

Голос науки: Алексей Тищенко о путях усиления когерентного излучения

27 ноября 2024

Автор: Константин Фрумкин

Современная цивилизация во многом базируется на управлении различными источниками электромагнитного излучения. Достижения физики в этой сфере видны и в рентгеновских кабинетах поликлиник, и в радиолокации, и в простых лазерных указках, и во многих других сферах. О проблемах создания новых источников излучения, и о методах его усиления мы беседуем с руководителем международной научно-исследовательской лаборатории «Излучение заряженных частиц» Института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике НИЯУ МИФИ Алексеем Тищенко.



Алексей Александрович, можно популярно объяснить, чем занимается ваша лаборатория?

Наши исследования в области физики заряженных частиц лежат на стыке двух огромных разделов науки: оптики и ускорительной физики. Это не просто две

области науки, это огромные континенты, и между ними очень большое пространство. Мы занимаемся как вопросами генерации излучения, так и взаимодействия излучения с разного рода структурами. Мы заняты работой на будущее, потому что перед наукой в этой сфере стоят глобальные вызовы.

Например?

В свое время возникла идея о когерентном излучении. Что это значит? Предположим, есть некая система излучающих объектов: это могут быть антенны, или возбужденные молекулы, или пучок заряженных частиц. Вот мы берем одну частицу и заставим ее излучать с определенной интенсивностью. Затем возьмем две частицы, и теперь интенсивность излучения можно умножить на два. Если мы возьмем N частиц, то интенсивность будет в N раз больше. Это вещи крайне важные с точки зрения практики, ведь нам нужны источники излучения, которыми мы можем управлять: на этой основе создаются и радары, и сенсорика разного рода, и многое другое. Так а что такое когерентность? Оказывается, при определенных условиях мы можем наблюдать эффекты нелинейного возрастания интенсивности излучения, когда оно усиливается не в N раз, а в N в квадрате раз! А представьте, что этих излучающих источников $N = 10^{10}$ штук, то есть 10 миллиардов (это совершенно реальные цифры, бывает и больше). Получается совершенно невероятный выигрыш в интенсивности. Неудивительно, что сегодня самые интенсивные, самые яркие источники излучения, построенные человечеством – синхротроны, лазеры на свободных электронах – основаны именно на эффекте когерентности в излучении заряженных частиц.

В России лазеры на свободных электронах есть?

Есть один, в Новосибирске, но и он немного выпадает из общей линейки, потому что работает на терагерцовых частотах. Это, с одной стороны, делает его уникальным, а с другой стороны, мейнстримом все-таки является работа в рентгеновском диапазоне. В России таких лазеров пока нет, хотя они строятся сейчас, это крупные проекты: СКИФ (Сибирский Кольцевой Источник Фотонов, в Новосибирском академгородке), СИЛА (СИНхротрон-ЛАЗер, в Протвино). Очень близок по физике и общей направленности и крупнейший современный российский проект НЦФМ (Национальный Центр Физики и Математики, в Сарове). В этой области есть задачи прикладного плана, где наши компетенции могут пригодиться, где мы интересны и научному сообществу, и разработчикам технологий. Символично, что наши исследования ведутся в том числе в рамках программы Приоритет 2030 – а мы и правда нацелены на решение задач, приоритетных для сегодняшней мировой науки.

И что же это за задачи?

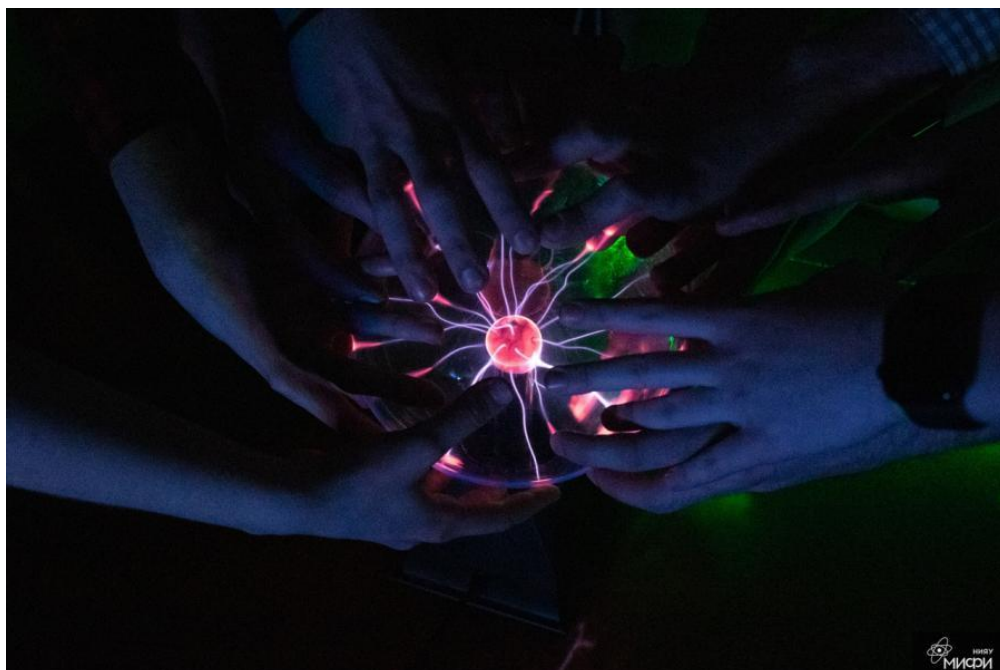
Человечеству удалось реализовать идею использования когерентного режима излучения. А что дальше? А можно усилить излучение еще как-то? Или мы здесь достигли максимума, разрешенного природой? Мы думаем, что есть пути и дальнейшего развития, и найти их – это и наша задача. В частности, в нашей группе мы развиваем некоторые подходы, которые обещают вывести на еще более интенсивные режимы излучения. Решение этой задачи требует развития физико-математической базы, проведения расчетов и экспериментов, чтобы доказать работоспособность тех или иных гипотез. Мы в этом смысле продолжаем традиции физики, которая сложились в Советском Союзе – излучательная физика у нас была очень сильной. Вот в МИФИ есть аллея Нобелевских лауреатов, а очень многие из них занимались этой физикой и внесли в нее важнейший вклад. И Тамм, и Франк, и Черенков, и Гинзбург, и еще много других замечательных исследователей. Мой научный руководитель **Михаил Иванович Рязанов** – через своего руководителя, академика **Евгения Львовича Фейнберга**, – яркий представитель школы Мандельштама-Тамма, это одна из двух самых крупных школ теорфизики в Советском Союзе. Или вот совсем недавно в МИФИ был [семинар](#) памяти **Виктора Михайловича Галицкого** – он тоже один из тех замечательных исследователей, благодаря которым развивалась физика в МИФИ. Мы стоим на плечах гигантов – это заезженные слова, но ведь так и есть. То есть мы сами-то до гигантов, наверное, не дотягиваем, но мы продолжаем эти традиции, и стараемся соответствовать духу и научному уровню нашей школы.

С какими именно излучениями вы работаете?

Мы акцентируемся на двух диапазонах электромагнитного излучения – терагерцовом и рентгеновском. Почему? Современная физика лазеров развита очень здорово, и хорошие, мощные источники когерентного излучения существуют в очень многих диапазонах - за исключением этих двух. А вот в терагерцах, как ни странно, до сих пор хорошей когерентной генерации нет. В рентгене есть, благодаря лазерам на свободных электронах, но очень хороших установок такого рода в мире очень немного, перечислить на пальцах одной руки. В нашей лаборатории мы исследуем новые типы источников в терагерцовом диапазоне, и некоторые наши гипотезы мы уже экспериментально проверяли и в России, и в Японии, на высокопрецизионном пучке установки LUCX, в крупнейшем японском исследовательском центре КЕК.

В последние годы доступ к зарубежным установкам, к сожалению, сильно затруднен, но мы в МИФИ стараемся это направление развивать. В частности, сейчас усилиями руководителя 14-й кафедры **Сергея Полозова** в МИФИ строится собственный компактный источник электронов. Когда он начнет

работать, у нас появятся отличные возможности для усиления экспериментальной стороны исследований.



Какие же гипотезы у вас сейчас в работе?

Я начал с того, что мы работаем на стыке оптики и физики заряженных частиц. На стыке наук бывает больше всего малоисхоженного: это и источник проблем, недоисследованности, но и там же больше всего возможностей. Мы вносим в ускорительную физику элементы оптики, очень хорошо развитой сегодня. Это наноплазмоника, физика метаматериалов, физика квантовых излучений. Вот сейчас наука уже моделирует ситуации, когда свет сам собой заворачивает за угол, например. Вроде бы, так не бывает: все знают, что свет движется по прямой. Чтобы его заставить завернуть, надо поставить зеркало или загнать его в какой-то искривленный канал (ну или пустить его по траектории, практически касающейся поверхности звезды, но это уже совсем экзотика). А как заставить его завернуть в вакууме, причем в привычных нам повседневных условиях, вне сильных гравитирующих объектов? Оказывается, пакеты Эйри дают такую возможность. Это то, что сегодня исследуют физики-теоретики, и это однажды будет реализовано в конкретных приборах и технологиях, как было реализовано уже очень много всего, что когда-то казалось фантастикой, сказкой. Вообще, в оптике есть масса новых вещей, малоизвестных в физике излучения. Но и наоборот: в оптике, скажем, совершенно привычна работа с плоскими волнами, часто к тому же монохроматическими, а в физике излучения ты работаешь с Лоренц-сжатым пакетом поля

заряженных частиц (а это уже совсем не плоская волна, и, что еще важнее, очень далеко не монохроматическая), плюс — это пучок, это когерентность по пучку и так далее. И вот именно такие ключевые моменты позволяют предлагать нечто новое. Так, сейчас мы исследуем возможность резонансного усиления излучения. Для этого мы хотим использовать мишень, состоящую из резонансных элементов. Данные исследования лежат в русле развития идеи метаматериалов, которая является как раз чисто оптической темой.

Можно пояснить – что это за элементы?

Снова начну немножко издалека. Был такой советский физик **Виктор Веселаго**, он в 1969 году написал статью про странные материалы, у которых диэлектрическая и магнитная проницаемость – обе одновременно меньше нуля. Он показал, что у таких материалов будут очень странные свойства. Люди думали над этим несколько десятков лет, искали эти материалы в природе, не нашли. Потом на стыке веков, в 1999 году американец Смит и британец Пендри придумали, как искусственно сделать такие материалы – и сделали их. Но они, правда, создали их в радиодиапазоне, но факт в том, что они доказали: такие метаматериалы могут существовать, их можно делать. Они их собрали, и это выглядело удивительно просто: какие-то железные и медные проволоочки, какие-то закрученные спиральки – скажем, представьте себе квадратик, который вложен в другой квадратик, они разомкнуты, – в общем обычный, вроде, колебательный контур, аналог того что используется во многих антеннах. Тем не менее, это была целая революция в оптике, после чего пошла лавина научных публикаций о метаматериалах. И сегодня они уже используются в конкретных технологиях (модуляторы и фильтры сигнала, частотные и фазовые, резонансные усилители и т.д.). А сколько всего еще очень заманчивого связано с метаматериалами? Супер-линза с неограниченным разрешением, вне вроде бы твердо установленного ограничения Рэлея, плащ-невидимка, делающий невидимым все, что скрыто под ним, изучение явлений сильной гравитации, встречающейся только в экстремальных условиях астрофизики – и изучение в комфортных условиях земных лабораторий, причем небольших, и так далее. И да, вот эти ключевые резонансные элементы можно делать как маленькие антенны. Но поскольку сейчас физика нанотехнологий хорошо развита, в частности в МИФИ есть замечательное нанотехнологическое оборудование, то мы можем делать такие элементы совсем маленькими.

Зачем?

Если мы хотим уходить от сантиметрового излучения, например, в инфракрасную область, в оптическую, у нас длина волны становится короче, и нам нужны совсем маленькие элементы, которые надо делать в наномасштабах. У нас есть такой опыт: например, в МИФИ по нашим расчетам группой проф. И.С. Васильевского была изготовлена такая нанорешетка на алмазных дисках, и мы

летали с ней в Японию, ставили там эксперименты. То есть, одна из задач которая решается в нашей лаборатории – изучить резонансные эффекты и с их помощью дополнительно усиливать уже существующие механизмы излучения.

Еще одна задача - создать компактные установки когерентного излучения. Существующие лазеры на свободных электронах — это здоровенные такие штуковины. Например, Swiss FEL, Швейцария, 800 метров в длину, European XFEL, Германия – 3 километра; даже современные синхротронные кольца — это, как минимум 300 метров в окружности. Такие установки строить долго и дорого, и в каждой исследовательской лаборатории или центре их не поставишь. А если бы были установки компактные, сравнительно недорогие – насколько б увеличилось число открытий на них, возросли возможности их конкретных применений?

То есть вы проверяете, можно ли уместить такой лазер, условно говоря, в одной комнате?

Точно можно. К примеру, можно использовать эффект обратного комптоновского рассеяния. Он по своей природе очень простой. Если мы светим лазером на пучок электронов, то фотоны от этого пучка отражаются. Фотоны легкие, электроны тяжелые – мы из школьной физики знаем, что при столкновении легкого тела с тяжелым легкое приобретает дополнительный импульс, то есть увеличивает свою скорость. Но фотоны всегда движутся со скоростью света. И если они приобретают от столкновения дополнительную энергию, то у них увеличивается не скорость, а частота. То есть, если мы светили лазером в оптическом диапазоне, то получаем луч уже в коротковолновом диапазоне. Это сравнительно простой способ получить очень жесткое излучение, рентгеновское, гамма-, причем его можно получать на довольно компактных установках. В США уже делают и продают такие установки. Неудивительно - в США много денег, много ученых, много фирм, которые вкладываются в технологии. Но там пока еще даже близко не достигнуто то, что можно выжать из этого процесса. У нас есть идеи, как можно еще усилить интенсивность таких источников – например, за счет использования краб-схемы. А еще, как можно реализовать такие источники на основе обратного комптоновского рассеяния в области, чрезвычайно популярной в наши дни (Нобелевские премии 2018, 2024 года) – аттосекундной оптике. Мы не одни это знаем: судя по публикациям ребята в MIT тоже об этом знают – но зато мы можем построить теорию, которая опишет детально это не самое простое явление. И, конечно, нам для всего этого хорошо бы иметь экспериментальные машины, хотя лично мне, как теоретика, они, в принципе, не сильно нужны: я и так уверен в своих результатах. Но, эксперимент — тоже очень интересная штука. Он не только позволяет доказать верность твоих идей широкому научному сообществу, но и показывает что-то новое, что ты мог просто не рассмотреть, позволяет провести твои идеи в жизнь – сначала на первых экспериментах, потом отработать их и превратить в технологии,

которые потом будут реализованы в виде доступных всем приборов, способов исследования и воздействия на самые разные объекты, и перейдут в сферу услуг, доступных всем людям.

То есть физика нас еще не раз удивит?

Точно да. Удивит, и не раз. Физика уже дала удивительные практические результаты. Не говоря даже про самолеты и космические спутники, компьютеры и смартфоны, сверхбыструю связь и новые материалы. Вот буквально пара-тройка из сотен, может и тысяч примеров: вот сегодня в медицине повсеместно применяют исследования МРТ. Ну а в основе МРТ лежит явление ядерно-магнитного резонанса. А ведь еще несколько десятков лет назад этим занимались только физики-теоретики. Или взять позитрон-эмиссионную томографию. Что такое позитрон? Это ведь антивещество, это античастицы электронов – а мы сегодня эту антиматерию, что еще в моем детстве казалась фантастикой, используем в ПЭТ-томографах. Или вот сегодня лазеры стали повседневностью: сверхкороткими лазерными вспышками корректируют зрение, испаряя часть хрусталика, и это уже 10-15 лет доступно не в единичных крупнейших медицинских центрах, а чуть ли не в каждом районе любого большого города. И мы в наших исследованиях тоже движемся вперед.

Источник: официальный сайт НИЯУ МИФИ, 27 ноября 2024 года

<https://mephi.ru/press/news/23748>