

Как понимать квантовую механику?

Философия квантовой механики

к.ф.-м.н. **Иванов Михаил Геннадьевич**
(кафедра теоретической физики МФТИ)
mgi@phystech.edu



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 теория 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 столкновителях (коллайдерах) elementарных 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.

Детерминизм 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 весрии
японских мультипликаторов [© P-G/R]

Недетерминизм 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.

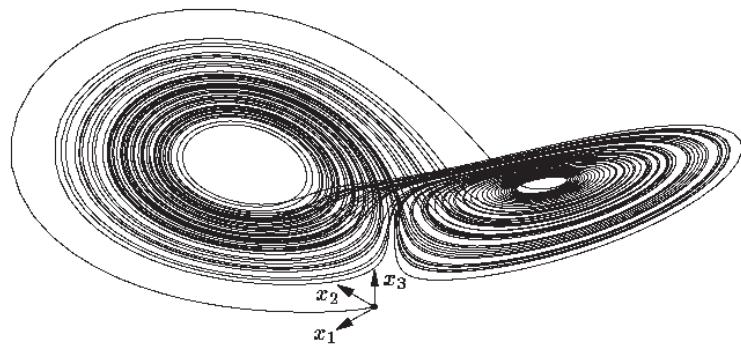
The recently recognized failure of predictability in Newtonian dynamics

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.

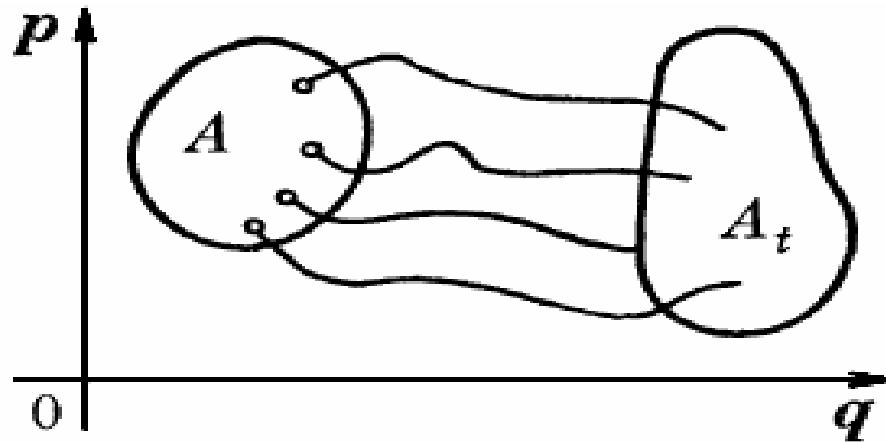


Аттрактор («бабочка») Лоренца — классический пример того, как детерминистическая динамика порождает хаос. Витки кривой проходят сколь угодно близко друг к другу, в результате чего сколь угодно малая ошибка приводит к тому, что со временем мы ошибёмся «лепестком». Первоначально аттрактор Лоренца возник 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:
«Геодезические
левоинвариантных метрик»
(1968)

Классическая механика — вероятностная теория



Мы не знаем, какая траектория на самом деле.

Вместо траекторий — эволюция облака вероятностей.

Неустойчивая динамика — «микроскоп» для начальных данных

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.

$$p(A \text{ или } B) = p(A) + p(B)$$

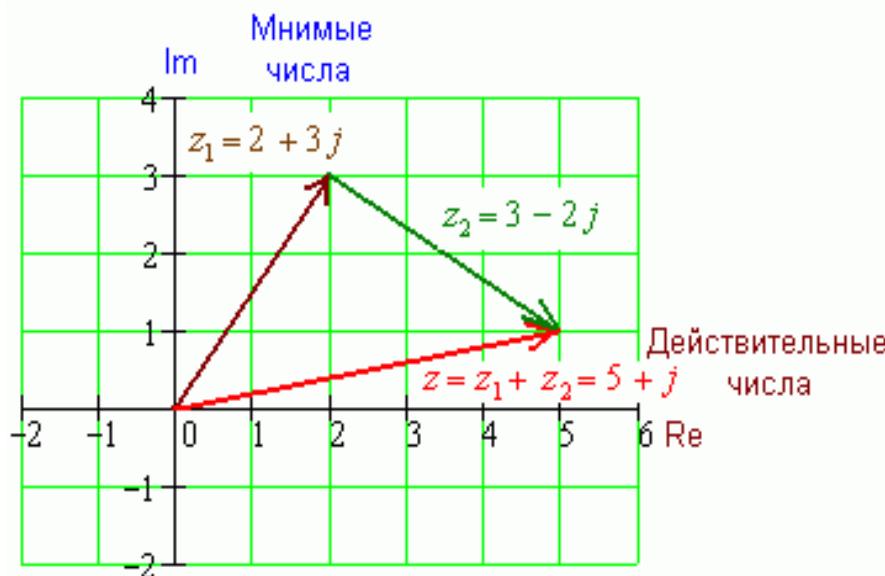
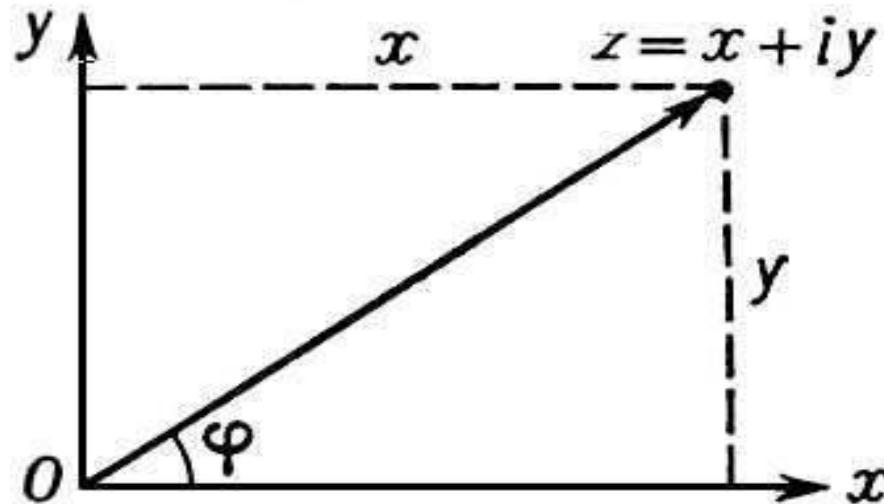
$$\frac{N(A) + N(B)}{N} = \frac{N(A)}{N} + \frac{N(B)}{N}$$

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

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

$$p(1 \text{ или } 2) =$$

$$= p(1) + p(2) +$$

$$+ 2\sqrt{p(1) p(2)} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$$

интерференционный член!

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 (проекционный 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 соотнести 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.

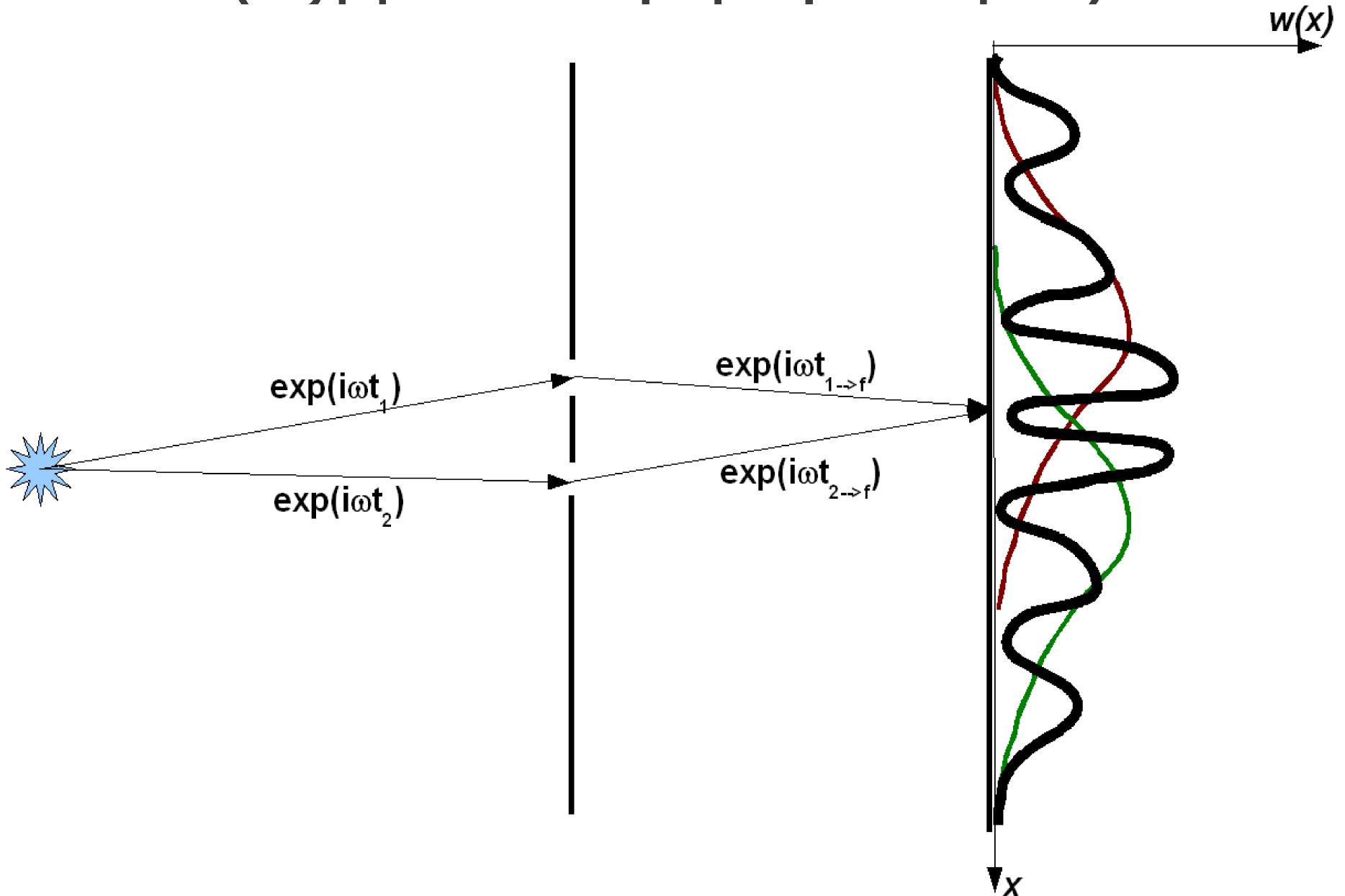
Принцип дополнительности

- 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.

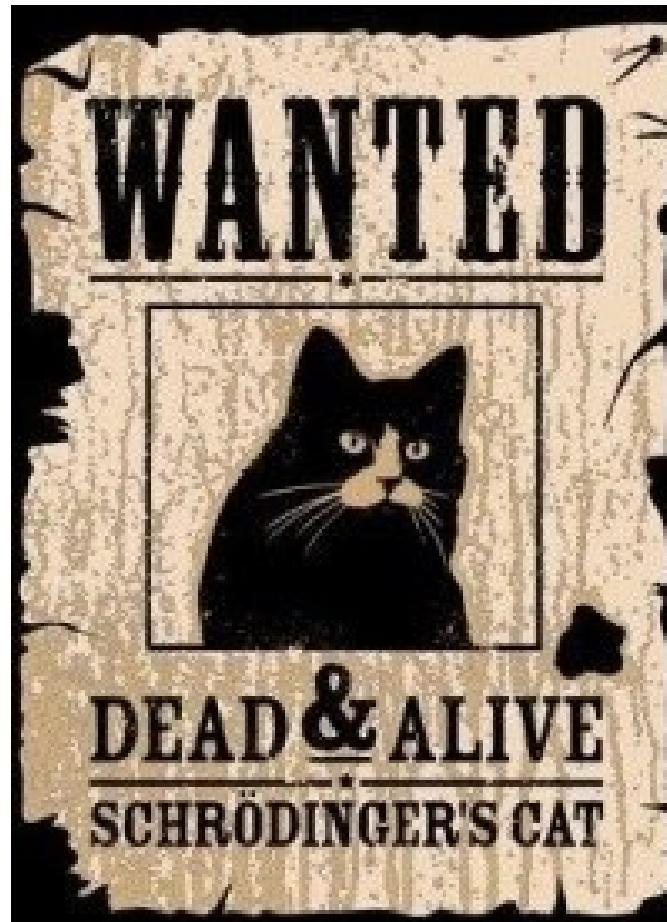
Копенгагенская интерпретация

- 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.

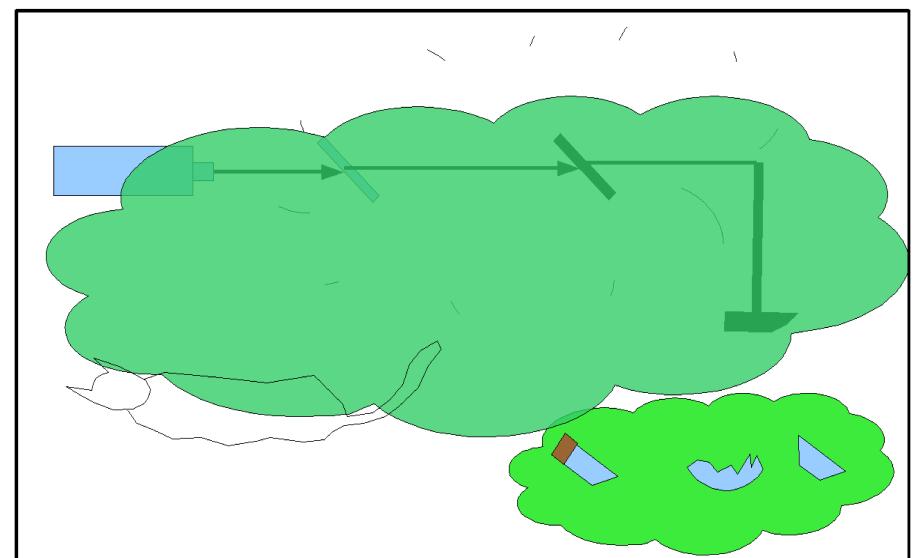
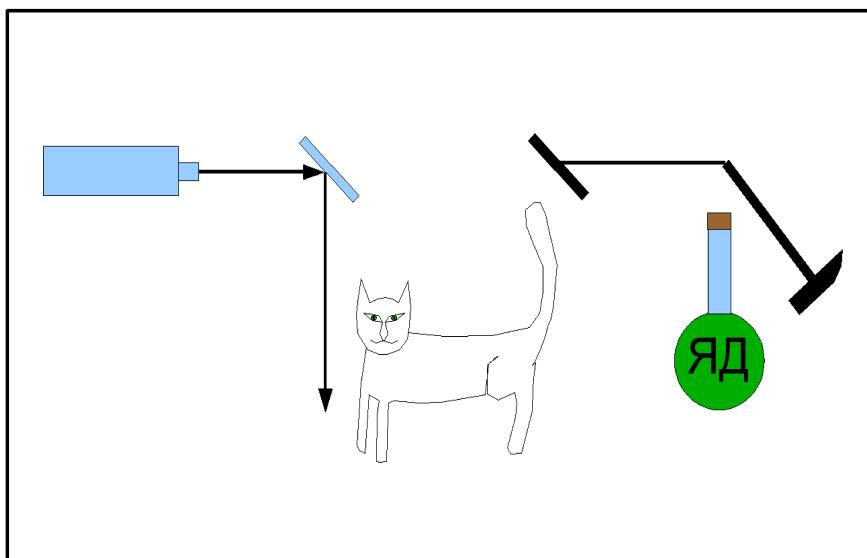
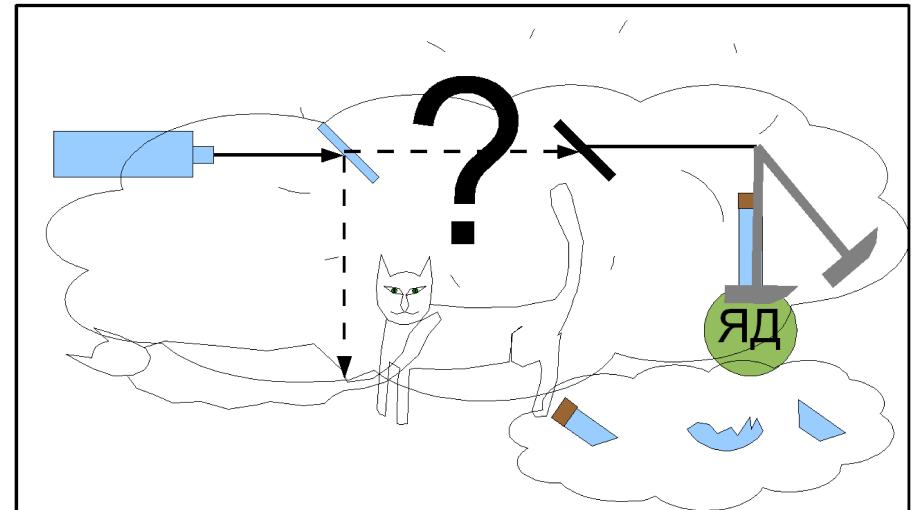
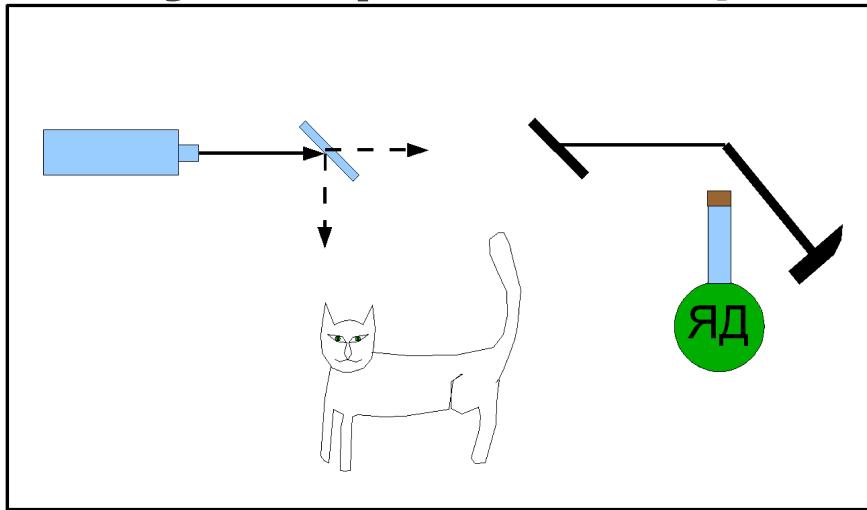
Интерференция на 2-х щелях (чудо интерференции)



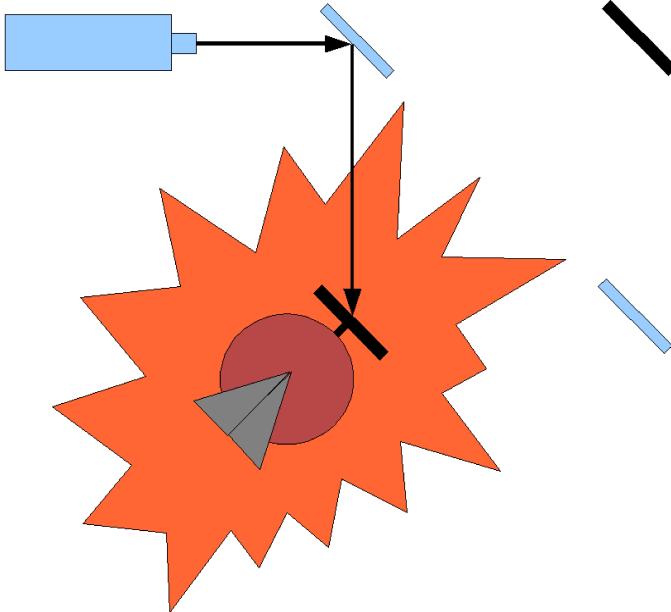
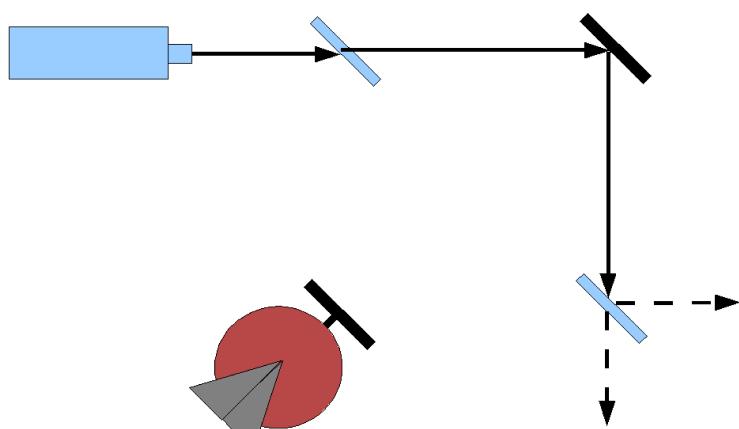
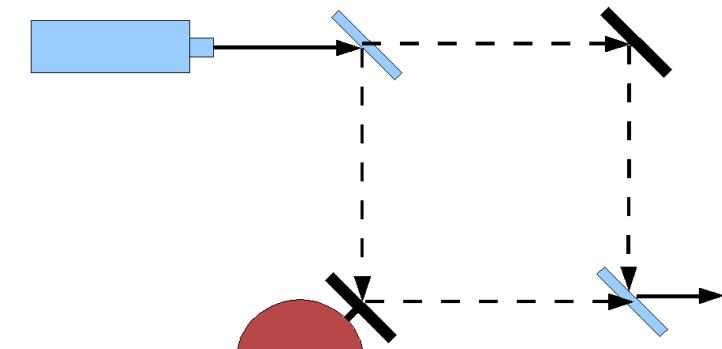
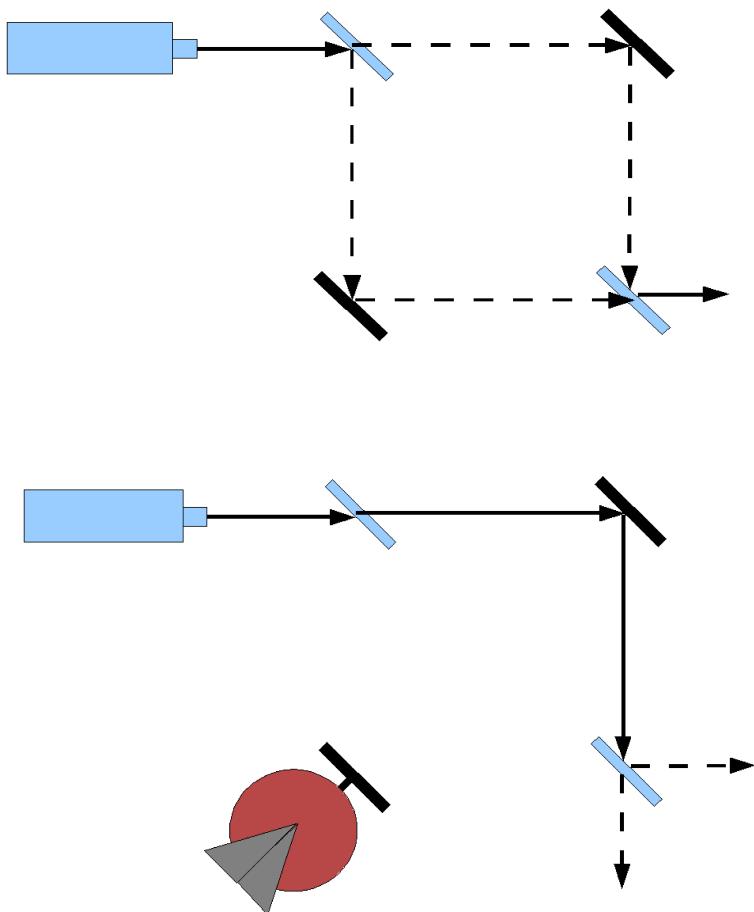
Знаменитый Кот Шрёдингера



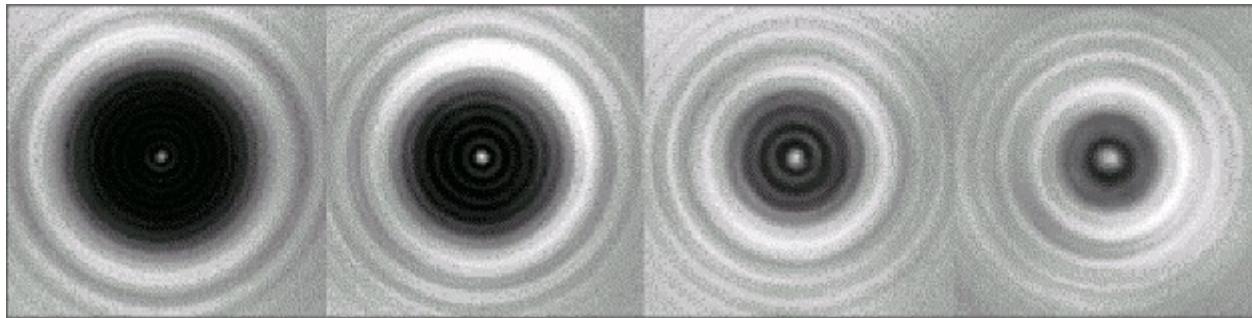
Фотон может быть в суперпозиции, а может ли Кот?



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

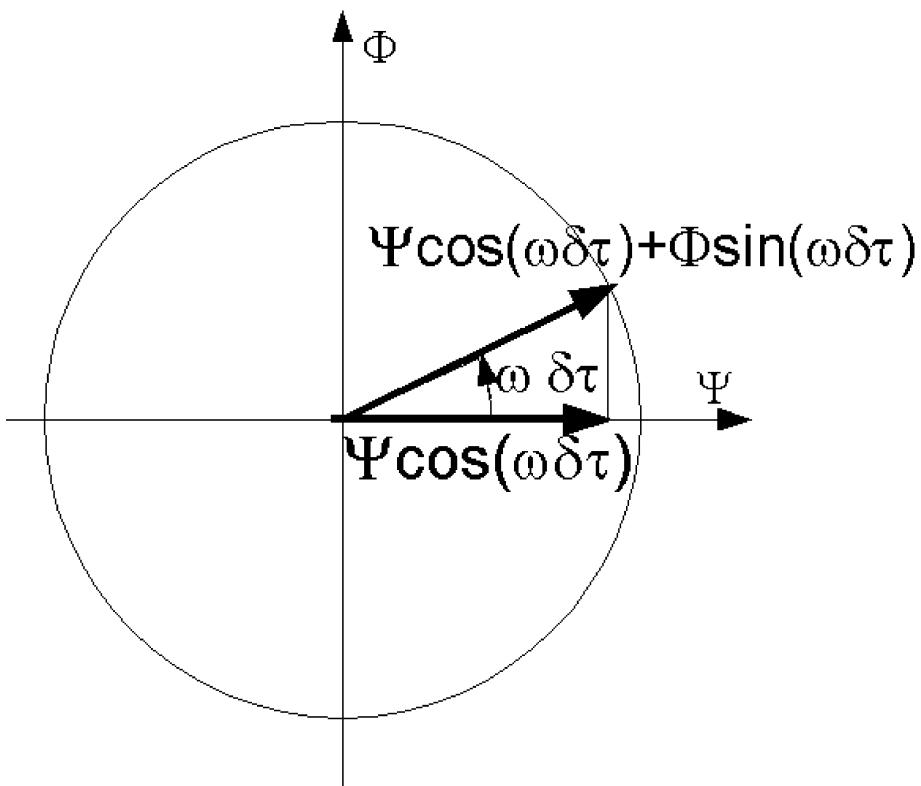
Движенья нет, сказал мудрец брадатый.
Другой смолчал и стал пред ним ходить.
Сильнее бы не мог он возразить;
Хвалили все ответ замысловатый.
Но, господа, забавный случай сей
Другой пример на память мне приводит:
Ведь каждый день пред нами солнце ходит,
Однако ж прав упрямый Галилей.

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 скомпенсирует 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 45^0)
 - Вспоминаем Кота Шрёдингера

Классическая «нелокальность» (классическая корреляция)



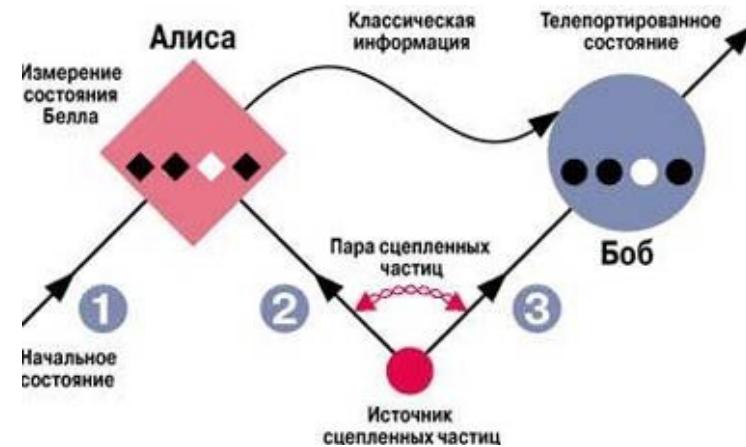
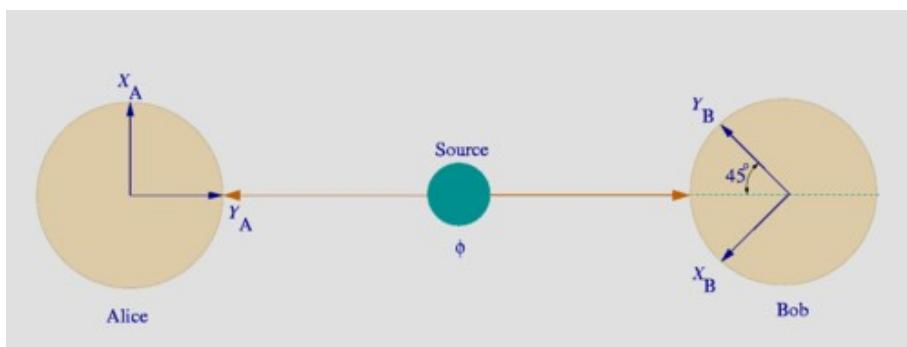
Квантовая нелокальность (квантовая корреляция)

вверх*вниз-вниз*вверх=

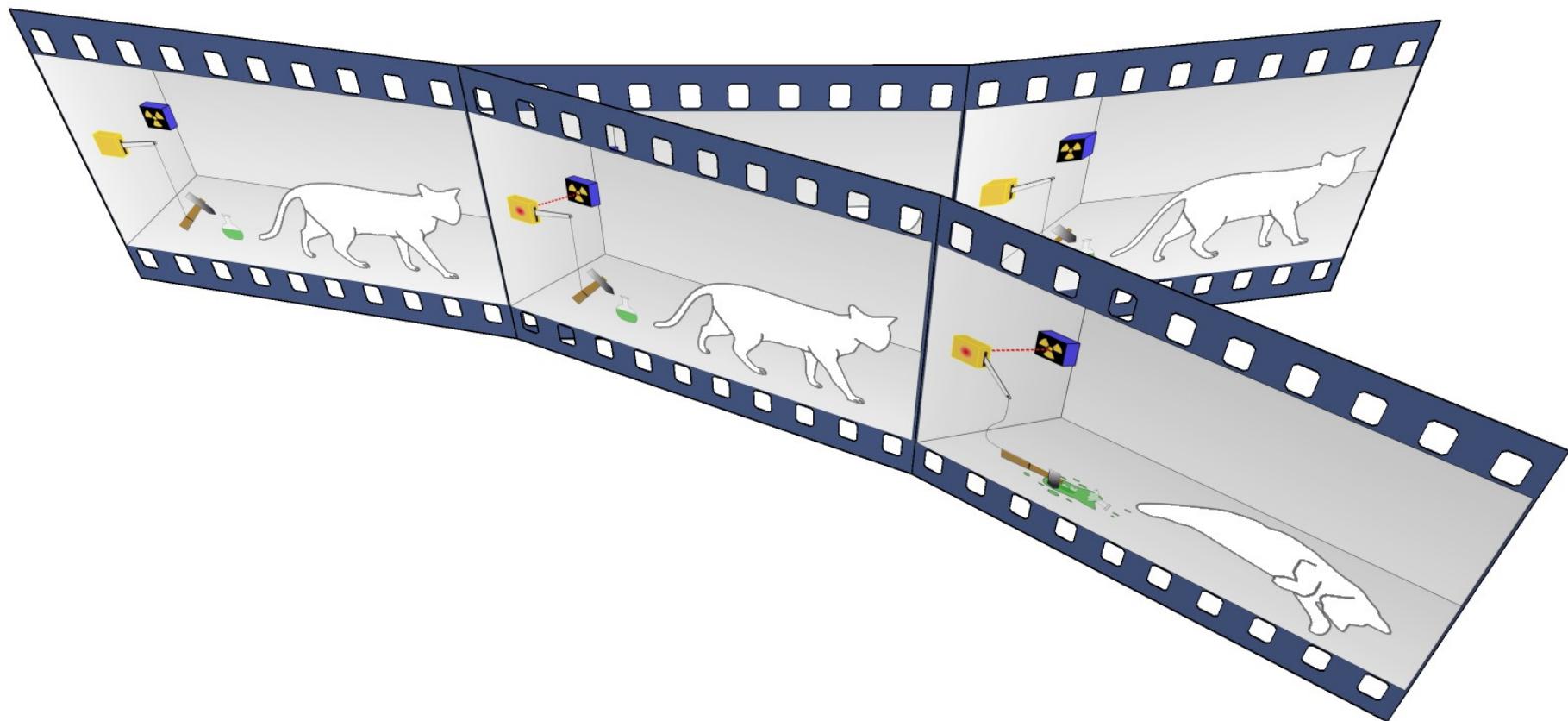
=вправо*влево-влево*вправо

Квантовая нелокальность существует!

- Нарушение неравенств Белла
- Квантовая телепортация

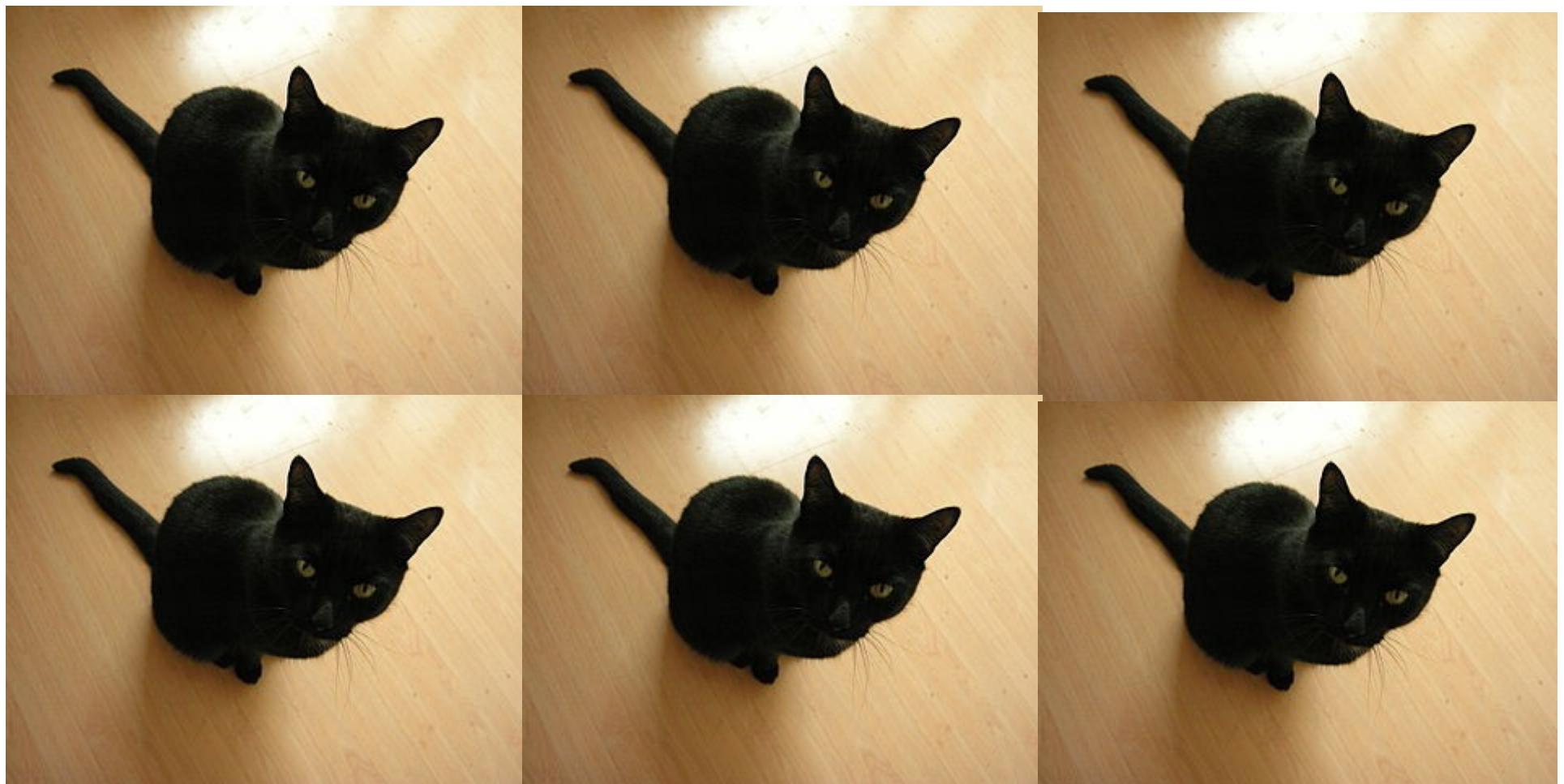


Многомировая интерпретация



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



к.ф.-м.н., доцент
кафедра теоретической физики МФТИ

mgi@phystech.edu

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