

СОВРЕМЕННЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЕ

Ю. Э. Пенионжкевич

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия
Научный исследовательский ядерный университет (МИФИ), Москва, Россия

Modern Charged Particle Gas Pedals and Their Applications

Yu. E. Penionzhkevich

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia
National Research Nuclear University, Moscow, Russia

В статье рассматривается применение ускорителей заряженных частиц в различных научно-технических исследованиях и промышленности. Многочисленные возможности этих методов позволяют точно определять содержание элементов в различных образцах, производить радиоизотопы для медицины, изготавливать ядерные мембраны. Эти применения ядерного излучения доказывают, что они могут быть широко использованы для решения большого разнообразия проблем, в том числе экологических.

Ключевые слова: ускорители заряженных частиц, ядерная физика, микромир, методы ускорения, безопасность

The paper reviews the application accelerators in different scientific and technical investigations, and industry. The many possibilities these methods give for the exact determination of elemental abundances in different samples, the production of radio-isotopes for medicine, and the manufacturing of nuclear membranes. These applications of nuclear radiation prove that they can be widely used in solving a great variety of problems, including ecological safety.

Keywords: charged particle gas pedals, nuclear physics, microcosm, acceleration methods, safety

Введение

Представление о ядерной физике у многих людей складывалось под влиянием наиболее яркого и трагического использования этой науки для создания атомной бомбы. Между тем, с момента открытия радиоактивности супругами Кюри в 1895 году, ядерная физика и большинство её фундаментальных результатов внесли решающий вклад в развитие многих областей науки, техники и медицины. Стоит вспомнить в связи с этим использование рентгеновских лучей в медицине, эффекта Мёссбауэра для анализа структурных особенностей твёрдых тел, радиоизотопный метод определения возраста различных объектов, активационный метод определения элементного состава вещества с высокой чувствительностью (до 10–10 г/г), не говоря уже об использовании ядерной энергии для получения электроэнергии. Этот список можно было бы ещё и ещё продолжать. Поэтому необходимо совершенно четко представлять себе, что ядерная физика настолько тесно вошла в нашу жизнь, что без неё уже немислимо наше цивилизованное существование. Настоящая статья не претендует на полное описание всех возможностей методов ядерной физики в решении важных для общества проблем. В ней пред-

ставлены лишь некоторые направления, развиваемые с использованием ускорителей заряженных частиц — это получение радиоизотопов для медицины, радиотерапии, производство специальных микрофильтров, радиационное материаловедение. Эти важные направления использования результатов фундаментальных исследований ядерной физики и физики тяжёлых ионов, в частности, успешно развиваются в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флёрова Объединённого института ядерных исследований в Дубне и в других ведущих научных центрах мира.

Ускорители заряженных частиц являются основным устройством, используем для изучения свойств ядерной материи, а также для многих других областей науки и техники. Ускоритель позволяет сформировать пучок частиц или ядер с требуемыми для эксперимента характеристиками (энергией, интенсивностью, пространственными размерами и т. д.). Ускорители различаются типом ускоряемых частиц, характеристиками пучка (энергией, интенсивностью и др.), а также конструкцией. Диапазон ускорителей по энергии пучков весьма разнообразен — от нескольких электронвольт (электронные микроскопы) до несколько гига и тераэлектронвольт (коллайдеры). В ускорительной физике используются следующие единицы:

1 килоэлектронвольт — 1 кэВ = 10³ эВ
 1 мегаэлектронвольт — 1 МэВ = 10⁶ эВ = 1000 кэВ
 1 гигаэлектронвольт — 1 ГэВ = 10⁹ эВ = 1000 МэВ
 1 тераэлектронвольт — 1 ТэВ = 10¹² эВ = 1000 ГэВ

Необходимость использования ускорителей для исследования структуры микромира очевидна. Во-первых, атомные ядра и элементарные частицы занимают очень малые области пространства, и проникновение в эти области требует высокой разрешающей способности зондирующего пучка, обеспечивающей взаимодействие отдельной частицы с отдельным микрообъектом. Во-вторых, чем меньше микрообъект, тем он прочнее и проведение экспериментов с перестройкой или разрушением внутренней структуры такого объекта также требует большей энергии.

Зная размеры изучаемого объекта, легко оценить энергию пробных частиц, необходимую для его изучения. Всякая частица обладает волновыми свойствами. Длина её волны или линейный размер зависит от импульса p (энергии) и дается формулой де Бройля

$$\lambda = \frac{h}{p} \approx \frac{2\pi\hbar}{E} \approx \frac{2\pi \cdot 200 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм}}{E(\text{МэВ})}$$

Здесь h — постоянная Планка, а $1 \text{ Фм} = 10^{-13} \text{ см}$. Приведённая формула даёт также связь между длиной волны (линейным размером объекта) и её кинетической энергией E в мегаэлектронвольтах. Структура объекта становится «видимой», если длина волны де Бройля сравнима или меньше размера (радиуса) объекта R , т. е. при $\lambda \leq R$. Качественное сравнение линейных размеров микрообъектов и соответствующей энергии протона представлено на рис. 1. Из рисунка видно, что для исследования ядер и нуклонов необходимы энергии в диапазоне $1 \text{ МэВ} < E < 1 \text{ ГэВ}$, для исследования кварковой структуры бомбардирующей частицы необходимо ускорять до энергий $E = 1 \text{ ГэВ} - 1 \text{ ТэВ}$ и более. В соответствии с этими задачами и определяется выбор того или иного ускорителя. Существующие ускорители, а их в настоящее время насчитывается более 10 тысяч, делятся на две группы — исследовательские ускорители и ускорители для прикладных исследований. К первой группе относятся ускорители для исследований в области ядерной физики и элементарных частиц, радиохимии, физики твёрдого тела и др. Ко второй группе — ускорители для практического использования: облучение природных образцов (активационный анализ), радиотерапия (медицина), производство радиоизотопов, для технологических облучений различных материалов, применяемых в индустрии, радиографии и др.

Ускорители различаются типом ускоряемых частиц, характеристиками пучка (энергией, интенсивностью и др.), а также конструкцией. Наиболее распространены ускорители электронов и протонов, поскольку пучки этих частиц проще всего приготовить.

Любой ускоритель конструктивно состоит из трёх частей — системы, где «изготавливаются» ускоряемые частицы (инжектор), ускорительной системы, где низкоэнергичные частицы от инжектора (обычно

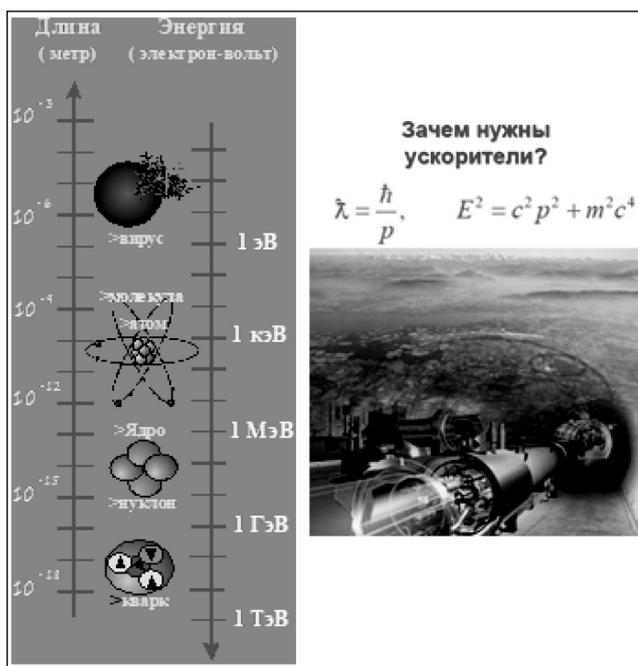


Рис. 1. Зависимость линейного размера исследуемого объекта от энергии протона в ускорителе.

сформированные в виде локализованных в пространстве сгустков) увеличивают в высоком вакууме энергию до проектной, и системы транспортировки (вывода) пучка к исследуемому объекту. Условно, с точки зрения траектории, по которой частицы двигаются в процессе ускорения, ускорители можно разбить на два класса — линейные (и прямого действия) и циклические. В линейных ускорителях частицы в процессе ускорения двигаются прямолинейно, а в циклических — либо по одной и той же замкнутой траектории, многократно проходя одни и те же ускоряющие промежутки (синхротроны), либо по траектории, напоминающей раскручивающуюся спираль (циклотроны, микротроны, фазотроны). Основными ускорителями, позволяющими получать высокие энергии и интенсивности пучков заряженных частиц, являются циклотроны, синхротроны, линейные ускорители и ускорители на встречных пучках. Ускорители бывают низких, средних и высоких энергий. Ускорители низких энергий получают пучки заряженных частиц в диапазоне 10–100 МэВ, ускорители средних энергий имеют пучки с энергией 100–1000 МэВ, ускорители высоких энергий имеют пучки с энергией 1 ГэВ и выше.

Классификация методов ускорения

Первая ядерная реакция была осуществлена с использованием простого электростатического ускорителя в 1932 году Кокрофтом и Уолтоном в Кэмбридже. В этом ускорителе протоны ускорялись до энергии 150 кэВ. Через несколько лет после этого американский ученый Ван де Грааф создал электростатический генератор, в кото-

ром использовался высоковольтный источник (кондуктор) для ускорения частиц. Этот тип ускорителя работает во многих ядерно-физических лабораториях. В современных тандемах Ван де Граафа напряжение на кондукторе достигает 25 МэВ, что позволяет получать пучки ускоренных ионов с энергией до нескольких МэВ на нуклон.

Проблемы повышение энергии в таких линейных ускорителях решаются в линейных высокочастотных ускорителях. В этом типе ускорителя ускоряемая частица проходит по прямой траектории через многочисленные электроды. Ускорение частиц осуществляется в пространстве между электродами. Ускоряемое напряжение подается попеременно на кольцевые электроды с частотой, соответствующей скорости пролета частицы межэлектродного пространства. Несмотря на то, что линейные ускорители позволяют ускорять заряженные частицы до энергии несколько гигаэлектронвольт (ГэВ $\sim 10^9$ эВ), это требует громадных линейных размеров ускорителей. Так линейный ускоритель электронов в Стэнфорде (США) на энергию 35 ГэВ имеет длину 3200 метров. Поэтому следующим этапом в развитии ускорителей явилось использование циклических ускорителей — циклотронов. В этих ускорителях, в отличие от линейных, ускоряемые ионы многократно пересекают ускоряющие электроды (дуанты) (см. рис. 2). В ускоряемом пространстве ионы удерживаются перпендикулярным магнитным полем.

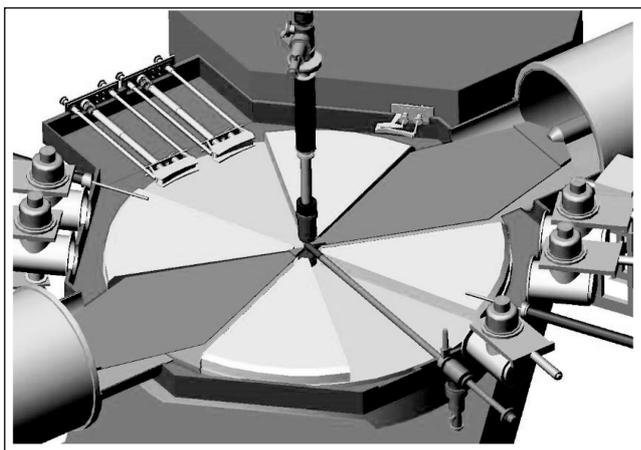


Рис. 2. Схема циклического ускорителя. Пучок по спирали движется от ионного источника, расположенного в центре, ускоряясь в каждой промежутке между электродами (дуантами) и затем выводится на мишень.

Следующим шагом в развитии ускорителей высоких энергий явилось открытие автофазировки, сделанное независимо российским ученым академиком Векслером и американским Макмиланом. Эта идея нашла воплощение в синхротроне, в котором частицы ускоряются высокочастотным ускоряющим потенциалом в возрастающем магнитном поле (см. рис. 3).

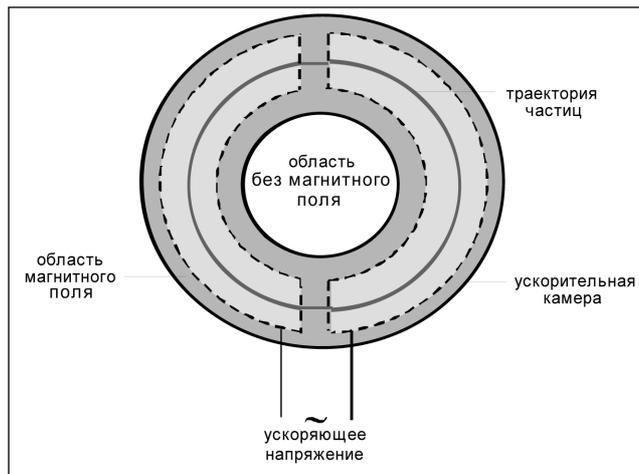


Рис. 3. Схема синхротрона.

Современные протонные синхротроны позволяют получить пучки протонов с энергиями 1000 ГэВ (1 ТэВ). В отличие от циклотронов, магнитное поле в синхротронах формируется только в области кольца, в котором ускоряются частицы. Поэтому электромагниты расставляются вокруг кольца. Диаметр орбит современных синхротронов высоких энергий достигает нескольких сотен метров.

Дальнейшее совершенствование циклотронных методов ускорения связано с появлением синхроциклотронов и изохронных циклотронов. Синхроциклотрон отличается от классического циклотрона тем, что ускоряющее напряжение подается на электроды не с постоянной частотой, а эта частота варьируется в зависимости от длительности цикла ускоряемых частиц. Изохронный циклотрон отличается от классического действием магнитного поля вдоль орбиты ускоряемой частицы. В классическом циклотроне это поле постоянно вдоль орбиты и увеличивается с радиусом ускорения; в изохронном циклотроне, наоборот, движущаяся по орбите частица испытывает изменяющееся действие магнитного поля, которое меняется по азимуту. Синхроциклотрон и релятивистский циклотрон позволяют получить энергии частиц до нескольких сотен МэВ. Накопительные кольца имеют несколько иные принципы получения пучков, нежели ускорители. Метод встречных пучков, используемый в накопительных кольцах использует возможность взаимодействия в накопительных кольцах двух пучков, ускоренных в противоположных направлениях. Этот метод, предложенный впервые в Новосибирске академиком Будкером, в настоящее время используется при получении пучков сверхвысоких энергий.

В 2008 года в в научно-исследовательском центре Европейского совета ядерных исследований (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN), был запущен Большой адронный коллайдер (Large Hadron Collider, LHC; сокр. БАК) — ускоритель заряженных частиц на встречных пучках, предназначенный для ускорения протонов и тяжёлых ионов (ионов свинца) и изучения продуктов их взаимодействия. Коллайдер построен в научно-

исследовательском центре Европейского совета ядерных исследований (CERN), на границе Швейцарии и Франции, недалеко от Женевы. В настоящее время БАК является самой крупной экспериментальной установкой в мире. Большим БАК назван из-за своих размеров: длина основного кольца ускорителя составляет 26 659 м.

Получение и использование радиоактивных изотопов в медицине

Большую роль играют ускорители в прикладных исследованиях, в том числе для производства фармпрепаратов и радиотерапии. С момента появления первых ускорителей заряженных частиц (более 60 лет назад) — они эффективно использовались для этих целей. В настоящее время около 500 специальных малогабаритных циклотронов и других ускорителей заряженных частиц работают для производства радиоизотопов для медицины. Как правило, в этих ускорителях получают пучок протонов или дейтронов с энергией до 40 МэВ и с интенсивностью пучка до 100 микроампер. На таких ускорителях получают радиоизотопы в количествах, достаточных для проведения диагностических исследований нескольких тысяч пациентов в год. Есть несколько проблем, которые необходимо решить при производстве и использовании радиоизотопов. Первая из них — высокая чистота получаемых на ускорителях препаратов. Во время облучения вещества мишени в ядерных реакциях образуется большое количество разных изотопов, многие из которых являются нежелательными для внедрения в организм (например, большое время жизни). Для получения чистых препаратов (чистота до 10^6 – 10^7) подбирают ядерные реакции, в которых необходимый изотоп образуется с большим выходом. Очистку от других элементов осуществляют с помощью радиохимических методов, а изотопов — с использованием магнитных масс-сепараторов. Вторая проблема состоит в том, что необходимо получать изотопы, живущие относительно малое время — от десятков часов до нескольких дней. Это нужно для того, чтобы после введения их в организм человека и после проведения исследований эти радионуклиды должны распадаться и прекратить своё радиоактивное воздействие на организм. Это требование чрезвычайно усложняет методику использования изотопа — нужны быстрые методы сепарации и доставки их от места производства до больницы, которые часто находятся на большом расстоянии друг от друга. Радиоизотопы в основном используются для двух целей: исследование метаболизма тех

или иных элементов в организме человека и диагностики состояния различных органов. В первом случае пациенту вводится определённый радиоизотоп в зависимости от того, какой орган предполагается исследовать. Этот метод основан на том, что каждый орган наиболее селективен к одному элементу. В таблице показаны основные радиоизотопы, получаемые на ускорителях для диагностики того или иного органа.

В последнее время стали использоваться изотопы более тяжёлых элементов, например ^{237}Pu . Этот радионуклид с периодом полураспада $T_{1/2} = 45,3$ дня применяется медиками для исследования метаболизма трансурановых элементов в организме, что чрезвычайно важно при профилактике заболеваемости жертв крупных экологических катастроф (например, Чернобыльская АЭС, районы испытания ядерного оружия).

Изотоп	Время жизни, ч	Энергия гамма-излучения, КэВ	Адсорбирующий орган
^{201}Tl	73,0	80	Сердце
^{111}In	67,2	240	Распространение инфекций
^{67}Ga	78,3	100–300	Желудок
^{123}I	13,2	160	Щитовидная железа

Другая цель использования радионуклидов для диагностики — это позитронная томография. При обследовании больного методом позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) в определённый орган человека вводится один из короткоживущих изотопов углерод-11 (период полураспада — 20 минут), азот-13 (10 минут) или кислород-15 (2 минуты). Эти изотопы,

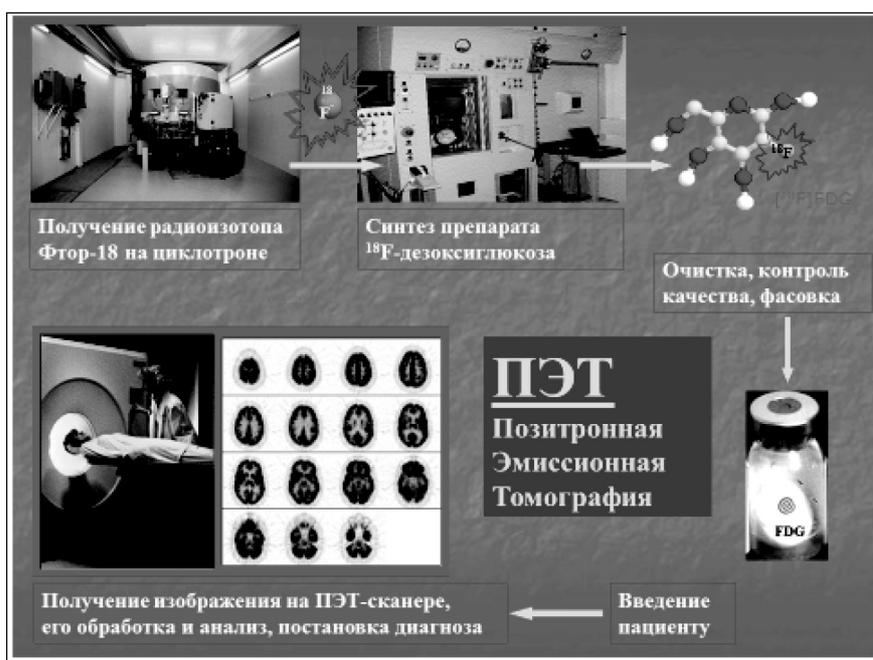


Рис. 4. Цикл получения препарата Фтора-18 для позитронно-эмиссионной томографии.

распадаясь, испускают одновременно два гамма-кванта с энергией 511 кэВ. Эти гамма-кванты измеряются специальными детекторами, расположенными вокруг тела человека. После сложнейшей обработки полученных сигналов от гамма-лучей, передаваемых на компьютер от большого количества детекторов, сигналы преобразуются в изображение органа. В отличие от рентгеновского снимка, изображение это объёмное с высоким пространственным разрешением и абсолютно безопасно для организма. На рис. 4 представлена схема получения препарата фтора-18 для позитронно-эмиссионной томографии (см. рис. 4).

Необходимо заметить, что использование радионуклидов в медицине является абсолютно безопасным ввиду очень малых доз и короткого времени жизни используемых радионуклидов. Таким образом в последнее время появилось новое направление — ядерная медицина. Это направление современной медицины, использующее радиоактивные вещества, свойства атомного ядра и ионизирующие излучения для диагностики и терапии заболеваний. Эффект от использования методов ядерной медицины дает улучшение качества лечения, сокращение расходов на лечение, повышение качества жизни миллионов пациентов.

На рис. 5 представлена таблица использования радионуклидов, получаемых на ускорителях для диагностики и терапии заболеваний.

Радионуклидная диагностика дает возможность, не нарушая целостности организма, локально и дифференцированно исследовать физиологические и биохимические процессы, отражающие состояние здоровья организма. Она позволяет выявлять отклонения от нормы на самых ранних стадиях и точно локализовать патологию.

Различается два вида радионуклидной диагностики:

- Сцинтиграфия и однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ — SPECT). Для ОФЭКТ обычно используют γ -излучатели с энергией γ -квантов в пределах 100–200 кэВ и периодами полураспада от нескольких минут до нескольких дней.
- Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ — PET). Для ПЭТ используются β^+ -излучатели с периодами полураспада от нескольких секунд до нескольких часов.

Позитронно-эмиссионная томография

Двухфотонная эмиссионная томография относится к группе функционально-ориентированных ис-



Рис. 5. Основные методы использования радиоактивных ядер, получаемых на ускорителях для диагностики заболеваний и терапии.

следований. Основан на использовании аннигиляционных гамма-квантов с энергией 0,511 МэВ, разлетающихся в строго противоположных направлениях (под углом 180 градусов) от места возникновения. Для обследований с ПЭТ используются радионуклиды, излучающие позитроны.

ПЭТ сегодня является одним из самых совершенных диагностических инструментов. Рентгеновская, ультразвуковая, и магнитно-резонансная томография проявляют структуру органа на стадии её патологического изменения. ПЭТ же способен зарегистрировать изменения в обменных процессах, которые этому предшествуют. ПЭТ помогает самому раннему распознаванию патологических сдвигов задолго до появления морфологических изменений. ПЭТ применяется в онкологии, кардиологии и неврологии, при изучении метаболических процессов в мозге и других органах, механизмов действия лекарственных препаратов. Возможности ПЭТ в значительной степени определяется арсеналом доступных меченых соединений — радиофармпрепаратов (РФП).

В таблице представлены радиофармпрепараты, используемые в ПЭТ-томографии

Радионуклид	$T_{1/2}$	Радионуклид	$T_{1/2}$
^{11}C	20,4 мин	^{68}Ga	68,0 мин
^{13}N	9,96 мин	^{75}Br	98 мин
^{15}O	2,03 мин	^{76}Br	16,2 ч
^{18}F	109,8 мин	^{77}Kr	74,7 мин
^{30}P	2,5 мин	^{82}Rb	1,3 мин
^{38}K	7,6 мин	^{87}Zr	1,6 ч
^{49}Cr	42,0 мин	^{89}Zr	78,43 ч
^{62}Cu	9,8 мин	^{92}Tc	4,44 мин
^{64}Cu	12,7 ч	^{93}Tc	2,75 ч
^{63}Zn	38,1 мин	^{110}In	69 мин

Радионуклидная терапия

Радиотерапия, лучевая терапия, радиационная терапия, радиационная онкология — лечение ионизирующей радиацией (рентгеновским, гамма-излучением, бета-излучением, нейтронным излучением, пучками элементарных частиц и тяжелыми ионами из медицинского ускорителя). Применяется в основном для лечения злокачественных опухолей. Радионуклидная терапия (РНТ) является особым видом лучевой терапии. Она заключается в использовании вводимых непосредственно в организм пациента (перорально, внутривенно, внутриполостным или внутритканевым способом) радиофармпрепаратов (РФП), которые воздействуют непосредственно на патологические очаги. Терапевтические радиофармпрепараты подавляют развитие патологических очагов, практически не вредя здоровым тканям.

Для примера ниже представлены изотопы, получаемые на циклотронах.

^{14}N (p, α) ^{11}C , ^{16}O (p, α) ^{13}N , ^{14}N (d, n) ^{15}O , ^{18}O (p, n) ^{18}F , ^{111}Cd (p, n) ^{111}In ,
 ^{68}Zn (p, 2n) ^{67}Ga , ^{203}Tl (p, 3n) ^{201}Tl , ^{124}Xe (p, 2n) ^{123}Cs - ^{123}Xe - ^{123}I .

На рис. 6 представлена оценка потребности здравоохранения в основных радиофармпрепаратах. Основными методами получения этих препаратов являются атомные реакторы, ускорители заряженных частиц и специализированные ПЭТ — циклотроны.

Ядерные мембраны

Одним из примеров эффективного использования пучков тяжелых ионов для производства ядерных наномембран является метод, предложенный в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флорова Объединенного института ядерных исследований в Дубне. Мембранная фильтрация по совокупности своих технико-экономических показателей является технологией XXI века и является одним из направлений развития нанотехнологий. В настоящее время важнейшие процессы в точной технологии (электроника, биотехнология, микробиология, фармацевтика и др.), медицине, сельском хозяйстве, экологии невозможно представить без применения широкой гаммы мембран. Так называемые ядерные или трековые мембраны являются особым типом искусственных полимерных мембран. От классических мембран, получаемых, в основном, методами химической технологии, ядерные мембраны отличаются высокой однородностью геометрических размеров и правильной формой пор, высокая селективность по отношению к выделяемому компоненту, биологическая инертность.

Таким образом, в настоящее время практически ни одна область науки, техники, производства, использующих высокие технологии, не может обходиться без методов ядерной физики. Эти методы продолжают развиваться и совершенствоваться с целью обеспечения полной

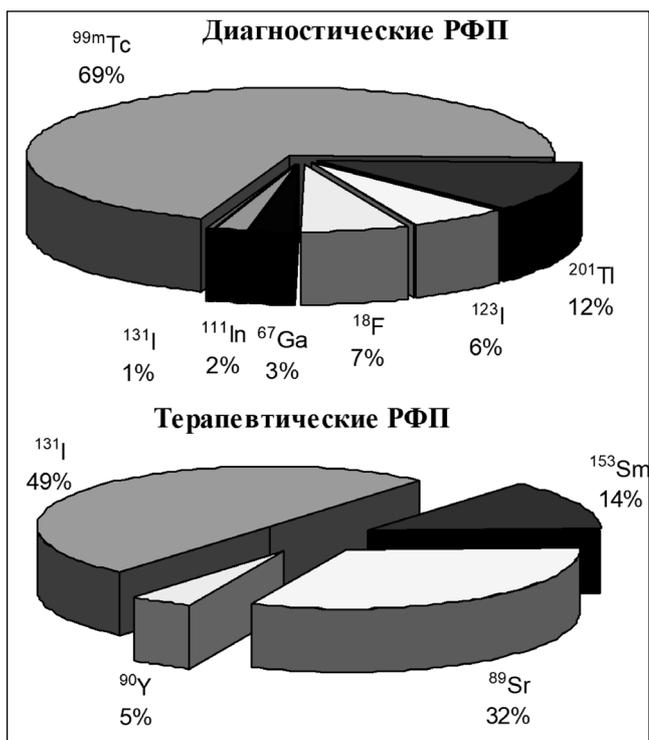


Рис. 6. Потребности медицины в изотопах и основные методы их производства: (атомный реактор ^{99m}Tc , ^{131}I , все изотопы для терапии, универсальный циклотрон ^{201}Tl , ^{111}In , ^{67}Ga , ^{123}I , ^{18}F , ПЭТ-циклотрон ^{18}F)

безопасности при их применении. И в основном эта цель уже достигнута — прикладные методы ядерной физики во многих случаях оказываются более безопасными, экологически чистыми, чем конкурирующие с ними. Ядерные мембраны, изготавливаемые на основе трековой технологии из полимерных пленок, являются фильтровальным материалом с уникальными свойствами. Эта уникальность заключается в том, что все поры, получаемые на месте треков, имеют разброс по диаметру не более 5%. Высокая интенсивность потока ускоренных ионов (до 10^{12} – 10^{13} ион c^{-1}), достигнутая на ускорителях тяжелых ионов позволяет иметь высокую производительность мембран. При производстве мембран используется, как правило, малогабаритный циклотрон.

На рис. 7, 8 представлены примеры использования ядерных мембран для фильтрации медицинских растворов и ранней диагностики раковых клеток.

Радиационное материаловедение

В атомной энергетике существует проблема радиационной стойкости конструкционных материалов. Под действием реакторного излучения материалы со временем распухают, меняется их прочность, происходит изменение кристаллической решетки. Эти эффекты ограничивают срок их службы. Физика радиационных повреждений не до конца ясна, поэтому ведутся

исследовательские работы, направленные на изучение механизмов

радиационного дефектообразования. В этом плане ускоренные тяжелые ионы являются эффективным «инструментом» моделирования радиационного повреждения. Пучки тяжелых ионов эффективно используются для прикладных исследований в области радиационного материаловедения, которые развиваются в нескольких направлениях:

- Получение наноструктур в металлах, полупроводниках и кристаллах. Они возникают под воздействием тяжелых ионов на кристаллическую структуру материала.

- Синтез в твердом теле квантово-размерных одно- и многокомпонентных нанофаз с объемной плотностью 10^{19} см^{-3} (сверхрешетки).

- Получение цилиндрических пор-треков в твердых телах. В настоящее время получены нанотреки в полупроводниках (кремний).

- Исследование возникающих под действием облучения эффектов упрочнения металлов, объемного расширения, ускоренной диффузии примесей, изменения люминесцентных свойств кристаллов.

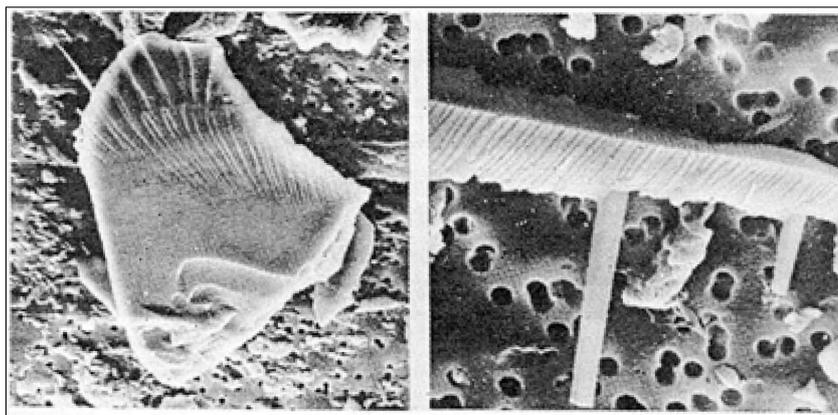


Рис. 7. Снимок поверхности ядерной мембраны (0,22 мкм) после фильтрации бактерий и осколков стекол ампул с водой для инъекций.

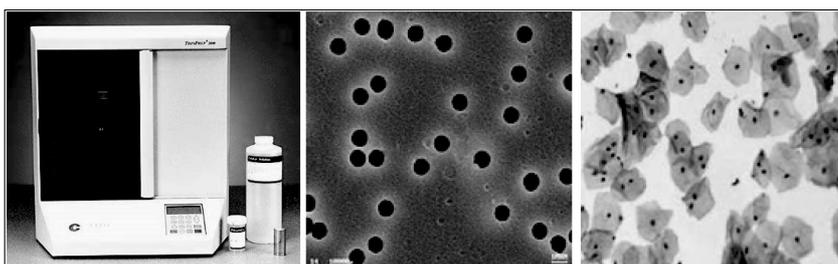


Рис. 8. Трековые мембраны для диагностики раковых клеток (размер пор 7.0 мкр). Монослой раковых клеток, собранных на мембране с диаметром пор 7 мкр.

Заключение

Приведенные выше примеры использования ядерных технологий являются лишь малой частью тех огромных возможностей современной ядерной физики с использованием ускорителей в решении важнейших задач современной науки и техники. Таким образом, в

настоящее время практически ни одна область науки, техники, производства, использующих высокие технологии, не может обходиться без методов ядерной физики. Эти методы продолжают развиваться и совершенствоваться с целью обеспечения полной безопасности при их применении. И в основном эта цель уже достигнута — прикладные методы ядерной физики во многих случаях оказываются более безопасными, экологически чистыми, чем конкурирующие с ними.

Литература

1. Дмитриев С.Н., Реутов В.Ф. Ядерная физика и нанотехнология. Дубна: Изд. ОИЯИ, 2008. 73с.
2. Мчедlishvili Б.В., Флеров Г.Н. Журнал Всесоюзного хим. общества Менделеева. 1983; 32: 641.
3. Пенионжкевич Ю.Э., Вахтель В.М. Современные ускорители заряженных частиц и их приложение. Воронеж, Изд. дом ВГУ, 2018.
4. Флеров Г.Н. Вестник АН СССР. 1984; 4: 35.
5. Черняев А.П. Ускорители в современном мире. М.: МГУ, 2012. 368с.
6. Penionzhkevich Yu.E. Phys. At. Nucl. 2008; 71: 1127.

Сведения об авторе:

Пенионжкевич Юрий Эрастович — доктор физико-математических наук, профессор, руководитель научным сектором Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований, Дубна, академик-секретарь отделения естественных наук Русской секции Международной академии наук (Здоровье и Экология),
E-mail: pjuer@lnr.jinr.ru