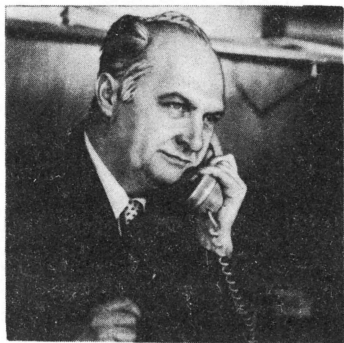


## Физика релятивистских ядер

А. М. Балдин



Александр Михайлович Балдин, член-корреспондент АН СССР, директор Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований. Занимается вопросами теории циклических ускорителей, теории фоторождения мезонов, фоторасщепления ядер, свойствами малонуклонных систем, систематикой элементарных частиц, теорией электромагнитных взаимодействий и релятивистской ядерной физики. Лауреат Государственной премии СССР 1973 г.

### СОСТАВНАЯ СТРУКТУРА АДРОНОВ

Исследование взаимодействия с веществом быстрых частиц и излучений сыграло огромную роль в физике. Существующие представления о структуре атомов, молекул, атомных ядер, т. е. основные представления о микроструктуре мира, были получены именно в результате такого рода исследований. Освоение новых диапазонов энергий пучков и новых длин волн различных излучений всегда приводило к крупным научным результатам, причем самые важные открытия были сделаны в исследованиях с наибольшими из достигнутых энергий и наименьшими длинами волн.

В настоящее время, наверное, самый острый вопрос физики — внутренняя структура элементарных частиц. Ускорительная техника позволила получить излучения с длинами волн, в тысячи раз меньшими тех размеров, которыми должны обладать элементарные частицы. Однако сама концепция внутренней структуры для этих объектов пока еще очень плохо сформулирована. Физики распространяют на элементарные частицы понятия, оказавшиеся очень успешными для атомов и ядер: вводят новые гипотетические «простейшие сущности», из которых должны состоять элементарные частицы, кварки,

партоны. В свободном состоянии этих частиц никто не видел, а описывать их связанное состояние мы, в сущности, не умеем.

Проблема изучения сложных, составных систем, для которых существенны релятивистские эффекты, в последнее время приобретает первостепенное значение. Необходимо научиться описывать системы, в которых энергия связи и энергия внутреннего движения сравнимы с массой составляющих систему частиц. Если разорвать, например, протон электромагнитным полем фотона большой энергии, то в результате появляются новые частицы — мезоны. Но самое поразительное, что из этой катастрофы протон выходит как феникс из пепла — невредимым, ничем не отличающимся от первоначального. Ударяя по протону много раз, мы можем получить сколько угодно новых частиц и даже целые атомы — число частиц в таких столкновениях не сохраняется. Итак, протон оказался не просто составной системой, а системой бесконечно сложной<sup>1</sup>.

Построение теории систем с бесконечным числом степеней свободы — кван-

<sup>1</sup> См., например: Сморodinский Я. М. Из чего состоит протон? — «Природа», 1976, № 2.

товой теории поля — представляет собой центральную проблему современной физики. Огромное разнообразие элементарных частиц, включая открытые недавно (и вызвавшие сенсацию)  $\psi$ -частицы, теоретики пытаются свести к небольшому числу элементарных сущностей. Однако все эти попытки так или иначе упираются в проблему построения квантовой теории поля, и в особенности — в проблему релятивистского описания связанных состояний, т. е. возбужденных состояний внутриадронной материи. Понятие внутриадронной материи становится все более значимым. Уже с конца 50-х годов физики отказались от утверждений, что элементарная частица в принципе не может иметь размеров. (Если нечто проявляется только как целое, значит оно абсолютно твердо, существование же абсолютно твердых, протяженных тел противоречит теории относительности.) Опыты по рассеянию электронов на протонах указали на существование у последних формфакторов, и сейчас мы уверенно можем говорить о размерах области пространства, занимаемой отдельным протоном. Элементарные частицы не возникают сразу имеющими значительные пространственные размеры, а вырастают из точечных «зародышей» до «взрослых» размеров. Это особенно наглядно показывают опыты по столкновению электронов с позитронами, в результате которых возникают адроны. Эти столкновения происходят в области пространства размером меньше  $10^{-15}$  см, в то время как размеры протонов составляют  $10^{-13}$  см.

«Элементарная» частица представляется нам сейчас как протяженный сгусток материи с плотностью примерно в два-три раза больше плотности вещества атомных ядер. Расстояние между нуклонами в ядрах сравнимо с размерами самих нуклонов, и приходится только поражаться значительным успехам нерелятивистской ядерной физики, в основе которой лежит представление о ядре как о совокупности точечных протонов и нейтронов, взаимодействующих с помощью ядерных сил. В последнее время появляется все больше работ, в которых  $\pi$ -мезоны, возбужденные нуклоны и другие частицы рассматриваются как составные части атомных ядер. Уже давно было ясно, что при столкновениях с ядрами частиц, имеющих энергию больше 100 МэВ, должны так или иначе проявляться новые степени свободы. Рассмотрение ядерной материи, нагретой до высоких темпера-

тур, существенное для изучения природы некоторых астрофизических объектов, неизбежно включает учет этих степеней свободы.

В этой статье мы попытаемся рассказать о новом подходе к этой группе проблем, возникшем в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) в 1970 г. Такой подход обусловлен качественно новыми возможностями эксперимента — получением пучков многозарядных ионов высоких энергий.

## ПУЧКИ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Физика многозарядных ионов при энергиях ниже 10 МэВ/а.е.м. (мегаэлектрон-вольт на атомную единицу массы) представляет собой необычайно продуктивное научное направление, активно развивавшееся уже в течение десятилетий в ряде лабораторий, в том числе и в ОИЯИ. Область энергий ионов  $< 30$  МэВ/а.е.м. относится к нерелятивистской ядерной физике. Основные реакции, идущие при столкновении ионов в данной области энергий, — перераспределение нуклонов. Главные усилия физиков направлены здесь на поиски трансурановых элементов<sup>2</sup>. Открытие новых элементов, изучение их свойств — не только большой вклад в науку, но и огромная прикладная задача.

Ускорение дейтронов на Дубненском синхрофазотроне<sup>3</sup> показало, что принципиальных трудностей для получения пучков сложных ядер вплоть до релятивистских энергий нет. Кроме того, рассмотрение возможных программ исследований с такими пучками<sup>4</sup> продемонстрировало их необычайную перспективность.

К настоящему времени физика ионов высоких энергий получила существенное развитие. Как всякое крупное научное направление, связанное с промышленным экспериментом, это направление имеет также побочные выходы.

<sup>2</sup> Флеров Г. Н.— Препринт ОИЯИ, 1971, P7-6153.

<sup>3</sup> Балдин А. М., Безногих Ю. Д., Зиновьев Л. П., Иссинский И. Б., Казанский Г. С., Михайлов А. И., Мороз В. И., Павлов Н. И., Пучков Г. П.— Препринт ОИЯИ, 1970, P9-5442.

<sup>4</sup> Балдин А. М.— Препринт ОИЯИ, 1971, P7-5808. Доклад на IV Международной конференции по физике элементарных частиц и атомного ядра. Дубна, 1971.

Физику релятивистских ядер можно подразделить на следующие области исследований: космические лучи и астрофизика, ядерная физика, физика сильных взаимодействий, биомедицинские исследования с многозарядными ионами, получение пучков релятивистских ядер.

Основное внимание мы уделим области релятивистских энергий, когда квадраты трехмерных импульсов частиц много больше квадратов их масс.

### КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФИЗИКИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР

Релятивистские ядра, как и многие другие объекты физики высоких энергий, впервые были обнаружены в космических лучах. На приведенных фотографиях показаны следы, оставленные в фотоэмульсии различными ядрами высокой энергии. Впервые такие следы были получены в 1948 г. американскими физиками. Они экспонировали ядерные эмульсии на высоте 30 км. Как видно, треки ядер с возрастанием атомного номера  $Z$  делаются все более плотными, обрастают  $\delta$ -электронами, которые в свою очередь рассеиваются и вызывают дополнительную ионизацию. Эти электроны выбиваются из атомов вещества эмульсий, и их образование обуславливает основную долю энергетических потерь первичной частицы. (Помимо  $\delta$ -электронов, небольшая часть энергии передается электронам, возникающим из-за перестройки атомов при выбивании сильно связанных электронов.) Число  $\delta$ -электронов пропорционально  $Z^2$ . Таким образом, по числу  $\delta$ -электронов можно идентифицировать релятивистскую частицу, если ее заряд и энергия не слишком велики. Ионизационные потери пропорциональны  $Z^2/\beta$ , где  $\beta = v/c$  — отношение скорости частицы к скорости света. В релятивистской области, где  $\beta > 0,8$ , зависимость от  $\beta$  слабее. Проблема идентификации релятивистских ядер в космическом излучении будет надежно решена, когда в лабораторных условиях ядра вплоть до тяжелых элементов будут ускорены до  $\beta \geq 0,8$ .

Релятивистские ядра космического излучения несут ценнейшую информацию о происхождении космических лучей, о химическом составе их источника, о межгалактической среде, сквозь которую прошли ядра. Однако эту информацию еще предстоит расшифровать. Очевидно, про-

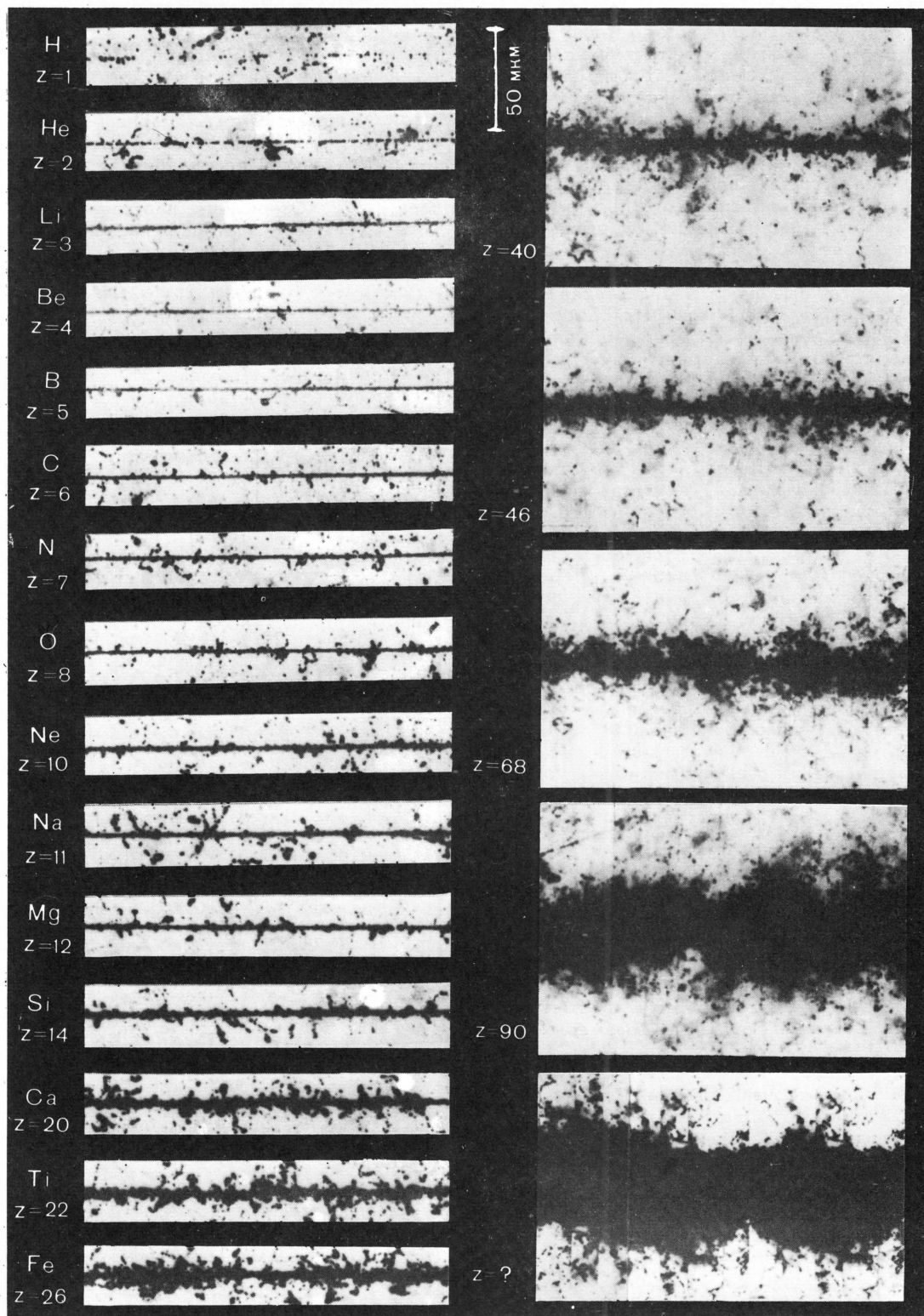
ходя через среду, ядра «раскалываются», и часть спектра, относящаяся к легким ядрам, обогащается, а часть спектра, относящаяся к тяжелым ядрам, обедняется. Поэтому необходимо тщательно изучить механизм раскалывания (или фрагментации) ядер и определить величину его сечения. Как показывают оценки, 10% - ная ошибка в сечениях фрагментации и в величине потоков ядер различных групп приводят к 100%-ной ошибке в определении количества вещества, пройденного космическими лучами. Если потребовать, чтобы отношение потоков ядер с различными атомными номерами претерпело бы незначительные изменения до того момента, как они попадут в атмосферу Земли, то количество вещества на их пути не должно превышать  $4\text{г/см}^2$ . Это соответствует среднему возрасту ядер  $\sim 10^8$  г, если средняя плотность межгалактического водорода составляет  $0,01$  ат/см<sup>3</sup>.

На графике показаны относительные потоки (распространенности) ядер в космических лучах и присутствие элементов в Солнечной системе; эти данные получены на спутниках<sup>5</sup>. Особенно резкое различие распространенностей в области ядер Li, Be, B можно было бы объяснить механизмом фрагментации тяжелых ядер в космических лучах. Но как объяснить преобладание тяжелых ядер в космических лучах? Трудно придумать такой механизм ускорения, который отдавал бы столь существенное предпочтение тяжелым ядрам.

Все механизмы ускорения зависят от отношения заряда к массе частиц, которое незначительно меняется на протяжении Периодической системы Менделеева. Возможно, наблюдаемые распространенности ядер в космических лучах свидетельствуют в пользу того, что состав элементов в области источников космических лучей сильно отличается от состава элементов Солнечной системы. Не исключено, что эти источники вообще состоят

<sup>5</sup> Meyer P., Ramaty R. and Weber W. R.—In.: Proc. Topical Meeting. Trieste, 1974, p. 234.

**Треки релятивистских ядер космического излучения [с различными  $Z$ ] в фотографической эмульсии. (Из работы: G. F. Powell. Proc. 11th International Conf. on cosmic rays. Budapest, 1969, p. 3).**





из ядерного вещества. Исследование столкновений релятивистских ядер на ускорителях должно внести существенную ясность в эти важные проблемы как с точки зрения понимания механизмов столкновения релятивистских ядер, прохождения их через вещество, так и с точки зрения калибровки аппаратуры для изучения состава космических лучей.

К важным аспектам относится также выяснение возможности теоретического описания сверхплотных звезд и других астрономических объектов, состоящих из ядерного вещества. Столкновение ядер, движущихся со световыми скоростями, а следовательно, со скоростями, большими скорости звука в ядерном веществе, должно сопровождаться коллективными движениями ядерного вещества типа ударных волн<sup>6</sup>. При этом плотность ядерного вещества должна быть больше, чем плотность протона. В некотором приближении эти явления можно описать с помощью гидродинамики, что позволит установить уравнение состояния ядерного вещества в таких экстремальных условиях. Знание уравнения состояния ядерной материи играет огромную роль в попытках описать астрономические объекты, эволюцию звезд, гравитационный коллапс. Таким образом, получение пучков релятивистских ядер в лабораторных условиях дает возможность не только проанализировать состав космического излучения, но и подвергнуть экспериментальной проверке представления о закономерностях поведения ядерной материи при высоких и сверхвысоких температурах.

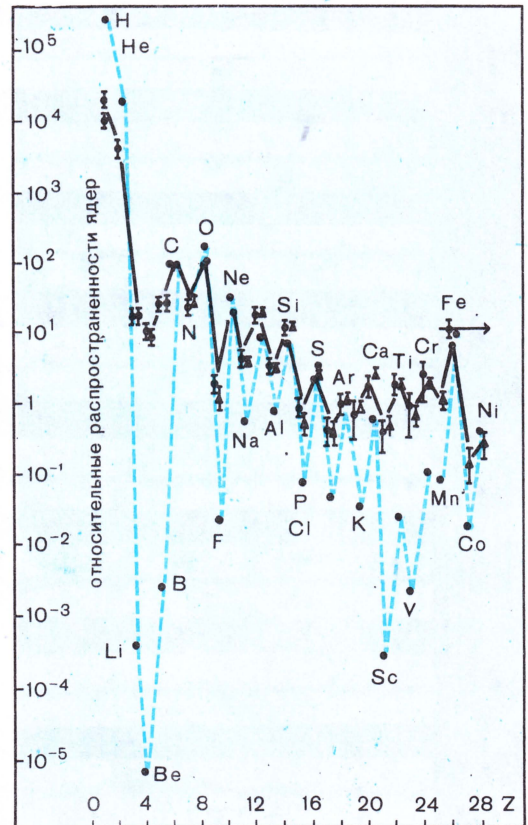
### ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ПУЧКАМИ ИОНОВ

Основные параметры, определяющие характеристики реакций, идущих при столкновении ионов высоких энергий, — это энергия связи, средняя энергии нуклонов внутри ядра и размер ядер  $R \sim 10^{-13} \cdot A^{1/3}$  см, где  $A$  — число нуклонов в ядре.

Характерная энергия нуклонов — 20 МэВ — соответствует длинам волн порядка  $10^{-13}$  см. Если глубину ядерного потенциала принять равной нескольким

десяткам МэВ, а среднюю кинетическую энергию  $\sim 20$  МэВ, то в области энергий ионов до  $\sim 30$  МэВ/а.е.м. ядра можно считать вырожденным ферми-газом нуклонов.

Оценим плотность ядерного вещества. Для этого воспользуемся значениями средних радиусов распределения зарядов ядер, измеренных в опытах по рассеянию электронов. Отношение плотности ядерного вещества к плотности вещества внутри протона определим как отношение объема, занимаемого протоном, к



Относительные распространенности ядер в космическом излучении [сплошная линия] и в Солнечной системе [пунктир] как функции атомного номера Z.

<sup>6</sup> Подробнее об этом см.: Новые формы ядерного вещества. Галицкий В. М. Сверхплотные состояния ядер; Манько В. И. Гидродинамические эффекты при сверхзвуковых столкновениях атомных ядер. — «Природа», 1976, № 1.

объему, приходящемуся на один нуклон в ядре:

$$\langle r_p \rangle^3 A / \langle R_A \rangle^3;$$

здесь  $\langle r_p \rangle$  — средний «размер» протона, а  $\langle R_A \rangle$  — средний «размер» ядра.

Таблица

| Элемент   | <sup>1</sup> H | <sup>4</sup> He | <sup>24</sup> Mg | <sup>40</sup> Ar | <sup>68</sup> Zn | <sup>120</sup> Sn | <sup>208</sup> Pb |
|---|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| $\frac{\langle r_p \rangle^3 A}{\langle R_A \rangle^3}$ | 1              | 0,410           | 0,441            | 0,490            | 0,513            | 0,615             | 0,644             |

Из таблицы видно, что увеличение плотности ядерного вещества всего в 2 раза (за счет совпадения объемов ядер при их столкновении) будет приводить к образованию ядерного вещества с характерной для нуклонов плотностью.

Ядра, ускоренные на Дубненском синхрофазотроне, имеют энергию до 5 ГэВ на нуклон. Это соответствует их движению со скоростью, составляющей 98% скорости света. Дело в том, что, по теории относительности, продольные размеры движущихся ядер сокращаются в  $E/m \approx 5$  раз и соответственно увеличивается их плотность. Скорость звука в ядерном веществе составляет около 0,2 от скорости света, т. е. изучаемые нами столкновения происходят со сверхзвуковой скоростью и с образованием сверхплотных состояний ядерного вещества.

В последнее время были высказаны очень интересные гипотезы о возможном существовании изомеров плотности ядерного вещества. Подобно тому как с помощью высоких давлений удается получать такие модификации обычных веществ, как алмазы или металлический водород, реальный может оказаться, что с помощью столкновений ядер высокой энергии будет получено новое (пока гипотетическое!) состояние ядерного вещества, обладающее необычными свойствами. Возможно, это новое вещество будет существовать относительно долгое время, т. е. будет метастабильным.

Необходимо отметить, что при столкновении релятивистских ядер гигантские энергии концентрируются не в точке, а в значительных (по сравнению с размерами элементарных частиц) областях пространства. Очень важно убедиться, что

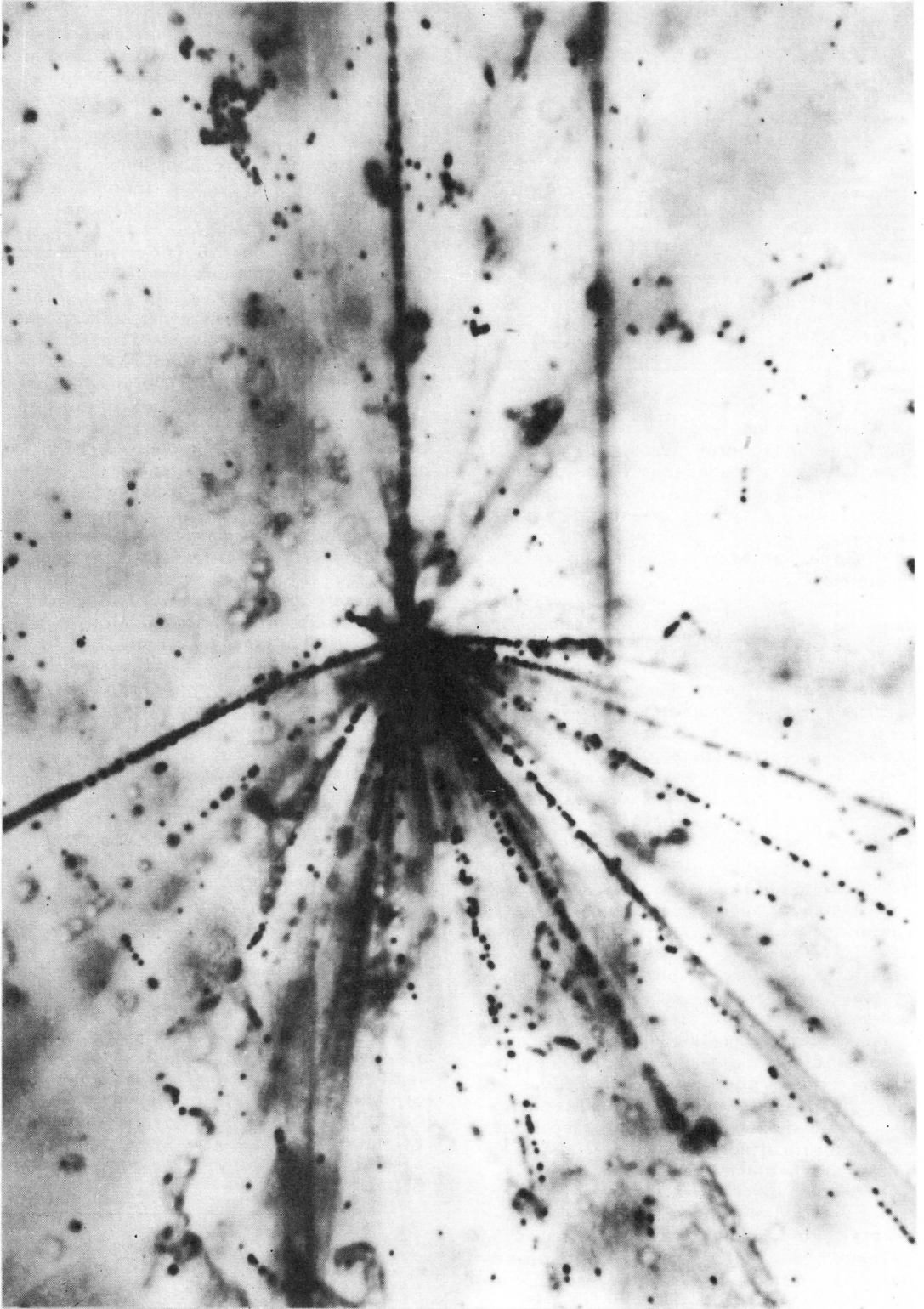
при таком столкновении происходит диссипация энергии, возбуждается много степеней свободы и оказывается справедливым предположение о сплошной среде и можно говорить о давлении и температуре.

На одной из представленных фотографий показано столкновение релятивистского ядра углерода с ядром серебра ядерной эмульсии. Ядра углерода были ускорены на Дубненском синхрофазотроне до энергий 60 ГэВ (т. е. до импульсов, удовлетворяющих условию  $\beta^2/m^2 \approx 25 \gg 1$ ), выведены из ускорителя, сфокусированы и направлены на регистрирующие приборы. Группа физиков под руководством К. Д. Толстова обнаружила, что не только под действием релятивистских ядер углерода, но и под действием протонов с вероятностью нескольких процентов происходит полный развал сталкивающихся ядер на составляющие нуклоны, при этом число испускаемых частиц достигает сотни<sup>7</sup>. Это показывает, что в значительной доле случаев происходят диссипация энергии и возбуждение многих степеней свободы, появляется большое количество не только нуклонов, но и  $\pi$ -мезонов. Можно ожидать, что поскольку налетающее ядро (скажем, меньшего диаметра, чем ядро мишени) движется внутри ядра мишени со сверхзвуковой скоростью и увлекает вещество ядра мишени, то может сформироваться фронт ударной волны. Такие представления были высказаны в литературе еще в 50-х годах. Недавно полученные экспериментальные результаты, указывающие на существование максимума в угловом распределении продуктов реакции расщепления ядер под углом 60°. Этот максимум был зарегистрирован польскими физиками (П. Зелинский с сотрудниками) еще в 1965 г. при облучении ксеноновой пузырьковой камеры пучками  $\pi$ -мезонов Дубненского синхрофазотрона<sup>8</sup>.

Недавно интенсивное исследование этого явления было предпринято физиками ФРГ (В. Грайнером и Е. Шоппером с сотрудниками) на ускорителях в Беркли (США) и в Дубне. Эта группа надеется с помощью изучения максимума (интерпретируемого как конус Маха) обнаружить

<sup>7</sup> Толстов К. Д.— Сообщения ОИЯИ, 1973, P1-6897.

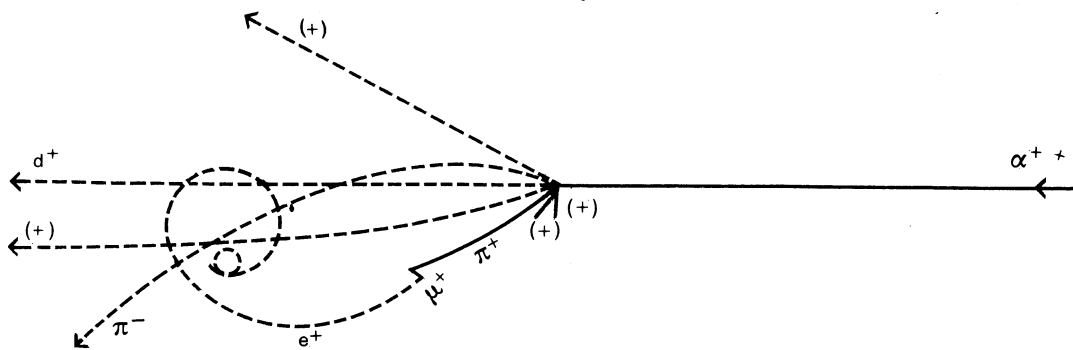
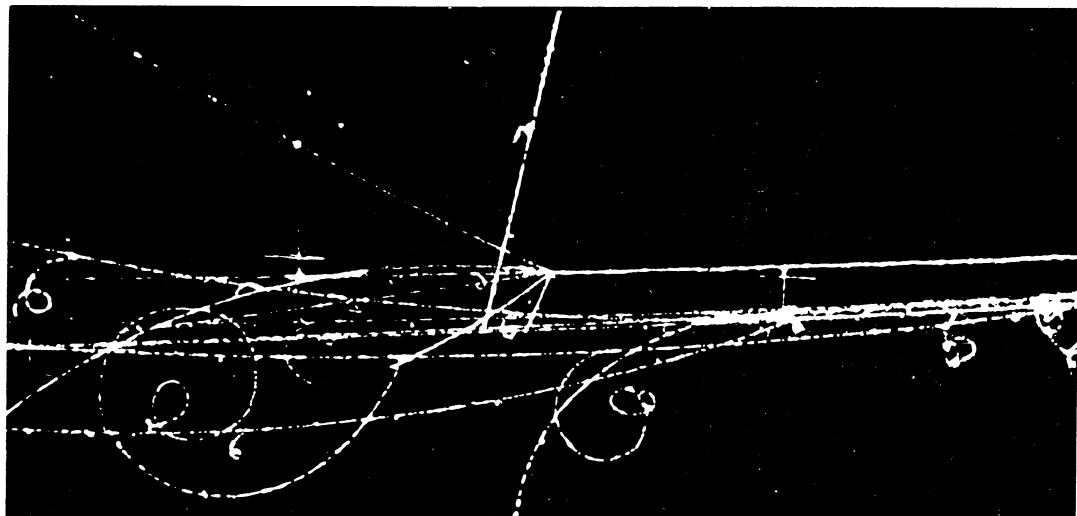
<sup>8</sup> Siemiar czuk T.— Acta Phys. Pol., 1973, v. B4, p. 621.



**Столкновение релятивистского ядра углерода с ядром фотографической эмульсии.**

Реакция столкновения релятивистского ядра гелия в 2-метровой пропановой пузырьковой камере в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований; внизу дана расшифровка событий.

Еще один важный аспект применения методов физики элементарных частиц к реакциям с релятивистскими многозарядными ионами — возможность индивидуального наблюдения движущихся ядер в трековых приборах. Например, реакция, вызванная релятивистским ядром гелия в 2-метровой пропановой пузырьковой камере Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. Поскольку камера помещена в магнитное поле, можно измерять импульсы частиц и величину ионизации. Техника измерения таких событий пол-



сверхплотное состояние ядерной материи — изомер плотности. Вне зависимости от того, справедлива ли гипотеза о существовании изомеров плотности, получение экстремальных состояний ядерной материи представляет огромный научный интерес. Несомненно также, что при столкновении многозарядных ионов высокой энергии с ядрами мы имеем дело с новыми формами коллективных движений ядерной материи.

ностью отработана, созданы системы обработки фотографий с помощью автоматических устройств и обсчета результатов на больших ЭВМ.

Наблюдение движущихся ядер (и групп барионов) в трековых приборах открывает важные перспективы изучения чрезвычайно короткоживущих состояний. Применение современных методов физики высоких энергий гарантирует измерение параметров ядерных систем с време-



нами жизни, сравнимыми с временами жизни частиц и резонансов, наблюдаемых в физике элементарных частиц. Здесь появляется возможность осуществить временную развертку ядерных распадов, т. е. создать своеобразный ядерный осциллограф. (Традиционные методы ядерной физики не имеют аналога этой возможности.) В каскаде распадов движущегося ядра в трековом приборе один распад от другого отделен расстоянием, пропорциональным времени жизни ядра, причем каждый распад изучается в условиях наблюдения полного углового распределения.

Особый интерес представляет применение этой методики к изучению так называемых экзотических ядер, т. е. ядер, в состав которых, наряду с протонами и нейтронами, входят  $\Delta$ -частицы или возбужденные состояния нуклонов — резонансы. Как показывают оценки<sup>9</sup>, при столкновении релятивистских ионов вероятности образования ядер, содержащих несколько  $\Delta$ -частиц, имеют вполне разумную величину даже для пузырьковых камер.

Таким образом, можно не только обнаружить необычные ядерные состояния, но и определить их время жизни. Изучение возбужденных состояний этих систем открывает новые направления в ядерной физике, которые по аналогии с ядерной спектроскопией естественно назвать гиперядерной, изоядерной и, возможно, суперядерной спектроскопиями.

Почти совершенно нетронутой областью исследований остается пока получение сверхсильных электромагнитных полей, которые возникают при сближении двух зарядов большой величины, движущихся со скоростями, близкими к скорости света. В этой области возможна ситуация, когда электромагнитные и сильные взаимодействия окажутся величинами одного порядка. Значительный интерес представляют также электромагнитные расщепления движущихся ядер.

#### СИЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПУЧКАХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР

В области энергий многозарядных ионов от 30 МэВ/а.е.м. до 300 МэВ/а.е.м., где рождение  $\pi$ -мезонов не существен-

но, основную роль играют процессы, которые можно назвать сверхзвуковыми и высокотемпературными многонуклонными реакциями. При энергиях выше 300 МэВ/а.е.м. существенную роль начинают играть возбуждения новых степеней свободы — возбужденные состояния нуклонов и мезонные переменные. Наконец, в области энергий порядка нескольких ГэВ на атомную единицу массы и начинается собственно релятивистская ядерная физика, когда возникают сверхплотные состояния, происходит слияние групп нуклонов, и тут никакими усовершенствованиями существующих ядерных моделей не обойтись. Необходимо рассмотрение внутриадронной материи, основу которого представляют те или иные структурные единицы — квазичастицы. Для проверок моделей внутреннего строения частиц проделано огромное число экспериментальных исследований по взаимодействию адронов.

Бурное накопление экспериментальных данных делает ситуацию в этой важнейшей области критической, напоминающей состояние теории структуры материи во времена знаменитых опытов Э. Резерфорда. Это хорошо иллюстрирует рисунок, на котором приведена зависимость вероятности рассеяния  $\alpha$ -частиц на атомах золота от переданного в этом столкновении импульса. Отклонение этих экспериментальных данных от простой экспоненциальной зависимости позволило автору ввести новое фундаментальное понятие — атомное ядро — объект внутри атома, способный воспринять большой импульс отдачи. На том же рисунке справа приведена вероятность рассеяния протонов на протонах при сверхвысоких энергиях как функция переданного импульса (экспериментальные данные 1973 г.). Отклонение экспериментальных данных от простой экспоненциальной зависимости удивительно напоминает рисунок слева. Однако пока мы не умеем делать отсюда столь же кардинальных выводов, которые сделал Резерфорд.

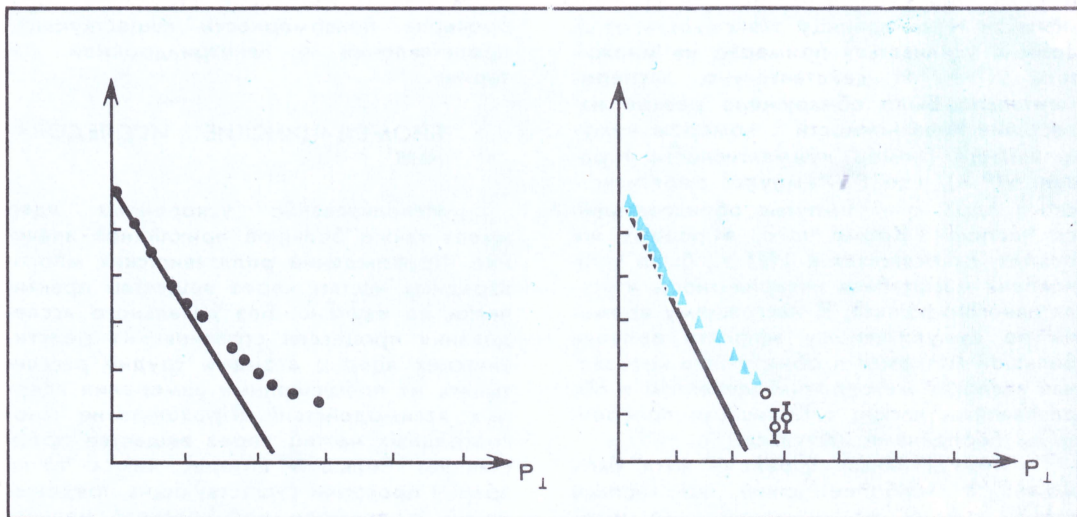
Представление о партонах — новых составных элементах «элементарных» частиц, обладающих исчезающе малыми размерами и способных воспринять большой импульс, — находится в настоящее время в состоянии бурного развития. Правда, вместо формул обычно рисуются картинки, напоминающие некоторые современные произведения живописи: автор сам не вполне понимает, что рисует, а слушатели делают вид, что им все

<sup>9</sup> Шахбазян Б. А., Темников П. П., Тимонина А. А. — Сообщения ОИЯИ, 1974, 8309, с. 85.

ясно. В значительно лучшем состоянии находится кварковая модель, которая имеет в своем активе не только оправдавшиеся на опыте предсказания, но и закономерности (формулы), охватывающие удивительно большой объем экспериментально-го материала.

В этой связи нами был поставлен вопрос о применении партонных и кварковых представлений к столкновениям релятивистских ядер<sup>10</sup>. При возникающих больших плотностях внутри ядра нуклоны должны терять свою индивидуальность, а

быв шкалы энергий оставляет характеристики неизменными. К 1970 г., когда начались наши исследования по релятивистской ядерной физике, было известно, что масштабная инвариантность выполняется не только в столкновениях электрон — протон, но и в столкновениях адронов. Одно из возможных толкований масштабной инвариантности заключалось в том, что при очень высоких энергиях массы частиц и константы размерности длины (формфакторы) становятся незначительными, а внутриадронная материя ведет



Сопоставление распределений по  $P_{\perp}$  [где  $P_{\perp}$  — проекция переданного импульса на плоскость, перпендикулярную к направлению столкновения], полученных в классических опытах Э. Резерфорда [слева] и в опытах по столкновению протонов с протонами при высоких энергиях [справа]. Прямые линии — экспоненциальная зависимость  $P_{\perp}$ ; кружки и треугольники — экспериментальные данные. [Графики взяты из работы Э. Резерфорда, опубликованной в «Phil. Mag.», 1911, v. XXI, p. 669, и из журнала «Phys. Lett.», 1973, v. 46B, p. 471.]

их кварковые составляющие — сильно перемешиваться, обобществляться. Один из важнейших законов, описывающих внутриадронную материю, — масштабная инвариантность. Под масштабной инвариантностью понимают независимость характеристик процессов от энергии сталкивающихся частиц. Эти характеристики (например, сечения) зависят только от отношения энергий сталкивающихся и вылетающей частиц, а преобразование масшта-

себя как однородная, сплошная среда. На этой основе было предсказано новое явление, названное кумулятивным эффектом<sup>11</sup>.

Кумулятивный эффект — процесс столкновения релятивистского ядра с мишенью, когда вновь образующимся частицам передается энергия, значительно превышающая ту, которая приходится на один нуклон ядра, т. е. энергия группы частиц передается одной. Поскольку среднее число нуклонов («на просвет») в ядре равно  $\sim A^{1/3}$ , при столкновении, например, ядра алюминия с мишенью вторичным частицам очень часто передается энергия, в 3 раза большая энергии, приходящейся на один нуклон. Кумулятивный эффект имеет и практическое значение: при ускорении ядер можно получить пучки вторичных частиц с энергией, превышающей номинальную

<sup>10</sup> Baldin A. M.—In: Proc. International Conference High Energy Physics and Nuclear Structure. Santa Fe, 1975, p. 621.

<sup>11</sup> Балдин А. М.—Препринт ОИЯИ, 1971, P7-5808. Доклад на IV Международной конференции по физике элементарных частиц и атомного ядра. Дубна, 1971.

энергию ускорителя (например, протонного).

Систематические экспериментальные исследования кумулятивного эффекта, предпринятые на Дубненском синхротроне группой под руководством В. С. Ставинского, подтвердили эти предсказания и обнаружили замечательные особенности кумулятивного эффекта. Так, важной характеристикой кумулятивного эффекта является зависимость выхода образующихся частиц от атомного номера релятивистского ядра. Согласно нашей модели, при увеличении номера кумулятивности  $N$  на единицу зависимость от  $A$  должна усиливаться примерно на множитель  $A^{1/3}$ . И действительно, экспериментально было обнаружено резкое нарастание  $A$ -зависимости с номером кумулятивности (номер кумулятивности  $N$  равен  $q/(P/A)$ , где  $P$  — импульс релятивистского ядра,  $q$  — импульс образовавшейся частицы). Кроме того, в первых же опытах, относящихся к 1971 г., была установлена масштабная инвариантность кумулятивного эффекта. К настоящему времени по кумулятивному эффекту получен большой материал и обнаружена интересная аналогия между этим эффектом и образованием частиц с большими поперечными передачами импульса.

Кумулятивный эффект — хотя, быть может, и наиболее яркий, но частный случай процессов множественного рождения частиц при столкновении релятивистских ядер. Изучение столкновений релятивистских ядер дает возможность нетривиального подхода к этим важнейшим процессам (процессы множественного рождения составляют 80% всех процессов столкновения адронов при больших энергиях) в связи со следующими особенностями по сравнению со столкновениями элементарных частиц:

внутренняя структура сталкивающихся объектов известна хотя бы в нерелятивистском пределе;

можно в широких пределах варьировать характеристики сталкивающихся объектов;

представляется возможность исследовать процессы столкновения, когда не только в конечном, но и в начальном состоянии присутствует много частиц (кумулятивные эффекты);

здесь более обосновано применение статистического и гидродинамического подходов.

Методы релятивистской ядерной физики — это естественное развитие и

адаптация методов физики элементарных частиц. Множественные процессы исследуются главным образом с помощью трековых приборов. К настоящему времени в Дубне релятивистскими ядрами облучены две пузырьковые камеры (1-метровая жидководородная и 2-метровая пропановая), 2-метровая стримерная камера и четыре крупных электронных установки, ранее применявшихся в физике элементарных частиц.

Сейчас наиболее актуальная проблема в этой области — получение информации о кварковой структуре ядра, проверка правомерности существующих представлений о «внутриадронной материи».

## БИМЕДИЦИНСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использование ускоренных ядер имеет также большое прикладное значение. Прохождение релятивистских многозарядных частиц через вещество практически не изучено. Без детального исследования процессов столкновения релятивистских ядер с атомами трудно рассчитывать на прецизионные измерения ядерных взаимодействий. Прохождение многозарядных частиц через вещество представляет большой интерес как с точки зрения проверки существующих представлений о природе космического излучения, так и с точки зрения радиационной безопасности космонавтов и космических аппаратов.

Релятивистские ядра в определенных условиях представляют в космосе наибольшую радиационную опасность. Для точной оценки опасности, исходящей от тяжелых частиц, и составления прогнозов развития радиационных поражений необходимо всесторонне исследовать особенности действия этих частиц на различные биологические системы. Использование для этих целей космических кораблей, искусственных спутников и высотных баллонов очень дорого и связано с преодолением значительных технических трудностей. Кроме того, интенсивность космического излучения низка и необходимы большие затраты времени для получения достаточных доз.

В связи с созданием пучков релятивистских ядер в лабораторных условиях эти исследования получают совершенно новые возможности. Особенно ценную информацию можно получить с помощью упомянутой пропановой камеры, в кото-

рой можно проследить все процессы, связанные с прохождением тяжелых частиц через углеводороды. Характерно, что одним из основных мотивов получения пучков релятивистских ядер в США была возможность исследовать ряд медико-биологических проблем.

Использование в медицине плотнo-ионизирующих излучений, для которых потери энергии на единицу длины достаточно высоки, получило значительное развитие как в СССР, так и в США. Современная онкология располагает большим опытом применения протонов и  $\alpha$ -частиц для лучевой терапии злокачественных опухолей. Возможность использования в медицине пучков релятивистских ядер, создаваемых в Дубне, была проанализирована В. П. Дзепелевым с сотрудниками<sup>12</sup>. Биологические особенности воздействия релятивистских многозарядных частиц связаны с тем, что их потери энергии на единицу длины резко возрастают к концу пробега, образуя в конце резкий «пик Брэгга». Ширина этого пика на половине высоты, без учета ядерных взаимодействий, определяется энергетическим разбросом пучка и флуктуациями пробегов отдельных частиц пучка. Относительная величина этих флуктуаций уменьшается примерно как  $1/\sqrt{m}$ , где  $m$  — масса релятивистского ядра. Среднеквадратичный радиус рассеяния уменьшается для тяжелых заряженных частиц с одинаковым пробегом тоже примерно как  $1/\sqrt{m}$ . Поэтому тяжелые ионы высоких энергий больше всего подходят для получения тонких пучков и создания сильно локализованных областей лучевого поражения. Это свойство тяжелых ионов представляет значительный интерес для исследования самых разнообразных биологических объектов.

#### ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПУЧКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР

Как показали эксперименты с ускорением дейтонов на Дубненском синхрофазотроне в 1970 г., переход к ускорению ядер не требует больших переделок ускоряющей системы и инжекционных устройств. В принципе любой ускоритель высоких энергий можно приспособить для ускорения дейтонов и

$\alpha$ -частиц. Важнейшее условие для использования ядерных пучков — наличие систем выводов первичных (ускоренных) частиц. Необходимо отметить, что выведенные пучки не только обладают большой интенсивностью, но и имеют почти на порядок меньший разброс по энергии частиц по сравнению со вторичными пучками.

Энергия ускоренных релятивистских ядер при заданных параметрах ускорителя пропорциональна их заряду. Например, энергия ядер углерода ( $Z=6$ ) на Дубненском синхрофазотроне, рассчитанном на получение протонов с энергией до 10 ГэВ, достигает 60 ГэВ. Энергия, приходящаяся на один нуклон, при условии ускорения полностью ионизованных атомов (голых ядер) определяется соотношением

$$E_{a. e. m.}^{\max} = E_p^{\max} \frac{Z}{A} \approx \frac{E_p^{\max}}{2},$$

т. е. энергия, приходящаяся на одну атомную единицу ( $E_{a. e. m.}$ ), примерно в два раза меньше энергии протонов на том же ускорителе. Вторичные пучки (например, пучки  $\pi$ -мезонов) той же энергии и той же интенсивности, что и при ускорении протонов, можно получить за счет кумулятивного эффекта, если иметь достаточную интенсивность ускоренных ядер. Более того, можно получить вторичные пучки частиц, обладающих энергией, значительно превышающей номинальную энергию ускорителя ( $E_p^{\max}$ ).

Однако для этого необходимо получать интенсивные пучки ядер с большими атомными весами. Как уже отмечалось, кумулятивный эффект имеет очень сильную  $A$ -зависимость, нарастающую с ростом номера кумулятивности. Получение таких пучков требует решения сложных технических проблем. Главная из них — получение голых ядер (т. е. полностью ионизованных атомов).

Ускорение частично ионизованных атомов предъявляет исключительно высокие требования к вакууму внутри камеры ускорителя. Потеря электронов ионом при столкновении его с молекулой остаточного газа резко меняет зарядность иона, что приводит к выпадению его из режима ускорения.

Улучшение вакуума примерно в 100 раз на расстояниях, измеряемых сотнями метров и километрами (длина дорожки современного ускорителя на высо-

<sup>12</sup> Дзепелев В. П., Савченко О. В., Рудерман А. И., Макарова Г. В. — Сообщения ОИЯИ, 1974, 8309.

кие энергии),— задача очень сложная.

Проблема создания эффективных источников сильно ионизованных атомов стоит перед физиками уже около двадцати лет. Известные в настоящее время схемы получения многозарядных ионов, работающие в эксплуатационном режиме на действующих ускорителях, позволяют получать заряд ионов не более 10. Для получения ионов высоких зарядов предполагается создать предварительные ускорители (иногда каскад ускорителей) с промежуточной «обдиркой» ядер на газообразных и твердых мишенях. Средний заряд ионов после прохождения фольги обдирочного устройства сильно зависит от их энергии. Например, для получения голого ядра кальция ( $Z=20$ ) необходимо ускорить ионы до энергии 10 МэВ/а.е.м., а это уже проблема создания крупного ускорителя.

В связи с этими трудностями мы решили воспользоваться огромным опытом Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ по источникам многозарядных ионов и взяться за разработку источников принципиально нового типа. Этот путь нам настойчиво рекомендовал ее руководитель Г. Н. Флеров. Электронно-лучевой источник, предложенный Е. Д. Донцом<sup>13</sup>, представляет собой довольно компактное устройство, позволяющее в настоящее время получать полностью ионизованные ионы неона с интенсивностью  $10^8$  частиц в импульсе при длительности цикла в десятки миллисекунд.

Криогенная техника позволяет получить в этом источнике магнитное поле практически любой нужной величины с очень малыми затратами энергии и вакуум в области ионизации  $\sim 10^{-11}$  тор. Источник получил название «Крион» (криогенный ионизатор). Существующее состояние работ по источнику позволяет рассчитывать на получение голых ядер с интенсивностью  $\sim 10^{11}/Z$ . Если параметры этого устройства будут улучшены, он станет незаменимым на современных ускорителях.

Хорошей альтернативой «Криона» является лазерный источник многозарядных ионов, предложенный и разработанный группой физиков Московского инженерно-физического института (МИФИ) под руководством Ю. А. Быковского<sup>14</sup>.

При воздействии сфокусированного

излучения лазера на поверхность твердой мишени образуется плазменный факел с большой температурой и плотностью. При плотности светового потока больше  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup> испаряемое вещество сильно ионизовано. Рост температуры плазмы сопровождается возникновением газодинамического движения, что в свою очередь оказывает существенное влияние на нагрев и ионизацию. Электроны как очень легкие частицы получают основную долю энергии и при своем вылете перпендикулярно поверхности мишени создают, по-видимому, некоторое подобие механизма коллективного ускорения. Такой процесс ускорения позволяет, например, ионам с  $Z > 20$  набрать энергию до  $\sim 20\text{—}40$  кэВ.

Применение метода сильноионизованных атомов в условиях работы Дубненского синхрофазотрона хотя и оказалось далеко не простой задачей, но довольно быстро привело к успеху. В частности, первые экспериментальные данные с релятивистскими ядрами углерода рекордных энергий получены на основе лазерного источника совместными усилиями коллективов ОИЯИ и МИФИ. Интенсивность пучка ядер углерода после прохождения всех систем синхрофазотрона, включая выводные устройства, оказалась вполне достаточной для проведения экспериментов не только в трековых приборах, но и методами ядерной электроники.

Описанные выше аспекты физики релятивистских ядер, конечно, не исчерпывают этой новой и чрезвычайно перспективной области. Нам представляется очевидным, что эта область науки получит большое развитие не только на действующих ускорителях, но и потребует создания специализированных ускорителей релятивистских ядер. Первый пример такого ускорителя — «Нуклотрон» (известный также под именем «Ядромет»), ускоритель на основе сверхпроводящих магнитов, который должен заменить Дубненский синхрофазотрон. Он позволит получать интенсивные пучки ядер вплоть до тяжелых с энергией на нуклон примерно в 3 раза большей, чем на синхрофазотроне, что откроет широкие перспективы исследований в релятивистской ядерной физике.

<sup>13</sup> Донец Е. Д., Пикин А. И.— Сообщения ОИЯИ, 1974, P7-7999.

<sup>14</sup> Ананьин О. Б., Быковский Ю. А.— Сообщения ОИЯИ, 1973, P7-7368; Ананьин О. Б. и др.— «Письма в ЖЭТФ», 1974, т. 19, с. 19.