

Физики создали настольный рентгеновский микроскоп

16.10.09 | [Физика](#), [Юрий Ерин](#)

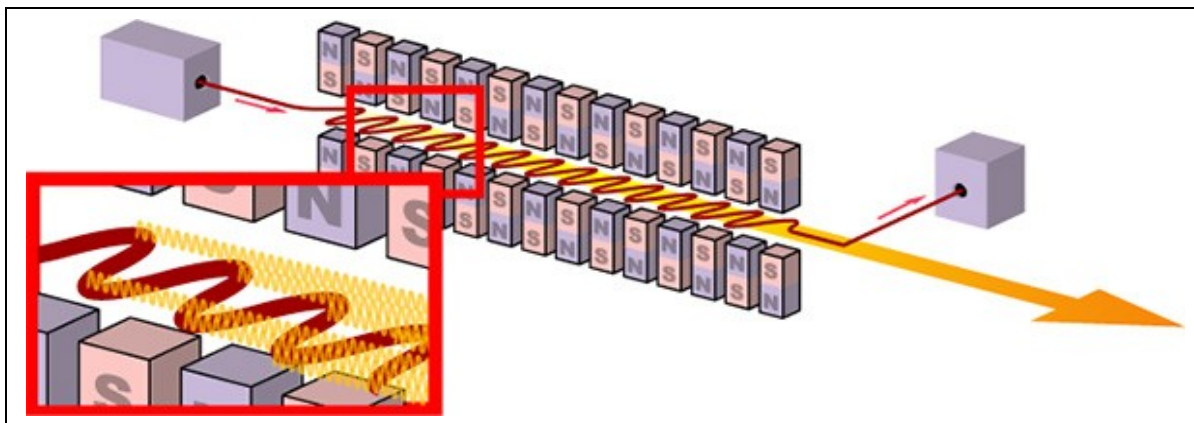


Рис. 1. Принципиальное устройство ондулятора. Магниты располагаются так, чтобы под действием магнитного поля электроны двигались по траектории (показана красным цветом), напоминающей синусоиду. Такое движение электронного луча приводит к возникновению магнитотормозного когерентного излучения (направление излучения показано желтым цветом). Рис. с сайта ru.wikipedia.org

Самые мощные источники рентгеновского излучения — синхротроны и лазеры на свободных электронах (рентгеновские лазеры), применяющиеся для исследований широкого класса научных задач, в частности как «микроскопы» для изучения атомарной структуры различных объектов. Однако высокая стоимость их постройки и эксплуатации, а также огромные размеры не позволяют оснастить синхротроном или рентгеновским лазером каждую научную лабораторию. Немецким физикам удалось создать настольный источник направленного рентгеновского излучения, который тоже может выполнять функции рентгеновского микроскопа. Размеры их прибора не превосходят и одного метра, а характеристики практически не уступают современным синхротронам и лазерам на свободных электронах.

Чтобы «увидеть» строение и динамику внутренней структуры вещества в масштабе одного атома и меньше нужен микроскоп с пространственным разрешением порядка ангстрема (10^{-10} м). Обычный световой микроскоп для этих целей не подходит, поскольку длина волны света составляет несколько тысяч ангстрем. Поэтому ученые пользуются микроскопами с яркими и короткими (порядка 10^{-15} секунд) рентгеновскими импульсами, чья длина волны меняется в пределах от 0,1 до 100 ангстрем. К сожалению, рентгеновские импульсы с такими характеристиками могут быть созданы лишь огромными и очень дорогими установками — синхротронами и лазерами на свободных электронах (их еще называют рентгеновскими лазерами).

Принцип работы обоих устройств основан на известной из электродинамики разновидности магнитотормозного излучения — синхротронном излучении. Если заряженная частица движется со скоростью, очень близкой к скорости света

(ультрарелятивистская частица) в магнитном поле криволинейным образом, то она начинает излучать во всём спектре электромагнитных волн. Максимум мощности излучения приходится на некоторую характерную частоту, определяющуюся энергией частицы, ее массой и напряженностью магнитного поля. Если взять легкую частицу (например, электрон или позитрон) и создать высокую напряженность магнитного поля, то характерная частота будет находиться в требуемой рентгеновской части спектра.

В синхротроне частицы (как правило, электроны), предварительно разогнанные до ультрарелятивистских скоростей электрическим полем, движутся по кругу и излучают направленные рентгеновские лучи (см. [анимацию](#)).

В рентгеновском лазере ультрарелятивистские частицы (электроны; поэтому его называют лазером на свободных электронах) попадают в массив магнитов, расположенных специальным образом. Эти магниты заставляют электроны двигаться, как лыжники-слаломисты, спускающиеся с горы. Массив таких магнитов, искривляющих траекторию электронов, называют **ондулятором**. Слаломное движение электронов в ондуляторе вынуждает их когерентно излучать (рис. 1). А там, где имеет место когерентное излучение, появляется возможность создать лазерный рентгеновский луч.

Благодаря таким вот «супермикроскопам» (синхротронам и рентгеновским лазерам) ученые получили немало ценных научных результатов. Однако существенный недостаток всех этих установок — их огромные размеры и чрезвычайно высокая стоимость. Например, японская установка синхротронного излучения [Spring-8](#), благодаря которой впервые удалось получить трёхмерное изображение человеческой хромосомы (см. [Получено трехмерное изображение человеческой хромосомы](#), «Элементы», 31.01.2009) и вируса (см. [Впервые получено рентгеновское изображение вируса](#), «Элементы», 26.06.2008) занимает площадь около 141 гектара, а на ее строительство было затрачено около 1,2 млрд американских долларов. Готовящийся к запуску в 2014 году в Германии лазер на свободных электронах [European X-Ray Laser](#) имеет длину 3,4 км, а бюджет строительства составляет больше 1 млрд евро.

Группа ученых из Германии (их статья [Laser-driven soft-X-ray undulator source](#) опубликована в журнале *Nature Physics*) предложила иной способ создания источника рентгеновского излучения — пусть и не очень мощного, но очень компактного и, что немаловажно, дающего направленный рентгеновский луч, что позволяет использовать источник и как рентгеновский микроскоп. Вся установка занимает около метра.

Физические принципы ее работы ничем не отличаются от лазера на свободных электронах. По-прежнему источником рентгена служат очень быстро движущиеся электроны. Вот только предварительный разгон электронов до ультрарелятивистской скорости осуществляется не на расстоянии около километра, как в рентгеновском лазере или синхротроне, а на значительно меньшей дистанции — несколько сантиметров. Такая миниатюризация стала возможна благодаря использованию лазерно-плазменного ускорителя — основной детали компактного источника направленного рентгеновского излучения. Как работает этот ускоритель, «Элементы» подробно уже писали (см. [Плазменные ускорители преодолели рубеж в 1 ГэВ](#), 29.09.2006). Напомним лишь кратко, что сверхмощный лазерный импульс направляется в емкость с газом, сильно ионизирует его атомы (рождается плазма) и оставляет за собой следы в виде микроскопических «пузырей» с продольно ориентированными сильными электрическими полями. Электроны образовавшейся плазмы захватываются этими «пузырями» и ускоряются в них до ультрарелятивистских скоростей (рис. 2).

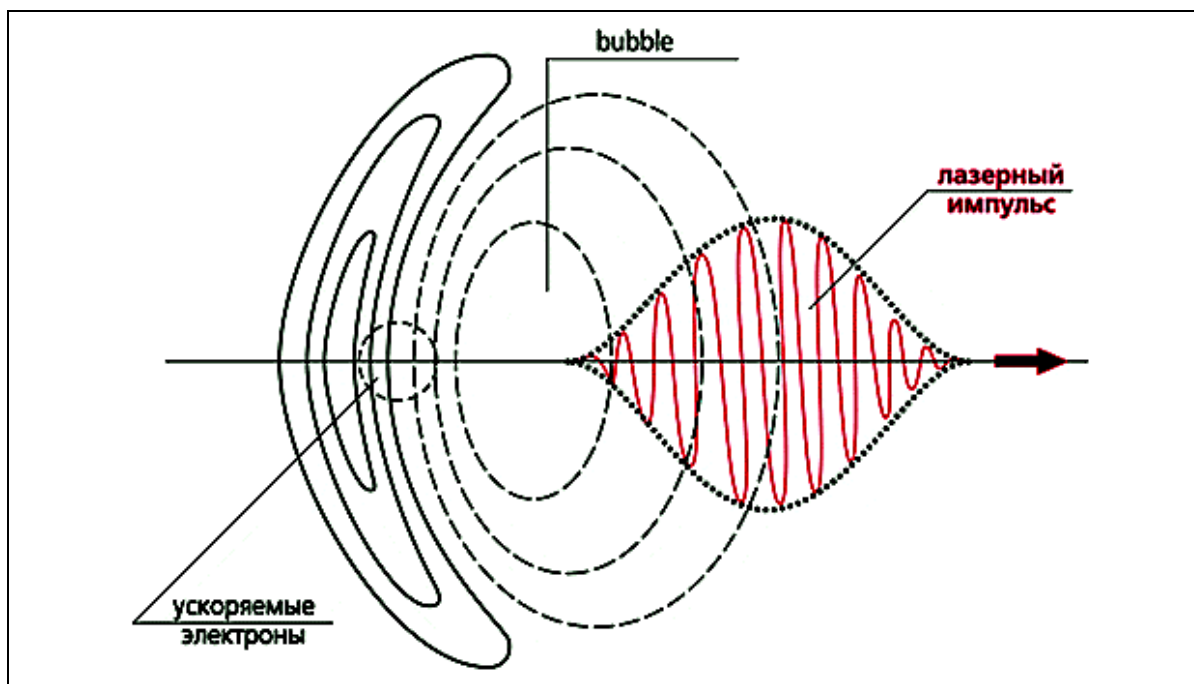


Рис. 2. Распространение лазерного импульса, приводящее к появлению областей (bubble — от *англ.* пузырь) с очень сильным электрическим полем. Из плазмы в пузырь захватываются электроны, которые затем в нем ускоряются. Рисунок с сайта vivovoco.astronet.ru

У авторов обсуждаемой статьи лазерно-плазменный ускоритель состоял из лазера, испускающего световые импульсы мощностью 20 тераватт (1 тераватт = 10^{12} Вт) и длительностью 37 фемтосекунд (1 фемтосекунда = 10^{-15} с) с энергией 850 миллиджоулей, и 15-миллиметрового сосуда с газообразным водородом (рис. 3), в который эти импульсы попадают.

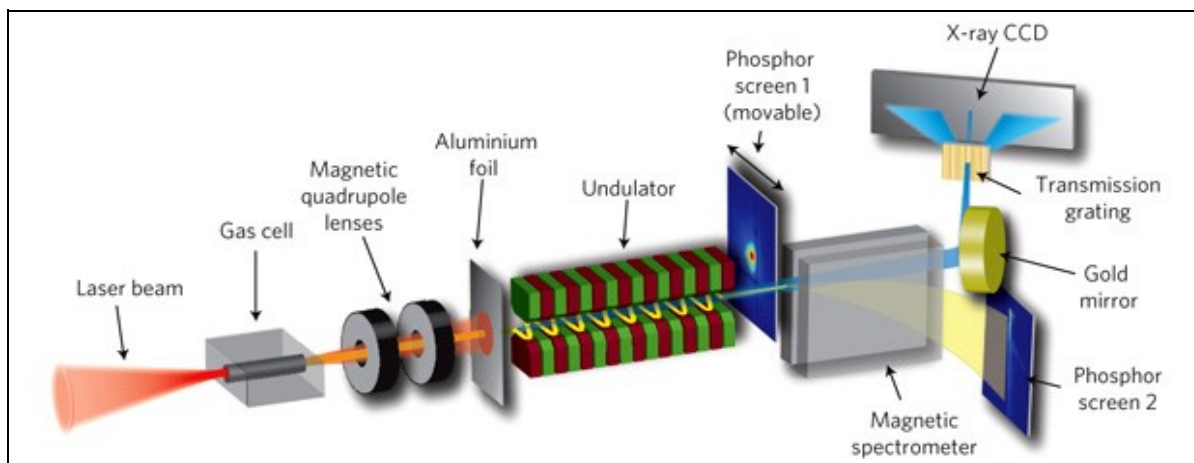


Рис. 3. Схематический рисунок настольного источника рентгеновского излучения. Сверхмощный лазерный импульс направляется в 1,5-сантиметровую емкость с водородом, из которой затем вырываются ультрарелятивистские электроны (механизм их ускорения описан в тексте). Образовавшийся электронный пучок фокусируется квадрупольными магнитными линзами. «Паразитное» излучение от плазмы и лазерный луч блокируются алюминиевой фольгой толщиной 15 мкм. Далее электронный пучок, прошедший через фольгу, попадает в ондулятор длиной 30 см и излучает узконаправленный рентгеновский луч (показан *синим цветом*). Полученное рентгеновское излучение отражается от золотого зеркала, затем направляется на дифракционную решетку и фиксируется с помощью ПЗС-камеры. Эти манипуляции необходимы для того, чтобы получить характеристики рентгена. Спектр излучивших электронов изучается с помощью фосфорных экранов. Рисунок из обсуждаемой статьи в *Nature Physics*

Под действием сверхмощных лазерных импульсов емкость с водородом становилась источником электронного пучка, энергия которого была сосредоточена в основном

в области 190–240 МэВ (1 МэВ = 10^6 электронвольт). Далее ультрарелятивистские электроны пучка проходили через маленькие магнитные квадрупольные линзы, расположенные приблизительно в 25 см от ускорителя. Их назначение — фокусировать электронный пучок в луч (рис. 4).

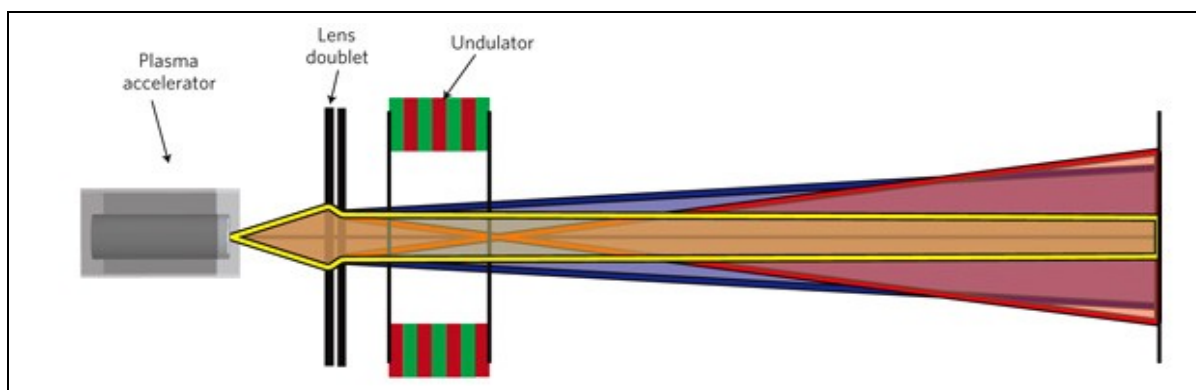


Рис. 4. Квадрупольные магнитные линзы выполняют функцию фокусировки электронов, разогнанных до ультрарелятивистских скоростей с помощью лазерно-плазменного ускорителя. Красным цветом изображены электроны с энергией 190 МэВ, желтым — 215 МэВ и синим — 240 МэВ. Рисунок из обсуждаемой статьи в *Nature Physics*

Чтобы избавиться от «паразитного» излучения плазмы и ненужного теперь лазерного луча на пути следования электронов, авторы статьи установили алюминиевую фольгу толщиной 15 мкм (1 микрометр = 10^{-6} м). Направленный электронный луч, проходя через алюминий, попадает в массив специальным образом расположенных магнитов (ондулятор) длиной 30 см. Ондулятор сконструирован так, что его магнитное поле, искривляя путь электронного луча, приводит к появлению синхротронного излучения с характерной частотой в области рентгеновского диапазона. Как показали исследования (рис. 3), движущимися электронами генерируются две основные компоненты (гармоники) рентгеновского излучения — с длиной волны 18 и 9 нм (рентген с такой длиной волны называют «мягким», отсюда слово *soft* «мягкий» в названии статьи). Таким образом, рентген создается устройством, в состав которого входит 1,5-сантиметровая емкость с водородом, совсем крошечные магнитные линзы и ондулятор длиной 30 см. Несложно посчитать, что, если не принимать во внимание размеры лазера, вся конструкция для получения рентгеновского излучения имеет длину около 1 м (с учетом расстояний между компонентами устройства) и может легко разместиться на обычном столе. Как замечают авторы публикации, такой прибор идеально подходит для университетских лабораторий.

Помимо небольших размеров, описанное устройство имеет несколько важных преимуществ, позволяющих рассматривать его не только как источник рентгеновского излучения, но и как рентгеновский микроскоп. Во-первых, излучение прибора имеет малую расходимость в пространстве. Иными словами, имеет место не просто излучение, а направленный сфокусированный узкий рентгеновский луч наподобие лазерного. Во-вторых, излучение носит импульсный характер с длительностью одного импульса порядка 10 фемтосекунд. Это на порядок меньше, чем рентгеновское излучение, получаемое в лучших синхротронах и лазерах на свободных электронах. И в-третьих, для своих маленьких размеров источник излучения достаточно яркий (большое количество рентгеновских фотонов, излучаемых за секунду в единицу телесного угла). Последние два свойства прибора имеют большое значение при исследованиях быстропротекающих химических процессов, а также в изучении неустойчивых или разрушающихся под действием «жесткого» излучения (вроде рентгеновского) микроструктур, например клеточных органелл.

В заключение можно сказать, пожалуй, еще об одном достоинстве устройства. Длину волны генерируемого излучения можно менять как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения, не только «настраивая» мощность лазерного импульса, но и при помощи небольшого сдвига квадрупольных магнитных линз.

Источник: Matthias Fuchs, Raphael Weingartner, Antonia Popp, Zsuzsanna Major, Stefan Becker, Jens Osterhoff, Isabella Cortie, Benno Zeitler, Rainer Hörlein, George D. Tsakiris, Ulrich Schramm, Tom P. Rowlands-Rees, Simon M. Hooker, Dietrich Habs, Ferenc Krausz, Stefan Karsch, Florian Grüner. [Laser-driven soft-X-ray undulator source](#) // *Nature Physics* (published online 27 September 2009).