

Как понимать квантовую механику?

Философия квантовой механики

к.ф.-м.н. **Иванов Михаил Геннадьевич**

(кафедра теоретической физики МФТИ)

mgi@phystech.edu



МФТИ

13 июня 2013 г.

Московское философское общество
Философский клуб «Библио-глобус»



Предупреждения:

- Я не философ. Что принято называть сегодня философией я не знаю.
 - Для меня философия — феноменология познания (эвристика) и те разделы знания, где нет методов строже эвристики.
- Что такое квантовая механика я знаю, а местами даже понимаю.
 - Написал книгу «Как понимать квантовую механику», М., Ижевск: РХД, 2012.



Прежде чем переходить к квантовой механике

Широкая гуманитарная культура в отношении
к физике застряла в XVIII веке:

лапласовский детерминизм уже усвоен,

классическая теории вероятности ещё не
усвоена.

Риторический вопрос писателя-медика

Представляю, как чувствовали бы себя физики, если бы при неизменных условиях опыта литий иногда превращался в гелий, иногда в соломенную шляпу, иногда в малинового медвежонка... Игра без правил, сказали бы шокированные физики.

к.м.н. Журавлева Валентина Николаевна
рассказ "Приключение",
сборник "Снежный мост над пропастью"
(1971)

Ответ физика

В квантовой системе, как правило, может произойти всё, что не запрещено законами сохранения... если мы столкнём на ускорителе две частицы с энергией, достаточной для рождения зелёного слоника, то с некоторой ... вероятностью зелёный СЛОНИК возникнет (хотя эта вероятность будет заметно меньше, чем вероятность самопроизвольной сборки слоника из отдельных атомов в результате броуновского движения, а среднее время ожидания такого события на много порядков превысит возраст Вселенной).

к.ф.-м.н. Иванов Михаил Геннадьевич

«Как понимать квантовую механику» (2012) стр. 63

Этим и занимаются физики на сталкивателях (коллайдерах) элементарных частиц



Панорама ЦЕРНа (вид на запад). На снимке обозначено положение тоннелей LHC (длина 27 км) и SPS (длина 7 км). Крестиками отмечена франко-швейцарская граница (снизу Швейцария). Предполагается, что на LHC удастся обнаружить бозон Хиггса. [© CERN <http://cdsweb.cern.ch/record/39027>]

Уточнение бозон Хиггса вероятно уже обнаружили.

Детерменизм в классической механике

. . . в пространстве ничего не пропадает; если ты оставишь в нём портсигар, так достаточно рассчитать элементы его траектории, прибыть на то же место в надлежащее время, и портсигар, следуя по своей орбите с астрономической точностью, попадёт к тебе в руки в заранее рассчитанную секунду.

С. Лем, рассказ «Патруль» (1959), серия «Приключения звёздного навигатора Пиркса»

Детерминизм классической механики в культуре (включая массовую)



Демон Лапласа (Laplace No Ma) по версии японских мультипликаторов [© P-G/R]

Недетерменизм в классической механике

... я снова должен остановиться и сделать заявление от имени обширного глобального сообщества людей, работающих в области механики. Сегодня мы все глубоко уверены, что энтузиазм наших предшественников по отношению к изумительным достижениям механики Ньютона привел их к обобщениям в области предсказуемости, в которые мы были действительно склонны верить вплоть до 1960-х гг., но которые, как мы сейчас поняли, являются ложными. Мы хотим принести коллективные извинения за то, что вводили в заблуждение широкие слои образованного населения, распространяя идеи детерминизма систем, подчиняющихся законам движения Ньютона, которые после **1960** были доказательно опровергнуты.

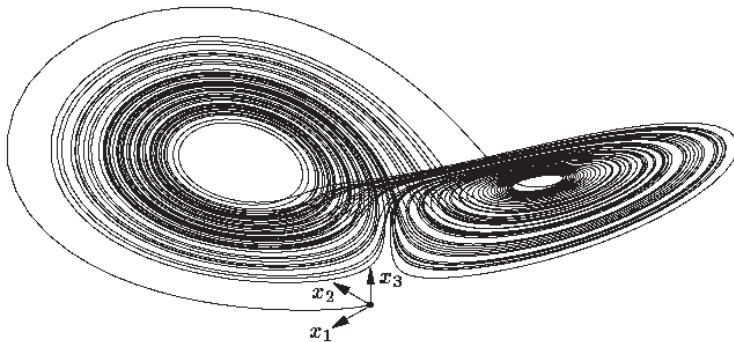
The recently recognized failure of predictability in Newtonian dynamics

By Sir James Lighthill, F.R.S.

Proc. Roy. Soc. London A 407 35-50 (1986) // p.38.

Неустойчивая динамика

В классической механике большинство интересных систем неустойчиво, т. е. первоначальная малая ошибка в начальных данных экспоненциально нарастает со временем.

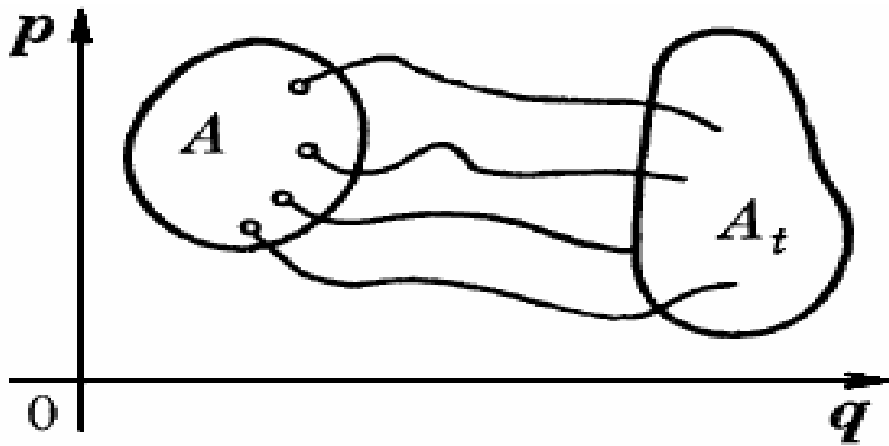


Аттрактор («бабочка») Лоренца — классический пример того, как детерминистическая динамика порождает хаос. Витки кривой проходят сколь угодно близко друг к другу, в результате чего сколь угодно малая ошибка приводит к тому, что со временем мы ошибёмся «лепестком». Первоначально аттрактор Лоренца возник при численном исследовании простейшей модели погоды.

Например, для вычисления погоды на два месяца вперёд нужно иметь в запасе пять знаков точности. Практически это означает, что вычислять погоду на такой срок невозможно.

В. И. Арнольд,
«Математические методы
классической механики»,
Добавление 2:
«Геометрические
левоинвариантных метрик»
(1968)

Классическая механика — вероятностная теория



Неустойчивая
динамика —
«микроскоп» для
начальных данных

Мы не знаем, какая
траектория на самом
деле.

Вместо траекторий
— эволюция облака
вероятностей.

Начальные
отклонения выросли в
10 раз — нужно знать
лишнюю цифру после
запятой.

Вероятность — доля событий (сложение и умножение вероятностей)

Если что-то может произойти двумя взаимоисключающим и способами, то вероятности складываются.

$$p(A \text{ или } B) = p(A) + p(B)$$

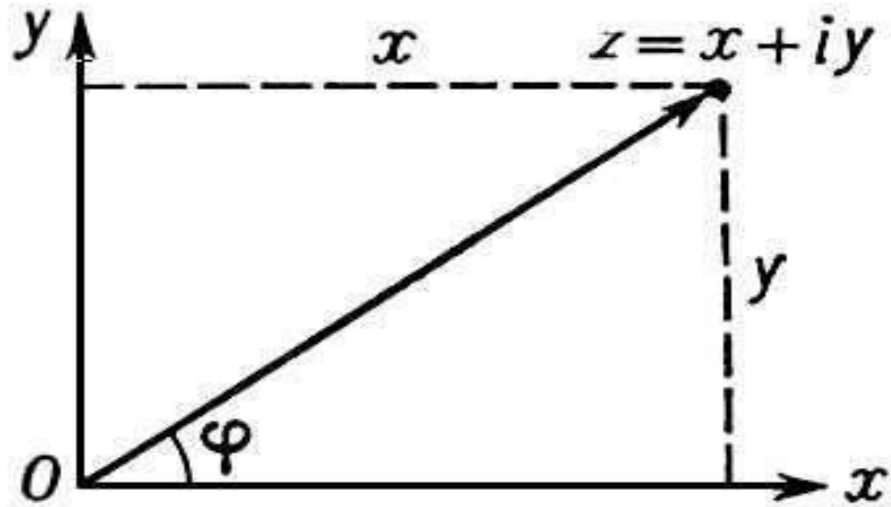
$$\frac{N(A) + N(B)}{N} = \frac{N(A)}{N} + \frac{N(B)}{N}$$

Если должно произойти А, а потом В, то вероятность последовательности — произведение вероятности А на условную вероятность В при условии А.

$$p(A, B) = p(A) p(B|A)$$

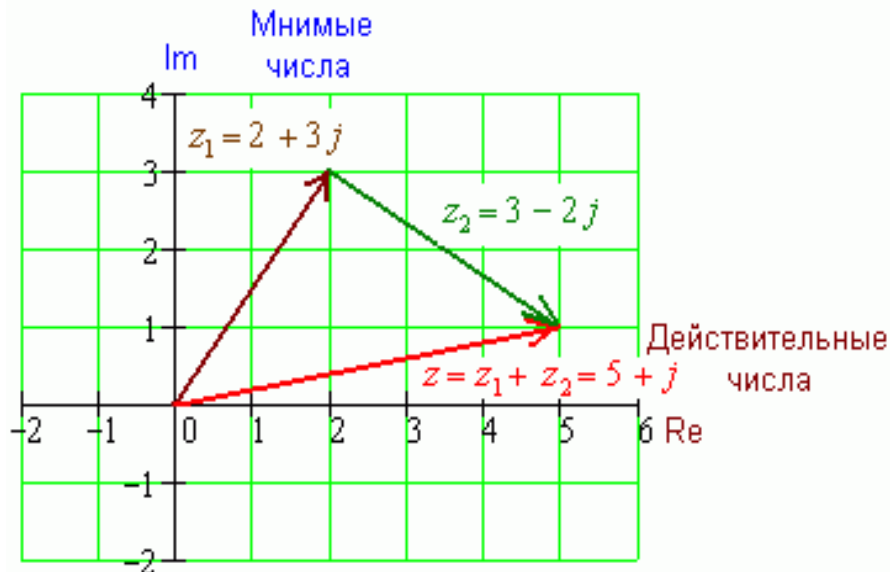
$$\frac{N(A, B)}{N} = \frac{N(A)}{N} \frac{N(A, B)}{N(A)}$$

Амплитуды вместо вероятностей



Если взаимоисключающие варианты принципиально неразличимы.

$$p = |z|^2 = x^2 + y^2$$



$$\begin{aligned} p(1 \text{ или } 2) &= \\ &= p(1) + p(2) + \\ &\quad + 2\sqrt{p(1)p(2)} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \\ &\text{интерференционный член!} \end{aligned}$$

Последовательно заменяем вероятности на амплитуды

- Состояние (распределение вероятностей/волновая функция) — вероятности/амплитуды для полного набора взаимоисключающих состояний.
- После измерения нереализовавшиеся вероятности/амплитуды обнуляются.
- НО! В квантовой механике полный набор взаимоисключающих состояний задаётся неоднозначно! Состояние — вектор (многомерный), его можно разлагать по разным базисам.

Две части квантовой механики

- Теория замкнутых систем (уравнение Шрёдингера)
 - Вектор состояния вращается.
 - Поскольку вектор многомерный, то в разных плоскостях будут разные частоты.
- Теория измерений (проектционный постулат)
 - Если измерение показало, что $X=A$, то так оно и становится.
 - Вектор состояния проецируется на подпространство.
 - Нереализовавшиеся амплитуды обнуляются.

«Да» или «Нет» с вероятностью — это м.б. незнание. А с амплитудой!?

- Как это вообще понимать?
- Принцип дополнительности
- Как это соотносить с прежними теориями, которые работают?
- Принцип соответствия
- Копенгагенская интерпретация

Прощание со «здравым смыслом»

Всё перечисленное неверно!

- Точечная частица находится в некоторой единственной точке пространства в любой момент времени, иначе это не точечная частица.
- Если провести над системой измерение, то мы станем лучше знать её состояние, если мерить достаточно аккуратно.
- Измерение всегда можно провести сколь угодно аккуратно, по крайней мере в принципе можно.
- Наука объективна в том смысле, что при изучении любого объекта мы можем исключить из рассмотрения субъекта, который этот объект изучает и измеряет.
- Если измерение говорит нам «ДА» (система определённо обладает некоторым свойством), то такое же измерение над другой такой же системой в таком же состоянии тоже обязательно даст «ДА» (детерминизм).
- Для того, чтобы состояние системы изменилось, надо, чтобы что-то провзаимодействовало именно с этой системой.
- Состояния всех подсистем однозначно определяют состояние системы в целом.

Принцип соответствия

- Если при описании явления применимы две разные теории, то предсказания результатов эксперимента должны «соответствовать» друг другу
- Что значит «соответствовать»?
 - Это зависит от задачи.
 - Поведение квантовой системы в пределе больших квантовых чисел соответствует поведению аналогичной классической системы.
 - Новая теория должна в некотором пределе воспроизводить предсказания старой, проверенной теории.

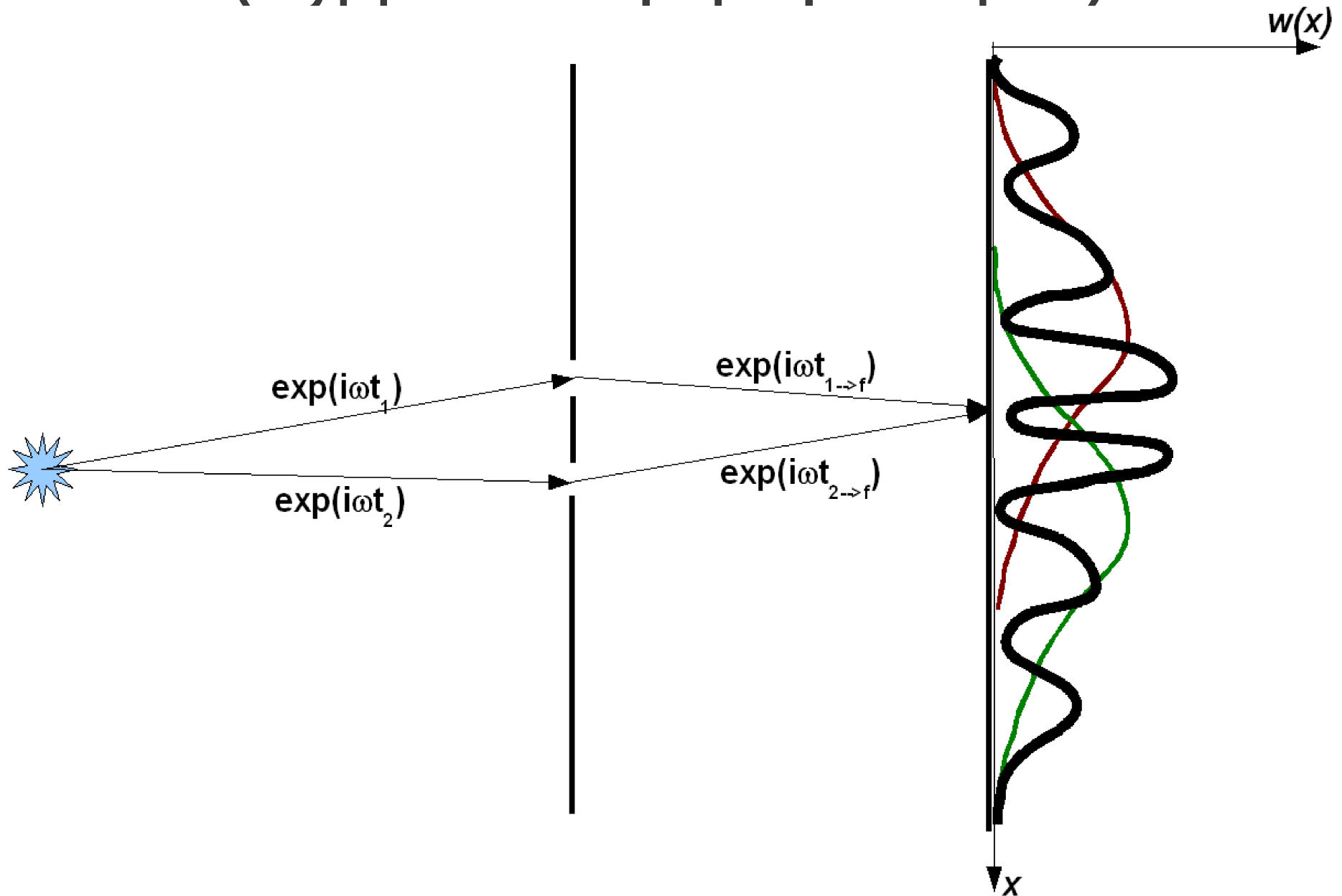
Принцип дополнительности

- явления природы обладают дополнительными свойствами и допускают дополнительные описания;
- понятия (величины), использующиеся в рамках одного описания, определены одновременно и взаимно согласованы;
- понятия (величины), использующиеся в рамках различных (дополнительных) описаний, могут быть одновременно не определены, за счёт чего дополнительные описания (дополнительные свойства) могут представляться противоречащими друг другу;
- понимание свойств системы требует использования дополнительных описаний.

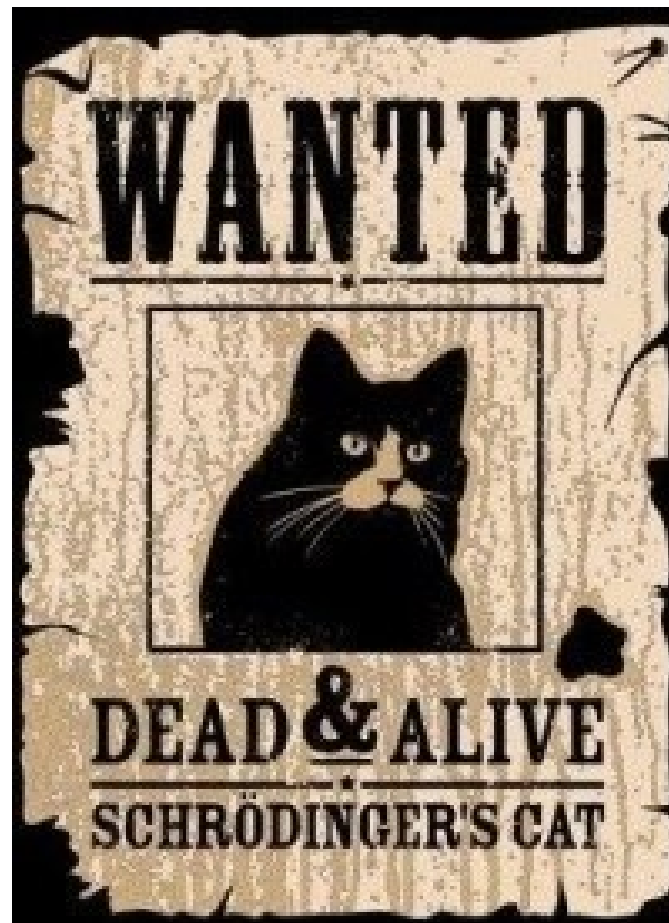
Копенгагенская интерпретация

- Для замкнутой микросистемы мы можем записать уравнение Шрёдингера и его решать.
- При измерении макрокопический «классический» прибор взаимодействует с квантовой системой и возникают вероятности.
- Вероятности считаются по правилу Борна. Вопрос «Что именно происходит при измерении?» не задаётся.

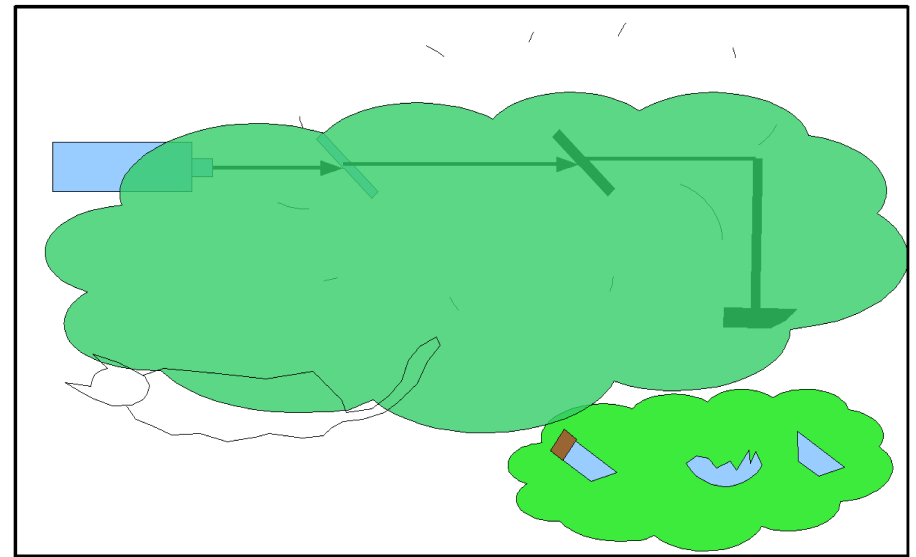
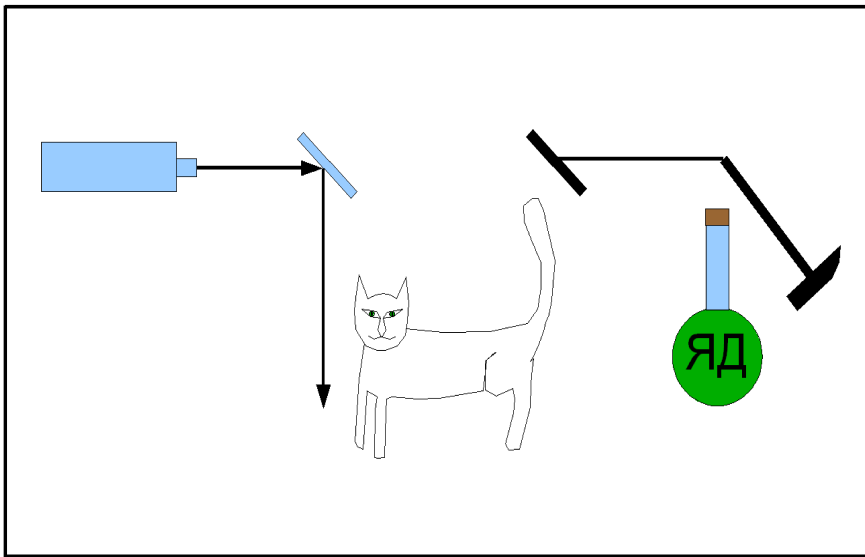
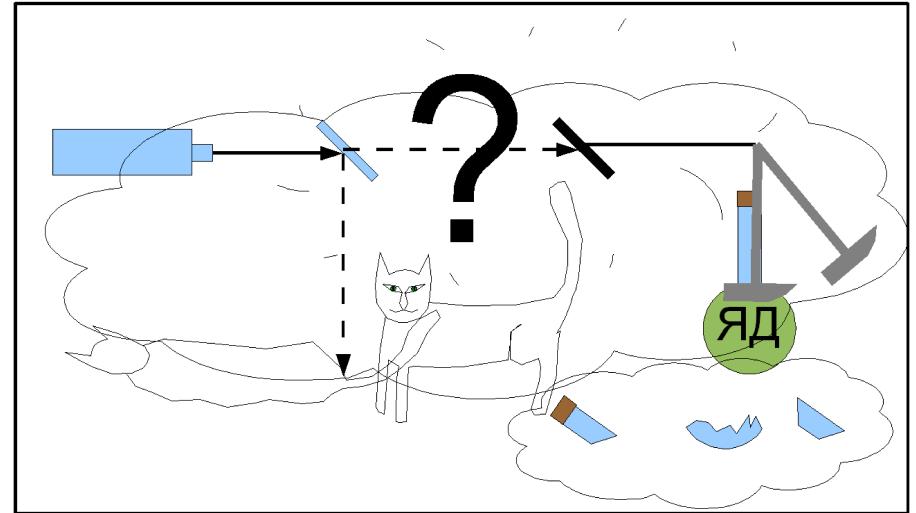
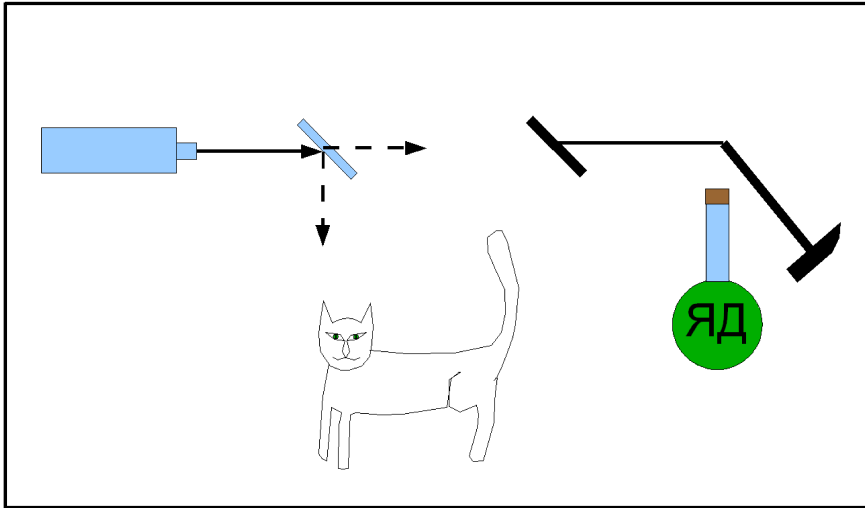
Интерференция на 2-х щелях (чудо интерференции)



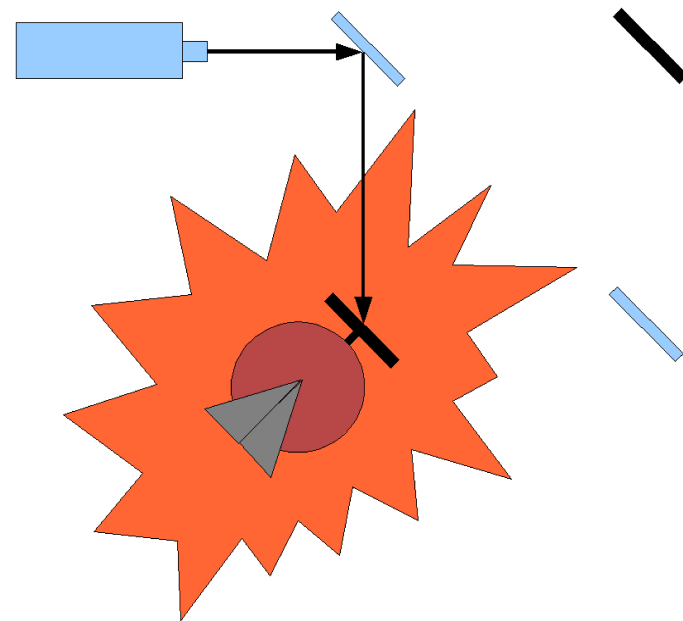
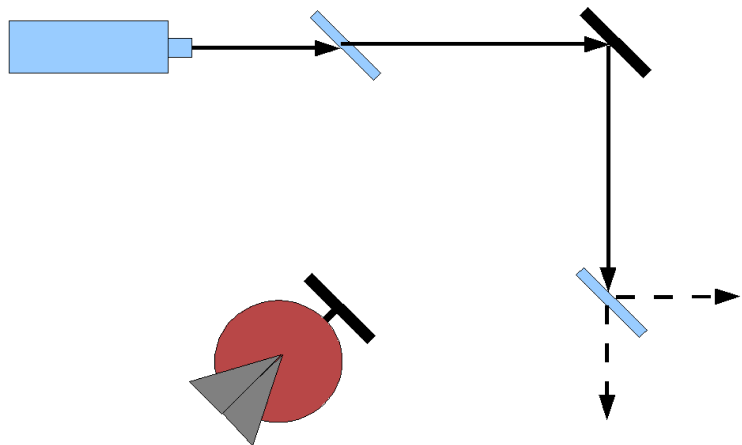
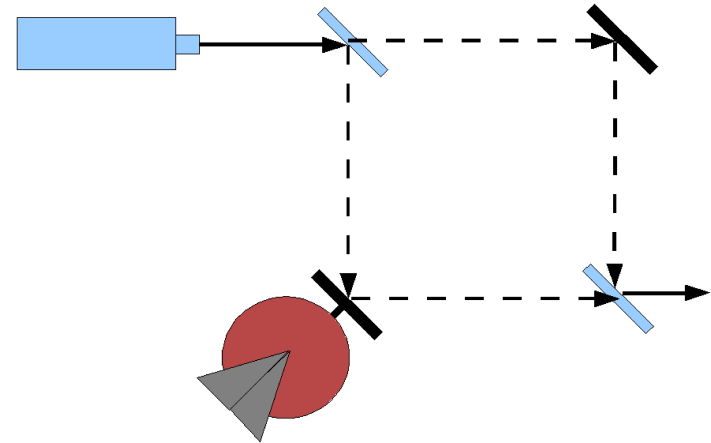
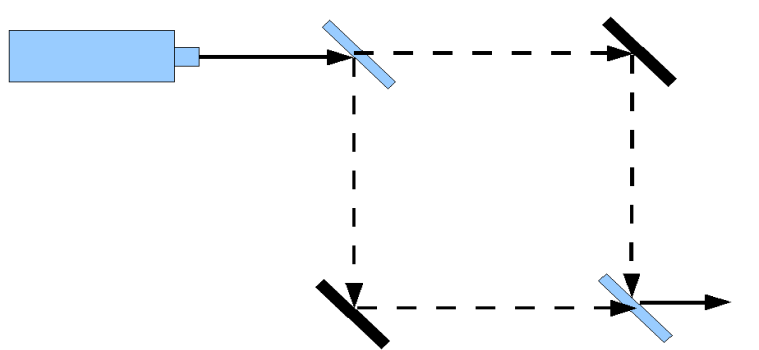
Знаменитый Кот Шрёдингера



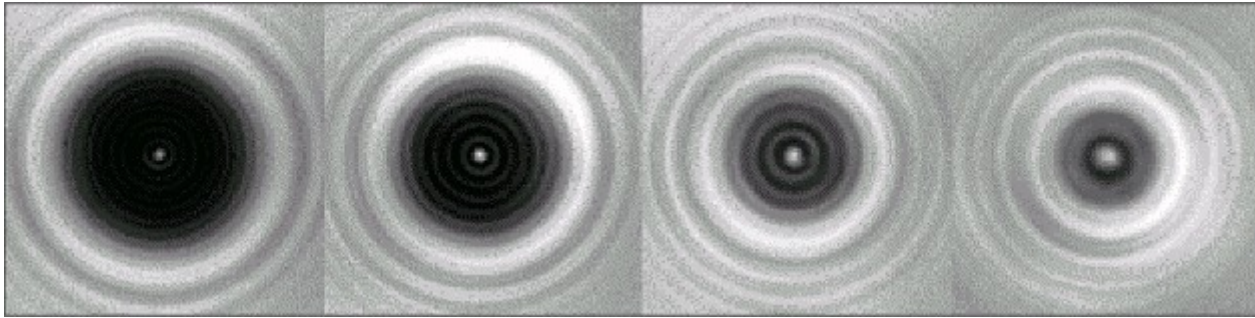
Фотон может быть в суперпозиции, а может ли Кот?



Измерение «без взаимодействия» (чудо дифракции)



При дифракции на чёрном шаре
отклоняются те фотоны, которые
в шар не попали!



На рисунке тень чёрного диска с
дифракционной картиной.

В центре тени — пятно Пуассона.

Квантовый эффект Зенона

ДВИЖЕНИЕ

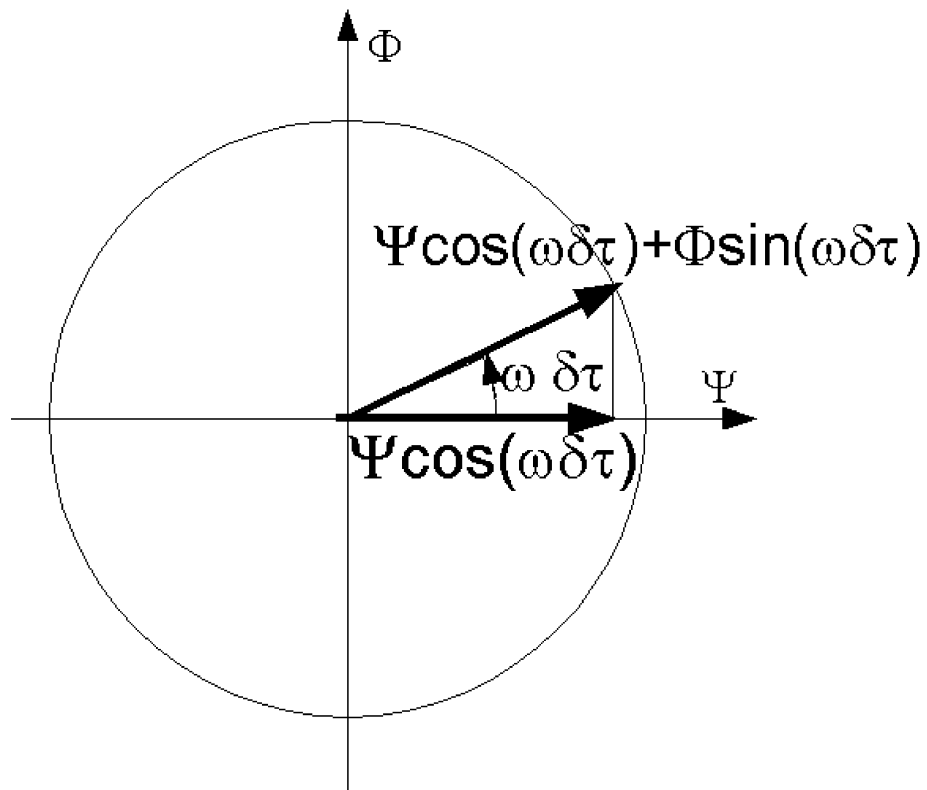
Движенья нет, сказал мудрец брадатый.
Другой смолчал и стал пред ним ходить.
Сильнее бы не мог он возразить;
Хвалили все ответ замысловатый.
Но, господа, забавный случай сей
Другой пример на память мне приводит:
Ведь каждый день пред нами солнце ходит,
Однако ж прав упрямый Галилей.

А. С. Пушкин

Апория «Стрела»

- Летящая стрела в каждый момент времени где-то находится/покоится, но стрела не может одновременно лететь и покоиться, а значит движение невозможно.
- Если очень точно измерить положение летящей частицы, то её волновая функция в очень узкий волновой пакет, для которого неопределённость координаты мала, а неопределённость импульса очень велика, после этого летела частица или покоилась будет уже не важно.
- Если повторять измерение очень часто, так, чтобы волновой пакет не успел расплыться и сдвинуться, то измерение компенсирует эволюцию волновой функции и частица каждый раз будет обнаруживаться в одном и том же месте (т.е. Перестанет двигаться)

Математика эффекта Зенона



$$p(\text{нет}) = \sin^2(\omega \delta t)$$

$$\begin{aligned} P(\text{нет}) &\sim n \quad p(\text{нет}) = \\ &= n(\omega t/n)^2 = \\ &= (\omega t)^2/n \rightarrow 0 \end{aligned}$$

Квантовая логика

- «да» и «нет» - взаимоисключающие состояния квантового бита.
- «да»+«нет» и «да»-«нет» — ничуть не хуже (поворот осей на 45°)
 - Вспоминаем Кота Шрёдингера

Классическая «нелокальность» (классическая корреляция)

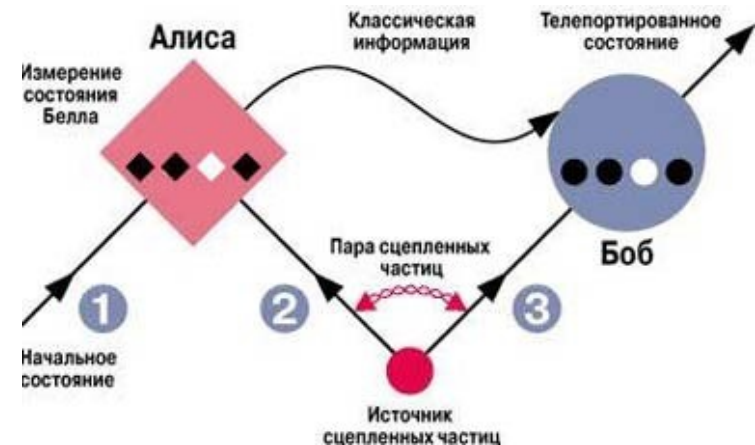
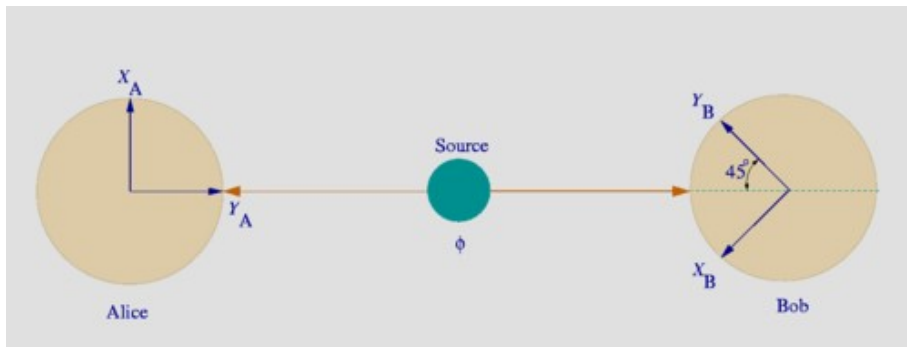


Квантовая нелокальность (квантовая корреляция)

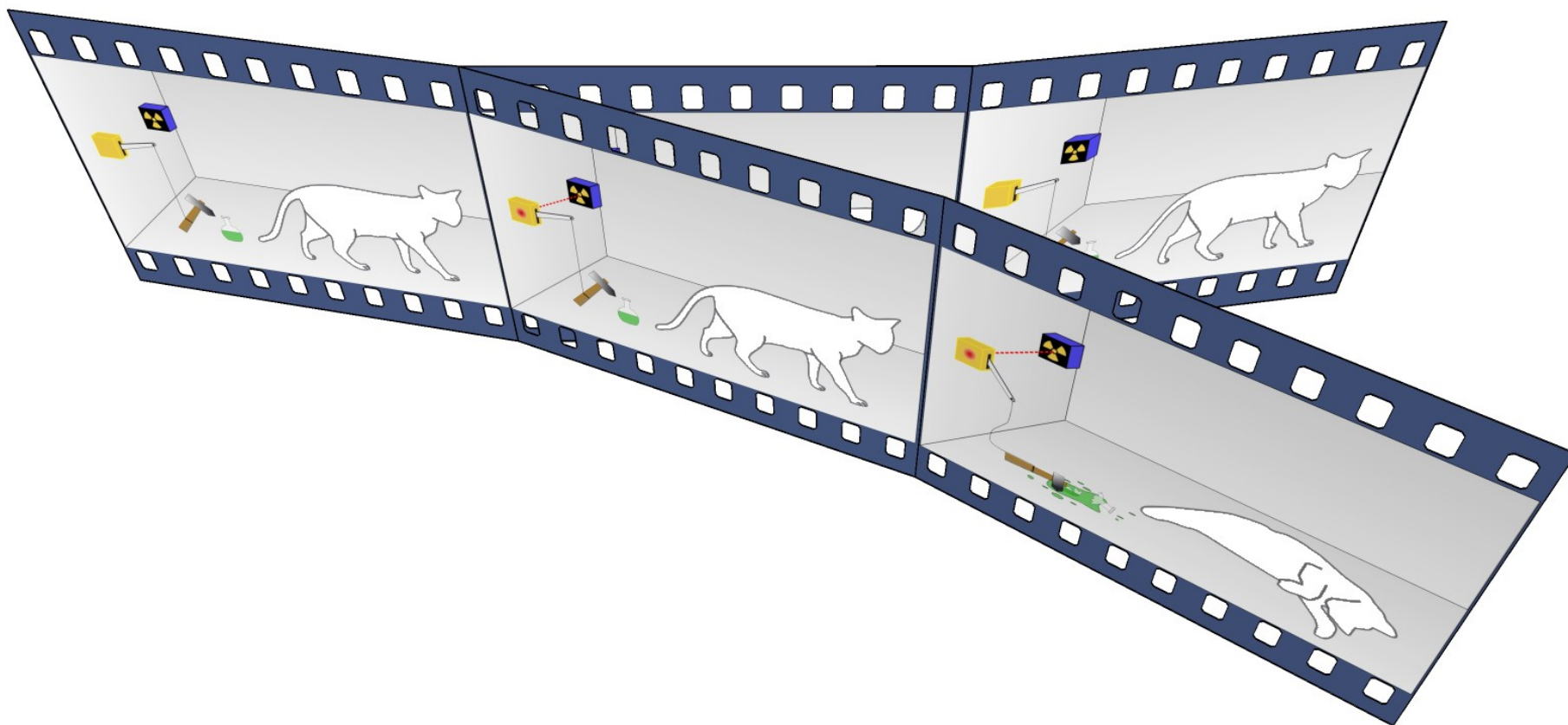
$$\begin{aligned} &\text{вверх} * \text{вниз} - \text{вниз} * \text{вверх} = \\ &= \text{вправо} * \text{влево} - \text{влево} * \text{вправо} \end{aligned}$$

Квантовая нелокальность существует!

- Нарушение неравенств Белла
- Квантовая телепортация



Многомировая интерпретация



Квантовый параллелизм:

каждый вариант учёного Кота Шрёдингера получает свой вариант контрольной работы... Но вопрос можно задать только один, причём всем сразу.



Ещё одна популярная интерпретация
квантовой механики:

Заткнись и считай !

(Применяется к философствующим аспирантам.)

Теория замечательно работает.
Что считать в каждом случае ясно.
Философия здесь не нужна.

Спасибо за внимание!

Иванов Михаил Геннадьевич



МФТИ

к.ф.-м.н., доцент

кафедра теоретической физики МФТИ

mgi@phystech.edu

<http://mezhpr.fizteh.ru/biblio/q-ivanov.html>