

Как измеряют мгновение

Игорь Иванов, лекция 29 июня 2009 года

Я вам расскажу сегодня про разнообразные быстропротекающие явления из самых разных областей физики. И причем не столько о самих явлениях, сколько о методах, с помощью которых в них можно взглянуть и их можно изучать. Конечно, вы понимаете, что эта тема очень огромная, ее невозможно как-то систематически изложить за короткую лекцию, поэтому просто воспринимайте это как обзор самых разных явлений, которые протекают в совершенно разных временных диапазонах, и также методов их исследования.

Миллисекунды

Ну что, начнем с миллисекунд. Про миллисекунды я рассказывать слишком много не буду просто по той причине, что это очень близкий к нам временной диапазон. То есть то понятие мига, которое мы ощущаем, как раз соответствует десяткам миллисекунд, ну, может быть, сотням миллисекунд. И кроме того, это всё можно исследовать буквально дома, в домашней лаборатории, поскольку современная фотокамера позволяет выставлять выдержку и в миллисекунды, и даже в доли миллисекунды. Поэтому на нее можно запечатлеть процессы, которые не видны невооруженным глазом (просто они слишком быстрые). Конечно, есть здесь определенная сложность, потому что часто требуется запустить фотокамеру именно в какой-то определенный момент времени, и с руки это сделать сложно, но в последнее время есть в свободной продаже такие специальные киты, которые имеют звуковые триггеры. То есть они запускают вспышку строго по звуковому сигналу, например, или с какой-нибудь задержкой после звукового сигнала. Такие киты продаются, они стоят недорого; если их купить, то можно получать такие красивые фотографии, как, например, яблочко, которое пулей насквозь пронзено. То есть буквально это всё можно изучать в домашних условиях.

Миллисекунды: 10^{-3} сек

Современная фотокамера + вспышка, запускающаяся от звука = **домашняя лаборатория**



Про миллисекунды я хочу рассказать еще вот что. На самом деле, как оказалось, мало кто знает, что невооруженный человеческий глаз обычно может заметить и изучить явления, длящиеся

буквально единицы миллисекунд. Конечно, не каждое явление так можно увидеть, для этого требуются некоторые специальные условия, но в определенных условиях это действительно можно сделать. Для этого нужно сделать следующие вещи: нужно, чтобы явление, которое у вас происходит, было ярко освещено и чтобы оно происходило на темном фоне. И последнее условие — это не смотреть прямо на это явление, а мотнуть взглядом туда-сюда. И тогда — вот можете попробовать — у вас на сетчатке получится некоторая развертка этого процесса во времени, и при определенном навыке можно действительно видеть события, протекающие единицы миллисекунд.

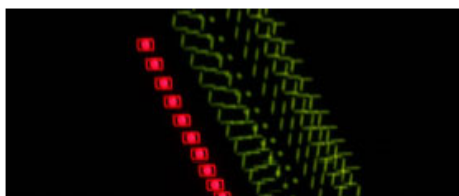
Ну вот, в качестве самого простого примера, который вы можете попробовать буквально дома вечером: вы можете найти какой-нибудь светодиодик и попробовать вот эту технику на нём, то есть мотнуть взглядом туда-сюда и осознать, что у вас отпечаталось на сетчатке. Часто светодиоды бывают мерцающие, некоторые светодиоды бывают непрерывного свечения. И это всё можно действительно разглядеть невооруженным глазом, даже если частота составляет 200–300 герц.

Миллисекунды: 10^{-3} сек

В подходящих условиях можно заметить невооруженным глазом явления длительностью в несколько мс (!), воспользовавшись **методом развертки** – т.е. быстро скользя взглядом туда-сюда.

Пример: светодиод, мерцающий с частотой в **сотни герц**, можно легко отличить от непрерывно светящегося; можно даже на глаз оценить скажность сигнала.

Снимок дисплея микроволновки движущейся камерой. Частота 200 Гц. Глазом видна аналогичная картина.



Ну вот, в качестве иллюстрации я здесь просто взял и с руки фотоаппаратом сфотографировал просто видеодисплей обычной микроволновки. То есть, когда я фотографировал, я, конечно, камеру сдвигал. В результате получилась череда отдельных изображений. Поскольку я всё это вручную выставлял, я смог измерить частоту вот этих вспышек этого дисплея, она получилась примерно 200 герц. Но самое главное, что невооруженным глазом тоже всё прекрасно видно. То есть, когда невооруженным глазом так вот мотнешь взглядом, тоже получается такая последовательность изображений. То есть видите — кое-какую физику можно изучать просто глядя на предметы. Ну, здесь, конечно, можно дальше про красивые картинки рассказывать, но я перейду еще дальше вглубь времени — то есть к долям миллисекунды — и перейду к микросекундному диапазону.

Микросекунды

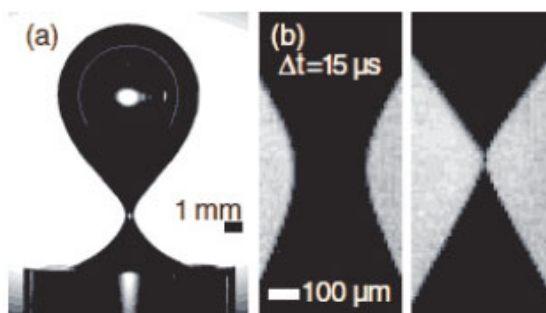
Итак, микросекунды. Микросекунды — это, в общем, довольно уже далеко отстоящий от обычной повседневной жизни диапазон времен, но, тем не менее, его можно наблюдать и с помощью обычных видеокамер. Конечно, они достаточно дорогие, это не те видеокамеры, которые продаются в магазинах. Эти видеокамеры, которые дают сотню тысяч кадров в секунду или даже миллионы кадров в секунду, стоят под миллион долларов. Но иногда достаточно, действительно, бывает купить такую камеру, вложиться в нее, и потом уже можно делать высокоточные работы,

настоящие исследовательские научные работы, которые публикуются в высокоимпактных журналах.

Микросекунды: 10^{-6} сек

Современные сверхскоростные видеокамеры дают сотни тысяч кадров в секунду.

Изучение нестационарных течений жидкости со свободной поверхностью (напр. поведение перешейка при отрыве капли)



Источник: N.C. Keim et al, *Phys. Rev. Lett.* 97, 144503 (2006)

И здесь тем есть несколько — то есть темы, которые буквально сейчас активно исследуются учеными. Среди этих тем, наверное, стоит выделить одну: это поведение нестационарных течений, особенно со свободной поверхностью. То есть это не просто, там, движение воды по трубам, а поведение капелек, струек, как они распадаются на капли. И вот, оказывается, здесь есть много нетривиальных вещей, которые до сих пор еще толком не изучены. Вот, например, одна из них — это то, что происходит с перешейком, вот с этим перешеечком, в тот момент, когда капля отрывается. Ну, здесь, на самом деле, нарисована как бы обратная ситуация. Это картинка из работы 2006 года, в которой капля воздуха поднималась со дна жидкости. (Подробнее об этой работе см.: [Обнаружен эффект памяти в поведении пузырьков воздуха под водой](#), «Элементы», 18.10.2006.) В принципе, динамика та же самая. Оказывается, что непосредственно перед моментом отрыва вот эта капелька (вот здесь она показана увеличенно, вот этот перешеек тоже показан увеличенно) ведет себя самоподобным образом. То есть значит, что вот эта форма перешейка при приближении к точке отрыва остается постоянной, но только масштаб ее уменьшается, уменьшается, уменьшается. То есть здесь, конечно, видна как бы точка, но если бы мы смогли это увеличить, мы бы увидели ту же самую форму — ту же самую форму, как здесь, только на меньшем масштабе.

И вот это очень интересует теоретиков, потому что такое самоподобное поведение на самом деле означает что-то важное про свойства уравнения, в которых это описывается. Ну, это одна из... не то что загадок — одно из свойств этого перешейка. Оказывается, что у него есть много других интересных свойств, и это действительно активно сейчас изучается в эксперименте.

Про микросекунды я еще хочу рассказать следующее: что микросекунды, в принципе, можно изучать и в школьной лаборатории. Для этого не требуется покупать какую-либо очень дорогую камеру.

Микросекунды: 10^{-6} сек

Микросекундные импульсы света можно даже получать в школьной лаборатории.

- лазерная указка (или зеркальце) ставится на моторчик и раскручивается (например до 100 об/сек),
- пятно 5 мм на расстоянии 3 м → вспышки света длительности 2,5 мкс и частотой 100 Гц.
- быстропротекающее явление, освещенное вспышкой света, снимается на фотокамеру с достаточно большой выдержкой.

Наносекунды: 10^{-9} сек

- **макроскопическое движение замирает**

– свет: 30 см/нс

– звук / ударные волны: ~ несколько мкм/нс

- в наносекундном диапазоне нас интересуют не предметы, а **вещество**.
- Снимать на камеру становится все труднее (нынешний рекорд – один кадр за 160 нс, апрель 2009 года)
- Переход от визуального наблюдения к иным методам исследования.

Для этого можно воспользоваться обычным фотоаппаратом, но только надо освещать предмет короткими микросекундными импульсами света. А получить их тоже не так уж сложно. Делается это просто: берете, например, лазерную указку — ну, или, если не хотите лазер мучить, берите маленькое зеркальце, — устанавливаете его на моторчик и раскручиваете его в горизонтальной плоскости. Например, 100 оборотов в секунду, в принципе, вполне можно получить. У вас тогда получится лучик света, который гуляет по стенам с большой скоростью. Дальше: вы ставите поодаль ширмочку, делаете в ней маленькую дырочку (как раз на траектории луча) и тогда, когда вот этот лучик чиркает по этой дырочке, у вас в соседнюю комнату, например, проходит очень короткий импульс света. И вы можете сделать примерные оценки и увидеть, что импульсы длительностью в буквально считанные микросекунды вполне доступны в школьной лаборатории. А дальше это просто снимаете в темной комнате на фотокамеру. И вы действительно видите быстропротекающие явления.

Ладно. Микросекунды — это тоже нечто такое, более как бы приземленное к нашей жизни.

Наносекунды

Теперь давайте перейдем дальше еще, перейдем в следующий диапазон — это наносекунды. И вот про наносекунды стоит поговорить чуть подробнее. Что такое наносекунды? Это, вообще-то, нечто, с чем мы уже в обычной жизни не сталкиваемся. Если взять какие-нибудь типичные явления, которые происходят в обычной жизни, с типичными скоростями — ну, например, звук, ударные волны или просто движение тел, — то они редко превышают один километр в секунду. Но один километр в секунду, если пересчитать его на наносекунды, на 10^{-9} секунды, составляет буквально считанные микроны. Даже если взять скорость света и умножить ее на одну наносекунду, тоже получится дистанция не такая уж большая, всего 30 см. И это всё приводит нас к очень важному выводу: что когда мы изучаем наносекундный диапазон и ниже, мы уже не изучаем тела — мы изучаем вещество. Нам совершенно уже не важно, из какого тела произошло это вещество. Поэтому мы переходим именно к изучению материи, а не тел.

Но как это всё можно изучать? В принципе, конечно, есть еще видеокамеры, которые немножко дотягивают и в наносекундный диапазон. Насколько я знаю, сейчас рекорд — это 6 миллионов кадров в секунду в оптическом диапазоне, то есть один кадр за каждые 160 наносекунд. Кое-что, конечно, можно увидеть здесь, но если у вас есть событие, которое протекает, скажем, 10 наносекунд, то, конечно, никакую динамику его вы с помощью видеокамеры не увидите. Поэтому так или иначе приходится от визуального наблюдения переходить к каким-то, может быть, более сложным, но и более прозорливым методам исследования, которые становятся всё более косвенными, когда мы уходим во всё более и более мелкие диапазоны времен.

В принципе, таких методов достаточно много. И моя лекция, собственно, им и посвящена. Но прежде чем рассказывать о них, я решил, что будет полезно здесь проиллюстрировать немножко иную мысль: чтобы изучать быстропротекающие процессы, иногда вовсе не требуется успевать следить за ними. Иногда достаточно как-то хитро поставить эксперимент и посмотреть на его результаты — с медленным детектором, с медленной техникой. Но потом, глядя на эти результаты, уже можно восстановить динамику события, которое протекало на наносекундном

масштабе. И вот я нашел одну из работ, которая была выполнена не так давно, которая прекрасно иллюстрирует эту мысль.

Диффузия вакансий на поверхности кристалла	Диффузия вакансий на поверхности кристалла
<ul style="list-style-type: none">• Нетривиальная экспериментальная задача в физике поверхности: изучить диффузию поверхностных вакансий<ul style="list-style-type: none">• ожидаемый временной масштаб при комнатных температурах: наносекунды• быстрые методы наблюдения → недостаточная разрешающая способность• методы с высоким разрешением (сканирующая туннельная микроскопия) → медленные, ~ 1 сек• нужна экспериментальная хитрость!	<p>Идея: посадить на поверхность кристалла примесные атомы и наблюдать за ними.</p> <ul style="list-style-type: none">• примесный атом внедряется в поверхностный слой и теряет подвижность,• “пробегающие” мимо редкие вакансии натываются на атомы, переносят их на новое место и “убегают”.• такие перескоки примесных атомов происходят намного реже, за ними можно уследить с помощью СТМ и узнать отсюда поведение поверхностных вакансий.

Эта работа относится к разделу физики под названием «физика поверхности». Физика поверхности изучает, грубо говоря, то, что происходит на поверхности твердого тела — например, кристалла. На самом деле, там происходит много интересного, там есть термодинамические, электрические, магнитные явления, механические явления. И они все протекают, как правило, совсем иначе, чем в толще. Поэтому в этой области физики конденсированных сред есть свои загадки, свои проблемы и свои методы исследования.

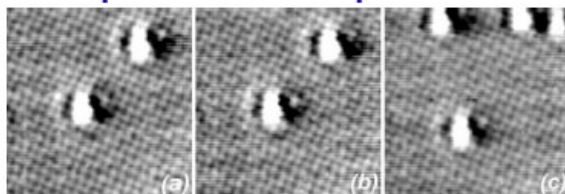
Один из конкретных вопросов, который очень важен, конечно, для этой области, — вопрос о том, как живет атомарно гладкая поверхность кристалла при конечной температуре, то есть при обычной комнатной температуре. Что значит «атомарно гладко»? Это значит, что его вырастили атомарно гладко и дальше отпустили в свободное плавание. Он же не будет непрерывно вот так стоять, там есть тепловые флуктуации, и иногда эти флуктуации заставляют какой-нибудь атом выпрыгнуть и начать гулять по поверхности. А на месте этого атома тогда появляется поверхностная дырка — называется она «вакансия», — которая тоже, оказывается, обладает подвижностью: она начинает гулять туда-сюда. Как вакансия гуляет, это тоже понятно. Просто соседние атомы перескакивают в нее, и в результате получается, что вакансия как бы перемещается. Так вот. Эти вакансии... Это значит, что атомарно гладкую поверхность можно представлять себе как разреженный газ двух типов частиц: поверхностные атомы, которые прыгают поверху, и вакансии, которые тоже вот как-то так диффундируют. У этого газа есть своя концентрация, есть свой типичный коэффициент диффузии, свои типичные времена перескоков, и это всё надо изучать, поскольку это действительно то, как живет поверхность.

Итак, возникает вопрос: как изучить диффузию поверхностных вакансий? Первое желание, конечно, просто взять и посмотреть с помощью какого-нибудь метода с высоким разрешением. Например, есть такой метод — сканирующая туннельная микроскопия, — с помощью которого можно видеть отдельные атомы. Но, к сожалению, этот метод очень медленный. Для того чтобы получить снимок даже небольшого участка поверхности, требуется время порядка секунды. В то же время теоретические оценки говорят о том, что все эти вакансии атома перемещаются за времена порядка наносекунд. С помощью этого метода ничего не получишь. С другой стороны, конечно, есть методы и быстрые, которые я потом еще покажу, но у них, как правило, есть очень плохое пространственное разрешение: они отдельный атом просто не видят. В результате возникает дилемма: как на эти вакансии взглянуть, чтобы их увидеть. Требуется некоторая экспериментальная хитрость.

И такую экспериментальную хитрость реализовали несколько лет назад ученые. Они сделали такую вещь: они решили на поверхность выращенного кристалла посадить примесные атомы, то есть атомы какого-то другого сорта. Эти атомы хорошо видны в сканирующий туннельный микроскоп, просто они отличаются по своим свойствам от атомов подложки. Эти атомы, когда их только посадили, встраиваются в верхний приповерхностный слой и, как правило, там сидят

неподвижно. Сидят, сидят, сидят... Можно делать снимок за снимком — через каждую, скажем, секунду — какого-нибудь участка, и будет видно, что атомы там сидят неподвижно. Но в тот момент, когда какая-нибудь вакансия прибегает (она же бежит очень быстро), она прибегает и взаимодействует с этими примесными атомами, перемещает их на несколько шагов атомной решетки и снова убегает. В результате получается, что на следующем кадре уже эти примесные атомы будут сдвинуты. И изучая эти перескоки атомов, которые происходят на самом деле очень редко, можно выяснить и динамику, диффузию вот этих вакансий.

Диффузия вакансий на поверхности кристалла



СТМ-изображения атомов индия на поверхности Cu(001).
Разница во времени между (a) и (b) **160 сек**, между (b) и (c) — **20 сек**.

Скоррелированные “прыжки” атомов, иногда на несколько периодов решетки, вызваны поверхностными вакансиями → концентрация вакансий при $T = 320\text{ K}$ составляет около $1,6 \cdot 10^{-10}$, типичное время перескока около **10 нс**.

Инструмент с секундным временным разрешением + экспериментальная смекалка = изучение явлений в наносекундном диапазоне.

Источник: R. van Gastel et al, *Phys.Rev.Lett.* 86, 1562 (2000).

Вот картинка из экспериментальной работы (подробнее о работе см.: [Диффузия примесных атомов на поверхности монокристалла](#)). На самом деле, конечно, там было много картинок получено, а это просто типичная картинка. Вот здесь показан небольшой участок поверхности меди, на которой сидят примесные атомы индия. Температура была 320 кельвинов, то есть вполне комнатная температура. Естественно, никаких вакансий не видно, потому что этот метод очень медленный. Зато видно сидящие примесные атомы. Вот последовательность из четырех кадров. Между первыми двумя прошло 160 секунд, то есть за 160 секунд они никуда не сдвинулись. Между вторым и третьим прошло 20 секунд, и за 20 секунд мало того что они оба перепрыгнули куда-то, так еще в кадр попали какие-то другие атомы. Это вполне согласуется с тем механизмом перемещения за счет вакансий, про который я говорил. Когда экспериментаторы обработали все данные, они смогли восстановить динамические свойства вот этих вакансий. То есть оказалось, что действительно у них очень маленькая концентрация, кроме всего прочего. И оказалось, что типичное время перескока — порядка 10 наносекунд. То есть это интересная иллюстрация того, что очень медленный инструмент позволяет иногда изучить динамику намного более быстрых явлений, если правильно, хитро поставить эксперимент.

Пикосекунды

Теперь переходим от наносекунд еще глубже, к пикосекундам. Пикосекунды — это еще более краткий миг. И за пикосекунды никакие тела — и вообще даже свет — не успевают сдвинуться на какие-либо макроскопические расстояния. Здесь мы уже переходим в чисто микроскопическую — ну, или, может быть, мезоскопическую — физику.

Пикосекунды: 10^{-12} сек	Пикосекунды: 10^{-12} сек
<p>Атомно-молекулярные явления:</p> <ul style="list-style-type: none"> • колебания кристаллической решетки (фононы), • самые быстрые “шаги” при свертке белков, • кинетика фазовых переходов в твердых телах, <p>Электронные явления:</p> <ul style="list-style-type: none"> • кинетика носителей заряда в полупроводниках, • образование и разрыв химических связей. <p>На пикосекундном масштабе начинается настоящая современная физика!</p>	<ul style="list-style-type: none"> • “Наносекундный барьер”: все “старинные” методы исследования не годятся, поскольку используют механическое движение. • Главный метод исследования: короткие лазерные импульсы, используются как для возбуждения, так и для регистрации пикосекундных процессов (<i>pump-probe technique</i>). • Короткие лазерные импульсы получать сравнительно легко. Лазеры привели к настоящей революции в экспериментальной физике.

Какие типичные процессы происходят на временах порядка пикосекунд? Это, прежде всего, разнообразные атомные, молекулярные явления. То есть явления, связанные с движением отдельных атомов или их групп. Например, синхронные колебания кристаллической решетки, то есть фононы. То есть если у вас есть, например, звук, то... — вы, наверное, знаете, что звук можно представить себе как поток таких квазичастиц, которые идут сквозь кристалл, то есть колебания решетки, которые называются фононами. Типичные времена колебания в этих фононах составляют как раз единицы, десятки, сотни пикосекунд.

Дальше. Например, поведение биологических молекул. Скажем, при свертке белков у вас происходит целый каскад разнообразных процессов. Когда у вас белок только транскрибировался... транслировался... вот... и потом начинает сворачиваться, то в процессе этой свертки у вас есть явления, которые происходят на пикосекундном масштабе, на наносекундном масштабе, вплоть до секунд. Но самые быстрые шаги переконформации этого белка происходят на пикосекундном масштабе. Это очень важно для биологии — знать, как всё это происходит.

Здесь же протекает такая вещь, как кинетика фазовых переходов. Слово «кинетика» означает, что мы не смотрим просто на результат чего-либо, а мы хотим в деталях знать, желательно поатомно, как происходит тот или иной процесс. То есть вот мы говорим: «Лед плавится». Скажем, посветили короткой вспышкой лазерного света на лед, и он расплавился. Но мы хотим знать, как начинается этот процесс — поатомно или через какие-нибудь колебания, однородно, неоднородно? Вот это всё изучается на пикосекундном масштабе.

Сюда же попадают и некоторые электронные явления. Я думаю, вы понимаете, что вообще между движением атомов и движением электронов есть довольно большой зазор по времени, потому что электроны на несколько порядков легче атомов, ядер. Поэтому при тех же самых силах электроны имеют отклик намного более быстрый, чем атомы или молекулы. Поэтому в пикосекундный масштаб попадают атомы и молекулы и некоторые достаточно медленные электронные движения. Ну например, кинетика носителей зарядов полупроводника. То есть, когда у вас в полупроводник подали напряжение, пошел какой-то ток, этот ток означает, что там светом посветили, начались какие-то процессы — скажем, родились дырки, которые куда-то потекли, начали рекомбинировать и так далее. Это всё протекает на масштабах порядка пикосекунд. В химических реакциях тоже. Говорится: «Химическая реакция произошла». На самом деле, она же не одномоментно происходит, это тоже целый каскад явлений, которые запускаются и следуют друг за другом. Это всё сопровождается разрывом, перетеканием электронных облаков, разрывом или созданием новых химических связей. Это всё тоже относится примерно к пикосекундному диапазону.

Про этот пикосекундный диапазон я хочу сказать две вещи. Первое — можно с полной уверенностью говорить, что это настоящая современная физика, то есть это то, что сейчас изучается в тысячах лабораторий мира, публикуется в сотнях журналов каждый день, это действительно самая настоящая современная физика. Вторая вещь, которую хочу рассказать про пикосекундный диапазон, — это то, как изучать такие явления. И здесь, оказывается, есть интересная вещь, которую я условно назвал «наносекундный барьер». Это означает вот что: разнообразные старинные методы исследования, которые, скажем, применялись еще в середине

XX века или раньше, так или иначе требовали перемещения чего-либо в пространстве. Скажем, если у вас есть желание снять на быструю фотокамеру, то вам нужно сдвинуть заслонку, или если вы хотите получить короткую вспышку света при пробое в конденсаторе, то у вас есть движение электронного потока от одной обкладки к другой обкладке. Так или иначе, у вас есть какое-то механическое перемещение на хотя бы миллиметровые расстояния. А как я уже до этого сказал, всё это заканчивается на наносекундах. То есть наносекунды — это когда еще хоть какое-то движение заметно. На пикосекундном масштабе никакое движение микроскопических тел не заметно. Поэтому все эти старинные методы исследования просто не могут изучить диапазоны меньше одной наносекунды — на самом деле, даже меньше десятка наносекунд.

И вот здесь настоящим прорывом было изобретение лазеров. Ну а точнее (я покажу на следующем слайде) — способа с помощью лазеров получать очень короткие световые импульсы. Там буквально за несколько лет была целая революция, с помощью которой прошли весь пикосекундный диапазон — от наносекунд до единиц пикосекунд и даже глубже. И вот оказалось, что лазер — это совершенно уникальный метод исследования. Потому что для быстротекущих процессов он служит одновременно как инициатором процесса, так и регистрирующим инструментом.

Стандартная методика, которую сейчас часто используют в большинстве, наверное, экспериментов по изучению быстротекущих процессов (по-английски она называется "pump-probe technique", по-русски это часто переводят как «накачка и зондирование»), выглядит так: у вас есть, скажем, импульс света, который вы расщепляете на два коротких импульса света, сдвигаете их относительно друг друга на считанные пикосекунды (это всё легко делается) и потом посылаете на исследуемый образец. И вот первый импульс у вас запускает какой-то процесс, а второй импульс у вас попадает на этот объект в тот момент, когда этот процесс происходит. В результате, если вы можете контролировать сдвигку по времени между этими импульсами, вы можете четко проследить, что происходило с процессом спустя, скажем, одну пикосекунду, или спустя две пикосекунды, или спустя три пикосекунды, то есть получить такую развертку по времени вашего процесса.

Получение коротких лазерных импульсов

- В лазере усиливается не одна, а много близких длин волн, которые накладываются друг на друга.
- Случайные фазы → непрерывный свет примерно постоянной интенсивности.
- Согласованные фазы (**синхронизация мод**) → биения. Если синхронизировано много мод – "очередь" из очень коротких импульсов.
- 1960-е годы: пикосекундный диапазон
- 1980-е годы: продольное сжатие импульсов, фемтосекундный диапазон.

Прямое наблюдение фононов

- Типичное время атомных колебаний в твердом теле: $2 \text{ \AA} / 1 \text{ (км/сек)} = 0,2 \text{ пс}$. Коллективные колебания (**фононы**) происходят медленнее: $T \sim \tau * N$.
- На поверхность посылают два синхронизированных по времени импульса: **мощный короткий ИК/оптический импульс** (световой удар по кристаллу), который запускает колебания, и диагностический **рентгеновский импульс**.
- Рентгеновский импульс получают из синхротронного излучения короткого электронного пучка, пропущенного через монохроматор.

Пару слов стоит сказать о получении этих лазерных импульсов. Они получаются вовсе не механическим способом, они получаются за счет взаимодействия между разными модами лазерного излучения внутри лазера. Выглядит это примерно так, если совсем вкратце. Ну, вы знаете, что такое лазер: там есть усиливающая среда, которая накачивается и формирует когерентно лазерное излучение. Так вот обычно в лазере усиливается не одна конкретная длина волны, а несколько близких или даже много близких длин волн. У них слегка отличающиеся частоты. И если не предпринимать никаких усилий, то эти частоты (то есть это разный тип света) просто накладываются друг на друга некогерентно. То есть, когда у вас выходит лазерный луч, на самом деле там есть много отдельных лазерных лучей со слегка отличающимися частотами. Однако если сделать специальное приспособление, специальное ухищрение, то можно добиться, чтобы эти разные частоты синхронизовались друг с другом. И тогда в какой-то момент времени они все, всей толпой начинают, скажем, с положительной фазы осциллирования. И тогда получается, что в этот момент времени у вас происходит резкий всплеск. А в дальнейшем у вас

почти ноль интенсивности, потому что эти фазы друг друга компенсируют буквально. И в результате у вас получается некий экстремальный тип биений — биения, вы знаете, получаются при наложении двух или нескольких близких частот; но если частот много, у вас получается прямо череда, чередование очень узких импульсов со строго определенной периодичностью. Эти узкие импульсы можно действительно делать в пикосекундном масштабе без каких-либо проблем. Буквально за год, за два люди моментально в 60-е годы получили эти технологии. Еще в 80-е годы была дополнительная техника, которая позволяла эти пикосекундные импульсы сжимать еще дальше и получать даже фемтосекундный диапазон. Это всё делается, это всё стало рутиной эксперимента.

Ну и в качестве иллюстрации того, как работает этот метод накачки и зондирования, я расскажу про еще одну работу, которая тоже была выполнена не так давно, в которой люди впервые увидели фононы (подробнее об этой работе см.: [Атомное кино](#)). Это, конечно, когерентные фононы, не однократные, не одиночные, но всё равно фононы, то есть колебания кристаллической решетки, прямо воочию, в реальном времени.

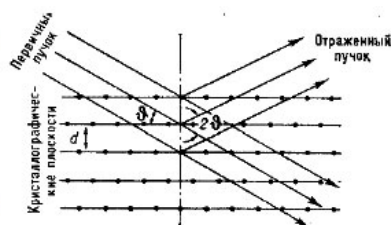
Сначала пару слов про типичные времена. Если вы возьмете типичную скорость движения атомов, поделите на типичные межатомные расстояния в кристалле, вы получите времена порядка долей пикосекунд. Реально в кристаллах у нас атомы движутся не по одиночке, а синхронно. Скажем, фонон — это синхронные колебания сразу большой группы атомов. Если вы возьмете типичное число этих атомов в длине волны — n , — скажем, десятки, сотни, тысячи, то у вас как раз получится период колебаний этих фононов в пикосекундном диапазоне.

Как с помощью этой методики накачки и зондирования можно увидеть такие фононы? Делается это таким образом: посылаются на исследуемый образец два импульса, которые четко скоррелированы по времени. Это импульсы из разных диапазонов электромагнитного излучения. Сначала посылается очень короткий и мощный инфракрасный импульс, который буквально наносит точечный удар по поверхности кристалла, и он генерирует в данном месте и в данное время поток фононов, которые уходят вглубь кристалла, то есть колебания решетки около поверхности. И в тот же момент или с определенной конкретной сдвижкой по времени присылается туда слабый диагностический рентгеновский импульс. Рентгеновский импульс подбирается с такой длиной волны, чтобы он эффективно отражался от поверхности. Дело в том, что (вы представляете, да?) кристалл имеет межатомное расстояние порядка нескольких ангстрем. И поэтому, если подобрать рентгеновский импульс с длиной волны тоже порядка нескольких ангстрем, у вас эффективно начинается дифракция. То есть кристалл выступает в виде дифракционной решетки для рентгеновского света. Этот рентгеновский лучик можно отразить и дальше с помощью него можно смотреть на колебания кристаллической решетки, потому что эти колебания действительно отражаются в поведении рентгеновского импульса.

Прямое наблюдение фононов

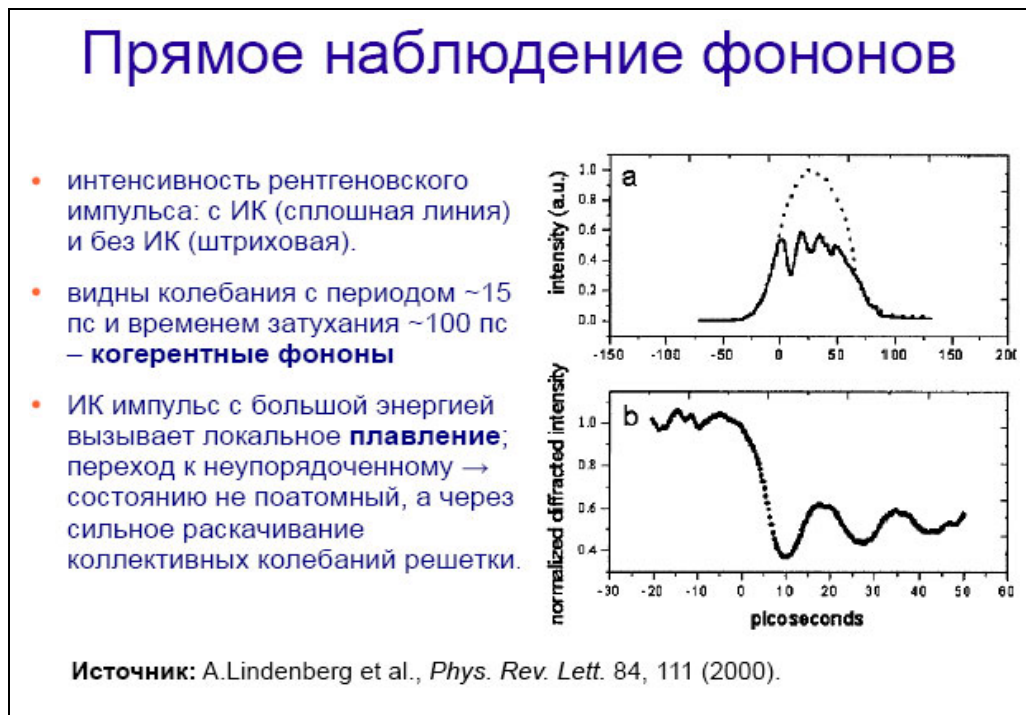
Длина волны рентгеновского света берется порядка нескольких ангстремов → **дифракция света на кристаллической решетке.**

Угол отклонения зависит от межатомного расстояния → его колебания приводят к **колебаниям угла дифракции, а также к колебаниям интенсивности на разных углах.**



Это лишь один пример акустооптических явлений в твердых телах.

Вот просто типичная картинка. Если взять длину волны порядка нескольких ангстрем, получится дифракция света на кристаллической решетке. Самый простейший случай — это просто отражение получается от кристаллических плоскостей. За этим отраженным пучком рентгеновского света можно наблюдать, можно измерять его интенсивность, в том числе при разных углах, и смотреть на колебания. Это, кстати, только один из примеров довольно широкого класса акустооптических явлений — явлений, в которых оптика связана с акустикой, то есть со звуковыми движениями или с колебаниями атомов.



И вот тоже результат из экспериментальной работы. Смотрите: здесь на картинке (это пикосекунды по времени... это просто интенсивность) показан профиль рентгеновского импульса. Штриховой линией показан профиль, когда у нас не было удара по кристаллу, просто прилетел импульс, отразился и задетектировался. А сплошной линией показано то, что происходит, когда у нас нанесен удар по кристаллу в момент времени ноль. Вот видно, что здесь есть колебания интенсивности. И особенно красивым это всё становится, когда мы отнормируем ее на невозмущенный случай, то есть поделим сплошную кривую на штрихованную кривую. И тогда у нас получается такая отнормированная интенсивность, сначала она была единичка, то есть стандартный случай, потом вдруг она упала и начала колебаться.

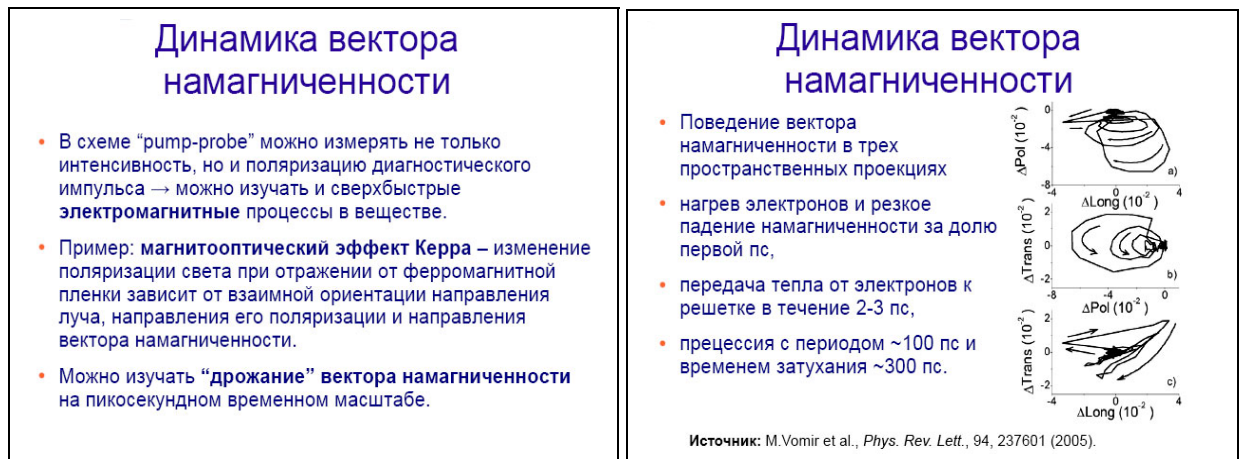
Видите, по этим данным на самом деле можно много что рассказать про поведение кристалла. Во-первых, можно определить период колебания. В данном конкретном случае он оказался порядка 15 пикосекунд. Это, кстати, вполне согласуется с расчетами, если взять, например, скорость звука в кристалле и промерить расстояние, всё это пересчитать на времена. Кроме того, видно, что эти колебания затухают. Это естественно, потому что у нас начинаются убегания этих волн в толщу. Поэтому тот поверхностный слой, который мы видим реально в рентгеновском импульсе... в нём колебания постепенно затухают. Времена затухания оказались порядка 100 пикосекунд, что тоже, в принципе, согласовывалось с теоретическими расчетами.

На самом деле, это не всё. Потому что дальше можно экспериментировать с этим делом — скажем, можно менять интенсивность удара по кристаллу и смотреть, что происходит с веществом. И вот оказалось, что там происходит интересная вещь: если превысить некий порог по яркости инфракрасного импульса, то у вас начинается локальное плавление кристалла, то есть кристалл просто в этом месте полностью начинает разрушаться и теряет свою кристаллическую решетку.

Картинку здесь не показываю, просто рассказываю, что там наблюдалось. Когда люди просканировали этот диапазон по мощности, оказывается, что это плавление начинается вовсе не

поатомно, а через раскачивание этих очень высокоамплитудных колебаний фононов, то есть есть некий предел колебаний, который еще кристалл держит, а если превысить этот предел, то он начинает просто плавиться и кристаллическая структура начинает разрушаться. То есть таким образом мы действительно изучаем кинетику фазовых переходов, по крайней мере локально.

В пикосекундном диапазоне, на самом деле, есть много интересных работ, и они используют универсальность лазерных импульсов. Я сейчас скажу просто, что лазерный импульс — это не просто когерентный свет, у лазера есть еще определенная поляризация. Эту поляризацию тоже можно детектировать, и она может рассказать вам многое об электромагнитных процессах, которые происходят в веществе.



Вот, скажем, такой есть эффект, называется «магнитооптический эффект Керра». Заключается он в следующем. Если у вас есть какая-то пластиночка из ферромагнитного материала, то есть намагниченная пластиночка, и от нее отражается лазерный лучик с определенной поляризацией, то плоскость поляризации чуть-чуть вращается. И это вращение зависит от всех углов, то есть от угла падения луча, от угла поляризации его и от угла, от направления вектора намагниченности вот этой пленочки. Так вот. Это значит, что если мы теперь будем измерять в этом в стандартной схеме накачки и зондирования поляризацию полученного излучения, то мы сможем выяснить, как у нас меняется — просто в реальном времени, — как у нас там дрожит вот этот вектор намагниченности.

Такие эксперименты тоже проводились буквально несколько лет назад. И вот результат из одной из работ. Здесь люди проэкспериментировали с разнообразными поляризациями и разнообразными углами падения луча и смогли просто в трехмерном пространстве восстановить динамику вектора намагниченности. То есть оказывается, что когда по нему ударяют с помощью инфракрасного импульса, он начинает как-то дрожать, иногда уменьшаться, сжиматься, переворачиваться, прецессировать. И вот это всё действительно прекрасно видно с помощью этой техники. Ну вот, скажем: здесь, конечно, нарисованы какие-то загогулины, ничего не понятно, но реально это три разных проекции, три разных взгляда на динамику вектора намагниченности в пленочке. И изучая их, физики смогли восстановить последовательно этапы того, что там происходит. Оказалось, что буквально за долю первой пикосекунды у вас происходит сначала нагрев электронов — то есть сначала электроны поглощают свет — и резкое падение намагниченности. То есть из-за того, что электроны горячие, и из-за того, что магнетизм связан с электронами, у вас получается резкое проседание намагниченности. Затем через 2–3 пикосекунды электронная теплота передается решетке, и решетка начинает как-то колебаться. А потом намагниченность восстанавливается до старого уровня, и происходит просто прецессия вокруг магнитного поля. Вот такие картинки получаются.

Фемтосекунды

Ну что ж, переходим дальше, к фемтосекундам. Фемтосекунда (фс) — это 10^{-15} секунды. Фемтосекундный диапазон — еще более мелкий по времени диапазон. Атомы здесь практически не движутся. Только, может быть, на сотнях фемтосекунд еще можно заметить какое-нибудь

смещение атомов в кристаллической решетке, но на десятках единиц фемтосекунд атомы уже можно считать просто неподвижными, и это уже область, в которой господствуют электроны, разнообразные электронные явления. Но электроны, на самом деле, тоже движутся с разными частотам, с разными скоростями. То есть внешние электроны движутся медленнее, внутренние атомные электроны движутся быстрее. Но под словом «движутся» я, конечно, не имею ввиду, что они прямо крутятся вокруг атома, но если запустить какой-то нестационарный процесс — например, возмутить как-то атом или выбить у него электрон, — то у вас начинается какое-то перетекание волновых функций. Вот это перетекание волновых функций у вас тоже происходит на фемтосекундном масштабе.

Фемтосекунды: 10^{-15} сек

- динамика электронов (внутренние быстрее, внешние медленнее)
- колебания отдельных атомов
- 1,5-3 фс: период колебания ЭМ поля в световой волне
- стандартный метод исследования: **ультракороткие лазерные импульсы** (вплоть до нескольких периодов ЭМ колебаний)
- однако есть и иные методы исследования!

Здесь есть стандартные методы исследования, то есть это фактически та же самая методика накачки и зондирования, о которой я говорил, только она уже в 80-е годы эволюционировала вплоть до единиц фемтосекунд. Ну и здесь она, конечно, столкнулась с определенным и неизбежным пределом. Просто период колебания электромагнитного поля обычной световой волны составляет от 1,5 до 3 фемтосекунд. То есть получить, скажем, 1 фемтосекунду просто нереально, потому что вы не можете получить световой импульс с половиной периода колебания — у вас неизбежно хотя бы 1–2 колебания есть. Поэтому оптические импульсы у вас неизбежно получаются длительностью несколько фемтосекунд. Но с помощью этих методов можно действительно изучать фемтосекундные процессы.

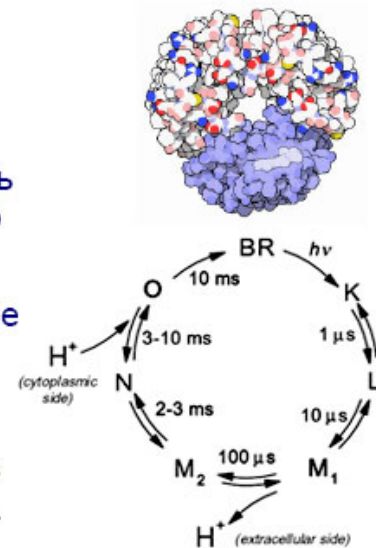
Вместо того чтобы показывать это, я решил, что полезно будет рассказать пример, ну, несколько иного взгляда на быстро протекающие процессы, то есть несколько иного метода детектирования этих явлений. Прежде чем я переключу на следующий слайд, я вам просто скажу словами.

Значит, если у вас есть быстропротекающий процесс, в котором переносятся заряды, например электроны, протоны, то, значит, у вас может возникать электромагнитное излучение, причем частота этого электромагнитного излучения как раз соответствует тем типичным временам переходов, которые у вас в этом процессе и имеются. Поэтому, если внимательно посмотреть на этот процесс и зарегистрировать от него вспышку электромагнитного излучения, то можно, расшифровав эту вспышку, кое-что узнать и про сам процесс. И вот здесь рассказывается о том, как буквально год назад это было применено к интересному биологическому белку под названием бактериородопсин.

Бактериородопсин — это вообще уникальный белок, у него много интересных физических свойств есть. Ну, реально в природе он вырабатывается определенным типом бактерий, и причем он встроен в их мембрану, то есть он сидит в мембране, и делает он следующую функцию. Это светочувствительный белок: когда его освещают светом, в нём запускается цикл, то есть каскад процессов, перестройки, разнообразные переконфигурации этого белка, результатом которого является передача протона от одного конца молекулы к другому. Ну и поскольку у нас этот белок встроен в мембрану, получается, что при освещении этот белок работает как протонный насос. То есть он из одной части, из одной области прокачивает протоны в другую область и там их отпускает, снова берет протон, перекачивает в другую и отпускает.

Перемещение зарядов в бактериородопсине

- **Бактериородопсин** – светочувствительный белок, встроенный в клеточную мембрану. Свет запускает в нем цепь превращений, за счет которых сквозь канал протон переносится на другую сторону мембраны.
- Весь цикл занимает ~20 мс, но самые первые процессы (перемещение зарядов) протекают за считанные пикосекунды. Для того, чтобы разглядеть их, требуется методика с суб-пикосекундным разрешением.



Конечно, это очень важно для биологии, это один из фундаментальных процессов в биологии. Поэтому, конечно, физики и, там, биофизики это активно всё изучали. Вот выяснилось, что есть много разных стадий, здесь примерно нарисовано, я не расшифровываю, что это такое, просто типичные стадии, типичные времена, в течение которых эти стадии все проходятся. И оказалось, что в этом белке, на самом деле, есть стадии с совершенно разным временным масштабом. То есть вообще весь цикл проходит примерно за 20–30 миллисекунд, то есть достаточно медленно. Но определенные этапы проходят за микросекунды, а некоторые шаги в этих этапах проходят даже за наносекунды и даже за пикосекунды, то есть есть целый диапазон в 12 порядков разнообразных переходов в этой молекуле. Ну и оказалось, что самые-самые первые явления, то есть самый первый отклик этой молекулы на свет, когда только-только ее осветили, вот он протекает буквально за считанные пикосекунды, за 1–2 пикосекунды. И для того чтобы разобраться в динамике этого процесса, требуется методика, которая позволяет зайти глубже, чем пикосекундный диапазон, то есть в фемтосекундный диапазон, хотя бы сотни или десятки фемтосекунд желательно разглядеть с помощью этой методики.

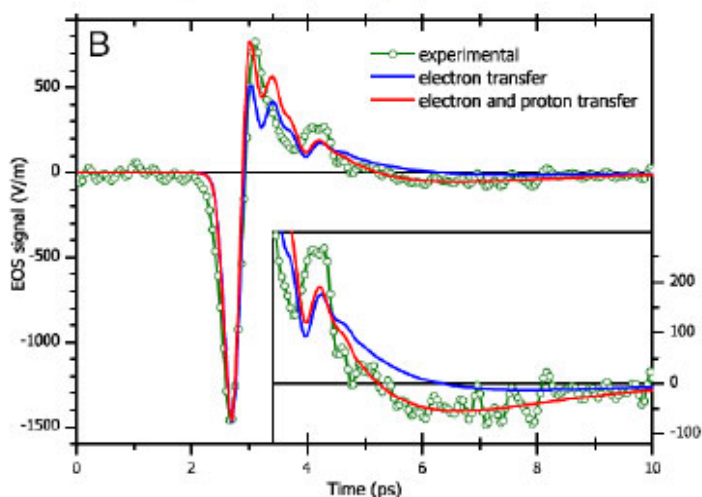
Перемещение зарядов в бактериородопсине

- Идея: раз переносятся заряды, значит **может возникать ЭМ излучение**. Субпикосекундные процессы приводят к излучению **терагерцовых волн**.
- Надо осветить образец короткой вспышкой света и отловить вспышку ТГц излучения. Сравнив ее профиль с результатом моделирования, можно узнать динамику перемещения зарядов.
- Правда, требуются технические хитрости, поскольку ТГц волны детектировать непросто.

Вот, ну, как я уже говорил, идея, которая здесь была применена, — очень простая. Если у вас есть перемещение зарядов, а в этой молекуле есть, естественно, перемещение зарядов, то у вас может возникать излучение. Вопрос: какого оно диапазона? Значит, если речь идет про пикосекундный диапазон времен, то одной пикосекунде, если пересчитать это в частоту, отвечает 10^{12} Гц, то есть это первое герцовое излучение. Ну, как мы слышали, на языке астрономов это называется дальний инфракрасный диапазон. То есть длина волны сотни микрон. Ну и вообще это очень тяжелый для изучения диапазон, как в астрофизике, так и, в принципе, в обычной физике. Вот, то есть в течение долгого времени не было не только надежных методов детектирования слабых терагерцовых импульсов, даже надежных методов генерации слабых терагерцовых импульсов. Поэтому прогресса большого не было. Вот буквально последние 5-10 лет наметилось несколько новых концепций, с помощью которых можно излучать эти терагерцовые волны и детектировать их тоже. То есть сейчас большой проблемы это не представляет.

Итак, если у нас тут будут процессы с типичным временем порядка пикосекунд или долей пикосекунд — то есть это значит, что будет производиться вспышка терагерцового излучения, — вот если эту вспышку задетектировать и промерить, то можно узнать многое... и сравнить с теоретическими расчетами — можно узнать много про динамику перемещения зарядов в этой молекуле. Ну, конечно, нереально от одной молекулы увидеть вспышку терагерцового излучения, особенно с учетом того, что оно плохо детектируется, поэтому здесь на помощь пришел тот факт, что эти молекулы можно концентрировать и выстраивать их примерно, ну, в одном направлении. И поэтому когда у вас есть вспышка света, которая инициирует процессы, то она сразу инициирует процессы в этих тысячах, миллионах молекул. И они все начинают излучать терагерцовое излучение, причем излучение это идет когерентно, то есть сразу со всей пленочки. И вот этот импульс уже можно задетектировать.

Перемещение зарядов в бактериородопсине



Профиль лучше всего воспроизводится с учетом переноса электрона и протона.

Источник: G.I. Groma et al, *PNAS* 105, 6888 (2008).

Вот картинка этого импульса, который получен в эксперименте. Здесь у нас пикосекунды, здесь, ну, электрическое поле в терагерцовом импульсе, вот эти зелененькие — это точки экспериментальные, видите с какой плотностью они стоят, то есть у нас на каждую пикосекунду приходится, ну, пара десятков этих точек. И это необходимо, потому что иначе такую быструю динамику просто было бы не заметить. Вот. На эти точки здесь наложено несколько кривых. Что это за кривые — не сильно важно, просто видно, что разные теоретические подходы к описанию отклика этой молекулы, скажем, с учетом переноса электронов или протонов или того и другого

вместе дают немножко разные предсказания, и самые лучшие предсказания дает кривая, которая учитывает, скажем, перенос и электронов и протонов. То есть это может показаться каким-то мелким вопросом, но я хочу, чтобы вы обратили внимание на саму методику. То есть с помощью внимательного изучения этого профиля и сравнения с теорией мы можем действительно много что узнать про субпикосекундные явления, то есть про явления, длящиеся сотни фемтосекунд. Вот [ссылка](#) на эту статью.

Аттосекунды

Так. Значит, дальше. Хорошо. Ну, фемтосекунды мы прошли, но на этом спектр еще не заканчивается, диапазон времен идет дальше. Следующими идут аттосекунды ($1 \text{ ас} = 10^{-18} \text{ с}$). Аттосекундный диапазон — это нечто совсем уже передовое, то есть буквально последние годы люди только-только залезли в аттосекундный диапазон с помощью импульсов рентгеновского или далекого ультрафиолетового излучения. То есть сейчас действительно уже можно получать импульсы длительностью в сотни аттосекунд — скажем, 300, 400 аттосекунд — ну и с помощью них изучать процессы, которые происходят тоже на этом масштабе.

Аттосекунды: 10^{-18} сек

- Период ЭМ колебаний в далеком УФ/рентгеновском диапазоне.
- динамика электронов на самых внутренних оболочках многоэлектронных атомов.
- Следует смотреть не на расстояния, а на **энергии**
 - соотношение неопределенностей "энергия-время": процессы с характерными энергиями E длятся не менее \hbar/E .
 - $1 \text{ эВ} \rightarrow 1 \text{ фс}$, $1 \text{ кэВ} \rightarrow 1 \text{ ас}$.

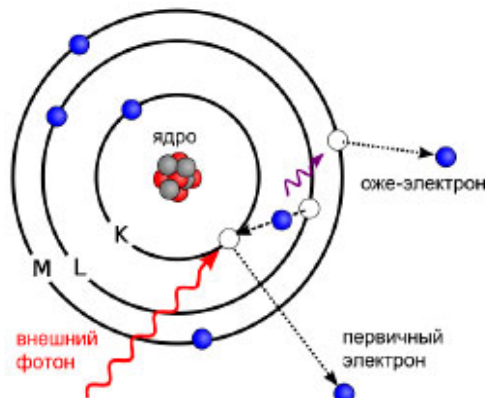
Ну, как я уже говорил, на аттосекундном масштабе уже никакого движения атомов совершенно нет, да и электроны, в общем-то, уже почти неподвижны, даже если они не в стационарных слоях. Единственное, что хоть как-то движется на этих масштабах, — это самые-самые внутренние электроны, то есть самые быстрые, самые внутренние электроны в многоэлектронных атомах. И здесь полезно подчеркнуть, что для того чтобы просто оценить, какие явления там происходят, а какие можно считать остановившимися, полезно смотреть не на расстояния, а полезно смотреть на энергии, которые используются в этих процессах.

Значит, здесь мы немножко уже залезаем в область квантовой механики. В квантовой механике есть такое соотношение определенности между энергией и временем, которое можно сформулировать так, что если у вас есть какой-то процесс, в котором у вас имеются переходы между энергиями с типичной разностью E , то этот процесс у вас не может длиться меньше, чем \hbar делить на E , где \hbar — постоянная Планка. И примерная линейка пересчета вот такая, то есть по порядку величины явления, которые протекают на внешних атомных оболочках, то есть затрагивают порядка электронвольт, длятся типичное время фемтосекунды. Явления, которые происходят на самых внутренних оболочках, длятся типичное время аттосекунды. И вот пример одной из работ, в которой люди залезли прямо в аттосекундный диапазон и смогли что-то узнать. Это динамика Оже-эффекта.

Оже-эффект — это достаточно простой эффект. Это двухэлектронная ионизация атома и поглощение рентгеновского фотона. Значит, когда у вас попадает какой-то фотон, он может поглотиться электронами, например самым внутренним электроном. При этом, если энергии достаточно, этот электрон может просто вылететь из атома и улететь, да? На его месте образуется вакансия, она очень глубокая, у нее очень большая энергия связи и она не может жить долго. Эта вакансия заполняется каким-либо из более высоких электронов, то есть этот электрон падает сюда, и, когда он падает, он испускает свой фотон. Так вот, этот фотон не всегда улетает прочь, а иногда может перепоглотиться вновь внутри этого же атома — скажем, каким-нибудь совсем внешним

электроном. И тогда этот совсем внешний электрон, который называется Оже-электрон, тоже вылетает из атома. И энергия этих двух электронов — первичного и Оже-электрона — она скоррелированная и она связана с энергией этого падающего фотона.

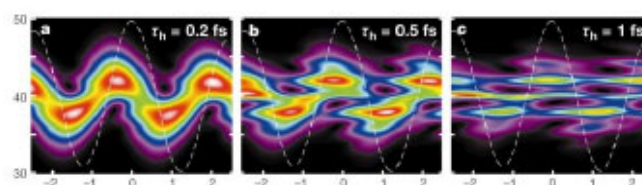
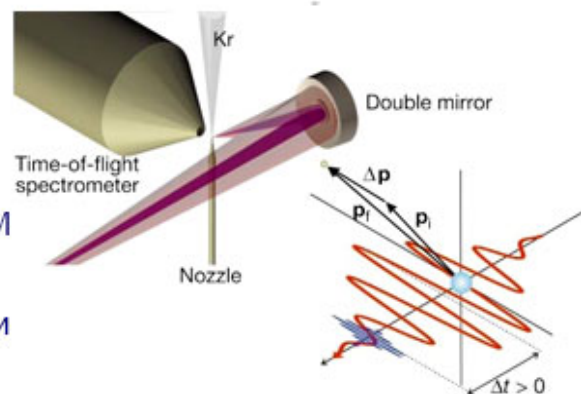
Динамика Оже-эффекта



- Первичный электрон выбивается за доли фс.
- Оже-электрон вылетает через несколько фс.
- Нужен инструмент с суб-фемтосекундным разрешением.

Динамика Оже-эффекта

- Оптический импульс, синхронный с рентгеновским, разгоняет вылетевшие электроны своим электрическим полем. Изменение кинетической энергии зависит от конкретного момента вылета.
- Точность порядка $1/10$ периода ЭМ колебаний (сотни ас).
- Измеренное время жизни вакансии составило 8 ± 1 фс.



Источник: M.Drescher et al, *Nature* 419, 803 (2002).

Значит, это интересный процесс, который рассказывает вам о том, как у вас перетекают электронные плотности внутри атома. И теоретические оценки говорят о том, что — ну, для типичных многоэлектронных атомов — это времена порядка единиц фемтосекунд, может быть даже меньше. Поэтому для того, чтобы в деталях его проследить, требуется техника, с помощью которой мы можем заглянуть внутрь фемтосекунды, то есть в сотни, хотя бы в сотни аттосекунд.

И вот картинка из работы, выполненной несколько лет назад, в которой эта динамика была изучена на примере атома криптона. Значит, суть здесь такая. Вообще, на самом деле, здесь уже становится принципиально сложным найти хоть какой-нибудь эффект, который бы, ну, менялся в аттосекундном диапазоне. Потому что в аттосекундном диапазоне почти всё уже стоит, почти всё уже неподвижно. Вот, скажем, если есть у вас какой-нибудь электромагнитный импульс, то за одну фемтосекунду он только-только успеет начаться. Да. Поэтому трудно от него что-либо ожидать.

Но, тем не менее, этот сам факт можно использовать — что внутри оптического импульса есть меняющееся электрическое поле. Используется это таким образом. Значит, ну, здесь экспериментальная установка нарисована, здесь просто показано, что с помощью двойного зеркала вот в эту точку, где этот эксперимент, собственно, и протекает, фокусируется сразу два импульса. Во-первых, это очень короткий рентгеновский импульс — здесь вот он на развертке показан. Значит, короткий рентгеновский импульс, который и инициирует этот процесс, то есть он выбивает первый электрон и запускает падение остальных в эту вакансию. И на это накладывается оптический импульс, который очень, конечно, медленный по сравнению с аттосекундами, но тем не менее он есть.

Так вот, значит, вылет первого и второго электронов происходит в какой-то конкретный момент времени. И оказывается, что, когда вот электрон только вылетает, он вдруг ощущает себя внутри электромагнитного поля от светового импульса. Внутри электрического поля светового импульса. И это электрическое поле этот электрон слегка подталкивает — ну, или притормаживает — в зависимости от того, в какой момент времени вылетел электрон, то есть в какую именно фазу этого колебания попал электрон. Вот. То есть с помощью этой методики можно, по крайней мере, различить $1/10$ от периода колебания световой волны. То есть в зависимости от того, электрон вылетел в какой-то определенный момент времени или спустя, скажем, 200 аттосекунд, у него уже будет слегка другое распределение по кинетической энергии.

Вот. Здесь показана картинка, но на самом деле это моделирование, то есть здесь — наверное, плохо видно — штрихами показана интенсивность электрического поля в оптическом луче. По оси X здесь единицы фемтосекунд, а по оси Y здесь, по-моему, энергия... да, это энергия выходящих электронов в килоэлектронвольтах. Ну и здесь видно, что, да, вот эти картинки нарисованы при разных предположениях о времени жизни вот этой глубокой вакансии внутри атома. Скажем, если бы она жила 200 аттосекунд, то эксперимент должен был бы показать вот такое колебание энергии вылетевших электронов, которое более или менее в фазе относительно электрического импульса. Вот. Если 500 ас, то картинка чуть смазывается, если 1 фс — она смазывается еще больше, и т. д.

То есть исследователи просто промоделировали это явление на компьютере, получили ожидаемые картинки, которые были бы при разных предположениях о времени жизни этой вакансии, и просто сравнили затем с экспериментально наблюдаемыми распределениями по энергии электронов. Вот. Ну и получили величину порядка 8 фемтосекунд. То есть в конкретном атоме криптона самая глубокая вакансия жила примерно столько времени.

Зептосекунды

И на этом спектр тоже не кончается, диапазон времен. Есть еще более мелкие процессы, более быстрые процессы, которые протекают на еще более мелких единицах времени. Эти единицы времени называются зептосекунды, 1 зс это 10^{-21} секунды. На зептосекундном масштабе уже, конечно, нет никаких движений ни атомов, ни даже электронов. И электроны, и атомы стоят. Всё, что может происходить на этом масштабе, — это ядерные реакции. То есть мы уже залезли вглубь ядра.

Зептосекунды: 10^{-21} сек

- В зептосекундном диапазоне движение атомов и даже электронов останавливается.
- Свет проходит 0,003 ангстрема за 1 зс.
- Зептосекунды – типичное время **ядерных реакций**: нуклоны со скоростями $\sim 0,1$ с проходят за 1 зс путь порядка нескольких диаметров атомного ядра.

Элементы 120 и 124

- Пример: недавнее (2008 год) экспериментальное обнаружение повышенной устойчивости некоторых изотопов элементов 120 и 124.
- Обычно сверхтяжелые неустойчивые изотопы живут единицы зептосекунд; изотопы 120 и 124 жили 1-2 ас.
- Для измерения промежутков в доли ас использовался “метод теней”.

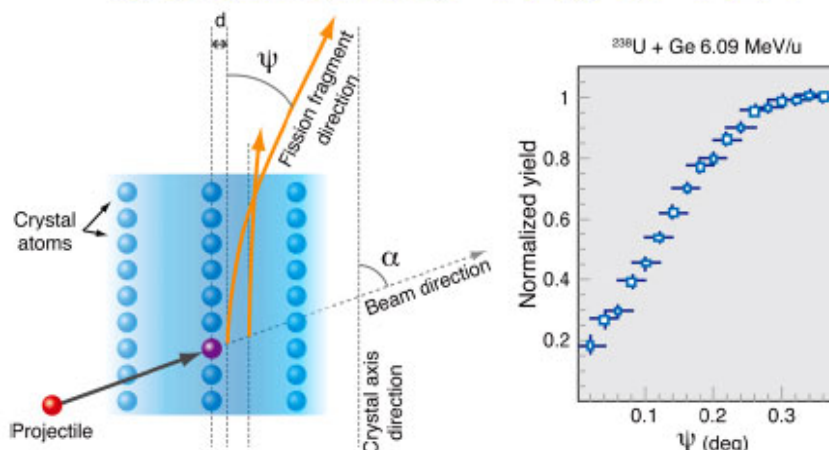
Значит, можно оценить типичное время, за которое нуклон, двигающийся с типичной ядерной кинетической энергией, проходит диаметр ядра. Это оказывается порядка 1 зептосекунды. Это дает нам примерную оценку того, сколько протекают ядерные реакции, если, скажем, у вас родилось какое-то ядро в столкновении и тут же распалось. Если оно не сдерживается никакими силами, то оно распадается примерно за зептосекунду. Если же у вас есть какие-то дополнительные силы или стимулы для этого ядра немножко пожить, то есть чуть-чуть быть постабильнее, то его время жизни будет по крайней мере на несколько порядков больше, чем зептосекунды.

Вот, оказывается, это можно изучать, и это действительно было недавно использовано, буквально в прошлом году, для обнаружения того, что некоторые изотопы элементов 120 и 124 обладают повышенной стабильностью. (Подробнее см. в новости [У изотопов 120-го и 124-го химических элементов обнаружена склонность к долгожительству](#), «Элементы», 15.08.2008.) Конечно, это не настоящие стабильные атомы, здесь вообще о стабильности говорить не приходится, они жили всего лишь 1–2 аттосекунды, но интерес к ним связан с тем, что эти изотопы, на самом деле, очень нейтроно-дефицитны. Совершенно гарантированно, что у них есть собратья, другие изотопы, с большим количеством нейтронов, которые будут жить намного дольше. Их просто очень тяжело экспериментально получить, поэтому люди сейчас экспериментируют только вот с нейтроно-дефицитными изотопами. Вот. Но получив кое-какие экспериментальные данные даже про эти нейтроно-дефицитные изотопы и сравнив их с теоретическими расчетами, можно действительно улучшить предсказания теоретиков относительно острова стабильности, который, может быть, существует в сверхтрансурановых элементах.

Значит, как это всё можно исследовать. Казалось бы, вообще удивительная вещь: и даже свет, можно считать, стоит, электроны стоят, и атомы стоят. И тем не менее можно это тоже исследовать.

Значит, метод, который здесь используется, называется «методом теней». И выглядит он так. Значит, смотрите, у вас есть кристалл, в котором сидят в кристаллических плоскостях ядра. Вот у вас налетает на эту мишень какое-то другое ядро, сталкивается с этим ядром и на какое-то небольшое время порождает метастабильное и очень тяжелое ядро. Но поскольку закон сохранения импульса соблюдается, это ядро движется по-прежнему вперед с некоторой скоростью. И затем оно распадается. И вот в зависимости от того, где именно оно распадается, картина получается сильно разная. Если оно распадается между кристаллографическими плоскостями, то есть в достаточном удалении от своей исходной плоскости, то дочерние частицы, в принципе, могут вылетать прямо вперед, им ничто не мешает. Если мы будем смотреть на распределение по углу этих дочерних частиц, то мы будем видеть довольно большое количество частиц, которые улетают прямо вперед, то есть вдоль кристаллографической плоскости. А если у вас это ядро распалось практически тут же, на месте, совсем-совсем недалеко отойдя от этой кристаллографической плоскости, то вы не сможете увидеть никакие частицы, которые вылетают вперед, просто потому, что мешает кристаллографическая плоскость. Либо эти частицы перерассеются, либо поглотятся, либо отклонятся электрическим полем на большой угол.

Элементы 120 и 124



- Если ядро распадается сразу же, осколки не вылетают вперед – мешает кристаллическая плоскость → возникает “тень кристаллической плоскости”
- Если ядро распадается с задержкой, то распад происходит уже между плоскостями.

Источник: M. Morjean et al. *Phys. Rev. Lett.* 101, 072701 (2008).

То есть, если вы построите теперь такой график — это количество дочерних частиц в зависимости от угла отклонения от кристаллографической плоскости, — вы увидите настоящую тень от кристаллографической плоскости. Но только эта тень, конечно, не в оптическом диапазоне, не в лучах — эта тень в распределении дочерних ядер, получившихся в этой реакции. Вот. И с помощью этой методики действительно можно вполне надежно отличать ядра, которые живут, скажем, одну аттосекунду или 100 зептосекунд. И с помощью этой методики действительно было показано, что эти элементы — некоторые из этих изотопов — живут достаточно долго.

Йоктосекунды

Идем дальше. Меньше, чем зептосекунды, есть диапазон — называется он йоктосекунды. Йоктосекунда (ис) — это 10^{-24} степени секунды. Значит, йоктосекунды — это никакие не ядерные масштабы, это масштаб элементарных частиц. Значит, даже ядра уже можно считать замороженными, даже в процессе самой нестабильной ядерной реакции можно считать, что ядро стоит.

Йоктосекунды: 10^{-24} сек

Мир элементарных частиц

- Свет проходит диаметр протона за 3 ис.
- Йоктосекунды – типичное адронное время: ширина адронных резонансов $\sim 100\text{-}200$ МэВ, что соответствует времени жизни 6-12 ис.
- Никакое смещение за это время обнаружить не удастся → измерения только косвенные.

... и еще меньше: $< 10^{-24}$ сек

- Самая тяжелая из открытых элементарных частиц – **топ-кварк** – живет 0,4 ис.
- Ожидаемое время жизни **хиггсовского бозона** зависит от его массы: от десятков ис (10^{-23} с) до сотых долей ис (10^{-26} с).
- Что с элементарными частицами (и, возможно, с пространством-временем) происходит на еще меньших временах – **достоверно неизвестно**. Есть много теорий, но какая из них верна – покажут будущие эксперименты на коллайдерах высоких энергий.

Значит, за время порядка йоктосекунд у нас происходят рождения—распады самых нестабильных элементарных частиц. Например, есть такие частицы, называются адронные резонансы, ро-мезоны, дельта-изобары и так далее. То есть это частицы, у которых есть типичное время жизни порядка 10 ис. Но, конечно, они не всегда происходят, они происходят только тогда, когда вы достаточно энергии сообщите телу, то есть, скажем, при столкновении элементарных частиц. И забавная ситуация получается, скажем, если вы замедлите всё время в 10^{24} раз, у вас весь мир будет стоять, все тела, все электроны, все атомы, все ядра будут стоять, и только где-то будут в элементарных частицах — столкновения в коллайдере — рождаться и распадаться, рождаться и распадаться вот эти вот адроны.

Конечно, никакое реальное смещение тел за это время уже нельзя увидеть, поэтому приходится косвенно получать информацию об этих быстропротекающих процессах.



Ну вот типичная картинка, тоже, по-моему, достаточно красивая, которая получается в столкновении ультрарелятивистских атомных ядер. Здесь вот схематично показано. Значит, это всё передовой край физики элементарных частиц. Эта статья вот еще даже неопубликованная, которая появилась в декабре прошлого года. Значит, в ней показаны последовательные этапы столкновения ультрарелятивистских ядер. То есть, ну, вы представляете, что ультрарелятивистские ядра, когда они разгоняются до большой скорости, они сплюсываются из-за лоренцева сокращения, и когда они сталкиваются лоб в лоб, то это вовсе и не значит, что в этот момент у вас вдруг происходит «бабах». У вас же всё в рамках релятивистской механики происходит. То есть в первые йоктосекунды после вот этого столкновения у вас два ядра вот этих проходят пока друг сквозь друга, то есть те кварковые распределения, которые находились в каждом ядре, они проходят друг сквозь друга и пока еще не трогают друг друга. Однако между ними натягивается силовое глюонное поле. И это вот состояние, которое осознали только недавно, называется «глазма», и оно существует буквально считанные йоктосекунды.

Затем на масштабе порядка 10, там, 20 йоктосекунд это глюонное поле начинает распадаться на адроны, эти адроны начинают распадаться на другие частички и примерно за 30, 50 ис у вас эта кварк-глюонная плазма распадается на газ отдельных адронов, частиц. И вот эти частицы у вас разлетаются уже дальше и детектируются в детекторах.

Но это всё, видите, конечно, очень косвенные методы наблюдения. То есть реально, конечно, никто не может последовательно эти шаги по времени проверить. Вот. Но их можно проверить косвенным образом, например вычислив в рамках предположения, скажем, о том, что существует глазма, распределение по углам рожденных частиц, и сравнив их с экспериментальными данными. Ну, это, конечно, косвенный метод, но тем не менее лучше, чем ничего вообще.

Вот. Есть еще меньшие времена, для которых, к сожалению, не придумали приставки. То есть йоктосекунды — это самые последние дольные приставки, которые зафиксированы в системе единиц СИ. Но некоторые процессы, которые мы уже достоверно знаем, протекают еще быстрее. Например, самая тяжелая элементарная частица, топ-кварк, распадается примерно за 0,4 йоктосекунды. Вот.

Сейчас физики ищут хиггсовский бозон. В зависимости от того, какая у него будет масса, у него будет разный уровень нестабильности. И распасться он будет от десятков йоктосекунд, может быть, до даже сотых долей йоктосекунды. Ну и, конечно, сейчас физики хотят изучить, что происходит дальше, и достоверно, к сожалению, пока не известно, то есть эксперимент пока еще ничего не говорит. Теорий есть много о том, что происходит на еще меньших временных масштабах, но все они должны будут пройти проверку экспериментом. И вот, собственно, один из вопросов, для чего мы делаем большие коллайдеры, в частности LHC, Большой адронный коллайдер, — это чтобы изучить, что происходит с нашим миром, с веществом, с энергией и, может быть, с пространством-временем на временах еще меньших, чем 10^{-24} секунды.

Вот. На этом я заканчиваю. Спасибо за внимание.