

621.384.6

ПРИМЕНЕНИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ *)

Л. Роузен

ВВЕДЕНИЕ

Сравнительно недавно наука и материнство считались безупречными. В настоящее время они подвергаются серьезным нападкам.

Основания для этих нападков на науку имеют в основном эмоциональный и даже иррациональный характер. Однако не следует обвинять неразумных критиков во всех наших огорчениях. В значительной части наших бед виноваты сами ученые, поскольку они недооценивают одно важное обстоятельство. Одна из наших обязанностей перед обществом состоит

*) L. R o s e n, Applications of Accelerators CERN Courier 11 (6), 159 (1971).
Перевод Ю. Г. Балашко.

в том, что мы должны разъяснять и пропагандировать нашу работу, обосновывать ее целесообразность на языке, понятном не только узким специалистам. Мы и только мы можем выполнить эту задачу. Мы и только мы можем дать наиболее правильный совет относительно разумной системы приоритета, основанный на учете интеллектуальной практической ценности наших целей. Мы и только мы можем дать наиболее обоснованное заключение о том, приведет ли то или иное направление исследований к практически ценным результатам при приемлемых затратах. Мы и только мы можем построить достаточно точные феноменологические модели, которые, возможно, позволят установить и использовать для прогнозов взаимные связи между техникой, промышленностью, образованием, обществом в целом и окружающей средой.

Нам часто рекомендуют обратиться к вопросу о том, что может дать наука обществу, вместо того, чтобы спросить, что может сделать общество для науки. Именно этот вопрос я намерен рассмотреть здесь в той мере, в какой он касается ускорителей заряженных частиц.

Просмотрев список ускорителей заряженных частиц, имеющихся во всех странах мира, можно утверждать, что все они представляют значительную ценность для науки и образования. Многие из нас полагают, что принципиально важные новые данные о структуре вещества и силах, определяющих фундаментальные свойства частиц, из которых построены ядра атомов, с наибольшей вероятностью могут дать эксперименты при наиболее высоких энергиях, при условии, что интенсивность пучка частиц достаточна для проведения статистически значимых измерений. Именно ускорители на наиболее высокие энергии вносят наиболее значительный вклад как в образование, так и в развитие фундаментальной науки.

Чтобы оценить важность этого вклада, следует отметить, что одной из особенностей, отличающих человека от животных, является его любознательность, его интерес, который направлен на самого человека, человеческое общество, окружающую среду и Вселенную в целом. Любознательность является одной из сторон человеческой жизни, которая придает ей значение и смысл, и одним из основных путей удовлетворения этой любознательности является развитие науки, изучение природы. Для развития науки необходимо непрерывно расширять границы исследованной части природы, а эти границы обычно весьма удалены от обычных условий: очень высокие и очень низкие температуры, очень высокие давления и очень разреженный вакуум, очень крупные (космология) и очень мелкие (ядра и внутриядерные частицы) объекты исследования. Ускорители заряженных частиц на наиболее высокие энергии позволяют исследовать мельчайшие структурные элементы материи и энергии в природе.

В дополнение к этим научным достоинствам можно указать также на другие выгоды, которые дает строительство и использование ускорителей. Например, одним из них, которого мы коснемся лишь бегло, является содействие международному сотрудничеству. Исследования ведутся во всех странах мира, и возможно, ни в одной другой области не наблюдается столь широкое, дружелюбное и деловое международное сотрудничество.

Рассмотрим теперь некоторые простейшие и наиболее очевидные применения ускорителей. История науки свидетельствует о том, что до настоящего времени одни лишь прикладные результаты более чем окупают все усилия, направленные на развитие науки. Даже в технике ускорителей высоких энергий в настоящее время выделились ветви, которые оказывают непосредственное влияние на экономику, способствуя развитию других областей техники (вычислительные машины, криогенная техника, техника высокого вакуума, получение сверхвысоких магнитных полей

и материалов, имеющих практически нулевое электрическое сопротивление), от которых решающим образом будут зависеть удобства человеческой жизни на нашей планете.

Рассмотрим прежде всего не возможные в будущем достижения, а современное состояние дел. При этом следует иметь в виду, что энергии, достижимые на некоторых машинах, которые теперь считаются низкими, еще вчера считались высокими.

УСКОРИТЕЛИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Если рассмотреть положение, существующее в США, можно отметить, что здесь имеется около 1000 ускорителей различных типов, которые составляют около половины всех имеющихся ускорителей в мире. Менее чем на 150 из них проводятся в основном фундаментальные исследования. Из оставшихся ускорителей приблизительно одна треть используется в медицине и промышленности, а на двух третях ведутся прикладные исследования. Капитальная стоимость ускорителей, используемых в медицине и промышленности, составляет 77 млн. долларов. Годовая продукция этих ускорителей (включая как товары, так и различные услуги) оценивается приблизительно в 2000 млн. долларов.

Испытания материалов без их разрушения. Все более расширяется применение ускорителей для различных испытаний материалов без их разрушения. Здесь можно выделить три основных направления:

1. Рентгеновская и γ -дефектоскопия (например, проверка сварных швов трубопроводов).

2. Толщиномеры. Для этой цели давно уже используются α - и β -частицы, но в настоящее время начинают использоваться протоны, причем это направление представляется перспективным. Группа исследователей в Харуэлле показала, что с помощью протонов с энергией 147 Мэв толщина слоя графита может быть измерена с точностью 0,0015%, тогда как обычные методы обеспечивают точность 2%.

3. Активационный анализ (в основном нейтронный активационный анализ).

Производство радиоизотопов. Две трети всех известных в настоящее время радиоизотопов было открыто в результате исследований ядерных реакций на ускорителях. Однако 80% (по активности) всех радиоизотопов получают на ядерных реакторах. В то же время наблюдается, по-видимому, тенденция к изменению существующего положения, в особенности в медицине, к чему мы еще вернемся далее.

Имеются следующие статистические данные и прогнозы относительно роста потребления радиоактивных изотопов (в млн. долларов):

	1969 г.	1970 г.	1971 г.
Основные радиоизотопы	10	11	13
Меченые реактивы	12	14	16
Фармацевтические радиоизотопы	32	40	50
Герметичные источники излучений	5	6	7
Итого	59	71	86

Из этих данных видно, что общая стоимость радиоизотопов, поступающих на рынок, значительна, и их сбыт довольно быстро расширяется. Стоимость радиоизотопов, получаемых на циклотронах, составляет 3 млн. долл. в год, и эта цифра быстро растет. Полагают, что к 1975 г. рынок расширится настолько, что сможет поглотить продукцию прибли-

зительно двадцати дополнительных установок для производства радиоизотопов на циклотронах. В данном случае экономические соображения имеют значительно меньшее значение по сравнению с болью и страданиями, которые эти радиоизотопы могут предотвратить.

Энергетические установки. Ускорители сыграли и продолжают играть решающую роль в развитии источников энергии, основанных на использовании ядерного топлива. Проводимые на них исследования касаются сущности проблем, связанных с сохранением ископаемого ядерного топлива, загрязнением окружающей среды и условиями жизни.

Можно привести несколько примеров того, какую роль сыграли результаты измерений сечений различных процессов.

1) Точные измерения отношения сечения захвата нейтронов плутонием-239 к сечению его деления под действием нейтронов показали, что плутониевые реакторы с водяным охлаждением любой конструкции не могут работать как реакторы-размножители; это позволило избежать убытков, исчисляемых сотнями миллионов долларов.

2) Несколько лет назад автор опубликовал результаты исследования взаимодействия быстрых нейтронов с ядром лития-7, которые показали, что контролируемый термоядерный синтез может быть осуществлен на основе реакции $D - T$ (что значительно легче осуществить, чем на основе реакции $D - D$, поскольку для этого требуется значительно более низкая температура), и в результате будет получаться больше трития, чем расходуется. В настоящее время можно думать, что в первом термоядерном реакторе будет осуществляться именно реакция $D - T$.

Однако недавно сотрудник Окриджской Национальной лаборатории США Р. Макнелли предложил использовать быстрые протоны (а также дейтроны, тритоны или ядра гелия-3) для зажигания ядерного топлива, состоящего из лития-6 или дейтерида лития-6, что позволяет избежать подогрева ядерного топлива до температуры, необходимой для начала реакции ядерного синтеза. Одним из препятствий на пути осуществления этой идеи является общий недостаток данных о сечениях ядерных реакций на легких ядрах при низких энергиях. Такие данные можно получить с помощью ускорителей.

Хорошо известно, что исследования на ускорителях заряженных частиц обеспечивают основные данные о сечениях различных ядерных процессов, необходимые для расчета ядерных реакторов. Пока еще отсутствует большое количество таких данных, которые необходимы, в особенности для быстрых реакторов, обеспечивающих наиболее экономичное использование мировых ресурсов урана. Неопределенности в оценках стоимости годовичного потребления ядерного топлива, связанные с недостаточной точностью основных ядерных данных, составят около 100 млн. долл. в 1980 г., 300 млн. долл. в 1990 г. и 700 млн. долл. в 2000 г. Эти неопределенности могут быть уменьшены в результате исследований, проводимых на ускорителях.

Изучение взаимодействия нейтронов и γ -лучей с ядрами должно сыграть решающую роль в разработке реакторов, предназначенных для исследования космического пространства, для опреснения воды в индустриально-аграрных комплексах и для получения тепла для технологических целей. Возникающие в этой области проблемы связаны в основном с экономным использованием нейтронов и радиационными повреждениями материалов. Их исследование является еще одной областью применения ускорителей.

Радиационная обработка материалов. Облучение различных материалов может использоваться для повышения их точки

плавления, прочности на разрыв, долговечности и изменения их адгезионных свойств. Из 270 ускорителей, имеющих на частных промышленных предприятиях, 46 используются для радиационной обработки материалов в промышленном масштабе (здесь не учитывается облучение пищевых продуктов). Их общая продукция (опять же за вычетом стоимости облученных пищевых продуктов) оценивается в 200 млн. долл. в год, причем большая часть ее приходится на ускорители электронов. Радиационное упрочнение различных покрытий и отделок, в особенности в производстве строительных материалов, текстильной промышленности и металлургии, в ближайшей перспективе является наиболее важным направлением. Наибольшую долю продукции этой отрасли составляют облученные пластмассы, причем их применение в качестве упаковочных материалов и электрической изоляции в широких масштабах является вопросом близкого будущего и обещает большие экономические выгоды.

В качестве примера можно указать, что мономеры с добавкой красителя, но без растворителей, упрочняются облучением электронами. При этом происходит их полимеризация, в результате чего они образуют превосходное цветное покрытие. Устранение растворителей из лакокрасочной промышленности позволяет частично решить проблему загрязнения окружающей среды.

В приведенной ниже таблице указаны некоторые основные применения ускорителей, число ускорителей, используемых для данной цели, и капитальная стоимость оборудования. (Эти данные взяты из доклада подкомиссии по ускорителям, представленного Комиссии по ядерной физике и технике инспекционного отдела Национальной Академии наук США).

Применения	Число ускорителей		Капитальная стоимость, млн. долл.	
	1964 г.	1968 г.	1964 г.	1968 г.
Исследования по ядерной физике и технике	282	297	101,4	129,7
Получение рентгеновских лучей и нейтронов	234	376	24,2	46,9
Исследование действия радиации	225	315	26,3	36,4
Исследования по атомной физике и физике твердого тела	5	35	0,5	2,8
Радиационная обработка	36	60	3,7	6,5
Итого	782	1083	156,1	222,3

УСКОРИТЕЛИ В ВОЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В настоящее время роль ускорителей в военной промышленности уже не так велика, как раньше, тем не менее она остается весьма важной. Возможно, наиболее важная задача в этой области связана с потребностями учета. Она касается обнаружения, измерения и анализа делящихся материалов, в основном производимых на энергетических ядерных реакторах. Необходимы неразрушающие методы контроля и анализа таких материалов. Необходимо создание ускорителей, позволяющих получить пучки нейтронов и γ -лучей достаточной интенсивности и энергии, которые можно было бы использовать для определения содержимого герметичных контейнеров.

К 1980 г. энергетические реакторы, имеющиеся во всем мире, будут производить ежедневно 90 кг плутония, что достаточно для производства

десятков термоядерных бомб. В настоящее время плутоний является коммерческим товаром, который может находиться во владении частных лиц. Для целей контроля в такой ситуации необходима скорейшая разработка простых и надежных методов, позволяющих быстро и точно определять состав различных материалов. Одна из таких возможностей связана с использованием нейтронов и γ -лучей, получаемых на ускорителях заряженных частиц, и в этом направлении уже сделано много. По-видимому, в этой области ускорители призваны играть решающую роль в течение длительного времени.

Рано или поздно будет заключен всеобщий международный договор о контроле за использованием делящихся материалов. Для выполнения любого соглашения, касающегося производства и распределения делящихся материалов и включающего ограничение на производство, разработку и накопление ядерного оружия, важное значение имеют эффективные методы контроля. Несомненно, специализированные ускорители будут являться частью системы контроля, обеспечивающей наблюдение за выполнением такого соглашения.

Методы испытаний и анализа, в частности, методы, основанные на использовании ускорителей, которые, по-видимому, обеспечат высокую точность и чувствительность, могут быть непосредственно применены для контроля загрязнения воздушной и водной среды. В частности, нейтронный активационный анализ может явиться весьма чувствительным методом обнаружения низких концентраций загрязнений в воздухе, воде и почве.

УСКОРИТЕЛИ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ЦЕЛЕЙ

Вероятно, ни в какой другой области человеческой жизни ускорители не сыграли такой важной роли для человечества, как в медицине, где они привели к созданию ядерной медицины и радиационной терапии. В диагностической медицине радиоизотопы используются для различных анализов: исследования функции щитовидной железы, определения объема крови, исследования функций почек и печени, усваивания витамина B_{12} организмом, расстройства всасывания жиров в кишечнике, выживания красных кровяных телец, обмена железа, определения объема сердечно-сосудистой системы, работы печени и т. д. Большинство изотопов, используемых в настоящее время, были открыты на ускорителях и производятся на реакторах. В то же время наблюдается рост производства радиоизотопов и на ускорителях.

Приблизительно в одной трети исследований, связанных с введением радиоизотопов в организм человека, используется йод-131. Применение вместо него йода-123 для исследований *in vivo* *) функции щитовидной железы, измерения объема крови, онкологического обследования мозга, легких и печени позволяет снизить дозу облучения пациента приблизительно в 100 раз по сравнению с йодом-131, поскольку йод-123 не испускает электронов и имеет более короткое время жизни. Такое снижение дозы облучения особенно важно в педиатрии и акушерстве.

Другим радиоизотопом, наиболее широко применяемым для исследования функций человеческого организма, является получаемый на ускорителях кобальт-57. Он используется для исследования усваивания витамина B_{12} . Его преимуществом по сравнению с более тяжелым радиоизотопом кобальта является более короткое время жизни и повышенная эффективность счета.

*) В живом организме (лат.).

Новый линейный ускоритель Брукхейвенской Национальной лаборатории и Лос-Аламосская «мезонная фабрика» могут производить значительные количества цинка-72. Предварительные исследования показывают, что этот радиоизотоп может найти широкое применение в качестве простого средства ранней диагностики рака предстательной железы, которое позволит проводить такое обследование у всех мужчин в возрасте выше среднего. В настоящее время такого метода не существует, хотя рак предстательной железы занимает третье место в общей статистике смертности мужчин от раковых заболеваний.

В 1968 г. радиотерапевтическое лечение получили 300 000 пациентов, а общее количество сеансов радиотерапии составило 3,5 млн. Расходы на борьбу с раком составили 300 000 долларов.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Выше было рассмотрено состояние дел в прошлом и настоящем времени. Что же можно сказать о будущем?

Можно указать ряд направлений в развитии применений ускорителей. Я уже упоминал ранее, что необходимо создание новых типов ускорителей, которые найдут применение, с одной стороны, для учета запасов ядерного горючего и, с другой, — для обеспечения надежного контроля за распределением и использованием делящихся материалов в мировом масштабе. Новые типы ускорителей потребуются также в самых различных отраслях хозяйства — от консервации пищи до стерилизации сточных вод.

Медицина и здравоохранение обнаруживают ненасытный голод в этой области, причем для этих целей требуются специализированные ускорители. В настоящее время в США построено или находится в стадии строительства шесть циклотронов для производства короткоживущих радиоизотопов — кислорода-15, азота-13 и углерода-11 (периоды полураспада соответственно 2, 10 и 20 минут).

Быстро развивающаяся ядерная медицина испытывает потребность в новых радиоизотопах, обладающих свойствами, более удобными с точки зрения диагностики. Многие из них могут быть получены на ускорителях. Возможно, наиболее драматичным использованием ускорителей является лечение злокачественных опухолей, поскольку применение пучков заряженных частиц высокой энергии в радиотерапии обеспечивает огромные преимущества. Быстрые протоны значительно удобнее для этих целей, чем рентгеновские лучи, однако до настоящего времени мы не уделяли достаточного внимания этому применению наших ускорителей на высокие энергии. Наши коллеги в СССР опередили нас в этой области.

В связи со строительством Лос-Аламосской «мезонной фабрики» потребовалась разработка новой конструкции ускорителя. Вскоре после этого осуществимость, стабильность и эффективность такого ускорителя были проверены на электронном прототипе. Конструкция этой модели была положена в основу при разработке промышленного образца, и теперь такие ускорители выпускаются промышленностью для получения рентгеновских лучей с энергией 4 Мэв и более. В настоящее время по крайней мере пять фирм строят такие ускорители; несколько десятков их уже построено для больниц и несколько десятков находятся в стадии строительства.

У читателей могут возникнуть опасения, что ускорители на наиболее высокие энергии не будут должным образом использоваться для медицинских целей. Позвольте заверить, что для этого нет оснований. На «мезонных фабриках» в США (ЛАНЛФ), Канаде (ТРИУМФ) и Швейцарии

(СИН) предполагается использовать для радиотерапии пучки отрицательных π -мезонов.

Проблема определения энергии пучка, необходимой для того, чтобы обеспечить однородное распределение остановившихся π -мезонов на заданной глубине в объеме опухоли, близка к решению, и соответствующий π -мезонный канал уже сконструирован.

В настоящее время есть основания думать, что μ -мезоны могут найти применение в медицине также и для диагностических целей. Несколько лет назад автору пришла мысль, что мезоны, возможно, удастся использовать для элементарного анализа живых тканей, подобно тому как в настоящее время для этой цели используется нейтронный активационный анализ, но при этом вред, приносимый организму вследствие облучения, будет меньше. Недавно получены некоторые весьма обнадеживающие данные по этому вопросу.

В связи с перспективностью использования π - и μ -мезонов в медицине естественно возникает вопрос, нельзя ли построить очень недорогую специализированную «мезонную фабрику» для этих целей. Д. Нагли, Э. Нэлл и Д. Хейгерман рассмотрели этот вопрос и предложили соответствующую конструкцию. Протоны, ускоренные до энергии 3 Мэв на каскадном генераторе Кокрофта — Уолтона, работающем под повышенным давлением, инъецируются в линейный ускоритель с дрейфовыми трубками (частота 400 Мгц), а затем дополнительно ускоряются на линейном ускорителе с боковыми связями (частота 1200 Мгц), как это сделано в Лос-Аламосе. Это дает основания надеяться, что две из наиболее любимых физиками элементарных частиц (π - и μ -мезоны) найдут широкое применение в диагностике и терапии.

Я предвижу, что ускорители заряженных частиц займут более важное место в нашей повседневной жизни. Не следует считать совершенно неразумным предположение о том, что уже на протяжении нашей жизни появятся каталоги для заказов по почте, содержащие следующий перечень ускорителей:

- 1) электронные ускорители (на $1\text{—}100\text{ Мэв}$) для инспекции и надзора за использованием ядерных материалов и полимеризации пластмасс;
- 2) изохронные циклотроны ($100\text{—}400\text{ Мэв}$) для производства изотопов и радиационной терапии с помощью протонов и α -частиц;
- 3) «мезонные фабрики» для производства изотопов, радиационной терапии (отрицательные π -мезоны) и активационного анализа для целей диагностики (μ -мезоны);
- 4) электростатические генераторы ($0\text{—}100\text{ Мэв}$) для радиационной обработки материалов нейтронами и заряженными частицами, производства изотопов, измерения нейтронных сечений и нейтронного активационного анализа и т. д.

И многое другое, о чем нам пока не приходилось задумываться.
