

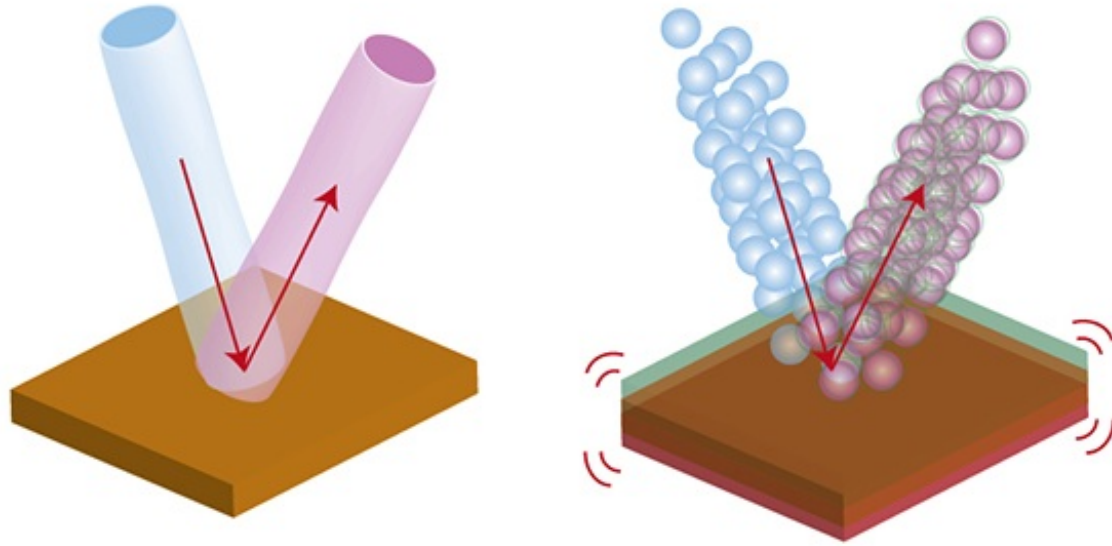
Профиль	9 Публикации	478 Комментарии	103 Избранное	25 Подписчики
---------	--------------	-----------------	---------------	---------------

27 ноября 2015 в 17:39

Сжатый свет или При чем здесь гравитационные волны

Физика*, Научно-популярное*, Лазеры

Привет, GT! Сегодня поговорим об одном необычном состоянии света и о его не менее необычных применениях. Добро пожаловать под кат.



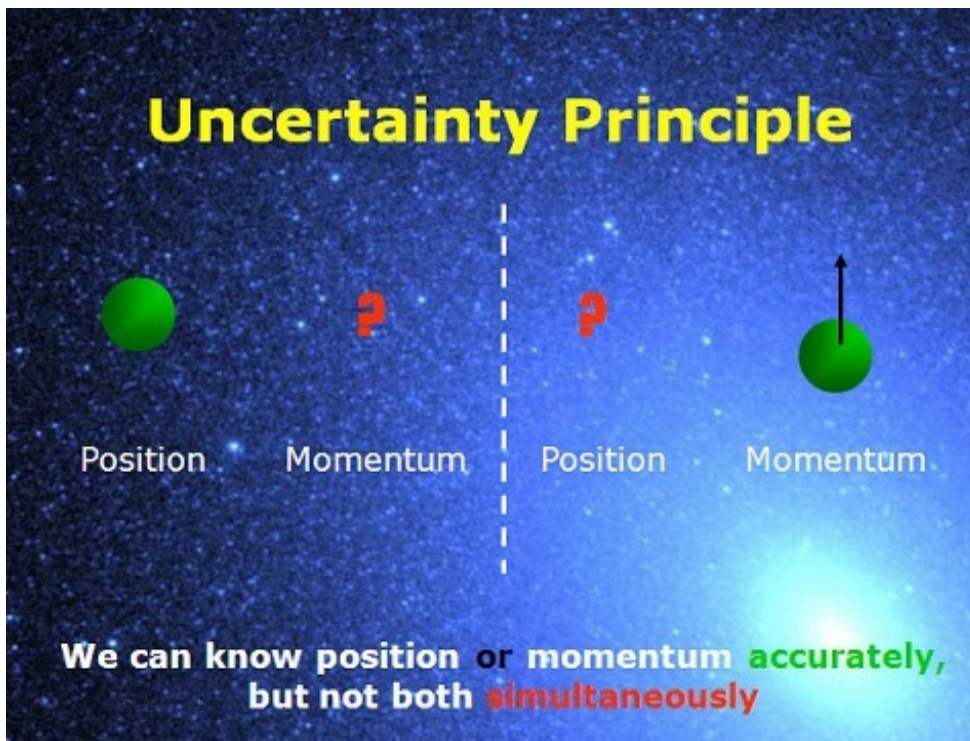
Полицейский останавливает Гейзенберга, превысившего скорость.

– Вы хоть знаете с какой скоростью вы ехали?

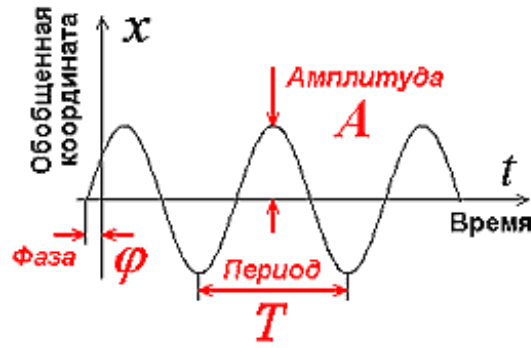
– Нет, но зато я точно знаю, где я находился.

(бородатый анекдот)

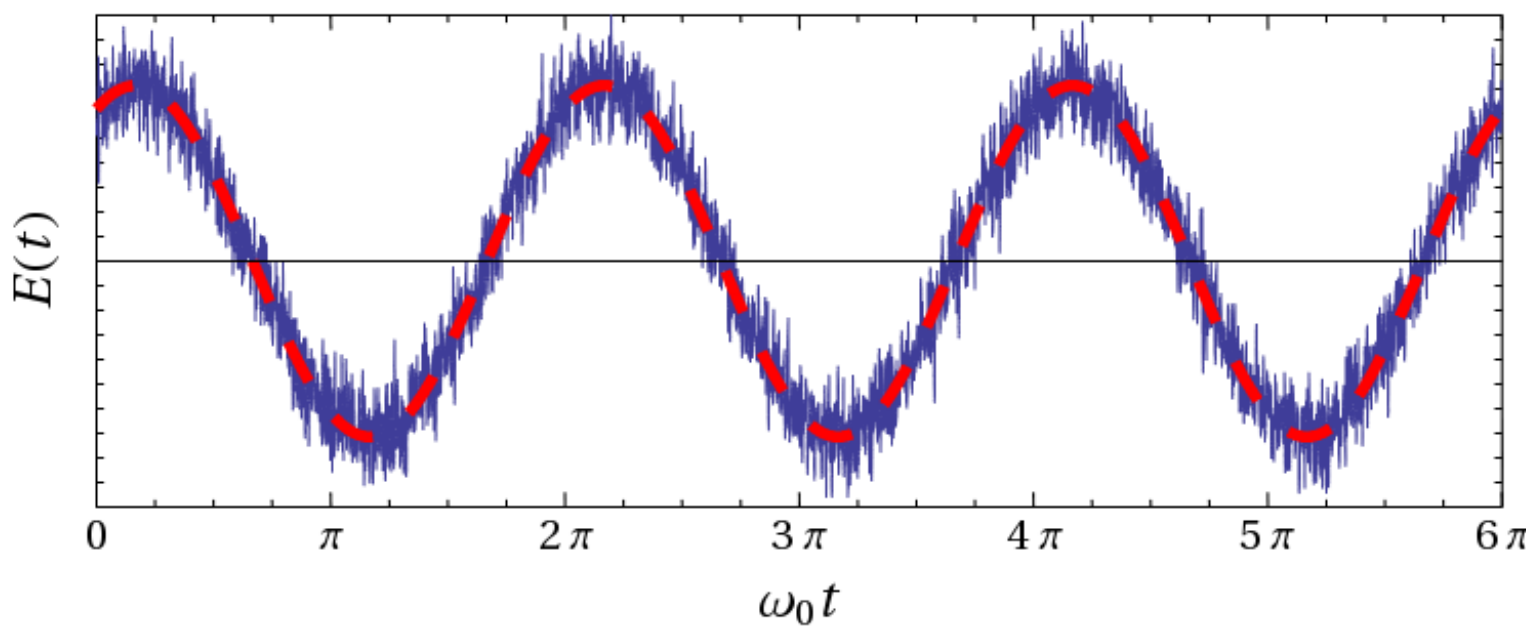
Соотношение неопределенностей Гейзенберга запрещает одновременно измерить координату и скорость (импульс) частицы. При этом никто не мешает точно померить одну из величин – но тогда неопределенность второй станет еще больше.



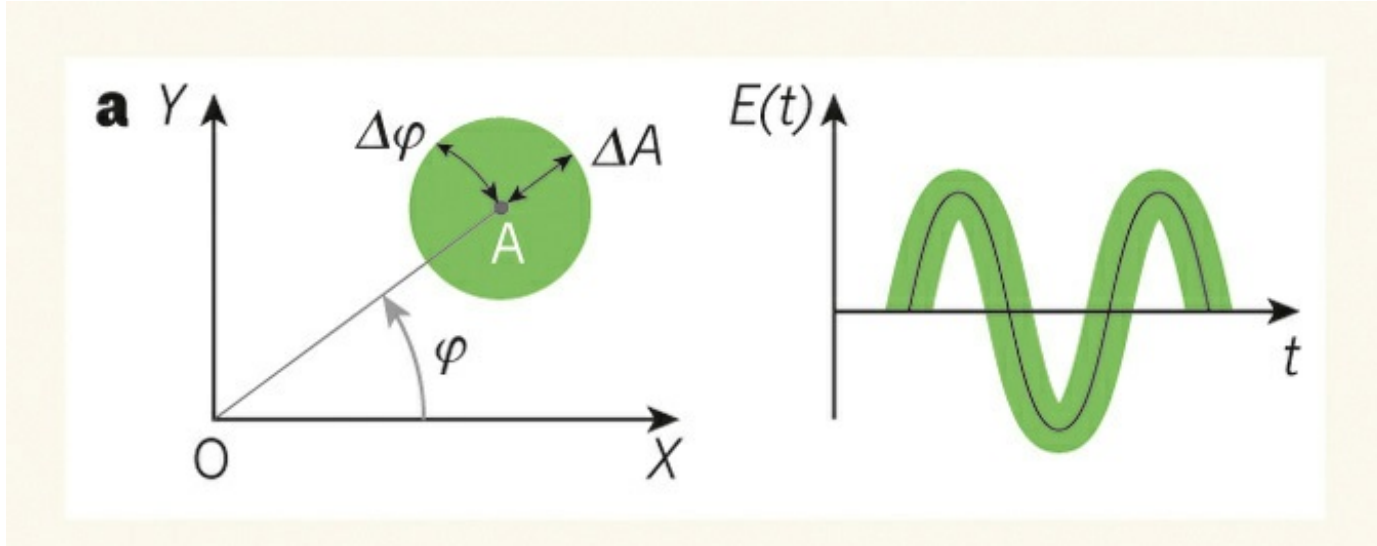
Вообще соотношения неопределенностей встречаются в физике довольно часто. Например, такое же соотношение верно для электромагнитной волны: оно связывает ее **интенсивность** (= число фотонов) и **фазу**:



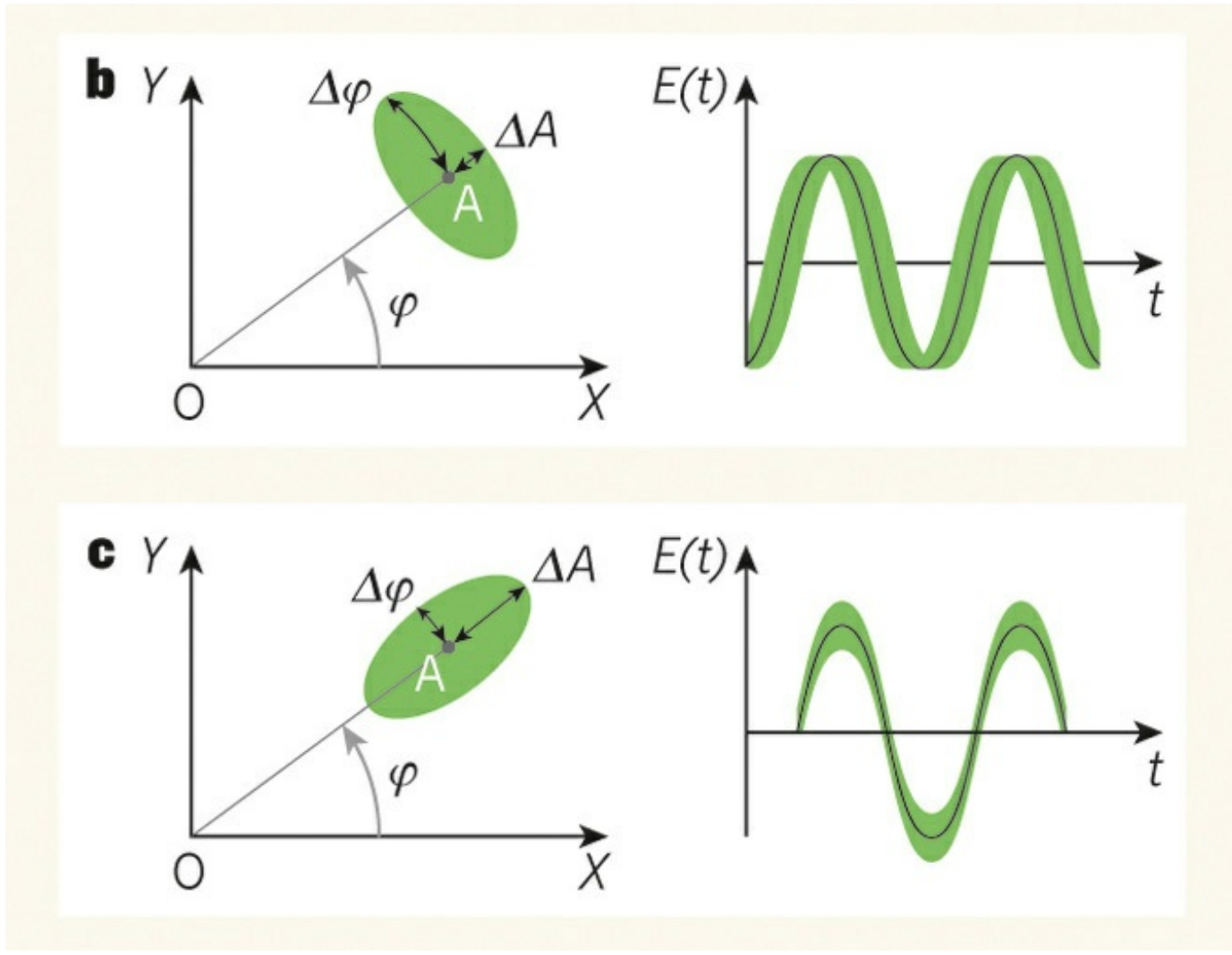
Из-за этой неопределенности мы не можем точно измерить описываемую волной синусоиду, для наблюдателя она всегда будет в шумовой дымке:



Это можно наглядно показать на круговой диаграмме, где амплитуде соответствует радиус до точки, фазе – угол между направлением на точку и осью X. Зеленым показана неопределенность:



При этом никто не мешает точно определить **либо** амплитуду, **либо** фазу. Тогда кружок погрешностей превратится в эллипс, сжавшись в одном направлении и вытянувшись в другом:



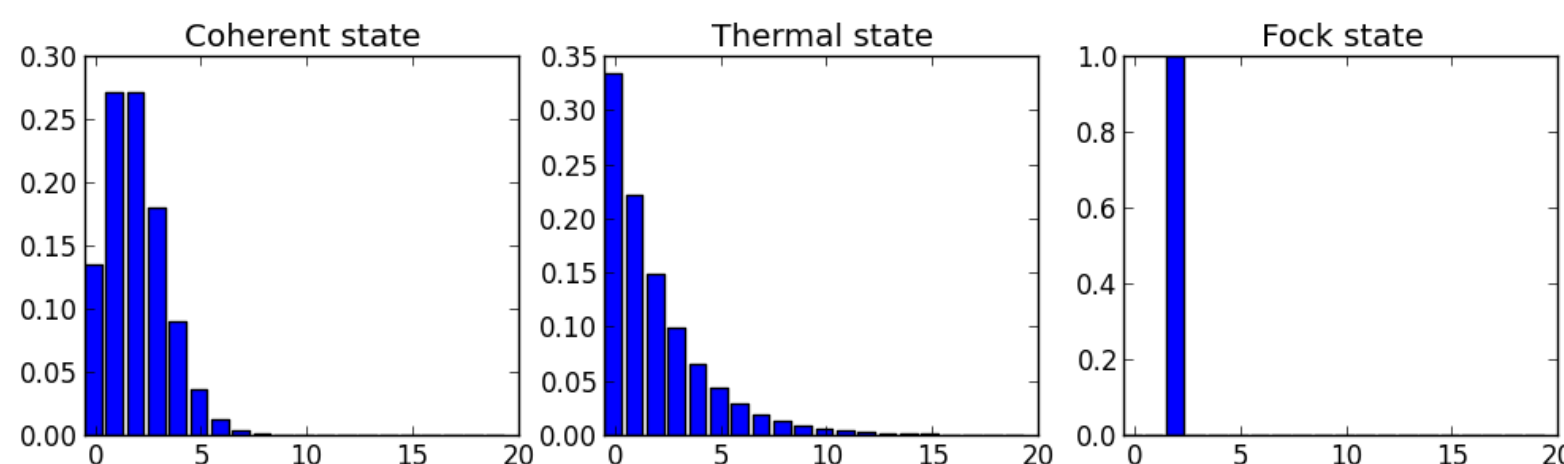
Такое состояние называется **сжатым светом**, потому что флуктуации амплитуды или фазы сжимаются вдоль одной из осей, уменьшая ошибку измерения. Первое называют **амплитудным сжатием** (эллипс вытянут поперек радиуса, можно точно померить амплитуду в максимумах-минимумах синусоиды); второе – **фазовым** (эллипс вдоль радиуса, можно померить фазу в нулях синусоиды).

Почему это важно?

Для обычного света мы не можем померить амплитуду или фазу точнее, чем нам дает кружок погрешностей. Это называется **стандартным квантовым уровнем шумов**. Сжатый свет позволяет уменьшить погрешность в одном направлении и «поднырнуть» под этот уровень шумов. В каком-то смысле мы можем [пафос_mode_on] **делать более точные измерения, чем того хотела бы природа** [пафос_mode_off].

Простой пример.

Любой источник света каждую секунду генерирует целое число фотонов. Оно может меняться от секунды к секунде из-за квантовой природы света, образуя распределение числа фотонов (я упоминал это в [рассказе про Хэнбери Брауна и Твисса](#)).



Число фотонов – это то же самое, что и интенсивность света. То есть интенсивность немного «шумит» — меняется от секунды к секунде. Это и есть стандартный квантовый уровень шума.

А вот если число фотонов не меняется от секунды к секунде (рисунок справа), то интенсивность строго постоянна и лишена какого-либо шума. Именно это будет светом, максимально сжатым по амплитуде. Поток фотонов при этом выглядит как-то так:

Реклама

Самое читаемое

Сейчас Неделя Месяц

Надёжность SSD в реальном мире: опыт Google 14

Windows 98 — теперь и в браузере 22

Дискуссия в Википедии: иллюстрировать ли статью о порнофильме самим фильмом? 36

2 суток на создание жилого дома: 3D принтеры помогают строить дома 13

Как получить статус книги-бестселлера на Amazon за 3 доллара 7

Законопроект «10 лет за хентай» вчера был принят в первом чтении 346

Студенты из Огайо пытаются разогнать электромобиль VBB-3 до 643,75 км/ч 15

В английской Википедии найдены 272 мистификации, которые просуществовали дольше года. Рекорд — 10 лет и 1 месяц 39

Apple ответила на требования ФБР. В суде компанию поддержат Google, Facebook и Microsoft 89

Google показала нейросеть, способную узнать страну по фотографии (а также город и улицу), даже если фото сделано в доме 63

Вопросы по теме

Какой выбрать для дома измеритель электромагнитных полей? 3

Как происходит передача заряда? 0

Как именно волны проходят сквозь материалы? 2

Какое среднее время удара футболиста по мячу? 1

Куда публиковать научную статью? 5



Incoming photons

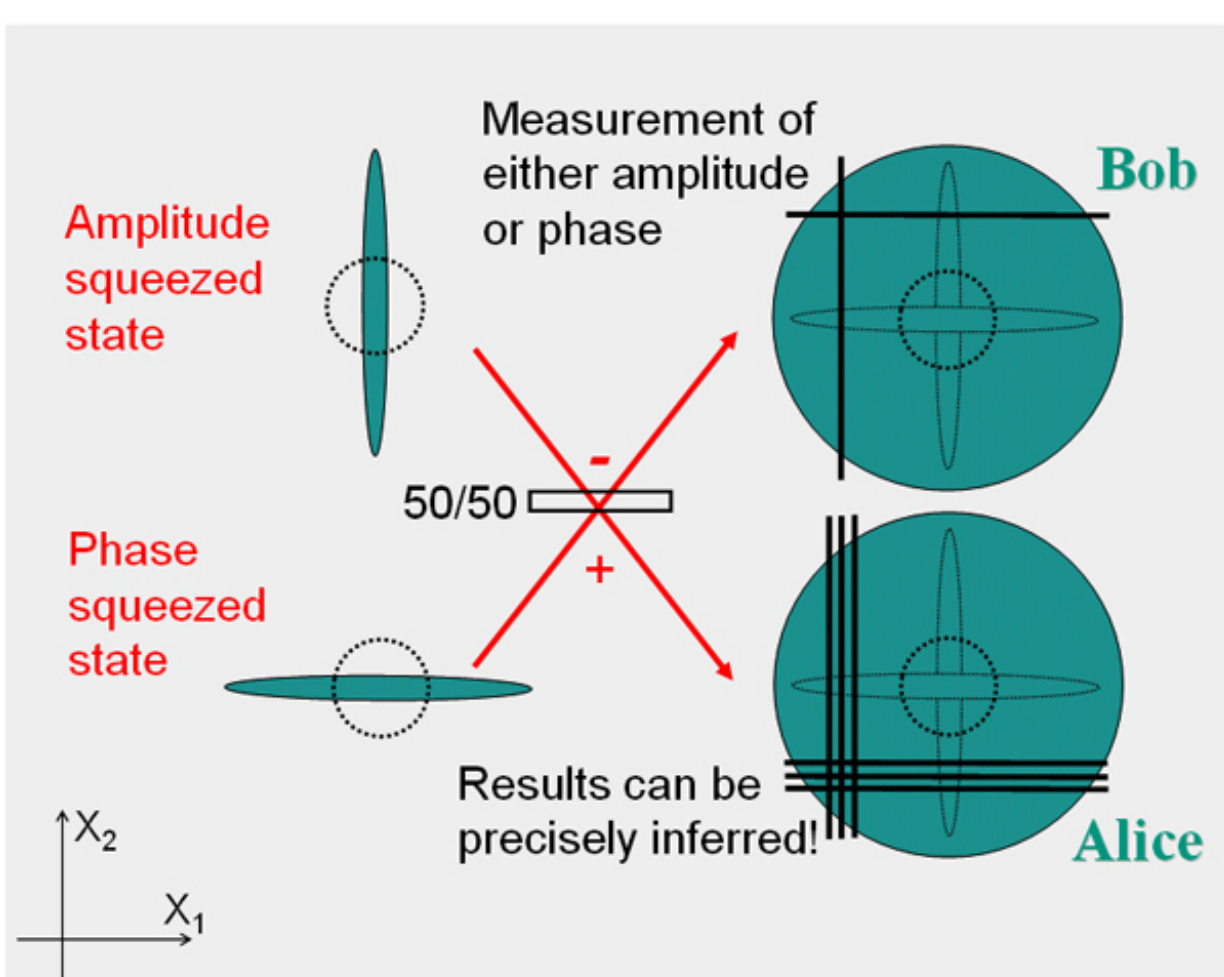
То есть фотоны испускаются строго периодически. Если периодичность нарушается, свет все равно остается до какой-то степени сжатым.

Зачем это нужно?

В отличие от других экзотических объектов, применение сжатого света оказались весьма перспективными.

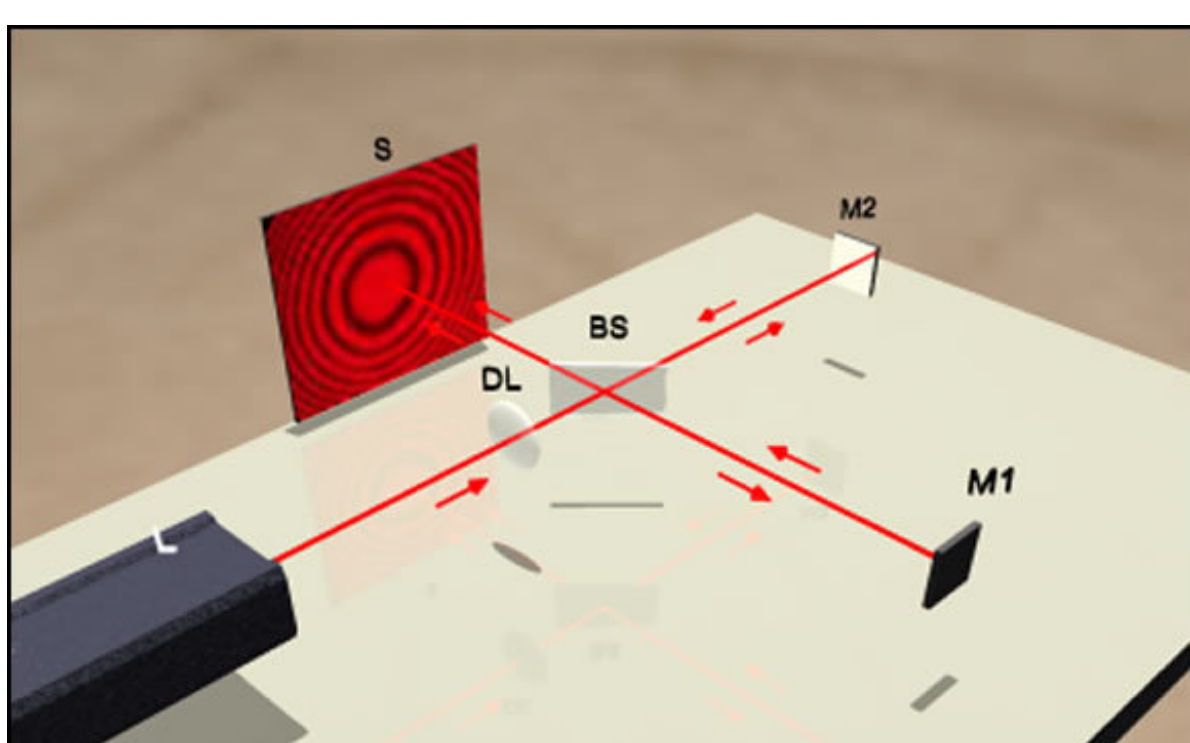
Телеком. Передача информации при помощи модуляции сжатой переменной (амплитуды (AM) или фазы (FM), более общий термин квадратуры) позволяет увеличить отношение сигнал/шум. Возможно построение усилителей, который добавляют шум только в ту квадратуру, которая несжата и не несет полезного сигнала.

Квантовая запутанность. В некоторых случаях можно проводить параллели между запутанностью фотонов и сжатием света. Например, можно запутать два пучка света: один сжатый по амплитуде, второй – по фазе.



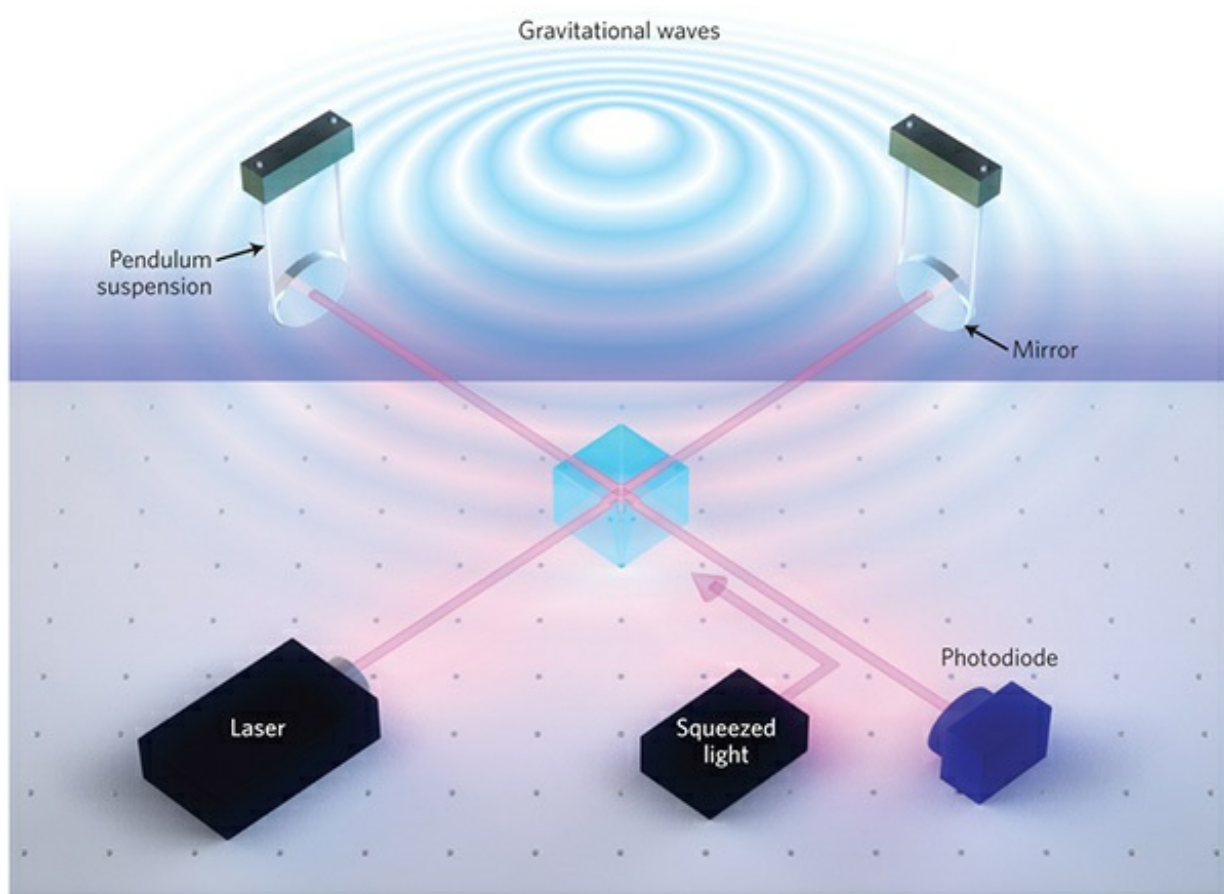
Квантовая криптография. Вытекает из квантовой запутанности и картинки выше. В простейшей схеме квантовой криптографии Алиса передает Бобу информацию при помощи фотонов со случайной поляризацией. Роль поляризации может играть направление сжатия: при неправильном его выборе злоумышленник, перехвативший канал связи, измерит не сигнал, а шум.

Детекторы гравитационных волн. Для этой задачи нужно улавливать мельчайшие колебания огромных грузов. Обычно это делается при помощи интерферометра Майкельсона. Он устроен очень просто: лазер, два зеркала и одна полупрозрачная пластинка:



Лазер отражается от двух зеркал, два отражения интерферируют, и на экране образуется интерференционная картина. Если одно из зеркал движется, то движется и картина. Происходит это из-за изменения фазы волны: зеркало отодвинулось – путь лазера стал чуть дольше, набежала дополнительная фаза – интерференционные полосы сдвинулись.

Так как интерферометр измеряет фазу, его разрешение не может быть лучше, чем неопределенность фазы. Для обычного лазера она ограничена стандартным квантовым уровнем шума. А вот если заменить лазер на источник фазово-сжатого света, то эта проблема исчезнет, и мы сможем измерять расстояния с невиданной точностью.



Сегодня это делается в одном из крупнейших детекторов гравитационных волн GEO600, и, по всей видимости, планируется на космическом детекторе LISA. Кстати, среди пользователей GT есть @Shkaff, который как раз этим и занимается и готов ответить на ваши вопросы в комментариях. :)

Точное измерение фазы. Фазово-сжатый свет может быть полезен для измерений методом фазового контраста – повседневной методики в современной биологии.

Как сгенерировать?

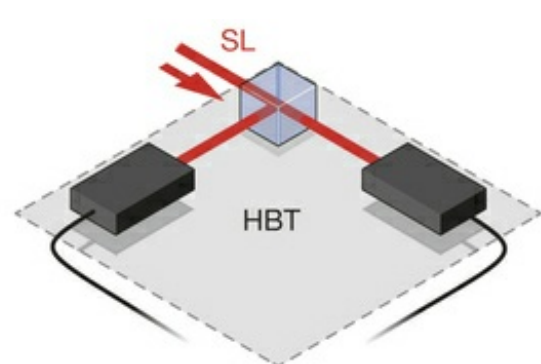
Создать сжатый свет не так просто. Для этого применяют нелинейные оптические процессы. На пальцах их объяснить довольно сложно, но один пример приведу.

В некоторых кристаллах наблюдается эффект под названием **нелинейность Керра** – зависимость показателя преломления от интенсивности света. Пошлем на такой кристалл лазерный импульс. У любого импульса интенсивность на фронтах ниже, чем в центре – а значит, показатель преломления наиболее сильно изменится там, где сейчас находится центр импульса. Разница показателей преломления приводит к тому, что фаза волны в центре и на фронтах меняется по-разному. Совокупность этих изменений приводит к тому, что фаза становится определена чуть лучше, чем обычно, а интенсивность – наоборот, чуть хуже. Здравствуй, сжатый свет :).

Как засечь?

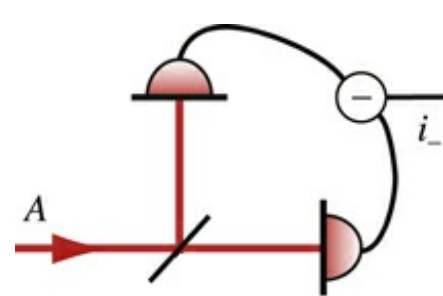
Измерить сжатый свет можно тоже несколькими способами.

1. Схема Хэнбри Брауна – Твисса.



В цикле про Хэнбри Брауна и Твисса я рассказывал, что корреляционная функция $g^{(2)}$ соответствует ширине распределения числа фотонов. Амплитудное сжатие света означает, что число фотонов определено лучше, чем обычно. Поэтому в широком смысле слова $g^{(2)}$ меньше единицы – признак сжатого света.

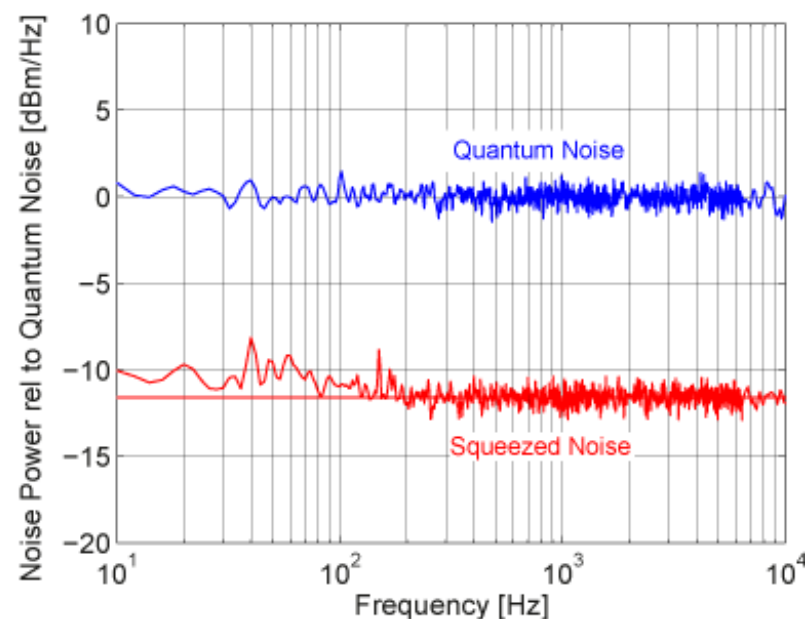
2. Балансный детектор. Это как схема Хэнбри Брауна – Твисса, но вместо корреляций мы либо вычитаем, либо складываем сигналы с двух диодов (по нашему желанию):



Полупрозрачное зеркало пропускает или отражает каждый фотон случайно. Эта случайность вносит в сигнал дополнительный **квантовый шум** (типа дробового). Такой шум имеет разный знак на двух диодах: если фотон отразился, то он не пролетит; если пролетел – не отразится.

Если мы вычтем сигнал одного диода из другого, то квантовый шум никуда не денется. А если сложим? Тогда шум обратен – дополнительный шумной это, очевидно, не прибавило.)

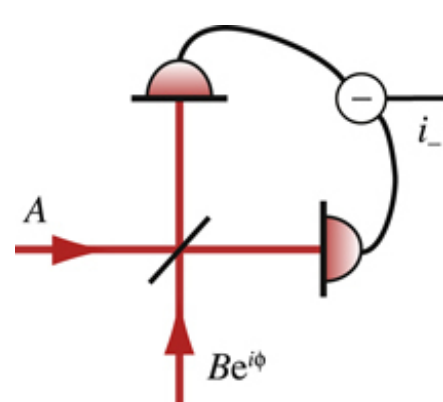
Итак, вычитание добавляет нам шум со стандартным квантовым уровнем, а сложение ничего не меняет. Если изучаемый свет был амплитудно-сжатым (т.е. «бесшумным»), то вычитание сделает его более шумным, а сложение – оставит без изменений. Переключаясь между сложением и вычитанием, мы можем измерять уровень шума, и если он отличается, то мы наблюдаем амплитудно-сжатый свет.



Примерно так выглядит шум после сложения (красный) и вычитания (синий). Красный шум гораздо слабее и соответствует сжатому свету.

3. Гомодинирование. Амплитудное сжатие измерить легко, а что же делать с фазовым? Если удастся «повернуть» ориентацию эллипса (то есть фазу света), то свет из сжатого по фазе станет сжатым по амплитуде. Фазу можно повернуть, смешивая свет с опорной волной. Это очень похоже на приемник-гетеродин, только в гетеродине частота опорной и изучаемой волн отличается, а в гомодине – нет (отсюда и название).

Еще в гомодине нужно подобрать фазу опорной волны. В электронике это делается фазовращателем, в оптике – линией задержки (чем позже придет свет, тем больше наберет фазу). Смешивание происходит на том же полупрозрачном зеркале:



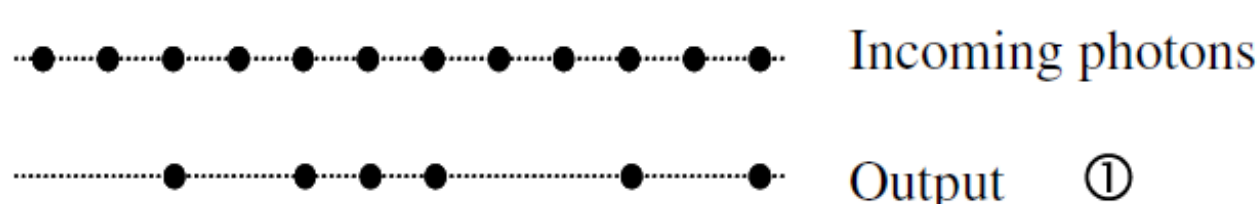
Опорная волна подходит снизу. А дальше – тот же балансный детектор.

И еще из интересного

Пока что сжатый свет используется только в сверхточной интерферометрии. Проблема в том, что он оказывается невероятно хрупким. Это легко понять на примере идеального амплитудно-сжатого света (поток фотонов строго периодичен):

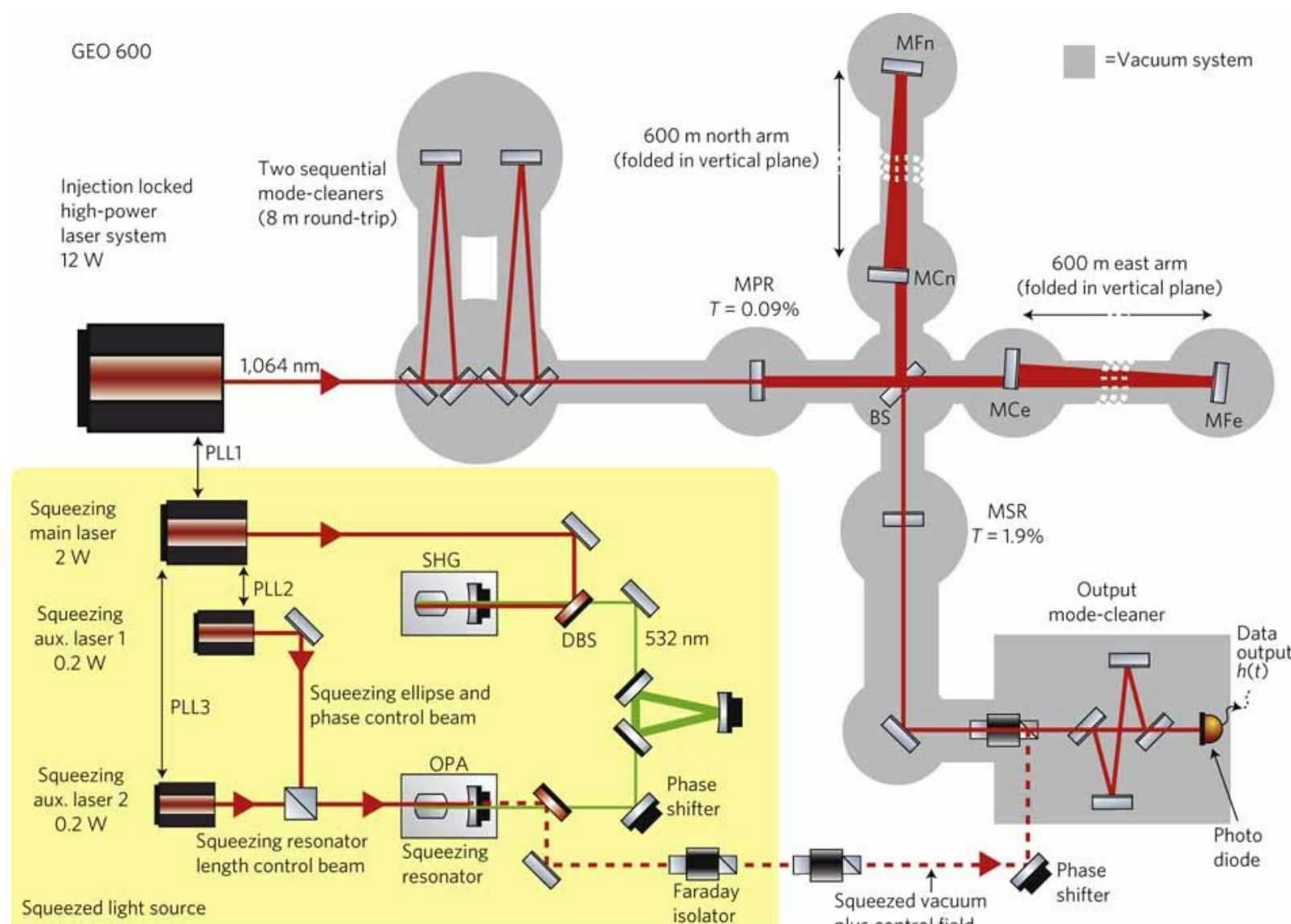


При распространении света неизбежны потери, которые всегда случайны. Это значит, что фотоны будут исчезать из потока случайным образом:



Как видно, от периодичности почти ничего не осталось. Равно как и от сжатия. Поэтому сжатый свет очень сложно передавать на большие расстояния.

Ну и напоследок давайте полюбуемся схемой гравитационного детектора GEO 600 под Ганновером:



Источник сжатого света – на желтом фоне. В нем используется нелинейный оптический процесс, но не нелинейность Керра, а генерация второй гармоники излучения. Красный пунктир – это и есть сжатый свет. Сверху-справа – интерферометр Майкельсона с плечами по 600 метров; зеркала подвешены на грузах, которые должны колебаться от гравитационных волн. Картина с интерферометра получается на фотодиоде в нижнем правом углу.

Источники

M. Fox. *Quantum optics: An Introduction* – Oxford University Press, 2006.

Спасибо @Shkalf за экспертные комментарии.

Картинки: КДПВ, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10.

сжатый свет, физика, квантовая оптика

+29 20,8k 71

Альберт @qbertych карма 47,0 рейтинг 0,4

Реклама

Похожие публикации

- +20 Квантовый компьютер Google работает 31,9k 40 16
- +37 Квантовая механика для всех, даром, и пусть никто не уйдёт обиженным: часть вторая 7,3k 274 33
- +99 Квантовая механика для всех, даром, и пусть никто не уйдёт обиженным: часть первая 29,2k 636 149

Комментарии (44)

- yatagarasu 27 ноября 2015 в 17:59 # +2 ↑ ↓
а какое минимальное расстояние между фотонами?
- Zenitchik 27 ноября 2015 в 19:12 # h ↑ +6 ↑ ↓
Никакое. Фотоны — это бозоны, они могут хоть друг на друга накладываться.
- voyager-1 27 ноября 2015 в 19:16 # h ↑ +4 ↑ ↓
У фотонов нет такой «ненависти» к друг другу — на них не действует принцип запрещения Паули, так что ограничений в этом плане нет. Ну разве что вы умудритесь накачать в очень маленькую область столько фотонов, что чёрная дыра образуется). Но это — явно ещё за пределами наших возможностей.
- yatagarasu 27 ноября 2015 в 20:11 # h ↑ +2 ↑ ↓
А сколько надо накачать?)
- Meklon 27 ноября 2015 в 20:38 # h ↑ +19 ↑ ↓
Лучше не надо) обещайте, что не будете.
- yatagarasu 27 ноября 2015 в 21:18 # h ↑ +1 ↑ ↓
Нет ну интересно же. Я же не усну пока не посчитаю.
А какой минимальный объём могут занимать несколько фотонов?
У фотона вообще объём есть?
- Хотя тут полагаю надо сразу исходить из радиуса Чёрной Дыры, которую стоит цель получить.
- DmitriyN 27 ноября 2015 в 21:59 # h ↑ +1 ↑ ↓
Вот тут почитайте о черных дырах из фотонов: [https://en.wikipedia.org/wiki/Kugelblitz_\(astrophysics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Kugelblitz_(astrophysics)). А объема у фотона нет :)
- stalinets 28 ноября 2015 в 18:38 # h ↑ 0 ↑ ↓
Но ведь фотон-фотонное взаимодействие возможно и изучается.
- qbertych 29 ноября 2015 в 22:17 # h ↑ +1 ↑ ↓
Фотоны напрямую друг с другом не взаимодействуют. Причина в линейности уравнений Максвелла (основных уравнений электродинамики): если мы пошлем в систему в два раза больше фотонов, то отклик будет ровно в два раза больше. Если бы фотоны взаимодействовали, отклик был бы другим (нелинейным).


Что обсуждают

- Сейчас Вчера Неделя
- Надёжность SSD в реальном мире: опыт Google 14
 - Протез на 4-летие мальчика Феди, стилизованный под любимого персонажа 9
 - Умные часы обогнали по продажам часы швейцарских брендов 1
 - Законопроект «10 лет за хентай» вчера был принят в первом чтении 346
 - Дискуссия в Википедии: иллюстрировать ли статью о порнофильме самим фильмом? 36

Собственно, поэтому нелинейная оптика и называется нелинейной: ее задача — заставить фотоны взаимодействовать друг с другом. Это успешно делается, при этом не имея отношения к ЛНС, черным дырам и подобным чудесным вещам.

 Greendq 27 ноября 2015 в 20:41 # h ↑ ↓ 0 ↑ ↓


Кстати, а это вообще возможно в теории? Если у фотонов нет массы — и их можно напихать сколько угодно в ограниченное пространство — то откуда ЧД появится?

 Banzeg 27 ноября 2015 в 20:52 # h ↑ ↓ +1 ↑ ↓

Как это — нет массы у фотонов?

 MaximChistov 27 ноября 2015 в 21:01 # h ↑ ↓ +4 ↑ ↓

у фотонов нет массы _покоя_

 Greendq 27 ноября 2015 в 21:26 # h ↑ ↓ 0 ↑ ↓

Ну так я же не «спокойные» фотоны собираюсь подловить :)

 MaximChistov 27 ноября 2015 в 21:49 # h ↑ ↓ +2 ↑ ↓

ну тут проблема в том, что фотоны летят исключительно прямолинейно. то есть чтобы собрать их нужное количество в одной точке, вам надо абсолютно одновременно все их выпустить из равноудаленных точек пространства. а еще это нарушит принцип неопределенности, ведь для этого вам нужно будет одновременно очень точно задать их положение в пространстве и скорость, что невозможно

 voyager-1 27 ноября 2015 в 22:20 # h ↑ ↓ +1 ↑ ↓

Это (принцип неопределённости) накладывает ограничения на минимальную энергию фотонов, с помощью которых можно создать чёрную дыру (у неё будет нижний предел на размеры/массу), но не запрещает сам факт возможности её создания таким образом.

 MaximChistov 27 ноября 2015 в 22:22 # h ↑ ↓ +1 ↑ ↓

@Greendq, как я понял, говорил про ручное создание. Вот оно-то невозможно, насколько я понимаю.

 Banzeg 28 ноября 2015 в 00:19 # h ↑ ↓ 0 ↑ ↓

фотоны летят исключительно прямолинейно

что насчет гравитационных линз, уважаемый?

 MaximChistov 28 ноября 2015 в 00:52 # h ↑ ↓ +2 ↑ ↓

Они искривляют пространство так, что с точки зрения стороннего наблюдателя траектория не прямая. А с точки зрения фотона его путь идеально прямой

 Banzeg 28 ноября 2015 в 01:15 # h ↑ ↓ +1 ↑ ↓

Искривляют пространство как?

Что с точки зрения стороннего наблюдателя, находящегося в менее искривленном пространстве, наблюдающего за движением фотона в более искривленном пространстве, фотон движется по искривленной траектории, хотя на самом деле движется прямолинейно? А чем фотон отличается от любых других тел, таких, как мы с вами, но, в менее искривленном пространстве с точки зрения физики движения? Смею утверждать, что двигаюсь в каждый момент времени прямолинейно (и это не беря во внимание искривление пространства земной гравитацией). Серьезно, объясните.

 voyager-1 28 ноября 2015 в 11:26 # h ↑ ↓ +2 ↑ ↓

Речь видимо про то, что нам надо собрать огромную концентрацию фотонов в минимальный промежуток времени и места. Тут гравитационная линза может помочь лишь с концентрацией фотонов (как собственно и обычная линза), а расширить промежуток времени, за который их можно собирать — она не сможет (фотоны всё равно будут улетать до тех пор, пока ваша грав-линза не достигнет предела Шварцшильда).

По этой теме есть пара интересных умозаключений (физически их проверить пока не возможно, возможно проверить их не получится и вовсе никогда): существует [Планковская масса](#) — это предел для массы фотона, превысив который, он превратится в чёрную дыру (без дополнительной «помощи» в виде частиц рядом).

Частота этой частицы порождает [Планковскую длину](#) — предельно малую длину, которую можно измерить (ибо частиц, способных измерить меньшие длины просто не может существовать — они просто «схлопнутся» в чёрную дыру). Но само по себе это не доказывает квантовости пространства (наличие какой-то «сетки» пространства, по точкам которой можно только прыгать, но нельзя оказаться между ними).

 vintage 28 ноября 2015 в 10:09 # h ↑ ↓ +2 ↑ ↓

С точки зрения пушечного ядра, его путь идеально прямой в этом не идеальном кривом пространстве. Но на мой взгляд контрпродуктивно считать ускорение в сторону минимума потенциала прямолинейным движением. Не, я понимаю, что если молиться на электромагнитные волны, то ничего другого не остаётся. Но можно ведь и более критически относиться к постулатам :-)

 lavmax 30 ноября 2015 в 14:48 # h ↑ ↓ +1 ↑ ↓

для этого вам нужно будет одновременно очень точно задать их положение в пространстве и скорость, что невозможно

Про фотоны кстати не очень этого понимаю. Если точно измерить положение фотона в пространстве, то все сломается? Ведь скорость фотона постоянна и в отдельном измерении не нуждается.

 MaximChistov 30 ноября 2015 в 16:15 # h ↑ ↓ +1 ↑ ↓

постоянен только модуль скорости, а вот про его направление вам ничего не известно

 Mingun 30 ноября 2015 в 19:53 # h ↑ ↓ 0 ↑ ↓

а еще это нарушит принцип неопределенности, ведь для этого вам нужно будет одновременно очень точно задать их положение в пространстве и скорость, что невозможно

Но ведь на самом деле нужны три координаты:

1. номер фотона
2. положение фотона
3. скорость фотона

Нельзя ли это как-то использовать? Для каждого конкретного фотона мы не знаем ни точно скорость, ни точно положение, но для группы, это, вероятно, возможно. Ведь как-то удается делать эксперименты с термоядом, пуляя в одну точку несколько лазерных лучей с разных направлений и никакие принципы не нарушаются.

 Shkaff 1 декабря 2015 в 00:35 # h ↑ ↓ 0 ↑ ↓

Позвольте-с, а откуда номер-то? Для каждого конкретного фотона ограничение исключительно на точность координаты и импульса (не скорости).

 Mingun 1 декабря 2015 в 18:24 # h ↑ ↓ 0 ↑ ↓

Определение «конкретного» подразумевает, что их можно сосчитать (в противном случае вы не можете говорить о конкретном фотоне, а только о какой-то неопределенной «массе», «жиже» фотонов), а значит, присвоить номер.

 Shkaff 1 декабря 2015 в 22:29 # h ↑ ↓ +1 ↑ ↓

Хорошо. Тогда, конечно, это называется [ЭПР парадокс](#) — для двух запутанных частиц (фотонов) можно точно знать сумму координат и разность импульсов, но это очень специальный пример. В общем случае для группы частиц действуют все те же правила — скажем, и координату и импульс центра масс знать точно нельзя (для фотонов — что-нибудь типа общего места точек будет).

 qbertych 1 декабря 2015 в 23:15 # h ↑ ↓ 0 ↑ ↓

Еще рядом стоит обменное взаимодействие: сосчитать фотоны может быть и можно, но пронумеровать — нельзя, потому что они неотличимы.

 Mingun 2 декабря 2015 в 00:21 # h ↑ ↓ 0 ↑ ↓

Не понимаю, почему нельзя нумеровать, если мы их можем сосчитать. Если нам нужно сохранять привязку одних и тех же номеров к фотонам, то это наверное и нельзя из-за их неотличимости, а если сохранять такое соответствие не нужно? Ведь и импульс, и скорость мы тоже будем мерить на конкретный момент времени. Правда, при таких условиях все эти измерения становится, похоже, бесполезными и ничего интересного из них не вытащить...

 Shkaff 2 декабря 2015 в 01:12 # h ↑ ↓ +1 ↑ ↓

Это основополагающий принцип квантовой механики — принцип [неразличимости](#) тождественных частиц (неплохо написано в [английской вики](#)). По сути дела, если частицы тождественны, единственным методом их отличить друг от друга было бы «прилепить табличку» и следить, куда и как частица движется. Но в квантовой физике траектории частиц не определены и носят вероятностный характер, так что в итоге все траектории «перемешиваются» и становится невозможно сказать, где же частица, за которой вы следили.

 Mingun 2 декабря 2015 в 18:43 # h ↑ ↓ 0 ↑ ↓

Вот именно что различать требуется, если нужно следить за частицей. А при измерении импульса и положения зачем следить за ее дальнейшей судьбой? Тут единственная проблема получается, что можно регистрировать несколько раз одну и ту же частицу

Другое дело, что обычно как раз дальнейшая судьба и интересна, поэтому я и написал выше, что такие измерения, если они возможны, вообще-то бесполезны.

 FransuaMaryDelone 3 декабря 2015 в 06:40 # h ↑ ↓ +2 ↑ ↓

Не понимаю, почему нельзя нумеровать, если мы их можем сосчитать

Я пробовал как-то: насыпал две ложки сахара в чай, размешал, и начал эти ложки нумеровать — не получилось. На вкус всё точно — две ложки сахара в чае, а номеров у ложек — не видеть.

 doobrik 28 ноября 2015 в 09:30 # h ↑ ↓ 0 ↑ ↓

Фотон — безмассовая частица, при чём тут покоя или не покоя. Можно подумать, у [беспокойного](#) фотона масса есть.

 forgotten 28 ноября 2015 в 21:33 # h ↑

Это неграмотное суждение. Специальная теория относительности оперировала массами «покоя» и «движения», однако уже в Общей теории относительности Эйнштейн от этой концепции отказался (в рамках ОТО если попытаться определить «массу движения» как меру взаимодействия, она окажется разной в зависимости от направления). В школьных учебниках она почему-то при этом прижилась, и продолжает использоваться совершенно безграмотно.

У фотона нет массы. Вообще. Никакой.
ufn.ru/ufn89/ufn89_7/Russian/r897f.pdf



FransuaMaryDelone 3 декабря 2015 в 12:55 # h ↑

0 ↑ ↓

У фотона нет массы. Вообще. Никакой.

Мне Л.Б. Окунь показался Планковским «аксиоматиком»:

"... существует кроме метафизиков и позитивистов еще третья группа работников над физической картиной мира. Она характеризуется тем, что ее главный интерес направлен не на связь с реальным или чувственным миром, но на внутреннюю замкнутость и логическое построение физической картины мира. Это — аксиоматики. **И их деятельность полезна и необходима. Но...**"

М. Планк. Картина мира современной физики // УФН. — 1929. — Т. 9. — С. 407—436. (стр. 411)



faiwer 27 ноября 2015 в 21:42 (комментарий был изменён) # h ↑

0 ↑ ↓

deleted

404

 amarao 27 ноября 2015 в 18:31 #

+3 ↑ ↓

Спасибо.



qbertych 28 ноября 2015 в 00:07 # h ↑

+1 ↑ ↓

Рад, что понравилось!



Banzeg 28 ноября 2015 в 00:21 # h ↑

+6 ↑ ↓

Я тоже рад, что ему понравилось. Не знаю, почему.



zuborg 27 ноября 2015 в 21:19 #

0 ↑ ↓

А что за обобщенная координата используется на графиках? Т.е. что конкретно меняется по синусоидальному закону? Явно ж не собственно интенсивность света.



qbertych 28 ноября 2015 в 00:07 # h ↑

+1 ↑ ↓

Время. Когда волна распространяется, в каждой точке пространства пучности волны периодически сменяются минимумами.

Но с тем же успехом можно использовать координату: если сделать «моментальный снимок волны сбоку», она будет казаться синусоидальной.



ra3vdx 27 ноября 2015 в 22:10 #

+3 ↑ ↓

► [Краткое содержание первой части](#)



ddecoder_mm 28 ноября 2015 в 00:26 #

+11 ↑ ↓

Ура, на гт не обзор гаджета и не новость от ализара!



r00tGER 30 ноября 2015 в 09:53 # h ↑


-3 ↑ ↓

И политику никто не вспоминает в комментариях. Эх, были времена... :(

Только зарегистрированные пользователи могут оставлять комментарии. [Войдите](#), пожалуйста.

Интересные публикации



H Юбилейный дайджест интересных материалов из мира веб-разработки и IT за последнюю неделю №200 (22 — 28 февраля 2016)  0

GT Надёжность SSD в реальном мире: опыт Google  14

GT Как получить статус книги-бестселлера на Amazon за 3 доллара  7

GT Windows 98 — теперь и в браузере  22

H Интегрируем Webpack в Visual Studio 2015  0

GT Дискуссия в Википедии: иллюстрировать ли статью о порнофильме самим фильмом?  36

GT 2 суток на создание жилого дома: 3D принтеры помогают строить дома  13

GT Протез на 4-летие мальчика Феди, стилизованный под любимого персонажа  9

GT Автозапуск стратостатов Loop за 30 минут: фото  10

GT Студенты из Огайо пытаются разогнать электромобиль VBB-3 до 643,75 км/ч  15

Вакансии

Мой круг

Web Developer

Санкт-Петербург · Полный рабочий день

Web-разработчик (PHP, Javascript, HTML)

Санкт-Петербург · Полный рабочий день

Web-дизайнер лендингов

Санкт-Петербург · Полный рабочий день

Веб-разработчик (JavaScript)

Санкт-Петербург · Полный рабочий день

Разработчик Ruby on Rails

Санкт-Петербург · Полный рабочий день · До 150 000 руб.

[Создать резюме](#)

[Разместить вакансию](#)

Заказы

Фрилансим

Опытный тестировщик с мобильными девайсами на проверку портала

26.02.2016 · 1 отклик · [Цена договорная](#)

Адаптация приложения LG Smart TV под SamsungTV

28.02.2016 · 0 откликов · [Цена договорная](#)

Нужен Java разработчик, с опытом написания серверной части REST

28.02.2016 · 0 откликов · [Цена договорная](#)

Ищем копирайтера для написания обзоров детских игр

28.02.2016 · 1 отклик · [Цена договорная](#)

Разработка сайта на CMS NetCat

28.02.2016 · 1 отклик · [Цена договорная](#)

[Зарегистрироваться](#)

[Разместить заказ](#)

[Войти](#)

[Регистрация](#)

[Разделы](#)

[Публикации](#)

[Хабы](#)

[Компании](#)

[Пользователи](#)

[Q&A](#)

[Песочница](#)

[Инфо](#)

[О сайте](#)

[Правила](#)

[Помощь](#)

[Соглашение](#)

[Услуги](#)

[Реклама](#)

[Спецпроекты](#)

[Тарифы](#)

[Контент](#)

[Вебинары](#)

[Разное](#)

[Приложения Хабра](#)

[Тест-драйв](#)

[Помощь стартапам](#)

[Работа в IT](#)

© TM

[Служба поддержки](#)

[Мобильная версия](#)

