

А.А. Бедняков

ОТКУДА ПОШЛО В НИИЯФ "МНОГОКРАТНОЕ РАССЕЙНИЕ"

(Некоторые полузабытые страницы истории, связанные с именем А.Ф.Тулинова)

Изучение многократного рассеяния легких ионов (H, He) под руководством А.Ф. Тулинова в 1959-1966 гг. было началом моей систематической исследовательской работы. И у этого начала своя предистория, также связанная с именем А.Ф.

В 1954 г., когда я поступил на работу в НИИЯФ (тогда еще НИФИ-2), в лабораторию № 12, которой заведовал И.А. Савенко (впоследствии - Учебная лаборатория студентов IV курса, а затем ЛКФИ - Лаборатория космофизических исследований), в одном из дальних тесных помещений соседней лаборатории № 2 (зав. С.С. Васильев, впоследствии ЛЯР - Лаборатория ядерных реакций) стоял и мирно пылился небольшой электростатический генератор на 200 кэВ. Он был построен за несколько лет до этого (в 1949г.) Л.Р. Войциком как ускоритель электронов /1/, но вскоре студентами-дипломниками И.Тепловым и А.Тулиновым под руководством С.С. Васильева переделан для ускорения протонов - были изготовлены и задействованы ионный источник типа Пеннинга и электромагнитный анализатор пучка с отклонением на 90° /2/.

В первые годы работы молодым специалистам лаборатории № 12 1953 года выпуска приходилось заниматься преимущественно проектно-конструкторской деятельностью, связанной со строительством 19-го корпуса на Ленгорах и оборудованием в нем помещений для "малых ускорителей" лаборатории, предназначавшихся, по замыслу, для прохождения практики студентов старших курсов Отделения строения вещества (теперь ОЯФ). На меня была возложена ответственность за будущий горизонтальный электростатический генератор ЭГ-1,5 (на 1,5 МэВ), который для нас разрабатывался в одном из "почтовых ящиков" (теперь НИИЭФА им. Ефремова, г. С-Петербург). В связи с этим руководитель лаборатории предложил мне в качестве практического ознакомления с работой электростатических генераторов продолжить "дипломное творчество" И.Теплова и А.Тулинова и возродить их детище на новом уровне (с учетом последних публикаций по технике) в одном из просторных помещений, освободившихся после переезда других лабораторий в Южное крыло нового здания физфака на Ленгорах.

Установка Войцика-Теплова-Тулинова была подвергнута существенной переделке - создан высокочастотный источник ионов, разработана система управления, сигнализации и автоматики (включая пульт), удлинена ускорительная трубка, реконструированы роторный киловольтметр и магнитный анализатор. (Большую помощь при этом оказал инженер В. Мельников и инженер-конструктор Е. Андронов, а также механик А. Тупикин). В результате на выходе из камеры анализатора получили пучок протонов с энергией несколько более 300 кэВ и током ~ 20 мкА; установку назвали ЭГ-300 (или ЭГ-0,3).

После переезда летом 1957 г. в 19-й корпус ускоритель ЭГ-0,3 подвергся дополнительной модернизации - усовершенствован ионный источник, создана система стабилизации ускоряющего напряжения с коронирующим острием /3/, спроектирована и изготовлена экспериментальная камера для изучения ядерных реакций с поворотом крышки на 360° без нарушения вакуума.

Поскольку в это время (к концу 1958 г.) было еще неясно, когда будет (и будет ли вообще) изготовлен заводом ускоритель ЭГ-1,5, встал вопрос о возможности организации учебной и научной работы на установке ЭГ-0,3, которая к тому времени давала стабильный протонный пучок с энергией от 50 до 350 кэВ и током до 10-15 мкА. Вначале на этой установке была выполнена дипломная работа И. Молчанова (под руководством И.Б. Теплова) по изучению D-D реакции при низких энергиях. Затем проведены пробные измерения вторичной электронной эмиссии от протонов с энергией 50-200 кэВ (руководил А.И. Акишин).

Но наиболее заинтересованным в ЭГ-0,3 оказался А.Ф. Тулинов, перед которым встала проблема учета многократного рассеяния ядер отдачи при изучении ядерных реакций. В те времена многократным рассеянием быстрых частиц - главным образом, электронов и мезонов - интересовались в основном исследователи космических лучей, и теоретические модели разрабатывались с учетом их нужд. Эксперименты с тяжелыми частицами (протонами, α -частицами) были единичными, а вопрос о применимости имевшихся теоретических рассмотрений к их рассеянию при энергиях сотни кэВ/нуклон и менее был неясен. А.Ф. Тулинов предложил мне с А.Н. Бояркиной провести на ЭГ-0,3 несколько измерений угловых распределений протонов с энергией $E < 100$ кэВ, рассеянных в тонкой мишени, и результаты сравнить с предсказаниями существующих теорий.

Первые результаты измерений и более подробное ознакомление с проблемой показали, что в понимании процесса многократного рассеяния ионов в этой области энергий остается еще много неясных вопросов, представляющих несомненный интерес для исследований. Этими исследованиями я и решил заняться всерьез, и А.Ф. Тулинов с согласия заведующего нашей лабораторией И.А. Савенко стал моим официальным руководителем.

И в этом, я считаю, мне повезло. Со стороны Анатолия Филипповича чувствовалось постоянное внимание и доброжелательность, регулярно проводились беседы-обсуждения состояния дел, давались оценки, делались замечания и предложения. Полученные уроки очень пригодились в моей дальнейшей работе:

- необходимость ясного представления о цели планируемого эксперимента, детального продумывания его постановки, тщательности подготовки и проведения для получения надежных результатов.

- требование всестороннего рассмотрения получаемых результатов, извлечения из них максимума информации и на этой основе определение направления дальнейших исследований.

- стремление к творческому осмыслению теоретического анализа данных эксперимента, получению представления о возможностях и путях усовершенствования существующих моделей.

Большое значение Анатолий Филиппович придавал точности формулировок и логике построения текстов, готовившихся к опубликованию.

Здесь, видимо, следует немного рассказать и о самих исследованиях многократного рассеяния ионов в тонких мишенях. Подавляющая часть экспериментов состояла в измерениях угловых распределений $F(\theta)$ ионов Н, Не, N и О, прошедших через пленки из полистирола $(C_8H_8)_m$, алюминия и меди. Изучалась зависимость $F(\theta)$ от энергии частиц E и толщины мишеней t . Кроме того, был выполнен ряд измерений удельных потерь энергии dE/dx ионов He^+ в $(C_8H_8)_m$ и Al для области $E < 300$ кэВ, которые в те времена были либо неизвестны, либо не слишком достоверны, но необходимы для анализа данных по многократному рассеянию.

Измерения с ионами H^+ и He^+ проводились в основном на ЭГ-0,3 при энергиях E от 70 до 250 кэВ и лишь небольшая часть - на запущенном к 1964 г. каскадном генераторе КГ-500 (при E 200-350 кэВ). Для этого освоили технологию получения тонких (< 1 мкм) пленок полистирола и создали вакуумную напылительную установку, на которой получили пленки Al и Си толщиной t от $\sim 0,1$ до $0,8$ мкм.

Регистрация прошедших через мишень рассеянных частиц осуществлялась специально разработанным фотографическим методом /4/, который позволял на фотопластинках типа МК и МР (НИКФИ) получать видимое изображение сечения "конуса рассеяния" плоскостью, перпендикулярной оси пучка ионов. (Этот метод несколько позже был с успехом применен для получения первой в мире протонограммы кристалла /5/).

С помощью микрофотометра измерялось распределение плотности почернения вдоль диаметра фотоизображения $N(r)$, которое переводилось в искомое распределение рассеянных частиц $F(\theta)$ с помощью модифицированного "метода двух экспозиций", известного из рентгенографии /4/.

Созданная для измерений аппаратура позволяла за один "заход" (без нарушения вакуума) получать на фотопластинке размером 9×12 см² от 12 до 24 изображений пучка, рассеянного разными мишенями (из числа 11, устанавливавшихся на поворотном устройстве на расстояниях 20-38 мм от пластинки). Падающий на мишень пучок имел диаметр около 0,15 мм и угловое расхождение $\sim 0,01^\circ$; при токе в пучке $10^{-8} + 10^{-9}$ А и пригодные для

фотометрирования изображения получались при временах экспозиции ~от 10 до 100 с (в зависимости от энергии ионов, толщины мишени и ее расстояния от фотопластинки) /4/.

Эксперименты с ионами N и O проводились на 70-и сантиметровом циклотроне с перестраиваемой частотой. (Эта уникальная установка была построена на рубеже 40- 50-х гг. в лаборатории С.С. Васильева и позволяла ускорять практически любые ионы легких элементов с различной степенью ионизации до энергий от десятков до сотен кэВ/нуклон. После переезда НИФИ-2 на Ленгоры ее передали вместе со зданием МИФИ и эксплуатировали совместно до 1997 года, когда по требованию нового владельца здания (ВИНИТИ) ее демонтировали и вывезли частично в МИФИ, частично в НИИЯФ.) Измерения выполнялись с ионами N^{+3} и O^{+3} при энергии около 330 кэВ/нуклон; мишенями служили пленки Al толщиной ~0,5 и 1,0 мкм, установленные на специальном штоковом вводе. Для регистрации рассеянных на разные углы частиц использовалась "линейка" из пропорциональных счетчиков с тонкими щелевыми подвижными окнами, являвшаяся частью аппаратуры В.С. Николаева, предназначенной для измерения зарядового состава ионного пучка после прохождения через тонкие мишени /6/. В.С. Николаев работал тогда в Лаборатории ядерных реакций

(бывшей № 2), заведующим которой был С.С. Васильев; а аппаратура эта была именно В.С. Николаева, разработанная им для определенной цели.

Во всех исследованных случаях полуширины $\theta_{1/2}$ угловых распределений рассеянных частиц $F(\theta)$ не превышали несколько градусов, и для анализа полученных данных применялась теория Мольера-Бете (М-Б) /7,8/, рассматривающая многократное рассеяние (МР) на малые углы ($\theta < 20^\circ$) частиц с кулоновским зарядом (Z_1e) на атомах (Z_2), для описания электрического поля которых использовалась функция экранирования Томаса-Ферми (ω_{TF}). Из существовавших в те годы эта теория была наиболее детально разработанной, удобной для конкретных расчетов и претендовавшей на описание рассеяния тяжелых частиц с небольшими скоростями v , когда параметр $\alpha = Z_1 Z_2 e^2 / hv > 1$ (что соответствовало условиям наших экспериментов).

Теория М-Б вполне удовлетворительно описывает результаты измерений только для протонов в Al и Si-мишенях /9/. В остальных случаях согласия с данными эксперимента удалось достичь лишь при соответствующей модернизации теории. Для случая МР протонов в $(C_8H_8)_m$ это было достигнуто путем замены функции ω_{TF} в рассмотрении М-Б функциями экранирования атомов 1H_1 (ω_H) и $^{12}C_6$ (ω_C), рассчитанными по точной формуле (ω_H) и с использованием волновых функций, найденных методом Хартри-Фока (ω_C) (и аппроксимированными, как и ω_{TF} , суммой экспонент) /10/.

При анализе экспериментальных результатов для более тяжелых ионов оказалось необходимым учесть изменение их зарядовых состояний ("перезарядку") в процессе

рассеяния. Для ионов He это было сделано путем классических расчетов потенциалов взаимодействия ионов He^+ и He^0 с атомами мишени и нахождения для них функций экранирования ω_{He^+} и ω_{He^0} с последующим усреднением соответствующих этим функциям параметров теории с весами, пропорциональными долям каждого из зарядовых состояний (He^{++} , He^+ и He^0) в рассеивающемся пучке при данной энергии /11/.

Для удовлетворительного описания МР ионов ^{14}N и ^{16}O с энергией $E \sim 330$ кэВ/нуклон в рамках теории М-Б оказалось достаточным вместо зарядов ядер ионов (Z_1) использовать их средние равновесные заряды $i_0(E)$ в пучке, проходящем через мишень /6/. (В дальнейшем на основе более обширного экспериментального материала было показано /12/, что лучшее согласие достигается при использовании некоторого эффективного заряда $i_{\text{sc}}(E)$ ($i_0 < i_{\text{sc}} < Z_1$), характеризующего в среднем взаимодействие иона с атомом мишени при отклонении на малые углы в процессе многократного рассеяния).

Эти материалы послужили основой моей кандидатской диссертации, писавшейся под неусыпным критическим взором Анатолия Филипповича и успешно защищенной в конце 1966 г. С моей стороны А.Ф. Тулинову была выражена глубокая и искренняя благодарность. И в память о том знаменательном для меня времени написана эта статья - воспоминание.

...А "запущенные" А.Ф. Тулиновым исследования многократного рассеяния ионов были продолжены.

Литература

1. Войцик Л.Р. Электростатический генератор и ускорительная трубка. Отчет о работе, НИФИ -2 МГУ, М., 1950.
2. Теплов И.Б., Тулинов А.Ф. Перестройка электростатического генератора лаборатории № 2 для изучения D-D реакции от 100 до 300 кэВ. Дипломная работа. Труды лаб. № 2, сер.С, гр.Ш, т.1, вып.1. НИФИ-2 МГУ. - М., 1951.
3. Бедняков А.А. Исследование многократного рассеяния тяжелых заряженных частиц в тонких пленках при энергиях менее 0,3 МэВ/нуклон. Кандидатская диссертация. НИИЯФ МГУ. М., 1966.
4. Бедняков А.А., Бояркина А.Н., Савенко И.А., Тулинов А.Ф. // ПТЭ, 1962, № 6, с.35.
5. Тулинов А.Ф., Ахметова Б.Г., Бедняков А.А., Пузанов А.А. // Письма ЖЭТФ, 1965. Т.2, Вып.1. С.48.
6. Бедняков А.А., Николаев В.С., Рудченко А.В., Тулинов А.Ф. // ЖЭТФ, 1966. Т.50, №3.С.589.
7. Moliere G. // Z.Naturforsch., 1948. Bd.3a. № 2. S.78.
8. Bethe H.A. Moliere's Theory of Multiple Scattering. // Phys.Rev., 1953.V.89. № 6. P.1256.
9. Бедняков А.А., Дворецкий В.Н., Савенко И.А., Тулинов А.Ф. // Вестник МГУ, физ.,астрон., 1965, № 1. С.55.
10. Бедняков А.А., Бояркина А.Н., Савенко И.А., Тулинов А.Ф. // ЖЭТФ, 1962. Т.42. №3.С.740.
11. Бедняков А.А., Тулинов А.Ф. // Вестник МГУ, физ.,астрон., 1973. №4. С.402.
12. Бедняков А.А., Николаев В.С., Собакин В.П. // Сб. "Физика ионноатомных столкновений в твердых телах". Екатеринбург. Изд.УПИ. 1996. С.40.