

В.И. Векслер и развитие физики фотомезонных процессов в ФИАН

Г.А.Сокол

Физический институт им.П.Н. Лебедева , РАН

e-mail : gsokol@venus.lpi.troitsk.ru

Аннотация

В статье рассказывается о Владимире Иосифовиче Векслере и о его роли как организатора и руководителя в развитии физики электромагнитных взаимодействий и физики фотомезонных процессов в ФИАН в период с 1949-го по 1959 год, и о исследовательских работах на созданном им электронном синхротроне с энергией $E_e = 250$ МэВ. Рассказывается также и о работах, проводимых на электронном синхротроне ФИАН с энергией $E_e = 1300$ МэВ, созданном в г. Троицке при активной поддержке его строительства В.И.Векслером

V.I. Veksler and the development of the fotomeson processes physics at LPI

G.A. Sokol

Lebedev Physical Institute, RAS

e-mail: gsokol@venus.lpi.troitsk.ru

Abstract

The role of academician V.I. Veksler in the development of studies of electromagnetic interactions in particle and meson physics is considered. In 1949 – 1959 years he was the leader of researches at the 250 MeV LPI synchrotron and put forward the suggestion to build a 1300 MeV LPI electron synchrotron at Troitsk. His fruitful activity was very important for basic researches.

В.И. Векслер и развитие физики фотомезонных процессов в ФИАН



Владимир Иосифович Векслер (1907 – 1966) – академик АН СССР, автор принципа автофазировки, позволившего осуществить ускорение релятивистских частиц, лауреат Международной премии «АТОМ для МИРА» (вместе с Э. Макмилланом), лауреат Ленинской и Государственной премий, основатель Эталонной лаборатории ФИАН, руководитель фундаментальных исследований по физике ядра и частиц на созданных им ускорителях электронов с энергиями 30, 280, 600, 1300 МэВ (ФИАН) и на ускорителе протонов (синхрофазотроне) с энергией 10 ГэВ (ОИЯИ, г.Дубна)

Введение

Настоящие заметки возникли на основе моего доклада на юбилейном заседании Лаборатории высоких энергий (ЛВЭ) ОИЯИ в конце 2007 года, в Дубне, посвященного 100-летию со дня рождения В.И.Векслера и 50-летию запуска в ЛВЭ ОИЯИ синхрофазотрона на энергию $E_p = 10$ ГэВ.

Несколько ранее, 5-го марта 2007 года, в ФИАН состоялась сессия Научных Советов 3-х институтов - ФИАН, ИЯИ РАН, ЛВЭ ОИЯИ - посвященная 100-летию со дня рождения В.И.Векслера. На сессии были представлены доклады А.Н. Лебедева, Б.Н. Долбилкина, В.А. Никитина и А.Д. Коваленко, в которых было рассказано о деятельности В.И. Векслера в ФИАН и в ЛВЭ ОИЯИ, о принципе автофазировки, но ничего не было сказано о деятельности В.И. Векслера в период с 1949-го по 1959 годы в ФИАН, в созданной им Эталонной лаборатории, и о физических исследованиях на только что запущенном им синхротроне с энергией $E_e = 250$ МэВ. Таким образом, часть жизни В.И.Векслера с 1949 по 1959 годы,

весьма существенная для развития физики электромагнитных взаимодействий и физики фотомезонных процессов в России, освещена не была.

Сразу же после сессии Научных Советов в ФИАН я попытался восполнить этот пробел в программе прошедшей сессии и написал свои впечатления о том времени и о роли В.И.Векслера в развитии исследований по физике электромагнитных взаимодействий и мезон-ядерной физики на 250 – МэВ- ном ускорителе ФИАН, и конечно же о тех работах, в которых я был непосредственным участником или которые выполнялись другими сотрудниками “на моих глазах” Эти впечатления о жизни В.И.Векслера за период с 1949 по 1959 годы были опубликованы вскоре в виде Препринта ФИАН N 17 (2007).[1].

Через короткое время мне по работе привелось быть в Дубне, в ЛВЭ ОИЯИ, где я встретился с А.И. Малаховым, директором ЛВЭ ОИЯ (в то время). Я подарил ему мой препринт ФИАН (N 17, 2007 г), рассказал о состоявшейся сессии 3-х Научных Советов, посвященной 100-летию со дня рождения В.И. Векслера и посетовал на то, что на сессии не было доклада о деятельности В.И. Векслера в чрезвычайно важный период становления физики электромагнитных взаимодействий в нашей стране, когда В.И. Векслер был инициатором и руководителем этих исследований. А.И. Малахов, выслушав меня, сообщил, что готовится сессия ЛВЭ ОИЯИ, посвященная В.И.Векслеру, и предложил мне сделать доклад на этой сессии о деятельности В.И. Векслера в период 1949 -1959 годов. Я сразу же согласился подготовить такое сообщение.

Предложение А.И. Малахова давало мне возможность обрисовать научную деятельность Владимира Иосифовича за период с 1949-го по 1959-й годы до окончательного перехода его на работу в Дубну, где в это время был уже запущен синхрофазотрон на 10 ГэВ.

Мне представилась возможность рассказать о физических работах, а также о тех исследованиях, которые велись в то время в Эталонной лаборатории ФИАН на 250- МэВ-ном синхротроне. Я ничего не собирался говорить о физических исследованиях на ускорителях с энергией 30 МэВ и 600 МэВ, которые также выполнялись в ФИАН в это время, и программа этих исследований также формировалась Владимиром Иосифовичем, поскольку я в этих исследованиях не участвовал и мало о них знал.

Нужно сказать, что период 1949-1959 лет. был “золотым” периодом физики фотомезонных процессов. Синхротрон ФИАН на 250 МэВ был единственным в Европе и в России ускорителем в этой области энергий, и все работы, проводившиеся на γ - пучке в то время, были по сути дела либо пионерскими работами, либо ведущимися одновременно с работами на 300-МэВ-ном ускорителе в Беркли (США). Наблюдалось некоторое соревнование в получении результатов по основным направлениям исследований на этих двух единственных тогда в мире ускорителях и, зачастую, благодаря энергии Владимир Иосифовича, мы оказывались впереди. Следует сказать, что в этот период мы активно общались с американскими физиками, которые довольно часто посещали ФИАН.

В настоящей работе кроме рассказа о деятельности Владимира Иосифовича я постараюсь рассказать о том коллективе и о тех участниках этих работ, без которых, я уверен, не удалось бы получить те результаты, о которых будет рассказано ниже. Я полностью сознаю, что мои заметки носят субъективный характер, поэтому хочу сразу извиниться перед теми участниками работ 1949-1959 лет и в последующие годы, о которых я либо ничего не сказал, либо написал недостаточно полно.

В настоящих заметках я буду частично использовать материал моего препринта ФИАН N 17 (2007), изданного сразу после сессии 3-х Научных Советов в ФИАН.

План изложения содержит следующие разделы :

1. Краткий исторический очерк развития Отдела физики высоких энергий (ОФВЭ) ФИАН.
2. Этапы деятельности В.И. Векслера в ФИАН.
3. Физические исследования на 250 МэВ-ном синхротроне ФИАН:
 - первое наблюдение π - мезонов в эксперименте на ускорителе,
 - фоторождение π^0 , π^+ , π^- -мезонов на нуклонах и ядрах,
 - комптон-эффект на протоне для $E_\gamma < 150$ МэВ и $E_\gamma > 150$ МэВ,
 - поляризуемость протона,
 - фоторасщепление дейтрона,
 - фоторасщепление ядер ^3He и ^4He ,
 - деятельность по атомному проекту:
 - фоторасщепление тяжелых ядер (в том числе ядер урана),
 - фотонейтроны из тяжелых ядер (и урановых соединений).

4. Конференции по мезон - ядерной физике, физике высоких энергий и физике частиц, где рассказывалось о результатах, полученных в ФИАН:
 - 1956 г. (ФИАН, Москва),
 - 1956 г. (Женева),
 - 1959 г. (Киев),
 - 1967 г. (итоговая конференция ФИАН, Дубна).
5. В.И. Векслер и развитие Лаборатории физики фотомезонных процессов (ЛФМП) в ФИАН (г. Троицк).
6. Заключение.

Основной акцент в изложении будет сделан на пункты 3 и 4, где будет рассказано о конкретных работах с оценкой их места в мировой литературе того времени, В план включен также пункт 5, где говорится о достижениях, полученных в экспериментах на синхротроне ФИАН с энергией $E_e = 850$ МэВ. Этот пункт прямо связан с теми традициями в физических исследованиях, которые были заложены В.И Векслером в период 1949-1959 лет его работы в Эталонной лаборатории ФИАН.

1. Краткий исторический очерк развития физики в ФИАН

Отметим основные этапы развития фотоядерной физики в ФИАН, начиная со времени появления в ФИАН В.И. Векслера.

- 1936 год - зачисление В.И. Векслера в штат ФИАН;
- 1944 год - предложение В.И. Векслером принципа автофазировки, позволившего ускорять частицы до высоких релятивистских энергий (сотни МэВ и выше) с использованием переменного магнитного поля.
Здесь следует упомянуть Е.Л.Фейнберга, предложившего В.И. Векслеру уравнение фазовой устойчивости ускоряемых частиц., а также Э.Макмиллана (США), разработавшего независимо аналогичный принцип автофазировки, но позже В.И. Векслера (более подробно об этом ниже);
- 1946 год –создание В.И Векслером ЭТАЛОННОЙ лаборатории;
- 1949 - 1962 гг- разработка и создание синхротронов С-3,С-25, С-60 на энергии электронов 30, 250. 600 МэВ и проведение на них исследований по ядерной физике, мезон-ядерной физике и

физике высоких энергий. Во всех этих исследованиях их инициатором и руководителем был В.И.Векслер;

- 50-е и 60-е годы - ФИАН становится одним из ведущих Центров в мире по электромагнитным исследованиям в физике частиц и ядер.

Параллельно с ФИАН ядерно-физическими исследованиями занимались в Беркли (США) на 300-МэВ-ном ускорителе электронов.

В Европе в это время еще никаких ускорителей не было.

Основные направления исследований на 250 МэВ-ном синхротроне ФИАН:

- фотореакции на ядрах,
- фоторождение π - мезонов на нуклонах и ядрах,
- фоторасщепление дейтрона,
- фоторасщепление малонуклонных ядер ^3He и ^4He ,
- фотоделение средних и тяжелых ядер (в том числе ядер урана),
- комптон-эффект на протоне,
- поляризуемость протона;
- 1967 г. - начало строительства синхротрона С-25Р в г. Троицке;
- 1980 г. - запуск синхротрона С25Р “ПАХРА” на энергию $E_e = 1300$ МэВ (рабочая энергия - 850 МэВ);
- 1984 г. - образование ОФВЭ (Отдела физики высоких энергий) ФИАН;
- 1980–2010 гг-исследования по электромагнитным взаимодействиям и мезонной физике на синхротроне С-25Р ФИАН:
 - парциальные сечения фоторождения π -мезонов на ядрах (Be, C),
 - комптон-эффект на π - мезоне,
 - поляризуемость π - мезона,
 - фоторождение η - мезонов на нуклонах и ядрах,
 - **ОБНАРУЖЕНИЕ** и исследование η - мезонных ядер.

2. Этапы деятельности В.И.Векслера в ФИАН

Можно выделить следующие этапы деятельности В.И. Векслера в ФИАН, начиная со времени его прихода на работу в ФИАН до времени его перехода на работу в Дубну.

- **начало работы В.И.Векслера в ФИАН - 1936 год**

Владимир Иосифович Векслер был приглашен в ФИАН С.И. Вавиловым в 1936 году и поступил в докторантуру в отдел Д.В. Скобельцына. В довоенные годы Владимир Иосифович принимал активное участие в космическо-биологических экспедициях на Эльбрусе. В 1940 году он защитил докторскую диссертацию под названием "Тяжелые частицы в космических лучах". В военные годы ФИАН находился в Казани, и Владимир Иосифович работал (до 1944 года) по оборонной тематике.

- **участие в космических исследованиях на Памире (1944-1947 годы)**

В 1944 году возобновились экспедиции по космическим лучам. Местом экспедиций был выбран Памир. Владимир Иосифович организовал и был руководителем первой экспедиции по космическим лучам на Памире. В эти годы он обдумывал проблему ускорения заряженных частиц до высоких энергий - десятки и сотни МэВ. Можно предположить, что его опыт исследований в космических лучах диктовал ему необходимость разработки метода получения управляемых по энергии и интенсивности источника частиц высоких энергий, и таким методом мог быть метод получения потока частиц на ускорителях.



Владимир Иосифович Векслер
организатор и руководитель первой
экспедиции по космическим лучам
на Памире (1944 г.)

• **первая публикация по автофазировке - 1944 год**

Легенда рассказывает, и это подтвердил Е.Л. Фейнберг в своем телеинтервью в 2005 году в передаче “ Властелины колец“, что однажды Евгений Львович увидел стоящего в задумчивости (что было необычно) в коридоре ФИАН Владимира Иосифовича и спросил его, что случилось? Владимир Иосифович рассказал Евгению Львовичу о своей идее ускорения частиц в переменном магнитном поле и о задаче синхронизации обращения частицы в таком поле. Е.Л.Фейнберг сразу заметил, что необходимо решить уравнение фазовой устойчивости, чтобы убедиться в том, что пучок частиц не рассыпается. На это Владимир Иосифович ответил, что он в этом не сомневается. И далее сказал, что если Евгений Львович хочет, то пусть напишет уравнение устойчивости по фазе. На этом разговор закончился, но Евгения Львовича уже тогда поразила и восхитила необычайная интуиция Владимира Иосифовича, Через некоторое время Евгений Львович принес Владимиру Иосифовичу фазовое уравнение устойчивости, показывающее, что действительно пучок частиц не рассыпается и сохраняется при ускорении в переменном магнитном поле. Уравнение явилось обоснованием предложенного Владимиром Иосифовичем метода автофазировки.



Евгений Львович ФЕЙНБЕРГ (1912 - 2006 гг.) – академик РАН, выдающийся физик-теоретик, известный своими работами в ядерной физике, физике частиц и космических лучей.

Е.Л. Фейнберг внес существенный вклад в обоснование принципа автофазировки, предложив В.И. Векслеру уравнение фазовой устойчивости пучка ускоряемых частиц в переменном магнитном поле.

В первых 2-х публикациях по автофазировке [2,3] не было упомянуто о вкладе Е.Л. Фейнберга в решении проблемы автофази-

ровки, и лишь в 3-ей публикации Владимир Иосифович написал слова благодарности Евгению Львовичу:

The author expresses his appreciation to E. Feinberg for detailed discussions and for helpful suggestions” (J. of Physics v IX, p. 153, 1945)[4]

. Эта благодарность несколько разрядила напряженность, которая возникла вокруг Владимира Иосифовича после его первых 2-х публикаций без ссылки на участие Евгения Львовича в обосновании принципа автофазировки.

Что касается Э.Макмиллана, то он в письме В.И. Векслеру написал, что он не знал о статье В.И. Векслера [4], занимался проблемой ускорения частиц в переменном магнитном поле самостоятельно и что он признает приоритет В.И. Векслера в решении этой проблемы.

Следует отметить, что В.И. Векслер и Э. Макмиллан были выдвинуты на Нобелевскую премию, но награждение не состоялось из-за того, что В.И. Векслер не представил в Нобелевский комитет необходимую информацию о своей работе (по причине существовавшей тогда в России обстановки секретности). Спустя несколько лет В.И.Векслер и Э. Макмиллан были удостоены престижной премии США “Атом для мира“.



В.И. Векслер и Э. Макмиллан на конференции по физике высоких энергий в г.Дубне (1963 год)

Жизнь Владимира Иосифовича в 40-е годы делилась, можно сказать, на 2 этапа: в летнее время осуществлялись космические экспедиции на Памире, а в зимнее время Владимир Иосифович активно занимался своей идеей автофазировки. С.И. Вавилов активно содействовал Владимиру Иосифовичу в этих занятиях. Когда Владимир Иосифович рассказал С.И.Вавилову идею автофазировки, С.И.Вавилов отправил Владимира Иосифовича в отпуск с настойчивым пожеланием, чтобы Владимир Иосифович написал все то, над чем он размышляет в виде статьи. Так появилась первая работа Владимира Иосифовича [2], которая была представлена в ДАН академиком Н.Д. Папалекси, а затем. вторая статья [3]. представленная в ДАН уже С.И.Вавиловым.

Курьезный случай по поводу оценки работ Владимира Иосифовича произошел на Ученом Совете ФИАН. После опубликования работ по автофазировке в Ученый Совет ФИАН поступило предложение отметить премией работу Владимира Иосифовича. Однако, Ученый Совет не смог оценить идею Владимира Иосифовича по ускорению релятивистских частиц (настолько она была необычна и не соответствовала существующим представлениям) и принял решение отложить этот вопрос подождать и пока премию не присуждать. Через некоторое время Владимир Иосифович получил Государственную премию 1-ой степени за разработку принципа ускорения релятивистских частиц.

- **создание ЭТАЛОННОЙ лаборатории - 1946 год**

С.И. Вавилов был инициатором создания отдельной лаборатории во главе с Владимиром Иосифовичем для реализации его идеи создания ускорителя релятивистских частиц. Лаборатория была названа ЭТАЛОННОЙ. В состав лаборатории тогда входили П.А.Черенков, Н.А.Добротин, А.Н. Горбунов, Н.Б. Делоне, Е.И. Тамм. , Э. Горжевская и ряд других сотрудников, работавших с Владимиром Иосифовичем в космических экспедициях (в основном).

- **участие в атомном проекте**

Работы по ускорителям по предложению С.И. Вавилова были включены в “атомный “ проект и находились в ведении Министерства среднего машиностроения. Это обеспечивало необходимое финанси-

рование, быстрое формирование кадрами в основном из первых послевоенных выпусков физ. фака МГУ. МИФИ. Физ Теха (1950- 1954 гг) и активное снабжение необходимыми материалами и оборудованием, в том числе и заграничным. Мне запомнился случай такого оперативного решения вопроса о приобретении 2-х лучевого осциллографа фирмы “Cossor“. Нам для настройки аппаратуры по временным совпадениям понадобился 2-х лучевой осциллограф, и мы сказали об этом Владимиру Иосифовичу. Он попросил дать марку осциллографа, пригласил нас в свой кабинет, снял телефонную трубку, позвонил в отдел снабжения Министерства среднего машиностроения и сказал :

- Говорит Векслер. Мне для работы необходим 2-х лучевой осциллограф фирмы “Cossor”.

Назвал марку осциллографа и положил трубку. Через неделю у нас был 2-х лучевой осциллограф. Так что вопросы снабжения решались быстро, и мы не имели задержек и затруднений по этому поводу.

- **создание синхротрона на энергию $E_e = 250$ МэВ**

ФИАН тогда (конец 40-х гг.) располагался на Миусской площади (практически центр Москвы) и строительство 250 МэВ-ного синхротрона здесь было невозможно. Для Эталонной лаборатории вскоре был отведен участок земли на юго-западе Москвы, у Калужской заставы, рядом с питомником роз биологического института АН. Там был выстроен 2-х этажный корпус. В подвальном помещении этого здания начал сооружаться синхротрон на 250 МэВ (С-25), а само место получило название “Питомник“, которое стало полуофициальным названием лаборатории и используется по сию пору. Синхротрон был построен в рекордно короткие сроки (1947-1949), и уже в 1949 году на γ -пучке этого ускорителя стали проводиться эксперименты по фотомезонной физике.

- **физические исследования на 250 МэВ-ном синхротроне**

Подробный рассказ о физических исследованиях на синхротроне с энергией $E_e = 250$ МэВ будет сделан позднее, в 3-ей главе.

- **переход В.И. Векслера на работу в Дубну, ОИЯИ (1959 г.) и разделение Эталонной лаборатории на 5 отдельных самостоятельных лабораторий**

В 1957 году в Дубне, в ОИЯИ был запущен синхрофазотрон с энергией пучка ускоренных протонов $E_p = 10$ ГэВ, с самой большой энергией в мире в те годы. Начиная с 1955 г. Владимир Иосифович все чаще и все на большие сроки уезжал в Дубну по делам, связанным со строительством и запуском синхрофазотрона, оставляя Эталонную лабораторию на попечительство М.С. Рабиновича. А в 1959 году Владимир Иосифович окончательно покинул ФИАН и перешел на работу в Дубну, в ОИЯИ, где была создана электрофизическая лаборатория АН (ЭФЛ АН) под его руководством. После перехода Владимира Иосифовича в Дубну Эталонная лаборатория ФИАН была разделена на 5 лабораторий:

- лаборатория ядерных реакций (руководитель Л.Е. Лазарева) с установкой - 30 МэВ –ным синхротроном,
- лаборатория фотомезонных процессов (руководитель П.А. Черенков) с установкой 250 МэВ –ным синхротроном,
- лаборатория электронов высоких энергий (руководитель В.А. Петухов) с синхротроном на энергию 600 МэВ,
- лаборатория физики плазмы (руководитель М.С. Рабинович),
- лаборатория физики ускорителей (руководитель А.А. Коломенский).

В составе Эталонной лаборатории в то время находился В.И. Гольданский. Он не имел “своей установки” и был вынужден покинуть ФИАН, проработав в нем почти 7 лет (1953 - 1959 гг.)

3. Исследования по мезон-ядерной физике на 250 МэВ-ном синхротроне ФИАН

В этом разделе в основном будет рассказано о физических исследованиях на 250 МэВ-ном синхротроне ФИАН за период, начиная с момента запуска синхротрона (1949 год) и по время перехода Владимира Иосифовича на работу в Дубну (1959 год). После перехода Владимира Иосифовича окончательно в Дубну и раздела Эталонной лаборатории работы на 250 МэВ синхротроне, естественно, продолжались, и о них также будет кратко рассказано.

Это был самый плодотворный период развития фотомезонной физики в ФИАН и в России, и в этом несомненная заслуга В.И.Векслера.

- **Основным направлением в физических исследованиях на новом синхротроне с энергией 250 МэВ стало исследование процессов фоторождения π -мезонов на нуклонах и ядрах**

Участие Владимира Иосифовича в экспериментах по космическим лучам на Эльбрусе, а в послевоенное время - на Памире, позволило ему выделить исследование процессов фоторождения π -мезонов на нуклонах и ядрах из других направлений взаимодействия γ -квантов с веществом. После обнаружения π -мезонов в космических лучах (Д. Оккиалини – 1947 г.) исследование характеристик взаимодействия π -мезонов с элементарными частицами и ядрами в экспериментах на ускорителях явилось одной из фундаментальных задач физики частиц.

Первые эксперименты по обнаружению π -мезонов на 250 МэВ-ном синхротроне проводились с помощью ядерных фотоэмульсий, и уже в 1950 году были получены первые результаты группой в составе А.П. Комара, В.Г. Ларионовой и В.М. Лихачева [5]. В работе [5] фотоэмульсии использовались как детекторы и располагались под несколькими углами вокруг мишени. Мезоны идентифицировались по удельной ионизации в ядерной эмульсии.

В следующей работе [6] использовались ядерные эмульсии, которые были предварительно некоторое время выдержаны в тяжелой воде (D_2O) и, таким образом, кроме ядер углерода и серебра содержали еще ядра дейтерия. Эмульсии располагались непосредственно в γ -пучке так, чтобы γ -пучок проходил вдоль плоскости эмульсии.

В таких эмульсиях были наблюдаемы случаи рождения π -мезонов на ядрах дейтерия в реакции



причем все 3 частицы были заряженными, и их треки четко выделялись в эмульсии. Эти результаты были получены группой, которой руководил М.И. Адамович и в составе которой активно работали В.Г. Ларионова и С.П. Харламов.

Марат Иванович Адамович, (1930-2002), доктор физ.мат. наук, работал в ФИАН с 1952 года, физик – экспериментатор, руководитель группы ядерных фотоэмульсий, участник работ по экспериментальному исследованию процесса фоторождения пионов на водороде и ядрах на 250 МэВ-ном синхротроне ФИАН.



Сергей Петрович Харламов, (1924). кандидат физ.мат. наук, физик- экспериментатор, участник экспериментальных работ по фоторождению пионов на водороде и ядрах на 250 МэВ-ном синхротроне ФИАН и Нуклотроне ОИЯИ с использованием ядерных фотоэмульсий.

Достоинством ядерных эмульсий было то, что даже по одному снимку можно было выделить конкретный процесс. Однако для получения статистически достоверных результатов по угловым и энергетическим распределениям продуктов реакции и по дифференциальным сечениям процесса требовалось большое количество часов работы на ускорителе и большое время на обработку снимков камеры. Именно поэтому были приняты усилия по разработке электронных методов регистрации продуктов реакции с использованием газовых пропорциональных счетчиков и сцинтилляционных детекторов.

- **Фоторождение π^0 , π^- , π^+ мезонов на водороде**

Систематическое исследование фоторождения π^0 , π^- , π^+ - мезонов на водороде стало возможным после разработки металлической криогенной водородной мишени, что было реализовано Л.И. Словохотовым. До этого использовалась пенопластовая мишень в виде стакана с двойными стенками, с “рубашкой” из жидкого азота, заливаемого в промежуток между стенками. Эта мишень была очень проста в изготовлении, но была очень не экономичной в эксплуа-

тации, т.к. водород в ней достаточно быстро испарялся, и время ее “жизни” измерялось несколькими часами. Металлическая криогенная мишень позволяла работать без дополнительного залива водорода несколько суток.

Леонид Иванович Словохотов, (1930-1990). физик-экспериментатор, участник работы по экспериментальному исследованию процесса фоторождения мезонов на водороде и ядрах, разработал и создал криогенную водородную мишень для работ на 250- МэВ синхротроне.



С помощью криогенной водородной мишени и были получены основные результаты по фундаментальному процессу фоторождения π - мезонов на водороде [9]. Эти работы оказались в ряду первых работ, совпавших по времени с аналогичными исследованиями, проводившимися в США на 300 МэВ-ном электронном ускорителе в Беркли.

Фоторождением π - мезонов занимались сразу несколько групп Эталонной лаборатории: группа А.С. Белоусова - Е.И. Тамма, группа В.В. Павловской и группа Б.Б. Говоркова. Исследования проводились на водороде и ядрах, различной методикой, в разных диапазонах по углам и энергиям.

Анатолий Семенович Белоусов (1926), доктор физ.-мат. наук, работает в ФИАН с 1950 года, физик-экспериментатор, руководитель работ по экспериментальному изучению фоторождения мезонов на водороде и ядрах на 250 и 850 МэВ синхротронах ФИАН сцинтилляционной методикой, руководитель экспериментальных работ на ер-коллайдере (г. Гамбург, ДЕЗИ).



• Комптон- эффект на протоне

Эта тема была предложена В.И. Гольданским. Он появился в Эталонной лаборатории в 1953 году.

Виталий Иосифович Гольданский (1923-2001), академик АН СССР, лауреат Ленинской премии, работал в ФИАН с 1953 по 1959 год, руководил экспериментальными исследованиями комптон-эффекта на протоне и фоторождением пионов на 250-МэВном синхротроне ФИАН.



Реакция упругого рассеяния γ - квантов на протоне

$$\gamma + p \rightarrow \gamma + p \quad (2)$$

рассматривалась как тестовая реакция для проверки наших представлений о структуре протона как точечной частицы с единичным электрическим зарядом e_p и магнитным моментом μ_p , окруженной облаком π -мезонов. Поляризация мезонного облака должна была приводить к появлению таких новых характеристик как электрическая и магнитная поляризуемости протона, определяемые коэффициентами α и β , соответственно (более подробно о поляризуемости будет сказано позже)

Эксперимент по изучению реакции (2) проводился в 2-х энергетических областях по энергии γ - кванта: для $E_\gamma < 150$ МэВ и для $E_\gamma > 150$ МэВ. Это разделение было связано с фоновыми условиями. Для энергетического диапазона $E_\gamma > 150$ МэВ упругий процесс (2) необходимо было выделять на фоне процесса рождения π^0 - мезонов

$$\gamma + p \rightarrow p + \pi^0 \rightarrow p + \gamma_1 + \gamma_2, \quad (3)$$

в котором распад π^0 -мезона на два γ -кванта создавал громадный фоновый счет, поскольку сечение процесса (3) было на 2 порядка больше сечения процесса (2).

Выделение процесса (2) на фоне процесса (3) представлялось довольно сложной методической задачей по сравнению с условиями

выделения процесса (2) в области $E_\gamma < 150$ МэВ, где процесс (3) отсутствовал.

В диапазоне энергий $E_\gamma < 150$ МэВ процесс упругого рассеяния γ – квантов на протоне выделялся путем регистрации только рассеянного γ – кванта. Регистрация γ -кванта осуществлялась сцинтилляционным детектором, в котором осуществлялось поглощение γ - кванта в результате процесса $\gamma \rightarrow e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$. Для увеличения вероятности регистрации γ детектором осуществлялась регистрация только одного вторичного γ - кванта.

Этот эксперимент был проведен В.И. Гольданским и группой Б.Б. Говоркова. Было получено угловое распределение рассеянных γ – квантов для $E_\gamma = 140$ МэВ и эти результаты оказались в числе первых работ в то время [8]. Из угловых распределений процесса упругого рассеяния γ – квантов были получены оценки поляризуемостей протона α_p и β_p .

Борис Борисович Говорков, (1928), доктор физ.мат. наук, работает в ФИАН с 1952 года, вместе с В.И. Гольданским участвовал в работах по экспериментальному исследованию Комптон-эффекта на протоне и фоторождению пионов на водороде и ядрах на 250 МэВ – ном синхротроне ФИАН, а также в работе по определению поляризуемости протона.



Сложнее обстояло дело с измерениями сечения Комптон - эффекта в области $E_\gamma > 150$ МэВ, где, как уже было сказано выше, существовал сильный фоновый процесс фоторождения π^0 - мезонов и использовать методику регистрации только одного вторичного γ - кванта было недостаточно. Для выделения процесса (2) необходимо было реализовать регистрацию обеих частиц, возникающих в конечном состоянии процесса (2), т.е. и протона p , и рассеянного γ – кванта. Однако регистрация обеих частиц еще не гарантировала успешного выделения процесса (2), поскольку существовал фоновый процесс с сечением на 2 порядка больше сечения процесса (2). Необходимо было выбрать такие условия регистрации, при которых случаи, возникающие от фонового процесса (3), вообще бы не регистрировались.. И такие условия регистрации были най-

дены ! Они опирались на кинематические особенности процессов (2) и (3). Согласно кинематике процессов (2) и (3) для конкретного значения E_γ энергия (а следовательно и пробег R) протона для Комpton - эффекта всегда больше энергии (и соответственно, пробега R) из процесса фоторождения π^0 – мезонов, т.е.

$$E_p (\gamma + p \rightarrow \gamma + p) > E_p (\gamma p \rightarrow p + \pi^0) \quad (4)$$

при одной и той же энергии падающего γ - кванта. Энергии рассеянного протона (и соответственно пробеги) оказывались равными, когда энергия фотона в реакции (3) превышала энергию фотона в реакции (2) на некоторое ΔE_γ . Таким образом, если осуществлять регистрацию процесса (2) в интервале этого ΔE_γ , то процесс (3) не должен регистрироваться. В то время еще не была реализована система “мечения“ γ -квантов по энергии, которая в настоящее время существует практически на каждом ускорителе электронов. Поэтому эксперимент проводился при нескольких значениях максимальной энергии тормозного спектра $E_{\gamma \max}$, которые отличались на величину ΔE_γ , определяемую из кинематики процессов (2) и (3). Для устранения из регистрации случаев, связанных с процессом (3), перед протонным телескопом устанавливался фильтр Δx_i , величина которого рассчитывалась из кинематических условий регистрации процесса (3) при данной энергии $E_{\gamma \max}$:

$$\Delta x_i = R_p (\gamma p \rightarrow \pi^0 p) \quad (5)$$

Так, последовательно проводя измерения при различных значениях $E_{\gamma \max (i)}$ и устанавливая соответствующий (рассчитанный по кинематике) фильтр перед протонным телескопом Δx_i , были измерены энергетическая и угловая зависимости выходов процесса упругого рассеяния γ -квантов на протоне в области энергий $E_\gamma > 150$ МэВ.

Для регистрации протонов использовался телескоп из 3-х газовых пропорциональных счетчиков, а рассеянные γ - кванты регистрировались сцинтилляционным детектором. Были получены дифференциальные сечения по углу вылета γ -квантов при двух энергиях первичных γ – квантов . Этот эксперимент был осуществлен в конце 50-х и в начале 60-х годов и был одним из первых экспериментов того времени. Эксперимент был выполнен группой в составе П.С. Баранова, Л.И. Словохотова, Г.А. Сокола и Л.Н. Штаркова (физики) при участии Ю.П. Янулиса, Т.Солоненко (радиоинженеры) и ряда других сотрудников (студентов и дипломников).

Гарри Арсентьевич Сокол, (1928), доктор физ. мат. наук, работает в ФИАН с 1951 года, физик-экспериментатор, участник работ по изучению Комптон-эффекта на протоне на 250 МэВ-ном синхротроне ФИАН, руководитель работ по обнаружению и исследованию эта(η)-мезонных ядер на 850 МэВ синхротроне ФИАН в г.Троицк.



Найденный метод выделения $\gamma p \rightarrow \gamma p$ - процесса на фоне $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$ - процесса, состоящий в использовании интервала ΔE_γ на конце спектра тормозного излучения, оказался очень эффективным по устранению фоновых отсчетов, но трудоемким, т.к. приходилось работать с относительно небольшим темпом счета, связанным с малой величиной ΔE_γ и соответственно малым числом γ - квантов в этом интервале в конце спектра тормозного излучения. В последующие годы, когда была разработана методика получения меченых по энергии γ - квантов, возникла возможность проведения измерений без настройки ускорителя по $E_{\gamma \text{ max}}$, сразу во всем энергетическом диапазоне γ - квантов, но с устранением фонового счета от $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$ - процесса электронным способом.

Как отмечалось выше, тема исследования Комптон - эффекта на протоне была предложена В.И. Гольданским, но эксперимент выполнялся уже после ухода В.И. Гольданского из Эталонной лаборатории. В.И.Векслер поддержал работу по Комптон -эффекту, но и он ко времени получения экспериментальных результатов уже перешел на работу в Дубну. Фактическим руководителем этой классической работы был Павел Сергеевич Баранов. Материалы этой экспериментальной работы легли в основу кандидатской (Г.А. Сокол) и докторской (П.С. Баранов) диссертаций, причем в докторской диссертации были определены значения электрической и магнитной поляризуемости протона.

Павел Сергеевич Баранов, (1928 – 2007) доктор физ.мат. наук, работал в ФИАН с 1951 года, физик-экспериментатор, руководитель работ по экспериментальному исследованию Комптон-эффекта на протоне и определению поляризуемости протона на 250 МэВ-ном синхротроне ФИАН. а также по фоторождению пионов на водороде и ядрах, участник экспериментальных работ на коллайдерах (DEZI – Германия и BNL – Брукхейвен, США)



- **поляризуемость протона**

Параллельно с экспериментом по Комптон - эффекту была создана теория комптон - эффекта (Л.В. Фильков) и была разработана методика выделения из экспериментальных данных значений электрической и магнитной поляризуемости протона. В этой большой работе принимали участие А.М. Балдин, В.А. Петрунькин, В.И. Гольданский, Л.В. Фильков, А.И. Львов - как теоретики, а также П.С. Баранов, Б.Б. Говорков и Л.Н. Штарков как экспериментаторы. Эти данные по поляризуемости протона оказались в числе первых данных в то время и были приведены в публикации “Particle Data”.

Александр Михайлович Балдин (1926-2001), академик АН СССР, лауреат Ленинской премии и премии РАН им.

В.И.Векслера, работал в ФИАН с 1951 года, создатель сверхпроводящего ускорителя Нуклотрон (ОИЯИ), специалист в области теоретической физики, физики элементарных частиц, физики ускорителей.



В последующие годы измерения поляризуемости и методика извлечения значений α и β поляризуемостей из экспериментальных данных проводились во многих работах, и эта деятельность продолжается до настоящего времени.

Виктор Алексеевич Петрунькин, (1931), кандидат физ.мат. наук, работает в ФИАН с 1958 года, физик-теоретик, участник работ на 250 МэВ-ном синхротроне ФИАН по исследованию Комpton-эффекта на протоне и получении сведений о поляризуемости протона.



- фоторасщепление дейтрона

Реакция фоторасщепления дейтрона



наилегчайшего ядра, состоящего только из 2-х нуклонов (протона и нейтрона) и обладающего энергией связи всего $E_{\text{св}} = 2.2$ МэВ, была первоначально исследована в области энергий γ - квантов до $E_{\gamma} = 17$ МэВ при использовании радиоактивных источников излучения. С появлением ускорителей частиц возникла возможность осуществления измерений при больших энергиях, а для 250 МэВ - ного синхротрона ожидалось проявление влияния мезонной структуры во взаимодействии нуклонов. Таким образом, процесс фоторасщепления дейтрона явился вторым (после Комpton-эффекта) фундаментальным процессом, в котором могла проявиться особенность сильного взаимодействия, обусловленного мезонными эффектами. Эксперимент проводился группой в составе: Н.Б. Делоне (руководитель группы). Л.И. Словохотова, Г.А. Сокола, Л.Н. Штаркова, Т. Кузнецовой, Ю.П. Янулиса. Т. Солоненко и ряда дипломников в первые годы (50-е) работы 250 МэВ - ного синхротрона [13]. Для идентификации процесса $\gamma d \rightarrow p n$ использовалась методика регистрации и измерения энергии протонов с помощью телескопа газовых пропорциональных счетчиков. В качестве мишени d использовалась тяжелая вода D_2O , а для учета вклада в регистрацию протонов из кислорода использовалась мишень, наполненная обычной водой H_2O . Результаты, полученные с H_2O мишенью, после нормировки на поток γ - квантов, вычитались из данных, полученных с D_2O - мишенью. При этой процедуре путем точного взвешивания мишеней обеспечивалось равное количество ядер O в мишенях.

Полученные данные по энергетическому ходу сечения в области энергий $E_\gamma > 100$ МэВ уже демонстрировали влияние мезонного вклада : сечение начинало расти по сравнению с рассчитанной величиной без учета вклада мезонов.

По результатам этой работы Л.Н. Штарковым была защищена кандидатская диссертация.



Лоллий Николаевич Штарков, (1926).
кандидат физ.мат. наук, работает в
ФИАН с 1948 года, участник
космофизических экспедиций, физик –
экспериментатор, участник физических
исследований на 250 и 850 МэВ
синхротронах ФИАН и получении
сведений о поляризуемости протона.

Теория мезонного вклада в процесс фоторасщепления дейтрона развивалась в работах М.А Маркова и А.М Балдина.

Моисей Александрович Марков (1908-1994),
академик АН СССР, дважды Герой Социалистического труда, работал в ФИАН с 1934 года, зав. теоретическим отделом Эталонной лаборатории ФИАН, основные работы в области квантовой механики, физики элементарных частиц, космологии.

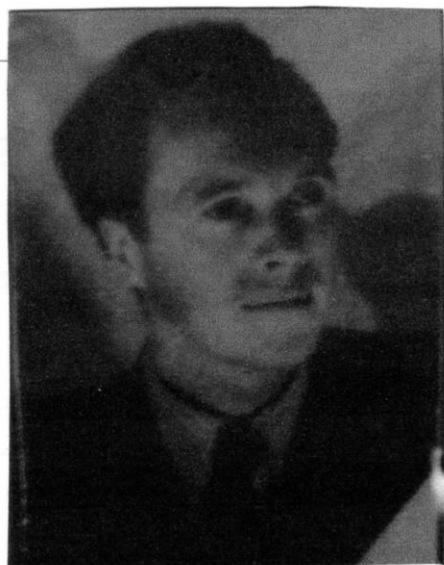


- **фоторасщепление ядер ^3He и ^4He**

Исследование процесса фоторасщепления ядер ^3He и ^4He явилось другим фундаментальным процессом, направленным на изучение влияния мезонного вклада на сечение реакции, а также на оценку влияния нуклонного резонанса Δ_{33} в этом процессе. Хотя

максимальная энергия γ -квантов $E_{\gamma \text{ max}} = 250$ МэВ не позволяла получить экспериментальные данные для всего интервала энергий, соответствующих возбуждению Δ_{33} -резонанса ($\Delta E \approx (150 \div 400)$ МэВ), однако, влияние первой части Δ_{33} -резонанса уже можно было наблюдать.

Эксперимент проводился с использованием методики камеры Вильсона (группа А.Н. Горбунова).



Андрей Николаевич Горбунов, 1921-2003), доктор физ.мат.наук, лауреат Государственной премии, работал в ФИАН с 1944 года, участник Памирских экспедиций, много лет вел экспериментальные исследования по расщеплению легких ядер на 250 МэВ-ном ускорителе ФИАН, используя камеру Вильсона.

Для этой цели была построена специальная пристройка к зданию, где располагался синхротрон, удаленная на ≈ 30 метров от синхротрона и расположенная по оси γ -пучка. В этой пристройке располагалась камера Вильсона диаметром $d = 1$ м. Камера наполнялась ^3He , либо ^4He . Пучок γ -квантов проходил по диаметру камеры и был сильно коллимирован (до диаметра $d_{\gamma} = 1$ мм) и интенсивность γ -пучка подбиралась такой, чтобы за каждый импульс синхротрона в камере создавался только один случай взаимодействия γ -кванта с ядром. Таким образом, в момент срабатывания камеры возникала картина однократного взаимодействия γ -кванта с ядром гелия.

Как уже отмечалось выше, получение объемной картины процесса фоторасщепления ядра гелия давало чрезвычайно ценную и точно интерпретируемую информацию о процессе. Было обработано достаточное для статистики число снимков, позволившее получить угловые и энергетические распределения продуктов распада ядер гелия и оценить вероятности (сечения) различных типов распределений [14]. Данные оказались первыми в мировой литера-

туре и чрезвычайно ценными и полными по вариантам расщепления. Это была пионерская работа, и последующие исследования фоторасщепления ядер гелия, проведенные в более широкой области энергий γ -квантов (синхротрон в Токио с $E_{\gamma \text{ max}} = 1300 \text{ МэВ}$) и использовавшие электронную методику регистрации, лишь подтвердили данные, полученные на синхротроне С-25.

По материалам этой работы А.Н. Горбунов защитил докторскую диссертацию.

- **исследования на γ – пучке в русле “атомного проекта”**

Исследования в русле “атомного проекта” составили значительную долю работ, проводимых на γ – пучке 250 – МэВ - ного синхротрона. Среди таких работ отметим следующие работы.

фотоделение тяжелых ядер. в том числе ядер урана

Эти исследования проводились И.В. Чувило с помощью методики ионизационной камеры, которая помещалась в γ - пучок и была наполнена газовой смесью, содержавшей тяжелые ядра и урановые соединения. В камере возникал ионизационный ток за счет фотоэлектронов и фотонуклонов из ядер газовой смеси. В случае, когда происходил акт деления, возникал одиночный сигнал, амплитуда которого была пропорциональна суммарной энергии ядер-осколков, возникающих при делении ядра. На материале этой работы И.В. Чувило в 1951 году защитил кандидатскую диссертацию “Энергетическая зависимость дифференциальных сечений деления γ - лучами некоторых изотопов тяжелых элементов”.

Иван Васильевич Чувило, (1924-2001), доктор физ.мат. наук, крупный организатор науки, работал в ФИАН с 1948 года, затем, в ЛВЭ ОИЯИ заместителем В.И. Векслера по науке, участник Памирских экспедиций, с 1968 года был директором ИТЭФ. Основные работы в области ядерной физики, фотоделения урановых соединений, методики эксперимента.



Второй работой была работа:

**изучение выходов нейтронов из тяжелых ядер при
облучении γ - квантами и протонами**

Измерения с γ -квантами осуществлялись на синхротроне ФИАН С-25, а измерения с пучком протонов проводились в ЛВЭ ОИЯИ (Дубна) на нуклотроне. Эта работа осуществлялась В.И. Гольданским. Использовалась методика измерения γ - активности специального раствора, возникающей после захвата нейтронов [11,12]. В последующем эта методика использовалась П.С. Барановым в экспериментах на синхротроне С-25 по фоторасщеплению дейтерия. Особенностью методики было то, что измерение γ - выходов по активности раствора проводилось после облучения, вне γ – пучка, т.е. в условиях без фона. Однако эта методика не давала информации по зависимости выхода нейтронов от энергии γ - квантов.

На этом можно завершить качественное описание тех физических направлений исследований, которые проводились на 250-МэВ-ном синхротроне под руководством В.И. Векслера.

В Приложении будут приведены некоторые конкретные результаты отмеченных выше работ

4. Конференции по мезон-ядерной физике, физике высоких энергий и физике частиц

В ряде Всесоюзных и Международных конференций по физике высоких энергий и физике частиц, которые проходили в 50-е годы в нашей стране и в Европе, активное участие принимали и физики Эталонной лаборатории ФИАН. Отметим некоторые из таких конференций.

1 Всесоюзная конференция по физике частиц высоких энергий (Москва, ФИАН. 1956 г)

На этой конференции среди многочисленных докладов были представлены следующие сообщения, связанные с исследованиями на 250 МэВ-ном синхротроне:

- Н.Б. Делоне, Л.И. Словохотов, Г.А. Сокол, Л.Н. Штарков
“Фоторасщепление дейтрона γ - квантами с энергиями от 40 до 140 МэВ”
- М.И. Адамович, В.И. Векслер, Г.В. Кузмичева, В.Г. Ларионова, С.П. Харламов
Фоторождение π - мезонов на дейтерии”
- Б.Б. Говорков, В.И. Гольданский, Г.А.Карпухин, А.В. Куценко, В.В. Павловская.
“Наблюдение рассеяния γ - квантов с энергией до 140 МэВ на протонах”

Международная конференция по ускорителям высоких энергий и пионной физике.

**“Symposium on high-energy accelerators and pion physics”
CERN, Geneva, 11- 23 June/ 1956.**

От ФИАН на конференции были представлены доклады :

- A.S. Belousov, V.M. Popova, N.G. Semashko, E.V. Shitov, E.I.Tamm, V.I. Veksler and E.V. Yagudina
“Photoproduction of pions from complex nuclei.”
- A.M. Baldin
“On the theory of photoproduction of mesons on bound nucleons”.
- M.I. Adamovich, V.I. Veksler, G.I.. Kuzmicheva, V.G. Larionova, S.P. Kharlamov.
“ Photoproduction of negative π – mesons on deuterium “.

9-я Международная конференция по физике высоких энергий, Киев, июнь, 1959 г.

На конференции, среди других докладов, были представлены доклады по тематике исследований, проводимых на синхротроне С-25 в ФИАН, а также на синхрофазотроне в ЛВЭ. Дубна.

- В.И. Векслер
“Анализ нуклон-нуклонного и пион – нуклонного взаимодействий при энергиях от 1,5 до 10 ГэВ”
- Г. Бернардини (обзорный доклад)
Фоторождение π - мезонов и Комптон-эффект на протоне”

В этом обзорном докладе Г. Бернардини более 50 % составили результаты, полученные в ФИАН на 250 МэВ-ном синхротроне.

4. Итоговая конференция по физическим работам, проведенным на 250 – МэВ-ном синхротроне в ФИАН

Конференция была проведена в 1969 году в Дубне [13]. К сожалению Владимира Иосифовича Векслера уже не было в живых, и конференция прошла без его участия, но в его память. Эта конференция явилась неким завершением необычайно активного периода деятельности молодых физиков Эталонной лаборатории (а с 1959 года - фотомезонной лаборатории) под руководством В.И. Векслера.

В последующие годы основная деятельность по физике электромагнитных взаимодействий и мезон - ядерной физике была сосредоточена по двум направлениям:

- выездные работы для участия в исследованиях на ускорителях в Серпухове и в Дубне, а также в зарубежных ядерных центрах (Бонн, Гамбург, Майнц)
- подготовка к исследованиям в области энергий γ - квантов до 1 ГэВ на строящемся в г. Троицке синхротроне ФИАН “ПАХРА” с энергией 1,3 ГэВ.

О результатах деятельности коллектива физиков, воспитанных В.И.Векслером, на 1,3 ГэВ-ном синхротроне будет подробно рассказано в следующем параграфе.

5. В.И.Векслер и развитие ЛФМП в ФИАН (после перехода В.И.Векслера в Дубну)

В 1959 году Владимир Иосифович перешел окончательно на работу в Дубну, в созданную им лабораторию высоких энергий (ЛВЭ), где уже заработал синхрофазотрон - ускоритель протонов с энергией $E_p = 10$ ГэВ. В то время это был крупнейший ускоритель в мире, и его создание явилось триумфом ускорительной физики в нашей стране, триумфом развитого В.И. Векслером принципа автофазировки.

В ФИАН продолжали работать синхротроны с максимальной энергией электронов $E_e = 30$ МэВ (лаборатория Л.Е. Лазаревой), с $E_e = 250$ МэВ (лаборатория фотомезонных процессов – ЛФМП - во главе с П.А. Черенковым) и синхротрон с $E_e = 600$ МэВ (лаборатория В.А. Петухова).

В ЛФМП к этому времени был подготовлен проект создания синхротрона на энергию $E_e = 1300$ МэВ. Энергия синхротрона была выбрана, исходя из бывших на то время представлений в области физики частиц и мезонов, состоящих в том, что в области до $E \sim 1$ ГэВ сосредоточены в основном все мезоны и нуклонные резонансы, такие как η и K - мезоны, Δ_{33} - резонанс. Сейчас мы знаем, что шкала мезонов и нуклонных резонансов простирается, с учетом странных, чармированных и бьюти кварков, до ~ 10 ГэВ, но в начале 60-х синхротрон с энергией $E_e = 1$ ГэВ представлял возможность изучать гиперядра и, как показали последующие события, η – мезонные ядра.

На фото представлен 1300 МэВ электронный синхротрон ФИАН “ПАХРА в г. Троицке

Параметры	(1990 г.)	(2015 ? г.)“
$E_e(\text{max})$ МэВ	850	1300
$I_e(\text{max})$ эл/с	10^{12}	$5 \cdot 10^{12}$
f гц	50	50
$\Delta \tau_{\gamma \text{ пучок}}$ мс	2	3



Разработку и строительство 1,3 ГэВ - ного синхротрона активно поддерживал Владимир Иосифович. Было принято решение строить новый ускоритель вне Москвы, поскольку возле ФИАН уже не было свободного участка земли без жилых строений. ФИАН удалось арендовать большой земельный участок (60 га) на окраине г. Троицка (тогда – поселка на 42 км по Калужскому шоссе), где и началось сооружение ускорителя.

Руководителем проекта стал П.А. Черенков, к тому времени он уже был лауреатом Нобелевской премии (по экспериментальному исследованию излучения электронов, движущихся в различных средах) и академиком АН СССР. Организатором всех работ по созданию ускорительного комплекса “ПАХРА” был Е.И. Тамм.

Евгений Игоревич Тамм (1926-2008), доктор физ.-мат. наук, работал в ФИАН с 1943 года, физик-экспериментатор, участник работ по экспериментальному исследованию процессов фоторождения мезонов на водороде и ядрах, руководитель работ по созданию синхротрона ФИАН на энергию 1300 МэВ (г. Троицк).



Со временем в первоначальный проект по созданию синхротрона были внесены дополнительные пункты о создании вычислительного центра (Л.И. Словохотов) и просмотрового центра для анализа снимков с пузырьковых камер (А.Н. Горбунов). К середине 1970-х годов на фиановской площадке в г. Троицке были построены 2 корпуса, соединенные галереей, в одном из которых был размещен синхротрон и пультовые физиков, а в другом - просмотровый и вычислительный центры, конференц-зал (амфитеатр), служебные помещения и кабинеты для сотрудников. Этот комплекс был удостоен 2-ой премии Совета Министров СССР по архитектуре производственных помещений

Таким образом, в г. Троицке к середине 1970-х годов был создан современный центр для проведения фундаментальных исследований в области физики частиц и мезон -ядерной физики с помо-

щью γ -квантов с энергией $E_\gamma \sim 1$ ГэВ. В Европе в то время существовал электронный ускоритель в г. Бонн на энергию $E_e \sim 2$ ГэВ и ускоритель – микротрон с энергией $E_e = 180$ МэВ в г. Майнц. Ускоритель в Бонне обладал малой интенсивностью и со временем к нему был пристроен накопитель.

Можно сказать, что период 1959-1965 гг. был периодом завершения исследовательских работ на 250 МэВ-ном синхротроне, а период 1965-1972 гг. был временем перебазирования лаборатории в г. Троицк и запуска синхротрона на энергию $E_e = 1.3$ ГэВ. Следует сразу сказать, что из-за недостатка в мощности электроподстанции ускоритель вначале работал при энергии ~ 500 МэВ. В это время создавались экспериментальные установки, осуществлялись выводы γ -пучка и пучка синхротронного излучения в оба экспериментальных зала. В это же время формировалась программа физических исследований на γ -пучке. Одним из пунктов программы было намечено исследование фоторождения гиперядер (Г.А.Сокол, В.Н.Фетисов). Энергия $E_e = 1,3$ ГэВ позволяла осуществить такого рода эксперимент, но к сожалению, эти планы не были реализованы, т.к. на синхротроне не удалось реализовать режим с $E_e = 1,3$ ГэВ. Практически все эти годы и по сегодняшний день максимальной энергией была и есть энергия $E_e = 850$ МэВ. Но и эта энергия позволила значительно продвинуться в исследованиях по мезон-ядерной физике по сравнению с тем, что было возможно реализовать на синхротроне с $E_e = 250$ МэВ.

Строительство ускорительного центра в г. Троицке, вне Москвы, имело значительное преимущество по сравнению с тем, что могло быть в случае создания центра в Москве. В г. Троицке происходило интенсивное строительство жилого комплекса АН СССР, и ЛФМП за несколько лет существования в г. Троицке была укомплектована кадрами всех необходимых специальностей - физики, радиоинженеры, вычислители, программисты, криогенщики, работники мех. мастерских и обслуживающий персонал - чтобы можно было проводить самостоятельные работы с точки зрения технического обслуживания, не обращаясь в соответствующие службы ФИАН. Численность ЛФМП в лучшие годы доходила до 250 человек (сейчас - всего 80). Следует отметить, что большая часть физиков, около 20 – 25 человек, была занята на выездных работах и практически не принимала участия в исследованиях на синхротроне, так что число всех физиков и инженеров, проводивших эксперименты

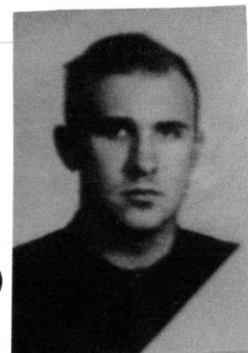
на синхротроне составляло 20-25 человек. Этого оказалось достаточно для осуществления программы исследований на новом ускорителе с энергией $E_e = 850$ МэВ в г. Троицке.

Тематика исследований на синхротроне “ПАХРА” содержала следующие пункты (здесь не указаны работы, проводившиеся на пучке синхротронного излучения - а их было достаточно много, и некоторые из них носили пионерский характер; указаны лишь направления, связанные с физикой частиц и мезон - ядерной физикой):

- фоторождение π - мезонов на водороде и ядрах,
- поляризуемость π - мезона,
- парциальные сечения фоторождения π - мезонов на ядрах,
- фоторождение η - мезонов на ядрах,
- обнаружение и исследование η – мезонных ядер.

Каждое из перечисленных направлений исследования сопровождалось теоретическими расчетами и оценками, проводимыми теоретиками ЛФМП: А.И. Лебедевым - рук. группы, Л.В.Фильковым, В.А. Петрунькиным, А.И.Львовым. В.Н.Фетисовым.

Андрей Иванович Лебедев, (1935), доктор физ.мат. наук, работает в ФИАН с 1957 года, физик-теоретик, руководитель теор.группы ЛФМП ФИАН, теоретически обосновал экспериментальные исследования по фоторождению мезонов на 250 и 850 МэВ синхротронах, и вместе с В.А. Трясучевым - возможность образования $\eta(\pi)$ - мезонных ядер при фоторождении η - мезонов на ядрах.



Выше было отмечено, что намеченные экспериментальные исследования по гиперядрам не были проведены из-за недостаточной энергии для рождения гиперядер. Однако теоретические исследования, проводимые В.Н. Фетисовым, развивались успешно и имели значительный резонанс в общеевропейских теоретических исследованиях по этому направлению.

Ниже даны краткие характеристики полученных экспериментальных данных по отмеченным направлениям.

1. Фоторождение π - мезонов на водороде

Эксперименты по фоторождению π -мезонов на водороде проводились с использованием жидко – водородной криогенной металлической мишени группой физиков во главе с П.С. Барановым. Применялась сцинтилляционная методика регистрации и полученные результаты были на уровне европейских данных.

2. Поляризуемость π - мезона

Это была пионерская работа. Она осуществлялась группой П.С. Баранова при активном участии в ней В.Г. Раевского и Л.В. Филькова. Основой исследования явилась так называемая диаграмма “пятихвостка”, когда падающий γ – квант рассеивался на π - мезоне из мезонной “шубы” протона, и регистрировались все 3 частицы в конечном состоянии: γ - квант, π^+ - мезон и нейтрон. Эксперимент проводился с использованием водородной криогенной мишени.

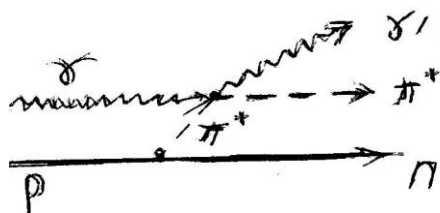


Рис. Схема Комптона-эффекта на π^+ -мезоне

В эксперименте была получена оценка величины электрической поляризуемости π - мезона

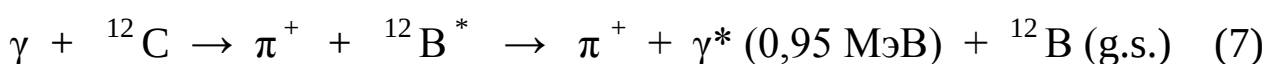
$$\alpha_{\pi} \approx 20 \pm 12 \text{ (в единицах } 10^{-43} \text{ см}^2 \text{)}$$

Ошибка связана как со статистическими ошибками, так и с процедурой выделения значения поляризуемости α_{π} из полученных угловых распределений продуктов реакции

По материалам этой работы В.Г. Раевский защитил кандидатскую диссертацию

3. Парциальные реакции фоторождения π -мезонов на ядрах

Исследовалась реакция фоторождения π - мезонов на ядре ^{12}C с регистрацией π –мезона и γ - кванта с энергией $E_{\gamma} = 0,95 \text{ МэВ}$, испускаемым конечным возбужденным ядром $^{12}\text{B}^*$:



Это так называемые парциальные реакции, когда в конечном состоянии возникают 2 частицы, в нашем случае π^+ мезон и возбужденное ядро $^{12}\text{B}^*$. Данные по таким парциальным реакциям могут быть использованы как для анализа мультипольных переходов, так и для определения вероятности поляризации остаточного ядра [15]. Для реализации этого исследования использовались телескоп сцинтилляционных детекторов (для регистрации π^+ - мезонов) и полупроводниковые германиевые Ge γ - детекторы для регистрации γ - квантов с энергией 0,95 МэВ для идентификации остаточного возбужденного ядра $^{12}\text{B}^*$. Эксперимент проводился группой Г.А. Сокола при активном участии в нем В.Л. Кашеварова и Е.В. Ржанова. Оба они по материалам этой работы защитили кандидатские диссертации.

Второй парциальной реакцией фоторождения π - мезонов на ядрах была реакция рождения π^0 - мезонов на ядрах лития ^6Li . Использовалась сцинтилляционная методика. Работа велась группой А.С. Белоусова с активным участием Я. Ваздика, который защитил кандидатскую диссертацию по материалам этой работы.

4. Фоторождение η - мезонов на ядрах

Фоторождение η - мезонов на ядрах также исследовалось на синхротроне "ПАХРА" с применением 2-х сцинтилляционных спектрометров для регистрации γ - квантов от распада η - мезона. (мода распада $\eta \rightarrow 2\gamma$ составляет $\sim 40\%$ от всей вероятности распада). В эксперименте были зафиксированы η - мезоны, однако точных количественных данных получено не было в связи с малым количеством часов работы ускорителя, которые были выделены для этих измерений. Работа проводилась группой А.С. Белоусова - Е. Малиновского.

5. Обнаружение и исследование эта (η) - мезонных ядер

Эта тема возникла в середине 80- годов. В 1986 году появилась теоретическая работа американских физиков Лью и Хайдера [18], в которой обосновывалась возможность существования ядерно-связанного состояния η - мезона в ядре, т.е. рассматривалась возможность существования эта (η) – мезонных ядер. Авторы про-

вели расчет энергии связи η - мезона в ряде атомных ядер, и было показано, что для $A > 11$ возможно связанное состояние η - мезона и ядра. В расчетах использовалось значение длины рассеяния (амплитуды рассеяния при нулевой энергии) $\alpha_{\eta N}$ равное :

$$\alpha_{\eta N} = 0,25 + i \cdot 0,27 \text{ fm} \quad (8)$$

Положительное значение реальной части амплитуды рассеяния $\text{Re } \alpha_{\eta N} > 0$ означало, что в s- состоянии между η – мезоном и нуклоном возникает ядерное притяжение, и возможно связанное состояние.

В этой же работе Лью и Хайдер предложили эксперимент по поиску эта(η) –мезонных ядер с использованием π^+ - пучка Брукхейвенской лаборатории (BNL). Через 2 года в 1988 году эксперимент был проведен и дал отрицательный результат : ни для какого ядра -мишени (Be, C, Al, Cu) эта- мезонных ядер обнаружено не было [19]. После этого отрицательного результата попытки экспериментального обнаружения эта- мезонных ядер не предпринимались в течение почти 10 лет.

Следует отметить, что заключение об отрицательном результате, как показал анализ BNL –эксперимента в [21], было ошибочным. Эксперимент просто “не удался”, т.к в эксперименте регистрировалась только одна частица - протон, и ожидаемый пик протонов не был выделен из-за очень большого фона. Тем не менее этот “отрицательный” результат привел к почти 10- летнему периоду, когда никаких попыток экспериментального обнаружения эта - мезонных ядер не делалось.

Тем не менее теоретические работы по эта - мезонным ядрам в этот период продолжались. В 1991 году появилась теоретическая работа А.И. Лебедева и В.А. Трясучева [20], в которой рассматривалась возможность образования эта - мезонных ядер в реакции фоторождения. В работе использовалось то же значение $\alpha_{\eta N}$, что и в работе [18]. Было рассчитано сечение образования эта-ядер на ядрах ^{12}C и ^{16}O для энергий γ - квантов от 650 до 1300 МэВ. Величина сечения оказалась в пределах от 1.0 до 0,5 μb . Сечение имело резонансный характер по энергии E_γ с максимумом при $E_\gamma = 800$ МэВ. Эта работа стимулировала проведение эксперимента в ФИАН по поиску эта - мезонных ядер на γ - пучке.

В работе [21] была проанализирована возможность реализации поиска эта- мезонных ядер на синхротроне “ПАХРА”, используя оценки сечения, полученные Лебедевым и Трясучевым в [20]. Ока-

залось, что несмотря на то, что сечение фоторождения эта- ядер по теоретическим оценкам значительно меньше рассчитанного сечения образования эта-ядер с использованием π^+ - мезонных пучков, интенсивность γ - пучка на два порядка может превышать существующую интенсивность π^+ - пучка и тем самым выход эта-ядер может быть достаточным для экспериментального обнаружения. Кроме того, использование γ - пучка с энергиями фотонов в интервале $\Delta E_\gamma = 600 \div 850$ МэВ оказывается благоприятным, т.к. этот интервал энергий соответствует области образования $S_{11}(1535)$ - резонанса, распад которого на ηN -пару ($\sim 50\%$) будет являться источником η – мезонов в ядре. Эти соображения и явились основой для проведения эксперимента по поиску эта - мезонных ядер на синхротроне “ПАХРА” [21].

Для осуществления эксперимента оказался существенным метод идентификации эта - мезонных ядер. В работе Г.А. Сокола и В.А. Трясучева [21] была рассмотрена временная последовательность существования эта - мезонных ядер, начиная от момента образования эта - ядра, его эволюцию и распад. Предполагалось, что процесс образования эта-ядра, его эволюция и распад осуществляются по следующему сценарию. Первоначально γ - квант при взаимодействии с нуклоном ядра образует $S_{11}(1535)$ - резонанс, который распадается на пару ηN :



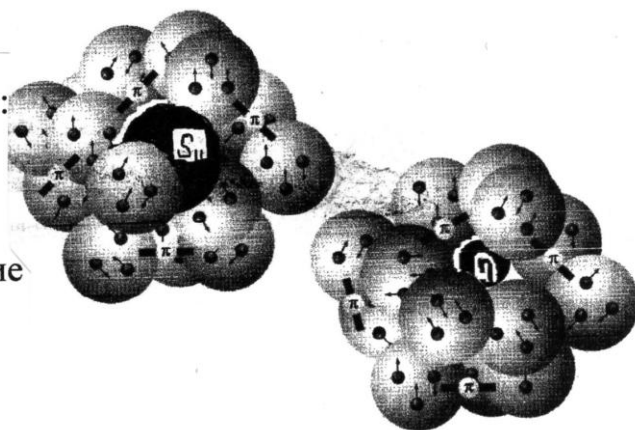
Если S_{11} распадается на πN пару (50%), то эта- ядро не образуется. Далее необходимо предположить, что для возникающей в ядре ηN - пары кинематика разлета окажется благоприятной для образования эта - мезонного ядра. Это происходит в том случае, когда нуклон N вылетает из ядра под малым углом вперед (по отношению к направлению γ - пучка), унося почти всю кинетическую энергию ηN – пары и оставляя тем самым η -мезон в ядре с малой кинетической энергией T_η . Для образования эта-ядра важно значение энергии T_η . Образование эта - ядра возможно при значениях T_η , при которых реальная часть амплитуды ηN – взаимодействия будет оставаться положительной т.е. $\text{Re } f_{\eta N} > 0$. По оценкам работы [22] этому условию соответствуют значения кинетической энергии η -мезона $T_\eta \leq 70$ МэВ. Это условие означает, что в случае образования в ядре ηN – пары (в результате распада S_{11} - резонанса) существует достаточно значительная доля всех возникающих в ядре η -мезонов, которые могут привести к образованию

эта - мезонного ядра, ядра, в котором кроме нуклонов будет находиться и η - мезон. Этот возникающий в ядре η - мезон с кинетической энергией в интервале $\Delta T_{\eta} = (0 \div 70)$ МэВ в результате своего движения в ядре испытывает соударения с нуклонами ядра, теряет свою кинетическую энергию и увеличивает тем самым вероятность образования S_{11} - резонанса: $\eta + N \rightarrow S_{11}$. Заметим, что часть η - мезонов при своем перемещении внутри ядра могут покинуть ядро, если ядерное ηN - взаимодействие еще невелико, и столкновение с нуклоном происходит на поверхности ядра. В случае образования S_{11} - резонанса в результате рассеяния η - мезона на нуклонах ядра возникает дилемма для S_{11} - резонанса: либо S_{11} распадается на πN - пару и, тем самым процесс закончится т.к., как правило, обе частицы вылетают из ядра, либо произойдет распад на ηN - пару (вероятности распада по πN и ηN - каналам примерно одинаковы и составляют $\sim 50\%$) и "жизнь" эта-мезонного ядра продолжится. Таким образом, может реализоваться последовательность во времени из нескольких процессов ηN - взаимодействия, которая обязательно должна закончиться распадом на πN - пару.

$$\eta N \rightarrow S_{11} \rightarrow \eta N \rightarrow \dots \rightarrow S_{11} \rightarrow \pi N \quad (10)$$

На рис. 3 представлены 2 состояния ядра : с S_{11} - резонансом и с η - мезоном внутри ядра. Эти 2 состояния характеризуются "временем жизни" $\tau_{1/2} \sim 10^{-23}$ сек. При реализации нескольких $\eta N \rightarrow S_{11}$ и $S_{11} \rightarrow \eta N$ переходов время жизни такого эта - ядра может достигать значения $\tau_{1/2} \sim 10^{-22}$ сек, что почти на два порядка превышает так называемое "ядерное время" - время пролета релятивистской частицы через ядро.

Два состояния эта(η) - мезонного ядра :
 1) с η - мезоном в ядре (справа)
 2) с $S_{11}(1535)$ нуклонным резонансом
 Оба состояния переходят друг в друга за время $\Delta\tau = 0.8 \cdot 10^{-23}$ сек. вследствие процесса $\eta N \rightarrow S_{11} \rightarrow \eta N$



В.И. Ритус назвал такую систему “ядерным резонатором”, который колеблется около своих ηN и S_{11} - состояний [23]. Однако, этот “ядерный резонатор” обладает плохой добротностью, т. к. испытывает ограниченное число колебаний (переходов $\eta N \leftrightarrow S_{11}$) и быстро распадается.

В соответствии с (6) конечным состоянием эта - мезонного ядра является его распад на πN - пару. Поскольку S_{11} - резонанс в ядре имеет небольшую кинетическую энергию (на уровне энергии Ферми), то происходит распад практически покоящегося в ядре резонанса. Распад обладает изотропией по углам разлета πN - пары, а энергии π - мезона и нуклона N составляют в среднем значения : $\langle T_{\pi} \rangle \approx 300$ МэВ, $\langle T_N \rangle \approx 100$ МэВ. На основе вышеописанной картины “жизни” и “смерти” эта- мезонного ядра и был выбран метод идентификации эта - ядра : регистрировалась πN - пара, разлетающаяся под $\langle \theta_{\pi N} \rangle \approx 180^\circ$, и определялись их кинетические энергии. Спектр таких пар в случае образования эта - ядер должен иметь резонансный характер и располагаться в области S_{11} - резонанса.

Следует отметить существенное различие в методе идентификации эта - ядер в работе [21] и в работах BNL [19] и Лос-Аламос [24], проведенных на π^+ - пучке. В работе [19] предполагалось использовать π^+ - мезоны с энергией, соответствующей условию безотдачной кинематике для η - мезона, т.е. предполагалось, что кинетическая энергия η - мезона $T_{\eta} = 0$. Энергия π - мезона рассчитывалась для элементарного процесса



При этом, если p' вылетал под $\theta_{p'} \approx 0^\circ$, то он уносил практически всю избыточную кинетическую энергию процесса (7) после рождения η - мезона, и η - мезон оставался в ядре с очень малой энергией. В эксперименте [19] регистрация протонов p' происходила под углом $\theta_{p'} = 15^\circ$, а энергия налетающих π^+ - мезонов превышала энергию, соответствующую энергии безотдачной кинематики. По этим причинам кинетическая энергия η - мезона могла составлять значительную величину. Однако главным допущением в этой методике было предположение, что условие (7) будет выполняться и для случая рождения η - мезона на нуклоне ядра, т.е. в реакции

$$\pi^+ + A \rightarrow \eta + p' + (A-1) \quad (12)$$

Тем самым, не учитывалось ферми распределение нуклонов в ядре, не учитывалось, что реакция типа (8) происходит на движущемся

нуклоне. Оценки показывают, что из-за ферми движения должно происходить существенное размытие пика протонов, регистрируемого под $\theta_{p'} = 15^\circ$. По-видимому, отсутствие узкого кинематического пика протонов p' , ожидаемого в реакции (8), произошло из-за размытия спектра ферми-движением, и такой размытый спектр оказалось трудно выделить на фоне больших флуктуаций регистрируемого спектра протонов. Здесь сказалась обычная трудность выделения одиночных событий от реакции с малым сечением на громадном фоне прочих процессов.

Отметим еще раз основное различие в методах идентификации эта-ядер в работах [19] и [24], когда использовался π^+ - пучок (BNL, Los Alamos), и в работе [21] (ФИАН), когда использовался γ пучок.

В первом случае (π^+ - пучок) рассматривалась 1-я стадия образования эта – ядра: образование η – мезона, и предполагалась регистрация одиночных протонов p' .

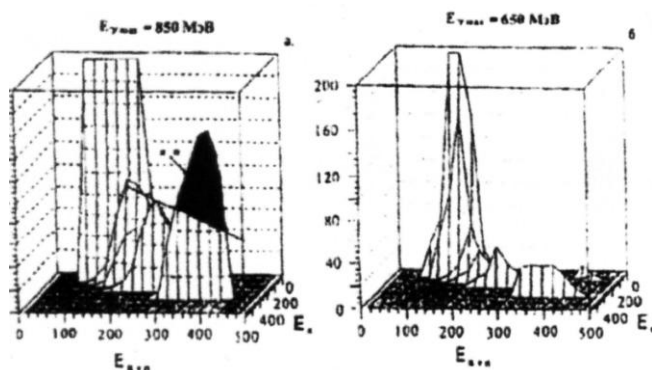
Во втором случае (γ – пучок) идентификация эта-ядра проводилась в стадии распада эта - ядра, регистрируя πN -пару из цепочки

$$\eta N \leftrightarrow S_{11} \rightarrow \pi N, \quad (13)$$

что значительно уменьшало влияние фона при регистрации событий.

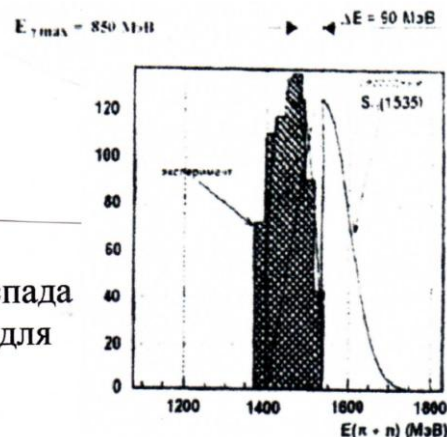
Эксперимент по поиску эта - ядер на синхротроне “ПАХРА” проводился при 2-х энергиях $E_{\gamma \text{ макс.}}$ конца спектра тормозного излучения: 650 и 850 МэВ, т.е. до порога фоторождения η - мезонов ($E_{\gamma \text{ порог}} = 707$ МэВ) и выше порога. Кроме того использовались 2 позиции по геометрии расположения π^+ и N спектрометров: позиция при $\langle \theta_{\pi N} \rangle = 180^\circ$, которая соответствовала разлету πN -пары при распаде покоящегося S_{11} - резонанса и позиция с $\langle \theta_{\pi N} \rangle = 100^\circ$, которая соответствовала кинематике фоторождения πN - пары, когда не происходило рождение η -мезона. Эта позиция была фоновой для распада S_{11} – резонанса.

Комбинируя условие по углу разлета πN – пары и энергии конца спектра тормозного излучения, была получена четкая резонансная картина возникновения спектра πN - пар при $E_{\gamma \text{ макс.}} = 850$ МэВ и при $\langle \theta_{\pi N} \rangle = 180^\circ$ и отсутствие резонансной структуры для $E_{\gamma \text{ макс.}} = 650$ МэВ.



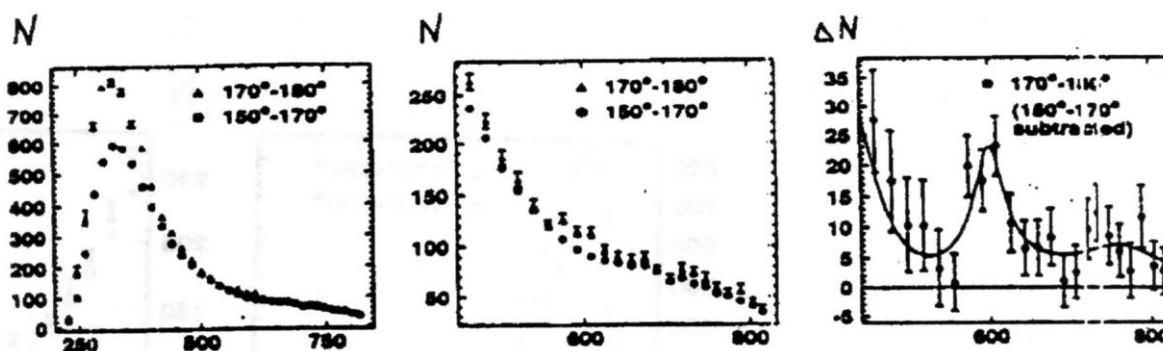
Двумерное распределение по суммарной кинетической энергии (π^+ , n) пары, $T(\pi^+)$, и кинетической энергии π^+ -мезона. $T(\pi^+)$ для двух энергий $E_{\gamma \max}$ конца спектра тормозного излучения 850 и 650 МэВ.

Экспериментальное распределение по суммарной полной энергии (π^+ , n) пары, $E(\pi^+, n)$, продуктов распада $S_{11}(1525)$ резонанса внутри ядра и распределение для распада свободного $S_{11}(1535)$ – резонанса



Энергетический спектр по суммарной энергии πN – пары оказался сдвинутым влево на $\Delta E = (90 \pm 15)$ МэВ по отношению к положению максимума для спектра распада свободного S_{11} - резонанса. Таким образом, этот эксперимент завершился с положительным результатом: было показано существование эта - мезонных ядер и получена оценка энергии связи S_{11} – резонанса в ядре. Этот результат был получен в 1999 году и был первым результатом в мировой литературе [25] По материалам этого эксперимента Г.А. Сокол защитил докторскую диссертацию “Обнаружение и исследование эта(η) – мезонных ядер. “

Лишь в 2003 году в Майнце на ускорителе MAMI-2 был получен аналогичный результат для ядра ${}^3_{\eta}\text{He}$ [26].



Функции возбуждения для $(\pi^0 p)$ -конечного состояния
 Реакции $\gamma + {}^4\text{He} \rightarrow {}^3\text{He} + n \rightarrow \pi^0 + p + X$
 (слева и в центре) и разность распределений (справа),
 аппроксимированная Брейт-Вигнеровской зависимостью

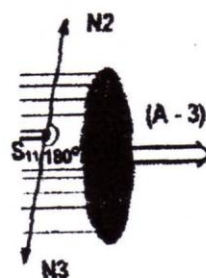
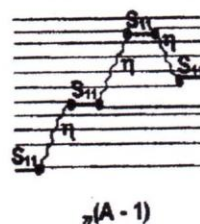
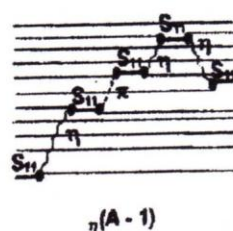
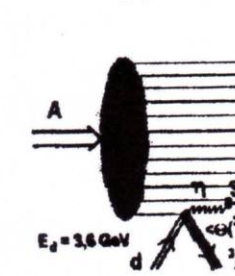
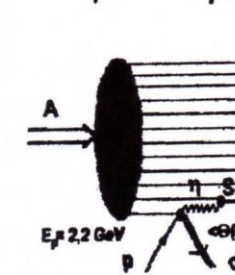
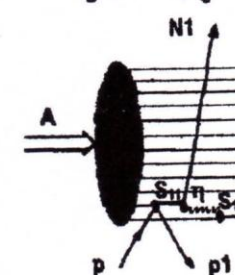
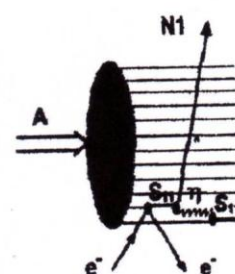
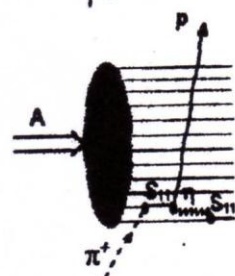
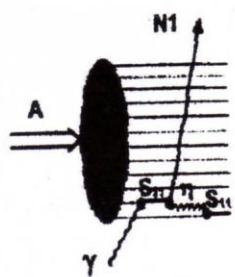
В настоящее время исследования эта-мезонных ядер и мезонных ядер, содержащих в своем составе другие мезоны (ρ -, ω -, ϕ -, K - и другие), проводятся или планируются практически на всех ускорителях Европы как с γ -пучками (Бонн, Майнц, Гренобль), так и с p - и d -пучками (Дармштадт, Юлих, Дубна). Заметим, что в Дубне, в ЛВЭ ОИЯИ на нуклотроне проводится совместная ЛФМП ФИАН-ЛВЭ ОИЯИ работа по обнаружению эта-мезонных ядер, и уже получен первый предварительный положительный результат в dA -реакции [27].

Таким образом, можно сказать, что ФИАН-новский результат 1999-2000 годов положил начало новому направлению в мезонно-ядерной физике - физике мезонных ядер, и это новое направление в настоящее время активно развивается.

Образование

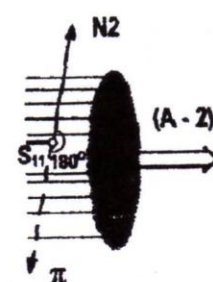
Эволюция

Распад



$$E(N2) = E(N3)$$

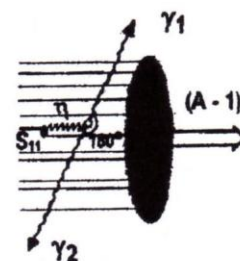
$$\Sigma \langle E_i \rangle \approx [600 - \Delta m(N^*) - \Delta m(S_{11}^*)] \text{ MeV}$$



$$\langle E(N) \rangle \sim 100 \text{ MeV}$$

$$\langle E(\pi) \rangle \sim 350 \text{ MeV}$$

$$\Sigma \langle E_i \rangle \approx [450 - \Delta m(S_{11}^*)] \text{ MeV}$$



$$\langle E_{\gamma 1} \rangle = \langle E_{\gamma 2} \rangle$$

$$\Sigma \langle E_i \rangle \approx [550 - \Delta m(\eta^*)] \text{ MeV}$$

Схема образования, эволюции и распада эта(η) мезонных ядер для входных γ-, π-, e⁻, p-, d- пучков

6. Заключение

Из приведенного материала следует, что роль Владимира Иосифовича Векслера в развитии физики электромагнитных взаимодействий и физики фоторождения мезонов в ФИАН в период 1949-1959 годов и его влияние на дальнейшее развитие физики высоких энергий в ЛФМП ФИАН (г. Троицк, создание синхротрона на энергию $E_e = 1300 \text{ МэВ}$) были определяющими.

Несколько заключительных замечаний о перспективах развития электромагнитных исследований в ближайшие годы в нашей стране.

Как известно, 1980-е годы XX- столетия ознаменовались созданием новых ускорительных центров в Европе (Бонн, Майнц, Гренобль) и в США (СЕБАФ). Это повлекло прекращение строительства новых ускорителей в России и развитие выездных работ в исследовательские центры Европы и США. В настоящее время возникли новые физические задачи, связанные с изучением сильных взаимодействий, кварковой хромодинамики (КХД) и нарушения киральной симметрии. Среди новых задач можно отметить:

- исследование влияния ядерной материи на характеристики (масса, время жизни) изоскалярных мезонов (η -, η' -, ϕ -, ρ)
- исследование η – мезонных ядер
- исследование нуклонных резонансов
- исследование нуклонных корреляций в ядрах.

В свете этих и других задач возникает необходимость создания в России нового ускорителя электронов на энергию $E_e = 2 \text{ ГэВ}$. Рассматривается возможность использования криогенных ВЧ-структур. Предполагается создание нового ускорителя осуществить на базе модернизации ускорительного комплекса ФИАН в г.Троицке с использованием существующей структуры помещений и технологических устройств.

Создание нового ускорителя послужит целям возрождения фундаментальных исследований по физике электромагнитных взаимодействий в России.

В соответствии с федеральной целевой научно-технической программой по развитию нанотехнологий модернизированный ускорительный комплекс ФИАН на основе нового ускорителя электронов на энергии 2 ГэВ может служить базой для исследования наномас-

териалов с применением непрерывных во времени и высокоинтенсивных пучков синхротронного излучения (световые пучки 4-го поколения), квазимонохроматических γ - квантов, полученных при столкновении пучка электронов с лазерным излучением (обратный Комптон-эффект), а также монохроматических электронов высокой интенсивности (до 10^{15} эл/сек)

Отделение ядерной физики и астрофизики (ОЯФА) ФИАН поддерживает предложение о создании ЦЕНТРА ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ на базе Института ядерных исследований ИЯИ РАН с его протонным и нейтронным пучками и Физического института им. П.Н.Лебедева РАН (г.Троицк), обладающего высокоинтенсивным пучком электронов и пучком синхротронного излучения синхротрона “ПАХРА” ($E_e = 850$ МэВ) и в перспективе новым ускорителем электронов на энергию $E_e = 2$ ГэВ.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность А.С. Белоусову, Б.Б. Говоркову, В.А. Петрунькину и С.П. Харламову за помощь в подборе материалов и за обсуждение представленного материала, Л.И.Горячевой и Л.Н. Павлюченко за помощь в оформлении текста.

Ссылки

- [1] Г.А. Сокол
Воспоминания о В.И. Векслере и о становлении физики электромагнитных взаимодействий и мезон- ядерной физики в ФИАН.
Препринт ФИАН N 17, (2007)
- [2] В.И. Векслер
Новый метод ускорения релятивистских частиц
Доклады АН СССР, т. 43 (8), стр. 346-348, (1944)
- [3] В.И. Векслер
О новом методе ускорения релятивистских частиц
Доклады АН СССР, т.44 (9), стр. 393-396, (1944) .
- [4] V.I. Veksler,

Concerning some new methods of acceleration of relativistic particles
J. of Physics p.153 (1945)

- [5] А.П. Комар, В.Г. Ларионова, В.И. Лихачев.
Искусственные мезоны, полученные с помощью ускорителя С-25
Отчет ФИАН, (1949)
- [6] М.И. Адамович, Г.В. Кузмичева, В.Г. Ларионова, С.П.Харламов
Фоторождение отрицательных π^- - мезонов на дейтерии.
. ДАН СССР т.102 N/ 4, (1955)
- [7] A.S. Belousov, A.V. Kucenko, E.I. Tamm
Photoproduction of π^0 - mesons from deuterium
Nuovo Cimento, v.3, N 1, p. 32-37 (1956)
- [8] Б.Б. Говорков, В.И. Гольданский, О.В. Карпухин, А.В. Куценко, В.В. Павловская
Упругое рассеяние квантов с энергией до 120 МэВ протонами
ДАН СССР, т.111, N/5, с.988 (1956)
- [9] V.I. Goldansky, B.B.Govorkov, R.G. Vasilkov
Photoproduction of neutral pions on hydrogen near the threshold
Nuclear Physics 12, N 4, p. 327-332, (1959)
- [10] Б.Б. Говорков, В.И. Гольданский, А.В. Куценко, В.В. Павловская, О.В. Карпухин
Зависимость сечений фоторождения π^0 - мезонов от массовых чисел ядер
. ДАН СССР т.112, N 1, с 37-40, (1957)
- [11] П.С. Баранов, В.И. Гольданский.
Выход и угловое распределение фотонейтронов высокой энергии
ЖЭТФ, т. 28, вып.6, с.746-748 (1955)

- [12] П.С. Баранов, В.И. Гольданский
Сцинтилляционный высокопороговый детектор нейтронов
ЖЭТФ т.33,вып.5,с.621-623 (1955)
- [13] Ю.А. Александров, Н.Б. Делоне, Л.И. Словохотов, Г.А. Сокол,
Л.Н. Штарков
Фоторасщепление дейтрона при энергиях от 50 до 150 МэВ
ЖЭТФ, т.33, вып. 3, с.614-620 (1957)
- [14] А.Н. Горбунов, В.М. Спиридонов
Фоторасщепление гелия
ЖЭТФ. Т.34. Вып.4, с.366-373 (1958)
- [15] Р.Г. Васильков, Б.Б. Говорков, В.И. Гольданский
Фоторождение нейтральных π – мезонов при энергиях γ –
квантов от порога до 240 МэВ
ЖЭТФ, т. 37, вып. 1 с. 11-21 (1959)
- [16] Г.А. Сокол
Диссертация кандидата физ. - мат. наук
Труды ФИАН, т.41 (1967)
- [17] П.С. Баранов, Л.И. Словохотов, Г.А.Сокол, Л.Н. Штарков
Угловое распределение γ – квантов на водороде при
энергии 247 МэВ
ЖЭТФ, т.41. вып.6, с.1713-1721 (1961)
- [18] L.C. Liu, Q Haider
Signature for the existence of eta - mesic nucleus
Phys.Rev.C, v.34, N. 5, p.1845 (1986)
- [19] R.E. Chrien, S. Bart, P.Pile. R. Sutter, N. Tsoupas, H.O. Funsten,
J.M. Finn, G.F. Stronash, C. Lyndon, V. Punjabi, C.F. Perdrisat,
B.J. Lieb, T. Kishimoto, ,L.c. Liu, R.Estep, B. Dropesky
Search for bound states of the η –mesons in light nuclei
Physical Rev. Letters.v.60, N. 25, p. 2595 (1988)
- [20] A.I. Lebedev, V.A. Tryasuchev
Cross section for production of η – nuclei by photons

J. Phys. G. Nucl. Part.Phys. 17. 1197, (1991)

- [21] Г.А. Сокол, В.А. Трясучев
Возможный метод наблюдения η – ядер.
КСФ ФИАН [Sov. Phys. - Lebedev Institute Report) N.4, p.23
(1991)
- [22] A.M. Green, S. Wyceh
The η –Nucleon scattering length and effective range.
Phys.Rev. C, v.55, p.2167 (1997)
- [23] В.И. Ритус
“ядерный резонатор”
Отзыв на диссертацию доктора физ. мат. наук Г.А.Сокола
- [24] B.Lieb, L.C.Liu
Search for nuclear bound states of the η - mesons.
Progress Report, LA-11670-PR (1988)
- [25] Г.А. Сокол, Т.А. Айбергенов, А.В. Кольцов, А.В. Кравцов,
Ю.И.Крутов, А.И. Львов, Л.Н. Павлюченко, В.П. Павлюченко,
С.С Сидорин.
Обнаружение η – мезонных ядер
Письма в ЭЧАЯ. N 5 (102), с.71 (2000)
- [26] M. Pfeiffer, J. Ahrens et al.
Photoproduction of η -mesic $^3_{\eta}\text{He}$
arXiv: nucl-ex / 0312011, v1 (2003)
- [27] S.V. Afanasiev et al.
Search and study of η - mesic nuclei in pA - collisions.
Proc. of the 1 st. Workshop in DUBNA
-]28] Г.А. Сокол
Обнаружение и исследование эта(η)- мезонных ядер
Диссертация доктора физ-мат. наук (2004)