

**ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР
ФОТОНАМИ И ЭЛЕКТРОНАМИ
ПРОМЕЖУТОЧНЫХ И ВЫСОКИХ
ЭНЕРГИЙ**

Успешное расщепление атомного ядра в Украинском физико-техническом институте (теперь Харьковский физико-технический институт АН УССР) в 1932 г. К. Д. Синельниковым, А. И. Лейпунским, А. К. Вальтером и Г. Д. Латышевым [1] положило начало ядерно-физическим исследованиям с помощью ускорителей. С этого момента и до настоящего времени ядерная физика — одно из главных направлений научных исследований указанного института. Заметное место в этих исследованиях занимает реакция деления ядер фотонами и электронами. Так, в ХФТИ впервые осуществлено деление ядер электронами и позитронами. Использование в опытах фотонов и электронов большой энергии позволило вовлечь в орбиту физики деления ядра практически всю периодическую таблицу элементов, что предоставило новые возможности для проверки различных моделей ядер и механизмов их деления. Имеющиеся экспериментальные данные по делению ядер фотонами и электронами промежуточных и высоких энергий обобщены в [2, 3].

В настоящее время ядерная физика высоких энергий. Интерес к ней, кроме естественно-го желания продвинуть исследования закономерностей ядерных превращений в сторону все более высоких энергий, обусловлен многими причинами. Имеется ряд специфических ядерных явлений, присущих только физике высоких энергий: деление относительно лег-

ких ядер и фрагментация, внутриядерные мезон-нуклонные каскадные процессы, образование гиперядер и т. д. Интерес к ядерной физике высоких энергий обусловлен также практическими соображениями, поскольку в исследованиях по радиационной стойкости материалов, радиационной медицине и биологии все шире используются пучки частиц с большой энергией. Для интерпретации наблюдаемых в этих исследованиях эффектов необходимы сведения о всем разнообразии ядерных реакций, происходящих в веществе. Изложенное в полной мере относится к электромагнитным взаимодействиям ядер, исследования которых особенно интенсивно ведутся в ХФТИ с момента ввода в строй линейных ускорителей электронов (1960 г.).

Эффективным средством исследования электромагнитных взаимодействий ядер является изучение различных фото- и электроядерных реакций, в том числе и деления в широком интервале энергий и массовых чисел. Если обратиться к области энергий «гигантского» резонанса, то именно изучение фотоделения повлияло на формирование представлений о структуре ядер и механизмах их превращений, на становление жидкокапельной и коллективной моделей.

На процесс деления влияет весь предшествующий делению механизм взаимодействия частицы высокой энергии с ядром, поэтому экспериментальные данные о сечении фотоделения, об

угловых и энергетических распределениях осколков используются для определения таких параметров ядра, как высота барьера деления, плотность уровней в седловой точке, и других, входящих в теоретические модели взаимодействия фотонов высоких энергий с ядрами.

К фотоделению тесно примыкает процесс деления ядер электронами — в обоих случаях электромагнитное поле взаимодействует с ядерным зарядом и током. Исторически сложилось так, что изучение фотоядерных реакций начато намного раньше, чем исследование ядерных реакций под действием электронов, хотя последние в принципе более информативны. Чтобы корректно извлекать информацию из экспериментальных данных об электроядерных реакциях, необходимо иметь достаточно хорошую теорию. Именно отсутствие такой теории наряду с другими причинами долго тормозило развитие исследований реакций.

Особенности деления ядер фотонами. Обычно теория электродезинтеграции ядер излагается как теория виртуальных фотонов [43]. Согласно этой теории ядерное взаимодействие электрона можно рассматривать как взаимодействие виртуальных фотонов с ядром, а теоретические проблемы электродезинтеграции сводятся к надежному определению спектра виртуальных фотонов.

Сечение фоторасщепления, т. е. процесса

$$\gamma + A = \sum_i A_i \quad (1)$$

в котором вначале имеется ядро A , а после поглощения фотона γ — совокупность адронов — продуктов взаимодействия, выражается через те же величины, что и сечение соответствующей реакции электрорасщепления

$$e + A = \sum_i A_i + e' \quad (2)$$

где e и e' — начальный и рассеянный электроны.

Представим сечение фотоядерной реакции в виде разложения по мультipoлям:

типолям:

$$\sigma_\gamma(k) = \sum_{\omega, \lambda} \sigma_{\omega\lambda}(k). \quad (3)$$

Здесь k — энергия фотона; индекс ω означает электрическую или магнитную компоненту мультипольности λ ; $\sigma_{\omega\lambda}$ — парциальное фотоядерное сечение.

Из-за сплошного характера спектра большинства имеющихся источников фотонов в фотоядерных экспериментах обычно измеряется не сечение, а так называемый выход σ_Q , связанный с сечением известным интегральным уравнением

$$\sigma_Q(E) = \sum_{\omega, \lambda} \int_0^E n_\gamma(E, k) \sigma_{\omega, \lambda}(k) dk, \quad (4)$$

где E — энергия электрона; n_γ — спектр фотонов.

Аналогичное соотношение связывает сечения электро- и фотоядерных реакций:

$$\sigma_e(E) = \sum_{\omega, \lambda} \int_0^E N_{\omega\lambda}(E, k) \sigma_{\omega\lambda}(k) dk. \quad (5)$$

Здесь σ_e — сечение электрорасщепления; $N_{\omega\lambda}$ — функция, определяющая спектр виртуальных фотонов типа ω мультипольности λ . Виртуальные фотоны имеют поперечную и продольную поляризацию, поэтому суммирование в (5) для электрических мультиполей начинается с нуля, а не с единицы, как в (4) для фотонов.

Спектр тормозного излучения определяется условиями формирования фотонного пучка и не зависит от свойств исследуемого ядра. Спектр же виртуальных фотонов, наоборот, определяется свойствами ядра-мишени и характером исследуемой реакции и практически не зависит от условий проведения эксперимента.

В спектре тормозного излучения фотоны различной мультипольности представлены одинаково, спектр же виртуальных фотонов зависит от их мультипольности — чем выше мультипольность, тем интенсивнее спектр виртуальных фотонов. Отсюда следует, что сравнение данных о сечениях фото- и электроядерных реакций дает сведения о мультипольности поглощенных фотонов и что использование виртуальных

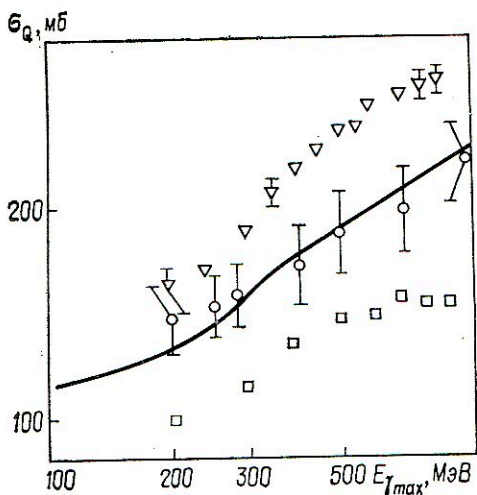


Рис. 1. Выход фотodelения ядер ^{238}U в зависимости от максимальной энергии тормозного спектра:

○ — Харьков и Ереван, 1971 г. [8]; □ — Лунд (Швеция), 1970 г. [10]; ▽ — Сендай (Япония), 1971 г. [11].

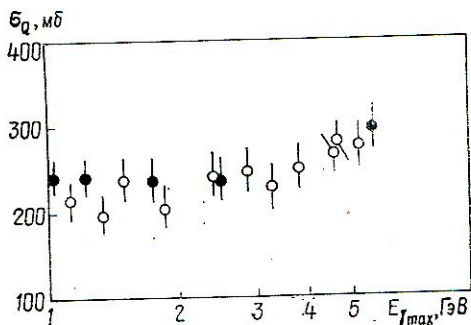


Рис. 2. Выход фотodelения ядер ^{238}U в зависимости от максимальной энергии тормозного спектра:

○ — Харьков и Ереван, 1971 г.; ● — Фраскати (Италия) и ДЕЗИ (ФРГ) 1975 г. [12].

фотонов позволяет выявить вклады в исследуемую реакцию более высоких мультиполей, чем это возможно в опытах с реальными фотонами.

С методической точки зрения использование виртуальных фотонов для изучения ядерных реакций имеет ряд несомненных преимуществ в сравнении с реальными, тормозными фотонами. При формировании пучка фотонов коллиматорами вырезается только часть тормозного излучения, образующегося в радиаторе, а вследствие зависимости сечения многократного рассеяния электронов от их энергии интенсивность

и спектральный состав тормозного пучка, попадающего на исследуемую мишень, значительно изменяются с изменением энергии электронов. Облучение мишени непосредственно электронами дает возможность иметь постоянный, практически не зависящий от энергии электронов поток виртуальных фотонов с интенсивностью, намного превышающей интенсивность тормозного излучения.

В случае электронов просто решаются вопросы фокусировки и мониторинга пучка.

Теория фотodelения при высоких энергиях. Основой теории фотodelения при высоких энергиях является жидкокапельная модель, с помощью которой можно рассчитывать барьеры деления, относительные ширины делительного канала и т. д. При низких энергиях, когда энергию возбуждения ядра можно считать равной энергии поглощенного фотона, а массу и заряд делящегося ядра — такими же, как и у исходного, не возникают особые осложнения при использовании модели жидкой капли для интерпретации экспериментальных данных. При больших энергиях делению ядра предшествует сложный каскадно-испарительный процесс, в результате которого делящиеся ядра приобретают широкое распределение по массе, энергии возбуждения, заряду, импульсу и угловому моменту, которые необходимо рассчитывать, чтобы воспользоваться моделью жидкой капли. В настоящее время реакция фотodelения при высоких энергиях математически моделируется на мощных электронных вычислительных машинах на основе каскадно-испарительной модели. Соответствующие программы созданы в Лунде (Швеция) [5], Дубне [6], Харькове [7].

Спектр виртуальных фотонов нельзя измерить экспериментально, поэтому точность теоретических оценок в этом случае очень важна. Некоторой гарантией точности расчетов является то обстоятельство, что спектр виртуальных фотонов полностью определяется процессами неупругого рассеяния электронов, которое хорошо изучено экспериментально.

В настоящее время теория электро-дезинтеграции позволяет вычислять спектры виртуальных фотонов с учетом структуры ядра и искажений волновых функций электрона в кулоновском поле ядра.

Фотоделение. Выход фотоядерной реакции связан с сечением соотношением

$$\sigma_Q(E) = \frac{E \int_0^E n_\gamma(E, k) \sigma_\gamma(k) dk}{\int_0^E n_\gamma(E, k) dk}, \quad (6)$$

где $n_\gamma dk$ — число фотонов в интервале энергии $k \div k + dk$; σ_Q — выход фотоядерной реакции, отнесенный к одному эквивалентному фотону. (Эквивалентный фотон — это поток энергии фотонов, численно равный максимальной энергии тормозного излучения.)

Тяжелые ядра ($Z \geq 90$). Выход реакции фотоделения для промежуточных ($150 \text{ МэВ} < k < 1,5 \text{ ГэВ}$) энергий измерен для ядер тория [8], ^{238}U [2], ^{235}U [3], а также для изотопов америдия [9].

На рис. 1 в качестве примера представлены имеющиеся экспериментальные данные по выходу деления ^{238}U в зависимости от максимальной энергии тормозного спектра. Заметно большое расхождение в значениях выхода, полученных в различных лабораториях. Это расхождение можно объяснить наличием искажений формы тормозного спектра и вследствие этого колебаниями вклада «гигантского» резонанса в общий выход.

Для более высоких энергий данные о выходе имеются лишь для ядер ^{232}Th и ^{238}U , измеренные для максимальных энергий фотонов вплоть до 6 ГэВ (рис. 2). Отличительной чертой фотоделения тяжелых ядер является слабая зависимость выхода от энергии, что обусловлено большим вкладом «гигантского» резонанса.

Среднетяжелые ядра. Для ядер с $Z \leq 83$ в пределах погрешностей значения выходов, полученные в различных лабораториях, согласуются между собой, как видно на примере ядер висмута и свинца (рис. 3).

Энергетическая зависимость сечений фотоделения. Как отмечалось, при работе с тормозным спектром сечение фотоделения вычисляется из экспериментальных данных о выходе путем решения уравнения (6). На рис. 4 изображены сечения фотоделения ^{238}U , полученные разными авторами. Видно, что все представленные сечения имеют резонансный характер с максимумами при 300 и 600 МэВ.

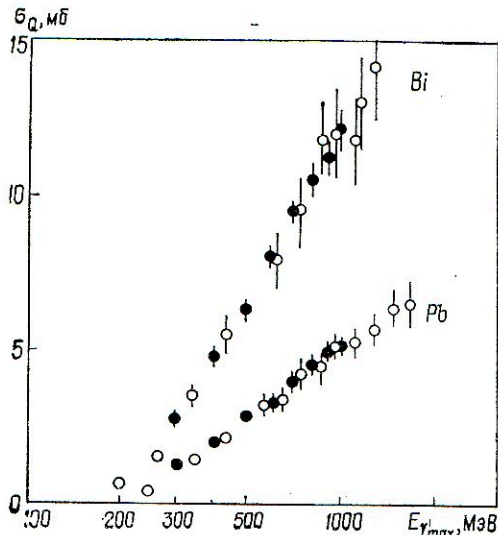


Рис. 3. Выход фотоделения ядер висмута и свинца в зависимости от максимальной энергии тормозного спектра:

○ — Харьков, 1967 г. [13]; ● — Фраскати (Италия), 1971 г. [14, 15].

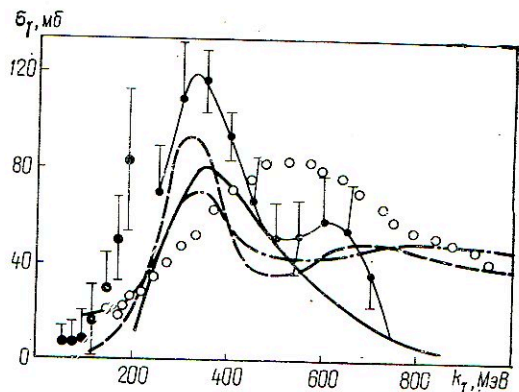


Рис. 4. Сечения деления ядра ^{238}U в зависимости от энергии фотона [16]:

тонкая кривая — Сендай (Япония), 1971 г. [11]; утолщенная — Лунд (Швеция), 1970 г. [10]; штриховая — Харьков, 1971 г. [8]; ● — ФИ АН СССР, 1957 г. [17]; ○ — Стенфорд (США), 1969 г. [18]; штрихпунктирная — результаты, полученные на квазиопохроматическом пучке во Фраскати (Италия), 1980 г.

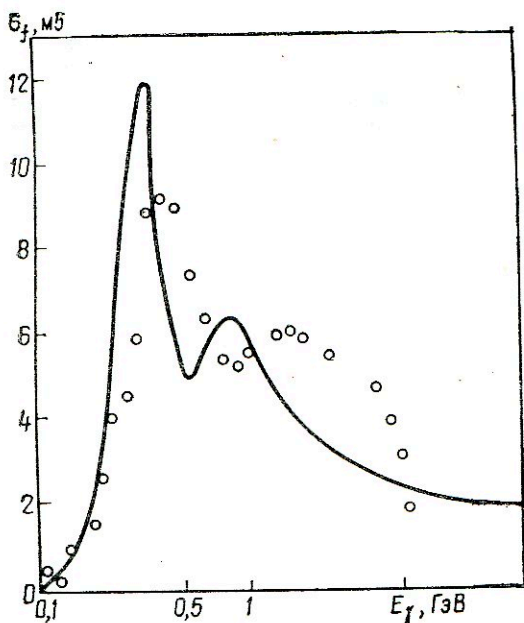


Рис. 5. Сечение деления ядер ^{209}Bi в зависимости от энергии фотона:

○ — результат решения уравнения (6) методом регуляризации с использованием выходов, приведенных в работе [8].

Сечение фотodelения ядер висмута, полученное при решении уравнения (6) методом регуляризации (рис. 5), также имеет два максимума в энергетической зависимости [3].

В настоящее время опубликован цикл работ, в которых сечение фотodelения ряда ядер определялось с помощью

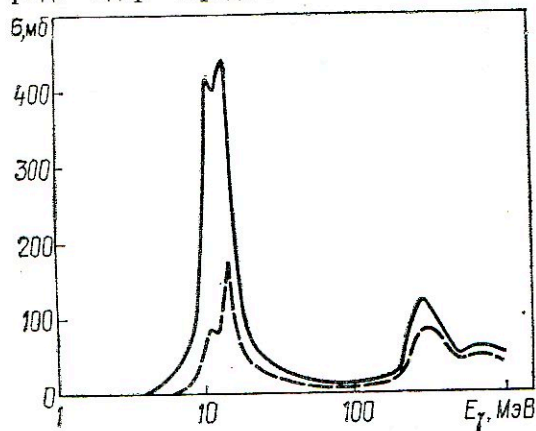


Рис. 6. Энергетическая зависимость полного адронного сечения фотопоглощения ядром ^{235}U (сплошная кривая) и сечения фотodelения (штриховая), рассчитанные по формулам (7) — (10).

пучка квазимонохроматических фотонов, образующихся при торможении электронов в монокристалле алмаза [16]. Полученное в этих работах сечение деления урана изображено на рис. 4 штрихпунктирной кривой. Ход энергетической зависимости и модуль сечения практически не отличаются от полученных в ХФТИ на обычном тормозном пучке (штриховая кривая).

Сечение фотodelения можно представить следующим образом:

$$\sigma_{\gamma f} = \sigma_t D, \quad (7)$$

где σ_t — полное адронное (ядерное) сечение фотопоглощения ядром; $\sigma_{\gamma f}$ — сечение фотodelения; D — делимость. Соотношение (7) можно рассматривать как определение делимости при фотodelении.

Сечение фотопоглощения удобно представить в виде

$$\sigma_t = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3. \quad (8)$$

Сечение σ_1 соответствует поглощению фотонов ядром как целым («гигантский» резонанс). В этой области энергии сечение фотопоглощения хорошо известно, его можно представить суммой двух лоренцианов с параметрами, приведенными в работе [19]. Сечение σ_2 описывает фотопоглощение в области энергий между «гигантским» резонансом и порогом фоторождения π -мезонов. Прямых измерений этого сечения для ядра урана нет. Имеющиеся экспериментальные данные для свинца свидетельствуют о том, что сечение фотопоглощения в этом интервале энергии мало, практически не зависит от энергии фотона и может быть определено из выражения [20]

$$\sigma_2(k) = 300 \frac{NZ}{A} (k - B)^{3/2} k_{\gamma}^{-3} e^{-60/k}. \quad (9)$$

Здесь сечение измеряется в миллибарнах, энергия — в мегаэлектрон-вольтах; B — энергия связи дейтона. Однопараметрический фактор $e^{-60/k}$ введен Левинджером для учета подавления сечения из-за принципа Паули при энергиях, близких к Ферми — энергии нуклона.

Сечение σ_3 фотопоглощения за порогом рождения пионов определяется

сечением фоторождения:

$$\sigma_3 = A\bar{\sigma}_t, \quad (10)$$

где $\bar{\sigma}_t$ — сечение фотопоглощения одним нуклоном, усредненное по импульсному распределению нуклонов в ядре [21].

Чтобы получить сечение фотоделения из полного адронного сечения фотопоглощения, необходимо знать делимость. Экспериментально энергетическая зависимость делимости для ядра урана известна в «гигантском» резонансе. Она имеет ступенчатый характер, обусловленный скачкообразным увеличением делимости в точках, соответствующих испарению очередного нейтрона. Ступенчатая зависимость делимости от энергии фотона для ядра ^{238}U представлялась в виде

| | | | | | |
|-------------|-----|------|-------|-------|-----|
| D | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 |
| k_p , МэВ | 0—6 | 6—14 | 14—23 | 24—28 | 28 |

Найденное таким образом сечение фотоделения урана вместе с полным адронным сечением фотопоглощения изображено на рис. 6. Оно имеет резонансную структуру. Первый пик при энергии 15 МэВ — «гигантский» резонанс в фотопоглощении, пики при более высокой энергии обусловлены резонансами в структуре нуклона. Имеющиеся экспериментальные данные о вы-

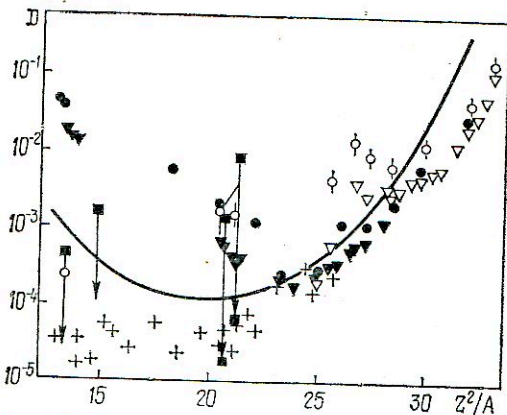


Рис. 7. Зависимость делимости ядер от параметра Z^2/A :

∇ — Харьков, фотоны, 1967 г. [13]; \circ — Гатчина, протоны, 1976 г. [23]; $+$ — Сакле (Франция), α -частицы, 1974 г. [25]; \bullet — Лунд (Швеция), фотоны, 1974 г. [26]; \blacktriangledown — Фраскати (Италия), фотоны, 1976 г. [27]; \blacksquare — Сакле, фотоны, [28]; кривая — расчет Никса и Сасси [22].

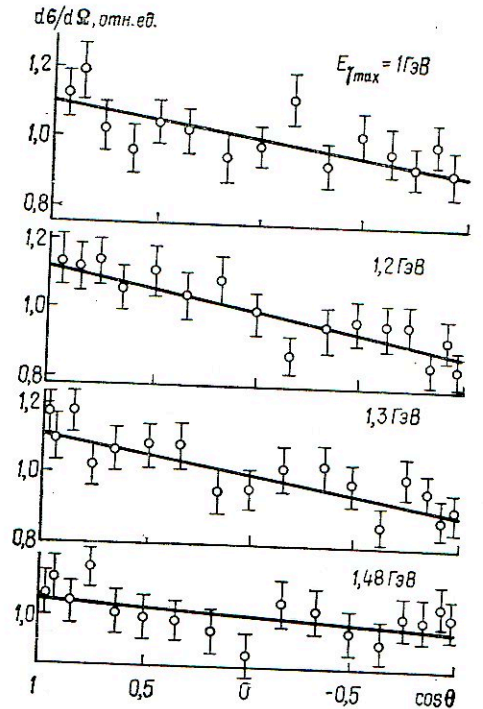


Рис. 8. Угловые распределения осколков фотоделения ^{209}Bi [31].

ходе не противоречат такому представлению об энергетической зависимости сечения фотоделения. На рис. 1 кривая соответствует результату численного интегрирования уравнения (6) с сечением фотоделения, изображенным на рис. 6.

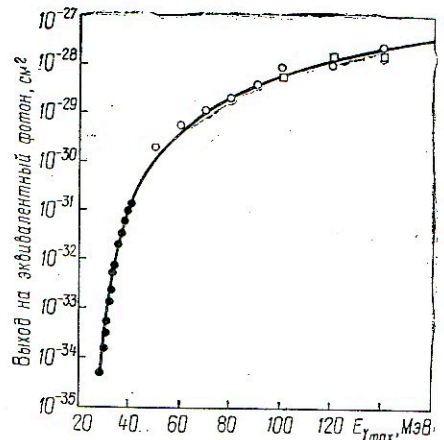


Рис. 9. Выход фотоделения ядра ^{209}Bi в зависимости от максимальной энергии тормозного спектра:

\circ — Харьков, 1969 г. [35]; \bullet — Дармштадт (ФРГ), 1974 г. [36].

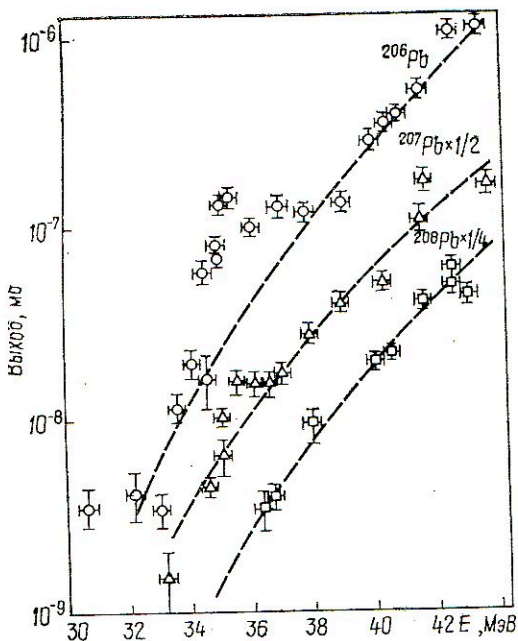


Рис. 10. Сечение электроделения изотопов свинца в зависимости от энергии электрона [38].

Аналогичная зависимость сечения фотоделения от энергии фотонов наблюдается для других ядер с той разницей, что для ядер с $Z \leq 83$ пика, соответствующего делению в «гигантском» резонансе, нет. Кривая на рис. 5 получена по (7) — (10) с $D = 0,11$.

Корректное измерение сечений фотоделения тяжелых ядер представляет интерес для определения полных адронных сечений фотопоглощения тяжелыми ядрами, где пока таких данных практически нет. Весьма перспектив-

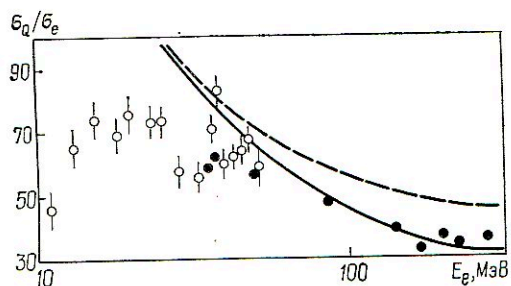


Рис. 11. Отношение выхода фотоделения ^{238}U к сечению электроделения в зависимости от энергии электрона:

● — Харьков, 1967 г. [39]; ○ — Сан-Паулу (Бразилия), 1973 г. [40]. Сплошные кривые — расчет по методу виртуальных фотонов, штриховые — с учетом размеров ядра,

ным представляется измерение сечений фотоделения за «гигантским» резонансом методом меченых фотонов.

Делимость ядер. Важной характеристикой процесса деления является делимость, определяемая как отношение сечения деления к полному сечению ядерного взаимодействия. Ввиду большой неопределенности в величине и энергетической зависимости сечений фотоделения и фотопоглощения имеется неясность в величине и характере энергетической зависимости делимости. Существует традиционный, хотя и не совсем оправданный, способ определения делимости в опытах по фотоделению при энергии 300—1000 МэВ, основанный на следующих упрощающих предположениях: 1) спектр фотонов описывается функцией $1/k$ («прямоугольное» приближение); 2) сечения фотоделения и фотопоглощения считаются не зависящими от энергий, причем второе сечение полагается равным 0,3 мб/нуклон, как это следует из опытов по изучению взаимодействия фотонов с ядрами фотоэмульсии. Делимость в предположении 2 также не зависит от энергии фотонов.

Большой интерес представляет зависимость делимости от параметра деления Z^2/A . Он вызван работой Никса и Сасси [22], в которой предсказан минимум зависимости делимости Z^2/A в районе ядра серебра, и экспериментальным обнаружением аномалии этой зависимости для ядер редкоземельных элементов [23, 24]. Полученные к настоящему времени экспериментальные данные частично представлены на рис. 7. Из рисунка видно, что делимости, полученные в опытах с фотонами и протонами, при $Z^2/A > 25$ примерно одинаковы, а при $Z^2/A < 25$ существенно различаются. Делимости, полученные в опытах с фотонами, качественно воспроизводят результаты теоретических расчетов: при $Z^2/A \approx 25$ наблюдается минимум делимости. Для протонов (кружочки) и α -частиц (крестики) делимость убывает и не увеличивается с уменьшением параметра Z^2/A .

Обратимся теперь к области ядер редкоземельных элементов ($Z^2/A = 25 \div 28$). В работах [23, 24] обнаружена

нерегулярность в зависимости Z^2/A , заключающаяся в большом значении сечений деления ядер тяжелых редкоземельных элементов по сравнению с предсказаниями жидкокапельной модели и полуэмпирической зависимостью, предложенной Н. А. Перфиловым [29].

Теоретические расчеты делимости, выполненные на основе каскадно-испарительной и жидкокапельной моделей [22, 28], качественно согласуются с экспериментальными данными, за исключением области редкоземельных элементов. В исследовании зависимости Z^2/A можно выделить две нерешенные экспериментальные проблемы: 1) существование особенности в районе тяжелых редкоземельных элементов (из рис. 7 видно, что в работах [26, 27] эта аномалия не обнаружена), 2) увеличение делимости с уменьшением параметра деления для ядер легче серебра. Здесь необходимы дополнительные, более тщательные исследования.

Угловые распределения осколков. В результате взаимодействия фотона с энергией примерно 1 ГэВ с ядром последнее может приобрести значительную скорость. Наличие скорости у делящегося ядра, сравнимой со скоростью осколков деления, сказывается на угловых распределениях осколков.

Если угловое распределение осколков в системе, связанной с ядром, изотропно, то в лабораторной системе оно имеет вид

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \sim 1 + 2 \frac{v}{V} \cos \theta, \quad (11)$$

где V — скорость осколка в системе, связанной с ядром; v — скорость ядра перед делением. Эксперименты показали, что для тяжелых ядер ($Z \geq 90$) в пределах 1—2% угловые распределения изотропны, для легких ядер наблюдается анизотропия, величина и характер которой объясняются наличием скорости у делящегося ядра [30, 31]. Угловое распределение осколков фотоделения ядра висмута показано на рис. 8. Видна направленность распределений вперед, по пучку, коэффициент анизотропии $a = v/V$ составляет

примерно 0,1 и слабо зависит от энергии фотонов.

При детектировании одного осколка скорость делящегося ядра определяется как усредненная величина по многим актам деления. Регистрируя оба осколка в совпадении, эту величину можно определить для каждого акта деления в отдельности. Из опытов, выполненных методом совпадений [32], следует, что угол разлета осколков меньше 180° , что свидетельствует о наличии у ядра определенной скорости перед делением, которая является важной характеристикой предшествующего делению внутриядерного каскада. Угловые распределения осколков электроделения ядер с $Z \geq 90$ при $E > 50$ МэВ также изотропны. При электроделении четно-четных ядер в районе «гигантского» резонанса наблюдается анизотропия [33], которая исчезает с увеличением энергии электронов.

Массовое и энергетическое распределение осколков деления. Энергетические и массовые распределения осколков связаны между собой законом сохранения энергии — импульса. Массовое распределение осколков деления тория, урана и более тяжелых ядер характеризуется симметричным, двугорбым распределением с ярко выраженным минимумом. С увеличением максимальной энергии фотонов от 10 МэВ до 1 ГэВ глубина минимума уменьшается и отношение максимума к минимуму изменяется от 200 до 2, что объясняется возрастанием вклада симметричной компоненты [34]. Из-за сплошного характера используемого в эксперименте тормозного спектра вопрос о соотношении симметричной и асимметричной компонент в массовых распределениях осколков фотоделения в зависимости от энергии фотонов окончательно не выяснен, хотя качественно ясно, что асимметричное распределение присуще «гигантскому» резонансу, а симметричное свойственно более высоким энергиям.

Массовое распределение осколков деления ядер легче висмута имеет симметричную, колоколообразную форму.

Фотоделение ядер с $Z \leq 83$ вблизи порога. Изучение деления ядер вблизи

порога дает сведения о величине барьера деления, плотности уровней в седловой точке и механизме взаимодействия фотонов с ядром.

При анализе экспериментальных данных о делении ядер тяжелыми частицами необходимо учитывать вносимый ими в ядро орбитальный момент, что затрудняет теоретическую интерпретацию экспериментальных данных. Это затруднение исчезает, если в качестве бомбардирующих частиц использовать фотоны, характер поглощения которых в основном дипольный, с небольшой примесью квадрупольной компоненты. При изучении фотоделения в припороговой области энергий возникают осложнения, связанные со сплошным характером тормозного спектра и большим перепадом выхода при переходе от одной максимальной энергии фотонов к другой.

Так, для ядра висмута выход в интервале $40 < E < 140$ МэВ изменяется на семь порядков (рис. 9). Сечения фотоделения существенно меньше сечений деления сильно взаимодействующими частицами. В связи с этим использование твердотельных трековых детекторов для регистрации осколков деления дало возможность продвинуться в область малых сечений и исследовать деление ядер золота [35], висмута [36], изотопов свинца [37] и вольфрама [38] в области энергии фотонов и электронов, где другие методики практически неприменимы.

В подавляющем большинстве опыты по припороговому делению выполнены непосредственно на электронах, поскольку в этом случае достигаются большие плотности событий по сравнению с фотонами. На рис. 10 в качестве примера показано сечение электроделения изотопов свинца в зависимости от энергии электрона [29]. Видны резонансы в сечении при $E = 35$ МэВ у ядер ^{206}Pb и ^{207}Pb и отсутствие такого резонанса у ^{208}Pb . Природа резонансов пока не ясна. При анализе экспериментальных данных на основе испарительной модели получены значения барьеров деления $26,0 \pm 0,5$; $26,2 \pm 0,5$; $27,6 \pm 0,5$ МэВ для ядер соответственно ^{206}Pb , ^{207}Pb и ^{208}Pb .

Электроделение. *Отношение сечений фото- и электроделения.* Выход ядерной реакции в мишени, бомбардируемой электронами, можно представить как сумму вкладов электро- и фото-ядерной реакций:

$$Y(E, t) = \sigma_e + n_Q \sigma_Q. \quad (12)$$

Здесь E — энергия электрона; σ_e — сечение электродеинтеграции; σ_Q — выход фотоядерной реакции, отнесенной к одному эквивалентному фотону; t — тормозной путь электрона, выраженный в радиационных единицах; n_Q — количество эквивалентных фотонов.

При незначительной в сравнении с радиационной единицей длине тормозного пути выполняется соотношение (в пересчете на один электрон)

$$n_Q = t. \quad (13)$$

Обычно разделение вкладов фото- и электроядерной реакции осуществляется путем измерения выхода реакции в зависимости от тормозного пути. В простейшем случае достаточно двух измерений: с радиатором γ -квант и без него. Тогда справедливо равенство

$$\sigma_Q / \sigma_e = \frac{N_2 - N_1}{t N_1} \quad (14)$$

где N_1 — выход реакции без радиатора; N_2 — выход с радиатором; толщиной мишеней для простоты пренебрегаем.

Имеющиеся экспериментальные данные об энергетической зависимости

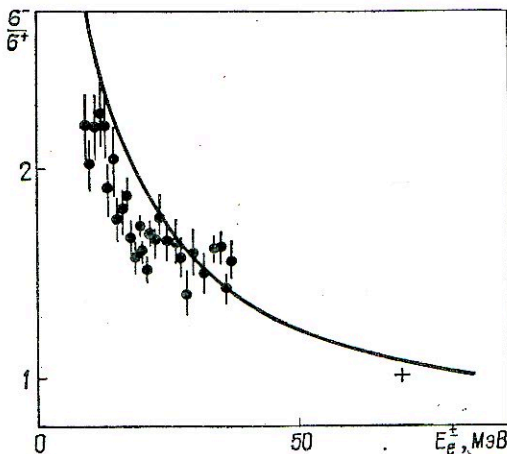


Рис. 12. Отношение сечений деления ядра ^{238}U электронами и позитронами в зависимости от энергии:

+ — Харьков, 1969 г. [41]; ● — Гессен (ФРГ), 1976 г. [42].

σ_Q/σ_e для деления урана представлены на рис. 11, из которого видно, что величина σ_Q/σ_e медленно уменьшается с уменьшением энергии и электрона от 75 при $E = 20$ МэВ до 35 при $E = 300$ МэВ. Кривые на рисунке — результат теоретического расчета.

Отношение сечений деления урана электронами и позитронами. В настоящее время экспериментальные данные об отношении сечений деления электронами и позитронами имеются только для ядра урана (рис. 12). Для энергии электрона (позитрона) 15 МэВ отношение $\sigma^-/\sigma^+ \approx 2$ и уменьшается с ростом энергии в соответствии с расчетом по методу искаженных волн. При $E > 100$ МэВ отношение близко к единице. Это означает, что влияние кулоновских эффектов на процесс взаимодействия электронов с ядром здесь незначительно.

На рис. 12 также заметна некоторая структура с периодом 8 МэВ, которую можно объяснить конкуренцией каналов деления E_1 и E_2 .

Сечение электроделения. Энергетическая зависимость сечений электроделения близка к зависимости выхода реакции фотоделения от максимальной энергии тормозного спектра. За порогом сечения быстро увеличиваются, затем выходят на «плато». Это связано с тем, что в опытах, в которых рассеянный электрон не фиксируется, спектр виртуальных фотонов близок к спектру тормозного излучения.

Сечение электроделения ядра урана в зависимости от энергии электрона показано на рис. 13. Экспериментальные данные, приведенные в различных работах, в пределах погрешностей согласуются между собой, за исключением работы Моретто и др. [18], в которой данные представляются нам несколько завышенными.

Теоретические расчеты сечений электроделения, выполненные по методу виртуальных фотонов, хорошо описывают экспериментальные данные.

Фотообразование делящихся изомеров. Одной из актуальных задач физики деления продолжает оставаться исследование свойств спонтанно делящихся изомеров. Необходимая здесь широта

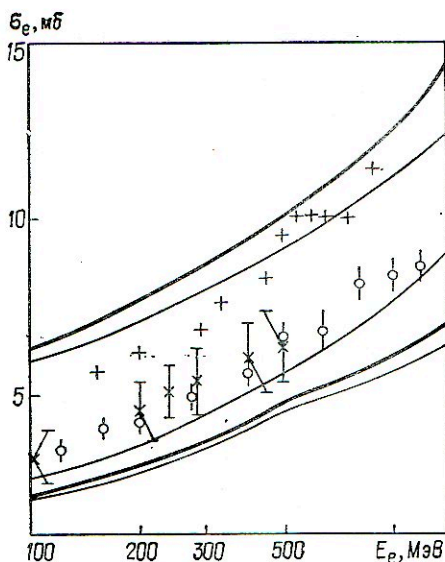


Рис. 13. Сечение электроделения ядра ^{238}U : + — Стенфорд (США), 1969 г. [18]; O — Харьков и ИЯИ АН СССР (Москва), 1981 г. [43, 44].

исследований может быть достигнута применением разнообразных методов образования изомеров. Использование для этой цели электронов и фотонов представляет ряд несомненных преимуществ. Поглощение γ -кванта не сопровождается преодолением кулоновского барьера, поэтому можно получать низкие энергии возбуждения. При высоких энергиях возбуждения в ядро внесится относительно небольшой угловой момент. Однако малая величина изомерного отношения ($10^{-4} - 10^{-6}$) в сочетании с малым значением сечений взаимодействия фотонов с ядрами затрудняет эти опыты. Поэтому в настоящее время опубликована лишь одна работа по фотообразованию делящихся изомеров при энергиях, превышающих энергию «гигантского» резонанса [45] ($E = 45$ МэВ).

Реакция фотоделения использовалась для наблюдения эффекта теней в ядре висмута [46] и исследования ориентационной зависимости взаимодействия электронов с кристаллическими структурами [47].

Перспективы. В настоящее время качественно выяснены основные закономерности деления ядер фотонами и электронами промежуточных и высоких

энергий. Практически все имеющиеся экспериментальные данные можно объяснить в рамках каскадно-испарительной модели и теории виртуальных фотонов. Однако из-за сплошного характера используемого в экспериментах тормозного излучения точность экспериментальных данных невысока. Дальнейший прогресс в изучении деления будет определяться повышением точности эксперимента, что, естественно, повысит требования и к качеству теории. Наиболее эффективным средством повышения точности являются использование монохроматических и меченых по энергии фотонов, постановка корреляционных экспериментов по электроделению с регистрацией неупруго рассеянного электрона и осколка деления в совпадении.

Очень перспективным является проведение опытов по фотоделению с использованием пучка поляризованных фотонов и ориентированных мишеней. Информация, которая будет при этом получена, представит несомненный интерес как для физики деления, так и для физики электромагнитных взаимодействий тяжелых ядер.

1. *Sinelnikov C., Leipunsky A., Walter A., Latschew G.*— *Z. Phys.*, Sow. 2, Н. 3, S. 285.
2. *Forkman B., Schreder B. A.*— *Phys. scr.*, 1972, 5, p. 105—115.
3. *Ранюк Ю. Н.*— В кн.: Электромагнитные взаимодействия ядер при малых и средних энергиях: Тр. III семинара. М.: Наука, 1976, с. 195—212.
4. *Dalitz R. H., Yennie D. R.*— *Phys. Rev.*, 1957, 105, N 5, p. 1598—1615.
5. *Schreder B., Andersson G., Forkman B.*— *Nucl. Phys. Report LUNP 7310*, Lund, Sweden, 1973.
6. *Varashenkov V. S., Geregi F. G., Iljinov A. S. et al.*— *Nucl. Phys. A*, 1974, 231, N 3, p. 462—476.
7. *Емец Н. Л., Ранюк Ю. Н.*— *Вопр. атом. науки и техники. Сер. Физика радиац. повреждений и радиац. материаловедения*, 1979, вып. 1, с. 31—37.
8. *Вартапетян Г. А., Демехина Н. А., Касилов В. И. и др.*— *ЯФ*, 1971, 14, вып. 1, с. 65—72.
9. *Виноградов Ю. А., Касилов В. И., Лазарева Л. Е. и др.*— *ЯФ*, 1976, 24, вып. 4, с. 686—697.
10. *Methasiri.*— *Nucl. Phys. A*, 1970, 158, p. 433—439.
11. *Wacuta Y.*— *J. Phys. Soc. Jap.*, 1971, 31, N 1, p. 12—22.

12. *De Carvalho H. G., Martins G. B., Tavares O. A. P. et al.*— *Lett. nuovo sim.*, 1975, 14, N 17, p. 615—621.
13. *Митрофанова А. В., Ранюк Ю. Н., Сорокин П. В.*— *ЯФ*, 1967, 6, вып. 4, с. 703—707.
14. *Emma V., Lo Nigro S., Milone C.*— *Lett. nuovo sim.*, 1971, 2, N 3, p. 77—120.
15. *Emma V., Lo Nigro S., Milone C.*— *Lett. nuovo sim.*, 1971, 2, N 6, p. 271—279.
16. *Bellini V., Emma V., Lo Nigro S. et al.*— *Nuovo sim. A*, 1980, 55, N 11, p. 183—196.
17. *Минарик Е. В., Новиков В. А.*— *ЖЭТФ*, 1957, 32, № 2, с. 241—246.
18. *Moretto I. G., Gatti R. C., Thompson S. G. et al.*— *Phys. Rev.*, 1969, 179, N 4, p. 1176—1187.
19. *Veysiere A., Beil H., Bergere R. et al.*— *Nucl. Phys. A*, 1973, 199, N 1, p. 45—64.
20. *Levinger J. S.*— *Phys. Lett. B*, 1979, 82, N 2, p. 181—182.
21. *Емец Н. Л., Любарский Г. Я., Ранюк Ю. Н., Сорокин П. В.* Программа «Каскад» для моделирования взаимодействия фотонов высокой энергии с атомными ядрами.— Харьков, 1972.— (Препринт/ХФТИ; № 72—37).
22. *Nix J. R., Sassi E.*— *Nucl. Phys.*, 1966, 81, N 2, p. 61—70.
23. *Апроненко Л. Н., Вайшинец Л. А., Горшков Б. Л. и др.*— Письма в *ЖЭТФ*, 1976, 24, вып. 12, с. 618.
24. *Ганн А. В., Назарова Т. С., Нога В. И. и др.*— *ЯФ*, 1979, 30, вып. 3, с. 876—878.
25. *Pate B. D., Peter J.*— *Nucl. Phys. A*, 1971, 173, p. 520—536.
26. *Methasiri T., Johansson S. A. E.*— *Nucl. Phys. A*, 1971, 167, N 1, p. 97—107.
27. *Emma V., Lo Nigro S., Milone C.*— *Nucl. Phys. A*, 1976, 257, p. 438—444.
28. *Kiely F. M., Pate B. D.*— *Z. Phys. A*, 1976, 279, p. 331—338.
29. *Perfilov N. A.*— In: *Proc. Symp. Phys. and Chem. of Fission*, Vienna, 1965, p. 283.
30. *Kroon I., Forkman B.*— *Nucl. Phys. A*, 1972, 179, N 1, p. 141—152.
31. *Касилов В. И., Митрофанова А. В., Ранюк Ю. Н., Сорокин П. В.*— *ЯФ*, 1972, 15, вып. 3, с. 406—411.
32. *Котов А. А., Семенчук Г. Г., Солякин Г. Е.* Сопоставление результатов изучения процессов деления ядер протонами и γ -квантами высоких энергий.— Ленинград, 1975.— (Препринт / ЛИЯИ; № 135).
33. *Arruda Neto J. D. T., Herdade S. B., Nascimento I. C.*— *Nucl. Phys. A*, 1980, 334, p. 297—316.
34. *Schreder B., Forkman B.*— *Phys. scr.*, 1973, 8, N 5, p. 189—190.
35. *Ранюк Ю. Н., Сорокин П. В., Санин В. М.*— *УФЖ*, 1969, 14, № 3, с. 409—417.

36. Turck D., Ziga W., Clerk H. G.— Phys. Lett. B, 1974, 49, p. 335—337.
37. Turck D., Clerk H.-G., Trager H.— Phys. Lett. B, 1976, 63, N 3, p. 283—286.
38. Kernohan A., Drake T. E., Chung A., Pai L.— Phys. Rev. C, 1977, 16, N 1, p. 239—242.
39. Рашков Ю. Н., Сорокин П. В.— ЯФ, 1967, 5, вып. 3, с. 531—534.
40. Nascimento I. C., Herdade S. B., Arruda Neto J. P. T.— In: Proc. Int. Conf. on Photonuclear reactions. Asilomar, 1973, vol. 1, p. 653-654.
41. Гришаев П. А., Ефимов В. П., Касилов В. И. и др.— УФЖ, 1969, 14, № 11, с. 1817—1819.
42. Kneissl U., Kuhl G., Weller A.— Nucl. Phys. A, 1976, 256, N 1, p. 11—20.
43. Кузнецов В. Л., Недорезов В. Г., Никитина Н. В. и др.— УФЖ, 1981, 26, № 1, с. 106—110.
44. Воронин А. С., Корецкая И. С., Кузнецов В. Л. и др.— ЯФ, 1981, 34, вып. 6, с. 434—439.
45. Gunter W., Huber K., Kneissl U., Krieger H.— Phys. Rev. C, 1979, 19, N 2, p. 433—439.
46. Скакун Н. А., Дикий Н. П.— ЯФ, 1972, 15, вып. 3, с. 615—630.
47. Антипенко А. П., Гришаев П. А., Касилов В. И. и др.— Письма в ЖЭТФ, 1979, 29, вып. 1, с. 86—89.

**ПУТИ РАЗВИТИЯ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ
В ХАРЬКОВСКОМ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ
ИНСТИТУТЕ**

Уже 50 лет отделяют нас от знаменательного в истории отечественной науки события — первого в СССР расщепления атомного ядра, осуществленного в ХФТИ АН УССР А. И. Лейпунским, К. Д. Синельниковым, А. К. Вальтером и Г. Д. Латышевым, — оказавшего влияние на ход развития ядерной физики в СССР и определившего пути развития института. Широкая эрудиция и научная смелость К. Д. Синельникова, ставшего впоследствии директором ХФТИ, позволили ему основать в дальнейшем ряд новых научных направлений института.

Физика плазмы — последнее детище К. Д. Синельникова в ХФТИ. В истории науки физика плазмы пока насчитывает всего около 30 лет. Однако высокие темпы ее развития за это время в условиях научно-технической революции позволили ей достичь уровня многих других областей знаний, развивающихся в более спокойных условиях.

Естественно, главным стимулом развития физики плазмы как науки является необходимость решения проблемы управляемого термоядерного синтеза (УТС), конкретной и весьма актуальной задачи энергообеспечения развивающегося народного хозяйства, огромной, как по своему значению для экономики, так и по трудностям, стоящим на пути ее решения. На сегодняшний день ситуация такова, что ученые-плазмисты разных стран уже обсуждают возможные типы управляемых термоядерных реак-

торов, их экономичность и другие особенности, так как главным итогом всей предшествующей работы был вывод о безусловной возможности создания термоядерного реактора.

Управляемый синтез, таким образом, — главнейшая задача физики плазмы, будет получен. Однако эта задача является все же частной задачей физики плазмы как науки, еще только начинающей показывать свои возможности. Плазменное состояние вещества — новый «научный континент» со своими сокровищами, загадками, неожиданностями.

Научная идеология ОФП (отделения физики плазмы) ХФТИ АН УССР сформировалась в начале X пятилетки. В ее основе лежит концепция о возможности создания реакторов управляемого термоядерного синтеза на базе замкнутой магнитной ловушки. Равновесие и устойчивость тороидального плазменного шнура в ней должны обеспечиваться ротационным преобразованием. Из двух наиболее изученных вариантов создания ротационного преобразования в замкнутых ловушках — с помощью тока, текущего по плазменному кольцу, и с помощью токов только во внешних проводниках — мы остановились на втором. Как известно, техническое решение первого варианта привело к созданию установок, получивших название токамаки, второго варианта — стеллараторов.

История разработки стеллараторов в нашем институте связана с именем

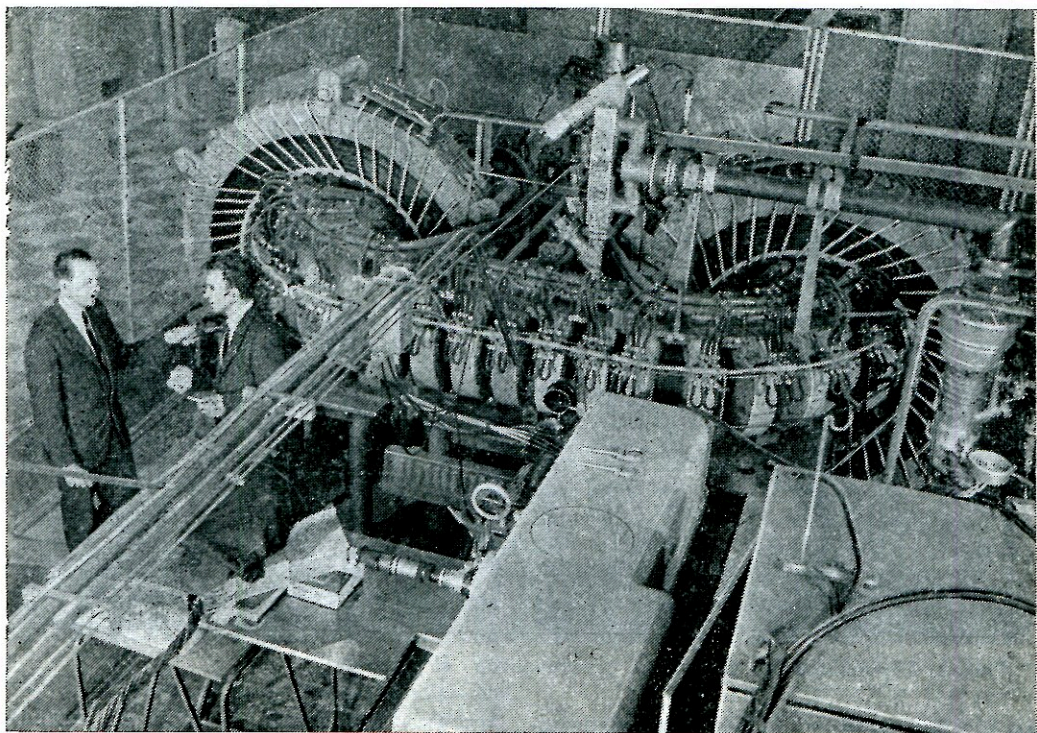


Рис. 1. Первый стелларатор ХФТИ АН УССР «Сирнус».

И. В. Курчатов. В 1960 г. он поставил эту задачу перед занимающимся физикой плазмы молодым коллективом, организованным всего за три года до этого в ХФТИ К. Д. Синельниковым.

Исследования стеллараторов как часть общей термоядерной программы СССР необходимы для решения общих задач физики удержания горячей плазмы в тороидальных установках. Следует отметить, что на сегодняшний день первоначальная задача уже решена в основном благодаря исследованиям, проводимым в ХФТИ (рис. 1). Прежде всего показана возможность настройки всей магнитной системы, обеспечивающей надежные стартовые условия и высокую воспроизводимость разрядов при работе с током, текущим по плазме, т. е. в токамачном режиме. Оказалось возможным при этом, в отличие от токамаков, снизить требования к запасу устойчивости, повысив тем самым эффективность использования магнитного поля для удержа-

ния плазмы. Замена металлической диафрагмы, ограничивающей диаметр плазменного шнура, на магнитную также дает, в принципе, возможность снизить в этом режиме количество примесей, поступающих в плазму во время разряда. В итоге показано, что удержание плазмы в стеллараторах, работающих в токамачном режиме, оказывается по крайней мере не хуже, чем в токамаках. Однако только такой вывод, безусловно, далеко не тривиальный, все же не оправдал бы постановку стеллараторных исследований (рис. 2).

Задачу программы исследований стеллараторов мы видим в том, чтобы реализовать в экспериментах их интересные особенности, трансформировать эти особенности в преимущества, способные повлиять на окончательный выбор типа замкнутой магнитной ловушки как основы управляемого термоядерного реактора.

Главная особенность стеллараторов состоит в возможности удержания плаз-

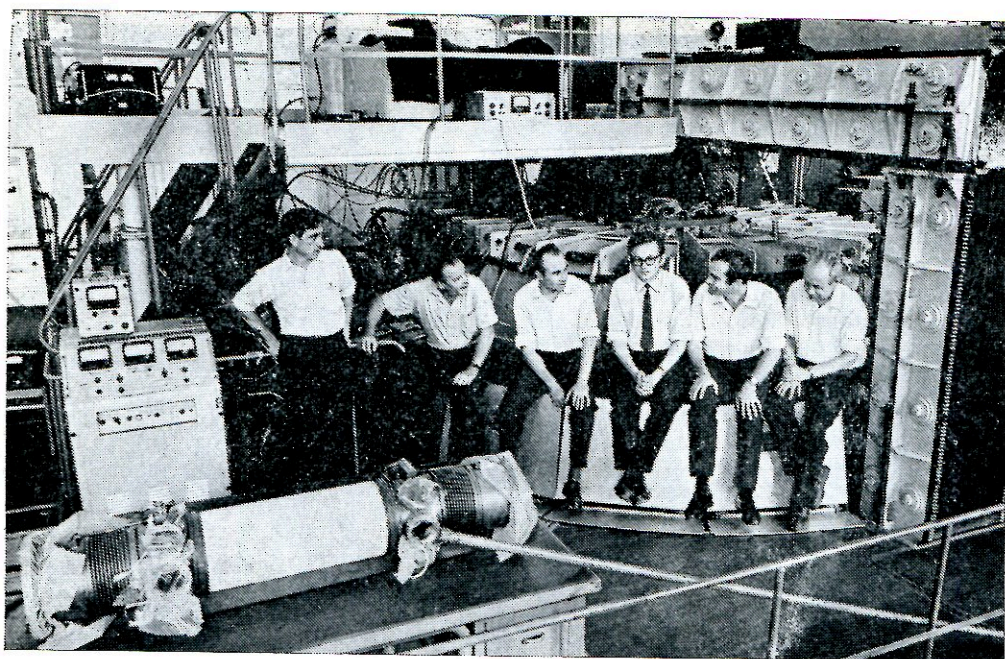


Рис. 2. Термоядерная установка стелларатор «Ураган-2».

мы «бестоковой», т. е. без возбуждаемого внешними источниками тока, текущего по замкнутому плазменному шнуру. Такой режим работы можно называть стеллараторным. Из этой особенности вытекает ряд основополагающих следствий.

Прежде всего возможность корректного изучения топографии удерживающего магнитного поля в вакууме позволила нам осуществить серьезные усовершенствования магнитной системы стеллараторов. В результате впервые создана новая модификация стелларатора — торсатрон. Достоинством его является конструктивная простота, позволившая, тем не менее, решить задачу создания эффективного полоидального дивертора (рис. 3 и 4). Вопрос о диверторе приобретает большую важность, он тесно связывается с проблемой очистки плазмы от примесей, с задачей выбора материала первой стенки будущего термоядерного реактора и рядом других технологических вопросов.

Разработка эффективной системы очистки термоядерной плазмы от примесей с помощью дивертора в замкнутых маг-

нитных ловушках — одна из главных задач ОФП ХФТИ. Наш переход к изучению торсатронов в качестве основы будущего термоядерного реактора тесно связан с необходимостью решения этой задачи.

В исследованиях, проведенных на диверторах, большое место занимают изучение взаимодействия потоков плазмы с поверхностью твердого тела, работы по выбору материала первой стенки термоядерного реактора. Это по существу новое направление должно объединять усилия специалистов как по физике плазмы, так и по физическому материаловедению. Их совместные эксперименты должны способствовать скорейшему решению задачи. В этом случае, как и во многих других, положительную роль должна сыграть комплексность нашего института, возможность привлечь к решению сложной задачи специалистов разного профиля. На пути создания управляемого термоядерного реактора важен также вопрос о режиме его работы.

Большие успехи в развитии токамаков, получение рекордных температур плазмы (до 80 млн. °С), ее плотности и

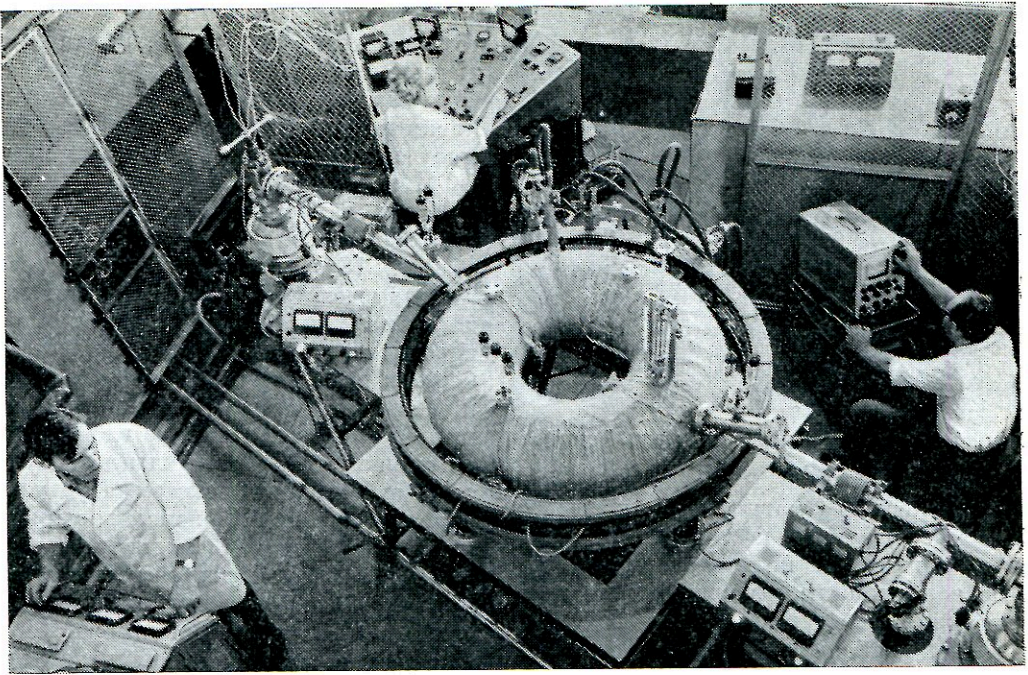


Рис. 3. Первый в мире торсатрон «Сатурн».

времени удержания открывают обнадеживающую перспективу. Однако в этом направлении просматриваются и некоторые неясности.

Совершенно очевидно, что термоядерный реактор в идеальном варианте должен быть устройством, работающим в стационарном режиме. Это определяется прежде всего серьезными трудностями, создаваемыми сильными термическими раскачками, испытываемыми материалами первой стенки реактора при его импульсной работе. Имеется и ряд других сложностей.

Токамаки же, в принципе, устройства импульсные. Необходимый для начального нагрева и удержания плазмы ток возбуждается в них методом индукции. Переход к стационарному режиму работы путем «затягивания» импульса тока в плазме, или же создания в плазменном торе постоянного тока с помощью ВЧ методов («токи увлечения») — серьезные задачи.

В то же время главная особенность стеллараторов или торсатронов, как мы уже отмечали, заключающаяся в возможности работать без возбуждаемо-

го внешними источниками тока в плазме — в этом случае — весьма важное достоинство. Торсатроны-реакторы могут и должны работать в стационарном режиме. При этом дивертор, их неотъемлемая часть, сможет обеспечивать непрерывную откачку гелия, получаемого в результате термоядерной реакции. Возникающие в тороидальной плазме токи равновесия, естественно, не могут влиять на стационарность режима работы.

Оценивая возможности торсатрона как основы реактора, следует добавить, что его конструкция кроме наличия дивертора имеет удачную особенность: выбором угла укладки винтовой обмотки торсатрона можно обеспечить относительное равновесие в ней ponderomotorных сил токов, тем самым создавая магнитные поля, значительно большие, чем в токамаках или обычных стеллараторах. Испытания такой квазибессильной конструкции магнитной системы на малой модели торсатрона подтвердили правильность наших расчетов; нам представляется вполне реальным создание торсатронов с на-

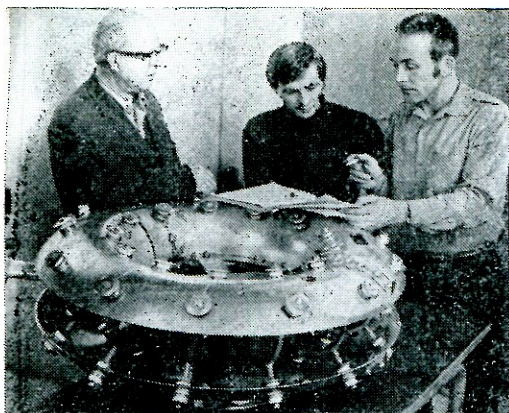


Рис. 4. Торсатрон с пространственной магнитной осью «Винт-20».

пряженностью магнитного поля до 200 кГс. Переход к таким сверхсильным магнитным полям открывает новые возможности в решении проблемы управляемых термоядерных реакций.

Весьма важное место в исследованиях, проводимых в ОФП ХФТИ, занимает установка «Ураган-3» (рис. 5). На ней изучается физика удержания плазмы в токовом и «бестоковом» режимах при эффективной очистке плазмы от посторонних примесей с помощью дивертора. Высокотемпературная плотная плазма в установке может создаваться

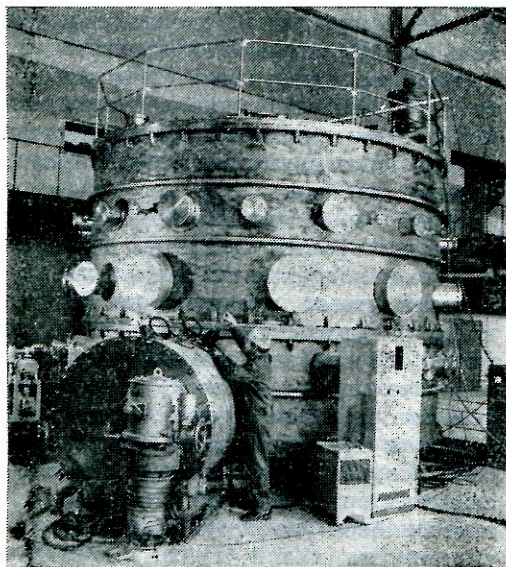


Рис. 5. Крупнейший в мире торсатрон с дивертором «Ураган-3».

высокочастотными методами, с помощью тока омического нагрева, а также инъекцией быстрых нейтральных атомов. Оригинальная конструкция этой установки позволяет реализовать все основные положения научной идеологии ОФП института.

Магнитная система установки «Ураган-3» помещена в вакуумную камеру объемом 70 м³, откачиваемую до высокого вакуума системой сорбционных и конденсационных насосов с общей производительностью $2 \cdot 10^6$ л/с. Несомненным достоинством такой конструкции является возможность замены магнитной системы, наиболее гибкой части установки, более совершенной независимо от остальных систем. Предусмотрено, например, использование в установке «Ураган-3» магнитной обмотки, охлаждаемой жидким азотом, что даст возможность создавать магнитные поля напряженностью свыше 50 кГс при соответствующем увеличении мощности источника питания.

Конструкция установки «Ураган-3» предусматривает также осуществление перехода к сверхпроводящей магнитной системе, т. е. переход к реально стационарному режиму работы. Начало этого весьма интересного этапа исследований на «Урагане-3» в будущем определится результатом работы еще одного нашего торсатрона «Кристалл-2» и состоянием криогенной базы института. «Кристалл-2», первый в мире сверхпроводящий торсатрон с дивертором, по существу — малая сверхпроводящая модель установки «Ураган-3» (рис. 6).

Решение задачи защиты плазмы от примесей с помощью диверторов требует постановки широких экспериментов. Одной из задач ХФТИ является проведение исследований по выбору дивертора для крупного токамака типа «Интор». С этой целью целесообразно осуществить в институте сооружение токамака среднего масштаба — ТБД путем реконструкции существующей установки «Ураган-2». Эта задача требует проведения широких исследований взаимодействия плазмы с различными материалами на стендовых установках.

Таким образом, «Ураган-3» — это базовая установка для развития долгосроч-

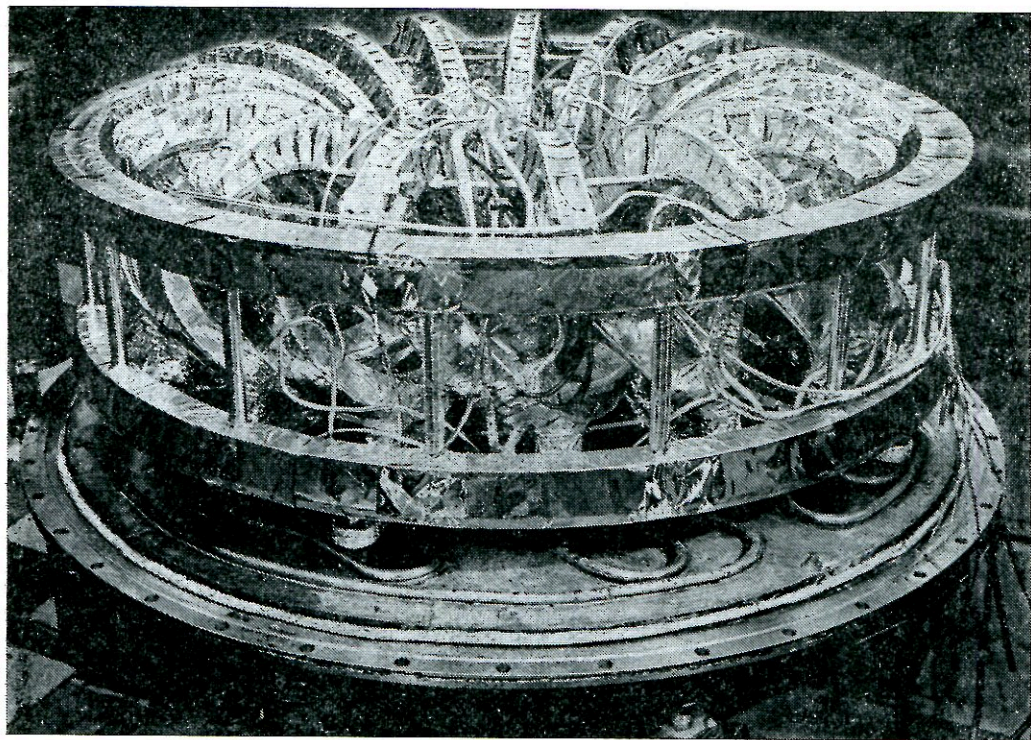


Рис. 6. Первый в мире сверхпроводящий торсатрон «Кристалл-2».

ной стеллараторной программы ХФТИ. Конструкция установки позволяет гибко вести экспериментальные работы по совершенствованию главной системы установки — магнитной — как в сторону увеличения напряженности магнитного поля (и, следовательно, повышения энергосодержания удерживаемой плазмы), так и по исполнению ее в сверхпроводящем варианте. При этом все остальные системы (вакуумная, создания и нагрева плазмы, диагностики, управления, автоматизации и др.) могут практически оставаться неизменными. Это открывает возможность совершенствовать и повышать мощность установки «Ураган-3» с малыми затратами времени и материальных средств.

Программа исследований на установке «Ураган-3» — крупнейшем в мире торсатроне с дивертором — это дальнейшее развитие общей программы тороидального удержания плазмы в ХФТИ, включающей в себя все основные этапы создания на базе торсатрона управляемого термоядерного реактора, ра-

ботающего в стационарном режиме. Проработка проекта такого реактора уже ведется ОФП совместно с НИИЭФА им. Д. В. Ефремова.

Большое место в решении проблемы УТС занимает изучение способов создания высокотемпературной и плотной плазмы. Для начала реакции необходимо нагреть дейтериево-тритиевую плазму до температуры свыше 50 млн. °С. В нашем институте традиционно исследуются высокочастотные способы создания горячей плазмы. Первые успехи были достигнуты еще в 60-х годах, когда на малых стендовых установках ионы плазмы нагревались до температуры свыше 10 млн. °С. В этих экспериментах для нагрева плазмы использовались быстрые магнитозвуковые и ионно-циклотронные волны. Осуществленный несколько позднее нагрев плотной плазмы в тороидальной ловушке «Омега» был шагом вперед. В частности, на этой установке впервые удалось нагреть плазму, состоящую из смеси ионов двух сортов (водорода и

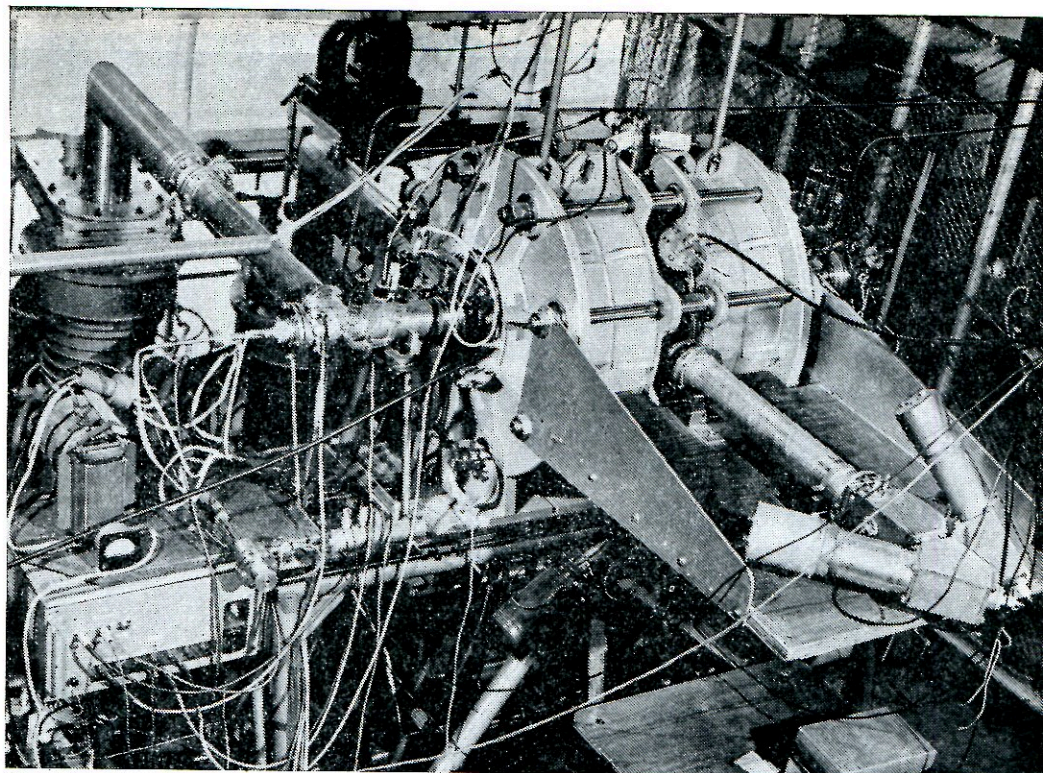


Рис. 7. Установка для электромагнитного удержания плазмы «Юпитер-1А».

дейтерия), используя ион-ионный гибридный резонанс. Нагрев плотной плазмы проходил с высокой эффективностью и в хорошем соответствии с теоретической моделью. Была показана возможность нагрева дейтериево-тритиевой плазмы, которая будет использоваться для получения энергии в первых термоядерных реакторах.

Успехи в высокочастотном нагреве плазмы позволили позднее уже на «Урагане» в 1973 г. впервые провести исследования удержания «бестоковой» плазмы высоких параметров в стеллараторах. Работы по высокочастотному нагреву плазмы в ХФТИ АН УССР продолжают развиваться. Их задача — обеспечить нагрев плотной плазмы до термоядерных температур в крупных установках следующего поколения.

Кроме ВЧ нагрева плазмы, в ОФП разрабатывается и готовится к использованию на установке «Ураган-3» и других крупных установках инжек-

ция в плазму быстрых нейтральных атомов.

В исследованиях по программе тороидального удержания плазмы активно участие принимали сотрудники ОФП А. Дикий, Е. Волков, В. Супруненко, В. Юферов, О. Павличенко, В. Войцеха, А. Георгиевский, К. Степанов, О. Швец, Н. Назаров и др. Огромную работу по сооружению новых установок провели и продолжают проводить сейчас ведущие инженеры: Ф. Тхоряк, В. Мерзликин, В. Самойлов, Ю. Сергеев, И. Павленко, А. Вильямс, Л. Китаевский и др.

Электромагнитное удержание плазмы — самостоятельная научная программа отделения физики плазмы ХФТИ. В ее основе лежит оригинальное решение задачи удержания высокотемпературной плазмы с использованием комбинации магнитных и электростатических полей, предложено О. М. Лаврентьевым. Роль электростатических полей состоит в запира-

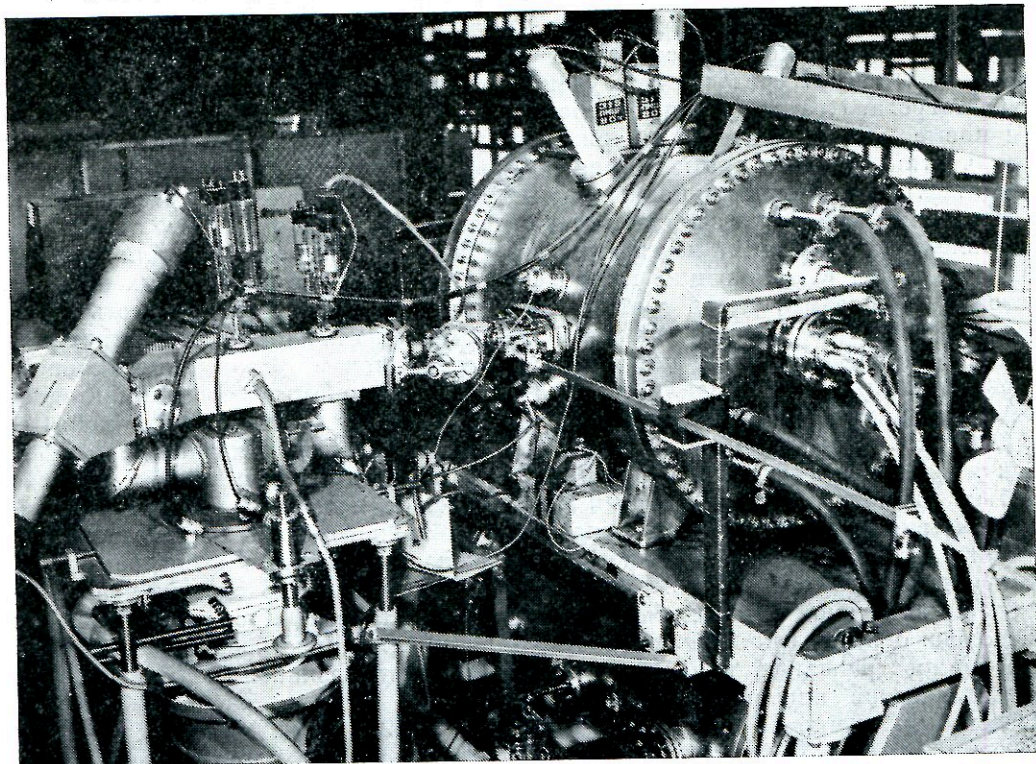


Рис. 8. Установка для электромагнитного удержания плазмы «Юпитер-1М».

электронов, инжектированных извне в ловушку со встречными магнитными полями. Для этого в местах выхода электронов — кольцевых щелях и осевых магнитных пробках — помещаются электроды под высоким отрицательным потенциалом. В этой схеме электронное облако в ловушке удерживается системой электрических и магнитных полей, а ионы плазмы удерживаются объемным электростатическим зарядом этого электрического облака. Эксперименты на электромагнитных ловушках (С-1, «Юпитер-2А», «Юпитер-1М», БК-4) (рис. 7 и 8) показали возможность накопления в них плазмы при внешней инжекции электронов через осевые пробки. Были выявлены основные закономерности удержания, давшие основания к проектированию крупной установки «Юпитер-2М».

Многощелевая конструкция новой установки позволяет удерживать в ней сравнительно большой объем плазмы. Успех этих исследований может по-

зволить создать проект управляемого термоядерного реактора, имеющего заметные преимущества перед реакторами тороидального типа.

В работах по исследованию электромагнитного удержания плазмы принимают участие О. Лаврентьев, И. Степаненко, В. Сидоркин, Ю. Азовский и др.

Плазменная электроника — новая, быстро развивающаяся ветвь физики плазмы, — была создана работами, начатыми и проведенными ХФТИ АН УССР, а затем рядом других институтов СССР (ИРЭ АН СССР, ФИАН, ИАЭ им. И. В. Курчатова, Институтом физики АН УССР, Сухумским физико-техническим институтом и др.). Работы ХФТИ в области плазменной электроники получили широкое признание, и в настоящее время институт занимает в этой области одно из ведущих мест в мире. Экспериментальные и теоретические исследования, проведенные в институте, привели к обнаружению

плазменно-пучкового разряда, предсказанию и осуществлению пучкового нагрева плазмы, открытию совместно с ИАЭ им. И. В. Курчатова турбулентного нагрева. Предложены и разработаны новые методы ускорения заряженных частиц в плазме и в нескомпенсированных электронных и ионных пучках волнами плотности заряда, методы управления потоковыми неустойчивостями и СВЧ стабилизация микроустойчивой плазмы, метод умножения частоты при отражении от движущейся плазмы. Проведены также первые экспериментальные исследования взаимодействия модулированных релятивистских пучков с плазмой и немодулированных моноэнергетических пучков с плазмой на гидродинамической стадии взаимодействия и показана его большая эффективность, что имеет важное значение для проблемы УТС. Впервые экспериментально обнаружена и исследована одна из важнейших и наиболее распространенных в лабораторной и космической плазме микроустойчивостей — пучковая неустойчивость, предсказанная в 1948 г. А. И. Ахиезером и Я. Б. Файнбергом. Развита квазилинейная теория релаксации первоначально немодулированного пучка. Все эти исследования получили в дальнейшем широкое распространение и развитие.

Основными исследованиями, проводимыми ХФТИ в последние годы, является релятивистская плазменная электроника, разработка методов ускорения сильноточных протонных и ионных пучков, исследование их коллективных взаимодействий с плазмой, ионный УТС. Я. Б. Файнбергом, В. Д. Шапиро, В. И. Шевченко выполнены первые работы по нелинейной теории взаимодействия сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП) с плазмой и показана высокая эффективность этого взаимодействия. Эти работы имели принципиальное значение для проблемы УТС.

Увеличение эффективности возбуждения регулярных СВЧ-колебаний с ростом релятивистского фактора γ впервые было показано В. И. Курилко. Ведутся работы по исследованию влия-

ния коллективных процессов на транспортировку и фокусировку РЭП в проблеме электронного термоядерного синтеза. В противовес существовавшей точке зрения была показана высокая эффективность взаимодействия моноэнергетических релятивистских пучков малой угловой расходимости с плотной плазмой. Этот вывод имеет существенное значение для использования РЭП в термоядерных исследованиях. Значительная часть работ посвящена коллективным и индукционным методам ускорения протонов и исследованию взаимодействия сильноточных ионных пучков с плазмой. Предложен индукционный плазменный ускоритель ионов и впервые построена модель такого ускорителя, применимого для ионного УТС. Выполнены первые экспериментальные исследования коллективных взаимодействий ионных пучков с плазмой. Проведены первые эксперименты и построена нелинейная теория авторезонансного метода ускорения.

В 1979 г. С. С. Моисееву и др. была присуждена Государственная премия УССР за работы по просветлению волновых барьеров.

Существенный вклад в выполнение работ по плазменной электронике в отделе, руководимом Я. Б. Файнбергом, был внесен А. Березиным, Л. Болотным, Е. Корниловым, С. Моисеевым, Ю. Ткачом, Б. Ивановым и многими другими.

На нынешнем этапе развития исследований по УТС качество и объем информации о параметрах плазмы и ее поведении, быстрота получения этой информации играют очень большую роль. Обеспечение лабораторий методиками измерений наряду с масштабом экспериментальных установок определяет уровень их работ. Быстро растет значение автоматизации измерений и управления плазменными процессами в настоящее время.

Информация о параметрах высокотемпературной плазмы получается с помощью широкого набора современных методов диагностики плазмы. Объем снимаемой информации настолько велик, что обработка его невозможна

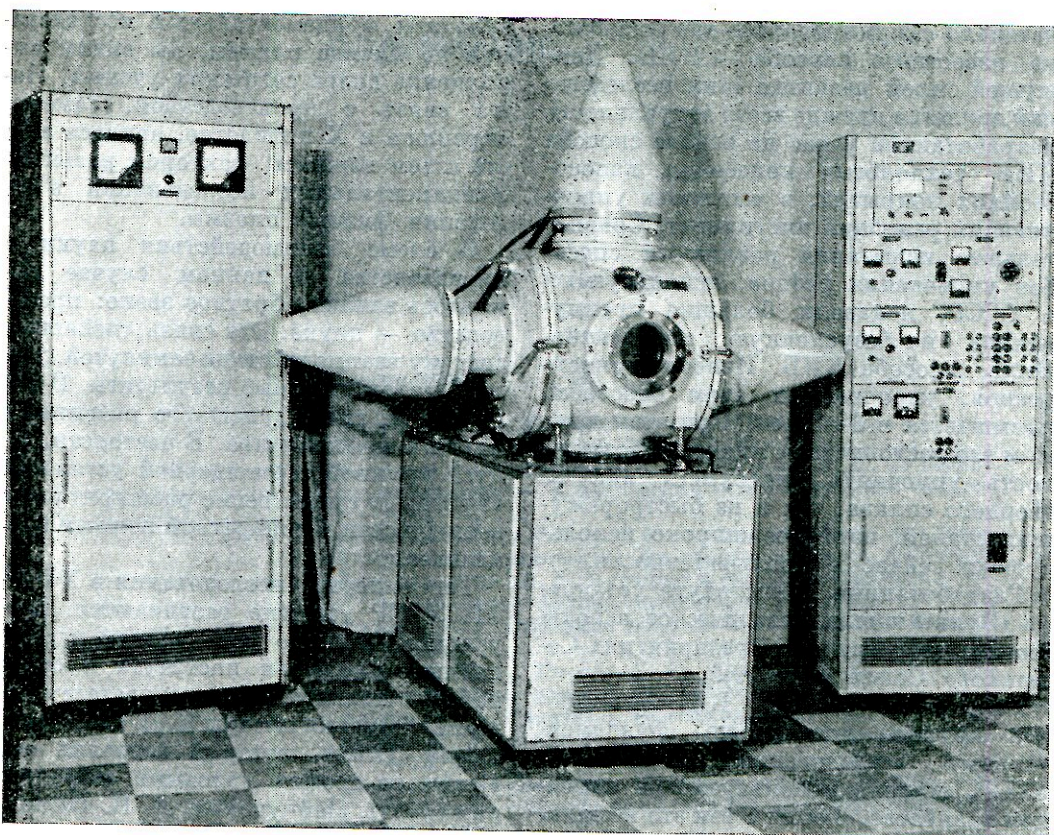


Рис. 9. Установка «Булат» для нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент и детали машин.

без привлечения электронных вычислительных машин.

Разработки методов и аппаратуры для диагностики плазмы велись в ХФТИ одновременно с развитием программы исследований по физике плазмы. Начиная с 60-х годов велись разработки аппаратуры для анализа массового состава и спектров энергии ионов в движущихся плазменных сгустках. Создана целая гамма многоканальных анализаторов энергий нейтральных атомов, используемых для измерения температуры ионов на стеллараторах ХФТИ. В 1970 г. впервые в стране с помощью созданной в институте аппаратуры проведены измерения электронной температуры и плотности методом лазерного рассеяния. С тех пор аппаратура для экспериментов по лазерному рассеянию усовершенствовалась; логическим завершением этого

процесса было создание многоканальной автоматической системы регистрации спектра лазерного рассеяния с использованием ЭВМ. Широкое применение находят выполненные в ХФТИ разработки методов и аппаратуры для микроволновой и субмиллиметровой интерферометрии плазмы, в том числе с использованием лазеров. Методы оптической спектроскопии также развиваются и дают полезную информацию. В этой большой работе принимали активное участие сотрудники ОФП института А. Калмыков, О. Павличенко, Л. Крупник, В. Терешин и др.

Плазменная технология сегодня стала весьма обширным понятием благодаря широкому практическому использованию плазмы в самых разных областях техники.

В отделении физики плазмы ХФТИ работы по плазменной технологии окон-

чательно сформировались как разработ-ка известного способа — КИБ. Дви-жущей силой развития этих исследова-ний является прежде всего актуальность разработанной у нас на основе способа КИБ технологии нанесения износо-стойких покрытий, в частности упроч-няющих режущий инструмент. Сравни-тельные испытания различных спосо-бов упрочнения резцов, используемых в СССР, показали большие преимущ-ества и безусловную перспектив-ность способа КИБ. Износостойкость резцов, упрочненных этим способом, повышается в 3—8 раз. При этом важ-ным его достоинством является возмож-ность упрочнять инструмент как из твердого сплава, так и из быстрорежу-щих сталей, наиболее широко исполь-зуемых сейчас в промышленности.

Разработанные в институте установ-ки «Булат» нашли практическое исполь-зование на различных предприятиях Со-ветского Союза (рис. 9).

Разработка способа КИБ — наибо-лее крупное достижение фундамен-тальных исследований ХФТИ АН УССР, широко используемое в народ-ном хозяйстве. Вместе с тем это не един-ственная разработка отделения физики плазмы, внедренная в производство. Начато серийное изготовление промышленностью высокопроизводительных электроразрядных насосов АВЭД, внед-ряются в производство криогенные насосы типа ГСВ и вакуумные ловушки типа ЛАФ.

В передаче промышленности новей-ших разработок, использующих ре-

зультаты фундаментальных исследова-ний по физике плазмы, мы видим вы-полнение долга советских ученых. На-ша связь с производством, заметно окрепшая в X пятилетке, явилась вме-сте с тем важным фактором развития фундаментальных исследований в от-делении физики плазмы.

В схеме взаимодействия науки и производства в данном случае поя-вилось важное обратное звено: произ-водство — наука. Эта связь, сделавшая систему взаимодействия замкнутой, уже дала положительные результаты. В ней мы видим залог успешного развития и науки и производства. В частности, за-пуск крупной термоядерной установки «Ураган-3» существенно расширит наши возможности в конкретной помощи про-мышленности.

Термоядерные исследования в ХФТИ АН УССР успешно развиваются. Без-условно, важную роль в этом играют научные традиции института и стиль работы, привитый нам основателем от-деления физики плазмы К. Д. Синельни-ковым. Стиль, который позволил ему вместе со своими молодыми сотрудни-ками А. И. Лейпунским, А. К. Вальте-ром и Г. Д. Латышевым осуществить 50 лет назад смелый эксперимент по расщеплению атомного ядра. Почетный долг ученых, инженеров и рабочих нашего поколения, учеников и после-дователей К. Д. Синельникова — с честью продолжить традиции ХФТИ АН УССР в решении новых еще более сложных и ответственных задач совре-менной науки и техники.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----|
| Предисловие | 5 |
| <i>Петросьяну А. М.</i> Ядерная энергетика | 7 |
| <i>Иваненко Д. Д.</i> Ядерная физика в 30-е годы | 18 |
| <i>Черфилов Н. А., Петржак К. А., Эйсмонт В. П.</i> От радиоактивности — к физическим основам атомной энергетики | 26 |
| <i>Цыгикало А. А., Ключарев А. П.</i> Электростатические ускорители Харьковского физико-технического института | 39 |
| <i>Гринберг А. П. И. В. Курчатов</i> и первые ускорители в Ленинградском физико-техническом институте | 45 |
| <i>Хижняк Н. А.</i> Линейные ускорители тяжелых заряженных частиц | 51 |
| <i>Вшишняков В. А., Инопин Е. В., Курилко В. И.</i> Линейные резонансные ускорители электронов | 68 |
| <i>Агизер А. И.</i> Квантовая электродинамика | 78 |
| <i>Инопин Е. В., Барц Б. И., Болотин Ю. Л.</i> Модели атомного ядра | 90 |
| <i>Соловьев В. Г.</i> Состояния средних и высоких энергий возбуждения — современный этап изучения структуры атомного ядра | 100 |
| <i>Ситенко А. Г.</i> Дифракционные явления и оптическая модель в ядерной физике | 109 |
| <i>Гольдманский В. И., Гольдберг В. З.</i> Атомные ядра на границе стабильности и их превращения | 133 |
| <i>Балдин А. М.</i> Релятивистская ядерная физика | 152 |
| <i>Рекало М. П.</i> Современные представления о структуре адронов | 168 |
| <i>Скринский А. Н.</i> Ускорительные перспективы физики элементарных частиц | 183 |
| <i>Волков Д. В.</i> О суперсимметричных калибровочных теориях поля | 200 |
| <i>Ключарев А. П.</i> Ядерные реакции с участием легчайших ядер | 209 |
| <i>Вацет П. И., Волощук В. И.</i> Фотодезинтеграция легчайших ядер | 221 |
| <i>Пасечник М. В.</i> Быстрые нейтроны | 232 |
| <i>Немец О. Ф.</i> Исследование прямых ядерных реакций в СССР | 242 |
| <i>Копанец Е. Г.</i> Атомное ядро и радиационный захват заряженных частиц | 259 |
| <i>Афанасьев Н. Г.</i> Рассеяние быстрых электронов атомными ядрами | 268 |
| <i>Сорокин П. В.</i> Экспериментальные исследования взаимодействия поляризованных фотонов с адронами | 281 |
| <i>Работнов Н. С.</i> Физика деления | 294 |
| <i>Ранюк Ю. Н.</i> Проблемы физики деления ядер фотонами и электронами промежуточных и высоких энергий | 304 |
| <i>Толок В. Т.</i> Пути развития физики плазмы в Харьковском физико-техническом институте | 316 |

ОЧЕРКИ ПО ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ В СССР

*К 50-летию расщепления
атомного ядра*

Утверждено к печати
ученым советом Харьковского
физико-технического института АН УССР

Редакторы

В. П. ЕГОРОВА, Т. Г. МИЦЕРУК

Оформление художника В. Г. САМСОНОВА

Художественный редактор И. П. АНТОНЮК

Технические редакторы

Т. С. БЕРЕЗЯК, И. А. РАТНЕР

Корректоры

Е. А. ДУБАРЬ, З. А. ЕРОХИНА

Информ. бланк № 5187

Сдано в набор 27.05.82. Подп. в печ. 08.09.82. БФ 00304.
Формат 70×160/16. Бум. тип. № 1. Обычн. нов. гарн.
Выс. печ. Усл. печ. л. 26,1. Усл. кр.-отт. 26,83. Уч.-изд.
л. 30,49. Тираж 2000 экз. Заказ 2-304. Цена 4 р.

Издательство «Наукова думка»,
252601, Киев, ГСП, Репина, 3.

Отпечатано с матриц Головного предприятия на
Книжной фабрике «Коммунист», 310012, Харьков-12,
Энгельса, 11.

УДК 621.039.5 (047)

Ядерная энергетика / Петросьянц А. М. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 7—17.

Рассмотрена история развития отечественной ядерной энергетики, которая берет свое начало с расщепления атомного ядра в 1932 г. в Харькове. Доказано преимущество ядерной энергетики по сравнению с другими видами энергии. Рассмотрено состояние атомной энергетики и перспективы ее развития в СССР.

Библиогр.: 17 назв.

УДК 539.1.01; 539.14

Ядерная физика в 30-е годы / Иваненко Д. Д. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 18—25.

Освещено состояние физики ядра в 30-е годы, история создания протонно-нейтронной модели ядра, трудности, с которыми сталкивалась рождающаяся теория ядра.

Написанная самим участником ядерных событий тех лет статья вводит в круг тех идей, которые волновали ученых, занимающихся проблемами ядра.

Библиогр.: 16 назв.

УДК 539.1.01; 53 (091); 621.039.6

От радиоактивности — к физическим основам атомной энергетики / Перфилов Н. А., Петряк К. А., Эйсмонт В. П. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 26—38.

Радиевый институт, созданный для изучения явлений радиоактивности, стоял у колыбели отечественных исследований по ядру. В очерке описано зарождение физики ядра и ее экспериментальной базы в институте в довоенные годы, современные исследования и перспективы развития по ядерной физике и особенно физике деления и ее приложениям к атомной энергетике.

Библиогр.: 24 назв.

УДК 621.384.65

Электростатические ускорители Харьковского физико-технического института / Цыпкало А. А., Ключарев А. П. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 39—44.

Описано создание высоковольтных электростатических установок разных энергий в Харьковском физико-техническом институте и использование их для исследований по физике ядра и решения прикладных задач.

Ил. 4.

УДК 621.384.644.038; 539.1.01

И. В. Курчатова и первые ускорители в Ленинградском физико-техническом институте / Гринберг А. П. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 45—50.

Изложена история создания первого циклотрона в Ленинградском физико-техническом институте под руководством и при непосредственном участии И. В. Курчатова. Научно-технические исследования и конструкторские разработки этого циклотрона легли в основу создания в СССР серийного ускорителя У-120. Первый циклотрон этой серии построен в Лаборатории № 2 (теперь Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова).

Библиогр.: 22 назв.

УДК 621.384.85

Линейные ускорители тяжелых заряженных частиц / Хлпняк Н. А. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 51—67.

Дан краткий исторический обзор становления физики и техники ускорителей в ХФТИ. Изложены основы динамики ускорения заряженных частиц в линейных резонансных структурах, нагруженных трубками дрейфа, диэлектрическими дисками. Рассмотрены вопросы дальнейшего развития линейных ускорителей, в частности ускоряющие структуры на H -волне и переменнo-фазовая фокусировка ускоряемого пучка полем ускоряющей волны.

Библиогр.: 67 назв.

УДК 621.384; 644.038; 624

Линейные резонансные ускорители электронов / Вишняков В. А., Иношин Е. В., Курилко В. И. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 68—77.

Дан краткий обзор истории развития исследований по физике и технике линейных резонансных электронных ускорителей в ХФТИ АН УССР. Освещены результаты проведенных в X пятилетке работ по модернизации основных элементов ускорительной базы ХФТИ АН УССР — линейных резонансных ускорителей электронов ЛУЭ-2 ГэВ, ЛУЭ-300 МэВ, ЛУЭ-40 МэВ и накопителя электронов Н-100, а также перспективы развития работ этого направления в XI пятилетке. Ил. 6. Табл. 2. Библиогр.: 40 назв.

УДК 530.1; 539.12; 53 (091)

Квантовая электродинамика / Ахизер А. И. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 78—89.

Квантовая электродинамика занимает особое место в современной физике как теория, справедливая в гигантском диапазоне расстояний от 10^{-15} см до 10^{10} см, и как образец теории, построенной на основе самых общих физических принципов.

В очерке изложены основные идеи квантовой электродинамики и дан обзор работ, выполненных в этой области физики в СССР. Библиогр.: 48 назв.

УДК 539.1.01; 539.14

Модели атомного ядра / Инопин Е. В., Барц Б. И., Бологин Ю. Л. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 90—99.

Обсуждается развитие идей, лежащих в основе традиционных моделей ядра — капельной, оболочечной, сверхтекучей, обобщенной, кластерной. Прослеживается эволюция представлений о ядерной структуре от первых простейших моделей к мощным современным методам теории атомного ядра.

Библиогр.: 47 назв.

УДК 539.1.01; 539.14

Состояния средних и высоких энергий возбуждения — современный этап изучения структуры атомного ядра / Соловьев В. Г. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 100—108.

Дан обзор современного состояния исследований возбужденных уровней атомных ядер в области средних и высоких энергий. Показаны пути развития теоретического описания сложных состояний ядер, проявляющихся с ростом энергий возбуждения. Рассмотрена квазичастично-фононная модель ядра и показаны ее возможности и достижения в теоретической интерпретации различных экспериментальных данных о возбужденных состояниях ядер.

Библиогр.: 48 назв.

УДК 539.12

Дифракционные явления и оптическая модель в ядерной физике / Ситенко А. Г. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 109—132.

Дан очерк развития современных представлений о дифракционном механизме ядерных взаимодействий и его различных проявлениях в ядерных процессах при достаточно высоких энергиях. На основе аналогии между оптическими и ядерными явлениями сформулированы основные положения дифракционной теории, которая широко используется в настоящее время для описания разнообразных процессов с участием сильновзаимодействующих частиц как в ядерной физике, так и в физике элементарных частиц.

Ил. 11. Библиогр.: 85 назв.

УДК 539.16.01

Атомные ядра на границах стабильности и их превращения / Гольданский В. И., Гольдберг В. З. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 133—151.

За последние 20 лет изучение свойств пограничных («экзотических») ядер стало передовой активно разрабатываемой областью ядерной физики. В очерке дан обзор свойств атомных ядер на границах стабильности и их превращений. Приведена общая харак-

теристика различных типов нестабильностей ядер: нестабильность по отношению к γ -излучению, β -распаду или K -захвату, а также нестабильность относительно испускания из ядра тяжелых частиц — протона, нейтрона, двух протонов, α -частицы и т. д. Оценены массы ядер, лежащих на границе стабильности. Большое внимание уделено протонной и дву-протонной радиоактивности, а также проблеме «экзотического» сверхтяжелого водорода ${}^7\text{H}$.

Ил. 5. Библиогр.: 44 назв.

УДК 539.171.1; 539.12

Релятивистская ядерная физика / Балдин А. М. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 152—167.

Изложены последние достижения новой области физики ядра — релятивистской ядерной физики. Прослежена связь релятивистской ядерной физики с такими фундаментальными явлениями физики высоких энергий, как масштабная инвариантность, предельная фрагментация, связь с кварк-партоновой моделью и квантовой хромодинамикой. Проанализированы условия, в которых можно изучать кварк-партоновые структурные функции ядер. Обсуждены перспективы различных теоретических подходов для описания кумулятивных ядерных процессов. Приведена краткая характеристика состояния и перспективы исследований релятивистской ядерной физики в Дубне.

Ил. 9. Табл. 1. Библиогр.: 19 назв.

УДК 539.12

Современные представления о структуре адронов / Рекало М. П. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 168—182.

Обсуждаются современные идеи о структуре адронов. Наиболее плодотворной оказывается гипотеза кварков. Возникшая вначале как попытка понять SU_3 -симметрию сильного взаимодействия, теория кварков стала в последнее время динамической теорией сильного взаимодействия. Именно квантовая хромодинамика, которая основана на представлении о точной калибровочной локальной цветовой симметрии взаимодействия цветных кварков с цветными глюонами, пытается объяснить такие явления, как образование адронных струй в e^+e^- -столкновениях, прямых фотонов и мюонных пар в адронных столкновениях. Принципиальным свойством квантовой хромодинамики является ее асимптотическая свобода, находящая подтверждение в опытах по глубоко неупругому рассеянию лептонов адронами. Единая теория слабого и электромагнитного взаимодействия лептонов и кварков имеет свойство перенормируемости. Предпринят ряд попыток объединить сильное, слабое и электромагнитное взаимодействие элементарных частиц. Все свойства электромагнитного взаимодействия адронов,

предсказываемые кварковой моделью, подтверждаются экспериментально.

Ил. 9. Табл. 1. Библиогр.: 51 назв.

УДК 621.384.60

Ускорительные перспективы физики элементарных частиц / Скринский А. Н. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 183—199.

Приведен обзор состояния и перспектив развития физики и техники ускорителей заряженных частиц, обеспечивающих возможности получения новых экспериментальных данных по основным направлениям исследований фундаментальных взаимодействий элементарных частиц.

Ил. 1. Табл. 3. Библиогр.: 49 назв.

УДК 539.12

О суперсимметричных калибровочных теориях поля / Волков Д. В. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 200—208.

Рассмотрены достижения и ограничения современных теорий калибровочных полей. Объясняются идеи использования группы суперсимметрии для устранения имеющихся ограничений. Обсуждаются перспективы построения единой теории фундаментальных взаимодействий на основе использования локальных групп суперсимметрии.

Библиогр.: 10 назв.

УДК 539.17

Ядерные реакции с участием легчайших ядер / Ключарев А. П. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 209—220.

Ядерные реакции на легчайших ядрах представляют большой научный и практический интерес. В очерке в историческом плане дано описание исследований термоядерных реакций: $T + D$, $D + D$, ${}^3\text{He} + D$, а также ${}^6\text{Li} (n, \alpha) {}^3\text{T}$, выполненных в ХФТИ в 1948—1954 гг.

Ил. 7. Табл. 2. Библиогр.: 28 назв.

УДК 539.172.3; 539.107.4

Фотодезинтеграция легчайших ядер / Вацет П. И., Волощук В. И. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 221—231.

Изложены результаты систематических исследований фотопроцессов на гелии в области энергий от порога реакций до 150 МэВ, полученные в ХФТИ.

Обсуждаются полные и парциальные сечения, угловые распределения продуктов реакций, сведения о механизмах фотопроцессов в области гигантского резонанса, роль обменных мезонных токов в промежуточной области энергий и парных динамических корреляций. Проведено сравнение экспериментальных результатов с теоретическими расчетами по модели оболочек в континуумном

приближении и модели квазичастиц с фото-ядерными правилами сумм. Исследованы тонкая структура гигантского резонанса и наличие возбужденных состояний 2^+ в гелии.

Ил. 12. Табл. 2. Библиогр.: 51 назв.

УДК 539.125.5

Быстрые нейтроны / Пасечник М. В. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 232—241.

Рассмотрены взаимодействия нейтронов средних энергий (до 10 МэВ) и быстрых нейтронов (до 300 МэВ) с атомными ядрами.

Отсутствие единой теории атомного ядра заставляет использовать модельные представления о ядре и ядерных процессах. О пригодности той или иной модели можно судить лишь на основании совокупности экспериментальных данных.

Ил. 2. Библиогр.: 24 назв.

УДК 539.1.01; 539.14

Исследование прямых ядерных реакций в СССР / Немец О. Ф. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 242—258.

Освещены выполненные в СССР теоретические и экспериментальные исследования прямых ядерных реакций. Ввиду большого объема проведенных исследований автор ограничился рассмотрением реакции только под воздействием заряженных частиц.

Библиогр.: 147 назв.

УДК 539.17

Атомное ядро и радиационный захват заряженных частиц / Копанец Е. Г. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 259—267.

Дан обзор современного состояния исследований атомного ядра с помощью резонансных реакций радиационного захвата заряженных частиц. Освещены вопросы исторического развития спектроскопических исследований в ХФТИ, приведены примеры достижений в области изучения легких ядер и свойств электромагнитного взаимодействия, а также успехи методик и техники эксперимента, рассмотрены прикладные аспекты, связанные с использованием реакций радиационного захвата.

Ил. 6. Табл. 2. Библиогр.: 19 назв.

УДК 539.172.2

Рассеяние быстрых электронов атомными ядрами / Афанасьев Н. Г. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 268—280.

Рассмотрено применение метода рассеяния электронов для исследования электромагнитной структуры атомных ядер. Особое внимание уделено изложению и обсуждению экспериментов, выполненных в ХФТИ, с использованием

электронов с начальной энергией 100—1200 МэВ. Эти эксперименты охватывает изучение упругого электрического и магнитного рассеяния электронов, электровозбуждения коллективных состояний и гигантских мультиполных резонансов в ядрах, квазиупругого рассеяния электронов на легких ядрах с регистрацией как только рассеянного электрона, так и его совпадения с выбиваемым протоном, и процесса электрообразования пионов. Проводится сравнение с данными, полученными в других исследовательских центрах.

Ил. 6. Табл. 3. Библиогр.: 33 назв.

УДК 539.12; 539.17

Экспериментальные исследования взаимодействия поляризованных фотонов с адронами / Сорокин П. В. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 281—293.

Описаны результаты исследований параметров поляризации для реакций $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$, $\gamma p \rightarrow \pi^+ n$ с использованием поляризованных фотонов и поляризованных протонов. Приведены резонансные и полюсные характеристики резонанса Δ_{33}^+ , оценка верхней границы возможного нарушения T -инвариантности.

Описаны результаты измерения поляризации протонов в реакции $\gamma d \rightarrow np$ и асимметрии сечения на линейно-поляризованных фотонах. Обсуждается соответствие этих данных гипотезе о возбуждении дибарионных резонансов.

Ил. 7. Табл. 2. Библиогр.: 47 назв.

УДК 539.17

Физика деления / Работнов Н. С. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 294—303.

Дан краткий очерк достижений отечественной физики деления за период с середины 60-х годов по настоящее время. Основное внимание уделено вопросам, связанным с концепцией двугорбого барьера деления: спонтанно-

делящимся изомерам, резонансам делимости в подбарьерной области, промежуточной структуре сечений деления.

Ил. 4. Библиогр.: 48 назв.

УДК 539.17

Проблемы физики деления ядер фотонами и электронами промежуточных и высоких энергий / Рапош Ю. Н. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 304—315.

Дан обзор теоретических и экспериментальных работ по электроделению ядер и делению фотонами за «гигантским» резонансом. Рассмотрена связь процессов фотоделения и возбуждения нуклонных резонансов, подробно проанализирована зависимость делимости ядер Z^2/A , обсуждается аномалия в делении ядер тяжелых редкоземельных элементов. Отмечено, что экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетами, выполненными по жидкокапельной модели с учетом механизма образования состава ядра.

Ил. 13. Библиогр.: 47 назв.

УДК 533.92 : 99; 621.039

Пути развития физики плазмы в Харьковском физико-техническом институте / Толлок В. Т. — В кн.: Очерки по истории развития ядерной физики в СССР : Киев : Наук. думка, 1982, с. 316—326.

Очерк посвящен обзору исследований по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, проводимых в ХФТИ АН УССР. Изложены преимущества стеллараторов, описана установка «Ураган-3» и программа исследований на этом крупнейшем в мире торсатроне с дивертором. Обсуждены проблемы нагрева плазмы, электромагнитного удержания высокотемпературной плазмы, ее очистки. Рассмотрены достижения плазменной электроники, методы ускорения протонных и ионных пучков, исследования взаимодействий пучков с плазмой, нонный УТС. Описано внедрение в народное хозяйство разработанных в ХФТИ установок по нанесению упрочняющих покрытий.

Ил. 9.

• НАУНОВА ДУМНА •

