

# ПРИРОДА

117049 Москва, Мароновский пер., д. 26  
тел. : [095] 238-24-56; e-mail: byalko@landau.ac.ru

**№ 5 - 1999 г.**

**Ю.М. Ципенюк**

## **Соотношение неопределенностей или принцип дополнителности**

© Природа

*Использование или распространение этого материала  
в коммерческих целях  
возможно лишь с разрешения редакции*



Образовательный сетевой выпуск  
**VIVOS VOCO! - ЗОВУ ЖИВЫХ!**  
<http://www.techno.ru/vivovoco>

# Соотношение неопределенностей или принцип дополнительности?

Ю. М. Ципенюк,

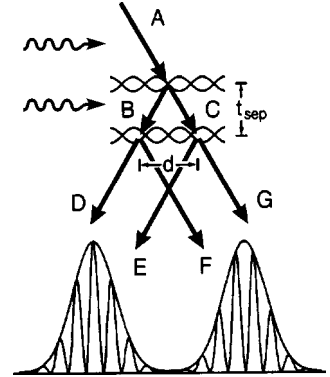
доктор физико-математических наук  
Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН  
Москва

**К**ВАНТОВАЯ механика предсказывает, что при определении траектории частицы, прошедшей через две щели, с помощью детектора любого типа интерференционная картина разрушается. Это утверждение — следствие принципа дополнительности, сформулированного Н. Бором. Он гласит: одновременное наблюдение волновых и корпускулярных свойств невозможно. Однако это утверждение ничего не говорит о том, каков физический механизм потери когерентности. В большинстве мысленных экспериментов интерференция нарушается чисто механическим путем — за счет передачи импульса частице, чья траектория определяется. Величина передаваемого случайным образом импульса при этом ограничена соотношением неопределенностей для координаты и импульса  $\Delta x \Delta p_x \geq \hbar/2$ . Физики уже давно задавались вопросом, действительно ли процесс нарушения когерентности пучков всегда связан с передачей импульса частице и принцип дополнительности — лишь следствие соотношения неопределенностей Гейзенберга, или определяющим является именно принцип дополнительности.

Успехи техники лазерного охлаждения атомов и

достижения последних лет в квантовой оптике позволили впервые осуществить такого рода эксперименты. Так, с помощью монохроматического пучка атомов натрия экспериментально был реализован мысленный эксперимент Фейнмана, показавший, что попытка определить траекторию атома путем рассеяния фотонов приводит к исчезновению интерференционной картины<sup>1</sup>. Весьма впечатляющий эксперимент по проверке основ квантовой механики с помощью атомных пучков провели физики из университета г. Констанц (Германия)<sup>2</sup>. Основная идея состоит в том, что при использовании атомов появляется дополнительная возможность судить об их траектории по их внутреннему состоянию.

Принципиальная схема эксперимента показана на рис. 1. Пучок атомов рубидия захватывается в магнитооптическую ловушку, осуществляется его лазерное охлаждение, а затем атомное облако освобождается и падает под действием гравитационного поля. При своем падении атомы проходят последовательно через две стоячие световые

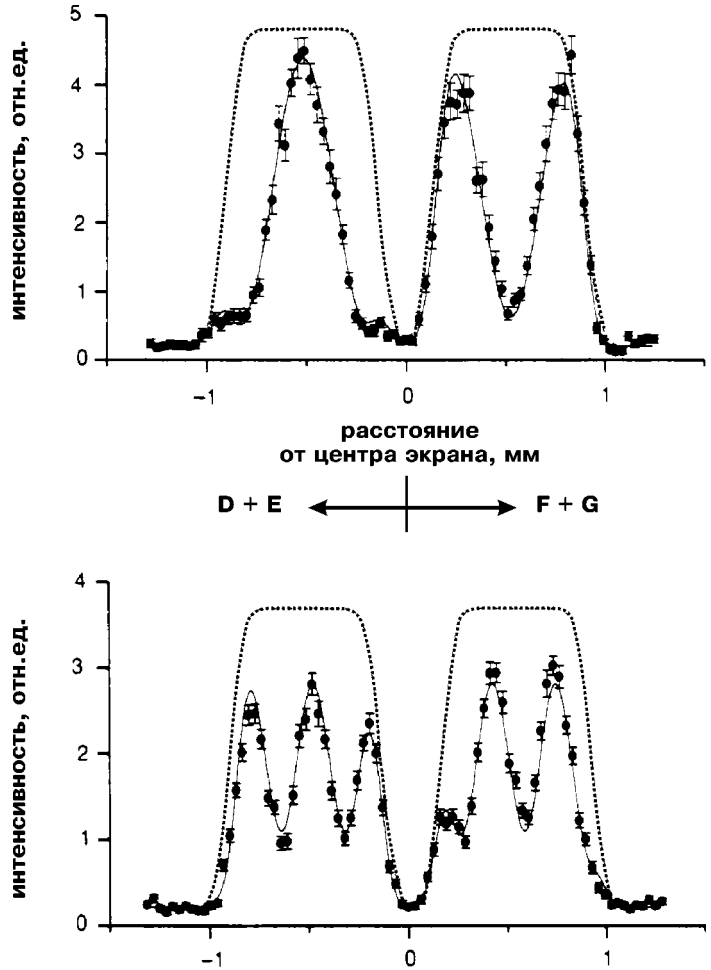


**Рис. 1.** Схема атомного интерферометра. Пучок холодных атомов рубидия *A*, подготовленный в магнитооптической ловушке, направляется на стоячую световую волну, где он разделяется на два пучка — прошедший без взаимодействия прямой пучок *C* и испытавший брэгговское отражение пучок *B*. Через время  $t_{sep}$  пучки расходятся по горизонтали на величину  $d$ . Затем пучки еще раз разделяются стоячей световой волной на две пары пучков (*F, G*) и (*D, E*), которые в дальней зоне образуют интерференционные полосы. Запись информации о траектории атома производится с помощью микроволнового излучения (частотой  $\sim 3$  ГГц), показанного волнистыми линиями со стрелками.

<sup>1</sup> Реализован мысленный эксперимент Фейнмана // Природа. 1996. № 12. С. 87–88.

<sup>2</sup> DuBois S., Nonn T., Rempe G. // Nature. 1998. V. 395. P. 33–37.

**Рис. 2. Интерференционные картины в дальней зоне, образованные парами пучков (D,E) и (F,G). Вверху — распределение интенсивности при расхождении пучков  $d=1.3$  мкм, внизу — при  $d=3.1$  мкм. Штриховыми линиями показаны профили пучков, измерения независимы. Заметим, что положения интерференционных максимумов в левой части соответствуют интерференционным минимумам в правой и наоборот.**



волны, образующие периодический потенциал, на котором рассеиваются частицы. Фактически происходит дифракция атомов на синусоидальной дифракционной решетке, аналогично тому, как происходит дифракция света на ультразвуковой волне в жидкости. Падающий пучок  $A$  (его скорость в области взаимодействия составляет всего 2 м/с) расщепляется вначале на два пучка  $B$  и  $C$ , затем попадает на вторую световую решетку, после которой образуются две пары параллельных пучков ( $D,E$ ) и ( $F,G$ ). Эти две пары перекрывающихся пучков в дальней зоне образуют стандартную интерференционную картину, соответствующую дифракции атомов на двух щелях, которые расположены на расстоянии  $d$ , равном поперечному расхождению пучков после первой решетки.

Практически эксперимент проводился иначе — двух отдельных световых решеток не было. Стоячая световая волна образовывалась в одном и том же резонаторе с помощью импульсного лазера. Протяженность светового поля в

вертикальном направлении (направлении движения частиц) была достаточно большой, а длительность импульса от лазера — намного меньше, чем время прохождения атомов через резонатор. Импульсный лазер включался дважды через заданный промежуток времени, и атомы на своем пути дважды встречались со световой решеткой. Поэтому фактическая схема эксперимента полностью соответствует рассмотренной выше принципиальной.

Пространственное распределение атомов рубидия

в выходящих пучках регистрировали в дальней зоне: атомы возбуждали резонансным образом с помощью лазера и затем детектировали фотоны флуоресценции. На рис. 2 показана картина, получающаяся при двух расстояниях между интерферирующими пучками  $d=1.3$  мкм и 3.1 мкм. Точно такая же интерференционная картина образуется в классических экспериментах по дифракции света на двух щелях, которые проводят студенты в физическом практикуме.

Информация о том, двигался атом по пути  $B$

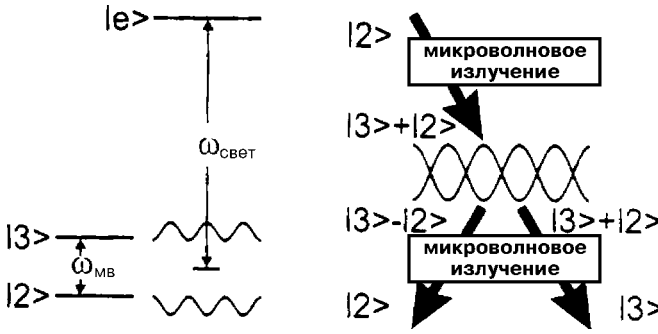


Рис. 3. Схематическое изображение принципа записи информации о траектории пучков.

Слева: упрощенная схема уровней  $^{85}\text{Rb}$ . Основное состояние расщеплено на два подуровня сверхтонкой структуры, соответствующих полному угловому моменту  $F=2$  и 3. Стоячая световая волна приводит к расщеплению исходного пучка на два; в них фазы волновых функций отличаются на  $\pi$ .  $\omega_{\text{свeт}}$  — частота стоячей световой волны;  $\omega_{\text{мв}}$  — частота микроволнового излучения.

Справа: расщепление пучков в поле стоячей световой волны сопровождается фазовым сдвигом, зависящим от внутреннего состояния атомов. Микроволновые импульсы преобразуют этот фазовый сдвиг в разную заселенность пучков атомами с разными внутренними состояниями.

или  $S$ , запоминалась по состоянию атомных электронов. Дело в том, что верхний электронный уровень рубидия  $5^2S_{1/2}$  за счет сверхтонкого взаимодействия расщеплен на два подуровня, соответствующих полному угловому моменту  $F=2$  или 3 (см. рис. 3, слева). Обозначим эти состояния как  $|2\rangle$  и  $|3\rangle$  соответственно. Хорошо известна тонкая структура в спектре излучения натрия (желтый дублет), связанная с небольшим расщеплением его верхнего уровня за счет спин-орбитального взаимодействия — взаимодействия электрона с орбитальным магнитным моментом. Сверхтонкое расщепление намного меньше и обусловлено взаимодей-

ствием электронов с магнитным моментом ядра, поэтому энергия, необходимая для возбуждения атома, очень мала, этот переход может быть инициирован микроволновым излучением частотой  $\sim 3$  ГГц.

Как показано на рис. 3, слева, частота  $\omega_{\text{свeт}}$  стоячей световой волны, на которой рассеиваются атомы рубидия, подбирается так, чтобы энергия фотонов  $\hbar\omega_{\text{свeт}}$  равнялась полусумме энергий, отвечающих переходам  $|2\rangle \rightarrow |e\rangle$  и  $|3\rangle \rightarrow |e\rangle$ . Символом  $|e\rangle$  обозначено возбужденное состояние рубидия  $5^2P_{3/2}$ . Частотная расстройка для этих переходов  $\Delta_{2e}$  и  $\Delta_{3e}$  одинакова по величине, но отличается знаком.

Атомы в состояниях  $|2\rangle$  и  $|3\rangle$  неодинаково взаимодействуют со световой решеткой; хотя амплитуды рассеяния равны, фазы волновых функций атома на выходе решетки различны: если атом находится в состоянии  $|2\rangle$ , то происходит сдвиг фазы на  $\pi$ . Это явление хорошо известно в оптике: при отражении от оптически более плотной среды фаза волны меняется на  $\pi$ , тогда как при отражении от границы с оптически менее плотной средой, как и у волны, проходящей в любую среду, фаза волны не изменяется. То же самое происходит и при прохождении атомов сквозь какую-либо среду. В нашем случае для атомов в состоянии  $|2\rangle$  световая волна представляет собой среду с отрицательным потенциалом (для них  $\Delta_{2e} < 0$ ), что эквивалентно оптически более плотной среде, поэтому фаза волновой функции этого состояния приобретает сдвиг  $\pi$ . Для атомов в состоянии  $|3\rangle$  световая волна — оптически менее плотная среда (для них  $\Delta_{3e} > 0$ ), поэтому фаза их волновых функций не меняется.

Далее, фазовый сдвиг на  $\pi$  у волновых функций в состояниях  $|2\rangle$  и  $|3\rangle$  используется для достижения разной заселенности уровней сверхтонкой структуры. Для этого атомные пучки, как схематически показано на рис. 3, справа, подвергаются воздействию двух так называемых  $\pi/2$ -импульсов с частотой, соответствующей энергии сверхтонкого расщепления (разнице энергий состояний  $|2\rangle$  и  $|3\rangle$ ).

Выходящие из магнитооптической ловушки ато-

мы находятся в нижайшем энергетическом состоянии, соответствующем полному моменту  $F=2$ . Действие микроволнового  $\pi/2$ -импульса смешивает отдельные состояния дублета ( $|3\rangle+|2\rangle$ ). После взаимодействия со световой решеткой атомы в состоянии  $|2\rangle$  в пучке  $B$  получают фазовый сдвиг  $\pi$ , а в пучке  $C$  — нет, так как в этом направлении прошли атомы, которые не взаимодействовали со светом. Таким образом, внутренние степени свободы атомов в пучке  $B$  характеризуются смешанным состоянием ( $|3\rangle-|2\rangle$ ), а в пучке  $C$  — ( $|3\rangle+|2\rangle$ ). Состояние уровней системы может быть записано в виде суперпозиции

$$|\Psi\rangle = |\Psi_B\rangle(|3\rangle-|2\rangle) + |\Psi_C\rangle(|3\rangle+|2\rangle),$$

в которой  $|\Psi_B\rangle$  и  $|\Psi_C\rangle$  описывают движение центра масс отраженного и прошедшего пучков.

Мы видим, что под действием микроволнового импульса произошло перепутывание внешних и внутренних степеней свободы атома, и это оказывается определяющим моментом в записи информации о направлении пучков.

Второй микроволновый импульс, воздействуя на оба пучка, преобразует внутреннее состояние прошедшего пучка в состояние  $|3\rangle$ , а испытавшего брегговское отражение — в  $|2\rangle$ . В результате последовательного воздействия двух микроволновых импульсов и двух взаимодействий со стоячей световой волной мы имеем на выходе волновую функцию атомного пучка в виде

$$|\Psi\rangle = |\Psi_B\rangle|2\rangle + |\Psi_C\rangle|3\rangle.$$



Рис.4. Исчезновение интерференции при включении микроволнового поля, записывающего информацию о траектории атома в его электронной структуре.

Итак, в результате вторичного взаимодействия с микроволновым полем после световой решетки этот фазовый сдвиг преобразуется в разную заселенность в пучках  $B$  и  $C$  атомов с электронным состоянием  $|2\rangle$  и  $|3\rangle$ : в пучке  $B$  преимущественно находятся атомы в состоянии  $|2\rangle$ , в пучке  $C$  — атомы в состоянии  $|3\rangle$ . Таким довольно изощренным способом, оказались помечены атомные пучки, претерпевающие затем интерференцию. Узнать о том, по какой траектории двигался атом, можно потом, определив его электронное состояние. Следует еще раз подчеркнуть, что практически никакого изменения импульса атома при такой процедуре мечения не происходит.

Результат эксперимента показан на рис.4. При включении микроволнового излучения, которое метит атомы в интерферирующих пучках, интерференционная картина полностью исчезает. Следует

подчеркнуть, что информация не считывалась, не определялось внутреннее электронное состояние. Информация о траектории атомов лишь записывалась, атомы запоминали, каким путем они двигались. Считывание информации, которое также проводилось авторами в одном из вариантов эксперимента, ничего не изменяло.

В чем же кроется причина нарушения когерентности пучков? Сейчас физики все более склоняются к тому, что ответственно за эту загадку микромира свойство "запутывания" состояний частиц, введенное в квантовую механику Э.Шредингером еще в 1935 г. Квантово-механические объекты не находятся в четко определенных состояниях, а всегда вовлечены в коллективные, коррелированные (запутанные) с другими объектами состояния, и только во всей совокупности этих состояний заложена информация об объекте. Но-

сителями информации могут быть коллективы частиц либо два и более свойств одной частицы.

В обсуждаемом эксперименте информация о траектории частицы кодируется за счет взаимодействия внешнего электромагнитного поля с атомом, которое, как уже говорилось, и перепутывает импульс атома с внутренним электронным состоянием. Иными словами, пространственная часть волновой функции практически не меняется, не происходит неконтролируемого изменения импульса частиц. "Приклеивание" этой внутренней электронной метки к конкретной траектории атома означает, что полная волновая функция атома вдоль одного пути (волновая функция, описывающая как электронное состояние

системы, так и движение) становится ортогональной полной волновой функции вдоль другого пути (другими словами, фазы волновых функций отличаются на  $\pi/2$ ), и пучки перестают интерферировать.

Нарушение интерференционной картины обусловлено корреляциями между детектором положения и атомными пучками. Следует отметить, что эти корреляции проявлялись и раньше, в частности, в нейтронных интерферометрах, в которых информация о траектории может запоминаться за счет селективного переворота спина в одном из плеч интерферометра.

У читателя не должно складываться впечатление, что вот, наконец, все стало понятным и прозрачным. Да, этот эксперимент пока-

зал, что механическое вмешательство в движение частицы, которое прекрасно описывается соотношением неопределенностей, на самом деле "замазывает" истинную причину потери когерентности частицей, это более грубый эффект, шум, в котором тонут более принципиальные квантовомеханические законы. Но рассмотренный эксперимент на самом деле поставил и целый ряд вопросов перед учеными, и прежде всего теперь надо ответить, какая конкретно информация о движении частицы уничтожает когерентность пучков, происходит ли всегда фазовый сдвиг между интерферирующими волновыми функциями на  $\pi/2$ , или это есть результат случайных фазовых сдвигов между двумя интерферирующими лучами.