



Ответ, который мы получаем, зависит от того, какой вопрос мы ставим, какой эксперимент мы устраиваем, какой регистрирующий прибор мы выбираем.

Д. А. Уиллер

Теория информации

ЛЕКЦИЯ 5:

ИНФОРМАЦИОННАЯ СТРУКТУРА ФИЗИЧЕСКОЙ РЕАЛЬНОСТИ

6 октября 2022

Тематика лекции

- Почему
 - Наличие информации, достаточной чтобы предсказывать или описывать что-либо, совсем не равноценна пониманию этого «что-либо».

Обратимся к квантовой физике: парадокс ЭПР (Эйнштейна-Подольского-Розена)

- Физика исходит из того, что состояние квантовой частицы до измерения не определено. Каждому из **ВОЗМОЖНЫХ** состояний квантового объекта соответствует определенная вероятность.
- Рассмотрим фотоны. Эти объекты имеют два **ВОЗМОЖНЫХ** состояния или спин - собственный момент импульса. После взаимодействия двух фотонов состояния находятся в т.н. «спутанном состоянии».
- В процесс столкновения двух фотонов «управляется» законом сохранения энергии: если спин (направление вектора вращения) первого фотона направлен в одну сторону, то спин второго — в противоположную, а сумма их вращения равна нулю.
- Но.... теперь измерить спин одного «спутанного» фотона, то **«МГНОВЕННО»** результат будет известен (???) фотону в другом месте. Т.е. информация о “направлении вращения“ удаленного фотона передается другому фотону и... он «мгновенно» изменяет свое состояние.
 - Измерительный прибор может зафиксировать любое значение спина. При этом второй «спутанный» фотон мгновенно узнает, как вертится первая, и начинает крутиться в противоположную

Комментарии к парадоксу ЭПР

- Эйнштейн рассуждал так: если происходит именно мгновенная передача информации, то значит, что скорость света не является основным ограничением для скорости передачи информации.
- Вывод: квантово-механическое описание природы не полное, а есть некие скрытые переменные, которые и определяют результат экспериментов над «спутанными» квантовыми состояниями
- В 1964-м Джон Белл показал, что можно провести эксперимент, который установит, возможно ли описание мира, отличное от квантово-механического.
- Идея эксперимента: если есть неизвестные переменные, то повторяя эксперимент несколько раз, можно получить определенное статистическое описание связи (корреляцию) скрытых и измеренных состояний. Результат такого эксперимента получил название **неравенство Белла**.

Было показано

- Что неравенство Бэлла нарушается – статистической связи нет
- Вывод: сигнал нельзя послать быстрее скорости света. Эйнштейн здесь прав.
- Но если мы **заранее** позаботимся о том, чтобы передать (переместить каким либо способом) на большое расстояние связанные частицы, то мы можем манипулировать их состоянием.
- При этом сама манипуляция состояниями «спутанных квантовых объектов», которую называют телепортацией состояния, происходит мгновенно.
- Такая телепортация происходит мгновенно и безошибочно....скорость телепортации не зависит от скорости света или каких-то других ограничений
 - ???????

Что это значит

- Если телепортация происходит без ошибок, то есть с вероятностью 1, то «информация Шеннона» не передается.
- Информация образуется там, где есть неопределенность описания..... Что за информацию можно передать на «флешке». Информационное содержание «по Шеннону» математических истин и детерминированных физических законов ничтожно - они выполняются всегда!
- Вопрос: надо ли исправлять ошибки...чтобы получить правильный результат вычислений ?

$$\frac{16}{64} = \frac{1\cancel{6}}{\cancel{6}4} = \frac{1}{4}.$$

$$\begin{aligned} e^{2\pi i} &= 1 \\ (e^{2\pi i})^i &= 1^i \\ e^{-2\pi} &= 1 \end{aligned}$$

- Итак, математическая ошибка - это использование математических формул вне зоны (состояния) их применимости или переход в «недостоверное» состояние

Введение из книги Д. Дойч. Структура реальности

- Способность **предсказывать** или описывать что-либо, даже достаточно точно, совсем **не равноценна пониманию** этого.
- В физике предсказания и описания часто выражаются в виде математических формул (но информационное содержание математических истин ничтожно).
- Математические формулы можно использовать в бесконечном множестве случаев (объем понятия), например, даже для предсказания результатов будущих наблюдений. Знать формулу не значит **понимать** описываемые с ее помощью физические явления, но значит знать «объем понятий», к которым эта формула применима.
- Какую информационную меру можно сопоставить **пониманию или объяснению** снятой неопределенности. Какое информационное содержание заключается в **объяснении (предсказании)** ?

д/з: ЧТО ПОНИМАЕТСЯ ПОД ЭТИМИ ТЕРМИНАМИ СЕМАНТИКИ

- Интенционал (содержание понятия)
- Экстенционал (объем понятия)

Информационные аспекты процессов вычислений как проблема разрешимости множеств

9

- Являются ли результаты моделирования разрешимым множеством ?
- Можно ли объяснить результаты моделирования, анализируя полученные данные ?

Разрешимое множество (также, вычислимое) — множество натуральных чисел, для которого существует алгоритм, получающий на вход любое натуральное число и через конечное число шагов завершающийся утверждение, принадлежит ли оно данному множеству $\rightarrow (0,1)$.

Теорема. множество является разрешимым, если его характеристическая функция вычислима.

Теорема. Множество разрешимо тогда и тогда, когда оно и его дополнение **перечислимо**.

Информационная основа объяснения и предсказания

- Объяснения неизбежно включают то, что непосредственно в эксперименте **не наблюдается** (атомы и силы; законы эволюции; контекст эксперимента).
- Чем «глубже» (по времени или масштабу) объяснение, тем к более **отдаленным** от непосредственного **опыта** сущностям оно обращается.
- Информационные сущности, формирующие структуру реальности, определяют и границы опыта. Представление о наличии **единственного исхода** любого эксперимента — неверно, т.е. закон исключенного третьего

$$A \vee \bar{A} = 1$$

не является основой научного понимания

- Остается остается только

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) * P(A)}{P(B)}$$

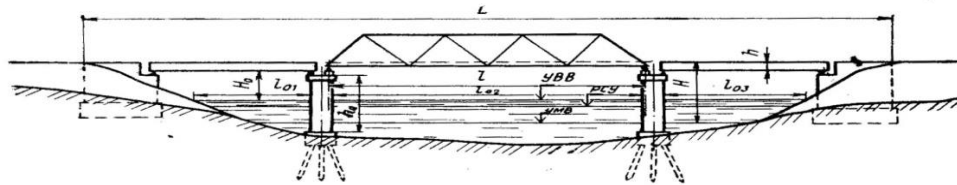
Информация как мера объема понятий vs содержательного объяснения

Суть «vs» в том:

- как отличить
 - содержательное «понимание» от простого «объемного» знания?
- ответ на вопрос «почему» отличается от ответа на вопрос «что»
- точные (выражаемые математическими формулами) законы естественных наук отличаются от эмпирических правил

Новые данные vs новое понимание

- смысл «глубоких» объяснений состоит в том, что они охватывают не только текущие и доступные для «измерения» ситуации, но и потенциально возможные или пока еще неизвестные...
 - Каково информационное содержание того, что мы понимаем - квазары состоят из вещества, находящегося в процессе падения в черную дыру, со столь сильным гравитационным полем, что из него этого поля невозможно вырваться ?
 - Понимание позволяет оценить температуру квазара даже если мы непосредственно измерить «температуру» квазара не можем
- требуется ли дополнительное понимание механики и какая информация нужна, чтобы построить мост через реку



Редукционизм: «объяснение данных на основе законов природы»

- Математически законы движения можно выразить системой уравнений. У этих уравнений существует много различных решений, каждое из которых описывает какую-то возможную траекторию.
- Суть редукционализма: определить, какое из возможных решений описывает измеренную траекторию движения. Чтобы это сделать необходимо получить **информацию о начальных состояниях**.
- Вопрос: какая информация нужна, чтобы **объяснить существования самого начального состояния**:
 - почему в действительности начальное состояние было таким,
 - является ли это состояние «эмерджентными» следствиями законов фундаментальной физики

Информационная мера (масштаб) понимания

Структура реальности

Один источник

Квантовые эффекты в пределах гравитационного поля черной дыры могут приводить к выделению энергии, своего рода жара. Это может натолкнуть на связь между квантовой теорией и термодинамикой, наукой и теплотой.



Если пространство и время не фундаментальны, тогда что? Специалисты в области теоретической физики выделяют несколько возможных вариантов ответа на этот вопрос.

1. Гравитация как термодинамика.

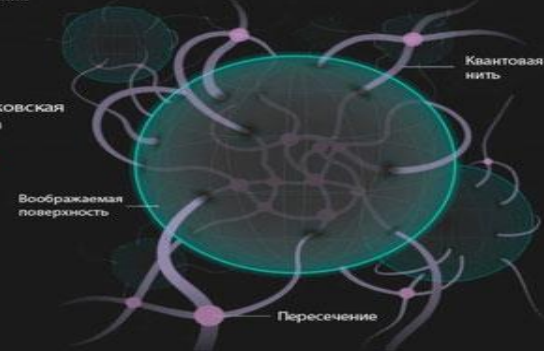
Гравитационные уравнения можно переписать в соответствии с законами термодинамики, не прибегая к пространственно-временным искажениям.



Это означает, что гравитация в макроскопическом масштабе является усредненной величиной до сих пор неизвестного «атома» пространства-времени.

2. Петлевая квантовая гравитация.

Вселенная – это сеть пересекающихся квантовых нитей, каждая из которых несет квантовую информацию о размере и форме близлежащего пространства.

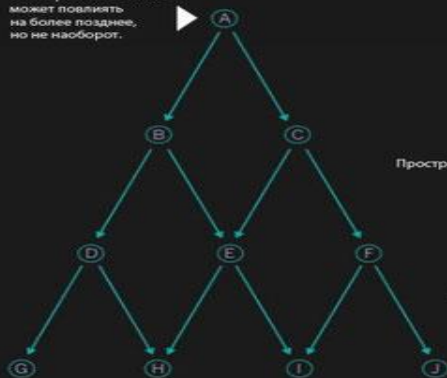


Представьте ограниченную область сети. Ее объем зависит от количества соединений, а площадь от количества входящих в нее нитей.

3. Причинные ряды.

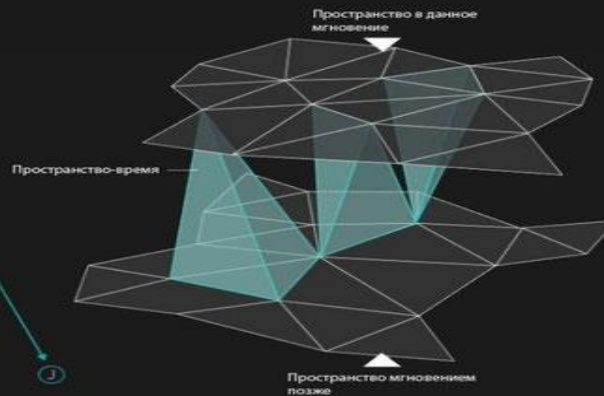
Строительные блоки пространства-времени являются, своего рода, точками «событий», соединенными между собой причинностью. Они формируют расширяющуюся сеть.

Более раннее событие может повлиять на более позднее, но не наоборот.



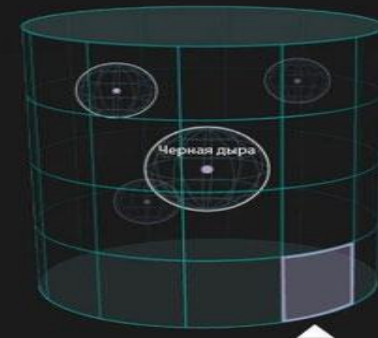
4. Причинная динамическая триангуляция.

Компьютерное моделирование аппроксимировало фундаментальную квантовую реальность как крошечную многоугольную структуру, подчиняющуюся квантовым правилам и состоящую из кусочков пространства-времени.



5. Голография.

Вселенная с тремя измерениями включает в себя черные дыры и струны, управляемые только гравитацией. А на двухмерной границе находятся элементарные частицы, которые подчиняются теории квантового поля.



Все, что происходит внутри трехмерной Вселенной, может быть описано, как процесс на двухмерной границе, и наоборот.

Словарь терминов, которые потребуются в дальнейшем

- Объяснение – утверждения о фактах в форме логически обоснованного следствия, в котором учитываются причины и контекст их получения
- Инструментализм – направление развития научных знаний, цель которых является лишь предсказание результатов экспериментов.
- Редукционализм – методологический принцип, согласно которому сложные явления могут быть полностью объяснены с помощью законов, свойственных более простым явлениям
- Холизм – принцип приоритета целого по отношению к его частям согласно этому принципу обоснованными являются только те объяснения, которые сделаны на основе явлений более высокого уровня; Восходит к метафизике Аристотеля - целое больше, чем сумма его частей.
- Эмерджентность – явление (например, жизнь, мысль или вычисление), относительно которого существуют факты или объяснения, которое не выводится из теорий низкого уровня, но которое можно объяснить на базе высокоуровневой теории. Другими словами, явление несводимости свойств системы к сумме свойств её компонентов.

Инструментализм - основа теории информации, сформулированной на базе «вероятностной меры»

Информация – это не материя и не энергия. Это третье».

Норберт Винер

- Информационное описание – это описание объекта в «полном пространстве его возможных состояний».
- Состояниям полного пространства возможностей могут быть сопоставлены вычислимые (вероятностные) меры
- Вероятность по Колмогорову (аксиоматика для математического описания теории вероятностей)
 - -пространство элементарных событий,
 - множество подмножеств из элем. событий или «возможные» события,
 - мера для каждого события – вероятность элементарного и «возможного» события

самый фундаментальный закон физической реальности

Комментарий к аксиоматике Колмогорова

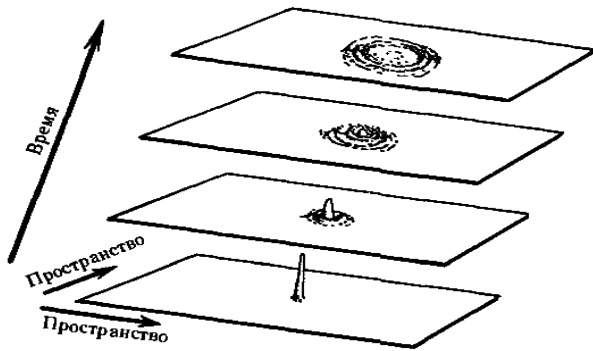
Проблема аксиоматизации теории вероятностей включена Д. Гильбертом в формулировку его 6-й проблемы «Математическое изложение основ физики»:

.... что касается аксиом теории вероятностей, то мне казалось бы желательным, чтобы параллельно с логическим обоснованием этой теории шло рука об руку строгое и удовлетворительное развитие метода средних значений в математической физике, в частности, в кинетической теории газов.

Пусть S — множество элементов, которые называются элементарными (альтернативными) событиями, A — множество подмножеств, называемых случайными событиями (или просто — событиями), каждому x из множества A сопоставляется неотрицательное вещественное число $P(x)$ — мера, которая называется вероятностью, причем $P(S)=1$...

Вероятность vs состоявшаяся реальность

Описание объектов с помощью формализма теории вероятности не применимы к единичным объектам, а применяются исключительно по отношению к ансамблю невзаимодействующих между собой и одинаково подготовленных объектов.



- Фундаментальные модели «мира», которые задают законы «поведения» отдельного объекта, выбираются в соответствии с тем, как в реальности меняется внешняя среда (контекст) при движении объекта.
- Хотя движение материального объекта строится на основе определенной причины, которая имеет форму некоторого «силового» воздействия, но внешняя среда, в которой происходит движение, меняется не контролируемым (случайным) образом, поэтому состояние объекта также меняется случайно.

Соотношение неопределенностей: двоичная логика vs логики реальности

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2} \\ \Delta y \cdot \Delta p_y \geq \frac{\hbar}{2} \\ \Delta z \cdot \Delta p_z \geq \frac{\hbar}{2} \end{array} \right.$$

Согласно соотношению неопределенностей в природе не существует состояния частицы с точно определенными значениями координаты и проекции импульса на эту координатную ось. Соотношение неопределенностей Гейзенберга имеет фундаментальное значение. Оно позволяет проводить численные расчеты не прибегая к точному и трудоемкому решению квантово-механических уравнений.

$$\Delta v_x \geq \frac{\hbar}{2m\Delta x}$$

Объект размером 1 мкм и массой 1 мкг $\Delta v_x \sim 10^{-22} \text{ м/с}$

Электрон в атоме (0,1 нм) $\Delta v_x \sim 10^6 \text{ м/с}$

Описание «сложных моделей действительности: принцип дополнительности Н. Бора

Принцип дополнительности – всякое «сложное» явление природы требует для своего описания по крайней мере двух взаимоисключающих дополнительных **понятий (объяснений)**.

Такие «понятия» составляют базис пространства состояний «сложных моделей!»

Система задается вектором состояния $|\psi\rangle$, который представляется через координаты ортогональных (взаимоисключающих) состояний $|\phi_k\rangle$. Можно «отнормировать» базисные состояния так, что:

$$|\psi\rangle = \sum_k |\phi_k\rangle,$$

набор операторов-проекторов \hat{P}_k :

$$\langle\phi_k|\phi_{k'}\rangle = p_k \delta_{kk'},$$

$$\langle\psi|\psi\rangle = \sum_{k,k'} \langle\phi_k|\phi_{k'}\rangle = \sum_k p_k = 1,$$

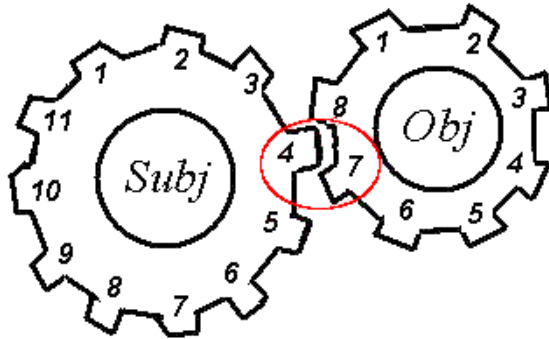
$$|\phi_k\rangle = \hat{P}_k |\psi\rangle,$$

$$\hat{P}_k \hat{P}_{k'} = \hat{P}_k \delta_{kk'},$$

$$\sum_k \hat{P}_k = \hat{1}.$$

Макро-запутанные состояния и проблема сложности

$$\psi = ||1,1\rangle + ||2,2\rangle + ||3,3\rangle + \dots ||11,8\rangle$$



$$P = \int dP = \int_V \omega dV = \int_V \Psi^* \Psi dV$$



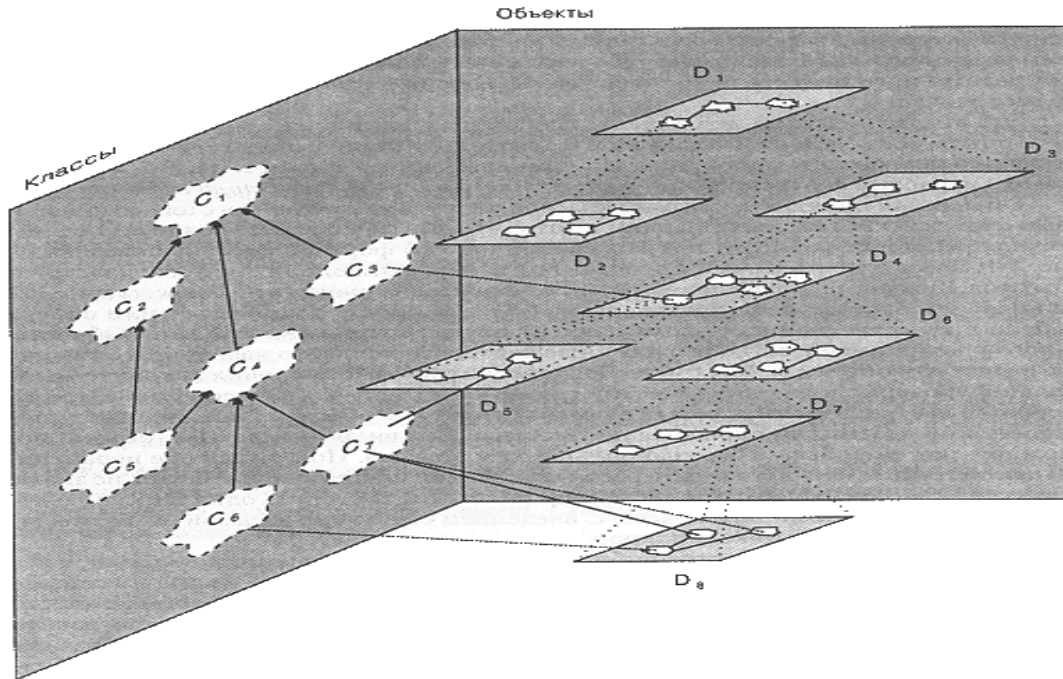
Почему легко
запутать, но
«сложно»
распутать
клубок НИТОК

Механическая запутанность

Сложность связана с объемом используемых понятий. Так "сложность программного обеспечения" связана с тем, что «эта технология» предполагает, что у программы есть только на **одно** «правильное» состояние из «счетного множества возможных». Правильное состояние требует чтобы:

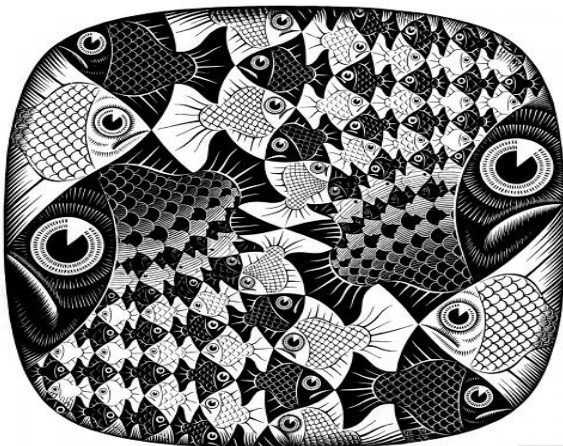
- состояние предметной области **было точно известно** (задача разрешена);
- процесс выполнения программы **полностью контролировался**;
- в процессе выполнения нет необходимости коррекции программы;
- программы, использующие «больших» данных, всегда работают предсказуемо.

Описание сложной системы: иерархия классов понятий или суперпозиция



Отображение объектов на классы не однозначно, формируя состояние «дополнительности»

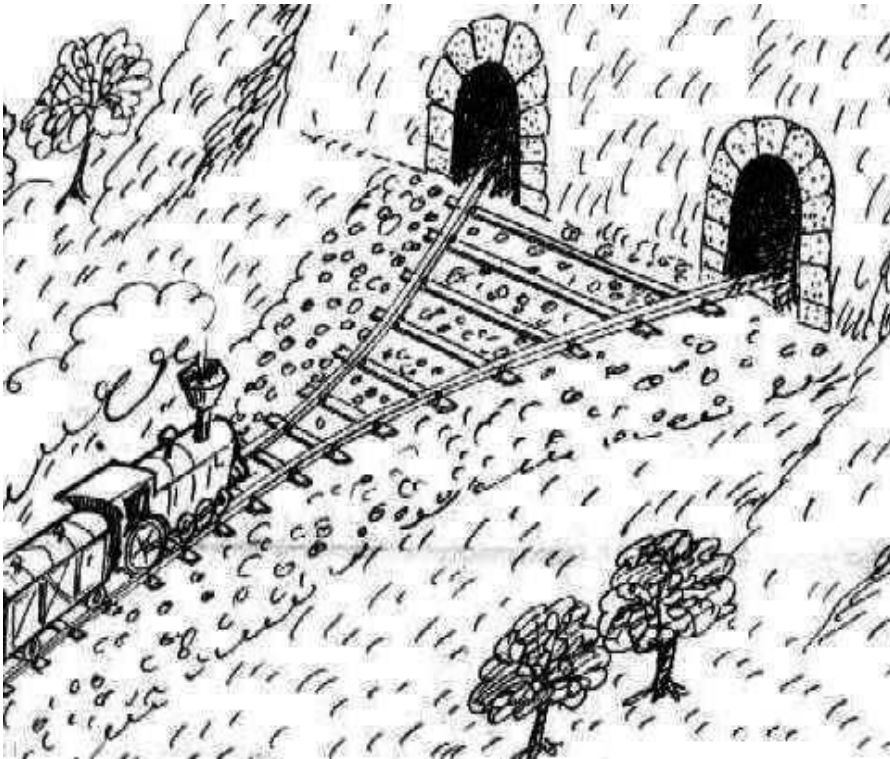
Согласно Бору, альтернативные описания дополняют друг друга – характеризуя разные аспекты проявления реальности.



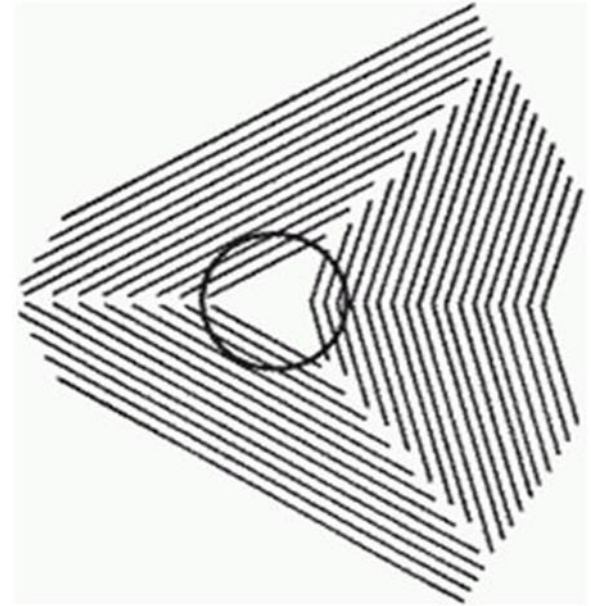
Такой объяснительный дуализм порожден **несовершенством используемых категорий** (сигнатуры языков), которыми мы мыслим, а информация как **мера разнообразия** не редуцируется однозначно к свойствам физической материи (не материализуется)

Самосознание факта как содержательное описание результатов измерения

Проблема: код, в котором информация о мире поступает в человеческое сознание в результате «измерений», порождает многомерные образы.

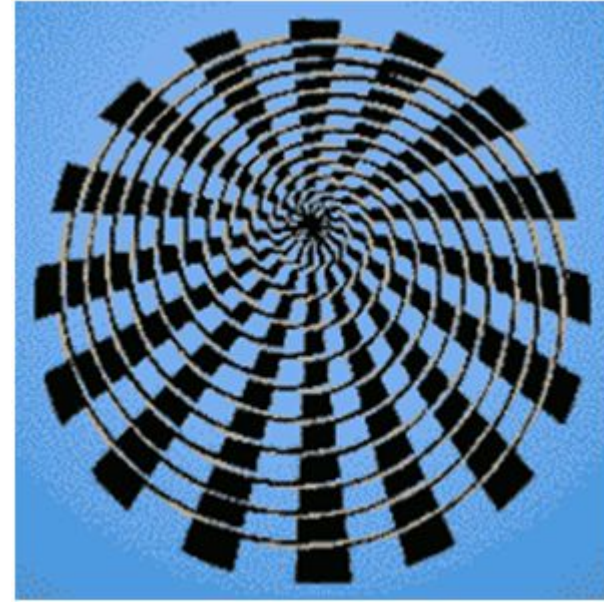
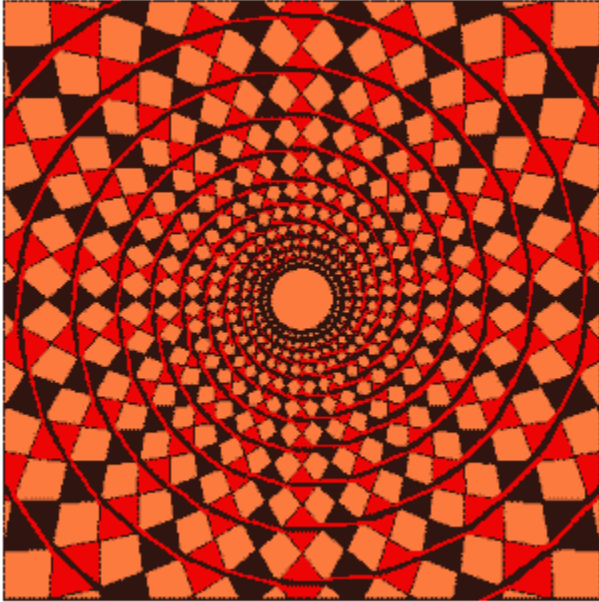


Не всем измерения, которые проводятся в рамках некоторой теории, соответствуют элементы макро реальности

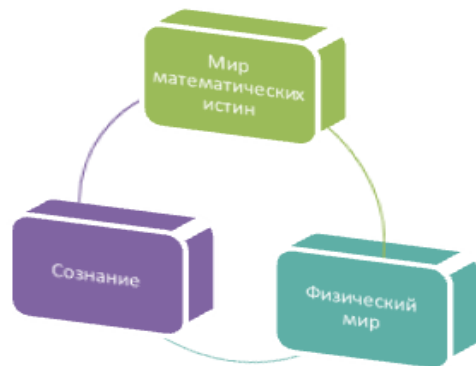


Окружность кажется искаженной

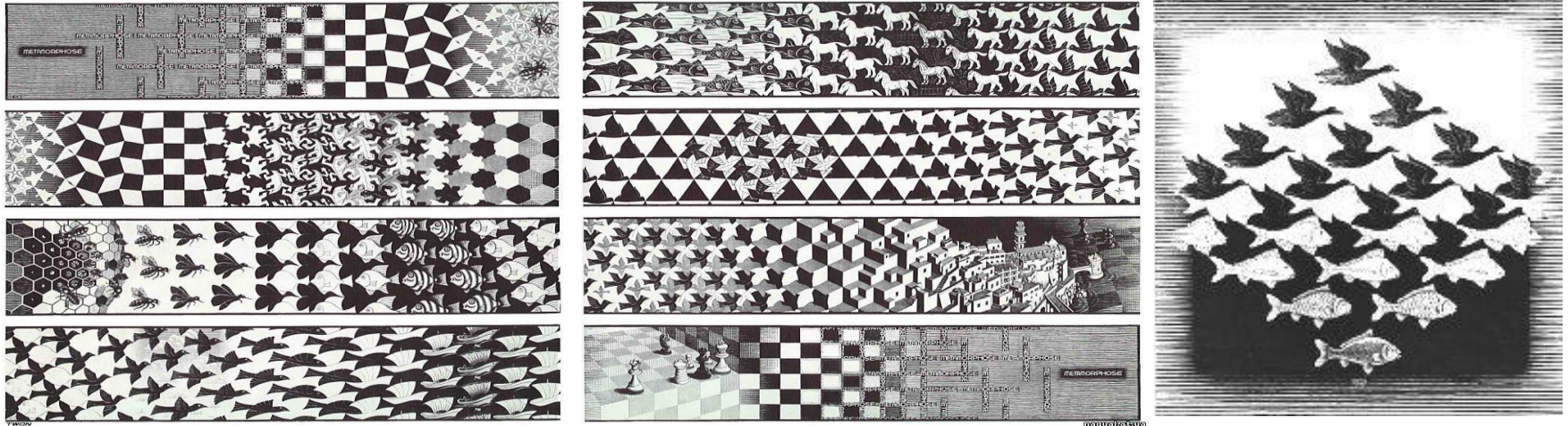
Результаты (факт) измерений зависит от условия эксперимента и устройства прибора.



Это не спирали, это круги.



«Динамика» проявленных состояний системы



В зависимости от результатов измерений система S может быть представлена как «проекция» на ту подсистему, амплитуда вероятности которой равна 1.

- Система может быть задана как совокупность альтернативных состояний, достигаемых с определенной вероятностью.
- Описание физического объекта может быть дано как «единичная сущность», которая находится в суперпозиции своих альтернативных базисных состояний.
- Такое описание позволяет рассматривать физический объект, через совокупностью операторов-проекторов вектора состояния на множество выбранных базисных состояний.