовательской группой Антона Цайлингера были обнаружены волновые свойства огромных молекул фуллерена C_{60} (1999), фторфуллерена $C_{60}F_{48}$ и биологических молекул тетрафенилпорфирина $C_{44}H_{30}N_4$, входящих в состав гемоглобина и хлорофилла (2003). Наблюдение волновых свойств макромолекул представляет большой интерес, поскольку оно даёт возможность изучать влияние сложной внутренней структуры молекул на их поведение в пограничной области между квантовым и классическим миром.

Отметим, что в отличие от атомарных газов, макромолекулы состоят из многих десятков атомов, имеют огромную массу и движутся со скоростью несколько сотен метров в секунду. Длина волны де Бройля оказывается при этом очень малой (порядка $1 \text{ пм} = 10^{-12} \text{ м}$), поэтому осуществить такой опыт с помощью двух щелей (рис. 1) оказывается невозможно.

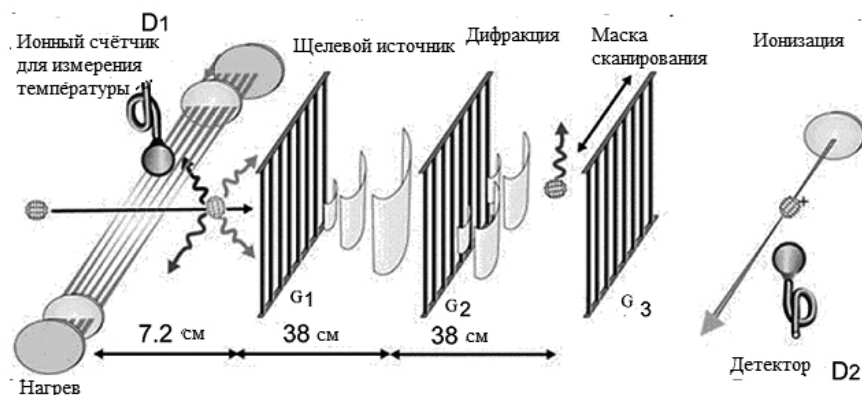


Рис. 2. Установка Цайлингера для наблюдения волновых свойств макромолекул и тепловой декогеренции.

Для наблюдения волновых свойств макромолекул в экспериментах австрийских ученых использовался интерферометр Тэлбота-Лоу, принцип действия которого подробно описан в [3]. Схема эксперимента показана на рис. 2. Установка состоит из трех идентичных автономных золотых решеток G_1 , G_2 и G_3 с периодом $D = 991 \text{ нм}$ (в

классическом интерферометре Тэлбота-Лоу в качестве второй решётки используется стоячая световая волна). Интерферометр и регистрирующее устройство помещаются в вакуумную камеру. Молекулы поступают туда из обычного термического источника за счет сублимации вещества при температурах 600–700 К.

В экспериментах наблюдалась интерференционная картина, предсказываемая квантовой механикой. Эта картина не совпадала с тем, что можно было бы ожидать в рамках классической физики, рассматривающей молекулы как движущиеся по траекториям точечные объекты. Кроме того, с классических позиций невозможно объяснить зависимость интерференционной картины от скорости молекул, наблюдающуюся в эксперименте, которая естественным образом объясняется при квантово-механическом подходе (дебройлевская длина волны обратно пропорциональна импульсу, а значит и скорости частицы).

В 2004 году группой Антона Цайлингера осуществлена *регулируемая тепловая декогеренция* [4]. Схема установки та же (рис. 2). В опыте использовался фуллерен C_{70} — одна из аллотропных форм углерода (другие формы — алмаз, графит и карбин). Фуллерен представляет собой выпуклый замкнутый многогранник, составленный из чётного числа 3-координированных атомов углерода. Пучок таких наночастиц (молекул) падал на первую дифракционную решётку. Исходная температура молекул 900 К. С помощью аргонового лазера (длина волны 488 нм, мощность до 15 Вт) производился нагрев летящих молекул. Молекула взаимодействует с лазерным излучением каждые 0,3 миллисекунды. По расчётам авторов молекулярная температура увеличивается на 140 К при поглощении каждого фотона. Это позволяет менять энергию колебаний атомов углерода, т. е. «*внутреннюю температуру*» молекул. Стадии нагрева контролировались электронным умножителем D_1 . Температура может быть оценена путем анализа зависимости доли ионов фуллерена от степени нагрева. Ионизация молекул производилась с помощью бомбардировки их электронами. Пучок молекул, прошедший три решётки, попадал на ионизационный детектор D_2 .

Молекула испускает *тепловые фотоны*, энергия которых зависит от интенсивности лазерного нагрева. С увеличением мощности нагрева и температуры возрастает частота и энергия кванта излучения. Соответственно уменьшается длина волны. При некоторой температуре длина волны оказывается настолько короткой, что позволяет отследить траекторию молекулы и определить, через какую именно щель решётки она прошла.

До включения лазера на экране получается контрастная интерференционная картина, т. е. молекулы ведут себя как квантовые частицы (обнаруживают волновые свойства). Лазерный нагрев приводит сначала к уменьшению контраста, а при $T > 3000$ К интерференция совершенно исчезает.

Отметим, что по закону смещения Вина при $T = 3000$ К максимум спектральной плотности излучательности приходится на длину волны $\lambda_m \approx 1$ мкм, примерно равную периоду дифракционной решётки. При более высоких температурах $\lambda < \lambda_m$, и разрешающая способность позволяет определить щель, через которую прошла молекула. Таким образом, при $T < 1000$ К молекулы ведут себя как квантовые частицы, а при $T > 3000$ К — как классические тела. Суперпозиция переходит в смесь. Механизм этого перехода — испускание тепловых фотонов.

Опыт свидетельствует о том, что **когерентная квантовая суперпозиция разрушается не из-за неконтролируемого возмущающего воздействия макро-**

ческого прибора на микрообъект, как утверждает многими авторами, а благодаря информационному обмену между подсистемами — в опыте Цайлингера между молекулой фуллерена и окружающей средой. При этом совершенно не важно, как идет обмен информацией, — через специально поставленный детектор, окружающую среду или человека [5]. Имеет значение только принципиальное наличие необходимой информации о частице, а кто её получит и как обработает — не имеет значения. Роль наблюдателя сводится к осознанию результатов опыта. Наблюдатель выступает как свидетель информационного обмена.

Здесь нужно отметить, что в классической и квантовой физике в понятие «*информация*» вкладывается разный смысл. В классической физике разделяется сама информация и её материальный носитель. Считается, что без материального носителя информация существовать не может. В квантовой физике информация — это физическая величина, характеризующая систему, подобно таким величинам, как объём, масса, энтропия и т. д. Можно сказать, что сама система является носителем информации, и вопрос о её материальном носителе отпадает.

В течение времени нагрева Δt от температуры 1000 К до 3000 К волновая функция фуллерена является лишь *частично декогерированной*. В этом временном интервале («*времени декогеренции*») миры Эверетта, соответствующие компонентам квантовой суперпозиции, могут взаимодействовать друг с другом, обмениваясь энергией и информацией. Возникает принципиальная возможность экспериментальной проверки *многомировой интерпретации* квантовой механики [6]. На такую возможность, но несколько в другом контексте, указывает автор [7]. До последнего времени считалось, что многомировая интерпретация квантовой механики принципиально не поддаётся проверке, а стало быть, не является строго научной.

В течение времени декогеренции энергия сохраняется не в каждой из ветвей многомирия, а в многомирии в целом. В каждой же ветви в принципе может быть зафиксировано кажущееся нарушение закона сохранения энергии — «исчезновение» или «возникновение» энергии. Так ли это, — покажут дальнейшие исследования.

На рис. 3 приведена своего рода «фазовая диаграмма» состояний. В зависимости от внутренней температуры T и массы m материальный объект может находиться в квантовом или классическом состоянии. Заштрихованная область соответствует частично декогерированным состояниям.

Диаграмма построена с учётом того, что масса фуллерена $m = 1,39 \cdot 10^{-24}$ кг, а температура начала перехода в классическое состояние $T = 1000$ К (нижняя кривая). При $T = 3000$ К процесс декогеренции завершён (верхняя кривая). Чем больше масса, тем при более низкой температуре происходит декогеренция. График позволяет оценить температуру, ниже которой будут наблюдаться квантовые свойства более крупных молекул, чем фуллерен, например, белков. Для макроскопических тел, масса которых на несколько порядков больше массы молекул, эта температура $T \rightarrow 0$, и волновые свойства наблюдать невозможно. Другой предельный случай — фотон, для которого $m = 0$ и $T \rightarrow \infty$. Это значит, что фотон не может ни при какой температуре рассматриваться как классическая частица.

Для фотонов опыт, аналогичный опыту Цайлингера, можно провести с помощью самого простого и дешёвого оборудования, без золотых решёток и лазерного нагрева. В отличие от фуллерена, фотон не надо «подсвечивать». Надо лишь пропустить луч лазера через дифракционную решётку. Далее, регулируя ширину щели и

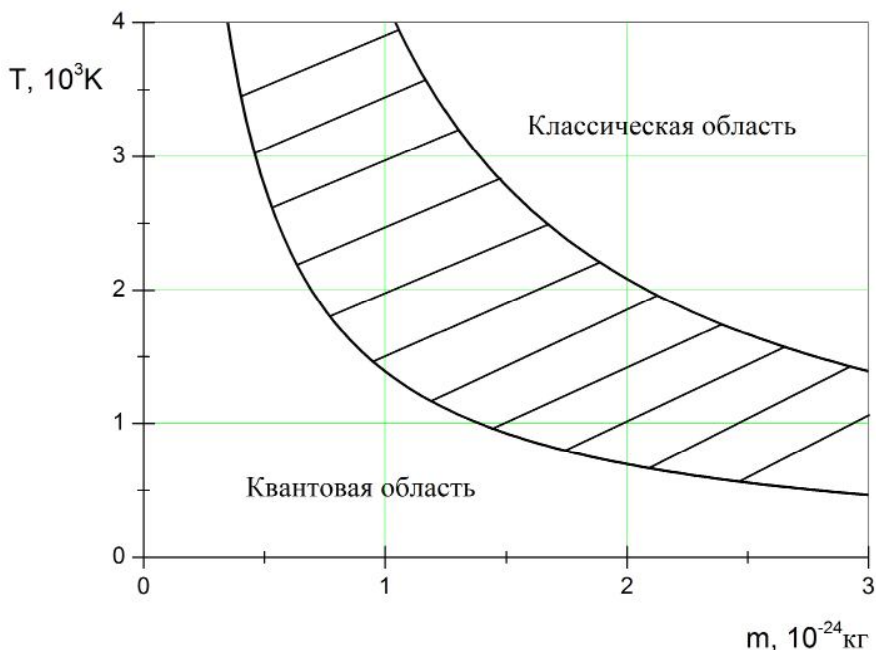


Рис. 3. «Фазовая диаграмма» квантовых и классических состояний в координатах (T, m)

(или) частоту лазера, казалось бы, можно ожидать, как в опыте Цайлингера, исчезновения или появления дифракционной картины. Пусть, например, луч гелий-неонового лазера с длиной волны $\lambda=0,63$ мкм пропускается сквозь дифракционную решётку с периодом $d = 0,01$ мм. В этом случае $\lambda \ll d$, и разрешающая способность оказывается достаточной, чтобы *в принципе* определить, через какую щель проходит фотон, и дифракционная картина наблюдаться не должна.

Ничего подобного, однако, не наблюдается. При прохождении света сквозь решётку суперпозиция не переходит в смесь ни при каком соотношении λ и d . Это и понятно, ведь фотон — квантовая частица, и поток фотонов нельзя рассматривать как поток классических частиц. Забвение этого обстоятельства приводит к многочисленным парадоксам, к обсуждению которых мы напомним ещё вернуться.

Подведём итог.

1. Рассмотрен уникальный опыт Цайлингера, показывающий, что декогеренция происходит в результате обмена информацией между системой (молекулой фуллерена) и окружающей средой.
2. Уточнено понятие «информация» в квантовой физике.
3. Предполагается существование эффектов, позволяющих экспериментально подтвердить многомировую интерпретацию квантовой механики.
4. Отмечены особенности интерференции фотонов.
5. Построена «фазовая диаграмма», позволяющая проследить эволюцию квантовых свойств системы при повышении её внутренней температуры для систем, имеющих разную массу (от фотона с нулевой массой до макроскопических тел).

Литература

1. Зурек В. Декогеренция и переход от квантового мира к классическому (с добавлениями автора) // Los Alamos Science. – 2002. – № 27. Режим доступа (русский перевод): http://www.chronos.msu.ru/RREPORTS/zurek_dekogerencia.pdf
2. Фейнман Р., Хибс А. Квантовая механика и интегралы по траекториям. М. : Мир, 1968. С. 13–37.
3. Gerlich S., Hackermüller L. u. a. A Kapitza-Dirac-Talbot-Lau interferometer for highly polarizable molecules // Nature Physics 3. 2007. P. 711–715. Режим доступа: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0802/0802.3287.pdf>
4. Hackermüller L, Hornberger K., Brezger B., Zeilinger A., Arndt M. Decoherence of matter waves by thermal emission of radiation // Nature. 2004. V. 427. P. 711–714. Режим доступа: <http://arxiv.org/pdf/quant-ph/0402146.pdf>
5. Заречный М. Невидимая глубина Вселенной. М.: ИГ «Весь», 2009. 256 с.
6. Верхоzin А. Н. Интерпретация квантовой механики // Вестник ПсковГУ. Серия «Экономические и технические науки». 2012. № 2.
7. Plaga R. Proposal for an experimental test of the many-worlds interpretation of quantum mechanics // Foundations of Physics. 1997. V. 27. P. 559–577. Режим доступа: http://xxx.lanl.gov/PS_cache/quant-ph/pdf/9510/9510007v3.pdf

Verkhozin A.

THERMAL DECOHERENCE (ANALYSIS OF THE RESULTS OF THE ZEILINGER RESEARCH GROUP EXPERIMENT)

The article addresses the unique experiment carried out by Austrian physicists in 2004 — a regulated decoherence of macromolecules. The author presents the interpretation of the experiment according to which decoherence is caused by the information exchange between subsystems — a fullerene molecule and the environment.

Key words: quantum mechanics, *decoherence*, wave function, *non-locality*, *entangled states*.