

# idb. КНИГА НОВОСТЕЙ

## Е - между сном опытом

### 01:11 Акустика голограмм

#### [9♥] Место слияния

[Наука а la Ривербэнк](#) [70]

[Левитация и звук](#) [71]

[Эволюция спиралей](#) [72]

[Волны чисел](#) [73]

#### [8♠] Голография на жидких кристаллах

[Полная запись](#) [74]

[Между жидкостью и кристаллом](#) [75]

[Между оптикой и акустикой](#) [76]

[Ассоциативная холопамять](#) [77]

#### [7♣] Квантовые процессоры с памятью

[Физика информации](#) [78]

[Обратимость с участием разума](#) [79]

[Когерентность без ошибок](#) [7A]

[Память для света](#) [7B]

#### [8♣] Третьи Картезианские игры

[Структура системы](#) [7C]

[Структура дисплея](#) [7D]

[Структура памяти](#) [7E]

[Структура программы](#) [7F]

N	0	1	E
00:00	00:01	01:00	01:01
00:10	00:11	01:10	<b>01:11</b>
10:00	10:01	11:00	11:01
10:10	10:11	11:10	11:11
W	0	1	S

<http://KNIGANEWS.ORG>

### Наука а la Ривербэнк [70]

0 Среди того необозримого океана вопросов и загадок, что постоянно окружают людей, исследующих мир, совершенно особое место занимает природа времени. Если это действительно еще одно измерение пространства, то почему оно такое странное? Почему мы все время привязаны к точке «теперь», не имея возможности самостоятельно перемещаться по оси времени ни вперед, ни назад? А если вдруг научимся это делать, то что станет с причинно-следственными связями, на которых держится мир?

1 Оценивая проблему по существу, приходится признать, что сколь-нибудь внятных ответов на все подобные вопросы у человека до сих пор нет. Но если чуть внимательнее приглядеться к истории науки, особенно к малоизвестным ее страницам, то можно отыскать там весьма перспективные заделы на данный счет. Вернуться в прошлое, чтобы начать все по новой, конечно нельзя. Но нет ничего, что мешало бы мысленно возвратиться к давно минувшим событиям и проанализировать, что там пошло не так. А поняв, внести желательные коррективы. И таким образом попытаться вновь свести в единое согласованное русло те рукава реки времени, что когда-то разошлись в разные стороны, ныне практически утратив признаки прошлого единства.

2 В качестве отправного пункта для этой «корректирующей миссии» можно выбрать самые разные точки в пространстве-времени. Однако наиболее колоритным по событиям и участникам представляется место под названием Ривербэнк, расположенное примерно в 40 километрах к западу от Чикаго. В первые десятилетия XX века это было довольно большое, площадью свыше 200 гектаров, частное имение, принадлежавшее эксцентричному миллионеру и магнату текстильной промышленности Джорджу Фабиану (1867-1936).

3 Вместо обычных для людей этого круга развлечений, вроде коллекционирования предметов роскоши или разгульного отдыха на модных курортах, Фабиан избрал для себя хобби совершенно иного рода – спонсирование научных исследований. Купив в 1905 году загородное поместье Ривербэнк, бизнесмен постепенно превратил его в солидный научный центр, приглашая к сотрудничеству ученых самых разных направлений. На первый взгляд, области затевавшихся здесь исследований казались абсолютно случайными и не имеющими ничего общего друг с другом. Достаточно сказать, что среди главных интересов Фабиана были криптография и шифры в текстах Шекспира, машина акустической левитации и генетические эксперименты по улучшению сельскохозяйственных культур. Чтобы понять, сколь неслучайным в действительности был этот диковатый комплекс задач, потребуется разобрать историю в подробностях.

Примерно в 1912 или 1913 году, ибо точной даты на данный счет не сохранилось, в Ривербэнк по приглашению Фабиана переехала жить и работать некая миссис Элизабет Уэллс Гэллап. В описываемые времена эта дама уже была весьма известна в определенных кругах общества благодаря нескольким примечательным криптографическим работам. Исследования ее были посвящены расшифровке тайных посланий, скрытых в первых изданиях книг Вильяма Шекспира и Фрэнсиса Бэкона. Применявшийся для этого «двухлитерный шифр» был изобретен Бэконом в молодости, а из криптограмм, выявленных в текстах старых книг, следовало, что это именно он был подлинным автором шекспировских пьес и сонетов. Имя же Шекспира, одного из актеров театра, где ставились бэконовские пьесы, по взаимной договоренности использовалось в качестве постоянного псевдонима.

Горячие споры о реальном авторе шекспировских произведений, как известно, длятся уже не первый век и с привлечением самых разнообразных аргументов. Любопытные работы Гэллап выделялись на общем фоне в первую очередь тем, что предоставляли убедительные документальные свидетельства непосредственно из эпохи Шекспира и Бэкона. Но убедительными, правда, они были только для тех, кто – вроде Джорджа Фабиана, к примеру – брал на себя труд разобраться в тонкостях криптографической науки. Да к тому же и наукой, строго говоря, криптографию в ту пору еще не считали, рассматривая тайнопись и вскрытие шифров скорее как искусство для посвященных или, хуже того, как разновидность оккультизма.

Для радикального пересмотра столь старомодных взглядов на криптографию, по крайней мере в США, Ривербэнкские лаборатории сыграли, без преувеличения, главнейшую роль. Но произошло это совсем не так, как представлялось Фабиану. В 1915 году он, намереваясь добиться научного прогресса в развитии обширного сельскохозяйственного сектора Ривербэнка – стада скота и производство молока, птицеферма, теплицы-оранжереи и тому подобное, – решил пригласить какого-нибудь перспективного ученого-профессионала. Причем не просто биолога, а специалиста в совсем новой для той поры науке генетике. По совету сведущих знакомых Фабиан вышел на Уильяма Фридмена (1891-1969), молодого и подающего надежды аспиранта-генетика Корнеллского университета. Долго уговаривать его не пришлось, и уже в сентябре того же года Фридмен переехал в Ривербэнк, чтобы возглавить местный «Департамент генетики». Однако появился он в лабораториях Фабиана, как вскоре стало очевидно, вовсе не для улучшения зерновых культур и пород скота.

Как человека, владеющего техникой фотографии, Уильяма Фридмена вскоре попросили оказать некоторую помощь миссис Гэллап – в деле пересъемки и увеличения страниц старинных книг, содержавших шифр. Фридмен с удовольствием взялся помогать пожилой даме, поскольку всерьез увлекся ее юной и симпатичной ассистенткой по имени Элизбет Смит. Интерес молодых людей оказался взаимным, так что вскоре пара поженилась и уже не расставалась всю остальную жизнь. Но кроме того, быстро выяснилось, что Фридмен обладал бесспорным и мощным талантом криптографа. Природные аналитические способности позволили ему с поразительной легкостью вскрывать шифры, которые другим представлялись чем-то очень сложным и трудноразрешимым. Но что еще важнее, как ученый-генетик Фридмен уверенно владел аппаратом статистики и другими инструментами математического анализа данных. Это позволило ему подвести прочный научный фундамент под таинственное ремесло криптоанализа, разработав целый набор формальных приемов и технологий для систематического вскрытия шифров. Поэтому неудивительно, что вскоре Фридмен возглавил и Департамент криптографии.

##

Другое важнейшее направление работ в Ривербэнкских лабораториях было посвящено акустике. Появилось оно по той причине, что один из научных экспериментов в расшифрованных текстах Фрэнсиса Бэкона описывал устройство акустической левитации. Машина представляла собой вертикально расположенную деревянную трубу, по внешней стороне которой были натянуты металлические струны. На эту конструкцию соосно <sup>8</sup> надевалась другая деревянная труба диаметром побольше, у которой тоже были струны, но натянутые по внутренней стороне. Меньшая центральная труба приводилась во вращение, струны ее начинали гудеть, а в результате ответной вибрации начинали звучать и струны внешней трубы. Благодаря резонансу этих звуков, утверждал Бэкон, порождалась сила, достаточная для подъема внешней трубы над землей.

Заинтересовавшийся конструкцией Фабиан нанял чикагского инженера Берта Эйзенхаура, дабы тот соорудил подобную машину в Ривербэнке. Ничего особо мудреного в бэконовском устройстве левитации вроде бы не было, поэтому заказанный аппарат вскоре был изготовлен. Практически <sup>9</sup> все в нем соответствовало авторскому описанию, но за единственным мало-приятным исключением – взлетать труба категорически не желала, так что никакой левитации не получалось. Конструктор машины Эйзенхаур был убежден, что проблема заключена в неправильной настройке струн. А потому предложил проконсультироваться со специалистом, профессионально разбирающимся в тонкостях акустики.

Фабиан, через бостонских родственников и друзей имевший связи в Гарвардском университете, в поисках консультанта вышел именно на того человека, который был ему нужен. Звали физика Уоллес Сэбин (1868-1919), и ныне он по праву считается отцом архитектурной акустики. Ко времени их знакомства с Фабианом в 1913 году Сэбин уже имел репутацию одного <sup>a</sup> из главных в своей области экспертов, создавшего собственную научную методику для оценки и проектирования акустических свойств помещений. В частности, под его непосредственным руководством в 1900 году был устроен бостонский Симфонический зал, и поныне стабильно упоминаемый среди 2-3 концертных площадок с самой замечательной в мире акустикой.

Суть новаторских методов Сэбина сводилась к тому, что он в корне иначе подошел к научной оценке акустики помещений, т.е. таких свойств архитектуры и интерьера, как отражение и поглощение звука, включая важнейшие эффекты реверберации или эха. Сэбин отказался от традиционного в ту пору, но крайне малопродуктивного геометрического анализа, сводившегося к формальному построению картин-паттернов для расходящихся и отраженных акустических волн в проектируемом <sup>b</sup> помещении. Вместо этого он предложил рассматривать звук как разновидность энергии, распределение плотности которой имеет смысл оценивать соответствующими формулами для энергетических полей. Конкретно для акустических приложений ученым было разработано несложного вида уравнение, ныне носящее имя Сэбина, которое на основе исходных данных о помещении позволило заранее рассчитывать его звуковую реверберацию. Или, как выражаются в акустике, насколько «сухим» или «влажным» будет звук.

###

Понятно, что идеи Сэбина о звуке как энергии практически идеально подходили для решения проблем акустической левитации. А поскольку этот ученый всегда славился дружелюбным отношением к людям и большим интересом к новым занимательным задачам, договориться с ним о сотрудничестве Фабиану не составило большого труда. Тем более, что деловой и щедрый миллионер предложил специально для Сэбина создать в тихой прерии Ривербэнка научную лабораторию для тонких акустических исследований (в шумном Бостоне подобного рода эксперименты удавалось проводить лишь глубокой ночью, когда затихал грохот уличного движения). В итоге эту лабораторию действительно построили, с великолепной реверберационной камерой, по сию пору знаменитой среди ученых-акустиков. Но только, увы, лишь к 1919 году – из-за Первой мировой войны, очень сильно повлиявшей на изменение всех исходных планов.

На период 1914-1918 годов Уоллес Сэбин практически оставил занятия акустикой, активно подключившись к научной поддержке союзников США в Европе. В частности, он занимался оптикой и улучшением технологий фотосъемки для авиаразведки французских ВВС, за что в итоге был награжден орденом Почетного легиона. После войны Сэбин совсем было собрался переезжать в Ривербэнк, где все эти годы появлялся лишь эпизодически, чтобы лично проконтролировать ход сооружения акустической лаборатории. Но в январе 1919 года, лишь недавно отметив 50-летие, Сэбин неожиданно умирает из-за резкого осложнения старой болезни.

Генетика Уильяма Фридмена, в свою очередь, война сделала чуть ли не самым компетентным криптоаналитиком в США. Сначала в Ривербэнке по предложению Джорджа Фабиана были устроены учебные курсы, где Фридмен стал готовить для армии группы специалистов по вскрытию шифров. Затем ученого зачислили на военную службу и отправили в Европу в качестве главного криптоаналитика при генерале Першинге, командовавшем американским корпусом. Столь резкий поворот событий на всю оставшуюся жизнь связал Фридмена с военной криптографией, попутно сделав его одним из отцов-основателей крупнейшей в мире спецслужбы, АНБ США. Повернись же события чуть иначе, этот талантливейший аналитик-генетик вполне мог оказаться и среди тех, кому удалось расшифровать устройство кодов ДНК.

За всеми этими большими переменами как-то сам собой затерялся мелкий эпизод с машиной акустической левитации, упоминаемой ныне лишь в качестве занятого экспоната в мемориальной экспозиции Ривербэнкских лабораторий. Никто толком не знает, что за выводы сделал об этой конструкции Уоллес Сэбин, и довелось ли ему вообще хоть как-то заниматься данной темой. Наверняка известно лишь то, что летать эта штука так и не начала. Но отсюда, впрочем, отнюдь не должен следовать вывод, будто акустическая левитация – лишь псевдонаучная чепуха и плод воображения фантазеров. На сегодняшний день это явление уже вполне освоено наукой. Более того, имеются основания полагать, что оно — наряду с генетикой и криптографией — тесно связано с такими загадками, как природа времени и устройство памяти материи.

## Левитация и звук [71]

0 Хозяин Ривербэнкских лабораторий Джордж Фабиан покинул этот мир в 1936 году, совсем немного не дожив до появления реальных устройств акустической левитации. Первые такие аппараты, подвешивающие небольшие объекты в воздухе с помощью силы звука, начали появляться уже в 1940-е годы, однако еще много лет после этого экспериментально подтвержденный феномен продолжал оставаться чем-то вроде занятого фокуса на периферии науки. Лишь к концу XX века явлением заинтересовались всерьез, найдя для акустической левитации несколько по-настоящему полезных практических приложений в радиоэлектронике, химии и космических исследованиях.

1 Для нынешней деятельности Ривербэнка, где по сию пору базируется солидная – заложенная еще Уоллесом Сэбином – лаборатория архитектурной акустики, проблемы левитации, правда, уже как-то совершенно неактуальны. Но, тем не менее, уместно отметить, что в период 1917-1918 годов непосредственным руководством работ по сооружению акустической лаборатории занимался здесь Берт Эйзенхаур. Тот самый инженер из Чикаго, что был приглашен Фабианом в Ривербэнк для конструирования бэконовской машины левитации.

2 Продуктивное общение с Сэбином и собственный интерес Эйзенхаура к физике звука в конечном счете привели к тому, что к 1923 году он стал главным инженером и изобретателем Ривербэнка. А развернутые в лабораториях исследования, так или иначе связанные с акустикой, оказались наиболее востребованными американской индустрией и постепенно стали играть здесь доминирующую роль.

3 Для новых технологий радиоэлектроники, получивших в послевоенные годы быстрое развитие, остро требовались стабильные и высокоточные источники аудиочастот, разрабатывавшиеся в Ривербэнке. Изобретенные Эйзенхауром устройства генерации и стабилизации колебаний, к примеру, заложили основы для первой общенациональной системы фототелеграфа в США, широко использовавшейся службами новостей для передачи изображений. Конструктивно близкие устройства также стали применять в геофизических исследованиях и других областях, где требовалась точная настройка при синхронизации сигналов для выстраивания картинок сканирования.

#

4 Все эти исторические подробности приводятся здесь, главным образом, для того, чтобы показать, насколько близко в Ривербэнке подошли к реальному воспроизведению явления акустической левитации. Вся суть которого сводится к аккуратному использованию стоячих звуковых волн, возникающих в нужных местах акустического поля при грамотном построении интерференционной картины.

5 Для стабильного порождения звуковых колебаний намного лучше, чем струны бэконовской машины, подходят электроакустические излучатели типа громкоговорителя. Поэтому современный акустический левитатор обычно построен на основе излучателя-трансдюсера, преобразующего электрические колебания в акустические или ультразвуковые с помощью вибрирующей пластины. Второй важной частью левитатора является другая пластина-рефлектор, необходимая для отражения звуковых волн и формирования интерференции, благодаря которой объекты можно удерживать парящими в воздухе.

Важной особенностью звука является то, что в основе своей это продольные волны давления. В случае продольной волны движение точек среды происходит параллельно направлению распространения, а не перпендикулярно, как в поперечных волнах. Можно говорить, что продольные волны – это колебания плотности среды. Поэтому визуально их удобно представлять в виде сжатий и растяжений, распространяющихся по цилиндру спиральной пружины. Кроме того, максимумы и минимумы амплитуды продольных колебаний часто изображают с помощью более наглядных поперечных волн, благо физика обоих явлений в сути своей одна и та же.

Точно так же, как волны на поверхности воды, отраженные от препятствий звуковые волны взаимодействуют с волной исходной и порождают интерференцию. Только здесь сжатие среды, которое встречается с другим сжатием, усиливают друг друга, а сжатие, встречающееся с разрежением среды, уравнивают друг друга. Если же звук, отражаемый рефлектором, оказывается согласован с сигналами излучателя, то в интерференционной картине могут породиться стоячие волны. Как и в случае поперечных волн, стоячие звуковые волны имеют так называемые узлы, или области минимального давления, и антиузлы, иначе именуемые пучностями, соответствующие областям максимального давления. Именно благодаря узлам стоячей волны, собственно, и возможен феномен акустической левитации.

##

В наиболее простой конфигурации акустический левитатор состоит из пары излучателя и отражателя. Обычно рефлектор помещают вертикально над излучателем, согласовав расстояние с частотой звука, чтобы порождалась стоячая волна. Распространение звуковых волн в такой установке идет параллельно направлению силе тяжести. И в разных участках стоячей волны силы давления действуют либо постоянно вниз, либо постоянно вверх, либо уравнивают друг друга в узлах. Понятно, что объект помещенный в такое силовое поле, естественным образом смещается к ближайшему узлу.

Поскольку на Земле помимо давления звука действует еще и гравитация, то пойманные в такую ловушку объекты проседают чуть ниже узлов, где давление акустического излучения уравнивается силой тяжести. Если же эксперимент происходит в невесомости или, выражаясь более строго, в условиях микрогравитации, где-нибудь на борту орбитальной космической станции, то левитирующие объекты скапливаются непосредственно в узлах стоячей волны.

В обычных условиях линейной зависимости акустического давления от амплитуды, т.е. громкости звука, левитировать в узлах стоячих волн могут лишь чрезвычайно легкие объекты, вроде частичек пыли. Однако в реальности исследователям удается удерживать парящими в воздухе куда более крупные предметы массой до нескольких килограмм. Столь значительное усиление акустического давления оказывается возможным благодаря явлению резонанса и нелинейным эффектам физики волн. Благодаря акустическому резонансу под ритмичным воздействием слабых по отдельности волновых импульсов может происходить постепенная «накачка» весьма значительной энергии. Похожие принципы лежат в основе лазера, и на этой же основе – в виде так называемого резонатора Гельмгольца – работают многие акустические левитаторы.

Список полезных практических приложений, придуманных на сегодняшний день для акустической левитации, уже достаточно велик. Например, в химических исследованиях и производстве весьма актуальна проблема так называемой бесконтейнерной работы с материалами. Некоторые вещества *b* бывают чрезвычайно едкими или как-то иначе сильно взаимодействующими с контейнерами, в которые их помещают для химического анализа или обработки. Поэтому очень кстати оказывается технология, удобная подвешивающая эти материалы для изучения и манипуляций в акустическом поле, без всяких рисков едкости и загрязнения от контейнера.

###

Другое полезное приложение – производство миниатюрных электронных устройств и микрочипов, где ныне практически всегда подразумевается использование сложных средств механизации и роботехники. При изготовлении некоторых особо нежных микроскопических устройств механические манипуляторы роботов оказываются слишком грубыми, поэтому *c* применяются более продвинутые манипуляторы на основе электромагнитной или акустической левитации. Управлять полем электромагнитного левитатора в принципе удобнее и проще, однако акустическая левитация имеет существенное преимущество в том, что в своей работе не делает никаких различий между проводящими и непроводящими материалами.

Грамотное управление формой звукового поля в левитаторе дает множество других новых возможностей в производстве микро- и наноустройств. Например, левитирующие расплавленные материалы могут постепенно охлаждаться и затвердевать в заранее заданной форме. В частности, одна из самых простых и в то же время широко востребованная форма – геометрически совершенная сфера. *d* Если плотность поля и поверхностное натяжение материала подобраны правильно, то капли можно сжимать, превращая сферу в бублик-тороид. Кроме того, правильно сконфигурированное интерференционное поле может придавать расплавленному материалу весьма сложную форму, заставляя, к примеру, пластик распределяться и затвердевать только в нужных областях микрочипа.

Еще одна область приложений, где акустическая левитация оказалась чрезвычайно полезна – это изучение физики пены. Одну из самых главных проблем здесь представляет гравитация, которая постоянно оттягивает жидкость из пены вниз, довольно быстро ее иссушая и по сути уничтожая. *e* Понятно, что условия микрогравитации, создаваемые в поле акустического левитатора, существенно продлевают время жизни для помещенной туда пены. И, соответственно, предоставляют ученым намного более благоприятные возможности для исследований.

Эксперименты с акустическими левитаторами позволили создать устройства существенно разных конструкций. Скажем, в конце 1980-х годов для исследований на борту космического челнока НАСА был сооружен прозрачный плексигласовый куб, в котором положение левитирующих предметов управлялось с помощью трех динамиков-излучателей, размещенных на взаимно-перпендикулярных осях. Отражателями служили стенки ящика, а каждый из излучателей работал на резонансной частоте куба (600 Гц). *f* Манипулируя соотношениями амплитуды и фазы сигналов между тремя динамиками, исследователь управлял точным перемещением подвешиваемых в пространстве предметов по всем трем осям координат (x,y,z). Среди аппаратов другой конструкции можно отметить устройство для, так сказать, мобильной левитации. Здесь имеется один большой излучатель и несколько маленьких, подвижных отражателей. В едином звуковом поле излучателя каждый такой отражатель подвешивает собственный объект, который перемещается в пространстве вместе с движениями рефлектора.



## Эволюция спиралей [72]

Причудливый исторический факт, согласно которому в стенах Акустических лабораторий Ривербэнк молодой генетик-математик Уильям Фридмен неожиданно превратился в одного из наиболее выдающихся криптографов США, можно, конечно, считать игрой случайных обстоятельств и совпадений. Но если принять во внимание еще целый ряд известных событий в истории науки XIX-XXI веков, то вместе с ними на базе сюжета о Фридмене можно было бы выстроить логически связную и драматически довольно эффектную цепочку больших открытий. Приводящих, так сказать, естественным путем к решению загадок об устройстве времени и памяти материи. Однако реальная жизнь, увы, распорядилась тут иначе. Так что ныне эти научные открытия существуют отдельно друг от друга, а ушедшая в военно-шпионские дела биография Фридмена не связана с ними вообще никак.

Для начала имеет смысл отметить пока еще неочевидную, однако постепенно все более проявляющуюся связь между генетикой и музыкой. А точнее сказать, между структурой молекул ДНК и музыкальной акустикой – как физикой благозвучных тонов, аккордов и их сочетаний-мелодий. В теории музыки для наглядного отображения степени близости и взаимосвязей между звуками-тонами используют разного рода пространственные модели. В зависимости от сложности принимаемых в рассмотрение взаимосвязей, такие модели могут быть как совсем элементарными, вроде линейной шкалы чисел, так и весьма замысловатыми, принимая формы многомерных геометрических фигур.

Самая простая модель пространства музыкальных тонов – ось действительных чисел, где каждый тон по определенному правилу отмечается точкой в соответствии с его частотой колебаний. Такая шкала во многом аналогична последовательному расположению клавиш на клавишных инструментах и вполне дает представление о похожести звуков, расположенных близко друг к другу по частоте. Однако более тонкие взаимосвязи на особых частотных интервалах, свойственных музыке – октавах, квинтах, терциях и т. д. – линейные шкалы отразить не могут. Чуть более сложные – двумерные – модели музыкального пространства могут иметь форму графов, решеток или кругов. Размещение тонов на круге особо полезно тем, что наглядно отражает циклическое возвращение звуков к одной и той же ноте, но на разных по высоте частотах.

Германский математик и философ Мориц Вильгельм Дробиш (1802-1896) в середине XIX века стал первым, кто в качестве наиболее адекватной модели музыкального пространства предложил использовать 3-мерную винтовую спираль. В этой модели линейное пространство тонов намотано вокруг цилиндра таким образом, чтобы все связанные октавой звуки лежали на одной прямой линии. Сто с лишним лет спустя, в 1982 г., видный американский психолог Роджер Шепард (р. 1929), плодотворно работающий на стыках физики, математики и искусства, существенно усовершенствовал спираль Дробиша. Шепард обобщил ее до еще более адекватной модели, двойной спирали с независимыми циклами для октав и квинт, и показал, что такая структура обеспечивает оптимальное компактное представление аккордов и гармонических соотношений.[1]

#

Примечательно, что чем глубже ученые изучают ныне природу двойных винтовых спиралей, будь то молекулы ДНК или аналогичные по строению структуры, тем больше неожиданных сюрпризов они преподносят. Причем происходит это в самых разных областях от биохимии до физики плазмы и астрономии. Так, к примеру, в январе 2008 г. большая группа исследователей из России, Великобритании и США (Алексей Корнышев, Сергей Лейкин, Geoff S. Baldwin, John M. Seddon и др.) опубликовала работу о необычном феномене в поведении двухнитевых молекул ДНК, похожем на нечто вроде «телепатии». А именно, о дальнедействующем распознавании молекул ДНК идентичной структуры и их взаимном притяжении без каких-либо посредников вроде белков.[2]

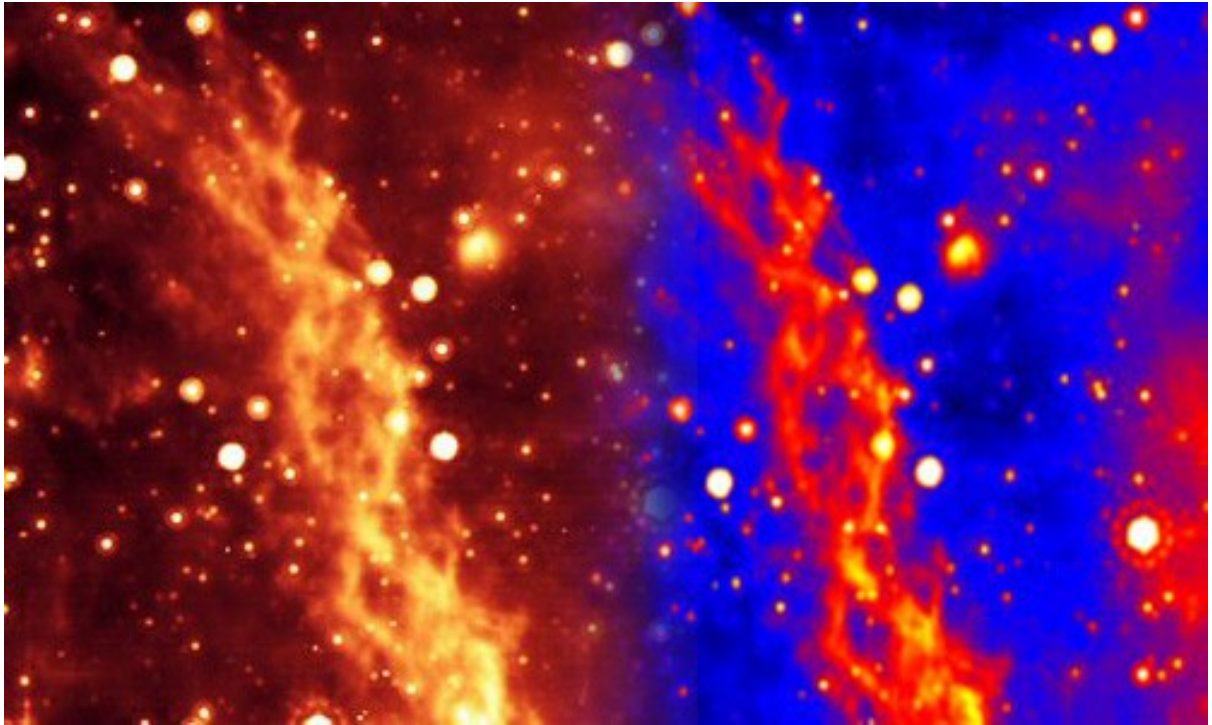
Хотя способность для одинарных взаимно-комплементарных нитей ДНК притягиваться друг к другу является, вероятно, наиболее известным и наиболее фундаментальным свойством ДНК, до последнего времени считалось, что физика целых двухнитевых ДНК работает в корне иначе и не позволяет делать то же самое. Однако упомянутая команда ученых имела основания считать иначе. Для доказательства своей гипотезы они искусственно синтезировали два разных варианта двухнитевых ДНК, смешав их в воде. Для идентификации и различения один тип молекул сделали зеленого цвета, а другой красного.

Подождав две недели, исследователи продемонстрировали, что красные и зеленые молекулы сами расползлись по группам и объединились с себе подобными. Для объяснения такого избирательного притяжения придуман довольно сложный электростатический механизм, ибо все полные молекулы ДНК имеют снаружи цепочек отрицательные электрические заряды и по идее должны взаимно отталкиваться. Насколько теория соответствует истине, покажут дальнейшие эксперименты, однако сам факт «телепатии» доказан наверняка.

Для примера из совсем другой области, в мартовском выпуске журнала Nature за 2006 год группа астрономов из американских университетов UCLA и Корнелл (Mark Morris, Keven Uchida, Tuan Do) сообщила об открытии невиданной прежде туманности в форме двойной спирали ДНК. Структура столь необычного для космоса вида была обнаружена с помощью особо чувствительного орбитального телескопа Spitzer и расположена вблизи центра нашей галактики Млечный путь. Та часть туманности, которую можно рассмотреть на инфракрасном снимке, растянулась в пространстве примерно на 80 световых лет. Подавляющее большинство туманностей, наблюдаемых астрономами, это либо состоящие из звезд галактики известной формы, либо бесформенные скопления космической пыли и газа. Открытая же ныне туманность демонстрирует в высшей степени регулярную форму, но при этом не похожую на все остальные.[3]

##

Гигантская двойная спираль расположена на расстоянии порядка 300 световых лет от ядра Млечного пути и растянулась по оси, перпендикулярной плоскости галактики и проходящей через ее центр. Столь четкая привязка к геометрии галактики дает ученым все основания полагать, что в зарождении столь необычной структуры явно участвовали какие-то мощные процессы в галактическом ядре. Однако что именно явилось причиной феномена – вращение магнитного поля, эффекты гигантской черной дыры, все эти факторы в совокупности или что-то еще – пока остается предметом гипотез и дискуссий.



*Туманность в форме ДНК*

Нельзя также исключать, что туманности в форме двойной спирали ДНК на самом деле вовсе не являются для космоса исключительной редкостью. Просто технологии для выявления образований с такой природой и такими размерами появились у астрономов лишь совсем недавно, а разрешающей способности телескопов пока хватает только на местную Галактику. Иначе говоря, может оказаться так, что и в большинстве других галактик тоже имеется нечто очень похожее, но только недоступное для наблюдений.

То, что подобные предположения строятся далеко не на пустом месте, может косвенно свидетельствовать другое важное открытие, сделанное недавно в смежной области – физике пылевой плазмы. Где также удалось обнаружить структуры в форме двойных спиралей ДНК, причем демонстрирующие не только самоорганизацию, но еще и способности к размножению и эволюции.

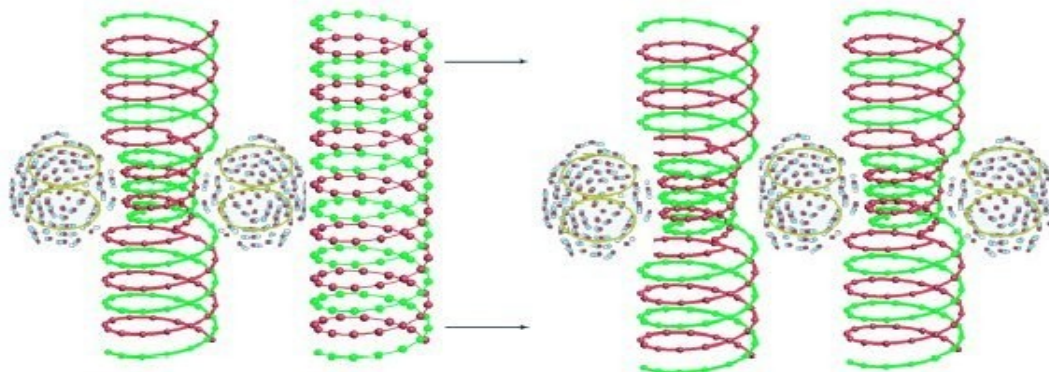
Под обычной плазмой, можно напомнить, принято понимать особое, четвертое – помимо твердого, жидкого и газообразного – состояние вещества в виде сильно ионизированного газа. Из-за того, что вместо атомов материи в целом электрически нейтральную плазму образуют более подвижные ионы и электроны, она имеет ряд свойств необычно активного флюида – являясь электрически проводящей средой и взаимодействуя с внешними магнитными полями. Для условий Земли плазма может представляться довольно редким и экзотическим состоянием материи, появляющимся разве что в лабораториях ученых да при атмосферных разрядах молний. Однако именно на плазму приходится основная часть вещества галактик, звезд и межзвездного газа, составляя, по грубым оценкам, примерно 99% массы видимой вселенной.

###

С начала 1990-х годов повышенный интерес у физиков стала вызывать так называемая пылевая плазма, отличающаяся от плазмы обычной присутствием в ней относительно крупных (в сравнении с размерами ионов) микрочастиц-пылинок диаметром от 10 до 100 нанометров. Интерес ученых возник поневоле, поскольку пыль в плазме существенно портила тонкие технологические процессы плазменного травления, применяемые в производстве микрочипов. Углубленное же изучение проблемы показало, что одноименно заряженные микрочастицы, находящиеся в потоке плазмы, вопреки интуиции и законам физики не разлетаются в стороны, а притягиваются друг к другу, образуя крупные комки и загрязняя чистоту обработки.

Более тщательное изучение проблемы - эксперименты на земле и в условиях микрогравитации на борту Международной космической станции, компьютерное моделирование - привело исследователей к выводу о том, что пылевая плазма в плазменных потоках представляет собой совершенно особое состояние вещества. Одна из важнейших особенностей данного состояния - это постоянно идущие в нем сильные процессы диссипации, т.е. энергетических обменов с внешней средой, обеспечивающие образование самоорганизующихся структур. При этом плазменные потоки и электрические поля создают для пыли весьма специфические условия, обеспечивающие притяжение одноименно заряженных пылевых частиц на больших расстояниях. При подходящих условиях естественным следствием этих процессов может становиться образование в плазме устойчивых «пылевых кристаллов».

Эксперименты такого рода в условиях гравитации обычно приводят к формированию плоских кристаллов в виде решетки вихревых конвективных ячеек регулярной структуры. Однако в опытах с компьютерными симуляциями, моделирующими отсутствие силы тяжести, плоский вихрь приобретает цилиндрическую форму, а образующие его пылинки могут самоорганизовываться в структуры одинарной или двойной винтовой спирали. Не заметить сходство с ДНК тут, ясное дело, довольно сложно. И летом 2007 г. в «Новом журнале физики» - быстро набравшем популярность и авторитет онлайн-международном издании - была опубликована весьма дискуссионная работа о текущих итогах в изучении плазменно-пылевых кристаллов. Статью подготовили один из патриархов физики плазмы, академик Вадим Н. Цытович, и группа его коллег из институтов России, Германии и Австралии, а итоги ее свелись к выводу об открытии структур, весьма похожих на неорганическую жизнь.[4]



Обмен информацией между спиральными структурами пылевой плазмы

В частности, исследователями установлено, что определенные условия среды, повсеместно обнаруживаемые в космосе, могут приводить к самообразованию спиралевидных структур из частиц пылевой плазмы. При этом в некоторых из таких структур отмечены так называемые бифуркации радиуса, т.е. резко изменяющиеся переходы от одного радиуса винта к другому и обратно, что предоставляет механизм для хранения информации в терминах длины и радиуса секций спирали. Более того, в некоторых компьютерных симуляциях спираль разделялась на две, эффективно воспроизводя саму себя. В других экспериментах две спирали вызвали структурные изменения друг в друге, а некоторые спирали даже демонстрировали эволюцию, с течением времени преобразуясь в более устойчивые структуры... Жизнь это или еще не жизнь, можно, конечно, спорить. Однако вряд ли подлежит сомнению, что эксперименты с эволюцией жидких плазменных кристаллов могут дать много подсказок к разгадке тайн о зарождении жизни «настоящей», биологической. Или, формулируя чуть иначе, о секретах передачи и накопления информации во вселенной.

- 
- [1] Roger N Shepard, «Geometrical approximations to the structure of musical pitch». *Psychological Review*, 1982 Jul, Vol 89(4) 305-333
  - [2] Geoff S. Baldwin, Nicholas J. Brooks, Rebecca E. Robson, Aaron Wynveen, Arach Goldar, Sergey Leikin, John M. Seddon, and Alexei A. Kornyshev. «DNA Double Helices Recognize Mutual Sequence Homology in a Protein Free Environment», *Journal of Physical Chemistry B*, 23 January 2008
  - [3] Mark Morris, Keven Uchida, Tuan Do. «A magnetic torsional wave near the Galactic centre traced by a 'double helix' nebula», *Nature* 440, 308-310 ( 16 March 2006)
  - [4] V N Tsyтович, G E Morfill, V E Fortov, N G Gusein-Zade, B A Klumov and S V Vladimirov. «From plasma crystals and helical structures towards inorganic living matter», *New Journal of Physics* 9 (2007) 263 ; В.Н.Цытович, «Развитие физических представлений о взаимодействии плазменных потоков и электростатических полей в пылевой плазме», *Успехи физических наук*, том 177, № 4, апрель 2007

## Волны чисел [73]

0 Тесная и неразрывная взаимосвязь между теорией информации и криптографией является ныне общеизвестным фактом. В каком-то смысле можно говорить, что обе эти науки на самом деле представляют собой разные грани одной и той же гигантской области исследований – теории кодирования. Просто в первом случае эта теория изучает коды для оптимальных методов передачи и хранения информации в условиях разного рода помех. А в случае криптографии решается противоположная задача – кодирование и накладывание умышленных помех таким образом, чтобы максимально затруднить доступ к информации для любой стороны, не владеющей «секретом» шифра.

1 Но имеется здесь и еще одна весьма глубокая, можно даже сказать фундаментальная взаимосвязь, пока что известная куда меньше. А именно, неразрывное единство между сугубо цифровой по своей сути теорией информации / криптографии с одной стороны, и физикой волн с другой. Это взаимопереплетение простирается куда шире и глубже, чем базовые для инфотехнологий преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую и обратно. Причем обозначился данный «цифро-волновой дуализм» информации, можно заметить, практически одновременно с рождением строгой математической теории для данной области.

2 Дело было в годы Второй мировой войны, когда электронщик и математик Клод Шеннон сначала, в 1940 году, защитил докторскую диссертацию по неожиданной теме «Алгебра для теоретической генетики», а несколько позже сумел уложить в общее русло строгой математической теории и науку о сохранении информации, и науку о ее шифровании. Дальнейшие же обстоятельства почему-то сложились так, что за полвека исследований чуть ли не все наиболее важные результаты относительно этих взаимосвязей были получены в одном месте – знаменитых Bell Labs, научно-исследовательском комплексе лабораторий американской индустрии связи.

3 Клод Шеннон начал работать в Bell Labs с 1941 года, когда из-за вступления США в войну исследования здесь были сосредоточены на радиотехнических системах наведения для ПВО, средствах защиты коммуникаций, криптографии и прочих подобных приложениях. Как известно, несколько лет интенсивной работы Шеннона над этими задачами в итоге привели его к созданию двух эпохальных трудов – «Математическая теория криптографии»[1] и «Математическая теория связи»[2]. Открытая публикация этих работ в первые послевоенные годы произвела подлинную революцию в науке об информации и ее кодировании, открыв эру систематического освоения цифровых инфотехнологий.

#

4 Публикации Шеннона оказались самым ярким, но, конечно, далеко не единственным важным итогом среди работ ученых и инженеров Bell Labs в военное время. Какие-то из этих трудов вскоре были рассекречены, другие же, носившие прикладной военный характер, так и остались на долгие годы неизвестными широкой публике, осев в секретных архивах. Об одной из таких работ за 1944 год, невзрачно озаглавленной «Финальный отчет по проекту С43» [3], стало известно лишь полвека спустя. Да и то не в США, а

в Европе, когда британская спецслужба GCHQ предала, наконец, гласности долго сохранявшуюся в тайне историю о создании ее сотрудниками методов «несекретного шифрования» на рубеже 1960-70-х годов [4]. Чуть позже те же самые вещи стали знамениты под названием «криптография с открытым ключом», когда их повторно и независимо изобрели несколько математиков открытого академического сообщества – Диффи, Хеллман, Райвест, Шамир и Эдлеман.

5 В секретном же сообществе англо-американских криптослужб первооткрывателем стал сотрудник GCHQ Джеймс Эллис, которого натолкнул на революционную идею тот самый военного времени отчет о «проекте C43». В работе Bell Labs описывалась новаторская и весьма остроумная идея засекречивания телефонной связи. А именно, предлагалось, чтобы

6 получатель маскировал речь отправителя путем добавления в линию шума. Сам получатель в процессе приема мог вычитать этот шум, поскольку он же его и добавлял, а следовательно знал, что тот собой представляет. Правда, существенные практические неудобства данной системы в те годы помешали ее реальному воплощению в жизнь, однако сама идея содержала несколько интересных особенностей.

Одна из них, к примеру, это забавный трюк с использованием инверсии речевого сигнала в качестве добавочного шума. Перевернутые с точностью до наоборот волны при наложении на речь отправителя не оставляют в линии никакого сигнала для наблюдателя-перехватчика, однако принятый

6 получателем сигнал остается нетронутым. (Уходя несколько в сторону от главной темы, можно напомнить, что на основе похожего принципа работает резистор Мебиуса с нулевым реактивным сопротивлением, где внутри сигналы помех в противофазе сами гасят друг друга, а снаружи устройство вообще никак себя не проявляет электромагнитными полями.)

Но вернемся к основной теме, волновым взаимодействиям и передаче информации. Суть системы Bell Labs была в том, что у получателя здесь нет никакого криптоключа или другого секрета, обычно необходимых для получения зашифрованного послания. Единственное, что требуется, это

7 чтобы получатель тоже – наряду с отправителем – принимал участие в организации защищенного канала связи. И тогда неприятель-перехватчик, даже зная все об устройстве этой системы, не сможет получить доступа к засекреченной информации. Именно эту простую и одновременно великую идею, но уже совсем на другом уровне математических формул и компьютерных операций над очень большими числами в 1970-е годы практически реализовали изобретатели криптографии с открытым ключом.

##

Спустя еще двадцать лет старая идея об управляемых волновых взаимодействиях снова вернулась на самые передовые рубежи современной криптографии. И что интересно, опять с подачи Bell Labs, но теперь уже в контексте удивительных технологий квантовых компьютеров. Эти устройства с принципиально новой конструкцией на основе квантовых свойств материи сулят грандиозный прорыв в решении сложнейших

8 вычислительных задач, включая взлом криптосхем с открытым ключом. Но пока, впрочем, такие успехи проходят исключительно по разряду гипотетических, поскольку реально удается сконструировать лишь игрушечные модели, в целом подтверждающие концепцию. Создание же настоящего компьютера на основе больших квантовых регистров, необходимых для решения серьезных задач, сопряжено с гигантскими техническими трудностями.

По этой причине очень многие из работающих в данной области ученых пишут алгоритмы и программы для устройств, которых, можно сказать, пока еще не существует в действительности. Тем не менее, даже на бумаге полученные исследователями результаты выглядят очень впечатляюще. Два наиболее знаменитых достижения из этого ряда появились в середине 1990-х годов благодаря ученым Bell Labs. Алгоритм Питера Шора [5] способен раскладывать огромные числа на множители и таким образом вскрывать шифр RSA в миллиарды раз быстрее, чем методы традиционных компьютеров. Другой же квантовый алгоритм, или поисковая машина Лова Гровера [6], теоретически демонстрирует возможность обследовать все закоулки Интернета примерно за полчаса.

Но прежде, чем познакомиться поближе с необычной волновой природой этих алгоритмов, понадобится хотя бы в общих чертах понять суть принципиальных отличий в устройстве компьютеров квантовых и обычных. Потому что уменьшение элементов памяти или логики вычислителя до размеров молекул, ионов и электронов – это далеко не все. И даже не самое главное. Куда важнее, что эти элементы работают по законам квантовой, а не классической физики. Для хранения бита информации, «0» или «1», можно использовать, скажем, квантованные состояния спина электрона, Down и Up. Как и в обычном компьютере, эти биты тоже можно переключать, то есть изменять состояние «вниз» (0) на состояние «вверх» (1), просто прикладывая к квантовой системе немного энергии.

При этом существенно, что согласно правилам квантовой механики, будет изменяться не состояние спина, а вероятность наблюдения спина в том или ином положении. Можно сказать, частица находится одновременно в обоих состояниях спина – скажем, на 70 процентов «вверх» и на 30 процентов «вниз». Такая суперпозиция состояний с определенными вероятностями сохраняется до тех пор, пока не произведено измерение. И лишь операция измерения, или «наблюдения», заставляет частицу однозначно выбрать одно из двух возможных состояний. Поскольку электрон (ион, атом, иная частица) может пребывать в двух состояниях сразу, то набор таких квантовых битов, или кубитов – это далеко не обычный компьютерный регистр, а нечто совершенно новое. Здесь вычисления можно осуществлять уже не последовательно, а, в некотором смысле, обсчитывать все сразу и одновременно.

###

Естественным следствием данной концепции является то, что квантовые компьютеры в принципе могут работать намного быстрее компьютеров классических и вполне способны решать те задачи, к которым обычные компьютеры и подступиться пока не могут. В частности, математик из AT&T (ранее Bell) Labs Питер Шор в 1994 году открыл квантовый алгоритм факторизации, позволяющий раскладывать большие числа на простые множители почти с такой же скоростью, какая свойственна перемножению чисел. Для классического компьютера, надо подчеркнуть, сложность задач перемножения и факторизации различается самым радикальным образом, на чем и построена стойкость RSA, известной криптосхемы с открытым ключом. Алгоритм же Шора для квантового компьютера чрезвычайно остроумно оперирует «волнами вероятностей», проходящими через кубиты регистра, и как бы сводит математическую задачу факторизации к задаче физической – определению периодичности кристаллической решетки.



*d* По сути дела, здесь был использован известный в теории чисел факт, позволяющий преобразовывать проблему факторизации в оценку периодичности длинной последовательности. Можно говорить, что метод Шора работает по тому же принципу, который позволяет минералогам с помощью рентгеновской дифракции отыскивать периодичность в кристаллической решетке неизвестной твердой субстанции. Периодическая структура решетки позволяет распространяться в любом заданном направлении лишь тому излучению, что имеет вполне определенные длины волн. Аналогичным образом и в алгоритме Шора квантовая система кубитов в состоянии суперпозиции позволяет «распространяться» лишь вполне определенным волноподобным вероятностям, связанным с квантовыми состояниями. Все же остальные вероятности затухают и исчезают. Затем алгоритм вычисляет эти «длины волн», оценивает периодичность и в конечном счете отыскивает множители числа. Делая это быстрее всех из известных алгоритмов факторизации.

*e* Еще один интереснейший алгоритм более общего назначения был открыт Ловом Гровером, другим исследователем из Bell Labs, в 1996 году. Алгоритм Гровера использует принципы квантового компьютера для очень быстрого поиска в неупорядоченных базах данных вроде Интернета. Здесь, естественно, также используется волновая природа вероятностей у состояний суперпозиции. Сам Гровер описывает суть алгоритма как «бросание камешков в пруд таким способом, чтобы волны от них накладывались и взаимодействовали вполне определенным образом». Алгоритм Гровера устанавливает сразу несколько траекторий вычислений, чтобы волны результатов, получаемых в квантовой системе одновременно, начали интерферировать друг с другом. Тогда нежелательные ответы сами себя гасят, а верные ответы, накладываясь, усиливают друг друга. В некотором смысле, квантовый компьютер – это «обратное вычисление»: предполагается, что компьютеру уже известны все возможные ответы, и алгоритму остается лишь отыскать верный.

*f* Описанные нюансы квантовых вычислений представляется крайне важными по такой причине. Квантовый компьютер по сути своей функционирует на основе необычных, но фундаментальных свойств частиц, образующих материю. Иначе говоря, это устройство в контролируемых условиях моделирует информационные процессы, лежащие, вероятно, в основе собственно материи, ее поведения и известных свойств. В частности, и памяти материи. Но извлечение информации с помощью интерференции волн – это принцип, лежащий в основе голографии и голографических средств хранения данных. Поэтому прежде, чем разбираться с памятью квантовых компьютеров, разумно для начала познакомиться с основами и приложениями современных голографических технологий.

- 
- [1] C. E. Shannon, «Communication Theory of Secrecy Systems», Bell System Technical Journal, vol.28(4), pp 656-715, 1949.
  - [2] C. E. Shannon, «A mathematical theory of communication,» Bell System Technical Journal, vol. 27, pp. 379-423 and 623-656, July and October, 1948
  - [3] «Final Report on Project C43», Bell Laboratories, October 1944, p. 23
  - [4] J H Ellis, «The Story Of Non-Secret Encryption», 1987 (Open publication by CESG in Dec 1997)
  - [5] P W Shor, «Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer», 1994. [arXiv:quant-ph/9508027]
  - [6] Grover L.K. «A fast quantum mechanical algorithm for database search», Proceedings, 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing, May 1996, p. 212 [arXiv:quant-ph/9605043]

# [8♠] Голография на жидких кристаллах

## Полная запись [74]

Изобретатель голографии Деннис Габор (1900-1979) родился в том же году и в той же стране Австро-Венгрии, что и Вольфганг Паули. Правда, родились они в разных столицах - Паули в Вене, Габор в Будапеште - и с разницей примерно в 40 дней. В дальнейшем, для получения качественного научного образования, молодые люди выбрали университеты Германии и там же остались работать. Однако, когда к власти в стране пришли нацисты, оба были вынуждены эмигрировать. Очень похожую судьбу, как известно, в ту пору пришлось разделить множеству выдающихся ученых Европы. Но если большинству из них, включая Паули, в конечном счете пришлось уехать подальше от войны, в Америку, то для Денниса Габора новым домом стала Великобритания. Так что на всю свою последующую жизнь он стал британским ученым венгерского происхождения.

Для описания одного из главных талантов Габора как исследователя в английском языке имеется отдельное труднопереводимое слово *serendipity*. В других языках его смысл приходится разворачивать в целую фразу типа «интуитивная прозорливость, позволяющая делать открытия, неожиданные для самого первооткрывателя». Например, еще в 1920-е годы при поисках оптимальной конструкции одной газоразрядной лампы, кадмиевой, Габор изобрел существенно иную лампу, ртутную, получившую широчайшее распространение. А еще через два десятка лет, работая над довольно специфической задачей, как повысить разрешающую способность электронного микроскопа, ученый придумал новый и весьма оригинальный метод фотосъемки, которому дал название голография - от греческих слов «холос» и «графе», т.е. «полная запись».[1]

Принципиальная особенность нового метода в том, что голография использует волновые свойства света, а не корпускулярные, как в традиционной фотографии. Обычные фотоснимки фиксируют лишь интенсивность света, рассеиваемого фотографируемым объектом. Для передачи же изображения во всей полноте нужно регистрировать не только интенсивность, т.е. амплитуду, но и фазу отражаемых объектами волн. Однако фиксировать сдвиги волновых фаз можно лишь относительно чего-то, а в обычной фотографии сравнить их просто не с чем. Габор же придумал способ, как это можно сделать, добавив в процесс съемки так называемый когерентный фон, то есть эталонные волны для регистрации фазы. Благодаря наложению «предметной волны» от объекта с когерентным фоном, или «опорной волной», возникает интерференционная картина, которая и фиксируется на фоточувствительной пластине.

Получившаяся при такой съемке картинка на пластине визуально не имеет ничего общего с тем, что фотографировалось, представляя собой весьма хаотичное чередование темных и светлых полос, крапинок и пятен. Но если эту интерференционную картину осветить эталонным пучком когерентного фона, то происходит маленькое чудо - волна рассеянного предметом света восстанавливается и воспроизводит полное изображение снятого объекта. Эта полнота дает возможность увидеть предмет во всех подробностях, включая объемные очертания, глубины резкости и эффекты параллакса, т.е. появление загороженных прежде деталей при смещении точки обзора по горизонтали или вертикали.

4 Столь замечательные результаты, правда, начали стабильно получать лишь лет через двадцать, к середине 1960-х. В конце же 1940-х годов открытая Габором голография явно опередила свое время. С самого начала было ясно, что качество голографического изображения напрямую зависит от

4 высокой степени когерентности волн, формирующих интерференционную картину. Иначе говоря, было крайне желательно, чтобы частоты предметных волн, отраженных от объекта, с высокой точностью соответствовали частотам опорной волны фона. Но источниками стабильного когерентного излучения наука в ту пору еще не располагала, поскольку лазеры начнут появляться десятком лет позже.

5 Голограммы, полученные Габором с помощью ртутной лампы, хотя и подтверждали в целом концепцию, однако имели чрезвычайно низкое качество и для реального применения явно не годились. Несколько лет оживленных экспериментов вокруг явно перспективной идеи закончились по сути ничем, и к 1955 году интерес к голографии пропал. Время технологии еще не пришло. Так это представлялось, точнее говоря, для

5 ученых открытого научного сообщества. С точки же зрения секретных военных проектов картина выглядела существенно иначе. Базовые принципы голографии абсолютно универсальны и справедливы для волн любой частоты. И если работа с когерентными частотами в диапазонах оптического или тем более электронного излучения поначалу была связана с гигантскими трудностями, то из этого вовсе не следовали такие же проблемы для других электромагнитных волн.

6 Для тех волн, в частности, что широко использовались в радиосвязи и, самое главное, в радиолокации. Если длина электронных волн примерно в 100 000 раз короче световых, то длина электромагнитных волн, используемых в радиолокации, в свою очередь примерно в 100 000 раз превосходит длину волн света. По этой причине уже в 1950-е годы на основе того же голографического принципа в США сумели успешно создать радиолокатор с синтезированной (когерентной) антенной, размещаемый на борту самолета и дающий качественные снимки местности в условиях плохой оптической видимости. По сути дела, новая технология «боковой радиолокации» представляла собой двумерную голографию для микроволнового диапазона частот, аналогичную электронной голографии Габора. Но для большинства ученых этот секретный военный проект долгое время оставался неизвестным.

7 Однако к 1963 году сразу в нескольких точках планеты были независимо получены очень важные новые результаты, положившие начало не просто возрождению, а взрывному развитию голографии. Самым знаменитым, вероятно, событием из этого ряда следует считать публикации [2] Эммета Лейта и Юриса Упатниекса, сообщивших об успешном создании ими лазерной монохромной голограммы в Мичиганском университете. Успех этой группы был обусловлен не только появлением лазера, но также многолетней работой Лейта в составе секретного проекта, разработавшего радиолокатор с когерентной антенной. Поэтому далеко не случайность, что несколько идей, впервые примененных в военной радиолокации, впоследствии были использованы в лазерной голографии Лейта-Упатниекса. Наиболее существенной из них стала двухлучевая схема записи, в которой исходный пучок лазера расщепляется делителем на два когерентных – опорный и предметный пучки, сходящиеся затем под углом благодаря зеркалам. В исходной схеме Габора оба источника волн находились на одной оси.

##

8 Другой важнейший результат был получен в СССР, где ленинградскому физику Юрию Денисюку (1927-2006) удалось разработать собственную – цветную – технологию голографии [3], существенно отличающуюся и от габоровской, и от американской. Абсолютно иной подход советского изобретателя объяснялся тем, что он просто ничего не знал о подобных разработках за рубежом и развивал идеи волновой фотографии совершенно самостоятельно. В основу своей конструкции заложив интересные, но в ту пору большинством давно уже забытые идеи французского физика Габриэля Липпмана (1845-1921).

9 В 1890-е годы этот ученый разработал оригинальный метод цветной фотографии на основе обычной фотоэмульсии черно-белых снимков и грамотного использования интерференции света. За свою технологию Липпман в 1908 году был удостоен Нобелевской премии, однако последующее развитие фотографии пошло по направлению более практических многоцветных эмульсий. Так что интерференционный метод, можно сказать, практически канул в забвение. Пока о нем не вспомнил Денисюк. Главная хитрость метода Липпмана состояла в том, чтобы использовать не плоский-двумерный, а объемный, или как еще говорят толстый слой фотоэмульсии. Благодаря ему фотография может сначала регистрировать, а затем и воспроизводить не только информацию об интенсивности, но и о спектральном составе волн света. Иначе говоря, передавать не только степень яркости каждого из участков картинка, но и их цветовую окраску.

а Достигал этого Липпман тем, что с помощью ртути подложку каждой фотографии делал зеркальной. Так что в объемном слое фотоэмульсии фиксировалась – в виде параллельных слоев разной толщины – интерференция волн, рассеянных объектом и отраженных зеркалом подложки. А Юрий Денисюк, в свою очередь, предположил, что если вместо отраженных зеркалом волн использовать более регулярный монохромный фон, то, быть может, удастся зафиксировать не только амплитуду и спектральный состав, но еще и фазовые сдвиги волн...

б В оптической лаборатории, где работал Денисюк, лазера в ту пору еще не было, поэтому и ему, как когда-то Габору, пришлось использовать не очень подходящую лампу на парах ртути. Но и этого источника хватило, чтобы экспериментами убедительно подтвердить собственно идею – волновая фотография в объемном слое, который при съемке подсвечивается с обратной стороны когерентным светом, действительно могла воспроизводить не просто цветное, но полное 3-мерное изображение объекта. И что существенно, воспроизводится голограмма Денисюка в обычном белом свете, а не при освещении снимка особой опорной волной лазера, как в системе Эммета-Упатниекса на основе плоской или «тонкой» фотоэмульсии.

###

Еще одна очень важная работа теоретического характера, опубликованная в тот же период совершенно независимо от Денисюка, но при этом принципиально расширявшая возможности голограмм в объемных 3-мерных средах (толстых эмульсиях, кристаллах и т.д.), была проделана голландским ученым Питером ван Херденом. Работавший в исследовательском центре Polaroid Research Labs, шт. Массачусетс, США, ван Херден занимался поиском новых материалов и технологий, перспективных с точки зрения эффективного хранения информации. Проанализировав возможности объемных (или глубоких) голограмм для записи и хранения данных, ученый отметил целый ряд важнейших преимуществ голографической памяти перед уже имевшимися в то время магнитными, полупроводниковыми и другими системами.[4]

В частности, расчеты ван Хердена продемонстрировали возможности чрезвычайно высокой плотности записи данных в голограммах по сравнению с более традиционными средами. Кроме того, поскольку каждая из единиц информации записывается в голограмме в виде интерференционной картины, распределенной по всему объему регистрирующей среды, метод предоставляет очень высокую помехоустойчивость хранения данных. Иначе говоря, частичные потери изображения в такой среде не влекут за собой потерю всей единицы информации. Ведь любая часть голограммы, даже самая малая, способна воспроизводить полное изображение, хотя и с потерей в разрешении.

И, наконец, еще одно очень важное из отмеченных ван Херденом свойств голографической памяти – это возможность использования полного информационного ресурса объемной регистрирующей среды за счет наложенной записи многих изображений. Это можно сделать, используя для каждой снимаемой картины свою собственную пространственно-частотную несущую волну, подобно тому, как в телевизионном кабеле по множеству каналов одновременно передается большое число картинок с помощью различных несущих частот. Особенности голографической записи позволяют при считывании информации избирательно выделить и восстановить каждую из картин с помощью своей опорной волны.

Внятные и четко обоснованные идеи ван Хердена о свойствах объемных голограмм и о создании на их основе существенно нового типа памяти были и остаются базовым фундаментом для огромного числа самых разных проектов, пытающихся внедрить устройства голографической памяти. Эти проекты начались еще в 1960-е годы, т.е. задолго до появления коммерчески куда более успешной оптической памяти на компакт-дисках. Однако по сию пору, несмотря на очень интенсивные и почти уже полувековые усилия, трехмерная голографическая память так и не смогла составить сколь-нибудь ощутимую конкуренцию более традиционным микроэлектронным, магнитным и оптическим технологиям. Главной причиной тому является отсутствие подходящего материала, то есть объемной регистрирующей среды с параметрами, которые обеспечили бы одновременно удобную, дешевую и надежную голографическую память. Пока что все эти параметры удается достигать лишь по частям.

---

[1] Gabor D. «A new microscopic principle», Nature, 1948, V.161, pp.777-778

[2] Leith, E.N.; Upatnieks, J. «Reconstructed wavefronts and communication theory». J. of the Optical Society of America. 1962, V 52: pp.1123-1130; «Wavefront reconstruction with diffused illumination and three-dimensional objects», J. of the Optical Society of America, 1964, V. 54, p.1295.

[3] Denisyuk Y.N. «On the reflection of optical properties of an object in a wave field of light scattered by it». Doklady Akademii Nauk SSSR (1962) 144: 1275-1278

[4] Van Heerden P.J. «Theory of optical information storage in solids», App. Optics 1963. V. 2, 393-400

## Между жидкостью и кристаллом [75]

0 В тот же 1879 год, когда родился Альберт Эйнштейн, в этот мир пришел еще один будущий физик-теоретик, швед Карл Вильгельм Озеен. Историкам науки Озеен известен своей теорией упругости для жидких кристаллов и заметными работами по гидродинамике. Но наиболее он знаменит, вероятно, чрезвычайной влиятельностью в Нобелевском комитете, выбиравшем лауреатов в области физики. В качестве важного чиновника от науки этому ученому довелось сыграть весьма существенную роль как в биографии Эйнштейна, так и в жизни Вольфганга Паули. Правда, с диаметрально противоположными результатами.

1 Именно Озеен был тем человеком, кто сумел так предложить кандидатуру Эйнштейна, что ему наконец присудили Нобелевскую премию – за 1921 год. Не как автору «сомнительной» для консерваторов теории относительности, а за объяснение природы фотоэффекта. С другой стороны, тот же Карл Озеен всегда и в самой категоричной форме возражал против любых выдвижений на премию Вольфганга Паули. Причем хорошо известно, что неприязнь двух ученых друг к другу была взаимной.

2 В самом начале 1930-х годов, когда Нобелевский комитет никак не мог решить, давать ли премии пионерам квантовой механики Гейзенбергу и Шредингеру, острый на язык Паули объяснил это тем, что в Швеции просто нет физиков-теоретиков, способных понять важность сделанных открытий. Подобная колкость, скорее всего, не могла не задеть Озеена, который на всю оставшуюся жизнь стал крайне пренебрежительно отзываться о вкладе самого Паули в квантовую механику, называя его работы «метафизикой». Так что в итоге удостоить ученого давно заслуженной им награды стало возможным лишь после смерти Озеена в 1944 году. И дабы этот странный треугольник замкнулся красиво, Нобелевская премия за 1945 год в области физики была присуждена Вольфгангу Паули по представлению Альберта Эйнштейна.

3 Применять к истории науки сослагательное наклонение – дело, как известно, довольно безнадежное, да и ни к чему по сути не ведущее. Кроме, разве что, сюжетов для фантастических историй на тему вроде такой: «Что стало бы с наукой, испытывай Паули и Озеен друг к другу примерно такие же симпатию и интерес, какие были у них, скажем, к Эйнштейну». Принципиально важными для развития этой фантазии представляются два момента. Во-первых, Озеен был весьма продвинутым и знающим специалистом в теории гидродинамики – той области, где Эйнштейн и Паули, были, мягко говоря, совсем не сильны. А во-вторых, Озеен глубоко и весьма плодотворно изучал физику жидких кристаллов примерно за 30-40 лет до того, как важность этих необычных веществ будет, наконец, понята всеми. Иначе говоря, если бы ученые масштаба Эйнштейна и Паули заинтересовались физикой жидких кристаллов в начале 1930-х, примерно тогда же, когда и Озеен, история физики XX века могла бы выглядеть заметно иначе.

#

4 Чрезвычайно важным узлом в контексте этой фантазии оказывается год 1888. Для одних эта дата памятна знаменитыми опытами Генриха Герца, который впервые сумел наглядно и убедительно продемонстрировать

предсказанные теорией электромагнитные волны – построив аппарат для приема и передачи волновых радиосигналов. Для кого-то еще – это год, в который Джордж Истман зарегистрировал торговую марку Kodak и защитил патентом свою фотокамеру на основе рулона пленки. Благодаря удобствам таких аппаратов фотография стала быстро превращаться из узкопрофессионального занятия в популярное массовое хобби. Но мало кто ныне вспоминает, что в этот же год австрийским ботаником и химиком Фридрихом Райнитцером было открыто новое, жидко-кристаллическое состояние вещества. В отличие от беспроводной связи и фотографии, жидким кристаллам пришлось ожидать должного к себе внимания еще почти 80 лет. Оставаясь все эти годы хотя и занятым, но бесполезным на практике разделом науки, интересным лишь для энтузиастов-одиночек и ценителей необычного.

5 Эта ситуация переменялась, причем весьма резко, лишь к середине 1960-х, когда вместе с бурным развитием микроэлектроники и общей миниатюризацией аппаратуры остро потребовались средства отображения информации, потребляющие как можно меньше энергии. Вот тут-то и вспомнили о жидких кристаллах, найдя применение их, как теперь выяснилось, чрезвычайно полезным физическим особенностям – быстро изменять оптические свойства при совсем небольших приложениях энергии. Целый букет важных исследований и результатов мощно переместил жидкие кристаллы в фокус массового научного интереса, а вскоре и интенсивной промышленной разработки направления. Ну а самоочевидный факт, что рассвет эпохи жидких кристаллов пришелся в точности на те же годы, что и ключевые открытия в области практической голографии, т.е. десятилетие в интервале 1963-1973 годов, если кем-то и был замечен, то лишь в качестве случайного совпадения.

6 Однако при желании в этом примечательном совпадении можно углядеть и весьма неслучайные черты. Для чего понадобится вернуться на 80 лет назад, к уже известным событиям в истории науки и техники, происходившим на рубеже 1880-1890 годов. И дабы картина соответствий проявилась более выпукло, можно непосредственно наложить открытия того периода на открытия 1960-х. По такой примерно схеме. (1a) Генрих Герц успешно применяет гипотетические в ту пору электромагнитные волны для практической радиосвязи. (1b) Лейт и Упатниекс с успехом используют идеи радиолокации, работающей на основе волновой природы «герцевых» радиосигналов, для создания оптической голограммы при помощи когерентных волн лазера.

7 Далее примерно в таком же духе. (2a) Пионер фотографии Истман создает удобную камеру Kodak с рулоном покрытой фотоэмульсией пленки – для съемки множества кадров без смены носителя-фотопластинки. (2b) Исследователь фототехнической фирмы Polaroid ван Херден разрабатывает фундамент для применения 3-мерных объемных сред – кристаллов, толстых эмульсий – в качестве голографической памяти для более продвинутых и емких систем хранения информации, в одном объеме содержащих множество снимков. Еще одна, третья, очень важная параллель. (3a) Габриэль Липпман изобретает оригинальный метод цветной фотографии, регистрирующий в толстой эмульсии интерференцию световых волн и не требующий цветных фотоматериалов. (3b) Юрий Денисюк на основе метода Липпмана изобретает собственную технологию цветной голографии – без какой-либо опоры на более раннее, но неизвестное ему изобретение Денниса Габора.

Ну и, наконец, жидкие кристаллы. (4a) Ф. Райнитцер, исследуя производные холестерина – кристаллы холестерилбензоата и холестерилацетата – обнаружил у них при разогреве два разных жидких состояния. Одно, более горячее, в виде обычной прозрачной жидкости, а другое – промежуточное – в виде жидкости мутно-белой, т.е. необычно сильно рассеивающей свет. Кристаллограф Отто Леман, по просьбе Райнитцера исследовавший эту странную фазу жидкости, обнаружил в ней характерные свойства упорядоченных кристаллов, вроде анизотропии и способности к поляризации света, поэтому назвал вещество в таком состоянии жидким кристаллом. (4b) Богатые способности молекул ЖК по-разному отражать и пропускать свет под действием электромагнитных, химических, тепловых и других воздействий по достоинству были оценены лишь 80 лет спустя. На их основе ученые создали принципиально новые индикаторы и дисплеи для отображения информации.

Логика приведенной здесь схемы соответствий станет более понятна, если вспомнить, что очень перспективная по многим параметрам голографическая память за долгие годы развития так и не смогла получить широкого распространения. Главным образом, из-за отсутствия подходящего материала в качестве носителя для хранения голограмм. Ученые-исследователи, перепробовав в качестве кандидатов самые разные вещества, пока так и не сумели найти оптимальное. Но при этом по самым разным причинам то и дело вынуждены возвращаться к жидким кристаллам, находящим широкое применение не только как средство отображения, но и как средство хранения информации. Иначе говоря, ЖК оказались одним из наиболее интересных для голографических экспериментов материалов. А это не может не наводить на мысль о какой-то очень глубокой и пока еще не до конца понятой связи между этими вещами.

Среди огромного, исчисляемого уже сотнями тысяч, числа разных жидких кристаллов, известных современной науке, наибольший интерес – здесь, во всяком случае – представляет так называемый холестерический тип, открытый в самых первых опытах Райнитцера. Название мало о чем говорящее, поскольку просто пошло от производных холестерина, в которых жидкокристаллическая фаза была обнаружена. Куда более содержательным оказывается другое название «хиральная фаза». Указывающая как на то, что вещество в этом состоянии демонстрирует право-лево-рукую асимметрию в свойствах, так и на то, что порождается оно только хиральными молекулами, имеющими правую и левую формы.

Главная особенность хиральных ЖК – это образование в их слоистой структуре так называемой холестерической спирали, т.е. винтовой структуры в повороте слоев с шагом спирали порядка 300 нанометров, что примерно соответствует длинам волн видимого света. Такая молекулярная структура обеспечивает уникальные оптические свойства. Хиральный ЖК действует на свет как естественный интерференционный фильтр, т.е. падающие световые лучи испытывают избирательное отражение в зависимости от длины волны. При этом шаг винтовой спирали сильно зависит от внешних воздействий. При изменении, к примеру, температуры или электрического поля, меняется расстояние между молекулярными слоями, соответственно изменяется длина волны максимального рассеяния, т.е. цвет вещества. Кроме того, селективно рассеивающее свет состояние может долго сохраняться и после снятия поля, а это означает, что холестерики подходят для создания ячеек памяти.



###

Еще одна чрезвычайно важная особенность жидких кристаллов, много обсуждаемая исследующими их учеными, но пока так и не попавшая в учебники – это тесная связь ЖК с биологией. Основным компонентом живых организмов является вода, а упорядоченные органические растворы – это и есть жидкие кристаллы. c Функционирование клеточных мембран и молекул ДНК, передача нервных импульсов и работа мышц, жизнь вирусов и вырабатываемая пауком паутина – все это процессы, с точки зрения физики протекающие в жидкокристаллической фазе. Со всеми присущими этой фазе особенностями – склонностью к самоорганизации при сохранении высокой молекулярной подвижности.

Особого интереса заслуживают такие формы жидкого кристалла, как биологические мембраны и клеточные мембраны. Образующие их молекулы, фосфолипиды, расположены перпендикулярно к поверхности мембраны, при этом сама мембрана демонстрирует упругое поведение и d допускает эластичные растяжения или сжатия. Молекулы, образующие мембрану, могут легко перемешиваться, однако имеют тенденцию не покидать мембрану из-за высоких энергозатрат на такого рода процессы. Но при этом липидные молекулы могут регулярно перескакивать с одной стороны мембраны на другую.

В этом кратком описании структуры и физики биологической мембраны довольно сложно не увидеть очевидное сходство с конструируемой здесь физикой космоса как мембраны. Иначе говоря, структура и работа самой мельчайшей живой единицы – биологической клетки – в общих чертах e словно воспроизводит жизнь вселенной. С одной стороны, это само собой наводит на мысль, что и вселенная может быть единым живым организмом на основе жидких кристаллов. А с другой стороны – здесь перед нами, возможно, предстает своеобразная иллюстрация «голографического принципа», когда даже самый мелкий фрагмент целого, биоклетка, отражает суть этого целого, то есть мироздания.

Впрочем, к столь глобальным обобщениям переходить пока рановато. Но важно подчеркнуть глубокие связи общего характера между жидкими кристаллами и голографией. И заодно отметить явное проявление этих связей – в прогрессе технологий компьютерно генерируемой голографии, а точнее, в создании голографических дисплеев на основе жидких кристаллов. Эта задача по сию пору представляет гигантскую техническую f проблему, поскольку идеальный дисплей для отображения голограмм, динамически генерируемых компьютером, должен состоять из пикселей с размерами меньше длины световой волны. И при этом пиксели должны допускать настройку фазы и яркости сигнала. Подобного рода дисплеи принято именовать оптикой с фазированной решеткой, однако для практического воплощения красивой идеи нынешний уровень нанотехнологий пока недостаточен.

---

## Между оптикой и акустикой [76]

0 Не секрет, что многие важнейшие открытия в науке были сделаны на стыке двух или нескольких, практически никак не связанных до этого направлений. Однако среди узлов, сцепляющих разные ветви научного прогресса в единое целое, хватает и таких, которые лишь смутно обозначились, однако реально во что-либо существенное так и не воплотились. Иначе говоря все предпосылки для нового эволюционного этапа вроде бы сформированы и готовы к объединению, но... Что-то вдруг не склеивается, как говорится, и вся конструкция рассыпается на многие десятилетия. Или даже века. Наглядный тому пример могут дать три важных для науки события, происходившие практически одновременно и, на первый взгляд, абсолютно независимо друг от друга в 1880-1881 годах.

1 Летом 1880 шотландский изобретатель-самоучка Александр Грэхем Белл (1847-1922), в ту пору работавший в Канаде и США, создает свой первый «фотофон» [1] – беспроводной телефон, в котором речь передавалась с помощью светового луча, модулированного звуками голоса. В тот же год, но только в Британии, другой шотландец Уильям Томсон на основе физики вихревых колец придумывает новаторскую модель эфира как вихревой губки, то есть среды с гранулированной упругой структурой. Еще через несколько месяцев, летом 1881 норвежец Карл Бьеркнес с большим успехом представляет в Париже свою гидродинамическую модель электромагнетизма, подкрепленную как внятными теоретическими выкладками, так и эффектными опытами-демонстрациями. Тогда же, в 1881, Белл успешно применяет свой фотофон на практике – для связи между зданиями, расположенными на расстоянии порядка 200 метров друг от друга...

2 Кроме одновременности, каких-либо осмысленных связей между упомянутыми событиями для истории науки по сию пору не существует. Единственное, пожалуй, что их все объединяет, это гигантское несоответствие в оценках важности работы по мнению самих авторов и со стороны научного сообщества. Белл, в частности, считал фотофон важнейшим изобретением своей жизни, намного более значительным, чем его же телефон, принесший изобретателю мировую славу. Но если телефон был оценен и востребован практически сразу, то смысл и полезность беспроводного устройства опто-акустической связи оставались непонятыми еще очень долгое время. О бесславной судьбе, выпавшей на долю очень важной для самого Томсона модели эфира как вихревой губки, а также о быстром забвении теории Бьеркнеса, составлявшей для скандинавского затворника дело всей жизни, уже было рассказано ранее. Принципиальный для развития физики узел, другими словами, завязать не удалось.

3 Сегодня, если фотофон Белла кто-то вдруг и вспоминает, то почти всегда в контексте оптоволоконной телефонной связи. Как правило, демонстрируя этим примером, что важная современная технология может опираться в своей основе на древнее изобретение, сильно опередившее эпоху и остававшееся невостребованным почти сотню лет. Куда реже упоминают Белла в качестве родоначальника наук оптоакустики и акустооптики, с разных сторон изучающих воздействие света и звука друг на друга, а также тонкие нюансы их совместных взаимодействий с материей. Практически все базовые элементы белловского фотофона – зеркала, линзы,

чувствительные к колебаниями света и звука кристаллы – по сию пору составляют основу в арсенале оптоакустических экспериментов и исследований. Область практических приложений этой науки сегодня очень обширна, но в данном случае особый интерес представляет направление под названием оптический компьютер.

#

4 Суть этого устройства в двух словах сводят к такой технологии, где основные обработка и передача информации происходят не в электронных, а в оптических цепях и схемах. Носителями же информации являются не потоки заряженных частиц-электронов, а, соответственно, пучки и волны света. К сожалению, выбранный здесь термин – «оптический компьютер» – не очень удачен, ибо искусственно ограничивает понимание сути данного предмета. Компьютерами по традиции называют устройства для решения вычислительных задач, то есть, грубо говоря, мощные и сильно продвинувшиеся в своем развитии арифмометры. Которым лишь на определенных этапах их эволюции начали находить и другие полезные приложения, вроде обеспечения коммуникаций, обработки изображений, поддержки баз данных и так далее.

5 Оптический же компьютер, напротив, по самой природе своей гораздо лучше подходит именно для этих задач. А математические вычисления – функции арифмометра – обеспечивает, так сказать, в качестве дополнительного бонуса. По мере того, как наука приходила к пониманию, что искусственный интеллект – это не склад истин и рецептов на все случаи жизни, а некая универсальная система для связей и сравнений всевозможных объектов и событий, стало ясно и то, что оптический компьютер гораздо ближе к этой концепции, чем электронная вычислительная машина. Множество разнообразных задач – таких как распознавание образов и машинное зрение, спектральный анализ сигналов и связь, навигация в пространстве и быстрый поиск в базах данных – с помощью оптических процессоров удается решать эффективнее и, если угодно, более естественно, чем в кремниевых микросхемах.

6 Благодаря принципиальным физическим отличиям фотонов от электронов, свет обладает многочисленными преимуществами с точки зрения передачи и обработки информации. Более отчетливо выраженные волновые свойства, а также отсутствие у фотона электрического заряда и массы покоя предоставляют оптическим компьютерам практически безграничный потенциал в развитии. Возможности одновременной и параллельной работы с различными длинами волн, с их разной поляризацией и с очень высокой опорной частотой излучения обеспечивают фантастические скорости передачи и плотность информации. Прозрачные среды применяются для высокоэффективного хранения данных, их обработки и коммутации. Более того, в прозрачной среде информацию, закодированную оптическим лучом, можно обрабатывать вообще без затрат энергии.

7 Идеологически чистый, как иногда выражаются, оптический компьютер подразумевает конструкцию, вообще лишенную каких-либо электропроводов и вспомогательных электронных устройств. Но увы, как показала практика, при нынешнем уровне технологий и материалов рассчитывать на чисто оптические решения пока не приходится. Поэтому и в военной технике – главной области применения таких устройств – и в прочих сферах, где весьма недешевые оптические компьютеры получают распространение, наиболее развиты оптоэлектронные подходы, оптимально

комбинирующие преимущества обеих технологий в одном аппарате. Однако имеется и существенно иное, тоже весьма активно развиваемое направление – под названием оптоакустическая обработка информации.

##

8 С точки зрения идеологической чистоты оптоакустика, или иначе акустооптика, представляется куда более приемлемым решением. Точнее даже сказать естественным, коль скоро имеется возможность обходиться без электроники и ее проводов. Несколько необычное одновременное применение сразу двух терминов объясняется существенными для специалистов нюансами. Оптоакустика, по определению, занимается теми явлениями, где свет воздействует на акустические характеристики среды. А в акустооптике, наоборот, изучаются эффекты воздействия интенсивного (ультра-) звука на поведение света. Для неспециалистов важна лишь общая физика взаимодействия оптических и акустических волн, поэтому на порядок слов можно не обращать внимания.

9 Как показали исследования, физика таких взаимодействий весьма богата разнообразными эффектами. С помощью ультразвука, скажем, можно управлять рассеиванием и преломлением света – это называется акустооптическая дифракция и рефракция. Под действием мощных оптических волн, с другой стороны, можно усиливать слабые акустические волны, делая громкими практически неслышные звуки. Более того, в определенных условиях свет может сам генерировать акустические волны, а звук, в свою очередь, порождать излучение света. Иначе говоря, многогранность акустооптических эффектов позволяет эффективно манипулировать по сути любыми параметрами оптических волн. В частности, говоря о современной технике, методами акустооптики управляют интенсивностью лазерного излучения, положением оптического луча в пространстве, поляризацией и фазой оптической волны, а также спектральным составом и пространственной структурой оптических пучков.

а Понятно, что для такого рода технологий – одновременно быстрых, точных и потребляющих мало энергии – очень важной областью применений стали системы оптической обработки информации вообще и оптические процессоры в частности. В самом общем случае типичный оптический процессор строится на основе трех главных элементов. Во-первых, оптическая схема для преобразования входного изображения в выходное, коль скоро в таких устройствах и вход, и выход, и даже команды управления представляют собой те или иные картинки. Во-вторых, схема организации обратной связи, обеспечивающая возможность подачи на вход процессора его же выходного сигнала. И в-третьих, оптический усилитель, компенсирующий потери информации при обработке.

б В традиционном оптическом процессоре все эти элементы физически представляют собой более или менее громоздкие конструкции из зеркал, линз и кристаллов. Понятно, что для условий массового производства аппаратура подобного рода не очень подходит, а при изготовлении малыми партиями оказывается чересчур дорогой в сравнении с электроникой. В то же время интегральные микросхемы-чипы дают великолепный пример того, к чему можно было бы свести оптический процессор в идеале. Теоретически, по крайней мере, ничто не препятствует тому, чтобы создать подходящий прозрачный кристалл в качестве оптического усилителя и внутри его объема сконструировать оптический процессор из множества микроскопических элементов, взаимодействующих друг с другом волнами света и звука.

### ###

Кроме того, для интегральных оптических процессоров будущего уже имеются и еще более красивые идеи – создать среду с переменной управляемой структурой. Подобно электронным чипам FPGA с перепрограммируемой логикой, внутри такого оптического процессора нужные зеркала, линзы, оптические транспаранты и межсоединения не устроены заранее, а создаются специальными командами управления по мере необходимости. <sup>c</sup> Надо только подчеркнуть, что идеи эти касаются сугубо квантовых по своему устройству процессоров. Иначе говоря, речь тут идет не об оптических компьютерах вообще, а о об устройствах на основе когерентного света, принципах квантового усиления и прочих эффектах квантовой физики.

Важнейшую роль при решении этой задачи играют материалы с ярко выраженными нелинейными оптическими свойствами. Если охарактеризовать эти свойства в простых словах, то речь идет о средах, способных существенно изменять свои оптические характеристики под влиянием проходящего через них света или звука. Благодаря этому в среде имеется возможность для взаимного влияния пучков света и импульсов звука, перекачки энергии между пучками и других взаимодействий. И что особо важно, становится возможным при помощи одних направленных волн создавать пространственные неоднородности, выполняющие функции оптических элементов для других волновых сигналов. Наиболее естественный, вероятно, способ порождать такие элементы-неоднородности с нужными свойствами предоставляет голография. <sup>d</sup>

Причем голография, кроме того, предоставляет и существенно иной тип межсвязей, принципиально отличающихся не только от проводов, но и от геометрических лучей оптики. В данном случае сигналы между элементами передаются не лучами, а путем распространения наложенных волн в пространстве, при этом связь между волнами устанавливается с помощью сформированных в среде решеток, которые также наложены друг на друга. Можно утверждать, что 3-мерная или «глубокая» голограмма является самым совершенным элементом связи различных волн, так как составляющие ее трехмерные решетки однозначно связывают определенные пары волн и не реагируют на другие волны. <sup>e</sup>

Наконец, голограммы можно использовать здесь не только в качестве принципиальных узлов оптического процессора, но также и в роли памяти – как для хранения картинок-команд, так и элементов обработки. Помимо огромной емкости и скорости выборки, голографическая память обладает целым рядом других достоинств и особенностей, разобрать которые имеет смысл отдельно. <sup>f</sup>

---

[1] A.G. Bell, «On the Production and Reproduction of Sound by Light», the American Journal of Sciences, Third Series, vol. XX, #118, October 1880, p. 305-324

## Ассоциативная холопамять [77]

0 Случилось так, что постепенно слово голограмма у большинства людей стало ассоциироваться с радужно переливающимися этикетками, защищающими фирменные товары от подделок. Обычно на этих наклейках действительно можно увидеть картинку, похожую на объемную. Но, к сожалению, такое представление о голограмме не совсем отражает суть столь важного явления, как голография. Точнее, совсем не отражает.

1 Аналогично, всякий раз, когда заходит разговор о голографической памяти, то в первую очередь всплывают важнейшие потребительские свойства этой технологии – очень большая информационная емкость голографических носителей и высокая скорость считывания-записи за одну операцию обработки. Если же кто-то из участников разговора слабо представляет себе суть предмета, то краткие объяснения сводятся примерно к следующему.

2 Пучок когерентного света расщепляют на два луча – предметный и опорный. Блок информации, подлежащий записи и именуемый «страницей», помещают на оптический транспарант, через который светит предметный луч. Затем этот пучок снова сводят с опорным, а расположенная в месте пересечения лучей фоточувствительная среда фиксирует картину наложения световых волн. Поскольку используемая для съемки голографическая среда не плоская, а объемная, в нее можно записывать множество разных страниц-голограмм, меняя угол падения опорного луча или длину волн света. При такой технологии каждая страница информации – большая матрица черных и белых точек-битов – записывается в один проход. И точно так же за раз страница считывается, когда кристалл голографической памяти освещают опорным лучом под тем углом и с той длиной волны, что использовались для записи.

3 При подобном объяснении становятся несколько яснее и суть собственно голографии, и существенные отличия этой технологии от других способов хранения информации. Вроде полупроводниковых чипов, жестких магнитных и лазерных оптических дисков, во всех из которых принята последовательная, бит за битом, а не постраничная работа с данными. Однако целый ряд существенных и принципиальных особенностей голографической памяти, как правило, ускользает почему-то и при таких разъяснениях. Важнейшая черта голографического способа записи / воспроизведения информации в том, что это интерференционная картина или, как иногда говорят, интерферограмма. А особая физика интерферограммы позволяет естественным образом делать при помощи этой технологии то, что недоступно другим способам фотографии или хранения информации.

#

4 Например, общеизвестный факт голографии – применение для съемки пары когерентных лучей, предметного и опорного – имеет и другую важную сторону, известную куда меньше. Когда когерентным пучком освещают не один, а два объекта, фиксируя на снимке интерференцию рассеиваемого ими света, то у голограммы появляется следующее свойство. В свете одного из снятых объектов голограмма воссоздает изображение второго. И, естественно, наоборот – в свете второго предмета можно воссоздать изображение первого. Это замечательное свойство получило название «принцип обратимости голограммы» и находит множество полезных на практике приложений.

Понятно, что с помощью описанного метода можно легко и удобно осуществлять мгновенное преобразование любого изображения в заранее заданное другое. Например, если обычный компьютер вычисляет логарифмы или тригонометрические функции по специальным алгоритмам разложения, сводящим вычисления к ряду простых арифметических операций, то на основе голографической памяти это можно устроить в 5 корне иначе. Записав в память заранее вычисленные таблицы в виде пар «входных и выходных» чисел, а затем вместо долгих вычислений просто подавать на вход один элемент пары и тут же получать на выходе второй, то есть ответ. Применительно к области криминальных расследований тот же самый принцип дает примерно такую картину. На вход подают отпечаток пальца – на выходе получают имя, фамилию, адрес и прочие установочные данные для обладателя пальца.

Другое ничуть не менее, а возможно и куда более интересное свойство голографического метода записи называется ассоциативная память. В компьютерных технологиях этот своеобразный способ хранения-извлечения информации также именуют памятью с адресацией по содержимому (content addressable memory), т.е. в качестве адресов для отыскания ячеек 6 памяти выступает сама хранимая в них информация. Имеется много задач, где данный подход оказывается очень удобен для быстрого поиска в больших базах данных по частично доступным сведениям. Однако на основе традиционных вычислительных технологий такой способ выборки организован довольно сложно и весьма недешево. Голография же реализует ассоциативную память совершенно естественным образом.

Можно сказать, что для объемного голографического накопителя свойство ассоциативной памяти – это просто одно из проявлений принципа обратимости голограмм. В упомянутом примере из жизни криминалистов и отпечатки пальцев, и имя-фамилия, и адрес человека – это все разные фрагменты одного образа-транспаранта занесенного в память. В терминах физики запись страницы выглядит так. Образ на транспаранте освещают пучком когерентного света, который рассеивается на элементарных 7 дифракционных решетках, формирующих изображение. Интерференция световых волн фиксируется голограммой... Впоследствии, при поиске нужной страницы, в луч света помещают лишь небольшой фрагмент исходного образа – отпечаток пальца. Так как память интерференционная, она в ответ воссоздает образ остальной картины, хотя и с меньшей интенсивностью. О подобной ситуации говорят, что удастся вызвать фантом потерянной части предмета. А это, по сути, и есть ассоциативный поиск в блоке памяти по частично доступной информации.

##

Столь выдающаяся способность голографической памяти к мгновенному, фактически, извлечению информации из хранилища всего лишь по небольшому ее фрагменту заинтересовала ученых особо. Ведь по многим 8 внешним признакам это очень напоминает работу другого – одновременно мощного и крайне загадочного – аппарата природы, а именно, памяти человека. Еще в середине 1950-х годов британский физиолог и физик Р.Л. Бэрл выдвинул гипотезу, объясняющую то, почему исследователям мозга никак не удастся отыскать механизм хранения и локализации воспоминаний в памяти. Бэрл первым, вероятно, предположил, что память, возможно, распределена сразу по всему мозгу в виде интерференционной картины нервных импульсов, проходящих по нейронам.[1]

В начале 1960-х, вместе с лавинообразными успехами в практической голографии, стала укрепляться и идея о голографическом устройстве человеческой памяти. В статьях голландского теоретика Питера Ван Хердена [2], заложивших фундамент для голографических систем хранения информации в объемных 3-мерных средах, были особо отмечены моменты подобия ассоциативной холопамяти и известных особенностей работы человеческого мозга. В последующие годы идею о принципах голографии как основе устройства мозга стал энергично развивать американский нейрофизиолог Карл Прибрам [3], однако ощутимой поддержки и признания среди коллег эти чересчур революционные идеи не получили.

На рубеже 1960-1970-х годов страницы журнала Nature стали своего рода полем битвы идей для сторонников и противников голографической модели мозга. Заметные успехи неголографических моделей памяти и, в частности, прогресс технологий искусственных нейросетей позволили их разработчикам утверждать [4], что для объяснения работы мозга вовсе не требуются принципы голограммы. В ответной статье на эту публикацию Питер ван Херден указал [5], что голографическая память – как и мозг – способна делать нечто такое, чего искусственные нейросети делать не умеют. А именно, моментально распознавать и выделять знакомые лица в толпе. Оппоненты же в свою очередь резонно парировали этот довод, заявив, что пока еще слишком рано делать выводы о том, какие вещи столь молодая технология умеет делать, а какие нет.

За несколько десятилетий, что прошли со времен той знаменательной стычки, направление искусственных нейросетей действительно сумело весьма существенно продвинуться в своих разработках. Особенно впечатляющий прогресс стал возможен после ряда открытий, сделанных в 1970-1980-е годы финским исследователем Теуво Кохоненом. Перечень важных работ ученого весьма обширен, но наибольшую, вероятно, известность получили его теория распределенной ассоциативной памяти для нейросетей и, особенно, самоорганизующиеся карты, в народе прозванные картами Кохонена. Разнообразные вариации карт Кохонена, т.е. соревновательных нейросетей с обучением без учителя, ныне с успехом применяют в самых разных областях – от химии и биологии до анализа финансовых рынков и процессов металлургического производства. Однако здесь наибольший интерес представляют продвинутое нейросети на основе оптической голографии, развиваемые с 1990-х годов.

###

Одно из характерных свойств оптической вычислительной среды – это способность эффективно образовывать параллельные связи между большим числом элементов, одновременно выполняя операции типа взвешивания и суммирования волновых сигналов разной интенсивности. Такие особенности системы являются по сути идеальными для построения нейросетей. Так, простейшая модель нейрона, персептрон, элементарно реализуется с помощью оптического транспаранта, режим пропускания которого задан набором чисел-параметров, именуемых весовыми коэффициентами. Столь же естественным образом с помощью оптических средств реализуются слои нейронов, а также оптические связи между двумерными нейронными массивами. С точки зрения формального математического описания такой системы, матрица связей становится четырехмерной.

Широкого назначения оптические компьютеры-нейросети на основе подобных систем ныне считаются одним из самых перспективных для развития направлений. Ну а в рамках данного направления особый интерес



представляют системы с голографическим накоплением информации в ассоциативной памяти. Развивая идеи Бэрла о гипотетическом механизме, управляющем накоплением информации в мозге на основе интерференции волн, ученые еще в 1960-е годы установили важные особенности для качественного голографического накопителя с ассоциативной выборкой. Было показано, что для устойчивости процесса поиска общая схема оптической ассоциативной памяти требует две существенно различные области запоминания. В одной все голограммы накапливаются вместе, обеспечивая быстрый поиск и распознавание по фрагменту, но выдавая смешанные друг с другом образы, содержащие данный фрагмент. В другой же области каждый блок информации накапливается сфокусированно и отдельно для точного извлечения.

В научной терминологии такое раздвоение предмета стали именовать бимодальным представлением паттерна. Математическая формализация этих идей привела к разработке искусственных нейросетей на комплексных числах и оперированию с комплексными числами-весами в голограммоподобном сферическом пространстве состояний. Поскольку лежащие в основе такой системы гипер-сферические вычисления естественным образом реализуются в оптическом процессоре, ассоциативный голографический компьютер демонстрирует превосходный потенциал как в быстродействии, так и в разнообразии практических приложений. В частности, на основе этой модели хорошо решаются задачи обобщения и распознавания образов со сменным вниманием. Подобно человеческому мозгу, такие системы тоже способны менять фокус от одного объекта к другому, не требуя переучивания.

Ну а в качестве завершения темы полезно вспомнить про еще один важный аспект в работе ассоциативной холопамяти. А именно, про естественный выбор наиболее яркого по интенсивности варианта изображения в качестве «наиболее вероятного». Одновременно припомнив одну из самых загадочных проблем квантовой физики – почему частицы материи выбирают свои наиболее вероятные состояния таким образом, что действует «стрела времени»? Есть сильное интуитивное ощущение, что две эти вещи – ассоциативная память голограммы и стрела времени – связаны друг с другом естественным образом. Однако для лучшего понимания этой связи понадобится ознакомиться с принципами квантовой обработки информации.

- 
- [1] R. L. Beurle. «Properties of a mass of cells capable of regenerating pulses». Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. Series B, 240, 55-94. (1956)
  - [2] P. J. van Heerden, «A new optical method of storing and retrieving information,» Applied Optics, Vol. 2, Issue 4, pp. 387-392, (1963) ; P. J. van Heerden, «Theory of optical information storage in solids,» Applied Optics, Vol. 2, Issue 4, pp. 393-400 (1963)
  - [3] Pribram, K. H., in «Macromolecules and Behavior» (edit. by Gaito, J.) , Academic Press, New York, 1966 ; Karl Pribram, «The Neurophysiology of Remembering», Scientific American 220 (January 1969), p. 75
  - [4] Willshaw, D. J., Buneman, O. P., and Longuet-Higgins, H. C., «Non-holographic associative memory», Nature, 222, 960-962 (1969).
  - [5] Pieter van Heerden, «Models for the Brain», Nature 227 (July 25, 1970), pp. 410-411

# [7♠] Квантовые процессоры с памятью

## Физика информации [78]

0 Эволюция в мире компьютерных технологий на протяжении всей своей истории движется во вполне определенном направлении. Суть которого можно охарактеризовать одним словом – «миниатюризация». Каждое новое поколение компьютерной техники непременно отличается от предшественников заметно меньшими размерами как логических элементов, так и ячеек памяти. Наблюдая эту тенденцию, Гордон Мур еще в середине 1960-х годов подметил, что количество элементов на единицу площади процессора стабильно удваивается примерно каждые 18 месяцев. Довольно скоро стало ясно, что та же самая, в сущности, закономерность справедлива и для устройств памяти. Никто не знает, почему так происходит, но вот уже более полувека эмпирический «закон Мура» весьма точно отражает динамику общего развития в компьютерной индустрии.

1 Понятно, что если при стандартном размере корпуса число вентиляей логики и ячеек памяти в нем постоянно возрастает, то этим обеспечивается стабильный рост производительности, а значит и функциональных возможностей устройства. Но столь же очевидно и то, что маршрут миниатюризации неизбежно ведет технологии в самые глубинные структуры применяемых материалов. В буквальном смысле, к уровню элементарных кирпичиков материи – молекул, атомов, единичных электронов и фотонов. Поэтому уже довольно давно, на рубеже 1970-80-х годов, наиболее дальновидные физики приступили к изучению проблем, связанных с реализацией компьютеров на уровне микромира.

2 В целом было показано, что не существует принципиальных барьеров для работы с битами информации на уровне отдельных частиц микромира. То есть при аккуратных манипуляциях единичными атомами, электронами или фотонами тоже можно осуществлять запись, считывание, хранение и передачу информации. А значит, в наличии имеются все базовые компоненты компьютерной обработки. Правда, с учетом одного принципиального обстоятельства, а именно, квантовых законов для частиц микромира. Эти законы очень существенно отличаются от законов физики классической, свойственной окружающему человека миру. Как только в 1980-90-е годы уровень лазерной и прочей квантовой техники стал позволять работу с единичными частицами, начались и непосредственные эксперименты по проверке того, насколько иной оказывается обработка информации на квантовом уровне.

3 Эти исследования, в частности, подтвердили весьма важные, но чересчур странные и неудобные аспекты теории, относящиеся к феноменам квантовой нелокальности и сцепленности частиц. Обнаруженные теоретиками довольно давно, еще в середине 1930-х годов, эти тонкие нюансы тогда не нашли сколь-нибудь внятного объяснения. Однако теперь выяснилось, что для обработки информации на квантовом уровне физика сцепленности имеет принципиально важное значение. Более того, попытки постижения данного явления и его механизмов обеспечили также заметный прогресс и в разрешении другой загадки – о природе квантово-

классического перехода. Причем те из ученых, кто продвинулся на этом пути дальше всех, пришли к убеждению, что квантовая физика в основе своей – это суть наука об информации в природе.

#

4 Имеются все основания считать, что базис для такой точки зрения был заложен в 1935 году, когда Эрвин Шредингер опубликовал свою работу «Современное состояние квантовой механики»[1]. Эта статья или «генеральная исповедь», как называл ее сам автор, ныне очень часто цитируется среди важнейших достижений теоретической физики первой

5 половина XX века. На осознание этого факта, правда, научному миру понадобилось около полувека. В 1930-е же годы идеи ученого не вызвали у современников практически никакого интереса. И хотя Шредингер в ту пору уже был и лауреатом нобелевской премии, и работал в Англии, из-за нацистов сменив Берлинский университет на Оксфорд, в переводе на английский язык столь важная для него статья была впервые опубликована лишь посмертно и много лет спустя – в 1980 году. Причем уже не в физическом журнале, а в трудах Американского философского общества.

6 Знаменита эта работа, в первую очередь, так называемым парадоксом шредингеровского кота, в максимально заостренной форме демонстрирующим нестыковки в классической и квантовой картинах описания мира. Здесь же Шредингер впервые ввел термин «сцепленность», назвав это явление самой главной характерной особенностью квантовой механики, заставляющей полностью отказаться от классических представлений. В целом же суть работы можно свести к исследованию проблемы, очень важной для области квантовой информации – как назвали бы это сейчас. Сам же Шредингер задается вопросами о том, что реально человек может узнать о состоянии странных объектов квантового мира и что именно происходит с этими объектами в процессе получения данного знания.

7 Анализируя «подводные камни» в довольно мутных описаниях для квантовомеханических процессов измерения, Шредингер сформулировал 4 базовых свойства, принципиально отличающих квантовые объекты от классических. Каждое из этих свойств, безусловно, требует поясняющих комментариев, однако здесь ограничимся их кратким перечислением. (1) Суперпозиция, т.е. свойство объекта находиться сразу в нескольких состояниях одновременно. (2) Интерференция, как сугубо волновое свойство наложения относительных фаз в состояниях этой суперпозиции. (3) Сцепленность, т.е. состояние пары или ансамбля частиц, которые описываются только их совместными свойствами вместо свойств индивидуальных. Чуть иная сторона того же свойства – полное знание о состоянии всей системы в целом не означает полного знания о состоянии ее частей. (4) Неопределенность и неклонированность. Иначе говоря, неизвестное квантовое состояние объекта невозможно измерить без его возмущения, а значит, нельзя и клонировать, т.е. скопировать без разрушения оригинала.

Две первые особенности объектов квантового мира были принципиально важны для теоретических расчетов, описывающих энергетические состояния атомов и молекул, для вычисления вероятностей переходов между этими состояниями и прочих выкладок, объясняющих результаты экспериментов. Иначе говоря, эта половина содержала сугубо прикладную пользу и сразу же была востребована практической физикой. Остальная же половина свойств, т.е. третья и четвертая позиции в списке Шредингера,

никакой практической пользы долгое время не представляли, а потому были отнесены к «философии». Но лишь до той поры, пока экспериментаторы не подступились к манипуляциям единичными квантовыми объектами.

##

С точки зрения физики элементарная единица информации – бит, т.е. 0 или 1 – представляет собой не только абстрактное математическое понятие, но и вполне конкретное средство представления битов в материальном мире. Варианты воплощения этой идеи могут быть самыми разнообразными: 8 триггеры в чипах процессоров, кольца-сердечники ферритовой памяти, намагниченные домены на пластинах жестких дисков, микроскопические ямки-питы оптодисков и так далее. Но суть у них всех одна – это тот или иной физический объект, имеющий два энергетически устойчивых состояния для интерпретации их в качестве 0 и 1.

Понятно, что для прогресса инфотехнологий примерно то же самое требуется и от частиц микромира, когда размеры компьютерных компонентов удастся уменьшить до этого уровня. Но одно из главных отличий квантового мира, состояние суперпозиции, означает, что частица одновременно пребывает во всех своих энергетических состояниях, а при измерении принимает одно из устойчивых с той или иной вероятностью. 9 Иначе говоря, здесь для единицы информации понадобилось ввести существенно иное понятие – квантовый бит или кратко кубит. Который в отличие от бита с его состояниями «или то / или это» обычно пребывает в состоянии «и то / и это». А вдобавок к этому кубиты демонстрируют и все прочие важные свойства квантового мира – интерференцию, сцепленность и невозможность клонирования.

Когда эксперименты с единичными кубитами и их ансамблями стали убедительно подтверждать все ключевые выводы теоретиков о странных свойствах объектов в квантовом мире, было осознано, что это принципиально новый уровень инфотехнологий, открывающий для дальнейшего развития невиданные прежде горизонты. Естественным образом тут же стали вставать вопросы о практическом применении этих результатов в 10 квантовых устройствах. Главная проблема здесь в том, что манипуляции даже с единичными квантовыми объектами и их крайне хрупкими свойствами сопряжены с гигантскими техническими трудностями. Если же речь идет о работе с ансамблем частиц, то из-за стремительной декогеренции, то есть распада квантовой согласованности ансамбля, задача становится почти нерешаемой.

Вряд ли будет преувеличением говорить, что сейчас самой главной проблемой при создании реальных квантовых устройств является как можно более длительное удержание схемы в когерентном состоянии. Или, 11 другими словами, максимальное оттягивание момента, когда относительно крупная система из искусственно смоделированного квантового состояния неизбежным образом перейдет в состояние классическое. Поскольку ныне у большинства физиков, похоже, нет уже сомнений, что квантово-классический переход вызван процессом декогеренции, в природе этого явления имеет смысл разобраться чуть подробнее.

###

Формулируя упрощенно, декогеренция – это что-то типа постепенной утраты квантового поведения по мере того, как частица взаимодействует со своим ближайшим окружением. Термин очевидным образом происходит от понятия квантовая когерентность, а то, в свою очередь, из физики волн. И это, конечно, неслучайно. В когерентных системах волны способны к интерференции. Все квантовые объекты описываются волновой функцией, т.е. являются волнами, и при этом взаимодействуют с окружающей средой. В результате этих взаимодействий способность к интерференции размывается, поскольку элементы квантовой системы оказываются сцеплены с элементами окружения. А термин декогеренция, соответственно, описывает этот совершенно естественный для квантовых систем процесс утраты чистого когерентного состояния.[2]

Неразрывно связанной с процессом декогеренции является сцепленность: когда элементы систем взаимодействуют, они теряют свою индивидуальность, а сцепленность оказывается вездесущей. И при этом описание декогеренции показывает, что не существует резкой границы, какого-то критического размера, при котором квантовое поведение переключается на классическое. Получается, что квантово-классический переход в действительности зависит не от размера системы, а от времени взаимодействий. Чем сильнее взаимодействия квантового объекта со своим окружением, тем быстрее развивается декогеренция. Поэтому более крупные объекты, обычно имеющие больше способов взаимодействия, декогерируют почти мгновенно, столь же быстро преобразуя свой квантовый характер в классическое поведение.

Уравнения теории декогеренции показывают, что здесь имеется глубокая связь с термодинамикой необратимых процессов, т.е. диссипацией (рассеиванием) энергии. При этом подчеркивается, что декогеренцию не следует отождествлять или путать с диссипацией, поскольку декогеренция предшествует диссипации, по времени действуя намного быстрее. С другой – экспериментальной – стороны уже получены многократные подтверждения в опытах тому, что квантовая сцепленность имеет много общего с энергией. Сцепленность не просто «есть или нет», как полагали раньше, а имеет определенные количества, т.е. при взаимодействиях ее может быть «много или мало». В целом же для задачи о декогеренции характерны, как показано, те же самые по сути начальные условия, что отвечают за термодинамическую стрелу времени. То есть за естественный переход систем к состоянию с наибольшей энтропией.[3]

Между термодинамической энтропией как мерой хаотичности в системе и информацией как мерой порядка прослеживаются вполне четкая связь и количественное соотношение. Чем больше имеется информации о системе, тем меньше ее энтропия. И, соответственно, наоборот – чем больше энтропия системы, тем меньше о ней информации. То, что понятия энтропии в теории информации и термодинамике имеют не только формальное сходство, но и общую физическую основу, ныне считается практически бесспорным. Например, многие из фактов термодинамики и статистической механики удается выводить из теории информации – либо максимизацией энтропии Шеннона, либо минимизацией информации Фишера. Но еще более интересным, наверное, следует считать практическое приложение этих идей – при создании квантовых компьютеров и других инфотехнологий на основе квантовых законов.[4]

- [1] Schroedinger E , «Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik», Naturwissenschaften, 48, 807; 49, 823; 50, 844 (November 1935) [Перевод на русский: Успехи химии, 5, 390, 1936. English translation in Proc. Am. Philos. Soc. 124 323 ,1980]
- [2] Zeh, H.D. «On the interpretation of measurement in quantum theory», Found. Phys. 1, 1970, pp. 69-7
- [3] Zeh, H.D., «The Physical Basis of the Direction of Time». Springer, 1999 (3rd edn.); Erich Joos, «Elements of Environmental Decoherence». In proceedings of the conference “Decoherence: Theoretical, Experimental, and Conceptual Problems”, edited by P. Blanchard, D. Giulini, E. Joos, C. Kiefer, and I.-O. Stamatescu (Springer 1999). arXiv:quant-ph/9908008
- [4] Philip Ball, «Physics: Quantum all the way», Nature, Vol 453, 1 May 2008 ; B. Roy Frieden, Shunlong Luo, Angel Plastino, «Physics and information», Physics Today, October 2007

## Обратимость с участием разума [79]

Историки науки, исследующие родственные связи и влияния между разными ветвями на древе общей эволюции знания, хронологию квантовых компьютеров нередко начинают отсчитывать с XIX века. Когда, ясное дело, не было еще ни компьютеров, ни квантовой физики. Но зато в изобилии рождались столь интересные научные идеи и задачи, что с некоторыми из них приходится разбираться по сию пору. Одна из таких проблем, непосредственно относящаяся к тесным связям между термодинамикой и теорией информации, известна под названием «демон Максвелла». Именно от этого занятного персонажа удобно начинать историю квантовых вычислений и квантовой информации в целом.

Перенесемся в примечательный для общего повествования 1867 год, когда Питер Тэт придумал свой ящик-барабан с отверстием в мембране, демонстрирующий поразительную стабильность вихревых колец. Под впечатлением от этих опытов его друг Уильям Томсон всерьез занялся изучением данного феномена и вихревой теорией атомов. Но тогда же произошло и еще кое-что существенное. В письме к Тэту другой его давний приятель, Максвелл, занимавшийся в ту пору разработкой молекулярно-кинетической теории газов, описал привидевшийся ему мысленный эксперимент-парадокс, по сути опровергающий второе начало термодинамики, т.е. одну из базовых основ всей физической науки. Выражаясь более аккуратными словами Максвелла, этот пример демонстрировал «ограниченность второго закона».[1]

Случайно так совпало или нет, сказать трудно, но остается фактом, что и опыт, придуманный Максвеллом, тоже сосредоточен вокруг установки, отчасти напоминающей барабан Тэта. С тем отличием, что здесь мембрана с крошечным отверстием делит резервуар пополам, на два равных объема А и В, заполненных газом в тепловом равновесии. То есть температура в обеих камерах поначалу одинаковая. Но давайте, говорит Максвелл, представим себе некое существо, управляющее заслонкой отверстия в перегородке. Это существо способно следить за каждой подлетающей к отверстию молекулой и делает вот что. Управляемая им заслонка открывается только для быстро движущихся молекул из камеры А и лишь для медленных молекул из камеры В. Из-за такой фильтрации с течением времени температура в камере В повысится из-за обилия быстрых молекул, а в камере А, напротив, понизится из-за преобладания молекул медленных.

Понятно, что такой результат явно противоречит второму началу. Которое в версии Клаузиуса гласит, что «невозможно создать аппарат, в циклической работе не порождающий иных эффектов, кроме передачи тепла от холодного тела к более горячему»... Согласно преданию, Уильям Томсон (Кельвин) был первым, кто назвал «демоном» столь злобное существо, ставящее под сомнение один из важнейших постулатов теории. Под именем «демон Максвелла» этот персонаж так навсегда и вошел в научный лексикон. Дабы будоражить умы которого уже поколения ученых своей парадоксальной физикой и провоцировать их на попытки экзорсизма, т.е. изгнания демонов из храма науки.

#

4 За полтора почти столетия, прошедшие с той поры, вокруг данной проблемы было опубликовано бесчисленное множество работ. В большинстве исследований с помощью самых разных доводов доказывалась непоколебимая правота второго начала термодинамики. В других же – придуманы новые версии демонов или, выражаясь более прозаически, фильтров, которые при разных условиях опыта дают результаты, похожие на очередное нарушение постулата. Для теории информации и квантовых вычислений наибольший интерес в этом длинном ряду представляет статья, опубликованная в 1929 году выдающимся физиком Лео Сцилардом (1898-1964).[2]

5 Хотя в истории XX века Сцилард более всего знаменит как отец атомной бомбы и основатель движения за ядерное разоружение, реальный вклад ученого в науку и общественную жизнь намного значительнее. Область его интересов простиралась от работ по молекулярной биофизике и устройству памяти в мозге до проектирования бытовой электротехники. В частности, в период с 1926 по 1933 годы Сцилард на пару с Эйнштейном разрабатывали передовую конструкцию холодильника без движущихся частей. Работа была небезуспешной, и в фирме A.E.G. одно время даже планировали серийное производство морозильной техники на основе «насоса Эйнштейна-Сциларда».

6 Но увы, как раз в это время разразилась экономическая депрессия, да еще изобрели эффективный хладагент фреон для компрессионных холодильников... В общем, машина великих физиков появилась, что называется, не ко времени. Побочным же, можно сказать, результатом этих изысканий стала важная теоретическая статья Сциларда «О понижении энтропии в термодинамической системе путем вмешательства разумных существ». Здесь Лео Сцилард стал, видимо, первым, кто через энтропию свел и парадокс демона, и термодинамику в целом к задаче обработки информации.

7 В своей работе, по сути дела продолжавшей тему его диссертации 1922 г., Сцилард рассмотрел, при каких условиях разумным вмешательством можно нарушать второе начало. Которое в одной из эквивалентных формулировок гласит, что энтропия замкнутой системы не может уменьшаться. Анализируя этот вопрос, Сцилард тоже привлекает идею максвелловского демона, но при этом показывает, что для управления механизмом фильтрации молекул этому существу необходимо как-то распознавать флуктуации, т.е. измерять их. А для этого оно, как пишет Сцилард, «постоянно должно быть точно информированным о состоянии термодинамической системы».

##

8 Поскольку существо и газ взаимодействуют, то необходимо рассматривать общую энтропию системы, состоящей из газа и демона. И если для регулирования движения молекул, рассудил Сцилард, демон должен как-то определять их скорость, значит, на это затрачивается энергия. Расходование же энергии демоном, соответственно, приводит к возрастанию его энтропии. Причем, как показали расчеты автора, это возрастание всякий раз будет больше, чем понижение энтропии газа. Иначе говоря, общая энтропия системы не убывает, а второй закон термодинамики вновь торжествует. Интересно, что рассуждения Сциларда о том, каким образом работа демона сводится к получению информации о молекулах, привели ученого к концепции элементарной единицы информации. Собственно термин – бинарная цифра или кратко бит – появится в научно-техническом обиходе несколько позже, в исследованиях Клода Шеннона и других авторов, занявшихся теорией связи.



Но самое главное, в этой же статье автор примерно за двадцать лет до Шеннона вывел ту же, «шенноновскую» формулу для энтропии единицы информации, логично связав ее с термодинамикой. Физическая связь между термодинамической и информационной энтропией была определена с помощью «предела Сциларда» – минимальной цены, которая должна быть заплачена в смысле расхода энергии за выигрыш в информации... Столь передовая в своих идеях статья, однако, явно опередила свое время и среди современников прошла почти незамеченной. Понадобилось еще несколько десятков лет, прежде чем в науке возродился интерес к задачам типа того, сколько требуется энергии на обработку информации в одной молекуле. Новый этап начался вместе с открытием физика корпорации IBM Рольфа Ландауэра (1927-1999), занимавшегося конкретной и по сию пору актуальнейшей проблемой – тепловыделением в электронных схемах компьютеров.[3]

В 1961 году Ландауэр обнаружил, что акт вычисления сам по себе – вопреки общепринятой истине того времени – может не требовать вообще никаких расходов энергии. Но зато, как показал исследователь, все логические операции, избавляющие систему от информации, вроде стирания, с необходимостью требуют диссипации энергии. По физической сути, акт стирания преобразует информацию из доступной формы в недоступную форму, известную как энтропия. То есть стирание информации одновременно является процессом добавления в систему энтропии и сопровождается рассеиванием энергии в окружающую среду. Особо следует отметить, что стирание информации является необратимым процессом. Если же логические операции устроены так, что их можно обратить, то они не ведут к возрастанию энтропии и могут происходить без затрат энергии.

Идею обратимости вычислительных процессов проще всего пояснить на каком-нибудь элементарном примере. Скажем, традиционный двоичный сумматор имеет на входе два бита, а на выходе дает лишь один, вычисляемый как сумма входов. Понятно, что при таком устройстве логического элемента информация о значениях битов на входах безвозвратно утрачивается. Но если на выходе сумматора сделать не один, а три бита – для результата сложения и битов-слагаемых – то операция становится обратной, ибо никакой информации не теряется. А значит, в принципе такой элемент логики может работать без энергозатрат. Если, конечно, позволят технологические возможности конструктора.

###

В 1970-е годы, опираясь на результаты Ландауэра, его молодой коллега по IBM Чарльз Беннет и – независимо от него – еще два ученых из МТИ, Эд Фредкин и Том Тоффолли, показали, что все компьютерные вычисления можно преобразовать к такой форме, которая обеспечивает логическую обратимость операций. В общем случае оказалось, что самым эффективным способом для реализации обратимых операций является такой. Если входные данные содержат  $N$  битов информации, то подав на вход эту информацию и еще  $N$  нулей, на выходе всегда можно получить требуемый результат плюс копию входной информации безо всякого дополнительного мусора.[4]

Практическим результатом этой работы был вывод о принципиальной возможности таких компьютеров, вычисления которых не требуют диссипации энергии. Иначе говоря, неоспоримый факт, согласно которому

современные компьютеры рассеивают массу тепла – это вовсе не физическая необходимость, а признак несовершенства имеющихся технологических решений. Попутно, в 1982 году Чарльз Беннет по-новому разрешил парадокс с демоном Максвелла, перераспределив, следуя Ландауэру, общее возрастание энтропии с «обработки информации вообще» на ее стирание.[5]

Возможность обратимых вычислений стала важнейшим открытием Ландауэра и для развития квантовой информации. Так как законы квантовой механики обратимы во времени, логично было задуматься о вычислительных устройствах, оперирующих квантовыми битами и подчиняющихся такому закону обращения. На основе этой идеи Пол Беньоф из Аргоннской национальной лаборатории в 1980 году описал гибридную машину Тьюринга, где на ленте обработки вместо традиционных битов хранились кубиты. Абстрактная модель позволила Беньофу показать, что в принципе квантовые системы могут выполнять вычисления в когерентной манере.[6]

Решающие же шаги для начала движения в данном направлении сделал Ричард Фейнман. В 1981 и 1984 годах он прочитал два доклада и опубликовал сопутствующие статьи, где уже в явном виде обсуждалась конструкция машины, оперирующей на основе квантово-механических принципов. Фейнман изучал идею универсального квантового симулятора, то есть машины, которая использовала бы квантовые эффекты для исследования других квантовых процессов и моделей. Принципиальный вывод ученого был вполне однозначным – да, вплоть до атомов и других частиц в законах физики не видно пределов для миниатюризации элементов, реализующих схемы логики и хранения информации. А значит, квантовый компьютер, похоже, действительно возможен.[7]

- 
- [1] J. C. Maxwell, Letter to P. G. Tait, 11 December 1867 in *Life and Scientific Work of Peter Guthrie Tait*, C. G. Knott (ed.), Cambridge University Press, London, p. 213 (1911).
  - [2] L. Szilard 'Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen' (On the decrease of entropy in a thermodynamic system by the intervention of intelligent beings'), *Zeitschrift für Physik* 53, 840-856 (1929). English translation in *Behavioral Science*, 9:301, 1964; reprinted in *Quantum Theory and Measurement*, edited by Wheeler and Zurek (Princeton University Press, Princeton, 1983)
  - [3] R. Landauer, «Irreversibility and heat generation in the computing process,» *IBM Journal of Research and Development*, vol. 5, pp. 183-191, 1961
  - [4] C. H. Bennett, «Logical reversibility of computation,» *IBM Journal of Research and Development*, vol. 17, no. 6, pp. 525-532, 1973.; T. Toffoli. *Reversible computing*. Technical memo MIT/LCS/TM 151, MIT Lab for Computer Science, 1980
  - [5] C. H. Bennett, «The Thermodynamics of Computation – A Review,» *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 21, no. 12, pp. 905-940, 1982
  - [6] Benioff P, «Quantum mechanical hamiltonian models of Turing machines», *J. Stat. Phys.* 29 515-546. 1982 ; Benioff P, «Quantum mechanical models of Turing machines that dissipate no energy», *Phys. Rev. Lett.* 48 1581-1585, 1982
  - [7] Richard Feynman. *Simulating physics with computers*. In *International Journal of Theoretical Physics*, 21 467-488, 1982. ; Feynman R P , *Quantum mechanical computers*, *Found. Phys.* 16 507-531 (1986); see also *Optics News* February 1985, 11-20. (Перевод на русский: *Успехи Физических Наук*, Август 1986, Том 149, вып. 4, стр 671-688)

## Когерентность без ошибок [7A]

0 При изучении предмета квантовых вычислений ученым по сути приходилось сводить воедино весьма разрозненные прежде идеи из классической теории информации, квантовой физики и компьютерной науки. Что в итоге привело к рождению новой дисциплины – теории квантовой информации. При этом теория информации и квантовая механика настолько хорошо подошли друг другу, словно всегда были единым целым. Также довольно скоро было обнаружено, что новая наука не только обеспечивает поддержку технологического прогресса, но и несет в себе потенциал больших открытий. Важнейшие алгоритмы квантовых вычислений – отыскание периода функции (П. Шор) и поиск в случайном списке (Л. Гровер) – продемонстрировали несколько серьезных задач, решение которых возможно лишь в квантовом компьютере и никак не в другом.

1 Последнее десятилетие XX века ныне уже с полным основанием можно называть началом эпохи квантовой информации и квантовых вычислений. Причем довольно парадоксальную роль в этот знаменательный период сыграл Рольф Ландауэр. Учитывая важность его работ, у историков науки имеются все основания, чтобы наряду с Ричардом Фейнманом причислять Ландауэра к крестным отцам квантовых вычислений. Но одновременно следует подчеркнуть, что по жизни это был отнюдь не энтузиаст, а скорее один из самых строгих и придирчивых критиков данного направления.

2 Руководя исследовательским подразделением IBM, Ландауэр стал свидетелем краха очень многих перспективнейших технологий. Обычная тому причина – в большинстве предложений авторы фатально недооценивали сложности, связанные с созданием по-настоящему жизнеспособного устройства. Примерно 30 последних лет жизни Ландауэр много занимался этой проблемой и опубликовал внушительный ряд статей с анализом серьезных дефектов в самых разных компьютерных альтернативах.

3 Критикуя, в частности, квантовые компьютеры, он как эксперт настойчиво предлагал, чтобы все публикации на данную тему непременно содержали следующее примечание: «Это предложение, как и все прочие для квантовых вычислений, опирается на спекулятивную технологию. В своей нынешней форме оно не принимает в расчет всевозможные источники шумов, ненадежностей и ошибок производства, так что работать, скорее всего, это не будет». Многие годы никто из авторов статей не мог отрицать, что столь жесткое в формулировках примечание было безусловно справедливым. Но при этом эффект от скептических выступлений Ландауэра вовсе не был отрицательным. Потому что в критике его всегда содержались советы и предложения о том, как сделать конструкцию более работоспособной и надежной.[1]

#

4 Вплоть до середины 1990-х годов ситуация с достижимостью квантовых вычислений выглядела довольно мрачно. Проблемы создания жизнеспособного квантового компьютера – это прежде всего проблемы физические. И самая главная из них – очень быстрый распад когерентности, то есть согласованных состояний суперпозиции у элементов, образующих вычислительную систему. Информация, обрабатываемая в квантовой системе, кодируется в фазовых соотношениях кубитов. Но состояния и соотношения кубитов чрезвычайно хрупки, легко разрушаясь от посторонних шумов и взаимодействий с окружающим миром.

Данный процесс, как уже говорилось, называется декогеренцией, и объяснение его природы в значительной мере позволило прояснить загадку квантово-классического перехода. Декогеренция, среди прочего, диктует и то, каким требованиям должны отвечать физические элементы, предполагаемые к использованию в квантовом компьютере. А именно, время сохранения когерентности их состояний должно быть больше времени вычисления. Чтобы этого добиться, конструкторы придумали два основных способа: (1) увеличивать время когерентности искусственно, или (2) отыскать квантовую систему, максимально изолированную от окружения.

Первая из этих задач – продлевать когерентное состояние путем повышения помехоустойчивости – на начальном этапе представлялась почти безнадежной. Ибо весьма эффективные методы коррекции ошибок, разработанные для традиционных аппаратов и каналов, в квантовых условиях совершенно не работают. Типичный пример классического кода с исправлением ошибок выглядит так. Каждый бит в этой схеме представляют строкой из трех одинаковых битов: ноль как 000, а единицу, соответственно, как 111. Если шум в системе относительно мал, он может исказить один из битов в триplete, поменяв, например, 000 на 010. Так что если при обработке встречается триплет 010 (или 100, или 001), то верное значение, скорее всего, равно 000. То есть исходное значение бита было ноль.

Более сложные обобщения этой идеи дают очень хорошие коды с исправлением ошибок для защиты классической информации при разных уровнях шума. Однако с прямым переносом этих принципов на квантовые системы ничего не выходит, поскольку в квантовой механике нельзя с определенностью установить неизвестное состояние квантового объекта. А также невозможно прочесть значение одной составляющей триплета, не разрушив все остальные. И даже хуже того, нельзя взять кубит, находящийся в неизвестном состоянии, и создать его дубликат – по причине известного запрета на клонирование. Именно на эти трудности указали скептические статьи Рольфа Ландаура и ряда других авторов, где была подчеркнута, что для квантовых вычислений необходимо иметь особую, квантовую коррекцию ошибок.[2]

##

Жесткая критика скептиков, заостривших внимание на принципиальных моментах проблемы, оказала на разработчиков чрезвычайно стимулирующее воздействие. И очень скоро, в 1995 году, сразу несколько теоретиков (Калдербанк – Шор и Эндрю Стайн) независимо друг от друга нашли то, что надо – методику квантовой коррекции ошибок, не требующую клонирования кубитов и выяснения их состояний. Как и в случае триплетного кода, каждое значение представлено здесь набором кубитов, но каждый из которых в свою очередь сцеплен с шестью другими. Такие ансамбли совместно обрабатываются квантовой логической схемой без разрушения индивидуальных состояний кубитов. И если, скажем, через это устройство проходит триплет 010, то оно фиксирует, что средний бит отличается от соседей, и переворачивает его, не определяя конкретные значения ни одного из трех битов.[3]

Разработанные в теории методы удалось быстро проверить экспериментами в целом ряде институтов. Последовавшие за этим практические успехи в повышении квантовой помехоустойчивости оказались столь впечатляющими, что их – незадолго до своего ухода – признал даже сам Ландауэр. Но сколь бы замечательными ни были достижения разработчиков, придумавших квантовые алгоритмы исправления ошибок, они снимают лишь часть проблемы. В целом же создание работоспособного квантового компьютера с большим числом кубитов по-прежнему остается для физиков очень тяжелой задачей, далекой от решения.[4]

В поисках новых подходов к сложным задачам исследователи нередко пытаются искать ответы у природы. В частности, в 1997 году Алексей Китаев обратил внимание на поразительную стабильность природных квантовых систем, сформулировав это примерно так: похоже, что некоторые физические системы обладают чем-то вроде естественной устойчивости к шумам. Иначе говоря, в таких системах квантовая коррекция ошибок происходит вообще без вмешательства человека, а чрезвычайно высокая сопротивляемость к разрушению когерентности является по сути дела врожденной. Развивая эту идею, Китаев и целый ряд других исследователей занялись разработкой топологического квантового компьютера. То есть вычислителя, в котором тонкие квантовые состояния зависят от топологических свойств физической системы.[5]

Топология, можно напомнить, это раздел математики о тех свойствах объекта, что не меняются при плавных деформациях типа растяжения, сплющивания и изгибания. А топологический квантовый компьютер, соответственно, выполняет вычисления на гипотетических объектах-нитях, представляющих собой мировые линии движения частиц во времени и пространстве. Можно сказать, что длина такой нити изображает движение частицы во времени, а толщина представляет физические размеры частицы в пространстве. Как показали теоретики, подобрав для топологического компьютера особый тип частиц (энионы), можно в строго определенной последовательности перемещать пары смежных частиц друг вокруг друга. При этом мировые линии энионов (т.е. траектории в пространстве-времени) сплетаются в косу, структура которой и содержит в себе помехоустойчивое квантовое вычисление. То есть конечные состояния частиц, содержащие результаты вычисления, определяются сплетением нитей и не зависят от электрических или магнитных помех... Жизнеспособная модель такого компьютера, правда, и здесь дело будущего.

###

Что же касается второго базового способа для борьбы с декогеренцией, т.е. отыскания изолированных квантовых систем, то здесь у физиков имеется масса возможностей для опоры на уже достигнутые результаты в смежных областях. На сегодняшний день для реализации кубитов, хорошо изолированных от своего окружения, разрабатывается не менее десятка разных схем. Даже простого их перечисления, не претендующего на полноту, достаточно, чтобы продемонстрировать разнообразие возможных вариантов. Электромагнитные ловушки Пауля для ионов и оптические ловушки для нейтральных атомов. Полупроводниковые квантовые точки для электронов и сверхпроводящие кольца-скивды для электронных токов. Матричная изоляция примесных центров в кристаллах и молекул в аморфных средах, гелях или в органических структурах типа ДНК. Мощно развиваемые методы ядерно-магнитного резонанса (ЯМР), наконец.

В силу объективных причин наибольших практических результатов на сегодня достигли разработчики технологий, упомянутых в данном списке первой и последней. А именно, ионные ловушки и ЯМР. О них имеет смысл рассказать чуть подробнее. В частности, методы стабильного удержания заряженных частиц в электромагнитных ловушках стали возможны благодаря появлению принципиально новых экспериментальных методик в сверхнизкотемпературном охлаждении, лазерной технике и акустооптике. В таких устройствах, ловушках Пауля, моделируются состояния вещества, называемые одномерными ионными кристаллами. Подобная струна цепочка ионов удерживается от разбега, обусловленного кулоновским

отталкиванием, с помощью статического и переменного электрических полей. При этом на каждый отдельный ион струны можно воздействовать сфокусированными лазерными лучами, управляя квантовой эволюцией частицы. На основе данной структуры уже удается создавать работающие прототипы квантовых регистров и вентиляей.[6]

e В существенно иной технологии на основе ядерно-магнитного резонанса квантовым процессором является молекула с базовым «скелетом» из примерно десятка атомов. Другие атомы вроде водорода присоединены к скелету так, чтобы можно было использовать все химические связи. Особый интерес представляют ядра атомов, поскольку их спины выступают в роли кубитов. Молекула помещается в сильное магнитное поле, а спиновые состояния ядер управляются применением осциллирующих магнитных полей контролируемой длительности. В силу естественного экранирования ядерные спины молекул оказываются сильно изолированными от влияния окружения, так что время сохранения когерентной суперпозиции может здесь измеряться секундами и более.

f Изучая физику таких манипуляций, исследователи пришли к выводу, что созданные природой объекты – молекулы – по-видимому, можно рассматривать как отдельный, уже существующий элементарный квантовый компьютер. Наиболее приятный аспект этого открытия в том, что создание подобных квантовых компьютеров не требует от людей ни производства микроскопических схем на атомном уровне, ни любых других революционных достижений в нанотехнологиях. Как отметили разработчики первого квантового ЯМР-процессора, Нил Гершенфельд и Айзек Чуанг, природа на самом деле уже выполнила самую сложную часть процесса, собрав нужные базовые компоненты. В этом смысле обычные молекулы уже сами знают, как делаются квантовые вычисления. Люди просто не задавали молекулам правильные вопросы.[7]

- 
- [1] Seth Lloyd, «Obituary: Rolf Landauer (1927-99)», Nature, Vol 400 , 19 Aug 1999, p 720 Landauer R 1991 Information is physical, Phys. Today May 1991 23-29 ; Landauer R 1995 Is quantum mechanics useful? Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A. 353 pp 367-376
  - [2] Landauer R, The physical nature of information, Phys. Lett. A 217 188 (1996)
  - [3] Calderbank, A.& Shor, P.W. Good quantum error correcting codes exist. Phys. Rev. A 54, 1098 (1996). ; Steane, A. «Error Correcting Codes in Quantum Theory». Phys. Rev. Lett. 77, 793 (1996)
  - [4] Andrew Steane, «Quantum computing», In Reports on Progress in Physics, volume 61, pages 117-173, 1998 (Preprint July 1997, arXiv:quant-ph/9708022v2).
  - [5] Kitaev A. Yu., «Fault-tolerant quantum computation by anyons». Preprint 1997, arXiv: quant-ph/9707021
  - [6] Cirac J I and Zoller P , «Quantum computations with cold trapped ions», Phys. Rev. Lett. 74 4091-4094 (1995)
  - [7] Gershenfeld N A and Chuang I L, «Bulk spin resonance quantum computation», Science (1997) 275 350-356

## Память для света [7В]

0 Всякая полноценная система обработки квантовой информации должна содержать процессор, память для поддержки процессора и долговременного хранения данных, плюс, конечно же, средства связи для обмена информацией между этими компонентами. Эксперименты и теоретические исследования свидетельствуют, что в качестве идеального переносчика квантовой информации наилучшим образом подходит свет. В принципе, на основе фотонов можно также пытаться строить и квантовый процессор, и устройства памяти, однако очень быстрые безмассовые частицы для этих задач подходят не лучшим образом. С другой стороны, более удобные в манипуляциях атомы и ионы оптимально подходят для хранения информации в своих квантовых состояниях, демонстрируя при этом очень долгие сроки жизни.

1 В таких условиях наилучшая конструкция для гипотетического запоминающего устройства квантовой информации обозначилась естественным, можно сказать, образом и выглядит примерно так. В идеале атомы материи должны формировать квантовую память для света. В такой памяти квантовые состояния оптического пучка можно было бы хранить, возможно обрабатывать и впоследствии извлекать в управляемом режиме. В классических системах обработки информации с участием света биты данных передаются закодированными в световых импульсах. Эти импульсы регистрируются фотодетекторами, преобразуются в импульсы электрического тока и в таком виде передаются в телефоны, компьютеры, запоминающие устройства и тому подобные приборы. В таких преобразованиях – суть классического интерфейса между светом и материей. Но при обработке квантовой информации столь простой механизм детектирования света для его передачи, записи и хранения в памяти совершенно не подходит.

2 Хотя слабый импульс света – это по природе своей квантовый объект, полная информация об этом импульсе даже в принципе не может быть записана в классическую память. При такой записи неизбежно происходит разрушение хрупких квантовых состояний. По этой причине появилась необходимость в разработке совершенно особого интерфейса, обеспечивающего высококачественный перенос квантовых состояний кубитов-фотонов на квантовые состояния – чаще всего это спины – атомных кубитов. При считывании, соответственно, требуется обратный перенос информации с атомов на фотоны света.

3 Хотя проблема подобных переносов изучалась в квантовой электродинамике и раньше, собственно термин «квантовый интерфейс материя-свет» появился совсем недавно, в конце 1990-х годов. По мере же освоения направления стало очевидно, что это один из основополагающих разделов для всей области квантовой информации, ее обработки и коммуникаций. На сегодняшний день исследователями предложено и разрабатывается довольно большое число разных методов для обмена квантовыми состояниями света и атомов.

#

Наиболее очевидный из этих способов – хранение состояния отдельного фотона в отдельном атоме или ионе – с технической точки зрения оказывается вполне реализуемым, однако для практических приложений излишне сложным и неэффективным. Куда более заманчивым и многообещающим сейчас представляется несколько иной метод – связывание квантового состояния света с ансамблем атомов. Этот новый подход к проблеме квантового интерфейса между материей и светом появился вместе с открытием того факта, что большое скопление атомов – атомный ансамбль – может быть эффективно связано с квантовым светом, если для этого связывания можно применить коллективное состояние суперпозиции множества атомов. За время, прошедшее с момента первой демонстрации квантового интерфейса между светом и атомным ансамблем, этот подход стал одним из наиболее плодотворных и богатых на результаты направлений в данной области.

Среди интересных свойств, обнаруженных у ансамблей атомов в качестве квантовой памяти для света, самое, быть может, замечательное – это так называемая пространственно многомодовая емкость. Исследователи, впервые продемонстрировавшие данное свойство в 2007-2008 гг. (Денис Васильев, Иван Соколов, Евгений Ползик), с полным основанием назвали такой вид памяти «квантовой голограммой».[1]

Ранее в других работах уже было показано, что ансамбль атомов может быть эффективной квантовой памятью для отдельной пространственной моды света, т.е. сигнала одной частоты. Теперь же стало ясно, что мультиатомная природа ансамбля позволяет хранить в нем многие пространственные моды и записывать голограммы оптических изображений. При этом показано, что квантовая голограмма имеет более высокую емкость хранения в сравнении с голограммой классической. И более того, способна хранить квантовые свойства изображения, такие как мультимодовую суперпозицию и сцепленные квантовые состояния – то есть такую информацию, которую в обычной голограмме обеспечить невозможно.

Первоначальные результаты относительно квантовых голограмм, сулящих очень перспективную квантовую память для изображений, достигнуты в сугубо теоретической области. Однако экспериментальное освоение новых идей в квантовой оптике, как правило, происходит довольно быстро. А арсенал конкретных атомных ансамблей, используемых в экспериментах по реализации квантового интерфейса материя-свет, достаточно разнообразен и постоянно расширяется. На сегодняшний день здесь чаще всего используют атомарные газы щелочных элементов при комнатной температуре, щелочные атомы, охлажденные в ловушках до нескольких десятых или сотых микрокельвина, либо примесные центры в твердотельном состоянии чистого вещества.

##

Кроме того, за последние годы получили развитие и другие варианты сред, возможных для устройства квантовой памяти. В частности, большое внимание привлекают так называемые оптические решетки. Здесь атомы конденсата Бозе-Эйнштейна равномерно размещаются в узлах светового кристалла, иначе именуемого трехмерной оптической решеткой [2]. Такого рода регулярные структуры формируются с помощью стоячих волн при интерференции лазерного света. Первые эксперименты и теоретические расчеты свидетельствуют, что квантовый интерфейс на основе таких решеток предоставляет богатые возможности как для переноса квантовой информации между материей и светом, так и для ее обработки в квантовых сетях.



Случилось так, что идейно весьма близким к этим работам оказывается существенно иное направление в прикладных оптических исследованиях, обобщенно именуемое фотонными кристаллами. Хотя сам этот термин появился недавно, в 1990-е годы, исследования «оптических сред с периодическими неоднородностями структуры» (другое, более длинное определение фотонного кристалла) начались намного раньше, фактически с первых работ по голографии в трехмерных средах. Еще в 1964 году появилась статья [3] (NA Kurnit, ID Abella, SR Hartmann) о явлении фотонного эха в голограммах. Там же была выдвинута идея и о принципиальной возможности применять эту технику для хранения импульсов света. В ту пору, правда, речь шла лишь о классическом, а не квантовом свете.

В последующие десятилетия появилось немало работ о замечательных свойствах, выявляемых в динамических голограммах с записью в нелинейных средах и – более широко – в материалах, структура которых имеет периодическое изменение коэффициента преломления по пространственным направлениям. Получаемые результаты давали все больше свидетельств тому, что оптические среды при правильно поставленных условиях эксперимента способны демонстрировать для света любые аналоги свойств, уже известных и хорошо освоенных для электротока в радиоэлектронных схемах. А именно, что и для света можно изготовить не только эффективные проводники и изоляторы, но и полупроводники, и даже сверхпроводники.

По аналогии с разрешенными и запрещенными энергетическими зонами – фундаментом твердотельной электроники – аналогичное понятие было введено и в оптику. Это сделал в 1987 году Эли Яблонович, в ту пору сотрудник Bell Communications Research, обобщив понятие запрещенной зоны до электромагнитных волн вообще и для света в частности [4]. Вскоре после этого понятия «фотонная запрещенная зона» и «фотонный кристалл» (как среда, использующая данные свойства) стали ключевыми терминами новейшего направления современной оптики. Достигнутые с тех пор несомненные успехи в области физики фотонных кристаллов и устройств на их основе сегодня уже позволяют говорить о скором создании оптических микросхем. Поскольку оптика означает принципиально новые способы передачи, хранения и обработки информации, значимость этого достижения будет вполне сопоставима с созданием интегральной микроэлектроники в 1960-е годы.

###

Здесь, впрочем, интерес представляют не столько темпы технологической революции, сколько физическая суть интересного явления. С общей точки зрения фотонный кристалл является средой с решетчатой для света структурой, т.е. с периодическим изменением коэффициента преломления среды – в одном, двух или трех измерениях (1D-, 2D-, 3D-фотонные структуры соответственно). Период такой оптической решетки делают сравнимым с длиной электромагнитной волны, что кардинально влияет на волновую физику поведения фотонов. Управляя структурой решетки, становится возможным управлять шириной разрешенных и запрещенных зон для движения фотонов – включая их полное отражение, беспрепятственное прохождение, замедление или даже остановку.

Так, фотонные проводники обладают широкими разрешенными зонами, благодаря чему свет свет пробегает здесь большие расстояния, практически не поглощаясь. Другой класс фотонных кристаллов – фотонные изоляторы – обладает широкими запрещенными зонами. В отличие от обычных непрозрачных сред, в которых свет быстро затухает, превращаясь в тепло, фотонные изоляторы свет не поглощают, выступая как зеркала. Что же касается фотонных полупроводников, то они обладают более узкими по сравнению с изоляторами запрещенными зонами, что очень удобно для организации управления световыми потоками. Это можно делать, например, влияя на положение и ширину запрещенной зоны. Из этого должно быть понятно, что фотонные кристаллы представляют огромный интерес для построения лазеров нового типа, оптических компьютеров, хранения и передачи информации.

Одна из серьезнейших проблем, стоящих перед разработчиками и исследователями фотонных кристаллов, – это сложности создания высокоточных регулярных структур с микроскопическим периодом решетки порядка сотен нанометров (диапазон волн видимого света). Отчасти это удается решать современными методами литографии, например, трехмерной голографической литографией. В качестве рабочего материала используется особый фоточувствительный полимер, в котором создается трехмерное изображение будущего фотонного кристалла, и в местах, подвергшихся интенсивному облучению, полимер переходит в нерастворимую форму.

Но имеются и более крутые идеи. В фотонных кристаллах, зачастую являющихся существенно нелинейными оптическими средами, способны возникать явления самоорганизации структурных неоднородностей, обычно описываемые в терминах теории диссипативных структур или динамического хаоса. Иначе говоря, эти процессы могут означать, что в принципе есть возможность и для того, чтобы фотонный кристалл рос и формировался сам – как результат естественной самоорганизации материи [5]... На этой глубокой и воодушевляющей идее пора, пожалуй, завершить обзор квантово-оптических достижений науки. И перейти к самой занимательной части программы – очередным Картезианским играм.

- 
- [1] D. V. Vasilyev, I. V. Sokolov, and E. S. Polzik, «Quantum memory for images – a quantum hologram», 2008, Phys.Rev. A 77, 020302, (ArXiv: 0704.1737v2 [quant-ph] 17 Sep 2007)
  - [2] Olaf Mandel, Markus Greiner, Artur Widera, Tim Rom, Theodor W. Hänsch and Immanuel Bloch. «Controlled collisions for multi-particle entanglement of optically trapped atoms». Nature 425, 937-940 (30 October 2003) ; P. Treutlein, T. Steinmetz, Y. Colombe, B. Lev, P. Hommelhoff, J. Reichel, M. Greiner, O. Mandel, A. Widera, T. Rom, I. Bloch, and T. W. Hansch. «Quantum Information Processing in Optical Lattices and Magnetic Microtraps», arXiv:quant-ph/0605163v2 9 Jun 2006
  - [3] Kurnit, N. A., I. D. Abella, and S. R. Hartmann, «Observation of a Photon Echo», Phys. Rev. Lett. 13, 567 (1964)
  - [4] E. Yablonovitch, «Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics», Physical Review Letters 58 (20): 2059-2062 (1987)
  - [5] M. Duneau, F. Delyon, and M. Audier, «Holographic method for a direct growth of three-dimensional photonic crystals by chemical vapor deposition,» Journal of Applied Physics, Vol. 96, No. 5, 2004, pp. 2428-2436

# [8♣] Третьи Картезианские игры

## КИ-3: Структура системы [7C]

Окружающая человека реальность построена из материи, которая на глубоком фундаментальном уровне демонстрирует квантовые свойства – одновременно дискретные и волновые. С другой стороны, как любил подчеркивать один из отцов голографии Юрий Денисюк [1], коль скоро  
0 каждая материальная частица нашего мира сопровождается волной, то можно предположить, что в самой основе структуры мира лежат голографические явления. Хотя бы уже потому, что для точной регистрации и воспроизведения всевозможных волновых полей люди не сумели найти ничего лучшего, чем голография.

Некоторые, правда, полагают, что это просто проявление наивности человека, который в своих поисках истины все время пытается уподобить природу собственным наиболее совершенным или выдающимся творениям. Так, вместе с развитием физической теории механики, вселенную то и дело стали сравнивать с механизмом гигантских высокоточных часов. А когда  
1 наука проникла в тайны строения атома и начала осваивать ядерную энергию, родилась теория Большого Взрыва – словно своеобразная проекция на космос идеи атомной бомбы. Далекое не лучшего, конечно, но тем не менее знаменательного научного достижения эпохи. Чуть позже, вместе с освоением голографии и компьютеров, стали рождаться и другие модели вселенной – реальность как движущаяся голограмма или мир как квантовый компьютер.

Интересно, что очень похожая картина наблюдается и в других областях науки. Где нерешенные проблемы, быть может, не носят столь глобальный характер, как в астрофизике и космологии. Однако отыскать ответы к  
2 загадкам устройства, скажем, человеческого мозга оказывается ничуть не проще, чем постичь тайны функционирования вселенной. Поэтому видится совсем неслучайным, что и здесь работу мозга поначалу пытались уподобить механической машине, затем электронному компьютеру, а с некоторых пор – еще и биологической голограмме.

Если воспринимать подобные идеи в науке не как проявление человеческой наивности, а как естественный процесс постепенного приближения к истине, то придется предположить, что между устройством вселенной и мозга, вероятно, имеется довольно много общего. Но с рассуждениями о том, сколь важные и далеко уводящие выводы логично следуют из этого умозаключения, здесь лучше не торопиться. Куда более уместно  
3 разобраться с тем, как может выглядеть функционирование вселенной в условиях модели, построенной на идеях голографического квантового компьютера. А коль скоро это очередные Картезианские игры, то и голография, и квантовые вычисления в основе своей непременно должны содержать вихревое движение. То есть много-много всевозможных вихрей (и ничего, кроме вихрей), когда-то привидевшихся Декарту в его визионерских грезах.

#

Формулируя суть забавы чуть иначе, далее будет развернут своего рода мысленный эксперимент по созданию гигантского квантового компьютера, воспроизводящего голографическую реальность. Вся система должна работать без противоречий с известными законами физики, а моделируемая виртуальная реальность, соответственно, обязана быть максимально похожей на мир, известный людям по их ощущениям и опыту.

4 Понятно, что здесь с необходимостью должны быть стрела времени, неразрушимые причинно-следственные связи между явлениями и, естественно, память о том, что уже произошло. В качестве же фундаментальной основы эксперимента, необходимо подчеркнуть, берется уже выстроенная в предыдущих Играх модель мира как «односторонней мембраны» с многослойной структурой.

5 Как было в подробностях показано ранее, имеются веские доводы за то, чтобы считать ткань пространства вихревой губкой. Если искать аналогии для такого рода структуры среди более известных науке веществ и материалов, тогда самую близкую модель предоставляют, вероятно, жидкие кристаллы. То есть состояние материи, одновременно демонстрирующее как свойство упорядоченности, присущее кристаллам, так и высокой подвижности, характерной для жидкостей. В случае же вихревой губки имеет смысл говорить не просто о текучем, а о сверхтекучем состоянии флюида. Поэтому самое естественное название для ткани мира-мембраны – сверх-жидкий кристалл.

6 Вряд ли требуется пояснять мысль о том, что в модели «вселенная как компьютер» по определению не должно быть никаких проводов. Уровень современных технологий уже вполне позволяет предполагать подобного рода конструкции, где все задачи передачи и обработки информации решаются исключительно средствами оптики и акустики. Более того, в условиях кристаллов с сильно нелинейными свойствами методами оптоакустики и голографии можно воссоздавать любой нужный узел компьютера на то время, пока в нем есть необходимость. Нельзя сказать, что эта идея уже широко реализована в реальных устройствах, однако принципиальная возможность для такого рода манипуляций сомнений не вызывает.

7 Явно плодотворная идея «все в одном» естественным образом включает в себя не только внутренние элементы компьютерного процессора, но и то, что в традиционных вычислительных архитектурах принято называть внешними устройствами. Первым в этом ряду обычно стоит дисплей. На сегодняшний день ничего революционного в подобной конструкции уже нет, достаточно лишь вспомнить устройство так называемых планшетных компьютеров. Где вся система представляет собой, по сути дела, один лишь дисплей, но с продвинутой внутренней функциональностью. В компьютерах, способных формировать голографические изображения, особой конструкции дисплей принято именовать пространственно-световым модулятором или кратко ПСМ. Уместно отметить, что базовый материал, используемый при создании современных ПСМ, – это жидкие кристаллы.

##

8 Что касается памяти компьютера, то выбор возможных вариантов здесь в общем-то совсем невелик, поскольку требования к запоминающему устройству чрезвычайно высоки. Во-первых, оно с предельной аккуратностью должно фиксировать все, что происходит в мире. Причем регистрировать происходящее надо не только в макромасштабе, но и вплоть

до уровня самых мелких элементов материи, включая квантовые соотношения между ними – это во-вторых. Ничего лучшего и более естественного, чем голография, для максимально точного запечатления картины в любой конкретный момент времени человечество не придумало. Ну а уж коль скоро голограммы, как установлено, в принципе способны фиксировать и квантовые взаимосвязи объектов, вроде суперпозиции и сцепленности, то выбор становится очевиден. Только квантовая голографическая память.

В конструкции мира как мембраны фундаментальную роль играют колебания, в каждом такте которых происходит «смена картинка» – то есть циклический переброс изображений с одной стороны мембраны на другую. Понятно, что вполне логично считать данные интервалы тактами работы компьютера. А память в идеале должна быть устроена таким образом, чтобы полностью фиксировать картинку для каждого такта. Иначе говоря, в каждом такте колебаний от мембраны должен отслаиваться очередной слой квантовой голограммы, запомнившей состояния всех частиц во вселенной для данного момента времени. Учитывая важнейший принцип эффективного компьютеринга – сохранение копии всех кубитов в каждом такте обработки – можно заметить, что такая схема обеспечивает как полную обратимость вычислений, так и нулевые энергозатраты на обработку.

Идея об отслаивании, то есть отделении всякого очередного снимка-голограммы от ткани мембраны, представляется одновременно естественной и принципиальной. Потому что именно так снимается вопрос о причинах невозможности путешествий во времени, разрушающих причинно-следственные связи в строении мира. Точнее, следует говорить о невозможности материальных путешествий, подразумевающих отрыв от мембраны вечного «теперь». Но эта конструкция вполне позволяет оперировать памятью материи. То есть виртуально возвращаться в интересующую точку прошлого и наблюдать, как все тогда было, аккуратно считывая (или даже меняя) содержимое памяти того или иного объекта. Если, конечно, иметь соответствующую технологию и уметь ею пользоваться.

Пока что, впрочем, куда более актуален другой вопрос: как именно может происходить подобное отслаивание и сохранение голограмм? Подсказки, ясное дело, по условиям игры следует искать в природе вихрей. И, соответственно, в физике спиральных структур, фиксирующих принципы вихревого движения. Например, представляется весьма логичным в качестве основы квантовой голографической памяти для материи взять структуру спиральных цепочек типа ДНК. Во-первых, это уже реализованный в природе носитель информации. Во-вторых, многослойные спиральные структуры характерны для холестерических жидких кристаллов. В-третьих, самозарождение одиночных и двойных спиралей наблюдается в пылевой плазме. В-четвертых, такого вида структуры формируются в центрах галактик. Короче говоря, игнорировать столь многочисленные подсказки – все равно, что идти против природы.

###

Кроме того, идея о цепочках памяти, тянущихся за частицами материи, весьма удачно ложится на ряд описанных ранее конструктивных схем – типа акустического левитатора или, скажем, топологического квантового компьютера на косах. Все пространство между мембраной и источником ее

вибраций можно рассматривать как одно большое устройство «мобильной левитации». Где имеется один мощный излучатель и много-много крошечных подвижных отражателей – объектов на мембране. В едином звуковом поле слоистой структуры каждый такой отражатель подвешивает собственную цепочку памяти, которая перемещается в пространстве вместе с движениями рефлектора.

d В тех случаях, когда объекты на мембране взаимодействуют, их цепочки памяти переплетаются – что можно трактовать как практическое воплощение идеи теоретиков о топологическом квантовом компьютере на косах. Замечательные геометрические свойства такой конструкции не только обеспечивают квантовым вычислениям повышенную устойчивость к помехам. Можно показать, что вращение, заложенное в топологию спиралей памяти, играет и чрезвычайно важную роль при фиксации причинно-следственных соотношений между объектами, движущимися в пространстве-времени.

e При этом имеются все основания говорить, что в данном компьютере, моделирующем реальность, важнейшую роль самой главной программы играет стрела времени. То есть неким неотъемлемым образом заложенный в конструкцию алгоритм функционирования, без которого не было бы внятных связей между событиями, а значит, и смысла во всем происходящем. Отсюда должно быть понятно, что стрела времени вместе с дисплеем-мембраной и голографической памятью, представляют собой ключевые элементы той системы, устройство которой будет рассмотрено в ходе данных Игр.

f Но прежде, чем переходить к конкретным элементам системы, имеет смысл напомнить один из снов – о «музыке дымящихся зеркал». Если при чтении последующих разделов у вас вдруг появится ощущение связи между данным сном и конструкцией компьютера, то наверняка это не будет случайностью.

---

[1] Denisyuk Yu.N., «My way in holography», Leonardo, 1992, V. 25, # 5, pp 425-430 (Pergamon Press)

## КИ-3: Структура дисплея [7D]

В условиях голографического квантового компьютера, конструируемого здесь для воссоздания окружающей человека реальности, логично предположить, что дисплей одновременно является и процессором. Дабы не плодить лишних сущностей, как говорят в таких случаях мудрецы. Сведенная до более конкретных понятий, эта общая идея означает, что мельчайший элемент картинки – его принято именовать пиксель – здесь обладает еще и функциями кубита, то есть мельчайшего элемента в логике квантового процессора. Вряд ли требуется разъяснять, что все эти богатые функции в мире-мембране с необходимостью придется возложить на вихревой осциллон, с одной стороны выступающий как протон, а с другой как электрон. Просто потому, что ничего другого здесь нет. Вопрос лишь в том, как такая штука может работать.

Ранее уже не раз было показано, что практически на любой вопрос ответы у человека давно имеются. Дело лишь в том, чтобы отыскать среди них наиболее близкие к истине. А затем попытаться их состыковать – по возможности без противоречий. Конкретно в данном случае самым перспективным началом для поиска ответа представляется «незамкнутый» треугольник Озеен-Эйнштейн-Паули. Первый ученый, напомним, явно симпатизировал второму, второго и третьего связывала дружба, но вот между третьим и первым, увы, всегда была откровенная неприязнь. Сложись их отношения чуть иначе и сформируйся треугольник взаимных интересов, глядишь, и у четвертого человека – неизвестного французского инженера Ранке – появилась бы возможность сделать большой вклад в науку XX века.

На рубеже 1920-1930 годов, когда Эйнштейн и Сцилард занимались конструированием тепловых насосов, Озеен изучал жидкие кристаллы, а Паули завел дружбу с Карлом Юнгом, инженер-металлург Жорж Ранке изучал циклические сепараторы для очистки газа от пыли. И обнаружил в их работе явление, весьма необычное с точки зрения физики. Газ, выходящий из центра струи циклона, имел более низкую температуру, чем исходный. Сконцентрировавшись на механизме, порождающем такую аномалию, Ранке вскоре создал и запатентовал «вихревую трубу» – устройство для эффективного разделения входного потока на два, горячий и холодный. По сути дела, Ранке практически реализовал здесь того самого демона Максвелла, что способен отделять быстрые молекулы от медленных.

В вихревой трубе Ранке нет движущихся частей, а общая конструкция на удивление проста. Разогнанный в специальной камере-улитке входной газ на большой скорости подается в трубу таким образом, чтобы давление и спиральное вращение увлекали его в один из концов трубы. На этом конце имеется кольцевое выходное отверстие для горячего газа, но лишь по краю трубы. А основная часть торца имеет форму конуса-отражателя. При правильно подобранных параметрах – размере выпускающего кольца, давления, скорости вращения газа – у вершины конуса образуется еще один, приосевой вихрь, увлекающий газ в направлении противоположного конца трубы. И если в том торце сделана не просто заглушка, а мембрана с подходящим отверстием по центру, то из этого отверстия пойдет струя газа, более холодного чем на входе.

#

Поскольку разница температур на двух выходах трубы может быть очень значительной, десятки градусов, у Ранке не было проблем с наглядной демонстрацией своего устройства. Однако научная общественность все равно восприняла изобретение инженера крайне скептически. Физика процесса «трубы Ранке» представлялась не просто неясной, но и сильно противоречащей теории. А именно, второму началу термодинамики, запрещающему убывание энтропии. Лишь много лет спустя, уже после второй мировой войны, вихревая труба Ранке все же получила промышленное применение, т.е. некоторое признание. И хотя с физикой данного процесса полностью разобраться так и не удалось, наиболее неясные моменты просто «замели под ковер» и, как это обычно принято, стали считать, что раз процесс освоен – значит он понят.

Как бы там ни было, вихревая труба Ранке привлечена сюда не за сложную судьбу, а по причине ее взаимосвязей с треугольником О-Э-П и физикой мира-мембраны. Интересы Карла Озеена, скажем, наверняка оказались бы очень полезны при исследованиях вихрей в жидкокристаллической структуре пространства. Исследования Эйнштейна и Сциларда в области тепловых насосов, термодинамики и демона Максвелла тесным образом сопряжены с открытием Жоржа Ранке. А Вольфганг Паули, сильно впечатленный идеями своего нового друга Юнга о многозначительных совпадениях-синхронизмах, мог бы узреть еще один важный сон, связавший все эти идеи в единую картину... Но коль скоро ничего такого реально не произошло, можно восстановить несложившуюся композицию здесь.

В прошлых Играх было показано, что общую динамику мембраны-вселенной удобно представлять в виде вращающегося сферического вихря или раздувающегося в невесомости мыльного пузыря. Сейчас пора обратить внимание на материал в привлеченной аналогии – мыльный раствор. Потому что мыло представляет собой наиболее знакомый человеку, повседневный пример так называемых лиотропных жидких кристаллов. Структуру лиотропного ЖК составляют два или более компонентов, а молекулы растворителя заполняют пространства вокруг элементов компаунда чтобы обеспечивать текучесть системы. Разная концентрация раствора дает лиотропному ЖК еще одну степень свободы, позволяя порождать существенно разные в своих свойствах фазы. Все эти нюансы представляются важными для дальнейшего развития аналогии.

Можно напомнить, что в геометрическо-топологическом разделе Игр демонстрировалось, как происходят циклы смен внешней и внутренней стороны мембраны – частицы сжимаются, увеличивая свою энергию, и переходят в другой энергетический слой, затем в третий, после чего начинается обратное расширение. С одной стороны, эта картина явно перекликается с разными фазами лиотропного жидкого кристалла. Для взгляда же на процесс с несколько другой стороны пора вспомнить, что при каждом переходе частицы – протона или электрона – с одной поверхности мембраны на другую происходит переворот спина или топологического заряда. Иначе говоря, частица все время продолжает вращаться как бы в одну и ту же сторону, не замечая, что мир вокруг мигнул и перевернулся вместе с ней.

##



8 Ныне, благодаря экспериментам с лучом лазера, уже в целом известно, как именно происходят подобные перевороты топологических зарядов у вихрей. И коль скоро уравнения, описывающие поведение оптических вихрей в луче, справедливы и для физики сверхтекучих жидкостей, вполне логично привлечь этот же механизм для пояснения работы пикселей-кубитов в конструируемом здесь дисплее. А именно, надо обратить внимание, что в момент своей максимальной фокусировки (где происходит переворот топологического заряда) круглый некогда вихрь превращается в отрезок тонкой линии или трубки, похожей на бар-перемычку в центре спиральной галактики. Эта трубка перпендикулярна главной оси вихря, поэтому есть основания уподобить ее вихревой трубе Ранке.

9 В данной модели важно постоянно учитывать, что мир этого двустороннего дисплея все время мигает, а стороны мембраны, соответственно, сходятся-расходятся. Логично считать, что фаза максимального сжатия пикселя в трубку Ранке происходит циклически в моменты максимального схождения сторон дисплея. Иными словами, в таких условиях с концов данной вихревой трубки выбрасываются не струи, а квантованные порции энергии. Из устройства трубы Ранке следует, что энергия пары квантов, вылетающих в противоположные стороны, существенно различается. Один должен быть быстрым, другой медленным. Но еще больше различается их функциональное назначение.

a Первый квант – с высокой энергией – вылетает из трубки в момент наибольшего сжатия мембраны. Поэтому естественная для кванта форма вихревого кольца в этих условиях выглядит как его плоская версия, то есть «овал Кельвина» – пара одинаковых плоских вихрей, вращающихся в противоположных направлениях. Одна из главных особенностей в физике такой пары – движение по строго прямолинейной траектории. А в рамках данной модели – еще и естественное движение вдоль мембраны с весьма специфической особенностью. Ось полета этой «бабочки» расположена так, что одно крыло-вихрь все время находится на внешней стороне мембраны, а второе крыло на внутренней. Выполняемая ими там роль, как уже должно быть ясно, – это единичные кванты фотонов света. (Вообще-то, в совокупности пара таких квантов выполняет еще одну важную роль – гравитона – но об этом подробнее в другом месте).

b Второе вихревое кольцо, испускаемое пикселем из другого конца в вихревой трубке Ранке, имеет не только меньшую скорость, но и существенно иную функцию. Прежде всего по той причине, что эта частица не остается в пространстве дисплея, а отрывается от мембраны. Не вдаваясь пока в нюансы, можно сказать, что данная частица остается на своем месте, там где вылетела, а мембрана движется дальше по оси времени. Для такого рода частиц, постоянно отслаивающихся от дисплея, в голографическом квантовом компьютере находится важное применение в качестве ячеек памяти. Что примечательно, физики-теоретики не только в значительной степени исследовали свойства подобного рода гипотетических частиц, но и давно придумали для них собственное название – тахионы. О них, впрочем, разговор впереди.

###

c Здесь же имеются в наличии практически все детали, необходимые для пояснения работы квантового дисплея-мембраны. Главная особенность данного устройства в том, что внешних зрителей тут нет, а объекты-картинки одновременно являются и объектами-наблюдателями. И коль

скоро абсолютно любой объект составлен из пикселей-кубитов, в первую очередь имеет смысл поподробнее разобраться с механизмом того, как именно эти пиксели видят, ощущают и взаимодействуют друг с другом. Предполагая, естественно, что ничего прочего – кроме вихрей и волн – у них для этого не имеется.

*d* Важнейшим элементом взаимодействия, ясное дело, являются кванты-фотоны, испускаемые пикселями в каждом такте дисплея, то есть при всяком сжатии мембраны. Распространяясь далее вдоль мембраны, фотон движется как винтовая дислокация в кристалле, т.е. рассекающая пространство плоскость, вращающаяся вокруг оси движения. Роль секущей плоскости тут играют плоские вихри-«крылья» фотона – каждый в своей половине мира. За время от одного сжатия мембраны до другого каждое крыло делает полуоборот, так что они успевают замести-просканировать по половине своего пространства. В следующем (полу-)такте, когда пиксели переворачиваются, крылья аналогично заметают остальную половину пространства. И, соответственно, делают сечение любого пикселя, встретившегося на их пути.

*e* Под сечением здесь следует понимать факт прохождения плоскости дислокации через частицу. Из-за этого именно по данной плоскости проходит очередное сжатие мембраны, а спин частицы на какое-то время приобретает вполне определенную направленность в пространстве. Или, как говорят в физике, происходит измерение квантового состояния частицы. Поскольку плоскость этого сечения была задана пикселем, испустившим фотон, то оба пикселя оказываются таким образом в одной плоскости. Или, пользуясь другой терминологией, в состоянии квантовой сцепленности. Общая плоскость сечения, так сказать, обеспечивает им запись в один и тот же слой квантовой голографической памяти.

*f* Из представленной картины несложно понять, почему так велика роль вероятностей в данном механизме. Угол наклона секущей плоскости находится в постоянном изменении, словно у вращающейся стрелки часов, а частицы-пиксели при этом осциллируют, так что их диаметр непрерывно меняется от минимума до максимума и обратно. В таких условиях предсказать результаты конкретных взаимодействий фотона с частицей оказывается возможным лишь в терминах вероятных событий. Уместно также напомнить, наверное, что каждый пиксель в своих осцилляциях проходит три существенно разных энергетических слоя. А фотон, соответственно, в своем движении рассекает все эти слои одновременно. То есть значительная часть его взаимодействий с пикселями материи может вообще не наблюдаться в доступном и привычном человеку слое.

---

## КИ-3: Структура памяти [7E]

Конструируемый здесь квантовый оптический компьютер предназначен для моделирования окружающей реальности. Иначе говоря, вычислениями в данном случае являются операции взаимодействия между разнообразными объектами мира, начиная с самых мелких – пикселей-осциллонов. Которые одновременно являются как участниками, так и, можно сказать, зрителями разворачивающихся событий. А коль скоро каждый из таких пикселей физически представляет собой уединенную волну, то наиболее логичным и естественным путем для построения устойчивых объектов на их основе является голограмма. То есть интерференционная картина, образованная стоячими волнами от когерентных источников.

Условие когерентности, то есть взаимной согласованности колебаний, является для голограммы принципиально важным. Некогерентные волны не взаимодействуют и, словно не замечая, проходят друг сквозь друга. Однако, поскольку в данном случае речь идет о когерентных волнах в 4-мерном пространстве, желательно прояснить, что именно здесь подразумевается под согласованностью колебаний. Потому что все пиксели мембраны в своих осцилляциях по определению пульсируют с одной и той же базовой частотой. Но для того, чтобы такие поперечные колебания были когерентными в 3-мерном мире голограммы, они должны лежать в одной плоскости. Удобно называть это секущей плоскостью – где взаимодействуют лишь те пиксели, спин которых перпендикулярен данному сечению.

На роль такой секущей плоскости по своим геометрическим свойствам идеально, по сути дела, подходит дислокация, сопровождающая распространение кванта света в пространстве. С одной стороны, спин того осциллона, что испустил квант, перпендикулярен плоскости дислокации по определению – вследствие самой физики для процесса порождения. С другой стороны, как бы эта дислокация ни распространялась впоследствии, все попавшие в ее зону действия другие осциллоны тут же – при очередном мигании мембраны – выстраивают свой спин перпендикулярно плоскости сечения. Происходит это естественным образом по энергетическим, как принято выражаться, причинам. Дислокация – это уже готовый дефект структуры, и именно здесь происходят перестройки с минимальными затратами энергии.

Если в терминах голографического дисплея представленный процесс описывает приведение пикселей в когерентное состояние, то с точки зрения квантовой механики это есть ни что иное, как процесс квантового измерения. Иначе говоря, именно таким путем – испуская реальные и виртуальные фотоны – частицы непрерывно ощупывают и «измеряют» состояние друг друга, т.е. образуют общие миры своих взаимодействий. Хотя и давно освоенный в квантовой физике, но все равно мутноватый термин «виртуальные фотоны» в данном контексте обретает куда более осмысленное содержание. Под реальным фотоном обычно принято понимать цуг квантов – или волновой пакет – испускаемый атомом в возбужденном состоянии. А фотоны виртуальные – это единичные кванты света, испускаемые пикселями постоянно, но в общем случае недоступные для наблюдения со стороны.

#

4 Тема о том, кто и что может наблюдать в 4D-мире, непрерывно расслаивающемся на 3D-сечения, напрямую связана с устройством голографической памяти в объемных средах. А также с тахионами, другими ненаблюдаемыми в экспериментах частицами, давно предсказанными теоретиками и оптимально подходящими на роль элементов, формирующих голографическую память материи. В квантовой физике эти странные частицы появляются из базовых уравнений, как формально допускаемые теорией решения, обладающие мнимой массой и всегда движущиеся со скоростью выше световой.

5 В условиях модели мира как вибрирующей мембраны данные свойства означают, что тахионы – это по определению такие вихревые частицы, которые отрываются от поверхности мембраны при излучении пикселем световых квантов. Иначе говоря, это другой, парный квант энергии, излучаемый с противоположного – «холодного» – конца трубки Ранке. Очевидно парадоксальная ситуация, когда «горячий» квант с более высокой энергией остается в теле мембраны (и распространяется там со скоростью света), а «холодный» квант отрывается, демонстрируя сверхсветовую скорость, объясняется механически – направлением движения этих частиц. У светового кванта направление «выстрела» всегда направлено в сторону движения мембраны, а для кванта тахиона испускание происходит, соответственно, в противоположном направлении.

6 Пояснить эту идею более наглядно можно с помощью аналогии из устройства звездных галактик. В 2005 г. с помощью орбитального инфракрасного телескопа Spitzer астрономы из университета Висконсина установили, что наша галактика Млечный путь тоже имеет бар-перемычку, как и большинство других спиральных галактик вселенной. При столь близком изучении объекта, физика которого для ученых пока еще остается не очень ясной, одним из самых неожиданных открытий стало то, что бар расположен не в плоскости галактики, а под углом около 45 градусов. И если представить, что вся эта конструкция быстро движется по оси, перпендикулярной плоскости галактики, то будет, вероятно, примерно вот что.

7 Горячие порции материи, что выходят с конца бара, расположенного выше плоскости, захватываются диском галактики. А холодные порции, что выходят с нижнего конца бара – стягиваются в туманность типа спирального винта, формирующегося по оси движения как своеобразный след (тоже, кстати, наблюдаемый астрономами). Проецируя эту аналогию на устройство пикселя, можно сделать такое сопоставление: звезды в плоскости диска галактики – это разбегающиеся кванты света, а винтовой формы скопления по оси источника – это, соответственно, отрывающиеся от мембраны тахионы. В теоретической физике подобный гипотетический процесс скопления носит название конденсация тахионов и обеспечивает им стабильное дальнейшее существование.

##

8 Известный метод привлечения аналогий, которые, естественно, ничего не доказывают, но дают наглядные примеры из уже освоенных физикой явлений, представляется удобным развить и дальше. Конденсат пылевой плазмы, самопроизвольно образующий устойчивые винтовые спирали, которые взаимодействуют друг с другом и способны к обмену информацией – это

уже установленный наукой факт. В сооружаемую же здесь модель этот факт очень удобно встроить по той причине, что сдвоенный мир мембраны формируется акустическими, по сути дела, колебаниями. Выступающими, среди прочего, и в качестве опорного излучения для голограмм. А принципы акустической левитации обеспечивают для спиралей голографической памяти сверхстабильное, можно сказать, существование. Потому что единичные тахионы каждой спирали прочно закрепляются в узлах стоячей акустической волны, толкающей мембрану.

9 Что касается формы для частицы-тахиона, то в условиях картезианских игр вряд ли надо напоминать, что она не может быть иной, нежели вихревое кольцо. Не столько даже потому, что на основе ферритовых, магнитных и прочих колец нередко устроена память компьютеров. А по той причине, что необходимость формы замкнутого вихревого кольца для оторвавшегося вихря была продемонстрирована еще Германом Гельмгольцем. Такая форма элементарной ячейки памяти здесь существенна, поскольку спин вихревого кольца при своем рождении фиксирует пространственное положение той плоскости дислокации, что образована парным ему фотоном. Иначе говоря, тахион запоминает волновой фронт акусто-оптической голограммы в данной точке пространства-времени.

a Сконструированная жидкокристаллическая структура Большой Вселенной, таким образом, в своем «поперечном» сечении имеет четко выраженную слоистую структуру из голографических снимков-срезов мира для каждого момента времени в жизни мембраны. Если же смотреть вдоль оси времени, то структура жидкого кристалла образована неисчислимым множеством нитей, закрученных в винтовые спирали. Нить памяти тянется за каждым пикселем голографического дисплея и – вследствие осцилляций пикселя – обеспечивает параллельную фиксацию происходящего по всей толще мембраны. Ибо мембрана, можно напомнить, содержит пятое «частотное» измерение – три слоя, существенно различающихся плотностью энергии. А каждый пиксель, протыкая мембрану, живет и взаимодействует с квантами во всех слоях одновременно.

b Информация о том, в каком из слоев произошло взаимодействие, в памяти отражается через радиус винтовой спирали – чем выше частота вращения у пикселя, тем уже в этом месте спираль. В целом же описанная конструкция голографической памяти и дисплея-процессора позволяет смоделировать если не все, то очень многие из загадок мироустройства – от термодинамической необратимости и стрелы времени до жизни и эволюции мультивселенной с сохранением причинно-следственных связей между явлениями. Ну а если природу проблемы удастся смоделировать, по крайней мере в мысленных экспериментах, то, вероятно, можно считать лучше понятой и проблему, и природу...

###

c При переходе к более конкретному разбору свойств, присущих сконструированной здесь голографической памяти, имеет смысл вспомнить характерные общие особенности для подобного рода устройств. Память в объемных средах способна хранить в одном и том же массиве материала огромное количество голограмм, которые разделяются при записи-считывании одним из трех основных способов. А именно: изменением угла наклона луча, изменением частоты экспозиции, точной фокусировкой луча в конкретном месте голограммы. Чем точнее установлены параметры луча при записи-считывании, тем аккуратнее и четче получается изображение. И, соответственно, наоборот.

В условиях дисплея-мембраны, где кванты света разлетаются от каждого пикселя в разные стороны совершенно хаотически, столь же беспорядочными оказываются и акусто-оптические голографические снимки, каждый миг фиксирующие эту картину в слоях памяти. Но если спин одного из пикселей на какое-то время зафиксировать в определенном положении, то расходящиеся от него дислокации квантов соответственно зафиксируют спины у окружающих пикселей. Пиксели «увидят» друг друга, что сопровождается волновым (обычно это называют электромагнитным) взаимодействием осциллонов в виде притяжения-отталкивания. Создаются условия для самопроизвольного формирования простейших устойчивых ансамблей из пикселей - в виде атомов водорода, для начала.

Здесь пора уточнить, что плоскость дислокации, порождаемая движением каждого кванта, в общем случае непрерывно меняет свой угол наклона в пространстве. Или обладает циркулярной поляризацией, как предпочитают выражаться ученые. Формулируя упрощенно, для каждого угла наклона порождается свой 3D-мир, в котором взаимодействуют частицы-пиксели лишь со вполне определенным направлением спина. Что, соответственно, фиксируется снимками-голограммами в их общей памяти. Но при этом появляются предпосылки для срабатывания известного принципа обратимости голограмм. Который автоматически, по сути, порождает единственный «наиболее вероятный» 3D-мир с обеих сторон мембраны.

Благодаря принципу обратимости, в свете одного из снятых объектов общая интерференционная картина голограммы воссоздает изображение второго. Если же объектов-пикселей много, а голограмм с их снимками под разными углами еще больше, то голографическая среда при освещении под любым углом воссоздает некую совокупную картину из наложенных друг на друга образов. Самым же ярким в этой совокупности будет образ, соответствующий наибольшему числу совпадений в позициях спинов. А поскольку голограмма - сама по себе решетка из энергетических неоднородностей, эта структура становится своего рода шаблоном, который стремится упорядочить спины пикселей. Иначе говоря, автоматически формирует для них наиболее вероятную структуру расположения. Таким образом в симметричной 4D-мультивселенной формируется выделенный 3D-мир, выступающий как оболочка мембраны. Нечто подобное, судя по всему, человек воспринимает как наблюдаемую вселенную.

## КИ-3: Структура программы [7F]

Получив общее представление о том, каким образом в 4D-мире порождается устойчивая 3D-оболочка, далее естественно задаться вопросами об эквивалентности. Иными словами, до какой степени похожей на наш мир можно было бы сделать виртуальную трехмерную вселенную, моделируемую с помощью описанной здесь конструкции? То есть своего рода квантового компьютера, работающего на основе акусто-оптических эффектов голографии в условиях сверхтекучей и вибрирующей гранулированной среды. Современная наука для доказательства подобной эквивалентности систем знает лишь один надежный способ – обстоятельные и точные математические выкладки. Любая попытка продемонстрировать такие вещи без формул и уравнений чаще всего воспринимается настороженно, чуть ли не как легкомысленный аттракцион. Тем не менее, нечто подобное станет сутью следующего большого раздела книги (West или «Теория...»).

Но прежде, чем переходить к теории, остается выполнить последний из пунктов в заявленной программе Картезианских игр. Ибо смысл всякого компьютера заключен отнюдь не в устройстве процессора-дисплея-памяти, а в программах, которые система способна выполнять. В конкретной же программе интересующего нас компьютера – максимально достоверно симулировать окружающую реальность – центральную роль, бесспорно, играет стрела времени. Это роль ключевого механизма, так сказать, который наполняет всю модель внятным содержанием – устанавливая четкие причинно-следственные связи между событиями и фиксируя упорядоченные структуры, то и дело возникающие среди всеобщего хаоса случайностей.

Для большей ясности картины полезно отметить, что в теории относительности имеется очень подходящее понятие под названием «мировая линия», обозначающее траекторию любого объекта в пространстве-времени. В рамках исследуемой модели сугубо абстрактная прежде мировая линия обретает вполне конкретное воплощение в виде тахионных цепочек памяти, тянущихся за каждой частицей материи и сплетающихся в косы для каждого ансамбля частиц. Из сопоставления кос памяти с мировыми линиями, впрочем, не следует выводить полную идентичность данных понятий.

В теории относительности принято считать, что мировая линия каждого тела – это своего рода ось его собственного времени. Поэтому если мировые линии не пересекаются, то нет и смысла рассуждать о том, какое из событий на разных линиях относится к «прошлому», а какое к «будущему». Кроме того, теория относительности не запрещает многократные пересечения и самопересечения мировых линий с нарушением порядка времени... В условиях же рассматриваемой здесь модели нарушение порядка времени невозможно в принципе. Все косы памяти формируются послойно и строго синхронно, поэтому независимо от пространственного расстояния для любых событий на 3D-мембране имеют смысл понятия «раньше» и «позже». При этом в общей памяти системы все произошедшие события сосуществуют по сути одновременно.

Описанный чуть ранее механизм, формирующий нити памяти для всех частиц материи во вселенной, обеспечивает запоминание состояний каждого кубита в каждом такте работы системы. Иначе говоря, никакая информация не теряется, так что реализован энергетически наиболее эффективный – беззатратный – вариант полностью обратимых вычислений. Откуда естественным образом возникает вопрос: как могут этот порядок и обратимость сочетаться с очевидной термодинамической необратимостью 3D-мира? Мира, где столь убедительно царят случайности и второй закон термодинамики, любую замкнутую и упорядоченную поначалу систему приводящие к состоянию максимального беспорядка. Формулируя вопрос чуть иначе, можно задать его так: в чем же хитрости столь парадоксальной работы программы?

Наиболее полным, развернутым ответом на данный вопрос является вся эта книга. В конкретном же контексте раздела существенными представляются несколько важных частных случаев. Одна из них – соотношение случайностей и детерминизма в квантовом мире. При работе практически любого компьютера весьма важной функцией является генератор случайных чисел, часто требующийся в программах для «внесения элемента разнообразия», говоря упрощенно. В подавляющем большинстве случаев такие генераторы на самом деле порождают вовсе не случайные, а псевдослучайные последовательности. То есть числа, вырабатываемые строго детерминированным алгоритмом, но без очевидных на первый взгляд закономерностей. Обычно этого бывает достаточно, однако в редких случаях прибегают и к подлинно случайным генераторам, берущим сигналы из хаоса в тепловом шуме электронных схем.

Нечто похожее происходит и в квантовом компьютере, симулирующем реальность. Поведение базовых элементов – пикселей-кубитов и фотонов-дислокаций – описывается уравнением Шредингера для волновой функции. Важнейшая особенность данного уравнения в том, что это математическое описание для вполне детерминированного и обратимого поведения объектов. То есть места для случайности здесь просто нет. Однако квантовая эволюция управляется не только этим уравнением, но также, как принято считать, схлопыванием или коллапсом волновой функции, который является необратимым и обеспечивает квантовую стрелу времени. В рассматриваемой здесь модели коллапс пикселя в большинстве случаев является псевдослучайным и вызван пересечением со строго детерминированной плоскостью дислокации фотона. Но выглядит это как случайность.

В математической физике подобная ситуация давно известна и изучена под названием стохастическая модель для детерминированной системы. В общем случае стохастическими принято называть те модели, которые содержат случайное поведение элементов. Но в ряде случаев многие вполне детерминированные модели, особенно включающие дифференциальные уравнения (как уравнение Шредингера, к примеру), в своем поведении могут представляться не поддающимися точным предсказаниям. Важнейшая тому причина – очень чувствительная зависимость от начальных условий, которые зачастую точно неизвестны из-за числовой нестабильности параметров и ограниченной точности измерений. Что, собственно, и имеет место в случае квантового компьютера-дисплея – применять стохастическую вероятностную модель здесь просто удобнее.



Но пора напомнить, что в обычных компьютерах помимо массы псевдослучайных последовательностей иногда применяются еще и генераторы на основе случайного шума. Также и поведение пикселей на квантовом дисплее-мембране не является сугубо predetermined и детерминированным только лишь воздействием окружения. Ведь все пиксели здесь живут на двух сторонах и в нескольких слоях одновременно, так что всегда присутствует ненулевая вероятность влияния одних слоев на другие. А кроме того, пиксели имеют длинную-длинную память, которая тоже голографически влияет на их текущее состояние - индивидуально и в ансамблях. Волновое голографическое воздействие памяти на картинку дисплея является важным и в то же время несколько парадоксальным элементом в работе так называемой испускающей стрелы времени.

Все волны по своей природе распространяются вовне от своего источника - будь это брошенный в воду камень, акустический излучатель или источник света. В общем случае испускаемые волны увеличивают энтропию системы, так как естественным образом увеличивают беспорядок в состоянии элементов. Что и принято иногда именовать испускающей стрелой времени. Но в принципе, как известно из эффектов стоячих волн и голографии, испускание волн можно сонастроить для упорядочивания системы в устойчивые геометрические формы. Яркими примерами такого уменьшения энтропии являются фигуры Хладни и климатические эксперименты Ханса Йенни (см [4D]). Данные примеры особо интересны тем, что упорядочение может происходить спонтанно, а память системы это фиксирует. Чем повышается вероятность голографического воспроизведения подходящих условий снова и снова. То есть происходит закрепление устойчивых конфигураций элементов в пространстве-времени.

Еще одна принципиально важная особенность рассматриваемой конструкции - это постоянное сплетение цепочек памяти в косы. С одной стороны, как уже показано теоретиками, такие косы дают очень удобный топологический механизм, обеспечивающий естественную устойчивость квантовой системы к шумам и повышенную сопротивляемость к разрушению когерентности. Если же смотреть с другой стороны, то сплетающиеся косы-траектории для любых взаимодействующих объектов порождают механизм четких причинно-следственных связей между явлениями. Или, как еще говорят, обеспечивается каузальная стрела времени.

Переплетение нитей и кос - это результат вращений объектов, а вращение является примером простейшей, как выражаются математики, некоммутативной операции. В отличие от сложения или умножения чисел, где результат не зависит от порядка элементов, итог операций вращения напрямую зависит от порядка их применения. Образно выражаясь, благодаря некоммутативности по итогу взаимодействия объектов можно восстановить, что было сначала, а что потом. То есть причину и следствие. Но чтобы понять, каким образом мировые линии взаимодействующих объектов непрерывно сплетаются в косы, хотя они вовсе не обязательно вращаются друг вокруг друга в 3D, необходимо вспомнить хитрости топологического устройства мембраны-дисплея. А именно, что при постоянных перескоках с одной стороны мембраны на другую все пиксели как бы стягиваются в единую точку, а затем вновь расходятся по своим местам. И если объекты взаимодействуют, то именно в эти моменты стягиваний происходит переплетение их кос памяти. И фиксация причинно-следственных связей, соответственно.

### ###

Для того, чтобы описанная схема работала, все косы должны заплетаться строго в одну сторону. Иначе говоря, хиральность всех спиралей памяти должна быть одна и та же – левая, к примеру. Но поскольку происходит это все в невидимом для обитателей оболочки мире, в наблюдаемых учеными субатомных взаимодействиях данная закономерность почти никак не проявляется. Только в очень тонких экспериментах со слабой ядерной силой, вроде каонового распада, где иногда отмечается нарушение закона сохранения четности и зарядового сопряжения частиц. Эти процессы напрямую связывают с очевидным дисбалансом материи и антиматерии в природе. Если бы «слабая стрела времени» – или, иначе, хиральность кос памяти – была направлена в другую сторону, то наблюдаемая вселенная была бы сделана из антиматерии, а не из материи...

Для полноты представленной здесь картины будет полезна еще одна иллюстрация. Поскольку каждый пиксель мембраны пребывает в состоянии постоянного «теперь», его собственную ось времени можно мысленно замкнуть в кольцо. В процессе осцилляций диаметр пикселя существенно изменяется от максимума до почти точки. На кольце времени это будет соответствовать тору переменной толщины – или, образно выражаясь, змею, кусающему себя за хвост.

Картинка со змеем-уроборосом появилась здесь по той причине, что осцилляции каждого пикселя – это в миниатюре, можно сказать, простейшая модель циклов эволюции вселенной. Ведь если последовательно применять голографический принцип, лежащий в основе сконструированной здесь модели, то каждая, даже самая мелкая часть голограммы должна воспроизводить всю картину целиком. Без массы подробностей, но в самых общих важных чертах. Из этого обобщения, в частности, следует, что природа пикселя на мембране позволяет проследить и этапы эволюции мембраны в целом. А именно, последовательное прохождение через три частотных слоя и итоговое замыкание мировых линий для начала нового цикла.

Понятно, что очерченная здесь схема устройства и функционирования системы нуждается, конечно же, в дополнительных обоснованиях, пояснениях и уточнениях. Для современной науки наиболее убедительными в подобных ситуациях аргументами являются математические выкладки. Практически все нужные расчеты, причем в изобилии, уже произведены множеством разных исследователей при решении собственных частных задач, так что остается лишь аккуратно собрать результаты и состыковать их друг с другом в общую непротиворечивую модель. Для доступности изложения, сделать это удобнее без формул и уравнений – на сугубо понятийном уровне.