

# idb. КНИГА НОВОСТЕЙ

## Е - между сном опытом

### 01:10 Оптика вихрей

#### [10♥] Форма вселенной

[Загадки додекаэдра](#) [60]

[Вглядываясь назад](#) [61]

[Космос как зал зеркал](#) [62]

[Аномальные факты и структуры](#) [63]

#### [9♦] Структура вращений

[И все-таки она вертится?](#) [64]

[Супержидкий кристалл](#) [65]

[Левая рука Меркурия](#) [66]

[Спин на ленте Мебиуса](#) [67]

#### [J♠] Кванты оптики

[Свечение звука](#) [68]

[Развилки истории](#) [69]

[Свет как дислокация](#) [6A]

[Сцепленность как суть](#) [6B]

#### [Q♣] Вторые Картезианские игры

[Резиновая геометрия](#) [6C]

[Конвективная геометрия](#) [6D]

[Гранулированная геометрия](#) [6E]

[Многомерная геометрия](#) [6F]

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

<http://KNIGANEWS.ORG>

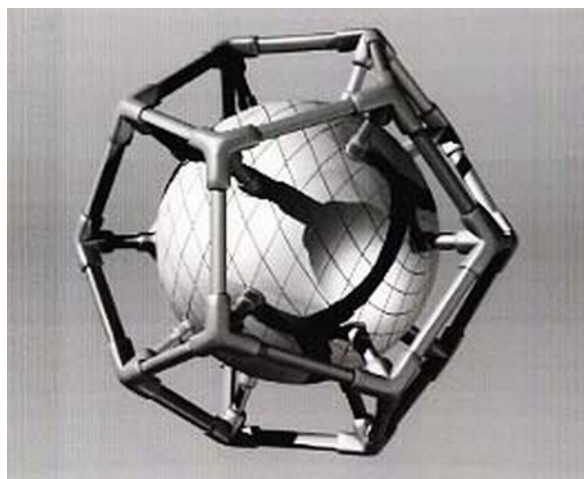
# [10♥] Форма вселенной

## Загадки додекаэдра [60]

0 Американский астроном Карл Саган (1934-1996) остался в памяти людей не только как ученый с интересными и глубокими идеями, но и – в первую очередь – как выдающийся популяризатор науки. Многие сотни статей, свыше десятка книг, знаменитый цикл телепередач о космосе – вряд ли кто мог сравниться с Саганом по яркости рассказов о космических исследованиях, внеземных мирах и поисках инопланетных цивилизаций.

1 Своеобразным завещанием ученого стал вышедший через несколько месяцев после его смерти фантастический фильм «Контакт» режиссера Роберта Земекиса. Картина была снята по одноименному роману Карла Сагана и посвящена теме, вдохновлявшей астронома всю жизнь – первой осмысленной встрече человечества с внеземным разумом.[1]

2 По замыслу Сагана, в качестве устройства для связи с инопланетянами в «Контакте» выступает некая гигантская Машина, построенная людьми по чертежам, полученным в радиосигналах из космоса. Внутри этой Машины помещается капсула с посланницей человечества (главную роль в фильме исполняет Джоди Фостер), а форма капсулы в сочетании с быстро вращающимися гигантскими внешними кольцами машины обеспечивают сворачивание пространства и образование пространственно-временных туннелей (кротовых нор), по которым человека почти мгновенно переносит из одного конца галактики в другой.

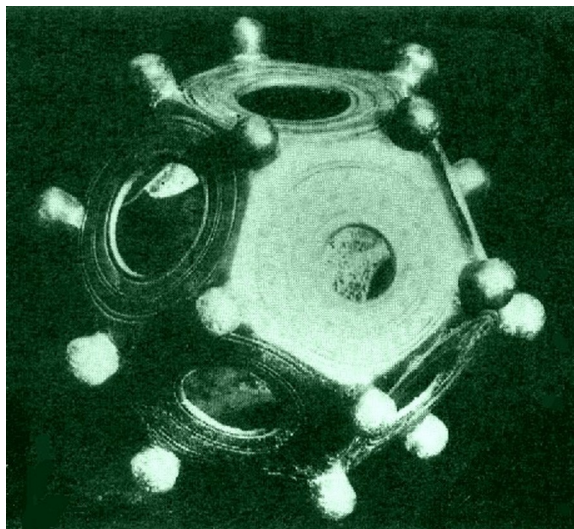


*Капсула из фильма "Контакт"*

3 Имеет смысл обратить внимание на форму капсулы – сфера, помещенная внутри правильного многогранника-додекаэдра. Откуда появилась именно такая форма конструкции, история умалчивает. Однако есть множество доводов в пользу того, что выбор этот был явно неслучайным.

#

4 Начать придется издалека. Имеется, к примеру, довольно старая тайна, над которой по сию пору безуспешно ломают голову археологи и историки. Во множестве стран Западной и Центральной Европы при раскопках поселений эпохи Римской империи (I-IV века н.э.) время от времени находят сравнительно небольшие, от 4 до 10 сантиметров в поперечнике, пустотелые предметы, изготовленные из бронзы или камня. Каждый такой предмет имеет форму геометрически правильного многогранника додекаэдра – 12 равных пятиугольных сторон, в центре каждой из которых имеется по одному круглому отверстию, ведущему в полую сердцевину. На каждой из граней обычно нанесены борозды-окружности – концентрическими кругами вокруг центрального отверстия. Каждая из 20 вершин додекаэдра увенчана маленьким набалдашником в форме шарика.[2]



*Римский додекаэдр*

5 К началу XXI века в раскопках обнаружено уже около сотни этих необычных вещей, большей частью в Германии и Франции, но также в других странах – Великобритании, Голландии, Швейцарии, Австрии, Венгрии – на территориях, когда-то входивших в состав северных провинций Римской империи. Никто не знает, каково было предназначение данных предметов. Гипотезы и предположения выдвигаются самые разные – то ли это подсвечники, то ли необычные игральные кости, а может, детские игрушки или какие-то замысловатые инструменты для наблюдений. Все эти догадки, впрочем, абсолютно ничем подкрепить, поскольку загадочные додекаэдры ни словом не упомянуты в письменных источниках и не встречаются ни на одном из изображений того времени.

6 Есть, правда, одна весьма правдоподобная гипотеза, согласно которой предметы эти относятся не столько к римским завоевателям, сколько к культуре местных племен и народов, издревле населявших перечисленные территории. Вполне возможно, что имеется какая-то прямая связь между додекаэдрами римского периода и множеством куда более древних каменных шаров с вырезанными по их поверхности правильными многогранниками. Такие шары-многогранники, датируемые периодом между 2500 и 1500 годами до н.э., находят в Шотландии, Ирландии и северной Англии.[3]



*Неолитические многогранники*

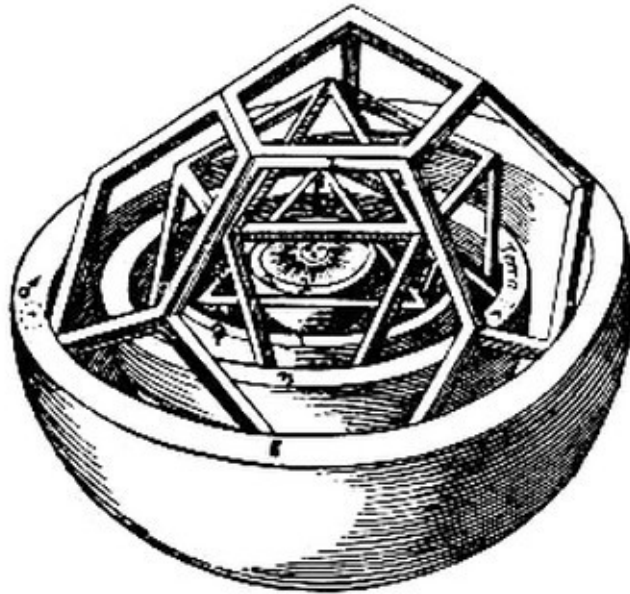
7 Примерно к этому же времени, 3000-2000 гг. до н.э., принято относить возведение знаменитого мегалитического комплекса Стоунхендж в Англии. Никто до сих пор не знает наверняка, каково было предназначение этого впечатляющего сооружения. Однако явно неслучайное расположение гигантских камней, привязанное к циклам движения солнца по небу, дает основания полагать, что Стоунхендж служил не только для религиозно-ритуальных обрядов (наиболее вероятное назначение), но и для астрономических наблюдений. И – кто знает – быть может, и маленькие каменные шары-многогранники играли для древних жителей Британии роль «домашних Стоунхенджей», олицетворяя какие-то важные для них духовные идеи и тайны мироустройства.

##

8 О чем же можно говорить наверняка, так это о важной роли правильных многогранников, и додекаэдра в частности, в картинах мироздания, созданных в Древней Греции школой пифагорейцев. Чуть позже эти идеи были тщательно развиты в текстах Платона (427-347 д.н.э.). Так, в позднем платоновском диалоге «Тимей» четыре главных элемента материи – огонь, воздух, вода и земля – представлены в виде скоплений крошечных частиц в форме правильных многогранников: тетраэдра, октаэдра, икосаэдра и куба. (Интересно отметить, насколько эта схема созвучна современной физической концепции о 4 агрегатных состояниях вещества – плазма, газ, жидкость и твердое тело). Что же касается пятого правильного многогранника, додекаэдра, то его Платон упоминает как-то вскользь, отметив лишь, что эта форма использовалась «для образца» при создании вселенной, имеющей совершенную форму сферы.

9 Исследователи древнегреческой философии предполагают, что здесь Платон, вероятно, размышлял в духе более ранней традиции, уходящей к Пифагору. В пифагорейской школе известна идея, согласно которой додекаэдр образовывал «балки», на которых был возведен свод небес. Также уместно отметить, что в более раннем диалоге «Федон» Платоном вложено в уста Сократа такое (12-гранное додекаэдрическое) описание небесной, более совершенной земли, существующей над землей людей: «Рассказывают, что та Земля, если взглянуть на нее сверху, похожа на мяч, сшитый из двенадцати кусков кожи».

а Под очевидным влиянием идей Платона, в последующие века философы и ученые стали предполагать, что небеса сделаны из пятого элемента «эфира» или «квинтэссенции». Эту традицию можно увидеть в иллюстрациях к работе Иогана Кеплера *Mysterium Cosmographicum*, изданной в 1596 году, где космос изображен в форме додекаэдра.



*Космос по Кеплеру*

*b* Наступившая после Кеплера эпоха великих научных открытий постепенно принесла совершенно новые знания об окружающем мире, включая и молекулярное устройство материи. Что же касается наивных платоновых идей об особой роли правильных многогранников в мироустройстве, то в конце XIX века отношение к ним стало примерно такое же, как к древней мифологии – местами забавно, однако для физической науки совершенно бесполезно.

###

*c* Последующее развитие научных знаний, впрочем, довольно быстро вернуло платоновы тела в фокус глубоких и заинтересованных исследований [4] – в связи с их заметной ролью в теории симметрий, принципиально важной для квантовой теории и физики частиц. А состоящий из пятиугольников 12-гранный додекаэдр при этом опять остался несколько в стороне – но, как и прежде, с некоторым смутным намеком на отношение к форме мироздания.

*d* Сначала это произошло на рубеже XIX-XX веков, когда великий математик Анри Пуанкаре занялся исследованием возможных форм для вселенной, представляемой в виде замкнутого 3-мерного пространства. Опровергая одну из собственных гипотез, Пуанкаре сумел мысленно создать теоретически непротиворечивую конструкцию с чрезвычайно интересными топологическими свойствами – так называемую многосвязную сферу гомологий.

*e* А спустя еще четверть века, уже после смерти Пуанкаре, два других математика, Вебер и Зейферт, доказали, что абстрактную сферу гомологий Пуанкаре можно получить из вполне конкретного объекта – если «склеить» друг с другом противоположные грани додекаэдра. В 3-мерном пространстве это, конечно, невозможно, однако в 4-мерном – вполне (как, например, двумерную полоску бумаги в 3-мерном мире склеивают концами в бесконечную одностороннюю ленту Мебиуса). Таким образом в науке топологии появился объект под названием «додекаэдрическое пространство Пуанкаре» – четырехмерное платоново тело со 120 додекаэдрическими гранями.[5]



*Додекаэдрическое пространство Пуанкаре*

*f* Ну а затем, на рубеже XX-XXI веков было сделано еще одно важное открытие, на этот раз в области экспериментальной астрофизики. Результаты наблюдений, многие месяцы кропотливо накапливавшиеся космическим спутником WMAP, оказались в противоречии с общепринятой космологической моделью. Но зато эти данные свидетельствовали в пользу того, что вселенная может иметь форму додекаэдрического пространства Пуанкаре. Или, как выражался в свое время Платон, «похожа на мяч, сшитый из двенадцати кусков кожи».[6]

- 
- [1] Carl Sagan, "Contact". Simon and Schuster, 1985
  - [2] Benno Artmann, «Roman Dodecahedra», Mathematical Intelligencer, Vol. 15, pp. 52-53, 1993.
  - [3] Dorothy N. Marshall, «Carved Stone Balls,» Proceedings of the Society of Antiquaries of Scotland 180, pp. 40-72, 1976/77
  - [4] Michael Atiyah and Paul Sutcliffe, «Polyhedra in physics, chemistry and geometry», arXiv:math-ph/0303071, Milan Journal of Mathematics (2003)
  - [5] Jeffrey Weeks, «The Poincaré Dodecahedral Space and the Mystery of the Missing Fluctuations», Notices Of The AMS, Volume 51, Number 6 (2004)
  - [6] Jean-Pierre Luminet, «A cosmic hall of mirrors», Physics World, September 2005

## Вглядываясь назад [61]

Общая форма мироздания, окружающего человека, начала, похоже, интересовала мыслителей примерно тогда же, когда зарождалась философия. И что примечательно, главные вопросы и важнейшие умозаключения на этот счет были сформулированы древними философами так, что в сути своей не сильно изменились и по сию пору – несмотря на все бесспорные достижения современной науки. Более того, в отношении трех ключевых вопросов относительно крупномасштабной формы вселенной нынешние ученые мало чем отличаются от древних мудрецов, поскольку, как и прежде, точных ответов они по-прежнему не знают.

Что это за вопросы? В предельно сжатом, но при этом еще понятном виде, перечень главных загадок выглядит так. Первое, является вселенная открытой или замкнутой? Иначе говоря, если двигаться в космосе все время «только прямо», то такое движение никогда не закончится или же в конечном счете вернется в исходную точку? Второй важнейший вопрос тесно связан с первым и касается кривизны пространства – является оно плоским, как лист бумаги на столе, либо же искривленным, подобно поверхности шара или седла? Третий вопрос на языке современной науки звучит так – какова крупномасштабная топология вселенной? Грубо говоря, ответ здесь должен быть таким, чтобы стало ясно, сколько в свободно деформируемой «резиновой» модели вселенной имеется сквозных отверстий – ноль (то есть в конечном счете это сфера), одно (тор, или «бублик»), два отверстия или же много, много больше. Вопрос об общей топологии вселенной очень важен по той, к примеру, причине, что число отверстий непосредственно связано с количеством разных кратчайших путей из одной точки пространства в другую.

Если более подробно говорить о первом вопросе, об открытой или замкнутой природе мироздания, то самый знаменитый, вероятно, аргумент в пользу бесконечности был выдвинут в Древней Греции философом-пифагорейцем Архитом Тарентским (428-347 до н.э.). Современник Платона, Архит прославился не только в качестве одного из наиболее выдающихся военачальников и политиков города-государства Тарента, но также как видный мыслитель, математик и астроном.

В своих космологических рассуждениях и философских спорах с теми, кто пытался доказать ограниченность вселенной, Архит предлагал провести примерно такой мысленный эксперимент. Поместившись на самом крае вселенной, были бы вы в состоянии протянуть свою руку или палку дальше за пределы этого края или нет? Согласитесь, продолжал он, что было бы очень странно, если бы вам это не удалось (зная общие свойства пространства). Но тогда конец вытянутой палки будет означать новый край. Передвинувшись к которому, вы сможете опять протянуть палку дальше и повторить свой вопрос. Таким образом пространство представляет собой нечто такое, что явно не имеет границ...

#

4 Сколь бы убедительно ни звучали подобные рассуждения, ни Платон, ни Аристотель, как известно, не приняли данный аргумент Архита, оставшись твердыми сторонниками идеи об ограниченной Вселенной. Полное разрешение этого парадокса было получено наукой лишь два с лишним тысячелетия спустя, когда Бернгардом Риманом была разработана концепция многомерной гипертесферы. На этой основе было показано, что 3-мерное пространство может быть не имеющей краев поверхностью для 4-мерной гипертесферы конечного объема – подобно тому как нет краев у поверхности обычного шара. А коль скоро нет конца, то нет и основы для цепочки рассуждений Архита.

5 Правда, из римановой геометрии гипертесфер абсолютно никак не следует, что именно такова форма вселенной. Но бесспорно, что в силу своих выдающихся симметричных свойств шарообразная форма с очень давних времен начала предполагаться как наиболее вероятная форма мироздания. Например, в космологии еще одного древнегреческого философа, Эмпедокла из Акраганта (ок. 490-430 до н.э.), вся вселенная представлялась в виде гигантской сферы или Сфайроса – который в своих бесконечных циклах расширения-сжатия одновременно существует как тело и мыслит как ум.

6 Переносясь же в век XX, имеет смысл упомянуть, что и Альберт Эйнштейн, создав к 1917 году общую теорию относительности (ОТО), отдавал предпочтение пространственно замкнутым формам вселенной, поскольку они элегантно снимают проблему граничных условий на бесконечности. Но личные предпочтения автора это одно, а выведенные им уравнения – нечто совершенно иное. Эйнштейновские формулы ОТО, соотносящие массу и энергию с деформациями в геометрии пространства-времени, работают применительно к локальным, а не глобальным свойствам вселенной. Иначе говоря, в больших космических масштабах они в равной степени подходят для пространств произвольной кривизны – и выпуклых, и плоских, и вогнутых.

7 Подходя чуть строже к сути второго вопроса, о кривизне, понадобится более аккуратно пояснить само понятие кривизны в трехмерном пространстве. Основные типы искривленного пространства определяются следующим образом. Когда о некоторой области пространства-времени говорится как о «плоской», или имеющей нулевую кривизну, то подразумевается, что в такой области пространства параллельные линии остаются на том же расстоянии и никогда не сходятся (как в евклидовой геометрии). Либо, другой случай, когда обширная область космоса может иметь «положительную кривизну», так что параллельные линии постепенно сходятся и в конечном счете пересекаются (трехмерный аналог поверхности сферы). Наконец, третий вариант, когда область космоса может быть «искривлена отрицательно», так что параллельные линии расходятся одна от другой и никогда не пересекутся (трехмерный аналог гиперболического пространства Лобачевского).

##

8 Среди этих трех базовых вариантов только положительно искривленное пространство с необходимостью имеет замкнутую форму, а плоское и отрицательно искривленное пространство могут быть как открытыми, то есть бесконечными (простейший случай), так и разными способами замкнутыми (сложная топология). Поскольку в математическом арсенале науки нет уравнений, которые позволяли бы из общих соображений вычислить глобальную кривизну вселенной, то здесь приходится целиком



опираться на результаты астрономических наблюдений. Такие наблюдения особо ценны еще и тем, что позволяют заглядывать в далекое прошлое расширяющейся вселенной – когда ее размеры были существенно меньше, а кривизна, по идее, более ярко выраженной.

g Из-за конечной скорости света человек видит луну такой, какой она была примерно секунду назад. Солнце – каким оно было восемь минут тому назад. От других ближайших к солнечной системе звезд свет идет несколько десятилетий. А из более удаленных мест данной области вселенной, вроде центра галактики Млечный путь, свет доходит до Земли за 30 000 лет. Что же касается далеких галактик, то о них человек знает лишь то, что происходило там миллиарды лет назад. Ну а если, наконец, с помощью новейших приборов взглянуть еще глубже в космос, то приоткрываются картины из совсем далекого прошлого, относящегося к началу наблюдаемой вселенной.

a И наблюдения эти, нельзя не признать, науку несколько озадачивают. Чуть ли не ежегодно появляется все больше и больше фактов, с постоянно растущей надежностью (по последним данным, свыше 98%) подтверждающих, что на всем доступном обзоре пространстве вселенная имеет нулевую кривизну. Иначе говоря, вплоть до самого отдаленного прошлого выглядит совершенно «плоской». Возобладавшая в науке «стандартная космологическая модель» решает эту проблему гипотезой об инфляции. Согласно которой вселенная уже при рождении мгновенно раздулась до столь гигантских размеров, что для наблюдателей ее кривизна сразу стала практически неотличима от нулевой (подобно тому, как Земля представляется плоской стоящему на ее поверхности человеку).

b Однако теория, в качестве своей основы берущая абсолютно непостижимый и физически необъяснимый механизм инфляции, устраивает далеко не всех ученых. Поэтому в качестве более разумной альтернативы разрабатываются гипотезы о сложной топологии вселенной, которая замкнута сама на себя неким замысловатым образом, а наблюдателям лишь представляется необозримо гигантской и плоской.

###

c Принято считать, что третий главный вопрос – о нетривиальной, возможно, топологии космического пространства – впервые начал всерьез обсуждать видный германский астроном Карл Шварцшильд (1873-1916). В одной из его работ [1], опубликованной за полтора десятка лет до рождения эйнштейновской общей теории относительности, была рассмотрена принципиальная возможность многосвязной топологии вселенной, то есть, грубо говоря, существование нескольких путей для прохождения лучей света от одного космического объекта к другому. На основе этой идеи Шварцшильд выдвинул и метод для примерной оценки реального размера вселенной – с помощью выявления небесных тел, являющихся на самом деле многократными образами одного и того же источника...

d Вполне справедливо, наверное, говорить, что в истории европейской науки столь необычные идеи впервые были выдвинуты Шварцшильдом. Однако абсолютно оригинальными называть их затруднительно, поскольку в истории древней восточной философии зафиксировано нечто очень похожее по смыслу.

e Один из основателей буддийской школы хуаянь, мастер Фа Цанг (643-712), знаменитый своими талантами объяснителя, был весьма доброжелательно принят при дворе китайской императрицы Ву, которая тоже хотела

овладеть премудростями философии буддизма. И вот однажды императрица, отчаявшись самостоятельно постичь тонкости учения, попросила Фа Цанга дать ей наглядную и простую демонстрацию всеобщей космической взаимозависимости. Тогда Фа Цанг велел соорудить особый зал, где зеркалами были покрыты все стены, пол и потолок. Внутри зала учитель подвесил горящий светильник, чтобы показать отношение «Единого ко многому». После чего он поместил в центре комнаты небольшой кристалл и показал императрице, как все окружающее отражается в гранях кристалла, тем самым проиллюстрировав, каким образом бесконечно малое содержит бесконечно большое, а бесконечно большое – бесконечно малое.[2]

*f* Если кому-то вдруг покажется, что между гипотезами Шварцшильда и буддийскими идеями Фа Цанга наблюдается лишь поверхностное сходство без каких-либо совпадений по существу, то тогда самое время перейти к совсем свежей теории современного французского астронома Жан-Пьера Люмине. В которой есть все – не только идеи Шварцшильда и зал зеркал с гранями кристалла Фа Цанга, но и додекаэдрическое пространство Пуанкаре с его нетривиальной топологией.

---

[1] K. Schwarzschild, Vierteljahrsschrift der Astron. Gesellschaft 35, 337 (1900)

[2] Chang, Garma C.C. «The Buddhist Teaching of Totality: The Philosophy of Hwa Yen Buddhism». University Park: Penn State Press, 1971 ; Liu, Ming-wood. «The Teaching of Fa-Tsang: an Examination of Buddhist Metaphysics». Ann Arbor: University Microfilms International, 1979

## Космос как зал зеркал [62]

Во времена, когда слово «компьютер» подразумевало солидных размеров машинный зал со шкафами электронных схем, понятие «компьютерная игра» уже ничем, по сути, не отличалось от нынешнего. Правда, о существовании таких игр в 1950-1960-е годы мало кто был наслышан, однако знавшие и допущенные играли с помощью компьютера ничуть не менее самозабвенно, чем сегодня. Одной из самых популярных забав у компьютерщиков того времени была игра Spacemar, суть которой сводилась к поединку двух космических ракет, пытающихся поразить друг друга с помощью выстрелов торпедами. Несмотря на примитивную суть, реализована игра была весьма замысловато. Например, помещенная в центр экрана звезда оказывала реалистичное гравитационное воздействие на траектории ракет вплоть до их фатального поглощения. Другой примечательной особенностью игры была замкнутость пространства, в котором происходило сражение. Как только ракета уходила, скажем, за правый край экрана, она тут же появлялась с левого края. Аналогично, по достижении нижней границы поля корабль сразу возникал сверху.

Хотя все, кто играл в Spacemar, осваивали концепцию замкнутой компактной вселенной легко и естественно, нельзя сказать, что подобная идея была в 1960-е годы популярна или мало-мальски распространена среди ученых-космологов. Разных теорий о возможной форме реального космоса, конечно, хватало. Но почти весь XX век космология занимала в науке положение, мало отличающееся от метафизики. Для проверки теорий экспериментом ставить опыты космологических масштабов человек не может, а точности данных, наблюдаемых астрофизиками в природе, долгое время ощутимо не хватало для сколь-нибудь определенного выбора в пользу той или иной конкурирующей гипотезы.

Принципиальные сдвиги стали происходить с началом 1990-х годов. Технический потенциал и чувствительность аппаратуры, наконец, возросли настолько, что стало возможным проверять и отсеивать космологические теории уже на основе конкретных результатов наблюдений. Данные от космического спутника COBE, от исследовательских зондов, запущенных в верхние слои земной атмосферы, новые результаты астрономов – поток свежей содержательной информации словно пробудил тихо дремавшую «метафизическую» науку. Всего за три года второй половины 90-х годов в области космологии было опубликовано новых статей примерно столько же, сколько за предыдущие 80 лет.

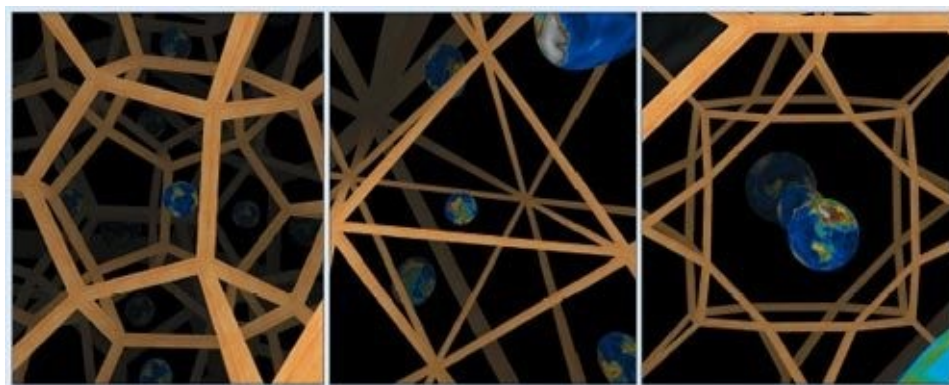
Хотя новые данные наблюдений оставляли по-прежнему открытым вопрос о наиболее вероятной форме космоса, в них были отмечены не то чтобы явные признаки, но скорее намеки на нетривиальную компактную топологию вселенной. Кроме того, самая простая топология – плоское бесконечное пространство евклидовой геометрии – не устраивает многих ученых по целому ряду принципиальных причин. Рассуждая философски, никто понятия не имеет, как оперировать физической бесконечностью. То есть, как можно говорить что-то конкретное о бесконечном пространстве, в котором по сути возможны и происходят абсолютно любые, даже самые невероятные вещи. В математическом аспекте, в частности, крайне сложно вычислить, каким образом могла бы появиться бесконечная вселенная с плоским евклидовым пространством. Повсюду в физике ученым приходится

иметь дело с так называемым принципом наименьшего действия, когда законы природы выбирают самый простой и наименее затратный путь для решения той или иной проблемы. Поэтому и в данном случае, считают космологи, природа могла бы иметь более легкий путь, создавая относительно небольшую «компактную» вселенную, нежели бесконечную.

#

4 Разнообразных гипотез о возможной форме многосвязного космоса было выдвинуто в достатке. Самая простая из этих компактных вселенных по сути воспроизводит идею игры Spacewar, но только для условий 3-мерного пространства. Такой «плоский бублик», свернутый в трех измерениях, топологи именуют 3-тором. Представить этот объект визуально довольно затруднительно, однако принцип устройства понять несложно. Можно сказать, что это пространство эквивалентно кубической формы ящику, в котором противоположные стороны некоторым образом склеены друг с другом.

5 Понятно, что жизнь внутри такого космоса-ящика оказывается очень похожа на жизнь внутри зала зеркал. И то, что сидящему внутри представляется разными звездами, уходящими глубже и глубже в пространство, на самом деле – одни и те же светила, повторяющиеся снова и снова, по мере того как свет отправляется в путешествие с одной стороны куба и возвращается обратно с противоположной стороны. Подобная игра зеркальных отражений не ограничена лишь бубликами или кубами. Исследующие данную область математики, в частности, американские топологи Уильям Терстон и Джеффри Уикс, описали целый ряд гипотез о вселенных, составленных из различных многогранников (призм, параллелепипедов, тетраэдров и т.д.), склеенных разными способами.[1]

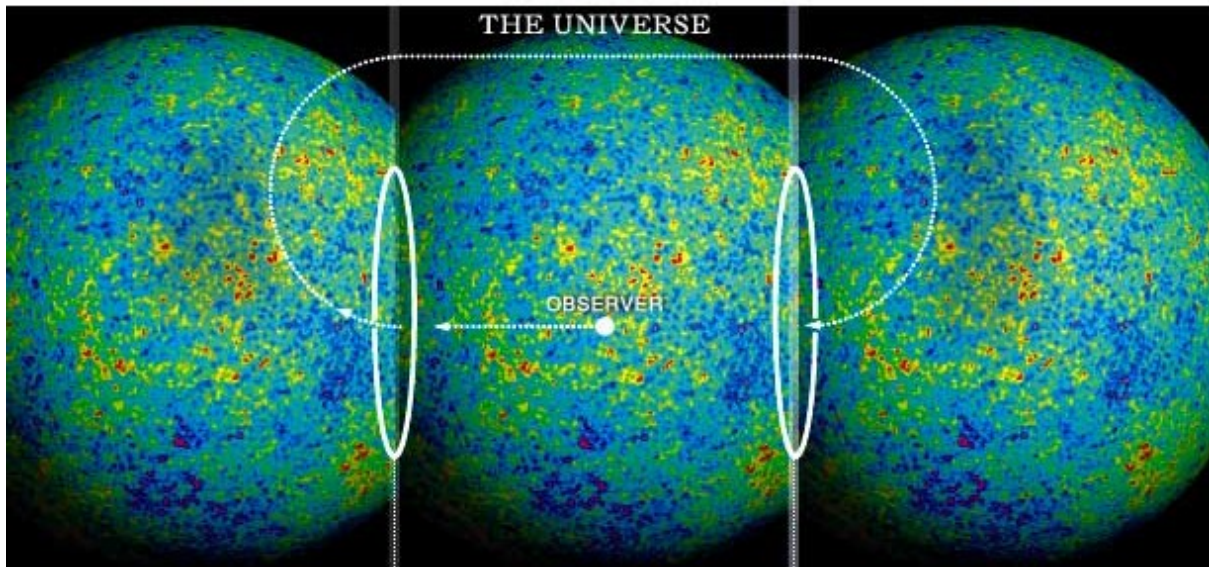


*Вселенные из многогранников*

6 Сюда же примыкает другое направление активных исследований топологии вселенной, именуемое «космической кристаллографией». В середине 90-х эту область начали разрабатывать французские астрономы из Парижской обсерватории (Luminet, Lehoucq, Lachieze-Rey) [2], а дальнейшее углубление и развитие идей было сделано в работах бразильских ученых. По сути, эти исследования аналогичны изучению повторяющихся структур из атомов, наблюдаемых в кристаллах. Но с тем отличием, что в космической кристаллографии исследователи ищут признаки повторяющихся структур в 3-мерной картине распределения ярких удаленных источников света, таких как галактические кластеры и квазары.

7 Сколь-нибудь существенных практических результатов космическая кристаллография, правда, за прошедшие годы получить не смогла. Но в 1998 году другая группа исследователей в США (Cornish, Spergel, Starkman)

предложила более перспективный метод для поиска признаков компактной многосвязной топологии – по карте распределения флуктуаций в микроволновом космическом фоне (МКФ). Было показано, что если физическое пространство действительно меньше, чем наблюдаемая вселенная, то какие-то участки на карте МКФ будут непременно иметь несколько копий. Более того, эти образы-«призраки» должны появляться в противоположных концах небесной сферы, как пары так называемых совпадающих кругов – в местах, где рисунок горячих и холодных пятен окажется один и тот же. В простейшем случае размер таких кругов зависел бы от расстояния между «стенами ящика» вселенной: чем меньше вселенная, тем больше угловой размер кругов.[3]



*Пары совпадающих кругов*

##

8 Наконец, требуется упомянуть еще об одном важном методе исследования топологии космоса – изучении спектра акустических колебаний ранней вселенной по карте МКФ. Зарождающуюся вселенную, как предполагается, пронизывали разной частоты акустические волны, вызывавшие небольшие флуктуации плотности в изначальной плазме. За последующие миллиарды лет вселенная претерпела гигантское расширение, однако эти первоначальные флуктуации навсегда остались запечатленными как горячие и холодные пятна на карте космического микроволнового фона.

9 Самый простой способ для понимания связи между акустикой и топологией – это равномерно рассыпать мелкий песок на поверхности мембраны барабана, а затем заставить мембрану вибрировать. Зерна песка будут скапливаться в характерных областях, образуя на поверхности так называемые фигуры Хладни – специфических очертаний рисунки, дающие информацию о локальной геометрии барабана и об упругости его мембраны. Однако распределение этих пятен зависит также и от общей формы – т.е. от топологии – барабана. Например, волны будут отражаться по-разному в зависимости от того, является мембрана бесконечной или конечной, а также в зависимости от того, имеет она форму круга, эллипса или еще какую-либо иную.

Как звуковые волны или колебания барабанной мембраны, так и флуктуации космического реликтового излучения можно изучать, раскладывая их на отдельные гармоники, т.е. представляя набором чистых тонов различной частоты. А соответствующим образом анализируя комбинацию колебательных мод вселенной, выделяемых на карте реликтового излучения, можно делать выводы о геометрии пространства 13,7 млрд лет назад. Анализ акустических гармоник вызвал особое внимание космологов вот по какой причине. Сначала в грубых данных спутника COBE в 1990-е годы, а затем и в более точных результатах спутника WMAP, запущенного NASA в 2001 году для изучения аномалий в реликтовом излучении, были зафиксированы очень существенные отклонения от картины длинноволновых мод, предсказываемой стандартной космологической моделью. Когда первые данные от WMAP были опубликованы весной 2003 года, то оказалось, что «нижние тона» звучания вселенной оказались намного слабее, чем предсказывает теория для плоского бесконечного пространства. Эти и несколько других не менее серьезных аномалий столь явно расходились с общепринятой моделью, что среди наиболее консервативных космологов стало набирать силу мнение, будто эти результаты вызваны систематическими ошибками в анализе данных.

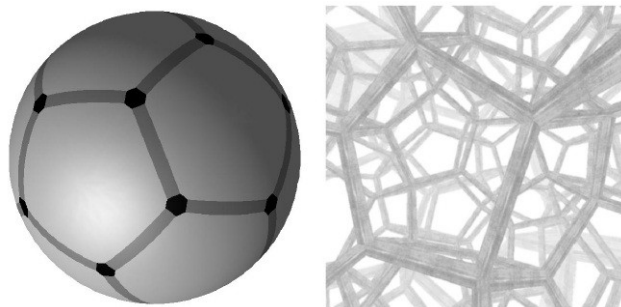
Однако меньшие числом и авторитетом сторонники идей о сложной топологии космоса, со своей стороны, попытались не отвергать данные как «невозможные», а найти более естественное, геометрическое объяснение наблюдаемому спектру энергии. Говоря упрощенно на языке музыкальных аналогий, эту ситуацию можно уподобить колебаниям струны, которая закреплена с обоих концов и по естественным причинам максимальная длина порождаемой ею волны может лишь в два раза превышать длину струны. А колокол не может издавать звуки с длиной волны, превышающей его собственные размеры. Возможно, что примерно то же самое означают и необычно низкие амплитуды длинноволновых мод вселенной. А точнее, что длинные волны (т.е. температурные флуктуации выше больших угловых масштабов) отсутствуют по простой причине – космос просто недостаточно велик для их поддержки. Таким образом, из геометрического объяснения энергетического спектра карты WMAP естественным образом вытекает, что окружающая человека вселенная является конечным, многосвязным пространством с размерами меньшими, чем представляется из астрономических наблюдений.[4]

###

Более того, команда ученых во главе с Жан-Пьером Люмине и Джефри Уиксом, предложившая чуть ранее способ для «акустического прослушивания» формы вселенной, уже к осени 2003 года опубликовала работу, в которой была найдена конкретная топология пространства, согласно расчетам удовлетворяющая энергетическому спектру карты WMAP. Получалось, что вселенная имеет форму додекаэдрического пространства Пуанкаре. Или, говоря более простым языком, правильного многогранника-додекаэдра, надутого до сферы вида футбольного мяча. Но с той особенностью, что 6 пар противоположных граней у этого «мяча» склеены друг с другом.[5]

Особая красота модели вселенной как сферического додекаэдра виделась в том, что она не только прекрасно удовлетворяла данным наблюдений, но и, в отличие от других компактных топологий (3-торов, призм и т.д.), была по своей конструкции жесткой. То есть подходила сама по себе, как совершенно правильный многогранник, не подразумевающий никаких подстроек и подгонов свободных параметров под нужную модель. Кроме

того, в случае достаточно компактных размеров вселенной, гипотеза о додекаэдре вполне поддавалась экспериментальной проверке. Например, с помощью описанного ранее метода «совпадающих кругов».



*Вселенная как сферический додекаэдр*

Самое поразительное, что уже довольно скоро, в 2004 году совпадающие круги на карте WMAP были действительно обнаружены. Коллективом польских исследователей из Торуньского университета (В. Roukema, В. Lew, М. Cechowska, А. Marecki, S. Bajtlik) были найдены 6 пар строго симметрично расположенных кругов, каждый с угловым размером около 11 градусов, причем рисунок одного круга в каждой паре получался из другого при повороте на 36 градусов - как и положено для совмещения граней в додекаэдре (причем в каждом случае поворот перехода следовало делать по винту с левосторонней спиралью).[6]

Примерно годом ранее, еще до открытия додекаэдрической модели вселенной, один из видных американских ученых, комментируя метод совпадающих кругов, сказал примерно такие слова: «Если нечто подобное удастся обнаружить (в наблюдаемых астрономических данных), то это стало бы фантастическим результатом»...[7] Обнаруженные польскими учеными 6 пар кругов выглядят вдвойне фантастически, учитывая нетривиальный характер додекаэдрической модели. Более того, эта находка впоследствии была проверена и подтверждена независимыми исследованиями. Самое же поразительное, что открытие это не только не стало революцией в науке, но на сегодняшний день практически неизвестно неспециалистам. А те, кто знают, в массе своей считают забавным курьезом и пары совпавших кругов, и вообще додекаэдрическую модель в целом.

- 
- [1] W.P. Thurston, Three-dimensional geometry and topology (1997). Princeton Mathematical series 35, Ed. S. Levy, (Princeton University Press, USA)
  - [2] R. Lehoucq, M. Lachieze-Rey, and J.-P. Luminet, Astron. Astrophys. 313 (1996), 339-346
  - [3] N. Cornish, D. Spergel and G. Starkman, «Circles in the sky: finding topology with the microwave background radiation», Classical and Quantum Gravity (1998), 15, 2657-2670 (astro-ph/9801212)
  - [4] R. Lehoucq, J. Weeks, J.-P. Uzan, E. Gausmann and J.-P. Luminet, «Eigenmodes of 3-dimensional spherical spaces and their application to cosmology», Classical and Quantum Gravity, (2002) 19, 4683-4708 (arXiv:gr-qc/0205009)
  - [5] J. Luminet, J. R. Weeks, A. Riazuelo, R. Lehoucq, and J. Uzan, «Dodecahedral space topology as an explanation for weak wide-angle temperature correlations in the cosmic microwave background», arXiv:astro-ph/0310253, Nature 425, 593-595 (2003)
  - [6] B.F. Roukema, B. Lew, M. Cechowska, A. Marecki & S. Bajtlik. «A hint of Poincaré dodecahedral topology in the WMAP first year sky map». Astro. & Astrophys. (2004) 423 821 (astro-ph/0402608)
  - [7] «Universe as Doughnut: New Data, New Debate» By Dennys Overbye, New York Times, March 11, 2003

## Аномальные факты и структуры [63]

0 Глядя на жизнь науки со стороны, довольно непросто понять, почему одни революционные научные открытия принимаются, что называется, на ура и сразу, а другие – ничуть не менее значительные – результаты многие годы упорно игнорируются и всячески замалчиваются. Особо поразительно, что происходит это без сколь-нибудь заметного внешнего давления, словно по некому всеобщему соглашению ученых. И хотя причины такой избирательности далеко не всегда ясны, однако ярко и наглядно проиллюстрировать, по крайней мере, данную ситуацию можно без труда. Причем, для пущей выразительности и подчеркивания закономерностей в происходящем, параллельно будут рассмотрены сразу два важных открытия эпохи космических исследований.

1 В 1976 году у планеты Марс появились два новых искусственных спутника – запущенные с Земли космические корабли «Викинг» американского агентства НАСА. Каждый из аппаратов-близнецов имел спускаемый модуль для непосредственного изучения поверхности планеты и, самое главное, поиска признаков внеземной биологической жизни. Прибывший на неделю раньше «Викинг-1» с орбиты делал снимки ландшафтов Марса для выбора наиболее подходящих мест посадки. И вот одна из таких фотографий, под номером 35A72, в регионе Сидония зафиксировала весьма необычный объект – отдельно стоящее среди равнины скальное образование, удивительно похожее на гигантское человеческое лицо с устремленным в небо взором.

2 В тот же день, 25 июля, руководство НАСА устроило брифинг для прессы, на котором главный ученый марсианской миссии Джерри Соффен, рассказывая о ходе экспедиции, продемонстрировал фотографию «лица» журналистам примерно с таким комментарием – «вот какой странной бывает игра света и тени»... А дабы никаких сомнений у публики не оставалось, Соффен заверил, что несколько часов спустя «Викинг» сделал повторный снимок той же местности при другом освещении, и ничего похожего на лицо здесь уже не наблюдалось. Никакого «повторного» снимка, правда, предъявлено не было. Однако как научная, так и вся остальная общественность с готовностью и без вопросов приняли явно поспешное и ничем конкретным не подкрепленное объяснение НАСА.

3 Впоследствии выяснится, что никакого повторного снимка у НАСА в тот момент не было и быть не могло в принципе – из-за постоянного смещения орбиты космического корабля. Иначе говоря, через несколько часов «Викинг-1» находился очень далеко от Сидонии, а заверения Джерри Соффена на брифинге были умышленным 100-процентным обманом. Внятных объяснений для столь вопиющей лжи из уст официального человека науки не получено до сих пор. Причем почти никто объяснений, собственно, всерьез и не требовал. А те, кто пытались, были элементарно проигнорированы.[1]

#

4 Ровно четверть века спустя, в 2001 году НАСА запустило на удаленную от Земли орбиту научно-исследовательский зонд WMAP для точного картографирования флуктуаций в микроволновом фоновом излучении космоса. Построение такой карты с максимально возможной точностью, с точки зрения современной космологии, представляется весьма перспективным



путем для получения ответов на вопросы о размерах вселенной, ее кривизне и геометрической форме в целом.

К началу 2003 года первая порция собранных спутником WMAP данных была опубликована для анализа научным сообществом. Сразу было ясно, что в данных этих имеются серьезные аномалии, не вписывающиеся в доминирующую космологическую модель, именуемую стандартной, и трактующую пространство космоса как плоское и бесконечно протяженное.

5 С другой стороны, независимым от НАСА ученым из Франции и США довольно быстро удалось подобрать существенно иную модель, для которой данные карты WMAP подходили практически идеально, а форма вселенной оказывалась компактной и похожей на раздутый до сферы додекаэдр, т.е. что-то вроде футбольного мяча, сшитого из 12 правильных пятиугольников.

В научную группу сопровождения проекта WMAP, собирающую и анализирующую данные для НАСА, входил, среди прочих, Дэвид Спергел, один из соавторов известной методики «совпадающих кругов», позволяющей проверять гипотезы о компактных формах пространства. На предложенную французами модель додекаэдрической вселенной команда Спергела набросились с такой оперативностью, что негативный результат их анализа

6 был опубликован практически одновременно с публикацией Ж.-П. Люмине и его коллег в журнале Nature. При этом столь торопливое опровержение модели «вселенной как футбольного мяча» было дано не только через онлайн-библиотеку научных препринтов ArXiv.org [2], что естественно, но и через центральные средства массовой информации, вроде газеты New York Times. Что крайне сложно назвать общепринятой в науке практикой.[3]

Особенно, когда вскоре выяснилось, что группа Дэвида Спергела с помощью интенсивных компьютерных обчислений карты WMAP проверяла и отвергала самые разные компактные модели, но только не конкретную модель додекаэдрического пространства Пуанкаре. Потому что в ней

7 совпадающие круги следовало искать с поворотом на 36 градусов, а компьютерная программа искала чистые совпадения без поворотов. Но об этом, правда, центральная пресса уже не сообщала. И в памяти масс осталось одно – занятная гипотеза о вселенной как футбольном мяче проверками не подтвердилась.

##

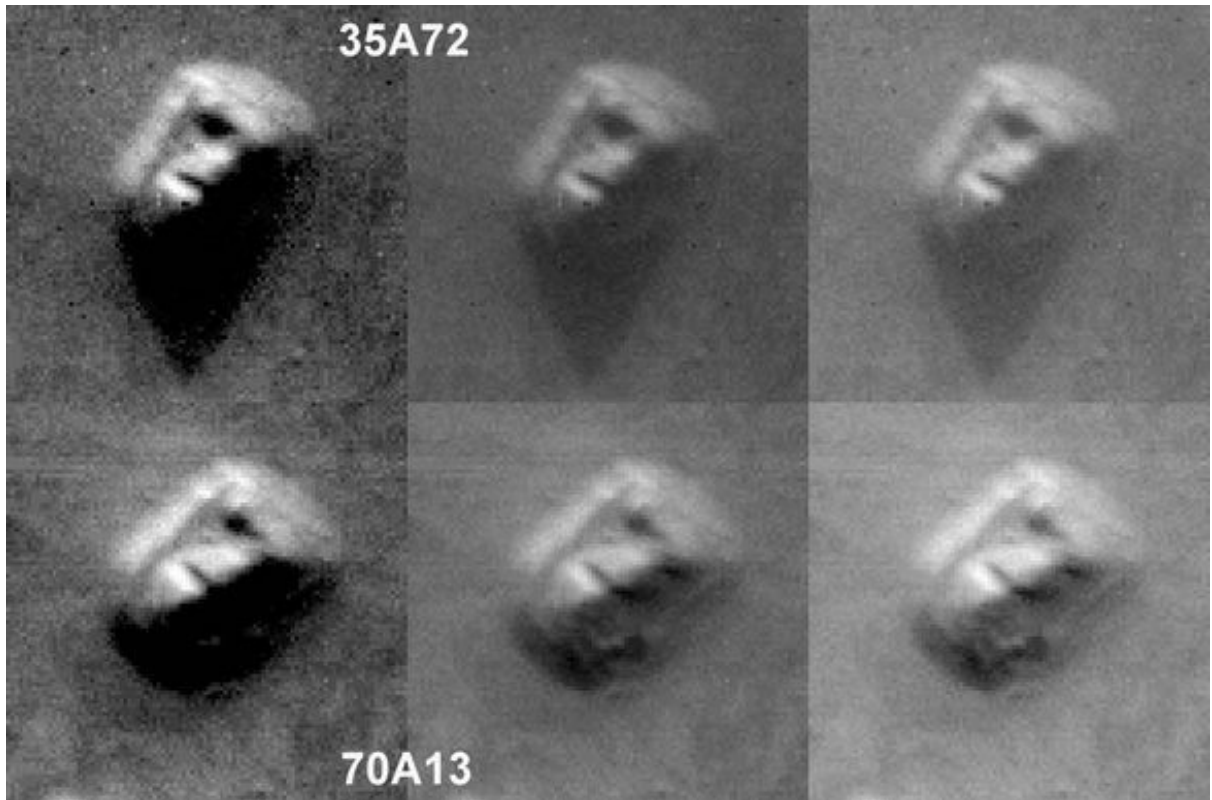
Теперь пора вернуться к сюжету о марсианском «лице» и Сидонии. За несколько следующих после открытия лет в этой истории появляются несколько новых и важных героев. Во-первых, Винсент ДиПьетро и Грегори Моленаар, инженеры-компьютерщики космического центра НАСА им.

8 Годдарда, заинтересовавшиеся необычной горой и решившие узнать о ней побольше. Имея доступ к архиву НАСА и помня о словах Джерри Соффена про повторный снимок, ДиПьетро и Моленаар попытались его найти, но безуспешно. Вскоре они обнаружили и причину своей неудачи – особенности орбиты «Викинга», улетевшего за тысячи километров от Сидонии.

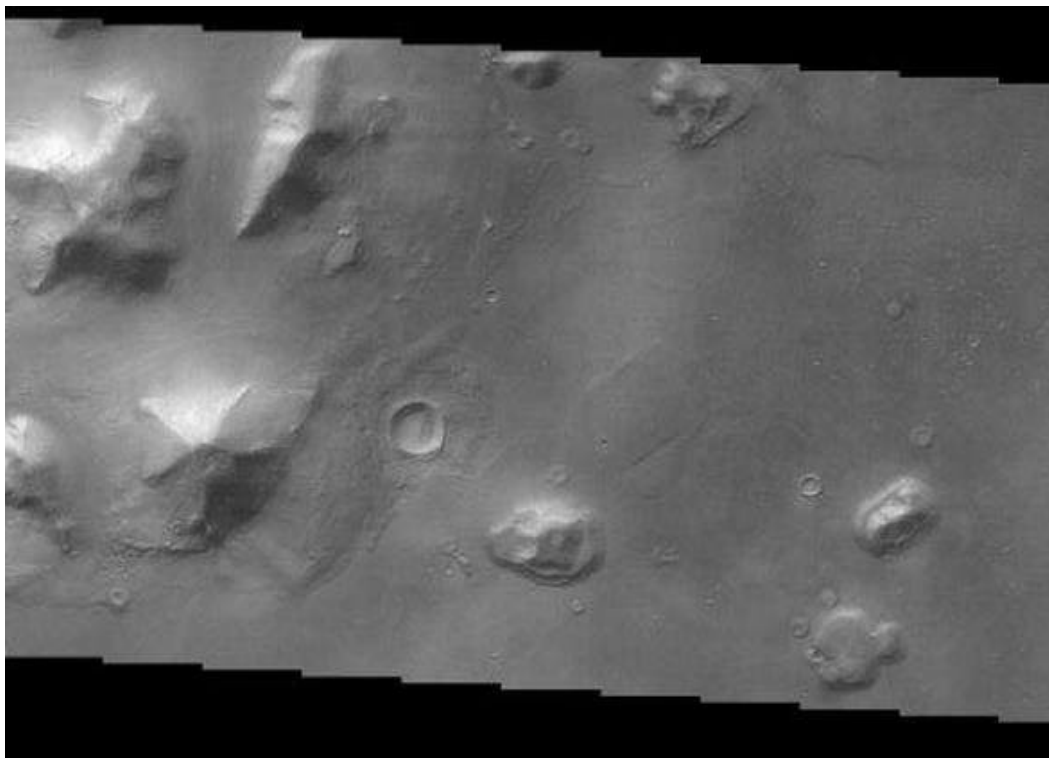
Но исследователи продолжали поиски и, наконец, нашли, то, что искали – еще одну фотографию той же местности, за номером 70A13, сделанную через 35 марсианских дней после первой, неправильно зарегистрированную и помещенную совсем не в ту папку. Самое же

9 главное, что на новой фотографии, сделанной в другое время суток и при ином освещении, черты человеческого лица у горы остались столь же отчетливо выраженными, как на 35A72, – с глазными впадинами, лбом, носом, ртом и прочими деталями. Кроме того, поблизости от Лица ДиПьетро и Моленаар обнаружили на снимках Сидонии еще целый ряд

объектов с весьма необычной для естественных образований формой. В частности, гигантскую пятигранную пирамиду, впоследствии получившую название D&M по имени ее первооткрывателей.

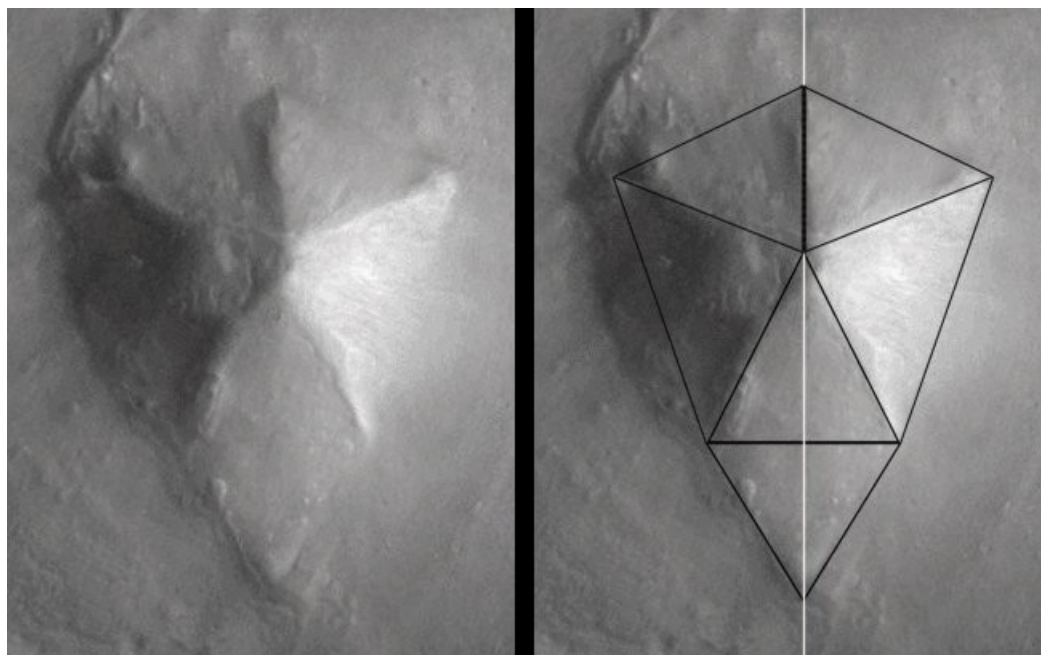


*Первый (35A72) и "зарытый" (70A13) снимки "Лица Марса"*



*Взаимное расположение пирамиды D&M (слева) и "Лица" (справа)*

Взволнованные своими открытиями, исследователи попытались поделиться ими сначала с сотрудниками JPL, Лаборатории реактивного движения, обеспечивавшими для НАСА марсианскую миссию «Викингов», затем с сообществом ученых, занимающихся планетарными исследованиями. К изумлению ДиПьетро и Моленара, столь важные факты о следах активности инопланетного разума на другой планете были восприняты как в NASA-JPL, так и в научном сообществе с полнейшим равнодушием и абсолютно безо всякого интереса. Что самое поразительное, даже Карл Саган, тогдашний лидер проекта SETI по поиску внеземного разума и одновременно видный представитель команды сопровождения «Викингов», почему-то выразил уверенность, что всякое серьезное изучение Лица – это просто трата времени.



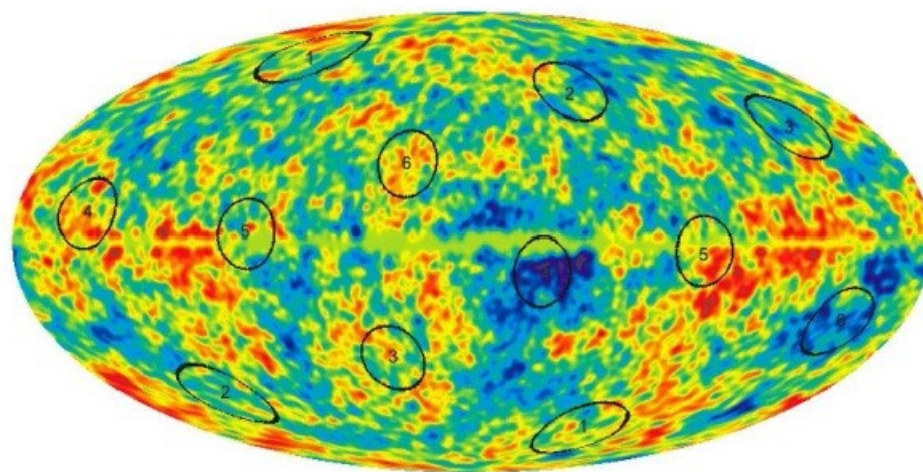
*Особенности формы пятигранной пирамиды D&M*

К счастью, далеко не все исследователи склонны руководствоваться в своей работе мнениями авторитетов. В 1980-е годы за изучение Лица и других аномальных объектов Сидонии взялся д-р Марк Карлотто, специалист с большим опытом в анализе цифровых изображений от спутников и медицинских систем сканирования. А конкретно пирамидой D&M сильно заинтересовался Эрол Торун (Erol Torun), профессиональный эксперт по географическим картам и геоморфологии из вашингтонского Агентства картографии министерства обороны США. Работы этих исследователей показали, что по всем критериям, применяемым при анализе объектов на Земле, объекты Сидонии никак нельзя считать естественными природными образованиями.

###

Похожая картина развернулась после 2003 года и в истории вокруг додекаэдрической модели вселенной. Причем и здесь, что занятно, в контексте несогласия с генеральной линией науки всплыло слово Torun. Только на этот раз речь идет о польском Астрономическом центре в Торуне, ученые которого независимо проанализировали данные карты WMAP и нашли-таки в небе 6 пар совпадающих кругов. Каждый круг в паре, как и положено, в правильном направлении повернут относительно другого на 36 градусов,

что прекрасно подтверждает додекаэдрическую гипотезу Люмине и его соратников. Работа польских исследователей была опубликована в 2004 году, однако о ней ни New York Times, ни другие средства массовой информации ничего не сообщили. Поэтому и известен данный результат, главным образом, лишь в узком кругу специалистов.



*Местоположение шести пар кругов на карте вселенной*

Сюжет с Лицом Марса по вполне очевидным причинам получил в обществе заметно больший резонанс, коль скоро тема инопланетян волнует обывателей куда сильнее, чем форма вселенной. По этой, видимо, причине для успокоения публики были предприняты воистину беспрецедентные шаги, когда в 1985 году лично Карл Саган опубликовал в своей научной колонке в журнале Parade [4] разоблачительную статью, высмеивающую всех незадачливых искателей аномалий на поверхности Марса. Не называя конкретных имен и профессионального уровня своих оппонентов, Саган представил их получокнутыми фантазерами, напрочь оторванными от реальности. А для наглядного подтверждения своих доводов Саган присовокупил к статье уже известную фотографию Лица, но теперь искусственно подправленную с помощью ретуши и цветовых фильтров, чтобы оказались затушеваны все человеческие черты изображения. (Почему известный ученый решился пойти на столь недостойный поступок – это отдельный вопрос. Но в тот период вокруг Сагана происходило много необычного. Например, в том же 1985 году издательство Simon & Shuster выпустило его первый и единственный роман «Контакт», заплатив начинающему фантасту в качестве аванса за еще ненаписанную книгу беспрецедентно огромную сумму размером в 2 миллиона долларов.[5]) По сути дела, публикация Саганом раскрашенной фотографии Лица представляла собой чистейшей воды научный подлог, который специалистами был вскрыт практически сразу. Но дело уже было сделано: иллюстрированный еженедельник Parade имеет многомиллионные тиражи, рассылается в качестве приложения ко множеству газет, так что в массовое сознание публики в очередной раз прочно впечатали – все эти истории про лицо и странную гору на Марсе не более, чем фантазии чудаков...

Тем не менее, когда в 1990-е к Марсу стали отправлять новые исследовательские зонды, требования и призывы к повторным съемкам Лица и Сидонии зазвучали в обществе с новой силой. На что НАСА в очередной раз прореагировало весьма своеобразно. Когда корабль Mars Global Surveyor (MGS) сделал снимок Лица 5 апреля 1998 года, то перед

предъявлением фотографии миру изображение обработали специальными программными средствами «улучшения контрастности». В результате чего, после пропускания картинка через фильтры высокого и низкого прохода, гора высотой более 300 метров стала выглядеть плоским и безвидным скоплением холмиков, ничуть не похожим на человеческое лицо. Весть и картинку эту средства массовой информации буквально за часы разнесли по планете, объявив, что история с Лицом на этот раз закрыта окончательно.

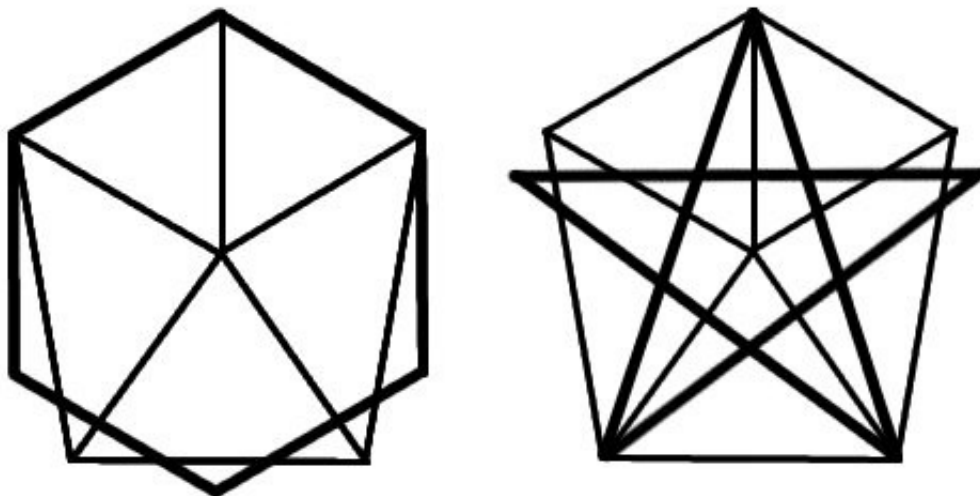
f Но затем до файла предъявленного фотоснимка добрались оппоненты и стали восстанавливать изображение своими алгоритмами, реально применяемыми для улучшения четкости военно-разведывательных, гражданских спутниковых, медицинских и прочих нечетких изображений, требующих улучшения. На этот раз в результате обработки очертания горы вновь проявили уже знакомые черты лица, но при этом со значительным числом новых деталей, вроде прорисовки ноздрей и губ, из-за большей разрешающей способности фотокамеры MGS. Когда новая версия восстановленного изображения была представлена исследователями на Весенней конференции Американского геофизического союза, то Арден Элби, главный ученый миссии MGS, почему-то пришел в сильнейшую ярость. Причина ярости не объяснялась, но и без того было понятно, что представленная 5 апреля официальная фотография Лица была крайне интенсивно и, получается, преднамеренно искажена. После этой конфузной истории НАСА стало обращаться со снимками значительно строже. Еще один снимок Лица – теперь уже при полном освещении – был сделан в начале апреля 2001 года, однако обществу представлен намного позже, в середине мая того же года. Оценить, что за преобразования претерпела картинка на этот раз, независимым исследователям теперь не представлялось возможным, поскольку доступа к первичным файлам уже не стало.

####

10 В параллельной истории о додекаэдрической модели вселенной в период 2004-2006 годов происходили события, в чем-то очень напоминающие по сию пору длящуюся сагу о марсианском Лице. Начиная с того, что и здесь исследователей лишили материалов для анализа, поскольку новые данные спутника WMAP перестали выкладывать обещанный всеобщий доступ. Первый раз это произошло в начале 2004, т.е. через год после первой публикации, когда не появилось прежде обещанной второй порции. Та же история повторилась еще через год – в 2005 публикации опять не последовало. При этом команда сопровождения WMAP сохраняла полнейшее молчание о происходящем, упорно уклоняясь от каких-либо комментариев по существу. Соответствующие доклады ученых о ходе миссии WMAP, предварительно заявлявшиеся на научных конференциях и семинарах, всякий раз в последний момент снимались из программы. Недоумение и вопросы в научном сообществе стали нарастать с каждым месяцем, и лишь в начале 2006 года появились, наконец, публикации материалов о собираемых WMAP данных. Причем представлено это было так, словно ничего необычного не происходило – итоговые отчеты просто озаглавили «Результаты WMAP за три года»[6]. Мимоходом, правда, один из научных руководителей миссии, Дэвид Спергел, в интервью для прессы сообщил, что программное обеспечение спутника пришлось дважды полностью переписывать, чтобы перекалибровать датчики спутника и перестроить методы регистрации данных.[7]

11 Итогом же этой большой работы стало «надежное, как никогда» подтверждение стандартной космологической модели. Додекаэдрическая модель Люмине в итоговом документе упомянута лишь вскользь, как одна

из отвергнутых проверкой компактных моделей, а о подтверждающем ее открытии польских астрономов не сказано вообще ни слова. Правда, примерно в это же время, весной 2006, уже известная группа метода «совпадающих кругов» (Спергел, Корниш и др.) публикует свое окончательное негативное заключение относительно гипотезы о вселенной в форме футбольного мяча. Сделано это весьма изящно и уже совсем не похоже на топорную публикацию Сагана с фальшивой фотографией. На этот раз оппоненты аккуратно проверяют заявленное поляками открытие и подтверждают сам факт присутствия на карте кругов. Однако делается это лишь для того, чтобы скрупулезно выстроить такую систему критериев для оценки данных, в условиях которой этот выдающийся результат попадает в полосу допустимых ошибок. Грубо говоря, открытие аккуратно утопили в погрешностях измерений, ибо оно не вписывается в общепринятую теоретическую модель.[8]



*Особенности пропорций в структуре пирамиды D&M*

12 В заключение, чтобы свести две столь разные, но в то же время и похожие истории в единое русло, осталось чуть внимательнее рассмотреть форму пирамиды D&M – еще одного аномального объекта на поверхности Марса, расположенного неподалеку от Лица. Об этой гигантской пирамиде средства массовой информации практически никогда не упоминают, однако, как показал в свое время ее главный исследователь Эрол Торун, признаков естественного происхождения в ней еще меньше, чем в Лице. Пирамида имеет пять граней, а лежащий в ее основании пятиугольник демонстрирует множество пропорций, связанных с константами  $\pi$ , золотым сечением  $\phi$  и основанием натуральных логарифмов  $e$ . Кроме того, эта фигура довольно затейливым образом одновременно объединяет в себе идею правильного пятиугольника и правильного шестиугольника. В отличие от них она имеет не 5 и не 6 осей симметрии, а всего одну. Но зато, рассматривая фигуру относительно этой оси, можно увидеть, что ее основание и высота находятся в пропорции правильного пятиугольника, а вот стороны и угол при вершине демонстрируют пропорции правильного шестиугольника.



13

Теперь осталось лишь заметить, что правильный шестиугольник состоит из 6 сопряженных друг с другом правильных треугольников, а 5 таких же треугольников, но в трехмерном пространстве, образуют каждую из вершин правильного многогранника икосаэдра. Важнейшая особенность икосаэдра в том, что он является многогранником, дуальным для додекаэдра. Иначе говоря, при соединении ребрами точек, лежащих в центрах соседних граней додекаэдра, получают икосаэдр. И наоборот, при соединении центров граней икосаэдра получается додекаэдр. Если же все вершины икосаэдра аккуратно срезать, а полученную фигуру надуть до сферы, то получится уже не простой, а классический футбольный мяч – 12 правильных пятиугольников, каждый из которых окружен пятью правильными шестиугольниками. Так что если все эти взаимозависимости приложить к топологии вселенной, то кто знает, быть может необычный вид пирамиды на Марсе – это своеобразный символ уже постигнутой кем-то формы космоса? Суть которой в таком случае сводится к одновременному сочетанию форм додекаэдра и икосаэдра.

- 
- [1] Mark Carlotto, «The Cydonia Controversy: The History, Science, and Implications of the Discovery of Artificial Structures on Mars», AuthorHouse, 2002
  - [2] Neil J. Cornish, David N. Spergel, Glenn D. Starkman, Eiichiro Komatsu, «Constraining the Topology of the Universe», (arXiv:astro-ph/0310233) Phys.Rev.Lett.92:201302 (2004)
  - [3] Dennis Overbye. “Cosmic Soccer Ball? Theory Already Takes Sharp Kicks”, New York Times, October 9, 2003
  - [4] Carl Sagan, «The Man in the Moon», Parade, June 2, 1985, p. 12
  - [5] David Morrison, «Carl Sagan’s Life and Legacy as Scientist, Teacher, and Skeptic», Skeptical Inquirer magazine, Jan/Feb 2007
  - [6] D. N. Spergel et al. «Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Three Year Results: Implications for Cosmology», Draft 16 March 2006, arXiv:astro-ph/0603449
  - [7] Dennis Overbye. “Scientists Get Glimpse of First Moments After Beginning of Time”, New York Times, March 16, 2006
  - [8] J. S. Key, N. J. Cornish, D. N. Spergel, G. D. Starkman. «Extending the WMAP Bound on the Size of the Universe», Preprint 28 Apr 2006 (arXiv:astro-ph/0604616)

## [9♦] Структура вращений

### И все-таки она вертится? [64]

В 1999 году журнал «Time Magazine», присоединившись к общей суете по поводу вступления человечества в новый миллениум, опросил экспертов и составил список из 100 самых великих людей уходящего столетия. В качестве наиболее выдающегося физика в этот список вошел, ясное дело, Альберт Эйнштейн. А самым великим математиком XX века был признан австрийский логик Курт Гедель (1906-1978), чья знаменитая теорема о неполноте преобразовала основы современной науки даже более, наверно, радикально, чем эйнштейновская общая теория относительности.

Примечательно, что оба этих выдающихся ученых, в разное время вынужденных из-за нацизма и войны покинуть Европу, нашли работу и приют в одном и том же месте – Принстонском Институте передовых исследований, где их кабинеты находились неподалеку друг от друга. Более того, несмотря на почти тридцатилетнюю разницу в возрасте, физика и математика связали близкие дружеские отношения. Из писем Геделя к матери известно, сколь высоко он ценил эту дружбу. А чтобы стала ясна степень уважения Эйнштейна к своему молодому коллеге, достаточно вспомнить его известные слова о том, что он (пребывая в весьма уже преклонных летах) ежедневно ходит в институт в основном ради того, чтобы пообщаться с Геделем на обратном пути домой. Такого рода пешие прогулки-беседы двух ученых были регулярными и продолжались вплоть до смерти Эйнштейна в 1955 году.

Никто, кроме самих друзей-ученых, не знает наверняка, что за темы они обсуждали в ходе этих прогулок. Но по крайней мере одно из непосредственных следствий их близкого общения известно очень хорошо. Хотя область главных научных интересов Геделя лежала весьма далеко от проблем физики, в конце 1940-х годов математик обратил свое внимание на уравнения общей теории относительности Эйнштейна и сумел найти для них точное решение. Это решение [1], получившее название «метрика Геделя», имеет весьма простой, красивый и, можно сказать, элегантный вид (что особо ценится в науке). Но, по иронии судьбы, именно эти обстоятельства крайне озадачили научный мир, ибо простое и красивое решение – так уж все устроено в природе – с большой вероятностью должно быть и наиболее верным. Однако элегантная метрика Геделя описывает вселенную с довольно странными свойствами. На взгляд современной науки, во всяком случае.

Сейчас обычно принято говорить, что найденное математиком решение является, увы, нереалистичным и нефизичным. Нереалистичным, потому что метрика Геделя описывает стационарную (т.е. сохраняющую постоянный объем) вселенную, вращающуюся с постоянной ненулевой скоростью. В то время как астрономические наблюдения, с одной стороны, убедительно свидетельствуют о постоянном расширении вселенной, а с другой стороны – не дают бесспорных свидетельств в пользу вращения вселенной. Нефизичным же это решение именуют по той причине, что вселенная Геделя допускает существование замкнутых в петли траекторий



по координате времени. Иначе говоря, как строго показал сам первооткрыватель, здесь можно вернуться в прошлое, хотя и очень отдаленное. А это нарушает причинно-следственные связи явлений и таким образом противоречит фундаментальным представлениям физической науки об устройстве окружающего мира.

#

Любой из аспектов критики геделевского решения заслуживает внимательного разбирательства. Так, скажем, «нефизичные» гигантские петли времени подразумевают нескончаемую последовательность циклов существования вселенной, где она сама является собственной причиной. А это, по сути своей, идея, высказываемая мыслителями со времен глубокой древности и графически нередко иллюстрируемая изображениями космоса в виде уробороса – огромного змея, ухватившего собственный хвост. Или, если смотреть чуть иначе, изрыгающего себя самого из собственной пасти... Однако в данный момент наибольший интерес представляет вопрос о вращении вселенной. Уже потому, хотя бы, что собственно в факте вращения ничего нефизичного нет. Скорее наоборот, всюду – от микроскопического мира элементарных частиц до планет, звезд, галактик и галактических кластеров – объекты природы находятся в постоянном вращении. Тем не менее, сама вселенная, согласно доминирующим ныне в науке взглядам, не вращается.

Нельзя, правда, сказать, что факт этот строго обоснован в теории и убедительно доказан экспериментами. Просто в мире без вращения ученым, можно сказать, живется как бы комфортнее. Во-первых, все уже сошлись во мнении, что согласно теории относительности вселенная повсюду должна выглядеть одинаково в независимости от того, где находится наблюдатель. А из идеи вращения вселенной следует, что направление вдоль оси такого вращения оказывается в некотором смысле «особым» и отличающимся от остальных. Если же, во-вторых, говорить об экспериментах и астрономических наблюдениях, то и здесь, как принято считать, не находится убедительных доказательств вращению вселенной. Но, это, впрочем, смотря как искать.

В 1982 году молодой английский астрофизик Пол Берч из Манчестерского университета обнаружил в высшей степени асимметричное распределение для углов вращения поляризации излучения от полутора, примерно, сотен внегалактических радиоисточников. Проанализировав независимо полученные наборы данных от разных исследователей, Берч показал, что все они демонстрируют одну и ту же закономерность – в северном полушарии небесной сферы вектор поляризации радиоизлучения направлен, главным образом, в одну сторону, а в южном полушарии в противоположную.[2]

В этой же работе Берч сделал и соответствующий вывод – что наиболее естественным объяснением для наблюдаемого феномена было бы вращение вселенной... За прошедшие с той поры годы никто не сумел убедительно опровергнуть этот неудобный результат, противоречащий общепринятым в космологии взглядам. Однако исследователю, начавшему свой путь в большую науку со столь вызывающего открытия, сделать дальнейшую карьеру в мире ученых, увы, не удалось.

##

Полтора десятка лет спустя после публикации Берча, весной 1997 появилась весьма созвучная работа [3] Борге Нодланда и Джона Ралстона, двух исследователей из американских университетов Рочестера и Канзаса. Нодланд и Ралстон изучали данные о вращении плоскости поляризации волн так называемого синхротронного излучения от 160 галактик и тоже обнаружили примечательную зависимость для углов поляризации. Оказалось, что угол вращения изменяется в зависимости от направления, в котором проводится наблюдение – словно у вселенной обнаружилась некая особая ось.

А именно, выходило, что величина вращения поляризации волн от наблюдаемой галактики непосредственно зависит от косинуса угла между направлением на эту галактику и осью, проходящей через экваториальное созвездие Орел, планету Земля и экваториальное созвездие Секстант. Получалось, что обнаруженная аномалия вновь серьезно подрывала важные физические концепции об изотропности вселенной (должна быть одинакова для наблюдений во всех направлениях) и гомогенности вселенной (должна быть одинаковой во всех местах). По понятным причинам «ось анизотропии» вселенной, обнаруженная Нодландом и Ралстоном, заняла в науке место по соседству с результатом Берча – среди занятых, но не заслуживающих особого внимания казусов.

Однако, по мере того, как в космологии набираются все более точные данные наблюдений, тем все более отчетливо в них проступают неудобные оси анизотропии. Причем оси эти, как правило, неким озадачивающим образом норовят проходить через Землю, словно именно она является особой системой отсчета. Так, среди множества загадок, которые принесли данные спутника WMAP, регистрирующего анизотропию фонового микроволнового излучения вселенной, видное место занимает проблема с неслучайной ориентацией низкочастотных колебательных мод.[4]

Согласно теории, нижние моды, как и все остальные, должны быть ориентированы в пространстве случайным образом. Но вместо этого карта WMAP показывает, что их расположение явно тяготеет к точкам равноденствия и к направлению движения Солнечной системы. Более того, пространственные оси этих колебаний лежат близ плоскости эклиптики, причем две из них находятся в плоскости Сверхгалактики, объединяющей нашу Галактику, соседние с ней звездные системы и их скопления. Подсчитано, что вероятность случайного совпадения данных направлений – менее 1/10000.

###

Иначе говоря, все это выглядит чрезвычайно странным и труднообъяснимым. Поскольку если продолжать считать вселенную неподвижной, то наша Солнечная система и планета Земля оказываются словно в центре всего космического пространства. Однако, если обратиться к концепции Курта Геделя, где вся вселенная вращается подобно гигантской рулетке, странности исчезают сами собой. Ибо во вселенной подобного рода каждый наблюдатель, где бы он ни находился, видит вещи так, как будто он находится в центре вращения, а вся вселенная словно вращается вокруг него. Визуально этот эффект представить легче, если открытая вселенная-цилиндр исходной модели Геделя преобразована в тор. Тогда, как показали в начале 1960-х годов германские теоретики Иштван Осват и Энгельберт Шюкинг, в замкнутом пространстве вселенной-тора нет никакой выделенной оси, а все элементы вращаются друг вокруг друга в общем вращении вихревого кольца.[5]

Конечно, все это, в принципе, физикам давно и прекрасно известно. Ибо модель Геделя за прошедшие с ее открытия полвека с лишним успела стать своего рода учебной «лабораторией», на основе которой демонстрируются и обкатываются всевозможные космологические гипотезы. А среди откликов на упомянутое выше открытие Нодланда и Ралстона, к примеру, той же весной 1997 года появился комментарий группы теоретиков (Юрия Обухова, Владимира Короткого и Фридриха Хеля), давших абсолютно естественное геометрическое объяснение «необычному» феномену в рамках общей теории относительности – но с учетом вращения вселенной. Ибо характерное поведение углов поляризации электромагнитной волны является типичным эффектом глобального космического вращения.[6]

Но сколь бы естественными ни были объяснения аномалий через вращение, общепринятыми они не являются и пока стать не могут. Ибо Стандартная Модель современной космологии никакого вращения не подразумевает, а привлечение этой концепции потребует радикального пересмотра всей теории. Решиться на это, ясное дело, очень непросто, поэтому для ответов на все новые и новые трудные вопросы в рамках устоявшейся модели теоретикам приходится то и дело изобретать новые сущности или «скрытые свойства», вроде инфляции, темной материи и темной энергии. О природе этих вещей никто ничего внятного сказать не может, но с их помощью создается хотя бы видимость объяснения.

Идея вращающейся вселенной, с другой стороны, хотя и не отвечает на все загадки космологии, но даже концептуально выглядит куда более привлекательней. Поскольку предлагает естественные геометрические и физические объяснения не только для космологических аномалий, но и для многих крайне неясных проблем квантовой физики частиц. Но разбираться с этим удобнее по порядку – от большого к малому.

- 
- [1] Kurt Gödel, «An Example of a New Type of Cosmological Solutions of Einstein's Field Equations of Gravitation», *Reviews of Modern Physics*, 21: 447-450 (1949)
  - [2] Paul Birch, «Is the Universe rotating?», *Nature* 298, 451-454 (July 1982)
  - [3] B. Nodland, J. Ralston, «Indication of Anisotropy in Electromagnetic Propagation over Cosmological Distances,» *Phys. Rev. Lett.*, vol. 78, no. 16, p. 3043, 21 April 1997
  - [4] Glenn D. Starkman and Dominik J. Schwarz, «Is the Universe Out of Tune?», *Scientific American*, August 2005
  - [5] István Ozsváth and Engelbert Schücking, «Finite Rotating Universe», *Nature* 193, 1168 – 1169 (March 1962)
  - [6] Yuri N. Obukhov, Vladimir A. Korotky, and Friedrich W. Hehl, «On the rotation of the universe», (arXiv:astro-ph/9705243), Preprint Univ. of Cologne (1997)

## Супержидкий кристалл [65]

0 Сугубо прикладная наука метеорология целиком сосредоточена, казалось бы, на столь узкой области, как погода планеты. Но при этом ученым-метеорологам то и дело удается оказывать неожиданно мощное воздействие на фундаментальные основы физической науки - от теории гравитации и ядерной физики до теории динамического хаоса. Главная причина тому достаточна очевидна - глубоко прорабатываемая метеорологами теория и практика гидродинамики. А специфическое поведение жидкостей, похоже, на фундаментальном уровне так или иначе проявляет себя чуть ли не в любом разделе физики.

1 В частности, российским математиком-метеорологом Александром Фридманом в начале 1920-х годов была выведена первая космологическая модель с расширяющейся или сжимающейся формой вселенной - как решение эйнштейновских уравнений общей теории относительности. Сам Эйнштейн, можно отметить, в тот период полагал вселенную стационарной. Новая же динамическая модель оказалась более стабильной и ныне лежит в основе большинства современных космологических теорий под названием «метрика Фридмана-Леметра-Робертсона-Уолкера». Имеет смысл подчеркнуть, что это решение для возможной геометрии вселенной отыскивалось Фридманом с помощью идей и математического аппарата гидродинамики. Иначе говоря, «космологический субстрат» вселенной представляется идеальной жидкостью, в качестве атомов которой выступают галактики.[1]

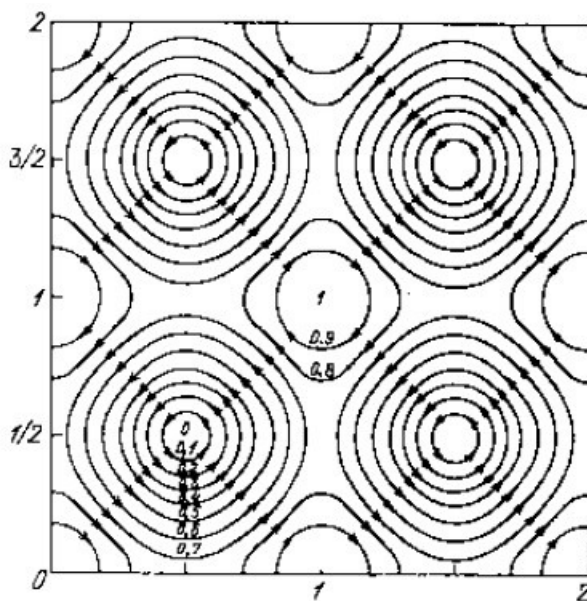
2 Двигающаяся без трения идеальная жидкость или «сухая вода», как шутливо называл ее в своих лекциях Ричард Фейнман, на протяжении веков была очень удобной для физиков абстракцией. Поначалу сугубо теоретическая, эта модель существенно упрощала решение гидродинамических задач, во многих случаях предоставляя вполне приемлемые по аккуратности оценок решения. То, что в природе существует реальный аналог идеальной жидкости - сверхтекучесть - было с большим удивлением обнаружено учеными примерно тогда же, когда наука подступилась к тайнам ядерной энергии.

3 Но явление сверхтекучести, открытое в 1937 году Петром Капицей при охлаждении жидкого гелия до температур, близких к абсолютному нулю, предоставило не только натуральный пример жидкости, лишенной вязкости. Сверхтекучая или супер-жидкость, как выяснилось, обладает и куда более ценными свойствами. В доступных для наблюдений и экспериментов макромасштабах она демонстрирует удивительные квантовомеханические свойства материи, обычно свойственные лишь частицам микромира.

#

4 Один из наиболее необычных эффектов подобного рода - это квантовые вихри, образующиеся при вращении супержидкости. Если вращать, скажем, обычный стакан с водой вокруг его вертикальной оси, то происходит примерно следующее. После некоторого краткого периода неподвижности жидкость тоже начинает однородно вращаться вместе со стаканом, образуя водяной вихрь. Иначе говоря, скорость частиц в вихре изменяется постепенно - от максимальной у края до минимальной у центра. В контейнере с супержидкостью аналогичный процесс вращения выглядит существенно иначе.

5 Поскольку сверхтекучая жидкость ведет себя как единая квантовая система, т.е. с дискретными уровнями энергии, она не может вращаться однородно и преобразуется в дискретную систему небольших вихрей. При этом каждый из этих крошечных квантовых торнадо несет отдельный кусочек общего углового момента системы. Квантовые вихри выталкивают частицы из своих центров, формируя нитевидные пустые сердцевинки, которые пронизывают супержидкость. Кроме того, вихри отталкивают друг друга, что в условиях теплового равновесия приводит к их упорядочиванию в форме регулярной структуры, похожей на кристаллическую и известной под названием вихревая решетка Абрикосова.



Вихревая решетка Абрикосова

6 Интересно, что образование такого рода динамических кристаллических структур в супержидкости советский физик Алексей Абрикосов поначалу предсказал в 1950-е годы сугубо теоретически [2]. Анализировал он, правда, не поведение сверхтекучего гелия, а феномены сверхпроводимости. Но коль скоро электроны в сверхпроводниках образуют, по сути, текущую без сопротивления электронную жидкость, то физика этих низкотемпературных явлений очень близка.

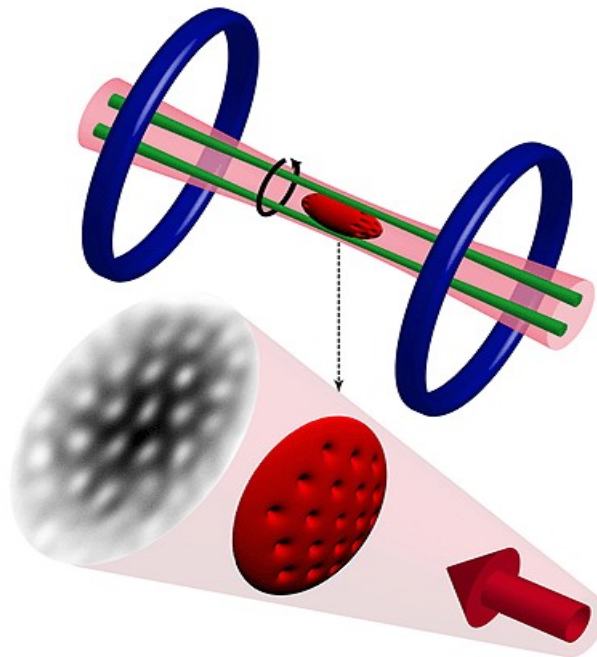
7 Так что предсказанное Абрикосовым образование вихревых квантовых решеток экспериментаторы впоследствии обнаружили и в сверхпроводниках, подвергаемых воздействию магнитного поля, и в супержидкостях, подвергаемых вращению. Более того, благодаря очень характерной структуре, такие вихревые кристаллы стали на сегодня общепризнанной сигнатурой для выявления сверхтекучего состояния в экспериментах с новыми видами супержидкостей, получаемых из глубоко охлаждаемых атомарных газов.

##

8 Эксперименты с необычными супержидкостями, так называемыми конденсатами Бозе-Эйнштейна и фермионными газами, вызывают огромный интерес по множеству причин. Их уникальные свойства когерентности – т.е. взаимно согласованное поведение атомов как единой квантовой системы – позволяют в макроскопических масштабах моделировать квантовомеханические феномены материи. А это сулит исследователям не только

более глубокое проникновение в природу высокотемпературной сверхпроводимости, но и вообще в физику вселенной на самых ранних этапах ее развития. В частности, работы в данном направлении дают надежду на отыскание разгадки к тайне возникновения собственно материи – то есть структур с более плотной энергией в однородном, по идее, изначальном мире.

9 Важнейшие эксперименты с глубоко охлажденными атомарными газами были проведены за десятилетний примерно промежуток на рубеже XX-XXI веков. Прогресс в криогенных и лазерных технологиях позволил к 1995 году реально получить конденсат Бозе-Эйнштейна, предсказанный теоретически еще в 1920-е годы, и продемонстрировать его сверхтекучесть. Еще через несколько лет это удивительное состояние материи удалось получить и для фермионного конденсата, когда было показано, что атомы изотопа лития-6 (фермионы) при сверхнизких температурах могут образовывать пары вроде куперовских пар электронов в сверхпроводниках, таким образом тоже превращаясь в конденсат Бозе-Эйнштейна. Сверхтекучее состояние для такого фермионного конденсата впервые было убедительно продемонстрировано экспериментом весной 2005 года группой Вольфганга Кеттерле в Массачусетском технологическом институте. [3]



*Сверхтекучий фермионный конденсат*

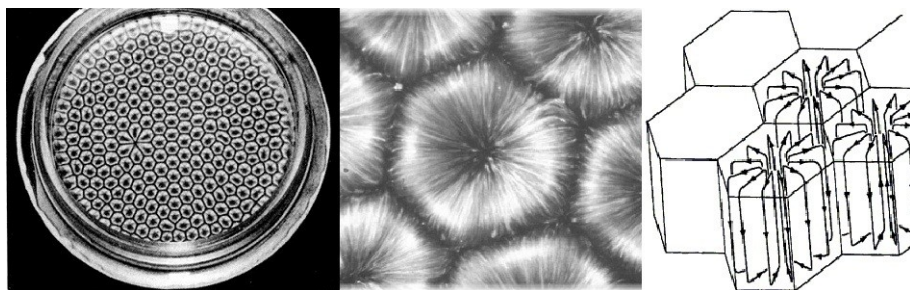
10 Исследователи охладили атомы лития до 50-миллиардной доли градуса Кельвина, захватив атомы в ловушку, сконструированную из инфракрасного лазера и кольцевых электромагнитов. После чего с помощью другого, зеленого лазера в качестве «мешалки» заставили вращаться облачко конденсата в ловушке. Образовавшаяся в газе регулярная кристаллическая решетка из крошечных вихрей дала явное свидетельство сверхтекучего состояния. Продемонстрировав, можно сказать, таким образом, что при сверхнизких температурах вблизи абсолютного нуля свойствами сверхтекучести обладают все строительные блоки материи, как бозонной, так и фермионной природы.

*b* В нобелевской лекции [4] Алексея Абрикосова (2003) вспоминается, среди прочего, что предсказанная им для сверхпроводников упорядоченная вихревая структура, похожая на кристаллическую решетку, поначалу воспринималась крайне скептически и коллегами-теоретиками, и, в особенности, физиками-экспериментаторами. Идею вихревых решеток пришлось принять, что называется, поневоле – лишь после того, как к середине 1960-х годов в лабораториях начал появляться инструментарий, позволяющий делать непосредственные снимки микроскопических процессов, происходящих в сверхпроводнике.

###

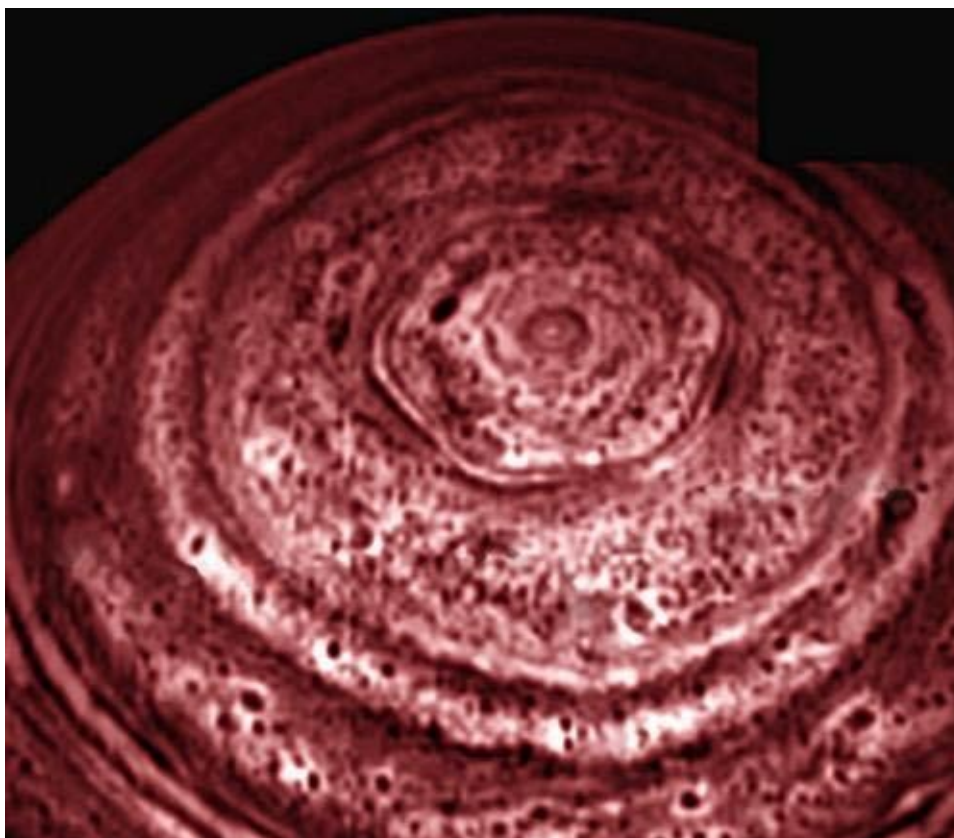
*c* При этом, что характерно, в области гидродинамики регулярные и устойчивые вихревые решетки в те времена были хотя и не общеизвестным, но достаточно давно установленным фактом. Более чем за полвека до описываемых Абрикосовым событий, в том же 1900 году, когда Макс Планк заложил основы квантовой теории, молодой французский физик Анри Бенар (1874-1939) сделал другое, экспериментальное открытие, современниками почти незамеченное. Обнаруженное им явление, ныне известное как «ячейки Бенара», можно продемонстрировать с помощью совсем нехитрого оборудования, вроде сковородки с плоским дном и масла, налитого на ее дно тонким слоем.

*d* При подогреве дна сковороды в однородном поначалу слое жидкости начинается диффузия и образуются конвективные потоки. Обычно этот процесс имеет вид довольно хаотический, однако Бенар установил, что при определенных соотношениях параметров – толщины слоя, площади поверхности, вязкости жидкости – конвективные потоки вдруг самоупорядочиваются и образуют регулярную, похожую на пчелиные соты структуру из ячеек правильной шестиугольной формы.



*Ячейки Бенара*

*e* Внутри каждой такой ячейки жидкость поднимается по центру и опускается по граням, так что в целом поведение ячейки аналогично вихревому кольцу. Сегодня этот эксперимент чаще всего приводят в качестве одной из наиболее ярких иллюстраций для междисциплинарной теории диссипативных структур, занимающейся проблемами динамического хаоса и самоорганизации в природе. Физика ячеек Бенара, конечно, существенно отличается от физики решеток Абрикосова, однако бесспорное внешнее сходство получающихся в результате структур само наводит на мысли и о глубинном родстве этих явлений.



«Гайка» Сатурна

И уж если речь зашла о правильных шестиугольных ячейках конвекции, то никак нельзя обойти и весьма свежий пример из результатов космических исследований. Весной 2007 года агентство НАСА опубликовало [5] новые снимки поразительного образования на северном полюсе Сатурна, сделанные зондом Cassini. Это образование в атмосфере гигантской планеты имеет форму правильного шестиугольника и по неизвестным причинам является чрезвычайно устойчивым, поскольку впервые было сфотографировано более четверти века тому назад - в ходе миссии космических зондов Voyager 1 и 2 в начале 1980-х годов. Шестиугольный полярный вихрь Сатурна имеет поперечный размер порядка 25 000 километров, так что на его площади могли бы уместиться почти 4 круга с диаметром планеты Земля. Причины формирования и устойчивости столь необычного объекта пока науке неизвестны. Наверное, должны помочь метеорологи...

- 
- [1] A Friedman, «Über die Krümmung des Raumes», Zeitschrift für Physik, 10 (1922), 377-386.; A Friedmann, «Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes», Zeitschrift für Physik, 21 (1924), 326-332.
  - [2] A. A. Abrikosov, Sovjet Physics - JETP 5, 1174 (1957)
  - [3] MW Zwierlein, JR Abo-Shaeer, A Schirotzek, CH Schunck, W Ketterle. «Vortices and superfluidity in a strongly interacting Fermi gas», Nature 435, 1047-1051 (June 2005)
  - [4] A. A. Abrikosov, «Type II Superconductors And The Vortex Lattice», Nobel Lecture, December 8, 2003
  - [5] «Cassini Images Bizarre Hexagon on Saturn», NASA-JPL Press Release, March 27, 2007



## Левая рука Меркурия [66]

0 Ближайшая к Солнцу планета Меркурий по сию пору остается одной из наименее исследованных человеком. Вплоть до 2011 года, за всю историю межпланетных космических экспедиций XX-XXI веков Меркурий посещался всего один раз – когда в 1974-1975 годах исследовательский зонд НАСА Mariner 10 трижды проходил вблизи планеты, собрав основную часть той информации, которой располагает на сегодняшний день наука. В данных о строении и свойствах Меркурия очень много непонятного, если не сказать загадочного – удивительно большая масса и признаки жидкого ядра при столь небольших размерах планеты, постоянное глобальное магнитное поле как у Земли (у Венеры и Марса такого нет), признаки больших резервуаров замороженной воды на полюсах...

1 Список накопившихся у ученых вопросов весьма велик, и есть надежда, что многие из них поможет разрешить исследовательский космический зонд Messenger, запущенный НАСА к Меркурию в 2004 году. Этот аппарат достиг планеты в 2011, а чуть позже, ориентировочно в 2013 году в том же направлении должен отправиться еще один корабль-исследователь – VeriColombo европейского космического агентства ESA и Японии.

2 Хотя интерес планетологов к Меркурию вполне очевиден, остается неясным, смогут ли приборы и результаты двух новых экспедиций помочь в разгадке еще одной тайны, также обнаруженной в данных от Mariner 10. Эта загадка, в отличие от остальных, в большинстве случаев обычно никак не упоминается, а потому, хотя и не является секретом, за прошедшие десятилетия практически забыта. Суть же проблемы такова: измерения параметров солнечного света, отражаемого Меркурием, показали, что большинство минералов на поверхности планеты отражает свет с одним и тем же направлением вращения поляризации.

3 Многие природные минералы, как известно, существуют в двух формах структурного строения, условно именуемых правой и левой хиральностью (от греческого «cheir» – «рука»). Как правая и левая рука у человека, эти структуры являются зеркальным отражением друг друга и обычно обнаруживаются в природе всегда в примерно равных пропорциях. Однако поверхность Меркурия имеет совершенно очевидное преобладание леворуких минералов, но почему – совершенно непонятно ни для минералогов, ни для физиков вообще. Некоторые же ученые-биологи предполагают, что коль скоро органические молекулы живых организмов на Земле имеют тенденцию к левой хиральности, то разгадка данной тайны Меркурия могла бы пролить свет и на загадки происхождения жизни на Земле.

#

4 Будет к месту напомнить, что собственно физический факт хиральности молекул был открыт в тесной связи с биологическими исследованиями. В 1848 году Луи Пастер, которому было в ту пору 25 лет, исследовал под микроскопом одну из солей винной кислоты и обратил внимание, что кристаллы соли не все одинаковы, а делятся на два типа, каждый из которых является зеркальным отображением другого. Заинтересовавшись, Пастер вручную отделил разновидности кристаллов друг от друга и растворил их в воде, чтобы пропустить через растворы луч поляризованного

света. Оказалось, что различие в симметрии сохраняется и при растворении соли – один из растворов вращал плоскость поляризации света по часовой стрелке, т.е. «вправо», а другой – в обратном направлении, т.е. «влево». Проанализировав свое открытие, ученый постулировал, что зеркально-симметричная форма кристаллов и их способность вращать плоскость поляризации света в противоположных направлениях объясняются тем, что существует два вида молекул соли – «правые» и «левые».

5 Еще через несколько лет тот же Пастер сделал – почти мимоходом – другое важное открытие, как-то раз обнаружив, что в забытой лабораторной чашке с оптически неактивным (т.е. не вращающим плоскость поляризации света) раствором выросла плесень. По идее, негодный раствор следовало просто вылить, а чашку вымыть. Но Пастер вместо этого решил проверить оптическую активность остатка. И оказалось, что испорченный раствор стал вращать плоскость поляризации света. Иными словами, выходило, что исходный раствор содержал равное количество правых и левых молекул и потому был оптически неактивным, но затем плесень использовала для своего питания молекулы только одного вида, а в растворе, соответственно, стали преобладать молекулы другого вида. Эта диспропорция и породила оптическую активность раствора.

6 Последующие исследования ученых показали, что свойство хиральности молекул оказывается не просто важным, а критически важным для осмысленного объединения традиционно различаемых областей неорганической химии, органической химии и физической химии в единую науку. Поначалу считалось, что вещества, исследованием которых занимается органическая химия, так или иначе связаны с жизнедеятельностью биологических организмов. Затем точка зрения изменилась, коль скоро многие из этих веществ научились синтезировать искусственно. Но благодаря открытиям Пастера в органической химии было обнаружено действительно существенное отличие биологически активных молекул от остальных.

7 В подавляющем большинстве биологически активные молекулы, включая витамины, сахара и все натурально образующиеся аминокислоты обладают свойством хиральности. Но если вещества органической химии имеют хиральную структуру, то при лабораторном, искусственном синтезе любого из них всегда происходит, как и в неорганической химии, образование левых и правых молекул примерно в одинаковом количестве. Однако в природе все такие молекулы, используемые и синтезируемые организмами, являются гомохиральными, т.е. имеют строго одну и ту же хиральность (даже в метеоритах, попавших на Землю из космоса, выявленные аминокислоты оказались с той же гомохиральностью, что и земные). Более того, искусственно синтезируемые молекулы «не с той» хиральностью часто оказываются токсичны для использующих их биологических систем, вызывая уродства и гибель. Вполне очевидно, что вся живая природа отдает предпочтение лишь одной половине зеркально-симметричных молекул, однако почему это так – совершенно неясно. Как непонятен и весь механизм происхождения гомохиральности в биологическом мире, где аминокислоты, скажем, существуют только левые, а сахара, наоборот, только правые.

##

8 В середине XX века довольно похожая ситуация, к удивлению как теоретиков, так и экспериментаторов, была обнаружена в мире элементарных частиц. Вплоть до 1957 года физики были уверены, что при зеркальном отражении этого мира все законы природы должны оставаться в точности

теми же самыми. Ученые называют это принципом пространственной инвариантности или, по соображениям терминологической строгости, принципом сохранения четности. Термин «четность» здесь подразумевает такое зеркальное отображение, которое меняет знак у всех трех пространственных координат, т.е. переставляет местами низ с верхом и левое с правым. Предполагалось, что любые, даже самые внимательные и искушенные зрители, наблюдающие всякий физический эксперимент, никогда не смогут отличить отраженную в зеркале картину от картины реальной.

g Для подобной точки зрения имелись веские основания, поскольку практически все известные на тот момент физические феномены подчинялись принципу пространственной инвариантности. В частности, не вызывала никакого сомнения применимость данного закона к трем из четырех фундаментальных взаимодействий природы – сильному, электромагнитному и гравитационному. Что же касается четвертого, слабого взаимодействия, по необходимости введенного в физику в 1949 году для объяснения распада и преобразований одних частиц в другие, то именно здесь, как оказалось, науку поджидали большие сюрпризы.

a В поисках решения для необъяснимых экспериментальных результатов два китайских теоретика Ли Цзун-Дао и Янг Чжань-нин, осевшие в США, занялись изучением всех известных на то время опытов с распадом частиц. И к изумлению своему обнаружили, что ни в одном из них принцип сохранения четности для слабых взаимодействий никогда не проверялся. Более того, столь примечательный факт оставался в физическом сообществе никем не замеченным, пока на него не обратили внимание Янг и Ли. Подводя итог в своей обзорной статье [1], опубликованной осенью 1956 года, они предложили несколько экспериментальных тестов, чтобы решить ясно и определенно, сохраняется ли четность при слабых взаимодействиях или же, напротив, слабые взаимодействия несимметричны, отличая, грубо говоря, правое от левого, а верх от низа.

b Среди предложенных экспериментов один из самых простых заключался в измерениях бета-распада кобальта-60. Идея была в том, чтобы с помощью сильного магнитного поля упорядочить ориентацию ядер кобальта, выровняв их спины, обычно случайно направленные, в одном и том же направлении. В процессе бета-распада электроны испускаются у полюсов ядра. Зеркальный образ такой системы с перевернутым направлением магнитного поля демонстрирует ту же по сути картину, но с той лишь разницей, что северный и южный полюса зеркальных ядер перевернуты, поскольку они вращаются в противоположную сторону. Принцип сохранения четности требует, чтобы испускаемые лучи были распределены между двумя полюсами поровну. Если же опыт показывает, что бета-частиц излучается с одного полюса больше, чем с другого, то становится возможным различать зеркальные отражения ядер-двойников. Иначе говоря, выявление анизотропии в испускании бета-лучей было бы эквивалентно нарушению четности в слабых взаимодействиях.

###

c Нельзя сказать, что статья китайских теоретиков оказалась полностью незамеченной, но сколь-нибудь заметного резонанса в научном сообществе поначалу она явно не получила. Никто не усмотрел здесь результат настолько важный, чтобы отложить текущие дела и заняться экспериментами с тестированием четности при слабых взаимодействиях. Лишь по счастливому стечению обстоятельств Ли Цзун-Дао сумел убедить свою

землячку и коллегу по Колумбийскому университету, профессора Цзянь-Сюн Ву, попытаться организовать эксперимент с распадом кобальта-60.

*d* В последнюю неделю 1956 и первые дни 1957 года Ву и ее коллеги поставили нужный эксперимент и обнаружили отчетливое нарушение принципа сохранения четности. Как только это стало известно, несколько физиков Колумбийского университета (R. Garwin, L. Lederman, R. Weinrich), работавшие с циклотроном, быстро модифицировали свой эксперимент по другой модели, также предложенной в статье Янга-Ли. Эксперимент на циклотроне столь же четко подтвердил нарушение четности, но теперь уже для случая распада мезонов. Статьи двух независимых экспериментальных групп с результатами, полностью подтверждающими идеи Янга-Ли, были опубликованы одновременно в одном и том же номере журнала Physical Review, открыв существенно новый и никем не предсказанный этап в развитии современной физики.[2]

*e* Конкретно для Янга и Ли это открытие принесло в том же 1957 году высшую для физиков награду, сделав их первыми нобелевскими лауреатами китайского происхождения. Для науки же в целом нарушение принципа четности означало то, что «оказалась разрушенной до основания весьма полная и завершенная теоретическая структура, причем никто не знает наверняка, как теперь складывать куски вместе» (цитата из комментариев ученых на пресс-конференции Колумбийского университета по поводу важного достижения).[3]

*f* За прошедшие с той поры полвека исследователям удалось, конечно, выстроить новую, Стандартную Модель взаимодействий, включающую в себя и нарушение четности. Но для слабого взаимодействия здесь отведена весьма особая роль «хирального калибровочного взаимодействия». В более понятных словах это означает, что по некоей неустановленной пока причине природа оказывается не полностью симметричной, а более леворукой. Конкретнее, согласно СМ, в слабых взаимодействиях принимают участие только леворукие компоненты частиц и только праворукие компоненты античастиц. Формулируя иначе, все наблюдавшиеся до сих пор нейтрино имеют только левую хиральность спина, а все антинейтрино – только правую... Данная картина заметно похожа на ситуацию в биологии, но вот почему это так – и здесь ясности никакой.

---

[1] Lee, T. D., and C. N. Yang, Question of Parity Conservation in Weak Interactions, The Physical Review, 104, Oct 1, 1956.

[2] Wu, C.S., Ambler, E., Hayward, R.W., D.D. Hoppes, and Hudson, R.P., Experimental test of parity conservation in beta decay, Physical Review, 105(4), 1957 ; Garwin, R.L., Lederman, L.M., Weinrich, M., Observations of the failure of conservation of parity and charge conjugation in meson decays: the magnetic moment of the free muon, Physical Review, 105(4), 1957

[3] Gardner, M., The Fall of Parity, in The Ambidextrous Universe, 1964

## Спин на ленте Мебиуса [67]

Спин элементарных частиц иногда называют самой квантовомеханической из всех физических величин, характеризующих строительные кирпичики природы. По сути своей, спин – это мера, характеризующая собственное вращение частицы или, точнее, количество энергии, запасенной в этом вращении. Звезды, планеты, бильярдные шары и прочие объекты, вращающиеся вокруг собственного центра масс, в принципе могут крутиться с самой разной угловой скоростью. А значит, иметь разное количество запасенной в этом движении энергии. В квантовой же физике, где всякая энергия по определению фигурирует разбитой на порции-кванты, спин ведет себя не так. Главная особенность квантовомеханического спина в том, что его величина для всякой частицы определенного типа – электрона, протона, фотона – всегда остается величиной строго постоянной. А меняться может лишь направление оси вращения («вверх» или «вниз»), определяющее знак спина в уравнениях.

Строго говоря, в науке по сию пору так и нет внятного объяснения для природы квантовомеханического спина. Как нет его, впрочем, и для многих других феноменов современной физики. Однако именно спин и, в частности, история его открытия дают показательную картину того, как делается реальная наука. И какую роль, соответственно, здесь способны играть случай и личности конкретных людей.

Существенно, что «титаны», создававшие фундамент квантовой механики в 1924-1928 годах, были весьма еще молодыми людьми. Вернер Гейзенберг родился в 1901, Поль Дирак в 1902, Вольфганг Паули в 1900. В тот же самый период родились и первооткрыватели спина, голландцы Сэмюэл Гаудсмит (1902) и Георг Уленбек (1900). Немаловажным подспорьем при совершении революции в физике оказались не только обычное для молодости нахальство, но и отсутствие у юных ученых устоявшейся репутации, и даже – порой – свойственное молодым невежество.

Скажем, когда в 1924 году В. Паули первым выдвинул идею о наличии у электрона еще одной «двузначной квантовой степени свободы» для объяснения наблюдаемых в экспериментах аномалий, то его редкостная для такого возраста образованность помешала дать наглядную физическую интерпретацию новому свойству. Другой, менее продвинутый в теории исследователь, двадцатилетний юноша Ральф Крониг вскоре предположил, что это может быть собственное вращение электрона. Однако одним из первых, кто узнал об идее Кронига, оказался Паули, который тут же разгромил ее в пух и прах, показав, что для обеспечения нужного углового момента поверхность электрона должна вращаться со скоростью, намного большей скорости света. Что, ясное дело, выглядело никак невозможным. Под большим впечатлением от этой критики, Крониг отказался от публикации своей работы.

#

Чуть позже, летом 1925, в Лейденском университете в Голландии, над той же самой проблемой серьезно задумались двое других молодых людей, Гаудсмит и Уленбек. Первый уже имел опыт работы над передовыми задачами физики в области спектров атомных излучений, поэтому хорошо ориентировался в основных результатах и в именах получивших их людей.

Но при этом обладал весьма посредственной общей научной эрудицией. Что же касается Уленбека, то он по причинам личного свойства на несколько предыдущих лет был оторван от переднего края науки, но при этом куда увереннее, чем его напарник, владел аппаратом классической физики. По этой причине оба узнавали друг от друга массу нового, причем происходить это могло в довольно комичной форме.

5 Например, когда исследователи вплотную подошли к своей главной задаче, и Гаудсмит стал рассказывать об озадачивающих результатах опытов, поставленных известными людьми, Уленбек то и дело прерывал его вопросами типа «А это кто такой?». Но зато, когда Гаудсмит завел речь о формальных математических соотношениях, описывающих эти результаты, а Уленбек стал обсуждать их в терминах степеней свободы электрона, то теперь уже рассказчику пришлось спрашивать: «А что это такое, степень свободы?». В итоге данный тандем ввел идею спина электрона, рассматривая его в виде вращающегося шарика, и придумал простого вида формулу, с помощью чего удалось эффектно объяснить и разрешить нестыковки экспериментов с теорией.

6 К счастью для авторов, первым рецензентом работы был не Вольфганг Паули, а их наставник Пауль Эренфест, который нашел полученные результаты очень любопытными и рекомендовал их, не откладывая, готовить к публикации. Параллельно работу согласился взять в изучение один из крупнейших авторитетов в физике того времени, Хендрик Лоренц, примерно через неделю представивший очень солидные расчеты для свойств вращающегося электрона с точки зрения общепринятой физики. Результаты этих расчетов выглядели крайне угнетающе. Магнитная энергия электрона оказывалась столь велика, что масса частицы становилась больше массы протона. Если же принимать значение массы, известное из экспериментов, то размеры электрона оказывались больше, чем размеры атома...

7 Короче говоря, идея спина по всем параметрам – и по классическим, и по меркам теории относительности – не вписывалась в физику никак. Обескураженный Уленбек даже решил отказаться от публикации, на что мудрый Эренфест сказал ему примерно следующее: «Я уже давно отправил ваше письмо в печать, вы оба достаточно молоды, чтобы позволить себе сделать глупость!»... Дальнейшая история, как говорится, всем известна, ибо концепция спина стала одним из краеугольных камней стремительно нарождавшейся квантовой механики.[1]

##

8 Конечно, большинству ученых пришлось тяжело и долго привыкать к вопиющим нестычкам квантовой теории с классической физикой и элементарной логикой. Но все несуразности, не находившие внятного объяснения, по неофициальному соглашению ученых было решено отложить до будущих времен. Которые, увы, все никак не настанут. Хотя давно пора. Иначе говоря, далее спин будет рассматриваться здесь в духе «Картезианских игр», то есть в терминах декартовых вихрей, их взаимодействий и сочетаний.

9 Такой подход, напомним, позволяет естественным образом объяснить в точности равное количество протонов и электронов во вселенной – как оснований и вершин у осциллонов, соединяющих две стороны «сверхтекучей мембраны» пространства. Из-за специфического механизма колебаний осциллонов в этой системе, протоны и электроны постоянно меняются местами на двух сторонах мембраны. В общих чертах показано,

что эта модель не только очень просто снимает проблему равных по величине и противоположных по знаку электрических зарядов у столь разных по размеру и массе объектов, как протон и электрон, но и в целом ведет к иному, более естественному взгляду на природу электромагнитных, сильных и слабых ядерных взаимодействий.

Теперь же пора отметить, что идея о двух слоях мембраны пространства, совокупно образующих одностороннюю поверхность типа ленты Мебиуса, сама по себе очень близка геометрическим свойствам квантового спина. Одна из важных особенностей частиц-фермионов с полуцелым спином – электронов, протонов, нейтронов – заключается в том, что при их движении в пространстве для возвращения в исходное состояние нужно сделать оборот не на 360 градусов (как для всякого объекта в привычном человеку мире), а на 720 градусов. То есть не один, а два полных оборота. Конкретно для электрона на орбите в атоме это означает, что после одного оборота вокруг ядра знак спина меняется на противоположный, и лишь после второго оборота спин принимает исходное значение. В качестве простой и наглядной иллюстрации для этого не совсем обычного, вообще говоря, свойства часто приводят так называемый «пояс Дирака».

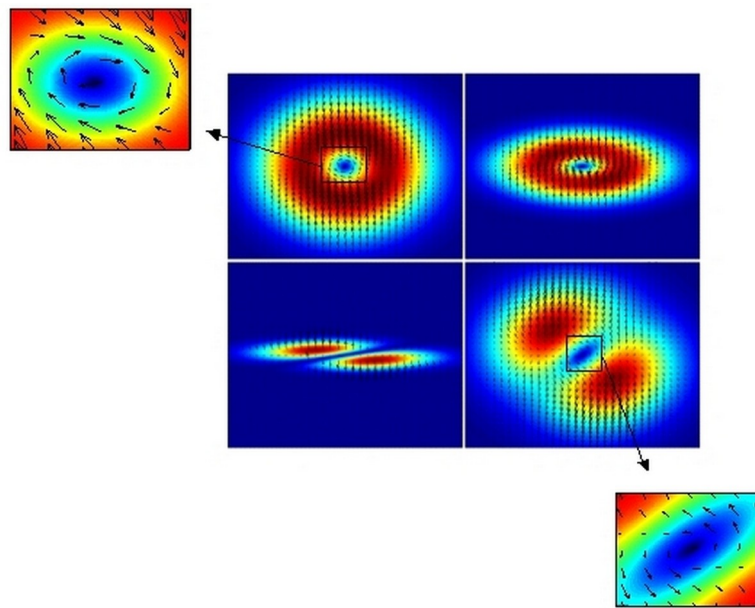
Одно из важных преимуществ Поля Дирака перед остальными молодыми дарованиями, создавшими квантовую механику, было в том, что он в качестве базового получил инженерное образование. Благодаря этому Дирак хорошо ориентировался в вопросах проективной геометрии, интенсивно используемой в инженерных науках, а плюс к тому, оказавшейся чрезвычайно полезной при решении загадок нарождавшейся квантовой физики. Видимо, по этой причине Дирак оказался первым, кто заметил, что странная особенность электронного спина становится совершенно естественным геометрическим следствием, если орбиту электрона представлять в виде перекрученного на половину оборота пояса. Иначе говоря, в виде ленты Мебиуса.

###

Возвращаясь к геометрическим свойствам конструируемой здесь модели пространства, надо подчеркнуть, что двухслойная поверхность Мебиуса принципиально отличается от обычной однослойной в том, что касается ориентируемости. Свойство ориентируемости пространства, напомним, непосредственно связано с различием правого и левого. Именно поэтому пространство вселенной никак не может быть трехмерным вариантом обычной поверхности Мебиуса, на которой один обход превращает правое в левое, левое в правое, а вращение по часовой стрелке становится вращением в противоположном направлении. Но все становится в корне иным, если лента Мебиуса двухслойная. Образованное ею пространство становится ориентируемым, а значит, сколько его не обходи, правое всегда будет оставаться правым, а левое левым... Правда, в модели, где частицы одного слоя постоянно меняются местами с частицами другого слоя, несложно увидеть одну очень серьезную проблему. Для того, чтобы при таких сквозных перескоках объекта все правое продолжало оставаться правым, а левое левым, переход должен быть и не зеркальным, и не центрально-симметричным, как в фокусе фотоаппарата, а весьма особенным – «с переворотом спина». Но такого рода переходы очень долгое время считались невозможными как в природе, так и в математике, занимающейся гладкими преобразованиями. Грубо говоря, предполагалось, что для обращения направления вращения вихря – то есть переворота спина – этот вихрь требуется сначала разрушить.

Однако к 1990-м годам общий прогресс лазерных технологий позволил ученым-оптикам сконструировать такие приборы, с помощью которых в закрученном винтом луче света удавалось-таки добиваться переворота в направлении вращения волны. Но при этом довольно долгое время оставалось неясным, как именно такая перемена в луче происходит. Лишь в 2001 году появилась работа [2] группы исследователей из университетов Каталонии и Аризоны, которым впервые удалось в подробностях заснять и продемонстрировать всю картину происходящего. Одной из главных хитростей, позволивших обращать вращение закрученного в спираль пучка и одновременно наблюдать все происходящее с оптическим вихрем, стала идея пропускать луч через цилиндрическую линзу. Оказалось, что после того, как пучок света проходит через линзу, прежде круглая сердцевина луча начинает сплющиваться в вытянутый эллипс, пока не вытягивается в исчезающе тонкую линию. А после того, как вихрь проходит через фокус линзы, эта линия снова превращается в эллипс, однако энергия в нем уже циркулирует в противоположном направлении.

d



*Процесс переворота топологического заряда*

Для описанного механизма переворота спина - или, другими словами, обращения топологического заряда вихря - исследователями усмотрено множество перспективных приложений. В частности, сами авторы указали, что их результаты помогут глубже понять поведение квантовых вихрей в конденсатах Бозе-Эйнштейна (КБЭ) и вообще в супержидкостях, поскольку оба типа вихрей - оптические и в КБЭ - описываются сходными уравнениями. Причем наблюдения исследователей над поведением света дают основания предполагать, что и в КБЭ вполне возможны такие вихри, спины которых постоянно меняют свое направление... Короче говоря, была проделана чрезвычайно интересная работа, заслуженно отмеченная среди главных результатов мировой науки за 2001 год в информационном бюллетене «Новости физики», ежегодно издаваемом АИМ, Американским физическим институтом. Несколько удивляет лишь то, что за все прошедшее с тех пор время столь интересная статья так и не попала в свободный интернет-доступ.

e



По этой ли причине, или по какой-то еще, но никто так и не обратил внимания на любопытную аналогию: фокус луча, сплюснутый в тонкую линию по центру вихря, похож на перемычку-бар в сердцевине спиральных галактик, в изобилии наблюдаемых астрономами. А строение таких галактик, в свою очередь, внешне напоминает разбрызгиватель на садовой лужайке. Где закрепленная на вертикальной оси трубка (бар) при подаче воды из-за вращения разбрызгивает с двух своих концов струи брызг по кругу (звездные рукава). И это же – условия той самой гидродинамической задачи, над которой безуспешно бились в 1939-1940-м годах студенты и аспиранты Принстона, включая Ричарда Фейнмана. Научным руководителем Фейнмана был Джон Арчибальд Уилер, который, в свою очередь, помогал Нильсу Бору создавать теорию ядерного деления на основе «гидродинамической» модели ядра как капли жидкости. Чуть позже все эти люди активно подключились к Манхэттенскому проекту по созданию атомной бомбы... Как ни странно, связующим звеном между всеми этими вещами оказывается феномен переворота спина.

- 
- [1] S. A. Goudsmit, Die Entdeckung des Elektronenspins, Phys. Blatter 21, 445 (1965). Русский перевод: С. Гаудсмит, «Открытие спина электрона», УФН, Том 93, вып 1 (Сентябрь 1967)
- [2] Gabriel Molina-Terriza, Jaume Recolons, Juan P. Torres, Lluís Torner, and Ewan M. Wright. «Observation of the Dynamical Inversion of the Topological Charge of an Optical Vortex», Physical Review Letters, vol 87, 023902 (Issue 2 - June 2001)

## Свечение звука [68]

0 Труды норвежского затворника Карла Бьеркнеса, здесь выступающие в качестве фундамента для гидродинамической модели электромагнетизма, в мире большой науки XX века упоминались крайне редко. А если же о них и вспоминали, то лишь в узкой области исследований, сосредоточенных на изучении пузырьков в жидкости, возбуждаемой внешними колебаниями акустического или ультразвукового диапазона частот. К 1990-м годам, что примечательно, именно это направление стало вызывать обостренный интерес, поскольку физика пузырьков в такого рода системе все больше стала удивлять ученых неожиданными результатами.

1 Интерес этот, безусловно, в первую очередь вызван поразительным явлением сонолюминесценции, с которым ныне связывают надежды на управляемый «термоядерный синтез на рабочем столе». Однако и помимо занятого феномена со свечением жидкости под действием звуковых волн, физические свойства пузырьков в подверженной регулярным колебаниям среде дают богатую картину для анализа и обобщений.

2 В качестве одного из наглядных тому примеров можно привести работу группы исследователей из американского Университета штата Нью-Йорк в Буффало (N. Ashgriz, T. Barbat, C.-S. Liu), в середине 1990-х годов углубленно изучавших «Динамику двух взаимодействующих пузырьков в акустическом поле». Такое название получила соответствующая статья авторов на данную тему в Journal of Fluid Mechanics за 1999 год.[1]

3 Анализ «первичных и вторичных сил Бьеркнеса», возникающих в результате сложного взаимодействия волн от собственных колебаний пузырьков и ультразвуковых вибраций в жидкости, дал картину с довольно причудливой динамикой. В частности, выяснилось, что силы Бьеркнеса имеют две составляющих. Первая известна давно, обратно пропорциональна квадрату расстояния между пузырьками и, подобно электромагнетизму, может быть притягиванием или отталкиванием – в зависимости от сдвига фазы в колебаниях пузырьков. Вторая же составляющая всегда является силой взаимного отталкивания и обратно пропорциональна пятой степени расстояния. Иначе говоря, это сила, которая на малых расстояниях удерживает притягивающиеся друг к другу вибрирующие пузырьки от столкновения и схлопывания.

#

4 Иными словами, если – в духе Бьеркнеса – считать физику пузырьков в такой системе моделью взаимодействий электрически заряженных частиц, то появляется совершенно естественный ответ на одну из больших загадок в устройстве материи. Ни классическая, ни квантовая теория электромагнетизма не объясняют, почему в атоме водорода электрон никогда не падает на протон, несмотря на постоянное взаимное притяжение частиц. Две же компоненты волновых сил Бьеркнеса, на больших расстояниях притягивающие разнополярные частицы, а на близких отталкивающие, могли бы объяснить загадочную стабильность атома простым уравновешиванием двух компонент.

5 Более того, коль скоро вторая компонента Бьеркнеса является силой отталкивания для любых зарядов, из этого также следует, что она, по идее, должна накапливаться с увеличением массы объекта. И сколь бы близкодействующей она ни была, для очень массивных объектов вроде планет или звезд, это должно проявляться при их сближении - но при

6 А именно, от богатой физики пузырьков в жидкости, совершающей вынужденные колебания. Где самым выдающимся феноменом является, несомненно, сонолюминесценция. То есть эффект излучения света пузырьками, возникающими в жидкости при ее возбуждении звуком. Впервые это явление было обнаружено германскими учеными из

7 Кельнского университета в 1934 году - на пике открытий квантовой физики - однако в то время феномен совершенно не вызвал у физиков сколь-нибудь заметного интереса. Такая ситуация сохранялась на протяжении последующего полувека, и лишь к концу 1980-х годов сонолюминесценция начала привлекать подобающее ей внимание ученых. Главным событием, вызвавшим эти перемены, стали результаты исследования группы Фелипе Гаитана из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, которой впервые удалось подробно изучить явление сонолюминесценции в стабильных условиях. До этого в экспериментах могли получать лишь тусклые одиночные вспышки света, природу которых изучить было очень сложно. А Гаитан и его коллеги (D.F. Gaitan, L. Crum, R. Roy, C. Church) сумели построить опыт так, что в их установке единственный пузырек оказывался захвачен в определенном месте стоячей акустической волны, регулярно испуская свет вместе с каждой пульсацией среды [2]. Такая технология эксперимента в течение 1990-х годов позволила развернуть систематическое изучение феномена, а получавшиеся при этом результаты производили ошеломительное впечатление. Достаточно лишь сказать, что температура внутри пузырька посреди контейнера с холодной водой оказывалась выше, чем температура плавления стали.

##

8 Общий список всех удивительных, парадоксальных и сильно озадачивающих ученых свойств, которыми обладает сонолюминесценция, оказывается весьма длинным. Вот лишь некоторые из них. Испускание света происходит в самом конце очень быстрого цикла сжатия пузырька, когда его размер уменьшается до величины порядка 1 микрометра, т.е. 1 тысячной доли миллиметра. Вспышка света при этом столь кратковременна, что поначалу у высокоточных оптических сенсоров просто не хватало разрешающей способности для фиксации длительности, поэтому был установлен лишь верхний предел - порядка 50 пикосекунд (1 пикосекунда равна триллионной доли секунды). Измерения более продвинутой аппаратурой в последующие годы сократили наблюдаемый интервал еще значительно - до величины менее 12 пикосекунд. При сравнении относительно малой акустической энергии возбуждения, прикладываемой к системе, с интенсивностью излучаемого пузырьком света ( $10^5$ - $10^7$  фотонов на вспышку), вычисления показывают, что данный феномен в точке фокуса-вспышки концентрирует плотность энергии примерно в триллион раз (миллион миллионов или  $10^{12}$ )...

Важной особенностью сонолюминесцентной вспышки является ее гладкий спектр излучений без каких-либо характерных спектральных линий. Такого рода спектр соответствует излучению абсолютно черного тела, причем стандартный аппарат физических расчетов здесь дает примерно такую картину: при температуре воды 22 градуса по Цельсию спектр сонолюминесценции соответствует спектру черного тела, разогретого до 25 000 кельвинов, а при охлаждении воды до 10° - спектру черного тела в диапазоне свыше 50 000 градусов (т.е. больше, чем на поверхности Солнца).  
9 При этом интенсивность излучаемого света заметно растет в сторону уменьшения длины волны. Частоты ультрафиолета и выше поглощаются водой, но оценки показывают, что в терминах излучения абсолютно черного тела наблюдаемый спектр может свидетельствовать о температурах свыше миллиона кельвинов. Иначе говоря, о температурах термоядерных реакций внутри звезд.[3]

Наконец, еще одна очень существенная черта сонолюминесценции - это редкостная стабильность пульсаций пузырька, как в смысле позиции точки в пространстве, так и - самое главное - в смысле чрезвычайно строгой периодичности вспышек [4]. Эксперименты показали, что частота световых  
a вспышек в действительности оказывается намного более стабильной, чем частота ультразвукового осциллятора, генерирующего звуковые волны в воде. Иначе говоря, похоже на то, что ультразвуковые колебания здесь накладываются на внутренние вибрации материи с куда большей частотой, приводя к периодическим резонансным всплескам-вспышкам.

Но такую идею, впрочем, привлекать для объяснения сонолюминесценции пока не принято. Удивительный феномен пытаются, естественно, постичь на основе знаний, уже имеющихся у физиков. Разнообразных гипотез, объясняющих механизм сонолюминесценции, на сегодняшний день  
b предложено в изобилии. Но поскольку в большинстве своем они серьезно противоречат друг другу, и при этом не способны внятно моделировать все стороны явления, можно сказать, что ясной картины здесь получить так и не удается.

###

В качестве одной из наиболее оригинальных - обычно, правда, тут употребляется слово экзотических - теорий сонолюминесценции нередко упоминают идею, разработанную Клаудией Эберляйн. В 1995-1996 гг. она предложила механизм [5], описывающий сонолюминесценцию как излучение, порождаемое скоррелированными, т.е. согласованными флуктуациями квантового вакуума. В квантовой теории постулировано, что вакуум заполнен хаотически взаимодействующими виртуальными частицами. Одним из наиболее известных проявлений скрытой энергии квантового вакуума считается эффект Казимира, когда хаотически движущиеся виртуальные фотоны обеспечивают взаимное притяжение  
c параллельных незаряженных пластин на близком расстоянии. Что же касается сонолюминесценции, то здесь, по гипотезе Эберляйн, граница пузырька, разделяющая воду и пар, при сжатии движется настолько быстро, что превращает виртуальные фотоны вакуума в реальные фотоны световых вспышек. Хотя в статьях автора нет ни слова о черных микродырах пространства, комментаторы отметили определенное идейное сходство описанного механизма с излучением Хокинга, т.е. гипотетическими процессами излучения фотонов космическими черными дырами. Но в целом теорию Эберляйн, довольно дружно раскритикованную коллегами, в рядах научного сообщества практически никто не поддержал. Однако было признано, что окажется она верной, сонолюминесценция стала

бы первым реально наблюдаемым эффектом излучения квантового вакуума.

Не исключено, что в модели Эберляйн со временем удастся разглядеть куда больше, чем это представлялось поначалу. Ну а для той модели, что d  
конструируется здесь, особо следует выделить идею о схлопывающемся пузырьке как о микроскопической черной дыре. Или, чуть иными словами, о периодически образующемся в ткани пространства-мембраны микропроколе, через который определенной порцией впрыскивается энергия из другого, параллельного мира-мембраны.

В вольных терминах и понятиях данной модели нет особой разницы между e  
словами «квантовый вакуум», «эфир зернистой структуры» или, скажем, «вихревая губка пространства». Но существенно, что гранулированное микровихрями пространство имеет структуру двухслойной мембраны и постоянно вибрирует с очень высокой частотой. Так что спонтанно возникающие здесь осциллоны – или частицы материи, иными словами – на одной стороне мембраны являются протонами, а на другой электронами. Тогда регулярно схлопывающийся в сонолюминесцентной жидкости пузырек, соответственно, оказывается удобной и наглядной макромоделью для жизни такого осциллона. В одной своей фазе это сравнительно большая и разреженная область пространства в виде естественно образующегося пузырька-«протона», а в противоположной фазе – куда меньший размером энергетический сгусток-«электрон», формирующий кратковременной точечный прокол в мембране. А поскольку с противоположной стороны двухслойной мембраны плотность материи и энергии намного выше (согласно общей модели, все частицы «нашего» мира на другой стороне мембраны сконцентрированы в теле звезды), то оттуда через микропрокол происходит естественный выброс порции лучистой энергии.

И подобно тому, как пузырек сонолюминесценции в каждом такте своих f  
сжатий испускает вспышку света, пульсирующий осциллон материи в каждой фазе электрона испускает единичный фотон или квант энергии. Исходя из хорошо известных в физике опытов с барабаном, наполненным дымом и имеющим отверстие, естественно предположить, какую форму должен иметь этот минимальный квант энергии. Вероятно, это должна быть форма вихревого кольца, вылетающего из отверстия, когда ударяют в мембрану барабана.

- 
- [1] Tiberiu Barbat, Nasser Ashgriz, Ching-Shi Liu. «Dynamics of Two Interactive Bubbles in An Acoustic Field». Journal of Fluid Mechanics (1999), 389: 137-168 Cambridge University Press
  - [2] D. Felipe Gaitan, Lawrence A. Crum, Charles C. Church, and Ronald A. Roy. «Sonoluminescence and bubble dynamics for a single, stable, cavitation bubble». Journal of the Acoustical Society of America, June 1992, Volume 91, Issue 6, pp. 3166-3183
  - [3] Moran M.J., Haigh R.E. et al. «Direct observations of single sonoluminescence pulses», Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 96, Number 3, May 1995 , pp. 651-656(6)
  - [4] J.D. Cheeke. «Single-bubble sonoluminescence: bubble, bubble toil and trouble». Canadian Journal of Physics, Volume 75, Number 2, February 1997
  - [5] Claudia Eberlein, «Sonoluminescence as quantum vacuum radiation», Phys. Rev. Lett. 76, 3842 (1996) arXiv:quant-ph/9506023 ; «Theory of quantum radiation observed as sonoluminescence», Phys. Rev. A 53, 2772 (1996); arXiv:quant-ph/9506024

## Развилки истории [69]

Идея о минимальном кванте энергии в форме вихревого кольца имеет множество разнообразных следствий, разрабатывая которые можно получать наглядные и естественные модели-объяснения для парадоксов квантовой физики. Но прежде, чем заниматься этими моделями, полезно в очередной – и явно не последний – раз обратиться к истории XIX века и открытиям второй научной революции. Потому что в столь динамичные, как тот, периоды смены эпох то и дело случаются важные моменты разветвления истории, у математиков именуемые точками бифуркации. В такие моменты бывает особенно важна роль относительно небольшого количества людей, в нужное время оказавшихся в нужном месте, и поэтому способных своими действиями существенно повлиять на траекторию возможного развития. Как общества в целом, так и науки в частности.

В узком контексте сюжета о квантовой оптике особый интерес представляет Шотландия в середине XIX века. Потому что именно здесь в тот период собралась плеяда ученых, по уровню своих талантов, возможно, сильно различавшихся, но в совокупности обладавших потенциалом к гигантским, без преувеличения, свершениям. Однако до какой степени этот потенциал удалось реализовать в жизнь – отчетливо видно лишь по прошествии полутора веков и с высоты накопленных наукой знаний.

Логичным началом для этой истории можно полагать год 1844, когда эдинбургский инженер-судостроитель Джон Скотт Рассел (1808-1882) сделал свой «Доклад о волнах»[1] на ежегодном собрании Британской ассоциации развития науки. Из этого выступления и основанной на нем последующей статьи ученый мир впервые узнал о существовании солитонов, иначе именуемых уединенными волнами. Правда, оба эти термина появятся значительно позже – «солитон», к примеру, так вообще в середине 1960-х годов, когда станет ясно, насколько уединенная волна по своим свойствам похожа на частицу. Сам же Рассел дал своему открытию имя «волна переноса», а в докладе рассказал о главных особенностях обнаруженного им удивительного явления. О том, что на поверхности воды может образовываться устойчивая волна в виде уединенного возвышения, которое с большой скоростью перемещается на далекие расстояния, сохраняя при этом неизменной свою форму. Когда Рассел впервые увидел такую волну, порожденную резко вставшей баржей в узком канале, то ему пришлось догонять и сопровождать ее верхом на лошади, поскольку волна не теряя формы энергично прошла по каналу порядка 2 миль, после чего затерялась в изгибах русла.

Ныне эта история общеизвестна, поскольку с подробностями описана в докладе Джона Рассела, ставшем классикой обширной литературы о солитонах. Однако в те времена, когда данная работа была впервые опубликована, реакция на открытие была более чем прохладной. Странная «волна переноса» противоречила всем известным законам физики, что с помощью аналитических расчетов показали авторитетные и влиятельные в ту пору британские ученые вроде Джорджа Биддела Эри и Джорджа Грина. И хотя сам Рассел, прежде чем выносить свою работу на публику, экспериментально изучал волны трансляции на протяжении десятка лет, мнение научных авторитетов оказалось куда весомее. Опыты противоречат общепринятой теории – значит, это Рассел что-то там напутал и неправильно понял в своих экспериментах.

#

Видный ученый Дж. Б. Эри, занимавший пост директора Гринвичской обсерватории, примерно в те же годы, кстати, зарубил правительственную поддержку инициатив Чарльза Бэббеджа, создавшего абсолютно реалистичный проект вычислительной машины более чем за столетие до появления компьютеров. Назначенный премьер-министром в качестве эксперта, Эри охарактеризовал в своем отзыве машину Бэббеджа как «абсолютно бесполезную»... Что же касается Джона Рассела, то он, надо подчеркнуть, на всю жизнь остался глубоко убежденным в важности своего открытия, продолжая отыскивать и изучать уединенные волны во всех их проявлениях. В 1840-е годы инженер нашел и реальное применение своему открытию. Но хотя новый экономичный способ Рассела для транспортировки барж на основе волны переноса действительно практиковался некоторое время на канале, соединяющем Эдинбург и Глазго, в научном мире никого всерьез так и не заинтересовало явление, противоречащее общепринятым законам гидродинамики.

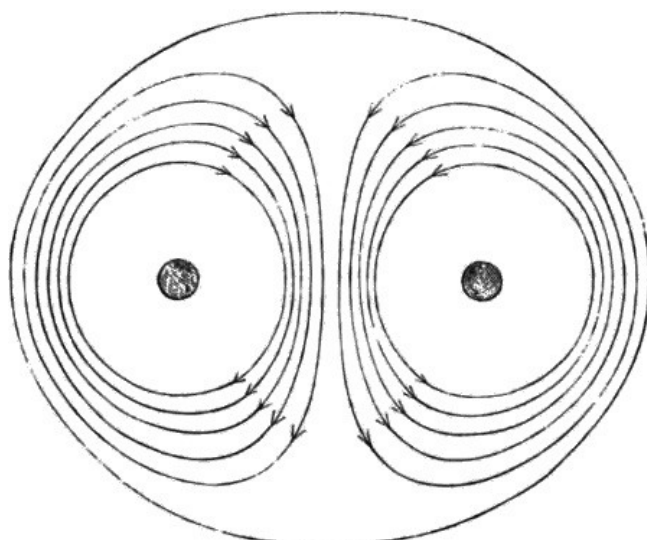
Тем временем другой шотландский ученый Уильям Томсон (Кельвин) – совсем еще молодой, но уже ярко проявляющий свои научные таланты – в середине 1845 года пишет письмо Майклу Фарадею. В этом послании Томсон рассказывает знаменитому исследователю электричества о своих теоретических расчетах, предсказывающих воздействие магнитного поля на плоскость поляризации света. Фарадей, как известно, не был силен в математике, а гений и интуиция великого экспериментатора на протяжении многих прежних лет так и не помогли ему в отыскании давно подозревавшихся взаимосвязей света с явлениями электричества и магнетизма. Но теперь, с подачи юного дарования, Фарадей взялся за опыты с новой силой и вскоре действительно нашел то, что давно искал. Осенью того же года им было продемонстрировано, что сильное магнитное поле, приложенное вдоль направления распространения света, может вращать плоскость поляризации света.

В 1846 году 22-летний Уильям Томсон занимает освободившуюся должность начальника кафедры натурфилософии – как в те времена называли физику – в Университете Глазго. Одним из первых студентов молодого профессора становится его одноклассник Джон Керр (1824-1907), поначалу готовивший себя в священники, а затем сделавший выбор в пользу естественных наук. Дружеские отношения будут связывать Керра и Томсона всю их последующую долгую жизнь, вплоть до смерти друзей, которая произойдет тоже, по сути, одновременно, в год их 83-летия.

Другой многолетний друг Томсона, шотландский физик и математик Питер Тэт (1831-1901), со временем возглавил кафедру натурфилософии неподалеку, в университете Эдинбурга. Поскольку Тэт в юности был однокурсником и близким знакомым Джеймса Клерка Максвелла, то, можно сказать, между двумя величайшими физиками Британии имелись не только регулярные научные контакты, но и – при посредничестве Тэта – довольно близкие человеческие отношения. Кроме того, именно опыты Тэта с кольцами дыма в 1860-е годы привлекли интерес Томсона к изучению вихрей в жидкостях. Переносясь в день сегодняшний, следует напомнить, что вихри вообще и вихревые кольца в частности являются одним из главных объектов изучения в физике солитонов.

##

Одним из следствий нового интереса Томсона стала его работа «О вихревом движении» (1869), в которой он аналитически исследовал весьма примечательное поведение системы из пары вихрей, сегодня обычно именуемой «овалом Кельвина». Для начала Кельвин показал, что если вихри вращаются в одном направлении, то они движутся по окружностям вокруг общего центра, расположенного между ними. Если они вращаются в противоположных направлениях, то центр вращения находится вне отрезка, соединяющего центры вихрей. Особенно же интересен тот случай, когда оба вихря вращаются в противоположных направлениях, а в остальном совершенно одинаковы. В таких условиях оба вихря движутся не по окружности, а по прямой, составляя как бы одно целое – овал Кельвина. Можно говорить, что овал движется по прямой, поскольку скорости двух его вихревых центров равны, а центр общего вращения находится в бесконечности. Из расчетов Кельвина получается, что пара вихрей такой системы движется в среде равномерно и прямолинейно, а вся остальная жидкость обтекает овал так, как она обтекала бы твердое тело в форме этого овала... Чтобы стало яснее, зачем потребовалось углубляться в столь древнюю работу, уместно обратить внимание на тот факт, что овал Кельвина, по сути дела, является вихревым кольцом «в разрезе», когда плоскость сечения проходит по оси поступательного движения кольца.



*Овал Кельвина*

В те же 1860-е годы, когда делались данные открытия, сформировались обстоятельства для более близкого знакомства великого физика с первооткрывателем и исследователем солитонов Дж. С. Расселом. Предприимчивый Томсон энергично подключился к затеянному в ту пору масштабному проекту по прокладке первого телеграфного кабеля между Европой и Америкой по дну Атлантического океана (за что, собственно, ученый и был удостоен титула барон Кельвин). Задачу по непосредственной укладке кабеля на океанское дно выполнял гигантский пароход «Грейт Истерн» – самое большое по тем временам средство передвижения, построенное руками человека. Одним из соавторов проекта и руководителем постройки этого чуда кораблестроительных технологий был Джон Рассел. В архивах историков науки имеется открытка, которую Томсон отправил Расселу с борта уходящего в море «Грейт Истерн». Однако никаких совместных проектов, связанных с исследованием волн переноса, из этого знакомства, увы, не последовало.



Параллельно, в течение 1860-1870-х годов Дж. К. Максвелл создает свою теорию электромагнетизма, которая на основе концепции волн в вихревой ячеистой среде математически строго и при этом эстетически красиво свела электричество, магнетизм и свет в единую связную картину. Хотя максвелловские уравнения более чем успешно дожили до нынешних дней,  
*a* необходимо подчеркнуть, что представления их автора относительно природы электромагнитных явлений сильно отличались от тех, что приняты сегодня. В частности, согласно современной теории электромагнетизма заряд является источником электрического поля, а ток – источником магнитного поля.

В теории же Максвелла заряд не является некой самостоятельной разновидностью вещества или «материей», это скорее локальный сдвиг или «смещение» в той субстанции (типа эфира), что образует и заполняет собой пространство. Поэтому и электрический ток оказывается у Максвелла не потоком заряженных частиц, а скорее процессом последовательного  
*b* возрастания и ослабления «смещения» в среде... Век спустя, во второй половине XX столетия физикам неоднократно приходилось возвращаться к этой максвелловской концепции, поскольку для теоретического описания полупроводников, сверхпроводников и прочих новооткрываемых квантовых феноменов потребовалось вводить «дырочную проводимость», фононы, экситоны и прочие квазичастицы. То есть объекты, реально хотя и не существующие, но как локализованные участки среды обладающие выраженными свойствами частиц.

###

В 1875 году довелось, наконец, заметно отличиться и Джону Керру, еще одному участнику «шотландской плеяды» из близкого окружения Кельвина. Этому ученому удалось открыть явление, которое ранее в течение многих лет искал, но так и не смог обнаружить Майкл Фарадей.  
*c* Открытие, вошедшее в историю под названием электрооптический эффект Керра, заключается во вращении плоскости поляризации или, иначе, в изменении показателя преломления света в среде под действием внешнего электрического поля.

Примерно столетие спустя эффект Керра и появившиеся к тому времени лазеры дадут сильнейший толчок к развитию исследований в области нелинейной оптики. Под этим термином принято понимать обширную совокупность оптических явлений, наблюдающихся при взаимодействии  
*d* интенсивных световых пучков с веществом. Оптический эффект Керра, самопорождаемый лазерным светом без внешнего электрического поля, оказался важнейшим ингредиентом для физики оптических солитонов – одного из наиболее перспективных направлений в развитии современной оптоволоконной связи...

Таким образом, можно видеть, что примерно за 30-летний период группой шотландских ученых были открыты почти все базовые результаты, которые лишь спустя столетие лягут в основу нелинейной квантовой оптики вообще и физики солитонов в частности. Чего в этих открытиях не хватает, так это, конечно, лазера. Но если присмотреться к устройству данного прибора, то  
*e* легко заметить, что он имеет довольно простую в своей основе конструкцию. Которая ничем особенным, в принципе, не отличается от электрооптических ячеек, конструировавшихся для экспериментов Керра, и оптических интерферометров, к 1870-м годам уже ставших весьма точными приборами для изучения физики света. Справедливо также заметить, что и волновые дифференциальные уравнения для солитонов

были выведены вовсе не шотландцами, а голландцами – Кортвегом и Де Вризом в 1895 году. Но вряд ли кто станет сомневаться, что займись в свое время изучением уединенных волн ученые калибра Максвелла или Кельвина, они бы наверняка сами нашли эти уравнения.

Но Максвелл неожиданно умер в 1879 году совсем еще нестарым человеком, не дожив и до 50 лет. А Кельвин не только так и не заинтересовался открытиями мало знакомого ему Рассела и своего друга Керра, но и на всю оставшуюся жизнь стал решительным противником максвелловской теории электромагнетизма. Поскольку имел собственные виды на альтернативную теорию эфира, которой в итоге так и не суждено было реализоваться до прихода нового века. Вместе с которым пришла и совершенно другая физика.

---

[1] Tiberiu Barbat, Nasser Ashgriz, Ching-Shi Liu. «Dynamics of Two Interactive Bubbles in An Acoustic Field». Journal of Fluid Mechanics (1999), 389: 137-168 Cambridge University Press

## Свет как дислокация [6А]

Джон Скотт Рассел, первооткрыватель солитонов или волн переноса, как он их называл, умер летом 1882 года в возрасте 74 лет. Некролог [1], опубликованный в бюллетене лондонского Королевского общества, на трех страницах описал, как это заведено в подобных случаях, наиболее важные дела и свершения разносторонне одаренного инженера и ученого. При этом о волнах переноса – самом главном открытии Рассела, которое он с энтузиазмом изучал всю свою жизнь – в некрологе не упомянуто ни единым словом. Обобщающая эти исследования книга ученого, «Волна переноса в океанах воды, воздуха и эфира», вышла из печати лишь после смерти Рассела в 1885 году, но не вызвала практически никакого интереса у научного сообщества. Максвелла в те времена уже не было, а Кельвин, очевидно, просто не разглядел важность того, что к концу XX века станет одной из самых горячих областей для исследователей экспериментальной физики. И вряд ли эта недалновидность выглядит странной для великого некогда ученого, который под конец жизни авторитетно заявлял, что летательные аппараты тяжелее воздуха невозможны, а у радиосвязи нет никакого будущего.

Сейчас нет, наверное, ни малейшего смысла в том, чтобы начинать гадать, как могла бы сложиться история науки, если бы солитоны, компьютеры и лазеры вошли в научный обиход на столетие раньше. Хотя реальные возможности для этого были, история сложилась так, как сложилась. Но имеются определенные резоны в том, чтобы на время забыть достижения квантовой теории XX века, и попытаться разобрать современные результаты физиков-экспериментаторов в терминах и понятиях науки века XIX. Сосредоточившись, главным образом, на открытиях нелинейной оптики и привлекая попутно известные факты из других областей.

Одно из важных и сравнительно недавно открытых в физике явлений получило название «световая пуля». Внешне этот феномен представляет собой крошечную бусину света, которая в своем движении может преодолевать большие расстояния, не теряя при этом стабильной формы. По своей физической сути световая пуля – это трехмерный солитон, способный к самоформированию в оптических средах с довольно специфическими свойствами. В чем именно заключаются эти особенности среды, можно пояснить чуть позже. Пока же куда более важным представляется то, что световые пули как уединенные волны органично вписываются в классические уравнения Максвелла для электромагнетизма.

Иначе говоря, появляется совершенно естественная возможность рассматривать свет как поток крошечных световых пуль или минимальных квантов энергии. Всякий же фотон света определенной энергии (или частоты, или цвета, другими словами) в такой картине представляет собой очередь из световых квантов или пакет уединенных волн. А корпускулярно-волновая двойственность света, которую по давней традиции принято считать труднодостижимым парадоксом, на самом деле оказывается естественным следствием природы кванта как уединенной волны. Подобного рода идеи – о трактовке частиц материи и квантов света как солитонов – вообще говоря, выдвигаются в науке уже достаточно давно. Но по целому ряду причин стать общепризнанными им пока не удалось. Одна из самых больших проблем – это неясные причины поразительной, практически вечной стабильности таких солитонов в физическом вакууме.

#

4 Конкретно для квантов света, в частности, всякая среда, способная поддерживать долгоживущие или вообще неуничтожимые оптические солитоны, должна обладать весьма специфическим сочетанием характеристик. Если пользоваться терминологией современной физики, то для того, чтобы фотоны света можно было считать очередями световых пульс, от «пустого пространства» вселенной требуется не только малая абсорбция, но также аномальная дисперсия и достаточная большая оптическая нелинейность.

5 Всякая честная попытка доходчиво и внятно разъяснить глубокий смысл этих терминов с помощью обычного языка потребовала бы, наверное, написания еще одной книги. Но для постижения их общей сути достаточно понять, что среда должна быть не только максимально прозрачной, но также обеспечивать для волн разной частоты в среднем одну и ту же скорость (чтобы волновые пакеты не расплывались), а для пучков света обеспечивать постоянную самофокусировку. Среди повсеместно распространенных материалов подобное сочетание оптических свойств считается если и не взаимоисключающим, то в высшей степени редким.

6 В качестве достаточно близкой аналогии для столь противоречивого сочетания характеристик можно привести старинную концепцию светонесущего эфира, от которого требовалось одновременно иметь специфические особенности кристаллов, жидкостей и газов. Как уже установлено ныне, столь противоречивый набор характерных свойств «гипотетического эфира» способны предоставлять гранулированные материалы, находящиеся в состоянии вибрации. Поэтому вряд ли покажется удивительным, что и в области нелинейной квантовой оптики многие из наиболее интересных и многообещающих результатов сегодня получают при экспериментах с гранулированными материалами и в решетчатых средах с регулярно меняющейся плотностью. Несложно понять, что для движущегося фотона вибрирующая с постоянной частотой гранулированная среда эквивалентна пространственной решетке.

7 И еще такой факт. В океане крайне разнообразных исследований физики XX века возможно проложить практически прямой маршрут, связывающий простые (нередко их называют «механистические») модели ученых в духе викторианской эпохи с новейшими достижениями современной науки. В 1915 году нобелевскую премию по физике получили отец и сын Брэгги, Уильям Генри (1862-1942) и Уильям Лоуренс (1890-1971), – за успешную расшифровку атомной структуры кристаллов с помощью дифракции рентгеновских лучей. Генри Брэгг в ту пору был уже видным британским ученым со специализацией на альфа-, бета- и гамма-излучениях. Однако главным инициатором революционной исследовательской работы по рентгеновской кристаллографии был совсем еще юный тогда Лоуренс Брэгг, так что самым молодым лауреатом в истории нобелевских премий он стал вполне заслуженно. На все последующие годы ученый сохранил авторитет одного из наиболее проницательных специалистов по физике кристаллов. И, вероятно, не случайность, что именно в Кавендишской лаборатории, которую в 1940-50-е годы возглавлял Лоуренс Брэгг, было сделано одно из величайших открытий XX века – двойная спиральная структура молекул ДНК.

##

8 Темы органических кристаллов (каковыми можно считать ДНК) и двойных спиралей тоже имеют самое непосредственное отношение к нелинейной оптике, однако сейчас речь пойдет о другой важной работе. В 1947 году Лоуренс Брэгг и его молодой коллега Джон Ф. Най опубликовали статью «Динамическая модель кристаллической структуры»[2], где с помощью остроумной и технически очень простой экспериментальной установки смогли наглядно продемонстрировать множество эффектов, моделирующих поведение невидимых атомов в кристаллах. Брэгг и Най поместили в сосуд с мыльным раствором небольшую пипетку ниже поверхности жидкости, так что постоянное давление воздуха в пипетке обеспечило образование очень большого количества – сотен тысяч – крошечных пузырьков примерно одинакового размера. Пузырьки в такой пене, или иначе жидкой гранулированной среде, часами сохраняли свою форму для длительных наблюдений и экспериментов, демонстрируя природу, по внешним признакам очень похожую на коллективное поведение атомов в кристаллах. В частности, ученые продемонстрировали с помощью этой динамической модели такие характерные явления, как процессы скольжения слоев, образование дислокаций и других типов дефектов, возникновение напряжений, связанных с «посторонними» атомами и множество прочих эффектов, свойственных физике кристаллов.

9 Примерно четверть века спустя, в 1974 году (можно обратить внимание на занятую перверсию цифр 47-74) была опубликована другая знаменитая работа Джона Ная, но теперь уже подготовленная совместно с его молодым коллегой, Майклом Берри. Статья получила название «Дислокации в цугах волн»[3] и на сегодняшний день считается одной из основополагающих работ современной нелинейной оптики. Примечательно, что первый рецензент этой статьи рекомендовал отвергнуть ее публикацию, посчитав результаты чересчур тривиальными. К счастью, авторам удалось убедить другого рецензента и редактора журнала, что простота в данном случае – это достоинство работы, а не ее недостаток.

a Суть же открытия Ная и Берри заключалась в том, что физику прохождения волн в среде, если рассматривать ее в четырех измерениях пространства-времени, можно описывать теми же понятиями и формулами, что и образование дефектов-дислокаций в кристаллах. Причем обнаруженная аналогия с 4-мерным кристаллом, как выяснили ученые, простирается очень далеко, повторяя для волновых дислокаций многие характерные особенности физики кристаллов. Ученые, в частности, показали, что волновые дислокации могут быть как краевыми и винтовыми, так и смешанного типа, объединяющего два основных.

b Под дислокацией, можно напомнить, понимают дефекты в однородной структуре кристалла, сводящиеся к сгущению (или разрежению) в расположении атомов. Все дислокации представляют собой сдвиг одной части кристалла относительно другой, а различают их по тому, какую пространственную форму этот сдвиг образует в кристалле. Два главных типа носят название краевой и винтовой дислокации, а все остальные, смешанные, являются сочетанием этих двух. Относительно простая краевая дислокация как бы расклинивает кристалл по обычной плоскости, добавляя в структуру еще один «лишний» слой сгущения. Более замысловатая винтовая дислокация соответствует оси спиральной структуры в кристалле, когда плоскость сгущения закручивается в виде геликоида или винтовой лестницы без ступенек. В кристаллографии винтовые дислокации интересны тем, что чаще всего образуются во время роста кристалла.

В лазерной физике винтовым дислокациям соответствуют так называемые оптические вихри, когда пучок света закручен в спираль. Опускаясь до самого нижнего уровня квантовой оптики и физики единичных квантов света, можно говорить, что винтовая дислокация – это пространственная структура, образуемая вектором напряженности (сгущения) электрического поля фотона. Если, конечно, пользоваться традиционной терминологией современной физики. Если же трактовать поля как удобную математическую абстракцию, а реальностью – в картезианском духе – считать жидкую гранулированную среду и сгустки энергии в виде вихрей и струй, то оказывается возможным в общих чертах восстановить и вероятный механизм образования квантов света.

Центральное место в этой конструкции занимает важный экспериментальный результат нелинейной оптики, демонстрирующий механизм переворота спина у вихря – когда круглой формы фокус вихря сплющивается в тонкий эллипс и затем превращается в тончайшую трубку «перемычку». Последующее утолщение перемычки в эллипс и затем опять в циркулярный вихрь показывает, что вихрь в ходе такого процесса меняет свой топологический заряд, то есть направление вращения. Если встроить этот физический механизм в разрабатываемую здесь модель пространства как вибрирующей двухслойной мембраны, где протон и электрон представляют собой систему из пары вихрей, постоянно меняющихся местами на мембранах, то получается примерно вот что.

Концы тонкой трубки перемычки в этой картине, по сути дела, представляют собой протон и электрон, обменивающиеся местами на сторонах мембраны. Из механики вибрации осциллонов следует, что «фаза трубки» – то есть собственно момент переворота – соответствует фазе схлопывания всех осциллонов и состоянию мембраны в самом тонком своем состоянии. В этот же момент мембрана получает очередную порцию энергии, обеспечивающей ее постоянные вибрации. От этого удара, примерно как в случае с отверстием в барабане, наполненном дымом, с концов трубки-перемычки в разные стороны вылетают два вихревых кольца. Существенно разная судьба колец в этой паре еще станет темой отдельного изучения, а пока что можно лишь отметить общую схожесть динамики данного механизма с работой садового разбрызгивателя воды – конструкции, чрезвычайно популярной среди физиков-теоретиков.

Принципиально важным в данной модели моментом, который необходимо подчеркнуть особо, является максимально сплющенное состояние мембраны в момент вылета вихревого кольца из трубки. Принимая это обстоятельство в учет, легче представить, что более уместно в данном случае говорить не столько о «бублике» вихревого кольца, сколько о его плоском сечении, имеющем форму овала Кельвина. Иначе говоря, квант света, вылетающий из частицы, оказывается парой плоских вихрей,двигающихся как винтовая дислокация в супержидком кристалле регулярно меняющейся плотности. А самое тут, возможно, интересное, что половинки каждого овала Кельвина движутся по разным сторонам мембраны...

[1] Russel's Obituary, Proceedings of Royal Society (London), vol. 34 (1882-1883), pp. xv-xvii

[2] W. L. Bragg and J. F. Nye. »A dynamical model of a crystal structure«, Proceedings of the Royal Society of London, 190, 474 (1947)

[3] J.Nye & M.Berry. «Dislocations in wave trains», Proc. of the Royal Society, Ser. A 336, 165 (1974)

## Сцепленность как суть [6В]

0 В 1935 году Эйнштейн, Подольский и Розен опубликовали свой знаменитый мысленный эксперимент, известный ныне как парадокс ЭПР [1]. С его помощью ученые наглядно продемонстрировали, сколь абсурдными и необъяснимыми свойствами квантовая механика наделяет окружающий мир, коль скоро из нее следует, что как угодно далеко разнесенные частицы могут мгновенно действовать друг на друга, одновременно меняя свои состояния.

1 Поначалу очень мало кто из физиков понял чрезвычайную важность этого результата. Вольфганг Паули, к примеру, в письме к Гейзенбергу по данному поводу написал, что Эйнштейн поставил себя в дурацкое положение. А Нильс Бор на страницах того же журнала *Physical Review* чуть позже опубликовал нечто вроде «опровержения», сводящегося к мысли, что эксперимент ЭПР не создает никаких препятствий для эффективного применения квантовой механики. И практическая полезность данной теории, подчеркнул Бор, ничуть не уменьшается от того, что кто-то полагает ее неполной. Подавляющее большинство физиков предпочло занять примерно такую же позицию и не заморачиваться всякими непонятными курьезами.

2 Чуть ли не единственным среди ведущих квантовых теоретиков, кто сразу углядел в парадоксе ЭПР принципиально важную идею, оказался Эрвин Шредингер. В том же 1935 году он написал по этому поводу собственную работу [2], где явлению мгновенного и независимого от расстояния взаимодействия частиц было дано особое название «сцепленность» (в оригинале *verschränkung*, ныне же термин более известен миру в англоязычном варианте как *entanglement*). Проанализировав это явление, Шредингер пришел к выводу, что если две частицы и вообще любые две квантовые системы в какой-то момент сходятся для вступления в физическое взаимодействие, а затем разделяются вновь, то их уже нельзя описывать прежним образом, то есть считать, что каждая система пребывает в своем собственном состоянии. Ибо из-за временного взаимодействия ранее независимые системы становятся сцепленными. И эту сцепленность Шредингер назвал самой главной характерной особенностью квантовой механики, отличающей ее от классической физики.

3 За прошедшие с той поры 70 с лишним лет наука давно уже перестала воспринимать квантовую сцепленность как некий странный теоретический курьез, найдя для этого явления целый ряд полезных практических приложений. Однако к внятному объяснению столь поразительного эффекта, опровергающего все традиционные представления человека о времени и пространстве, приблизиться не удалось ни в малейшей степени.

#

4 Поскольку здесь восстанавливается иная, существенно отличающаяся от общепринятой картина вселенной, то вполне естественно задаться вопросом, как в нее вписывается столь важный феномен квантовой сцепленности. Тем более, что здесь данное явление представляется достаточно очевидным следствием из физического устройства мира как двоянной мембраны. В таком мире каждая из частиц материи доступна

для наблюдений человека лишь одной из своих половин, а в действительности, на более общем уровне природы представляет собой пару частиц по обе стороны мембраны. Для частиц с массой такую пару образуют противоположно заряженные протон и электрон, а безмассовые и нейтральные кванты света образуют пары друг с другом. Если уподобить две поверхности мембраны слоям ткани, то в некотором смысле можно говорить, что частицы с массой соединяют ткань пространства подобно точечным заклепкам, а фотоны света – подобно швам швейной машины.

5 Эту аналогию имеет смысл разъяснить подробнее, но несколько позже, в более подходящем для моделей антураже Картезианских игр. Пока же речь идет конкретно о загадках квантовой сцепленности, одна из существенных особенностей которой заключается в чрезвычайной хрупкости такого рода состояний. Ибо квантовая сцепленность систем начинается с момента их взаимодействия и длится лишь до того мгновения, пока один из элементов объединенной системы не вступит во взаимодействие с чем-либо еще. Тогда наступает, как выражаются физики, коллапс общей волновой функции системы и разрушение сцепленности. Иначе говоря, весь процесс взаимодействия частиц и образуемых ими систем можно представлять как нескончаемую череду образований и разрушений сцепленных состояний.

6 Квантовая сцепленность, как известно, свойственна для всех типов частиц – как обладающих массой, так и для безмассовых фотонов. На первый взгляд может показаться, что устраивать экспериментальное изучение этого явления было бы проще с частицами, образующими атомы материи. В мысленных экспериментах эпохи открытия парадокса ЭПР, скажем, одно из наиболее внятных исследований сосредоточено на двух электронах, занимающих общую орбиту обращения вокруг ядра.

7 Согласно законам квантовой механики эти электроны имеют противоположно направленные спины и составляют, естественно, единую квантовую систему в составе атома. Если теперь аккуратно разделить такие электроны – а в мысленных экспериментах это сделать проще простого – то частицы по-прежнему будут составлять единую квантовую систему. Но лишь до тех пор, пока экспериментатор не решит измерить значение спина у одной из частиц. Измерение или конкретная фиксация неопределенного прежде положения спина электрона – это, по сути, взаимодействие электрона с частицами измерительного прибора-детектора. Измерение вызывает коллапс волновой функции и мгновенную фиксацию спина другого электрона в направлении, противоположном спину первого. Сколь бы далеко эти частицы ни находились друг от друга.

##

8 Такая ситуация выглядит очень загадочно, когда смотришь лишь с одной стороны мембраны. Но если доступна картина сразу с двух сторон – с лица и изнанки ковра, так сказать, – то можно увидеть, что два электрона на одной орбите атомного ядра здесь – это два протона с изнаночной стороны. Которые хотя и неявно, но тоже входят в ту же самую квантовую систему. Поэтому когда данная система разрушается, то в действительности происходит коллапс волновой функции сразу с обеих сторон мембраны. Но если с одной стороны мембраны пару сцепленных электронов каким-либо образом удалось очень аккуратно разделить и разнести на большое расстояние, то с другой стороны они как протоны по-прежнему продолжают находиться на близком расстоянии единой системы. Поскольку измерение одного из разнесенных в пространстве электронов



означает и фиксацию состояния парного ему протона по другую сторону мембраны, то это разрушает и его квантовую систему с протоном-партнером по соседству. А фиксация состояния данного протона, аналогично, фиксирует и состояние парного ему электрона по эту сторону мембраны.

9 В реальных физических экспериментах и в практических приложениях квантовой сцепленности, как показала жизнь, значительно удобнее оперировать поляризованными фотонами света, а не электронами, протонами или ионами. Причины для того имеются разные, но одна из самых главных – относительная легкость и простота технологии для эффективного получения сцепленных фотонных пар в любых нужных количествах. Найдена такая технология, естественно, была далеко не сразу, а примерно за полтора десятилетия экспериментов и поисков. В середине 1990-х годов появилась этапная работа международного коллектива ученых из университетов Инсбрука и Мэриленда, где впервые был описана конструкция очень удачного и широко применяемого ныне источника сцепленных поляризованных фотонов.[3]

a В общих чертах данная установка выглядит примерно так. Генерируемый лазером пучок ультрафиолетового (УФ) света направляют в кристалл бората бета-бария – специфического материала с сильно нелинейными оптическими свойствами. Благодаря этим свойствам некоторые из фотонов ультрафиолета расщепляются на пару фотонов с большей – инфракрасной (ИК) – длиной волны, т.е. в два раза меньшей частотой. Такие инфракрасные фотоны излучаются из кристалла двумя конусами, оси направления которых отклонены симметрично по разные стороны от исходного направления лазерного луча. В процессе преобразований, происходящих с УФ-фотоном в кристалле, он не только разделяется на пару фотонов с меньшей энергией, но также фотоны этой пары становятся плоско-поляризованными со взаимно перпендикулярным расположением плоскостей. То есть в один конус уходят ИК-фотоны, поляризованные горизонтально, а в другой конус – ИК-фотоны, поляризованные вертикально.

b Но особо важно, что эксперимент можно устроить таким образом, когда конусы перекрываются. Тогда фотоны, попавшие в зону пересечения конусов, не несут какой-либо конкретно заданной поляризации – ни горизонтальной, ни вертикальной. Про такие пары фотонов известно лишь то, что их поляризация различна, а состояния сцепленные. Поэтому если дальше эту пару аккуратно разделить, отправив фотоны в разные стороны, то они продолжают оставаться в состоянии квантовой сцепленности и «промежуточной» поляризации между вертикальным и горизонтальным состояниями. Когда же у одного из фотонов пары фиксируют угол поляризации с помощью детектора-анализатора, находящийся в другом месте второй фотон тут же фиксирует свою поляризацию в перпендикулярной плоскости.

###

c Этот поразительный опыт, многократно воспроизведенный во множестве лабораторий мира и для самых разных расстояний между сцепленными фотонами, стал на сегодня наиболее яркой и убедительной демонстрацией идеи о глубоком единстве, связывающем весь мир квантовых частиц в одно целое. А также нагляднейшим примером того, что наблюдая лишь одну сторону мира-мембраны, постичь его не удастся никак. Если же смотреть на мембрану сразу с двух сторон, то описанный эксперимент с расщеплением УФ-фотона на сцепленную пару выглядит не только чуть иначе, но и менее загадочно.

В этой картине всякий фотон света представляет собой очередь – или цуг – из квантов энергии, каждый из которых выглядит как пара вихрей или овалов Кельвина,двигающихся по спирали вдоль направления движения фотона – подобно винтовой дислокации в кристалле. Количество таких квантов в фотоне определяет его энергию или, другими словами, частоту (длину волны). А оптически активные среды, поляризующие свет, деформируют цилиндрическую спираль дислокации, сжимая сечение в эллипс или, в конечном счете, вынуждая двигаться овалы Кельвина в линейной плоскости. Что делает фотон плоско поляризованной волной или «краевой дислокацией».

Если развивать эту модель дальше, то расщепление УФ-фотона на пару ИК-фотонов в кристалле выглядит так, как поочередный – в соответствии с фазой винтовой спирали – уход каждого из квантов цуга в один из «боковых» конусов света. Из-за такого рассечения в одном конусе оказываются овалы Кельвина, получившие вертикальную поляризацию, а в другом – горизонтальную поляризацию. Если же конусы сделаны перекрывающимися, то оптические свойства решетки кристалла «рассекателя» воздействуют на очередь овалов Кельвина только отчасти. В результате такого неполного рассечения лишь по одну сторону мембраны УФ-фотон разделяется на пару ИК-фотонов, а с другой стороны мембраны фотон продолжает оставаться единой системой из цуга квантов с УФ-частотой. Продолжается это хрупкое состояние сцепленной неопределенности лишь до той поры, пока измерение-фиксация одного из ИК-фотонов не приводит к коллапсу всей системы, а значит – через УФ-половину по другую сторону мембраны – и к фиксации состояния второго ИК-фотона...

Хотя феномен квантовой сцепленности в такой модели становится значительно менее загадочным, одновременно возникает и множество новых вопросов – относительно того, как именно может быть устроена столь необычная мембрана. Обе части которой, получается, очень тесно и постоянно друг с другом связаны, но при этом наблюдение с одной стороны мембраны не дает практически никакой информации о существовании другой стороны. Нетривиальная геометрия этой конструкции – в сочетании со смежными аспектами математики и физики – вполне достойна того, чтобы стать темой следующих «Картезианских игр».

- 
- [1] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen. «Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?» Physical Review 41, 777 (15 May 1935)
- [2] E. Schrödinger. «Die gegenwärtige Situation der Quantenmechanik». Die Naturwissenschaften 49, 823-828 (1935)
- [3] Paul G. Kwiat, Klaus Mattle, Harald Weinfurter, Anton Zeilinger, Alexander V. Sergienko and Yanhua Shih. «New High-Intensity Source of Polarization-Entangled Photon Pairs», Phys. Rev. Lett. 75, 4337 – 4341 (Issue 24 – December 1995)

# [Q♠] Вторые Картезианские игры

## КИ2: Резиновая геометрия [6С]

0 Природа человеческого сознания устроена так, что всякие новые идеи воспринимаются им намного лучше, если сопровождаются поясняющими суть картинками. Именно поэтому, как хорошо известно психологам, математикам и физикам, практически любую научную концепцию легче объяснить или постичь, если она изложена не алгебраическим языком формул и уравнений, а графическими средствами схем, диаграмм и визуальных моделей. Иначе говоря, языком геометрии.

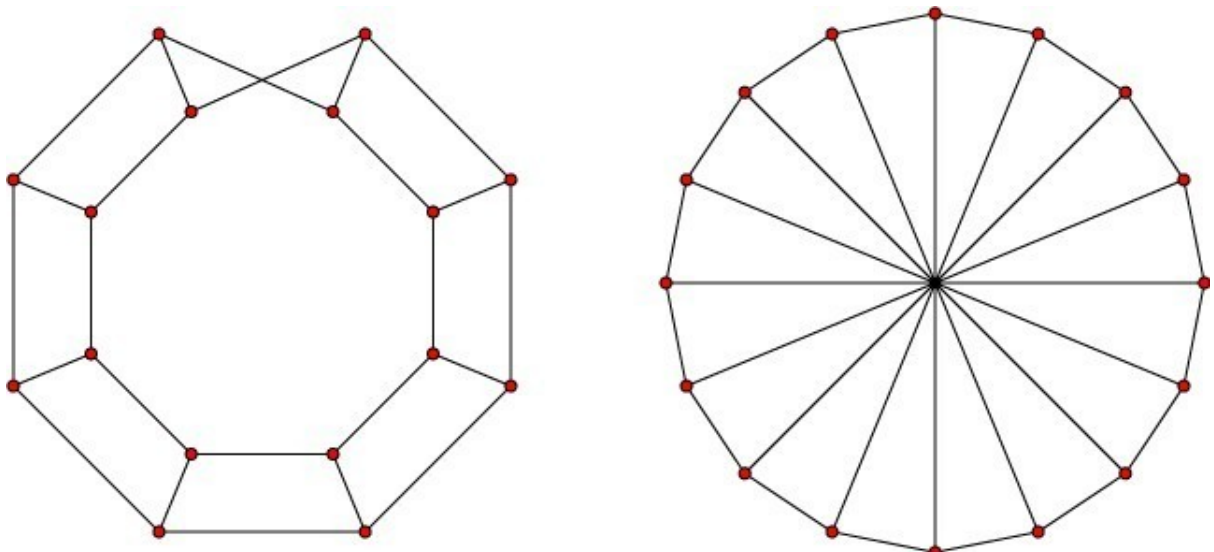
1 В гигантском инструментарии современной геометрии имеется один весьма специфический раздел, именуемый топологией. В отличие от других разделов, где большое значение имеют соотношения длин, площадей, углов и других количественных характеристик объектов, топологию это все не интересует, поскольку здесь изучаются иные, качественного свойства вопросы о геометрических структурах. В топологии не спрашивают, насколько велика или мала данная вещь, ибо любой объект здесь можно как угодно сжимать и растягивать при условии сохранения целостности, то есть без разрывов и склеек. По этой причине топологию иногда называют резиновой геометрией.

2 Что же касается вопросов качественного свойства, составляющих суть топологии, то они обычно сводятся к тому, как связаны друг с другом элементы объекта. Типичные вопросы выглядят примерно так. Можно ли вещь разделить на отдельные части? Сколько у объекта поверхностей? Есть ли там дырки, а если есть, то сколько? Глубокая связь между столь абстрактными, на первый взгляд, проблемами топологии и физическими свойствами конкретных объектов природы далеко не всегда самоочевидна. Скорее даже наоборот, для многих людей топология представляется наукой, весьма далекой от физики реального мира, где невозможно как угодно растягивать и сжимать вещи, не нарушая их целостность.

3 Прежде, чем переходить к иллюстрациям, демонстрирующим огромную важность топологии для физики, уместно привести какой-нибудь простой жизненный пример, поясняющий суть топологических подходов к анализу качественных проблем геометрии. Нередко в качестве такого примера привлекают карту метрополитена крупного города вроде, скажем, Москвы. Карта метро не дает сколь-нибудь содержательной информации о том, как далеко станция «Парк Горького», находящаяся в южном сегменте кольцевой линии, расположена от станции «Ботанический сад» на радиальной линии северного направления. Масштаб расстояний между пунктами не выдерживается, более того, тут даже не соблюдаются направления по сторонам света при движении от одной точки к другой. Однако карта эта достоверно рассказывает обо всех линиях и станциях, а также об узлах (станциях пересадок), соединяющих все линии метрополитена в целое и действительно существенных при движении из одного пункта в другой. Так, от «Парка Горького» до «Ботанического сада» можно добираться через много станций по кольцевой линии, а можно и короче по радиусу, сделав пересадку в Центре. Иначе говоря, карта метро дает не столько геометрическую, сколько топологическую информацию.

#

4 Похожим по форме и более актуальным здесь по сути примером можно считать объект теории графов, именуемый лестница Мебиуса [1]. Этот граф, всегда имеющий четное число узлов-вершин, попарно соединенных ребрами-«перекладинами», своим видом напоминает бесконечную лестницу, у которой начало и конец замкнуты с полупереворотом на 180 градусов. Иначе говоря, это простейший аналог ленты Мебиуса, составленный из одномерных отрезков линий. И если полагать, что лента Мебиуса – как элементарный образец односторонней поверхности – лежит в основе геометрии вселенной, то лестница Мебиуса оказывается очень удобной моделью для демонстрации принципиально важных топологических моментов в устройстве этой конструкции.



Два эквивалентных представления лестницы Мебиуса

5 Легко увидеть, что все точки лестницы лежат на одной замкнутой линии. Если эту линию, пользуясь резиновыми возможностями топологии, развернуть из формы двойного кольца и равномерно натянуть на окружность, то получится другое эквивалентное представление лестницы Мебиуса. Из которого ясно видно, что точки-узлы каждой пары симметрично расположены в противоположных концах этой вселенной, а соединяющая их перекладина проходит через центр окружности. Хотя это очевидно из самой иллюстрации, имеет смысл подчеркнуть, что в центре данной конструкции никакого узла нет, но геометрически он важен как единая точка схождения всех перекладин-диаметров при симметричном распределении узлов по окружности. Это, можно сказать, самая простая и наглядная демонстрация базовой идеи, согласно которой каждый протон в одной точке пространства является электроном в противоположном конце вселенной. Причем всякий раз, когда электрон и протон каждой пары с гигантской частотой меняются своими местами, то происходит это через пустоту геометрического центра.

6 Кроме того, характерную топологию лестницы Мебиуса несложно углядеть в общеизвестной структуре молекул ДНК. Понятно, наверное, что было бы легкомыслием отнести к этому совпадению как к случайности. Но для более тщательного разбора взаимосвязей между строением вселенной, биологией и сохранением информации будут отведены отдельные разделы в дальнейшем.

7 Здесь же разворачиваются Вторые Картезианские игры, посвященные стыкам физики и геометрии. Причем, как это следует из их названия, главный упор Игр должен делаться на ключевую декартову идею об основополагающей роли вихрей в устройстве мироздания. С точки зрения топологии, надо отметить, эта пафосная идея выглядит вполне естественной, поскольку разного рода вихри теснейшим образом связаны с понятием «топологический дефект». А топологические дефекты на сегодняшний день считаются наиболее перспективным путем к постижению того, как в этом мире из ничего появляется что-то (и все-все-все остальное в придачу).

##

8 Для пояснения сути термина топологический дефект в самых общих чертах, полезно привлечь идею симметрии. И зафиксировать, что наиболее симметричным во всех отношениях объектом или пространством считается среда, напроць лишенная каких-либо свойств и отличий во всех своих местах и направлениях. Иначе говоря, всюду безвидная. Тогда любая деталь или особенность, появляющаяся в повсюду одинаковой среде называется нарушением симметрии, а если же это нарушение способно сохранять стабильность, то оно именуется топологическим дефектом или, иначе, топологическим солитоном. Как показывают эксперименты и подтверждают теоретические расчеты, топологические дефекты обычно являются разновидностями вихревого движения: вихревыми кольцами, вихревыми нитями, конвекционными ячейками в жидкостях и газах; винтовыми дислокациями в кристаллах, вихревыми решетками в сверхтекучих или сверхпроводящих материалах, и так далее.

9 До геометрической роли конвекционных ячеек, вихревых нитей и винтовых дислокаций Игры доберутся естественным образом, а пока речь пойдет о торе – одной из самых важных в топологии фигур, имеющей форму вихревого кольца или, скажем, надутой автомобильной камеры. Между графом лестницы Мебиуса и тором просматривается достаточно очевидное родство, если заметить, что тор является поверхностью вращения для ленты Мебиуса – если ее вращать вокруг осевой линии. Богатые топологические свойства тора интересны во множестве физических аспектов, но сейчас имеет смысл задержать внимание на одном, связанном с так называемой проблемой причесывания поверхности.

a Эта проблема, к примеру, чрезвычайно актуальна при выборе правильной формы для реактора термоядерного синтеза, где облако плазмы необходимо удерживать в заданном ограниченном объеме с помощью магнитного поля. Чтобы понять суть задачи, надо представить себе замкнутое пространство формы, окружающей плазму. В каждой точке поверхности этого пространства компонент магнитного поля, параллельный поверхности формы, должен быть ненулевым, а иначе плазма даст в этом месте утечку и удержать ее не удастся. Переформулировав суть чуть иными словами, можно сказать, что вектор магнитного поля в каждой точке поверхности подобен растущему здесь волосу, а задача отыскания поля нужной формы эквивалентна задаче такого причесывания поверхности, чтобы все-все волоски были уложены горизонтально.

b Оказывается, что существование решения для этой проблемы зависит исключительно от топологической природы выбранной поверхности. Если, например, в качестве поверхности выбрана сфера – то решения у задачи

просто не существует. Иначе говоря, покрытый шерстью шар полностью причесать невозможно, а значит магнитное удержание шара плазмы организовать не удастся в принципе. (Любопытным следствием проблемы с причесыванием оказывается то, что в любой момент времени в какой-то из точек на поверхности Земли непременно стоит безветренная погода.) Единственный же тип поверхности, для которого «гладкая прическа» возможна – это форма вихревого кольца, то есть тор. По этой причине тороидальной формы магнитное поле и стало решением, повсеместно используемым в конструкциях экспериментальных термоядерных реакторов.

###

*c* В примере с задачей удержания плазмы несложно углядеть аналогию с другой, куда более масштабной проблемой. А именно, с поиском оптимальной формы для мембраны, образующей пространство 3-мерной вселенной, известной человеку. В общих чертах уже понятно, что это должно напоминать тор. Но только не обычный тор, просто похожий на надутую автомобильную камеру, а довольно особенный.

*d* Во-первых, топологически эта конструкция непременно должна иметь свойства односторонней поверхности. Самым простым трехмерным вариантом ленты Мебиуса без краев, самопересечений и склеек является, как известно, поверхность Клейна, более известная как бутылка Клейна.

*e* Во-вторых, пространство вселенной является ориентируемым, то есть здесь наблюдаются вполне очевидные различия между правым и левым. Всякая же односторонняя поверхность по природе своей является неориентируемой. Простейший трюк, с помощью которого лента Мебиуса превращается в ориентируемую поверхность, – это двухслойный вариант той же самой конструкции. Строго говоря, такая поверхность уже не является односторонней, однако важнейшие свойства ограниченного и замкнутого на себя бесконечного пространства здесь сохранены. Следовательно, форму вселенной логично представлять как двухслойную бутылку Клейна.

*f* И в-третьих, наконец, каким-то образом топология космоса одновременно должна быть похожа на мяч, сшитый из 12 пятиугольных кусков кожи. Не столько потому, что эта форма упоминается в трудах древнего мудреца Платона, но по той причине, что совсем недавно эта же топология футбольного мяча была «переоткрыта» в карте фонового космического излучения от спутника WMAP – как додекаэдрическое пространство Пуанкаре.

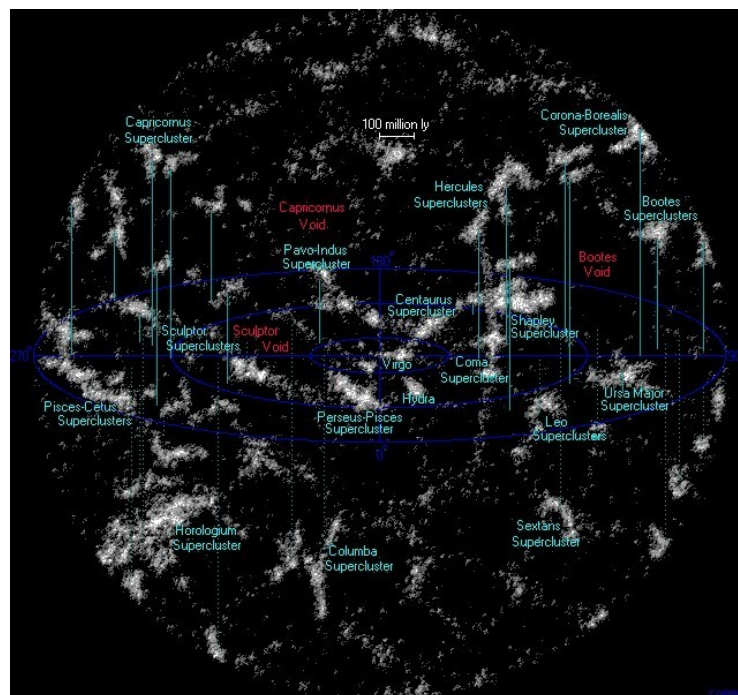
---

[1] Richard K.Guy, Frank Harary. «On the Möbius ladders». Canad. Math. Bull. 10: 493-496 (1967)

## КИ2: Конвективная геометрия [6D]

Физика конвективных ячеек дает наглядные иллюстрации тому, каким образом в реальной жизни могут находить воплощение абстрактные геометрические идеи о топологических конструкциях пространства. Совсем несложные, в общем-то, опыты с ячейками Бенара, к примеру, демонстрируют намного больше, чем механизм самоформирования регулярной решетки из шестиугольников в тонком слое масла на сковороде. Похожие по сути процессы наблюдаются и в космических масштабах – скажем, в конвективном слое и фотосфере Солнца. Или даже в характерной ячеистой структуре сетки из галактических суперкластеров.

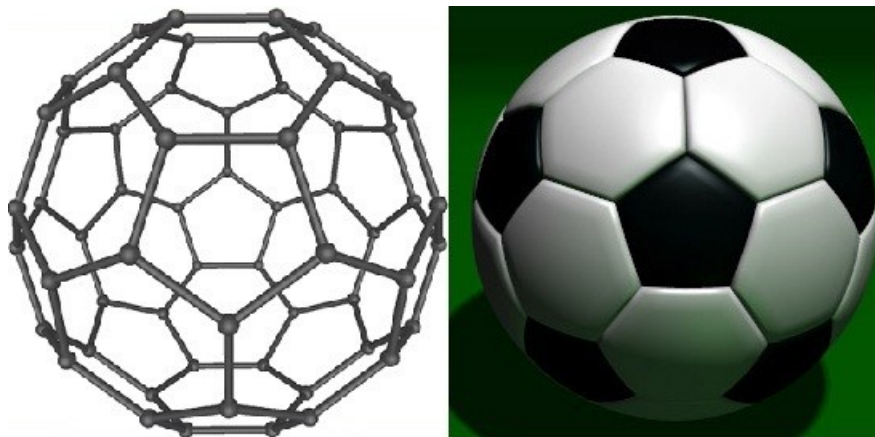
Согласно принятой в астрономии терминологии, крупные космические скопления принято именовать группами (до 50 галактик), кластерами (до 1000 галактик) и суперкластерами (образование из нескольких кластеров, групп и изолированных галактик). Сам факт существования суперкластеров уже свидетельствует, что галактики во вселенной распределены крайне неравномерно. Однако и суперкластеры, в свою очередь, формируют еще более крупные структуры, носящие название «нити» (filaments), «стены» или «листы», которые могут иметь протяженность от сотен миллионов до миллиарда световых лет. Такого рода структуры характерной сеткой покрывают порядка 5% наблюдаемой вселенной. В гигантских промежутках между суперкластерами и нитями находятся так называемые войды или пустоты, в которых галактики почти не встречаются. Суперкластерные образования настолько велики в своих размерах, что уже не являются гравитационно связанными и, следовательно, участвуют в хаббловском расширении вселенной. Предполагается, что наблюдения за этими структурами должны поведать нечто существенное относительно процессов формирования галактик на ранних стадиях вселенной.



*Вид вселенной в миллиарде световых лет от Земли*

Форма ячеек, образующих регулярные сетчатые структуры при физических экспериментах с процессами самоорганизации, зависит от характера кривизны поверхности. На плоскости или поверхности цилиндра, который во многом идентичен плоскости, такие ячейки могут иметь форму правильных треугольников, квадратов, шестиугольников. Природа, впрочем, как правило выбирает шестиугольники, поскольку они больше всего похожи на энергетически самую выгодную форму – круг. Однако, когда речь заходит о поверхности сферы, то тут картина выглядит иначе, поскольку правильные шестиугольники для замощения уже не годятся.

2 Чтобы понять, чем мостят поверхность шара, надо вспомнить пять правильных платоновых многогранников и образующие их грани – тетраэдр, октаэдр и икосаэдр (треугольные грани), куб (квадраты) и додекаэдр (пятиугольники). Каждая из этих фигур раздувается до шара, сохраняющего разбиение на правильные сегменты, а без надувания самый большой объем при вписывании тел в сферу одного радиуса имеет додекаэдр. Отсюда можно понять, что энергетически наиболее предпочтительными для замощения поверхности шара выглядят правильные пятиугольники.



Фуллерен и классический футбольный мяч

Однако природа, как выяснилось в 1985 году вместе с открытием сферических молекул-фуллеренов, предпочитает энергетически еще более выгодную форму, совмещающую в себе два платоновых тела – додекаэдр и икосаэдр. В геометрии эту фигуру именуют усеченным икосаэдром, поскольку ее проще всего получить путем аккуратного отсечения всех вершин у икосаэдра таким образом, чтобы все ребра многогранника сохранили равную длину. В результате же получается конфигурация, идентичная классическому футбольному мячу...

3

##

В связи с этим можно вспомнить лето 2006 года, для многих оставшееся в памяти благодаря чемпионату мира по футболу в Германии. Обычный для таких мероприятий накал страстей, драматичный финальный матч между командами Франции и Италии, роковой удар Зидана головой – но не по мячу, а в грудь оскорбившего его соперника... Это, наверняка, запомнили почти все, даже люди, крайне далекие от футбола. Трудно сказать, насколько подобный фон хорош для дела популяризации науки в массах, однако не подлежит сомнению, что любовь народа к футболу пытаются, по меньшей мере, использовать и в такого рода целях.

4



Например, явно неслучайно в летнем номере журнала American Scientist за тот же год была опубликована статья «Топология и комбинаторика футбольных мячей»[1], подготовленная германским математиком Дитером Кочиком из Мюнхенского университета. В качестве основы для своего исследования Кочик выбрал самую известную на сегодня конструкцию, утвердившуюся примерно с 1970 года. Классический футбольный мяч шьют или склеивают из 32 кусков материала – 12 из них имеют форму правильного пятиугольника, еще 20 – правильные шестиугольники. Эти куски расположены так, что каждый пятиугольник окружен шестиугольниками. То есть речь идет о той самой геометрической фигуре, которая при плоских гранях называется усеченным икосаэдром. Собственно статья немецкого математика анализирует, каким образом эта классическая 32-кусочная конструкция может быть модифицирована, чтобы получать всевозможные способы регулярного замощения сферы многоугольниками для создания разнообразных форм футбольных мячей.

Однако в контексте Картезианских игр куда больший интерес представляет иллюстративный материал, создававшийся при подготовке работы Кочика к публикации. Такого рода картинки уже давно делаются с помощью компьютера, поэтому редакция журнала обратилась за помощью к Майклу Тротту, известному эксперту по работе с графикой научного пакета программ Mathematica. Экспериментируя с программой морфинга, математически преобразующей футбольный мяч в самые разные формы, Тротт вышел далеко за рамки исходной темы статьи. Получившиеся при этом анимационные видеоролики оказались столь эффектными, что около полудюжины их было выложено в интернет в качестве работы, имеющей самостоятельную эстетическую и научную ценность. Два из этих клипов, в частности, могут иметь самое непосредственное отношение к форме вселенной, поэтому имеет смысл рассмотреть их поподробнее.[2]

Клип первый – это гладкий морфинг, превращающий тор в двухслойный футбольный мяч. Анимация показывает, как тор непрерывно деформируется в два концентрически совмещенных мяча одинакового размера. Важно подчеркнуть, что при этом преобразовании не происходит никаких разрывов поверхности. Поскольку суть компьютерного преобразования сводится к манипуляциям с расположением узлов графа, Тротт нанес на тор сетку из пятиугольников и шестиугольников – деформированных, естественно, но с характерным для футбольного мяча взаиморасположением клеток и в двойном их количестве. Клетки внешней и внутренней сферы в итоге трансформации не совпадают, а сдвинуты по типу шахматной доски. Поверхности мячей при этом оказываются соединены друг с другом в четырех точках – у вершин четырех из 12 пятиугольников. В технических терминах топологии данная анимация показывает гладкую гомотопию между двумя отображениями графа футбольного мяча – на сферу и на тор.



*Морфинг тора в двухслойный мяч*

##

8 Все, кто хотя бы в самых общих чертах усвоил базовые принципы топологии, сразу усмотрят в этом трюке с морфингом какой-то подвох. Ведь тор – это же цельная фигура, не распадающаяся на части. Иначе говоря, из него никак нельзя сделать две сферы, не нарушив при этом строгих топологических правил, запрещающих разрезы и склейки. Хитрость тут действительно имеется, ибо преобразования, именуемые гомотопическими, допускают стягивание замкнутых линий на поверхности в точку. Чтобы наглядно представить топологический эффект такой операции, достаточно рассмотреть все тот же тор, который в противоположных местах кольца перехватывают по окружности трубы бечевками, после чего начинают эти петли стягивать. Понятно, что тор превратится в две колбаски, каждую из которых можно надуть до сферы. Иначе говоря, продемонстрирована гомотопия тора и двух сфер, соединенных друг с другом в двух точках. В данном примере сферы соединены последовательно, а не концентрически, однако уже понятно, видимо, что с помощью большего количества манипуляций и стяжек можно вложить мячи друг в друга.

9 Такого рода преобразования чрезвычайно важны в топологии, потому что, с одной стороны, они являются гладкими и непрерывными с точки зрения алгебры, а с другой – повсеместно встречаются в жизни. Наиболее очевидный тому пример – обычный воздушный шарик, который в своем первоначальном виде является скорее плоским лоскутом резины, чем сферой. Раздувание этого лоскута, свернутого, грубо говоря, в кулек, и перетяжка отверстия ниткой топологически стягивают петлю в точку, превращая плоский лоскут в шарообразное тело. В строгом физическом смысле отверстие в клапане все равно остается, но оно мало настолько, что молекулы воздуха через него практически не проходят.

a Отсюда естественным путем рождается вопрос относительно мембраны, образующей пространство вселенной. Как здесь могут быть устроены клапаны, обеспечивающие точки соприкосновения сфер, изменение общего размера мембраны, и вообще, механизм раздувания/сдутия космоса? Несложно догадаться, что как и повсюду в программе Картезианских игр, ответы, ясное дело, будут сводиться к вихрям в их разнообразных проявлениях.

b Тут самое время отметить, что топология, рождавшаяся как самостоятельный раздел математики в середине XIX века, чуть ли не с самого начала была тесно связана с задачами вихревого движения. Примерно в течение десятилетия, с 1847 по 1857, в Германии были опубликованы основополагающие труды по топологии математиков Листинга и Римана, а еще год спустя там же появилась очень важная работа ученого-универсала Германа Гельмгольца об интегралах, описывающих вихри в идеальной жидкости.

###

c Есть свидетельства, что уже Гельмгольц, знакомый с пионерскими работами Римана об искривленных поверхностях и о проблемах связности, понимал, что появление в жидкости вихря изменяет топологические свойства среды. В частности, область вне вихря становится многосвязной. Иначе говоря, если в спокойной жидкости любую замкнутую линию можно было стянуть в точку (односвязная область), то из-за вихря в жидкости образуется сквозное отверстие, а значит стягивание петли в точку

возможно уже не всегда. Гельмгольц, напомним, математически строго показал, что вихревые трубки в среде не могут иметь висячих концов – они должны начинаться и заканчиваться на поверхностях жидкости, либо замыкаться на самих себя в кольца.

*d* В последующие годы существенное продвижение топологических исследований было обеспечено шотландскими физиками Томсоном (Кельвином), Тэтом и Максвеллом – причем в самой непосредственной связи с изучением вихревого движения в явлениях гидродинамики и электромагнетизма. Шотландцы долгое время ничего, по сути, не знали о работах Листинга и Римана, однако были хорошо знакомы со статьей Гельмгольца о вихревых линиях и вихревых трубках, которая в значительной степени опиралась на геометрические идеи Римана.

*e* К тому времени, когда на рубеже XIX-XX веков Анри Пуанкаре сконструировал свою многосвязную сферу гомотопий – как возможную модель вселенной в форме замкнутого 3-мерного пространства – топология уже стала вполне самостоятельным и весьма абстрактным разделом математики. Иначе говоря, привязывать теоретические исследования к конкретным физическим явлениям для обоснования важности предмета уже не требовалось. Поэтому когда еще через четверть века было продемонстрировано, что абстрактную сферу Пуанкаре можно красиво сконструировать из додекаэдра, попарно склеивая в 4-мерном пространстве его противоположные грани, никто не бросился искать способы возможной физической реализации для такой модели. Или для близкой ей разновидности, сконструированной, скажем, не из «платонова» додекаэдра, а из «архимедова» усеченного икосаэдра. Тоже состоящего из 12 правильных пятиугольных граней в той же самой конфигурации, но в сочетании с 20 шестиугольниками, то есть в сумме имеющего 32 грани.

*f* Примерно тогда же, в начале 1930-х, когда молодой германский математик Герберт Зейферт сконструировал модель додекаэдрического пространства Пуанкаре, физику Вольфгангу Паули приснился грандиозный сон о мировой гармонии, которую олицетворяли огромные часы хитрой конструкции. Если в обычных часах имеется лишь один плоский циферблат, поделенный на 12 делений, то часы вселенной из сна больше походили на сферу, имея 2 взаимно-перпендикулярных круглых циферблата, каждый из которых был разбит на 32 сегмента. И если бы ученый калибра Паули углядел в этой подсказке не просто воодушевляющую символическую картину, а нечто очень конкретное и имеющее самое непосредственное отношение к устройству мироздания, то наука физика к сегодняшнему дню могла бы выглядеть существенно иначе.

---

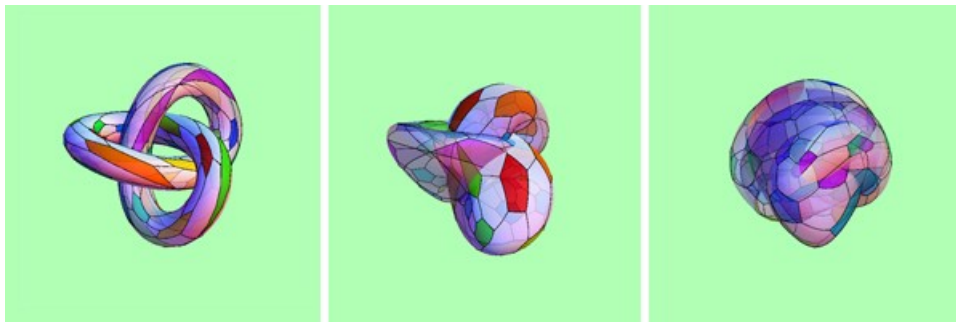
[1] D. Kotschick, «The topology and combinatorics of soccer balls», American Scientist 94 (July-August 2006):350-357

[2] Trott, M. «Bending a soccer ball – mathematically». Mathematica Guidebooks, ([www.mathematicaguidebooks.org/soccer/](http://www.mathematicaguidebooks.org/soccer/)), June 2006

## КИ2: Гранулированная геометрия [6Е]

0 Благодаря инструментарию топологии имеется возможность проследить глубокие связи между моделью вселенной в виде двухслойного футбольного мяча и идеей пространства как гранулированной вихревой губки. Нельзя сказать, что взаимосвязи эти тривиальны и самоочевидны, однако в целом их можно показать на примере достаточно простых и внятных аналогий. Из этих же иллюстраций попутно станет яснее, откуда у вселенной берутся такие свойства, как хиральность, калибровочная симметрия и скрытые пространственные измерения.

1 Когда чуть выше шла речь о футбольном чемпионате мира 2006 года и сопровождавшей его научной статье про топологические свойства мяча, то были упомянуты два примечательных анимационных клипа Майкла Тротта [1]. Данные клипы графически реализуют математику гладких преобразований мяча в другие фигуры, и сейчас самое время рассмотреть вторую из этих иллюстраций. Она демонстрирует процесс морфинга между двухслойным футбольным мячом и трилистным узлом - еще одной богатейшей любопытными свойствами фигуры в топологии.



*Морфинг трилистного узла в двухслойный мяч*

2 Говоря точнее, морфинг происходит в противоположную сторону - ибо это узел-трилистник преобразуется в футбольный мяч. Для того, чтобы такой трюк стал возможен, на тороидальную поверхность узла наносится та же, что и в первом клипе, сетка мощения многоугольниками -  $2 \times 32$  клетки футбольного мяча - но теперь не в одном, а в трех экземплярах-копиях, замкнутых в периодический узор. После чего все три копии одновременно отображаются на два слоя римановой сферы, изображающей футбольный мяч. В итоге, на финальном графике, все три пары футбольных мячей совпадают друг с другом.

3 Эта иллюстрация важна по целому ряду причин. Во-первых, имеется прямая связь между топологией трилистного узла и лентой Мебиуса. Если такую ленту перекрутить не на один полуоборот, как обычно, а на три, а затем разрезать получившуюся фигуру по осевой линии, то получится односторонняя лента, завязанная в трилистный узел. Во-вторых, узел-трилистник является классическим - как и лента Мебиуса - примером хиральной фигуры, то есть при наложении не совпадает со своим зеркальным отображением. Гладкое же гомотопическое преобразование между тором-трилистником и двухслойной сферой показывает, что и в этой, казалось бы, шарообразной фигуре, не имеющей правых и левых предпочтений, на неких внутренних уровнях оказывается заложено свойство хиральности.

#

4 Ну и, наконец, очень важен момент с тремя копиями двухслойного покрытия, которые на поверхности узла-трилистника расположены периодически друг за другом, а на римановой сфере укладываются в полностью совпадающие три пары. Иначе говоря, если в геометрии вселенной имеется хиральная топология узла-трилистника, то тогда каждая из двух поверхностей мембраны-сферы должна иметь трехслойную структуру.

5 Здесь самое время вспомнить, что в течение примерно полувекового интервала, с 1930-х по 1980-е годы, ученые к великому своему удивлению обнаружили в физической природе три разных типа материи – пространственно совпадающих друг с другом, но существенно отличающихся в своих свойствах. Сначала, можно напомнить, в середине 30-х годов в космических лучах высокой энергии была обнаружена новая частица мюон, по большинству признаков идентичная электрону, но только живущая крошечные доли секунды и имеющая примерно в 200 раз большую массу. Затем, к концу 70-х, благодаря новым сверхмощным ускорителям частиц был открыт тау-лептон – еще более трудноуловимый двойник электрона, превышающий его по массе в 3520 раз.

6 Попутно и для мюона, и для тау-частицы в более мощных спектрах энергии были открыты все остальные партнеры-двойники, соответствующие тем частицам, что вместе с электроном образуют более привычную человеку материю – кваркам, нейтрино, античастицам. Но хотя три семейства частиц уже давно являются достоверным научным фактом, смысл этого факта для современной науки продолжает оставаться совершенно неясным... Если же обратиться к модели пространства как жидкой гранулированной среды (или вихревой губки, в терминах XIX века), то целый ряд аналогий из динамики вихрей и современной нелинейной оптики может пояснить, что означают три данных семейства частиц.

7 Но для начала имеет смысл упомянуть важные итоги экспериментов PVLAS, опубликованные в 2006 году большой группой итальянских ученых [2]. Совместный проект нескольких исследовательских центров Италии, PVLAS, расшифровывается как Polarizzazione del Vuoto con LASer или «Поляризация Вакуума ЛАЗером» и на протяжении более десятка лет предоставляет физикам полигон для широкого исследования физических, в частности оптических свойств «пустого» пространства. В самых общих чертах эксперимент сводится к герметичной камере, в которой создаются условия глубокого вакуума, а на луч лазера, проходящий через камеру, воздействует магнитное поле мощных сверхпроводящих магнитов. В рамках темы PVLAS подготовлено несколько десятков научных работ разного свойства, однако здесь представляет интерес самый главный результат – надежное экспериментальное подтверждение того факта, что под действием магнитного поля вакуум вращает плоскость поляризации луча. То есть по своим оптическим свойствам пустое пространство может вести себя аналогично (жидкому) кристаллу с двойным лучепреломлением.

##

8 Среди множества феноменов, которые благодаря лазеру и новым материалам обнаружены в области нелинейной оптики, важное место занимают эффекты скачкообразного изменения частоты в луче – генерация суммы и разности двух частот, генерация второй и третьей гармоник. В

данный момент особый интерес представляют два последних феномена: генерация второй гармоники или порождение колебаний с удвоенной частотой; и генерация третьей гармоники или утроение первоначальной частоты колебаний. Поскольку явления эти имеют четко выраженную волновую природу, а все частицы материи также являются волноподобными сгустками энергии, логично предполагать, что и для таких волн могут существовать условия, когда частота их колебаний удваивается или утраивается.

Иначе говоря, опираясь на известные аналогии между свойствами нелинейных оптических сред и физического вакуума как гранулированной губки или пены, логично предположить, что три семейства частиц, образующих материю – это в действительности одно и то же семейство, но в разных режимах колебаний. Эффект возрастания частоты колебаний частицы легко проиллюстрировать на примере шарика от пинг-понга, прыгающего между поверхностями стола и ракетки. Когда расстояние 9 между ракеткой и столом уменьшается, то есть сокращается амплитуда колебаний шарика, частота его прыжков заметно увеличивается. Однако для частиц материи, словно волчки вращающихся на поверхности мембраны, еще лучше подходит аналогия с фигуристами на льду и часто используемым ими приемом для увеличения скорости вращения. Сначала фигурист начинает крутиться с расставленными в стороны руками, а затем прижимает их к телу, из-за чего момент инерции тела сокращается, а угловая скорость вращения, соответственно, увеличивается.

Вспоминать эти общеизвестные примеры, памятные всем по школьным урокам физики, здесь понадобилось для того, чтобы пояснить механизм увеличения массы электрона (и прочих частиц) при переходе из одного семейства в другое. Естественные физические ограничения не позволяют точно измерить размер электрона, не говоря уже о его двойниках в других семействах, мюоне и тау-лептоне. Поэтому все эти частицы принято считать «точками», не имеющими размера. Кроме того, вспоминая известный закон об эквивалентности массы и энергии, надо понимать, что a под словами «мюон в 200 раз тяжелее электрона» понимается не сила притяжения частиц к земле, а то, насколько один сгусток энергии более инертен, чем другой. Иначе говоря, насколько тяжелее сдвинуть его с места или отклонить траекторию движения. Осталось лишь вспомнить гироскоп, классический пример быстро вращающегося волчка, и одно из главных его свойств – чем больше угловая скорость вращения, тем большую надо приложить силу, чтобы сдвинуть с места ось гироскопа. Откуда в общих чертах становится понятно, что увеличение «массы» точечных частиц при переходе от одного семейства к другому – это одно из естественных следствий увеличения частоты их колебаний.

И уж коль скоро разбираемая здесь модель позволяет преодолевать естественные физические ограничения приборов и на примере простых аналогий рассматривать внутреннее устройство «точек», то самое время вспомнить одну из самых грандиозных аналогий. А именно, между устройством спиральной галактики с баром-перемычкой по центру, b вращающимся разбрызгивателем воды на лужайке и, наконец, электроном-протоном, в своем верчении разбрызгивающих кванты-фотоны словно струи света или звездные рукава. Эта аналогия уже встречалась в других местах, но и здесь она пригодится для того, чтобы пояснить один из самых главных моментов гранулированной геометрии – каким образом, собственно, порождается пространство зернистой структуры. Или, формулируя чуть иначе, как формируется ткань мембраны.

###

То, что вселенная быстро расширяется, а мембрана, соответственно, движется, предполагается неоспоримым научным фактом. Всякая же частица материи – пара электрон-протон – в каждом такте своей осцилляции разбрызгивает кванты энергии в направлениях, перпендикулярных оси колебаний. Другими словами, в плоскости мембраны. Всякий же квант света в своем распространении имеет спиральную структуру винтовой дислокации или вихревой нити. А натянутая нить, быстро движущаяся в неподвижном воздухе, как известно, оставляет за собой цепочки парных вихрей, именуемых вихрями фон Кармана. Если же таких нитей не одна и не две, а очень-очень много, то неподвижная прежде среда после прохождения такой решетки превращается в бурлящую пену или, другими словами, вихревую губку. Иначе говоря, «ничто» превращается в «нечто».



*"Ничто" превращается в "нечто"*

В этой картине достаточно близко воспроизводится сцена из сна про черепаху и трех ее слонов. Однако для научного обоснования столь смелой гипотезы одного лишь сна, прямо скажем, как-то маловато. Ведь если за данной идеей что-то есть, то должны существовать и физические эксперименты, каким-либо образом подтверждающие фантазии. И если как следует поискать, то в области современной нелинейной оптики действительно можно отыскать экспериментальные результаты, в общих чертах воспроизводящие физику описанного процесса.

Уже упоминавшаяся ранее группа исследователей из Каталонского политехнического университета Барселоны (Molina-Terriza, Recolons, Torner плюс Дмитрий Петров) в 2002 году опубликовала статью [3] о первом, как предполагается, экспериментальном наблюдении спонтанного зарождения массивов оптических вихрей. Опыты в данном случае проводились на основе нелинейного кристалла трибората лития, генерирующего вторую гармонику в лазерном луче (длина волны обыкновенного луча 1064 нанометра, у необыкновенного луча второй гармоники, лежащего в перпендикулярной плоскости, длина волны соответственно равна 532 нанометра). Для генерации второй гармоники использовалась известная техника накачки с помощью ультракоротких импульсов другого лазера длительностью 8 наносекунд. В луч накачки искусственно встраивались

винтовые дислокации с помощью генерируемых компьютером голограмм. В результате интерференционного взаимодействия этих лучей в среде начинают спонтанно возникать многочисленные пары вихрей-близнецов и вихревые цепочки типа Кармановых.

*f* Обнаружившие этот эффект исследователи подчеркивают, что вихревые цепочки в гидродинамике, конечно, порождаются при существенно иной физике процессов. Однако и этот опыт, и многие другие современные результаты науки свидетельствуют, что между лазерной оптикой и динамикой жидкостей имеются очень глубокие аналогии.

- 
- [1] Trott, M. «Bending a soccer ball - mathematically». Mathematica Guidebooks, ([www.mathematicaguidebooks.org/soccer/](http://www.mathematicaguidebooks.org/soccer/)), June 2006
  - [2] E. Zavattini, G. Zavattini, G. Ruoso, E. Polacco, E. Milotti, M. Karuza, U. Gastaldi, G. Di Domenico, F. Della Valle, R. Cimino, S. Carusotto, G. Cantatore, M. Bregant «Experimental observation of optical rotation generated in vacuum by a magnetic field», Physical Review Letters Vol. 96AR. 110406 (2006)
  - [3] Gabriel Molina-Terriza, Dmitri V. Petrov, Jaume Recolons, and Lluís Torner. «Observation of optical vortex streets in walking second-harmonic generation», Optics Letters, Vol. 27, Issue 8 (2002), pp. 625-627



## КИ2: Многомерная геометрия [6F]

0 В достопамятном сне Вольфганга Паули «о высочайшей гармонии», где тонко согласованные законы мироустройства были представлены в виде часов необычной конструкции, каждая из деталей механизма, надо полагать, была явно неслучайной. И в качестве символа, по крайней мере, представляла ту или иную важную идею. Если воспринимать подобные сны всерьез, разумеется, как это делал сам Паули. И как это делается здесь.

1 При анализе характерных деталей в часах, поразивших ученого, имеет смысл обратить внимание на взаимную перпендикулярность двух круглых циферблатов. Каждый из которых имеет по 32 деления – как каждая из сторон вселенной, представленной в виде разбитого на ячейки двухслойного мяча-мембраны. Еще со времен Ньютона науке хорошо известно, что волны во взаимно перпендикулярных плоскостях практически не взаимодействуют друг с другом. Поэтому, учитывая волновую природу материи, перпендикулярность миров-циферблатов можно трактовать в качестве символического объяснения того, каким образом в одном пространстве сосуществуют две стороны вселенной, практически невидимые друг для друга.

2 Принимая же во внимание другие известные факты о необычном взаимодействии волн, можно развить это объяснение еще дальше. Ранее давалось описание так называемого резистора Мебиуса, обладающего нулевым реактивным сопротивлением. Двухслойная структура этого устройства естественным образом «гасит» присущие всем физическим проводникам паразитные сопротивления индуктивной и емкостной природы, или – выражаясь менее технически и более образно – сглаживает все складки и ямы в рельефе электромагнитного русла резистора, делая его идеально плоской поверхностью для тока. Достигается это, в общих чертах, тем, что любая волна сигнала идет одновременно по двум сторонам резистора в противоположных фазах, в результате чего эти фазы при наложении полностью гасят друг друга, включая и любые всплески реактивного сопротивления.

3 На основе примерно того же принципа, можно отметить, в годы II мировой войны инженеры пытались сделать средство для предотвращения перехвата телефонных передач противником – одновременно пуская по проводу в обратную сторону принятый сигнал, но с перевернутой фазой. Благодаря этому трюку подключавшийся к линии враг всякий раз мог услышать одну лишь тишину... Ну а при сопоставлении этой схемы с двухслойной мембраной вселенной, не только свернутой в ленту Мебиуса, но и постоянно выворачивающейся наизнанку и обратно, яснее становятся многие вещи. Не только то, почему две тесно связанные стороны вселенной сосуществуют словно неведомо одна для другой, но и то, почему пространство представляется наблюдателям совершенно плоским – как усреднение между выпуклой и вогнутой поверхностями свернутого листа...

#

4 Электромагнитные взаимодействия, благодаря которым все частицы материи по одну сторону мембраны «видят и чувствуют» друг друга, по сути дела формируют плотную сеть из лучей-фотонов. В определенном смысле, именно эта сеть и образует экран с 3-мерным изображением, которое для наблюдателей представляется «нашей вселенной». По причине

принципиальной важности такого экрана, имеет смысл подробнее рассмотреть, как могут быть устроены нити-лучи, образующие его ткань.

5 Ранее было показано, что световой квант электромагнитной энергии перемещается в пространстве подобно винтовой дислокации в кристалле. Иначе говоря, в виде двигающейся по спирали плоскости, смещающей одну область зернистого пространства относительно другой. И всякий раз, когда эта плоскость проходит через частицу-осциллон, образуется своего рода «текущее сечение» частицы, фиксируемое спиралью луча. Излагая то же самое чуть другими словами, дислокация в кристалле проявляет частицу-уплотнение и одновременно как волну переносит в себе информацию об этом уплотнении. Действуя, по сути, в качестве канала-волновода. Так что следующие частицы, при прохождении дислокации через них, благодаря этому процессу «видят и чувствуют» соседей. На языке квантовой механики это называется формированием когерентного или единого состояния системы. В 2001 году группа физиков-оптиков из Института Нильса Бора и Университета Аархуса (B. Julsgaard, A. Kozhekin, E. S. Polzik) впервые продемонстрировала этот же самый, по сути, эффект, но теперь уже в макромасштабе – с помощью лазерного луча сцепив в единое когерентное состояние два газовых облачка из атомов цезия, находившиеся на некотором расстоянии друг от друга.[1]

6 Данный эксперимент примечателен в первую очередь тем, что в поддающихся наблюдениям и измерениям условиях демонстрирует, возможно, общую схему «формирования реальности» в природе. В этом опыте исследователи сначала привели в единое квантовое состояние каждое из двух газовых скоплений по-отдельности, с помощью циркулярно-поляризованных лазерных импульсов выровняв спины атомов в облачках. Если каждое из этих газовых скоплений представлять атомом, то данная операция аналогична процессу образования атома как единого взаимосогласованного состояния всех его частиц-компонентов. Только вместо внешнего лазера внутри атома, естественно, действуют излучаемые самими частицами фотоны, обычно имеющие естественную циркулярную поляризацию.

7 Ну а следующий шаг экспериментаторов – сцепление двух облачков еще одним импульсом лазера – становится иллюстрацией того, как находящиеся на отдалении друг от друга атомы образуют проявленную 3-мерную материю с помощью электромагнитных взаимодействий. Проще всего, наверное, это понять, если представить себе, как 3-мерное пространство образуется с помощью плоскости, вращаемой вокруг проходящей через нее прямой. Винтовая дислокация фотона, по сути своей, это именно данный случай – когда плоскость сдвига с высокой частотой регулярно обегает по кругу пространство и формирует по ходу луча 3-мерную совокупность из срезов всех встреченных на пути вихрей-уплотнений. Или частиц материи, иными словами.

##

8 Помимо этих иллюстраций, на базе того же эксперимента можно разобрать еще одну очень важную идею – о квантовой сцепленности. При которой, как известно, частицы могут быть разнесены как угодно далеко, что явно исключает электромагнитные и прочие известные науке взаимодействия, но, тем не менее, продолжают чувствовать друг друга. Для приведения частиц в когерентное сцепленное состояние, как показывают эксперименты, надо упорядочить расположение спинов частиц (или обеспечить им единую «плоскость среза», иными словами), благодаря чему

образуется единая квантовая система. Ранее было показано, что в условиях модели мира как двусторонней мембраны термин «квантовая система» означает связанное состояние частиц по обе стороны мембраны, то есть в пространстве большего количества измерений. И если в данном 3-мерном пространстве частицы материи аккуратно разделены и разнесены без воздействия на их спин, то по другую сторону мембраны цельность системы сохраняются. А значит, сцепленные частицы продолжают «чувствовать» друг друга через другие измерения пространства.

9 Чтобы стал понятнее реальный механизм таких взаимодействий, не зависящих от расстояний в 3-мерном мире, полезно привлечь несколько наглядных примеров из топологии, физики гранулированных сред и хитростей промышленного производства. В индустрии, в частности, для сортировки предметов разного размера широко применяются такие приспособления, как калибровочные шаблоны. Грубо говоря, это несколько параллельных плоскостей, в каждой из которых прорезаны отверстия одного, строго определенного – калибровочного – размера. Самая верхняя плоскость имеет наиболее крупные отверстия, а у каждой последующей калибр дырок уменьшается. Благодаря такой конструкции фильтра всякая поступающая в него смесь, содержащая ингредиенты разных размеров, естественным образом разделяется на фракции, поскольку в каждой калибровочной плоскости остаются лишь элементы примерно одного размера, а те, что помельче, проваливаются в дырки ниже.

а Для гранулированных сред, находящихся в состоянии вибрации, известен похожий по сути, но только уже не внешний, а внутренне присущий эффект самопроизвольного разделения на слои-фракции из зерен разного калибра (эффект бразильского ореха). Поскольку известно, что такое разделение на слои управляется соотношениями в размерах и массах гранул, а каждая сторона мира-мембраны состоит из трех слоев-семейств похожих по свойствам частиц, логично и здесь предположить действие аналогичного механизма «калибровочного» расслоения. А коль скоро размер-масса частиц в каждом слое тесно связаны с частотой их колебаний, то можно говорить, что с изменением частоты – т.е. при увеличении угловой скорости вращения вместе с уменьшением размера – частица смещается или «проваливается» в другие слои пространства-времени. А затем, замедляя вращение и увеличивая размер, в итоге оказывается на другой стороне мембраны. Тут же, впрочем, начиная цикл обратного перехода. Графически такую последовательность перемещений через разные частотные слои можно наглядно изобразить с помощью двух уже известных вариантов представления лестницы Мебиуса. Но теперь каждая перекладина лестницы становится волнистой, что обозначает физический принцип перехода частицы с одной стороны мембраны на другую, а уменьшение амплитуды волны вместе с возрастанием частоты отражает и многослойную структуру мембраны, и механизм перемещения между слоями.

б Коль скоро понятие линейных расстояний в привычном нам 3-мерном пространстве непосредственно связано с прохождением света из одной точки в другую (как скорость фотона деленная на время пути), а свет по своей природе распространяется исключительно вдоль мембраны, то бессмысленно говорить о расстоянии между слоями и их толщине. Как бессмысленно, скажем, говорить о линейных расстояниях между ТВ-каналами в луче спутникового телевидения. Или о «толщине» этих каналов. Однако же, в области коммуникаций вполне общепринято говорить и о расстояниях меж каналами и об их ширине, но только в терминах частот передачи. Иными словами, применительно к мембране частотную шкалу

тоже вполне естественно уподобить еще одному пространственному измерению. И подобно тому, как в телеприемнике очень просто в долю секунды переносится из Сибири в Сахару, а оттуда в Чили или Китай – просто переключая частотные каналы передач, – так и в мире-мембране частотные переходы делают привычные человеку расстояния вещь весьма и весьма условной.

###

c Если же подвести общий итог, сопоставляя топологические особенности фигур и известные физические свойства вселенной, можно сделать следующие выводы о геометрической структуре многомерного мира как мембраны.

d Три пространственных измерения нашего мира как ленты Мебиуса или, строже, трехмерной поверхности Клейна – это минимальная размерность замкнутой и гладкой односторонней поверхности, не имеющей краев и разрезов. Трехмерная поверхность ограничивает пространство большей, четырехмерной размерности, – как сфера ограничивает пространство шара. Но поскольку мир-поверхность, подобно увеличивающей радиус сфере, постоянно сдвигается вдоль четвертой оси пространства, то эта ось – времени – играет для мембраны особую роль. Эту роль можно назвать однонаправленным пространством или стрелой времени. Ибо частицы мембраны крошечными скачками сдвигаются по этой оси строго в одном направлении, причем каждый такой скачок для двухслойной мембраны выглядит как «выворачивание» внутренней стороны наружу. Частицы материи внешней стороны в каждом такте сдвига можно считать стоящими на месте, в то время как парные им частицы с внутренней стороны оказываются снаружи. В результате элементы каждой пары меняются местами, после чего процесс повторяется, и материя внутренней стороны опять становится внешней вместе с общим сдвигом мембраны во времени.

e При таком устройстве мембраны в общих чертах должно быть понятно, что в четырехмерном пространстве положение каждой ее частицы, состоящей из пары неразрывно связанных элементов, должны описывать не 4, а 8 пространственных координат. Иначе говоря, пространство мембраны можно трактовать как 8-мерное. Но и это еще не все, коль скоро в целом уже ясна и многослойная структура мембраны, где каждая из сторон имеет три существенно разных слоя-пространства. Поэтому для точного описания пространственного положения элемента материи нужно иметь еще одну, пятую координату, указывающую на «частотный слой». А это в свою очередь означает, что суммарное число измерений в пространстве мембраны оказывается равным 10. Или, если угодно,  $2 \times 5$ .

f Ну, а когда 10-мерная геометрия мира становится достаточно очевидна, самое время вспомнить и о том, что всей материи вообще и частицам квантовой физики, в частности, свойственна еще и такая вещь, как память. Некоторым не очень ясным пока образом материя обычно помнит свою форму, а частицы явно помнят свои прежние состояния. Другими словами, имеются несомненные признаки того, что где-то сохраняется информация обо всем происходящем в мире. И есть сильное подозрение, что для этой цели служит еще одно – одиннадцатое – пространственное измерение.

---

[1] B. Julsgaard, A. Kozhekin, and E. S. Polzik, «Experimental long-lived entanglement of two macroscopic objects», Nature 413, 400 (2001)