

ФИЗИКА

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1983/4

Л.А.Шелепин

КОГЕРЕНТНОСТЬ



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

ФИЗИКА

4/1983

Издается ежемесячно с 1967 г.

Л. А. Шелепин

КОГЕРЕНТНОСТЬ

Издательство «Знание» Москва 1983

Леонид Александрович ШЕЛЕПИН, доктор физико-математических наук, заведующий сектором кинетики релаксационных и когерентных процессов ФИАН им. П. Н. Лебедева, специалист в области теоретической физики (физическая кинетика, физика лазеров, физика атмосферы, молекулярная спектроскопия), автор более 200 научных статей, 9 изобретений и 2 монографий (по кинетике процессов в газах и плазме).

Рецензент: **Борис Михайлович Болотовский**, доктор физико-математических наук, председатель редакционной комиссии НМС отделения по пропаганде физико-математических знаний Всесоюзного общества «Знание».

Шелепин Л. А.

Ш 42 Когерентность. — М.: Знание, 1983. — 64 с.
(Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Физика»; № 4).

11 к.

Понятие когерентности возникло еще в классической оптике. Сейчас оно не только стало общезначимым, но и применяется за рамками физики. В брошюре проблема когерентности рассмотрена с разных сторон. Обсуждаются когерентные свойства излучения и вещества, рассмотрены прикладные возможности, ведущие к коренным преобразованиям в технике.

Брошюра рассчитана на читателей, интересующихся проблемами и достижениями современной физики.

1704020000

ББК 22.31
530.1

1. ВВЕДЕНИЕ

Понятие когерентности, определяющее согласованность протекания во времени нескольких колебательных или волновых процессов, возникло в классической теории колебаний. Это понятие проделало удивительный путь, сложившись за последние десятилетия в общезначимое и даже, в определенном смысле слова, в общенаучное.

Начало нашего века ознаменовалось созданием теории относительности и квантовой механики — двумя открытиями громадного значения, в корне изменившими наши физические представления о внешнем мире. Как синтез этих двух теорий возникла релятивистская квантовая механика. На ее основе радикально изменились фундаментальные представления атомной физики, были открыты антивещество и несохранение четности, приобрели новое содержание понятия частицы и поля, заложены основы теории элементарных частиц.

Столь же принципиальным шагом в развитии физики явилось создание теории тяготения (общей теории относительности), приведшее к пересмотру наших пространственно-временных представлений, к отказу от отождествления реальной геометрии с евклидовой, к установлению взаимосвязи геометрических свойств пространства-времени с физическими явлениями. Тем самым был заложен теоретический фундамент для бурного развития астрофизики. Все эти крупные вехи на пути нашего познания хорошо известны.

Вместе с тем на основе квантовой механики, объединившей в единое целое корпускулярные и волновые свойства вещества, за последние 30 лет сформировалось новое фундаментальное направление, носящее общезначимый характер, — теория когерентных коопе-

ративных явлений. Хотя развитие ее имело эволюционный характер, в настоящее время уже можно говорить о новом качественном этапе нашего познания. Классическая когерентность, генерация излучения в лазерах, когерентное состояние вещества, сверхпроводимость, сверхтекучесть, сверхизлучение, сверхрассеяние— все это может быть объединено понятием когерентных явлений. Приставка «сверх» здесь не случайна, она показывает, что соответствующий круг явлений воспринимался как неожиданный, нестандартный в свете принятых в свое время представлений.

Для всех этих внешне разнородных явлений существует общая черта, которую можно назвать когерентностью (кооперативностью, фазировкой, корреляцией) излучения или вещества. Она свойственна многочастичным объектам, в которых частицы существуют не изолированно, сами по себе, а вследствие тех или иных причин действуют совместно, обнаруживая свойства, не присущие отдельной частице.

Важный вклад в развитие новых представлений о когерентности в теории излучения внесла и вносит лазерная физика. И хотя формирование общей теории когерентных явлений далеко от завершения, уже сейчас ясно, что эта новая ступень физического знания открывает широчайшие прикладные возможности. Более того, речь идет не о решении отдельных, может быть очень важных и крупных, проблем, но о том, что когерентная физика ведет к преобразованию техники и экономики. Речь идет также о коренных изменениях в вопросах записи, хранения, переработки информации, управления физическими процессами.

Понятие когерентности сейчас уже не только общезначимое. Оно выходит за пределы физики и представляется весьма плодотворным и для других конкретных наук, в частности биологии.

Данная брошюра посвящена рассказу о возникшем в последние десятилетия новом содержании теории когерентности, попытке рассмотреть когерентные явления как целое с разных сторон: естественнонаучной, прикладной, методологической, а также изложению некоторых нерешенных проблем, с тем чтобы представить возникающие здесь интересные перспективные возможности.

2. КЛАССИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ КОГЕРЕНТНОСТИ

Нас окружает многообразный мир колебаний и волн: колебания маятника и струны, сердечной мышцы и силы тока в электрической цепи, молекул вещества и активности Солнца, биотоков мозга и численности популяции животных, уровня воды на берегу моря и веток деревьев под действием ветра; волны электромагнитные и акустические, морские и атмосферные, плазменные и гравитационные, ударные и химические.

Общий признак колебательных явлений — их многократная повторяемость через определенные промежутки времени, называемые периодом колебаний T . В основе описания колебательного движения лежит простой предельный случай, при котором изменение со временем t некоторой величины E происходит по закону

$$E = A \cos(\omega t + \varphi). \quad (1)$$

Это так называемые гармонические монохроматические колебания. Здесь $\omega = 2\pi/T$ — частота, A — амплитуда, φ — фаза колебаний. Не зависящие от времени величины ω , A , φ являются основными характеристиками колебательного процесса.

Волновое движение — это распространение колебаний в пространстве с конечной скоростью. Конкретные механизмы распространения сильно различаются друг от друга. В среде все новые ее части вовлекаются в колебательное движение благодаря силам взаимодействия между молекулами среды. Распространение электромагнитных волн происходит за счет того, что появляющееся в каком-либо месте пространства переменное электрическое поле возбуждает в соседних точках переменное магнитное поле, и наоборот. Так же как и в теории колебаний, анализ волновых процессов связан с понятием гармонической монохроматической волны, для которой величина E зависит уже не только от времени, но и от пространственных переменных. Волновое движение характеризуется, помимо величин ω , A и φ , длиной волны λ , равной пути, который проходит волна за период колебаний, и направлением распространения.

При определенных условиях может происходить сложение двух или нескольких колебаний (волн), оно имеет свои особенности, связанные с фазовыми соотношениями. Рассмотрим сложение двух гармонических монохроматических колебаний с одинаковой частотой, но

разными A и φ : $A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$. С помощью обычных тригонометрических формул нетрудно убедиться, что и результирующее колебание является гармоническим монохроматическим колебанием той же частоты ω , а амплитуда результирующего колебания A_p определяется амплитудами A_1 и A_2 и разностью фаз складываемых колебаний:

$$A_p^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (2)$$

В зависимости от разности фаз A_p может меняться от $A_1 - A_2$ до $A_1 + A_2$. При $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$ происходит сложение амплитуд, при $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi$ — их вычитание. В последнем случае, если $A_1 = A_2$, колебания полностью гасят друг друга; образно говоря, свет плюс свет дает темноту.

Сложение колебаний, при котором A_p зависит от разности фаз, называют интерференцией. Очевидно, два монохроматических колебания одной частоты всегда интерferируют. Характер интерференции полностью определяется важной физической величиной — интерференционным членом, зависящим от разности фаз (в (2) — это член, содержащий $\cos(\varphi_1 - \varphi_2)$).

В реальных условиях, однако, монохроматических гармонических колебаний и волн не существует. Можно говорить лишь о той или иной степени близости к ним. Любые волны имеют конечный спектральный интервал, ограничены во времени и пространстве. Но, что очень важно, такие характеристики, как частота, амплитуда, фаза, могут быть сохранены и в общем случае негармонических и не монохроматических колебаний и волн. Однако в отличие от случая монохроматических колебаний они изменяются с течением времени.

Результат сложения двух колебаний зависит от быстроты изменения разности их фаз. Если эти изменения настолько быстры, что не могут быть зарегистрированы инерционным прибором, то можно измерить только среднюю амплитуду. Для случайных фаз среднее значение интерференционного члена равно нулю. Поэтому согласно (2) средняя интенсивность I_p результирующего колебания (пропорциональная среднему квадрату амплитуды A_p^2) равна сумме интенсивностей слагаемых колебаний: $I_p = I_1 + I_2$. Если же при быстрых изменениях φ_1 и φ_2 разность фаз $\varphi_1 - \varphi_2$ останется постоянной, то среднее значение интерференционного члена уже не равно нулю и имеет место интерференция.

Когерентность в теории колебаний и волн опреде-

ляется как необходимое условие существования эффектов интерференции. Если разность фаз играет для реальных немонахроматических колебаний существенную роль и происходит интерференция, то такие колебания являются когерентными. Если же разность фаз меняется беспорядочно и достаточно быстро, то такие колебания являются некогерентными. Интенсивность суммы таких колебаний всегда равна сумме их интенсивностей.

Понятие когерентности получило особое развитие в классической оптике. Средний период колебаний электромагнитного поля в оптической области спектра составляет 10^{-15} с. Из-за очень больших оптических частот и быстроты изменения амплитуд и фаз колебаний ни один приемник света не может измерить мгновенное значение физических величин. Удастся измерять только квадраты напряженностей световых полей, усредненные по временам, существенно превышающим времена этих изменений. Поэтому для обычных независимых источников света корреляция не наблюдается, они не когерентны; так, интенсивность света от двух электрических лампочек равна сумме интенсивностей каждой из них.

Однако если пучки света не являются независимыми, например, один получается из другого отражением от зеркала, то интерференционный член не обращается в нуль и $I \neq I_1 + I_2$. Для таких коррелированных (когерентных) источников света и соответствующих им световых пучков, дающих интерференцию, колебательные и волновые процессы протекают во времени согласованно. В любом случае, однако, для когерентности существуют свои временные и пространственные границы, обусловленные немонахроматичностью и неточечностью источника. Последний всегда имеет некоторую спектральную ширину $\Delta\omega$ и конечные геометрические размеры, определяющие соответственно временную и пространственную когерентности.

Интерференционная картина, возникающая вследствие временной когерентности двух пучков, наблюдается в интерферометре Майкельсона (рис. 1). Луч света от точечного источника делится полупрозрачным зеркалом на два пучка. Затем эти два пучка соединяются, имея уже разность хода $c\Delta t$ (c — скорость света). С увеличением разности Δt времен расхождения расстояний для

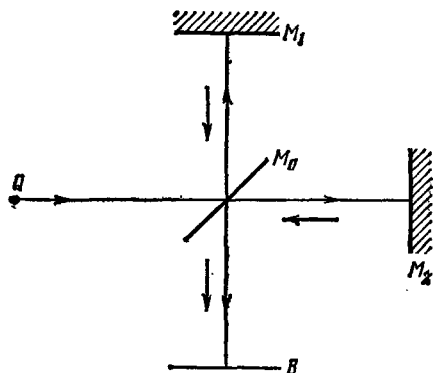


Рис. 1. Схема интерферометра Майкельсона: Q — точечный источник света; M_0 — полупрозрачное зеркало; M_1 и M_2 — зеркала; B — экран

каждого из пучков степень когерентности убывает. Полосы интерференции наблюдаются при условии $\Delta t \cdot \Delta \omega \lesssim 2\pi$, поскольку при больших временах Δt монохроматические волны от разных концов спектрального интервала $\Delta \omega$ приходят в противофазе и когерентность теряется. Максимальное значение $\Delta t \sim 2\pi/\Delta \omega$, при котором когерентность еще сохраняется, называется временем когерентности света, а соответствующая оптическая длина пути — длиной когерентности.

В реальных волнах амплитуда и фаза меняются не только в направлении распространения, но и в перпендикулярной плоскости. Случайные изменения разности фаз для двух различных точек этой плоскости увеличиваются с ростом расстояния между ними, и постепенно когерентность исчезает. Интерференционная картина, обусловленная пространственной когерентностью, наблюдается в интерферометре Юнга (рис. 2). Протяженный квазимонохроматический источник Q создает интерференционную картину вблизи точки P на экране после прохождения через два точечных отверстия P_1 и P_2 , достаточно близких друг к другу. Контрастность интерференционных полос зависит от расстояния между отверстиями. Увеличение размеров источника приводит к ухудшению контрастности интерференционных полос и затем к их полному исчезновению. Для наблюдения интерференционной картины от фиксированного источника в определенной точке P оба отверстия в плоскости A должны быть расположены внутри некоторой об-

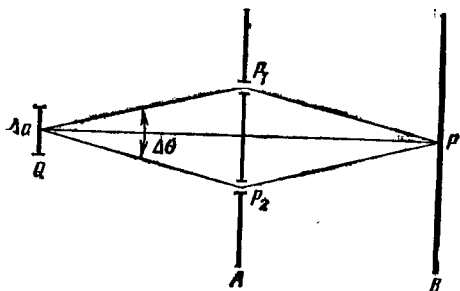


Рис. 2. Схема интерферометра Юнга: Q — протяженный источник света; A — экран с двумя отверстиями P_1 и P_2 ; B — экран

ласти, площадь которой определяется выражением $S = \frac{\pi}{4} (\lambda/\chi)^2$, где χ — относительный угловой размер источника (отношение геометрического размера к расстоянию до него). Величину S называют площадью когерентности света в плоскости A. Она определяется непосредственным подсчетом разности хода лучей между крайними точками источника при условии, что интерференционные максимумы от лучей одного края источника не налагаются на минимумы от лучей другого края.

Поскольку пространственная когерентность определяется не абсолютным, а относительным угловым размером источника, то оказывается возможной когерентность света, который приходит на Землю от звезды. Свет самой звезды является пространственно некогерентным, но при наблюдении звезды в телескоп можно наблюдать резкие кольца, обусловленные интерференционными явлениями. Была получена интерференционная картина и от такого источника, как Солнце. При этом в интерферометре Юнга расстояние между отверстиями составляло менее 0,05 мм. Таким образом, от некогерентного источника можно получить на больших расстояниях почти когерентный пучок конечного сечения, но при этом будет использована очень малая часть энергии источника (для звезды в почти когерентной части пучка плотность излучения составляет 10^{-13} от плотности излучения вблизи источника).

Все пространство, занимаемое волной, можно разбить на части, в каждой из которых волна сохраняет свою когерентность. Объем такой части пространства называют объемом когерентности. Он приблизительно равен объему цилиндра, высота которого равна длине когерентности, а площадь основания — площади когерентности.

Для реальных условий представления о световых пучках идеально когерентных (когда суммируются амплитуды оптических полей) и идеально некогерентных (когда суммируются интенсивности) не являются вполне адекватными. Ситуация обычно носит промежуточный характер и соответствует случаю частично когерентных световых пучков. Поэтому возникла необходимость введения количественной меры степени когерентности. Экспериментально степень когерентности в классической оптике оценивается контрастностью интерференционных полос, т. е. величиной $(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$. В теории естественной мерой степени когерентности двух колебаний (волн) является величина интерференционного члена, усредненного по времени наблюдения. Интерференционный член равен нулю, если амплитуды, являющиеся функциями времени, независимы, и отличен от нуля, если эти величины коррелируют друг с другом. Такого рода средние величины относятся к классу корреляционных функций, широко применяемых в теории случайных процессов. Интерференционный член соответствует корреляционной функции $\Gamma(x_1, x_2, \tau)$, построенной при определении усреднении по времени t произведения двух волновых полей

$$\Gamma(x_1, x_2, \tau) = \overline{E(x_1, t)E(x_2, t + \tau)}. \quad (3)$$

Обычно в оптике в качестве меры степени когерентности $g(x_1, x_2, \tau)$ используется нормированная корреляционная функция

$g(x_1, x_2, \tau) = \Gamma(x_1, x_2, \tau) / \Gamma(x_1, x_1, 0) \Gamma(x_2, x_2, 0)$, (4) принимающая значения от нуля, соответствующего отсутствию когерентности, до единицы, соответствующей полной когерентности. Отметим, что при полной когерентности, когда $g(x_1, x_2, \tau) = 1$, корреляционная функция $\Gamma(x_1, x_2, \tau)$ разбивается на два сомножителя, или, как говорят, факторизуется.

Теория когерентности в первой половине нашего века приобрела определенную завершенность и хорошо

описывала известные факты, относящиеся к хаотическим (тепловым) источникам света с некоррелированно излучающими атомами и молекулами. Человек имел дело именно с такими источниками (раскаленное тело и электрическая лампа, светящаяся плазма и горящая спичка). Для них корреляционная функция второго порядка (4) является исчерпывающей характеристикой степени когерентности излучения. Широкое применение нашли интерференционные спектральные приборы, имеющие очень высокую разрешающую способность (определяемую величиной $\lambda/\Delta\lambda$). С их помощью оказалось возможным измерение длин волн с очень большой точностью ($\lambda/\Delta\lambda \sim 10^6$).

В 50-е годы возникает необходимость существенно обобщения понятия когерентности, первоначально введенного для описания явлений интерференции и дифракции. Это было связано с появлением новых более совершенных оптических детекторов, а также новых источников — лазеров. Новый способ детектирования слабых оптических сигналов был основан на технике фотоотсчетов, обязательным элементом которой является наличие фотодетектора, с помощью которого можно регистрировать импульс от отдельных фотонов. В качестве такого фотодетектора использовались фотоэлектронные умножители, имеющие достаточно высокий коэффициент усиления ($\sim 10^6$). В результате оптические характеристики были переведены на язык последовательностей электрических импульсов. Была развита соответствующая импульсная техника, позволяющая измерять распределения фотоотсчетов, флуктуации интенсивности светового потока, корреляционные функции интенсивности.

При исследовании оптических явлений нужно учитывать, что любое оптическое поле создается множеством элементарных источников (молекул) и обладает определенными статистическими свойствами, учитывающими взаимосвязи излучателей. В таких источниках света, как лазеры, в отличие от обычных тепловых элементарных излучателей существенно связаны друг с другом, коррелированы. Для анализа статистических свойств их излучения оказалось уже недостаточно корреляционных функций второго порядка, полностью описывающих хаотические элементарные источники. Необходимо было использовать корреляционные функции

высших порядков. Корреляционная функция порядка $2n$ определяется как среднее от произведения $2n$ величин $E(x, t)$, взятых в различных пространственно-временных точках. Такие функции отображают сложные взаимосвязи, возникающие для полей с высокой степенью корреляции. В этом случае мы говорим о когерентности высших порядков.

Началом нового этапа в развитии оптических исследований в теории когерентности следует считать эксперименты Р. Хэнбери Брауна и Р. Твисса, исследовавших корреляцию фотоэлектронов на выходе двух фотодетекторов. Они впервые измерили корреляционную функцию четвертого порядка. Впоследствии удалось измерить корреляционную функцию шестого порядка.

Корреляционная техника нашла также применение для измерений угловых диаметров звезд, ширин спектральных линий, анализа спектров. Ее преимуществом при измерении угловых диаметров звезд (по сравнению с интерферометром Майкельсона) является отсутствие влияния на результаты измерений фазовых искажений за счет турбулентности атмосферы и изменения ее показателей преломления, а также возможность использования больших базовых расстояний, что позволяет измерять звезды очень малых угловых размеров.

За последнюю четверть века параллельно с развитием теории когерентности высших порядков был предложен и выполнен целый ряд необычных экспериментов, в частности, наблюдались биения, возникающие при суперпозиции световых пучков от независимых источников света, проводились эксперименты по интерференции отдельных фотонов. Нужно подчеркнуть, что, хотя сама теория когерентности высших порядков и является классической, в этих экспериментальных исследованиях уже самым непосредственным образом используется квантовый характер светового излучения. Это относится и к квантовым генераторам — лазерам, и к фотодетекторам, регистрирующим отдельные кванты света. Таким образом, в общей теории когерентности возникает задача конкретного учета квантовых закономерностей,

3. О КОГЕРЕНТНЫХ СВОЙСТВАХ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Большую и многогранную роль в развитии теории когерентности сыграли лазеры. В 1954 г. были разработаны первые квантовые генераторы когерентного электромагнитного излучения. Их создание связано с именами Н. Г. Басова, А. М. Прохорова и Ч. Таунса. С 1960 г., когда была получена генерация на рубине в видимой области спектра, начинается стремительное развитие лазеров и их внедрение во многие сферы нашей жизни.

В основе действия лазеров лежит корреляция элементарных излучателей среды: атомов и молекул. Эта корреляция возникает за счет предсказанного А. Эйнштейном явления индуцированного (или вынужденного) электромагнитного излучения. Индуцированное излучение когерентно (находится в фазе) с падающим излучением, что и обуславливает возможность синхронизации элементарных излучателей. Существуют три основных процесса резонансного взаимодействия излучения с веществом, когда энергия кванта совпадает с энергией перехода: поглощение, спонтанное излучение, индуцированное излучение.

В результате первого из них молекула переходит с нижнего энергетического уровня m на верхний уровень n , в результате второго и третьего процессов — с верхнего на нижний. Вероятности поглощения и индуцированного излучения задаются соответственно величинами $BN_m U_\omega$ и $BN_n U_\omega$, где B — коэффициент, U_ω — плотность энергии на частоте ω перехода $m \rightarrow n$, N_m и N_n — число молекул в единице объема, находящихся соответственно на уровнях m и n . Величины N_m и N_n называют также заселенностями уровней m и n . Чтобы процесс индуцированного излучения был преобладающим, необходимо превышение заселенности верхнего состояния над заселенностью нижнего. В этом случае говорят об инверсной заселенности, поскольку в термодинамически равновесных условиях заселенность нижнего уровня всегда больше, чем верхнего.

Если индуцированный процесс преобладает над процессом поглощения, плотность энергии излучения в среде будет непрерывно возрастать, т. е. излучение будет усиливаться. Очевидно, усиливающая (или, как ее еще

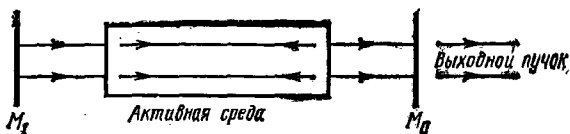


Рис. 3. Схема устройства лазера: M_1 — зеркало;
 M_0 — полупрозрачное зеркало

называют, активная) среда должна быть неравновесной. Чтобы усилитель превратить в генератор, необходимо ввести положительную обратную связь. В лазере обратную связь обычно получают, помещая активную среду между двумя зеркалами, имеющими высокий коэффициент отражения (рис. 3). Электромагнитная волна, попеременно отражаясь от зеркал, усиливается при прохождении активной среды. Такая система зеркал называется резонатором. Излучение из резонатора может быть выведено различными способами. Например, в лазерах сравнительно небольшой мощности одно из зеркал делается частично прозрачным.

Отметим, что генерация может осуществляться лишь для некоторых заданных типов собственных колебаний (мод) резонатора, соответствующих определенным конфигурациям стоячих волн электромагнитного поля. Моды несколько различаются по частоте. В контур полосы усиления может попадать большое число мод, хотя обычно лазеры генерируют на одной или нескольких модах резонатора, для которых усиление максимально.

Генерация является пороговым эффектом. Она возникает, если усиление превышает потери энергии. Чаще всего основные потери в резонаторах — это потери на зеркалах. Развитие генерации происходит от уровня спонтанного излучения, причем результат оказывается малочувствительным к этому уровню.

Лазерное излучение обладает очень высокой степенью когерентности, обусловленной согласованным вынужденным излучением света во всем объеме активного вещества. Объем когерентности, полученный с помощью лазера, в 10^{17} раз превышает объем когерентности от лучшего нелазерного источника той же интенсивности. С когерентностью связаны и другие замечательные свойства лазерного излучения: направленность, обусловленная поддержанием только электромагнит-

ных волн, распространяющихся вдоль оси резонатора или очень близкой к ней; высокая монохроматичность, определяемая усилением волн определенной частоты, соответствующей собственному колебанию электромагнитной волны (моды) резонатора; яркость (мощность излучения, испускаемая с поверхности источника в единичный телесный угол), на несколько порядков превосходящая яркость обычных источников.

В настоящее время имеется большой объем литературы о лазерах и свойствах лазерного излучения. Поэтому мы остановимся ниже лишь на важном обобщении теории когерентности. Оно связано с интерференцией волн с различными частотами, возникающей при генерации лазерами ультракоротких импульсов. Этим способом получены самые высокие мощности $\sim 10^9$ кВт при длительности импульса $\tau = 10^{-10} - 10^{-12}$ с (выходная мощность генерации обратно пропорциональна длительности импульса). Получение ультракоротких импульсов достигается тем, что для многомодового излучения лазера при наличии нелинейного элемента внутри резонатора возникает связь между модами. Такой процесс связывания мод определенными фазовыми соотношениями носит название синхронизации мод.

Применяются два вида синхронизации мод: активная и пассивная. В первом случае внутри резонатора помещается управляемый внешним сигналом модулятор, создающий синусоидальные потери на частоте $\Delta\omega$, равной расстоянию между модами. В результате возникает обмен энергией данной моды с двумя соседними, что и приводит к синхронизации фаз всех мод.

В случае пассивной синхронизации внутри резонатора помещается насыщающийся поглотитель, пропускание которого растет с увеличением интенсивности излучения. За счет нелинейности взаимодействия излучения с веществом поглотителя возникает разностная частота, обеспечивающая связь соседних мод. Здесь существенными являются требования к скорости релаксации в поглотителе. На практике пассивная синхронизация мод достигается с помощью определенных красителей, быстро изменяющих свою прозрачность под действием лазерного импульса.

Чтобы получить очень короткие импульсы, необходима в соответствии с соотношением $\Delta\omega \cdot \Delta\tau > 2\pi$ большая ширина спектральной линии люминесценции, т. е.

большое число N_m синхронизируемых мод. Пиковая мощность генерации для синхронизированных мод пропорциональна $N_m^2 A^2$ (A — амплитуда волны). Если же фазы случайны, мощность равна сумме мощностей отдельных мод (пропорциональна $N_m A^2$). Таким образом, пиковая мощность увеличивается пропорционально N_m (которое для твердотельных лазеров может составлять величину порядка 10^3 — 10^4), а средняя мощность от синхронизации мод, по существу, не зависит. Именно с этим и связано получение самых высоких лазерных мощностей.

Самосинхронизация мод, по существу, является интерференцией волн с различными частотами. Такая интерференция приводит к их гашению в одни моменты времени и резкому усилению в другие. В результате вместо сравнительно длительных импульсов генерируется серия очень коротких. Эти импульсы тем короче, чем большее число волн с различными частотами будут интерферировать. Подчеркнем, что получение интерференции волн с различными частотами означало новый принципиальный шаг в развитии теории когерентности. Вместе с тем мы вступили, по существу, в новый мир — мир ультракоротких импульсов, обладающий удивительными, подчас парадоксальными свойствами, некоторые из которых будут рассмотрены ниже. Уже с момента получения ультракоротких импульсов отмечались самые разнообразные возможности их использования (нагрев плазмы, высокоскоростная фотография, измерение времени жизни короткоживущих возбужденных состояний). Как ни замечательны были обобщения понятия когерентности в теории излучения и их практические следствия, но это оказалось только началом.

4. КОГЕРЕНТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА

С созданием квантовой механики стало ясно, что волновые свойства присущи не только излучению, но и веществу. В 20-е годы Э. Шредингером и В. Гейзенбергом были независимо разработаны волновая и матричная механики. Тогда же было показано, что они являются разными представлениями единой квантовой механики и описывают один и тот же квантовый объект и как волну и как частицу. Любой частице вещества ставится в соответствие волна де Бройля, длина кото-

рой выражается через массу m и скорость v частицы и через постоянную Планка h

$$\lambda = h/mv.$$

Экспериментально волновые свойства потока электронов были обнаружены в 1927 г. в опытах К. Дэвиссона и Л. Джермера, открывших дифракцию электронов в кристаллах. Двадцать лет спустя В. А. Фабрикант с группой сотрудников наблюдал волновую картину, пуская электроны не потоком, а поочередно. И снова, как в опытах К. Дэвиссона и Л. Джермера, на регистрирующей пластинке возникла чередя темных и светлых колец.

В основе квантовой механики лежит понятие волновой функции (или ψ -функции). Волновая функция подчиняется уравнению Шредингера

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H}\psi. \quad (5)$$

Вид оператора Гамильтона \hat{H} определяется конкретной задачей. С помощью ψ -функции могут быть вычислены средние значения для любых физических величин. Собственные значения E стационарного уравнения Шредингера $\hat{H}\psi = E\psi$ задают энергетический спектр. Допустимыми являются только некоторые определенные значения энергии, образующие, например, системы энергетических уровней атомов, колебательных и вращательных уровней молекул. Электронные термы молекул носят более сложный характер. Для двухатомных молекул это — кривая, зависящая от расстояния между ядрами, для многоатомных — сложная многомерная гиперповерхность. Макроскопические свойства вещества во многом определяются функцией распределения заселенностей соответствующих энергетических термов. ψ -функция является комплексной величиной. Квадрат ее модуля, т. е. величина $\psi^*(x)\psi(x)$, задает вероятность нахождения частицы в определенной точке пространства (или в определенном энергетическом состоянии).

Наличие волновых свойств у вещества позволяет поставить вопрос о его когерентности, т. е. о возможностях для системы «не взаимодействующих» между собой частиц обнаруживать свойства, связанные, грубо говоря, с синхронизацией фаз ψ -функций отдельных частиц, атомов или молекул. Когерентные свойства вещества имеют, таким образом, принципиально квантовый

характер. Излучение в общем случае также подчиняется квантовым законам.

В этом смысле классическая трактовка когерентности, основанная на корреляционных функциях, оказывается уже недостаточной. Возникает необходимость общей квантовой концепции когерентности, включающей в себя когерентные свойства как вещества, так и излучения.

Эта концепция основана на формализме матрицы плотности. Матрица плотности (или статистический оператор) ρ задает наиболее общее описание квантовомеханической системы. Она включает в себя как статистику квантовых состояний, задаваемых волновой функцией ψ , так и статистику, связанную с нашим незнанием некоторых свойств объекта, как это имеет место в классической статистике. Диагональные элементы матрицы плотности ρ_{nn} задают заселенности, а недиагональные $\rho_{mn} (m \neq n)$ — корреляцию между состояниями. Величину

$$g_{mn} = \rho_{mn} / (\rho_{mm} \rho_{nn})^{1/2} \quad (6)$$

можно определить как меру степени когерентности. Именно в рамках этого общего определения и рассматривается ниже понятие когерентности (при сравнении с (4) видна глубокая аналогия квантовой и классической формул).

Матрица плотности, задающая наиболее полное описание физической системы, служит исходным пунктом для анализа когерентных эффектов. Это относится к матрице как плотности вещества, так и поля. Эволюция матрицы плотности определяется гамильтонианом \hat{H} физической системы.

Состояния, задаваемые волновой функцией ψ — частный случай матрицы плотности. Матрица плотности при этом имеет вид $\psi(x)\psi^*(x')$. Общая же матрица плотности может быть разложена по данным состояниям

$$\rho(x, x') = \sum_n \omega_n \psi_n(x) \psi_n^*(x'),$$

где ω_n — коэффициенты разложения. Как видно из этого соотношения, в общем случае состояния, описываемые матрицей плотности, охватывают сразу все состояния ψ с тем или иным весом.

Квантовая статистика (или формализм матрицы плотности) является в настоящее время наиболее об-

щей теорией в физике. Определение когерентности, данное на ее основе, также носит общий характер. Оно относится и к излучению, и к веществу (и то, и другое полностью описывается формализмом матрицы плотности). Однако реальное нахождение матрицы плотности для многих практически интересных случаев оказывается весьма сложной задачей.

Конкретное изучение когерентных свойств вещества началось с явлений сверхпроводимости и сверхтекучести. Было показано (хотя и далеко не сразу), что эти фундаментальные явления носят коллективный, кооперативный характер. Явление сверхпроводимости было открыто в 1911 г., когда голландский физик Х. Каммерлинг-Оннес обнаружил, что при температуре, близкой к 4 К, электрическое сопротивление ртути скачком обращается в нуль. Тогда если в кольце из металла, находящегося в сверхпроводящем состоянии, индуцировать электрический ток, то он не будет затухать. В проведенных экспериментальных наблюдениях даже через три года не было отмечено никакого уменьшения тока.

Явление сверхпроводимости обусловлено взаимодействием электронов с кристаллической решеткой. Свободные электроны отталкиваются друг от друга. Но в решетке электрон стремится притянуть положительные ионы, решетка деформируется. Электрон оказывается окруженным своего рода «облаком» положительного заряда, которое притягивает второй электрон. Это притяжение у сверхпроводника преобладает над кулоновским отталкиванием. Образуется слабо связанная пара электронов. Размер такой электронной пары составляет 10^{-4} см, что намного превосходит период кристаллической решетки (10^{-8} см) и соответственно среднее расстояние между электронами. В результате для всей совокупности электронов образуется единое состояние, характеризующееся электронной упорядоченностью, фазовой когерентностью. Все электронные пары в данном сверхпроводнике имеют одинаковую фазу.

В 1962 г. английский физик Б. Д. Джозефсон предсказал два новых интересных эффекта, связанных с фазовыми соотношениями. Он рассмотрел два сверхпроводника со своими фазами φ_1 и φ_2 , разделенных тонким (~ 1 нм) слоем диэлектрика (рис. 4). Согласно законам квантовой механики через тонкий слой изолятора может туннелировать ток. Этот ток выражается опре-

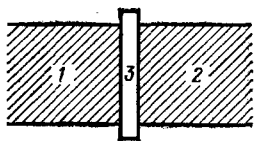


Рис. 4. Переход Джозефсона: 1, 2 — сверхпроводник; 3 — изолятор

деленным образом через волновую функцию ψ . При наличии разности фаз через контакт, представленный на рис. 4, потечет сверхпроводящий ток без всякого приложенного извне напряжения. Плотность тока j описывается простым соотношением

$$j = j_0 \sin(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (7)$$

Это явление получило название стационарного эффекта Джозефсона. Следует особо подчеркнуть, что этот эффект обусловлен квантовой характеристикой — фазой волновой функции. Впервые в истории физики был осуществлен и эксперимент, в котором такое макроскопическое явление, как электрический ток, непосредственно определялся фазой волновой функции.

Если к описанному контакту приложить небольшое постоянное напряжение, то возникает нестационарный эффект Джозефсона. Через контакт при постоянном напряжении потечет переменный сверхпроводящий ток. Этот переменный ток будет генерировать электромагнитные волны, причем частота их линейно зависит от напряжения. Это джозефсоновское электромагнитное излучение также было обнаружено экспериментально.

Фазовые соотношения, когерентность играют принципиальную роль в эффектах Джозефсона. Так экспериментально наблюдалась интерференция токов, проходящих через два перехода. Это явление оказывается аналогом обычной интерференции оптических полей от двух щелей. Здесь интерференция обусловлена различием в фазах, с которыми сливаются сверхпроводящие токи, прошедшие по двум разным путям. Схема эксперимента представлена на рис. 5. Внешний ток $j_{\text{полн}}$ является суммой токов, идущих через каждый переход. Разность фаз волновых функций в точках P и Q должна быть одинаковой по какому бы пути — PBQ или PCQ — мы не пошли. В отличие от обычной интерференции световых волн, где приращение фазы определяется оптической длиной пути, здесь приращение фазы является функцией от векторного потенциала магнитно-

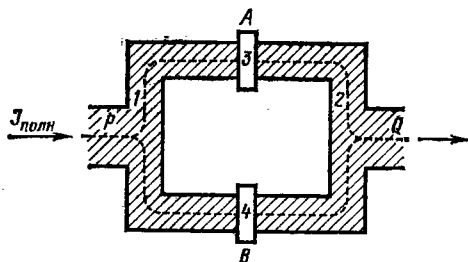


Рис. 5. Два параллельных перехода Джозефсона: 1, 2 — сверхпроводник; 3, 4 — изолятор

го поля. При этом разность фаз для токов, прошедших по обоим путям, оказывается равной величине $2e\Phi/\hbar$, где e — заряд электрона, Φ — магнитный поток через контур $PBQC$. В результате для величины внешнего тока $I_{\text{полн}}$ получается выражение

$$I_{\text{полн}} = 2j_0 \sin \delta_0 \cos \frac{e\Phi}{\hbar}. \quad (8)$$

Здесь δ_0 и j_0 — медленно меняющаяся фаза и ток, зависящие от конкретных условий эксперимента. Существенно, что ток как функция магнитного поля оказывается осциллирующим и достигает максимальных значений при $\Phi = \frac{n\pi\hbar}{e}$, где n — целое число. Если площадь

контура $PBQC$ составляет $\sim 1 \text{ мм}^2$, то максимумы (как функция магнитного поля) будут отстоять друг от друга на $2 \cdot 10^{-5}$ Гаусс. Это позволяет измерять магнитные поля с очень высокой точностью. Точность может быть значительно увеличена при использовании схем с многими переходами. Можно ожидать, что в дальнейшем измерения магнитных полей с помощью описанных квантовых интерферометров станут такими же точными, как в оптике измерения длин световых волн.

В настоящее время эффекты Джозефсона нашли многочисленные применения. Можно отметить разработку генераторов и приемников излучения в субмиллиметровом и инфракрасном диапазонах (10^{11} — 10^{14} Гц). Работающие в этих областях спектра лазеры работают на дискретных, далеко отстоящих друг от друга частотах, соответствующих конкретным молекулярным переходам. С другой стороны, в некоторых полупроводнико-

вых приборах генерация может непрерывно перестраиваться, однако верхний частотный предел не превышает 10^{10} Гц. В нашем случае перестройка излучения может производиться в диапазоне 10^{11} — 10^{14} Гц с помощью простого изменения разности потенциалов. Интересные перспективы открываются для создания ячеек памяти в сверхскоростных ЭВМ, стандартов частоты, сверхтонких измерений в физике, в медицине (например, для исследования сигналов от магнитного поля, возникающего при работе сердца) и т. д. И хотя практическое значение переходов в сверхпроводниках еще полностью не раскрыто, крупнейший американский физик Р. Фейнман поставил приборы на их основе в один ряд с созданием транзисторов и лазеров.

Когерентными свойствами вещества определяется и явление сверхтекучести, открытое в 1938 г. советским физиком П. Л. Капицей. Капица обнаружил удивительную способность жидкого гелия при температуре ниже 2,19 К протекать через узкие капилляры (диаметром 10^{-5} см). Движение сверхтекучего гелия по капилляру характеризуется полным отсутствием вязкости; силы трения оказываются равными нулю. Жидкий гелий при температуре, близкой к абсолютному нулю, находится в определенном упорядоченном состоянии. Движение такой жидкости представляет собой коллективный процесс, в котором участвуют все атомы гелия. При этом каждая частица полностью делокализована и «размазана» по всему объему жидкости. Гелий при атмосферном давлении остается жидким вплоть до абсолютного нуля. При давлениях выше 30 атм он может кристаллизоваться. Интересно отметить, что и при росте кристаллов гелия вблизи абсолютного нуля рассеяние энергии также полностью отсутствует. В этих условиях возникает когерентная кристаллизация, она происходит практически мгновенно. Такая когерентная сверхбыстрая кристаллизация наблюдалась экспериментально.

В 50-е годы осознаются возможности получения новых макроскопических квантовых эффектов, связанных с когерентными состояниями вещества. Начало здесь положила известная работа Р. Дике (1954 г.), где было предсказано явление сверхизлучения. В теории Дике, относящейся к сложной системе, состоящей из большого числа двухуровневых излучателей, исследовались коллективные состояния излучающих молекул. В 1963 г.

Р. Глаубер развил метод когерентных состояний, описывающий свойства гармонических осцилляторов и использовавшийся первоначально в теории излучения. Эти два частных подхода (Дике и Глаубера) сыграли очень большую роль в исследовании конкретных когерентных эффектов.

5. МЕТОД КОГЕРЕНТНЫХ СОСТОЯНИЙ

В квантовой механике любой атом, любая молекула характеризуется набором допустимых значений энергии (энергетических термов, уровней). Обычно рассматривались системы, находящиеся в состояниях, соответствующих определенным уровням энергии. Однако при некоторых условиях могут возникать коллективные состояния, в которых молекула находится не на одном каком-либо уровне, а на всех сразу (с определенными вероятностями для каждого), т. е. происходит делокализация, и уже нельзя говорить об отдельных уровнях. Существуют коллективные состояния и для многочастичных систем, когда частицы не только полностью теряют свою индивидуальность, но само понятие отдельной частицы теряет смысл. Типичным примером здесь служит явление сверхтекучести.

Таким образом, возникла задача разработки достаточно простого и физически ясного квантовомеханического метода анализа коллективных состояний многоуровневых и многочастичных систем. Она была решена Р. Глаубером на основе обобщения классического понятия полной когерентности на квантовый случай.

Что же сохраняется при переходе от классических формул к квантовым? Глаубер подметил одно интересное обстоятельство. В отличие от состояний частичной когерентности, характерных для реальных оптических полей, в предельном случае полной когерентности отсутствуют всякие шумы, контрастность интерференционных полос максимальна, степень когерентности $g(x_1, x_2, \tau) = 1$. При этом, как мы видели из формулы (4), корреляционная функция представляется в факторизованном виде, т. е. в виде сомножителей, каждый из которых относится к одной точке пространства. В классической теории волновых полей для состояний полной когерентности условие факторизации выполняется также для всех корреляционных функций высших порядков. Это оказывается справедливым и в квантовой

теории электромагнитного поля, последовательно и строго описывающей все явления, связанные с излучением. Квантовые состояния, соответствующие полной когерентности, были названы когерентными.

При построении когерентных состояний в оптике была использована исключительно плодотворная аналогия между амплитудами мод (собственных колебаний поля) и координатами совокупностей одномерных гармонических осцилляторов, т. е. систем, совершающих колебания по закону (1). При этом числа квантов в данной моде поля могут трактоваться как номера уровней соответствующего гармонического осциллятора. В отличие от привычных задач квантовой механики, где рассматривались состояния ψ_n , соответствующие определенной энергии (n — номер уровня осциллятора), когерентные состояния $f(z)$ соответствуют частице, одновременно находящейся на всех уровнях осциллятора. Они являются суперпозицией бесконечного числа волновых функций ψ_n , соответствующих состояниям системы с определенным номером уровня

$$f(z) = \exp\left(-\frac{1}{2} |z|^2\right) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{(n!)^{1/2}} \psi_n, \quad (9)$$

где z — произвольное комплексное число.

Система функций $f(z)$ в отличие от системы волновых функций ψ_n не является взаимноортогональной, но тем не менее обладает свойством полноты. По набору $f(z)$ может быть разложен любой квантовый оператор. Используя такое разложение, а также ряд замечательных математических свойств когерентных состояний, удалось резко упростить расчеты конкретных когерентных эффектов. Были заложены основы нового научного направления — квантовой оптики.

С физической точки зрения когерентные состояния квантовой системы представляются такими волновыми пакетами, которые максимально адекватны классической картине движения: в квантовом соотношении неопределенностей В. Гейзенберга произведение неопределенностей импульса и координаты достигает для когерентных состояний минимума; физические величины, входящие в уравнение движения, «почти точно определены»; эволюция описывается классическими уравнениями; волновые пакеты не расплываются со временем. Можно сказать, что когерентные состояния — это

квантовые состояния, максимально близкие к классическим. Включая в себя волновые функции всех уровней, они позволяют ввести фазу.

Указанные свойства когерентных состояний осциллятора обусловили их широкий круг применений. Методы теории когерентных состояний, разработанные вначале для нужд квантовой оптики, были с успехом перенесены на другие разделы физики, в частности на теорию сверхпроводимости и сверхтекучести. Эти методы применялись для анализа бозе-эйнштейновской конденсации экситонов, для описания движения частицы в магнитном поле, для вычисления вероятности перехода между уровнями Ландау, в гейзенберговской модели ферромагнетизма, для спиновых волн, в квантовой электродинамике для устранения инфракрасной расходимости, в физике элементарных частиц в связи с дуальными моделями и спонтанным нарушением симметрии вакуума.

Если когерентные состояния осцилляторов нашли широкий круг применений, то их обобщение на произвольные, неэквидистантные (т. е. имеющие в отличие от гармонического осциллятора неравные расстояния между уровнями) системы столкнулось с определенными трудностями.

Понятие когерентных состояний для неэквидистантных систем трансформируется: соответствие классике становится неполным, сохраняются не все свойства классического движения. Так, когерентные состояния ротатора, моделирующего вращение системы из двух атомов, находящихся на определенном расстоянии, расплываются.

Был предложен целый ряд способов (на основе того или иного свойства глауберовских состояний) построения обобщенных когерентных состояний для произвольных квантовых систем. В общем случае вопрос такого построения решается неоднозначно, и эта неоднозначность является принципиальной. Все эти обобщенные когерентные состояния можно представить в виде рядов типа (9), но с различной системой коэффициентов. С физической точки зрения за основу обобщения когерентных состояний следует брать максимальную близость к классическому поведению. В общем случае для таких систем можно ожидать выполнения следующих свойств: эволюция их описывается классическими уравнениями движения; физические величины, входящие в

уравнения движения, имеют малые дисперсии («почти точно определены»); соотношения неопределенностей минимизируются.

К настоящему времени построены обобщенные когерентные состояния углового момента, ротатора, шарового волчка, атома водорода.

Когерентные состояния как квантовые состояния, максимально близкие к классическим, определяют переход между классической и квантовой механикой. С этой точки зрения классическое состояние наиболее близко не к одному фиксированному состоянию, а к бесконечной взвешенной сумме квантовых состояний.

Итак, вопросы записи в квантовой оптике состояний полной когерентности повернулись совершенно неожиданной стороной, став частью проблемы взаимосвязи классической и квантовой теории, точнее — построения квантовой теории, максимально близкой к классической (своего рода классического представления квантовой механики).

6. ДВУХУРОВНЕВОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ. МОДЕЛЬ ДИКЕ

До сих пор мы описывали когерентные явления на основе понятия фазы. Но при попытке анализа этих явлений в системах с фиксированным числом уровней (частиц) возникают серьезные трудности. Они связаны с существованием соотношений неопределенности в квантовой механике. Согласно соотношению неопределенности Гейзенберга $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$ точность измерения координаты не может превышать значения $\hbar/\Delta p$, определяемого разбросом импульса. При точно заданном импульсе координата является неопределенной. Аналогичное соотношение существует между фазой и числом частиц $\Delta \varphi \cdot \Delta N \geq 1$. При фиксированном числе частиц фаза полностью не определена. Справедливо и обратное.

Для получения когерентных характеристик в случае, когда фаза не определена, первоначально использовалось двухуровневое приближение. Это диктовалось двумя обстоятельствами.

Во-первых, ввиду неизученности вопроса необходимо было проводить предельно возможные упрощения, анализировать простейшие схемы, еще сохраняющие

особенности квантового подхода. Во-вторых, хотя двухуровневых молекул (или атомов) в природе не существует, имеется возможность настройки (или подбора) частоты воздействующего на молекулу внешнего электромагнитного излучения в резонанс с частотой перехода между двумя уровнями. При этом влиянием остальных уровней в очень многих случаях можно пренебречь.

В 1954 г. Р. Дике рассмотрел далеко идущую аналогию двухуровневой системы и частицы со спином $1/2$. Проекция спина на ось может принимать два значения: $+1/2$ и $-1/2$; энергия частиц со спином $1/2$ в магнитном поле также принимает два значения. Для каждой i -й частицы имеются две собственные функции ψ_i^+ и ψ_i^- , описывающие состояния с проекциями спина $1/2$ и $-1/2$. По аналогии с обычным спином для двухуровневых молекул вводится понятие энергетического спина $R^{(i)}$ и его проекций $R_x^{(i)}$, $R_y^{(i)}$, $R_z^{(i)}$, а для системы N двухуровневых молекул — суммарного энергетического спина

$$R = \sum_{i=1}^N R^{(i)}.$$

В математическом плане описание наборов двухуровневых молекул и частиц со спином $1/2$ совпадает. Оно основано на применении аппарата теории групп (непосредственно используется унитарная группа SU_2). В системе N двухуровневых молекул полному спину соответствует величина, названная кооперативным числом r , проекции спина — разность заселенностей m . Совокупность допустимых значений r и m определяется неравенствами $|m| \leq r \leq \frac{N}{2}$. Волновая функция ψ_{rm}

описывает коллективные состояния системы N двухуровневых частиц. Величина r характеризует когерентные свойства системы с фиксированным числом частиц. Для фиксированного числа частиц, когда понятие фазы смысла не имеет, когерентность находит свое выражение в определенной коррелятивной связи между частицами. Причем именно эти корреляции в случае неопределенного числа частиц приводят к обычному понятию фазы (т. е. к когерентным состояниям Глаубера). Роль кооперативного числа весьма наглядно отображается формулой для спонтанного излучения системы N молекул

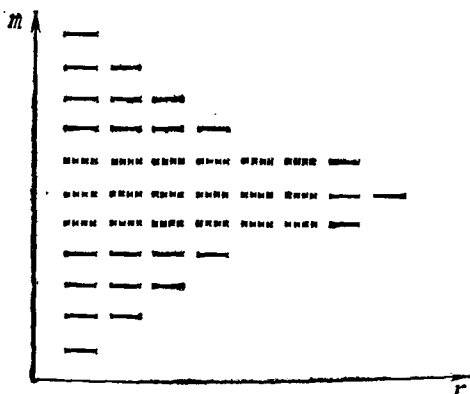


Рис. 6. Схема коллективных уровней в модели Дике

$$I = I_0 \sum_{rm} P_{rm} (r+m)(r-m+1), \quad (10)$$

где I_0 — интенсивность излучения одной молекулы, P_{rm} — вероятность нахождения системы в состоянии ψ_{rm} . Как видно из формулы, при $r = \frac{N}{2}$, $m=0$ система излучает пропорционально N^2 (такое состояние называется сверхизлучательным), при $m = -r$ система не излучает вовсе, т. е. излучение вещества существенно зависит от его когерентных свойств.

При радиационных процессах (излучении и поглощении квантов) кооперативное число r сохраняется. Столкновительные процессы приводят к переходам между состояниями с различными r , причем это движение по r носит диффузионный характер. На рис. 6 представлена условная схема коллективных уровней системы двухуровневых молекул, характеризующихся индексами m и r . При радиационных переходах движение происходит только в вертикальном направлении (при постоянном r) при столкновительных диффузионное движение вдоль оси r .

Для описания динамики когерентных процессов в системе двухуровневых молекул, взаимодействующих с излучением, необходимо решить соответствующие уравнения для матрицы плотности. Эти уравнения, часто называемые уравнениями Блоха, можно записать в форме

$$\frac{\partial R}{\partial t} = [\Omega, R], \quad (11)$$

где Ω — некоторый фиксированный вектор, характеризующий свойства излучения; R — энергетический спин, скобки означают векторное произведение. Продольная компонента вектора R — величина R_z соответствует разности заселенностей и описывает их релаксацию, поперечные компоненты R_x и R_y соответствуют поляризации среды и описывают фазовую релаксацию. Для R выполняется соотношение $R^2=1$. Поэтому любые взаимодействия на систему двухуровневых молекул сводятся к поворотам вектора R .

В общем случае необходимо учитывать процессы затухания. Это проводится добавлением в правую часть (11) дополнительных членов, выражаемых через константы затухания, соответствующие продольному и поперечному времени релаксации (т. е. временам установления для компонент R_z и R_x, R_y соответственно).

Уравнение (11) по форме совпадает с уравнением движения для гироскопа в механизме. Эта аналогия дала возможность перенесения ряда понятий теории гироскопов на описание взаимодействия резонансного излучения с двухуровневой системой. Здесь многое заимствовано даже из терминологии.

При определенных упрощающих предположениях (включая равенство частот перехода и внешнего импульса, а также отсутствие фазовой модуляции), решение уравнения (11) имеет вид

$$R_x = 0, \quad R_y = \mu \sin \Theta, \quad R_z = \cos \Theta. \quad (12)$$

Здесь μ — дипольный момент. Величина Θ — это нормированная на множитель μ/\hbar площадь под огибающей медленно меняющейся амплитуды для импульса электромагнитного поля. Она является безразмерной величиной и, как мы увидим ниже, играет исключительно важную роль в анализе целого ряда когерентных явлений. В литературе обычно ее называют просто площадью импульса. В общем же случае теоретический анализ любых взаимодействий системы двухуровневых атомов с излучением описывается совместным решением уравнений Блоха и Максвелла.

7. КОГЕРЕНТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ДВУХУРОВНЕВЫХ СИСТЕМАХ

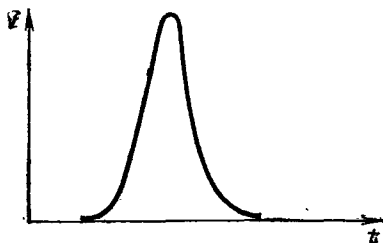
С когерентностью вещества, возникающей в результате резонансного взаимодействия с излучением, связан целый ряд эффектов. Это — самоиндуцированная прозрачность, фотонная индукция и фотонное эхо, оптическая нутация, сверхизлучение и сверхрассеяние, сверхизлучательный фазовый переход, оптическая бистабильность. Основные особенности этих эффектов можно рассматривать в рамках двухуровневого подхода.

Самоиндуцированная прозрачность. Это явление было предсказано С. Л. Мак-Колом и Е. Л. Ханом и экспериментально осуществлялось с помощью мощных коротких световых импульсов. При определенных условиях, когда площадь импульса $\Theta = 2\pi n$, поглощение короткого импульса резонансным переходом падает, и вещество становится практически прозрачным. При этом компоненты вектора R , т. е. заселенности уровней и поляризация среды, согласно (12) не меняются. После возбуждения резонансные молекулы возвращаются снова в нижнее состояние, так что энергия опять переходит в поле излучения, т. е. импульс при временах, меньших времени релаксации, движется через резонансно поглощающую среду без потерь энергии, но со скоростью существенно меньшей по сравнению с фазовой скоростью в среде.

Динамику движения импульса можно описать следующим образом. Под действием переднего фронта импульса молекулы переходят из нижнего состояния в суперпозицию верхнего и нижнего состояний и запасают тем самым энергию в среде. Если площадь импульса достаточно велика, то молекулы переходят в верхнее состояние. Под действием оставшейся части импульса молекулы индуцированно излучают, отдавая энергию в поле и восстанавливая прежнюю форму импульса. Среда возвращается в исходное состояние. Коэффициент поглощения κ определяет скорость импульса, причем большим значениям κ соответствуют медленно движущиеся импульсы.

Истинно стационарным решением является 2π -импульс. Он имеет строго определенную форму (рис. 7). В отличие от 2π -импульса, $2\pi n$ -импульсы (при $n \geq 1$),

Рис. 7. Форма 2π -импульса



разбиваются на отдельные солитоны (уединенные волны), соответственно 4π -импульс — на два солитона (2π -импульса), 6π -импульса — на три и т. д. Общее решение уравнений (11), учитывающее фазовую модуляцию, показывает наличие еще одного стационарного решения: 0π -импульсов. Площадь этих импульсов равна нулю, значение фазы при нулевой амплитуде претерпевает скачок на π , и в этом смысле поле внутри импульса меняет знак (рис. 8). Для коротких 0π -импульсов, в случае когда ширина спектра намного превосходит ширину линии, существует аномально слабое их поглощение.

В настоящее время эффект самоиндуцированной прозрачности наблюдался на целом ряде молекулярных газов (в частности, на SF_6 , BCl_3 , NH_3 с помощью коротких импульсов, полученных в лазере на CO_2). Эффекты самоиндуцированной прозрачности исследовались и для ультразвуковых волн.

Фотонное эхо. Эффект фотонного эха возникает при облучении среды двумя последовательными импульсами излучения на частоте поглощающего перехода. До прихода импульсов все частицы находятся на нижнем уровне, и поляризация среды отсутствует. В качестве первого возбуждающего импульса используется $\frac{\pi}{2}$ -им-

пульс (т. е. импульс с площадью, равной $\pi/2$), который создает максимальную поляризацию среды и выравнивает заселенность уровней (вектор R поворачивается на $\pi/2$). В результате согласно формуле (10) возникает сверхизлучательное состояние. За счет корреляции фаз отдельных излучателей радиационное время жизни системы становится существенно меньше радиационного времени жизни отдельной молекулы,

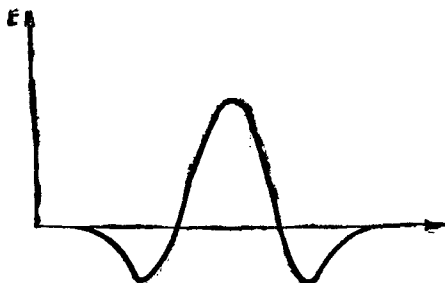


Рис. 8. Форма Оп-им-пульса

Излучение, возникающее в момент первого импульса благодаря такой корреляции, носит название световой индукции. Однако сразу же начинается расфазировка, приводящая к потере системой молекул состояния когерентности и, следовательно, к прекращению излучения почти сразу после прохождения возбуждающего импульса. Расфазировка обусловлена тем, что каждая молекула находится в своих конкретных условиях (неоднородность) и имеет собственную частоту перехода, несколько отличающуюся от других молекул. Поскольку каждый вектор R_i i -й молекулы вращается со своей скоростью, возникает и нарастает со временем разброс фазы. Этот разброс, очевидно, может быть компенсирован, если бы оказалось возможным обращение времени.

Эквивалентом такого обращения времени является π -импульс, изменяющий согласно (12) знак поляризации частиц, что соответствует обращению времени. Если промежутки времени между первым и вторым импульсом составят τ , то через время 2τ происходит восстановление когерентного состояния системы и она излучает сигнал фотонного эха. Временная последовательность импульсов и эха представлена на рис. 9.

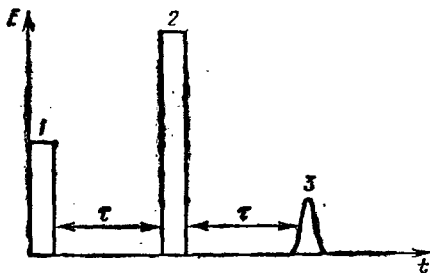
Отметим, что столкновения частиц между собой, сбивающие фазу излучателей, приводят к необратимой расфазировке системы, в результате чего амплитуда сигнала фотонного эха уменьшается.

Сигнал эха также может играть роль возбуждающего импульса. Его сочетание со вторым и первым импульсами может вызывать в моменты времени 3τ , 4τ ... сигналы многократного эха.

Фотонное эхо экспериментально наблюдалось и ис-

Рис. 9. Фотонное эхо

1 — $\frac{\pi}{2}$ -импульс; 2 — π -импульс; 3 — сигнал эха



следовалось в большом числе работ. Сейчас оно используется для измерения ширины перехода, для оценки радиационного времени жизни, позволяет проводить идентификацию перехода.

Нутационный эффект. Его название происходит из отмечавшейся выше аналогии динамики когерентных оптических эффектов с движением гироскопа. При коротком ударе об ось гироскопа возникают быстрые (нутационные) колебания его оси около некоторого положения динамического равновесия. В оптике нутационный эффект заключается в модуляции амплитуды светового поля, прошедшего через резонансную среду. Эксперименты проводились в усиливающей среде углекислого газа при распространении импульса излучения CO_2 -лазера. Импульс подавался в виде ступеньки E_0 электрического поля световой волны на резонансной частоте. В этом случае при условии точного резонанса вектор R медленно (по сравнению с частотой поля) вращается с частотой $\Omega = \frac{\mu E_0}{\hbar}$ вокруг оси x . Его попереч-

ная компонента изменяется по гармоническому закону. Созданная полем поляризация переизлучается, и результирующее поле, прошедшее через среду, оказывается промодулированным с частотой Ω .

В настоящее время нутационный эффект является фактически единственным способом измерения дипольных моментов μ колебательно-вращательных переходов в газах.

Во всех рассмотренных выше эффектах когерентизация вещества, образование коллективных состояний излучателей, происходило при нестационарных внешних воздействиях. Возможны, однако, и стационарные когерентные эффекты. К. Хепп и Е. Либ рассмотрели си-

стему двухуровневых молекул, взаимодействующих с одной модой излучения и помещенную в идеальный резонатор. Расчет показал, что при понижении температуры происходит фазовый переход второго рода от обычного состояния молекул к когерентному. Ниже некоторой критической температуры роль возникающих квантовых корреляций, обусловленных взаимодействием молекул через поле, становится определяющей, и система двухуровневых молекул ведет себя как одна макроскопическая молекула. При этом в резонаторе появляется макроскопическое среднее число фотонов, и мы должны уже говорить о едином когерентном состоянии вещества и излучения. Выше критической температуры квантовые корреляции разрушаются.

Другой пример стационарного эффекта — явление оптической бистабильности. Оно экспериментально наблюдалось при помещении в резонатор насыщающего поглотителя, имеющего существенно нелинейные характеристики (использовались, в частности, пары Na при малых давлениях 10^{-4} — 10^{-5} тор). Исследовалась зависимость интенсивности выходного поля $I_{\text{вых}}$ от интенсивности входного поля $I_{\text{вх}}$, задаваемого излучением лазера (использовались, в частности, лазеры на красителях). Выходное поле при определенных условиях оказывается двухзначной функцией от входного. При одних и тех же значениях $I_{\text{вх}}$ существуют два значения $I_{\text{вых}}$, т. е. возникает, как говорят, бистабильность. В настоящее время оказалось возможным и получение мультистабильности, когда $I_{\text{вых}}$ оказывается многозначной функцией от $I_{\text{вх}}$.

Поскольку выходное поле является функцией атомной поляризации, то для расчета эффектов необходимо совместное решение уравнений Блоха с уравнениями Максвелла. Такое решение оказывается двухзначным и характеризуется гистерезисным оптическим эффектом. Имеется типичная гистерезисная зависимость выходной интенсивности $I_{\text{вых}}$ от входной $I_{\text{вх}}$. Состояние, в котором находится система между значениями $I_{\text{вх}}$ и $I_{\text{вых}}$, зависит от того, каким путем получена входная интенсивность (повышением ее от малых значений или понижением от больших). Важно подчеркнуть, что в рассматриваемой системе вход и выход являются чисто оптическими. Явление бистабильности может найти приме-

нение для создания логических элементов оптических ЭВМ, оптических ячеек памяти, а также оптических переключателей и ограничителей.

8. КОГЕРЕНТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В МНОГОУРОВНЕВЫХ СИСТЕМАХ

Многие особенности когерентных процессов можно исследовать в двухуровневом приближении. Реальная же среда является многоуровневой, и это приводит к новым аспектам, не учитываемым в двухуровневой модели. Молекулярные системы обладают неэквидистантной системой колебательно-вращательных уровней. Излучение, резонансное относительно какой-либо пары уровней, вообще говоря, не будет резонансным по отношению к другим переходам. Однако в 1973 г. было экспериментально доказано существование явления так называемой «мгновенной» диссоциации многоатомных молекул, возникающего при мощном импульсном лазерном возбуждении, резонансном лишь для нижнего колебательного перехода, за время, меньшее времени между соударениями.

Это явление нашло объяснение в рамках когерентного резонансного механизма бесстолкновительной диссоциации, включающей переходы в последовательности почти эквидистантных уровней.

Если в двухатомных молекулах из-за ангармоничности колебаний излучение, резонансное для нижнего колебательного перехода, является нерезонансным для всех остальных (расстояния между уровнями уменьшаются с ростом номера уровня), то для многоатомных молекул выход излучения из резонанса в принципе может быть скомпенсирован большой плотностью уровней. Последняя обусловлена большим числом комбинационных колебательных уровней, соответствующих одновременному возбуждению различных колебательных мод, и относящихся к ним вращательных уровней.

Для резонансной к излучению CO_2 -лазера колебательной моды молекулы BCl_3 , уже начиная с четвертого уровня этой моды, среднее расстояние между уровнями становится соизмеримым с однородной шириной вращательного уровня при давлениях порядка нескольких тор и комнатной температуре. Практически это уже не отдельные уровни энергии, а своего рода квазиконтинуум,

и поглощение излучения становится резонансным. Возбуждение же трех-четырех нижних уровней возможно и при нерезонансном поглощении в сильном поле. Именно здесь и находится «узкое место» диссоциационного потока.

Частота колебательного перехода зависит от массы атомов, составляющих молекулу, и различна для разных изотопов. Поэтому излучение, резонансное для нижнего перехода одной из колебательных мод молекулы, содержащей определенный изотоп, будет нерезонансным для молекулы, содержащей другой изотоп. Это и определяет возможность лазерного разделения изотопов. Все сказанное относилось к изолированным, несталкивающимся молекулам. Столкновения между молекулами, перераспределяя возбуждение между самыми различными уровнями, резко нарушают селективность процесса. Поэтому конкретная степень обогащения существенно зависит от столкновительной стадии процесса диссоциации, сменяющей когерентную бесстолкновительную стадию.

Расчеты и эксперименты показали, что, используя особенности выравнивания скоростей диссоциации молекул разного изотопического состава, можно эффективно разделять изотопы и в столкновительной стадии процесса. В целом использование когерентной диссоциации позволило сделать значительный шаг вперед в вопросах повышения КПД и эффективности разделения. Существенными представляются и перспективы открытой позднее когерентной ионизации.

Наряду с когерентной диссоциацией и ионизацией существует и ряд других интересных селективных процессов, например, селективное стимулирование определенных химических реакций, в частности реакций с участием комплексных соединений.

Воздействие на предварительно (когерентно) возбужденную среду для двухуровневых молекул было рассмотрено выше на примере эффекта фотонного эха. Для многоуровневых систем здесь также появляются свои особенности. Так, в трехуровневой системе (рис. 10) с помощью взаимодействующих на равновесную фазу импульсов с частотой ω_{12} и ω_{13} можно наблюдать сверхизлучающие импульсы на всех трех частотах. А значит, оказывается возможным исследование характеристик перехода, не соответствующего какой-либо из частот из-

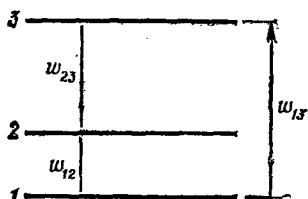


Рис. 10. Трехуровневая схема

лучения, падающего на молекулярную систему. С помощью трехуровневого подхода было показано, что для спонтанного комбинационного рассеяния на предварительно возбужденной среде может осуществляться режим сверхрассеяния (т. е. квадратичная зависимость от числа молекул), а также показана возможность существования солитонов вынужденного комбинационного рассеяния.

Отметим, что предварительное возбуждение среды может в определенных случаях осуществляться передней частью импульса, а остальная часть взаимодействует уже с когерентизированной средой. Таким образом, осуществляются режим сверхизлучения и кооперативное комбинационное рассеяние. Рассмотренная выше методика получила название активной спектроскопии. Для активной спектроскопии характерны два импульса: возбуждающий, который переводит среду в состояние, описываемое нестационарной матрицей плотности, с недиагональными элементами, и зондирующий импульс, когерентно рассеивающийся на этой среде. В настоящее время активная спектроскопия сложилась в очень важное направление в нелинейной оптике. Она дает возможность определения вероятностей радиационных переходов, релаксационных процессов и ряда других характеристик.

Следует подчеркнуть, что в отличие от нуля недиагональные элементы матрицы плотности могут возникать при самых различных нестационарных взаимодействиях на вещество. Наряду с когерентизацией вещества под действием коротких импульсов значительный интерес представляет создание когерентных пучков частиц, аномально взаимодействующих с веществом (сечение при этом пропорционально не числу частиц в пучке, а квадрату числа частиц). Когерентность частиц в таком пучке может быть создана нестационарными мето-

дами за времена, меньшие времени релаксации. Модулированные пучки в принципе могут использоваться в электронной и протонной спектроскопии для увеличения яркости изображения без изменения энергии пучка.

Особый интерес в реальных многоуровневых системах вызывают новые возможности управления и модуляции импульсов излучения. Рассмотрим их на примере эффекта самоиндуцированной прозрачности в трехуровневой системе (см. рис. 10), где переходы $2 \rightarrow 1$ и $3 \rightarrow 2$ разрешены, а переход $3 \rightarrow 1$ запрещен. Имеются два стационарных совместно распространяющихся по среде импульса с частотами ω_{12} и ω_{23} . Проведенные расчеты показали наличие сильной зависимости формы импульса от амплитуды поля первого, т. е. существует возможность управления прохождением через среду импульсов света одной частоты с помощью излучения на другой частоте. Так, изменением амплитуды поля на переходе $2 \rightarrow 3$ можно снижать или увеличивать порог самопрозрачности для импульса частоты ω_{12} . При сильном различии дипольных моментов переходов даже небольшое изменение поля с частотой ω_{23} может вызвать резкое изменение условий прохождения импульса частоты ω_{12} . Имеется возможность формирования коротких мощных импульсов на одном из переходов, подавая подобный импульс на другой переход и «дежурящее» поле на первый.

В условиях когерентного взаимодействия влияние одного канала радиационного распада на другой становится весьма существенным, вызывая изменение скорости распада, формы и времени появления импульса. В трехуровневой системе (см. рис. 10) возникает сильная связь мод с частотами ω_{12} и ω_{23} через общий уровень. Появление второй моды приводит к сильному изменению амплитуды поля первой моды. Третья мода также существенно влияет на характер колебаний плотности фотонов первых двух мод.

Таким образом, два импульса различных частот, соответствующие переходам между уровнями молекулы, могут когерентно влиять друг на друга. Такое проявление взаимодействия пучков света через вещество хорошо видно уже на примере трехуровневой схемы. Используя третий уровень, можно управлять излучением импульс, распространяющийся в среде, можно модулировать с помощью другого, например существенно ме-

нее мощного, импульса; менять режим работы лазера с помощью дополнительного светового импульса, не меняя параметров генератора.

Формирование ультракоротких импульсов в среде многоатомных молекул также имеет свою специфику. Для импульсов длительности $\sim 10^{-11}$ с спектральная ширина импульсов превосходит расстройку уровней. Для анализа может быть применена модель системы гармонических осцилляторов. В этом случае площадь распространяющегося импульса независимо от его начальных параметров обращается в нуль и картина прохождения импульса в системе гармонических осцилляторов во многом аналогична распространению Ол-импульса в двухуровневой среде. Это оказывается приближенно справедливым даже для трехуровневой системы, где происходит увеличение «порога» эволюции к Ол-импульсу по сравнению с двухуровневой системой.

9. КОГЕРЕНТНОСТЬ

КАК ОБЩЕФИЗИЧЕСКОЕ ПОНЯТИЕ

В настоящее время диапазон исследования когерентных кооперативных явлений продолжает расширяться. Анализ современного состояния проблемы позволяет сделать три важных качественных вывода.

Во-первых, общий глобальный характер когерентных явлений. Когерентные явления наблюдаются (или рассчитываются) для излучения и вещества, для кристаллов, жидкостей, газа, плазмы; для молекул, атомов, ядер, элементарных частиц. Обсуждаются вопросы о возможностях создания когерентного гравитационного поля и управления гравитацией. Таким образом, когерентные явления присущи практически всем известным в настоящее время формам материи.

С развитием теории когерентных явлений квантовая механика вторглась в традиционное поле классической физики. Самые различные разделы оптики до последнего времени рассматривались классически или для них успешно применялись классические модели. Так, например, хотя при анализе процессов рассеяния использовались квантовые уровни, сама динамика процесса хорошо описывалась классически. В квантовых когерентных методах возникает понятие фазы, когерентные состояния максимально близки к классическим, т. е. мы

имеем своего рода возвращение классических представлений, но на новой основе, поскольку в целом когерентные методы означают решительный отход от классики. В этом круге вопросов квантовая механика дает то, что нельзя получить в классике. Когерентные состояния, как квантовые состояния, максимально близкие к классическим, позволяют понять взаимосвязь между классической и квантовой механикой.

Таким образом, второй общий вывод заключается в том, что изучение физической природы когерентных эффектов может дать существенный вклад в вопросы исследования оснований квантовой механики, взаимосвязи корпускулярно-волнового дуализма и когерентных явлений, анализа классической и квантовой теории на новой основе.

Третий вывод связан с тем, что одна и та же суть когерентных явлений может быть описана с разных сторон самыми различными физическими, математическими и статистическими методами. Особо следует выделить теоретико-групповой подход, взаимосвязь когерентности и симметрии. Примерами такой взаимосвязи, носящей весьма общий характер, являются описание кооперативных состояний двухуровневых систем с помощью группы $SU(2)$, многоуровневых неэквидистантных систем с помощью групп $SU(n)$, систем осцилляторов с помощью некомпактной группы $SU(1; 1)$. С анализом единой симметричной сущности когерентных явлений связана также задача статистического рассмотрения когерентной совокупности частиц. Так наличие корреляций между частицами может существенно изменить статистические свойства ансамбля.

Сюда же примыкают и описание когерентных явлений нелинейными дифференциальными уравнениями и их взаимосвязь с методом интеграла по путям Фейнмана и комплексными цепями Маркова. Наличие определенной единой точки зрения во всех этих подходах свидетельствует о возможности дальнейшего существенного обобщения имеющихся сейчас понятий.

Когерентные свойства проявляются при определенных физических условиях: в нестационарных процессах, при наличии нелинейности, в результате фазовых переходов.

В общем случае нестационарных быстропротекающих процессов частицы уже нельзя рассматривать как

вполне независимые. Вследствие возмущения среды происходит корреляция частиц, которая сохраняется за времена, меньшие времени релаксации, т. е. при кратковременном воздействии система частиц откликается как целое. Это характерно для таких явлений, как фотонное эхо, самоиндуцированная прозрачность, сверхрассеяние на предварительно возмущенной среде. Сюда относится и создание когерентных пучков частиц, аномально взаимодействующих с веществом (когерентность в таком пучке может быть создана нестационарными методами за времена, меньшие времени релаксации).

Когерентные свойства вещества проявляются и при наличии нелинейности. Впервые нелинейные уравнения для описания когерентных процессов были использованы В. Л. Гинзбургом и Л. Д. Ландау. Феноменологические нелинейные уравнения Гинзбурга—Ландау, написанные для эффективной волновой функции сверхпроводящих электронов, хорошо отображают широкий круг явлений. В настоящее время исследован ряд общих закономерностей эволюции нелинейных волн в диспергирующих средах, описываемых уравнением Кортевега—де Вриза. Показано, что в общем случае начальное возмущение распадается при достаточно больших временах на совокупность стационарных уединенных волн (солитонов) и на несолитонную часть, имеющую вид волнового пакета, расплывающегося с течением времени. Вместе с тем были проанализированы когерентные процессы, приводящие к образованию солитонов в оптических эффектах, в явлении индуцированной самопрозрачности. В теории солитонов существует определенная связь когерентных и нелинейных эффектов. Изучение этой связи и понимание ее механизма представляет значительный интерес. С нелинейными когерентными процессами связана и проблема формирования ультракоротких импульсов (10^{-11} — 10^{-12} с). Именно наличие в лазере нелинейного элемента (просветляющегося фильтра) и приводит к рассмотренному выше явлению самосинхронизации мод, обуславливающему образование ультракоротких импульсов.

Когерентные состояния, как мы видели, не обязательно связаны с неравновесным состоянием вещества. Они могут реализоваться и в равновесных условиях в результате фазового перехода; характерным примером являются состояния сверхпроводимости и сверхтекуче-

сти. И в системе молекулы — излучение, находящейся в резонаторе, при понижении температуры возможен фазовый переход второго рода и возникновение коллективизированного состояния излучателей и излучения. Это общее когерентное состояние излучения и вещества оказывается энергетически более выгодным.

По-видимому, имеется еще не до конца понятая глубокая связь между различными условиями проявления когерентных явлений: нестационарными процессами, нелинейными процессами и фазовыми переходами. Но главное заключается в том, что когерентные явления существуют в очень широком диапазоне условий. Само же понятие когерентности носит ярко выраженный общезначимый физический характер.

10. ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ. ФОТОННАЯ ТЕХНИКА

При рассмотрении прикладных аспектов когерентной физики можно указать целый ряд проблем, имеющих кардинальное значение. С ними связаны как внедрение уже известных результатов, так и фундаментальные исследования. Однако главное здесь состоит не в отдельных крупных достижениях, а в том, что когерентная физика несет с собой коренные преобразования в технике и экономике.

Рассмотрим этот аспект на примере применений когерентного излучения. В настоящее время разработаны многочисленные типы лазеров. Генерация получена в широком диапазоне длин волн от миллиметровой и субмиллиметровой области до вакуумного ультрафиолета, обсуждаются возможности генерации в рентгеновской области. Достигнутые пиковые мощности в импульсе составляют 10^{12} Вт, мощности же в непрерывном режиме генерации — 10^5 Вт. Практическое использование лазеров основано на когерентных свойствах лазерного излучения: высокая частота сигналов со стабильностью частоты порядка 10^{-14} ; острая направленность луча с ничтожной расходимостью, возможность фокусировки излучения на область с размерами порядка длины волны; огромные электрические поля (до 10^7 В/см), образующиеся при этом; легкость управления лучом; большая яркостная температура источника.

На этой основе разрабатываются многочисленные

технологические применения. В настоящее время лазеры используются в промышленности (резка, сварка, сверление отверстий, закалка, скрайбирование), в медицине (глазные и онкологические операции), в атмосферных и космических исследованиях (локация, лазерное зондирование атмосферы), в геодезии, в метрологии, в строительстве, в научных исследованиях (проблема термоядерного синтеза, лазерные приборы). Это только некоторые из областей, в которых лазер находит применение. Ожидается, что они расширятся во много раз.

Однако методически вопрос стоит значительно шире. Речь идет о месте энергии когерентного излучения среди других видов энергии. Основной двигательной силой, первоначально использовавшейся человечеством, была мускульная сила людей и домашних животных, затем стали господствовать паровые машины, а с началом XX в. — электричество. Производство электроэнергии, энерговооруженность в значительной степени характеризуют потенциал страны. В настоящее время быстро растут мощности лазеров. Обсуждается лазер-реактор, где ядерная энергия может непосредственно преобразовываться в энергию излучения. В ближайшем будущем ожидается получение больших количеств энергии в форме когерентного излучения.

В этой связи весьма важен вопрос о ценности различных видов энергии, об определенной их иерархии. Основным критерием здесь является упорядоченность (или, как говорят, негэнтропия) соответствующих форм движения. С ней связано существенное отличие между паровой и электрической машинами в КПД и экономичности передачи энергии на расстояние, что и обусловило качественное различие в соответствующих уровнях техники. Целесообразно найти пути непосредственного использования энергии когерентного излучения, соответствующего наиболее упорядоченной форме движения. Конечно, необходимо и эффективное превращение «когерентной» энергии в другие виды энергии.

Вопрос стоит так: возможна ли в принципе замена господствующего положения электротехники фотонной техникой? Если аналог электрогенератора — лазер — существует, то аналога электромотора — фотонной машины — пока нет. Необходимо ее создание.

В. Христиансен и А. Гертцберг проанализировали вопрос о возможностях построения фотонной машины

на конкретном примере газодинамического лазера замкнутого цикла, состоящего из полости с горячим сжатым газом, сопла, лазерной полости, диффузора и компрессора. При истечении нагретого газа из сопла он расширяется, температура его падает, поскольку скорость релаксации различных типов колебаний молекул неодинакова, возникает разрыв колебательных температур и инверсная заселенность колебательных уровней молекул; в лазерной полости возникает генерация. При этом, однако, колебательная энергия переходит в поступательную, энергия направленного движения частиц — в тепло, смесь нагревается и сжимается, и требуется сравнительно небольшая работа компрессора для перекачки газа в начальную полость.

Подобно генератору и мотору, лазер и фотонная машина могут меняться ролями. При этом лазерная секция становится поглощающей, нижний уровень заселен больше верхнего. При поглощении энергии когерентного излучения газ приобретает дополнительную колебательную энергию. Давление его при выходе из диффузора превышает начальное, и компрессор становится турбиной. Таким образом, в случае идеальной фотонной машины энергия когерентного излучения поглощается, и производится работа. Рассмотренная система является одним из возможных фотонных аналогов электрической системы генератор—мотор.

Для создания фотонных машин, возможно, окажется существенным и использование когерентности вещества. Наряду с проблемой создания фотонных «моторов» большое значение имеют вопросы эффективной передачи энергии, разработки двигателей и расширения технологических возможностей.

Так, важным преимуществом фотонной техники является возможность беспроводной передачи энергии. Вследствие малости дифракционной расходимости, обуславливающей расширение лазерного пучка, энергия может транспортироваться по прямой на многие тысячи километров. Это существенно в условиях Земли и незаменимо в космических условиях. Лазерный луч, направленный с Земли, освещает на Луне лишь небольшую площадку со стороной порядка 10^3 м. С помощью подобной транспортировки энергии при наличии фотонных машин может быть налажено снабжение энергией Луны и других планет, подпитка ракет и т. п.

Существенный интерес представляют двигатели на основе когерентного излучения. Так, лазер в принципе может быть использован в качестве двигателя фотонной ракеты, обладающей максимальной скоростью истечения вещества. Уже сейчас с практической точки зрения обсуждаются возможности использования лазеров для маневрирования на орбите космических кораблей. Это может достигаться как с непосредственным использованием отдачи фотонов, так и с использованием отдачи частиц вещества, истекающего под действием лазера в пространство. Испаряя вещество с помощью лазера из космических объектов, лишенных двигателей, можно транспортировать их в нужном направлении.

Использование энергии когерентного излучения для конкретной технологии требует преобразования ее в другие формы: тепловую, механическую, химическую, электрическую. Здесь следует иметь в виду и замечательное свойство селективности, связанное с использованием когерентных процессов. Оно обусловлено избирательным воздействием когерентного излучения на конкретные уровни, строго определенным возбуждением атомов и молекул в отличие, например, от теплового воздействия, когда в той или иной степени возбуждаются все уровни. На этой основе оказывается возможным эффективное разделение изотопов, стимулирование определенных химических реакций, реализация заданных физических процессов.

Таким образом, получение энергии непосредственно в форме когерентного излучения дает существенный технологический выигрыш, новый качественный шаг в технологии. В целом рассмотренная картина даже в своей основе далека от полноты, поскольку мы ограничились лишь примером фотонной техники. Еще совершенно недостаточно изучены возможности, связанные с использованием когерентного состояния вещества, а они могут быть весьма интересными. Так, например, решение проблемы получения высокотемпературной сверхпроводимости повлекло бы за собой радикальные изменения в электротехнике.

11. ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ. ИНФОРМАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

Качественно новые решения несут с собой когерентные методы в записи, преобразовании и передаче информации, управлении физическими процессами. Хотя мы еще не можем в полной мере оценить существующие перспективы, но и то, что известно сейчас, кажется весьма впечатляющим.

Внедрение достижений когерентной оптики ведет к коренному повороту в записи и обработке информации, которые приобрели в связи с «информационным взрывом» особое значение. Главную роль здесь играет голография. Голографический метод представляет собой когерентный двухступенчатый процесс формирования изображения, в котором регистрируется интерференционная картина, создаваемая излучением, рассеянным исследуемым объектом, и когерентным фоном опорной волны. Зарегистрированное (на фотопластинке) изображение называется голограммой. По существу, это запись фаз результирующей суммарной волны, получившейся в результате интерференции. Пропуская через голограмму опорную волну, мы можем полностью восстановить изображение предмета.

При голографической записи используется практически вся информация, которую несет свет об объекте, т. е. амплитуды и фазы, в отличие, например, от фотоснимка, где используется только амплитуда. Голографическое изображение создает полную иллюзию присутствия, объект можно «рассматривать» с разных сторон. Изображение практически неотлично от реального объекта. Емкость голограмм огромна; на пластине 100 см^2 может быть записана информация, соответствующая 10^7 страниц книги.

Заметим, что запись информации в виде голограмм имеет большое преимущество перед записью микроизображений. Голограмма малочувствительна к наличию трещин, которые в случае микроизображений могут привести к значительной (или даже полной) потере информации. Это связано с большой избыточностью голографической записи.

Одно из наиболее многообещающих применений голографии — распознавание образов. Оно опирается на возможность с помощью голограммы выделить из груп-

пы предметов только те, изображения которых на ней записаны.

Трехмерные голограммы могут быть использованы как ячейки памяти. Механизм такой памяти связан с интерференционной записью информации в светочувствительном объеме. За счет записи под различными углами емкость информации может составлять 10^{12} бит/см³.

Специальным образом приготовленные голограммы начинают составлять конкуренцию линзам. Уже возникает безлинзовая оптика. С помощью голограммы можно получить на порядок больше разрешенных элементов, чем с помощью линзы (у линзы по краям поля разрешение падает), можно фокусировать очень широкие пучки — до 10 м в диаметре.

Голография дает возможность видеть мир в звуковых и радиоволнах. Это достигается масштабным уменьшением голограммы, полученной с помощью звуковых волн, в λ_1/λ_2 раз, где λ_1 — длина волны звука, λ_2 — света. С помощью преобразованной голограммы и получают видимое изображение. При получении голограмм с помощью коротких импульсов открылись возможности изучения хода быстропротекающих процессов.

Наряду с перечисленными возможностями записи и переработки информации существует много других приложений голографии. Отметим применение ее при создании запоминающих устройств, анализе напряжений и деформаций тел (на основе голографической интерферометрии), получении изображений внутренних органов (с помощью акустической голографии), построении оптических когерентных систем обработки данных, получении изображений быстро движущихся объектов.

Для передачи информации могут быть использованы лазерные пучки, имеющие два важных достоинства. Это, во-первых, широкая полоса частот, присущая свету (количество информации пропорционально этой полосе). При переходе от микроволн к оптическим частотам ширина полосы увеличивается в 10^4 раз. Во-вторых, высокая направленность излучения. Однако в нижней атмосфере световые пучки сильно затухают. И это затрудняет непосредственную передачу информации с их помощью. В последнее время благодаря развитию волоконной оптики удалось при волноводном распростра-

нении света по стеклянному волокну передавать сигналы на расстояния свыше 100 км.

За последнее десятилетие сформировалось новое научное направление — динамическая голография. Если в обычной (статической) голографии процессы записи и восстановления волновых фронтов разделены во времени, то в динамической одни и те же волны участвуют, по существу, одновременно в формировании и восстановлении голограмм. В этом процессе необходимо использовать оптически нелинейную среду. Благодаря интерференции падающих на нее волн, в объеме нелинейной среды образуется пространственная амплитудная или фазовая решетка, взаимодействие с которой, в свою очередь, приводит к изменению амплитуд или фаз волн, распространяющихся в данной среде. Время установления и исчезновения динамических голограмм определяется временем релаксации возмущенной среды. Обычно под действием излучения происходит пространственно-временная модуляция показателя преломления или коэффициента поглощения среды.

Для записи динамических голограмм широко используются самые различные, в том числе резонансные, среды. В растворах сложных органических красителей, обладающих очень широкой полосой поглощения, возбуждение среды приводит к уменьшению коэффициента поглощения, а в длинноволновой части полосы в результате быстрого релаксационного процесса образуется инверсная заселенность, возникает усиление.

При взаимодействии с интерференционным полем излучения в поглощающем растворе красителя индуцируется решетка просветления поглощения, решетка усиления, а вследствие частичного преобразования поглощенной энергии в тепло — и температурная решетка. Одновременно с действием возбуждающих импульсов, создающих эти решетки, зондирующий пучок дифрагирует на них. Интенсивность дифракции на решетке усиления существенно выше, чем на решетке просветления. Это приводит к существенному (до 10^3 раз) усилению слабых пучков света за счет энергии сильного пучка. На основе динамической голографии оказывается возможной компенсация фазовых искажений световых пучков, коррекция лазерного излучения; она дает новые способы исследования свойств оптически нелинейных сред. Однако наиболее интересные перспективы откры-

ваются в области обработки оптической информации. Это методы распознавания образов, операции сложения и вычитания комплексных амплитуд, пространственной фильтрации, приводящей, в частности, к построению контуров изображений.

Не менее важной представляется роль когерентности в проблеме управления физическими процессами. Общей тенденцией является миниатюризация управляющих систем (электронные лампы — транзисторы — интегральные схемы). Это — одно из основных направлений научно-технической революции. Здесь значительные перспективы открывает использование явлений сверхпроводимости, особенно эффектов Джозефсона (сверхпроводящие элементы ЭВМ, криотронные схемы, элементы памяти).

Новое направление в проблеме управления открыли исследования по когерентному взаимодействию излучения с многоуровневыми системами (атомами и молекулами), когда характерное время взаимодействия с полем не превышает времени затухания поляризации за счет релаксационных процессов. Два импульса различных частот, соответствующие переходам между уровнями молекул, могут когерентно влиять друг на друга. В разделе 8 было рассмотрено косвенное воздействие двух пучков света при наличии трех уровней. Использование третьего уровня дает возможность управления излучением.

В этом смысле роль промежуточного третьего уровня можно уподобить роли сетки в триоде, т. е. здесь появляются элементы своего рода сверхмикрорадиотехники, связанной с взаимодействием излучения и элементарных генераторов — атомов и молекул. Регуляция в этом случае осуществляется в основном не при помощи изменения заселенностей, а за счет фазовой корреляции излучающих молекул, обусловленной связью между молекулами через световое поле. При конкретном решении задач создания управляемых лазерных устройств можно выделить управление при воздействии на активную среду внутри лазера и управление с помощью воздействия вспомогательных импульсов на многоуровневую внешнюю среду при прохождении через нее основного лазерного импульса (в частности, в условиях самоиндуцированной прозрачности). Можно полагать, что в перспективе прогресс управляющих си-

стем будет определяться использованием когерентных свойств вещества, когерентными процессами на атомном и молекулярном уровне.

В этой связи хотелось бы подчеркнуть, что речь может идти не только об управлении временной последовательностью сигналов (или их зависимостью от времени), но и пространственной структурой волны. Так, проведенные эксперименты показали возможность применения явления фотонного эха для записи, преобразования и восстановления пространственной структуры импульсных полей.

Здесь работы еще только начинаются. Однако сама перспектива использования для управления всей пространственно-временной структуры волны представляется необычайно привлекательной.

12. КОГЕРЕНТНОСТЬ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ФИЗИКИ

Понятие когерентности, как уже отмечалось, выходит за рамки одного или нескольких разделов физики и является общезначимым. Оно тесно связано с квантовой механикой, позволяет поставить вопрос о когерентном состоянии вещества. Одной из основ нашего мировоззрения является представление о единстве внешнего мира. Поэтому можно ожидать существования каких-либо аналогов когерентности и за пределами физики. Действительно, такие попытки делались. Например, в биологии обсуждался солитонный механизм управления мышечной деятельностью, близкие понятия применялись и при анализе работы мозга. Поэтому возникает вопрос о возможности обобщения квантового подхода, включающего анализ когерентных явлений, на другие области знания.

Можно выделить два направления поиска путей применения квантового подхода в других областях. Первое из них — это непосредственное расширение сферы приложений квантовой механики. Так, современная химия строится на основе квантовых представлений. Все дальше и дальше пробивает себе дорогу квантовый подход при анализе сложных органических молекул; можно ожидать непосредственного его использования для исследования биохимических процессов, а возможно, и клеточных органелл (митохондрий, рибосом).

Второе направление связано с определенным абстрагированием от чисто физических понятий. Для этого из имеющихся изоморфных (отличающихся лишь по форме) формулировок квантовой механики нужно выбрать подходящую не только для физики, но и для других областей науки. Здесь естественно использовать формулировку квантовых закономерностей на основе комплексных цепей Маркова, тесно связанную с известным фейнмановским интегрированием по путям. В этом формализме в отличие от обычно применяемых в физике гайзенберговского или шредингеровского представления квантовой механики не используются чисто физические понятия, такие, как координата, импульс, момент, энергия и т. д. Задается лишь набор вероятностей переходов между состояниями, т. е. при обобщении квантового подхода на другие науки здесь нет необходимости в поисках аналогов конкретных физических величин.

Обычные (действительные) цепи Маркова имеют в настоящее время чрезвычайно широкую область приложений: это физика, радиотехника, автоматика, экономика, социология, медицина, биология. Для этих цепей условная вероятность осуществиться событию A_i в $(s+1)$ -м испытании $P_{s+1}(A_i)$ зависит только от события в s -м испытании и не зависит от предыдущих. При этом полная вероятностная картина возможных изменений при переходе от одного испытания i к другому испытанию j задается матрицей перехода

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{pmatrix}$$

Элементы матрицы перехода p_{ij} неотрицательны, сумма элементов каждой строки равна единице. Для достоверного события $p_{ij}=1$.

В основе комплексных цепей Маркова лежит комплексная теория вероятностей, согласно которой каждому случайному событию A из поля событий ставится в соответствие уже не действительное неотрицательное, а комплексное число $\psi(A)$. Для достоверного события $|\psi(A)|^2=1$. В этом плане переход к комплексным вероятностям является своего рода естественным обобщением понятия обычной вероятности.

Вместе с тем в понятие комплексных цепей Маркова уже в значительной мере заложены основные особенности квантовой механики. Причем конкретные системы определяются заданием матрицы перехода (в стандартных формулировках квантовой механики — заданием гамильтониана). Подчеркнем, что в комплексных цепях не конкретизируется величина \hbar (постоянная Планка), она может быть любой.

Квантовая механика в этой формулировке может явиться действенным рабочим инструментом в естественных и общественных науках. Речь идет о построении обобщенных моделей марковских процессов, где учитывается комплексный характер вероятности, соответствующий природе явления. Сюда относятся не только чисто стохастические свойства, описываемые, в частности, обычными цепями Маркова, но и учет внутренних корреляций, своего рода фазовых соотношений между объектами, описываемых комплексными цепями Маркова.

Основная трудность в исследовании таких явлений заключается в построении комплексной матрицы перехода. Это может быть выполнено по аналогии с многочисленными построениями действительных матриц для обычных цепей Маркова, когда матрица перехода строится на экспериментальных, теоретических, иногда даже априорных данных. Если матрица дана, то остаются чисто математические проблемы, решая которые, можно получить когерентные характеристики. Таким образом, появляются конкретные возможности анализа когерентных явлений (или их аналогов) уже за рамками физики, в других частных науках (например, биологии, экономике, социологии, где широко используются обычные цепи Маркова).

Имея метод нахождения и анализа когерентных характеристик (или их аналогов) в различных областях науки, важно указать конкретные явления и процессы, где такие характеристики могут быть существенными,

13. КОГЕРЕНТНОСТЬ В БИОЛОГИИ

Квантовый подход к биологическим объектам должен включать в себя оба направления: как непосредственное приложение квантовой механики, так и использование комплексных цепей Маркова для учета когерентных фазовых соотношений между объектами.

В рамках первого направления следует выделить применение квантового подхода для анализа структуры биополимеров, изучения биохимических процессов, исследования роли электромагнитных полей в живых организмах. Так, в настоящее время накоплен значительный экспериментальный материал по сверхслабому собственному излучению биологических объектов. Оно обнаружено у самых различных животных и растительных клеток. Следует подчеркнуть, что излучение или поглощение квантов неизбежно происходит в химических процессах синтеза или распада в клетках живого организма. Электронные состояния биосистем имеют весьма сложную структуру, и даже слабое излучение, обладающее определенными когерентными свойствами, может привести в действие в организме определенную цепочку процессов.

Таким образом, процессы излучения и поглощения квантов могут составить определенный канал передачи информации между мембранами, клеточными органеллами, клетками, между ДНК и белком. Другими словами, представляется весьма вероятным наличие в организме наряду с химической и электрической системами, являющимися неотъемлемыми проявлениями жизнедеятельности, третьей информационно-управляющей системы.

Такая система осуществляет регуляцию излучением, а не слабыми токами или переносом химических соединений в организме.

Вопросы когерентности здесь могут играть существенную роль. Так, наличие коллективных π -электронных состояний в молекулах, содержащих двойные связи, в частности, ароматических соединениях типа бензола, присуще также и отдельным составным частям биомолекул ДНК и белков. Это может приводить к когерентному взаимодействию электронной системы молекул с излучением. Представляется также вероятным формирование в результате кинетических процессов на уровне биомолекул ультракоротких импульсов, когерентно взаимодействующих с веществом.

Необходимость учета когерентных состояний между различными биологическими объектами в рамках второго направления, связанного с использованием комплексных цепей Маркова, проявляется в целом ряде

проблем. В частности, при рассмотрении работы нервной системы (анализ формирования и распространения нервных импульсов по принципу: все или ничего), при построении поведенческих моделей животных, при исследовании психических явлений.

Остановимся более подробно на примере работы мозга. Сущность работы мозга как сложной системы взаимосвязанных структур начиная с 50-х годов пытались понять на основе аналогии с электронно-вычислительной машиной. Сейчас уже ясно, что сходным является лишь ряд конечных результатов работы ЭВМ и мозга. Имеются и фундаментальные различия. Так, в отличие от двухпозиционного переключателя, элементарной структурной единицы ЭВМ, нейрон определенным образом суммирует воздействия на нескольких входах, определяя, должен ли он посылать импульсы, и подбирает выходной сигнал и его частоту (двухпозиционные свойства «да»—«нет» свойственны лишь аксону). Огромное число контактов между различными нейронами позволяет говорить о мозге как о единой кооперативной системе. В отличие от ЭВМ каждая из функций мозга локализована, и система обладает большой функциональной гибкостью и устойчивостью к различным повреждениям. В этом плане имеется прямая аналогия с голографической записью. Отметим здесь также свойство трехмерных голограмм осуществлять операции, характерные для ассоциативной памяти, когда часть какой-либо зарегистрированной ранее ситуации извлекает из памяти всю ситуацию в целом.

Действие современных ЭВМ, решающих чрезвычайно сложные задачи, разбивается на элементарные операции, с которыми может справиться весьма простое устройство — двухпозиционный переключатель с ответами «да»—«нет» (1—0). В основе этих элементарных операций лежит булева алгебра, формализовавшая обычную логику и сводящая процесс решения сложных задач к большому числу простых операций. Этот процесс задается программой и в этом смысле однозначно определен.

В отличие от ЭВМ для работы мозга характерны как внутренняя стохастичность, так и наличие определенных корреляций. Простейшая возможность их описания должна основываться на теории комплексных марковских цепей, учитывающих возникающие здесь

своего рода фазовые соотношения. В пользу волновой картины процессов, происходящих при работе мозга, свидетельствуют и отмечавшиеся аналогии с голографической обработкой информации и делокализация функций мозга, и структура нейронной сети, и характер работы нейронов. Все это дает возможность определенной фазировки, создания определенного когерентного кооперативного состояния.

Хотя работа мозга характеризуется невероятной сложностью, в первом приближении, по-видимому, следует говорить о его действии по квантовым законам. Во всяком случае пока это — простейшая из возможностей. Работа мозга делится на бессознательное, как основу, и сознательное, как результат функционирования своего рода выходного устройства. Сознательному соответствует обычная логика. Бессознательное, по-видимому, протекает по квантовым законам, квантовой логике. Однако в нашем сознании квантовая логика не находит непосредственного отображения. Мысли, картины, возникающие в сознании, не суть адекватная передача работы мозга. При включении сознания возникает определенная стохастичность в выводах, решениях, подобная стохастичности при квантовомеханических измерениях.

В мозгу, так же как и в ЭВМ, сложные вычислительные и логические операции реализуются путем выполнения огромного числа очень простых. Каковы же элементы и логика квантовой ЭВМ? Простейшей квантовой системой является двухуровневая. Ее отличие от двухпозиционного переключателя заключается в дополнительном наличии фазы. В физике набор двухуровневых частиц (молекул) характеризуется рассмотренной выше моделью Дике. В отличие от набора двухпозиционных переключателей, находящихся в состоянии 0 или 1 (аналог заселенности уровней), здесь дополнительно имеются когерентные характеристики. В данном случае это кооперативное число r , определяемое соотношением фаз отдельных молекул. Взаимодействие двухуровневых объектов, законы композиции базисных элементов описываются (аналогично обычной логике для ЭВМ) квантовыми законами, квантовой логикой. Такие законы композиции могут быть заданы на основе теоретико-группового подхода (с помощью величин, называемых коэффициентами Клебша—Гордана). Принци-

пиальный момент — это когерентная природа взаимодействия между базисными элементами.

Говоря о когерентности в биологии, следует, по-видимому, коснуться еще одной проблемы, связанной с возможностью существования так называемого «биополя». Конечно, очень многое (может быть, даже основная часть) из того, что пишется и говорится на эту тему, удивительно напоминает воззрения и аргументацию повара-окультиста Юрайды из бессмертного романа Ярослава Гашека: «Окультист Юрайда считал, что хотя на первый взгляд кажется бессмысленным писать шутки ради о том, что совершится в будущем, но, несомненно, и такая шутка очень часто содержит пророческие факты, если духовное зрение человека под влиянием таинственных сил проникает сквозь завесу неизвестного будущего. Вся последующая речь Юрайды была сплошной завесой. Через каждую фразу он поминал завесу будущего, пока наконец не перешел на регенерацию, то есть восстановление человеческого тела, приплел сюда способность инфузорий восстанавливать части своего тела и закончил заявлением, что каждый может оторвать у ящерицы хвост, а он у нее снова отрастет». Так, несмотря на ряд широковещательных заявлений, до сих пор нет достаточно четких экспериментов, доказывающих существование явлений типа телепатии или телекинеза. Вопрос об их возможности остается открытым.

Но можно поставить вопрос и по-другому. В настоящее время детально развиты теоретические и экспериментальные исследования атомов и относительно простых молекул, как их индивидуальных свойств, так и состоящих из них макроскопических сред. В структурном отношении специфика биологических систем заключается в том, что они состоят из очень больших и сложных молекул. Поэтому предположение, что в биосистемах (как «джинн из бутылки») появляются какие-то таинственные «биополя» неэлектромагнитного происхождения, вряд ли выдерживает критику.

При генерации электромагнитных волн специфика сложных молекул (в силу большой спектральной ширины линии) заключается в возможности их использования для генерации ультракоротких импульсов, в частности 2π - и 0π -импульсов (см. раздел 7). Специальных опытов по изучению возможностей их генерации биоси-

стемами, так же как и по их действию на биосистемы, пока не ставилось. А между тем мир ультракоротких импульсов обладает чрезвычайно интересными особенностями.

При определенных условиях поглощение коротких импульсов резонансным переходом падает и возникает эффект самоиндуцированной прозрачности. 2π -импульсы в течение некоторого времени проходят через поглощающую среду без существенных потерь энергии. Площадь импульса сохраняется с постепенным увеличением его длительности. Поглощение 2π -импульса происходит сразу, когда длительности 2π -импульсов становятся порядка времени релаксации, т. е. действие 2π -импульсов может быть локализовано в сравнительно узкой пространственной области и приводить к различным возмущениям типа акустических колебаний. 0π -импульсы, как отмечалось, имеют аномально слабое поглощение и могут распространяться на значительные расстояния. Регистрация коротких 0π -импульсов, свободно проходящих через поглощающую среду, даже сейчас требует специально поставленных экспериментов. Детектором является инверсно заселенная активная среда, которая может существенно реагировать на прохождение 0π -солитона. Это означает, что принимать сигналы в организме могут лишь специально настроенные системы. Выше отмечались также исключительно многообразные и эффективные возможности обработки информации и управления с помощью ультракоротких импульсов в рамках многоуровневого подхода.

Представляются вполне разумными гипотезы о том, что организмы могут излучать значительное количество ультракоротких импульсов и находятся в своего рода их среде, что живой организм может иметь свою «визитную карточку» — характерный набор импульсов. Все сказанное об ультракоротких импульсах в определенной степени вписывает их в те зыбкие сведения о «биополе», которые имеются в настоящее время (хотя, разумеется, и не может служить их подтверждением). По-видимому, в существующих научных рамках ультракороткие импульсы дают некоторую надежду на рациональное объяснение «биополя» и связанного с ним круга возможных явлений.

Может быть, это подтвердится в дальнейшем, может быть, и нет, но сейчас ясно одно: вопросы когерентного

взаимодействия ультракоротких импульсов с живыми организмами составляют очень интересную проблему, поставленную перед нами развитием науки. Здесь требуются конкретные физико-биологические экспериментальные исследования по указанным взаимодействиям.

14. КОГЕРЕНТНОСТЬ И ОБЩЕСТВЕННЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Когерентность в общественных явлениях — что это? Просто поверхностная аналогия, не имеющая под собой реальной почвы или что-то более существенное?

Важно сразу подчеркнуть, что здесь речь идет о конкретных методах анализа, конкретных алгоритмах исследований. Так, квантовый подход в формулировке комплексных цепей Маркова может быть действенным рабочим инструментом в решении ряда проблем общественных наук. Сейчас в эту область начинают интенсивно проникать математические, статистические, кибернетические и другие методы исследования; отдельные социальные процессы уже моделируются на ЭВМ. Это, в частности, касается и таких наук, как социология, психология, эстетика, лингвистика. Быстро развиваются приложения обычных (действительных) цепей Маркова в таких вопросах, как телефония, скопление людей в обслуживающих учреждениях, модели снабжения, структуры рабочей силы, очередей и т. п.

В настоящее время, однако, нет опыта применения моделей, где существенную роль играют кооперативные, корреляционные связи в поведении людей (описываемых комплексными цепями Маркова). В то же время этот круг вопросов может иметь принципиальное значение. Так, степень воздействия внешней информации на отдельного человека определяется не только его личными качествами, но и определенной системой его взаимосвязей, т. е. при разработке моделей поведения определенных совокупностей людей чисто вероятностный подход не всегда оправдан из-за наличия внутренних связей, существенных корреляций.

Эти корреляции должны быть учтены и при анализе информационно-пропагандистского воздействия; субъект воздействия не должен рассматриваться изолированно. Он обычно входит в некоторую совокупность людей с определенной системой ориентаций, и его по-

ведение в значительной степени определяется существующим окружением, устоявшейся системой мнений. Именно поэтому система воздействия, направленная на абстрактного среднего человека, не является достаточно эффективной. Она должна учитывать результат воздействия на скоррелированную совокупность людей в целом. Математический аппарат, описывающий данный круг явлений, должен включать в себя указанные коррелятивные связи.

Наряду с комплексными цепями Маркова для анализа процессов формирования общественного мнения могут быть использованы непосредственно когерентные методы, в частности модель Дике и ее обобщения. Рассмотрим предельно упрощенную ситуацию наличия двух противоборствующих мнений: за или против. Каждый человек с определенной вероятностью имеет то или другое мнение. Ситуация здесь вызывает известные ассоциации с квантовой механикой. Так, типично квантовой чертой (все или ничего) является выбор того или иного состояния в процессе «измерения» (например, опроса). В смысле этой аналогии системе мнений каждого человека можно приписать волновую функцию ψ . «За» или «против» — это два состояния (уровня). Собственная функция первого состояния — ψ_i^+ , второго — ψ_i^- . Совокупность N лиц соответствует совокупности N двухуровневых объектов. При отсутствии взаимодействия волновая функция имеет вид $\Psi = \psi_1 \psi_2 \dots \psi_N$. Внутренние когерентные свойства системы (в данном случае — сложившиеся системы мнений внутри отдельных групп, включая наличие коррелированных ориентаций, как совпадающих, так и противоборствующих) описываются в соответствии с моделью Дике кооперативным числом r . При этом вместо двух уровней нужно рассматривать систему коллективных уровней (см. рис. 6).

Переход между состояниями происходит за счет внешнего информационного (несилового) воздействия и обмена собственной информацией, мнением. Такой обмен информацией служит аналогом радиационных переходов, не меняющих когерентных свойств системы (сохраняется кооперативное число r). Миграции членов рассматриваемой совокупности, резкое изменение характера жизни и т. п. могут разрушать степень когерентности общественного мнения и являются аналогами столкновительных процессов (изменяющих кооператив-

ное число r). Как видим, существуют воздействия разного плана. Они могут приводить к возникновению фазовых переходов, неустойчивых состояний, развитию лавинных процессов и другим эффектам, математически изоморфным обычной модели Дике. Для моделирования более сложных (и более близких к реальности) ситуаций (включая наличие нескольких противоборствующих сил) может быть привлечена теория кооперативных состояний многоуровневых систем. Используя эмпирические данные, здесь можно ставить задачи о нахождении областей устойчивости в той или иной взаимосвязанной совокупности людей, об эффективности сочетания действий различного плана. В целом аппарат когерентности открывает в принципе ряд новых возможностей количественного прогнозирования результатов тех или иных воздействий.

Рассматриваемый подход здесь служит методом исследования определенных когерентных закономерностей, проявляющихся в некоторых социальных явлениях. Однако следует особо подчеркнуть исключительную сложность социальных явлений. В данном случае речь идет о возможностях построения приближенных моделей некоторых конкретных процессов.

В проблеме «когерентность и общественные явления» есть и другая сторона, связанная с ролью когерентной физики для современной научно-технической революции. В настоящее время широко обсуждается и круг проблем, связанных с энергетическим кризисом, с ограниченностью энергетических ресурсов, с прогнозами дальнейшего развития. Известно, что в течение длительного времени в мире в целом происходит экспоненциальный рост производства. От прогресса энергетики в наибольшей степени зависит развитие экономики страны. Однако ресурсы ограничены. Во всем мире имеется около 13 000 млрд. т химического топлива. Запасы урана в соответствующих энергетических единицах (при условии использования его в реакторах на быстрых нейтронах) более чем в 100 раз превышают запасы химического топлива. При современных темпах роста энергетики и этих запасов хватит на весьма ограниченный период. В настоящее время человечество близко подошло к осуществлению управляемого термоядерного синтеза. Однако и после овладения этим источником энергии вопрос не снимается. Рост производства энер-

гии, приводящий к выделению на Земле всевозрастающих ее количеств, имеет принципиальный предел, связанных с недопустимым уровнем разогрева планеты, в первую очередь — атмосферы. Часто ставится вопрос о существовании (причем в обозримом будущем) энергетического предела развития цивилизации на Земле, доказывається неизбежность прекращения восходящего развития и необходимость регресса общества. Однако нельзя понимать развитие только как количественный рост определенных показателей производства и потребления. На определенном этапе возникают новые качественные закономерности и соответствующие им новые типы технических систем, новые научные направления.

Таким научным направлением несомненно является когерентная физика. С ее развитием проблема переходит в новую плоскость. Центр тяжести уже не в силовом энергетическом взаимодействии, а в согласовании, синхронизации, фазировке. Именно использование когерентности на микроуровне дает конкретную перспективу на преодоление принципиальных энергетических трудностей, сулит ряд возможностей, представляющихся пока почти фантастическими.

15. КОГЕРЕНТНОСТЬ КАК ОБЩЕНАУЧНОЕ ПОНЯТИЕ

Как было показано выше, понятие когерентности далеко выходит за рамки одного или нескольких разделов физики. Когерентные явления носят общий глобальный характер. Они проявляются на всех трех известных уровнях структуры вещества: атомном, ядерном и элементарных частиц в широком диапазоне физических условий при нестационарных и нелинейных процессах. Они уже выходят за рамки физики. Когерентные понятия уже успешно применяются в биологии и представляются перспективными для приложения в общественных науках. Обнаруженные общие фундаментальные черты самых различных областей физики (а также и других конкретных наук), самых разнородных на первый взгляд явлений подчеркивают внутреннее единство материи, указывают на взаимосвязь когерентных явлений со структурой материи, иерархией ее строения и формами движения. Таким образом, мы имеем дело с некоторым общим свойством материи.

В философском плане идея о наличии подобного свойства содержалась у Лейбница. В философии Лейбница принципы самодвижения и отражения заключены в его учении о монадах. Маркс и Ленин, критикуя Лейбница, вместе с тем высоко оценивали диалектическую сторону его учения. Ленин следующим образом определил основные принципы философии Лейбница: «Монада — принцип философии Лейбница. Индивидуальность, движение, душа (особого рода). Не мертвые атомы, а живые подвижные, весь мир отражающие в себе, обладающие (смутной) способностью представления (душа своего рода) монады — вот последние элементы» *.

Процесс отражения внешнего мира монадами Лейбниц представлял как согласование, синхронизацию часов, а не как действие часов друг на друга, благодаря чему они идут синхронно. Вообще говоря, несмотря на некоторую условность формы изложения, по-видимому, неизбежную для того времени, у Лейбница содержится основная идея понятия когерентности — несиловое взаимодействие, синхронизация. По Лейбницу, это неотъемлемое общее свойство материи, неразрывно связанное с процессом отражения.

В настоящее время намечается исследование взаимосвязи между когерентностью и отражением, дальнейшее углубление естественнонаучного раскрытия философской категории отражения. «Без идеи об отражении, — писал известный болгарский философ Тодор Павлов, — как свойстве, присущем всей материи, сознание должно было бы появиться внезапно, как револьверный выстрел, на самых высоких этапах развития органической материи; при этом нельзя логически основать тезис о сознании, как особом проявлении интенсивной, динамической, внутренней стороны материи, то есть ее движения, изменения, взаимодействия». Хотя сделано очень многое в анализе различных форм отражения — от простого следа до сознания, — тем не менее существует определенный разрыв между простыми формами отражения для неорганической материи и весьма сложными для живых организмов. О «когерентном» отражении можно, по-видимому, говорить как о недостающем промежуточном звене. Когерентные явле-

* В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 29, с. 68. М.: Политиздат, 1977.

ния — это специфическое свойство организованного вещества, связанное, в частности (как и в организмах), с понижением энтропии системы. Кооперативные, когерентные состояния можно рассматривать как наиболее высокоорганизованную форму неживой материи.

В когерентных явлениях и, в частности, в голографии особенно четко проявляется внутреннее единство математического описания и физического образа, абстрактного и конкретного. На основе голографии проводится распознавание образов, декодирование, проведение операций, свойственных ассоциативной памяти; в цифровой голографии процесс создания образов (например, трехмерных изображений объектов, не существующих в действительности) реализуется с помощью расчетов на ЭВМ. Отсутствие непроходимой пропасти между математической абстракцией и конкретной физической картиной в «когерентном» отражении означает, что в этом случае отражение не просто след, но несет в себе зародыши высших форм отражения. Здесь имеется определенная параллель с учением Лейбница, согласно которому под действием внешнего возмущения происходит согласование, синхронизация монад. Характерно, что, как отмечалось выше, работа мозга в известном смысле близка к голографическому принципу.

В настоящее время выдвинутая Лейбницем концепция общего свойства материи наполняется конкретным содержанием. Понятие когерентности начинает приобретать фундаментальный общенаучный характер. Более того, представляется обоснованным и включение его в ряд общенаучных понятий, выдвигаемых научно-технической революцией на роль философских категорий (таких, как система, структура, элемент, симметрия, модель, вероятность, информация, управление, организация).

Мы проследили удивительный путь развития понятия когерентности. Далеко не все еще здесь ясно. В некоторых местах видны лишь туманные контуры проблем и явлений. Но и сделанное кажется впечатляющим. Уже сейчас проблемы когерентной физики объединяют разные физические направления, требуют комплексного решения, определенной координации самых различных специальностей (оптики, физики твердого тела, молекулярной физики, ядерной физики, физики элементарных частиц и др.), концентрации усилий на перспективных

вопросах. Необходима также реализация новых технологических приложений. Вместе с тем необходим дальнейший фундаментальный научный задел, раскрытие проблем когерентности во всей сложности их взаимосвязей, включая самые неожиданные.

ЛИТЕРАТУРА

Горелик Г. С. Колебания и волны. Изд. 2-е. — М.: Гостехиздат, 1959.

Каганов М. И. Электроны, фононы, магноны. — М.: Наука, 1979.

Климонтович Ю. Л. Квантовые генераторы света и нелинейная оптика. — М.: Просвещение, 1966.

Когерентные кооперативные явления (Труды ФИАН, т. 87). — М.: Наука, 1976.

Пейн Г. Физика колебаний и волн. — М.: Мир, 1979.

Перина Я. Когерентность света. — М.: Мир, 1974.

Уиньон М. Знакомство с голографией. — М.: Мир, 1980.

Фабрикант В. А. Новое о когерентности. — Физика в школе, 1968, № 1.

Фролов В. С. Волшебное зеркало. — М.: Знание, 1979.

Леонид Александрович Шелепин

КОГЕРЕНТНОСТЬ

Гл. отраслевой редактор Л. А. Ерлыкин

Редактор К. А. Кутузова

Мл. редактор Н. А. Сергеева

Обложка художника М. А. Дорохова

Худож. редактор М. А. Гусева

Техн. редактор Л. А. Солнцева

Корректор Н. Д. Мелешкина

ИБ № 5915

Сдано в набор 28.12.82. Подписано к печати 03.03.83. Т 02184. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,86. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч. изд. л. 3,44. Тираж 33 400 экз. Заказ 2414. Цена 11 коп. Издательство «Знание», 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 834004. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

ДОРОГОЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку. Подписка на брошюры издательства „Знание“ ежеквартальная, принимается в любом отделении „Союзпечати“.

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в „Каталоге советских газет и журналов“ в разделе „Центральные журналы“, рубрика „Брошюры издательства „Знание““.

Цена подписки на год 1 р. 32 к.



СЕРИЯ

ФИЗИКА