

Московский Государственный Университет  
имени М.В.Ломоносова  
Научно-исследовательский Институт ядерной  
физики имени Д.В.Скобельцина  
Физический Институт имени П.Н.Лебедева  
Институт ядерных исследований РАН  
Объединенный институт ядерных исследований  
Харьковский физико-технический институт

# Исследования электромагнитных взаимодействий ядер: вчера, сегодня, завтра

**Москва 2011**

УДК 539.165  
ББЛ 22.383.  
С32

**Редакционный совет:**

В.Г.Недорезов (председатель), Б.С.Ишханов, В.В.Варламов,  
А.И.Лебедев, П.И.Зарубин.

Научное издание:

**Исследования электромагнитных взаимодействия ядер:  
вчера, сегодня, завтра**

*Сборник статей*

**под общей редакцией профессоров В.Г.Недорезова,  
Б.С.Ишханова, В.В.Варламова.**

Технический редактор Е.В.Тихонова

Сборник посвящен истории развития фотоядерных исследований в СССР. Эта история связана, прежде всего, с открытием в 1944 году академиком В.И.Векслером принципа автофазировки. В Московском Государственном Университете ядерно-физические исследования начались в 1940 году, когда академик Д.В.Скобельцын основал первую в МГУ и в СССР экспериментальную кафедру по физике атомного ядра. Систематические исследования фотоядерных реакций начались в 1960 году, то есть 50 лет назад, когда из эталонной лаборатории ФИАН образовались лаборатории фотоядерных реакций (зав. лаб. - Л.Е.Лазарева) и фотомезонных процессов (академик П.А.Черенков). В начале 70-х годов академиком А.М.Балдиным, который долгие годы возглавлял Научный Совет РАН по физике электромагнитных взаимодействий, были определены долгосрочные цели исследований по релятивистской ядерной физике. В сборнике обсуждаются не только полученные за 50 лет результаты, но и перспективы развития физики электромагнитных взаимодействий ядер.



## Оглавление

<i><b>Введение</b></i> .....	<b>5</b>	
<i><b>Глава 1. Б.С.Ратнер.</b></i>		
Первый синхротрон. К истории одного открытия.....	<b>8</b>	
<i><b>Глава 2. Г.А.Сокол.</b></i>		
Вступление в эпоху ускорителей. Воспоминания о В.И.Векслере и о становлении физики электромагнитных взаимодействий в ФИАНе.....	<b>17</b>	
<i><b>Глава 3. Г.М.Гуревич, В.Г.Недорезов, Г.В.Солодухов.</b></i>		
«Питомник» - Фотоядерная лаборатория ИЯИ РАН.....	<b>47</b>	
<i><b>Глава 4. А.С.Белоусов, Б.Б.Говорков, А.И.Лебедев, С.П.Харламов.</b></i> Исследования фотомезонных процессов в ФИАНе.....		<b>72</b>
<i><b>Глава 5. П.И.Зарубин.</b></i>		
Воспоминания о будущем.....	<b>116</b>	
<i><b>Глава 6. Ю.Н.Ранюк.</b></i>		
Центр ХФТИ.....	<b>145</b>	
<i><b>Глава 7. В.В.Варламов, Б.С.Ииханов.</b></i>		
Исследования электромагнитных взаимодействий в научно- исследовательском институте ядерной физики имени Д.В.Скобельцина Московского Государственного Университета имени М.В.Ломоносова.....	<b>150</b>	
<i><b>Глава 8.</b></i>		
Языком архивных рассекреченных документов.....	<b>184</b>	
<i><b>Заключение</b></i> .....	<b>206</b>	



## Введение

Решение о подготовке настоящего сборника появилось в связи с 50-летием лаборатории фотоядерных реакций ИЯИ РАН и лаборатории фотомезонных процессов ФИАН. Они образовались одновременно в 1960 году из Эталонной лаборатории, первым руководителем которой был академик В.И.Векслер. Эта дата совпала с 40-летием Института ядерных исследований РАН, куда в 1971 году перешла лаборатория фотоядерных реакций.

При составлении сборника было решено не ограничиваться историей указанных лабораторий, а, может быть впервые, рассмотреть развитие физики электромагнитных взаимодействий ядер в более широком аспекте. Однако, авторы сборника не претендуют на полный обзор по указанной проблеме, которой исторически занимались и продолжают заниматься многие институты, включая ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ, ОИЯИ (Дубна), ИЯФ СО РАН (Новосибирск), ФИАН и др. Здесь в основном представлены воспоминания, которые так или иначе связаны с деятельностью академиков В.И.Векслера, А.М.Балдина, Д.В.Скобельцина, которые заложили основы физики электромагнитных взаимодействий ядер. Сюда относится физика гигантских резонансов, оптическая анизотропия ядер и нуклонов, адронизация фотонов при высоких энергиях, кулоновские взаимодействия релятивистских ядер. Не стоит удивляться сочетанию таких, на первый взгляд, разных направлений. На самом деле такое сочетание как раз и является характерной особенностью современного этапа. Если раньше фотоядерные процессы изучались, в основном, с точки зрения коллективных возбуждений ядер, гигантских резонансов, которые хорошо описывались однофотонными возбуждениями в рамках классической квантовой электродинамики и различных теоретических моделей, то теперь на первый план выходят процессы многофотонного обмена, характерные для интенсивных электромагнитных полей. Наиболее сильные поля, доступные в лабораторных условиях, можно получить в рассеянии релятивистских ядер. Для понимания указанных процессов будут полезны новые эксперименты по рассеянию электронов на встречных пучках релятивистских ионов, а также использование мощных импульсных тераваттных лазеров и лазеров на свободных электронах, которые способны приводить к фотоядерным реакциям.

Эти новые направления существенно расширяют сложившуюся в последние годы программу исследований электромагнитных

взаимодействий ядер. Поэтому в последние годы в рамках Совета по электромагнитным взаимодействиям (сейчас этот совет находится в стадии реорганизации) сформировалась новая программа «Исследование ядерной материи и астрофизических процессов на пучках фотонов, электронов и релятивистских тяжелых ионов», которая объединяет указанные направления в рамках единой тематики.

В настоящем сборнике кроме исторических реминисценций важное внимание уделяется краткому обсуждению перспективы исследований. Конечно, трудно говорить о перспективах развития конкретных лабораторий, потому что человеческий фактор не подлежит предвидению. Но говорить о будущем данного направления науки сейчас более чем возможно, потому что понимание программы будущих исследований на многие годы вперед на основе накопленных знаний уже сложилось. К сожалению, большая часть этих проектов реализуется не в России, а в Европе, а точнее в Германии. Россия поставляет туда мозги и деньги, причем в немалых количествах. Наши сотрудники работают в Дармштадте, Майнце, Бонне, Гамбурге - там, где есть (или строятся) современные ускорители и накопители электронов. А вот фундаментальные работы в Москве, а также и в Харькове, где раньше был крупный центр на базе линейных электронных ускорителей, практически прекратились.

Тем не менее, оптимизм в отношении перспективы электромагнитных исследований в России продолжает существовать. В настоящее время фотоядерные исследования дают основную информацию о спиновой структуре нуклонов, о природе ядерных сил в непертурбативной области, о нуклонных формфакторах и др. Кроме того, фундаментальные исследования по физике электромагнитных взаимодействий стимулируют развитие новых методов для прикладных направлений, в частности для мощных гамма-источников на основе Комптоновского излучения и др. Об этом говорят различные регулярные конференции по этой тематике, включая Черенковские чтения в ФИАНе, международные семинары EMIN в ИЯИ РАН и др.

В Заключении приводится сложившаяся к настоящему времени программа исследований по физике электромагнитных взаимодействия ядер, с участием международных коллабораций, а также перечисляются участвующие в ее выполнении научные

институты России. Разумеется, специализация даже в рамках одного направления довольно условна, потому что тематика электромагнитных взаимодействий на самом деле, особенно в области физики высоких энергий, намного шире. В этой программе подчеркнута роль ядра, как объекта исследований, что составляет отдельную самостоятельную нишу.

По истории создания первого синхротрона и о работах академика В.И.Векслера опубликовано немало статей и монографий. Но мы не приводим здесь ссылок к работам, которые легко найти с помощью ИНТЕРНЕТа. В основном, в сборник включены те публикации, которые были выполнены на уровне препринтов и мало известны даже специалистам. Основу сборника составляют новые, не публиковавшиеся ранее материалы. Они приводятся в оригинальном виде и не подвергнуты научному редактированию, хотя некоторые оценки авторов могут быть спорными.

## ГЛАВА 1.

### **Б.С.Ратнер. К истории одного открытия**

*Автор этой статьи, изданной в виде препринта Института ядерных исследований РАН (0985/98), - Борис Самуилович Ратнер, один из первых сотрудников В.И.Векслера в ФИАНе. Участвовал в сооружении и запуске электронного синхротрона ФИАН на энергию 30 МэВ. Много лет вел экспериментальные исследования на этом синхротроне.*

Событие, которое произошло 11 января 1948 года в одном из помещений старого здания Физического института имени П.Н.Лебедева на Миусской площади, не получило широкой огласки, хотя, несомненно, открывало новый этап в развитии отечественной ядерной физики. В этот день был запущен первый в СССР и третий в мире ускоритель заряженных частиц, основанный на принципе автофазировки, открытом Владимиром Иосифовичем Векслером в 1944 году.

История этого открытия, одного из крупнейших в физике XX века, представляет значительный интерес. Автор открытия - В.И.Векслер, бывший воспитанник детдома, затем электромонтер, окончил в 1931 году экстерном Московский энергетический институт, став инженером-электротехником. Несколько лет он проработал во Всесоюзном электротехническом институте, где защитил кандидатскую диссертацию. Академик С.И.Вавилов обратил внимание на молодого талантливую ученого и в 1936 году пригласил Векслера в докторантуру ФИАНа, где тот включился в исследования космических лучей, проводимые под руководством академика Д.В.Скобельцина.



*Президиум 1-й Международной конференции по ускорителям. 1963 г.*

С огромной энергией, свойственной ему, приступил Векслер к совершенно новой для него деятельности. Особое внимание уделял он усовершенствованию пропорциональных счетчиков - одного из основных приборов в руках исследователей космических лучей того времени. Изучением механизма работы газоразрядных счетчиков он занимался, еще работая в ВЭИ. Эксперименты проводились в горах, сначала на Эльбрусе, а позже на Памире. Транспортировка оборудования, его наладка и осуществление исследований потребовали необычайных усилий. Творческий и организационный талант Векслера проявился здесь в полной мере, и он становится руководителем экспедиций.

Серьезные недостатки исследований, связанные с малой интенсивностью космических лучей и неопределенностью спектра частиц, натолкнули В.И.Векслера на мысль об использовании ускорителей для изучения высокоэнергичных частиц. Но в то время получение на ускорителях релятивистских частиц, то есть частиц, обладающих скоростями, сопоставимыми со скоростью света, представлялось неразрешимой задачей. Исключение составлял бетатрон, пригодный лишь для ускорения электронов на энергию до 100 МэВ. Дальнейшему росту энергии препятствовали сильная зависимость массы ускорителя от энергии ускоренных частиц и увеличение потерь на излучение.

Несколько лет потратил Векслер на поиски решения проблемы. Дополнительным толчком вскоре послужило решение С.И.Вавилова построить в ФИАНе огромный циклотрон. Для его разработки была создана "циклотронная бригада", в которую вошли Векслер, Вернов, Грошев, Фейнберг и Черенков. В горячих спорах при обсуждении различных вариантов пришли к выводу о невероятной трудности постройки подобного ускорителя. Тем не менее, работа началась и только с началом войны была прекращена.

Во время войны ФИАНу была поручена важная оборонная тематика, но мысли о создании ускорителя нового типа, по-видимому, не покидали Векслера. В 1944 году он предлагает оригинальный ускоритель - микротрон, в котором "вредный" эффект роста массы электрона с увеличением его энергии не мешает процессу ускорения. Для этого необходимо, чтобы увеличение периода обращения электрона в магнитном поле было кратным частоте ускоряющего электрического поля. Микротрон позволил получать электроны большой энергии (в последние годы в разных странах были построены модифицированные микротроны на энергию до 1 ГэВ, на которых проводятся многочисленные физические исследования).

Анализируя работу придуманного им ускорителя, Векслер открыл совершенно новое явление, которое он назвал автофазировкой. Если период обращения частицы в магнитном поле зависит от ее энергии, а энергия частицы зависит от фазы ускоряющего электрического поля, то период обращения должен быть связан с фазой. Это и обуславливает возможность автофазировки. Оказалось, что частицы при ускорении сами автоматически будут подстраиваться к вполне определенной фазе, зависящей только от основных параметров ускорителя: амплитуды ускоряющего напряжения, скорости изменения магнитного поля и частоты обращения частиц.

Две работы, посвященные автофазировке, были опубликованы весной 1944 года в "Докладах Академии наук СССР", а в 1945 году - в советском журнале "Journal of Physics". В конце 1944 года их представили на конкурс научных работ ФИАНа. Жюри решило работу не премировать, так как "если работа В.И.Векслера правильная, то не нам давать ему премию, а

если неправильная, то тем более не давать... Но работа интересная, ее нужно поддерживать, пускай еще немного поработает...". Вот что пишет академик Е.Л.Фейнберг, входивший тогда в состав жюри: "Идея была ошеломляющей (хотя теперь она кажется кое-кому простой), и мало кто поверил в ее осуществимость. Ведь Векслер не имел никакого опыта работы с ускорителями и, соответственно, никакого авторитета в этой области".

Сделав открытие, Векслер решил подтвердить его на практике, построив ускоритель, работающий на принципе автофазировки. Это было очень смелое решение, поскольку приборы такого масштаба, технически крайне сложные, включающие большие магниты, объемы, которые надо было откачивать до высокого вакуума, мощные высокочастотные устройства, физиками ФИАНа никогда не создавались. Повидимому, и Векслер не сразу оценил трудность задачи, решив построить первый ускоритель - то, что впоследствии было названо синхротроном, - силами двух человек: Бориса Львовича Белоусова, незадолго до этого окончившего физфак МГУ, и молодого теоретика Матвея Самсоновича Рабиновича, принятого в аспирантуру теоретического отдела ФИАНа. Он, по словам его руководителя Е.Л.Фейнберга, в очень короткие сроки провел расчеты, которые подтвердили справедливость принципа автофазировки для реальных условий. Им, в основном, была создана теория кольцевых резонансных ускорителей, опубликованная в печати в 1946 году.

В июне 1946 года я пришел в маленькую группу Б.Л.Белоусова после пяти лет службы в армии. О ядерной физике имел весьма смутные представления, так как окончил электромеханический факультет МЭИ в 1941 году. Группа Белоусова состояла из инженера Э.Г.Горжевской и лаборанта Игоря Кедрова. Она располагалась в большой светлой комнате на втором этаже старого здания ФИАНа на Миусской площади. Посередине комнаты стоял на фундаменте небольшой магнит будущего ускорителя. Добиться его изготовления оказалось нелегкой задачей. Большого труда стоило с помощью С.И.Вавилова уговорить директора Трансформаторного завода создать столь непривычное для завода изделие. В комнате, у окна, стоял письменный стол Векслера, за которым он никогда не сидел.

В то время он был заместителем директора института С.И.Вавилова, читал лекции в МГУ и имел несколько аспирантов, занимавшихся исследованиями космических лучей.

*В.И.Векслер и  
Э.Макмиллан.  
Дубна, 1963 г.*



К этому времени Белоусовым была проделана большая работа: изготовлена высоковакуумная установка, спаяна с помощью стеклодувов Института физпроблем вакуумная камера, опробовано проводящее покрытие для нее и многое другое. Работоспособность Белоусова была огромной, и к делу он относился с фанатизмом. К сотрудникам, относившимся к работе спокойно, он испытывал недоверие. Тогда уже Векслеру стало ясно, что построить ускоритель малыми силами не удастся.

Сомнения в правильности идеи автофазировки исчезли после того, как в США известный физик Э.Макмиллан, не знавший об открытии Векслера, предложил в 1946 году идею синхротрона. Осенью 1946 года англичане Говард и Баренс переделали изготовленный в США бетатрон в синхротрон и впервые экспериментально подтвердили правильность принципа автофазировки. В том же году в компании "Дженерал Электрик" был создан синхротрон на 70 МэВ. Примерно в это же время в СССР создание синхротрона было включено в общий план проблемы изготовления собственной атомной бомбы. Благодаря



такому решению отпадали трудности в преодолении многих проблем на пути создания ускорителя - кадровых, финансовых, приобретения оборудования и т.д.

Одновременно на плечи Векслера ложилась огромная ответственность. Работа включалась в тематику Первого главного управления, которое возглавлял Берия, и приобретала статус высшей секретности. На Векслера постоянно оказывалось давление с целью ускорить ход работы. Бесмысленность такого давления была очевидна для всех, кто знал Векслера, - подгонять его не было никакой надобности. Новый статус дал возможность запросить в Академии наук в августе 1946 года 40 штатных единиц (всего в ФИАНе числилось 270 человек персонала). На 1 января 1947 года в эталонной лаборатории (так называли группу Векслера) числилось 19 сотрудников.

Летом 1946 года с приходом новых сил работа пошла еще быстрее. Было решено предварительно ускорять электроны в бетатронном режиме до 3 МэВ. Впоследствии оказалось, что осуществление этой стадии ускорения электронов потребовало наибольших усилий. Самостоятельно изготовили сердечник магнита, необходимый для вихревого ускорения. Он был собран из нескольких сотен проволок пермаллоя. Были начаты измерения асимметрии магнитного поля в зазоре магнита. Подбиралась форма спадания магнитного поля вдоль радиуса. Поняли, не без труда, значение фазовой асимметрии магнитного поля (здесь большую роль сыграл теоретик Э.Л.Бурштейн). Был найден прецизионный способ ее измерения (в журнале *Review of Scientific Instruments* этот способ был опубликован только год спустя, естественно, не нами).

Поздней осенью 1946 года приступили к запуску ускорителя. Незадолго до этого произошло событие, взволновавшее лабораторию. На имя вице-президента Академии наук академика Бардина, курировавшего работу Уральского филиала АН, пришла телеграмма из Свердловска от группы, собирающей бетатрон: "Видим пучок". На Векслера немедленно посыпались упреки в том, что у него мальчишки занимаются столь сложной работой, и лаборатория была срочно укреплена двумя маститыми заместителями заведующего - А.П.Комаром, руководившим свердловской группой, и П.А.Черенковым. Надо

сказать, что Борис Белоусов очень ревниво относился к своему детищу и старался не подпускать к нему новое начальство. Вскоре выяснилось, что в Свердловске за пучок был ошибочно принят газ, светившийся в плохо откачанной камере. Кстати, пучок там был получен только в 1951 году. Это подтвердили специально приезжавшие в Свердловск А.П.Комар и я.

Попытки запуска бетатронной ступени ускорителя, продолжавшиеся около двух месяцев, успеха не имели. Электроны совершали в камере один оборот, но гамма-лучей, верного признака работы ускорителя, зарегистрировать не удавалось. Много усилий было потрачено на поиски пучка. Основная трудность заключалась в том, что существовал ряд факторов, способных препятствовать ускорению. Нужно было найти основной, решающий. Между тем, не было полной уверенности ни в том, что получен достаточно хороший вакуум (в то время вакуумметры с трудом измеряли минус пятую степень рт.ст.), ни в нужном сопротивлении проводящего слоя камеры, ни в достаточном объеме рабочей области и т.д.

Для лаборатории настали тяжелые дни. Векслер пробовал консультироваться у различных специалистов. Помню, как в лабораторию приезжал крупнейший авторитет в области электрических машин Д.В.Ефремов, как привозили немецкого физики Макса Штеенбека, разбиравшегося в работе бетатрона. Все было напрасно. Между тем, высокое начальство требовало от Векслера скорейшего запуска синхротрона. В лаборатории побывали зампред Совнаркома Первухин, заместитель Берии Ванников, нарком электропромышленности Кабанов, его заместитель Алексенко и многие другие. Позже Векслер рассказывал мне о таком эпизоде. На совещании у Берии, куда он был вызван для объяснений, один из генералов, желая угодить начальству, заявил, что Векслер читает лекции студентам вместо того, чтобы усиленно работать. На что получил неожиданный ответ матом: "Что же, ... я тебя поставлю лекции читать?". Здесь надо сказать, что Векслер никогда не переносил на своих сотрудников давление, оказываемое на него. Он был всегда спокоен и дружелюбен.

Спустя некоторое время он принимает кардинальное и весьма смелое решение - прекратить попытки запуска синхротрона

и немедленно приступить к постройке нового ускорителя со значительно большей рабочей областью и лучшими характеристиками. Такое решение было связано с откладыванием запуска синхротрона почти на год и содержало значительный элемент риска.

На трансформаторном заводе, где теперь было создано специальное конструкторское бюро по ускорителям, был заказан новый магнит со специальными обмотками для компенсации асимметрии магнитного поля и сердечником, позволяющим осуществлять начальное ускорение в бетатронном режиме. На стекольном заводе были изготовлены части ускорительной камеры эллиптического сечения, которые спаивали стеклодувы ФИАНа братья Воронковы. В лаборатории сконструировали новую улучшенную вакуумную установку. Был смонтирован новый агрегат электропитания магнита, рассчитанный на частоту в 150 Герц. В короткий срок было построено специальное здание для лаборатории с залом для ускорителя, машинным залом, помещением для конденсаторной батареи и несколькими лабораторными комнатами.

Осенью 1947 года начался монтаж второго варианта синхротрона, а 28 декабря вечером мы собрались для его запуска. Первое же включение напряжения на инжектор, которое произвел Борис Белоусов, сидевший около ускорителя (забыли поставить защитную стену между магнитом и пультом), оказалось успешным. Защелкали механические счетчики, регистрировавшие импульсы от расположенных в разных местах счетчиках Гейгера, на экране осциллографа возник импульс от излучения с энергией около 3 МэВ. Пучок сразу выключили и бросились качать Владимира Иосифовича. Через две недели, после небольших переделок в высокочастотном генераторе, был получен пучок электронов, ускоренных в синхротронном режиме до энергии 30 МэВ. Таким образом, сложнейшая задача создания первого отечественного синхротрона была решена под руководством Векслера сравнительно небольшим коллективом менее чем за два года. Удивительно короткий срок, особенно, если учесть полное отсутствие опыта создания подобных ускорителей в нашей стране. Интересно отметить, что Макмиллан, через год после Векслера

открывший принцип автофазировки, запустил свой ускоритель тоже на год позже него.

Основной причиной столь выдающегося успеха коллектива явилось умение Векслера руководить людьми. Он предоставлял им максимум инициативы и, одновременно, постоянно следил за их работой, помогая им в нужный момент ценным советом или критическим замечанием. Векслера отличали большая доброжелательность и огромная увлеченность, которая передавалась практически всем работавшим с ним. К сожалению, трагически сложилась судьба Б.Л.Белоусова. Во время борьбы с так называемым "космополитизмом" в 1948 году его отстранили от работы в ФИАНе. В течение года он не мог устроиться на работу. Наконец, А.Алиханян взял его в группу, работавшую на горе Алагез. Здесь он вскоре погиб, заблудившись во время прогулки в горах.

Работы по созданию кольцевых электронных ускорителей велись в те годы и в других лабораториях. Кроме упомянутой выше свердловской группы, ими занялись в Томском политехническом институте. В 1950 году состоялась встреча с его сотрудниками, на которой мы поделились с ними опытом.

Синхротрон на 30 МэВ многие годы служил источником гамма-лучей при изучении фотоядерных реакций, а В.И.Векслер продолжал создавать новые ускорителя на большие энергии и работать над новыми принципами ускорения частиц.

## ГЛАВА 2.

*Г.А.Сокол.*

### **Вступление в эпоху ускорителей. Воспоминания о В.И.Векслере и о становлении физики электромагнитных взаимодействий в ФИАНе.**

*Автор этой статьи,- ведущий научный сотрудник лаборатории фотомезонных процессов ФИАН.*

#### **1. Введение**

В программе Сессии оказался отсутствующим доклад о деятельности В.И. в период 1949-57 годов на "Питомнике", в созданной им Эталонной лаборатории, когда В.И. еще не переехал на работу в Дубну и весь был сосредоточен на физических исследованиях на только что запущенном синхротроне с энергией 280 МэВ (С-25). Таким образом, часть жизни В.И., весьма существенная для развития физики электромагнитных взаимодействий и фотомезонной физики в России, освящена не была. И это явилось существенным упущением на фоне рассказа Б.Н. Долбилкина о работе на 30-МэВ ускорителе по фотоядерным реакциям и, тем более, двух последующих докладов о физических исследованиях, проводившихся под руководством В.И. на синхрофазотроне в Дубне. Правда, объем работ и временной интервал пребывания В.И. в Дубне (~12 лет) более значителен, чем его время пребывания на "Питомнике" (так называлось то место, где располагался ускоритель С-25), но эти годы (1949-1957) (~ 8 лет) были чрезвычайно важными для становления физики электромагнитных взаимодействий и фотомезонной физики в ФИАНе и вообще в нашей стране. Тем более, что это было время бурного развития ядерной физики в послевоенное время и эти работы (ускорители и физические исследования на них) были включены в "атомный проект" (создание атомной бомбы) и они были в плане работ по Министерству среднего машиностроения, очень хорошо финансировались и были обеспечены людьми.

Отмеченное выше событие (100-летие со дня рождения В.И. ) и практически отсутствие на Сессии сообщения о деятельности В.И. в области фотомезонной и фотоядерной физики на

синхротроне С-25 в ФИАНе и явилось основным поводом для написания этих заметок. Я не ставил перед собой задачу написания обзора всех исследований, которые были осуществлены на С-25 под руководством В.И.Векслера. Я пишу, в основном, о тех работах, в которых я принимал непосредственное участие или близко соприкасался с такими исследованиями. Мне представлялось необходимым отметить, что исследования на С-25 в период 1949- 1957 годов явились началом развития физики электромагнитных процессов и мезон-ядерной физики в нашей стране и в этом непосредственная заслуга В.И.Векслера.

## **2.Создание Эталонной лаборатории**

Синхротрон С-25 на энергию 280 МэВ начал работать в 1949 году. К этому времени была уже создана Эталонная лаборатория во главе с В.И.. В ней уже работали П.А. Черенков, Е.И. Тамм, И.В. Чувило, А.Н. Горбунов, В.Г. Ларионова, Ю.С.Иванов, В.Е.Писарев, Э.Г.Горжевская и другие. Я упоминаю только физиков-экспериментаторов, были еще физики-теоретики во главе с М.А.Марковым и среди них А.М.Балдин и В.В.Михайлов . который трагически погиб в горах в 1949 году. Основной состав физиков Эталонной лаборатории был набран в 1950-1953 годы. Это были выпускники первых послевоенных наборов физфака МГУ, а также МИФИ и Физ.Теха.

Как я уже говорил выше, послевоенные выпускники МГУ ,Физ.Теха и МИФИ частично были направлены в ФИАН, в Эталонную лабораторию именно потому, что работы по ускорителям и по ядерной физике в то время были в ведении Министерства среднего машиностроения и во многие научные центры, занимающиеся ядерной тематикой (Саров, Челябинск, Томск) были направлены крупные коллективы выпускников МГУ, Физ. Теха и МИФИ, в том числе и в Эталонную лабораторию ФИАН. С нашего курса физфака МГУ (ядерное отделение) (1945-1950 гг) и затем с последующих 2-х выпусков, в Эталонную лабораторию попали В. Лихачев, М. Адамович, Б. Говорков, А. Белоусов, Е. Минарик, Р. Осокина, Е. Лейкин, В. Спиридонов, Г.Константинов Ф.Ягудина, В.Майков, А.Варфоломеев и другие. Часть выпускников физфака МГУ были приняты в другие

лаборатории ФИАН, так Б. Болотовский и В. Ритус попали в теоретический отдел ФИАН и с ними у нас было тесное научное сотрудничество.

Наша лаборатория относилась к режимным организациям и на "Питомнике" существовал так называемый 1-й Отдел. Приходя на работу, мы подходили по очереди к окошечку 1-го Отдела и получали огромный портфель, в котором находились все материалы, относящиеся к работе. В портфеле был также рабочий журнал и мы были обязаны все расчеты и получаемые результаты в эксперименте записывать в этом журнале и нигде больше. Уходя с работы, мы сдавали портфель в 1-й Отдел. Никаких записей в других тетрадках, не сдаваемых в 1-й Отдел, делать не полагалось. Такой режим имел ту положительную сторону, что все, чем мы занимались и все результаты сохранялись, ничто не терялось, и это было очень важно при проведении многодневных экспериментов, а особенно при подведении итогов работы, т.к. все материалы были "под рукой".

Следует сразу же сказать, что мы попали в лабораторию, где работал уже ускоритель С-25, но практически не было никакой аппаратуры для проведения физических исследований. Аппаратуру предстояло разработать и изготовить самим, практически собственными руками. Кроме нас, физиков, в лаборатории было достаточное количество радио-инженеров, в мастерских - умельцев-механиков, так что работа по созданию физической аппаратуры для проведения экспериментов сразу началась и началась активно. У нас не было никакого практического опыта по ее созданию, не было "старших" товарищей, которые смогли бы осуществить качественное руководство, но был энтузиазм и ясное понимание нужности этой работы. Настольной книгой для многих из нас послужила книга Векслера, Грошева и Исаева "Ионизационные методы регистрации излучений", хорошо написанная и вобравшая в себя практически все известные в то время разработки по ионизационным методам детектирования частиц.

Важным источником сведений о методах и конкретных постановках экспериментов являлась журнальная иностранная литература (*Phys.Rev.*, *Rev. Mod. Physics*, *Nucl.Instr.and Methods* и др.), которая еженедельно поступала к нам в лабораторию.

Литература обычно раскладывалась на круглом столе в здании лаборатории (каждый раз ~ 1520 журналов, в основном американских) и мы все утром в понедельник, толпились вокруг этого круглого стола в поисках нужного нам материала по методике или физике. Как правило, В.И. также находился там, вечером забирал часть журналов к себе в кабинет или домой, а утром во вторник возвращал стопку журналов на круглый стол. В журналах уже были его пометки статей, которые должны быть прочитаны и доложены на семинаре. Такие сообщения по литературе приходилось делать каждому из нас на еженедельном семинаре перед основным сообщением по поводу постановки эксперимента или по состоянию эксперимента и первым результатам. В работу семинара были вовлечены все физики без исключения и эта работа являлась для нас хорошей школой. Эксперименты обсуждались, продумывались и результаты появлялись достаточно быстро.

Было еще одно действие со стороны В.И., которое являлось, по-видимому, основным стимулом и активизацией нашей работы - это ежедневный утренний обход сотрудников лаборатории и выяснение состояния дел, планов и проблем, связанных с проведением работы. Тут же, на месте принимались решения по тем вопросам, которые тормозили работу, будь то заказ в мастерскую, или заказ в отдел снабжения, или привлечение нужных специалистов для осуществления конкретной работы.

В лаборатории было всего 5 групп (группа М.И.Адамовича, группа А.Н. Горбунова, группа А.С.Белюсова и Е.И.Тамма, группа Н.Б.Делоне, группа В.В.Павловской) и ряд сотрудников, которые имели индивидуальные планы (И.В. Чувило, И. Усова и др.). Этот утренний обход занимал может быть 1-1,5 часа, но был самым действенным средством для активизации работы и всем было ясно, что то, о чем говорилось сегодня, завтра будет иметь спрос. Обычно так и бывало. На следующее утро В.И. заходил в комнату и первый вопрос был о том, что сделано из того, о чем говорилось накануне. Удивительно было то, что В.И. никогда не забывал о чем был разговор накануне, часто выдавал свои рекомендации и решения по тем вопросам, которые обсуждались "вчера" и не нашли решения и настойчиво требовал их осуществления. Это



стимулировало и дисциплинировало абсолютно всех и было самым действенным в нашей жизни.

Я хотел бы рассказать об одном из решений В.И. по поводу режима работы ускорителя, но вначале следует немного рассказать о самом ускорителе.

### **3. Синхротрон С-25.**

Ускоритель С-25 был размещен в цокольном (подвальном) помещении 2-х этажного здания на юго-западе Москвы, вернее на пустыре за Калужской заставой. В те годы (50-ые) началась застраиваться Большая Калужская улица от Калужской площади до Калужской заставы. Теперь это Ленинский проспект. Примерно в 2-х км от Калужской заставы протекала речка Чура и вот на берегу этого оврага, по которому текла р. Чура, был вырыт котлован, дно которого забетонировали, и на этом фундаменте был смонтирован магнит ускорителя и все необходимые коммуникации. Ускоритель был ориентирован так, что получаемый  $\gamma$ -пучок тормозного излучения из ускорителя попадал в противоположный склон оврага.

Никаких гражданских строений, тем более жилых, возле построенного над ускорителем 2-х этажного здания не было. Рядом был пустырь и поля института растениеводства АН, где произрастали, в частности, розы и это место называли "Питомником". Так и наше здание, где размещался ускоритель, очень скоро между собой сотрудники стали называть "Питомник". Это название прижилось, стало почти официальным наименованием и существует по сей день. Сейчас там размещена лаборатория ИЯИ, в прошлом лаборатория фотоядерных реакции ФИАН, во главе с Л.Е.Лазаревой.

Со временем рядом появилось здание института биологии АН, затем была выстроена Калужская ТЭЦ, а совсем недавно вырос колоссальный дом центрального отделения Сбербанка России.

От Калужской заставы до "Питомника" нас возили обычно на небольшом институтском автобусе. Можно было, конечно, пойти до "Питомника" и пешком, но только в сухую погоду. Как правило, путь этот состоял из непрерывных луж, поскольку настоящей дороги еще не было, а та, что существовала, была

разбита и разворочена проезжавшими грузовыми автомашинами. Много галош было оставлено на этой дороге сотрудниками лаборатории. Так что все сотрудники старались приходить вовремя, чтобы ехать на автобусе.

Водителем автобуса был легендарная личность - "Константиныч". Он был небольшого роста и был весьма искусным в вождении автобуса по этой грязной, разбитой дороге. До сих пор помню его красочное высказывание : "Вылезай ! Не повязу!", которое звучало каждый раз, когда в автобус набивалось много народу. Стоило большого труда уговорить его везти всех. Решающим доводом было то, что время приближалось к началу работы, никто не "вылезал" из автобуса ,и опоздание грозило всем ненужными осложнениями . Тогда действительно был строгий контроль за временем прихода и ухода с работы и нарушение распорядка неумолимо влекло писание объяснительной записки и разговора-наставления с начальством.

Но вернемся к зданию, построенному над ускорителем. На 2-ом этаже были размещены комнаты физиков, в том числе 2 пультовые, кабинет В.И. (самое удаленное от С-25 помещение). На 1-ом этаже была пультовая ускорителя, технические комнаты и помещения для силового оборудования (генераторы, насосы, силовые электроустановки). Там же был зал для сборки камеры ускорителя, которой занимался механик-умелец Н.Г.Котельников.

Сам ускоритель размещался в начале большого экспериментального зала, вдоль по которому проходила трасса  $\gamma$ -пучка. Зал ускорителя был ориентирован поперек 2-х этажного здания над ним. Между ускорителем и той частью зала где размещалось физическое оборудование для проведения эксперимента, никакой защитной перегородки не было. Сразу после выхода  $\gamma$ -пучка из ускорителя, на расстоянии  $\sim 2$  м от ускорителя, размещалась металлическая ферма, середина которой, площадью в  $\approx (2 \times 2) \text{ м}^2$  была заполнена свинцовыми кирпичами (размером  $5 \times 10 \times 20 \text{ см}^3$ ), толщиной  $30 \div 40$  см. В середине этой "стенки" было отверстие, в которое вставлялся свинцовый коллиматор для пропускания и формирования  $\gamma$ -пучка. Как правило диаметр отверстия был от 5 до 20 мм и устанавливался в зависимости от того, какая интенсивность требовалась для

проведения конкретного эксперимента. Длина зала вдоль по  $\gamma$ -пучку была около 30 м и вдоль по пучку устанавливалась аппаратура для проведения нескольких экспериментов. Далее по  $\gamma$ -пучку была сооружена пристройка к залу, где помещалась камера Вильсона. Она уже была защищена стеной зала и в  $\gamma$ -пучок помещался еще один свинцовый коллиматор, для снижения загрузки камеры Вильсона.

После этого более-менее подробного описания структуры размещения ускорителя и физической аппаратуры на  $\gamma$ -пучке, можно вернуться к тому эпизоду, где проявилась решительность В.И. На 1-ом месте после коллимирующей защитной стенки располагалась установка, где использовалась жидко-водородная мишень. В первых экспериментах использовалась очень простая жидко-водородная мишень в виде двойного стакана из пенопласта, высотой около 1 м, во внешний объем которого заливался жидкий азот, а во внутренний объем заливался жидкий водород. Несмотря на наличие охлаждающей "рубашки" из жидкого азота, водород в мишени довольно быстро испарялся, срок действия такой мишени составлял всего несколько часов. Лишь несколько лет спустя были созданы металлические жидководородная и жидкодейтериевая мишени с вакуумной оболочкой и с охлаждающей "рубашкой" из жидкого азота, которые могли работать несколько суток без доливки водорода. Инициатором, разработчиком и изготовителем этой уже современной жидко-водородной мишени был Л.И.Словохотов. А пока приходилось работать с пенопластовой водородной мишенью. И основной недостаток был не в том, что достаточно быстро испарялся дорогостоящий жидкий водород и приходилось заново заливать жидкий водород, а в неэффективности использования этой мишени. Дело в том, что режим работы ускорителя был такой: 45 минут ускоритель работал, а затем выключался и 45 минут "остывал". Команда ускорительщиков установила такой режим, опасаясь разогрева ускорителя. Электромагниты ускорителя охлаждались проточной водой и было опасение, что из-за перегрева и закипания воды и ухудшение охлаждения, возможны неприятности в электрическо-магнитных устройствах и даже выход из строя самого ускорителя.

Когда мы стали работать с водородной мишенью, то такой режим работы ускорителя оказался очень невыгодным, т.к. происходило испарение водорода в мишени, а эксперимент на 45 минут - прекращался. Мы как-то при очередном утреннем обходе В.И. посетовали на то, что работа идет не эффективно из-за частых остановок ускорителя, тем более, что режим работы ускорителя после включения требовал еще некоторого времени для наладки. В.И. среагировал мгновенно. Он пошел в пультовую ускорителя (и мы все вместе с ним) и стал наблюдать как растет температура на электромагните ускорителя. Температура как обычно стала расти, но постепенно ее рост замедлился. Через 45 минут температура достигла  $\sim 90^{\circ}$  С и ускорительщики стали готовиться к отключению. Но В.И. предложил продолжить работу и следил за температурой, сказал, что берет всю ответственность за возможные последствия на себя. Температура продолжала расти, но значительно медленнее и ее рост практически прекратился при  $94 - 95^{\circ}$  С.

Так мы стали работать в непрерывном во времени режиме. До этого никто не брал на себя смелость осуществить такой эксперимент с ускорителем. Были и другие случаи, когда В.И. принимал быстрые решения, может быть не такие масштабные, как выше описанный случай с режимом работы ускорителя, но важные для реализации эксперимента. Обычно это касалось вопросов снабжения или прохождения заказов в мех. мастерских. Мне запомнился случай, связанный с настройкой аппаратуры. Мы работали на ускорителе, применяя методику совпадений. Регистрировались обычно минимум 2 частицы из продуктов реакции. Это было необходимо для четкого выделения событий из довольно сильного фона. Практически невозможно было устойчиво выделить только одну частицу из продуктов реакции, т.к. мешал фон. И регистрация 2-х и более продуктов реакции было необходимым правилом. Предварительно нужно было настроить аппаратуру на временные совпадения 2-х каналов регистрации. Эта процедура отнимала достаточно много времени, т.к. нужно было измерить так называемую кривую совпадений, что требовало введение временной задержки в один из каналов регистрации и осуществление измерений для достаточно большого количества позиций по временной задержке в канале. В то же

время нам был известен быстрый метод нахождения совпадений с помощью 2-х лучевого осциллографа. Но таких осциллографов наша радиопромышленность не выпускала. При очередном утреннем обходе мы сказали В.И., что нам для целей наладки совпадений необходим 2-х лучевой осциллограф. Назвали фирму "Cossor", которая выпускала такие осциллографы. Какова же была реакция В.И ? Он взял у нас бумажку с данными об осциллографе "Cossor", пригласил нас в свой кабинет, снял телефонную трубку, позвонил в отдел снабжения Министерства Среднего Машиностроения и сказал: "Говорит Векслер. Мне срочно нужен осциллограф фирмы "Cossor"" (и назвал тип и данные осциллографа). И положил телефонную трубку. Через неделю у нас был 2-х лучевой осциллограф "Cossor". И так В.И. действовал по многим вопросам организации эксперимента.

Теперь мне хотелось бы перейти к самому важному вопросу - о научной деятельности в лаборатории, о становлении физики электромагнитных взаимодействий и физики фотомезонных процессов в Эталонной лаборатории ФИАН. Кстати, довольно скоро, когда были получены первые экспериментальные результаты и после раздела Эталонной лаборатории на ряд отдельных подразделений, одна из новых лабораторий стала называться лабораторией фотомезонных процессов.

#### **4. Первые научные результаты**

Первые эксперименты на  $\gamma$ -пучке тормозного излучения синхротрона С-25 были осуществлены с помощью фотоэмульсий. Как я уже отмечал ранее, в Эталонной лаборатории в начале не существовало никаких готовых методик проведения исследований и фотоэмульсии были единственным возможным прибором. Это были специально изготовленные фотоэмульсии фирмы "Iford" с толстым чувствительным слоем ( $\sim 100$  мкм). Первые эксперименты с обнаружением  $\pi$ -мезонов проводились группой А.П.Комара с участием В.Г.Ларионовой и В.М.Лихачева. Фотоэмульсии использовались в качестве детекторов и располагались вокруг мишени, помещенной в  $\gamma$ -пучок. Уже тогда были обнаружены в фотоэмульсиях треки частиц, проходящих через фотоэмульсии.

Затем эксперимент усложнился и фотоэмульсии помещались непосредственно в  $\gamma$ -пучок. Пластинки с фотоэмульсией устанавливались так, чтобы  $\gamma$ -кванты проходили вдоль пластинки. В этом случае длина трека заряженной частицы могла быть равной длине слоя фотоэмульсии, т.е. несколько см. Стопка таких фотопластинок устанавливалась в  $\gamma$ -пучок, кратковременно облучалась и затем с помощью микроскопа просматривалась, с надеждой найти треки частиц в фотоэмульсиях.

Этот эксперимент был проведен группой М.И.Адамовича и тогда был получен первый очень обнадеживающий результат: в фотоэмульсии были обнаружены множественные треки и по измерениям плотности ионизации удалось выяснить, что это были треки протонов и  $\pi$ -мезонов. С эмульсиями, которые предварительно некоторое время выдерживались в "тяжелой"  $D_2O$ -воде, изучалась реакция  $\gamma + d \rightarrow \pi^- + 2p$ . Были получены также сведения о взаимодействии  $\gamma$ -квантов с нейтроном в реакции  $\gamma + n \rightarrow \pi^- + p$ . Это были первые искусственные  $\pi$ -мезоны, рожденные не в космических лучах, а на  $\gamma$ -пучке ускорителя. Напомню, что первые  $\pi$ -мезоны были обнаружены также с помощью фотоэмульсий, экспонированных в космических лучах, в 1947 году (С. Пауэлл и Дж. Оккиалини). На ускорителях они были образованы уже в 1950-52 гг., как у нас в ФИАНе, так и на 300-МэВ -ом ускорителе в Беркли (США) в эти же годы.

Это был первый научный результат и В.И. придавал этому очень большое значение. К этому событию были сразу же привлечены теоретики, в частности М.А.Марков и А.М. Балдин. Другой успешной методикой оказалась методика ионизационных камер, которой занимался И.В. Чувило и здесь был использован опыт работ на ускорителе С-3, (30 МэВ-ном бетатроне), где аналогичная методика использовалась Б.С. Ратнером. С помощью ионизационных камер и на С-3 и на С-25 были получены первые данные по фотоделению тяжелых ядер. в том числе урана.

Ионизационная камера была все же медленным прибором. Однако, и с ее помощью удалось выделить акты деления ядер. Ионизационная камера была сильно загружена фоновыми частицами, импульсы от которых практически сливались во времени и, таким образом, через ионизационную камеру протекал

некий постоянный ток. Когда возникал акт деления, то тяжелый осколок создавал одиночный всплеск тока, который регистрировался как одиночный сигнал. Эта картина была хорошо видна на осциллографе. Таким образом проводились измерения полных сечений фотоделения для тех элементов, которые входили в состав газовых смесей, наполняющих ионизационные камеры.

Фотоэмульсии и ионизационная камера помещались непосредственно в  $\gamma$ -пучок и, как правило, оказывались очень загруженными фоновыми частицами и требовали кратковременного, малоинтенсивного (что делалось с помощью коллимации  $\gamma$ -пучка) облучения.

Третьим детектором такого типа была камера Вильсона. Эту методику развивал А.Н. Горбунов. Для камеры Вильсона была сооружена специальная пристройка к основному зданию, на пути  $\gamma$ -пучка. Работы по фоторасщеплению  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$ , осуществленные с помощью камеры Вильсона, получили мировое признание.

В этих работах на первой стадии участвовали В. Спиридонов, Ю.С. Иванов и А.Варфоломеев, затем в них принимал участие Г. Таран. Обработка снимков с камеры Вильсона требовала специальной просмотровой техники и в последующем эта методика стимулировала создание просмотрового центра, который был создан А.Н. Горбуновым в лаборатории, когда она перебазировалась в г. Троицк, где был сооружен новый синхротрон С-25Р, на энергию  $E_e \sim 1,3$  ГэВ.

Все 3 методики (фотоэмульсии, ионизационная камера и камера Вильсона) использовались непосредственно в  $\gamma$ -пучке, в этом их сходство. Кроме того они не требовали специального электронного оборудования, но нужна была просмотровая техника и поэтому обработка результатов, поиск и измерение треков проходил достаточно медленно и для получения физических результатов необходимо было время. Однако, следует сказать, что по сравнению с электронными методами исследования, когда результаты, по крайней мере "скорые" получались непосредственно в эксперименте, методика фотоэмульсий и камеры Вильсона обладала неоспоримым преимуществом по достоверности наблюдения физической реакции. Достаточно было одного снимка реакции, чтобы понять, что такой процесс

существует и оставалось только набрать необходимое число случаев такой реакции для получения количественных результатов (сечения, вероятность).

Стоит отметить еще одну методику, которая не требовала сложной электроники и была проста в применении. Это методика наведенной активности. Этой методикой занимались П.С. Баранов и В. Роганов. Она применялась для регистрации нейтронов из мишени, помещенной в  $\gamma$ -пучок, с помощью детекторов-сосудов, в которые заливался специально подобранный раствор, который становился радиоактивным (испускал  $\gamma$ ) после поглощения нейтронов. Простота этого метода состояла в том, что он требовал только облучения, а замер активности мог быть осуществлен спустя какое-то время и в другом месте на специальном стенде. Метод обладал высокой избирательностью к регистрации из реакции (из мишени) определенных продуктов реакции, поскольку была известна схема возбуждения и распада того химического элемента или химического соединения, которое содержалось в растворе, налитом в контейнеры.

Следует сказать, что в разработке этого метода активное участие принимал В.И. Гольданский. Возможно здесь уместно сказать о той роли, которую играл В.И. Гольданский в работе фотомезонной лаборатории. В.И. Гольданский пришел в лабораторию В.И. со своими темами - Комптон-эффект на протоне и поляризуемость протона. Следует сразу отметить незаурядность личности В.И. Гольданского, его эрудицию и активность. В этом он был очень похож на В.И. Он пришел в Эталонную лабораторию уже будучи доктором физ.мат. наук - диссертация была посвящена ядерной проблеме и связана с процессом возникновения нейтронов в ядерных (урановых) сборках в результате фотореакций и реакциях на  $p$ -пучках и методов регистрации возникающих нейтронов. Естественно, использование метода наведенной активности, возникающей в специальных растворах после захвата нейтрона, и был использован П.С.Барановым, поскольку он был аспирантом В.И.Гольданского. Сам В.И.Гольданский попал в Эталонную лабораторию из ИХФ АН в результате "борьбы с семейственностью" (1953 г.).



Мне запомнилось его выступление на семинаре лаборатории по поводу расчета кинематики элементарных процессов. Потом эта тема вылилась в книгу "Кинематика ядерных реакций" (А.М. Балдин, В.И. Гольданский, И.Л. Розенталь). Во 2-ом издании к этим авторам присоединился В. Максименко. Эта книга и сейчас является настольным руководством каждого физика-экспериментатора.

Придя в Эталонную лабораторию В.И. Гольданский стал научным руководителем группы В.В.Павловской, а затем получил под свое руководство сектор, в который вошли 2 группы: группа П.С. Баранова в составе Л.Н. Штаркова, Г.А. Сокола и Л.И. Словохотова - это физики, затем у нас были Ю.П. Янулис, В.Г. Раевский, Т. Солоненко, Т. Кузнецова, ряд инженеров и дипломников, и 2-я группа - В.В. Павловской, в которую входил Б.Б. Говорков, Е. Минарик, А. Куценко, В.Запечалов. Впоследствии Б.Б. Говорков вместе с Е. Минариком выделились в отдельную группу и занялись подготовкой эксперимента по определению поляризуемости протона и по фоторождению нейтральных  $\pi$ -мезонов на нуклонах и ядрах. В нашей группе основное направление исследований было связано с исследованием комптон-эффекта на протоне (эта тема стала темой моей кандидатской диссертации, но результаты были получены уже после того, как В.И. Гольданский ушел из лаборатории).

Следует сказать, что В.И. Гольданский сыграл определяющую роль в создании в лаборатории жидко-водородной мишени (я уже говорил об этом выше). Непосредственно он учил нас (и меня в том числе) как нужно осуществлять заливку жидкого водорода в мишень с соблюдением всех правил безопасности. Заливка проводилась во дворе "Питомника" из дьюара с жидким водородом и затем мишень уносилась в зал ускорителя и устанавливалась на соответствующее место в  $\gamma$ -пучке.

К сожалению, когда В.И. ушел окончательно в Дубну, через некоторое время Эталонная лаборатория распалась на ряд независимых лабораторий. Руководителями новых лабораторий стали Л.Е.Лазарева - лаборатория фотоядерных реакций (к этому времени ускоритель С-3 был перебазирован со старой площадки ФИАН на Миусской площади на Питомник), П.А.Черенков -

лаборатория фотомезонных процессов ( основой ее стал ускоритель С-25 ), В.А.Петухов - лаборатория электронов высоких энергий с базовой установкой С-60, М.С.Рабинович - лаборатория физики плазмы и А.А.Коломенский - лаборатория ускорителей. Каждая из новых лабораторий базировалась на своем ускорителе (С-3, С-25, С-60). У В.И. Гольданского не оказалось такой базовой установки и он был вынужден уйти из ФИАНа. В общей сложности в Эталонной лаборатории В.И. Гольданский проработал около 7 лет и его влияние на физическую тематику лаборатории было очень высоким, а в случае с нашей группой - определяющим.

В связи с этим следует рассказать о том, как формировалась тематика сектора и всей лаборатории. Я не могу сказать кем и почему, возможно это было инициировано В.И.Гольданским, но для определения тематики исследований на ускорителе была создана комиссия в АН во главе с академиком Леонтовичем, которой был представлен перечень тем, которыми предполагалось заниматься в лаборатории. Я помню общее производственное собрание, которое было посвящено тематике исследований. В.И. был на этом совещании и когда было озвучено решение комиссии и одной из первых была названа тема по исследованию комптон-эффекта на протоне В.И. сказал: "Многие пытались поднять ногу на этот столбик (Комптон-эффект), хотел бы я увидеть, кому удастся "обмочить" этот столбик". В.И. ясно видел сложность проведения эксперимента и своим высказыванием только подтверждал необходимость нахождения не стандартного решения этой задачи. Мы этот эксперимент удачно провели и получили результат, который и по сей день цитируется как один из первых, полученных в этой области энергий.

## **5. Развитие электронных методов исследования**

Вернемся снова к развитию разных методик, необходимых для проведения исследований на ускорителе С-25. В начальные (50-е) годы активно развивалась методика пропорциональных газовых детекторов (в нашей группе) и методика сцинтилляционных детекторов (в группе Белоусова-Тамма). Обе методики требовали одновременного развития электроники, так что в каждой группе имелись радиоинженеры. Так в гр. Белоусова-

Тамма электроникой занимались А. Руденко А.В.Куценко и П. Шарейко, в нашей группе (я уже говорил) Ю. Янулис и Т. Солоненко.

Сцинтилляционными детекторами начал заниматься А.С. Белоусов, который "своими руками" можно сказать "сварил" первый сцинтиллятор. Сцинтилляторы, изготовленные в лаборатории, были органические монокристаллы нафталина, антрацена и стильбена. Кристаллы выращивались в специальных печах из расплава. Затем были заказаны нужные сцинтилляционные массы в Лыткарино (под Москвой), а уже в 60-70-е годы сцинтилляторы стали разрабатываться в Харькове в объединении Монокристалл.

Б.Б.Говорковым применялись сцинтилляционные счетчики на основе жидких сцинтилляторов (растворы активатора в ксилоле или толуоле ).

Пропорциональными газовыми детекторами занимался я. Была создана конструкция из стеклянных цилиндров, торцы цилиндра заклеивались алюминиевой фольгой , в начале и конце цилиндра впаивались вводы из вольфрамовой проволоки диаметром 2 мм так, чтобы конец этого вольфрамового ввода доходил до центра цилиндра и между этими вводами натягивалась тонкая диаметром 20 мкм медная нить (с одной стороны имелась стальная пружинка, необходимая для того, чтобы нить натягивалась и не провисала ). На внутреннюю часть цилиндра наносился тонкий слой токопроводящей пасты (аквадаг) и этот слой служил катодом, а нить, соответственно, являлась анодом счетчика. Когда на катод подавалось отрицательное напряжение и в газе детектора создавалась ионизация проходящей через счетчик заряженной частицей, то электроны из ионизации, ускоряясь в таком цилиндрическом поле, двигались к нити и непосредственно у нити попадали в сильное электрическое поле такой напряженности, в котором могла происходить вторичная ионизация и умножение заряда. Подбирая состав газа (обычно  $Ag + CO_2$  ( $\approx 0,5\%$ )) и напряжение, можно было получить устойчивый пропорциональный режим умножения первичного заряда, так что выходной сигнал, снимаемый с нити, был пропорционален потере энергий  $\square E$  частицы. Сигналы формировались на входе усилителя (длительность импульса составляла (1-2) мк сек и, таким образом,

можно было осуществлять регистрацию частиц, вылетающих из мишени, помещенной в  $\gamma$ -пучок.

Следует сказать, что стеклянные цилиндры необходимой конструкции, изготавливались в стеклодувной мастерской ФИАН известным стеклодувом Воронковым, брат которого работал в институте П.Л.Капицы ( институт низких температур АН ), где все установки были из стекла .

Из таких счетчиков, расположенных друг за другом на одной оси, составлялся телескоп. Обычно телескоп состоял из 3-х счетчиков. Отбирались события, которые соответствовали одновременному пролету частицы через все счетчики. Использование тройных совпадений позволяло значительно снизить фоновый счет телескопа, соответствующий срабатыванию только одного счетчика. Таким образом можно было изучать процессы, регистрируя только одну частицу в конечном состоянии реакции.

С помощью такого телескопа пропорциональных счетчиков было осуществлено исследование двух процессов: фоторасщепления дейтрона и Комптон-эффект на протоне. В процессе  $\gamma + d \rightarrow p + n$  (фоторасщепление дейтрона) регистрировался протон  $p$  при расположении телескопа под разными углами  $\Theta_p$  и при разных энергиях конца спектра тормозного излучения  $E_{\gamma\max}$ . В виду отсутствия в то время дейтериевой мишени проводился разностный эксперимент: в качестве мишени использовалась обычная  $H_2O$  и тяжелая вода  $D_2O$ . Были сконструированы два дисковых контейнера с тонкими стенками из 50 мкм алюминиевой фольги, которые наполнялись обычной и тяжелой водой. Толщина слоя воды вдоль по  $\gamma$ -пучку составляла 1,0 см. Мишени попеременно помещались в  $\gamma$ -пучок, длительность экспозиции в каждом положении составляла  $\sim 0,5$  часа. Выход процесса  $\gamma + d \rightarrow p + n$  вычислялся как разность выходов с тяжелой ( $D_2O$ ) и простой ( $H_2O$ ) водой. Были получены угловые распределения выходов (которые затем преобразовывались в дифференциальные сечения) реакции  $\gamma d \rightarrow p + n$  для нескольких значений средней энергии  $\langle E_\gamma \rangle$  от 150 до 250 МэВ. Эти данные оказались одними из первых в мировой литературе. Было выявлено возрастание сечений при приближении

к энергиям , где начиналось проявление  $\Delta_{33}$ -резонанса (говоря современным языком) и эти результаты активно обсуждались в то время теоретиками.

Для осуществления исследований упругого рассеяния  $\gamma$ -квантов на протоне (Комптон-эффект на протоне) также применялся телескоп из 3-х газовых пропорциональных счетчиков. В качестве мишени уже использовалась жидко-водородная мишень, о которой я уже писал выше (на основе пенопластового стакана с охлаждением жидким азотом). Телескоп был составлен из счетчиков специальной конструкции. Корпус счетчика был металлический, что позволило наполнить его газовой смесью ( $\text{Ar} + 0,5 \% \text{CO}_2$ ) до давления  $\sim 3$  атмосфер. Корпус имел тонкие алюминиевые входное и выходное окна диаметром 15 см. Размер чувствительной области вдоль по пути частицы был равен  $\Delta x = 10$  см. Чтобы обеспечить быстрый сбор носителей на анод счетчика, устанавливались 3 анодных нитей в поперечном направлении к треку частицы, которые затем объединялись на один анодный выход. Такая конструкция анодных нитей являлась неким прообразом нитяной пропорциональной камеры, которая была разработана в ЦЕРНе в 70-е годы Шарпаком, за что он получил нобелевскую премию.

## 6. Комптон-эффект на протоне

В нашем случае использование 3-х нитей в одном объеме позволило получить более быстрый сигнал, т.к. носители заряда (электроны) собирались на нить из меньшего объема и, следовательно, быстрее. Такая конструкция пропорционального счетчика была нами разработана самостоятельно, опираясь только на информацию о работе пропорционального счетчика в книге "Ионизационные методы регистрации излучений".

В эксперименте по изучению комптон-эффекта на протоне было применено еще одно новшество: работа велась в достаточно узком интервале  $\Delta E_\gamma$  энергий  $\gamma$ -квантов вблизи края спектра тормозного излучения  $E_{\gamma\text{max}}$ . Это было связано с необходимостью отделения от значительного фонового вклада от процесса фоторождения  $\pi^0$ -мезонов.

Из сравнения кинематик 2-х процессов:  $\gamma + p \rightarrow \pi^0 + p_1$  (1) и  $\gamma + p \rightarrow \gamma + p_2$  (2) следует, что кинетическая энергия  $E(p_2)$  всегда больше энергии протона  $E(p_1)$  при одной и той же энергии  $E_\gamma$ , т.е. всегда существует  $\Delta E_\gamma$ , внутри которого выполняется это условие. Таким образом, можно регистрировать только процесс (2), если выделять нужный интервал  $\Delta E_\gamma$ . Такой интервал  $\Delta E_\gamma$  выделялся у края спектра тормозного излучения. Телескоп располагался под  $< \Theta_p >$  и на входе телескопа устанавливался медный фильтр, который выбирался таким, чтобы поглотить протоны из процесса (1) при энергии  $E_{\gamma_{\max}}$ .

Такое "решение проблемы фона" обеспечило регистрацию процесса (2) практически при отсутствии вклада от реакции (1), несмотря на то, что сечение процесса (1) на 3 порядка превышает сечение процесса (2). В этих исследованиях были получены угловые распределения (дифференциальные сечения) для 2-х энергий  $E_{\gamma_{\max}} \cong 215$  и  $250$  МэВ.

Эти результаты, как и результаты по фоторасщеплению дейтрона были получены в 60-е годы и явились одними из первых результатов в этой области энергий. Здесь также был обнаружен рост сечений в начале широкого  $\Delta_{33}$ -резонанса. Эти данные хорошо согласуются с более поздними данными, полученными на других ускорителях, в частности на синхротроне в Токио, который был запущен в 60-е годы, имел максимальную энергию  $E_{\gamma_{\max}} = 1300$  МэВ. Такой диапазон энергий  $\gamma$ -квантов позволил измерить сечение комптон-эффекта в области  $\Delta_{33}$  и более высоких резонансов. Наши данные хорошо согласуются с обще-мировыми результатами, которые были получены значительно позднее.

Наверное, здесь уместно сказать несколько слов об отношении В.И. к публикации материалов эксперимента. Он придавал очень большое значение скорейшей публикации полученных данных. Поскольку он хорошо представлял состояние с получением экспериментальных данных и с их обработкой ( в результате ежедневных утренних общений), и четко понимал когда нужно было доложить результаты, и настойчиво рекомендовал готовить публикацию. Иногда он требовал прекратить набор статистики в эксперименте и заняться только подготовкой статьи,

если видел, что дело со статьей идет медленно из-за продолжения эксперимента.

В то время очень чувствовалось соревнование в экспериментальных исследованиях, которые велись у нас в стране, на нашем ускорителе С-25, с аналогичными исследованиями, которые выполнялись в США, в Беркли, на синхротроне с  $E_{\text{ymax}} = 300$  МэВ. Американцы достаточно быстро, в течение (~0,5 года) публиковали свои работы, в основном в Phys. Rev., мы их знали. В то время был налажен контакт между американскими и советскими физиками, некоторые американские физики были на "Питомнике", я помню семинар, где выступал Р.Вилсон, будущий создатель и директор лаборатории им Э.Ферми.

Иногда приезжали целые делегации. Так однажды в нашу лабораторию прибыла китайская делегация. П.А. Черенков (он тогда уже был Нобелевским лауреатом и возглавлял фотомезонную лабораторию) при встрече с китайскими физиками, предложил им оставить в его комнате часы, когда они собирались пройти в экспериментальный зал, чтобы посмотреть С-25, с тем, чтобы предотвратить действие магнитного поля на часы, если кто-либо из них окажется близко к ускорителю. Китайцы так и сделали: сняли часы и оставили их в кабинете. Произошел конфуз. Когда китайцы вернулись, то нескольких часов не досчитались. Я уже не помню точно, вызывали ли милицию, но через короткое время часы нашлись и похититель был обнаружен.

Когда в 1955 году в ФИАНе проходила Международная конференция по ядерной физике (приехали Сегре, Вайскопф, Пановский и другие знаменитые физики), то от нашей лаборатории на конференции было представлено несколько докладов, в том числе были доложены наши первые результаты по фоторасщеплению дейтрона. А на конференцию в Киев в 1959 году была отправлена с докладом уже целая делегация во главе с В.И.. Докладывались первые теоретические и экспериментальные результаты по фоторождению заряженных и нейтральных мезонов на водороде и ядрах, по Комптон эффекту на протоне, по фоторасщеплению ядер гелия.

Следует сказать, что В.И. очень редко соглашался с предложениями быть в числе авторов докладов или статьи. Он

довольствовался выраженной ему благодарностью за руководство и содействие и соглашался на авторство, только в случаях, когда статья или результаты представлялись в высшие инстанции, в министерство или авторство носило политический характер . как в случае представления на международную конференцию.

Результаты, полученные на ускорителе С-25, докладывались затем на Международной конференции в Женеве (1962 год ) и на итоговой конференции ФИАН , проведенной в Дубне в 1967 году.

### **7. В.И. и его ближайшее окружение**

В.И. был великий спорщик. Я не случайно употребил слово "великий". Он спорил очень активно, забывая все на свете, о времени, о необходимых делах, стоял с мелом в руках у доски, что-то писал, чертил и много говорил. В то же время он успевал слушать оппонента. Мне не приходилось спорить с В.И. (просто не был готов, "духу" не хватало), а вот Лоллий Николаевич Штарков решался спорить с ним, спорил отчаянно, тоже с мелом в руке и находясь в великом возбуждении. Часто их споры (неоднократные) проходили в нашей комнате, мы были свидетелями-слушателями, а споры касались в основном, методических вопросов, например, вопрос о том, как лучше формировать электрический сигнал, идущий с детектора по длинному (~100 м) высокочастотному кабелю, как выбрать RC-цепочки в схемах интегрирования и дифференцирования сигнала. Или вопрос, связанный со статистикой отсчетов - как осуществлять набор статистически распределенных сигналов, чтобы получить наиболее достоверный результат. Надо сказать, что Л.Н. Штарков эти вопросы знал достаточно глубоко, читал специальную литературу, сам активно размышлял и В.И. нередко соглашался с ним.

Говоря о Л.Н. Штаркове, нужно отметить, что он был схож с В.И. по страстности суждений и я, да и остальные члены нашей группы (я уверен) выросли в самостоятельных физиков благодаря влиянию не только В.И., но и В.И. Гольданского и Л.Н. Штаркова. Если продолжать эту тему о людях, которые формировали наше сознание и отношение к работе, то кроме уже упомянутых (В.И. Гольданский, Л.Н. Штарков) следует назвать М.С. Рабиновича. Он



около 3-х лет, будучи заместителем В.И. фактически руководил Эталонной лабораторией во время отъездов В.И. в Дубну, вплоть до разделения лаборатории на ряд отдельных лабораторий, когда В.И. окончательно переехал в Дубну. Матвей Самсонович Рабинович был очень организованным человеком и эту организованность он внес в работу лаборатории. Вошли в жизнь так называемые "5-ти минутки", которые проводились еженедельно по утрам, в субботу (мы тогда работали 6 дней в неделю).

На 5-ти минутке собирался практически весь состав физиков и представители служб (ускоритель, мастерские, отдел снабжения) и заслушивалось поочередно краткое (5-10 минут) сообщение руководителей физических групп о том, что было сделано за неделю, какие планы-запросы на следующую неделю на ускоритель (что будет сделано и каковы ожидаемые результаты за неделю), каковы требования-запросы к мастерским, отделу снабжения и т.д. Вел эти совещания М.С. очень активно, тут же на месте принимал решения. Совещания длились 30 -40□ (не больше), но за это время присутствующие получали достаточно полную информацию о состоянии исследований на ускорителе. Отличительной особенностью, м.б. чертой характера М.С. была его способность внести уверенность в свои силы каждому собеседнику. Он говорил как уже о свершившемся факте о полученных результатах, о публикациях, о диссертациях, т.е. всячески подталкивал нас, молодых физиков экспериментаторов к работе, к оформлению результатов и диссертаций.

После распада Эталонной лаборатории и организации лаборатории фотомезонных процессов, руководителем лаборатории стал П.А. Черенков. Он уже был Нобелевским лауреатом, но это событие практически (по крайней мере внешне) не изменило стиль и характер руководства П.А.. Если в характерах В.И., М.С.Рабиновича и В.И.Гольданского революционная сторона характера была основной, то у П.А. основой был, пожалуй, эволюционизм. Он не любил, или не был готов, к каким-либо резким переменам, его девизом была стабильность. Это также определенным образом воздействовало на коллектив. Но зато большой вес приобрел его статус Нобелевского лауреата. У него был специальный блокнот с таким оформлением его имени и когда в какую-либо инстанцию посылалось письмо, отпечатанное на

таким именно бланке, то оно имело, как правило, положительное решение. В самой АН такие письма большой роли не играли (академики знали себе цену!), но при обращении, например, в дирекцию Лыткаринского завода (сцинтиллирующие материалы) или в дирекцию МЭЛЗ (ФЭУ), или в СНИИП (электроника), или в Рижский завод приборостроения (полупроводниковые детекторы) такое обращение часто являлось решающим.

## 8. Теоретики

Следует также отметить, что большое влияние на формирование экспериментальной программы наших исследований и на нас самих, как физиков, оказал А.М. Балдин, который как никто из теоретиков был близок к экспериментаторам, понимал их проблемы и часто формировал свои теоретические предложения в понятных и удобных для экспериментаторов терминах и формах. А.М. Балдин очень близко сотрудничал с группой М. Адамовича, с Б.Б. Говорковым, с П.С. Барановым по проблемам фоторождения мезонов и по поляризуемости протона и мезона. Он активно поддержал наше стремление заняться гиперядрами на С-25Р, а в последующем поддержал нашу работу по эта-ядрам.

Говоря об А.М. Балдине, нельзя обойти М.А. Маркова. Он довольно часто выступал на семинарах на Питомнике со своим взглядом на мезон-ядерную физику и на физику вообще. Его лекции были всегда очень интересны, предельно просты в терминологии и поэтому понятны. Я помню его лекцию о природе сильного взаимодействия. Он нарисовал кружок (это нуклон, сказал М.А.), затем он мелом очертил довольно большой круг вокруг нуклона - и сказал, что это  $\pi$ -мезонная "шуба". Затем он полез в карман, достал мел красного цвета, нарисовал внутри картинки круг поменьше и сказал, что это область, где действуют  $k$ -мезоны (они в 4 раза тяжелее  $\pi$ -мезонов и поэтому радиус их действия меньше). Получилась очень понятная картина сильного взаимодействия нуклонов с участием  $\pi$ -мезонов,  $k$ -мезонов и более тяжелых частиц. Его коньком была гипотеза о тяжелых частицах, "максимонах", весом до  $10^{-5}$  грамма, поиск которых и

обнаружение требовали очень больших энергий, практически не реализуемых в земных условиях. Это сейчас как-то пересекается с гипотезой о хиггсах, частицах с массой  $\sim 200$  ГэВ. Нужно отметить, что М.А. создал очень сильный коллектив физиков-теоретиков часть из которых потом вместе с ним ушла в Дубну (А.Балдин, П.Исаев), но часть осталась и до сих пор активно работает над проблемами ядерной физики и физики электромагнитных и сильных взаимодействий (А.И. Лебедев, В.Н. Фетисов, В.А. Петрунькин, Л.В. Фильков, В.А.Царев, А.И. Львов).

Роль теоретиков в анализе экспериментальной информации, получаемой на С-25, и выявлению механизмов фотомезонных и фотоядерных процессов была очень велика. Так, В.Петрунькин и Л.Фильков занимались анализом  $\gamma p \rightarrow \gamma p$  реакции и связанной с ней проблемой поляризуемости элементарных частиц, А.Лебедев - фоторождением  $\pi$ -мезонов, В.Фетисов - образованием гиперядер, В.Царев - К-мезонной физикой, А.Львов - поляризуемостью нуклонов. М.А. Марков был высоким человеком, на 1,5 головы выше В.И.. Когда случалось им стоять рядом, различие в росте выглядело довольно потешно. М.А. Марков по натуре видимо был флегматичен, он говорил медленно, но имел богатую мимику лица и глаз и во время разговора хитро поглядывал на собеседника, особенно в тех местах, когда утверждались какие-либо нетривиальные мысли.

Я помню М.А. еще со студенческих лет. На последнем курсе он читал нам цикл лекций по теоретической ядерной физике (я учился на ядерном отделении физфака МГУ) и лекции нашему потоку читали в учебном центре-практикуме, который размещался недалеко от станции метро "Сокол", обычно в разговоре мы так и говорили, что занятия (лекции) будут на "Соколе". Лекции М.А. читал хорошо. Учебников не было, поэтому мы старались записывать. Я обычно сидел рядом с Володей Ритусом на первом ряду и я четко видел, что когда М.А. выводил на доске какую-либо формулу или делал какое-то сильное утверждение в виде вывода, он всегда внимательно смотрел на Володю Ритуса и даже делал небольшую паузу, ожидая его реакции. Дело в том, что у Володи Ритуса была необычайная интуиция на несогласованность либо в формулах, либо в утверждениях и он довольно часто

переспрашивал М.А. или уточнял вывод формулы (благо М.А. на лекции разрешал задавать вопросы, если было что-то не ясно) и нередко его интуиция не подводила и М.А. либо исправлял формулу, либо уточнял словесный вывод.

Я должен сказать, что и сейчас, когда я иногда бываю на теоретических семинарах, где присутствует В.И.Ритус, я обращаю внимание как точно иной раз он задает вопрос по казалось бы малозначительному поводу, но после его вопроса становится ясно насколько Володя проникает в содержание сказанного. В.И. нам также читал лекции по методике эксперимента и взаимодействию излучения с веществом.

Надо сказать, что читал он, вернее рассказывал, неважно, т.к. спешил, перескакивал, часто ошибался при написании разных формул, опять таки из-за спешки. Читал нам лекции (всего несколько) и Померанчук, по моему впечатлению тоже неровно и не очень понятно. Самое приятное впечатление, даже восхищение оставил у меня С.Э.Хайкин (на 1-ом курсе) и его учебник "Механика" и С.Г.Калашников (на 2-ом курсе) нам читал курс электричества. Это был класс!

Мы учились сразу же после войны. Мы были первым послевоенным набором на физфаке МГУ, начиная с 1-го курса. Были студенты и целые группы, которые продолжали прерванную войной учебу и они заканчивали 3-ий, 4-ый или 5-ый курсы, но таких было мало. На нашем 1-ом курсе было принято около 300 студентов, окончили  $\square 250$  - это был один из самых больших потоков на физфаке МГУ. Наш курс состоял примерно на 50 % из выпускников школы (я был в их числе) и молодых ребят, пришедших с войны (фронтовиков). Вот они-то и формировали отношение к учебе и вообще отношение к жизни. Они возглавили все общественные организации как на курсе, так и в последующем на факультете, а также и в студенческом общежитии на Стромынке.

Я благодарен им и такому стечению обстоятельств, поскольку их устремленность к учебе, естественно, передавалась нам, бывшим школьникам, и сильно дисциплинировала. Я хотел бы назвать И. Жолудева, Л. Шувалова, А. Белоусова, Б. Глуховского, В.Инденбома, которые "стояли у руля" на нашем курсе, они были наиболее яркими личностями. Наш курс с 3-го года обучения был

разделен на 2 потока: на ядерное и на радио-отделение. Выпускники ядерного отделения были направлены на работу в различные ядерные центры страны, в том числе и в Москве, а из радио-отделения формировались те коллективы (в Москве и в стране), которые занимались в основном ракетной техникой и космосом. Два или три последующих выпуска также распределялись аналогичным образом. В это время уже были сформированы Физико-технический институт и МИФИ и выпускники этих вузов (соответствующих специальностей) также направлялись в научно-производственные центры по ядерной и ракетной направленности, так что в 50-е годы были созданы солидные коллективы по этим направлениям (и по другим также) и поэтому не удивительно, что в ближайшие годы были получены такие потрясающие результаты и по космосу и по ядерной технологии.

### **9. В.И. и С25-Р**

50-е годы, как я уже говорил и далее еще отмечу, были насыщенными научными достижениями и в области ядерной физики, прежде всего в фотомезонной физике, благодаря развитию электронных ускорителей. Их появление у нас в стране и за рубежом, в основном в США, определило центр приложения усилий - это электромагнитные процессы при высоких энергиях, основу которых составили процессы фоторождения  $\pi$ -мезонов и возбуждение нуклонных резонансов. Лишь после создания протонных ускорителей стала активно развиваться физика сильных взаимодействий и это уже 60-е годы. В.И. к этому времени уже был в Дубне, где в 1957 году был запущен синхрофазотрон с энергией ускоренных протонов 10 ГэВ и активно велась работа по поиску новых частиц и резонансов

Первым успехом в работе дубненских физиков было открытие анти-сигма-минус гиперона. К этому времени была разработана концепция кварков (1964 год). Одним из первых В.И. обратил внимание на необходимость построения нового электронного ускорителя с энергией  $E_e > 1$  ГэВ. Я помню доклад на нашем научном семинаре на "Питомнике" В.А. Царева, который обосновал необходимость иметь энергию  $E_e = 1,3$  ГэВ. По его

словам именно в этой области энергий можно ожидать появление большого количества нуклонных резонансов. При больших энергиях по словам Володи Царева ожидается "the desert" (пустыня) и лишь при энергиях  $\sim$  нескольких ГэВ можно ожидать проявления каких-то новых структур.

Строительство нового электронного ускорителя на энергию  $E_e = 1,3$  ГэВ вскоре было начато в г. Троицке (40 км от Москвы). Строительство возглавлял П.А. Черенков при активной поддержке проекта В.И.. Фактически реальным руководителем и организатором конструкторско-проектных и строительных работ стал Е.И. Тамм. Большую помощь ему оказывали Г.П. Бочаров и Л.И. Словохотов. Кстати, по инициативе Л.И. Словохотова в проект был включен пункт о создании в этом комплексе С-25Р вычислительного центра, а по инициативе А.Н. Горбунова в проект был внесен пункт о создании просмотрового центра для работ с фильмовой информацией (пузырьковые камеры).

Синхротрон С-25Р в "ПАХРЕ" был построен и запущен в 70-е годы, но к сожалению В.И. уже не увидел ускоритель в действии. Следует сказать, что в 60-е годы в Токио был сооружен практически такой же синхротрон на энергию 1,3 ГэВ (он имел 6 квадрантов, а синхротрон С-25Р - 4) и проработал до  $\sim$  1995 года. Наш действующий синхротрон С-25 (на 280 МэВ) имел энергию достаточную для возбуждения 1-го нуклонного резонанса, так называемого  $\Delta_{33}$ - резонанса. Правда, энергии  $\gamma$ -квантов было недостаточно, чтобы пройти по энергии весь диапазон возбуждения (средняя энергия  $\Delta_{33}$ -резонанса  $E(\Delta_{33}) = 300$  МэВ и его ширина  $\Gamma(\Delta_{33}) \sim 200$  МэВ), но первую половину  $\square_{33}$  резонанса можно было исследовать на С-25. Исследование процессов фоторождения  $\pi$ -мезонов (заряженных и нейтральных) в области энергий  $\gamma$ -квантов велось до  $E_\gamma = 280$  МэВ, явилось одним из основных направлений научной деятельности Эталонной лаборатории наряду с исследованием комптон-эффекта на протоне и фоторасщеплением  $d$  и малонуклонных систем  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$ . Успех этих исследований был в первую очередь связан с инициативой и руководством В.И.

## 10. В.И. как человек

Я не ставил перед собой цель детального анализа проведенных на С-25 исследований по фоторождению пионов, комптон-эффекту, поляризуемости и фоторащеплению легких ядер. Это задача научного обзора. Свою задачу я видел в том, чтобы указать на эти направления мезон-ядерной физики, и на то, что они были инициированы и руководились В.И. Векслером, рассказать об общей атмосфере, которая сложилась в Эталонной лаборатории в те годы, когда ею руководил В.И., на влияние на нас, молодых физиков, которое оказывал В.И.

Что касается меня, то я могу сказать, что В.И. оказал самое существенное влияние и на формирование моего отношения к научным исследованиям (одно из характерных для В.И. суждений, что не существует какой-либо избирательности в научной работе, что как правило, она связана со всем спектром деятельности, нет "чистой" и "грязной" работы, в эксперименте все важно и желательно все уметь делать), так и на мою жизнь.

Как правило, В.И. сам лично разговаривал с теми, кто приходил к нему на работу. Когда мне Володя Лихачев сказал (а он уже был принят на работу В.И.), что В.И. имеет еще вакансии и что он сказал В.И. обо мне и что В.И. приглашает меня для беседы, я тот час же явился на Миуссы, где тогда размещался ФИАН. Мы беседовали на 2-ом этаже фиановского корпуса, в холле, где стоял большой диван из черной кожи. В.И. сидел в одном углу дивана, я в противоположном. Он подробно расспросил меня, чем я занимался на дипломе, об успехах в учебе на физфаке, поинтересовался моей общественной работой. Беседовали мы не более 0,5 часа, видимо он остался удовлетворен беседой, сказал, что берет меня на работу, потом вдруг спросил имею ли я жилье в Москве и когда я ответил, что я не москвич и живу пока в общежитии на Стромынке, В.И. несколько призадумался. Помолчав, он предложил мне поступить к нему в аспирантуру, сказав, что аспирантам предоставляется общежитие АН и я на 3 года сниму с себя заботу о жилье. Я согласился. В.И. через несколько дней дал мне тему для вступительного экзамена по физике: "Дисперсия света". Через пару недель я, написав реферат, пришел на экзамен. В комиссии были В.И., М.С. Рабинович и

представитель ФИАН по аспирантуре. Я рассказывал у доски наверное не менее 1 часа, вопросы были, конечно, во время рассказа. Наибольшую активность проявил М.С. Рабинович. Наконец В.И. сказал: "Муся, довольно его мучить, давай заканчивать". Мне поставили 4 и так я был принят в аспирантуру ФИАН, руководителем стал В.И. Сразу скажу, что мы с ним по теме диссертации отдельно вдвоем ни разу не встречались. Но тема диссертации была включена в официальную тему работы группы Н.Б. Делоне, куда я был прикреплен и она обсуждалась ежедневно на утренних обходах лаборатории В.И.. Раньше я уже говорил, что мы все наши исследования начинали с нуля, сами создавали аппаратуру, проводили сеансы на С-25, проводили обработку результатов. Конечно, 3-х лет, что отводилось для выполнения диссертационной работы, было явно недостаточно, так что за эти 3 года мне удалось только приблизиться к тем проблемам, которые стояли перед нами. После 3-х лет я был официально принят в штат ФИАН (с 01.05.1954 г).

В.И. помог мне еще в одном жизненно важном деле. Я к моменту поступления в аспирантуру был женат и моя жена была распределена в г. Электросталь, где преподавала в техникуме. Спустя год или 1,5 года я как-то сказал В.И., что у меня есть к нему просьба, не может ли он посодействовать тому, чтобы мою жену отпустили из г. Электростали. Дело в том, что работы в г. Электросталь так же были в ведении Министерства среднего машиностроения, что и наша Эталонная лаборатория и В.И., естественно знал чиновников этого министерства. При этом разговоре я был в кабинете В.И..

После того, как высказал ему свою просьбу, он что-то уточнил, потом снял трубку и позвонил зам. министра по кадрам и объяснил ему, что у него есть сотрудник, жена которого работает в техникуме в Электростали, и он просит отпустить ее совсем с работы (несмотря на то, что не прошло еще 3 года обязательной отработки по распределению), поскольку семья его сотрудника оказалась разорванной и это плохо отражается как на работе его сотрудника, так и на работе его жены. Просьба В.И. была довольно быстро удовлетворена и вскоре моя жена переехала в Москву.

Во многих воспоминаниях о В.И. говорится о его отзывчивости, о его помощи нуждающимся сотрудникам, в том



числе и деньгами, причем В.И., делая это, старался, чтобы его действия не афишировались. То, что я рассказал выше, есть еще один пример такой помощи.

Вообще В.И. был очень живой и общительный человек, он часто во время обеденного перерыва принимал участие в игре в пинг-понг, причем играл хорошо, напористо и как правило выигрывал. Было несколько случаев выезда летом в Подмоскowie куда-нибудь на озеро или в лес. Довольно часто он с несколькими сотрудниками совершал пешие прогулки с Питомника по Садовому кольцу к своему дому (он жил где-то у метро "Красные ворота") - это прогулки около 10 км, но В.И. любил ходить, ходил быстро. Во время этих переходов домой он много рассказывал и о науке, и о своей жизни. Выросший в детдоме (с 14 лет) он понимал жизненные трудности и всегда был готов помочь, чем мог.

## 11. Заключение

Мне следует заканчивать свои воспоминания о В.И.. Они по замыслу должны были отразить выдающуюся и определяющую роль В.И. в развитии ядерной физики средних энергий, в основном фотомезонной физики на синхротроне С-25 в то время, когда В.И. был руководителем созданной им Эталонной лаборатории ФИАН до времени, когда он переехал в Дубну, в ОИЯИ. Этот период жизни В.И. был очень активным, ярким, насыщен большими достижениями в физике электромагнитных взаимодействий и в мезон-ядерной физике.

Воспоминания о В.И. Векслере неизбежно связываются с воспоминаниями о развитии фундаментальных физических исследованиях в 50 - 60 годы с использованием ускорителей частиц. Мы были молоды и мы были непосредственными участниками многих пионерских работ как в физике электромагнитных взаимодействий, так и в мезон-ядерной физике. Я уже говорил, что развитие было стремительным и связывалось в первую очередь с пониманием "власть имущих" громадной роли науки в развитии страны и создании так называемого "оборонного потенциала".

Прошло более 50-лет с той поры, когда В.И. создал первый ускоритель и получила развитие фундаментальная ядерная физика.

К сожалению, многие позиции в науке сейчас утеряны . Занятие наукой уже не является престижным делом. Практически отсутствует финансирование фундаментальных исследований. На первое место вышли так называемые прикладные направления исследований, связанные с получением рыночной продукции, на которой можно зарабатывать деньги. Это направление развивать необходимо. но нельзя ограничиваться только им, не развивать стратегически важные направления, которые в будущем станут основой прикладных исследований.

Кроме отсутствия финансирования очень тяжелое положение сложилось с молодыми кадрами. Их просто нет. И это крайне отрицательно отражается не только на современном состоянии, но ставит под угрозу будущее развитие фундаментальных исследований в нашей стране.

Вот такое печальное окончание моих воспоминаний о В.И.Векслере получилось. Хотелось бы, чтобы такое положение науки изменилось, чтобы научная общественность и прежде всего РАН нашли в себе силы предотвратить окончательное разрушение науки в России. Остается надеяться !

Мне хотелось бы выразить благодарность А.С.Белоусову, Б.Б.Говоркову , Н.Б.Делоне, А.И.Лебедеву, Е.М.Лейкину , Г.И.Мерзону, В.И.Ритусу , Е.И.Тамму, С.П.Харламову и В.А.Цареву , ознакомившихся с этими заметками в рукописи и сделавших ряд существенных замечаний и уточнений , которые мною были учтены при окончательной редакции.

### ГЛАВА 3.

*Г.М.Гуревич, В.Г.Недорезов, Г.В.Солодухов.*

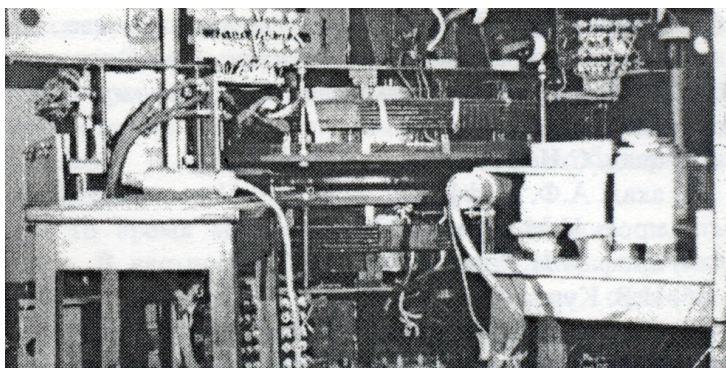
#### **«Питомник» - Лаборатория фотоядерных реакций.**

*Авторы этой главы являются ветеранами ЛФЯР, которые участвовали и продолжают участвовать в многочисленных экспериментах по изучению электромагнитных взаимодействий ядер. Статья подготовлена при активном участии сотрудников ЛФЯР Л.З.Джилавяна, В.П.Лисина, Б.А.Тулупова и других.*

Лаборатория фотоядерных реакций была в числе трех лабораторий ФИАНа, на базе которых образовался Институт ядерных исследований. В этом году сорокалетний юбилей института совпал с 50-летием лаборатории фотоядерных реакций, у истоков которой стоял Владимир Иосифович Векслер (1907 – 1966гг.). Открытый им в 1944 году принцип автофазировки стал основой создания первого в Советском Союзе (и третьего в мире) электронного синхротрона С-3 на энергию 30 МэВ, на базе которого сформировалась эталонная, а затем фотоядерная лаборатория. Через два года, в 1949 году, в Эталонной лаборатории вошел в строй еще один ускоритель электронов (С-25) на энергию 250 миллионов электрон-вольт.

*В.И.Векслер*





*Электронный синхротрон С-3*

Первым руководителем лаборатории фотоядерных реакций в 1960 году стала Любовь Ефремовна Лазарева. Основным тематическим направлением деятельности лаборатории фотоядерных реакций являлось исследование электромагнитных взаимодействий ядер, главным образом, в области недавно открытого коллективного состояния ядер – гигантского дипольного резонанса.



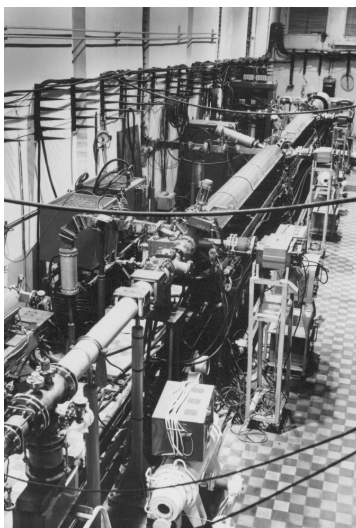
*Л. Е. Лазарева - организатор и бессменный (до 1986 года) руководитель лаборатории фотоядерных реакций ФИАН им. П. Н. Лебедева (затем ИЯИ АН СССР, ИЯИ РАН), ведущей в СССР и России в этой области исследований.*

На момент создания лаборатории экспериментальных данных по сечениям гигантского резонанса было мало, и интерес к этим работам в мире был очень велик. Соответственно, велика была и

конкуренция между группами из разных лабораторий и разных стран.

Имя Л. Е. Лазаревой неразрывно связано с развитием мировой фотоядерной науки. Она – автор основополагающих работ по фотоядерным реакциям, ставших ныне классическими. Л. Е. Лазаревой был предложен ставший теперь классическим метод измерения полных сечений фотопоглощения. Он оказался чрезвычайно плодотворным и до сих пор широко используется в ведущих лабораториях мира. Некоторые результаты, полученные в ЛФЯР этим методом, рассмотрены ниже.

*Линейный ускоритель  
электронов ЛУЭ -100 МэВ*



После перехода ЛФЯР в Институт ядерных исследований в 1970 году, под руководством Л. Е. Лазаревой была проведена коренная модернизация ускорительной базы лаборатории. По ее инициативе был сооружен линейный ускоритель электронов. С присущей ей настойчивостью и энергией Л. Е. Лазарева осуществляла повседневное руководство работами по его созданию и введению в строй, что позволило существенно расширить диапазон физических исследований и поднять их на современный уровень. В сооружении, запуске, наладке и дальнейшей модернизации активную роль сыграли М. В. Карпов,

В. В. Петренко, В. Н. Пономарев, Р. Л. Кондратьев, В. А. Балицкий, М. А. Жаренов, Л. З. Джилавыян и др.

На этом ускорителе изучались фотоядерные реакции («эталонные» реакции  $^{63}\text{Cu}(\gamma, n)$  и  $^{238}\text{U}(\gamma, F)$ ) под действием первого в стране пучка квазимонохроматических фотонов от аннигиляции позитронов на лету (Л.З.Джилавыян), а также реакции с заселением высокоспиновых изомеров. Проводились исследования фото- и электроделения и явления изомерии формы ядер-актинидов (В.Г.Недорезов).

Для проведения исследований на пучке ЛУЭ-100 была создана установка для измерения сечений рассеяния электронов на ядрах (порядка  $10^{-32}$  см<sup>2</sup>) с рекордным разрешением (0,1%), включающая в себя систему анализа и формирования пучка, магнитный спектрометр с «магическим углом» и многоканальную систему детектирования (Б. С. Долбилкин, Р. Л. Кондратьев, В. П. Лисин, А. Л. Полонский), на которой был выполнен цикл экспериментов, в том числе – измерения абсолютных сечений упругого рассеяния электронов на ядре  $^{12}\text{C}$  с точностью 2,5% и среднеквадратичного зарядового радиуса с точностью 1%, для использования этих величин в качестве эталона при относительных измерениях других ядер.

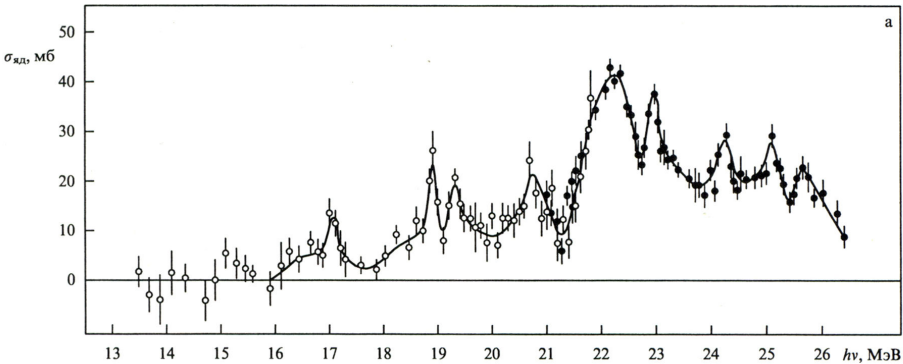
Постоянно развивались новые современные экспериментальные методики: использование пучков квазимонохроматических фотонов от аннигиляции позитронов на лету, метод обратного рассеяния лазерного излучения на быстрых электронах (совместно с ИЯФ СО АН СССР), создание поляризованных ядерных мишеней и пучков, новый в то время многопараметрический анализ данных с использованием ЭВМ и т.д. Большое внимание в лаборатории уделялось прикладным исследованиям, имеющим прямой выход в различные отрасли народного хозяйства. Большой научный авторитет лаборатории и лично Л. Е. Лазаревой сделал возможным организацию и проведение цикла продолжающихся до сих пор

международных Семинаров по физике электромагнитных взаимодействий ядер, получивших мировое признание.

Среди работ первоначального периода следует выделить пионерские исследования сечений образования запаздывающих нейтронов в реакциях фотоделения урана и тория и угловых распределений быстрых фотонейтронов.

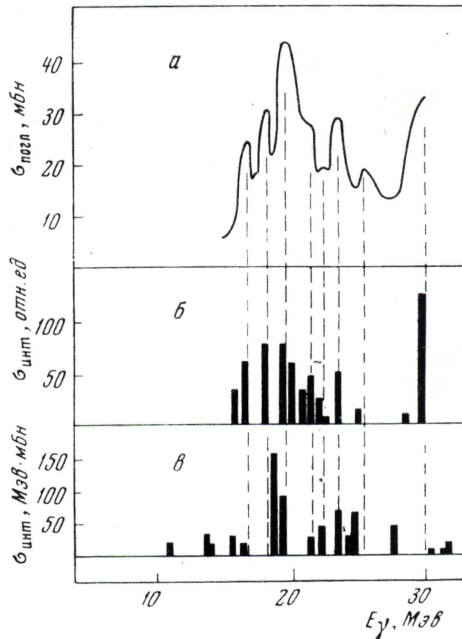
С развитием оболочечной модели ядра, указывающей на возможность существования тонкой структуры гигантских резонансов легких ядер, появилась необходимость экспериментальных данных о полных сечениях фотопоглощения ядер. Уникальная по своим возможностям методика, признанная во всем мире и основанная на измерении ослабления пучка гамма-квантов ядрами мишени, была предложена в ЛФЯР Л. Е. Лазаревой. Этой методикой было впервые в мире показано влияние оболочечных эффектов на форму и расщепление ГДР для большой группы легких ядер (Б. С. Долбилкин, В. И. Корин, Л. Е. Лазарева, Ф. А. Николаев и др.).

Кривая полного сечения фотопоглощения для ядра  $^{16}\text{O}$  стала классической и приводится во многих монографиях..



*Полное сечение фотопоглощения для ядра  $^{16}\text{O}$*

Для проведения этих измерений в лаборатории был создан девятиканальный магнитный парный спектрометр гамма-квантов, в котором впервые был применен метод цифрового кодирования информации.



Полное сечение фотопоглощения для ядра  $^{32}\text{S}$  в сравнении с теоретическими расчетами по модели оболочек (в) и с учетом связи фононов (б).

Высокое качество полученных результатов позволяет использовать их для проверки справедливости различных вариантов теоретических моделей дипольного резонанса. В качестве примера приведем сравнение экспериментального сечения поглощения ядром  $^{32}\text{S}$  (а) с теоретическими расчетами

В начале 70-х годов была показана применимость метода полного поглощения к средним и тяжелым ядрам, включая актиноиды (Л. Е. Лазарева, Г. М. Гуревич, В. М. Мазур,



Г. В. Солодухов и др.). Малость ядерного сечения в сравнении с полным (атомное + ядерное) потребовала применения высокоэффективных, (с эффективностью, близкой к 100%), и высокостабильных детекторов.

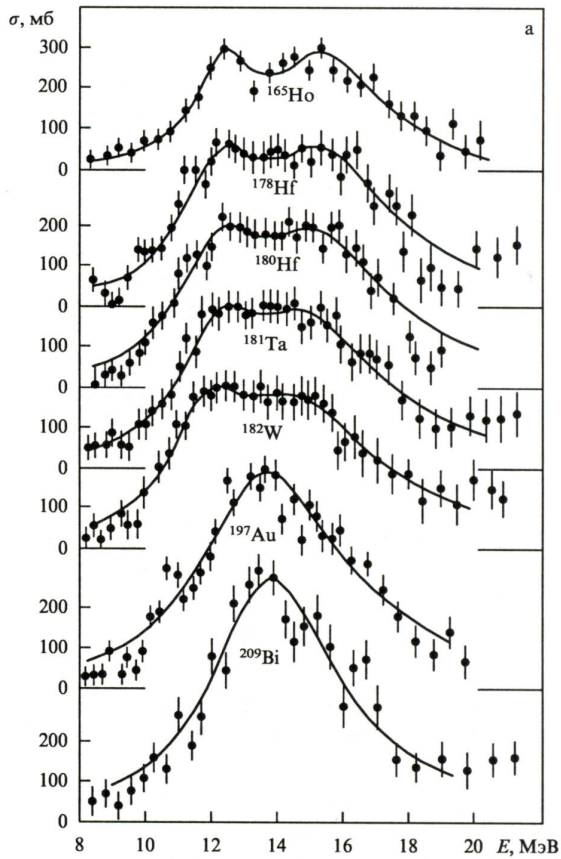
Впервые эксперименты были организованы в режиме *online* с компьютерным сбором и обработкой данных.

Отсутствие детальных данных, (несмотря на обширный материал, полученный в экспериментах на квазимонохроматических пучках фотонов в Сакле и Ливерморе), явилось причиной подробного изучения методом поглощения группы ядер с  $154 < A < 209$ . Измерения проводились на обогащенных изотопах.

Были выполнены измерения полных сечений поглощения для двух групп ядер:  $154 < A < 209$  и  $Z > 90$  (всего около 20 ядер).

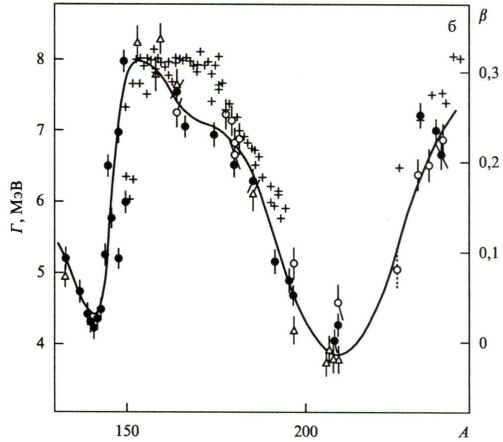
Известно, что для деформированных ядер ширина ГР должна увеличиваться за счет сдвига максимумов кривых Лоренца, который является функцией деформации. Интересным является тот факт, что, начиная с  $A \sim 160$  до  $A \sim 185$ , несмотря на то, что параметр деформации остается примерно постоянным, ширина резонансов для ядер в этом интервале  $A$  заметно уменьшается, что может быть объяснено уменьшением ширин отдельных лоренцевых кривых. Это обстоятельство, ранее не обсуждавшееся в литературе и не имевшее объяснений, может быть связано с заполнением деформированной нейтронной оболочки  $N=108$ , существование которой подтверждается анализом данных по низкоэнергетическим спектрам.

Известно, что для деформированных ядер ширина ГР должна увеличиваться за счет сдвига максимумов кривых Лоренца, который является функцией деформации. Интересным является тот факт, что, начиная с  $A \sim 160$  до  $A \sim 185$ , несмотря на то, что параметр деформации остается примерно постоянным, ширина резонансов для ядер в этом интервале  $A$  заметно уменьшается, что может быть объяснено уменьшением ширин отдельных лоренцевых кривых.

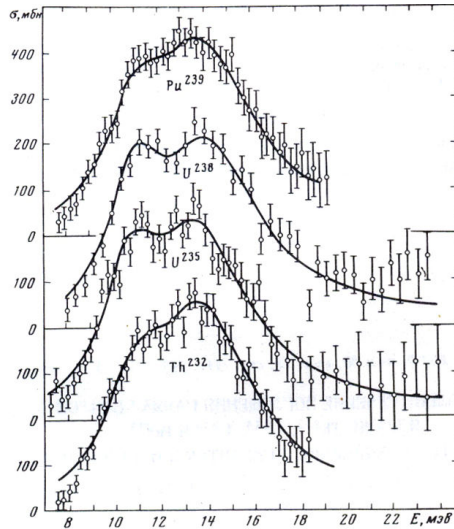


Полные сечения  
фотопоглощения ядер с  $154 < A < 209$

*Эволюция ширины ГР для этой группы ядер – зависимость от атомного веса – и параметры деформации*



*Полные сечения фотопоглощения ядер – актиноидов.*



Это обстоятельство, ранее не обсуждавшееся в литературе и не имевшее объяснений, может быть связано с заполнением деформированной нейтронной оболочки  $N=108$ , существование

которой подтверждается анализом данных по низкоэнергетическим спектрам.

Измерения, выполненные на ядрах актинидов  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ , позволили обнаружить наличие перехода от сферической к сильно деформированной форме ядер при  $Z \sim 90$ , аналогичного фазовому переходу при  $N \sim 90$ .

Аналогия наблюдаемых эффектов в ядрах этих двух областей служит подтверждением принципа зарядовой независимости ядерных сил. Полученные результаты являются уникальными до сих пор.

В рамках совместной работы ЛФЯР с INFN при участии Л. З. Джилавяна на ускорителе-тандеме в Legnaro (Италия) в обратных фотоядерных реакциях были извлечены параметры гигантского E1 резонанса, построенного на возбужденных состояниях ядер  $^{59}\text{Cu}$ , показано усредненное уширение резонанса, связанное с деформацией ядра при высоких значениях его спина.

С успехом развивались другие направления исследований. Среди них можно отметить экспериментальное изучение А-зависимости вероятности деления ядер антипротонами (совместный эксперимент ИЯИ РАН – Технический университет Гархинга - ЦЕРН). Показано, что эта зависимость имеет резкий минимум в районе серебра, что указало на универсальный характер процесса деления для всей периодической таблицы.

Важные экспериментальные результаты были получены при изучении прямого фотоэффекта (Б. С. Ратнер, Р. М. Осокина) в реакциях  $(\gamma, p)$ , а также неупругого рассеяния фотонов с заселением изомерных состояний ядер (Л. Е. Лазарева, О. В. Богданкевич, Ф. А. Николаев, Б. С. Долбилкин и, позже, Л. З. Джилавян, В. М. Мазур). Были измерены сечения реакции  $^{197}\text{Au}(\gamma, n)$  с заселением высокоспинового изомера, выделен вклад изовекторного E2 гигантского резонанса (Л. З. Джилавян, Л. Е. Лазарева, В. Н. Пономарев, А. А. Сорокин).

Из уникального научного оборудования, созданного в лаборатории, можно отметить установку НОРД-2 для низкотемпературной спиновой ориентации ядер, обладающую рекордными рабочими параметрами (Г. М. Гуревич) и

спектрометр быстрых нейтронов с дискриминацией по форме импульса (С. С. Вербицкий, А. М. Лапик, А. В. Русаков).

Среди оригинальных методик отметим также разработку и применение ядерных толстослойных фотоэмульсий для исследований на ядрах актинидов (Л. Е. Лазарева, Н. В. Никитина, Н. М. Куликова. совместно с лабораторией И. М. Франка и НИКФИ), при которой изучаемое вещество вводится непосредственно в фотоэмульсию. Авторские права защищены патентом.

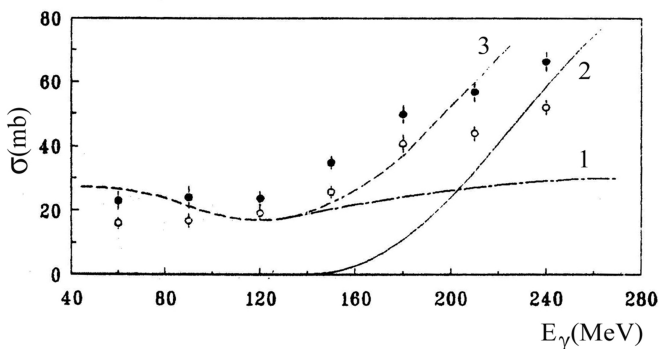
В лаборатории фотоядерных реакций ИЯИ РАН впервые в мире был получен ряд уникальных результатов по делению ядер электронами и фотонами (Л.Е.Лазарева, В.Г.Недорезов, Н.В.Никитина, А.С.Судов, В.Л.Кузнецов, В.А.Запелалов). В частности, данные по возбуждению спонтанно – делящихся изомеров под действием электронов остаются единственными в мире до сих пор. Эти работы стали возможны благодаря участию Радиевого института РАН (А.С.Кривохатский, Б.М.Александров), сумевшего изготовить мишени из ядер – актинидов мирового класса по многим параметрам, включая степень очистки изотопов.

В сотрудничестве с ХФТИ (Ю.Н.Ранюк, В.И.Нога, С.А.Пашук) на линейных ускорителях ЛУЭ-100 ИЯИ РАН, ЛУЭ-300 и 2000 ХФТИ измерены сечения деления ядер-актинидов  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  фотонами и электронами с энергией от порога до 2 ГэВ. Изучены механизмы деления этих ядер в области гигантского резонанса, до порога рождения пионов, и в области нуклонных резонансов. Показана доминирующая роль  $E1$  фотопоглощения в этих процессах и подтверждено согласие с теорией Вайцзекера – Вильямса в рамках однофотонного возбуждения ядер реальными и виртуальными фотонами.

Большой цикл работ был выполнен в содружестве с Институтом ядерной физики СО РАН. Инициатором этих работ были Л.Е.Лазарева и В.Г.Недорезов. Впервые в мире на пучке гамма-квантов, полученных методом обратного комптоновского рассеяния лазерных фотонов на электронах накопителя, были выполнены совпадательные эксперименты по делению ядер-актинидов фотонами. Особую роль здесь сыграл Г.Я.Кезерашвили, под руководством которого на накопителях электронов ВЭПП 3,4 был создан гамма пучок на основе аргонового и твердотельного

лазеров. От ИЯФ СО РАН участие в этих работах принимали Ю.М.Шатунов, А.А.Казаков, Г.М.Тумайкин, А.Н.Скринский.

Благодаря уникальным параметрам гамма - пучка (жесткий спектр, низкий уровень фона), удалось получить ряд уникальных результатов.



Сечения деления ядер  $^{238}\text{U}$  (светлые точки) и  $^{237}\text{Np}$  (тёмные точки)

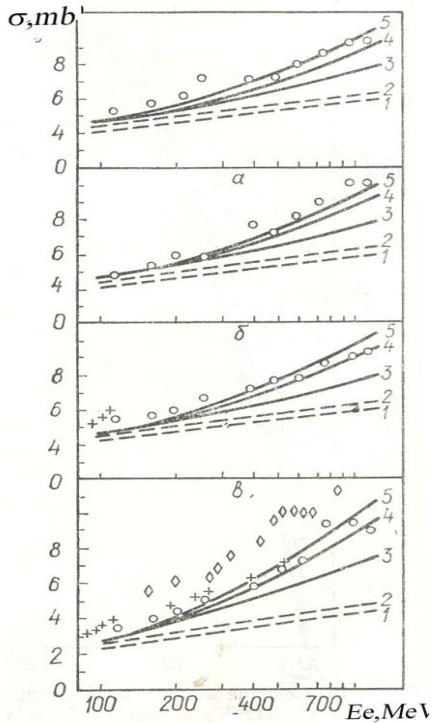
Проведенные эксперименты указали на превышение полных сечений фотопоглощения над «универсальной кривой» в области  $\Delta$  резонанса. Впоследствии этот результат был подтвержден группой Б.Бергмана на ускорителе СЕБАФ. Возможно, он открывает новое направление по изучению электромагнитных взаимодействий ядер при больших значениях  $Z^2\alpha$ , когда простая модель Вайцзекера – Вильямса с однофотонным обменом становится не применимой.

Под руководством С.М.Поликанова (ОИЯИ, Дубна) были измерены сечения возбуждения спонтанно делящихся изомеров формы  $^{240\text{mf}}\text{Am}$  и  $^{242\text{mf}}\text{Am}$  фотонами и электронами в области энергий от порога до 2 ГэВ. Установлен статистический механизм этих реакций и показано, что изомерные отношения для реакций с реальными и виртуальными фотонами зависят только от энергии возбуждения делящихся ядер и не зависят от типа налетающих частиц, что подтвердило гипотезу об изомерии формы указанных ядер и наличие у них двугорбого барьера деления.

Сечения возбуждения  
спонтанно-делящихся  
изомеров  $^{42m_f}\text{At}$   
электронами.

Кривыми показаны  
вклады различных  
механизмов:

1,2 – гигантские  
резонансы,  
3 – квазидейтронный,  
4,5 – фоторождение  
пионов.



Результаты по возбуждению изомеров формы фотонами высоких энергий непосредственно связаны с изучением механизмов фотопоглощения тяжелых ядер. При энергии фотонов выше порога рождения пионов их невозможно объяснить традиционными представлениям в рамках коллективных и статистических моделей. Это указывает на возможность существования новых механизмов возбуждения ядер, например, процессов с малой передачей энергии и импульса (расщепление фотона).

По этой тематике, начиная с 1971 года, опубликованы около ста печатных статей в реферируемых журналах, одна монография, обзор в УФН, защищены одна докторская и 6 кандидатских диссертаций.

В 1986 году лабораторию возглавил талантливый физик-теоретик, профессор Р. А. Эрамжян. Круг научных интересов Р. А. Эрамжяна был весьма широк. Тем не менее, можно отметить его особое отношение к фотоядерным реакциям. Здесь его интересы концентрировались вокруг предсказанного и экспериментально обнаруженного в НИИЯФ МГУ масштабного явления – конфигурационного расщепления гигантского дипольного резонанса. Р. А. Эрамжян одним из первых осознал универсальный характер этого явления.



*Р. А. Эрамжян*

Круг научных интересов Р. А. Эрамжяна был весьма широк. За время работы в ЛФЯР в содружестве с российскими и зарубежными коллегами он активно участвовал в развитии нескольких направлений физики ядра и элементарных частиц. Совместно с теоретиками из ОИЯИ (г. Дубна) Р. Майлингом, Я. Жофкой и В.Н. Фетисовым из ФИАН Р. А. Эрамжян изучал проблемы спектроскопии и свойства распадов гиперядер.

Вместе со своим учеником, сотрудником ЛФЯР Г.Г. Рыжих совместно с профессорами из НИИЯФ МГУ В.И. Кукулиным и Ю.М. Чувильским он принял активное участие в создании и разработке мультикластерной динамической модели с антисимметризацией для легких ядер. В рамках этой модели исследовались корреляционные и обменные эффекты электромагнитных формфакторов легких ядер. Модель активно использовалась при проведении расчетов наблюдаемых для различных ядерных реакций.

Исследование механизмов процессов обычного и радиационного захвата мюонов на легких ядрах имеет принципиальное значение для уточнения фундаментальных констант электрослабого взаимодействия. Проблема  $\mu$ -захвата легкими ядрами исследовались Р. А. Эрамжяном совместно с



группой из Дубны (Т.В. Тетерева, В.А. Кузьмин и др.) и с теоретиками из Казахстана (Н.А. Буркова, Т.Д. Каипов).

В то же время следует отметить особое отношение Р.А. Эрамжяна к фотоядерным реакциям. Здесь его интересы концентрировались вокруг предсказанного и экспериментально обнаруженного в НИИЯФ МГУ интересного эффекта, — конфигурационного расщепления гигантского дипольного резонанса. Р.А.Эрамжян одним из первых осознал универсальный характер этого явления. Он был активным участником в написании ряда обзоров по фотоядерным реакциям. В авторский коллектив, работавший над созданием этих работ, входили сотрудники из НИИЯФ МГУ В.Г. Неудачин, Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, В.Г. Шевченко и Н.П. Юдин. Кроме того Р.А. Эрамжян выступил как инициатор и активный участник проведения модельных расчетов наблюдаемых для реакций фоторасщепления легких ядер, в которых был также проанализирован и случай линейно поляризованных фотонов. Данные работы были выполнены совместно с теоретиками из Казахского Государственного Университета Н.А. Бурковой, М.А. Жусуповым и др..

Большое внимание Р.А. Эрамжян уделял изучению роли мезонных степеней свободы в реакциях с участием легких ядер. Под руководством Р.А. Эрамжяна теоретически анализировались фоторождение и рассеяние пионов на легких ядрах и исследовались поляризационные характеристики для указанных реакций при средних энергиях. Этот цикл работ выполнялся с участием теоретиков М. Гмитро, С.С. Камалова, Т.Д. Каипова, А.А. Чумбалова, работавших в ОИЯИ (г. Дубна).

За время работы в ИЯИ им было опубликовано свыше 60 работ совместно с теоретиками и экспериментаторами, работавшими в ИЯИ РАН, ОИЯИ (г. Дубна), ФИАН им. Лебедева, НИИЯФ МГУ, Казахского Государственного Университета, Харьковского Физико-Технического Института.

Исследование роли мезонных и нуклонных степеней свободы для реакций с участием нуклонов и легчайших ядер при средних энергиях является предметом исследования сотрудницы ЛФЯР В.Ю. Гришиной в течение последних 11 лет. Свидетельством важности этого направления для современной

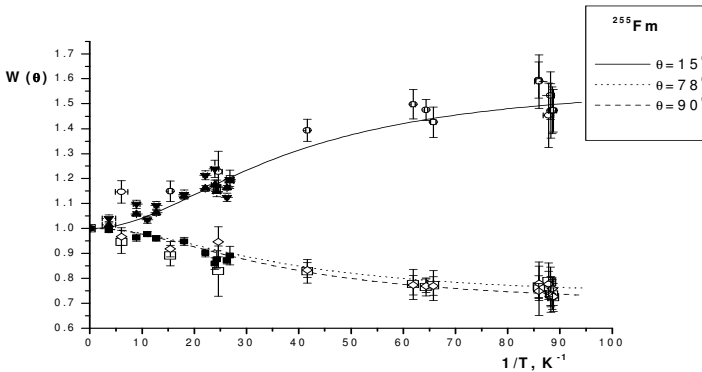
адронной физики является большое количество экспериментов по реакциям данного типа, проводимых на ускорителях мира. Это недавние эксперименты по фоторождению пионов и тяжелых мезонов  $\eta$ ,  $\eta'$ ,  $\omega$ ,  $\phi(1020)$  и каонов на нуклонах и легчайших ядрах в Джефферсоновской лаборатории (США) и на накопителе электронов ESRF (проект GRAAL в Гренобле (Франция)). Также существует обширная исследовательская программа по рождению пионов и тяжелых мезонов  $\eta$ ,  $\eta'$ ,  $\omega$ ,  $\phi(1020)$  и каонов на протонном пучке ускорителя COSY-Jülich (Германия), которая реализуется в течение последних пятнадцати лет.

Активное участие в подготовке экспериментов по рождению тяжелых векторных мезонов  $\omega$ ,  $\phi$ , и каон-антикаонных пар, пар  $\pi\eta$  и  $\pi\pi$  в протон-протонных и протон-дейтронных соударениях, а также анализ и интерпретация данных проводится сотрудницей ЛФЯР В.Ю. Гришиной в содружестве с ИТЭФ (Москва) и Институтом Ядерной Физики Исследовательского центра г. Юлиха (Германия). Исследовались механизмы указанных реакций. Выполнение теоретических расчетов для различных наблюдаемых, в частности полных и дифференциальных сечений образования каон-антикаонных пар, пар  $\pi\eta$  и  $\pi\pi$  в рамках модели эффективного лагранжиана было направлено на изучение свойств  $a_0(980)$  и  $f_0(980)$  мезонов в модах распада  $\pi\eta$  и  $\pi\pi$ , соответственно, а также в каон-антикаонной моде распада. Амплитудный анализ реакции  $pp \rightarrow d K^+ \text{ anti-}K^0$  и фитирование полученных данных вблизи порога содержит указания на доминирующую роль  $a_0(980)$  мезона для данной реакции. Анализировалось взаимодействие антикаонов с легчайшими ядрами. Предсказанный эффект взаимодействия антикаонов с легчайшими ядрами в конечном состоянии экспериментально подтвержден для реакций с образованием дейтрона в конце  $pp \rightarrow d K^+ \text{ anti-}K^0$  и  $pn \rightarrow d K^+ K^-$ .

Теоретическая оценка отношения выходов  $\phi(1020)$  и  $\omega$ -мезонов, сделанная для реакции  $pn \rightarrow d M$  подтвердилась на экспериментах, выполненных на ускорителе COSY- Jülich (Германия). Величина  $R = 4,2 \times 10^{-3}$ , предсказанная правилами Окубо – Цвейга – Изуки, превышена почти на порядок. Это может служить указанием на существование скрытой странности в нуклонах.

В рамках динамической модели с реджезованным нуклонным обменом и Кварк-Глюонной Струнной Модели анализировалась реакция фоторасщепления дейтрона. Предсказанный эффект асимметрии вперед-назад для дифференциального сечения, связанный с эффектом интерференции изовекторной и изоскалярной амплитуд подтвержден экспериментом, выполненном на ускорителе в Джефферсоновской лаборатории (США). В рамках динамической модели с реджезованным обменом  $K^*$ – мезоном одновременно анализировались реакции  $\gamma p \rightarrow K^+ \Lambda$  и  $\pi^- p \rightarrow K^0 \Lambda$ . Модель описывает существующие данные для области  $-t$  не более 1 ГэВ в широком диапазоне энергий.

Поляризационные исследования традиционно составляли и составляют важную часть программы работы ЛФЯР. В лаборатории разработаны и созданы установки для спиновой ориентации атомных ядер (НОРД и НОРД-2). Установка НОРД-2 обладает рекордными на мировом уровне рабочими характеристиками (базовая температура ниже 10 мК, магнитное поле 7 Т) и позволяет ориентировать ядра всей периодической системы. Проводятся исследования угловых распределений заряженных фрагментов, испускаемых ориентированными ядрами трансурановой области. Цель экспериментов – изучение соотношения между угловой анизотропией альфа-распада и ядерной деформацией. Измерены угловые распределения альфа-частиц, испускаемых ориентированными ядрами  $^{241, 243}\text{Am}$ ,  $^{253, 254}\text{Es}$ ,  $^{255}\text{Fm}$  в диапазоне температур 10–1000 мК (в качестве примера на рисунке приведены результаты для  $^{255}\text{Fm}$ ). Путем анализа экспериментальных данных получены значения параметров углового распределения альфа-частиц, характеризующие амплитуды и фазы альфа-частичных волн с разными орбитальными моментами ( $L=0, 2, 4$ ). Определена величина сверхтонкого магнитного поля на ядрах Es в матрице железа. Впервые в мире получено значение ядерного магнитного момента  $^{254}\text{Es}$ .



Угловая анизотропия альфа-частиц, испускаемых ориентированными ядрами  $^{241,243}\text{Am}$ ,  $^{253,254}\text{Es}$ ,  $^{255}\text{Fm}$

С 1999 года по настоящее время лабораторию фотоядерных реакций возглавляет доктор физ.-мат. наук, профессор В. Г. Недорезов. В этот период значительно расширилось активное участие сотрудников лаборатории в ведущих российских и международных коллаборациях, занимающихся исследованиями по физике электромагнитных взаимодействий, включая Харьковский Физико-Технический институт, Новосибирский Институт ядерной физики СО РАН, ОИЯИ, РНЦ «Курчатовский институт».

На накопителе электронов ESRF (проект GRAAL в Гренобле (Франция)) проведены исследования фоторождения тяжелых мезонов на пучке поляризованных меченых фотонов. В рамках этой коллаборации в течение последних 10 лет сотрудниками ЛФЯР (В.Г.Недорезов, А.А.Туринге А.М.Лапик, Н.В.Руднев, А.Н.Мушкаренко, А.С.Игнатов) исследованы сечения и спиновые асимметрии процессов фоторождения пионов и тяжелых мезонов на нуклонах и ядрах в области нуклонных резонансов (500 – 1500 МэВ). Эксперимент выполнен на пучке обратно рассеянных комптоновских фотонов на накопителе электронов с энергией 6 ГэВ (Гренобль, Франция). Основное внимание в этих

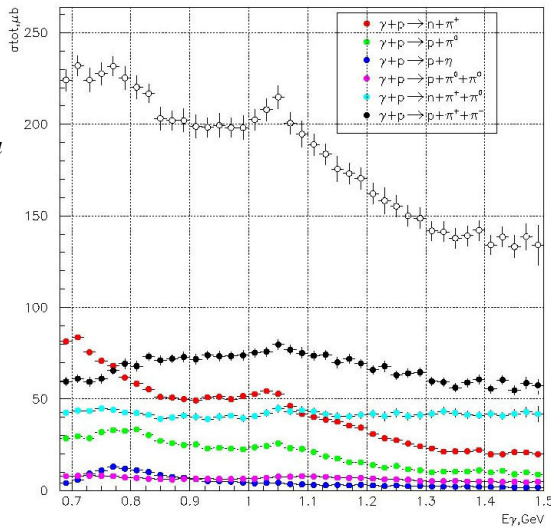
экспериментах было уделено изучению поляризационных эффектов в фоторождении мезонов на протоне и нейтроне.

Российская сторона продолжила изучение полных и парциальных сечений фотопоглощения на нуклонах с использованием протонной и дейтронной мишеней. В результате были получены новые экспериментальные данные по полным сечениям фотопоглощения на нейтроне, которые указывают на идентичность полных сечений фотопоглощения на протоне и нейтроне в области нуклонных резонансов. Это приводит к уточнению интегральных сечений фотопоглощения ядер, новой интерпретации "универсальной кривой", необходимости уточнения правил сумм и другим фундаментальным следствиям по проблеме электромагнитных взаимодействий ядер. Новые данные по полным сечениям на протоне и нейтроне позволили по-новому взглянуть на результаты, полученные ранее в Новосибирске для тяжелых ядер и предоставили большую информацию для дальнейших исследований в этой области.

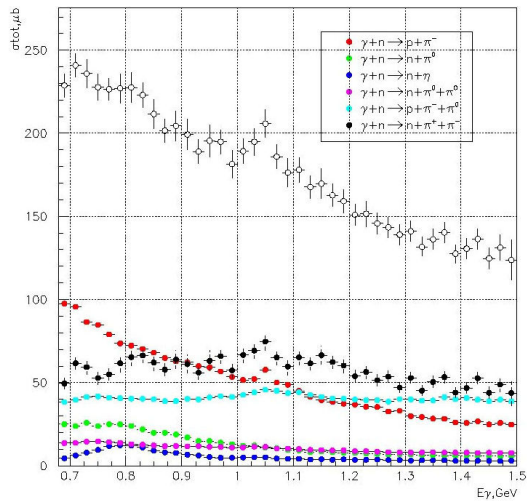
На рисунках показаны полные сечения фотопоглощения на протоне и нейтроне в области энергий от 600 до 1500 МэВ. Они существенно уточняют имевшиеся ранее данные (для нейтрона были только данные одной работы, выполненной в 1971 году). При этом для улучшения экспериментальной точности данные GRAAL получены двумя независимыми методами (вычитание фона и суммирование парциальных сечений). Видно, что в области энергий выше  $\Delta$  – резонанса сечения на протоне и нейтроне практически совпадают, что существенно меняет представления о механизмах фотонуклонных реакций в области нуклонных резонансов.

Особый интерес представляет тот факт, что полные сечения для протона и нейтрона оказались одинаковы, несмотря на различия в парциальных сечениях. Возможно, это указывает на существование универсальных «входных состояний», одинаковых по вероятности образования для протона и нейтрона. Кроме того, полученные данные позволяют предположить, что и на свободном нейтроне сечение полного поглощения не отличается от сечения на свободном протоне, что является принципиально новым результатом.

Полное сечение  
фотопоглощения  
на связанном  
протоне  
(дейтронная  
мишень)



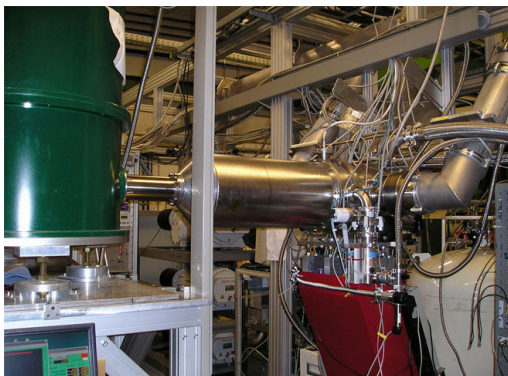
Полное сечение  
фотопоглощения  
на нейтроне  
(дейтронная  
мишень)



В последние годы к традиционным исследованиям фотоядерных реакций добавилось изучение возбуждения ядер под действием сильных импульсных электромагнитных полей релятивистских ионов (проект ELISE/NUSTAR/FAIR, GSI, Германия).

Сотрудники лаборатории участвуют в международной коллаборации Дельта-Сигма, занимающейся исследованием спиновых эффектов в нуклон-нуклонном рассеянии. Это отражает общую тенденцию к концентрации усилий на решение актуальных проблем.

С 1990 года лаборатория фотоядерных реакций является участником международной коллаборации A2, работающей на пучке меченых фотонов на микротроне непрерывного действия МАМI университета им. Гутенберга (Майнц, ФРГ). На первом этапе основные усилия были направлены на изучение свойств протона в области  $\Delta$ -резонанса. На энергиях фотонов от 200 до 800 МэВ исследовались упругое рассеяние фотонов, различные реакции фоторождения и полное фотопоглощение (Б. С. Долбилкин, А. С. Забродин, Р. Л. Кондратьев, В. П. Лисин, А. Л. Полонский, И. В. Преображенский).



*Поляризованная мишень с «замороженным» спином», установленная в 2010 году на пучке меченых фотонов в Майнце.*

В эксперименте LARA была удвоена мировая база данных по комптоновскому рассеянию на протоне, получено значение обратной спиновой поляризуемости протона и ряд параметров  $\Delta$ -резонанса (Р. Л. Кондратьев, В. П. Лисин). В эксперименте на детекторе TAPS – вошедшие в таблицы PDG величины электрической и магнитной поляризуемостей протона (А. Л. Полонский). В 1998 – 2003 г.г. на базе коллаборации A2 была образована коллаборация GDH для экспериментальной проверки правила сумм Герасимова – Дрелла - Хирна (Gerasimov-Drell-Hearn sum rule). Это правило связывает статические характеристики частицы-мишени с интегральной разностью сечений полного поглощения при параллельной и антипараллельной ориентации спинов частицы и фотона. Некоторые результаты экспериментов по рассеянию электронов на протоне и дейтроне заставили усомниться в справедливости правила сумм ГДХ, несмотря на то, что для его вывода использовались лишь самые фундаментальные физические принципы. Эта ситуация сделала экспериментальную проверку правила сумм ГДХ весьма актуальной. Ранее дважды поляризационные эксперименты (поляризованы как мишень, так и пучок фотонов) не проводились ввиду значительных технических трудностей. В результате в большом диапазоне энергий (от 200 до 2900 МэВ) были впервые измерены спирально зависимые сечение полного фотопоглощения и дифференциальные сечения основных парциальных реакций фоторождения на протоне и дейтроне и впервые экспериментально подтверждена справедливость правила сумм ГДХ. Заметный вклад в эти эксперименты внесли сотрудники ЛФЯР Р. Л. Кондратьев, В. П. Лисин, И. В.Преображенский.

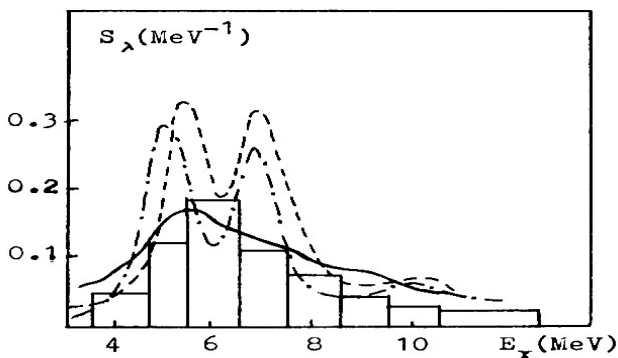
В связи с увеличением энергии ускорителя МАМІ до 1600 МэВ (МАМІ-С) было существенно обновлено экспериментальное оборудование коллаборации. Ведутся эксперименты с циркулярно и линейно поляризованными фотонами на продольно и поперечно поляризованных малонуклонных мишенях. Значительный вклад в создание и эксплуатацию детекторов, криогенных и поляризованных мишеней, проведение и планирование экспериментов и обработку данных внесли и вносят сотрудники ЛФЯР Г. М. Гуревич, Р. Л. Кондратьев, В. П. Лисин, А. Л. Полонский и А. М. Лапик.



Практически с момента создания лаборатории в ней велись исследования различных аспектов теории фотоядерных реакций. В шестидесятые годы в содружестве с фотомезонной лабораторией ФИАН (А. М. Балдин, С. Ф. Семенко) Б. А. Тулуповым велись исследования по изучению высказанной А. М. Балдиным возможности оптической анизотропии атомных ядер, которые способствовали пониманию механизма образования гигантского дипольного резонанса в деформированных и переходных ядрах и связанных с ним процессов: фотопоглощение, рассеяние фотонов на поляризованных и ориентированных ядрах и т.п.

Позднее в содружестве с МИФИ (М. Г. Урин и др.) Б. А. Тулуповым был создан метод для исследования одноквазичастичных силовых функций в ядрах, имеющих сильные коллективные колебательные состояния – обобщенный метод связанных каналов (ОМСК). Результаты, полученные в рамках этого метода, значительно лучше совпадают с соответствующими экспериментальными данными, чем результаты известной квазичастиочнофононной модели (КЧФМ), созданной в ОИЯИ. Приведенный ниже пример иллюстрирует возможности обобщенного метода связанных каналов.

В настоящее время этим же содружеством развивается полумикроскопический метод для описания простейших фотоядерных реакций: полных сечений фотопоглощения, одночастичных  $(\gamma, N)$  и  $(N, \gamma)$  реакций и связанных с ними процессов. Полученные результаты хорошо описывают соответствующие экспериментальные данные.



Вычисленная в рамках ОМСК силовая функция дырочного нейтронного состояния  $1g_{9/2}$  в изотопе  $^{123}\text{Te}$  (сплошная линия) в сравнении с экспериментальными данными (гистограмма) и результатами расчетов по КЧФМ (штриховая кривая); штрихпунктирная кривая – расчет по ОМСК в приближении, соответствующем КЧФМ

Среди методических работ, выполненных в ЛФЯР, следует отметить разработку инжектора в синхротрон С-25 на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8-5 на энергию 8 МэВ. С использованием его пучка впервые в мире была разработана и осуществлена оригинальная система многооборотной инжекции в кольцевой ускоритель при высокой энергии инжектируемых электронов. Это потребовало использования магнитно-токового канала для ввода частиц в камеру ускорителя и учета связанных бетатронных колебаний для увеличения длительности инжекции, что позволило существенно увеличить интенсивность пучка синхротрона (А. М. Громов). В настоящее время на базе ускорителя ЛУЭ-8-5 ведутся прикладные работы совместно с отраслевыми институтами.

Большой опыт, накопленный сотрудниками лаборатории, в детектировании различных видов излучения, глубокое понимание физики происходящих в них процессов, владение математическим аппаратом, необходимым для анализа полученных данных,

позволяют с успехом применять эти знания в прикладных задачах самого широкого профиля. Среди них можно отметить следующие:

– Разработка для использования в медицинской практике детекторов рентгеновского излучения, позволяющих на порядок снизить радиационную нагрузку на пациента при рентгенографических исследованиях. Накоплен значительный опыт применения такой аппаратуры. Разработка защищена патентом РФ.

– Экспериментальные исследования, ведущиеся в интересах и совместно с предприятиями Росатома, направленные на применение радиационной методики для повышения эффективности извлечения урана из трудно вскрываемых руд.

– Изучение возможностей наработки на компактных импульсных разрезных микротронах на энергию электронов ~50 МэВ радиоизотопов для медицинских целей. Сотрудники лаборатории активно участвуют в разработке методики и аппаратуры для обнаружения несанкционированного перемещения взрывчатых и делящихся веществ.

По результатам работ ЛФЯР опубликованы сотни научных статей, монографии, обзоры в ведущих российских и зарубежных изданиях.

В настоящее время в штате лаборатории находится 29 человек, в том числе 19 научных сотрудников, среди них 11 кандидатов и 3 доктора физико-математических наук. За последние 5 лет в лаборатории успешно прошли обучение 6 студентов и 4 аспиранта.

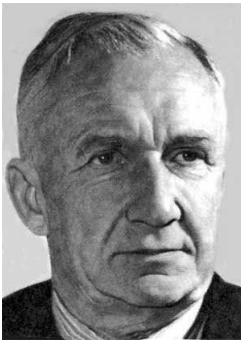
Подробная информация о результатах работы ЛФЯР, включая публикации за последние годы, находится на сайте лаборатории (см.сайт [www.inr.ru](http://www.inr.ru)) .

**ГЛАВА 4.****А.С.Белоусов, Б.Б.Говорков, А.И.Лебедев, С.П.Харламов.  
Исследования фотомезонных процессов в ФИАНе.**

*Авторы этой главы – сотрудники Отдела физики высоких энергий Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН, специалисты по изучению электромагнитных взаимодействий адронов и ядер.*

**Введение**

В начале прошлого столетия после открытия атомных ядер было обнаружено, что они сильно взаимодействуют друг с другом. При рассмотрении природы ядерных сил И.Е.Тамм в 1934 г. разработал гипотезу об их обменной природе (обмен электроном и нейтрино между нуклонами).



*Академик И.Е.Тамм*



*Академик В.И.Векслер*

В 1935 г японский физик Х.Юкава использовал эту идею, и для объяснения большой величины ядерных сил и их короткодействующего характера сформулировал гипотезу о существовании иного промежуточного состояния ( $\pi$ -мезона). Поиски мезонов (их в то время называли квантами сильных взаимодействий) сначала велись в космических лучах, а затем на ускорителях. Заряженные  $\pi$ -мезоны были открыты в 1947 г. (масса  $m \sim 139 \text{ МэВ}/c^2$ ), а нейтральные ( $\pi^0$ ) в 1950 г. ( $m \sim 135 \text{ МэВ}/c^2$ ).

Начались интенсивные исследования их сильных взаимодействий с нуклонами и ядрами.

Вместе с тем было ясно, что уникальную информацию о ядерных силах может дать изучение электромагнитных процессов с участием мезонов, нуклонов и ядер, поскольку электромагнитное поле, являющееся переносчиком электромагнитного взаимодействия, хорошо изучено и описывается квантовой электродинамикой вплоть до малых расстояний  $\sim 10^{-16}$  см. Благодаря малости константы электромагнитного взаимодействия  $\alpha \cong 1/137$  фотоны (реальные и виртуальные) проникают внутрь ядер и адронов и служат надежным щупом для изучения их структуры. Кроме того, в электромагнитных процессах адронные фоны значительно слабее, чем в процессах сильных взаимодействий, что облегчает проведение экспериментов.

Широкие исследования электромагнитных взаимодействий ядер и адронов стали проводиться после разработки В.И.Векслером принципа автофазировки в циклических резонансных ускорителях, который был зарегистрирован как открытие. В 1951 г. В.И.Векслер получил Государственную премию СССР за изобретение нового принципа ускорения частиц. Работы по созданию электронных синхротронов велись Эталонной лабораторией, который руководил В.И.Векслер, а его заместителем был П.А.Черенков.



*Академик П.А.Черенков*

*Академик В.И.Гольданский*

Эти работы сначала проводились в старом здании ФИАН на Миусской площади, а затем были перенесены на территорию питомника растений ботанического сада на окраине тогдашней Москвы недалеко от Калужской заставы. Тогда эта площадка

получила условное название «Питомник». В январе 1948 г. начал работать синхротрон С-3 на энергию 30 МэВ, на котором была реализована широкая программа изучения фотоядерных реакций. В 1949 г. коллективом Эталонной лаборатории ФИАН был запущен второй синхротрон (С-25) на энергию 250 МэВ. За проектирование и сооружение синхротрона С-25 П.А.Черенков с коллективом сотрудников получили в 1952 г. Государственную премию СССР.

Сразу после запуска были начаты поиски реакций образования  $\pi$ -мезонов фотонами тормозного излучения ускоренных электронов. Актуальность изучения фотомезонных процессов возросла многократно. М.А.Марков, перешедший из теоретического отдела ФИАН в Эталонную лабораторию и ставший руководителем группы теоретиков лаборатории, подчеркивал, что для выяснения природы ядерных сил и разработки теории сильных взаимодействий исключительную важность имеют экспериментальные работы по изучению процессов с участием фотонов и адронов и соответствующие теоретические исследования.



*Академики М.А.Марков  
и А.М.Балдин*

Директора ФИАН С.И.Вавилов и Д.В.Скобельцин горячо поддерживали развитие нового для института направления исследований электромагнитных свойств ядер и частиц.

В.И.Векслер, руководитель Эталонной лаборатории, весьма остро поставил вопрос об интенсификации поисков процессов образования  $\pi$ -мезонов фотонами. Был даже учрежден приз для тех, кто первыми выявят мезоны, рожденные пучком фотонов. И вот в декабре 1949 г. группой сотрудников (А.П.Комар, В.Г.Ларионова, В.Н.Лихачев) были обнаружены треки заряженных  $\pi$ -мезонов в фотоэмульсии, облученной пучком фотонов с энергией

230 МэВ. К сожалению, из-за существовавшей в то время секретности исследований в области ядерной физики результаты этой работы не были опубликованы в открытой печати. Примерно в это же время процесс фоторождения мезонов был зарегистрирован в Радиационной лаборатории им. Е.О.Лоуренса (Беркли, США) на синхротроне с энергией электронов 340 МэВ.

В ФИАНе был развернут широкий фронт как теоретических, так и экспериментальных исследований процессов фотообразования  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  и  $\pi^0$ -мезонов на нуклонах и ядрах, комптоновского рассеяния на протонах как ниже, так и выше порога рождения мезонов, реакций фоторасщепления ядер. Велись также работы по ускорительной тематике. Такой комплексный подход обеспечил быстрое получение новых результатов, которые активно обсуждались на научных семинарах, в которых активно участвовали В.И.Векслер, М.А.Марков, А.М.Балдин, П.А.Черенков, В.И.Гольданский, И.Я.Померанчук, Ф.Б.Мигдал и др. Семинары проходили в конференц-зале Эталонной лаборатории на территории «Питомника» (теперь это территория Института Ядерных Исследований РАН).

В.И.Гольданский, который в 1952 г перешел из Института Химической Физики в лабораторию В.И.Векслера, имел уже опыт работы в области ядерной физики в Дубне. Он проработал в ФИАНе 9 лет и сыграл важную роль в развитии исследований на «Питомнике».

Работы на ускорителе С-25 велись круглосуточно, а борьба между группами за «пучковое время» была весьма острой. Несмотря на это наш коллектив был очень дружным и работал, и отдыхал вместе. В обеденный перерыв велись «бои» на волейбольной площадке, В.И.Векслер любил ездить с молодежью за город и даже водил сотрудников в поход на Кавказ.

В ФИАНе были развёрнуты теоретические и экспериментальные исследования процессов фоторождения мезонов на нуклонах

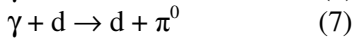
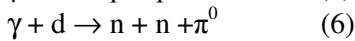
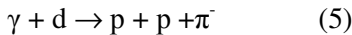
$$\gamma + p \rightarrow \pi^0 + p \quad (1)$$

$$\gamma + n \rightarrow \pi^0 + n \quad (2)$$

$$\gamma + p \rightarrow \pi^+ + n \quad (3)$$

$$\gamma + n \rightarrow \pi^- + p \quad (4)$$

Из-за отсутствия свободных нейтронов реакции (2) и (4) изучались на слабо связанных нейтронах в дейтерии



### **Исследования по теории фотомезонных процессов.**

Теоретические исследования процессов фоторождения мезонов начали вести с 1950 г. А.М.Балдин и В.В.Михайлов, которые ранее моделировали движения частиц в ускорителях (в связи с созданием синхрофазотрона в Дубне). Их вдохновляла возможность проверки предсказаний теоретико-возмущенческих подходов к рассмотрению электромагнитных процессов с участием адронов. В рамках теории возмущений по электромагнитному и сильному взаимодействиям были вычислены сечения процессов фоторождения мезонов с учетом аномальных магнитных моментов нуклонов и отдачи нуклонов. Из-за большой величины константы сильного  $\pi N$ -взаимодействия  $f \sim 1$  нельзя было надеяться на полный успех такого подхода. Тем не менее, полюсное слагаемое в амплитуде процессов (3) и (4), которое отражает явления запаздывания взаимодействия, достаточно хорошо предсказывает отношение сечений процессов (3) и (4), а в области энергий вблизи порога рождения мезонов предсказывает преобладание сечений рождения заряженных мезонов по сравнению с нейтральными.

Эти предсказания получили обоснование в подходе на основе теории дисперсионных соотношений, сформулированных для процессов (1-4) А.А.Логуновым, Л.Д.Соловьёвым и А.Н.Тавхелидзе (ОИЯИ). Расчеты амплитуд и сечений в области пороговых энергий были проведены А.М.Балдиным и Б.Б.Говорковым, а для более широкой области энергий А.И.Лебедевым и С.П.Харламовым, которые также рассмотрели поляризационные наблюдаемые для процессов фоторождения. Подход к вычислению амплитуд фоторождения мезонов на основе метода паде-приближений был развит А.И.Лебедевым, Б.В.Мангазеевым и Л.В.Фильковым. А.М.Балдин и В.А.Петрунькин провели детальный теоретический анализ



фундаментальных свойств нуклонов: их поляризуемостей, а А.И.Львов и В.А.Петрунькин указали на необходимость корректного учета вклада обмена  $\pi^0$ -мезоном в амплитуду процесса

$\gamma + p \rightarrow \gamma + p$ . С.Б.Герасимов получил правило сумм, связывающее аномальные магнитные моменты нуклонов с полными сечениями образования мезонов фотонами. Л.В.Фильков развил на основе двойных дисперсионных соотношений теорию комптоновского рассеяния на протоне, а В.А.Царев - теорию фоторождения странных частиц на нуклонах.

С целью извлечения сведений о фоторождении на свободных нейтронах из данных по реакциям (5) и (6) А.М.Балдин, В.В.Михайлов и А.И.Лебедев разработали в рамках импульсного приближения теорию фотообразования пионов на дейтронах с учетом ядерных и кулоновских взаимодействий частиц в конечном состоянии. Сечения процессов (5), (6), (7) были выражены через известные параметры нуклон-нуклонного рассеяния, что позволило избежать при расчетах использование модельных представлений об нуклон-нуклонных силах.

При теоретическом рассмотрении реакций фоторождения мезонов на ядрах было показано, что Z-зависимость сечения фоторождения  $\pi^-$ -мезонов сильно зависит от кулоновского притяжения мезонов и его учет приводит к удовлетворительному описанию данных опыта. А.И.Лебедевым, Ю.С.Полем, В.А.Трясучевым, В.И.Фетисовым и В.А.Царевым были рассмотрены реакции фоторождения  $\pi^0$ -мезонов и  $\eta$ -мезонов на легких ядрах. Показано, что изучение парциальных реакций фоторождения с переходом ядра в определенное возбужденное состояние  $A^* \gamma + A \rightarrow \pi^0(\eta) + A^*$  может дать новые сведения об амплитудах фоторождения на свободных нуклонах и о строении ядер. А.И.Лебедев и В.А.Трясучев рассчитали сечения образования  $\eta$ -ядер фотонами, а А.И.Львов рассмотрел спектральные функции для этих ядер.

## Эксперименты на синхротроне С-25

### 1) Проверка изотопической инвариантности в процессе фоторождения нейтральных $\pi$ -мезонов на дейтерии.

В одном из первых экспериментов (1955г.), выполненных с использованием электронной методики, сотрудники ФИАН А.С.Белоусов, А.В.Куценко и Е.И.Тамм исследовали реакции упругого  $\gamma+d \rightarrow d+\pi^0$  (7) и неупругого  $\gamma+d \rightarrow p+n+\pi^0$  (6) фоторождения  $\pi^0$ -мезонов на дейтерии с целью проверки гипотезы изотопической инвариантности. Одним из наиболее общих следствий изотопической инвариантности является различие знаков констант взаимодействия протона  $g_p$  и нейтрона  $g_n$  с нейтральным мезонным полем.

Основываясь на общих положениях квантовой механики, А.М.Балдин и В.В.Михайлов показали, что поперечное сечение упругого процесса сильно зависит от относительного знака  $g_n$  и  $g_p$ . Если  $g_n = -g_p$ , то сечение этого

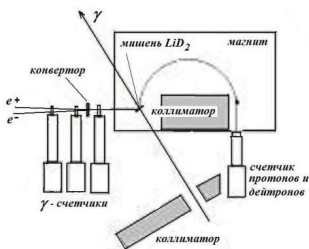


Схема установки для регистрации процессов фоторождения  $\pi^0$ -мезонов на дейтерии

процесса примерно в 40 раз больше, чем в случае  $g_n = g_p$ . Кроме того, при  $g_n = -g_p$  сечения реакций (6) и (7) сравнимы по величине. Схема эксперимента показана на рисунке.

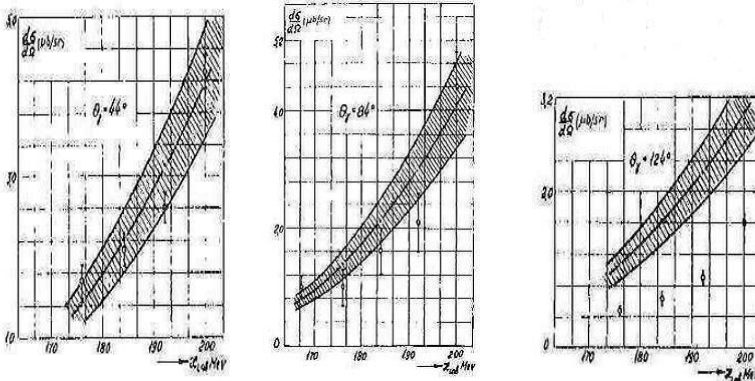
Работа проводилась на пучке тормозного излучения с максимальной энергией 250 МэВ на мишени из  $\text{LiD}_2$ . Для регистрации протонов и дейтронов использовался сцинтилляционный счетчик. Гамма кванты от распада  $\pi^0$ -мезонов регистрировались телескопом, состоящим из сцинтилляционных счетчиков со свинцовым конвертором. Идея использовать магнитное поле для разделения протонов и дейтронов была высказана В.И.Векслером. Она заключалась в измерении

времени пролета в магнитном поле частиц с одинаковым импульсом. Процесс измерения сводился к регистрации числа протонов и дейтронов в зависимости от времени задержки импульса от стартового сигнала гамма телескопа, регистрирующего гамма квант от распада  $\pi^0$ -мезона.

Эксперимент показал, что в процессе фоторождения на дейтерии в конечном состоянии дейтроны образуются примерно с такой же вероятностью, как и протоны. Этот результат подтвердил изотопическую инвариантность в пион-нуклонных взаимодействиях.

2) *Измерение дифференциальных сечений процессов фоторождения  $\pi^0$ -мезонов на протоне и дейтроне.*

Работа выполнена сотрудниками А.С.Белоусовым, А.В.Куценко, А.И.Лебедевым, С.В.Русаковым, Е.И.Таммом, Л.С.Татаринской и П.Н. Шарейко. При измерении сечений процессов  $\gamma+d \rightarrow d(pn)+\pi^0$  и  $\gamma+p \rightarrow p+\pi^0$  использовалась криогенная мишень, которая заполнялась попеременно жидким водородом или жидким дейтерием. Фотоны от распада  $\pi^0$ -мезонов, образовавшихся тормозными  $\gamma$ -квантами с энергиями от 170 МэВ до 210 МэВ, регистрировались под углами  $44^\circ$ ,  $84^\circ$  и  $124^\circ$ . На рисунке приведены полученные результаты для дейтерия. Кривыми показаны сечения, вычисленные в рамках импульсного приближения. Заштрихованные области указывают на неопределенность расчетов. Экспериментальные значения для углов  $\theta < 90^\circ$  удовлетворительно согласуются с результатами расчетов, а при углах  $\theta > 90^\circ$  заметно меньше расчетных. Вычисления показывают, что относительная роль упругого и неупругого процессов существенно зависит от угла вылета мезонов, и об относительной их роли можно судить по измеренному соотношению сечений на дейтерии и водороде. Полученные в работе отношения выходов гамма квантов от распада  $\pi^0$ -мезонов для дейтерия и водорода оказались равными 4 для углов  $44^\circ$  и  $84^\circ$  и 2 для угла  $124^\circ$ .



Выходы фотонов от распада  $\pi^0$  в реакции  $\gamma + d \rightarrow d(p\pi) + \pi^0$

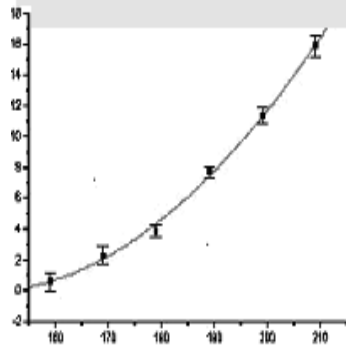
Таким образом, результаты эксперимента указывают на преобладание упругого фоторождения в околопороговой области энергий при углах вылета до  $90^\circ$ .

### 3) Исследование фоторождения $\pi^0$ -мезонов на ядре ${}^4\text{He}$ .

А.С.Белоусов, С.В.Русаков, Е.И.Тамм, Л.С.Татаринская, В.А.Царев и П.Н.Шарейко изучали процесс  $\gamma + {}^4\text{He} \rightarrow \pi^0 + X$  в околопороговой области энергий. Волновые функции ядра  ${}^4\text{He}$  достаточно хорошо известны. Ядро имеет нулевой спин, и у него отсутствуют возбужденные состояния. Теоретическое рассмотрение процесса указывает на то, что в этой области энергий основной вклад в сечение дает упругий процесс  $\gamma + {}^4\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + \pi^0$ . Для расчета дифференциального сечения упругого процесса В.А.Царевым было использовано обобщенное импульсное приближение. Эксперимент по изучению фоторождения  $\pi^0$ -мезонов на  ${}^4\text{He}$  проводился с использованием криогенной мишени. Гамма-квант от распада  $\pi^0$ -мезонов регистрировался телескопом сцинтилляционных счетчиков.

Обработка результатов измерений позволила получить дифференциальные и полные сечения фоторождения  $\pi^0$ -мезонов на  ${}^4\text{He}$  в интервале энергий 155–205 МэВ. Полные сечения  $\sigma(\text{He})$  приведены на рисунке.

Полное поперечное сечение фоторождения  $\pi^0$  мезонов на  ${}^4\text{He}$ .



Сопоставление полученных для ядра  ${}^4\text{He}$  результатов с сечениями фоторождения  $\pi^0$ -мезонов для водороде  $\sigma(\text{p})$  показывает, что отношение  $\sigma(\text{He})/\sigma(\text{p})$  увеличивается с уменьшением энергии фотонов  $E_\gamma$  (см. Таблицу). Это указывает на существенный вклад процесса упругого

$E_\gamma$ ; МэВ	$\sigma(\text{He})/\sigma(\text{p})$
185	$7.7 \pm 0.4$
195	$6.3 \pm 0.3$
205	$5.5 \pm 0.3$

фоторождения  $\pi^0$ -мезонов в полное сечение, что согласуется с теоретическими предсказаниями.

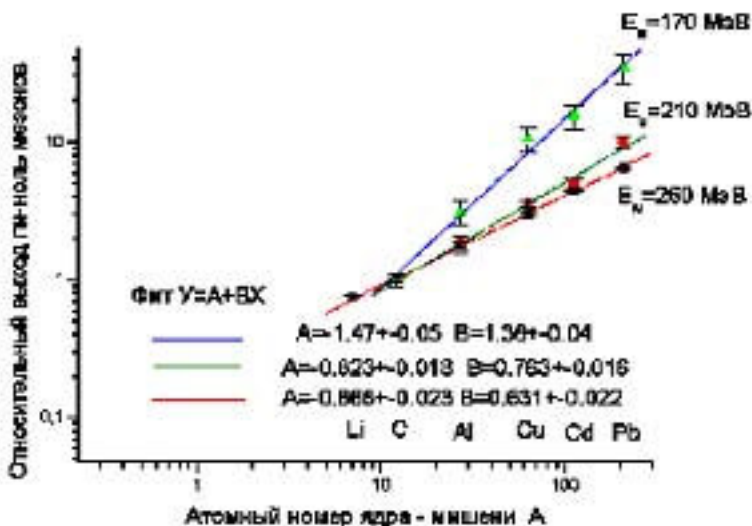
#### 4) Фоторождение $\pi^0$ -мезонов на ядрах.

А.С.Белоусов, С.В.Русаков, Е.И.Тамм и Е.В.Шитов провели исследование фоторождения  $\pi^0$ -мезонов на ядрах при энергиях вблизи порога их образования.

Данные по фоторождению  $\pi^0$ -мезонов на ядрах при энергиях фотовозбуждения  $\Delta_{33}(1232)$  резонанса показывают, что зависимость выхода мезонов от атомного номера  $A$  следует закону  $A^{2/3}$ . Это означает, что в процессе образования  $\pi^0$ -мезонов основную роль играют «поверхностные» нуклоны ядра. Возможно, что это обусловлено сильным поглощением мезонов внутри ядра из-за сильного взаимодействия

$\pi$ -мезонов с нуклонами при резонансной энергии. Можно ожидать, что при уменьшении максимальной энергии тормозного спектра фотонов  $E_M$ , и, соответственно, энергии образующихся в ядре мезонов зависимость выхода мезонов от  $A$  должна быть более сильной.

В эксперименте  $\pi^0$ -мезоны регистрировались по одному из  $\gamma$ -квантов распада телескопом сцинтилляционных счетчиков, расположенным под углом  $90^\circ$  к пучку фотонов. Измерялись относительные выходы гамма квантов для мишеней C, Al, Cu, Cd, Pb. На рисунке приведены результаты измерений относительных выходов  $\pi^0$ -мезонов на этих ядрах.

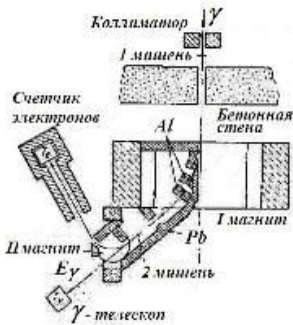


Аппроксимация данных в виде  $\sigma=K \cdot A^n$  дает следующие значения  $n$ : при  $E_M = 260$  МэВ  $n=0.63 \pm 0.02$ , при  $E_M = 200$  МэВ  $n=0.76 \pm 0.02$  и при  $E_M = 170$  МэВ  $n=1.36 \pm 0.04$ . Таким образом, с уменьшением максимальной энергии тормозных фотонов показатель степени у  $A$  растет, и при  $E_M = 170$  МэВ зависимость становится практически  $\sim A^{4/3}$ . Это можно объяснить тем, что при малых энергиях фотонов существенным становится вклад упругого фоторождения  $\pi^0$ -мезонов на ядрах. Эти результаты были подтверждены в дополнительном эксперименте, в котором  $\pi^0$ -

мезоны регистрировались по двум гамма квантам распада.

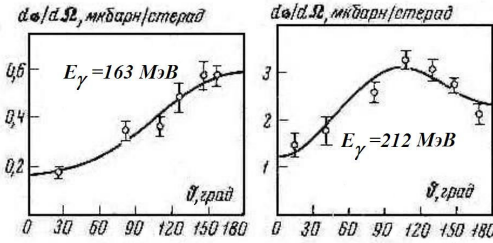
5) *Измерения дифференциальных сечений фоторождения  $\pi^0$ -мезонов на протонах.*

Группой сотрудников (Б.Б.Говорков, С.П.Денисов, Е.В.Минарик, Р.Г.Васильков) были проведены измерения дифференциальных сечений фоторождения  $\pi^0$ -мезонов на протонах при энергиях фотонов от 160 МэВ до 240 МэВ.



*Система мечения фотонов на ускорителе С-25.*

При измерениях использовалась жидководородная мишень, а энергия пучка фотонов измерялась с помощью системы мечения, приведенной на рисунке.  $\pi^0$ -мезоны регистрировались по одному  $\gamma$ -кванту от их распада телескопами сцинтилляционных счетчиков. В работе использовалась оригинальная система «привязки» выходов реакций к магнитному полю в ускорителе, что позволило измерить сечения для целого набора энергий одновременно. Дифференциальные сечения образования  $\pi^0$ -мезонов на протоне для энергий 163 МэВ и 212 МэВ показаны на рисунке. Линиями обозначены результаты аппроксимации данных опыта степенными полиномами по  $\cos(\theta)$ .

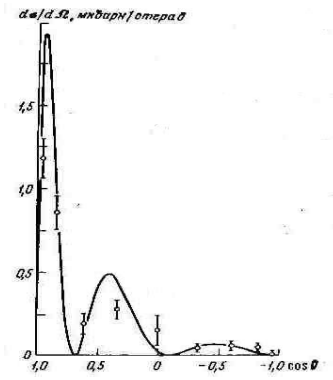


Сечения процесса  
 $\gamma + p \rightarrow p + \pi^0$

Мультипольный анализ данных для околопороговой области энергий позволил найти S- и P- волновые амплитуды процесса фоторождения. Впервые была получена величина электрической дипольной амплитуды вблизи порога  $E_{0+}(\gamma + p \rightarrow p + \pi^0) = (2,0 \pm 0,2) \cdot \lambda \cdot 10^{-2}$ , где  $\lambda = h/m_{\pi}c$ . Это значение согласуется с предсказаниями теории дисперсионных соотношений.

б) Исследование когерентного фоторождения  $\pi^0$ -мезонов на ядрах.

С использованием той же аппаратуры (см. п. 5) было исследовано когерентное фоторождение мезонов на ядрах от C до Pb. В таком процессе амплитуды образования мезонов



Угловое распределение  $\pi^0$ -мезонов в реакции  $\gamma + Ta \rightarrow \pi^0 + Ta$  при энергии фотонов 181,5 МэВ

на отдельных нуклонах ядра складываются, и зависимость сечения



от угла вылета мезона характеризуется наличием минимумов и максимумов. Анализ измеренных сечений позволил новым способом определить размеры ядер и подтвердить результаты подобных измерений в экспериментах по рассеянию протонов и электронов на ядрах. На рисунке приведено дифференциальное сечение для ядра Та. Соответствующее значение радиуса равно  $\sqrt{\langle r^2 \rangle} = (5,27 \pm 0,08) \cdot 10^{-13}$  см.

7) *Исследование фоторождения  $\pi^-$ -мезонов на дейтроне.*

М.И.Адамович, Г.В.Кузьмичева, В.Г.Ларионова и С.П.Харламов методом ядерных эмульсий исследовали процесс  $\gamma + d \rightarrow p + p + \pi^-$  с целью получения сведений о фоторождении  $\pi^-$ -мезонов на нейтроне. Фотоэмульсии типа "Р" НИКФИ толщиной 400 мкм на стеклянной подложке были пропитаны тяжелой водой. В  $1 \text{ см}^3$  наполненной водой эмульсии содержалось в среднем  $3,2 \cdot 10^{22}$  ядер дейтерия. Фотоэмульсии были облучены в пучке тормозного излучения электронов с максимальными энергиями 250 МэВ и 200 МэВ. Плоскость облучаемой пластинки располагалась под углом  $30^\circ$  к направлению пучка фотонов. При этом фотоэмульсия одновременно служила и мишенью и детектором. На рисунке показана микрофотография события образования  $\pi^-$ -мезона фотоном с энергией 149,2 МэВ. Рожденный в точке О  $\pi^-$ -мезон в конце пробега (в точке К) поглощается ядром фотоэмульсии и образует вторичную звезду.



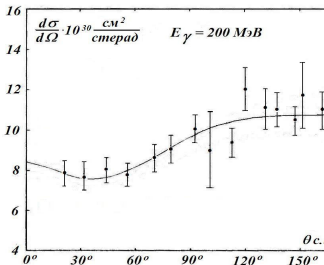
*Событие  $\gamma + d \rightarrow p + p + \pi^-$   
в фотоэмульсии*

В проведении этого эксперимента большую роль сыграл А.М.Балдин. Из анализа экспериментальных данных, проведенного с использованием его расчетов, было сделано заключение об одноуклонном механизме рождения  $\pi^-$ -мезонов на дейтонах, впервые было получено сечение реакции

фоторождения  $\pi^-$ -мезонов на свободных нейтронах и определено пороговое значение S- волновой амплитуды  $E_{0+}(\gamma+n \rightarrow p+\pi^-) = (3,15 \pm 0,06) \lambda \cdot 10^{-2}$ .

8) *Исследование фоторождения  $\pi^+$ -мезонов на протоне.*

М.И.Адамович, Э.Г.Горжевская, Г.В.Кузьмичева, В.Г.Ларионова, А.И.Лебедев, Н.В.Панова, В.М.Попова, В.М.Семашко, С.П.Харламов и Ф.Р.Ягудина провели экспериментальные и теоретические исследования реакции  $\gamma+p \rightarrow n+\pi^+$ . В работе использовалась жидководородная мишень. Мезоны регистрировались стопками из слоев ядерной фотоэмульсии, расположенными под углами от  $16^\circ$  до  $156^\circ$ . Дифференциальные сечения были измерены для 14 значений энергии фотонов от 165 МэВ до 230 МэВ. На рисунке приведены сечения для  $E_\gamma=200$  МэВ. Результаты расчетов по дисперсионным соотношениям указаны кривой.



Сечение  
процесса  
 $\gamma + p \rightarrow n + \pi^+$ .

Для измерения дифференциальных сечений при энергиях фотонов ниже 160 МэВ использовалась мишень из тонкой полиэтиленовой пленки. Парциально-волновой анализ данных выявил определяющую роль фотообразования  $\pi^+$ -мезонов в S-состоянии. Найдено пороговое значение амплитуды  $E_{0+}(\gamma+p \rightarrow n+\pi^+)=(2,86 \pm 0,02) \cdot \lambda \cdot 10^{-2}$  и определена константа пион-нуклонного взаимодействия  $f^2/4\pi=0,079 \pm 0,003$ , величина которой совпадает с

результатами опытов по  $\pi N$ - и  $NN$ - рассеянию.

Экспериментальные данные согласуются с теорией дисперсионных соотношений при учете релятивистских эффектов, эффектов отдачи нуклонов и вкладов в дисперсионные интегралы мнимых частей амплитуд перерассеяния. Определена разность длин рассеяния  $\pi$ -мезонов на нуклонах в  $S$ -состоянии с изоспинами  $1/2$  и  $3/2$ :  $a_1 - a_3 = 0,247 \pm 0,006$ . Впервые найдена верхняя граница ширины радиационного распада  $\rho$ -мезона  $\Gamma_{\rho\pi\gamma} = 0,16 \pm 0,02$  МэВ, которая удовлетворительно согласуется с предсказанием унитарной симметрии  $\Gamma_{\rho\pi\gamma} = 0,12$  МэВ.

За цикл исследований процессов рождения  $\pi$ -мезонов фотонами в околопороговой области энергий сотрудникам ФИАН М.И.Адамовичу, Ф.М.Балдину, А.С.Белоусову, Б.Б.Говоркову, А.И.Лебедеву, Е.И.Тамму и С.П.Харламову была присуждена в 1973 г. Государственная премия СССР.

#### *9) Безмезонные фотопроцессы.*

Здесь дается краткая информация об изучении комптоновского рассеяния на протонах и фоторасщепления ядер без образования мезонов в конечном состоянии.

На синхротроне С-25 изучались процессы рассеяния фотонов  $\gamma + p \rightarrow \gamma + p$  на протонах. Первые измерения сечения такой реакции в области энергий 40–70 МэВ были выполнены на жидководородной мишени группой В.И.Гольданского. В группу входили В.О.Павловская, А.В.Куценко, О.В.Карпухин и Б.Б.Говорков, предложивший регистрировать в конечном состоянии не  $\gamma$ -р совпадения, на чем настаивал В.И.Гольданский, а только рассеянный гамма-квант. Это позволило бы значительно быстрее набрать статистику. Результаты этих исследований были опубликованы в 1955 г, а Б.Б.Говорков после выполнения этих измерений стал заниматься исследованиями реакции  $\gamma + p \rightarrow \pi^0 + p$ . Остальные и присоединившаяся к ним позже группа П.С.Баранова провели новые измерения сечения процесса  $\gamma + p \rightarrow \gamma + p$  при энергиях 40–110 МэВ.

Изучение таких процессов дает возможность получить информацию о новых фундаментальных свойствах адронов – об их

поляризуемостях. В рамках квантовой теории поля В.А.Петрунькин доказал, что квадратичные по энергии коэффициенты разложения сечения комптоновского рассеяния на протоне, выражаются через дипольные электрическую  $\alpha_p$  и магнитную  $\beta_p$  поляризуемости протона. В результате обработки экспериментальных данных получены их величины:  $\alpha_p = (12.4 \pm 1.1) 10^{-43} \text{ см}^3$  и  $\beta_p = (1.5 \pm 0.8) \cdot 10^{-43} \text{ см}^3$ .

Эти значения согласуются с дисперсионным правилом сумм, полученным А.М.Балдиным:  $\alpha_p + \beta_p = 14 \cdot 10^{-43} \text{ см}^3$ . Обнаружение нового свойства у адронов было признано открытием, которое зарегистрировано. А.М.Балдин и С.Ф.Семенко развили теорию тензорной поляризуемости ядер. Работы по изучению поляризуемостей адронов и ядер продолжаются до настоящего времени во многих научных центрах.

Процесс  $\gamma + p \rightarrow \gamma + p$  исследовался в ФИАНе и при энергиях выше порога образования мезонов (200-250 МэВ) группой П.С.Баранова (Б.А.Кузнецова, Л.И.Словохотов, Г.А.Сокол, Л.Н.Штарков). Результаты измерения сечения этой реакции согласуются с предсказаниями теории двойных дисперсионных соотношений.

В Эталонной лаборатории были также исследованы реакции фоторасщепления ядер. Под руководством П.А.Черенкова А.С.Варфаламеев, Ф.П.Денисов, В.Н.Майков измерили сечения глубокой дезинтеграции ядер фотонами при энергиях несколько десятков МэВ. Изучались реакции фоторасщепления малонуклонных систем: дейтерия,  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$ . Дифференциальное сечение процесса  $\gamma + d \rightarrow p + n$  было измерено при энергиях от 40 МэВ до 140 МэВ группой Н.Б.Делоне (Л.Н.Штарков, Г.А.Сокол, Л.И.Словохотов, Ю.А.Александров). Эти измерения выявили влияние мезонных токов. Также впервые были изучены все каналы фоторасщепления ядер  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$  при энергиях фотонов вплоть до порога фотообразования пионов (~150 МэВ). Продукты реакций регистрировались уникальным в то время методом - камерой Вильсона в магнитном поле, помещенной прямо в пучок тормозного излучения. Классические результаты, полученные П.А.Черенковым, А.Н.Горбуновым, А.Т.Варфоломеевым, Г.Г.Тараном, С.Б.Герасимовым, В.Н.Фетисовым, стимулировали

многие теоретические исследования по описанию сечений и проверке фотоядерных правил сумм. Результаты исследований были отмечены в 1977 г. государственной премией СССР.

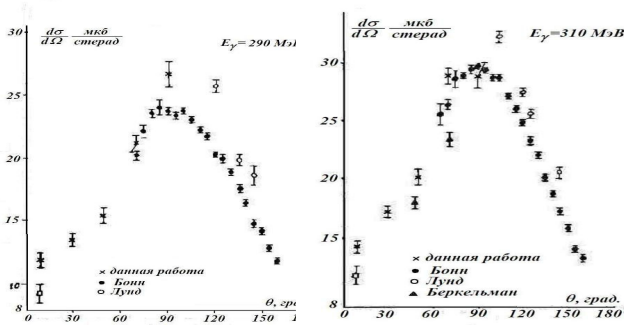
### Исследования на синхротроне С-60

В 1959 г. Эталонная лаборатория, сильно увеличившаяся из-за расширения тематики исследований, была преобразована в ряд лабораторий, среди которых Лаборатория фотомезонных процессов (ЛФМП) и Лаборатория электронов высоких энергий (ЛЭВЭ) продолжили исследования по изучению процессов образования мезонов фотонами. Заведующим ЛФМП стал П.А.Черенков, получивший в 1958 г. вместе с И.Е.Таммом и И.М.Франком Нобелевскую премию за открытие и интерпретацию излучения сверхсветовых электронов в среде. Заведующим ЛЭВЭ стал В.А.Петухов. В 1963 г. заместителем П.А.Черенкова был назначен Е.И.Тамм, который впоследствии возглавил Лабораторию фотомезонных процессов, преобразованную в 1984 г. в Отдел физики высоких энергий.

В ФИАНе в начале 50-х годов был сооружен протонный ускоритель на энергию  $\sim 180$  МэВ, на котором отлаживались элементы строящегося в Дубне синхрофазотрона. После запуска последнего протонный ускоритель был переделан в электронный синхротрон на энергию 680 МэВ, получивший условное название С-60 и ставший базовой установкой для ЛЭВЭ. На нем исследовались процессы фоторождения мезонов в области энергий возбуждения  $\Delta_{33}(1232)$  резонанса.

#### *1) Изучение процесса $\gamma + p \rightarrow p + \pi^0$ в интервале энергий фотонов от 290 МэВ до 360 МэВ*

В группе В.С.Павловской (Ю.А.Александров, В.А.Козлов, А.В.Куценко, В.Н.Майков) были измерены дифференциальные сечения процесса  $\gamma + p \rightarrow p + \pi^0$  в интервале энергий фотонов от 290 МэВ до 360 МэВ для углов вылета мезонов от  $10^0$  до  $90^0$ .  $\pi^0$ -мезоны регистрировались по двум  $\gamma$ -квантам их распада

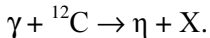


### Дифференциальные сечения процесса $\gamma + p \rightarrow p + \pi^0$

спектрометрами полного поглощения, в которых радиаторами служили свинцовые стекла ГФ-1. Полученные в работе сечения для малых углов составили в то время более половины всей мировой статистики при указанных выше энергиях. На рисунке приведены дифференциальные сечения для фотонов с энергиями 290 МэВ и 310 МэВ. В проведенном мультипольном анализе с использованием новых данных были существенно уточнены значения S- P- амплитуд фоторождения.

### 2) Исследование подпорогового фоторождения $\eta$ – мезонов на ядрах углерода.

В 1968 г. Ю.А.Александров, А.В.Куценко, В.Н.Майков, В.С.Павловская и В.И.Царев провели исследование фоторождения  $\eta$ -мезонов на ядрах углерода при энергиях ниже порога их образования на свободном нуклоне



$\eta$ -мезоны идентифицировались по двум  $\gamma$ -квантам черенковскими спектрометрами полного поглощения. Работа проводилась на пучке тормозного излучения электронов с максимальной энергией 650 МэВ. Согласно проведенному моделированию энергия каждого  $\gamma$ -кванта распада  $\eta \rightarrow \gamma + \gamma$  должна быть больше 190 МэВ, а их сумма  $\Sigma > 450$  МэВ.

$\langle E_\gamma \rangle$ МэВ	$\langle \theta_\eta \rangle$	$d\sigma/d\Omega \cdot 10^{31}$ см <sup>2</sup> /стерад.
589	44 <sup>0</sup>	3,7±0,5
609	41,5 <sup>0</sup>	10,0±5,6

В таблице приводятся сечения для двух значений энергии тормозных фотонов  $\langle E_\gamma \rangle$  и углов вылета  $\eta$ -мезонов  $\langle \theta_\eta \rangle$ .

Таким образом, в работе был зарегистрирован процесс фоторождения  $\eta$ -мезонов на ядрах в «подпороговой» области энергий. Изучение таких реакций представляет интерес для выяснения поведения амплитуд фоторождения вне массовой поверхности.

3) *Изучение реакции  $\gamma + p \rightarrow n + \pi^+$  при энергиях фотонов от 230 МэВ до 360 МэВ.*

Процесс фоторождения положительных мезонов исследовался в группе Е.М.Лейкина (Ю.М.Александров, В.Ф.Грушин, А.Я.Ротвайн, А.А.Шиконян) сначала на ускорителе С-25 (при энергии 230 МэВ), а потом на С-60 при энергиях 260 МэВ, 290 МэВ, 320 МэВ и 360 МэВ.  $\pi^+$ -мезоны регистрировались по запаздывающим сигналам от распада  $\pi^+$ -мезонов с помощью детектора остановок  $\pi^+$ -мезонов, представляющего собой телескоп из четырех сцинтилляционных счетчиков с тормозящим фильтром, и магнитного спектрометра. Проведен мультипольный анализ полученных и опубликованных в литературе сечений. Из сопоставления найденных амплитуд с предсказаниями теоретических моделей была найдена ширина радиационного распада  $\rho$ -мезона  $\Gamma_{\rho\pi\gamma} = 0,22^{+0,14}_{-0,09}$  МэВ. Это значение согласуется с результатами, полученными при изучении фоторождения  $\pi$ -мезонов в области пороговых энергий.

Группой Е.М.Лейкина – В.Ф.Грушина совместно с сотрудниками ХФТИ и МГУ были проведены измерения поляризационных характеристик процессов фоторождения  $\pi^+$ -мезонов в области энергий фотонов 250–500 МэВ. Эксперименты были выполнены на линейно поляризованном пучке фотонов харьковского линейного ускорителя с использованием

поляризованной мишени. Это позволило провести полный мультипольный анализ процессов фоторождения  $\pi^+$  и  $\pi^0$ -мезонов без использования фаз  $\pi N$ -рассеяния. В результате были найдены реальные и мнимые части S- и P- волновых амплитуд фоторождения мезонов. Полученная квадрупольная амплитуда фоторождения в области энергий возбуждения  $\Delta_{33}$ -резонанса указывает на существование тензорного взаимодействия между кварками в адронах. Из сопоставления экспериментальных данных с результатами расчетов амплитуд фоторождения  $\pi$ -мезонов, выполненных Б.В.Мангазеевым и А.И.Лебедевым, были сделаны оценки векторной  $g_{\omega NN}^V = 12,0 \pm 1,1$  и тензорной  $g_{\omega NN}^V = 10,6 \pm 2,1$  констант взаимодействия  $\omega$ -мезона с нуклонами.

### Исследования на С-25Р.

Во второй половине 50-х годов В.И.Векслер, несмотря на занятость работами по запуску протонного синхрофазотрона в Дубне, высказал предложение о реконструкции синхротрона С-25. Был подготовлен проект нового электронного ускорителя на энергию 1.3 ГэВ, сооружение которого началось в 1967 г. на новой площадке ФИАН в г. Троицке (недалеко от речки Пахра). Его стали называть С-25Р, другое название «Пахра». Первые экспериментальные исследования на этом ускорителе были начаты в 1976 г.

#### *1) Изучение процесса радиационного фоторождения $\pi^+$ -мезонов на протонах.*

По предложению Л.В.Филькова и П.С.Баранова на новом синхротроне (С-25Р) были проведены исследования процесса  $\gamma + p \rightarrow \gamma + \pi^+ + n$  с целью получения сведений о рассеянии фотонов на мезонах и о поляризуемости пионов.

Этот сложный эксперимент с регистрацией всех частиц конечного состояния был проведен группой П.С.Баранова (Т.А.Айбергенов, О.Д.Безниско, А.А.Нафиков, А.И.Осадчий, В.Г.Раевский, С.А.Ралко, Е.И.Тамм, Л.А.Фоменко, Л.В.Фильков, С.Н.Черепня, Л.Н.Штарков, Ю.П.Янулис).

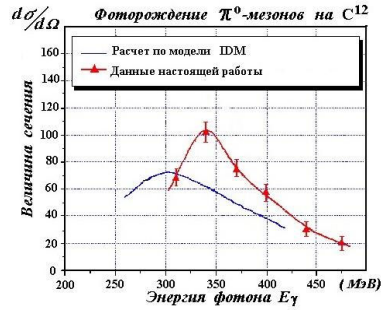
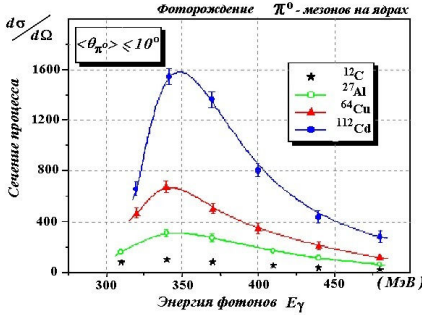


$\pi^+$ -мезон и рассеянный фотон регистрировались телескопами сцинтилляционными счетчиков. Нейтрон регистрировался спектрометром, состоящим из четырех время-пролетных сцинтилляционных детекторов. В работе измерены поперечные сечения этой реакции в зависимости от квадрата переданного импульса. Используя разработанную Л.В.Фильковым процедуру экстраполяции данных в пионный полюс, авторы получили дифференциальное сечение для пионного комптоновского рассеяния  $d\sigma(\gamma+\pi^+ \rightarrow \gamma+\pi^+)/d\Omega=(5,4\pm 1,0)\cdot 10^{-32}$  см<sup>2</sup>/стерад для  $\theta=130^0\pm 30^0$  в интервале энергий фотонов 350-800 МэВ и значение электрической поляризуемости  $\pi^+$ -мезона  $\alpha_{\pi^+}=(20\pm 12)\cdot 10^{-43}$  см<sup>3</sup>.

Так как на площадке ФИАН в Троицке не было криогенной станции, П.С.Баранову пришлось возить дьюары с жидким водородом из Москвы на машине в сопровождении эскорта ГАИ для обеспечения безопасности транспортировки взрывоопасного груза.

2) *Фоторождение  $\pi^0$  на ядрах при энергиях возбуждения  $\Delta_{33}$ -резонанса.*

А.С.Белоусов, Я.А.Ваздик, Е.И.Малиновский, С.В.Русаков, П.А.Смирнов, Ю.В.Соловьев, А.Р.Теркулов, А.П.Усик и А.М.Фоменко измерили сечения фоторождения  $\pi^0$ -мезонов под углом  $\sim 10^0$  на ядрах  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{27}\text{Al}$ ,  ${}^{64}\text{Cu}$  и  ${}^{112}\text{Cd}$  при энергиях 300-500 МэВ.  $\pi^0$ -мезоны регистрировались по двум  $\gamma$ -квантам черенковскими спектрометрами полного поглощения.



Дифференциальные сечения фоторождения  $\pi^0$ -мезонов на ядрах.  
На правом рисунке для ядра  $^{12}\text{C}$  приведена теоретическая кривая.

Можно ожидать, что процесс фоторождения на ядрах под малыми углами (с малыми переданными импульсами) носит когерентный характер с зависимостью от атомного числа в виде  $\sim A^2$ . Однако зависимость сечения от  $A$  может изменяться с энергией из-за поглощения мезонов в ядре. В случае сильного поглощения зависимость близка к  $\sim A^{4/3}$ .

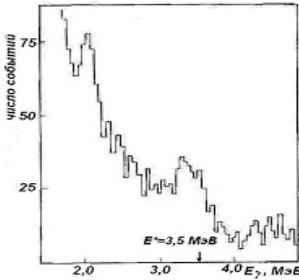
Действительно, измеренная зависимость сечения от  $A$  указывает на то, что наиболее сильное поглощение  $\pi^0$ -мезонов происходит в области  $\Delta_{33}$ -резонанса. Сечения когерентного фоторождения на ядрах могут быть рассчитаны в рамках изобар-дырочной модели, что позволяет судить о поведении  $\Delta_{33}$ -изобары в ядре. На рисунке слева приведены измеренные в работе сечения на ядрах  $^{12}\text{C}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{64}\text{Cu}$  и  $^{112}\text{Cd}$ . На рисунке справа представлены сечения на ядре  $^{12}\text{C}$  и результаты расчета в рамках изобар-дырочной модели.

### 3) Изучение парциальных реакций фоторождения мезонов на ядрах.

Тот же коллектив (см п.2) измерил парциальное сечение процесса  $\gamma + {}^6\text{Li} \rightarrow \pi^0 + {}^6\text{Li}^* \rightarrow \pi^0 + {}^6\text{Li} + \gamma$  с переходом ядра на возбужденный уровень с энергией 3,56 МэВ.

$\pi^0$ -мезоны регистрировались по двум  $\gamma$ -квантам спектрометрами, состоящими из сцинтилляционных счетчиков и черенковского ливневого детектора полного поглощения. На совпадение с  $\pi^0$ -

мезоном регистрировался и мягкий фотон  $\gamma$  кристаллом NaJ. На рисунке представлен

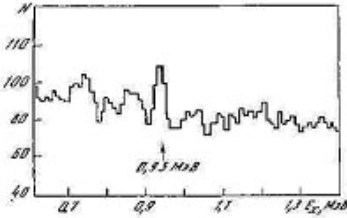


Спектр  $\gamma$ -фотонов  
в реакции  ${}^6\text{Li}(\gamma\pi^0){}^6\text{Li}^*$ ,  
 ${}^6\text{Li}^* \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma + \pi^0$

полученный спектр  $\gamma$ -фотонов. Пик в спектре при энергии 3,5 МэВ соответствует испусканию  $\gamma$ -фотона с уровня возбуждения ядра  ${}^6\text{Li}^*$ . Дифференциальное сечение, измеренное для фотонов в интервале энергий 270-380 МэВ для углов  $\theta_\pi \sim 0^\circ - 20^\circ$  равно  $(5,12 \pm 0,76) \cdot 10^{-31} \text{ см}^2/\text{стерад}$ .

На тормозном пучке синхротрона группой Г.А.Сокола (Т.Айбергенов, Н.З.Гогитидзе, А.Н.Елисеев, В.Л.Кашеваров, Л.Н.Павлюченко и Е.В.Ржанов) было измерено сечение реакции  $\gamma + {}^{12}\text{C} \rightarrow \pi^+ + {}^{12}\text{B}^* \rightarrow \pi^+ + {}^{12}\text{B} + \gamma$  с испусканием мягкого фотона с уровня возбуждения 0,95 МэВ ядра  ${}^{12}\text{B}^*$ . Изучение подобных процессов может дать информацию о механизмах фоторождения пионов на ядрах и о структуре ядер. В эксперименте одновременно регистрировались пион и мягкий  $\gamma$ -квант, испущенный возбужденным ядром  ${}^{12}\text{B}^*$ .

$\pi^+$ -мезоны регистрировались под углом вылета  $\theta_\pi = 60^\circ$  сцинтилляционным пробеговым телескопом.  $\gamma$ -кванты регистрировались  $\gamma$ -спектрометром на основе германиевых детекторов.

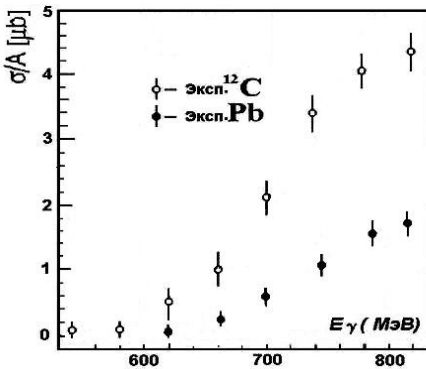


Спектр  $\gamma$ -квантов  
в реакции  $^{12}\text{C}(\gamma, \pi^+)^{12}\text{B}^*$ ,  
 $^{12}\text{B}^* \rightarrow ^{12}\text{B} + \gamma$ .

На рисунке показан спектр энергии  $\gamma$ -квантов. Пик при энергии 0,95 МэВ соответствует испусканию мягкого  $\gamma$ -фотона с первого возбужденного уровня ядра  $^{12}\text{B}^*$ .

### 3) Изучение фоторождения нейтральных мезонов на ядрах.

В 1999-2005 г. А.С.Белоусов, Я.А.Ваздик, В.Г.Зверев, Е.И.Малиновский, И.Е.Малиновский, В.Н.Меженин, К.Г.Обидин, П.А.Смирнов, Г.Г. Таран, А.Р. Теркулов провели измерения сечений процессов  $\gamma + A \rightarrow \pi^0(\eta^0) + X$  на ядрах  $^{12}\text{C}$  и Pb при энергиях фотонов 200-800 МэВ.



Сечение  $\sigma/A$  процесса

$\gamma + A \rightarrow \pi^0(\eta^0) + X$  на ядрах  $^{12}\text{C}$   
и Pb.

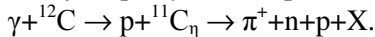
Работа выполнена на пучке тормозного излучения. Мезоны идентифицировались по распаду их на два гамма-кванта, которые регистрировались черенковскими счетчиками полного поглощения.

На рисунке приведены сечения на нуклон, полученные для  $\eta^0$ -мезонов. Сечения быстро растут с увеличением энергии, что возможно связано с проявлением  $S_{11}(1535)$ -резонанса.

#### 4) Поиски связанных состояний $\eta$ -мезонов с ядрами.

На ускорителе С-25Р были проведены эксперименты по поиску  $\eta$ -ядер. Такие объекты могут существовать за счет притяжения медленных  $\eta$ -мезонов к ядрам. А.И.Лебедев и В.А.Трясучев впервые показали, что сечение образования  $\eta$ -ядер достаточно велико, что позволяет проводить такие работы на синхротроне. Г.А.Соколом и В.А.Трясучевым был предложен оригинальный способ выявления связанных  $\eta$ А-систем по их распаду на коррелированные по углам и энергиям  $\pi^+$ -n пары, которые могут образоваться в процессе  $\eta+N \rightarrow \pi+N$ , протекающим на внутренних нуклонах ядра. Захват медленных  $\eta$ -мезонов двумя нуклонами в ядре может приводить и к образованию коррелированных пар нуклонов.

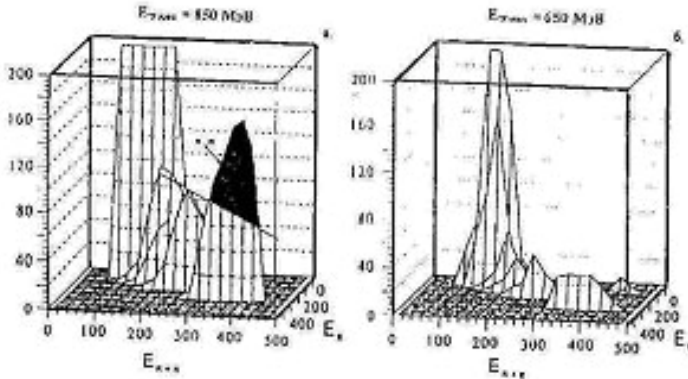
Для поиска  $\eta$ -ядер изучался процесс



$\pi^+$ -мезоны и нейтроны регистрировались на совпадения сцинтилляционными спектрометрами, а их энергия определялась по времени пролета. Анализировались события, в которых пионы и нейтроны вылетали в противоположные стороны и их энергии соответствовали кинематике процесса  $\eta+\text{p} \rightarrow \pi^++\text{n}$  для покоящегося  $\eta$ -мезона. Для уменьшения фонов детекторы располагались в плоскости, перпендикулярной к пучку фотонов так, чтобы угол между ними составлял  $180^\circ$ . Измерения проводились при энергиях  $\gamma$ -пучка как выше порога образования  $\eta$ -мезонов (850 МэВ), так и ниже (650 МэВ). После введения небольших поправок на экстраполяцию выхода  $\pi$ -мезонов при меньшей энергии на область энергий 750 МэВ было проведено вычитание выходов  $\pi^+$ n-пар. Ниже представлены результаты измерений.

Видно, что для области энергий вблизи порога рождения  $\eta$ -мезонов наблюдается превышение выходов (затемненная область на левом рисунке). Вместе с тем, проведение измерений при повернутым на  $90^\circ$  в азимутальной плоскости положением детектора  $\pi$ -мезонов,

когда условие угловой корреляции нарушено, превышения не было обнаружено. Все это указывает на существование связанных состояний. Следует отметить, что способ поиска  $\eta$ -ядер по наблюдению коррелированных  $\pi N$ -пар их распада стал использоваться и на зарубежных ускорителях, где также получены указания на существование связанных состояний  $\eta$ -мезонов и ядер.



*Распределение  $\pi^+n$  - пар от их суммарной энергии*

В настоящее время исследования на С-25Р продолжаются с целью увеличения статистики и наблюдения двухнуклонных распадов  $\eta$ -ядер.

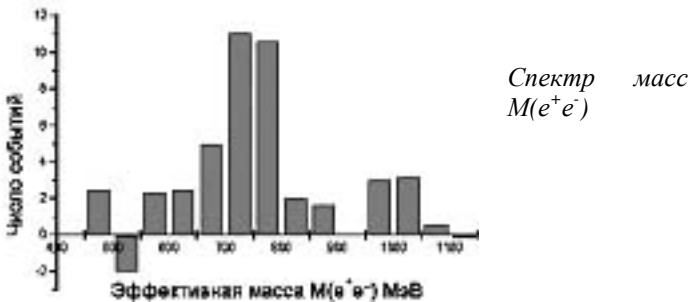
### **Работы ФИАН на ускорителях других научных центров.**

#### *1) Обнаружение электромагнитного распада $\phi$ -мезона.*

В 1967 г. на синхрофазотроне в Дубне сотрудниками ОИЯИ и сотрудниками ФИАН (А.М.Балдин, А.С.Белоусов, Л.И.Журавлев, Л.Н.Штарков) на установке М.Н.Хачатуряна был выполнен эксперимент по поиску и измерению вероятности электромагнитного распада  $\phi$ -мезона на пару  $e^+e^-$ . В модели векторной доминантности эта вероятность выражается через константу связи фотона с  $\phi$ -мезоном  $g_{\gamma\phi}$ , которая определяет сечение фоторождения  $\phi$ -мезонов на нуклонах.

Эксперимент был выполнен на пучке пи-мезонов с энергией 4 ГэВ, полученном на синхрофазотроне в Дубне. В работе использовалась жидководородная мишень. Образующиеся в мишени векторные мезоны в ней же и распались, а продукты распада регистрировались двухплечевой аппаратурой, каждое плечо которой включало в себя по 4 искровых камеры и черенковский спектрометр полного поглощения. Искровые камеры измеряли направление движения заряженных частиц, вылетающих из мишени. Черенковские спектрометры идентифицировали электроны и измеряли их энергию. Это позволило определить массу распадающихся  $\phi$ -мезонов.

Триггером являлось одновременное срабатывание всех сцинтилляционных и черенковских счетчиков. После обработки полученных данных были найдены распределения событий по эффективной массе, приведенные на рисунке.



Полученный спектр масс содержит пики, соответствующие  $\rho$ - и  $\omega$ -мезонам в области масс 700-800 МэВ и  $\phi$ -мезону в области масс  $\sim 1000$  МэВ. Обработка данных дала значения относительных вероятностей распадов векторных мезонов:

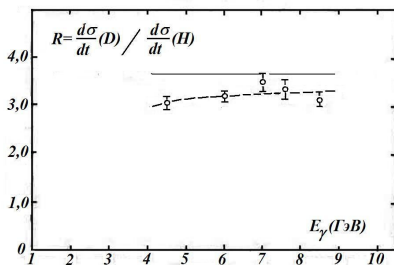
$$V_\rho = (5.3 \pm 1.1) \cdot 10^{-5}, \quad V_\omega = (6.5 \pm 1.3) \cdot 10^{-5}, \quad V_\phi = (66^{+44}_{-28}) \cdot 10^{-5}.$$

Распад  $\phi$ -мезонов на пару электронов в данной работе был зарегистрирован впервые и был признан открытием.

## 2) Исследование фоторождения $\rho^0$ -мезонов на дейтронах

В 1968 г. А.И.Лебедев был в научной командировке в США и работал в Корнелльском университете (г. Итака, штат Нью-Йорк), где был запущен электронный синхротрон с сильной фокусировкой на энергию 10 ГэВ. Ускоритель был быстро построен благодаря использованию небольшого горно-рудного щита при проходке туннеля для синхротрона.

А.И.Лебедев провёл теоретическое рассмотрение процесса  $\gamma+d \rightarrow \rho^0+d$  в рамках модели векторной доминантности в предположении о дифракционном характере фоторождения векторных мезонов на нуклонах. В расчетах учитывались поправки Глаубера на многократное



*Отношение сечений*

$$R = \sigma(\gamma+d \rightarrow \rho^0+d) / \sigma(\gamma+p \rightarrow \rho^0+p)$$

перерасеяние мезонов в дейтронах. Вычисленное отношение  $R$  сечений процессов  $\gamma+d \rightarrow \rho^0+d$  и  $\gamma+p \rightarrow \rho^0+p$  для угла вылета мезонов вперед приведено на рисунке сплошной линией. Экспериментальные данные (пунктирная кривая) были получены на синхротроне для области энергий от 4 ГэВ до 9 ГэВ. Результаты совместного исследования подтверждают предсказания модели векторной доминантности. Небольшое отличие данных от предсказаний видимо обусловлено вкладом недифракционного механизма при фоторождении  $\rho^0$ -мезонов. В работе принимали участие Г.МакКлеллан, Н.Мистри, П.Постек, Х.Огрен, А.Силверман, Дж.Шварц, Р.Тальман, К.Готтфрид и А.И.Лебедев.



3) Полное сечение адронного поглощения при энергиях  
10 – 40 ГэВ (Серпуховский ускоритель)

М.А.Марковым была высказана идея о возможности создания на современных протонных ускорителях пучков нейтрино, электронов и фотонов с энергиями в десятки ГэВ. В результате взаимодействия выведенных из ускорителя протонов с ядрами мишени образуются  $\pi^0$ -мезоны, распадающиеся на фотоны, которые конвертируются в  $e^-e^+$ -пары. Группой сотрудников ЕрФИ, ИФВЭ и ФИАН впервые в 1970 г на Серпуховском протонном ускорителе У-70 были созданы пучки электронов с энергиями до 46 ГэВ.

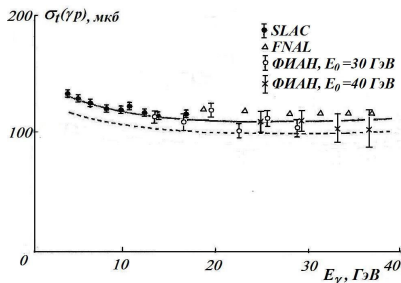
В первом эксперименте на электронном пучке Серпуховского ускорителя были измерены полные сечения адронного фотопоглощения на водороде  $\sigma_i(\gamma p)$  и дейтерии  $\sigma_i(\gamma d)$ , которые являются фундаментальной характеристикой электромагнитного взаимодействия адронов.

Измерения проводились сотрудниками ЕрФИ, ИФВЭ и сотрудниками ФИАН (А.С.Белоусов, Н.П.Буданов, Я.А.Ваздик, Б.Б.Говорков, А.И.Лебедев, Е.И.Малиновский, Е.В.Минарик, С.В.Русаков, В.И.Сергиенко, Е.И.Тамм, П.А.Черенков и П.Н.Шарейко). К тому времени полное сечение  $\sigma_i(\gamma p)$  было измерено при энергиях до 20 ГэВ (SLAC). Серпуховский электронный пучок позволял получить новые данные в диапазоне 20 ГэВ – 40 ГэВ. Эксперимент проводился при двух значениях энергии электронного пучка – при  $E_0 = 30$  ГэВ и  $E_0 = 40$  ГэВ. Интенсивность пучков составляла  $10^6$  электронов в импульсе.

Работа проводилась на криогенной мишени. Для определения энергии фотонов использовалась предложенная Б.Б.Говорковым амплитудно-временная система мечения фотонов. Электроны, испустившие тормозное излучение в мишени, регистрировались спектрометром полного поглощения, расположенным в пучке за мишенью. Другим детектором регистрировались адроны. Совпадение во времени сигналов от этих двух детекторов свидетельствовало об образовании адронов фотонами известной энергии.

На рисунке приведены полученные сечения адронного фотопоглощения для водорода. Там же приведены результаты

работы, выполненной ранее на Стенфордском линейном электронном ускорителе при энергиях до 18 ГэВ, и

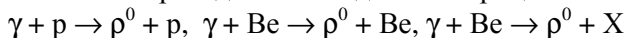


Зависимость полного сечения  $\sigma_T(\gamma p)$  от энергии.

результаты, полученные позже на электронном пучке ускорителя в лаборатории имени Ферми в США при больших энергиях. В пределах ошибок полученные результаты совпадают с данными этих работ. Сплошная кривая проведена через все экспериментальные точки. Абсолютная величина сечения, полученная в эксперименте, несколько больше, чем это следует из предсказания модели векторной доминантности, в которой учитываются вклады  $\rho$ -,  $\omega$ -,  $\phi$ - и  $\rho'$ -мезонов (пунктирная линия). Если это превышение отнести к вкладу в сечение семейства  $J/\psi$ -мезонов и использовать аддитивную кварковую модель, то можно получить оценку сечения взаимодействия  $D$ -мезона с протоном:  $13 \text{ мб} < \sigma_T(Dp) < 15 \text{ мб}$ . В работе получены также полные сечения адронного фотопоглощения на дейтерии и нейтроне. Эти данные в течение долгого времени относились к самым высоким энергиям.

#### 4) Фоторождение $\rho^0$ -мезонов на протоне и на бериллии (Серпуховский ускоритель).

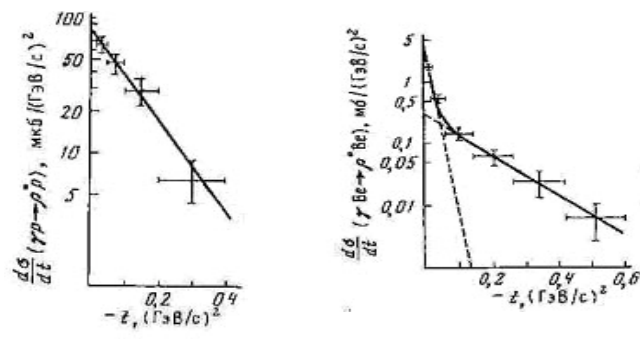
На электронном пучке с импульсом 31 ГэВ/с ускорителя У70 были также проведены исследования процессов



В эксперименте участвовали сотрудники ЕрФИ, ИФВЭ и сотрудники ФИАН Ю.А.Александров, А.С.Белоусов, Н.П.Буданов, Я.А.Ваздик, Б.Б.Говорков, В.В.Ким, В.А.Козлов, А.И.Лебедев, Е.И.Малиновский, В.В.Павловская, В.И.Сергиенко, Ю.В.Соловьев, Е.И.Тамм, В.А.Хабло, П.А.Черенков и Л.Н.Штарков.

В работе использовалась система мечения фотонов, состоящая из сцинтилляционных и черенковских счетчиков полного поглощения.  $\rho^0$ -мезоны рождались фотоном с определенной энергией в одной из мишеней (водородной или бериллиевой).  $\rho^0$ -мезоны регистрировались по их распаду на пару  $\pi^+\pi^-$  магнитным искровым спектрометром.

Измеренные сечения фоторождения  $\rho^0$ -мезонов на водороде для трех интервалов энергий 15-20 ГэВ, 20-25 ГэВ и 25-30 ГэВ равны, соответственно,  $10,9 \pm 1,1$ ,  $11,0 \pm 1,1$  и  $10,2 \pm 1,1$  мкбн. Полученные сечения удовлетворительно согласуются с результатами работ при меньших энергиях.



*Дифференциальное сечение упругого фоторождения  $\rho^0$ -мезонов на водороде и на ядре бериллия.*

На рисунке приведены дифференциальные сечения по квадрату переданного импульса  $t$  для процесса на водороде и на бериллии для энергетического интервала 15-20 ГэВ. Вид зависимости сечения для процесса на водороде описывается одной экспонентой с наклоном  $7,7 \pm 1,2$   $(\text{ГэВ}/c)^{-2}$ . Дифференциальные

сечения для других интервалов слабо зависят от энергии. Упругое фоторождение  $\rho^0$ -мезонов на водороде носит преимущественно дифракционный характер. Измеренное полное и дифференциальное сечения согласуется с предсказаниями модели векторной доминантности и аддитивной кварковой модели.

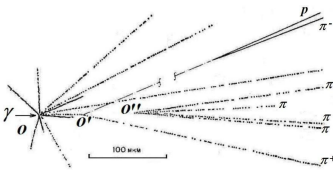
Вид зависимости дифференциального сечения по квадрату переданного импульса  $t$  для процесса на бериллии описывается двумя экспонентами. Экспонента с наклоном  $65 \text{ (ГэВ/с)}^{-2}$  описывает сечение когерентного образования  $\rho^0$ -мезонов в области дифракционного конуса до  $t < 0,1 \text{ (ГэВ/с)}^{-2}$ . Вторая экспонента с наклоном  $8,0 \pm 2,0 \text{ (ГэВ/с)}^{-2}$  совпадает с наклоном сечения на свободном протоне.

Анализ измеренных сечений на водороде и бериллии позволил получить (при использовании расчетов В.В.Благовещенского и А.И.Лебедева) сечение взаимодействия  $\rho^0$ -мезона с нуклоном  $\sigma_t(\rho N) \sim 34 \text{ мб}$ .

##### *5) Фоторождение очарованных частиц.*

В 1979-1986 гг. сотрудники ФИАН М.И.Адамович, Ю.А.Александров, С.Г.Герасимов, В.Г.Ларионова, Г.И.Орлова, Н.Г.Пересадыко, Н.А.Салманова, М.И.Третьякова, С.П.Харламов и М.М.Чернявский участвовали в исследованиях фоторождения очарованных частиц на ядрах (в рамках сотрудничества WA58). Эксперимент проводился на пучке меченых фотонов с энергиями 20–80 ГэВ на протонном ускорителе SPS в CERN. Базовой установкой служил универсальный спектрометр OMEGA. В качестве мишени и одновременно прецизионного вершинного детектора для идентификации распадов короткоживущих очарованных частиц использовались слои безподложечной ядерной фотоэмульсии БР2 НИКФИ толщиной 600 мкм. Отдельные слои эмульсии облучались в пучке фотонов, располагаясь под углом  $5^\circ$  к его направлению в передней части магнитного спектрометра. Программа геометрической реконструкции восстанавливала треки заряженных частиц в магнитном поле спектрометра, координаты места взаимодействия фотона в эмульсии и углы вылета частиц. Эти данные служили целеуказанием для поиска места

взаимодействия в эмульсии. Сравнение предсказанной и наблюдаемой в эмульсии топологии следов частиц позволяло выявить событие с рождением очарованных частиц. В эмульсии по спектрометрическим целеуказаниям было найдено около 17000 событий. В работе впервые наблюдался процесс фоторождения очарованных частиц, фоторождения пар  $D^0$ - и  $\bar{D}^0$ -мезонов, пар  $D^0$ - и  $D^-$ -мезонов,  $\bar{D}^0$ -мезона и очарованного бариона  $\Lambda_c^+$ ,  $\bar{D}^0$ -мезона и странно-очарованного  $F$ -мезона.



Событие фоторождения  
пары  $\bar{D}^0 + \Lambda_c^+$ .

На рисунке приведена микрофотография события фоторождения  $\bar{D}^0$ -мезона и очарованного бариона  $\Lambda_c^+$  фотоном с энергией 25 ГэВ ( $\bar{D}^0$ -мезон распадается на  $\pi$ -мезоны в точке  $O'$ .  $\Lambda_c^+$  распадается на  $\pi^+$ -мезон и  $\Lambda^0$  на расстоянии 50 мкм в точке  $O''$ ).

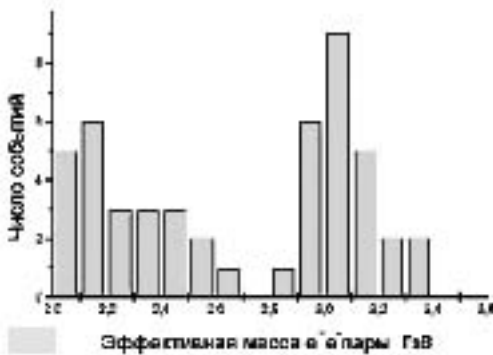
Измеренное сечение образования пар очарованных частиц фотонами в интервале энергий (20–70) ГэВ составляет  $(230 \pm 57)$  нбн/нуклон. Сечение ассоциативного образования  $\Lambda_c^+$ -бариона и  $\bar{D}^0$ -мезона равно  $(64 \pm 31)$  нбн/нуклон. Полученные распределения энергий бариона и мезона согласуются с моделью фотон-глюонного слияния. В работе были определены массы и времена жизни нейтральных и заряженных  $D$ -мезонов и  $\Lambda_c^+$ -бариона.

*б) Фоторождение  $J/\psi(3100)$  мезонов на дейтерии при средней энергии 55 ГэВ*

В 1975 году в Национальной ускорительной лаборатории им. Э.Ферми (Батавия, США) был сформирован электронный пучок с энергией  $90 \pm 2$  ГэВ и создана система мечения фотонов. На этом пучке был поставлен эксперимент

по измерению сечения фоторождения на дейтерии недавно открытых  $J/\psi$  - частиц. В эксперименте участвовали Т.Нэш, А.С.Белюсов, Б.Б.Говорков, Д.О.Колдуэлл, Дж.П.Кумалот, А.М.Эйснер, Р.Дж.Моррисон, Ф.В.Мерфи, С.Дж.Еллин, П.Дж.Дэвис, Р.М.Эглофф, Дж.Луст, Дж.Д.Прентис.

Электроны, испускающие в конверторе тормозные фотоны, отклонялись магнитом и регистрировались счетчиками системы мечения. Меченые фотоны, попадая в



*Эффективная  
масса  
 $e^+e^-$ -пар.*

жидкодейтериевую мишень, рождали  $J/\psi$  - частицы, которые идентифицировались по их распаду на  $e^+e^-$ -пары, которые регистрировались пропорциональными камерами и годоскопом из 48 черенковских спектрометров полного поглощения. Спектрометры имели радиатор из свинцового стекла SF-2. Измеренное распределение  $e^+e^-$ -пар по эффективной массе показано на рисунке. Анализ событий под пиком, соответствующим массе  $J/\psi$ -мезонов, показал, что их распределение по переданному импульсу  $t$  имеет вид  $e^{-bt}$ , где  $b=1.8\pm 0.4$  (ГэВ./с) $^{-2}$ . Поперечное сечение на нуклон для этого жесткого процесса составляет  $37.5\pm 8.2$ (стат.) $\pm 4$ (сист.) нб при средней энергии фотонов 55 ГэВ в лабораторной системе координат.

7) *Изучение образования адронов фотонами  
на ер – коллайдере ГЕРА.*

В 1983 г. П.А.Черенков на конференции в Сан–Ремо в Италии познакомился с директором института ДЭЗИ (Немецкий электронный синхротрон) в г. Гамбурге с профессором Ф.Зоргелем, который предложил коллективу лаборатории фотомезонных процессов ФИАН участвовать в совместных исследованиях по физике высоких энергий на проектируемом в то время коллайдере ГЕРА, в котором электроны с энергией 26 ГэВ должны сталкиваться с протонами, ускоренными до энергии 820 ГэВ (полная энергия в с.ц.м.  $W=2\sqrt{E_\gamma E_p} \sim 300$  ГэВ). Решение об участии в коллаборации и создании детектора Н1 поддержали Отделение ядерной физики АН СССР (М.А.Марков) и Совет по электромагнитным взаимодействиям (А.М.Балдин).

Детектор представлял собой многоцелевую установку, обеспечивающую регистрацию частиц конечного состояния в 4 $\pi$  геометрии, их идентификацию. Изготовление слоистой металлоконструкции детектора (весом ~2000 т) на Ижорском заводе было профинансировано АН СССР. Сотрудники ФИАН участвовали в сборке и наладке элементов детектора Н1, в разработке программного обеспечения, в получении, обработке и анализе экспериментальных данных. Система измерения светимости ер – столкновений и мечения фотонов (показана на рисунке) была создана в ФИАНе.



*Система измерения  
светимости  
 $e\bar{e}$  — столкновений  
и мечения фотонов*

Среди примерно трехсот участников коллаборации N1 работали следующие сотрудники ФИАН: В.Ф.Андреев, П.С.Баранов, А.С.Белоусов, Я.А.Ваздик, Н.З.Гогитидзе, Л.А.Горбов, А.И.Лебедев, С.В.Левонян, Е.И.Малиновский, С.В.Русаков, П.А.Смирнов, Ю.В.Соловьев, А.П.Усик, А.М.Фоменко, П.А.Черенков, И.П.Шевяков и Л.Н.Штарков.

Для определения светимости  $e\bar{e}$ -столкновений ( $L$ ) регистрировались на совпадения фотоны тормозного излучения электронов на протонах (счетчиком PD) и электроны ( $e^-$ ), испустившие тормозной квант. Сечение этого процесса хорошо известно, что обеспечивало высокую точность измерения светимости. Первые  $e\bar{e}$ -столкновения в коллайдере ГЕРА были зафиксированы этой системой 19.10.1991. Велось непрерывное мониторингирование светимости, так как её величина необходима для получения практически всех научных результатов и диагностики пучков в коллайдере. За все время работы коллайдера была набрана интегральная светимость  $\sim 0.5 \text{ fb}^{-1}$ .

События образования адронов фотонами тормозного излучения выделялись посредством регистрации электронов отдачи на совпадения с сигналом о появлении адронов в основном детекторе N1. Измерение энергии электронов отдачи дает информацию об энергии фотонов, которые привели к рождению адронов. Для измерения энергий электронов и фотонов использовались калориметры полного поглощения на основе радиационно стойких кристаллов КРС.

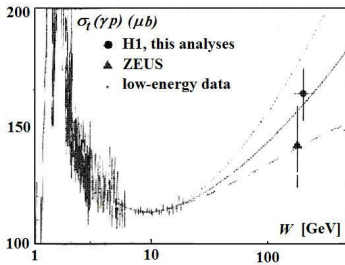
Как отмечалось выше сечение, фотопоглощения  $\sigma_i(\gamma p)$ , измеренное при энергиях 10 - 40 ГэВ, медленно спадает с ростом



энергии, оставаясь вблизи 100 мкбарн. Вместе с тем, в ИФВЭ при исследовании  $pp$  – взаимодействий при энергии  $\sim 70$  ГэВ было обнаружено выполаживание зависимости сечения  $\sigma_t(pp)$  от энергии и даже рост сечения

$Kp$ -взаимодействия. Это открытие получило название «Серпуховский эффект». Необходимо было измерить  $\sigma_t(\gamma p)$ , при энергиях выше 40 ГэВ (л.с.к.).

Такая возможность появилась после создания ер-коллайдера ГЕРА. Результаты измерения сечения  $\sigma_t(\gamma p)$  приведены на рисунке. Видно, что сечение фотопоглощения



*Зависимость полного сечения  $\sigma_t(\gamma p)$  от энергии*

увеличивается с ростом энергии так же, как и сечения адронных процессов. Такое поведение приблизительно можно описать выражением  $\sigma_t(\gamma p) = C \cdot W^{0.16}$ , где  $C$  - константа. Полное сечение при энергии  $W=200$  ГэВ составило  $\sigma_{tot}(\gamma p) = 165.3 \pm 2.3$  (стат.)  $\pm 10.9$  (систем.) мкб.

Изучение характера выделенных событий адронного фотопоглощения позволило провести дальнейший анализ компонент, составляющих полное сечение. Полное сечение можно представить в виде суммы сечений следующих процессов:

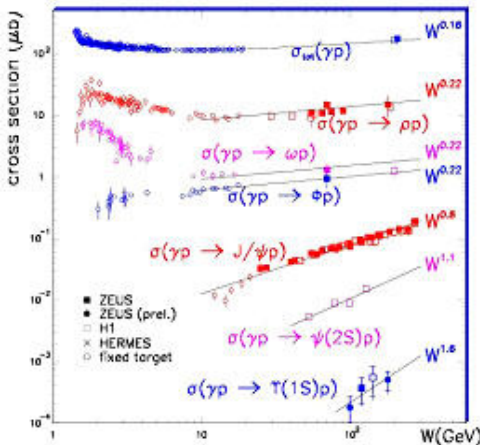
- Упругое образование векторных мезонов (EL)  $\gamma + p \rightarrow V + p$   
( $V$ :  $\rho^0, \omega, \phi$ )
- Дифракционная диссоциация фотона (GD)  $\gamma + p \rightarrow X + p$
- Дифракционная диссоциация протона (PD)  $\gamma + p \rightarrow V + Y$
- Двойная дифракционная диссоциация (DD)  $\gamma + p \rightarrow X + Y$ ,  
здесь диссоциируют как протон, так и фотон.
- Все процессы, не относящиеся к вышеперечисленным,

считаются не дифракционными (ND).

В таблице приведены соответствующие слагаемые.

Процесс	Поперечное сечение (мкб)	Полная ошибка (мкб)
DD	20 ± 20 (предположение)	—
GD	23.4 ± 2.6 ± 4.3 ± 10.2	11.3
PD	8.7 ± 1.5 ± 1.5 ± 3.0	3.6
EL	17.1 ± 1.6 ± 3.7 ± 1.4	4.3
DD+GD+PD+DD	69.2 ± 3.4 ± 8.8 ± 9.3	13.2
ND	96.1 ± 3.5 ± 14.7 ± 9.6	17.9
Total	165.3 ± 2.3 ± 10.9 ± 1.3	11.2

Слабый рост полных сечений при высоких энергиях связывают в настоящее время с вкладом процессов образования мини-струй в  $\sigma(\gamma p)$ , то есть с влиянием эффектов квантовой хромодинамики (КХД).



Сечения фоторождения векторных мезонов.

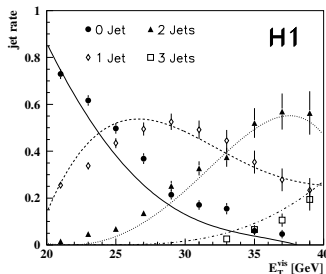
КХД описывает так называемые «жесткие» процессы, которые характеризуются большими передаваемыми импульсами или значительным изменением масс частиц.

На рисунке приведены измеренные на ер-коллайдере ГЕРА сечения фоторождения векторных мезонов, в том числе тяжелых ( $m > 3$  ГэВ). Видно, что с увеличением массы векторного мезона зависимость сечения его образования от энергии  $W$  изменяется с

$W^{0.22}$  на  $W^{1.8}$ , то-есть становится более сильной. Это есть следствие возрастания роли кварк-глюонной динамики процессов с увеличением массы мезона.

Был исследован также характерный для КХД процесс образования адронных струй, возникающих в результате фрагментации кварков и глюонов, которые определяют механизмы жестких процессов взаимодействия фотонов с протонами. Для выделения струй на фоне высокой множественности частиц конечного состояния использовался так называемый «конусный алгоритм». Струйная топология событий фоторождения становится все более выраженной с ростом поперечного импульса  $E_T$  адронной системы.

На рисунке приведена зависимость наблюдаемого числа событий образования одной, двух или трех струй от поперечного импульса струи. Видно, что для  $E_T > 35$  ГэВ наблюдается рост числа трехструйных событий. Из соотношения числа 3х-струйных и 2-струйных событий была получена «константа» сильного взаимодействия кварков с



*Число струй адронов в зависимости от  $E_T$ .*

глюонами при массе  $Z^0$ -бозона  $\alpha_s(M_Z) = 0.1176 \pm 0.002$ . При изучении жестких процессов с участием адронов (в том числе и в процессах фоторождения) был установлен рост  $\alpha_s$  с увеличением расстояния между кварками, что обеспечивает отсутствие кварков и глюонов в свободном состоянии.

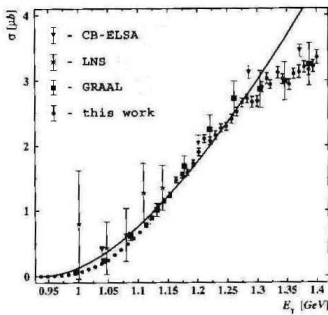
На ер-коллайдере были также исследованы процессы фоторождения частиц, содержащих «очарованные» и «прелестные»

кварки, измерены их времена жизни и найдены их возбужденные состояния.

8) Работы на микротронах университета г. Майнц

С 1994 г. сотрудники ФИАН В.Л.Кашеваров, Л.В.Фильков и С.Н.Черепня участвуют в работах по исследованию фотомезонных процессов на электронных микротронах МАМИ-В и МАМИ-С на энергии 0.84 ГэВ и 1.5 ГэВ, соответственно, Института ядерной физики Университета г. Майнц. Работы проводятся в рамках коллаборации А-2 на пучках меченных поляризованных фотонов с использованием поляризованных мишеней. Исследования направлены на выяснение динамики реакций фоторождения мезонов, на изучение электромагнитных свойств мезонов и нуклонных резонансов, распадающихся с испусканием нескольких мезонов ( $\pi, \eta$ ).

Измерены полное (см. рисунок) и дифференциальное сечения процесса  $\gamma + p \rightarrow \pi^0 + \eta + p$  и определены адронные ширины распада резонанса  $\Delta(1700)D_{33}$ . На пучке циркулярно поляризованных фотонов впервые была измерена асимметрия этого процесса. Эксперимент подтвердил



Полное сечение процесса  
 $\gamma + p \rightarrow \pi^0 + \eta + p$

доминирующую роль этого резонанса и позволил идентифицировать малые вклады в сечение резонансов с положительной четностью.

При исследовании радиационного фоторождения мезонов  $\gamma + p \rightarrow \gamma + \pi^+ + n$  была определена разность электрической и магнитной поляризуемостей  $(\alpha_\pi - \beta_\pi) = (11.6 \pm 1.5) \cdot 10^{-4} \text{ fm}^3$ , величина которой хорошо согласуется с результатами ранее выполненных экспериментов, но не согласуется предсказаниями киральной теории.

Были измерены дифференциальные сечения процесса  $\gamma + p \rightarrow \eta + p$  для 120 значений энергии от порога реакции до 1.4 ГэВ. Детальное изучение динамики реакции позволило обнаружить провал в зависимости полного сечения от энергии при  $W = 1680 \text{ МэВ}$ .

Исследовалась реакция  $\gamma + p \rightarrow \pi^0 + p + \gamma$ . С высокой статистикой измерены дифференциальные сечения для излученного фотона  $\gamma$  и для вылета  $\pi^0$ -мезона при энергиях возбуждения резонанса  $\Delta^+(1232)$ . Из сравнения полученных данных с предсказаниями моделей, в которых аномальный магнитный момент этого резонанса используется как свободный параметр, делается вывод о необходимости модификации теоретических подходов.

Были изучены также редкие распады  $\eta$ - и  $\omega$ -мезонов, образованных фотонами на нуклонах.

### Заключение

Работы по изучению процессов фоторождения мезонов и фоторасщепления ядер в ФИАНе заложили основы развития в нашей стране нового направления в фундаментальных исследованиях строения микромира: электромагнитные взаимодействия адронов и ядер. Были разработаны новые методики и приборы для ядерно-физических исследований: синхротроны, черенковские и сцинтилляционные счетчики, пропорциональные и дрейфовые камеры, ядерные фотозмульсии, быстрая электроника и т.п. Успешному развитию исследовательских работ содействовала тесная кооперация экспериментаторов и теоретиков.

Исследования по фоторождению мезонов внесли весомый вклад в выяснение природы сильных взаимодействий, в развитие теоретических подходов в физике частиц и ядер, начиная с теории

возмущений мезодинамики и дисперсионных соотношений, до квантовой хромодинамики и теории многочастичных взаимодействий.

Установлена изотопическая инвариантность сильных взаимодействий, были измерены S- и P-волновые мультипольные амплитуды образования пионов в области энергий от 150 МэВ до 800 МэВ. Проведена проверка предсказаний теории дисперсионных соотношений. В экспериментальных исследованиях фоторождения  $\pi$ ,  $\eta$ , и  $\rho^0$ -мезонов на ядрах (включая дейтрон) была выяснена область применимости импульсного приближения и установлена роль когерентных и некогерентных механизмов их образования. Изучение реакции  $\gamma + p \rightarrow \gamma + n + \pi^+$  позволило определить поляризуемость мезонов.

Измерено сечение адронного фотопоглощения на нуклонах в широкой области энергий, вплоть до предельно достижимых на ускорителях. Определены константы сильных взаимодействий в мезодинамике  $f$  и в квантовой хромодинамике (КХД)  $\alpha_s$ .

Исследованы жесткие процессы образования фотонами «очарованных» и «прелестных» частиц, измерены сечения их рождения, определены времена жизни. Выявлен быстрый рост сечений фоторождения тяжелых векторных мезонов с увеличением энергии, что обусловлено эффектами КХД. Изучены жесткие реакции фоторождения струй адронов. Установлено, что учет более высоких порядков теории возмущений КХД приводит к улучшению в описании жестких процессов фоторождения мезонов.

За экспериментальные и теоретические исследования электромагнитных взаимодействий адронов и ядер 15 работников ФИАН были отмечены Государственными премиями. Восемь сотрудников получили дипломы об открытиях. Результаты исследований процессов фоторождения мезонов опубликованы в ведущих научных журналах, докладовались на представительных международных и российских конференциях и неоднократно помещались в таблицах по компиляции мировых данных по физике высоких энергий (Particle Data Group).

Современный этап исследований требует проведения прецизионных измерений сечений и других наблюдаемых для процессов фоторождения мезонов. Так для проверки предсказаний

алгебры токов необходимы более точные данные о пороговых значениях амплитуд процессов фоторождения  $\pi$ -мезонов на протоне и на нейтроне.

Модель кварков предсказывает большее число барионных резонансов, чем их до сих пор выявлено. Поэтому целесообразно искать такие «пропущенные» резонансы в процессах фоторождения нескольких мезонов.

К настоящему времени открыто большое число мезонов, и исследование процессов их образования фотонами необходимо для развития феноменологических подходов к описанию таких процессов. Требуется детальное изучение процессов фоторождения странных частиц как на свободных нуклонах, так и на ядрах. Такие исследования несомненно дадут важную дополнительную информацию о взаимодействиях странных частиц и о структуре гиперядер. Большую актуальность имеют поиски в реакциях фоторождения мезонов связанных состояний мезонов с ядрами и исследования влияния ядерной среды на свойства адронных резонансов. Изучение фоторождения тяжелых мезонов на нуклонах необходимо для проверки КХД.

Таким образом, изучение процессов фоторождения необходимо для решения актуальных проблем строения вещества, для проверки новых подходов в физике микромира. Следует отметить, что процессы рождения  $\pi$ -мезонов фотонами играют важную роль в астрофизике, определяя обрезание спектра протонов космического излучения за счет образования пионов при взаимодействии реликтового излучения с протонами.

## ГЛАВА 5

### ***П. И. Зарубин, ОИЯИ, Ученый секретарь Научного совета РАН по электромагнитным взаимодействиям*** **Воспоминания о будущем**

*Не знаешь куда идти –  
посмотри откуда пришел.*

*Индийская поговорка.*

Релятивистская ядерная физика, зародившаяся на синхрофазотроне и развивающаяся на нуклотроне ОИЯИ, признается одной из ветвей научного предприятия, начатого шесть десятилетий назад В. И. Векслером и его соратниками. Впечатляющие успехи, достигнутые в то непростое и славное время, придают надежду на будущее российских исследований микромира. Автор этой заметки – сотрудник ОИЯИ и сверстник Лаборатории фотоядерных реакций, являющейся прямым наследником легендарного Питомника. С одной стороны эти обстоятельства ограничивают его личный мемориальный вклад в книгу, а с другой, возможно, делают интересным его взгляд как представителя «следующего» поколения на перспективу фундаментальных исследований электромагнитных взаимодействий. Жизненной удачей автора стало сотрудничество с академиком Балдиным, что позволяет использовать мысли



Александра Михайловича (для краткости А. М.) - как опубликованные, так и запомнившиеся.

### **Фоторождение мезонов – начало физики высоких энергий.**

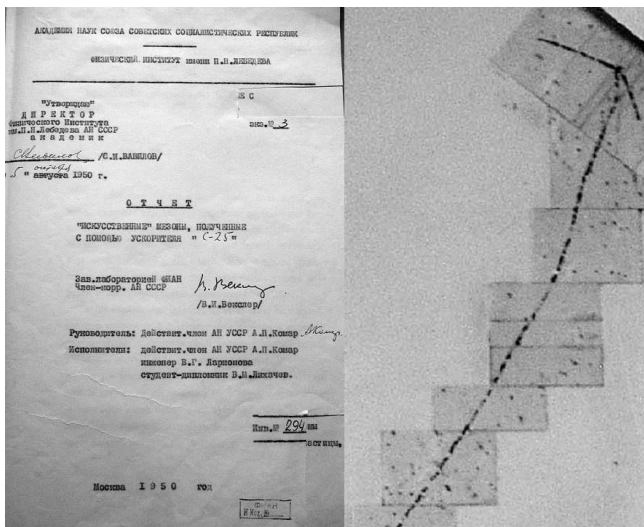
В неофициальном наименовании Питомник А. М. видел символичность – здесь поколения молодых исследователей начали работу. Многие из «первого призыва» заняли лидирующие позиции в физике атомного ядра и элементарных частиц, в том числе А. М. Балдин. В 1949 году после окончания МИФИ А. М. был направлен в ФИАН, где прошел путь от младшего научного сотрудника до руководителя сектора теоретиков, стал доктором наук и профессором. Сформировался как ученый под влиянием блестящей плеяды физиков ФИАН, а своими учителями считал Д. В. Скобельцына и М. А. Маркова. Уже первые работы студента МИФИ А. М. Балдина по теории движения частиц в циклическом ускорителе привлекли внимание В. И. Векслера. Эти исследования, выполненные под руководством М.С. Рабиновича совместно с В. В. Михайловым, были связаны с решением широкого круга вопросов, относящихся к теории циклических ускорителей, вошли в физическое обоснование крупнейшего в то время в мире ускорителя – синхрофазотрона ОИЯИ. Введение в строй электронных и протонных ускорителей в СССР в конце 40-х и в течение 50-х гг. потребовало физиков-универсалов, вовлечённых в теоретическую разработку и планирование тематики экспериментальных исследований, глубоко понимающих состояние и перспективы развития, как современной теории, так и экспериментальной и ускорительной техники. А. М. стал одним из наиболее ярких и плодотворно работавших представителей из этого ряда советских физиков.

По-существу, с Питомника началась «индустриализация» советской физики. Хотел бы процитировать слова А. М. из его мемуарной статьи «Сочинение на заданную тему». «Проектирование синхрофазотрона потребовало значительного объема экспериментальных работ и создания модельного ускорителя, который впоследствии был реконструирован в электронный синхротрон и до настоящего времени работает в

ФИАН. До 1954 года эти работы были сильно засекречены, что привело к потерям приоритетов отечественных физиков и инженеров. Синхрофазотрон носил шифрованное название "Объект КМ" (Кольцевой магнит), а его модель называлась МКМ. При всем большом ущербе, который нанесла система секретности, имелся и положительный (с точки зрения темы настоящих заметок) момент: большинство трудившихся в засекреченных областях науки цель своих исследований видело в результате, а не в самоутверждении в международном сообществе, закреплении за собой интеллектуальной собственности.» «Занятие физикой ускорителей в суровой обстановке сороковых годов требовало ответственности за количественные результаты.»



*А. М. Балдин и В.В.Михайлов (1944 г.)*



*Титульная страница отчета «ИСКУССТВЕННЫЕ»  
 МЕЗОНЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ УСКОРИТЕЛЯ С-25 и  
 фотография следа мезона с расщеплением ядра эмульсии*



*Киев 1959г. Конференция по фоторождению мезонов.*

*Слева направо: Харитонов (Ереван, ЕрФИ), А.С.Белоусов (Москва, ФИАН), В.Пауль (Бонн), Робинсон (США), В.Енчке (Гамбург, ДЕЗИ), Беллами (Великобоитания), Вокер (США), ?, ?, Р.Вильсон (США), Д.Сальвини (Италия, Фраскати), В.И.Гольданский (ФИАН), Э.Амальди (Швейцария, ЦЕРН), А.М.Балдин (ФИАН), В.Панофски (Стенфорд), П.А.Черенков (ФИАН).*

В начале 50-х гг., в связи с развёртыванием работ на электронном синхротроне ФИАН С-25 и по инициативе М.А.Маркова, А. М. Балдиным (частью - в соавторстве с В. В. Михайловым) были выполнены расчёты сечений рождения мезонов на нуклонах и ядрах высокоэнергетическими фотонами. Полусная модель с учётом аномальных магнитных моментов нуклонов, введённая в этих работах, получила впоследствии обоснование и стала неотъемлемой составной частью метода дисперсионных соотношений. Работы этого направления, отмеченные

Государственной премией СССР за 1973 г., сыграли заметную роль в развитии теории сильных взаимодействий и формировании представлений о существовании внутренней структуры и возбуждённых состояний нуклонов, а также в развитии методов адекватного описания процессов с участием сильновзаимодействующих частиц. Подобно тому, как классические опыты Р. Хофштадтера по рассеянию электронов на нуклонах и ядрах привели к представлению о пространственной протяжённости распределения электрического заряда адронов, исследования комптоновского рассеяния, выполненные в ФИАН и теоретически интерпретированные А. М. Балдиным в терминах коэффициентов электромагнитной поляризуемости нуклонов, показали, что элементарные частицы, к которым принято относить нуклоны, являются не только пространственно-протяжёнными, но и динамически-деформируемыми системами (открытие авторским коллективом эффекта зафиксировано в 1957 г.). При этом дисперсионное правило сумм А. М. Балдина для суммы коэффициентов электрической и магнитной поляризуемости нуклонов, предложенное в 1960 г., послужило основой первой реалистической оценки электрической поляризуемости протона и является в настоящее время основным и наиболее общим ингредиентом всех современных анализов данных по низкоэнергетическому комптон-эффекту на нуклонах. Взаимная превращаемость известных элементарных частиц, возможность их рождения и исчезновения в промежуточном состоянии рассматриваемой реакции - это фундаментальная черта релятивистской квантовой динамики, которая приводит к взаимной обусловленности свойств различных элементарных частиц. Выполненный позже в ОИЯИ по инициативе и при участии А. М. Балдина эксперимент по лептонному распаду фи-мезона (т.е. нейтрального векторного мезона с массой 1020 МэВ) с промежуточным переходом массивной частицы в фотон (зафиксированный в 1971 г. в качестве научного открытия) подтвердил, в частности, наличие "адронной" компоненты фотона, которая обуславливает адроноподобный характер поведения сечений взаимодействия фотонов высоких энергий с нуклонами и ядрами, определяя, образно выражаясь, "ядерные" свойства света.



*Б. Б. Говорков, А. М. Балдин, Ю. М. Адо и Е. И. Тамм на международном симпозиуме, посвященном 50-летию открытия автофазировки (ФИАН, 1994 г., фото А. Н. Горбунова)*

Обобщая понятия молекулярной оптики, А. М. Балдин ввёл в ядерную физику понятия тензорной и векторной поляризуемости ядер, характеризующие "оптическую анизотропию" атомных ядер с отличным от нуля спином. Одним из наиболее ярких проявлений этого свойства оказалось расщепление гигантского дипольного резонанса сильно деформированных ядер на два максимума, соответствующих двум типам коллективных дипольных колебаний нуклонов: вдоль и поперёк оси симметрии ядра. А. М. Балдин получил первые численные оценки параметров оптической анизотропии атомных ядер и предсказал, таким образом, ряд наблюдаемых эффектов, получивших впоследствии экспериментальное подтверждение в работах американских физиков с признанием его приоритета.

Приведем статью академиков Н. Н. Боголюбова и Б. М. Понтекорво, характеризующую этот этап.

Газета «Правда». 3 августа 1972 г. № 226 (19734)

На соискание Государственной премии

### **Крупный вклад в физику частиц.**

Преобладающей тенденцией в развитии научного понимания структуры вещества, как показывает история науки, было стремление свести основные свойства материи к свойствам

простейших объектов (молекул, атомов, элементарных частиц). Для этого создавались методы, позволяющие расчлнить мельчайшие частицы материи на составные части и исследовать их свойства. Особенно существенную роль сыграло использование электромагнитного излучения предельно малой длины волны. Чем короче длина волны фотонов, тем более тонкие детали строения материи можно "рассмотреть" с помощью установок для получения и регистрации такого излучения. Совокупность подобных приборов играет здесь роль, аналогичную микроскопу. В результате исследований излучения, поглощения и рассеяния фотонов и законов движения частиц в электромагнитных полях были открыты атомные ядра и фундаментальные частицы материи - электроны, обнаружены закономерности, положенные в основу квантовой механики.

Продвижение в область еще более коротких длин волн электромагнитного излучения привело к рождению квантовой электродинамики, которая объединила исключительно широкий круг явлений - от эффектов, наблюдаемых в области расстояний, в миллионы раз меньших размеров атома, до процессов космических масштабов. Теория электромагнетизма не только лежит в основе современного естествознания, сегодняшней техники, но и служит базой для построения теории других классов фундаментальных взаимодействий - сильных (ядерных) и слабых. Построение таких теорий должно открыть перед человечеством перспективы использования принципиально иных, чем ныне известные, законов природы.

Качественно новый этап в развитии исследований с электромагнитным излучением предельно малых длин волн начался в 1949 году, когда одновременно в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР и в Беркли (США) были запущены электронные синхротроны, дающие возможность получать фотоны с длиной волны, которая меньше размеров составного элемента атомного ядра - протона. В попытках расчлнить, разорвать протон с помощью такого жесткого излучения были обнаружены так называемые явления фоторождения мезонов, когда в результате столкновения фотона с протоном рождаются новые частицы, а сам протон часто выходит из таких столкновений неизменным. Число частиц не сохраняется, их может появиться столько, сколько

позволяет закон сохранения энергии. При этом старые наивные представления о делимости вещества на части, само понятие "состоит из" оказываются несостоятельными. Если от протона можно "оторвать" сколько угодно частиц, значит, он не элементарен, а бесконечно сложен.

Для количественного описания подобных систем с бесконечным числом степеней свободы необходим существенный прогресс в решении центральной проблемы физики - построения квантовой теории поля, в чем, собственно, и состоит главный смысл исследования процессов фоторождения мезонов. Достижения в построении квантовой теории поля уже привели к созданию новых и эффективных методов описания "поведения" материи на самых различных уровнях. Эти достижения революционизировали всю теоретическую физику, включая разделы, имеющие большое прикладное значение (статистическая физика, физика твердого тела, физика атомного ядра, физика металлов и др.)

Процессы образования и взаимодействия элементарных частиц изучают в десятках крупных лабораторий мира. Мощное развитие получило и исследование фундаментального взаимодействия фотон - протон, превратившись в большой раздел физики элементарных взаимодействий. Ее основной задачей стало исследование загадочных сильных (или ядерных) взаимодействий с помощью хорошо изученного электромагнитного взаимодействия. Оказалось, что основные черты процессов фоторождения связаны с динамикой сильных взаимодействий. Поэтому изучение таких процессов позволяет выявить новые закономерности сильных взаимодействий – наиболее сложного и очень актуального раздела физики элементарных частиц.

Работы М.И. Адамовича, А.М. Балдина, А.С. Белоусова, Б.Б. Говоркова, А.И. Лебедева, А.А. Логунова, Л.Д. Соловьева, А.Н. Тавхелидзе, Е.И. Тамма, С.П. Харламова, заложившие основы советских исследований фундаментального взаимодействия фотон - нуклон, выдвинуты на соискание Государственной премии 1972 года. Они выполнены в 1950-1970 годах и посвящены теоретическому и экспериментальному исследованию явлений фоторождения пи-мезонов. Авторами были впервые предсказаны основные закономерности фоторождения мезонов, созданы новые



методы исследований, экспериментально определены параметры классической мезонной физики и построена теория элементарных процессов фоторождения, основанная на фундаментальных принципах квантовой теории поля.

Особое внимание было уделено исследованию так называемого околопорогового фоторождения пи-мезонов. И не случайно: за последние 20 лет большинство попыток построения теорий сильных взаимодействий проверялось путем сопоставления их выводов именно с данными по фоторождению пи-мезонов в околопороговой области энергий. Для экспериментального исследования эти явления оказались весьма трудными: вновь образующиеся частицы имеют очень малую энергию. Чтобы зарегистрировать их, физики разных стран создавали специальные водородные мишени и тонкостенные счетчики, применялись и пузырьковые камеры. Названный нами коллектив предложил оригинальные и простые методы, позволившие получить данные, относящиеся к рекордно близким к порогу энергиям. Ряд принципиально новых методов был изобретен и для регистрации фоторождения нейтральных пи-мезонов - частиц, практически мгновенно распадающихся на фотоны. Авторами были изучены особенности рождения пи-мезонов не только при столкновениях фотон-протон, но и столкновениях фотон-дейтрон. В частности, ими впервые предсказаны, а затем экспериментально изучены характеристики процесса фоторождения нейтральных пи-мезонов на ядрах, протекающего без изменения свойств ядра (так называемый процесс когерентного фоторождения мезонов). Это позволило проверить один из основных принципов симметрии элементарных частиц - изотопическую инвариантность.

Анализ совокупности всех полученных авторами результатов позволил определить важнейшие параметры мезонной физики. Необходимо отметить, что содержание соответствующих разделов международных справочников по элементарным частицам и их взаимодействиям исчерпывается уже многие годы данными этих советских исследователей, несмотря на значительные усилия, предпринятые в других лабораториях. Широкое международное признание получили и их теоретические выводы.

Исследования развивались параллельно в тесном контакте физиков-теоретиков и экспериментаторов. Был применен весь арсенал современной физики элементарных частиц - от чисто инженерных разработок по созданию сложной аппаратуры до абстрактных методов теоретической физики с привлечением таких разделов математики, как теория обобщенных функций и теория функций многих комплексных переменных.

В итоге авторами были впервые сформулированы и доказаны, исходя из фундаментальных принципов квантовой теории поля, дисперсионные соотношения для фоторождения мезонов. Эти соотношения устанавливают связь между экспериментально измеримыми величинами и являются одним из очень немногих строгих результатов теории сильных взаимодействий. На их основе удалось связать физические характеристики процессов фоторождения пи-мезонов с характеристиками сильного взаимодействия пи-мезонов с нуклонами и получить надежные количественные результаты для процессов фоторождения в достаточно широкой области энергий. Тем самым были заложены основы теоретического описания процессов фоторождения. Тщательная экспериментальная проверка дисперсионных соотношений, проведенная как авторами, так и физиками многих других лабораторий мира, подтвердила справедливость основных физических принципов теории для данной области энергий.

Выдвинутые на соискание Государственной премии работы, выполненные в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне и в Физическом институте им. П.Н. Лебедева в Москве, внесли крупный вклад в отечественную и мировую науку. Они оказали большое влияние на развитие целой области фундаментальных исследований, как в СССР, так и за рубежом.

Академик Н. Боголюбов

Академик Б. Понтекорво

Мировой класс этих исследований позволил приступить к развитию ускорительной базы АН СССР на основе синхротрона С-25Р, что было неординарной задачей в политико-экономической ситуации 60-х годов. Наше лидерство признавалось - в этот период А. М. читал лекции в Боннском университете и среди слушателей

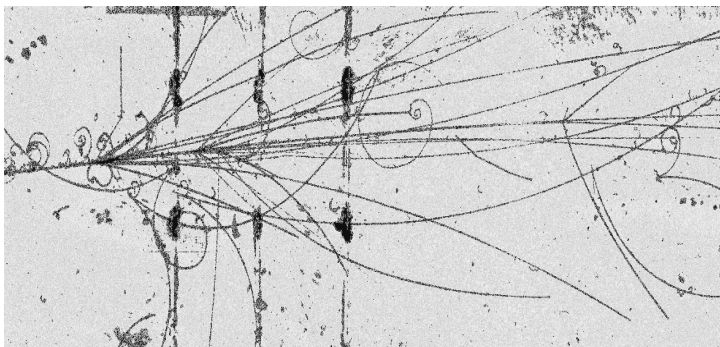
был Х. Шоппер. Вспоминается рассказ А. М. о визите на стройку С-25Р в Красной Пахре комиссии АН с целью ее ... закрытия. Реакция В. П. Дзелепова, одного из ее членов (член-корреспондента АН СССР, директор ЛЯП ОИЯИ), была следующей. Сталкивая камешки носком ботика вглубь котлована, он заметил: «Да..... это уже не закроешь». Как говорить, все надо делать вовремя. А. М. рассказывал и о планах строительства электронного ускорителя на энергию 5 ГэВ (что состоялось в ДЕЗИ), где его кандидатура (теперь можно поделиться) предполагалась М. И. Марковым в качестве научного руководителя. На базе С25Р возникал целый каскад ускорителей с перспективой создания электрон-позитронного коллайдера. Чем не ПЕТРА прямо под Москвой? Однако страна дала физикам столько сколько могла. И даже больше. Семена, заложенные в 40-50 е годы, давали мощные всходы. Амбициям физиков, казалось, не будет предела. В этот период началось самое активное разветвление отраслей физики микромира.

В дальнейшем, будучи исключительно занятым и прекрасно организованным научным лидером А. М. никогда не упускал из виду свою миссию председателя Научного совета РАН (ранее АН СССР) по электромагнитным взаимодействиям. Опираясь на авторитет академического звания, он «пробивал» в 90-е сохранение работы С-25Р на физику. Оказывалась поддержка и работе С-60 (ФИАН) как источника синхротронного излучения малой интенсивности для медико-биологических и кристаллофизических исследований. Разучиться ускорять частицы легко, а вот научиться вновь проблематично.

### **Релятивистская ядерная физика**

В 1968 году А. М. по инициативе и при поддержке М. А. Маркова был избран директором Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна). На молодого еще человека легла ответственность за формулирование актуальной научной программы коллектива, основанного В. И. Векслером, за сохранение и приумножение исследовательской базы и прежде всего – «векслеровского наследства» - Синхрофазотрона. Эта уникальная установка, создание которой стоило огромных усилий в трудные послевоенные годы, дала пионерские результаты

по физике элементарных частиц. Она дала путевку в творческую жизнь целому поколению экспериментаторов, в том числе и из стран-участниц ОИЯИ. Перед в А. М. стали задачи определения приоритетов развития ускорительного и экспериментального комплексов Лаборатории. Исследование взаимодействий ядер при релятивистских энергиях было выбрано в качестве основного ориентира. Для этого под руководством А. М. синхрофазотрон был преобразован в оригинальный ускорительный комплекс релятивистских и поляризованных ядер.



*Фотография взаимодействия ядра  $^{12}\text{C}$  с импульсом 4.5А ГэВ/с в пропановой пузырьковой камере (ЛВЭ ОИЯИ, 1974 г.)*

В начале 70-х годов Александром Михайловичем были определены долгосрочные цели исследований по релятивистской ядерной физике – приоритетному для отечественной науки направлению, основанному на стыке физики атомного ядра и элементарных частиц. Это направление сразу оказалось нацеленным на установление пределов применимости протон-нейтронной модели атомного ядра и построение физической картины ядерной материи на уровне субнуклонных составляющих - кварков и глюонов. На синхрофазотроне в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ впервые в мировой ускорительной практике были получены пучки релятивистских ядер, движущихся со скоростями

близкими к скорости света и энергиями порядка нескольких гигаэлектрон-вольт на нуклон. Изучение процессов столкновения ядер с ядрами распространилось до области энергий, где принципы теории относительности начинают играть определяющую роль. Новое направление физических исследований – релятивистская ядерная физика – возникло на фундаменте достижений квантовой теории поля, физики элементарных частиц, ядерной физики, физики ускорителей. Следом за Дубной релятивистская ядерная физика стала существенной частью программ крупнейших ускорительных центров США, Европы, России, стран-участниц ОИЯИ. При этом в Лаборатории динамично развивалась обширная экспериментальная программа сотрудничества по физике частиц с Институтом физики высоких энергий (Протвино), Лабораторией им. Э. Ферми (США) и Европейской организацией ядерных исследований (ЦЕРН).

Первым успехом в этом направлении стало предсказание А. М. Балдиным ядерного кумулятивного эффекта. Как показали первые эксперименты в Дубне, при энергиях в несколько ГэВ рождение частиц в соударениях ядер выходит на асимптотический режим. Это означает выход на режим неизменности физической картины рождения вторичных частиц при фрагментации ядер с ростом энергии соударения или достижения так называемой предельной фрагментации ядер – концепции, введенной А. М. Балдиным. В этой области кварковые и глюонные степени свободы начинают играть существенную роль. Замечательной особенностью процесса фрагментации ядер является распространение этих свойств и на частицы, рожденные за кинематическим пределом соударения свободных нуклонов – на кумулятивные частицы. На языке партонной модели это обстоятельство указало на наличие в ядрах многокварковых состояний. Вспоминается рассказ А. М. об общении с Р. Фейнманом в 1971 г. во время конференции АIP. Балдин: «Вы знаете, когда переменная Фейнмана  $X$  может быть больше единицы?» Фейнман: «Это невозможно.... хотя ... конечно .... в ядрах!»

Картина фрагментации ядер при релятивистских энергиях оказалась в глубокой аналогии с уже известными особенностями протон-протонного взаимодействия и глубоконеупругого рассеяния электронов на протонах при высоких энергиях.

Обнаруженные эмпирические закономерности позволили А. М. Балдину ввести универсальное импульсное распределение партонов в ядрах – кварк-партоновую структурную функцию ядра, что резко активизировало интерес к развитию теории для описания ядра на расстояниях меньше размера нуклона (модели флуктонов, короткодействующих нуклонных корреляций, мультикварковые состояния в ядрах и др.).

А. М. Балдиным предложены универсальные подходы к описанию не только спектров одиночных частиц, но и для описания всей картины акта множественного рождения частиц в соударениях ядер. Им было предложено описание процесса ядерных взаимодействий в пространстве 4-х мерных скоростей, исходя из принципов симметрии – симметрии самоподобия. Результаты этого нового направления – релятивистской ядерной физики – совместно с основополагающими работами теоретиков школы Н. Н. Боголюбова В. А. Матвеева и А. Н. Тавхелидзе составили единый комплекс работ по выявлению динамической роли нового квантового числа «цвет» и соответствующей симметрии в реализации наблюдаемого масштабно-инвариантного поведения адронных и ядерных взаимодействий с большой передачей импульса. Они были отмечены Ленинской премией за 1988 г.

Под руководством А. М. развивалась ускорительная база Лаборатории высоких энергий: были созданы новые ионные источники и экспериментальные зоны ускоренных пучков. В особое направление исследований сформировались эксперименты с пучками поляризованных дейтронов, созданы уникальные пучки поляризованных нейтронов. В них получены уникальные сведения о спиновой структуре дейтрона – этого “атома водорода ядерной физики” - на межнуклонных расстояниях меньше радиуса нуклона.

Итоги первого периода исследований с релятивистскими ядрами позволили А. М. выдвинуть и обосновать идею создания специализированного ускорителя релятивистских ядер – нуклотрона, магнитная система которого основана на явлении сверхпроводимости. Под его руководством были решены уникальные инженерные проблемы и прежде всего создание быстроциклирующих сверхпроводящих магнитов и комплекса оживления гелия. С запуском и развитием нуклотрона в 90-х годах

возникают качественно новые возможности для изучения свойств атомных ядер. Отечественная физика, наука стран-участниц ОИЯИ получила мощную основу для первоклассных исследований по физике сильных взаимодействий. Самое пристальное внимание А. М. уделял применению достижений релятивистской ядерной физики, технологий нуклотрона для создания ядерно-энергетических установок, управляемых ускорителем, проблемам трансмутации радиоактивных отходов, радиационным исследованиям для космических полетов.

### **Перспективы ядерной физики на нуклотроне ОИЯИ.**

Атомное ядро остается лабораторией квантовой физики полной сюрпризов. В этой связи А. М. Балдин в 90-е годы обращал внимание автора на возможность и актуальность постановки оригинальных исследований по физике ядра на пучках нуклотрона. Пучки стабильных и радиоактивных ядер качественным образом расширяют возможности для изучения ядерной структуры, в том числе кластерных степеней свободы. Получаемые сведения могут иметь ключевое значение в проблемах не только ядерной физики, но и ядерной астрофизики, физики космических лучей и ядерной геологии.

При продвижении к релятивистскому масштабу энергии ядер, ведущему к кинематической коллимации релятивистских фрагментов, возникают принципиальные преимущества экспериментального плана. Подходы, основанные на релятивистской инвариантности при теоретическом описании систем движущихся фрагментов, позволяют обеспечить единство интерпретации с выводами о фрагментации покоящихся ядер. Составляя самостоятельный раздел физики ядра, исследование ядер методами физики высоких энергий имеет принципиальное значение для развития таких разделов физики промежуточных энергий, как изобарные степени свободы в ядрах и реакции перезарядки, гиперядра, явления предельной фрагментации ядер. Например, привлечение сведений о конечных кластерных состояниях было бы весьма ценным при проведении комплексных экспериментов по кумулятивному рождению частиц, направленных на исследование кварк-партонных степеней свободы в легких ядрах.

Нуклотрон ОИЯИ, сменивший синхрофазотрон в 2000-е годы, позволяет вести исследования практически всех характеристик возбужденной ядерной материи. Оптимальный выбор исследуемой области возможен как вариацией энергии столкновения, так и оптимальным выбором кинематической области регистрации вторичных частиц. С развитием исследований по релятивистской ядерной физике на ускорительном комплексе синхрофазотрон - нуклотрон была создана целая система магнитооптических каналов транспортировки пучков. Эти каналы могут быть использованы для формирования вторичных пучков релятивистских радиоактивных ядер, что позволяет качественно расширить область экспериментов по ядерной физике.

Современной проблемой является изучение коллективных степеней свободы в возбужденных ядрах, в которых отдельные группы нуклонов ведут себя как составляющие кластеры - легчайшие ядра  $^4\text{He}$  и  $^3\text{He}$ , дейтроны, тритоны, а также несвязанные в кластеры нуклоны. Развивается концепция разреженной материи с кластеризацией нуклонов в эти ядра, дающая мотивацию экспериментам по изучению кластерных ансамблей. Поскольку макроскопические кластерные состояния могут играть роль в астрофизических процессах, эти исследования приобретают значение, выходящее за рамки ядерной структуры. Кластеризация отчетливо проявляется для легких ядер, где невелико число кластерных конфигураций. Легкие ядра являются источниками для генерации основных конфигураций нуклонных кластеров. Качественно разнообразить кластерную спектроскопию позволяют радиоактивные ядра. Настоящее исследование ориентировано на изучение ансамблей релятивистских кластеров и нуклонов, возникающих при периферической диссоциации легких ядер, в том числе радиоактивных.

Конфигурационное перекрытие основных состояний ядер и конечных состояний проявляется при диссоциации на периферии ядер мишени. Периферическая диссоциация протекает без перекрытия плотностей сталкивающихся ядер с передачей возбуждения вблизи энергии связи. Периферические реакции содержат все характеристики, которые могут быть использованы для интерпретации. Определение взаимодействий как периферических упрощается с ростом энергии ядер благодаря



возрастающей коллимации фрагментов. Инвариантное представление позволяет сохранить целостность с выводами физики низких энергий. Возникает возможность «томографии» ядер.

### **Электромагнитные взаимодействия ядер**

Периферические реакции возбуждаются в электромагнитных и ядерных дифракционных взаимодействиях, а также реакциях срыва. В наиболее периферических соударениях ядра взаимодействуют между собой через зависящие от времени электромагнитные поля, что позволяет изучать взаимодействия ядер с квазиреальными фотонами мишени или даже их когерентными группами (многофотонные процессы). Процесс кулоновской диссоциации является особенно простым и в то же время ценным механизмом, так как возмущение, вносимое полем ядра-мишени, известно достаточно точно. Кулоновским взаимодействием могут возбуждаться каналы диссоциации ядер в добавление к возбуждениям с сохранением связи нуклонов. В случае радиоактивных ядер исследование их структуры во вторичных пучках на тяжелых ядрах мишени является единственно возможным. Исследования ядер при высоких энергиях представляют интерес и из-за увеличения интенсивности эквивалентных фотонов. Заслуживают обсуждения особенности, связанные с его экспериментальным применением.

По-существу, начало использования кулоновского рассеяния ядер как пробника субатомной структуры материи было положено уже в пионерских работах Резерфорда и его сотрудников Гейгера и Марседена, исследовавшими рассеяние  $\alpha$ -частиц малой энергии от радиевого источника в золотой фольге, что и привело к открытию атомного ядра. Уже в тех давних экспериментах обнаружилось отличие от кулоновской зависимости сечения при рассеянии на ядрах водорода, на расстояниях приблизительно  $3 \cdot 10^{13}$  см (или порядка 3 Ферми). Таким очевидным образом проявилось радикальное снижение относительной роли кулоновского поля ядра и проявление сильных взаимодействий нуклонов.

Последующий прогресс в изучении атомных ядер в решающей степени оказался связан с созданием ускорителей

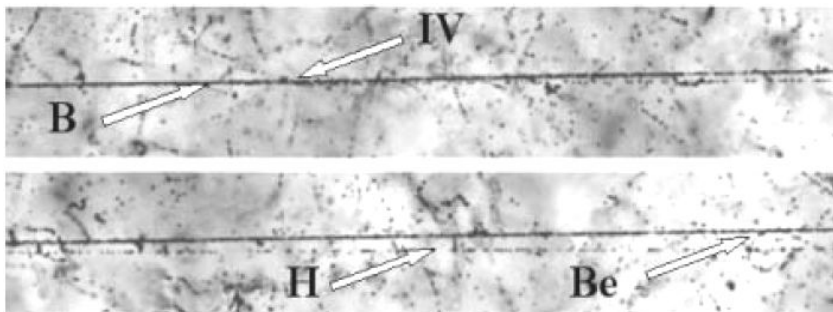
легких ядер и ионов, позволяющих преодолевать кулоновские барьеры сталкивающихся ядер и включать в действие ядерные силы. Можно считать известную работу Оппенгеймера и Филиппа 1935 г. следующим шагом в развитии настоящей темы. Они пытались объяснить превышение числа реакций  $(d,p)$  по сравнению с  $(d,n)$  виртуальным развалом дейтрона в кулоновском поле ядра еще до ядерного взаимодействия. Вследствие кулоновского отталкивания этот процесс мог бы объяснить доминирование реакции  $(d,p)$ . Таким же образом Р. Оппенгеймер трактовал действительный развал дейтрона в кулоновском поле ядра. С тех пор множество ядер-снарядов различных типов (от легких до тяжелых ионов, включая радиоактивные ядра) были изучены при начальных энергиях, начиная со значений ниже кулоновского барьера до промежуточных энергий. В течение достаточно длительного времени электромагнитные процессы в соударениях нерелятивистских ядер были предметом значительного теоретического, а также экспериментального интереса. Основное предположение для реакций такого типа состоит в том, что ядра не проникают друг в друга. Для соударений при энергии ниже кулоновского барьера условие отсутствия ядерных взаимодействий очень хорошо выполняется. Так открылся доступ к ценной информации о структуре ядра. Кулоновский механизм возбуждений послужил мощным инструментом для изучения электромагнитных переходов. Важный пример - исследование вращательных и колебательных степеней свободы в тяжелых ядрах методом кулоновского возбуждения.

Первые экспериментальные указания на существенную роль электромагнитной диссоциации релятивистских ядер были получены в экспериментах по физике космических лучей. Исследовалось взаимодействие ядер галактического происхождения с энергиями несколько ГэВ на нуклон в вольфрамовом поглотителе. Было обнаружено уменьшение среднего пробега ядер с ростом их энергии. Этот эффект был приписан вкладу виртуальных фотонов, нарастающему с увеличением энергии налетающих ядер.

Ускорение в 70-х годах легких ядер до релятивистских энергий в Беркли позволило систематически исследовать взаимодействия ядер  $^{12}\text{C}$  и  $^{16}\text{O}$  при энергиях 1.05А и 2.1А ГэВ с

фрагментацией в разнообразные изотопы. Особое внимание было уделено систематическому изучению поведения сечений удаления нуклона из первичного ядра в зависимости от атомного веса мишени. При переходе к тяжелым ядрам наблюдался резкий рост сечения по сравнению с зависимостью геометрического типа от весов ядра-снаряда и мишени, который ожидался пропорциональным фактору. Обнаруженный эффект нашел объяснение в зависимости от заряда мишени, пропорциональной  $Z^2$ , и был описан на основе метода эквивалентных фотонов с использованием данных по сечениям фотон-ядерных взаимодействий.

Другой эксперимент в Беркли, который также имел принципиальное значение, был выполнен на пучке изотопа  $^{18}\text{O}$  с энергией 1.7А ГэВ. В работе получены сечения фрагментации ядра  $^{18}\text{O}$  с отделением одного или двух нуклонов ( $\gamma, n$ ) и ( $\gamma, 2n$ ) во взаимодействиях на ядрах от Ве до. Несмотря на высокий порог отделения нуклонов, превышающий 12 МэВ, был обнаружен рост сечений, соответствующий кулоновскому типу  $Z^2$ . В этих исследованиях выявилась невозможность одновременного детектирования отделяющихся нуклонов с главным фрагментом, а также более вероятных каналов с более низким порогом (например,  $^{18}\text{O}(\gamma, \alpha)^{14}\text{C}$  с порогом около 6 МэВ). Решение проблемы детектирования всех фрагментов позволило бы иметь большую определенность в энергии квазиреального фотона. Это обстоятельство не позволило прямым образом учесть вклад стриппинга и ядерной дифракции. Тем не менее, в силу значительности эффекта на ядрах Рб и U его электромагнитная природа выявилась вполне очевидным образом. Отмечается, что одновременное получение информации обо всех каналах фотонных реакций является уникальной особенностью этого метода изучения релятивистской фрагментации, особенно для исследования каналов для нестабильных ядер.



*Электромагнитная диссоциация ядра  ${}^8\text{B} \rightarrow {}^7\text{Be} + p$  с энергией 1.2А ГэВ в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии. На верхней фотографии указана вершина взаимодействия IV. При смещении по направлению струи фрагментов (нижняя фотография) можно различить фрагмент Be и фрагмент H.*

Электромагнитное возбуждение и диссоциация в кулоновском поле тяжелых ядер вновь представляются очень мощным инструментом. Ожидается, что они сыграют даже более важную роль на новых пучках новых ускорителей FAIR (Германия), RIA (США), RIKEN (Япония). На период до создания коллайдеров электронов и радиоактивных ядер видны перспективы для экспериментального изучения этим методом ядер, удаленных от долины стабильности, методом кулоновской диссоциации на тяжелых ядрах. Особый интерес представляют исследования экзотических ядер на ускорителях с радиоактивными пучками с энергией несколько МэВ или десятков МэВ на нуклон, которые стали доступными в последние десятилетия по всему миру. Это направление исследований уже значительно расширило пейзаж ядерной физики, а также сделало возможными современные исследования в ядерной астрофизике. Так как электрическое поле ядра с большим зарядом  $Z$  многократно сильнее, чем поле электрона, оно может служить даже более удобным электромагнитным пробником. Кроме того, на нем можно изучать эффекты высоких порядков ( $Z^{2n}$ , где  $n$  – число виртуальных фотонов), недостижимые с пучками электронов.

Для случая нерелятивистского кулоновского возбуждения хорошим приближением является классическое рассмотрение относительного движения снаряда и мишени, в котором ядро-мишень зафиксировано, а ядро-снаряд движется по гиперболе. При промежуточных и релятивистских энергиях в качестве приближения можно заменить резерфордскую траекторию прямой линией. При соударениях выше кулоновского барьера между ядрами действуют и сильные взаимодействия ядер, которые при самых малых углах рассеяния могут стать незначительными. Хотя и тогда могут присутствовать ядерные эффекты: в данном случае это ядерная дифракция из-за волновой природы снаряда. Однако благодаря малости длины волны де Бройля у релятивистского снаряда такой эффект мал. Исследования структурных свойств ядер при высоких энергиях представляют интерес как по чисто экспериментальным причинам, так и из-за увеличения интенсивности спектров эквивалентных фотонов. Особенностью релятивистского соударения является то, что оно может вести к кулоновской диссоциации в добавление к кулоновскому возбуждению с сохранением связи частиц.

Дальнодействующие электромагнитные взаимодействия ведут к очень большим сечениям, которые могут легко быть проверены экспериментально. Прохождение релятивистского ядра мимо заряда тяжелого ядра мишени индуцирует электромагнитный импульс короткой длительности, усиленный благодаря лоренцовскому сжатию. Такой импульс может быть достаточно энергичен, чтобы возбудить гигантские резонансы в ядре, отделить фрагменты или даже создать частицы, как и в реакциях ядер и нуклонов с реальными фотонами. Из-за того, что амплитуда обмена фотоном имеет сингулярность при передаче 4-импульса, обмен виртуальным фотоном дает больший вклад в амплитуду для наименьших углов рассеяния, в отличие от сильного взаимодействия частиц. Для определенных процессов и условий эксперимента можно отделить электромагнитный вклад по этой особенности. Итак, можно считать, что электромагнитное поле быстро движущегося иона, пролетающего мимо исследуемого ядра, является интенсивным источником квазиреальных фотонов. Теоретическое описание механизма электромагнитных соударений ядер дается в методе эквивалентных фотонов, который был

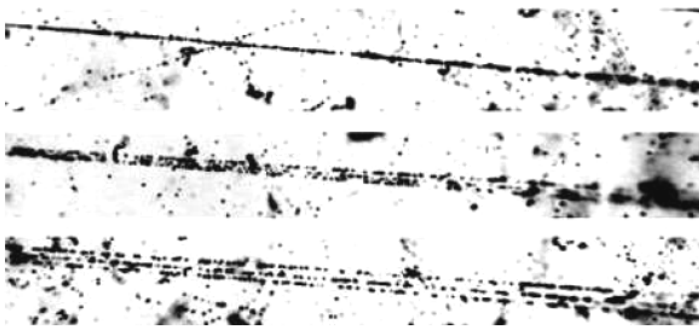
предложен Ферми, а позже развит Вайцеккером и Вильямсом. Теоретически снаряд и мишень могут меняться ролями в качестве объекта изучения и пробника, т. е., можно рассматривать случай внутреннего возбуждения снаряда электромагнитным полем мишени и наоборот, а также их одновременное возбуждение. Для теории этот выбор - просто вопрос соглашения, так как снаряд и мишень могут меняться ролями.

### Новые проблемы

Интригующий сценарий существования кластерных систем состоит в том, что может происходить конденсация  $\alpha$ -частиц, аналогично конденсации Бозе-Эйнштейна бозонных атомов в магнитооптических ловушках. Поиск  $\alpha$ -конденсата требует спектроскопии  $N\alpha$ -состояний с нулевым орбитальным моментом. Переход в конденсатное состояние должен происходить на  $N\alpha$ -пороге, что будет вести к предельно малым относительным энергиям  $\alpha$ -частиц. Возможно, релятивистская фрагментация окажется наилучшей лабораторией для генерации столь сложных состояний. Электромагнитное взаимодействие позволяет осуществить заселение  $N\alpha$ -состояний «мягким» образом. Простейшим  $\alpha$ -конденсатом является нестабильное ядро  ${}^8\text{Be}$ . Хотя установлено, что  $\alpha$ -кластеризация играет важную роль в структуре легких ядер, однако, только знаменитое состояние Хойла  $0^+$  в ядре  ${}^{12}\text{C}$  отнесено к разреженному  $\alpha$ -конденсату. Это состояние, возникающее при плотности  $\rho_0 / 3$ , может быть описано с хорошей точностью, как конфигурация  $\alpha$ -частиц, сконденсированных на низшей  $0S$  орбите. Проблема состоит в поиске состояния Хойла в  $3\alpha$ -спектре инвариантных масс. Первым объектом предлагаемого эксперимента является ядро  ${}^{12}\text{C}$ , а его целью – обнаружение и исследование процесса электромагнитной диссоциации  ${}^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$  на ядрах свинца.

Когерентная диссоциация ядер с полным разрушением на легчайшие ядра и нуклоны без возбуждения ядер мишени наблюдались для ядер Au и Pb и даже U. В случае разрушения нейтроноизбыточных ядер происходит и генерация когерентных ансамблей нейтронов. Возможно, что в этом явлении подтверждается существенная роль эффекта дальнедействующих

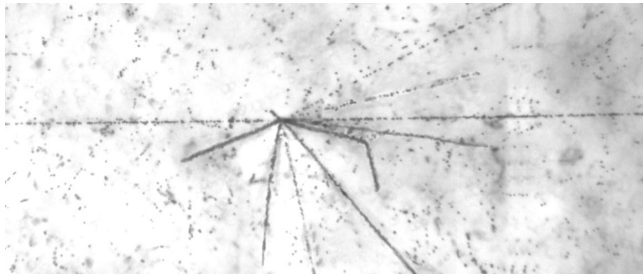
квантово-электродинамических взаимодействий. Порождаемые тяжелыми ионами электрические и магнитные поля делают возможными многофотонные обмены и ядерные возбуждения, которые невозможно наблюдать в случае электронов. Возбуждение кратных (двойных, тройных и т.п.) гигантских ядерных резонансов различных мультипольностей может приводить к появлению неожиданных и даже экзотических конфигураций нуклонных кластеров в конечных состояниях распадов этих резонансов. Обнаружение расщепления  $^{12}\text{C} \rightarrow 3\alpha$  в электромагнитном поле тяжелого ядра – первый шаг в этом направлении.



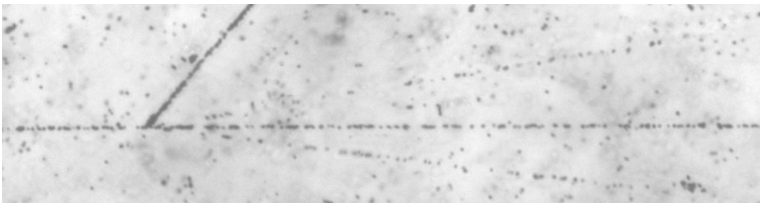
*Фрагментация релятивистского ядра  $^{12}\text{C} \rightarrow 3\text{He}$  с импульсом 4.5A ГэВ/с в периферическом взаимодействии на ядре эмульсии; верхнее фото: вершина взаимодействия и струя фрагментов в очень узком угловом конусе; среднее фото: смещение от вершины взаимодействия по направлению движения фрагментов; нижнее фото: дальнейшее смещение вдоль струи фрагментов - при таком удалении от вершины взаимодействия становятся отчетливо различимыми три фрагмента He*

Исследования ядер, лежащих в области границы нейтронной стабильности, сформировали актуальное направление исследований – физика ядер с экзотической структурой, для которых наблюдались anomalously большие радиусы ядер. Малые энергии связи позволяют определить структуру ядер с избытком нейтронов  $^6\text{He}$ ,  $^8\text{He}$ ,  $^{11}\text{Li}$  и  $^{14}\text{Be}$  как молекулярно-подобную. В настоящее время остаются малоизученными корреляции внешних нейтронов со слабой связью с основой ядра (кором). Нейтронное гало, обнаруженное в них, может играть роль катализатора

процессов в сверхновых. Изучение нейтронно-кластерных состояний периферической диссоциации перечисленных ядер имеет ценность для развития и этого раздела ядерной физики. Вслед за  $\alpha$ -кластеризацией и нейтронами могут исследоваться моды с участием тритонов в нейтроноизбыточных изотопах Li, Be и B. Процессы с участием тритонов должны рассматриваться в ядерной астрофизике как дополнительная ветвь нуклеосинтеза. Интригующей возможностью является образование стабильного кластера из 4-нейтронов или тетранейтрона  ${}^4n$ . Даже не имея стабильности, такое состояние может проявиться как резонанс над порогом 1-3 МэВ.



*Событие фрагментации  ${}^6\text{He} \rightarrow {}^4\text{He}$ : входящая слева частица с зарядом  $Z_{pr} = 2$  создала вершину взаимодействия с 8 фрагментами и почти не отклоняющийся релятивистский след  $Z_{fr} = 2$*



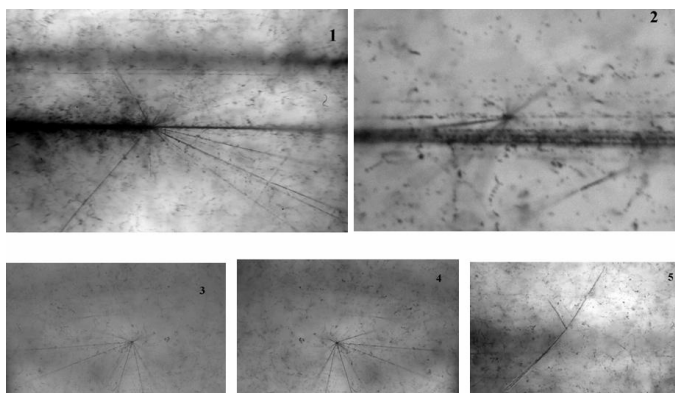
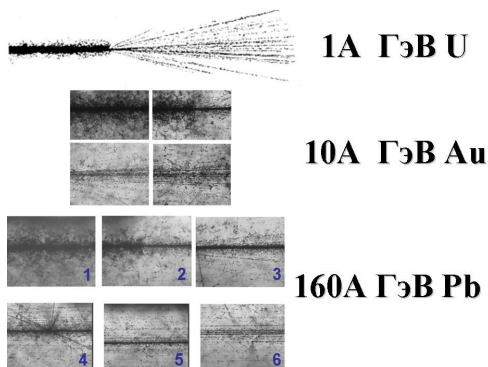
*Событие фрагментации  ${}^6\text{He} \rightarrow {}^4\text{He}$ : входящая слева частица с зарядом  $Z_{pr} = 2$  создала вершину взаимодействия с фрагментом мишени, парой мезонов и почти не отклоняющийся релятивистский фрагмент  $Z_{fr} = 2$*

Ускорение ядер  ${}^{12}\text{C}$  открывает возможности для экспериментов во вторичных пучках по структуре гало в изотопе



$^8\text{He}$  и поиску тетранейтрона  $^4\text{n}$ . Энергия связи к диссоциации  $^6\text{He} + 2\text{n}$  составляет всего 2.2 МэВ, а к  $^4\text{He} + 4\text{n}$  - 3.1 МэВ. Для сравнения, энергия связи 4 нейтронов в  $^{12}\text{C}$  составляет около 63 МэВ. Слабая связь нейтронов в  $^8\text{He}$  позволяет использовать электромагнитную диссоциацию. Сечения процесса  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  (1.05А ГэВ)  $\rightarrow$   $^8\text{He}$  составляет  $35 \pm 7$  мкб. При интенсивности  $10^9$  ядер и 10% эффективности взаимодействия можно ожидать образования 10 - 100 ядер  $^8\text{He}$ . Радиус «пятна» нейтронного гало на удалении 10 метров составит около 50 см. При поперечном импульсе релятивистских нейтронов около 0.1 ГэВ/с можно разделить вершины ливней в калориметре и выполнить угловой анализ релятивистских нейтронов. Факт прохождения  $^4\text{n}$  соответствует развитию одиночного ливня. Оценка выхода  $^4\text{n}$  не надежнее утверждений об их реальности. Диссоциацией  $^4\text{He} + ^4\text{n}$  будет протекать на фоне  $^6\text{He} + 2\text{n}$ ,  $^7\text{He} + \text{n}$ ,  $^4\text{He} + 4\text{n}$ . Статистика событий такого типа составит 1 событие в цикл, а искомым – может быть на порядок меньше, т. е. один  $^4\text{n}$  за 10 циклов. Для накопления статистики требуются сотни часов ускорительного времени. Столь малый выход связан не с малостью сечения образования  $^4\text{n}$ , а с созданием условий его наблюдения. Отметим полезность спектрометрии заряженного релятивистского фрагмента He, которая позволила бы реконструировать инвариантную массу возбуждаемого ядра  $^8\text{He}$ . В той же постановке могли бы быть детально исследованы особенности диссоциации  $^2\text{H} \rightarrow \text{p} + \text{n}$ ,  $^3\text{H} \rightarrow \text{p} + 2\text{n}$ ,  $\text{d} + \text{n}$ , а также  $^6\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + 2\text{n}$ .

Задачи физики электромагнитных взаимодействий могут решаться на универсальном спектрометре. Ключевой компонент – 100-канальный адронный калориметр с площадью около  $1 \text{ м}^2$  и энергетическим разрешением не хуже 30%. Для мечения электромагнитных взаимодействий желателен использование активной мишени в виде сэндвича свинец-плексиглас, veto-детекторов фрагментации мишени, а также координатных детекторов для проводки фрагментов налетающих ядер. Будучи создан, такой калориметр будет востребован и в исследованиях центральных взаимодействий.



*Множественная фрагментация ядра золота с энергией 10A ГэВ: вершина взаимодействия (1), «нейтронная» звезда в струе релятивистских фрагментов (2), «нейтронные» звезды, обнаруженные при дальнейшем продвижении в направлении струи*

## Перспективы

События множественной фрагментации релятивистских ядер вплоть до полного разрушения на легчайшие ядра и нуклоны без возбуждения ядер мишени надежно наблюдались для ядер Au и Pb и даже U. Как таковое, существование этого явления не вызывает сомнения. Возможно, что в нем подтверждается существенная роль эффекта дальнедействующих квантово-электродинамических взаимодействий. Большие электрические заряды тяжелых ионов, движущихся с релятивистскими скоростями, и порождаемые ими сильные электрические и магнитные поля делают возможным наблюдение процессов многофотонных обменов и нового типа квантовых переходов и ядерных возбуждений, которые практически невозможно наблюдать из-за их малости в электрон-ядерных взаимодействиях. Возбуждение кратных (двойных, тройных и т.п.) гигантских ядерных резонансов различных мультипольностей может приводить к появлению неожиданных и даже экзотических конфигураций нуклонных кластеров в конечных состояниях распадов этих резонансов.

Можно обрисовать исследовательский горизонт, на который указывают эти результаты. Представленные выводы мотивируют дальнейшие исследования систем ядерных кластеров методом релятивистской фрагментации. Механизмы множественного развала легких ядер могут лежать в основе множественной когерентной диссоциации и самых тяжелых ядер. По-существу, были сделаны пусть и совершенно необходимые, но только первые шаги в этом направлении.

Ультратрапериферические столкновения с диссоциацией ядер могут привести к появлению в конечном состоянии многочастичных комбинаций легчайших ядер с кинематическими характеристиками относительного движения, которые представляют ядерно-астрофизический интерес и которые трудно сформировать в каких-либо других лабораторных условиях. Подчеркнем соответствие между масштабом относительных

энергий релятивистских фрагментов и диапазоном температур важнейших процессов в природе - от нуклеосинтеза в Солнце до взрывов сверхновых.

Углубленное исследование когерентной диссоциации тяжелых ядер приведет к постановкам новых физических задач и развитию экспериментальной техники. Например, для исследования электромагнитной диссоциации ядер с энергиями порядка  $10^4$  ГэВ на мишенях из свинца представляется весьма перспективным использование адронных калориметров, что позволит детектировать релятивистские нейтроны-фрагменты. В случае полного разрушения тяжелых ядер на легкие фрагменты присутствие нейтронной компоненты обусловлено симметричностью легких ядер.

Здесь можно отметить и интересную перспективу поиска многофотонных эффектов при разрушении молекулярных систем, энергии связи в которых порядка  $0.1$  эВ. Эти вопросы имеют непосредственное отношение к космической радиобиологии и технике.

В связи с указанной проблемой воздействия сильных электромагнитных полей на ядерную материю представляет большой интерес новое направление (проект ELI – Extrem Light Infrastructure), в котором предполагается использование мощных тераваттных лазеров. Под воздействием когерентного лазерного импульсного излучения за счет нелинейных эффектов может стать возможным, например, деление ядер. Эксперименты в этом направлении могут дать полезную информацию о многофотонных электродинамических процессах, что представляет интерес как с фундаментальной (взаимодействия импульсных полей релятивистских тяжелых ионов, астрофизические процессы), так и прикладной точки зрения (ядерная энергетика, мощные гамма-источники на электронных накопителях и др.).

При оценке в целом фактов и идей, приведенных в заметке, возникает захватывающая картина исторической логики развития физики микромира. Представляется, что успех нынешнего этапа будет связан с синергетическим слиянием заделов и идей, как это было сделано А. М. Балдиным в период возникновения физики релятивистских ядер. Один из сценариев – физика релятивистских кластерных систем возникающих в электромагнитной диссоциации

релятивистских ядер. Фундаментальный интерес – новый уровень понимания многочастичных аспектов ядерной структуры. Практический подход – методы и методология физики высоких энергий.

Хотел бы завершить эти заметки цитатой из статьи А. М. Балдина «О проблеме значимости в физике» в журнале "Вопросы философии" N10 за 1974 год. «Таким образом, наука стала настолько сложным организмом и настолько тесно связана с практической деятельностью людей, что основной ее критерий значимости — критерий, связанный с внутренней логикой развития науки, — становится частью многомерного критерия. Необходим разумный баланс требований, как со стороны внутренней логики науки, так и со стороны ее практической значимости. Нарушение этого баланса может привести либо к безразличию общества к науке, либо к потере перспективы в фундаментальных исследованиях. Разработка методики сведения многомерного критерия к единой количественной мере значимости отдельных научных направлений — насущная потребность практики планирования науки и оценки ее достижений. Поставленная задача должна включать не только установление системы коэффициентов относительной значимости, но и определение ее динамики. Учет динамики означает, что система целей и значимостей может резко меняться как в связи с развитием техники и самой науки, так и под воздействием внешних обстоятельств (экологическая проблема, энергетический кризис и т. п.) и нуждается в постоянном пересмотре.»

**ГЛАВА 6.*****Ю.Н.Ранюк.*****Сотрудничество ХФТИ – ИЯИ РАН**

*Автор этой статьи – ведущий научный сотрудник ХФТИ (г.Харьков) многие годы активно работал в сотрудничестве с российскими учеными. Автор нескольких книг по истории ядерной физики.*

Первая совместная работа Харьковского физико-технического института и Института ядерных исследований (Москва) была опубликована в 1976 году в журнале Ядерная физика (т. 24, вып. 4) и называлась она «Деление ядер  $^{241}\text{Am}$  и  $^{243}\text{Am}$  фотонами с энергией с энергией 50 – 139 МэВ». Её авторами были Ю.А. Виноградов, Л.Е. Лазарева, В.Г. Недорезов, Н.В. Никитина, Н.М. Паровик (москвичи) и В.И. Касилов, Ю.Н. Ранюк, П.В. Сорокин (харьковчане). Этой работой было заложено начало продолжительному и плодотворному сотрудничеству двух институтов и двух коллективов. Чтобы понять, как это все было, придется вернуться на несколько десятков лет назад.

В 1951 году в Стенфорде (США) был запущен один из первых в мире линейных ускорителей электронов «Mark I». Длина его составляла 4 фута и он ускорял электроны до энергии 6 МэВ. Харьков решил посостязаться с Стенфордом в сооружении электронных линейных ускорителей. Ещё в 1947 году в Харькове была выполнена основополагающая теоретическая работа «Динамика заряженных частиц в линейном ускорителе с бегущей волной», а в 1954 году заработал ускоритель на энергию 3.5 МэВ. Всего в Харькове в период 1951 – 1965 гг было сооружено 6 линейных ускорителей электронов. Из них наиболее интенсивно использовались в изучении фотоядерных реакций два: ускоритель на энергию 300 МэВ (запущен в 1964 году) и ускоритель на номинальную энергию 2 ГэВ (запущен в 1965 году).

Многие физики страны проявили интерес к открывшимся в нашем институте возможностям для проведения экспериментов. Здесь я хочу особенно отметить Антона Пантелеймоновича Комара, академика АН УССР, одно время работавшего директором

Ленинградского физтеха. Посмотрев работу нашего электронного ускорителя на 300 МэВ, Антон Пантелеймонович изъявил желание провести у нас опыты по измерению энергетических и массовых распределений осколков фотоделения. Вскоре приехала группа опытных и активных экспериментаторов в составе Бочагова Бориса Архиповича, Семенчука, Солякина Георгия Ефимовича, Котова А.А и др. К сожалению, Комара и Бочагова давно уже нет среди живых. Всех соавторов я очень хорошо помню и испытываю к ним глубокое чувство уважения.

Где-то в 1964 году я впервые услышал о возможности детектирования осколков деления стеклами и сразу же поставил пробный эксперимент. Благо у меня все для этого было: урановая фольга, источник нейтронов, плавиковая кислота, микроскоп. Осколки я увидел сразу и через некоторое время начал опыты по изучению процессов фото- и электроделения. Опубликовал несколько обративших на себя внимание работ. О них узнали в Ереване, где был запущен электронный синхротрон на энергию 4.5 МэВ и кто-то из тогдашних директоров – Алиханян или Аматауни – пригласил меня продолжить мои харьковские эксперименты в сторону более высоких энергий. Там моими коллегами стали Вартапетян Гамлет Арутюнович, Нина Демехина и др. Наша сотрудничество оказалось очень успешным.

Мне трудно сейчас припомнить как и когда я попал в Институт ядерных исследований. Хорошо помню, что ехал я к Любовь Ефремовне и в Москве она терпеливо навела меня по телефону на «Питомник». Я же то ли в силу своей бестолковости, то ли по другой причине никак не мог на него выйти. Мне кажется, что сейчас я найду его в темную ночь с закрытыми глазами. Любовь Ефремовна, о которой я был уже слышан, поразила меня своим вниманием, доброжелательностью, чуткостью. Сейчас я уверен, что мы, харьковчане, этим злоупотребляли. Какая бы нужда не приводила нас в столицу – мы шли к Лазаревой. Ее связи в научном и чиновничьем мире и ее авторитет были необъятны и она терпеливо вникала в наши проблемы и всегда решала их самым оптимальным и решительным образом.

Я припоминаю научные интересы тех благословенных лет. Очень большое внимание привлекал к себе «гигантский» резонанс. Мне даже помнится, что в то время это была тема №1. Извлечение

сечений фотоядерных реакций из кривых выхода (метод «разности фотонов»). Фотоделение ядер и детектирование осколков деления.

Теперь самое главное. Как-то Любовь Ефремовна повела меня в одну из комнат своей лаборатории и познакомила с Володей Недорезовым. Я до сих пор помню эту комнату и девочек, которые окружали Володю. Лазарева изъявила желания, чтобы мы организовали сотрудничество на базе наших электронных ускорителей, которых у нас к тому времени развелось много и мы не всегда знали, что с ними делать. Основа для сотрудничества была у нас прочная. Самое главное – это дружба. У нас в институте до сих пор уверены, что Недорезов – это мой брат. Кроме этого два электронных ускорителя. Володя где-то раздобыл набор уникальных мишеней трансурановых изотопов. Кроме этого, наши экспериментаторы еще не раскачались и мы всегда имели возможность получить пучковое время без задержки и в необходимом количестве. Ускорительщики буквально сдували с нас пыль: они хотели поскорее увидеть в печати сделанные на их ускорителях работы. Мы занялись измерением сечений мгновенного и задержанного фото- и электроделения изотопов ядер Th, U, Pu, Am, Np.

Московские физики решительно усовершенствовали методику регистрации осколков. Если мы считали количество осколков деления, наблюдая их под микроскопом, то теперь подсчет осколков осуществлял специально созданный автомат и работа пошла намного быстрее и веселее.

В интервале 1976 – 1989 гг нами было опубликовано 7 совместных работ. Последняя работа называлась «Измерение сечений мгновенного и запаздывающего деления  $^{243}\text{Am}$  ядер под действием фотонов и электронов с энергией 450-950 МэВ». Ее авторы Евсеев И.Г. Иванов Д.И. Недорезов В.Г. Нога В.И. Пашук С.А. Савицкий Г.А. Судов А.С. (Препринт ИЯИ АН СССР П-0517 Москва ). Опубликована она была в 1989 году.

Апофеозом нашего сотрудничества явилось издание в 1989 году в киевском издательстве «Наукова думка» монографии «Фотоделение ядер за «гигантским резонансам» (190 стр.). Мне до их пор часто приходится слышать (правда не от ядерщиков, а от материаловедов) что наша книга у них является настольной).



На этом наше сотрудничество не кончилось. Я часто вспоминаю, как помогал москвичам делать в Харькове сцинтилляционную «русскую» стенку для Гренобля. За стиролом Харьковский Институт монокристаллов послал цистерну в Пермь. И надо же было такому случиться, что пока эта машина ездил, в Белгороде появилась таможня и таможенники потребовали у перевозчиков соответствующие документы. Меня срочно вызвали ехать в Белгород. После короткого совещания было принято решение везти цистерну проселочными дорогами подальше от милиции. Поехали мы густым лесом вдоль реки Северский Донец, Это, как известно, река князя Игоря, берегами которой он убегал из половецкого плена. Все было хорошо пока за одной из излучин мы увидели милицейскую машину и двух милиционеров, которые в рабочее время мирно удили в реке рыбу. Увидев нас, они побросали удочки, достали достали пистолеты и повернули нас с поднятыми руками лицом к цистерне. После этого приступили к ощупыванию наших карманов.

Как результат этого детективного приключения через 10 лет в литературе появилась статья «A Large acceptance lead-scintillator time-of-flight wall for neutral and charged particles», опубликованная в NIM, A487(2002) 396. Авторы V. Kuznetsov Ф. Lazik Yu. Malyukin V. Abramov, Yu. Ranyuk.

Нет ничего в мире вечного, кончилось и наше сотрудничество, но не дружба. Я хочу сказать, что в свое время я был постоянным участником ваших семинаров, в том числе последнего. Лет 15 тому судьба меня закинула в Женеву, а Владимира в Гренобль. Мы встречались с ним и там, и там. Свой путь в Женеву я проложил через Питомник, где всегда проводил день по дороге в Шереметьево.

Хочу обратиться ко всем присутствующим и выразить уверенность, что вся ваша старая гвардия меня помнит, как и я помню и люблю всех.



*Мой день рождения в ЦЕРНе 2 июня. Мои гости из Гренобля Галина Хоткевич (француженка) и Владимир Недорезов (москвич) в гостиничной столовой.*

**ГЛАВА 7.*****В.В.Варламов, Б.С.Ииханов***

*Авторы этой статьи являются ведущими сотрудниками НИИЯФ МГУ, где многие годы активно ведутся работы по изучению фотоядерных реакций*

**ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ  
ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени  
Д.В.СКОБЕЛЬЦЫНА  
МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА**

Ядерно-физические исследования в Московском государственном университете начались в 1940 году, когда Д.В.Скобелев основал первую в МГУ и в СССР экспериментальную кафедру по физике атомного ядра. В 1946 году при активном участии академика Д.В.Скобелева по Постановлению правительства СССР в МГУ были созданы 2-й Научно-исследовательский физический институт, впоследствии переименованный в Научно-исследовательский институт ядерной физики (НИИЯФ МГУ), и Отделение строения вещества Физического факультета МГУ, позднее преобразованное в Отделение ядерной физики. В 1993 году НИИЯФ МГУ было присвоено имя его основателя - Д.В.Скобелева.



*Д.В.Скобелъцин*

После создания НИИЯФ и ОЯФ в МГУ началась подготовка специалистов для проведения исследовательских работ по физике деления урана и реакций термоядерного синтеза. В 1949 г. началось строительство новых зданий МГУ на Воробьевых горах.

Было принято решение о проектировании ряда ускорительных установок и о строительстве специального корпуса (№ 19) для их размещения. В этом корпусе были запущены 120-см циклотрон на энергию протонов 6.6 МэВ, электростатический генератор на 4 МэВ, каскадный генератор на 0.5 МэВ и бетатрон на 35 МэВ. Большая роль в практическом осуществлении всего комплекса работ, связанных с созданием и пуском ускорителей, принадлежала зам. директора НИИЯФ МГУ профессору С.С.Васильеву.



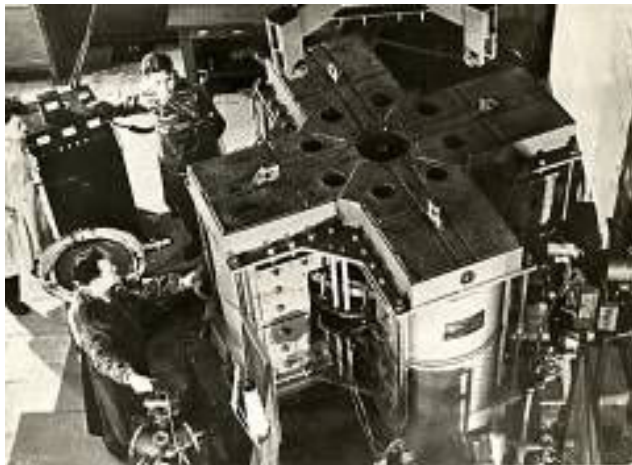
*С.С.Васильев*

С вводом в строй в 1959 г. индукционного ускорителя электронов - бетатрона на 35 МэВ, разработанного по техническому заданию, составленному под руководством С.С.Васильева, в НИИЯФ МГУ начались исследования электромагнитных взаимодействий.

Несомненной заслугой С.С.Васильева явился выбор верхней энергии электронов этого ускорителя, в 1.5 -2 раза превышающей энергию большинства работавших в те годы бетатронов.

Этот выбор давал несомненные преимущества исследователям НИИЯФ МГУ, способствовал более глубокому изучению механизма фоторасщепления атомных ядер и обеспечил долгий срок эффективной эксплуатации этой установки, на которой было выполнено свыше двухсот научных исследований. Бетатрон был спроектирован специальным КБ Московского трансформаторного завода ("Электроставода"). Несомненна роль С.С.Васильева при разработке, сооружении и дальнейшем усовершенствовании бетатрона. С.С.Васильев сыграл большую роль при проектировании и строительстве помещений корпуса, предназначенных для размещения бетатрона и проведения исследований фоторасщепления ядер. Его участие обеспечило функциональную продуманность и ряд дополнительных удобств при эксплуатации ускорителя и проведении исследований. В частности, было известно, что сечения фотоядерных реакций крайне малы, а поэтому серьезной проблемой являлась регистрация продуктов

реакций на уровне большого электронного и  $\gamma$ -фона. Разделение экспериментального зала и зала ускорителя толстой бетонной защитой явилось ощутимым преимуществом при измерении выходов фотоядерных реакций.



Первоначально бетатрон был изготовлен с отпаянной стеклянной камерой, что ограничивало возможности оптимизации и интенсивности и значительно уменьшало срок службы камеры при выходе из строя инжектора. Под руководством В.В.Экивина была проведена разработка сначала откачных стеклянных, а затем фарфоровых камер. Откачные камеры позволяли сравнительно просто заменять инжекторы, регулировать их положение, обеспечивая оптимизацию интенсивности пучка, имела более надежный проводящий слой, обеспечивавший ее большую долговечность. Огромная заслуга в организации надежного и бесперебойного функционирования бетатрона на протяжении длительного (~ 30 лет) срока принадлежит группе инженерного обеспечения (В.В.Экивин, О.Ф.Нестеренко).

Первые исследования на новом ускорителе были выполнены под руководством профессора В.Г.Шевченко.

Эти исследования не стали простым повторением общеизвестных результатов, а имели принципиальную новизну.



*В.Г.Шевченко*

Получаемое на бетатроне тормозное  $\gamma$ -излучение позволяло исследовать взаимодействие  $\gamma$ -квантов с атомными ядрами в области энергий до 35 МэВ - в энергетической области Гигантского Дипольного Резонанса (ГДР).

К началу исследований в МГУ ГДР был известен уже в течение 15 лет, и полученные о нем сведения сводились к следующему:

а) ГДР наблюдался в эффективном сечении фоторасщепления у всех исследованных ядер в виде максимума с шириной 4 - 10 МэВ;

б) было известно, что основными каналами распада ГДР являются каналы распада с испусканием нейтронов и протонов - т.е. основные реакции ( $\gamma, n$ ) и ( $\gamma, p$ ).

Несмотря на то, что исследования проводились в ведущих ядерных центрах, как в СССР, так и за рубежом, экспериментальные данные о ГДР были явно недостаточны, слишком грубы и во многих случаях противоречивы. Не была изучена форма ГДР - не было достоверных сведений о его ширине. Принципиально важный вопрос о структуре ГДР оставался без ответа. Не были ясны основные закономерности распада ГДР. О

механизме фотоядерной реакции в районе ГДР делались выводы по существу лишь на основе теоретических (модельных) представлений о нем. Не было ясно, проявляется ли ГДР в ядерных реакциях с другими частицами. Однако, наряду с этим было осознано, что ГДР представляет собой фундаментальное явление в ядерной физике, изучение которого могло дать новые неожиданные результаты. Дальнейший прогресс в изучении ГДР был возможен лишь при существенном улучшении экспериментальных методов исследования ГДР и постановке новых типов экспериментов по исследованию различных характеристик ГДР на большом числе ядер-мишеней.

Большое значение имело то, что экспериментальные исследования по физике фотоядерных реакций проводились при активном участии теоретической группы под руководством профессора Ю.М.Широкова. Выполненные в НИИЯФ работы по микроскопическому описанию ГДР способствовали достижению прогресса в его экспериментальных исследованиях. Была показана роль оболочечной структуры ядра в процессах формирования ширины ГДР, выяснена роль кластерных образований в ядре и его одночастичных состояний в процессах формирования коллективных ядерных возбуждений. Огромный вклад в исследования по этим направлениям внесли профессора Н.П.Юдин, В.В.Балашов, В.Г.Неудачин, Ю.Ф.Смирнов.

Уникальные разработки, выполненные в НИИЯФ МГУ под руководством В.Г.Шевченко, позволили получить ряд принципиально новых физических результатов, которые существенно изменили наши представления о механизме взаимодействия  $u$ -квантов с атомными ядрами, позволили существенно продвинуться в понимании процессов, происходящих в атомных ядрах при поглощении  $\gamma$ -квантов. Исследования природы и свойств ГДР, в которых активное участие принимали Б.А.Юрьев, Б.И.Горячев, Ю.И.Сорокин, В.Н.Орлин, сыграли существенную роль в становлении современных представлений о структуре и динамике атомного ядра. Первым было измерено фоторасщепление  ${}^7\text{Li}$  при облучении пучком фотонов с верхней границей  $E_m = 9.5$  МэВ. Столь низкое значение  $E_m$  было выбрано в связи с тем, что при таких энергиях  $\gamma$ -квантов реакция  $\text{Li}(\gamma, T){}^4\text{He}$  была



единственной реакцией с вылетом заряженных частиц, и из-за отсутствия возбужденных состояний у конечного ядра можно было однозначно расшифровать измеренные энергетические спектры и на их основе определить сечение реакции, а также положение и характеристики (из анализа угловых распределений и приведенных  $\alpha$ -ширин) уровней ядра  ${}^7\text{Li}$ . Был, в частности, обнаружен ранее предсказанный оболочечными расчетами уровень с  $J = 5/2$  при  $E_x = 5.3 \pm 0.2$  МэВ, долгое время не проявлявшийся в реакциях, вызванных заряженными частицами, что вызывало сомнения в правильности оболочечного подхода к описанию низколежащих состояний атомных ядер. В дальнейшем исследования низковозбужденных состояний были проведены для ядер  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{10}\text{B}$  и  ${}^{11}\text{B}$ , для каждого из них были измерены энергетические и угловые распределения фотопротонов, а из анализа полученных данных были установлены положения и характеристики ряда уровней. Результаты представили существенный интерес при обсуждении модельных расчетов структуры легких ядер и показали, что фотоядерные реакции являются удобным методом для изучения низковозбужденных состояний атомных ядер, имеющим ряд преимуществ перед реакциями, вызванными нуклонами и сложными частицами.

Большой интерес вызвали результаты, полученные в НИИЯФ в начале 60-х годов при исследовании фотопротонных реакций на средних и тяжелых ядрах. Определение характеристик заряженных продуктов фотоядерных реакций на тяжелых ядрах представляет довольно сложную задачу, так как исследуемую реакцию сопровождает сильный электронный и  $\gamma$ -фон. Ряд методических приемов позволил преодолеть имевшиеся трудности и получить принципиально новые результаты. Угловые и энергетические распределения фотопротонов из ряда ядер средне-тяжелых и тяжелых ядер ( ${}^{103}\text{Rh}$ ,  ${}^{141}\text{Pr}$ ,  $\text{W}$ ,  $\text{Pt}$  и  $\text{Pb}$ ), измеренные в НИИЯФ при нескольких значениях верхней границы тормозного  $\gamma$ -спектра, обнаружили ряд интересных закономерностей. Лишь в случае родия и празеодима и при энергиях протонов  $E_p < 9$  МэВ из вольфрама, платины и свинца при облучении с  $E_m = 22.5$  МэВ угловые распределения фотопротонов были почти изотропными или симметричными относительно  $90^\circ$ , как это наблюдалось у всех более легких ядер в работах других авторов. В то же время угловые распределения более энергичных протонов  $E_p > 9$  МэВ при облучении

с  $E_m = 29.5$  МэВ и всех протонов при облучении с  $E_m = 33.5$  МэВ имели значительную асимметрию со сдвигом максимума вперед. Наблюдался рост асимметрии и сдвига с увеличением энергии протонов и атомного номера  $Z$  ядер мишени. Наблюдаемая асимметрия свидетельствовала о сильной интерференции электрического дипольного  $E1$  и электрического квадрупольного  $E2$  поглощения  $\gamma$ -квантов ядрами, т.е. о значительной роли квадрупольного  $E2$ -поглощения  $\gamma$ -квантов в фотопротонных реакциях. Оценки показали, что вклад  $E2$ -поглощения практически равный нулю при испускании фотопротонов из родия и празеодима при  $E_m = 22.5$  МэВ, увеличивается с ростом энергии фотопротонов, энергии  $\gamma$ -квантов и атомного номера  $Z$  и достигает 60 - 70% при облучении  $\gamma$ -квантами с  $E_m = 33.5$  МэВ ядер W, Pt и Pb. Измеренные спектры фотопротонов имели максимумы, почти не изменявшиеся с ростом  $E_m$ . В случае  $^{141}\text{Pr}$  спектр имел два максимума. С ростом  $Z$  ядра минимальная энергия протонов в спектре и положение максимума спектра сдвигались в сторону больших энергий, так что средняя энергия протонов увеличивалась и оказывалась существенно выше, чем энергия протонов, ожидаемая при испускании протонов из гигантского дипольного резонанса фотопоглощения на этих ядрах.

Измеренные выходы фотопротонов оказались выше выходов, оцененных по статистической модели: в десятки раз в случае родия, в сотни раз в случае  $^{141}\text{Pr}$  и в тысячи раз в случае Pt и Pb. Эти результаты и формы спектров фотопротонов показали пренебрежимо малую роль статистического механизма в вылете фотопротонов из ядер с  $A > 100$ . Эти же данные позволили сделать вывод и о сравнительно малом вкладе механизма прямого фотоэффекта в процессы формирования гигантских резонансов.

Чтобы подробнее выяснить особенности образования фотопротонов в реакциях на тяжелых ядрах, были проведены измерения сечений реакций  $(\gamma, p)$  на родии, вольфраме и свинце. Использовалась методика прямой регистрации фотопротонов сцинтиляционными детекторами и метод наведенной активности. Максимумы измеренных сечений оказались на несколько МэВ выше максимумов дипольного резонанса в сечениях реакции  $(\gamma, n)$  на этих же ядрах. Сечение реакции  $(\gamma, p)$  на W (слабее на Rh) расщепилось на два пика. Указание на такое расщепление было обнаружено и в кривой выхода  $(\gamma, p)$  на свинце.

Из сопоставления с угловыми распределениями фотопротонов было установлено, что если низко расположенные максимумы сечений связаны, в основном с дипольным поглощением, то высокоэнергетичные максимумы в сечениях реакции ( $\gamma, p$ ) на Rh, W и Pb могут быть связаны с наличием области квадрупольного поглощения ("квадрупольного резонанса"). В теории предсказывались два типа состояний, возбуждающихся при  $E2$ -поглощении: одни состояния, соответствовавшие колебаниям формы ядра, должны были лежать при низких (приблизительно несколько МэВ) энергиях, другие, соответствовавшие поляризационным колебаниям протонов относительно нейтронов, ожидалось при более высоких энергиях. Количественные расчеты сечения  $E2$ -поглощения в рамках современной оболочечной модели для ядра  $^{208}\text{Pb}$  показали, что в согласии с экспериментальными данными низкоэнергичная область  $E2$ -поглощения расположена при  $\sim 4$  МэВ, а высокоэнергичная при  $\sim 25$  МэВ.

Большую роль в этих исследованиях сыграли постоянные контакты с экспериментальной группой Лаборатории фотоядерных реакции ИЯИ АН. Под руководством заведующей лабораторией профессора Л.Е.Лазаревой был разработан уникальный метод полного поглощения  $\gamma$ -квантов, с помощью которого области энергий ГДР были получены сечения полного фотопоглощения для целого ряда тяжелых ядер. Активное участие в этих работах принимали Р.М.Осокина, Г.В.Солодухов, Б.С.Ратнер, Г.М.Гуревич, Л.З.Джилаван, Б.С.Долбилкин.

К основным результатам, полученным в НИИЯФ МГУ, следует отнести обнаружение промежуточной структуры ГДР средних и тяжелых ядер.

Большую роль в получении этих принципиально важных результатов сыграло улучшение экспериментального метода исследования ГДР. Был создан высокоэффективный детектор быстрых нейтронов на базе 80 пропорциональных счетчиков, обогащенных  $^{10}\text{B}$  и размещенных в парафиновом замедлителе большого объема. Эффективность этого детектора к быстрым нейтронам составила величину 45% и превосходила по своей эффективности все аналогичные детекторы, использовавшиеся в экспериментах с  $\gamma$ -квантами. Под руководством В.Г.Шевченко и при активном участии И.М.Пискарева и И.М.Капитонова был

реализован «многоканальный» метод измерения выхода фотоядерной реакции  $Y(E^m)$ . В основе метода быстрое (с частотой 50 Гц) циклическое изменение верхней границы спектра тормозного  $\gamma$ -излучения. Метод позволял проводить одновременные измерения выхода реакции  $Y(E^m)$  при 512 значениях верхней границы  $E^m$  и практически исключал временной дрейф регистрирующей аппаратуры. Статистическая точность выхода фотонейтронных реакций в этих экспериментах достигала рекордного значения 0.1%, что нельзя было получить традиционно используемыми способами.

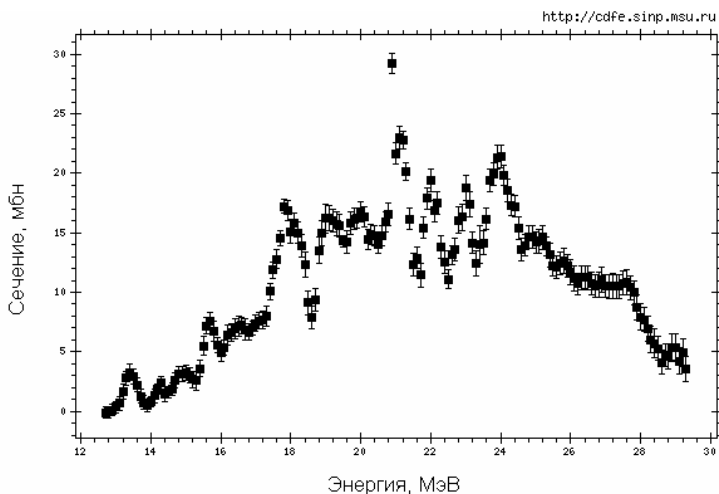
Кардинальный прогресс был достигнут и в методике анализа экспериментальных данных, полученных на пучке тормозного  $\gamma$ -излучения. В экспериментах с тормозным излучением нельзя непосредственно получать информацию об эффективном сечении реакции  $\sigma(E)$ , относящуюся к определенной энергии возбуждения ядра  $E$ . Реально измеряется не  $\sigma(E)$ , а так называемый «выход» фотоядерной реакции  $Y(E^m)$  при определенной верхней границе  $E^m$  тормозного спектра  $W(E, E^m)$ . Искомое сечение  $\sigma(E)$  и измеренный выход  $Y(E^m)$  связаны между собой интегральным уравнением Вольтерра 1-го рода

$$Y(E^m) = \int_0^{E^m} \sigma(E)W(E, E^m)dE.$$

Проблема состоит в извлечении из этого соотношения величины  $\sigma(E)$  из экспериментально измеренных значений  $Y(E^m)$ . Обычно, варьируя верхнюю границу тормозного спектра  $E^m$ , получают набор значений  $Y(E^m)$  и далее решают обратную задачу восстановления функции  $\sigma(E)$  по набору значений  $Y(E^m)$ . Эта задача является некорректно поставленной и требует применения специальных математических методов для получения устойчивого решения. Метод решения некорректно поставленных задач был разработан в работах академика А.Н.Тихонова. Метод регуляризации является устойчивым методом решения приведенного выше уравнения. В результате совместной работы с группой математиков Московского университета, возглавляемой академиком А.Н.Тихоновым, метод регуляризации был впервые

использован для анализа данных фотоядерных экспериментов - восстановления сечений фотоядерных реакций. Был разработан устойчивый метод восстановления сечений фотоядерных реакций, который в дальнейшем активно использовался в различных лабораториях, занимающихся исследованиями в этой области. С помощью специально разработанного метода редукции, базирующегося на идеях математической теории распознавания образов получены данные о сечениях фотоядерных реакций для большого числа ядер в представлении с оптимальным энергетическим разрешением. Это позволило решить проблемы надежности выделения структуры ГДР в фотоядерных экспериментах различного типа, устранить хорошо известные значительные расхождения их результатов, выяснить роль и взаимосвязь различных механизмов электромагнитных взаимодействий ядер. С использованием этих усовершенствований экспериментального метода измерения и анализа данных промежуточная структура ГДР была обнаружена для большого числа (около 40) легких, средних и тяжелых атомных ядер в широком диапазоне массовых чисел ( $A = 9 - 208$ ).

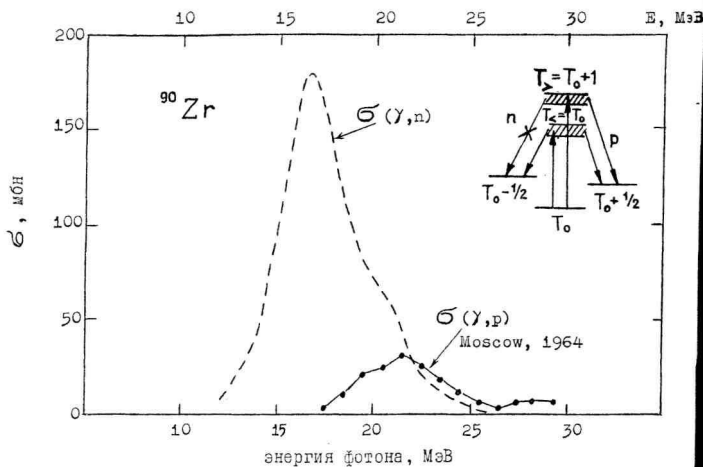
Следует подчеркнуть, что данные о промежуточной структуре ГДР впервые были надежно получены в экспериментах фотоядерной группы МГУ. Они имели большой международный отклик, поскольку потребовался существенный пересмотр теоретических подходов к описанию высокоэнергичных коллективных ядерных состояний. Стало очевидным, что ГДР нельзя интерпретировать, оставаясь в рамках базиса  $1p1h$ -возбуждений. Его нельзя свести к 1 - 2 выделенным дипольным состояниям. На самом деле происходит сильное дробление фотоядерного сечений в районе ГДР по многим отдельным состояниям, причем "разброс" энергий этих состояний достигает 10 - 15 МэВ, формируя в целом большую ширину ГДР.



. Этот механизм формирования ширины ГДР является основным не только для ГДР, но и для других коллективных состояний и впервые был обнаружен в вышеописанных экспериментах с высоким энергетическим разрешением. На несколько лет позже структура фотонейтронных сечений была получена в США и во Франции в экспериментах с квазимоноэнергетическими аннигиляционными фотонами.

Промежуточная структура ГДР была впервые обнаружена и в фотопротонных сечениях. Крайне интересной оказалась интерпретация низкоэнергичных максимумов в сечениях реакции  $(\gamma, p)$  на Rh ( $\sim 19$  МэВ) и W ( $\sim 20.5$  МэВ), где вклад  $E2$ -поглощения незначителен. Интерпретация такого максимума как гигантского дипольного резонанса приводила к вопросу о том, почему он для этих ядер (так же как и в случае ядер  $^{208}\text{Pb}$  и  $^{90}\text{Zr}$ , исследованных в НИИЯФ немного позднее), на 6 - 12 МэВ сдвинут относительно дипольного максимума в сечении  $(\gamma, n)$  на этих ядрах. Объяснение этого явления было связано с установлением факта, что изоспин является хорошим квантовым числом как для основных, так и для возбужденных состояний средних и тяжелых ядер.

В фотоядерных реакциях учет изоспина приводит к



расщеплению дипольного резонанса на две группы переходов на уровни с  $T = T_0$  и уровни с  $T = T_0 + 1$  ( $T_0$  – изоспин основного состояния ядра мишени). Первая группа уровней соответствует обычному дипольному максимуму, наблюдавшемуся при измерении сечений фотонейтронных реакций, тогда как вторая, сдвинута по энергии на несколько МэВ выше первой группы и практически не может распадаться с испусканием фотонейтронов. Вылет нейтронов с уровней верхней группы запрещен правилами отбора по изоспину. В то же время, так как испускание протонов из нижнего максимума  $T_0$  подавлено высоким кулоновским барьером, протоны в основном испускаются при распаде возбужденных состояний с  $T = T_0 + 1$ . Таким образом, проведенные исследования фотопротонных реакций на средних и тяжелых ядрах показали, что в области энергий  $\gamma$ -квантов 23 - 33 МэВ расположен максимум сечения  $E2$ -поглощения  $\gamma$ -квантов - гигантский квадрупольный резонанс; в области энергий  $E_\gamma = 19 - 22$  МэВ на исследованных ядрах наблюдается пик дипольного резонанса. Величина сечения в этом пике заметно превышает значение в пике квадрупольного резонанса в случае Rh, но меньше его в случае W и особенно Pb, где дипольный и квадрупольный пики расположены при одной и той же энергии. Смещение максимума дипольного резонанса в

фотопротонной реакции относительно максимума в сечении фотонейтронной реакции хорошо объясняется изоспиновым расщеплением дипольного резонанса, в результате которого дипольные уровни с изоспином  $T_0 + 1$ , которые распадаются преимущественно с вылетом протоном, сдвигаются в область более высоких энергий.

В реализации программы исследования изоспиновых эффектов в фотоядерных реакциях существенную роль сыграло создание в НИИЯФ МГУ уникальной методики прямой регистрации протонов в условиях высокого фона от электронов и  $\gamma$ -квантов. Проблема заключается в том, что соотношение между числом регистрируемых протонов и электронов фона  $1 : 10^7$ . Для регистрации протонов была использована методика телескопа кремниевых полупроводниковых детекторов.

Вышеописанные исследования гигантского дипольного резонанса (ГДР) были в основном завершены к началу 70-х годов. К этому моменту в экспериментах по неупругому рассеянию электронов уже были открыты гигантские резонансы другой мультипольности. Однако изучение ГДР значительно опережало изучение новых, так называемых мультипольных гигантских резонансов (МГР), поскольку развитые методы его исследования на пучках  $\gamma$ -квантов обеспечивали получение наиболее надежной и разнообразной информации. Поэтому дальнейшее изучение ГДР являлось чрезвычайно важным для выработки единого теоретического подхода к описанию высоковозбужденных ядерных состояний различного типа.

Несмотря на большое число исследований ГДР проблема его теоретического описания оставалась нерешенной. Так экспериментально наблюдаемая структура ГДР не получила удовлетворительного объяснения ни в рамках традиционных микроскопических подходов (частично-дырочная модель, теория конечных ферми-систем), ни в рамках коллективных моделей. Практически не было сведений о роли нуклонов различных оболочек в формировании ГДР ядер с незаполненной внешней оболочкой, в то время как ядра именно этого типа составляют подавляющее большинство атомных ядер. Не был изучен вопрос о вероятности различных механизмов фотоядерной реакции -



полупрямого (обусловленного распадом  $1p1h$ -конфигураций с вылетом нуклона в непрерывный спектр), предравновесного и идущего через составное ядро. Кроме того, теория встретила большие трудности в интерпретации ширины ГДР и энергетических спектров продуктов его распада. В значительной степени это было связано с необходимостью учета возбуждений более сложных, чем  $1p1h$ . Трудоемкость этой задачи, неизвестность ряда важных параметров теории приводили к сильным упрощениям и большому разнообразию методов расчета, результаты которых в основном следовало рассматривать как качественные.

Сравнение результатов расчетов с большинством накопленных экспериментальных данных по сечениям фотоядерных реакций, энергетическим и угловым распределениям продуктов распада ГДР уже не могло быть эффективным средством проверки теоретических моделей, поскольку эти данные содержали в неразделенном виде вклады от распада многих состояний ГДР на большое число уровней конечных ядер. Для дальнейшего прогресса в понимании природы механизма взаимодействия  $\gamma$ -квантов с атомными ядрами необходима была постановка экспериментов нового типа. Нужна была качественно новая информация о распадных свойствах ГДР. Необходимо было детально исследовать различные каналы его распада и, прежде всего такие, в результате которых происходит заселение отдельных состояний ядер-продуктов (парциальные каналы). В первую очередь это относится к парциальным нуклонным каналам распада ГДР, поскольку вылет нуклонов является основной формой распада ГДР.

Высокая информативность фотоядерных экспериментов, в которых фиксируются отдельные состояния конечных ядер, обусловлена тем, что эти состояния по энергии расположены значительно ниже формирующих ГДР состояний ядра-мишени и изучены достаточно детально. Знание природы низколежащих состояний конечного ядра позволяет получить новые сведения о высокорасположенных состояниях ГДР. В этой связи при активном участии профессоров И.М.Капитонова, В.В.Варламова, В.И.Шведунова была намечена и осуществлена широкая программа измерений парциальных фотоядерных сечений, в основном сечений реакций  $(\gamma, p_i)$  и  $(\gamma, n_i)$ , где  $i$  - нумерует

уровень конечного ядра. Полученные данные позволили совершить качественный скачок в понимании механизма возбуждения и распада ГДР. Для выполнения этой программы исследований были созданы новые экспериментальные установки и решен целый ряд методических задач. В связи с тем, что происходит выделение отдельных каналов реакции, экспериментальные трудности вырастают на порядок. Сечения парциальных фотонуклонных реакций на ядре, содержащем  $A$  нуклонов, можно получить двумя методами: либо, измеряя энергетические спектры фотонуклонов, либо, измеряя энергетические спектры  $\gamma$ -квантов, снимающих возбуждение конечного ядра, содержащего  $A - 1$  нуклонов.

Первый метод был реализован для фотопротонных парциальных каналов ( $\gamma, p_i$ ). Для регистрации фотопротонов использовался  $\Delta E-E$  телескоп полупроводниковых кремниевых счетчиков. Это позволило эффективно решить задачу выделения сигналов протонов из интенсивного фона от неядерных процессов. Спектры фотопротонов измерялись с шагом  $E_p \sim 1$  МэВ. Для достижения необходимой точности в относительной нормировке спектров был использован принцип быстрого автоматического варьирования  $E_m$ . Этот методический прием, ранее применявшийся для измерения эффективных фотонуклонных сечений, впервые был реализован в спектроскопических фотоядерных экспериментах.

Для реализации второго метода измерения сечений парциальных фотоядерных реакций (измерение спектров  $\gamma$ -квантов, снимающих возбуждение конечных ядер) был использован прецизионный  $\gamma$ -спектрометр на базе Ge(Li)-кристалла большого чувствительного объема ( $100 \text{ см}^3$ ). Его высокое энергетическое разрешение позволяло наблюдать заселение отдельных уровней конечных ядер, разделенных энергетическим интервалом 5 - 10 кэВ.

Впервые были измерены сечения парциальных реакций на большом числе легких и средних ядер. Всего было исследовано 16 ядер с  $A = 11 - 60$ . Для них определены сечения примерно 300 парциальных фотоядерных каналов. Огромный объем новой экспериментальной информации, весьма чувствительной к деталям механизма возбуждения и распада ГДР, позволил совершить качественный скачок в понимании физики изучаемого явления. Был разработан метод извлечения информации о формировании и

распаде ГДР, основанный на модельно независимом анализе полученных данных о парциальных каналах. Он основан на использовании спектроскопических сведений о низколежащих заселяемых при распаде ГДР уровнях остаточных ядер, полученных в независимых экспериментах по изучению реакций однонуклонной передачи (подхвата и срыва) нуклонов. С помощью разработанной методики многоканального измерения энергетических спектров фотопротонов впервые выполнена серия детальных экспериментальных исследований характеристик распада по протонному каналу высоковозбужденных состояний гигантского дипольного резонанса (ГДР). Полученные данные позволили с одной стороны впервые дать объяснение особенностей распада состояний ядер по протонному и нейтронному каналам в рамках концепции изоспинового расщепления ГДР, а с другой - поставить вопрос о границах области применимости этой концепции. Выполнен цикл детальных исследований фоторасщепления большого числа ядер. Впервые полученные данные об образовании конечных ядер фотопротонных реакций в различных состояниях позволили выяснить физические особенности структуры сечений фотоядерных реакций на легких и средних ядрах и определить влияние их оболочечной структуры на процессы формирования и распада состояний ГДР.

Впервые была системно исследована роль реакций с образованием одного, двух и большего числа нейтронов в процессах формирования и распада ГДР, получены новые характеристики процессов взаимодействия с атомными ядрами фотонов низких и средних энергий. Выполнены детальные исследования характеристик распада ГДР большого числа ядер по различным каналам, обнаружены отчетливо выраженные оболочечные эффекты.

Из анализа всей совокупности экспериментально выделенных парциальных каналов для ядер с  $A = 12 - 60$  были получены следующие основные результаты.

1. Выделены компоненты фотонуклонных сечений, соответствующие прямой (быстропротекающей) стадии фотоядерной реакции, и определена вероятность прямого механизма распада ГДР. Установлено, что прямой механизм играет важную роль для ядер этой области. В реакции  $(\gamma, p)$  на его долю в

среднем приходится 50% сечения. В реакции  $(\gamma, n)$  вероятность прямых процессов существенно выше (в среднем на 40%). С увеличением массового числа и энергии возбуждения вероятность прямого механизма реакции уменьшается. Вероятность прямого распада ГДР с ростом массового числа  $A$  уменьшается примерно от 100% для  $A = 12$  до 50% для  $A = 40$ . Для более тяжелых ядер доминирует распад через стадию составного ядра.

2. Определена роль различных факторов в формировании ширины ГДР ядер  $1d2s$ -оболочки ( $A = 16 - 40$ ). Следует отметить, что форма ГДР ядер этой области индивидуальна — ширина ГДР изменяется в широких пределах (от 4 до 20 МэВ), причем не наблюдается систематической зависимости этой ширины от массового числа  $A$ . Попытки объяснить природу ширины ГДР ядер этой области до описываемых исследований оказывались несостоятельными. Детальный анализ показал, что для дважды магических ядер  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ , а также и ядра  $^{28}\text{Si}$  ширина ГДР минимальна (4 - 5 МэВ) и обусловлена разбросом дипольных переходов из внешней ( $1d2s$ ) оболочки. Увеличение ширины для остальных ядер связано с конфигурационным и изоспиновым расщеплением, а также с увеличением разброса по энергии дипольных переходов из одной оболочки. Для каждого ядра найден вклад перечисленных факторов в формирование ширины ГДР.

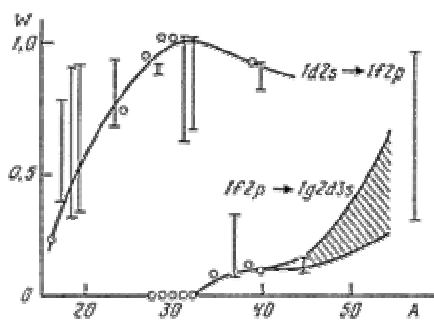
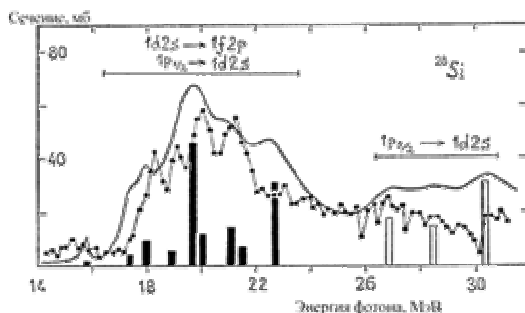
3. Получено экспериментальное доказательство влияния механизма реакции на ширину ГДР. Уменьшение вероятности прямого распада (и соответственно увеличение вероятности статистического распада) ГДР приводит к увеличению его ширины.

Перечисленные в пунктах 1 - 3 результаты были получены впервые и свидетельствовали о прогрессе в понимании физики высоковозбужденных коллективных состояний.

Единый максимум ГДР не формируется, а вместо этого возникает широкая (10 - 20 МэВ) полоса энергий, где происходит интенсивное дипольное поглощение фотонов, причем фотоны меньшей энергии формируют ветвь А гигантского резонанса, обусловленную  $E1$ -переходами нуклонов из внешней незаполненной оболочки в ближайшую свободную оболочку, а фотоны большей энергии формируют ветвь Б, обусловленную переходами нуклонов из внутренней заполненной оболочки во внешнюю, частично заполненную. Таким образом, ГДР легких ядер оказывается

расщепленным на отдельные группы дипольных переходов, отвечающие разным оболочечным конфигурациям и сильно смещенным по энергии.

Причина конфигурационного расщепления состоит в том, что в легких ядрах существенное значение имеет пространственно-обменная часть нуклон-нуклонного взаимодействия. Благодаря действию пространственно-обменных сил и в связи с характерной для атомных ядер в



целом существенной нелокальности нуклон-ядерного взаимодействия возникает сильный сдвиг по энергии глубоких дырочных состояний, отвечающих заполненным внутренним оболочкам. В результате экспериментов конфигурационное расщепление удалось наблюдать непосредственно. Величина конфигурационного расщепления (сдвиг центров тяжести дипольных переходов групп А и Б) оказалась весьма значительной - около 10 МэВ.

Результаты этих пионерских исследований были позже подтверждены в аналогичных экспериментах японских,

австралийских и бельгийских физиков и получили международное признание. Более того, эксперименты, выполненные физиками США, Швейцарии, Японии и СССР, в которых ядра возбуждались самыми различными элементарными частицами, показали, что открытая закономерность конфигурационного расщепления гигантского дипольного резонанса имеет универсальный характер - не зависит от типа частиц, возбуждающих ядра, т.е. проявляется не только в электромагнитных, но и в сильных и слабых взаимодействиях (в мюон-ядерных и адрон-ядерных процессах, и в состояниях гиперядерных систем). Таким образом, без концепции конфигурационного расщепления вообще нельзя понять "отклик" легких ядер на действие различных зависящих от времени внешних полей. Большой вклад в исследования по этому направлению внес руководитель Лаборатории фотоядерных реакций ИЯИ АН Р.А.Эрамжян.

В 1987 г. Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий внес в государственный реестр под N 342 открытие "Закономерность конфигурационного расщепления гигантского дипольного резонанса у легких атомных ядер" (авторы открытия Б.С.Ишханов, И.М.Капитонов, В.Г.Неудачин, В.Г.Шевченко, Н.П.Юдин, Р.А.Эрамжян). Регистрация этого открытия явилась итогом успешных 20-летних исследований гигантского дипольного резонанса, проводившихся в НИИЯФ МГУ.

В начале восьмидесятых годов стало ясно, что дальнейший прогресс в исследовании механизма взаимодействия  $\gamma$ -квантов с атомными ядрами возможен лишь при создании ускорителей электронов нового поколения, генерирующих в непрерывном режиме пучки электронов с малым энергетическим и пространственным разбросом. Такие ускорители имеют 100% фактор заполнения рабочего цикла в отличие от обычных электронных ускорителей, работающих в импульсном режиме, и у которых фактор заполнения рабочего цикла равен всего лишь 0.1%. Пучки электронов ускорителей непрерывного действия обладают уникальными свойствами:

1. Монохроматичность пучка ( $\Delta E / E$ ) составляет  $10^{-3}$  -  $10^{-4}$ , что на два порядка выше, чем у большинства действующих линейных ускорителей.

2. Пучок электронов имеет малую угловую расходимость и резкие пространственные границы.

3. Благодаря непрерывному характеру пучка на 2 - 3 порядка снижаются загрузки детекторов по сравнению с загрузками на импульсных ускорителях при среднем токе, сравнимом со средним током современных линейных ускорителей.

4. Ускорители электронов непрерывного действия позволяют на два порядка повысить точность экспериментальных данных по сечениям фотоядерных реакции, которая в экспериментах на современных линейных ускорителях ограничена разрешающим временем детекторов и возможностями систем накопления информации.

5. Получение непрерывных электронных пучков с большим средним током позволяет проводить качественно новые совпадательные эксперименты в области ядерной физики, на несколько порядков повысить точность в традиционных экспериментах, реализовать принципиально новые эксперименты, недоступные на существующих импульсных ускорителях.

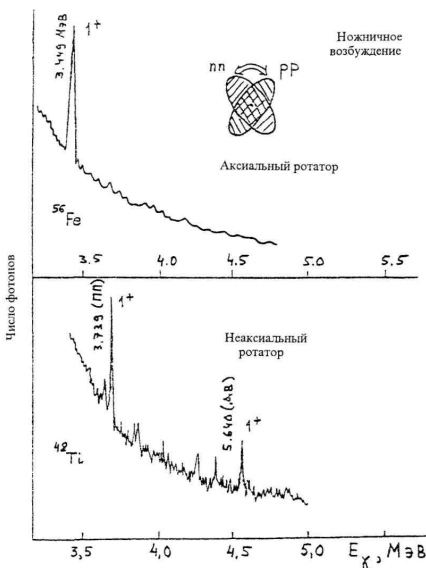
6. Преимущества непрерывных электронных пучков неоспоримы при создании сверхмощных линейных ускорителей с мощностью пучка, превышающей сотни киловатт, при энергии электронов 10 - 100 МэВ. Подобные ускорители будут использоваться в области материаловедения, для эффективного решения экологических задач, для трансмутации радиоактивных отходов, сжигания ядерного топлива, получения интенсивных нейтронных пучков.

В 1985 г. в НИИЯФ МГУ было начато строительство ускорителя электронов непрерывного действия - разрезного микротрона. Этот ускоритель в своем окончательном варианте должен был иметь энергию электронов 175 МэВ при среднем токе пучка 100 мкА. Инжектор РМ НИИЯФ МГУ состоит из электронной пушки на энергию 100 кэВ, линии формирования продольного и поперечного эмиттанта, нескольких ускоряющих секций и системы вывода пучка.

В процессе создания ускорителя был решен целый ряд сложных научно-технических проблем:

- предложен новый метод выбора условий инжекции в разрезной микротрон,
- разработан ряд программных комплексов для расчета динамики пучка в разрезном микротроне,
- выполнены трехмерные расчеты ускоряющих структур,
- предложен и реализован новый способ ввода СВЧ-мощности в непрерывном режиме в секции линейного ускорителя.

Окончательная реализация проекта предполагалась совместно с Лабораторией фотоядерных реакций ИЯИ, которой в то время руководил Р.А.Эрамжян. Однако из-за кризиса 90-х годов и недостатка финансирования проект не был реализован до конца. Был построен начальный участок ускорителя, позволявший получать фотоны с энергией 6.7 МэВ.



В течение 1992 - 1995 гг. на построенном участке РМ НИИЯФ МГУ под руководством профессора И.М.Капитонова были выполнены первые в России эксперименты по ядерной



резонансной флюоресценции (ЯРФ). Эти эксперименты продемонстрировали высокое качество пучка инжектора и возможность получения уникальных физических результатов. Были измерены ЯРФ спектры для нескольких атомных ядер с  $A \sim 50 - 70$ . Получены новые, представляющие исключительно большой интерес, сведения о коллективных магнитных дипольных М1 возбуждениях орбитального типа, присущих деформированным ядрам. Эти возбуждения относятся к новому классу ядерных коллективных состояний. Их называют либо "ножничными" (scissors) колебаниями, либо гигантскими угловыми дипольными вибрациями. Полученные в НИИЯФ МГУ экспериментальные данные по ЯРФ для ядер  $^{56}\text{Fe}$  и  $^{48}\text{Ti}$  показывают, что ядро  $^{56}\text{Fe}$  ведет себя как симметричный ротатор с параметром квадрупольной деформации  $\beta_2 = 0.17 - 0.20$ . В отличие от ядра  $^{56}\text{Fe}$ , ядро  $^{48}\text{Ti}$  является неаксиальным ротатором с параметром неаксиальности  $\gamma = 21^\circ$ . Параметр квадрупольной деформации для этого ядра  $\beta_2 = 0.23$ . Важно подчеркнуть, что этот метод определения параметров деформации ядер обладает исключительно высокой чувствительностью, ставящей его в ряд наиболее точных и надежных методов изучения формы атомных ядер. Используя высокое качество пучка, удалось поставить эксперименты по измерению времени жизни возбужденных состояний атомных ядер методом самопоглощения. Характерный интервал времени жизни, который может быть измерен таким методом, составляет  $10^{-10} - 10^{-17}$  сек.

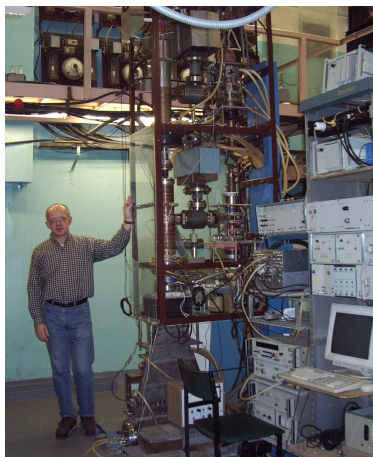
В 90-х годах при поддержке World Physics Technologies Inc. и в сотрудничестве с МИФИ, ИТЭФ, ФИ РАН, ИФП РАН, ФГУП «НПП ТОРИЙ» под руководством профессора В.И.Шведунова в НИИЯФ МГУ был создан сверхкомпактный электронный ускоритель нового поколения - импульсный разрезной микротрон на энергию пучка 70 МэВ. В рамках данного проекта впервые в практике создания ускорителей были разработаны большие прецизионные поворотные магниты на основе редкоземельного магнитного материала, а также создана оригинальная ускоряюще-фокусирующая структура. В настоящее время он используется не только в различных экспериментах в области ядерной физики, но и для детектирования углерода, азота и кислорода методами фотоядерных реакций, в работах по медицине, направленных на

повышение качества радиационной терапии. В конце 90-х годов на этом ускорителе были выполнены уникальные эксперименты по взаимодействию электронного пучка с кристаллами, неупругому рассеянию фотонов на ядрах. Были исследовано явление флуоресценции атомных ядер, получены ценные сведения о коллективных магнитных дипольных возбуждениях несферических ядер, разработан новый метод элементного и изотопного анализа материалов.

В 1994 г. за цикл работ «Новые представления о механизме взаимодействия  $\gamma$ -квантов с атомными ядрами» профессорам Б.С.Ишханову, И.М.Капитонову, В.И.Шведунову была присуждена премия им. М.В.Ломоносова.

В последние годы в НИИЯФ МГУ была разработана концепция сверхмощного линейного ускорителя электронов непрерывного действия для трансмутации элементов и сжигания радиоактивных отходов на энергию 10 МэВ, средний ток 200 мА и мощность пучка 2 Мвт. Для проверки разработанной физической концепции формирования и ускорения непрерывных сильноточных электронных пучков был разработан, изготовлен и осуществлен пуск сильноточного двухсекционного ускорителя непрерывного действия на энергию 1.2 МэВ, средний ток 8.4 мА, мощность электронного пучка 10 кВт. Для запуска ускорителя необходимо было проанализировать физические процессы, происходящие при взаимодействии высокоинтенсивных электронных пучков с электромагнитными полями, влияние пространственного заряда на расходимость электронных пучков, оптимизировать структуры электромагнитных полей ускоряющих резонаторов для обеспечения максимально эффективного ускорения и фокусировки электронных пучков различных энергий, изучить нелинейные эффекты в резонансных структурах, возникающие при ускорении высокоинтенсивных электронных пучков, проанализировать физические условия, влияющие на формирование прецизионных электронных сгустков из непрерывных пучков, промоделировать различные процессы, происходящие при ускорении сильноточных пучков. Измерения параметров пучка, энергетического спектра на выходе ускорителя продемонстрировали высокое качество электронного пучка, стабильность и надежность работы ускорителя. Молодым ученым Отдела электромагнитных

процессов и взаимодействий атомных ядер НИИЯФ А.С.Алимову и А.В.Тиуну в 1995 г. была присуждена премия И.И.Шувалова за цикл работ "Новые физические явления при взаимодействии высокоинтенсивных непрерывных пучков с электромагнитными полями".



Развитие науки и техники в последние десятилетия характеризуется стремительным ростом объемов получаемых, анализируемых и применяемых данных и существенным повышением требований к их точности и надежности. Это в первую очередь относится к ядерной физике и ядерной энергетике: отсутствие необходимых ядерных данных на стадии разработки, создания и использования сложных и дорогостоящих установок нередко чревато не только большими экономическими потерями, но и определенными угрозами здоровью людей и экологии окружающей среды. Именно эти обстоятельства стимулировали создание в мире более 30 лет назад мире нескольких крупных Центров ядерных данных, специализировавшихся на решении разнообразных проблем сбора, систематизации, анализа и эффективного распространения данных об атомных ядрах и нейтронных ядерных реакциях. Первыми организациями такого типа стали Национальный центр ядерных данных США, Банк данных Национального агентства по энергетике Франции, Секция

ядерных данных МАГАТЭ и российский Центр ядерных данных (ФЭИ, г. Обнинск). Стала очевидной высокая эффективность созданных и развитых методов компьютерной обработки данных и для обработки информации по реакциям под действием заряженных частиц, находящих широкое применение не только в ядерной энергетике и других приложениях, но и в фундаментальных ядерно-физических исследованиях. В этой связи к международному сотрудничеству Центров ядерных данных подключилось еще несколько организаций из разных стран.

Описанные выше многочисленные и разнообразные экспериментальные и теоретические исследования фоторасщепления атомных ядер, выполненные в НИИЯФ МГУ к концу 70-х годов (профессора В.Г.Шевченко, Б.С.Ишханов, И.М.Капитонов), потребовали интенсивной компьютерной обработки данных. В этой связи в НИИЯФ начала развиваться активная деятельность по созданию мощных программных комплексов обработки данных, которая проводилась совместно с НИВЦ и ВМиК МГУ (академик А.Н.Тихонов, профессор П.Н.Заикин). Был получен целый ряд уникальных результатов, которые получили широкую известность и нашли применение в самых различных областях науки и техники (ядерная физика, ядерная энергетика, астрофизика, медицина, биология, радиационная химия, радиационная геология, экологический мониторинг и др.). Это привело к поступлению в НИИЯФ МГУ рекомендаций Секции ядерных данных МАГАТЭ и Центра по данным о строении атомных ядер и ядерных реакций Минатома России о создании в НИИЯФ центра по сбору и обработке фотоядерных данных.

Они были активно поддержаны тогдашним ректором МГУ академиком Р.В.Хохловым и профессором И.Б.Тепловым, в то время заместителем директора НИИЯФ МГУ, который в своей научной деятельности большое внимание уделял компьютерным методам обработки информации. Приказом № 550 от 2 ноября 1979 года директора НИИЯФ академика С.Н.Вернова на базе группы анализа ядерных данных



*И.Б.Теплов*

отдела электромагнитных процессов и взаимодействий атомных ядер был создан Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ. С 1986 года по настоящее время центр возглавляет ведущий научный сотрудник профессор В.В.Варламов. С момента создания ЦДФЭ является участником международной сети Центров ядерных данных, функционирующей под эгидой МАГАТЭ (Австрия, Венгрия, Китай, Корея, Россия, Словакия, США, Украина, Франция, Япония).



Для решения задач компьютерной обработки ядерных, прежде всего, фотоядерных, данных при поддержке ректора МГУ Р.В.Хохлова Минвуз выделил для ЦДФЭ НИИЯФ МГУ ЭВМ ЕС-



В короткий срок в рамках программы “ЭВМ коллективного пользования МГУ” в ЦДФЭ при активном участии В.В.Сургутанова были созданы мощные информационно-поисковые системы различного назначения, основанные на больших международных массивах справочно-библиографических, а также числовых (экспериментальных и оцененных) данных по атомным ядрам и ядерным реакциям.

Информационно-поисковые системы ЦДФЭ позволяли осуществлять гибкий и быстрый поиск данных и выдавать их в виде, удобном для эффективного дальнейшего использования. В условиях того времени обслуживание запросов потребителей осуществлялось путем подготовки данных в соответствии с запросами на всех носителях, предусмотренных конфигурациями вычислительной техники того времени, начиная от машинных распечаток, включая перфокарты и перфоленты и кончая магнитными лентами. В разное время пользователями ЦДФЭ были сотрудники около 40 организаций различных министерств и ведомств страны, прежде всего, высших учебных заведений и организаций Академии Наук.

В 1983 - 1991 годах под руководством ЦДФЭ функционировала Система Центров ядерных данных Минвуза, включавшая в себя специализированные организации из Саратовского, Ростовского-на-Дону, Киевского и Ужгородского государственных университетов. По мере совершенствования компьютерной техники ЦДФЭ последовательно переводил свои

информационно-поисковые системы с одних типов ЭВМ на другие, постоянно совершенствуя и расширяя их поисковые возможности и эффективность использования потребителями.

ЦДФЭ - Центр Данных Фотоядерных Экспериментов - Microsoft Internet Explorer

Файл Правка Вид Избранное Сервис Справка

Добро пожаловать на сайт ЦДФЭ.

Сервисы, доступные в ЦДФЭ:

Объект поиска	База данных
Различные характеристики ядерных реакций под действием фотонов, нейтронов, заряженных частиц и тяжелых ионов из международного фонда данных EXFOR	<b>База данных по ядерным реакциям (EXFOR)</b> <a href="#">[описание]</a> Последнее обновление: 19 марта 2003
Энергии, амплитуды, ширины, сечения, интегральные сечения и моменты Гигантских Дипольных Резонансов	<b>Параметры Гигантского Дипольного Резонанса, Сечения Фотоядерных реакций</b> <a href="#">[описание]</a> Последнее обновление: 7 мая 2002
Ядра, реакции, энергии, углы, аннотации (в кодах), ссылки, авторы	<b>Индекс фотоядерных данных с 1955 г.</b> <a href="#">[описание]</a> Последнее обновление: 7 мая 2002
Энергетические пороги основных фотоядерных реакций ( $\gamma, n$ ), ( $\gamma, p$ ), ( $\gamma, \alpha$ ), ( $\gamma, ^2\text{He}$ ), ( $\gamma, n$ ), ( $\gamma, 2n$ ), ( $\gamma, \text{np}$ ), ( $\gamma, 2p$ )	<b>Пороги фотоядерных реакций</b> <a href="#">[описание]</a> Последнее обновление: 15 февраля 2003
Пороги и энергии ядерных реакций для любых известных ядер и множества налетающих/вылетающих частиц	<b>Калькулятор порогов и энергий ядерных реакций</b> <a href="#">[описание]</a> Последнее обновление: 15 мая 2002
Распространенности изотопов, атомные массы, избытки масс, энергии связи, спин-четности, моменты, деформации, моды распада основного и метастабильных состояний.	<b>Параметры основного состояния атомных ядер</b> <a href="#">[описание]</a> Последнее обновление: 15 марта 2002
<b>Параметры ядерных уровней:</b> Энергии, спин-четности, времена жизни, моды распада, метастабильные состояния, изоспины, моменты кол-ва движения, спектроскопические факторы, и т.д. <b>Параметры <math>\alpha</math>-фа-бета-гамма-распадов:</b> Энергии, интенсивности, мультимпульсности, коэффициенты ветвления и смешивания и т.д.	<b>NESSY (New ENSDF Search System): Реферальная база данных по ядерной спектроскопии</b> <a href="#">[описание]</a> Последнее обновление: 30 января 2003
Выходы и сечения реакций под действием $p$ -, $d$ -, $t$ -, $^3\text{He}$ -, $\alpha$ и тяжелых ионов	<b>Каталог реакций под действием заряженных частиц ЦАЭД</b> <a href="#">[описание]</a> Последнее обновление: 28 декабря 2000
Вероятности внутренней конверсии изомерных переходов малой энергии	<b>Вероятности внутренней конверсии изомерных переходов малой энергии</b> <a href="#">[описание]</a> Последнее обновление: 15 мая 2002

Желаем удачи!

Современные Интернет-технологии обеспечивают оперативный доступ к самой свежей информации, облегчают решение задач по сбору и обобщению научной информации, предоставляют ученым и преподавателям практически неограниченные возможности представления своих результатов и обмена информацией, делают легко доступными огромные объемы информации. Именно в связи с этим основными формами

предоставления пользователям накопленной информации в ЦДФЭ стали объемные реляционные базы данных и мощные поисковые системы к ним, функционирующие в среде Интернет (<http://cdfe.sinp.msu.ru>).

В настоящее время на главной странице Web-сервера ЦДФЭ (<http://cdfe.sinp.msu.ru>), созданного на основе материалов международной Сети Центров ядерных данных МАГАТЭ (13 организаций из 9 стран), представлены данные, содержащиеся в нескольких реляционных базах данных (как общего назначения, так и специализированных). Основные из них включают практически полные опубликованные экспериментальные и оцененные данные обо всех (~2500) известных в настоящее время стабильных и радиоактивных атомных ядрах и огромное количество (свыше 1 млн. наборов данных (> 500 Мб исходной информации) из более, чем 100 тыс. публикаций) характеристик ядерных реакций под действием фотонов, нейтронов, заряженных частиц и тяжелых ионов.

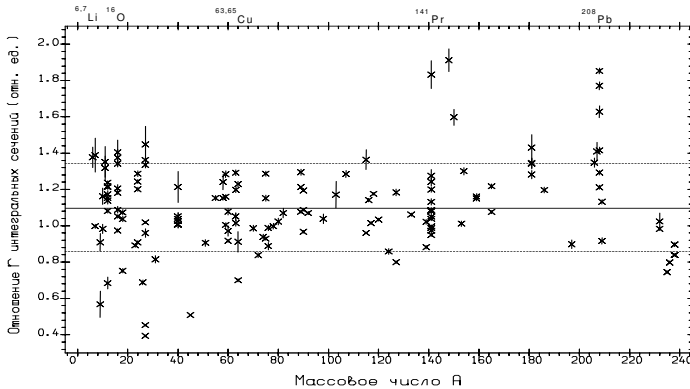
Поисковые системы баз данных ЦДФЭ позволяют осуществлять подбор данных по многим признакам и их сочетаниям, проводить анализ количественных характеристик отобранных данных по выходным таблицам, просматривать соответствующие графические представления и легко транспортировать данные, как в графическом, так и табличном виде, на компьютер пользователя. Подобная концентрация и организация ядерно-физической информации в виде объемных реляционных баз данных не только обеспечивают эффективное информационное обеспечение разнообразных традиционных ядерно-физических исследований, но открывают принципиально новые возможности решения проблем, многие из которых без таких баз данных не могли быть ранее не только решены, но и поставлены. Вот лишь простое перечисление подобных задач различной сложности: поиск данных, одновременно удовлетворяющих очень большому количеству разнообразных условий; подбор данных по некоторым признакам, которые отсутствуют в рубриках или каталогах печатных источников или других менее мощных и гибких поисковых систем; установление различных систематических закономерностей, выявление и учет систематических погрешностей различного типа;



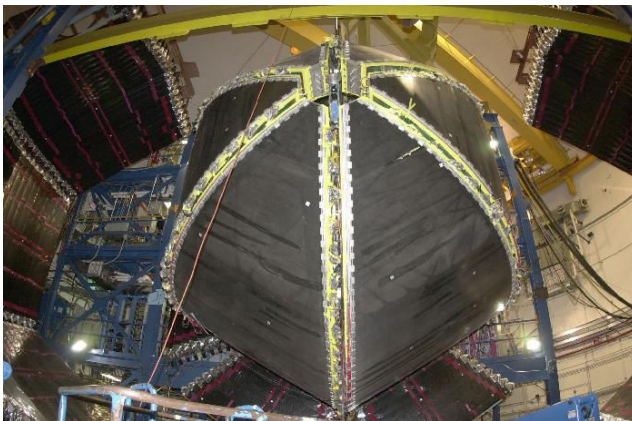
получение на основе систематик данных, которые не могут быть получены экспериментально в силу того, например, что проявляются не индивидуально, а лишь в различных комбинациях.

Накопленные и систематизированные в ЦДФЭ данные об атомных ядрах и ядерных реакциях позволили провести серию оригинальных исследований и получить целый ряд важных результатов, среди которых могут быть отмечены, например, следующие:

- выявление значительных систематических расхождений по энергетическому положению, величине и форме (структуре) сечений различных фотоядерных реакций, полученных в экспериментах на пучках тормозного  $\gamma$ -излучения и квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов; выяснение их причин и разработка методов их учета и устранения
- детальный системный анализ расхождений величин сечений фотонейтронных реакций различной множественности, прежде всего  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$ , обусловленных погрешностями процедур определения множественности фотонейтронов и разработка методов взаимной коррекции соответствующих данных и приведения их в согласие друг с другом для большого числа ядер;
- подтверждение открытого в НИИЯФ эффекта конфигурационного расщепления гигантского дипольного резонанса, в частности, для ядер  ${}^{6,7}\text{Li}$ ;
- получение новых данных по полным и парциальным фотоядерным реакциям и анализ на их основе параметров изоспинового расщепления гигантского дипольного резонанса для большого числа ядер.



В последние годы сотрудники Отдела электромагнитных процессов и взаимодействий атомных ядер НИИЯФ МГУ внесли значительный вклад в исследования структуры адронов, динамики сильного взаимодействия в электромагнитных процессах, проводимые с помощью детектора CLAS на электронном ускорителе Jefferson Lab в США.



При активном участии доктора физ.-мат. наук В.И.Мокеева был создан комплекс программ, моделирующих работу электромагнитного калориметра на больших углах, развита

феноменологическая модель описания рождения пар заряженных пионов на протоне реальными и виртуальными фотонами. Удачное сочетание характеристик непрерывного пучка электронов и детектора CLAS – единственной в мире установки, способной в каждом акте реакции определить типы и импульсы всех образованных частиц – позволило получить ряд уникальных результатов.

На этой установке наблюдался сигнал от нового типа возбуждений нуклона - “missing” резонанса  $3/2^+(1720)$ , выполнены измерения структурных функций инклюзивного рассеяния неполяризованных и поляризованных электронов. Получены указания на существование конституентных кварков конечных размеров. В результате анализа экспериментальных данных (JLAB, США) по фоторождению пар заряженных пионов на протоне в кинематической области от порога до 2.1 ГэВ впервые обнаружены вклады каналов  $\gamma p \rightarrow \pi D_{13}(1520)$ ,  $\pi F_{15}(1685)$ ,  $\pi P_{33}(1660)$ , определены их интегральные и дифференциальные сечения. Впервые получены данные о тензорных обменах в t-канале.

В НИИЯФ МГУ создана группа, которая участвует в подготовке нескольких экспериментов утвержденных программным Комитетом CEBAF:

1. Измерение формфакторов наиболее ярко выраженных в фотонной точке нуклонных резонансов  $N^*$  ( $\Delta$ ,  $D_{13}$ ,  $F_{15}$ ,  $S_{11}$ ) вплоть до максимально достижимых 0.5 ГэВ. В результате эксперимента будет получена информация о структуре адронов при характерных расстояниях между конфайнментом и асимптотической свободой.
2. Исследование высоколежащих резонансов  $W > 1.5$  ГэВ) в эксклюзивном ( $e, e\pi\pi$ ) канале, поскольку  $2\pi$  канал является основным каналом распада этих резонансов. Одной из важных задач исследования ( $e, e\pi\pi$ ) реакции является поиск “missing”-резонансов. Существование подобных резонансов с массой около 2 ГэВ предсказывается всеми конституентными кварковыми моделями, однако до сих пор эти резонансы не обнаружены. Предполагается, что “missing”-резонансы слабо связаны с  $1\pi$  каналом распада, но могут быть сильно связаны с  $2\pi$  каналом. Поиск этих частиц является важной задачей в понимании динамики конфайнмента.

Большую роль в организации и развитии исследований электромагнитных взаимодействий в НИИЯФ МГУ играет тесная связь между сотрудниками Отдела электромагнитных процессов и взаимодействий атомных ядер института и Кафедры общей ядерной физики Физического факультета МГУ. Преподаватели Кафедры ведут исследования в Отделе, научные сотрудники Отдела читают лекции, ведут семинарские занятия и занятия в Практикумах, руководят курсовыми и дипломными работами студентов, диссертационными работами аспирантов и соискателей. К настоящему времени по этому одному из основных научных направлений деятельности НИИЯФ защищено свыше 100 дипломных работ и свыше 40 кандидатских и докторских диссертаций.

Активное участие в учебном и научном процессах в НИИЯФ и ОЯФ принимает нынешний заведующий Лабораторией фотоядерных реакций ИЯИ РАН профессор В.Г.Недорезов. В частности он читает курс лекций «Электромагнитные взаимодействия ядер».

Постоянные творческие связи сотрудников Отдела электромагнитных процессов и взаимодействий атомных ядер НИИЯФ МГУ, Кафедры Общей ядерной физики Физического факультета МГУ и Лаборатории фотоядерных реакций ИЯИ РАН способствуют повышению эффективности исследований электромагнитных взаимодействий.

## ГЛАВА 8

## Языком архивных документов

Поскольку качество сохранившихся документов за время хранения весьма ухудшилось, ниже приводятся в основном только тексты, соответствующие оригиналам.

## Документ 1

## ВЫПИСКА ИЗ ПРИКАЗА

Физическому институту им. П. Н. Лебедева Академии наук СССР

г. Москва

№ 369

от 9 ноября 1959г.

6

1. В соответствии с решением Ученого совета Института, временно, впредь до утверждения в Президиуме АН СССР, разделить с 1 декабря с/г. Лабораторию ускорителей и фотоядерных реакций на три самостоятельные лаборатории с подчинением их непосредственно Инженеру Дирекции Института:

а) лаборатория ускорителей (зав. лабораторией акад. В. И. Векслер; зам. зав. лабораторией, зав. сектором д-р Ф. М. И. - М. С. Рабинович; главный инженер лаборатории М. Г. Седов; зам. зав. по АХЧ Леман).

б) лаборатория фото-мезонных процессов (и. о. зав. лабораторией - зав. сектором д-р Ф. М. П. А. Черенков; зам. зав. лабораторией, канд. Ф. М. И., мл. науч. с. р. А. Н. Горбунов; главный инженер лаборатории А. М. Беляк; зам. зав. лабораторией по АХЧ - С. А. Покровский).

в) лаборатория фотоядерных реакций (и. о. зав. лабораторией, ст. н. с. стр. Л. Лазарева; главный инженер лаборатории В. Н. Логунов).

По утверждению разделения Лаборатории ускорителей и фотоядерных реакций в Президиуме АН СССР, объявить конкурс на вакантные должности заведующих лабораториями фото-мезонных процессов и фото-ядерных реакций.

2. Поручить уче. ому секретарю Института профессору Н. Н. Соболеву и пом. директора по кадрам Р. Г. Троицкому в недельный срок подготовить все материалы по разделению лабораторий ускорителей и фотоядерных реакций, необходимые для представления в Отделение физ. мат. наук АН СССР.

П. П. Директор ФИАН, академик - Д. В. Скобелевы.

В е р н о:

**Документ 2**

от 8 февраля с.г. <sup>2</sup>на министерство Вооруженных сил и академию наук СССР возложены обеспечение и организация исследований в 1948 году космических лучей с помощью ракет дальнего действия, высотных самолетов и исследований в горах.

Сообщаю Вам, что во исполнение указанного Постановления проведены следующие мероприятия. <sup>3</sup>

Для исследования космических лучей с помощью ракет дальнего действия Р-1 Академии наук СССР выделяются две ракеты Р-1 при заводских испытаниях в августе-сентябре и 4 ракеты в октябре-ноябре с.г.

Министерством Вооруженных сил СССР выделяются Академии наук СССР:

- 3 автомашины «студебекер» и 2 автомашины «Виллис» с запасными частями к иностранным маркам автомашин в соответствии с заявкой АН СССР.
- 2 двигателя переменного тока для физического института имени Лебедева Академии наук для работ на Государственном центральном полигоне (ГЦП) МВС и одна передвижная электростанция переменного тока для Армянской Академии наук.
- 2 связные радиостанции SCR-399
- телефонный кабель ПТФ-7 20 километров
- телефонный кабель ПТГ-17 20 километров
- 11 американских радиоприемников HRO-5Г или AR-88 Д по усмотрению Академии наук.
- 8 типов американских радиоламп в количестве 1800 штук (потребность удовлетворяется не полностью в связи с отсутствием некоторых типов ламп).

Кроме того, даны указания о закреплении на время испытаний за Физическим институтом имени Лебедева Академии Наук СССР радиолокационной станции SCR-627 в селе Новая Лужа Химкинского района Московской области и об обеспечении наблюдений за полетом шаров-зондов с помощью всех радиолокационных постов со станциями SCR-627 по графику, согласованному с Академией наук СССР.

Автомашина «дождь 3/4», необходимая Академии наук на ГЦП на все время испытаний, будет предоставлена начальником ДЦП из числа автомашин, находящихся на полигоне.

Установка на ГЦП двух финских домиков, предоставляемых Академии наук под приемный пункт Физического института, будет обеспечена по прибытии этих домиков на полигон.

Выделение самолета ТУ-4 под летающую лабораторию для подъема специальной аппаратуры весом 2-3 тонны на высоту 12 км может быть произведено только после окончания государственных испытаний и поступления этого самолета на вооружение Советской Армии.

---

<sup>1</sup>Документ выполнен на типографском бланке с угловым штампом помощника Генерального штаба Министерства ВС СССР.

<sup>2</sup>Речь идет о постановлении СМ СССР «О мероприятиях по обеспечению работ в 1948 г. В области исследования космических лучей»

<sup>3</sup>Далее абзац выделен неустановленным лицом очерком на полях.

### **Документ 3.**

*Постановление СМ СССР № 4178/1674сс/оп*

*«О приеме под охрану войск МГБ СССР вновь вступающих в эксплуатацию специальных объектов»*

*г.Москва 8 сентября 1948 года*

*Св. секретно Кремль (специальная папка)*

Совет Министров Союза ССР ПОСТАНОВЛЯЕТ:

Обязать МГБ СССР (тов. Абакумова) принять под охрану войск МГБ СССР:

А) вновь вступающие в эксплуатацию объекты акционерного общества «Висмут» в Германии;

Б) специальные цеха заводов № 92 Министерства вооружения и № 496 Министерства электропромышленности;

- В) Ленинградский государственный институт прикладной химии  
Министерства химической промышленности;  
Г) спецпроизводства завода № 752 Министерства химической  
промышленности;  
Д) установку С-25 Физического института Академии наук СССР.

**Документ 4.**

*Об организации производства толстослойных фотопластинок для  
физических исследований.*

Проект внесен Вавиловым, Зверевым и Борисовым (Госплан  
СССР).

п/п Л.Берия

**Документ 5. № 277**

*Справка А.Н. Комаровского на имя Б.Л. Ванникова*

*О строительстве специальных объектов ПГУ при СМ СССР*

*5 сентября 1949 г.*

*сов. Секретно (особая папка) Экз. № 1*

*Лично начальнику Первого главного Управления*

*при Совете Министров Союза ССР товарищу Ванникову Б.Л.*

*Справка о строительстве специальных объектов*

*для нужд Первого главного управления при Совете Министров*

*СССР товарищу Ванникову Б.Л., осуществляемом Главгорстроем  
МВД СССР.*

За период времени с конца 1945г. и по 1 сентября 1949 года  
Главпромстроем МВД СССР построено и введено в действие 35  
специальных объектов, в том числе научно-исследовательских  
институтов, лабораторий и опытных установок – 17, горнорудных  
и металлургических предприятий – 7, комбинатов и заводов  
основного сырья -2, химических предприятий - 5 ,  
машиностроительных и прочих предприятий – 4.

На указанных объектах построено 895 цехов и производственных  
помещений общей площадью 956 тыс. м<sup>2</sup>. Кроме того, выстроено и  
сдано в эксплуатацию 32 жилых поселка в количестве 2942 домов



жилой площадью 479 тыс. м<sup>2</sup> и 268 культурно-бытовых и коммунальных зданий площадью 132 тыс. м<sup>2</sup>.

Продолжается строительство 11 научно-исследовательских и промышленных объектов, а также жилых домов и коммунально-бытовых сооружений. Наряду с этим ведутся дальнейшие работы по развитию и наращиванию новых мощностей на введенных в действие объекты.

### **Документ 6.**

*Научно-исследовательские институты, лаборатории и опытные установки.*

Выстроены и введены в действие: Институт «А» (г.Сухуми) и Институт «Г» (г.Сухуми), Научно – исследовательский институт № 9, научно-исследовательский Физический институт № 2, Научно-исследовательский вакуумный институт, физические Лаборатория № 2, Лаборатория № 3, Лаборатория № 6, Лаборатория Физического института и центральная гидрометеорологическая обсерватория (Долгопрудный Московской области), высокогорная Памирская станция (Муром Таджикской ССР), Лаборатория «Б» (Сунгум Челябинской области) и Лаборатория «В» (Обнинское Калужской области), Конструкторское бюро № 11 в составе лабораторий, 2 опытных заводов и испытательных полигонов (Саров Мордовской АССР), установка «М» с лабораториями и специальными мастерскими (Иваньково Калининской области), установка №7 и установка С-25 (г. Москва). Общая производственная площадь построенных зданий составляет 122 тыс. м<sup>2</sup>.

Кроме того, идет строительство в Москве физического института, института геохимии и объектов института имени Карпова, которое будет закончено в 1949-50гг.

Начаты работы по строительству установки «КМ»<sup>52</sup> в Иваньково Калининской области.

Производственная площадь строящихся объектов составит 48 тыс.м<sup>2</sup>. Одновременно с этим производятся работы по дальнейшему развитию большинства внедренных в действие объектов.

Стоимость выполненных работ по всем научно-исследовательским учреждениям и опытным установкам составляет 603 млн.руб.

### **Документ 7.**

*Президент Академии наук*

*Союза Советских Социалистических Республик*

*Академик В..И. ВАВИЛОВ*

*Тов. И.В.СТАЛИНУ*

Докладываю, что в соответствии с постановлением Совета Министров СССР в Физическом институте имени П.П. Лебедева под основным руководством члена-корреспондента АН СССР В.О. Векслера закончен постройкой и начал работать электронный ускоритель «С-25», позволяющий получать электронные пучки со скоростью электронов, эквивалентной 250 миллионам электро-вольт.

«Скан-25»- самая мощная ускорительная установка, работающая в СССР. По печатным данным в Америке на таком же принципе , как «С-25», начала работать установка, дающая пучки частиц со скоростью электронов 500 миллионов электро-вольт.

Приоритет оригинального принципа, который положен в основу новой ускорительной машины (синхротрона), принадлежит В.О. Векслеру, предложившего этот принцип в 1944 г. и получившего на него авторское свидетельство. Приоритет в этом В.О.Векслера признается и за границей.

Основная идея, на которой построен синхротрон, имеет широкое принципиальное значение. Она позволила устранить те трудности, которые до 1944 года казались непреодолимыми при конструировании ускорительных машин типа циклотрона, вследствие зависимости энергии ускоряющихся частиц от их скорости.

В.О. Векслером было показано, что при медленном возрастании магнитного поля, управляющего траекторией частиц, или медленном возрастании частоты электрического поля, ускоряющего эти частицы,, период их обращения в ускорителе автоматически поддерживаемся постоянным. Это дает

возможность применять для ускорения частиц переменное электрическое поле.

На принципе, предложенном В.О. Векслером, в настоящее время строятся все ускорительные машины, как в СССР, так и за границей. Это относится как к установкам, предназначенным для ускорения электронов, так и для ускорения тяжелых частиц – протонов.

Осуществление ускорителя «С-25» шло последовательными этапами. В конце 1947 года была построена и начала работать небольшая установка «С-3», позволяющая получать электронные пучки со скоростью, эквивалентной 30 миллионов электро-вольт. Эта установка работает и в настоящее время в физическом институте имени Н.П.Лебедева и используется для физических исследований; в частности, при помощи этой машины было исследовано распадение ядер урана под действием лучей гамма, а также расщепление лучей ядер углерода.

#### **Документ 8.**

Новый большой ускоритель «С-25» начал работать в так называемом бетатронном режиме, при котором электроны доводятся до энергии 4 миллиона электронвольт в конце июля месяца текущего года. 27 октября текущего года удалось осуществить ускорение частиц уже в полном запроектированном размере, т.е. была достигнута скорость, эквивалентная 250 миллионам электронвольт. Есть основания надеяться получить с помощью этой машины еще большие скорости. Работа по усовершенствованию машины продолжается. Вместе с тем начаты исследования по получению искусственных мезонов – частиц, определяющих связи в атомном ядре.

Осуществление новой ускорительной машины «С-25» стало возможным благодаря напряженной работе большого коллектива физиков, инженеров и техников.

В работе очень большую помощь оказал трансформаторный завод имени Куйбышева Министерства электропромышленности. Работники завода принимали деятельное участие в постройке магнита, а также наладке машины

**Документ 9.**

*Докладная записка президента Академии наук СССР С.И. Вавилова Л.П. Берия о пуске установки «С-25».*

*28 октября 1949 г.*

*Сов.секретно (особая папка) Экз. № 1*

*Товарищу Берия Л.П.*

Докладываю, что в соответствии с решением Совета Министров в Физическом институте имени П.Н. Лебедева Академии наук СССР под основным руководством члена-корреспондента Академии наук СССР В.И. Векслера разработана, спроектирована и построена установка «С-25». Эта установка была запущена в бетатронном режиме в конце июля с.г.

В течение последнего времени производилась наладка синхротронного режима работы установки, а после преодоления ряда трудностей 23 октября с.г. установка впервые была запущена в синхротронном режиме.

В настоящее время ускоритель «С-25» дает запроектированный пучок электронов с энергией до 250 миллионов электронвольт. Имеется возможность дальнейшего повышения энергии пучка частиц.

Большая помощь в этой работе получена со стороны Московского трансформаторного завода имени Куйбышева Министерства электропромышленности СССР.

Приложение: рапорт руководителей работы на имя президента Академии наук СССР.

С.Вавилов

(Приложение)

Рапорт руководителей работы на имя президента Академии наук СССР.

Президенту Академии наук СССР

Директору Физического института имени П.Н. Лебедева Академии наук СССР академику С. И. Вавилову.

Докладываем Вам, что в результате напряженной работы всего коллектива Эталонной лаборатории Физического института имени П.Н. Лебедева Академии наук СССР 23 октября с.г. была запущена установка «С-25». Эта установка, которую мы по решению Правительства разработали, руководили проектированием и постройкой, в июле месяца была запущена в бетатронном режиме. После длительной и напряженной работы, в которой принимал участие большой коллектив физиков и инженеров, было преодолено большое количество трудностей и неясностей и осуществлен синхротронный режим.

В настоящее время установка дает пучок частиц с энергией до 250 миллионов электронвольт.

Уже сейчас мы приступили к физическим исследованиям, результаты которых, мы не сомневаемся, оправдают большую помощь, оказанную нам партией и Правительством в создании этой установки.

Зав.Эталонной лабораторией ФИАН,  
Член-корреспондент Академии наук,  
Профессор В.И.Векслер.

#### **Документ 10.**

*Справка Д.В. Ефремова и В.И. Векслера  
Об ускорителях заряженных частиц*

*25 ноября 1949 г. Сов. секретно*

*(особая папка)*

*Ускорители заряженных частиц и их значение для  
исследований строения вещества и проблемы ядерной физики*

Наиболее эффективным способом исследования структуры и свойств атомных ядер, характера внутриядерных сил и других фундаментальных проблем строения вещества является бомбардировка ядер быстрыми частицами.

Быстрые частицы получают при помощи ускорителей заряженных частиц – бетатронов, синхротронов и циклотронов и других. Вопросы практического использования ядерной энергии

также в значительной степени зависят от исследований, выполняемых на ускорителях. Так, например, с помощью циклотрона было впервые обнаружен один из делящихся материалов – плутоний – в количествах, достаточных для макрoхимических исследований.

Дальнейшее развитие проблемы ядерной энергии теснейшим образом связано с прогрессом в сооружении мощных ускорителей, так новые успехи в исследовании природы ядерных сил и устойчивости атомных ядер возможны только в том случае, если исследователи будут обладать мощными средствами воздействия на ядро.

В настоящее время следует считать установленным, что в вопросах устойчивости атомных ядер и свойств ядерных частиц (протонов и нейтронов) большую роль играют мезоны – частицы с массой промежуточной между массой протона и нейтрона.

До последнего времени мезоны обнаруживались только в космических лучах; современные ускорители, в которых заряженные частицы приобретают энергии в сотни миллионов электронвольт, обеспечивают получение мезонов в лабораторных условиях в количествах неизмеримо больших, чем те, которые наблюдаются в космических лучах.

Таким образом, физики получили новое средство для использования свойств атомных ядер, в частности, для поиска нового типа ядерных реакций, сопровождаемых выделением энергии.

Современное развитие теории ускорителей и технический прогресс обеспечивают сооружение таких ускорителей, с помощью которых заряженные частицы смогут приобретать энергию в несколько миллиардов электронвольт.

Важность интервала энергии 5-10 миллиардов электронвольт обусловлена, в частности, тем, что при этих энергиях существует некоторая вероятность искусственной генерации ядерных частиц.

Из вышеуказанного ясно, какое большое значение имеют ускорители и их развитие для дальнейшей разработки более эффективных способов получения ядерной энергии.

По сообщению американской печати, в США к началу 1948 года насчитывалось около 50 действующих ускорителей различных

типов и находились в стадии сооружения и проектирования еще 40 ускорителей, в том числе по крайней мере 15 ускорителей на энергии в 100 миллионов электронвольт и выше.

В соответствии с опубликованными данными, в апреле 1948 года комиссией по атомной энергии США утверждено строительство двух гигантских кольцевых ускорителей протонов: ускорителя на 2-3 миллиарда электронвольт в Брукхейвской лаборатории и ускорителя на 6-7 миллиардов электронвольт в Калифорнийском университете.

Общая стоимость сооружения вышеуказанных 50 действующих ускорителей в США может быть ориентировочно оценена суммой около 600 миллионов рублей по ценам, действующим в Советском Союзе в 1945 году.

Затраты на сооружение 40 запланированных ускорителей, включая указанные гигантские кольцевые ускорители, значительно превзойдут ранее израсходованные США суммы в связи с тем, что в последние годы сооружаются преимущественно мощные ускорители и (затраты на их сооружение) могут быть ориентировочно оценены суммой около 2 300 миллионов рублей также в ценах, действующих в Советском Союзе в 1945 году.

Следует отметить, что сооружение большого числа ускорителей в США финансируется Комиссией по атомной энергии или Управлением военно-морского флота.

Строительство ускорителей приобрело широкое значение также в Англии, Франции, Швеции и других странах.

В Советском Союзе имеются значительные успехи в области разработки ускорителей заряженных частиц.

Установленный в 1944 году советской наукой принцип автофазировки частиц позволил значительно расширить пределы энергии ускоряемых частиц (на \_\_\_\_\_ величины энергии).

Электротехническая промышленность освоила изготовление сложнейшего оборудования, из которого комплектуются современные ускорители.

Отечественная промышленность изготовила для ведущих научно-исследовательских институтов и университетов 4 малых циклотрона, 3 крупных циклотрона, 2 бетатрона и синхротрон на 30 миллионов электронвольт. Большинство из этих установок введено в эксплуатацию.

Успешно изготовлена и пущена установка «С-25» - синхротрон на 250 миллионов электронвольт; в стадии окончания предпусковых работ находится установка «М», которая по энергии частиц превзойдет все известные заграничные действующие ускорители.

Имеются все необходимые теоретические и технические предпосылки для разработки еще более мощных ускорителей и в первую очередь установки КМ, которая явится мощнейшим оружием для дальнейших исследований фундаментальных проблем атомного ядра и ядерной энергии.

Д.Ефремов,  
В.Векслер.

### **Документ 11.**

*Письмо С.В.Кафтанова Л.П.Берия о мероприятиях по удалению из Московского механического института группы преподавателей, сотрудников и студентов*

*14 декабря 1949 года. Сов.секретно (Особая папка)*

*Заместителю председателя Совета Министров СССР  
товарищу Берия Л.П.*

Сообщаю вам, что, рассмотрев докладную записку т. Абакумова В.С. от 7.Х.49г. № 6004/А о наличии в кадрах профессорско-преподавательского, учебно-вспомогательного и студенческого состава Московского механического института лиц с компрометирующими данными Министерство высшего образования провело и наметило провести следующие мероприятия:

1. Отчислена из института сотрудница Воронкова А.С. лаборант (быв. диспетчер учебной части).
2. Переведены в другие институты следующие студенты:
  1. Попов А.И. (студент факультета № 132)
  2. Шляпников Ф.А. (студент факультета № 132)
  3. Скалодуб В.И. (студент факультета № 132)
3. Будут освобождены от работы с 7 февраля 1950 года следующие лица:



1. Фрейнбек Е.Л.- профессор кафедры № 18
2. Хайкин С.З.-зав. кафедрой спецфизики
3. Бескин Н.М. – доцент кафедры математики
- 4.Мигдал А.Б.- профессор кафедры № 17
- 5.Кусиков С.Н. – зав.кафедрой технологии машиностроения
- 6.Кошарнов И.Г.- ассистент кафедры графики
- 7.Дворецкий Е.Р. – ст. преподаватель кафедры точной механики
8. Полянский-Жирнович В.Н. – преподаватель кафедры химии.

3. Будут переведены с 7 февраля 1950 года, по окончании зимней сессии, в другие институты следующие студенты:

1. Вишневский С.М. (студент факультета № 131)
2. Лизоркин П.И. (студент факультета № 131)
3. Меркулов В.А. (студент факультета № 132)

4. Кроме лиц, указанных в письме тов. Авакумова В.С. Министерством высшего образования отстранены от работы 28.IXX.49 года следующие лица:

1. Мюллер С.Э. – диспетчер учебной части
2. Коган Б.А. – лаборант
3. Стрижникова А.А. – ст. лаборант.

В связи с тем, что замена профессора Лейпунского А.И., Тамма И.Е. и Тихонова А.Н., являющихся наиболее крупными специалистами в области ядерной физики, в текущем году не представляется возможной, Министерство высшего образования просит Вашего согласия оставить их временно на работе в Московском механическом институте.

Министр высшего образования СССР С.Кафтанов.

## **Документ 12.**

*Письмо А.П.Завенягина Л.П.Берия с просьбой об ознакомлении М.Г.Мещерякова, Д.В. Ефремова и В.И. Векслера с материалами Бюро № 2.*

*16 декабря 1949 г. Сов. Секретно (особая папка)*

*Товарищу Берия Л.П.*

Прошу Вашего разрешения ознакомить с материалами Бюро - 2:

1. Мещерякова Михаила Григорьевича, начальника установки «М» с «планом расположения строящегося Ливерпульского циклотрона»(№786) и с «Английскими и американскими циклическими ускорителями» (№ 915 II, YII, YIII).
2. Ефремова Дмитрия Васильевича, заместителя министра электропромышленности СССР, и Векслера Владимира Иосифовича, зам. директора Физического института АН СССР с «Английскими и американскими циклическими ускорителями» (№ 915 II, YII, YIII).

Резолюция: ознакомить (подчеркнуто). Л.П.Берия. 23.XII.

### **Документ 13**

*В число секретных документов входили также диссертации. Ниже приводятся несколько страниц одной из первых диссертаций (Б.И.Гаврилов, 1955 год), в которой использованы результаты измерений, выполненных на синхротроне С-3. Эта диссертация оказалась единственной из засекреченных работ, сохранившейся в архиве лаборатории фотоядерных реакций благодаря снятию грифа секретности. Можно обратить внимание, что некоторые страницы, например все надписи на английском языке, сделаны от руки.*

АКАДЕМИЯ НАУК СОВЕТА СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н. ЛЕВЕНДЕРА

ИДВ. 0136

**ГАБРИЛОВ В.В.**

ВЫХОД ФОТОНОВ ТРОИНОМ ПРИ ВОЗРАСТНИИ ВЕЩИ  
СРЕДНЕ-ЧАСТИЦ И ТИПОВЫХ ИДЕР

Диссертация на соискание ученой  
степени кандидата физико-  
математических наук.

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук  
профессор

/ТРОИНА В.В./

Кандидат физико-математических  
наук

/САВАРИНА В.В./

гор. Москва

1955 год

§ 7. Заключение.

В работе были измерены:

1. Выходы нейтронов при фоторасщеплении меди, цинка, никеля, молибдена, тантала, золота, таллия, висмута, тория и урана в зависимости от максимальной энергии спектра  $\gamma$ -квантов.

2. Кривые выхода фотоделения для урана и тория.

3. Среднее число нейтронов  $\bar{\nu}$ , приходящихся на один акт деления для урана и тория в зависимости от максимальной энергии тормозного  $\gamma$ -излучения.

Полученные кривые позволили рассчитать:

а/ Поперечное сечение вылета фотонейтрона  $\sigma(\gamma, n)$ .

а также сечение поглощения  $\gamma$ -кванта -  $\sigma_{\gamma}$ ;

б/ Поперечное сечение фотоделения для урана и тория;

в/ Относительную вероятность фотоделения при фоторасщеплении урана и тория для энергий до 11 мэв.;

г/ Выход фотоделения для тория по отношению к урану.

Получены также закономерности основных характеристик рассчитанных сечений в зависимости от  $A$  и  $Z$ . Эти закономерности находятся в удовлетворительном согласии с теоретическими предположениями.

Сечения  $\sigma(\gamma, \bar{n})$  и  $\sigma_\gamma$  для нейтронов, теплых и горячих приведены впервые. В литературе не были опубликованы также данные о среднем числе нейтронов, приходящихся на один акт деления, <sup>при</sup> фоторадиационном уране и тории в зависимости от максимальной энергии тормозного  $\gamma$  - излучения.

Следует отметить, что сечения фоторадиации в области энергии 25-30 мэв. имеют не очень малые значения. Хотя точность расчета их в этой области мала, однако тенденция к росту может увеличивать на величину максимума в интервале 25-30 мэв., приведенного в работе /42/. Для этой области энергии представляли интерес более точные измерения, которые возможны с монохроматическими источниками  $\gamma$  - излучения.

В заключение мне хочется выразить глубокую благодарность руководителю работы - ст.научному сотруднику ЛАЭА-РЕВОЙ Л.Н. за постоянное внимание и работу, помощь при работе результатов измерений и их детальное обсуждение и профессору ГРОБЕВУ Л.В. за внимание и работу, а также бывшим студентам-дипломникам СТАВНИСКОМУ В.С. и ЧЕРНЯКОВУ Б.Р. за участие в измерениях. Я также благодарен радиационному ЕСТРАНУХУ И.В. и ОБЧИННИКОВУ В.П. за безотказное действие измерительной или радионепаратуры, группе ассистентов спектрометра за деловое и серьезное отношение к работе и особенно СМОЛДИНОЙ И.А., возмевшей на себя труд по оформлению почти всей графической работы.

ЛИТЕРАТУРА

- |   |                    |         |                |
|---|--------------------|---------|----------------|
| 1. А.С.Митропол,                                  | ЖЭТФ               | 15-81   | /1945/         |
| 2. Goldhaber M. and Teller E.                     | Phys. Rev          | 74.1046 | /1948/         |
| 3. H. Steinwedel und F. H. D. Jense               | Zs.f. Naturforsch. | 5a 413  | /1950/         |
| 4. U.L. Businaro and S. Gallone                   | Nuovo Cimento      | 26 1285 | /1955/         |
| 5. Lewinger F.S. and Bethe H.A.                   | Phys. Rev          | 78.115  | /1950/         |
| 6. M. Gell-Mann, M.L. Goldberger a. W.E. Thirring | Phys. Rev          | 95.1612 | /1954/         |
| 7. Mann. A. and Halpern J.                        | Phys. Rev          | 82.733  | /1951/         |
| 8. Cameron A.G., Harms W. and Katz L.             | "                  | 83.1204 | /1951/         |
| Toms M.E. and Stephens W.E.                       | "                  | 92.362  | /1953/         |
| E.V. Weinstock and J. Halpern                     | "                  | 94.1651 | /1954/         |
| M.E. Toms and W.E. Stephens                       | "                  | 98.626  | /1955/         |
| 9. Cameron A.G.W. and Katz L.                     | "                  | 84.608  | /1951/         |
| J. Goldemberg and L. Katz                         | "                  | 90.308  | /1953/         |
| 10. R. Montalbetti, L. Katz and J. Goldemberg     | "                  | 91.659  | /1953/         |
| 11. R. Nathans and J. Halpern                     | "                  | 93.437  | /1954/         |
| 12. J. Goldemberg and L. Katz                     | Can. J. Phys.      | 32.49   | /1954/         |
| 13. Whalin E.A. and Hanson A.O.                   | Phys. Rev.         | 89.324  | /1953/         |
| 14. Лозунов В.А., Ратнер Б.С. и Руссов            | Отчет СИАИ         |         | /1951/         |
| 15. Лазарова Л.С. и Ратнер Б.С.                   | Отчет СИАИ         |         | /1950/         |
| Лазарова Л.С., Ратнер Б.С. и                      | Стрелник И.В.      | ЖЭТФ 29 | 6m.3/9/ /1955/ |

- 79.
16. Александров Б.И., Толстов К.И. и Виноградов С.И. Отчет АИАН. /1950/
17. D.J. Litter Proc. Phys. Soc. 65A.203 /1952/
18. А.Н.Кропачев "Дозиметры рентгеновских и  $\gamma$  - лучей". Издательство МГУ стр.83 /1953/
19. А.И.Бочар-Бруевич "Применение электронных осциллографов в экспериментальной физике"-ИЗВТИ,Москва стр.-312 /1955/
20. Flaver B.H., Lawson J.D. and Fossey E.B. Proc. Phys. Soc. 65B.286 /1952/
21. G. Adams Phys. Rev. 74.1707 /1948/
22. K. Phillips Proc. Phys. Soc. 65A.57 /1952/
- H. W. Koch and R. E. Carter Phys. Rev. 77.165 /1950/
- L. E. H. Trainor and S. B. Braven Can. J. Phys. 33.110 /1955/
- 89
23. M. Lax Phys. Rev. 78.61 /1947/
24. Кузнецов -Дипломная работа АИАН /1950/
25. Гаврилов Б.И., Лазарев Л.В. и Степанов Г.И. Отчет АИАН  
Валуев Б.И., Гаврилов Б.И. и Огачинский Б.И. Отчет АИАН.  
Валуев Б.И., Гаврилов Б.И., Лазарев Л.В., Семенов Г.И. ЖЭТФ 29 3(9) /1955/
26. G. A. Price and D. W. Keist Phys. Rev. 77.806 /1950/
27. J. R. Huizenga, J. E. Sinder a. R. B. Duffield Phys. Rev. 75.1009 /1954/
- /см. также Mellinney and Ogle Phys. Rev. 81.342 /1951/

28. Воротченко В.Г. Дипломная работа ФИАН /1954/
29. H.E. Johns, L. Katz, R.A. Douglas and R.M.H. Haslam  
Phys. Rev. 80.1062 /1950/
30. L. Katz and A.G.W. Cameron Can. J. Phys. 29.518 /1951/
31. R. Wilson Proc. Phys. Soc. 66A.645 /1953/  
L.W. Spencer Phys. Rev. 87.136 /1952/
32. Goldemberg J. and Katz L. -- 89.1300 /1953/
33. J.T. Berman and K.K. Brown -- 86.82 /1954/
34. G.C. Baldwin and G.S. Klaiber -- 73.1156 /1949/  
B.C. Diven and G.M. Almy -- 80.407 /1950/  
P.R. Byerly and W.E. Stephens -- 83.54 /1951/  
L.J. Newkirk -- 86.373 /1951/  
V.E. Krohn and E.F. Strader -- 87.685 /1952/  
K. Strauch -- 81.373 /1951/  
Marshall, Rosenfeld and Wright -- 83.305 /1951/
35. Дж. Блашин и В. Райсфорд - "Теоретическая ядерная физика" - Изд. ИЛ. /1954/ стр. 295  
В. Райсфорд - "Статистическая теория ядерных реакций" - Изд. ИЛ. /1952/ стр. 71
36. Goward F.K., Jones E.J., Watson H.H. and Lee D.J. Proc. Phys. Soc. 64A.95 /1951/
37. Чувано И.Б. Диссертация ФИАН.
38. R.B. Duffield and J.R. Huizenga Phys. Rev. 83.1042 /1953/



39. В.А.Кривонос                    УФН            47.371    /1952/  
       В.А.Кривонос                    УФН            54.3      /1954/
40. P.R. Byerly and W.E. Stephens Phys. Rev. 81.473    /1951/
41. R. Sagane                            - " -        85.956    /1952/  
       L.S. Edwards and F.A. MacMillan - " -        87.377    /1952/  
       L. Eyras                            - " -        86.325    /1952/
42. M. Doms and H. Heimwedel Z.f. Naturf. USA. 217    /1951/
43. N. Bohr and J. Wheeler    Phys. Rev. 56.426    /1939/
44. Сперов Н.Н. и Ташкин В.М. Отчет ЛИЯН                    /1954/
45. ДАТамочук, Сперов Н.Н. и Ташкин В.М. Отчет ЛИЯН                    /1955/
46. W.J. Lawrence and K.M. Terwilliger Phys. Rev. 91.699    /1953/
47. Сессия Академии Наук СССР по широкому  
 использованию атомной энергии 1-6 июля 1955 г.  
 Заседания отделения физико-математических  
 наук.  
 Л.С.Назарова, В.И.Гаврилов, В.И.Вакуев,  
 Г.И.Зацепина, В.С.Ставицкий -  
 "Выход нейтронов при фоторасщеплении  
 урана и тория", стр.306.

## Заключение

Ниже приводится сложившаяся к настоящему времени программа исследований по физике электромагнитных взаимодействий ядер, где участвуют Российские институты. Разумеется, специализация даже в рамках одного направления довольно условна, потому что тематика электромагнитных взаимодействий на самом деле, особенно в области физики высоких энергий, намного шире. В этой программе подчеркнута роль ядра, как объекта исследований, что составляет отдельную самостоятельную нишу. Эта программа, сформулированная Советом по электромагнитным взаимодействиям РАН (в настоящее время этот совет находится в стадии реорганизации), достаточно полно отражает уровень исследований, сложившийся в России в настоящее время, включая участие в международных проектах.

Наименование темы	Участники
<p>Исследование электромагнитных взаимодействий ядер в области нуклонных и ядерных мультипольных резонансов. Прецизионные измерения полных и парциальных сечений и последовательные микроскопические расчеты. Изучение спиновых структурных функций нуклонов, мезонов, легчайших ядер, фотона, померона. Измерение амплитуд фоторождения мезонов, сечений реального и виртуального комптоновского рассеяния, измерение магнитных моментов нестабильных барионов. Исследование свойств мезонов и нуклонных резонансов в ядерной среде.</p>	<p>ФИАН, ИЯИ РАН, ОИЯИ, ИТЭФ, НИИЯФ МГУ, НИИЯФ ТПУ, МИФИ, ОИЯИ,</p>
<p>Изучение спиновых структурных функций ядер в реакциях упругого и неупругого рассеяния электронов. Исследование глубоко неупругого комптоновского рассеяния и электророждения мезонов, поиск новых типов барионных состояний.</p>	<p>НИИЯФ МГУ, ИТЭФ, ИФВ, ИЯИ РАН, НИИЯФ ПТУ, ИЯФ СО РАН.</p>

Исследования эволюции сильных взаимодействий с изменением расстояний (виртуальности) фотонов.	
Исследование электромагнитных взаимодействий релятивистских тяжелых ионов. Изучение квантово-динамических эффектов высокого порядка, спектров виртуальных фотонов. Исследование свойств нестабильных и экзотических ядер на встречных пучках электронов и тяжелых ионов, включая астрофизические аспекты.	ИЯФ СО РАН.  ОИЯИ, ИЯИ РАН, ИТЭФ, ФИАН, РНЦ КИ, ИЯФ СО РАН.
Изучение электромагнитных взаимодействий в сплошных средах, включая кристаллооптику. Исследование воздействия мощных импульсных лазеров на ядерную среду. Прикладные исследования по системам безопасности, детектированию взрывчатых веществ и делящихся материалов, медицинской диагностике и терапии, создании фарм-препаратов.	ОИЯИ, ИЯИ РАН, НИИЯФ ТПУ, НИИЯФ МГУ, ФИАН.