

Самый яркий СИ-генератор

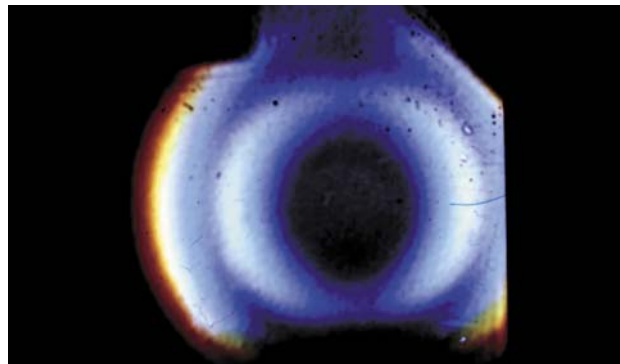
Генератор синхротронного излучения, дающий самый яркий на сегодняшний день пучок фотонов, был создан в Институте ядерной физики СО РАН (Новосибирск) и установлен в синхротронном центре ALBA CELLS (Испания).

Более ста лет назад немецкий математик Г. Шотт, исследуя свойства излучения, испускаемого движущимся по окружности электроном, вывел формулы, описывающие спектрально-угловое распределение мощности излучения релятивистского заряда. Это и стало началом истории синхротронного излучения – этим термином было названо электромагнитное излучение, которое получается при движении релятивистского электрона (или другой заряженной частицы, движущейся со скоростью, близкой к скорости света) сквозь поперечное магнитное поле. По длине волн это излучение относится к широкой области спектра – от инфракрасной до рентгеновской компоненты.

Открытие синхротронного излучения практически совпало по времени с открытием явления сверхпроводимости металлов – одного из самых ярких научных событий XX в. Судьба этих двух важнейших открытий оказалась удивительно схожей, поскольку оба они по достоинству были оценены лишь полвека спустя.

В 1940-е гг. при работе на кольцевых ускорителях (в которых электроны разгоняются до релятивистских скоростей) физики обнаружили, что на синхротронное излучение расходуется значительная доля энергии. И только спустя два десятилетия были найдены способы использования этого излучения. По сравнению с рентгеновскими аппаратами синхротронные генераторы давали более узкий монохроматический луч очень высокой яркости (энергетической плотности). Таким образом, синхротронное излучение оказалось прекрасным инструментом для изучения внутренней структуры вещества.

Удивительное совпадение, но еще через двадцать с небольшим лет именно сверхпроводимость была



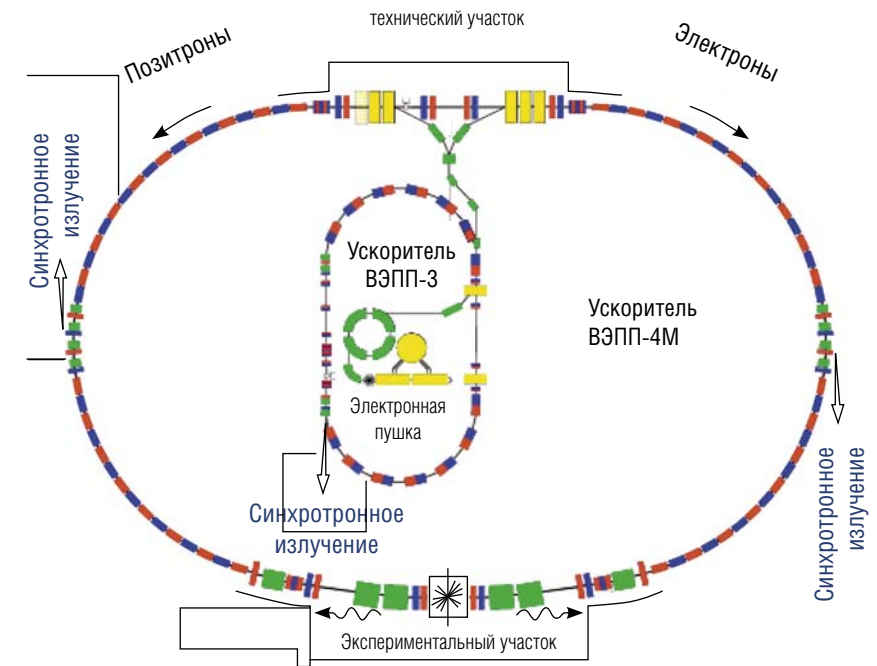
Этот свет из первого сверхпроводящего вигглера ИЯФ СО АН СССР демонстрирует радиальное распределение интенсивности синхротронной радиации. Фото автора

В 2011 г. исполнилось 100 лет со дня открытия явления сверхпроводимости. Датский ученый Х. Камерлинг-Оннес обнаружил, что при охлаждении ртути до температуры ниже 4,2 К происходит неожиданно резкий (минимум на 4 порядка) спад электрического сопротивления. Сейчас известно уже несколько сотен металлических сплавов и чистых металлов, являющихся сверхпроводниками при очень низких температурах.

В 1986 г. было открыто сверхпроводящее состояние в керамических соединениях – смешанных оксидах нескольких химических элементов. У этих веществ температура перехода может достигать 160 К.

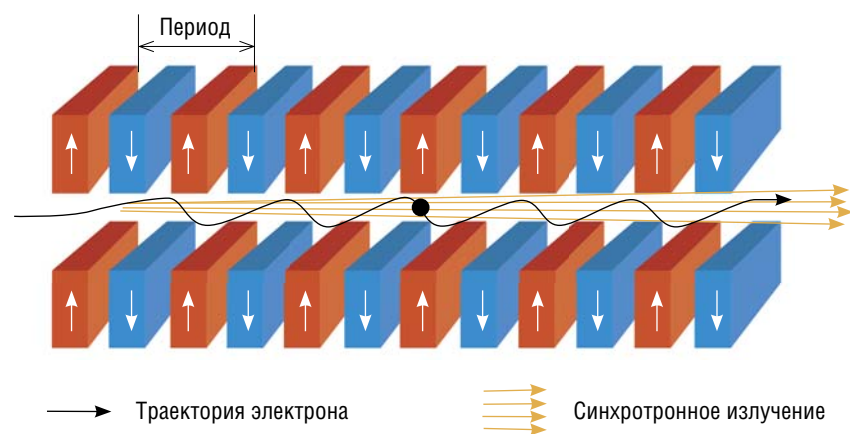
За работы в области сверхпроводимости было присуждено шесть Нобелевских премий по физике, в том числе: в 1962 г. – Л. Ландау (СССР) за разработку теории сверхпроводимости Гинзбурга-Ландау; в 2003 г. – В. Гинзбургу, А. Абрикосову (Россия) и А. Леггету (Великобритания) за исследование сверхпроводников II рода. Явление сверхпроводимости нашло многочисленное применение в науке и технике, одно из важнейших – создание ускорителей нового поколения (коллайдеров)

Ключевые слова: сверхпроводимость, магнит, вигглер, ондулятор, синхротронное излучение.
Key words: superconductivity, magnet, wiggler, undulator, synchrotron radiation



Понадобилось около полвека, чтобы синхротронное излучение стало мощным инструментом в исследовании вещества. Современный ускорительно-накопительный комплекс ИЯФ СО РАН (справа) обеспечивает синхротронным излучением более 20 научно-исследовательских станций, на которых работают люди самых разных специальностей, от химиков до археологов





Первый в мире сверхпроводящий вигглер, изготовленный в ИЯФ СО АН в 1979 г. (справа), представлял собой два ряда коротких сверхпроводящих магнитов чередующейся полярности. Магниты создают знакопеременную зависимость величины магнитной индукции поля от продольной координаты, близкую к синусоидальной. В таком поле заряженные частицы движутся по извилистой кривой в плоскости между магнитами, напоминающей путь змеи. Фото автора



В центре синхротронного излучения ALBA CELLS (Испания) запускается в эксплуатацию 119-полюсный сверхпроводящий вигглер, разработанный и созданный в новосибирском Институте ядерной физики СО РАН. Фото автора

Вигглер и ондулятор – это специализированные источники синхротронного излучения. Их собирательное русскоязычное название – «змейка».

Электрон излучает на криволинейном участке траектории движения. Длина этого участка зависит (обратно пропорционально) только от величины магнитной индукции поля, сквозь которое пролетает заряженная частица.

Если длина криволинейного участка будет меньше периода «змейки», т. е. расстояния между соседними одинаковыми полюсами магнита, то спектр излучения получится сплошным. Именно такой режим реализуется в вигглере. В ином случае спектр будет линейчатым – ондуляторным

использована для многократного усиления мощности генератора синхротронного излучения. В 1979 г. в новосибирском Институте ядерной физики СО АН СССР была изготовлена и установлена на электронный накопитель ВЭПП-3 сверхпроводящая «змейка» – первый в мире источник синхротронного излучения, где нужная структура магнитного поля поддерживалась последовательностью коротких сверхпроводящих магнитов. Она состояла всего из двадцати пар магнитов, но получаемый с ее помощью пучок фотонов был ярче почти в 200 раз по сравнению с излучением, получающимся при использовании поворотных магнитов.

За последние пятнадцать лет ИЯФ изготовил и поставил в США, Англию, Канаду, Германию, Италию, Бразилию, Испанию и другие страны полтора десятка сверхпроводящих вигглеров (генераторов синхротронного излучения со сплошным спектром). Технические характеристики этих устройств различаются, поскольку спектр излучения оптимизировался в соответствии с конкретными задачами.

Так, сверхпроводящий 21-полюсный вигглер с самой высокой величиной магнитного индукции (7,5 Тл) был построен для Центра синхротронного излучения Инс-

титута атомной энергии им. И. В. Курчатова (Москва), где он используется для решения задач материаловедения, связанных со структурным анализом вещества, включая наноматериалы.

В октябре 2011 г. в синхротронном центре ALBA CELLS (Каталония, Испания) был запущен 119-полюсный вигглер с периодом 3 см и с амплитудой магнитного поля 2,1 Тл, еще одно «детище» ИЯФа. Он дает самую высокую на сегодняшний день плотность излучения: рентгеновский луч в диапазоне энергий фотонов 1–60 кэВ мощностью 20 кВт сосредоточен в очень узком конусе (менее 10^{-6} стерадиан). Это устройство интересно еще и тем, что занимает промежуточное положение между вигглером и ондулятором: спектр излучения в мягкой области (до 6 кэВ) у него линейчатый, а при более высоких энергиях фотонов – сплошной.

Этот чрезвычайно яркий пучок позволяет получать изображения с помощью рентгеновской трансмиссионной микроскопии и микротомографии, что важно для нанодиагностики и изучения объемной структуры образцов. С помощью методики «порошковой» дифрактометрии стало возможным исследовать с высоким пространственным разрешением структуру наномате-

риалов. А поскольку измерения можно проводить за времена менее 1 нс, это позволит изучать в динамике быстротекающие процессы.

Несколько сверхпроводящих многополюсных вигглеров с полем 4,2 Тесла, изготовленных в ИЯФ, установлены в международных центрах СИ для проведения биомедицинских исследований, таких как трехмерный количественный анализ содержания минералов в костной ткани, механическое поведение кости под нагрузкой и т. д.

Яркие рентгеновские пучки представляют также огромный интерес для материаловедения и инженерии, так как позволяют исследовать особенности объемной структуры многофазных композиционных материалов, в том числе трещины и поры. В химической инженерии можно исследовать потоки несмешивающихся жидкостей. Для этих целей уже в следующем году будут поставлены многополюсные сверхпроводящие вигглеры для научных центров России, Австралии, США и Германии.

Д. ф.-м. н. Н. А. Мезенцев (Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск)