

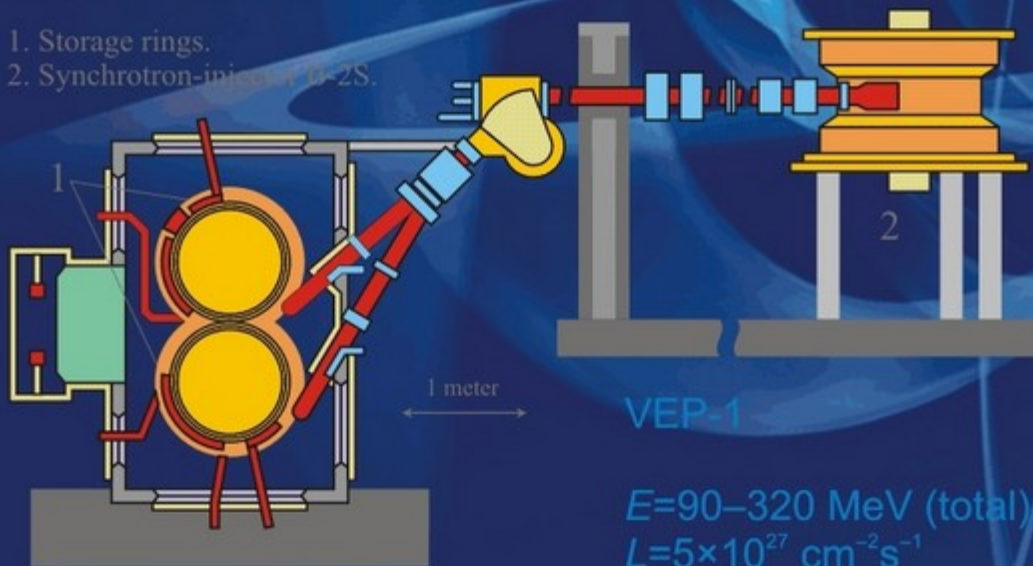


Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера

Experiments 1965–1967 — parallel pioneering together with Princeton-Stanford storage rings:

- electron-electron elastic scattering;
- double bremsstrahlung (the first observation and study).

1. Storage rings.
2. Synchrotron-injector B-2S.



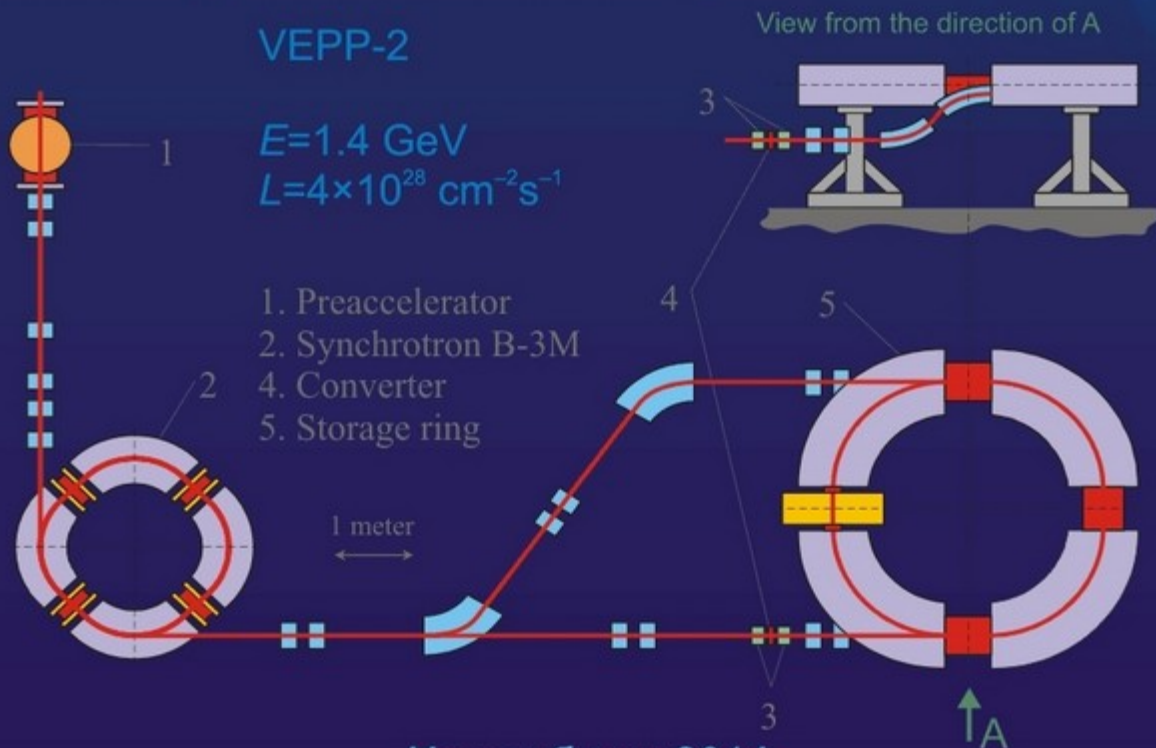
Первые коллайдеры ИЯФ

к 50-летию начала экспериментов
по физике элементарных частиц

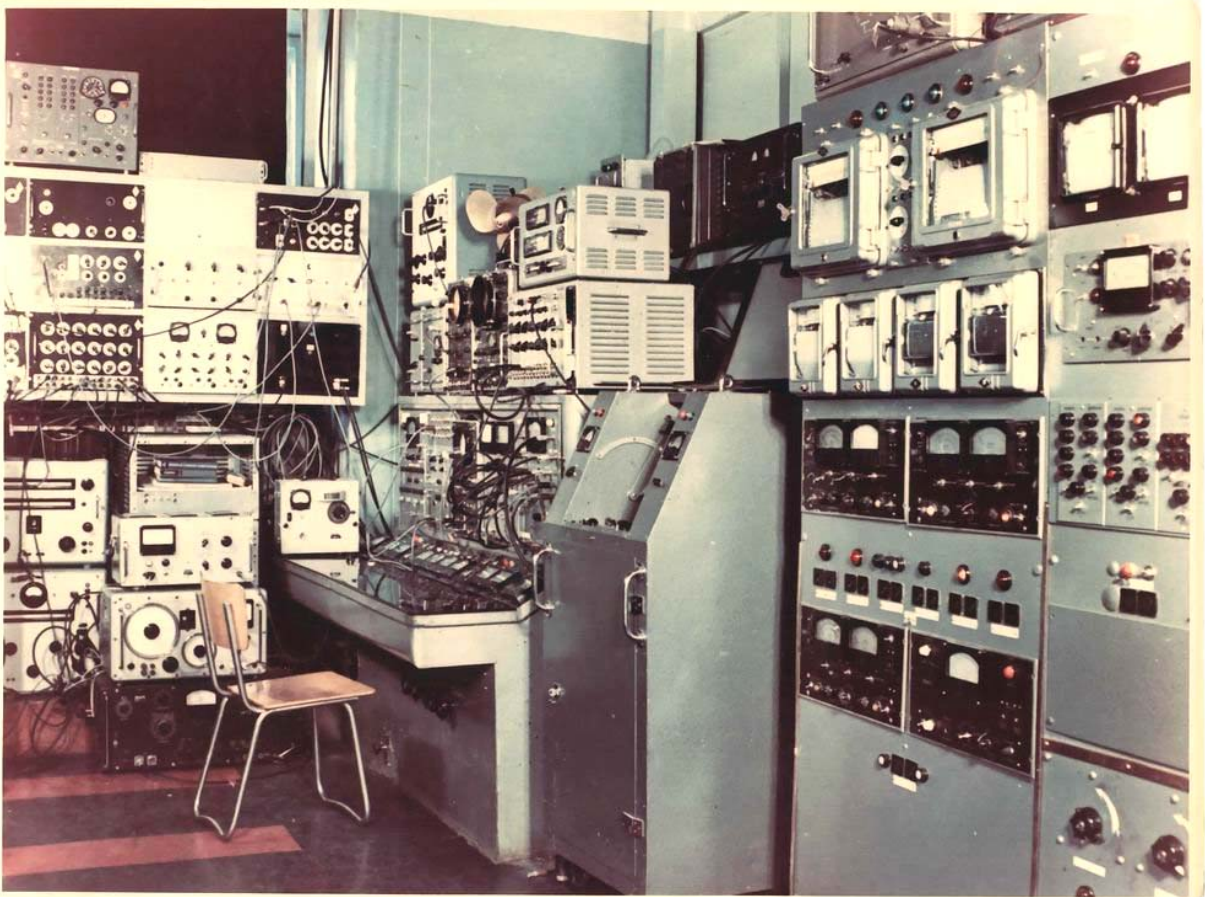
VEPP-2

$E=1.4$ GeV
 $L=4 \times 10^{28}$ cm⁻²s⁻¹

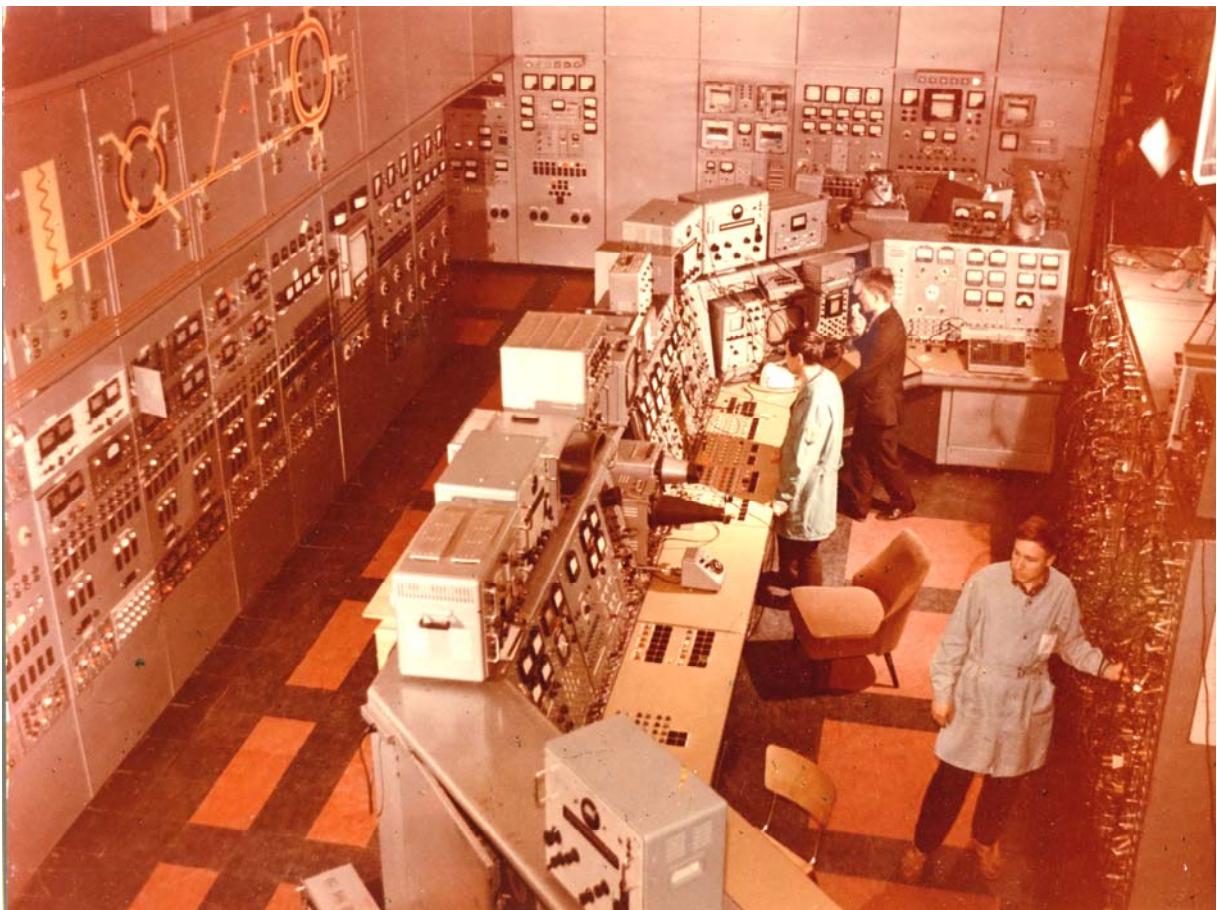
1. Preaccelerator
2. Synchrotron B-3M
4. Converter
5. Storage ring



Новосибирск 2014



Пультная ВЭП-1



Пультная ВЭП-2

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ.Г.И.БУДКЕРА
Сибирского отделения РАН

Первые коллайдеры ИЯФ.

**К 50-летию начала экспериментов
по физике элементарных частиц.**

Главный редактор – академик А.Н.Скринский.

Авторский коллектив:
академик Г.Н.Кулипанов,
академик А.Н.Скринский,
д.ф.-м.н., профессор С.И.Середняков,
д.ф.-м.н., профессор А.П.Онучин,
д.ф.-м.н., профессор Г.М.Тумайкин,
к.ф.-м.н. В.В.Петров.

Новосибирск 2014



Первые коллайдеры ИЯФ.

В книге представлены материалы о первых коллайдерах ИЯФ: установке со встречными электрон-электронными пучками ВЭП-1 и установке со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2. Описывается принцип действия и конструкция этих установок и детекторов для изучения продуктов взаимодействия сталкивающихся частиц. Приведены результаты первых экспериментов. Изложение выполнено в научно-историческом стиле, описание установок и экспериментов дополнено воспоминаниями участников событий 50-летней давности, отражающих начало зарождения и развития нового направления физики экспериментальных частиц – метода встречных пучков.

Настоящее издание предназначено в первую очередь сотрудникам ИЯФ СО РАН, а так же тем, кто интересуется историей развития методов встречных пучков в России.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы слово коллайдер стало знакомым не только физикам, но и широкому кругу людей, не имеющих никакого отношения к науке. Эксперименты на коллайдерах за последние десятилетия стали одним из главных – а может быть и самым главным – источником фундаментальной информации в физике (может быть, вместе с космологией и физикой нейтрино). Первые коллайдеры (их тогда называли установками со встречными пучками) появились 50 лет назад (1963-1964 года). Институт ядерной физики оказался в числе первых научных центров, заложивших основы этого нового направления в физике элементарных частиц.

Идея встречных пучков впервые была предложена норвежским инженером Р. Видерое (патент подан в 1943 году, опубликован в 1953 году). В патенте Видерое не рассматривалось столкновение релятивистских частиц, когда действительно реализуется колоссальный выигрыш энергии взаимодействия в системе центра масс. Позже, в своих воспоминаниях Видерое написал, что он не включил в патент кинематику столкновений, т.к. по мнению его друга Б. Тушека, это было тривиально и известно всем еще со школы. Так или иначе, но предложение Видерое не привлекло внимание физиков. Реальным импульсом к разработке встречных пучков стало предложение Д. Керста (США, 1956 год) осуществить встречные протон-протонные эксперименты на базе оригинального FFAG-ускорителя. Этот ускоритель мог обеспечить достаточную плотность пучков, что является основной проблемой для реализации встречных пучков. В своей статье (январь 1956 года) и докладе на симпозиуме в Женеве (июнь 1956 года) Керст сделал акцент на огромном выигрыше встречных пучков при высоких энергиях и привел соответствующие формулы. Также в апреле 1956 года Дж. О'Нил (США, Принстон) опубликовал статью (со ссылкой на Керста) с предложением электрон-электронных накопительных колец. В этой статье ничего не говорилось про радиационное затухание (хотя оно тогда было уже хорошо известно), а накопление предлагалось делать с помощью системы тонких фольг (что не работает). Идея встречных пучков обсуждалась в нескольких докладах на симпозиуме 1956 года в Женеве. Статья Керста и симпозиум дали большой импульс развитию метода встречных пучков.

Через несколько месяцев сразу в нескольких лабораториях разных стран (в Лаборатории Новых Методов Ускорения (ЛНМУ) ИАЭ АН СССР инициатором развёртывания этих работ выступил её организатор и руководитель Андрей Михайлович Будкер*) началась практическая разработка коллайдеров – установок, в которых очень многое было революционного и делалось впервые в истории. Первыми коллайдерами, которые были полноценно реализованы и на которых было изучено электрон-электронное взаимодействие при совершенно недоступных до этого энергиях (в системе центра инерции) были Принстон-Стэнфордские кольца (Стэнфордский университет, США, 2x500 МэВ) и ВЭП-1 (Встречные Электронные Пучки-1, 2x160 МэВ) в Институте ядерной физики СО РАН СССР, Новосибирск, в Институте, который был создан в 1958 году на базе ЛНМУ. Первые акты рассеяния на обеих установках были зарегистрированы в 1964 году. Эксперименты по проверке квантовой электродинамики на этих установках продолжались до 1967 года.

Еще во время работы над электрон-электронными накопителями физики начали задумываться о возможности создания электрон-позитронных коллайдеров, что открывало принципиально новые возможности для экспериментов по физике элементарных частиц. В ИЯФ такая работа началась в конце 1959 года (проект ВЭПП-2 на энергию 2x700 МэВ). Примерно в то же время, в начале марта 1960 года, на семинаре во Фраскати (Италия) Б. Тушек предложил построить e^+e^- накопитель (Ada) на энергию 250 МэВ, используя в качестве источника частиц уже имеющийся во Фраскати синхротрон. Идея была сразу принята и первые частицы в кольце были получены уже в 1961 году; однако интенсивность пучков была столь мала, что в 1962 году это накопительное кольцо было

перевезено в Орсе (Франция), где имелся более интенсивный инжектор. Здесь в 1963 году Бруно Тушеком был открыт эффект внутреннего рассеяния. Светимость AdA оставалась слишком малой, чтобы можно было поставить эксперименты по физике элементарных частиц, поэтому было зарегистрировано только тормозное излучение.

Эксперименты на e^+e^- накопителе ВЭПП-2 в Новосибирске начались в 1966 году, его светимость была в 40 тысяч раз выше, чем на AdA. На ВЭПП-2 был поставлен первый настоящий эксперимент на встречных электрон-позитронных пучках-наблюдение резонанса (1966). В 1967 году заработал накопитель АСО (Orsay, 2×450 МэВ), на котором зарегистрировали ω -мезон. Далее был Φ -мезон (АССО, 1967 год) и годом позднее с добавлением регистрации заряженных каонов (ВЭПП-2, 1968 год). В эксперименте, выполненном на ВЭПП-2 (1970 год) при энергии 2×670 МэВ, было обнаружено аномальное увеличение много-адронных событий, не объясняемое в рамках существующих теорий. Аналогичные результаты в это же время были получены на итальянской установке Adone. Это оказалось важным стимулом для создания следующего поколения коллайдеров, на которых впоследствии родилась физика кварков, объяснившая эту аномалию.

Первые значимые эксперименты по физике элементарных частиц на встречных пучках, начатые в 1964 году на электрон-электронных коллайдерах в Стэнфорде и в Новосибирске показали их осуществимость, а затем первые эксперименты на электрон-позитронных коллайдерах AdA, ВЭПП-2 и АСО открыли эру e^+e^- встречных пучков, что позволило в последующие 50 лет сделать колоссальный прорыв в физике элементарных частиц.

Дальнейшее развитие электрон-позитронных коллайдеров шло по двум направлениям: увеличение энергии и увеличение светимости. В ИЯФ это выразилось в создании установок ВЭПП-4, с последующей модернизацией, и далее ВЭПП-2М и ВЭПП-2000. Перечислим электрон-позитронные коллайдеры, которые за истекшие полсотни лет создавались в других центрах. Это Adone (Италия), SPEAR (США), DCI (Франция), Doris (Германия), PETRA (Германия), PEP (США), Tristan (Япония), CESR (США), LEP (ЦЕРН), DAFNE (Италия), BEPC (Китай), PEP-2 (США), KEKB (Япония). Следует отметить, что в ИЯФ впервые была высказана и обоснована конкретными предложениями и разработками идея создания линейных коллайдеров. В связи с задачами изучения недавно открытого на большом адронном коллайдере в ЦЕРНЕ бозона Хиггса разрабатывается циклический электрон-позитронный коллайдер на энергию 2×175 ГэВ.

В эти годы в крупных лабораториях были созданы установки с использованием и других частиц: протонов, антипротонов, ионов. Важную роль в ряде этих проектов сыграл предложенный А.М.Будкером и опробованный в ИЯФ метод электронного охлаждения.

В последнее время появились новые идеи, позволяющие на порядки увеличить светимость. Успешная реализация этих идей идет на DAFNE и KEKB. Такие установки, позволяющие получить очень высокую светимость, стали называть фабриками. В ИЯФ разработан физический проект Ц-ТАУ фабрики, дающий возможность ставить эксперименты с рекордной светимостью в области энергий до 2×2500 МэВ.

Как было сказано выше, в первые годы ИЯФ был одним из лидеров начавшейся гонки в экспериментах на встречных пучках. К сожалению, в последующем в связи с рядом обстоятельств, и прежде всего, с большой стоимостью проектов следующих поколений коллайдеров, институту не выпала честь участвовать в открытии новых семейств элементарных частиц. Тем не менее, установки ВЭПП-2М, ВЭПП-4, ВЭПП-4М и ВЭПП-2000 внесли заметный и признанный мировой общественностью вклад в развитие физики элементарных частиц. Установка ВЭПП-2М в течение двух десятков лет имела рекордную светимость в своей области энергий, и это было успешно использовано физиками на детекторах НД-СНД и КМД-1,3. В связи с вводом ВЭПП-2000 область низких энергий расширена до 2×1000 МэВ, и здесь можно ожидать новых интересных результатов. В ИЯФ был открыт и использован метод резонансной деполяризации, позволивший провести прецизионные измерения масс целого семейства элементарных частиц на

установках ВЭПП-2М, ВЭПП-4 и ВЭПП-4М. ИЯФ был и остается лидером по работе с поляризованными пучками. Физики ИЯФ занимали и продолжают занимать достойное место в развитии ускорительной физики.

Синхронно с созданием коллайдеров шло бурное развитие детекторных методик, обеспечивающих создание новых детекторов. Первые детекторы базировались на искровых камерах с оптическим съемом информации, затем были созданы проволочные искровые камеры с запоминанием на ферритовых кольцах. Со середины 70-х стали использоваться пропорциональные камеры, а затем дрейфовые камеры, не требующие внешнего запуска и не имеющие мертвого времени. Для идентификации частиц применяются различные виды черенковских счетчиков. Для регистрации фотонов используются различные виды сэндвичей и счетчики полного поглощения на основе кристаллов NaI, CsI и жидких криптона и ксенона. Физики ИЯФ внесли достойный вклад в развитие этих методик, являющихся базовыми элементами любого современного детектора частиц.

Каждое следующее поколение коллайдеров и детекторов требовало создания всё более сложной техники и новых технологий. И это удачно совпало по времени с бурным техническим прогрессом, затронувшим все области техники и, прежде всего электронику, сверхпроводимость и компьютеры. Сработала и обратная связь, когда задачи поставленные физиками, стимулировали создание новых устройств, материалов и технологий, в последующем используемых в других областях науки и техники и в медицине. В этом плане лаборатории ИЯФ всегда стремились быть на мировом уровне. То же можно сказать и о производственной базе ИЯФ. Именно благодаря этому ИЯФ успешно участвует в международных проектах и выигрывает тендеры по поставкам различного оборудования и даже крупных установок во многие страны. Научные школы физиков-ускорительщиков и физиков-детекторщиков ИЯФ признаны во всем мире и, несомненно, являются лидирующими в России.

Можно отметить еще одну сторону влияния коллайдеров на научно-технический прогресс. Они дали толчок и стимулировали развитие работ по использованию синхротронного излучения, созданию источников этого излучения и лазеров на свободных электронах. Значительный вклад ИЯФ в становление этих направлений является общепризнанным.

** Из воспоминаний Б.Г.Ерозолимского: «Ограничусь лишь упоминанием о том, что сама идея встречных пучков и известного всем большого выигрыша в энергии, выделяемой в системе центра масс сталкивающихся электронов, по сравнению со случаем, когда ускоренные электроны падают на неподвижную мишень, пришла в голову Андрею Михайловичу независимо от О'Нейла, и он её обсуждал с нами за несколько месяцев до появления соответствующего американского предложения-препринта.». Академик Г.И.Будкер. Очерки. Воспоминания. Новосибирск. «Наука». 1988.*

I. ВЭП-1 – ПЕРВЫЙ КОЛЛАЙДЕР ИЯФ.

Введение.

О начале развертывания работ по встречным пучкам в руководимой Андреем Михайловичем Будкером Лаборатории Новых Методов Ускорения (ЛНМУ) вспоминает Александр Николаевич Скринский (круглый стол 2004 год):

Поводом к началу работ по практической реализации установок со встречными пучками явились результаты экспериментов Хоффитатора в Стэнфордском университете по рассеянию электронов с энергией до 500 МэВ на протонах. Было видно, что закон Кулона при этих энергиях нарушается. Тогда обсуждались три гипотезы: есть размер у протона, есть размер у электрона, квантовая электродинамика нарушается при малых расстояниях.

Первые разговоры о встречных пучках начались в 1956 году после обсуждения итогов Женевской конференции и конкретного предложения использовать затухание в электронных пучках благодаря синхротронному излучению для того, чтобы накапливать и сжимать пучки для получения высокой плотности.

Идея заниматься встречными пучками появилась еще до подписания Постановления о создании института. Разговор о том, что Институт появится, в 1957 году уже был. Весной 57 года, когда я был студентом 4 курса, в МГУ пришел Вадим Волосов, нашел меня в общежитии и стал агитировать войти в компанию, которая потом преобразуется в институт. Мы приехали после каникул в августе, собеседование в ЛНМУ прошли несколько человек.

Сентябрь, октябрь, может быть, и ноябрь я в группе Б.В.Чирикова занимался экспериментами по созданию и изучению виртуального катода в сильноточном электронном пучке – в связи с предложением АМ использовать поле электронного пучка для фокусировки протонных пучков, а потом, видимо, по рекомендации Чирикова, Андрей Михайлович меня позвал к себе и сказал: «Мы собираем группу, которая займётся электрон-электронными пучками. Хотим привлечь тебя». Я сразу согласился. К концу 1957 года стала постепенно складываться эта группа. В неё вошли Б.Г.Ерозолимский, Л.Бондаренко, А.Кадымов, В.С.Панасюк, я. Началось формирование понимания того, что же такое электрон-электронные пучки.

Было ясно, что потребуется какой-то инжектор. Был опыт спирального накопления на Б1 и бетатронного режима на Б2. Было решено преобразовать бетатрон Б-2, ускорявший электроны до 2 МэВ, в синхротрон (названный Б-2С) на энергию 100 МэВ (но реально получился ускоритель на 43 МэВ). Как было выпустить пучок? Это стало основным технически новым – и сложным – элементом, как и впуск в накопитель. И сегодня в циклических машинах впуски и выпуски – особо деликатные места. В течение 1 нсек нужно было создать на орбите дополнительное поле, отклоняющее пучок и направляющее его в выпускной канал. Проблема была острой. Высоковольтный импульс с наносекундным фронтом и с малыми «хвостами» – задача трудная (тем более в 1950-х годах!). Занимались тогда этой задачей Б.Г.Ерозолимский и Л.Н.Бондаренко. Система выпуска для Б-2 (и Б-2С) была сделана, и мы вскоре увидели выпущенный пучок. Несколько позднее задача формирования нужных импульсов была более полно решена Сашей Киселевым.

В 1958 году чертеж собственно ВЭП-1 был готов. Производство накопителя началось на Турбинке, здесь в Новосибирске, в 1959 году. Очень многого не было там заложено. Один вопрос такой: кольца соприкасаются и здесь не должно быть спада поля, оно должно быть однородно. Как обеспечить устойчивость пучков в дорожках? Пообсуждав с Андреем Михайловичем, решили так распределить поле: в районе соприкосновения орбит – плоская часть, потом короткие крылья с увеличенным

градиентом такие, чтобы и сохранить интеграл поля на орбите, и получить нужную фокусировку в обеих дорожках.

Еще одно место было чрезвычайно сложным. Дорожки с нужным магнитным полем почти азимутально однородным и полностью открытые снаружи. У них естественно, поле на краю полюсов ужасное. Была придумана компенсирующая система. Самым острым моментом было сделать так, чтобы компенсация была вдоль всей траектории впуска. Задача выглядела почти неразрешимой – градиенты слишком велики. Этим, в основном, занимался Гриша Сильвестров. В результате, придумали сделать «перпендикулярный вход пучка», расширив магнитные полюса на участке впуска. Это решение оказалось правильным.

Изготовленный накопитель в 1960 году перевезли в Москву. ВЭП-1 разбирали и собирали несколько раз. Несмотря на сложные двойные уплотнения, серьезная вакуумная часть была хорошо сработана. Было уже понятно, что и как делать.

С ВЭП-1 много было нетехнических сложностей. Сначала мы думали, что ВЭП-1 останется в Москве. Те, кто оставался в Москве, этого хотели. «Перенос ВЭП-1 в Новосибирск – это не только потеря времени, но и работа потерялась бы» – говорили они. Команда Б.Ерозолимского, остававшаяся в Москве в Курчатовском институте, стала добиваться статуса лаборатории и отделилась от лаборатории Будкера. Этот конфликт развивался в 1962 году, когда мы уже были в Новосибирске. Это дело разбиралось в Министерстве среднего машиностроения, куда входил Курчатовский институт. Там выступил М.А.Лаврентьев. Он резко заявил, что некоторые хотят развивать науку в Сибири, а вот некоторые в Москве не хотят отдать оборудование. Решение было в пользу Будкера, в пользу ИЯФ. Очень быстро команда под руководством Димова демонтировала ВЭП-1. И очень быстро его перевезла сюда.

С точки зрения организации заведующим сектором встречных пучков в 1961 году стал Вениамин Сидоров, а я его заместителем. В какой-то месяц осени 1962 года нас превратили в два сектора.

Из воспоминаний Г.М.Тумайкина:

Я поступил в ИЯФ в июне 1962 в лабораторию Геннадия Ивановича Димова, которая занималась разработкой перезарядной инжекции. Но в июле было принято решение перевести ВЭП-1 из Москвы в Новосибирск. Организация этой работы была поручена Геннадию Ивановичу, имевшему опыт строительства синхротрона в Томске, и таким образом вся моя дальнейшая жизнь оказалась связанной с тематикой встречных пучков. В июле-августе меня послали в командировку в Институт атомной энергии для ознакомления с ВЭП-1. Установка размещалась в бывшей поликлинике. К этому времени был получен синхротронный режим в инжекторе Б-2С, собран канал к накопительным кольцам, стоящим вертикально одно над другим. Впоследствии я узнал, что разработка и исследование синхротронного режима в установке с предварительным бетатронным ускорением было дипломной работой Александра Николаевича Скринского. Моя главная задача тогда состояла в ознакомлении с устройством и работой этого уникального безжелезного синхротрона, в котором помимо бетатронного ускорения было еще предварительное спиральное накопление.

К моменту прибытия в ИЯФ ящиков ВЭП-1 строительство третьего блока главного здания Института было в основном завершено. Комплекс предполагалось разместить на месте нынешнего ВЭПП-2000. Начался монтаж антресолей, затем установка оборудования, электромонтаж, дистиллят. Темп работ был очень высокий.

Из воспоминаний бригадира электриков А.П.Шленкина:

В начале августа меня вызвал А.А.Нежевенко и сказал, что надо отложить все дела и обязанности и помочь выполнить монтаж установки ВЭП-1, которую дирекция обещала

смонтировать и привести в рабочее состояние за три месяца (это было одним из условий перевозки ВЭП-1 в Новосибирск). Нужно было смонтировать огромную массу контрольных, силовых кабелей, вакуумные системы, сжатый воздух, техническую воду, дистиллят... Одновременно работали специалисты нескольких организаций, каждая из которых думала только о своей части работы, и поэтому накладки и нестыковки были обычным явлением. Электрики работали без документации по набросанным накануне ночью схемам. Работы велись с 8-ми до 23 часов. Затем подводили итоги дня, перекусывали, намечали планы на следующий день и расходились по домам. Суббота тогда была рабочим днем. Надо отметить, что все работали с большим подъемом, хотелось показать, что в Сибири будет Большая Наука. Установка ВЭП-1 была досрочно смонтирована и предварительно налажена (имеется ввиду энергоснабжение и кабельное хозяйство), о чем указано в приказе № 183 от 22 октября 1962 года.

1. Описание комплекса ВЭП-1.

Комплекс установок включает в себя инжектор – электронный синхротрон Б2-С, соприкасающиеся накопительные кольца, обеспечивающие в месте соприкосновения столкновение встречных сгустков электронов, и электронно-оптический канал для перевода ускоренных электронов из синхротрона в накопительные кольца. Схема комплекса и его фото представлено на рис.1 и 2.

Особенностью установки является вертикальное расположение накопительных колец при нормальном горизонтальном расположении синхротрона. Это сделало комплекс более компактным и упростило постановку системы регистрации.

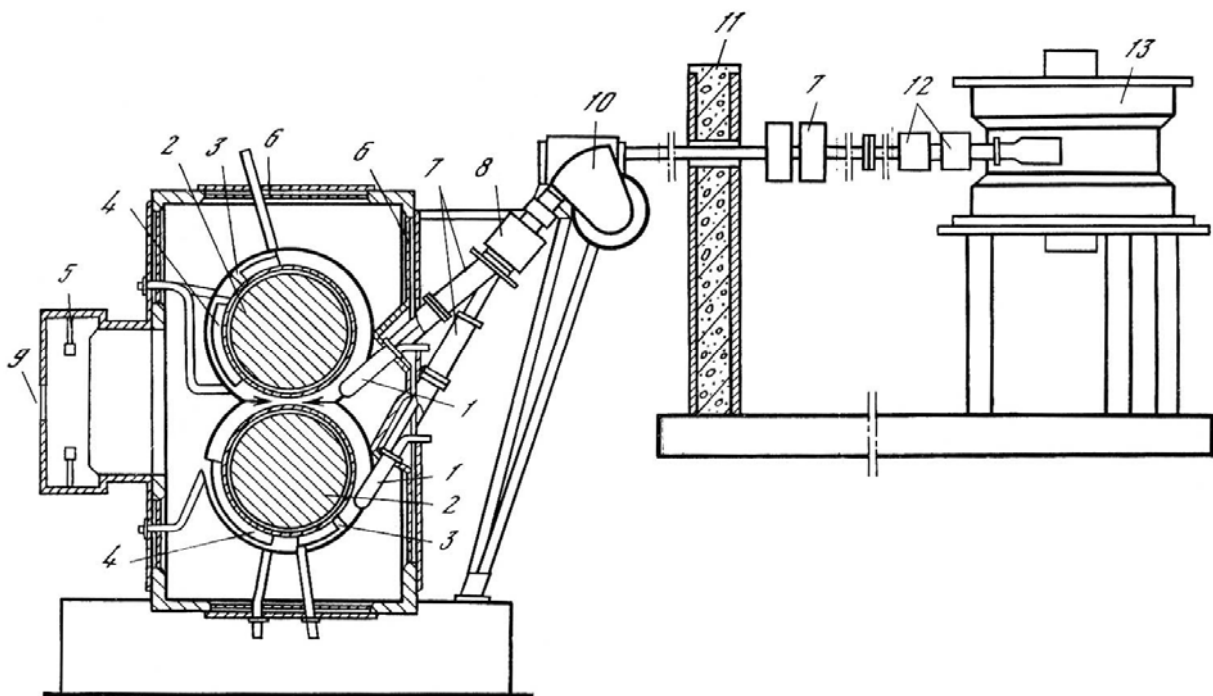


Рис 1. Схема комплекса ВЭП-1. 1-Компенсирющие системы-КС, 2-Ярмо магнита, 3-резонатор, 4-инфлектор, 5-азотит, 6-внутренние фланцы, 7-квадрупольные линзы, 8-коммутирующий магнит, 9-окно для вывода СИ, 10-поворотный магнит, 11-радиационная защита, 12-корректора.

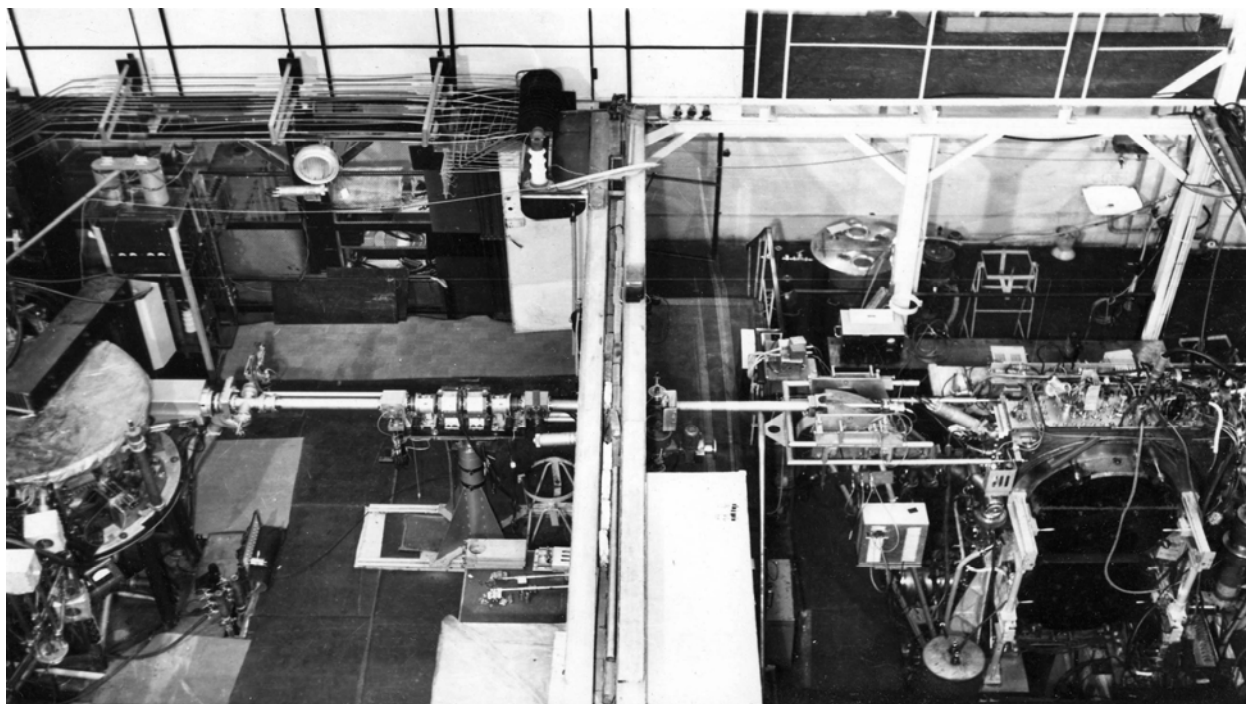


Рис 2. Общий вид комплекса. Справа видна верхняя дорожка коллайдера. (по отношению к рис.1 вид с другой стороны)

1.1 Синхротрон и канал.

Для создания установок со встречными электронными пучками в первую очередь предстояло решить вопрос об инжекторе. К этому времени был накоплен опыт создания бетатронов со спиральным накоплением. Эти работы велись с целью получения стабилизированного релятивистского электронного пучка. На созданном бетатроне Б-2 был получен ускоренный ток электронов 10А (1956 год) на радиусе 14 см. На базе конструкции этого бетатрона был создан синхротрон с бетатронным предускорением. Синхротрон получил название Б-2С.

Магнитное поле синхротрона формировалось токовыми витками, расположенными выше и ниже медианной плоскости и двумя алюминиевыми обечайками (внутренней и наружной), обеспечивающими формирование нужного профиля поля за счет скин-эффекта (рис. 3,4). Чтобы не создать замкнутого витка, в обечайках были сделаны разрезы. Через внутреннюю обечайку проходил бетатронный сердечник, создававший вихревое ускоряющее поле. Специальная система многослойных разрезных экранов катушечного типа экранировала область ускорения от рассеянного магнитного поля этого сердечника. Для компенсации напряжения, наведенного сердечником на витки ведущего поля, в конструкцию были заложены обратные витки, расположенные на большом расстоянии от медианной плоскости вблизи экранов. Поэтому влияние тока этих витков на магнитное поле на орбите было несущественным. Катушки, создающие магнитное поле состояли из двух параллельных групп (верхней и нижней) последовательно включенных витков: бетатронных, синхротронных и шестивитковых пакетов. Бетатронные и синхротронные витки были уложены в специальные пазы в двух (верхнем и нижнем) стеклотекстолитовых дисках и залиты эпоксидной смолой. Шестивитковые пакеты прилепали непосредственно к наружным обечайкам. Диски стягивались между собой шпильками, при этом одновременно к обечайкам прижимались крышки вакуумной камеры и шестивитковые пакеты, образуя жесткую конструкцию, способную выдержать многотонные электромагнитные силы.

Вакуумная камера синхротрона состояла из внутренней и наружной обечайек, закрытых крышками из оргстекла. Внутри камеры на крышках были размещены стекла с

проводящим покрытием, подсоединенные к наружной обечайке. Это исключало накопление статических зарядов, нарушающих процесс ускорения. На наружной обечайке имелись съёмные фланцы, сделанные по профилю вакуумной камеры и имеющие с ней хороший электрический контакт для сохранения скин-слоя формирования магнитного поля. Откачка велась паромасляным насосом с производительностью 2000л/сек через ловушку с температурой жидкого азота. Для откачки в стенке одного из фланцев были сделаны горизонтальные щели.

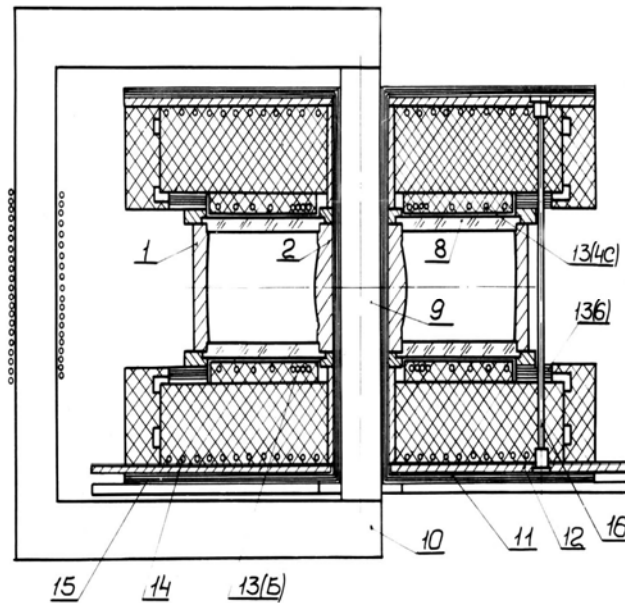


Рис 3. Разрез синхротрона Б-2С. 1-наружная обечайка, 2-внутренняя обечайка, 8-крышка вакуумной камеры, 9,10-бетатронный сердечник, 11-медные экраны, 13-бетатронные витки, 13(4с)-4 синхротронных витка, 13(6)-шестивитковый пакет, 12,14-обратные витки, 16-стягивающие шпильки.

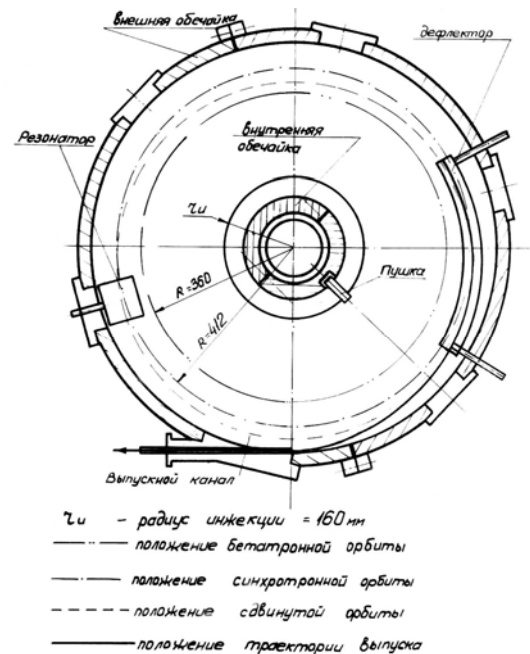


Рис 4. Разрез синхротрона Б-2С в медианной плоскости.

К моменту инжекции электронов током, протекающим через все витки, во всем объеме камеры создавалось спадающее по радиусу квазистационарное магнитное поле. Электронная пушка размещалась на внутреннем радиусе. Инжектируемый пучок, разворачиваясь по спирали в виде блина, заполнял всю вакуумную камеру. Шаг спирали определялся величиной напряжения на обходе, создаваемым бетатронным сердечником. Таким образом реализовался режим накопления.

Ниже приведены основные параметры этого режима:

- Энергия инжекции электронного пучка 20 кэВ
- Радиус инжекции 15 см
- Максимальный радиус накопления 38 см
- Энергия электронов на максимальном радиусе 60 кэВ
- Количество витков спирали 100-150

Следующим этапом было бетатронное ускорение. Включался разрядник бетатронной конденсаторной батареи и начинался рост магнитного поля во всем объеме камеры. Ток разряда, как в режиме накопления, так и в режиме так бетатронного ускорения протекал через все витки ускорителя. Бетатронное соотношение 2:1 вначале выполнялось для среднего радиуса, что приводило к уменьшению размера пучка (энергетического и бетатронного), а в конце бетатронного ускорения равновесная орбита расширялась до

радиуса, определяемого частотой ВЧ системы. Такой режим был найден путем подбора соотношений амплитуд и длительностей вихревого электрического и ведущего магнитного полей. Одновременно за счет адиабатического затухания происходило уменьшение вертикального размера. К концу бетатронного ускорения вертикальный размер составлял около 2-х см., а радиальный, включая энергетический разброс, 6см. Энергия электронов была около 2 МэВ. Пучок вводился в ускоряющий резонатор, включалось ускоряющее поле в резонаторе, поджигался разрядник основной конденсаторной батареи, создающий магнитное поле в основном в области синхротронной орбиты, и пучок ускорялся в синхротронном режиме. Магнитное поле в синхротронном режиме создавалось на наружном радиусе током в синхротронных витках и шестивитковых пакетах. В конце цикла ускорения на наружный 6-витковый пакет включалась еще одна конденсаторная батарея, ток от которой обеспечивал получение максимальной энергии и корректировал величину показателя спада поля "n".

Резонатор представлял собой пролетную трубку с разрезом для ввода пучка (рис.5), фактически являвшейся емкостью, укорачивавшей четвертьволновую линию. Конструкция резонатора была выполнена из полистирола, покрытого тонкой медной фольгой с продольными разрезами. Это обеспечивало его «прозрачность» для ведущего магнитного поля. Резонатор работал на 1-ой гармонике частоты обращения (116 МГц). Эффективность резонатора (отношение амплитуды ускоряющего напряжения к амплитуде напряжения на резонаторе) составляла около 0,35. В начале цикла ускорения напряжение на резонаторе было 6 кВ, в конце 2-3 кВ.

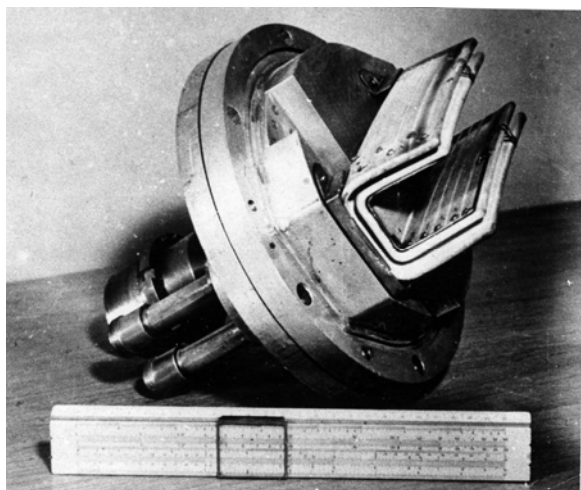


Рис 5. Резонатор синхротрона вместе с фланцем.

В конце цикла ускорения посредством так называемых сдвиговых витков создавалось азимутальное искажение магнитного поля. Равновесная орбита сдвигалась в дефлектор и к выпускному каналу. Последний представлял собой экранирующую от магнитного поля двухслойную (медь и железо) трубку, размещенную по касательной к равновесной орбите и проходящую через алюминиевую стенку наружной обечайки. Конструкция позволяла экранировать магнитное поле на траектории выпуска. Импульс дефлектора не был синхронизирован с фазой ускоряющего напряжения. Чтобы избежать флуктуаций выпущенного тока, за несколько микросекунд до выпуска снималось

напряжение с ускоряющего резонатора. Это приводило к разбунчировке сгустка и позволяло иметь стабильный выпуск свыше 50% ускоренных электронов. Дефлектор представлял собой пару короткозамкнутых линий, расположенных под и над равновесной орбитой и питался от высоковольтного генератора с низким выходным сопротивлением. Амплитуда импульса до 100 кВ, передний фронт около 1нсек.

Система питания всех элементов магнитной системы была построена на разряде конденсаторных батарей через трех-электродные разрядники. Разрядники поджигались импульсами от водородных тиратронов. В системе питания синхротрона было задействовано 7 разрядников и 7 конденсаторных батарей, обеспечивающих решение следующих задач (рис.6):

- 1) Создание квазистационарного поля для накопления
- 2) Создание вихревого электрического поля для спирального накопления и бетатронного ускорения

- 3) Создание магнитного поля для бетатронного ускорения
- 4) Создание магнитного поля для синхротронного ускорения
- 5) Создание магнитного поля для коррекции частот бетатронных колебаний в конце синхротронного ускорения
- 6) 2 разрядника для питания витков, сдвигающих равновесную орбиту в дефлектор и к выпускному каналу.

Последние три цепи питания (5,6) не показаны на схеме. Витки синхротрона (прямые и обратные) на рис.6 обведены пунктиром. Показаны дополнительные индуктивности (L_1 - L_6), регулирующие соотношение токов в витках синхротрона.

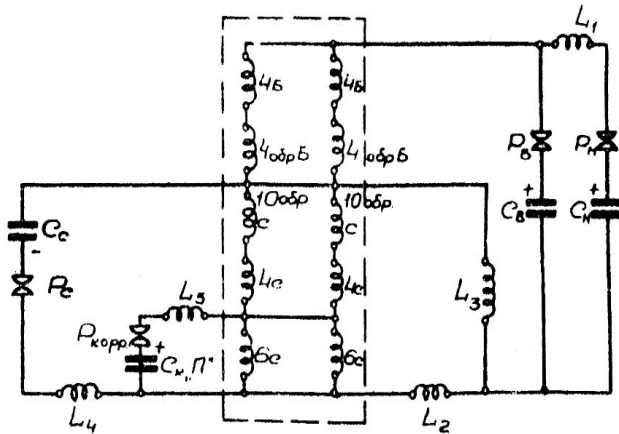


Рис 6. Схема питания синхротрона.

Все разрядники кроме разрядника основного поля имели простую конструкцию, состоящую из двух медных полушарий, с поджигающим электродом в одном из них (рис.7). Разрядник основного синхротронного поля с током до 80 кА был более сложной усиленной конструкции, обеспечивающей подавление звука разряда. Периодическая подстройка разрядников проводилась вручную. Поджигающий импульс

формировался схемой на высоковольтном водородном тиратроне. Стабильность запуска разрядников вместе с тиратроном была порядка одной микросекунды. Основная часть энергии, запасенная в конденсаторах, рассеивалась в катушках и обечайках ускорителя, что приводило к нагреву элементов ускорителя. В связи с этим время между циклами ускорения было около 16 сек.

Стабилизация напряжения на конденсаторных батареях обеспечивалась релейным отключением выпрямителя при достижении в процессе зарядки заданного уровня напряжения. Наиболее высокие требования были к напряжению основной конденсаторной батареи, определяющей энергию пучка. Здесь вместо стабилизации напряжения использовалось формирование импульса запуска всего ускорительного цикла в тот момент, когда в процессе зарядки напряжение на этой конденсаторной батарее достигало заданной величины. Дополнительно были развиты и другие системы стабилизации и привязки момента выпуска. Одна из них была основана на использовании синхротронного излучения, выведенного из ускорителя. Пучок выпускался в нарастающем магнитном поле при энергии, на которой синхротронное излучение только начинало появляться в оптической области и имело сильную зависимость от энергии. Специальной системой фильтров выделялись интенсивности в двух областях спектра, а электронная схема давала отношение интенсивностей коротковолновой и длинноволновой частей спектра. Когда полученный сигнал достигал определенной величины, срабатывала электроника, формирующая задний фронт напряжения на резонаторе и затем импульс запуска разрядника дефлектора. Это параллельно с системой стабилизации напряжения на конденсаторных батареях обеспечивало кратковременную точность энергии выпущенного пучка не хуже 0,05%. Естественно, температурные уходы и другие медленные нестабильности требовали участия оператора.

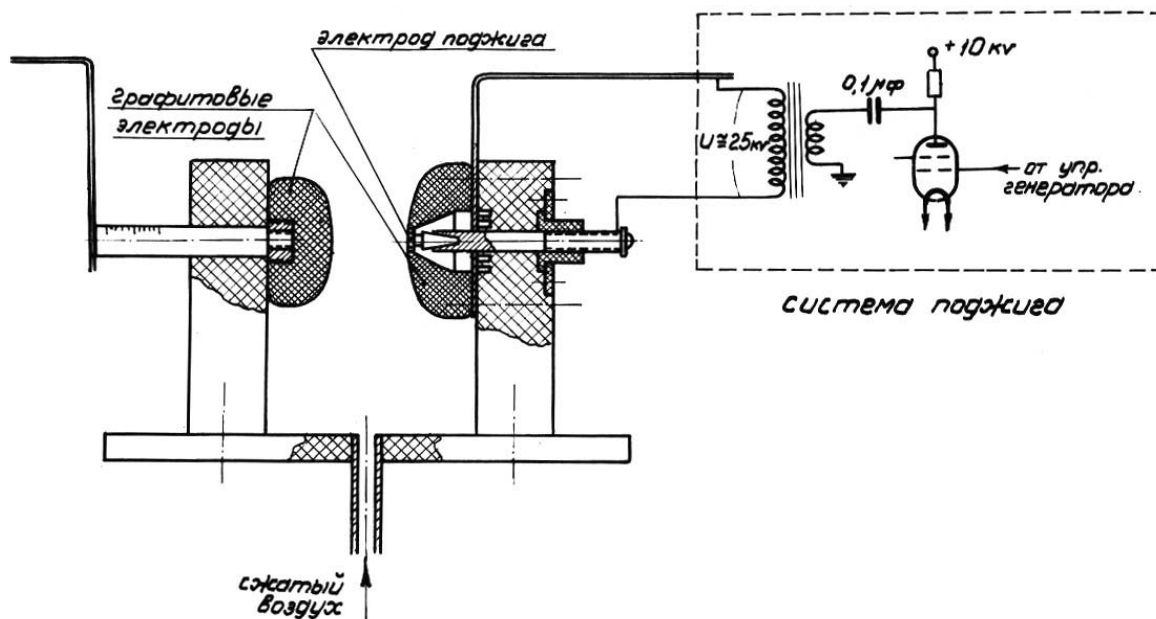


Рис. 7. Разрядник вместе с системой поджига.

Ниже приведены основные параметры синхротронного режима:

- Рабочая энергия 43 МэВ
- Радиус равновесной орбиты 412 мм
- Магнитное поле на равновесной орбите 3,48 кГс
- Ток в витках, создающих основное поле 80 кА
- Длительность цикла ускорения 0,9 мсек
- Временной интервал между циклами ускорения 16 сек
- Ускоренное число частиц $4 \cdot 10^{10}$

Основу электроники управления и контроля составляли шестиканальные генераторы импульсов, позволяющие расставлять генерируемые импульсы в необходимой временной последовательности. Эти импульсы использовались для запуска импульсных элементов, осциллографов и др. Электронные схемы были выполнены на лампах и тиратронах. Вся электроника была аналоговой, цифровой техники ещё не было.

Система наблюдения за пучком в основном была построена на измерении тока с расположенных в камере свинцовых пробников. Из специальных измерений было установлено, что их эффективность в области бетатронных энергий составляет (20-50)% . Пробники могли передвигаться по радиусу для изучения процессов накопления, бетатронного и синхротронного ускорения, наблюдение велось с помощью осциллографа. На канале перепуска между синхротроном и накопительными кольцами были установлены секционные свинцовые пробники с толщиной в несколько сантиметров. Они, позволяли определять заряд и положение центра тяжести пучка. На высокой энергии при наладке выпуска использовалось также тормозное излучение при гибели пучка на пробнике. В режиме синхротронного ускорения, когда пучок был сбунчирован, использовался сигнал с пикап-электрода. Точное измерение заряда выпускаемого пучка проводилось с помощью цилиндра Фарадея. В процессе настройки выпуска пучка для измерения его размеров использовалась обычная фотопленка.

Запуск синхротрона вела команда в составе А.Скринского, С.Попова Г.Тумайкина и Бориса Кудинова. Проблем хватало, включая случаи серьезных пробоев витков ускорителя, нарушений вакуума и пр. Многие элементы пришлось серьезно изменить. Работали, как выше вспоминал А.Шленкин, до поздней ночи, часто включая и воскресенье (суббота тогда была рабочим днем). К весне 1963 года синхротрон уже работал. Далее была проблема выпуска. Дефлектор и наносекундный разрядник с

обострителем фронта были разработаны Львом Бондаренко, оставшимся в Москве высококвалифицированным специалистом, по совместительству веселым юмористом и балагуром. Выпуск был получен при его участии. Впоследствии для питания инфлектора, был установлен разрядник А.В.Киселева, не имеющий послеимпульсов, всю эту технику обслуживал и модернизировал Ю.Матвеев.

Электронно-оптический канал включал в себя пару дублетов квадрупольных линз, поворотный и коммутирующий магниты. Последний при смене полярности поля переводил направление движения пучка с верхней дорожки коллайдера на нижнюю. Так как накопительные кольца были расположены вертикально, а синхротрон- горизонтально, хорошего согласования эмиттанса ускорителя и акцептанса колец не было.

Основные элементы каналов имели импульсное питание с использованием тиратронов и конденсаторных батарей. Такое решение, в основном сохранившееся и на последующих установках, было оправдано редкой частотой работы канала. Энтузиастом импульсной идеологии был Андрей Михайлович. В частности, в конструкцию квадрупольных линз была заложена возможность регулировки эффективной длины линз. Это достигалось экранировкой части вакуумной камеры медной цилиндрической втулкой, надетой на непроводящую внутреннюю камеру. Наиболее сложным элементом была система импульсных впускных магнитов. Для ВЭП-1, не имеющего прямолинейных промежутков, задачей этих магнитов была компенсация магнитного поля кольца на траектории ввода пучков. Поэтому они назывались КС-ы (компенсирующие системы) (Рис.8).

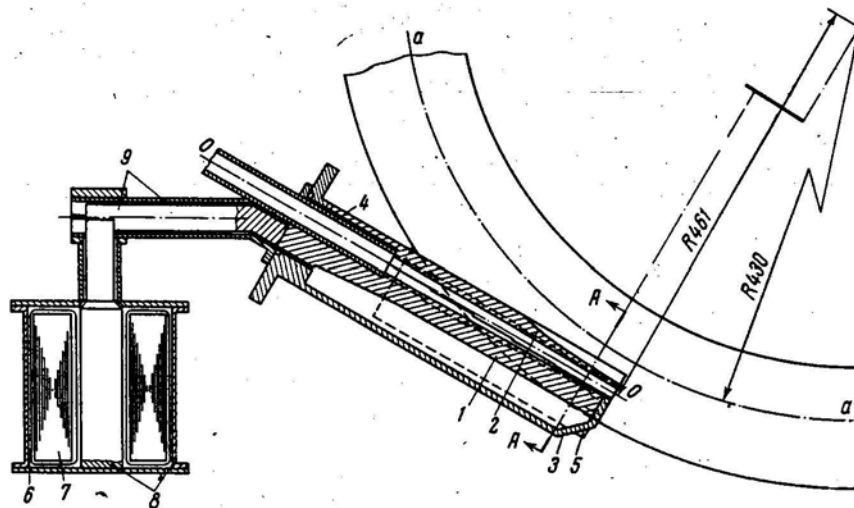


Рис. 8. Компенсирующая система для ввода пучка. 1-внутренняя шина, 2-съемная крышка корпуса, 3-короб, он же наружная шина, 4-экранирующая стальная труба, 5-стальные накладки, 6-тороидальный пакет железа трансформатора, 7-первичная обмотка импульсного трансформатора, 8-тороидальная медная обечайка, она же вторичная обмотка трансформатора, 9-коаксиальный токоподвод.

О тонкостях этого места и оригинальном решении проблемы рассказано выше А.Н. Скринским и ниже в воспоминаниях Татьяны Всеволожской:

Задача решалась путем компенсации постоянного поля в момент впуска импульсным полем безжелезного магнита, которое должно было с хорошей точностью повторять конфигурацию постоянного вдоль траектории впуска. Были проведены тщательные измерения рассеянных полей, которые легли в основу конструирования компенсирующей системы (КС).

Безжелезный магнит имел квазиаксиальное сечение. Продольное изменение поля в нем задавалось переменной высотой внутренней токовой шины, а поперечный градиент - формой профилей внутренней и внешней шин, также переменной вдоль длины магнита.

Из-за сложной конфигурации полей не только в пространстве, но и во времени, поскольку поля, проходящие через скин-слой в металле, сдвигаются по фазе, для получения компенсации с высокой точностью предполагалось провести дополнительное шиммирование по результатам измерения полей в реальном магните. И потребовались долгие месяцы кропотливой работы и все упорство и методичность Вадима Пакина для достижения этой цели. Однако область компенсации была узкой - хрупкий, неустойчивый баланс сложения многих мультипольных составляющих. Это приводило к большому значению поля, проникающего сквозь стенку-нож магнита в апертуру дорожки.... В результате система работала неустойчиво. Для того, чтобы в корне изменить ситуацию, нужно было найти принципиально новое конструкторское решение задачи компенсации.

И такое решение было найдено. Г.И. Сильвестров предложил, образно выражаясь, использовать для компенсации полей рассеяния сам их источник - магниты накопителя. Часть железа из полюсов вблизи КС была выбрана и заменена шихтованными вкладышами, которые одинаково хорошо пропускали и постоянный и импульсные магнитные потоки. Теперь и рассеянное и компенсирующее поля определялись одними и теми же эквипотенциальными поверхностями. Импульсное поле дополнительно формировалось скиновыми поверхностями токонесущих шин, профилированных по форме линий. Компенсация полей с хорошей точностью обеспечивалась практически по всей высоте межполюсного зазора накопительной дорожки. Внешнее поле за ножом магнита в новой КС уменьшилось почти на порядок. В 10 раз увеличилось отношение поля к току. Это позволило иметь внешние поля на уровне 0,5%.

Самый первый вариант КС для однопольного кольца (прототип ВЭП-1) был дипломной работой Валерия Петрова, выполненной под руководством Г.Сильвестрова.

1.2 Коллайдер.

Проект коллайдера ВЭП-1 выполнялся в 1958-1959 годах. Изготовление было завершено в 1960 году на Новосибирском турбогенераторном заводе, директором которого был А.А.Нежевенко, будущий зам.директора ИЯФ. ВЭП-1 был доставлен в Москву, где были начаты работы по его подготовке к запуску. В 1962 году ВЭП-1 был перевезен в Новосибирск.

Конструкция коллайдера имела форму плоского параллелепипеда, в большие грани которого были вмонтированы (сварены) по два кольцевых магнитопровода, являющихся одновременно и полюсами, и крышками вакуумной камеры (рис.9).

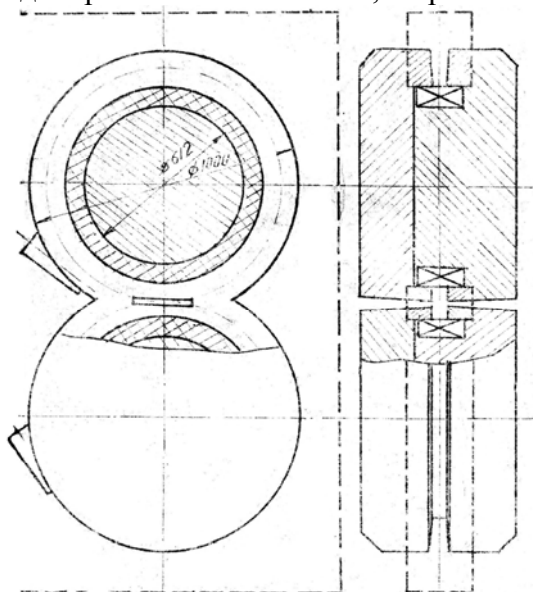


Рис.9. Магнитная система ВЭП-1.

Ярма для обратного потока грибообразной формы вместе с катушками располагались внутри колец вне вакуумной камеры. Магнитные полюса, формирующие профиль магнитного поля устанавливались внутри вакуумной камеры. Остальная часть вакуумной камеры была выполнена из нержавеющей стали. На остальных четырех гранях были установлены съёмные фланцы с двойным уплотнением, наружным на вакуумной резине, внутренним на свинцовых прокладках. В этой конструкции создавался промежуточный объём между высоким вакуумом и атмосферой. Промежуточный объём откачивался паромасляными насосами с азотными ловушками, внутренняя часть т.н. азотитами.

Последние представляли собой охлажденные жидким азотом поверхности с периодически напыляемым на них титаном. Современной техники металлических, разъемных уплотнений и технологии аргоновой сварки тогда в ИЯФ ещё не было. Внутренняя высоковакуумная часть камеры прогревалась до температуры 200 градусов. После такого прогрева удавалось поддерживать надежную восьмую степень. За вакуумное хозяйство отвечал Гений Александрович Блинов.

Через вертикально расположенные фланцы со стороны канала осуществлялся выпуск пучков. Другие фланцы служили местом ввода фидеров инфлекторов и резонаторов, пробников и др. Инфлектор представлял собой вогнутую пластину, расположенную на внешнем радиусе и имел неоднородное по радиусу поле, которое создавалось бегущей навстречу пучку волной. На первом этапе импульс инфлектора формировался тем же генератором, что и импульс дефлектора. Этот импульс имел хвосты, что вело к раскачке впущенного пучка. Впоследствии для питания инфлектора был применен генератор, разработанный А.Киселевым, который не имел послеимпульсов.

Резонатор представлял четвертьволновый коаксиал с полый внутренней «жилой» (рис.10), через которую пролетал пучок. Резонатор работал на второй гармонике, ускоряющее напряжение достигало 6кВ. Резонаторы монтировались на верхнем и нижнем фланцах. На рисунке 11 показан съемный фланец с ускоряющим резонатором.

Первый этап запуска ВЭП-1 предполагал инжекцию только в верхнее кольцо. Кольцо имело азимутальную симметрию с показателем спада магнитного поля $n=0,6$. Система же двух слабофокусирующих колец должна иметь однородное поле в области соприкосновения орбит. Эта область составляла около 40^0 . Для обеспечения устойчивости пучка величина показателя спада поля “n” в прилегающих к месту встречи областях размером по 20^0 была увеличена до 1 вместо 0,6 в остальной части орбиты. Это было сделано на втором этапе запуска.

Основные параметры коллайдера:

Энергия инжекции	43 МэВ
Максимальная энергия	2x160 МэВ
	(вместо 2x130 МэВ запланированных)
Радиус равновесной орбиты	43 см
Кратность ускоряющего напряжения	2
Максимальное ускоряющее. напряжение	6 кВ
Вакуум	$3 \cdot 10^{-8}$ мм.рт.ст.
Время жизни на малом токе (E=43-160 МэВ)	(400-1200) сек
Время затухания на энергии инжекции	~1сек.
Рабочие токи при энергии 160 МэВ	до 100 мА
Максимальная светимость	$5 \cdot 10^{27}$ см ⁻² сек ⁻¹

К лету 63 года В.Ауслендером, С.Поповым и А.Скринским были подготовлены первые рабочие материалы по ВЭП-1, в которых было изложено текущее понимание основных вопросов, таких как устойчивость пучка, его время жизни, размеры и т.д. Материалы оказались полезным пособием для участников работы.

Захват электронного пучка на верхнюю дорожку накопительного кольца был получен 20 августа 1963 года. Энергия пучка электронов была увеличена до 43 МэВ, что позволило увидеть синхротронное излучение циркулирующего пучка. Это было знаменательное событие не только для участников запуска, но и всего коллектива ИЯФ. А 21 августа в Дубне открылась Международная конференция по физике высоких энергий и ускорителям, где впервые были доложены работы ИЯФ по созданию установок со встречными пучками. Так что первый пучок был получен в нужное время. Для измерения интенсивности пучка использовалось синхротронное излучение, регистрируемое ФЭУ. Калибровка проводилась по одному электрону (рис.12), переход к большой интенсивности осуществлялся через систему оптических фильтров, калиброванных

Эдуардом Зининым, создавшим впоследствии всю систему оптического наблюдения. Света было достаточно, чтобы невооруженным глазом наблюдать один электрон.

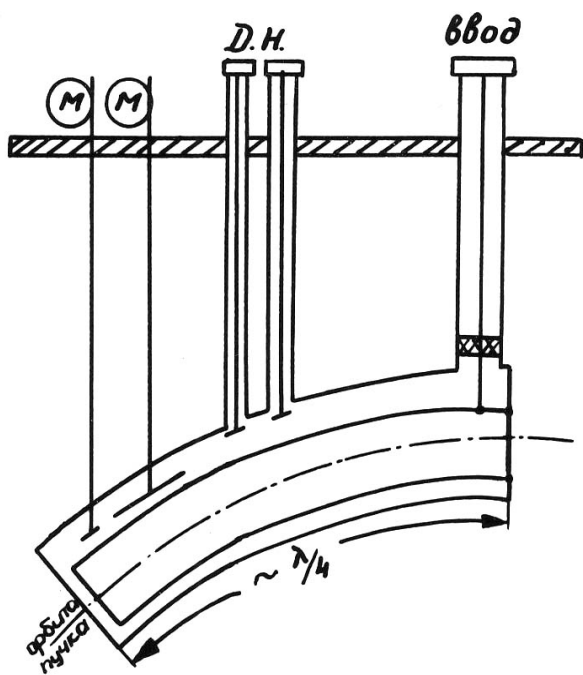


Рис.10. Схема резонатора ВЭП-1. ДН-датчики напряжения, М-механизмы подстройки, грубой и тонкой.



Рис.11. Резонатор ВЭП-1 в сборке на фланце.

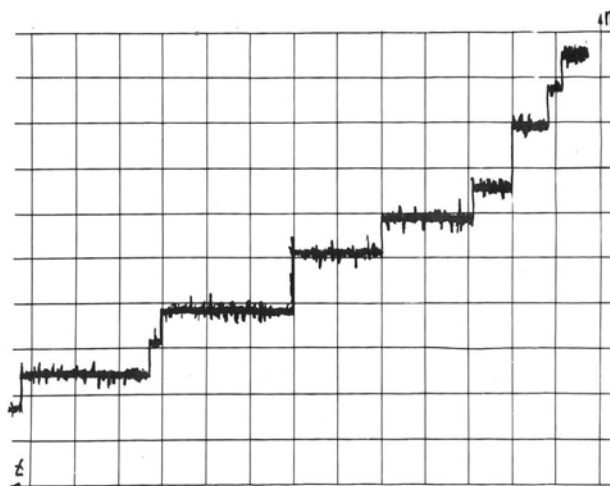


Рис.12. Калибровка по одному электрону.

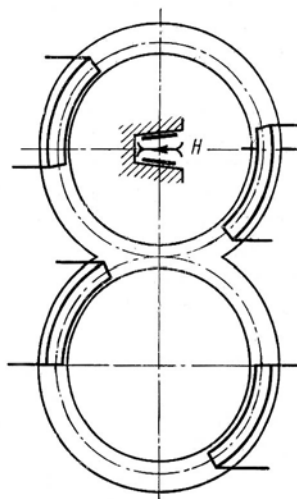


Рис.13. Расположение пластин для коррекции частот бетатронных колебаний и их резонансной раскачки, управления вертикальным положением орбиты и отсоса ионов.

Далее предстояла работа по получению двух пучков и обеспечения их встречи. Зима прошла в напряженной подготовке. Это наладка инъекции на нижнюю дорожку, создание системы управления пучками и контроля сведения пучков. Следует отметить, что в отличие от позитрон-электронного коллайдера, где пучки движутся по одной орбите, в

электрон-электронном пучки нужно сводить по радиусу, вертикали и фазе. Была создана система управления орбитами с помощью одновитковых корректоров. Один тип витков, расположенных вне вакуумной камеры между полюсом и ярмом, создавал радиальное смещение орбиты в направлении места встречи, обеспечивая сведение орбит по радиусу и выставку места встречи по центру щели для выпуска рассеянных электронов. Другой тип витков, выполненный в виде прилегающих к полюсам токовых пластин, расположенных внутри вакуумной камеры, обеспечивал сведение пучков в поперечном (в обычном представлении вертикальном) направлении и регулировку частот бетатронных колебаний (рис. 13). Каждая пластина имела свой источник питания, что обеспечивало возможность в зависимости от соотношения токов создавать градиент или (и) радиальную компоненту поля. На каждой дорожке было установлено 2 пары таких пластин, что позволяло также управлять углом встречи. Пластины и источники питания были изолированы от земли, что давало возможность подавать на них постоянное напряжение для отсоса или ВЧ напряжение для раскачки бетатронных колебаний. Возможность оперативного измерения частот бетатронных колебаний оказалась важнейшим инструментом для настройки коллайдера и вообще для развития пучковой физики.

Для обеспечения столкновений помимо совмещения орбит необходимо было научиться контролировать одновременное прохождение сгустков через область взаимодействия. Оригинальным решением этой задачи было использование ЭОП-ов (электронно-оптических преобразователей) с круговой разверткой, как для измерения длины сгустков, так и фазировки пучков для обеспечения их встречи. Разрешение составляло около одного сантиметра, или $0,3 \cdot 10^{-11}$ сек. Лучи света с обеих дорожек через систему зеркал сводились на экран ЭОПа, разница путей света составляла ровно один оборот. Для получения встречи изображения сгустков должны были совпасть. Это достигалось подстройкой фазы напряжений на резонаторах с помощью фазовращателей в высокочастотных трактах питания резонаторов. Оптическая система позволяла наблюдать из места встречи одной телекамерой оба пучка и контролировать сведение их орбит. Следует отметить, что использование синхротронного излучения явилось важнейшей частью пучковой физики и в какой-то мере способствовало последующему развитию работ с применением синхротронного излучения.

Для регистрации светимости было предложено внутри вакуумной камеры разместить счетчики для регистрации малоуглового рассеяния, имеющего на порядки большее сечение. Сложным местом магнитной системы, как и ожидалось, было место встречи, где вдоль орбиты была удалена часть полюсов, чтобы обеспечить вывод электронов, рассеянных на большой угол. Необходимо было получить однородное магнитное поле в месте встречи, где отсутствовали полюса, и имелась щель для выпуска рассеянных электронов через тонкую фольгу. Эта задача была успешно решена Л.С.Коробейниковым.

Первая светимость была зарегистрирована **19 мая 1964 года**. Далее велась кропотливая работа по изучению установки, улучшению её параметров и подготовке коллайдера к физическим экспериментам. Шаг за шагом ВЭП-1 продвигался к началу экспериментов по физике высоких энергий.

Вспоминает Геннадий Николаевич Кулипанов:

Поначалу накопления не было, инжектировали однократно. Потом Герман Тумайкин сообразил, что если «бить» длинным импульсом инфлектора, так чтобы впускаемый пучок «бился» один раз, а накопленный - три раза, то у последнего останутся малые колебания. Только после того, как мы это сделали, пошло накопление. Предел в то время были 100 мА. Сейчас этот метод с предударом накопленного пучка используют во всех накопителях, а первыми применили его мы.

Сначала «разводили» пучки по фазе, на верхнюю дорожку впускали 60 мА, потом на нижнюю столько же. Поднималась энергия. В процессе подъема корректировались частоты бетатронных колебаний, выставлялась нужная энергия, вводились коррекции

для сведения пучков (все это без единого компьютера) по поперечным координатам и по фазе, включалась система стабилизации, и после всего давалось разрешение на включение детектора, представляющего систему искровых камер.

Автоматизацией процесса занимались постоянно. Основным узлом управления («компьютером») в то время был реостат с электроприводом. Реостат через стойку БТ-4 управлял током возбуждения мотор-генератора, питающего магнитную систему. Вдоль реостата был тоненький стержень, и на нем находилось много концевиков, каждый концевик что-нибудь включал в соответствии с уровнем магнитного поля. Реохорд реостата перемещался и включал концевики, которые вместе с управляющими реле громко щелкали.

А для наблюдения за сведением пучков по СИ сделал систему на шаре конструктор Алексей Щепин. Поначалу, несмотря на все усилия, эта система никак не работала. И даже сам конструктор не мог добиться нужного эффекта. После этого он сделал систему проще, и сведение пучков настраивать стало просто и быстро.

Хочется вспомнить тех, кто в те далекие годы работал на ВЭП-1. Конечно, назвать всех сейчас совершенно невозможно. Магнитными системами занимался Леня Коробейников, ВЧ- системой - Боря Лазаренко, Юра Украинцев, Толя Чернов, системой впуска-выпуска пучка - Юра Матвеев и Андрей Чабанов. Алик Ефимов был лаборантом у Коробейникова, Юра Каркавин, Коля Бегунов - электрики, Ваня Лагутин – лаборант у Давида Весновского, Виктор Семенычев и Володя Стенин-механики, вакуумщики - Блинов Гений Александрович, а Коля Осипов, Володя Крылов и Юра Чесноков - дежурные лаборанты, многие узлы на этапе доводки и запуска установки конструировал Слава Зайцев.

В течение 1965-1968 годов были поставлены эксперименты при энергиях 2x43 МэВ, 2x130 МэВ и 2x160 МэВ. Установка была спроектирована на энергию 2x130 МэВ, увеличение энергии было достигнуто за счет размагничивания центрального ярма специальными катушками, которые фактически уменьшали рассеянный поток и разгружали центральное ядро. В итоге эквивалентная энергия ускорителя, дающей такую же энергию взаимодействия на неподвижной мишени достигла **100 ГэВ!** (величина, достигнутая только в 1990-е годы). Об этом на экскурсиях на ВЭП-1 с гордостью говорил гостям Андрей Михайлович Будкер. Ещё он любил наблюдать прямо на установке яркое свечение пучка и показывать его гостям, среди которых было много именитых. Максимальная светимость установки составляла около $5 \cdot 10^{27}$ см⁻² сек⁻¹. Однако понятие светимости в первых экспериментах не использовалось. Основным показателем работы было число событий рассеяния на малые углы и куламы (кулон-амперы), представляющие собой интеграл произведения токов верхней и нижней дорожек за время эксперимента. Отношение «малых углов» к куламам было обратно пропорционально поперечному размеру пучков и характеризовало эффективность встречи, по нынешним понятиям удельную светимость.

В перерывах между циклами наборов статистики для основных экспериментов, выполняемых совместно с лабораторией В.Сидорова, мы активно занимались пучковой физикой. В первую очередь это было изучение эффектов встречи и нелинейных резонансов, которыми изобиловала магнитная система ВЭП-1. Мы ввели понятие полезной магнитной апертуры, которую теперь называют динамической, и первые провели её измерения в зависимости от величины нелинейностей и частот бетатронных колебаний. ВЭП-1 был большой школой пучковой физики, на нем родились многие методики, которые широко использовались и продолжают использоваться на других установках. На ВЭП-1 возникла идея постановки экспериментов с использованием сверхтонкой внутренней мишени, и после окончания работ со встречными пучками под руководством С.Г.Попова впервые были выполнены такого рода эксперименты уже на

одном пучке. Здесь также возникла и была реализована идея выделения монохроматических гамма-квантов из спектра тормозного излучения.

2. Немного об ускорительной физике.

Накопительные кольца – это место, где очень удобно заниматься ускорительной физикой, прежде всего в связи со стационарными условиями наблюдения. Кроме того это были первые накопительные кольца, где экспериментаторов могли ожидать новые эффекты.

Одним из таких эффектов был эффект внутреннего рассеяния (ЭВР), ограничивающий время жизни при больших токах, впервые обнаруженный на установке «AdA» во Фраскати. На ВЭП-1 он сразу был подробно изучен. Как оказалось, внутрисгустковое рассеяние определяло время жизни во всем диапазоне энергий ВЭП-1 при рабочих токах в режиме набора интеграла светимости (Рис.14), хотя многократное внутреннее рассеяние внутри сгустка, увеличивающее его размеры, несколько уменьшало влияние однократного внутреннего рассеяния.

Однако этого увеличения размеров было недостаточно для получения большого времени жизни пучков, поэтому вводилось искусственное увеличение радиального размера пучков посредством раскачки бетатронных колебаний импульсами, подаваемыми на пластины инфлектора. Это оказалось очень выгодным, так как время жизни увеличивалось (квадратично с радиальным размером) из-за двух эффектов: увеличения объема сгустка и поперечного импульса, определяющего сечение при внутрисгустковом рассеянии. Одновременно и светимость увеличивалась, так как появилась возможность увеличения токов. Диапазон энергий ВЭП-1 (43-160 МэВ) охватывал разные процессы, определяющие размеры и время жизни пучков. Так в области низких энергий на малых токах размеры пучков определялись многократным рассеянием на остаточном газе, а время жизни однократным кулоновским рассеянием. В области высоких энергий доминирующими становились эффекты квантовых флуктуаций синхротронного излучения и однократное тормозное излучение. Были выполнены тщательные измерения, подтверждающие наличие этих механизмов, и получено хорошее совпадение с расчетами.

Впервые наблюдались эффекты накопления ионов и их влияния на размеры и время жизни пучка. Ввиду малого расстояния между сгустками ионы не успевали покинуть пучок, а накапливались в пучке, что было наблюдалось по уменьшению тормозного излучения с равновесной орбиты и уменьшению вертикального размера пучка при включении отсоса ионов. На рис.15 видно, что включение отсоса ионов уменьшает вертикальный размер пучка. Наблюдаемый остаточный рост вертикального размера с включенным отсосом при увеличении тока определяется ростом радиального размера и связью вертикального и радиального движения. Эксперименты показали, что имеются два механизма влияния ионов на размер пучка: многократное рассеяние и сдвиг рабочей точки из-за пространственного заряда к работающим резонансам. Однако уменьшение поперечных размеров при включении отсоса ионов приводило к уменьшению времени жизни из-за ЭВР. Оказалось, что отсос ионов из пучка слабее улучшает время жизни, чем его ухудшает ЭВР. Поэтому в режиме набора статистики отсос ионов не использовался.

Еще до получения первых встречных пучков встал вопрос об устойчивости режима столкновений пучков. Вначале появились линейные теории, которые давали оптимистические результаты. Но поле встречного пучка является нелинейным, поэтому требовались исследования. К этой задаче по инициативе А.Н.Скринского подключились Я.С.Дербенев, Г.Н.Кулипанов и С.И.Мишнев. Было показано, что вблизи нелинейных резонансов должен проявляться эффект, связанный с появлением устойчивых замкнутых орбит и образованием областей бетатронной автофазировки (ОБА), которые с увеличением тока могут перекрываться. Одновременно Б.В.Чириковым были найдены условия перехода регулярного бетатронного движения в стохастическое. Эта теоретическая база

явилась хорошей поддержкой при проведении экспериментального изучения. Действительно, было обнаружено, что при столкновении пучков проявляются резонансы даже очень высоких порядков. Обычно это отражалось в увеличении размера пучка и уменьшении времени жизни. Например, вблизи рабочей точки заметно проявлялся даже резонанс 7/9. Поэтому для получения максимальной светимости требовалась тонкая настройка частот бетатронных колебаний. К сожалению, в слабофокусирующей машине невозможно независимое управление вертикальной и радиальной бетатронными частотами, поэтому возможности экспериментатора в этом плане были ограничены.

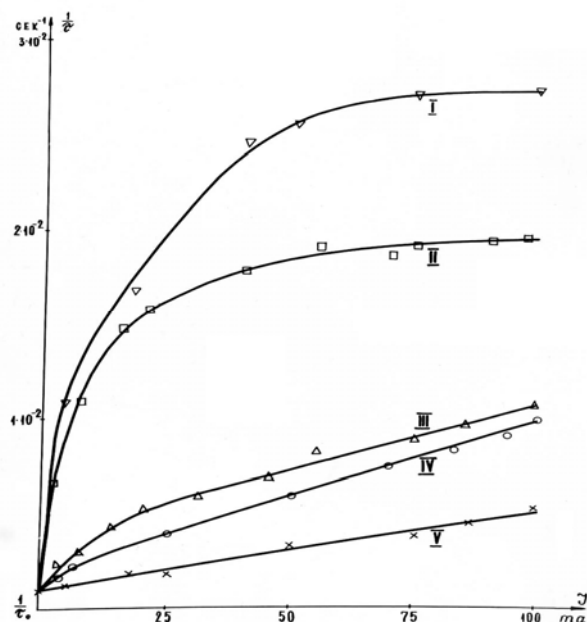


Рис. 14. Зависимость обратного времени жизни пучков от тока. $E=90$ МэВ. I-размеры естественные, отсос ионов включен, II-размеры естественные, без отсоса ионов, III-радиальный размер увеличен, IV-вертикальный размер увеличен, V-увеличены вертикальный и радиальный размеры.

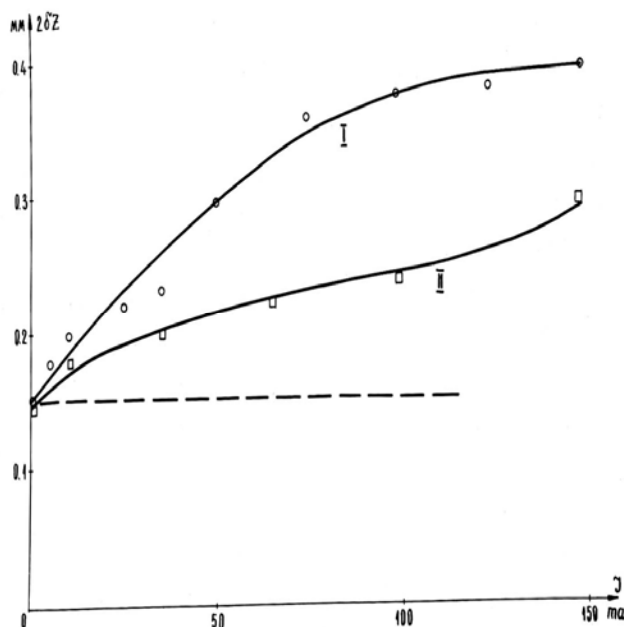


Рис. 15. Влияние отсоса ионов на вертикальный размер пучка. I-отсос ионов выключен II-отсос ионов включен. $E=100$ МэВ.

На рис. 16 показано значение времени жизни пучка при наличии встречного пучка и его отсутствии. Видно, что встречный пучок усиливает влияние машинных резонансов. В результате таких исследований были подтверждены ограничения на предельную величину сдвига частот бетатронных колебаний, вызываемого встречным пучком. Стоит отметить, что для измерения времени жизни пучков на базе самописца была создана аналоговая система, позволившая следить за временем жизни непосредственно по шкале самописца. Это обеспечило удобство и оперативность при проведении пучковых экспериментов. Важной частью методики были устройства, разработанные для оперативного измерения продольного и поперечных размеров сгустков.

Одновременно началось изучение динамики частиц вблизи машинных нелинейных резонансов и в отсутствие встречного пучка. Магнитная система ВЭП-1 оказалась привлекательной для изучения нелинейного движения. В кольцо были установлены октуполь и секступоль, что позволило менять машинную нелинейность. Имелся также хороший инструментарий для проведения таких исследований. Даже визуально можно было наблюдать богатое разнообразие нелинейных резонансов (рис. 17).

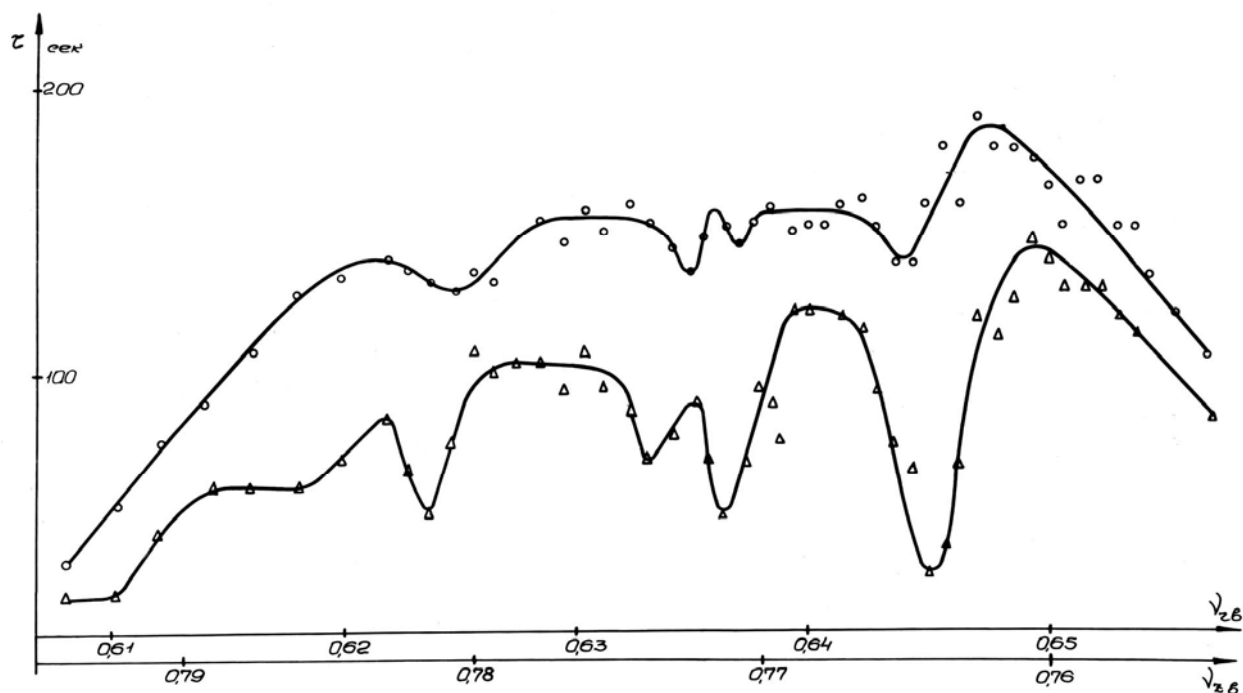


Рис.16. Время жизни пучка на верхней дорожке в зависимости от частоты бетатронных колебаний без встречного пучка (верхняя кривая) и при наличии встречного пучка (нижняя кривая). $E=43\text{МэВ}$.

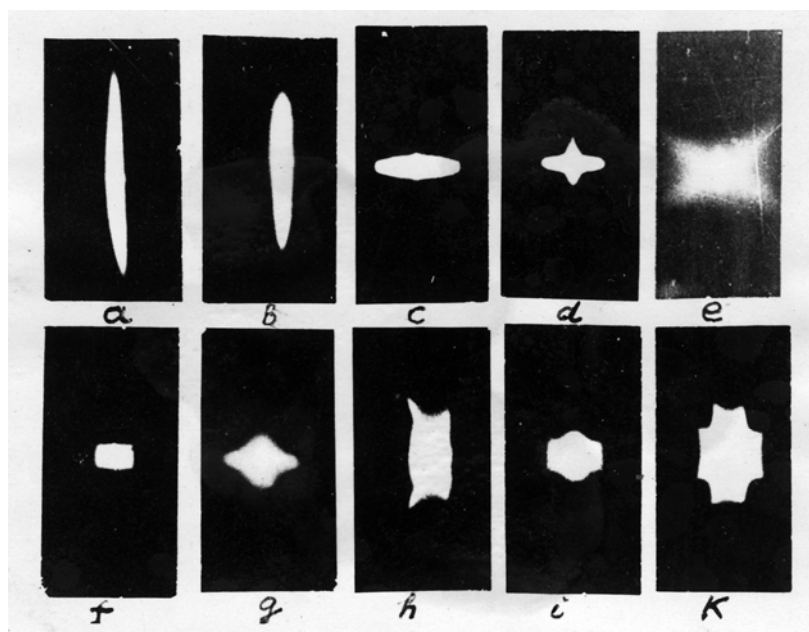


Рис. 17. Фотографии поперечного сечения пучка вблизи различных резонансов:
 а) $Q_r=2/3$, б) $Q_r=3/4$, в) $Q_z=3/4$, д) $Q_z=3/4$ и $3Q_r-2Q_s=2$, е) $2Q_r+Q_z=2$,
 ф) $2Q_r+Q_z-Q_s=2$, г) $Q_z=5/6$, h) $Q_z+4Q_r=3$, и) $4Q_z+Q_r=4$, к) $4Q_z+Q_r=4$ и $Q_z+4Q_r=3$

С помощью пучка было произведено изучение магнитной системы, измерены квадратичная и кубическая нелинейности, основным источником которых были щели для вывода рассеянных электронов. Это позволило определить резонансные гармоники и провести оценки силы основных резонансов. В частности, были измерены и сравнены с расчетом параметры области бетатронной автофазировки: частоты фазового движения, ширины этой области и времени жизни частиц в ней (Рис.18). Изучен характер движения частиц на суммовых и разностных резонансах. Было исследовано влияние синхротронных

колебаний на динамику бетатронного движения. Впервые было показано, что синхробетатронные резонансы расширяют область действия нелинейных резонансов.

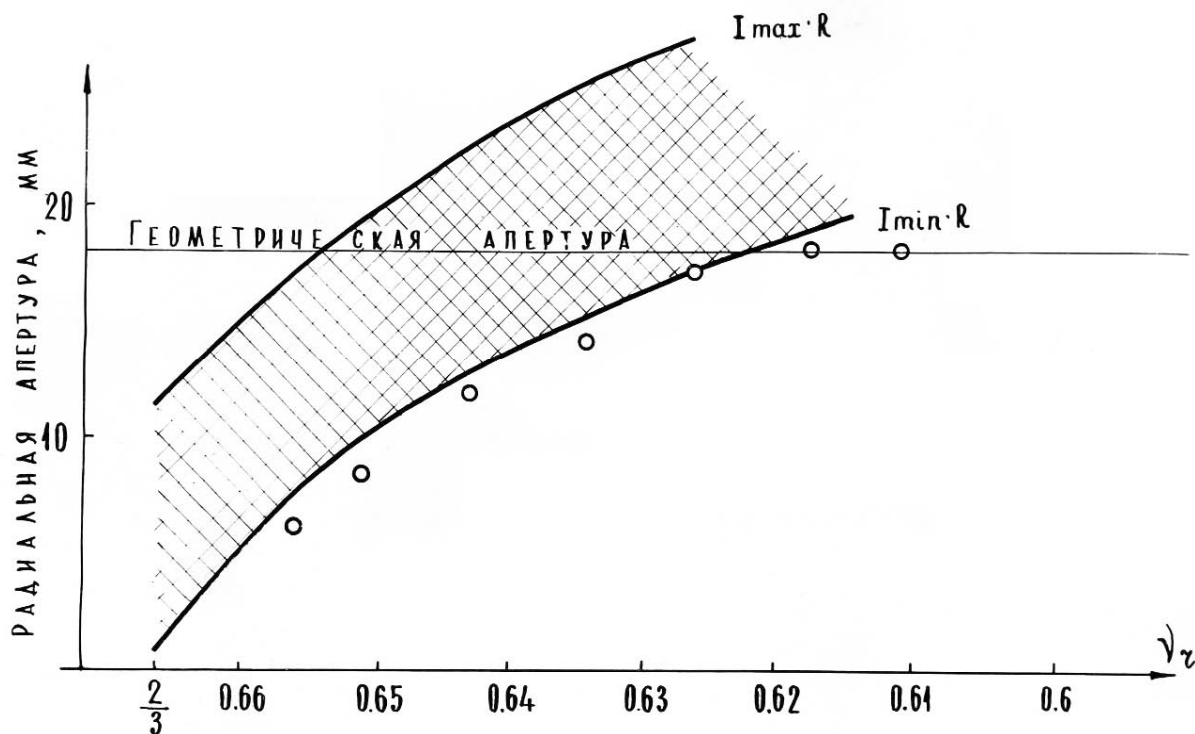


Рис.18. Область бетатронной автофазировки (заштриховано), связанная резонансу $3Q_r=2$ в зависимости от частоты радиальных бетатронных колебаний (расчет). Нижняя граница области соответствует максимальной допустимой амплитуде, т.е. определяет динамическую (магнитную) апертуру. Можно видеть хорошее совпадение измеренного значения динамической апертуры с расчетом.

Из воспоминаний Г.Н. Кулипанова:

На одном из институтских семинаров, где Б.В. Чириков подробно рассказывал о нелинейных резонансах и стохастической неустойчивости, я осознал, что для изучения нелинейного резонанса как явления, электронный пучок в накопителе – идеальная модель, учитывая следующее:

- добротность электронного пучка в накопителе ВЭП-1 как осциллятора составляет $\sim 10^8$;
- магнитная система накопителя позволяет иметь большую и регулируемую величину кубической нелинейности;
- специальная система внешнего резонансного высокочастотного возбуждения (созданная и используемая нами для измерения частот бетатронных колебаний) позволяла возбуждать нелинейный резонанс при любой частоте бетатронных колебаний, не ограничивая себя только естественными «машиными» резонансами;
- изменяя амплитуду высокочастотной раскачки и величину кубической нелинейности, можно легко изменять параметры нелинейного резонанса: частоту фазовых колебаний и размер области автофазировки.

Кроме того, используя вторую внешнюю резонансную высокочастотную раскачку можно исследовать взаимодействие пары резонансов в большом диапазоне их взаимного расстояния и отношения размеров областей автофазировки и тем самым в «настоящих экспериментах» проверить «критерий Чирикова». Достаточно легко можно было вводить также частотную модуляцию ВЧ напряжения, используемого для возбуждения

нелинейного резонанса, что при изменении величины девиации и частоты модуляции моделировало бы периодическое прохождение нелинейного резонанса.

Пучок электронов, представляющий собой ансамбль высокодобротных осцилляторов, совершающих колебания в нелинейной потенциальной яме, действительно оказался объектом, позволившим выполнить исследования по изучению условий перехода регулярного колебательного движения в стохастическое. Изучалось воздействие на такой осциллятор периодических возмущений, близких к его частоте вертикальных бетатронных колебаний (85МГц). Это воздействие было модулировано частотой, лежащей в диапазоне частот фазовых колебаний(0-60кГц) в области бетатронной автофазировки (ОБА) при глубине модуляции до 200кГц. С помощью диссектора и ФЭУ со щелевой диафрагмой наблюдалось поведение пучка. Интерес представляло распределение плотности в поперечном сечении и наличие или отсутствие регулярного движения. Получены интересные результаты, демонстрирующие в зависимости от частоты и глубины модуляции переход из области регулярного движения частиц в область стохастичности (рис.19). Эксперимент подтвердил правильность известных теоретических исследований, выполненных Б.В.Чириковым.

Эксперименты по исследованию нелинейных резонансов и «эффектов встречи» часто проводились параллельно с командой ВЭПП-2, многие печатные работы были основаны на совместных исследованиях, в которых принимали участие со стороны ВЭПП-2 В.Л. Ауслендер, Н.С. Диканский, С.И. Мишнев, Ю.М. Шатунов. Это были пионерские работы, доложенные и опубликованные в трудах международных совещаний и конференций, но, к сожалению, не опубликованные в цитируемых журналах и поэтому мало известные. Правда, следует заметить, все препринты ИЯФ, описывающие эти эксперименты, были переведены на английский язык в SLAC и FERMILAB, и эти переводы доступны в библиотеках и в настоящее время.

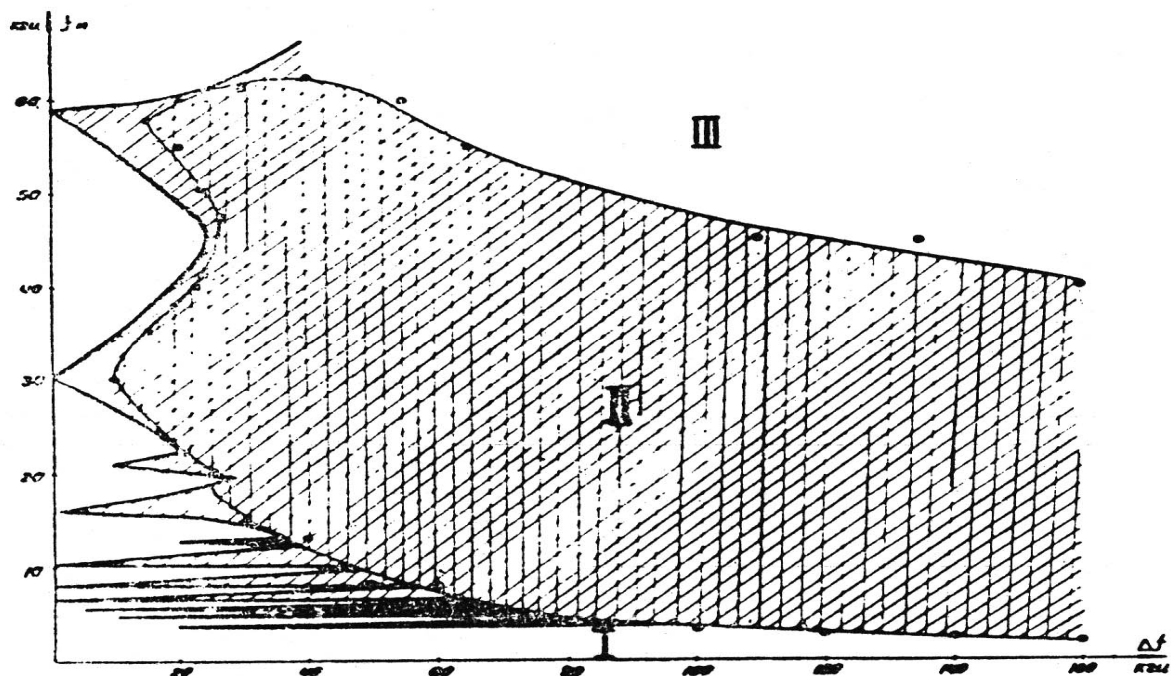


Рис.19. Диаграмма устойчивости движения при периодическом прохождении резонанса (при частоте малых фазовых колебаний в ОБА 36кГц) в зависимости от частоты модуляции и глубины модуляции. Наблюдались разные области движения: I-медленное (адиабатическое) прохождение резонанса, II-стохастическая область (дважды заштрихованная область-полное разрушение ОБА, ординарно-частичное разрушение ОБА), III-модуляционные резонансы (аналог синхробетатронным).

О когерентных неустойчивостях. На ВЭП-1 и синхротроне Б-2С наблюдалась продольная неустойчивость. К этому времени в литературе появились первые сообщения о такой неустойчивости и возможности подавления её перестройкой частоты резонатора в сторону низких частот. Подавить неустойчивость удалось соответствующей перестройкой резонатора и генератора. Поперечные неустойчивости на ВЭП-1 не наблюдались. По-видимому, это связано с малым количеством частиц в сгустке ($5 \cdot 10^9$) и большой кубичной нелинейностью. Следует также вспомнить об изучении коллективных явлений в синхротроне Б-2С в квазибетатронном режиме. Наблюдаемая в определенных условиях неустойчивость исследовалась Г.Кулипановым и была интерпретирована как двух-поточковая (диокотронная) неустойчивость.



За истекшие несколько десятков лет произошел огромный прогресс в изучении нелинейных явлений и коллективных эффектов. Нынешнее поколение физиков-ускорительщиков с высокой надежностью может просчитать и предсказать всю динамику частиц в циклических ускорителях и кол-лайдерах. И бурное развитие всей этой богатой физики началось с первых коллайдеров, к числу которых относится и ВЭП-1 (Рис.20).

Рис. 20. ВЭП-1 теперь историческая реликвия. Участники запуска (слева направо) Г.Н.Кулипанов, С.Г.Попов, А.Н.Скринский, Г.М.Тумайкин.

Заключение.

Из воспоминаний А.Н.Скринского:

«Привезя в пустой недостроенный зал никогда не работавшее оборудование, потребовавшее самых радикальных усовершенствований, сумели в 1965 году - менее чем за три года - получить первые экспериментальные результаты по электронному рассеянию. При этом был разработан, создан и «оживлен» принципиально новый ускорительный комплекс, гораздо более сложный, чем все существовавшие где-либо до того времени. И экспериментальные результаты по физике элементарных частиц были получены на нем в те же сроки, что и в Стэнфорде». А.Н.Скринский. «Академик Г.И.Будкер. Очерки и воспоминания».

На ВЭП-1 прежде всего была показана принципиальная возможность постановки значимых экспериментов по физике элементарных частиц на встречных пучках. Были сделаны первые шаги в пучковой физике и методике. ВЭП-1 стал хорошей школой для физиков-ускорительщиков и инженеров. Опыт, полученный на этом первом коллайдере, сыграл важную роль в дальнейшем развитии метода встречных пучков.

В создании комплекса ВЭП-1, его запуске и постановке экспериментов принимал участие большой коллектив физиков, инженеров и лаборантов. Непросто через 50 лет вспомнить всех участников работы. В первую очередь это были физики и инженеры старшего поколения: Г.И.Будкер, А.А.Наумов, Ерозолимский и В.С.Панасюк, сыгравший

важную роль в создании ускоряющих ВЧ систем, Е.С.Миронов, Г.А.Блинов, разработчик вакуумных систем. Следует вспомнить и Е.Абрамяна, создавшего бетатрон Б-2, послуживший базой для создания первого синхротрона. Конструкторскими работами в Москве руководил И.Бендер. Далее назовем московскую команду физиков и инженеров, принявших на разных этапах участие в создании и запуске комплекса ВЭП-1. Это: Л.Бондаренко, А.Кадымов, оставшиеся в Москве, и продолжившие эту работу в Новосибирске А.Скринский, С.Попов, Л.Коробейников, Г.Сильвестров, Ю.Матвеев, Г.Острейко, Вал.Петров. В Новосибирске к работе подключились С.Мишнев, Г.Тумайкин, Б.Кудинов, Г.Кулипанов, Т.Всеволожская, Э.Зинин, А.Киселёв, Б.Лазаренко, Ю.Украинцев, В.Пакин, Л.Данилов, Д.Весновский, И.Кесельман, Б.Баянов, А.Медведко и др. В этом перечне не названа другая часть команды физиков и инженеров, создававшая системы регистрации и участвующая наравне с ускорительщиками в постановке первых экспериментов на встречных пучках.

Литература.

1. *В.Н.Байер, Г.А.Блинов, Л.Н.Бондаренко, Г.И.Будкер, Б.Г.Ерозолимский, Л.С.Корбейников, Е.С.Миронов, А.А.Наумов, А.П.Онучин, В.С.Панасюк, С.Г.Попов, В.А.Сидоров, Г.И.Сильвестров, А.Н.Скринский, А.Г.Хабахнашев.* Встречные электрон-электронные пучки. Труды Междунар. конф. по ускорителям, Дубна, 1963. Атомиздат, 1964, с.274.
2. *Г.И.Будкер, Н.А.Кушниренко, А.А.Наумов, А.П.Онучин, С.Г.Попов, В.А.Сидоров, А.Н.Скринский, Г.М.Тумайкин.* Состояние работ на электрон-электронном накопителе ВЭП-1. Атомная энергия, 1965, **19**, № 6, с.497.
3. *В.Л.Ауслендер, Л.С.Коробейников, Г.Н.Кулипанов, С.И.Мишнев, С.Г.Попов, А.Н.Скринский, Г.М.Тумайкин, Ю.М.Шатунов.* Проявление нелинейных резонансов в накопителях. Атомная энергия, 1967, **22**, №3, с.179.
4. *В.Л. Ауслендер, Э.И.Зинин, Г.Н.Кулипанов, С.И.Мишнев, С.Г.Попов, А.Н.Скринский, Г.М.Тумайкин, Ю.М.Шатунов.* Время жизни и размеры электронного (позитронного) пучка в накопителе при малом токе. Там же. стр.200-206.
5. *В.Л. Ауслендер, Г.Н.Кулипанов, С.И.Мишнев, А.А.Наумов, С.Г.Попов, А.Н.Скринский, Г.М.Тумайкин.* Экспериментальные данные по взаимодействию пучков при встрече. Атомная энергия, 1966, **20**, №3, с.213.
6. *Э.И.Зинин, Л.С.Коробейников, Г.Н.Кулипанов, Б.Л.Лазаренко, Ю.Г.Матвеев, С.Г.Попов, А.Н.Скринский, Т.П.Стародубцева, Г.М.Тумайкин.* Система управления и контроля параметров электронных пучков в электрон-электронном накопителе ВЭП-1. Там же. стр 220.
7. *Г.Н.Кулипанов, С.И.Мишнев, А.Н.Скринский.* Изучение стохастической неустойчивости пучка при периодическом прохождении резонанса бетатронных колебаний. Труды Междунар. конф. по ускорителям, Ереван, 1969, Атомиздат, 1970, т.2. стр.300.
8. *Н.С.Диканский, Г.Н.Кулипанов, Б.А.Лазаренко, С.И.Мишнев, С.Г.Попов.* Изучение прохождения частиц через область автофазировки бетатронных колебаний за счет радиационного затухания. Там же. стр.308.
9. *С.Г.Попов.* Синхротрон Б-2С – инжектор электронов в установку со встречными пучками ВЭП-1. Диссертация на соискание уч. степ. канд. физ.-мат. наук, Новосибирск, 1964.
9. *Г.М.Тумайкин.* Изучение поведения электронного пучка в накопителе ВЭП-1. Диссертация на соискание уч. степ. канд. физ.-мат. наук, Новосибирск, 1967.
10. *Г.Н.Кулипанов.* Экспериментальное исследование нелинейных резонансов. Диссертация на соискание уч. степ. канд. физ.-мат. наук, Новосибирск, 1969.

II. ДЕТЕКТОРЫ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ВЭП-1.

О начале работы в ИЯФ и экспериментах на ВЭП-1 вспоминает Алексей Павлович Онучин:

Начало работы в ИЯФ

Зимой 1957 года Андрей Михайлович Будкер на семинаре в МГУ рассказал, что он организует Институт ядерной физики в Новосибирске, где будут заниматься экспериментами на встречных пучках. Я в это время находился на дипломной практике в ФИАНе, в лаборатории П.А. Черенкова. Программа Будкера меня очень заинтересовала. Я прошел собеседование и был принят на работу.

1 марта 1959 г. я впервые вошел в ИЯФ, который находился на территории Института атомной энергии (теперь Курчатовский институт). Меня встретил Борис Григорьевич Ерозолимский. Он рассказал, что идет производство накопителя ВЭП-1 в Новосибирске и детектора на заводе в Москве, а на ускорителе Б-2 — инжекторе накопителя круглосуточно ведутся работы. Он также рассказал, что у нас есть сильный конкурент в США, где начато сооружение аналогичной установки. Тогда же состоялась моя первая встреча с Андреем Михайловичем и заместителем директора Алексеем Александровичем Наумовым. В запуске ускорителя Б-2 были заняты мои однокурсники Саша Скринский и Стас Попов.

Я начал изучать проект детектора на ВЭП-1. Когда я стал рассчитывать скорость счета событий, встал вопрос, какой будет ток в накопителе. Борис Григорьевич отправил меня к Будкеру. Подумав, Андрей Михайлович сказал, что ток может быть 100 ампер.

В 1959 году в ИЯФ произошло важное событие - рождение идеи встречных электрон-позитронных пучков. Я в то время сидел в одной комнате с В.Н. Байером. У Андрея Михайловича была встреча с известным теоретиком Померанчуком. После встречи Андрей Михайлович зашел к нам и сказал, что не понимает, почему Померанчука не заинтересовала наша работа по ВЭП-1. На что Байер сказал, что на электрон-электронных пучках можно только квантовую электродинамику проверять, а вот если бы были позитрон-электронные пучки... Вот с этого все и началось. Начались работы по созданию комплекса ВЭПП-2.

Детектор на ВЭП-1 состоял из пар цилиндрических счетчиков, включенных на совпадение, и был предназначен для измерения углового распределения электрон-электронного рассеяния в диапазоне углов $40^\circ - 90^\circ$. Диаметр счетчиков был 2 см, а размер места встречи 3 см. Я понял, что поправки в угловом распределении электрон-электронного рассеяния будут содержать большие систематические ошибки и рассказал об этом Борису Григорьевичу. Необходимо было разобраться.

В это время у нас появился Алексей Георгиевич Хабахпашев. Он участвовал в Великой Отечественной войне, был кандидатом наук. Он сказал, что о встречных пучках ничего не знает и попросил меня ввести его в курс работ. У нас установились очень приятные отношения. Постепенно мы дошли до проблемы, связанной с размерами счетчиков. Появился такой вариант детектора: у одного счетчика размер 6 см, а у другого - 9 см. Это были черенковские счетчики из оргстекла (пластические сцинтилляторы тогда еще не производились).

Прототип счетчиков мы испытали в лаборатории, где я делал диплом. По результатам расчетов и испытаний была опубликована статья. Конструкторское бюро разработало проект детектора. Он представлял собой круговой рельс, на котором устанавливались счетчики. Схемы совпадений и электронику сбора информации сделали на заводе в Москве.

Так появился второй вариант детектора. Он был изготовлен и собран на ВЭП-1 в Москве, а позже перевезен в Новосибирск. При изготовлении детектора с нами вместе начали работать лаборанты В.Н. Баяев, А. Роцин, В. Ободзинский и В. Целуйкин.

Переезд в Новосибирск

12 апреля 1961 года, когда Гагарин полетел в космос, я приехал в Новосибирск. С особой теплотой я вспоминаю замдиректора Александра Абрамовича Нежсевича. До ИЯФ он работал директором Турбогенераторного завода. В ИЯФ он создал мастерские, конструкторское

бюро и все службы института. Особенно внимательно он относился к физикам. В цехе работал экспресс-участок - такое в Москве нам и не снилось. Он помогал нам решать все возникающие проблемы.

Моим руководителем был Борис Валерьянович Чириков. Он переехал сюда годом раньше, читал оригинальный курс физики в НГУ. Мы вместе с ним занимались схемой расположения установки ВЭПП-2 в защищенном зале. Он несколько раз мне говорил, что ему не хочется заниматься ВЭПП-2 - это большое сложное инженерное сооружение.

Вскоре приехал второй детекторщик - Кушниренко Женя, появились радиоинженер Мелехов Герман, лаборанты Яковлев Володя и Белавин Аркадий.

Андрей Михайлович, который часто наезжал в Новосибирск, в один из приездов сказал, что нашел для меня заведующего лабораторией. Он получил хорошие результаты по спектрокопии нейтронов, работал в Институте имени Нильса Бора в Копенгагене, скоро защитит кандидатскую диссертацию. Речь шла о Вениамине Александровиче Сидорове. Через некоторое время Сидоров приехал, все посмотрел и сказал, что ему здесь нравится.

Потом была целая эпопея с перевозом ВЭП-1 в Новосибирск.

В начале 1962 года ИЯФ полностью переехал в Новосибирск. Были созданы лаборатория № 14 Скринского для работ по коллайдерам ВЭП-1 и ВЭПП-2 и лаборатория № 3 Сидорова для работ по детекторам для ВЭП-1 и ВЭПП-2.

Переехав в Новосибирск, Сидоров сразу же сделал очень важное предложение — использовать в детекторах искровые камеры. Они были открыты в 1959 году и начали входить в эксперименты. Кушниренко и Пестов стали заниматься искровыми камерами, сделали прототип искровой камеры, на которой очень эффективно регистрировались космические частицы.

Алексей Георгиевич и я занялись пластическими сцинтилляционными счетчиками больших размеров. По договору с МЭЛЗом разработали ФЭУ с торовидными динадами ФЭУ-30, ФЭУ-60 и ФЭУ-65 с диаметром фотокатода 5, 10 и 15 см. Сделали счетчики с размером сцинтиллятора 20×20 см. Было принято решение, что для ВЭПП-2 триггером занимается Хабзпашев, искровыми камерами — Пестов, а для ВЭП-1 триггером занимаюсь я, искровыми камерами — Кушниренко. Так появился третий вариант детектора для ВЭП-1, с которым и был проведен эксперимент по проверке КЭД.

Особо хочу отметить, что с самого начала Сидоров стремился к тому, чтобы в лаборатории была мощная радиогруппа. Из Москвы переехали Ю.В. Коршунов и В. Степанов. Здесь появились Н.П. Тумайкина, позже - С.Е. Бару, В.И. Фоминых, В.М. Аульченко, Г.А. Савинов и другие.

Эксперименты на ВЭП-1

Работы по монтажу и запуску ВЭП-1 велись в высоком темпе. Начались эксперименты по инжекции в ВЭП-1. Эти эксперименты привели нашу команду в уныние. Особенно неожиданным оказался эффект гибели пучков при их сведении. Появился загадочный термин «эффекты встречи». Даже стали говорить, что основные работы на встречных пучках будут посвящены исследованию неустойчивостей аналогично тому, как это было в термояде. Однако, здесь проблемы оказались проще. Измерения показали, что при малых токах пучки не гибнут и можно иметь токи до 30 мА, когда эффекты встречи еще не работают. Да... это не 100 А, что было в оценках в Москве...

К счастью, из расчетов следовало, что и при таких токах в эксперименте по проверке квантовой электродинамики можно получить значимый результат. Но нужно было найти решение, каким образом настраивать положение пучков по радиусу, по вертикали и по фазе, выбирать оптимальные токи. Необходим был монитор с большой скоростью счета. И тогда родилась идея — поставить счетчики около орбиты. Сделали проект системы «счетчики под малыми углами». Сечение регистрации у этих счетчиков было в тысячу раз больше, чем у основного детектора. Был изготовлен один счетчик, измерения с которым показали обнадеживающий уровень фона. Быстро были изготовлены все счетчики, схемы совпадений и электроника сбора данных. Началась круглосуточная работа с пучками.



Рис. 1: А.П. Онучин и В.А. Сидоров обрабатывают результаты эксперимента на ВЭП-1: делят число событий рассеяния на малые углы на куламы (кулон-амперы).

*И вот в ночную смену 19 мая 1964 года была зарегистрирована первая светимость!!!
Это был триумфальный этап большой работы ИЯФ!*

В 1965 году у нас произошло редкое в отечественной науке событие - по работам на ВЭП-1 и ВЭПП-2 А.Н. Скринский защитил докторскую диссертацию без защиты кандидатской диссертации!

На ВЭП-1 начались физические эксперименты с искровыми камерами. Именно тогда мы впервые наблюдали двойное тормозное излучение. С помощью этого процесса и рассеяния на малые углы стали надежно измерять светимость. По результатам этих экспериментов в 1966 г. я защитил кандидатскую диссертацию. На защите Сидоров сказал, что это первая диссертация по физике частиц, выполненная методом встречных пучков.

В экспериментах с искровыми камерами были проведены измерения электрон-электронного рассеяния при энергии 43, 135 и 160 МэВ в пучке. Было получено, что КЭД справедлива до расстояния $5 \cdot 10^{-14}$ см. На основе этих экспериментов в 1967 г. Кушниренко защитил кандидатскую диссертацию.

Одновременно с экспериментом на искровых камерах был впервые исследован подробно процесс двойного тормозного излучения и впервые исследован процесс однократного тормозного излучения с регистрацией рассеянных электронов на малый или на большой угол. Для сравнения экспериментального спектра гамма-квантов с теоретическим на ВЭП-1 в месте встречи был получен пучок меченых монохроматических гамма-квантов. Результаты экспериментов подтвердили теорию Байера-Фадина-Хозе.

В 1967 за успехи, достигнутые в работах на ВЭП-1 и ВЭПП-2, А.М. Буджер, А.А. Наумов, В.С. Панасюк, В.А. Сидоров и А.Н. Скринский были награждены Ленинской премией. В этом же году, когда успешно заканчивались эксперименты на ВЭП-1, на ВЭПП-2 впервые в мире на встречных пучках был исследован процесс сильного взаимодействия — зарегистрирован ρ -мезон и измерены его параметры! Это был период мирового признания наших работ. В 1968 году В.А. Сидоров и А.Н. Скринский избираются член-корреспондентами АН СССР.

Эксперименты на ВЭП-1 проводились под руководством В.А. Сидорова. На ВЭП-1 были исследованы следующие процессы: рассеяние электронов на большие и малые углы, двойное тормозное излучение, однократное тормозное излучение, а также получен пучок монохроматических гамма-квантов, изучен режим сверхтонкой мишени в накопителе, исследованы параметры счетчика полного поглощения типа сэндвич, создан магнитный парный спектрометр высокой эффективности.

Эксперименты проводились при трех значениях энергии коллайдера ВЭП-1: 43, 135 и 160 МэВ. Типичные значения токов были 10-20 мА, светимость — $(1-5) \cdot 10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$. Поперечные размеры пучков были 1 мм и 3 мм в вертикальном и радиальном направлении, соответственно. Продольный размер был около 5 см. Время жизни составляло 10-15 минут, частота обращения пучков — 116 МГц.

1. Рассеяние электронов на большие углы

Главной целью экспериментов на ВЭП-1, кроме реализации метода встречных пучков, была проверка квантовой электродинамики при больших передачах импульса, ~ 0.2 ГэВ. Классически это соответствовало проверке закона Кулона на расстоянии менее 10^{-13} см, то есть, меньше размера нуклона. Сечение e^-e^- рассеяния на большие углы в квантовой электродинамике (КЭД) описывается формулой Меллера. При расчете сечения модифицируется фотонный пропагатор $1/q^2 \rightarrow 1/q^2 \cdot 1/(1 - \Lambda^2 \cdot q^2)$, что позволяет установить верхний предел на параметр нарушения Λ , который является мерой чувствительности эксперимента к возможному нарушению КЭД.

Вспоминает Е.В.Пахтусова:

Вглядываясь во времена начала экспериментов на встречных пучках в нашем Институте, понимаешь, как давно все это было, как сильно изменилась среда физического эксперимента, как сейчас трудно понять молодым, в каких условиях проводились исследования и как было сложно получать результаты мирового значения при таком низком уровне автоматизации, при практическом отсутствии математического обеспечения и весьма ограниченных компьютерных мощностях.

Подготовку и проведение экспериментов возглавил В.А.Сидоров, которому едва исполнилось 30 лет. С самого начала было принято направление на максимальную автоматизацию эксперимента, позволяющую получать надежные результаты. Для этой цели В.А.Сидоровым была создана в лаборатории группа радиоинженеров, обеспечивающая эксперименты необходимой электроникой, был построен свой вычислительный центр. Следует отметить, что принципы и подходы, заложенные В.А.Сидоровым в те времена при проведении экспериментов, в основном, остались те же, что и сейчас, но сейчас это, естественно, осуществляются на более высоком технологическом уровне.

В проведении экспериментов участвовало большое количество техников и лаборантов, инженеров и физиков. Перечислить всех здесь невозможно, можно лишь выразить благодарность всем этим людям за их труд, принесший нашему Институту славу первопроходцев на трудном пути освоения тайн мироздания.

Уже много написано о технической стороне проведенных экспериментов, поэтому здесь мне хочется вспомнить о людях, с которыми мне довелось работать в те давние времена, и результаты труда которых сейчас составляют историю и гордость нашего Института.

Еще будучи студенткой, однажды я пришла в Институт и увидела в комнате стоящего у доски улыбающегося высокого красивого молодого человека. Рядом с ним, у стенки, стояли рюкзак и гитара. Это был Кушниренко Женя, выпускник МИФИ.

Он, еще не определившись с местом жительства, только что с вокзала, появился в Институте полный желания включиться в работу.

Первым экспериментом в Институте на установке ВЭП-1 была проверка квантовой электродинамики на малых расстояниях. Эта работа требовала новых подходов в проведении эксперимента, и ее возглавил Женя Кушниренко. Успешное проведение этого эксперимента и аналогичных экспериментов в США положили начало эпохе встречных пучков, приведших к глобальным изменениям наших знаний о физике элементарных частиц.

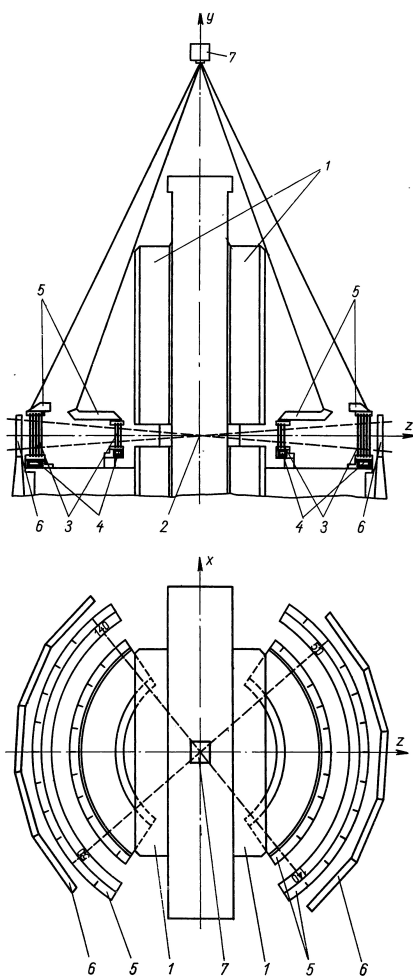


Рис. 2: Детектор для ВЭП-1. 1 — магнит накопителя; 2 — место встречи; 3 — искровые камеры; 4 — зеркала; 5 — призмы; 6 — сцинтилляционные счетчики; 7 — фотокамера.

Детектор представлял собой несколько цилиндрических секторов оптических искровых камер и сцинтилляционных счетчиков, расположенных в горизонтальной плоскости (рис. 2). Сцинтиллятор в счетчиках был на основе полистирола. В качестве фотодетектора использовался ФЭУ-30, разработанный совместно ИЯФом и МЭЛЗом. Искровая камера представляла собой плоский или цилиндрический зазор, заполненный гелием. Во время прохождения частицы, сцинтилляционные счетчики давали сигнал триггера. Последующий генератор вырабатывал высоковольтный импульс амплитудой в десятки киловольт, который подавался на пластины камеры. Пробой в виде яркой искры наблюдался вдоль трека частицы и с помощью сложной системы зеркал передавался на фотокамеру РФК-5, расположенную сверху над всей системой. Оптическая система

позволяла получать информацию об азимутальной и вертикальной координате искры и, соответственно, рассеянного электрона. Скорость счета запусков составляла около 0.1 Гц. Всего было записано около 100 тыс. событий.

Фоновые условия на ВЭП-1 были достаточно тяжелыми и по современным меркам. Частота обращения пучков составляла 116 МГц, загрузки систем детектора были до ста килogerц. Поэтому электроника должна была быть достаточно быстродействующей. В то время в жизнь широко входили транзисторы, но было также достаточно много громоздких ламповых приборов. Стоит упомянуть знаменитый в то время многоканальный анализатор АИ-1000 (Радуга) высотой 2 метра и шириной 1 метр. Очень красиво выглядели пересчетки на декатронах («Волна»). Широко использовались высоковольтные источники для питания ФЭУ ВС-22. Такие устройства как дискриминаторы, схемы совпадений, пересчетки уже разрабатывались радиогруппой в лаб. 3 и производились в ИЯФ. Для их производства применялись высокочастотные транзисторы, поэтому быстродействие зачастую составляло уже сотни мегагерц.

Пленки с записями искр в камерах после проявления просматривались на специальном просмотрном аппарате и данные о треках переносились на перфоленту. Это делало возможным извлечение координат и углов треков рассеянных электронов и обработку информации на компьютере, сначала на вычислительном центре (ВЦ СО АН), а в дальнейшем на ЭВМ МИНСК-22 в ИЯФ. При обработке снимков выделялись коллинеарные e^-e^- события (условия отбора показаны на рис. 3).

Обработкой эксперимента занимались В.А. Сидоров, Е.В. Пахтусова и Е.А. Кушнirenко. По отобраннным событиям было получено угловое распределение по полярному углу (рис. 4), из которого и был получен предел $1/\Lambda > 0.4$ ГэВ. Таким образом, квантовая электродинамика была проверена до расстояний 0.5 ферми.

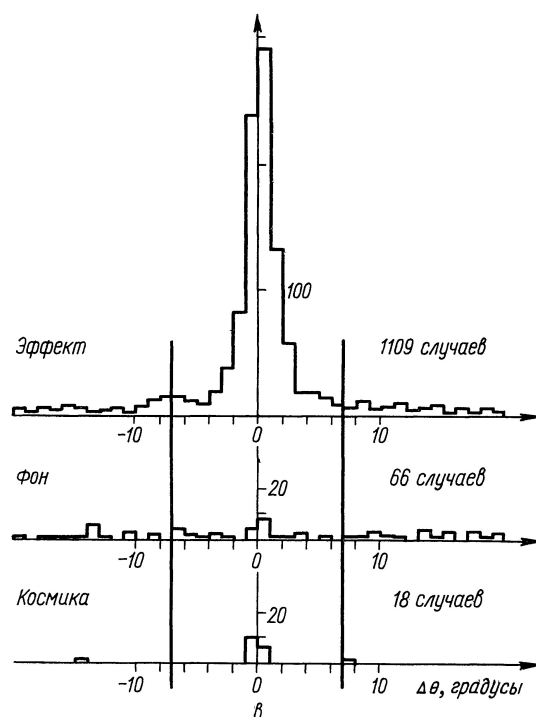


Рис. 3: Распределение по расколлинеарности e^-e^- событий на ВЭП-1.

В Стэнфорде при энергии $E_{CM}=600$ МэВ одновременно с нашим результатом был получен предел 0.26 ферми. Отметим, что ВЭП-1 и коллайдер в Стэнфорде были первыми

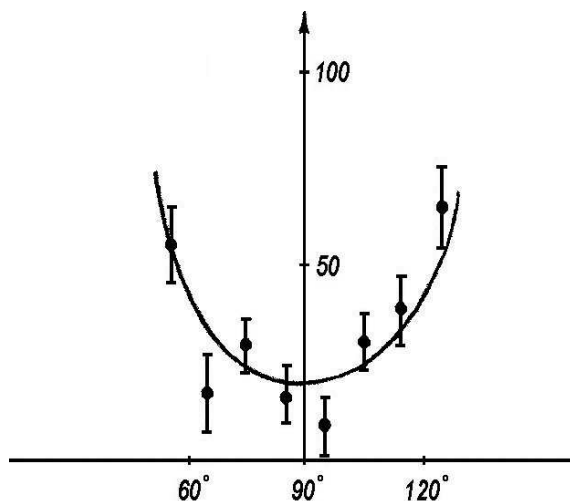


Рис. 4: Угловое распределение по полярному углу e^-e^- событий на ВЭП-1.

установками, на которых проводились эксперименты по проверке квантовой электродинамики. Эти работы в Стэнфорде и Новосибирске внесли определяющий вклад как в развитие метода встречных пучков, так и в методику проведения физических экспериментов.

2. Рассеяние электронов на малые углы

Для мониторинга светимости использовался процесс e^-e^- рассеяния на малые углы. Система малых углов представляла собой маленькие сцинтилляционные счетчики, установленные очень близко к орбите электронов, на расстоянии $1/4$ длины бета-тронных колебаний между ними, и регистрировавшие процесс упругого электрон-электронного рассеяния на угол порядка 1.5° (рис. 5). Скорость счета процесса составляла около 10 Гц. Систематическая ошибка измерения светимости оценивалась на уровне 10-20%.

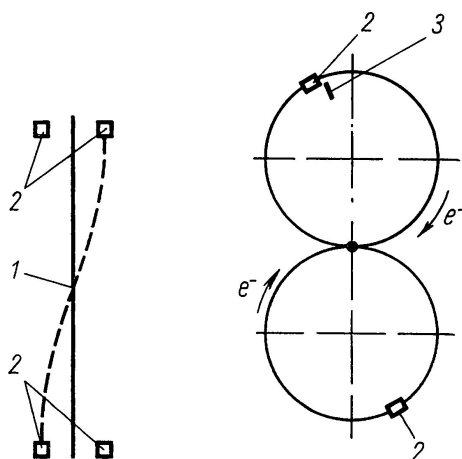


Рис. 5: Расположение счетчиков под малыми углами на ВЭП-1. 1 — траектория пучков, 2 — счетчики, 3 — защита от фона.

Сечение регистрации событий e^-e^- рассеяния у системы малых углов было в 2 тысячи раз больше, чем у системы регистрации рассеяния на большие углы. Система малых углов использовалась для настройки оптимального положения пучков в радиальном и аксиальном направлениях, а также положения пучков по фазе. Измерения показали, что основным фоновым процессом является рассеяние электронов на остаточном газе. Фон вычитался по методу задержанных совпадений. Разрешающее время схем совпадений составляло 3 нсек. Отношение эффект-фон было около 0.5. С помощью этой системы 19 мая 1964 года впервые была зарегистрирована светимость на ВЭП-1. В дальнейшем этот процесс использовался для измерения светимости в экспериментах по рассеянию на большие углы, двойному тормозному и однократному тормозному излучению.

Отметим что метод измерения светимости по рассеянию на малые углы впервые был применен на ВЭП-1 и в дальнейшем использовался на многих коллайдерах.

3. Двойное тормозное излучение

На ВЭП-1 впервые изучался процесс двойного тормозного излучения (ДТИ). Детектор состоял из двух сцинтилляционных кристаллов NaI(Tl) диаметром и высотой 15 см, расположенных по касательной к пучкам в месте встречи с противоположных сторон (рис. 6).

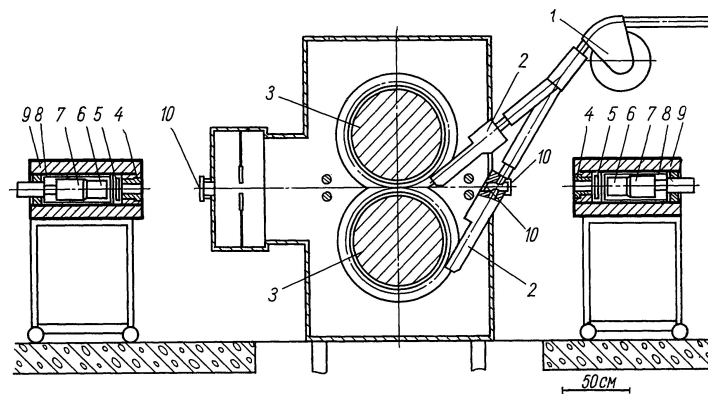


Рис. 6: Система счетчиков NaI(Tl) для двойного тормозного излучения на ВЭП-1. 1-3, 11-13 — элементы ускорителя, 4-10 — счетчики с кристаллами NaI(Tl).

Фон случайных совпадений определялся процессами однократного тормозного излучения (ОТИ) и тормозного излучения на остаточном газе. Фон вычитался методом задержанных совпадений. Были измерены энергетические спектры обоих фотонов в процессе ДТИ (рис. 7). Было измерено полное сечение, нормировка делалась по событиям рассеяния на большие углы. Результаты измерений находятся в согласии с теорией Байера-Фадина.

4. Тормозное излучение при рассеянии электронов

Стоит также отметить специальное измерение энергии радиационного фотона в e^-e^- рассеянии на малые или на большие углы (рис. 8). Этот фотон регистрировался счетчиками NaI(Tl) под нулевыми углами, предназначенными для измерения светимости по тормозному излучению.

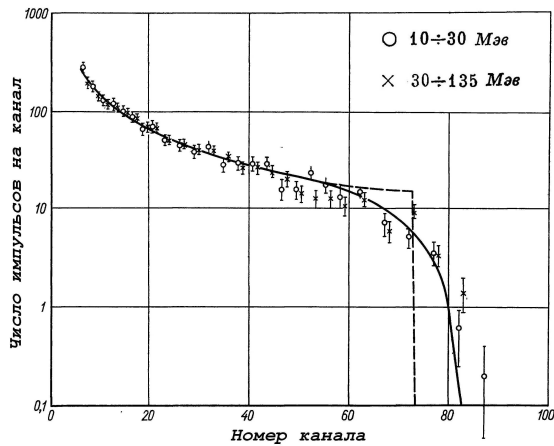


Рис. 7: Спектр двойного тормозного излучения на ВЭП-1.

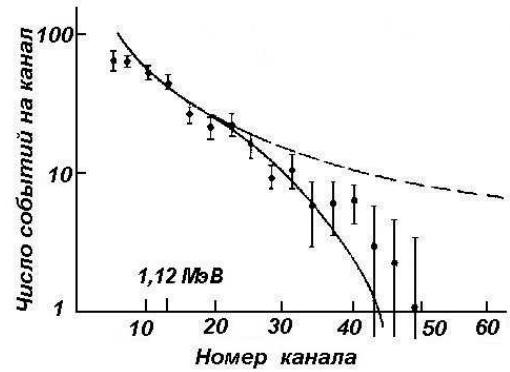


Рис. 8: Спектр мягких фотонов при e^-e^- рассеянии на ВЭП-1.

5. Методические работы

Отметим ряд методических работ, выполненных на ВЭП-1 и имеющих важное значение и сегодня. Так, на ВЭП-1 было осуществлено получение меченых фотонов. Для этого во внутренней части орбиты устанавливался сцинтилляционный счетчик для регистрации электрона отдачи в процессе тормозного излучения (см. рис. 9). Энергия квазимонохроматического фотона определялась радиусом орбиты электрона отдачи в магнитном поле. Мишенью для тормозного излучения была тонкая 5 мкм кварцевая нить, которая вводилась в вакуумную камеру. Орбита искажалась так, чтобы пучок гораздо большего размера проходил через нить. Расчетная ширина линии γ -квантов была менее 1%. Спектры фотонов (рис. 10) измерялись счетчиками NaI(Tl) под нулевыми углами. Измеренное разрешение и форма линии ограничивались размерами счетчика NaI(Tl). Время жизни пучка в такой геометрии было велико — около 2 минут. В современной терминологии — это близко к режиму сверхтонкой мишени, который впервые был предложен и опробован на ВЭП-1.

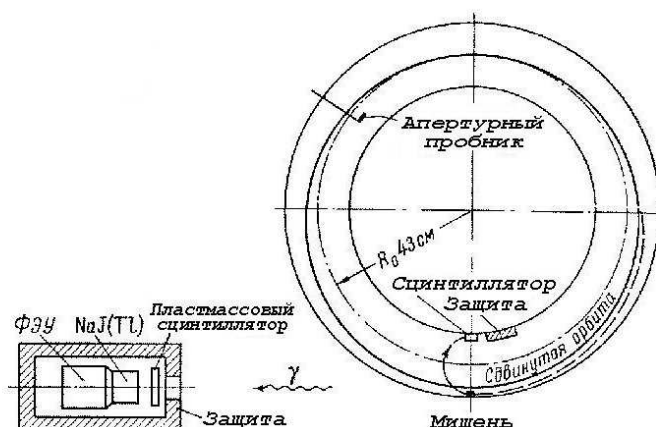


Рис. 9: Конфигурация установки для получения пучка монохроматических фотонов на ВЭП-1.

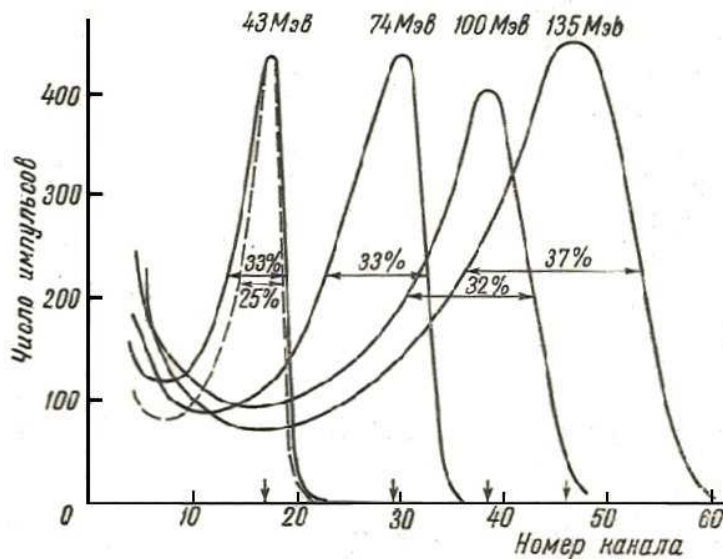


Рис. 10: Спектры монохроматических фотонов на ВЭП-1. Цифры на кривых указывают энергию γ -квантов.

Для более точного измерения энергии меченых фотонов был предложен и реализован парный магнитный спектрометр (рис. 11). Это был магнит размерами около 2 метров с большим зазором более 5 см и полем более 10 кГс. Фотоны конвертировались на входе спектрометра в пару электрон-позитрон. Энергия каждой частицы пары измерялась по кривизне трека в магнитном поле с помощью проволочных искровых камер, расположенных внутри магнита. Для улучшения разрешения в качестве конвертора использовался тонкий кристалл NaI(Tl). Кроме того, в прямом направлении также был установлен кристалл NaI(Tl) для измерения энергии дополнительных фотонов из конвертора. Эти меры позволили улучшить разрешение спектрометра до 1.5% при толщине мишени $0.014 X_0$ и 2.3% при $0.1 X_0$. Таким образом, на ВЭП-1 в реальном эксперименте были впервые опробованы проволочные камеры.

Для регистрации и измерения энергии фотонов в широком диапазоне углов был предложен и изготовлен многослойный сэндвич, состоящий из более 10 слоев сцинтиллятора и металла — меди, свинца. Была оптимизирована его структура, что позволило измерять энергии фотонов низких энергий. Техника сэндвичей получила дальнейшее развитие в детекторах на ВЭПП-2 и ВЭПП-2М.

Диссертации.

По результатам экспериментов на ВЭП-1 были защищены кандидатские диссертации А.П. Онучиным, Е.А. Кушниренко. Часть материалов ВЭП-1 вошла в докторскую диссертацию В.А. Сидорова.

Некоторые из участников экспериментов на ВЭП-1

Команда физиков-экспериментаторов на ВЭП-1 включала в себя следующих основных сотрудников: В.А. Сидоров, Г.И. Будкер, А.П. Онучин, А.Н. Скринский, Е.А. Кушниренко, Ю.Н. Пестов, С.Г. Попов, Е.В. Пахтусова (аспирант), П.И. Голубничий (аспирант), Л.М. Курдадзе (студент), Д.М. Николенко (студент), В.Е. Балакин (студент) и другие. Инженерное обеспечение по электронике и вычислительной технике поддерживали: Ю.В. Коршунов, Г.Г. Мелехов, К.Ф. Олзоев, Р. Фиштейн, Н. Тумайкина, В.М. По-

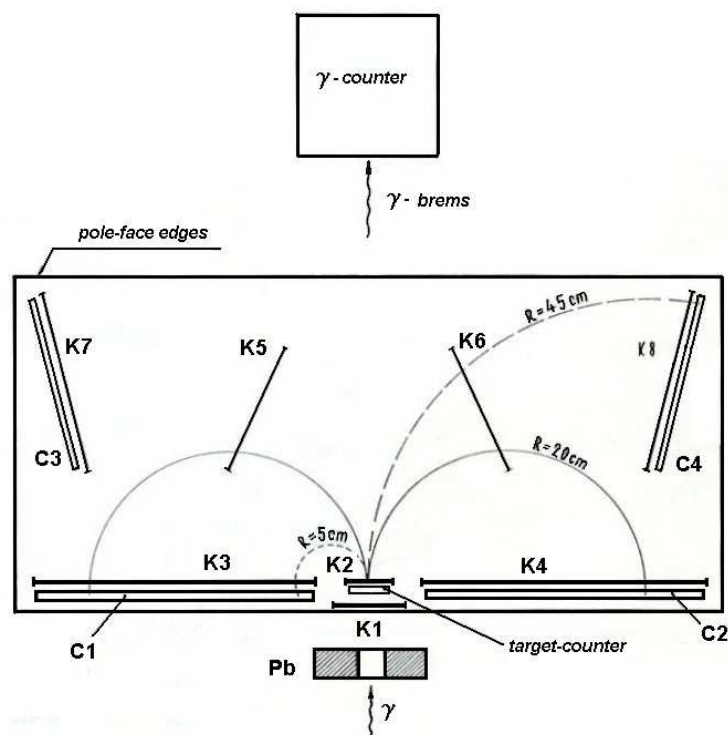


Рис. 11: Схема магнитного спектрометра на ВЭП-1. К1-К7 — проволочные камеры, С1-С4 — сцинтилляционные счетчики.

пов, А. Романов, С.Е. Бару, И.Г. Фельдман, Х. Протопопов, Р. Лебедев и другие. Конструкторами были Г.М. Колачев, А.И. Романчук, В. Зайцев. В команде лаборантов и механиков были В.Н. Баев, В. Целуйкин, А. Живалев, А.А. Белавин, В.А. Яковлев, Г.А. Савинов, В. Шохин, Г.Д. Минаков, М.Д. Минаков, А. Богатырев, А.Чуев, А.Е. Волков и другие. Просмотр фотопленок производился Г.Н. Бойко (Хлестовой), В.Г. Шленкиной, Г.Т. Шепель, Г.В. Щенниковой.

Результаты экспериментов на ВЭП-1 были опубликованы в журналах и в виде препринтов. Многие методики, впервые примененные на ВЭП-1, были использованы на ВЭПП-2 и следующих коллайдерах ИЯФ. А есть и такие, которые применяются и сегодня. К ним относятся: 1 — измерение светимости с помощью малоугловых процессов — рассеяния на малые углы, однократного тормозного излучения, двойного тормозного излучения, 2 — сверхтонкая мишень, 3 — методика проволочных камер (парный спектрометр). 4 — методика проволочных камер и сэндвичей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б.Г.Ерозолимский, А.П.Онучин, А.Г.Хабахпашев. Система регистрации ВЭП-1. Представлено на совещании по встречным пучкам. Харьков, 1962. Ч.2, с. 79-90.
2. Б.Г.Ерозолимский, А.П.Онучин, А.Г.Хабахпашев. О методических погрешностях в эксперименте на встречных пучках. ПТЭ, 1964, №1, с. 23.
3. В.Н.Байер, Г.А.Блинов, Г.А.Бондаренко, Г.И.Будкер, Б.Г.Ерозолимский, Л.С.Коробейников, Е.С.Миронов, А.А.Наумов, А.П.Онучин, В.С.Панасюк, С.Г.Попов, В.А.Сидоров, Г.И.Сильвестров, А.Н.Скринский, А.Г.Хабахпашев. Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна 1963 г., Атомиздат 1964, с. 275.
4. А.П.Онучин, С.Г.Попов, В.А.Сидоров, А.Н.Скринский. Фоновые условия наблюдения рассеяния на малый угол на установке ВЭП-1. Доклад на Всесоюзном совещании по новым методам ускорения, Новосибирск, 1964.

5. А.Г.Берковский, В.Г.Гусельников, А.П.Онучин. Фотоэлектронный умножитель с тороидальными эмитерами. ПТЭ, 1965, №5, с. 201.
6. Г.И. Будкер, Е.А. Кушниренко, А.А. Наумов, А.П. Онучин, С.Г. Попов, В.А. Сидоров, А.Н. Скринский, Г.М. Тумайкин. Состояние работ на электронном накопителе ВЭП-1. Атомная энергия, 1965, **19**, №6, с. 498.
7. П.И. Голубничий, А.П. Онучин, С.Г. Попов, В.А. Сидоров. Двойное тормозное излучение в рассеянии электронов при энергии 2×160 МэВ. Атомная энергия, 1967, **22**, с. 168.
8. Г.И. Будкер, Е.А. Кушниренко, А.А. Наумов, А.П. Онучин, С.Г. Попов, В.А. Сидоров, А.Н. Скринский, Г.М. Тумайкин. Рассеяние электронов на электронах при энергии 2×135 МэВ. Атомная энергия, 1967, **22**, с. 164.
9. В.Л. Ауслендер, С.И. Мишнев, А.П. Онучин, Е.В. Пахтусова, С.Г. Попов, В.А. Сидоров, А.Н. Скринский, А.Г. Хабахпашев. Контроль светимости установок со встречными пучками по рассеянию на малые углы. Атомная энергия, 1967 **22**, с. 176.
10. Л.С. Коробейников, Л.М. Курдадзе, А.П. Онучин, С.Г. Попов, Г.М.Тумайкин. Получение монохроматических γ -квантов на электронном накопителе. Ядерная физика, 1967, **6**, с. 84.
11. Г.И. Будкер, А.П. Онучин, С.Г. Попов, Г.М. Тумайкин. Эксперименты с мишенью в электронном накопителе. Ядерная физика, 1967, **6**, с. 775.
12. П.И. Голубничий, Е.А. Кушниренко, А.П. Онучин, Тормозное излучение в рассеянии электронов на электронах при энергии 2×160 МэВ. Ядерная физика, 1968 **7**, с. 1240.
12. Г.И. Будкер, Е.А. Кушниренко, Р.Л. Лебедев, А.А. Наумов, А.П. Онучин, С.Г. Попов, В.А. Сидоров, А.Н. Скринский, Г.М. Тумайкин. Проверка квантовой электродинамики в рассеянии электронов на электронах. Ядерная физика, 1967, **6**, с. 1221.
14. P.I. Golubnichy, L.M. Kurdadze, D.M. Nikolenko, A.P. Onuchin, S.G. Popov, V.A. Sidorov. High efficiency pair magnetic spectrometer. Nucl. Instr. Meth., 1969, **67**, с. 22.
15. А.П. Онучин. Измерение светимости установки со встречными электронными пучками. Диссертация к.ф.-м.н. Институт ядерной физики, Новосибирск, 1965 г.
16. Е.А. Кушниренко. Проверка применимости квантовой электродинамики в экспериментах по рассеянию электронов на электронах. Диссертация к.ф.-м.н. Институт ядерной физики, Новосибирск, 1967 г.

III. ВЭПП-2 – ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР ИЯФ

Введение

Уже на первой стадии развертывания работ по ВЭП-1, когда ещё не было ясно, какие подводные камни могут встретиться на этом пути, Андрею Михайловичу с его молодыми коллегами и учениками хватило смелости приступить к осуществлению рискованного по тем временам проекта – установки со встречными электрон-позитронными пучками. К тому же ещё ничего не было известно о подобных планах других лабораторий.

Вспоминает Владимир Николаевич Байер:

В октябре 1959 г. в кабинете А.М.Будкера состоялась длительная дискуссия, посвященная работам института по программе встречных электрон-электронных пучков, в которой принял участие И.Я. Померанчук. В дискуссии перемежались теоретические соображения по проверке квантовой электродинамики на малых расстояниях в электрон-электронном рассеянии на большие углы и технические детали, относящиеся к установке ВЭП-1.

Большого восторга все сказанное у И.Я. Померанчука не вызвало и никаких слов поддержки не последовало. Впрочем, у остальных участников также не наблюдалось энтузиазма. Проводив И.Я. Померанчука, Андрей Михайлович заглянул ко мне и посетовал, что как-то наша программа не производит впечатления и нужно думать еще, как ее усовершенствовать. Я ответил, что программа будет неизмеримо более богатой, если вместо электрон-электронных встречных создать электрон-позитронные встречные пучки. Первая реакция Будкера была резко негативной, и он ушел, но минут через 20 вернулся. В последовавшей после этого дискуссии мы много раз менялись местами, убеждая друг друга и высказывая сомнения в возможности их создания. В итоге Андрей Михайлович потребовал, чтобы я отложил все дела и оценил возможность реализации новой программы....

На фоне того, что и установки с электрон-электронными встречными пучками были еще далеки от завершения, и далеко не все считали, что их удастся запустить, предложение создать электрон-позитронные встречные пучки с резко повышенными требованиями к интенсивности и качеству пучков, не встретило поддержки у многих известных ученых в Академии наук СССР.

Первые возражения типа — «А у вас все аннигилирует!» — были легко опровергнуты, поскольку сечение аннигиляции заметно меньше, чем сечение рассеяния на малый угол, которое определяет время жизни пучка и которое одинаково для электронов и позитронов. Гораздо сложнее было преодолеть обций отрицательный настрой.

И.В. Курчатov направил программу электрон-позитронных встречных пучков на отзыв трем ведущим специалистам. Отзывы были разные, но все резко отрицательные. Игорь Васильевич тогда, посмеиваясь, заявил: «Значит, в этом есть что-то нетривиальное. Надо делать».

Для создания электрон-позитронного коллайдера предстояло решить широкий круг научно-технических проблем, таких как

- создание высокоинтенсивного с достаточно высокой энергией ускорителя электронов,
- разработка эффективной схемы получения позитронов с возможностью многократной инжекции с накоплением,
- получение сверхвысокого вакуума,
- обеспечение устойчивости пучков в течение миллиардов столкновений.

1. Инжектор

С самого начала Андрею Михайловичу было ясно, что институт не может пойти по пути использования в качестве инжектора линейного ускорителя, который мог бы обеспечить высокую интенсивность электронов и, соответственно, позитронов. Не было в институте сложных технологий для создания такого ускорителя, а в стране не было мощных и надежных клистронов. Потребовались бы, как показывает нынешний опыт, многие годы для создания такого инжектора. Однако полученный к этому времени в ИЯФ опыт создания ускорителей показал, что и решения с безжелезными синхротронами типа Б-2С не годятся для создания высокоэнергичного и быстроциклического синхротрона. И А.М.Будкер с А.А.Наумовым сделали следующий шаг, предложив конструкцию, в которой магнитное поле формируется одновитковыми токовыми шинами и магнитными полюсами. Преимущества такой конструкции магнитов заключаются в малой величине рассеянных полей и возможности обеспечения малого времени ускорения. В используемых в то время многовитковых конструкциях магнитов большая индуктивность не позволяла этого сделать. К примеру, в сооружаемом тогда в Томске синхротроне «Сириус» время ускорения было 40 мс, а в синхротроне Б-3М, о котором речь пойдет ниже, около 1,5 мс. Это важно с точки зрения подавления разного вида неустойчивостей, свойственных сильноточному ускорителю.

Инжекционная часть комплекса ВЭПП-2 состоит из импульсного линейного ускорителя (ИЛУ), электронно-оптической системы транспортировки пучка, электронного синхротрона (Б-3М), устройства впуска-выпуска, набора систем питания элементов комплекса, управления и контроля. Схема комплекса ИЛУ – Б-3М показана на рис.1.

За время своего существования комплекс ИЛУ – Б-3М прошел несколько этапов модернизации, так что в дальнейшем будет приведено, в основном, описание финального его состояния, с указанием, по возможности, и первоначальных разработок.

Форинжектор электронов ИЛУ представляет собой резонансный контур, образованный четвертьволновой спиральной линией, нагруженной на конце емкостной насадкой, в которой размещена электронная пушка. Система питания ускорителя работает в режиме автогенерации на триодах ГК-5А. Для анодного питания автогенератора используется модулятор, подающий на анод лампы импульс напряжения 30кВ с током 1кА. Длительность импульса и, соответственно, время раскочки резонансного контура 1,2 мсек. Схема ИЛУ показана на рис.2. На этапе запуска использовался первый вариант ИЛУ(ИЛУ-1) с меньшими габаритами и меньшей энергией.

В баке 1 (высотой 2,5 м, диаметром 2 м.) из нержавеющей стали размещена медная спираль 2 длиной 40 м, состоящая из 12 витков, которая образует спиральную линию. Верхняя часть резонатора ограничена медным экраном 3, припаянным к спирали и замыкающим ее на корпус. К нижней части спирали крепится насадка 10, которая является одним из электродов ускорителя; вторым электродом служит корпус бака. Внутри насадки расположены электронная пушка 4 и вакуумно-плотный контейнер 11 с внутренним атмосферным давлением. Импульс на управляющую сетку для отпирания пушки и запирающее напряжение подаются по высоковольтным кабелям, проходящим внутри спирали в контейнер и затем через проходные изоляторы контейнера. Так же проходят кабели для нагревателя катода. Для подстройки собственной частоты резонатора служит подвижный экран 5. В верхней части резонатора размещены измерительная петля 12 и петля обратной связи 13. Мощность для возбуждения подводится к первому верхнему витку (на рис. 2 не указано).

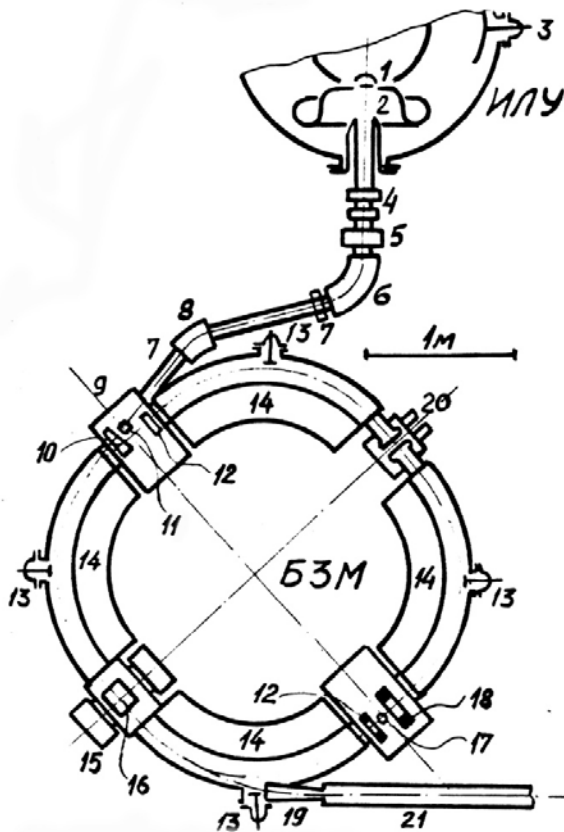


Рис.1. Схема ускорительного комплекса ИЛУ – Б-3М. 1 – электронная пушка, 2 – ускоряющий зазор, 3 – экран для подстройки частоты, 4 – дублет квадрупольных линз, 5 – резонатор $\lambda = 10$ см, 6, 8, 10 – поворотные магниты, 7 – квадрупольные линзы, 9 – прямолинейный промежуток Б-3М, 11 – дефлектор Б-3М, 12 – линза Панофского, 13 – горизонтальные пробники, 14 – дипольные магниты Б-3М, 15 – бетатронный сердечник, 16 – инфлектор, 17 – вертикальный пробник, 18 – пояс Роговского, 19 – выпускное отверстие, 20 – ускоряющий резонатор, 21 – электронно-оптический канал Б-3М – ВЭПП-2.

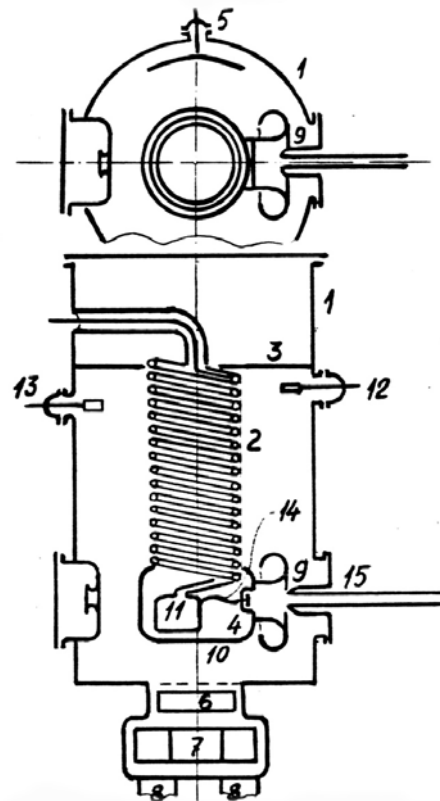


Рис.2. Схема импульсного ускорителя электронов ИЛУ (верхняя часть – разрез в сечении пушки). 1 – корпус резонатора, 2 – медная спираль, 3 – медный экран, 4 – электронная пушка, 5 – экран для подстройки частоты резонатора, 6 – вакуумный шибер, 7 – азотная ловушка, 8 – магниторазрядные насосы, 9 – формирующие электроды, 10 – емкостная насадка спирали, 11 – вакуумноплотный контейнер, 12 – измерительная петля, 13 – петля обратной связи, 14 – коаксиал высоковольтного питания пушки, электронно-оптический канал ИЛУ – Б-3М.

После включения режима автогенерации в резонансном контуре ИЛУ постепенно за время около 1 мсек запасается энергия, и при достижении максимального напряжения включается электронная пушка на время одного оборота электронов в синхротроне.

В ускоряющем зазоре ИЛУ на пучок кроме продольного электрического поля действуют поперечные магнитные поля, обусловленные током спирали и током смещения насадки 10. Формирующие электроды 9 позволяют уменьшить влияние магнитных полей на ускоряемые частицы и существенно ослабить увеличение эффективного фазового объема. Далее пучок проходит через электронно-оптический канал, состоящий из системы поворотных магнитов и квадрупольных линз. Оптическая схема канала обеспечивает удовлетворительное согласование оптических и дисперсионной функций синхротрона с параметрами инжектируемого пучка. Ось канала лежит ниже медианной плоскости синхротрона, выпуск пучка производится в прямолинейном промежутке по вертикали с использованием параллельного переноса.

Основные параметры ИЛУ:

- Частота резонатора 2,5 МГц,
- Напряжение на ускоряющем зазоре 2,5 МВ,
- Длительность выпущенного сгустка электронов 30 нс,

- Импульсный ток электронов 30 А.
- Импульсная мощность генератора 3Мвт.

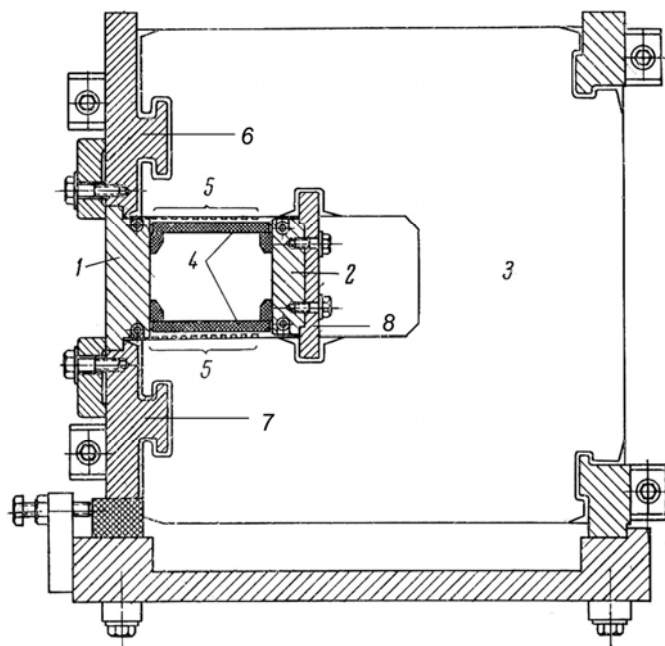


Рис. 3. Поперечный разрез магнита Б-3М.

Электромагнит синхротрона кольцевой ($R \cong 1$ м), С-образный, с четырьмя прямолинейными промежутками по 40 см каждый, в которых расположены системы впуска, выпуска, контроля, бетатронный сердечник и резонатор.

На рисунке 3 показан разрез поперечного сечения магнита Б-3М. Магнитное поле создается импульсным током, протекающим по шинам 1 и 2 в противоположных направлениях. Основная часть магнитного потока замыкается через магнитопровод 3. В такой конструкции магнитное поле за наружной шиной пренебрежимо мало, что позволяет решить проблему вывода пучка через небольшое отверстие в шине. Длительность импульса, питающего магнит, выбрана такой, что толщина скин-слоя, в данном случае $\sim 0,3$ см, много меньше толщины шины. Поэтому необходимая форма поля в рабочей области создается как наклоном полюсов магнитопровода 3, так и соответствующим профилем шин, обеспечивающим расчетное значение показателя спада магнитного поля $n=0,6$. В силу особенностей формирования поля такой магнит можно назвать "железно-безжелезным".

Магнитопровод синхротрона набран из листов трансформаторной стали Э-44 толщиной 0,35 мм. Выбор данной марки стали обусловлен малой длительностью импульса ускорения. Листы стали склеены в короткие (по азимуту) блоки эпоксидной смолой с наполнителем из кварцевой пыли. Это было сделано потому, что, к сожалению, в то время еще не было опыта изготовления клееных магнитов большой длины. Каждый квадрант состоит из 12 блоков. В каждый блок с помощью эпоксидной смолы и изолирующих прокладок вклеены бобышки из нержавеющей стали 6, 7, 8, к которым после их прецизионной обработки на карусельном станке, крепятся токонесущие шины.

Электромагнит и вакуумная камера представляют собой единое целое. Токонесущие шины являются одновременно боковыми стенками вакуумной камеры. Поверхности шин со стороны вакуумной камеры имеют два радиуса кривизны: в горизонтальной плоскости – в соответствии с радиусом орбиты и в вертикальной – с радиусом, соответствующим кривизне силовых линий магнитного поля при $n = 0,6$. В токонесущие шины впаяны медные трубки водяного охлаждения. Все квадранты соединены последовательно. Шины

на торцах магнитов коммутируются с помощью рамочных фланцев, уменьшающих рассеянные поля на торцах. Азимутальный размер каждого магнита составляет 88° . Каждый квадрант смонтирован на стальной тумбе, которая крепится на общей толстой стальной плите на бетонном фундаменте.

Горизонтальные крышки 4, сделанные из эпоксидной смолы (стеклоткань, пропитанная эпоксидной смолой) и покрытые внутри аквадагом, вкуче с токонесущими шинами образуют вакуумную камеру синхротрона. Многолетний опыт эксплуатации показал их отличную радиационную стойкость. Снаружи на крышках имеются пазы, в которые заложены корректирующие витки 5, позволяющие регулировать градиент и вертикальное положение медианной плоскости. Для радиальной коррекции орбиты используются специальные витки на ярмах. Полная апертура вакуумной камеры составляет 120 мм по радиусу и 80 мм по высоте.

Системы впуска и выпуска уменьшают вертикальную и радиальную апертуру соответственно на 30 мм (на первом этапе работы синхротрона инжекция производилась по радиусу в середине квадранта и ограничивала радиальную апертуру на 2 см). Выпускной канал проходит через середину шин квадранта и расположен таким образом, что ось канала касательна к орбите в точке выпуска. Поперечное сечение окна выпускного канала – $2,3 \times 2,3$ см.

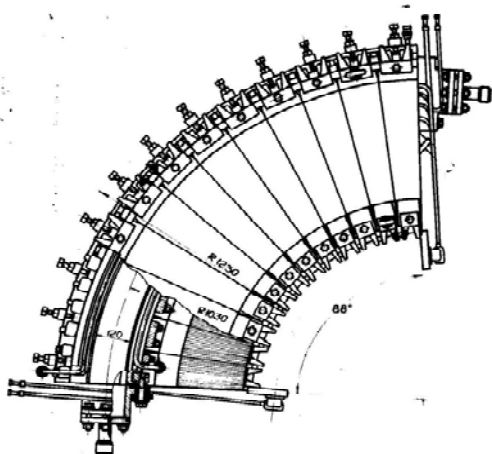


Рис. 4. Разрез квадранта Б-3М, вид сверху.

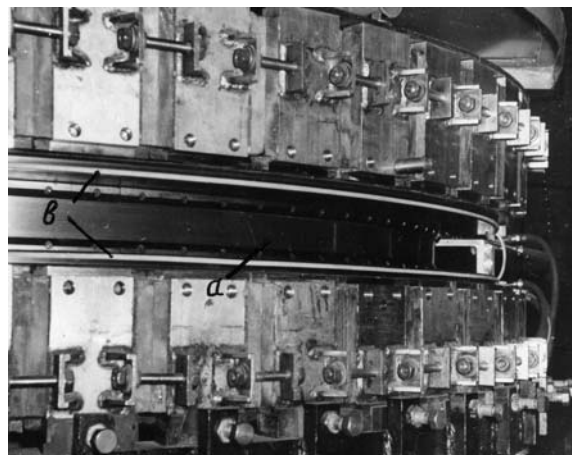


Рис. 5. Электромагнит Б-3М (наружная шина снята).

Для возбуждения электромагнита совместно с ВЭИ им. Ленина была создана система питания, обеспечивающая получение однополярных импульсов тока длительностью $1,5 \cdot 10^{-3}$ сек при токе амплитудой до 150 кА. Импульсный ток создается при колебательном разряде мощной конденсаторной батареи ёмкостью $C = 20000$ мкФ на индуктивность электромагнита $L \cong 10^{-5}$ Гн через систему коммутирующих вентилях. В качестве коммутатора на первом этапе запуска использовались ртутные игнитроны, затем тиристоры. В промежутке между рабочими импульсами батарея перезаряжается через вспомогательную индуктивность. Одновременно для компенсации потерь происходит подзаряд батареи. Для равномерной загрузки сети батарея разбита на 18 групп, которые заряжаются поочередно и лишь в момент разряда на шины электромагнита включаются параллельно.

В Б-3М принята однооборотная инжекция с помощью инфлектора, напряжение с которого снимается за время, существенно меньшее периода обращения (27 нс). Инфлектор, расположенный в прямолинейном промежутке, представляет собой пару разнесенных по вертикали горизонтальных пластин, нагруженных на волновое сопротивление по 50 Ом каждая. Инфлектор работает в режиме бегущей волны и

обеспечивает полное гашение вертикального угла траектории частиц на первой четверти оборота.

Энергия инжектируемого в Б-3М пучка недостаточна для синхротронного режима, поэтому с помощью специального бетатронного сердечника пучок предварительно ускоряется до энергии 7 МэВ, после чего включается высокочастотная ускоряющая система и основное ведущее магнитное поле.

До 1985 года высокочастотная система Б-3М работала на третьей гармонике частоты обращения частиц. Источником ВЧ-мощности служил переделанный стандартный генератор "Корунд". Для получения необходимого ускоряющего напряжения от генератора требовалась импульсная ВЧ-мощность порядка 1,5 МВт. При этом лампа выходного каскада генератора работала с токами, близкими к предельным, ввиду чего она довольно быстро теряла эмиссию, и ее приходилось часто менять. Кроме того возникали трудности, связанные с неустойчивостью пучка в режиме с тремя распределенными по азимуту сгустками, что ограничивало величину захваченного и ускоренного тока.

С учетом указанных недостатков, ВЧ-система Б-3М была подвергнута кардинальной модернизации. Ускоряющая система была перестроена на первую гармонику частоты обращения. Вакуумный ускоряющий резонатор выполнен в виде двух короткозамкнутых отрезков коаксиальных линий, на свободных концах которых закреплены бобышки, образующие ускоряющий зазор. Для уменьшения геометрических размеров резонатора объем между проводниками линий заполнен ферритом.

Выпуск из синхротрона однооборотный. На первом этапе работы в качестве дефлектора использовалась короткозамкнутая линия длиной около 80 см с волновым сопротивлением 50 Ом, на которую подавался высоковольтный импульс порядка 90 кВ от газового разрядника. Серьезными недостатками этого дефлектора были трудность заведения пучка в него перед выпуском и неизбежные потери при этом. В последующем был изготовлен и поставлен укороченный дефлектор в виде С-образного сердечника длиной 10 см с магнитопроводом из листов железа марки ХВП толщиной 80 мкм, изолированных друг от друга лаковой изоляцией и спеченных при высокой температуре под давлением. Генератор питания дефлектора основан на линиях с коммутаторами на трехэлектродных разрядниках под высоким давлением. Дефлектор располагается в прямолинейном промежутке на конце коаксиального герметизированного токопровода, который можно перемещать по вертикали дистанционно.

Синхротрон проработал свыше 50 лет, обеспечивая работу трех электрон-позитронных коллайдеров: ВЭПП-2, ВЭПП-2М и ВЭПП-2000. За эти годы модернизации подверглись инжектор, системы впуска-выпуска, ВЧ-система, системы питания и электроника. Последняя прошла длинный путь от аналоговых устройств стабилизации, контроля и управления до современной цифровой компьютерной техники.

Основные параметры синхротрона Б-3М:

Энергия инъекции	2,5 МэВ
Максимальная энергия	250 МэВ
Радиус поворота в магнитах	103 см
Длина прямолинейного промежутка	40 см
Бетатронные частоты Q_z , Q_x	0,87, 0,77
Максимальное ускоряющее напряжение	24 кВ
Частота повторения	1 Гц
Ускоренное число электронов	$3 \cdot 10^{11} \text{ сек}^{-1}$

Руководил созданием инжекторной части коллайдера Алексей Александрович Наумов. Под его руководством удалось менее чем за два года смонтировать и запустить синхротрон. Основу команды составляли молодые физики-выпускники МГУ, начавшие работать еще в Москве: Валерий Петров, Геннадий Яснот, Александр Киселев и участник войны Иван Тимошин, ещё до запуска ушедший на другую тематику. В Новосибирске команда пополнилась еще рядом сотрудников: Вячеславом Туркиным, Владимиром

Купчиком, Вячеславом Сербиным и другими. Естественно, без квалифицированной команды инженеров и прежде всего радистов создание синхротрона-инжектора было невозможно. Это были приехавшие из Москвы Вадим Семёнович Панасюк, Лев Юдин, Геннадий Острейко, Олег Курнаев. В Новосибирске добавились Евгений Мельников (до ИЯФ гл. инженер Новосибирской радиостанции), Евгений Харитонов, Александр Панфилов, Виктор Ерохов, Владимир Кузнецов, Анри Егоров, Геннадий Кузнецов, Виктор Петров, Владимир Пильский, Владимир Нифонтов, будущий писатель Давид Константиновский, Валентин Давидовский, Нина Коршунова, Геннадий Кочурин, Эдуард Купер, Анатолий Медведко, Григорий Куркин, Вячеслав Ключев, Михаил Захваткин и другие. Их усилиями было создано много мощных уникальных систем питания установок комплекса и сложнейшей по тем временам электроники управления и контроля. Следует отметить, что в первые годы радиофизическая лаборатория, возглавляемая В.С.Панасюком, а позднее М.М.Карлинером, работала, в основном, для ВЭПП-2. В конце 60-х годов часть её сотрудников переключилась на задачи ВЭПП-3 и ВЭПП-4, а на ВЭПП-2 приходили новые люди, которые вносили свой вклад в развитие и поддержание работоспособности этого уникального ускорителя. Это Анатолий Кожемякин, Петр Воробьев, Павел Климин, Александр Михайличенко, Аркадий Полунин, Александр Лысенко, Василий Просветов и другие.

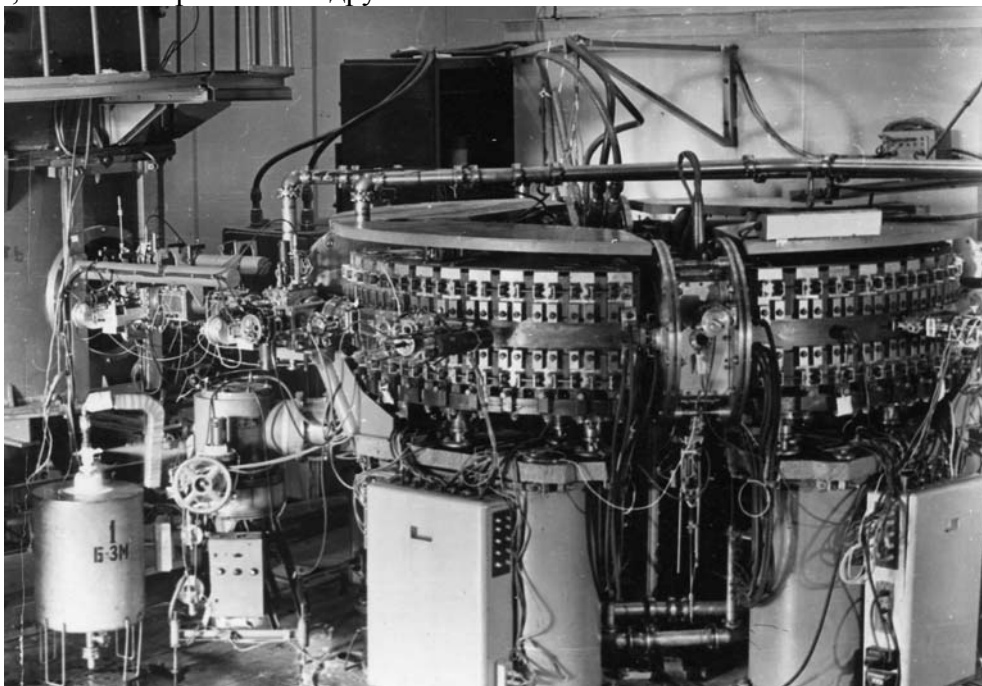


Рис.6. Общий вид ИЛУ, канала и Б-3М.

2. Накопительная дорожка

Схема расположения всего комплекса, включая синхротрон и электронно-оптические каналы, показана на рис.6. Накопительная дорожка представляла собой слабофокусирующий рейстрек с четырьмя одинаковыми промежутками. Два промежутка использовались для инжекции электронов и позитронов, в третьем промежутке был расположен резонатор, и последний (противоположный резонаторному) был предназначен для постановки экспериментов.

О начале работ по созданию ВЭПП-2 вспоминает А.Лившиц - руководитель конструкторского отдела ИЯФ:

1960 год мне запомнился многим. Весной я приехал в Сибирь. В этом году началась усиленная разработка ВЭПП-2. Ни одно здание ещё не было выстроено, поэтому конструкторская группа работала у меня на квартире. Группа состояла из меня, моей

жены и молодых специалистов Н.Кузнецова и Г.Корнюхина. В моей квартире в двух маленьких комнатах жила моя семья, а в большой комнате стояли 4 кульмана, на которых мы работали. Атмосфера в этом маленьком коллективе была чудесной, мы были молоды и полны энтузиазма.... В 6 часов вечера выходила моя дочь и вещала, что пора прекращать работу. Летом мы переехали в огромный зал на 5-ом этаже пристройки к цеху. Значительную часть этого зала занимал чертёж ВЭПП-2, вид сверху в натуральную величину, который мы вычертили мелом на полу. Чертёж страшно понравился Андрею Михайловичу. Он любил его показывать гостям и начальству....

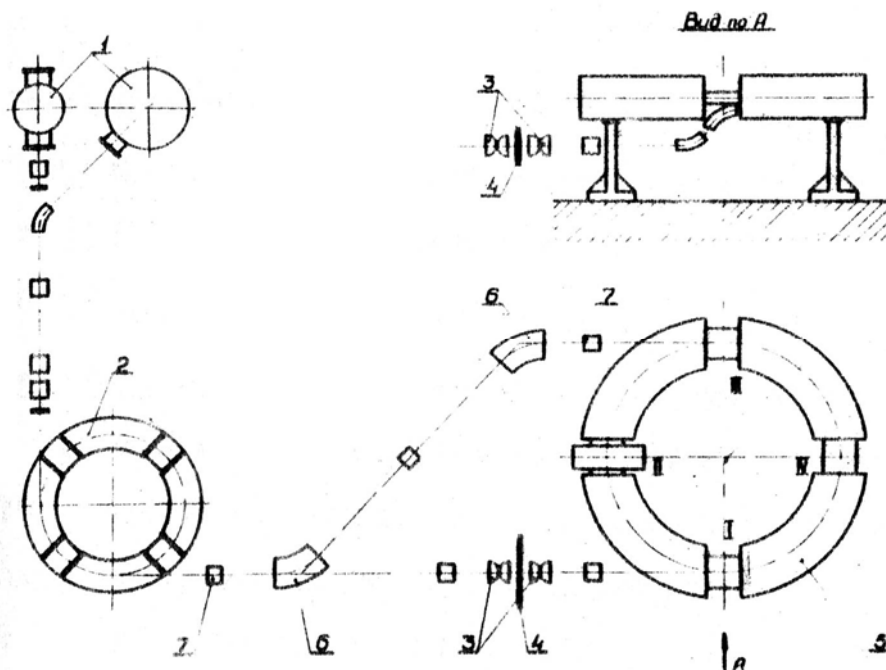


Рис.7. Схема комплекса ВЭПП-2(до модернизации).1-ИЛУ(1-ый и 2-ой варианты), 2-синхротрон Б-3М, 3-параболические линзы, 4-конвертор, 5-коллайдер ВЭПП-2, 6-горизонтальные поворотные магниты, 7-квадрупольные линзы, 8-впускной магнит.

Работы по конструированию, производству и сооружению ВЭПП-2 были выполнены в короткие сроки, от начала конструирования до получения первого пучка прошло около четырех лет. При этом надо отметить, что по тем временам это была очень сложная в технологическом плане установка.

Основные параметры ВЭПП-2:

- Максимальная энергия 670 МэВ
- Число поворотных магнитов 4
- Радиус кривизны 150см
- Длина прямолинейных промежутков 4*60см
- Фокусировка слабая $n=0,6$
- Рабочая апертура (с учетом септум-магнитов, инфлекторных пластин, приемников излучения и радиальных пластин отсека ионов):
 - По вертикали ± 38 мм
 - По радиусу ± 55 мм
- Рабочие токи ($E=510$ МэВ) 40мА*40мА
- Максимальная светимость $3 \cdot 10^{28} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$

Квадранты сконструированы в виде электромагнитов закрытого типа. Наклон поверхности полюсов к горизонтали составлял 3 град. 35мин, что обеспечивало $n=0,6$ в области вакуумной камеры. Магнитные измерения проводили А.Скринский, сыгравший ведущую роль в реализации всего проекта, Б.Левичев, В.Ауслендер, Л.Каштанов,

Ю.Пупков и др. Наиболее сложным оказалось нахождение медианной плоскости, для таких измерений использовались пермаллоевые датчики. Окончательная проверка была выполнена пучком альфа-частиц.

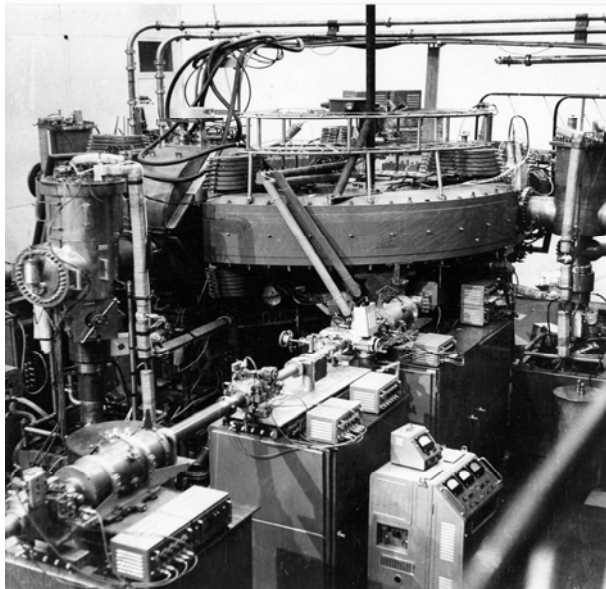


Рис.8. Вид на коллайдер ВЭПП-2 до модернизации.

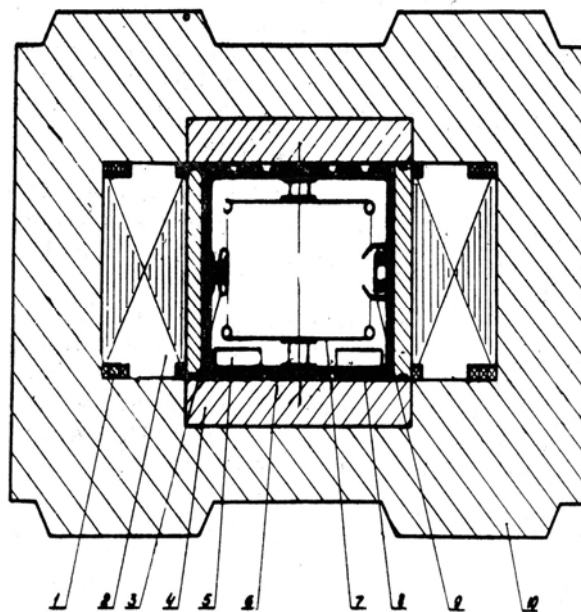


Рис.9 . Поперечный разрез квадранта ВЭПП-2 (после реконструкции). 1-обратные витки Q-коррекции, 2-обмотка основного поля, 3- пластина разведения частот бетатронных колебаний, 4 -полюс, 5- магниторазрядный насос, 6-витки Q-коррекции, 7- пластины вертикального разведения орбит (или инфлектор), 8-внутренняя камера, 9-приемник излучения, 10-ядро.

На рис. 9 показано поперечное сечение магнита и вакуумной камеры после проведенной в 1968-1969гг модернизации коллайдера. Полюса являются крышками наружной вакуумной камеры, боковые стенки камеры выполнены из латуни. Между этими стенками и обратными ярмами (снаружи и внутри) магнитопровода располагались медные шины, по которым пропусклся ток, создающий магнитное поле. Для охлаждения к шинам были припаяны медные трубки, через них протекал дистиллят. Шины располагались по высоте в 2 ряда, коммутация шин была сделаны внутри промежутков. На первом этапе коммутация осуществлялась с помощью специальных дуг и болтовых соединений, после модернизации в экспериментальном и резонаторном промежутках были смонтированы паяные серебряным припоем соединения. Вся эта часть с точки зрения современных конструкций магнитов и технологий их производства выглядела примитивной и была на самом деле не надёжной. И это доставляло немало хлопот физикам и обслуживающему персоналу. Установка питалась от мотор-генератора, установленного в энергокорпусе, максимальный ток при энергии 670 МэВ был около 7кА. Вакуумная система в квадрантах конструктивно была выполнена в виде вложенных одна в другую двух камер: наружной с не очень высоким вакуумом и внутренней-высоковакуумной. В промежутках также была реализована система «двойного» вакуума. Наружная камера откачивалась диффузионными насосами с азотными ловушками. Уплотнения наружной вакуумной камеры резиновые. Её слабым местом были так называемые тройные стыки, особенно на участках перехода от квадранта к промежутку, поэтому сборка камеры требовала определённого опыта или лучше сказать мастерства. Внутренняя высоковакуумная камера в квадрантах (после модернизации медная камера была заменена на нержавеющей) была теплоизолирована от наружной и допускала возможность прогрева до температуры 400 градусов. Узлы внутренней камеры в промежутках собирались с помощью уплотнений из

отожжённой меди, зажимаемых между фланцами, технология аргоновой сварки ещё не была освоена. При этом допускалось небольшое перетекание между внутренней и наружной камерами. В процессе модернизации установки в 1968-1969 годах в квадрантах вблизи полюсов между внутренней и наружной камерами были установлены корректирующие витки, позволяющие регулировать градиент, квадратичную и кубичную нелинейности, а также положение медианной плоскости. До проведения модернизации такой возможности управления параметрами магнитной структуры не было, и это ограничивало экспериментальные возможности. Внутри камеры в двух квадрантах были расположены пластины электронного и позитронного инфлекторов, в двух других - пластины для электростатического разведения орбит электронов и позитронов. На внутреннем радиусе во всех квадрантах были размещены пластины, создающие неоднородное электрическое поле, для разведения бетатронных частот электронного и позитронного пучков и отсоса ионов. При модернизации в камерах под нижними пластинами были установлены распределенные магнито-разрядные насосы с общей скоростью откачки около 10 тыс. литров/сек при максимальном поле 1,5 Т, а на внешнем радиусе был размещён приёмник синхротронного излучения. Приёмник представлял собой тонкую танталовую ленту, которую для предварительного обезгаживания можно было нагревать электрическим током. При большом токе пучка и высокой энергии сама лента прогревалась от синхротронного излучения до температуры несколько сотен градусов. Промежутки откачивались с помощью азотитов -- охлажденных до температуры жидкого азота поверхностей, на которые напылялся титан, являющийся хорошим сорбентом. Всё это обеспечило получение высокого вакуума в условиях мощного синхротронного излучения. Хочется отметить, что это было первое использование магнито-разрядных насосов, работающих в магнитном поле накопителя. Время жизни пучка на малых токах достигало десяти часов, при токе 100ма около-4-х часов. Высокий вакуум создавался усилиями лаборатории Г.Блинова, здесь начинал свою карьеру В.Анашин, в разработке распределенной откачки большая заслуга В.Ауслендера и М.Малева.

Длина сгустка до модернизации была около 80 см., и, соответственно, длина области взаимодействия пучков-свыше 50см при длине прямолинейного промежутка 63 см. Это существенно снижало эффективность регистрации продуктов реакции. В процессе модернизации была проведена замена высокочастотной системы. Был установлен новый резонатор, работающий одновременно на первой и третьей гармониках частоты обращения. Конструкция резонатора приведена на рис.10. Внутри корпуса резонатора 4 размещена трубка с дисками на концах. Она образует внутренний проводник коаксиальной линии с емкостями дисков. Собственная частота соответствующей резонансной моды равна третьей гармонике частоты обращения. Электрическое поле в зазорах направлено одинаково относительно движения частицы. Емкость параллельно соединённых дисков и индуктивность короткозамкнутого отрезка коаксиальной линии, создаваемой штангой 3 и трубой 6, образуют моду с частотой, равной первой гармонике частоты обращения. Электрическое поле 1-ой гармоники в зазорах направлено в разные стороны, эффективное ускоряющее напряжение, возникающее из-за изменения фазы пролёта, составляет 25% от напряжения на зазоре. Так как ускоряющая система на первой гармонике является пролётной трубкой с двумя зазорами, равновесные фазы электронов и позитронов на первой гармонике смещены на 180° , и это оказалось неожиданностью при попытке организовать встречу пучков на первой гармонике. Объяснение этому «парадоксу» было найдено А.Скринским.

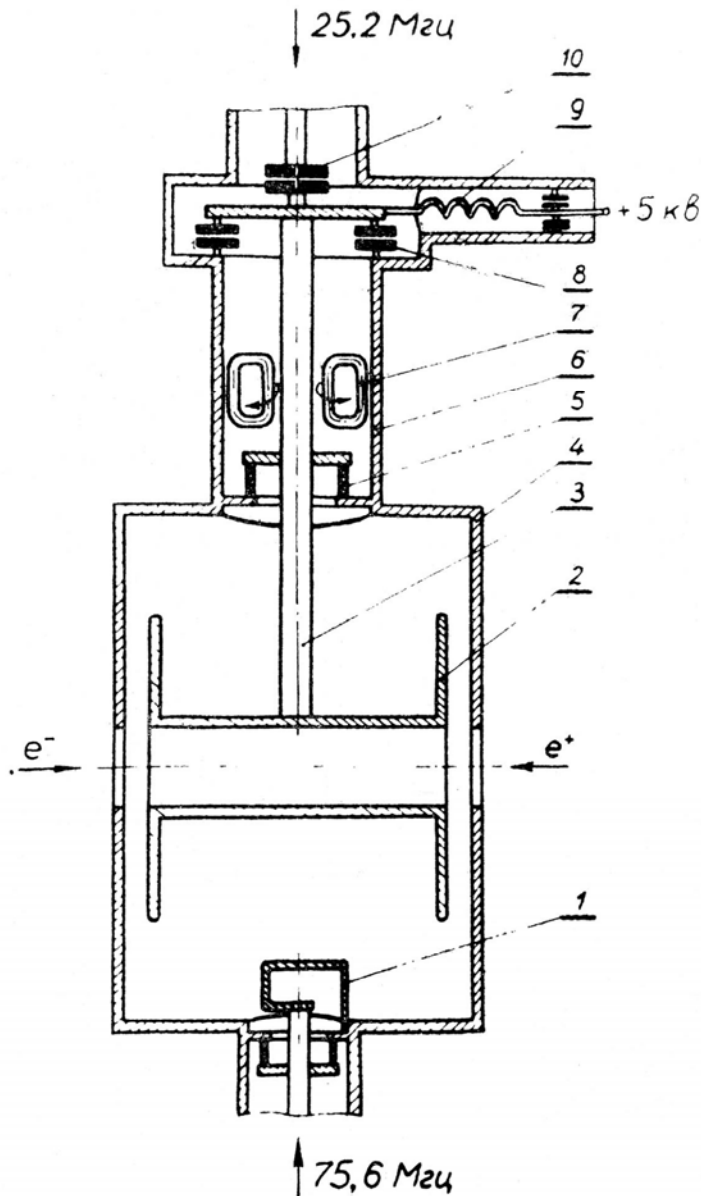


Рис.10. Схематический разрез резонатора ВЭПП-2. 1-Петля возбуждения 3-й гармоники, 2-труба с дисками, 3-штанга, 4-корпус резонатора, 5-керамический резонатор, 6-наружная труба шунтирующей индуктивности, 7-рамки настройки первой гармоники, 8,10-разделительные емкости, 9-дроссель.

Поэтому на 1-ой гармонике проводилось только накопление позитронов с расстроенным вниз и выключенным резонатором третьей гармоники. По окончании накопления позитронов включалось напряжение возбуждения резонатора 3-ей гармоники, а затем резонатор настраивался при обеспечении фазировки 1-ой и 3-ей гармоник таким образом, чтобы все позитроны попали в одну область устойчивости. Инжекция электронов велась на 3-ей гармонике с включенным вертикальным разведением орбит позитронов и электронов и их бетатронных частот. Сепаратрисса выбиралась таким образом, чтобы обеспечить встречу сгустков в экспериментальном промежутке и резонаторе. Амплитуда ВЧ напряжения: 1-ая гармоника 8 кВ (эфф.), 3-я гармоника-200 кВ. Длина сгустка при новой ВЧ-системе уменьшилась до 20см.

При конструировании резонатора впервые учитывались требования к спектру высших собственных частот резонатора с целью обеспечения затухания когерентных синхротронных и бетатронных колебаний. В разработке этого оригинального резонатора участвовали М.Карлинер, И.Шехтман, И.Седяров, Вик.Петров, В.Вещеревич, конструктор В.Меджидзаде и др. Следует отметить, что на первом резонаторе была обнаружена, свойственная этому резонатору, так называемая пондеромоторная неустойчивость. Механизм её возникновения связан с деформацией резонатора и, соответственно, изменением его резонансной частоты вследствие давления, вызываемого электромагнитным полем, на диски резонатора.

3. Электронно-оптические каналы. Получение позитронов

Расположение синхротрона и накопителя выбрано таким образом, чтобы минимизировать количество элементов каналов и облегчить требования к стабильности магнитных полей в элементах. Впуск электронов и позитронов производился в противоположных промежутках.

Наиболее сложными элементами каналов были септум-магниты и конверсионная система, являющимися частью позитронного тракта (рис.11). Конструкция септум-

магнитов безжелезная в форме коаксиала с уравновешенной по электромагнитным силам центральной шиной со скиновым формированием профиля поля. При энергии электронов 200 МэВ угол поворота составлял 35 градусов, ток - 200кА, магнитное поле- 8,9 кГс. Питание магнитов осуществляется через импульсный понижающий трансформатор кабельной конструкции. Похожая конструкция септум-магнитов использовалась и при создании последующих коллайдеров. В разработке септум-магнитов основной вклад внес В.Пакин, а их питания Б.Баянов. Дублеты квадрупольных линз, установленные на этом канале, были импульсными и по конструкции мало отличались от линз ВЭП-1.

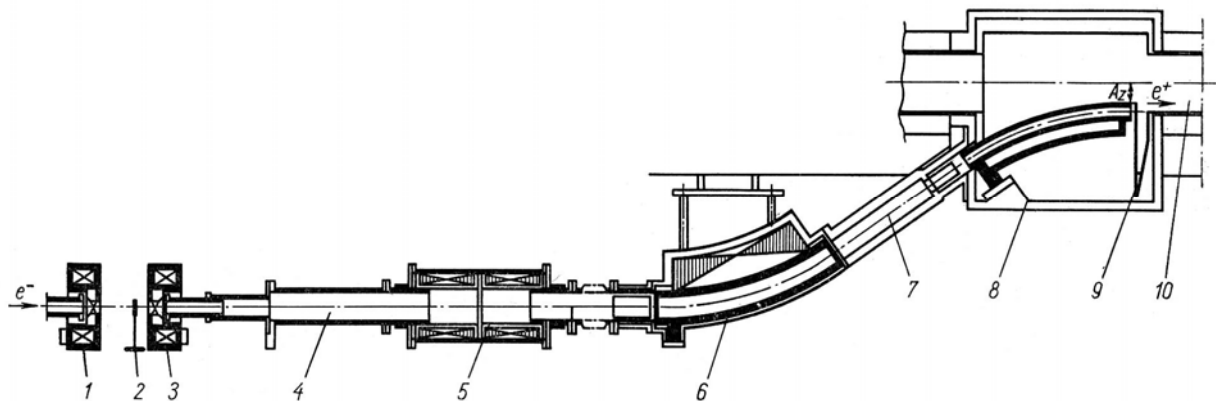


Рис.11. Схема размещения элементов позитронного тракта ВЭПП-2: 1-первая Ха-линза, 2-конвертор, 3-вторая Ха-линза, 4-вакуумпровод, 5-квадрупольный дуплет, 6-нижний впускной магнит, 7-равновесная траектория впуска, 8-верхний впускной(септум)-магнит, 9-медианная плоскость накопителя, 10- высоковакуумная камера накопителя.

Получение позитронов производится конверсией электронов через гамма-кванты на конверсионной мишени из вольфрама с толщиной около 1 рад.единицы (0,8см). На первом этапе для эффективного собирания позитронов с конвертора использовалась предложенная А.М.Будкером короткофокусная параболическая линза (Ха-линза). Линза состоит из двух параболоидов вращения, выполненных из бериллия толщиной около 0,2 мм и соприкасающихся своими вершинами. Ток свыше 100 кА и длительностью около 1мксек подводится к линзе от расположенного концентрично с линзой понижающего трансформатора с малой индуктивностью рассеяния и создаёт осесимметричное фокусирующее магнитное поле, интеграл которого растет линейно с отклонением от оси линзы.

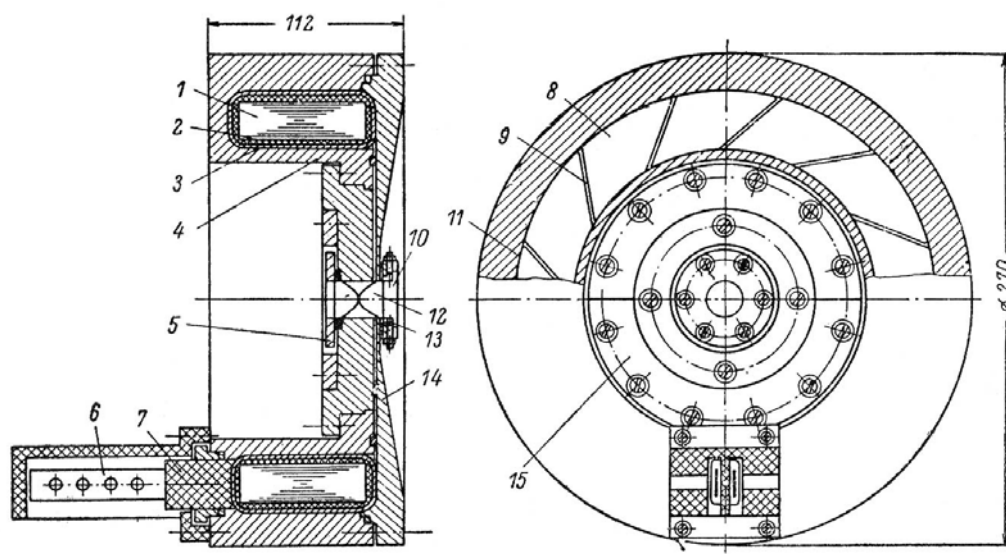


Рис.12. Параболическая линза с трансформатором. 1-сердечник, 2,8-первичная обмотка, 3,9,11-изоляция, 4-вторичный виток, 5,15-прижимные фланцы, 6,7-ввод первичной обмотки, 10,13-цанговые контакты, 14-торцевой фланец, 12-параболическая линза.

Разработка этого сложного и прецизионного изделия была выполнена Г.Сильвестровым, Л.Даниловым, С.Родионовым и конструктором К.Шрайнером. Из рис.12 видно, что это было действительно сложное и уникальное изделие. Для фокусировки электронов на мишень также использовалась параболическая линза. Размер падающего электронного пучка был существенно меньше апертуры линзы, поэтому для исключения рассеяния в «шейке» (области перехода между вершинами параболайдов) ось пучка смещалась относительно оси линзы. Позднее в 1970-ом году Г.И Сильвестровым была разработана цилиндрическая литиевая линза (рис.13). Идея использовать литий была предложена А.М.Будкером в 1960 году, хотя предложение, использовать для фокусировки прямой ток в виде газового разряда, было опубликовано В.Пановским в 1950 году. В этой линзе, как и в параболической, ток, создающий фокусирующее магнитное поле, течет вдоль оси пучка по литиевому цилиндру. Конструкция этой линзы позволяет получить большой градиент, и, несмотря на рассеяние позитронов при прохождении через линзу, её эффективность выше параболической.

Коэффициент конверсии при переходе на литиевые линзы увеличился с 10^{-4} до $3 \cdot 10^{-4}$. И существенно возросла надёжность. В разработке этого сложного как в техническом, так и в технологическом плане изделия кроме Г.И.Сильвестрова и конструктора В.Карасюка принимали участие В.Баянов, Г.Виллевалд, Ю.Петров, А.Чернякин и др.

Ниже приведены основные параметры параболической и литиевой линз при конверсии электронного пучка с энергией 250 МэВ, в позитронный с энергией 120 МэВ.

	Параболическая	Литиевая
Ток, кА	140	125 (e^-), 165 (e^+)
Длит.импульса, мксек	0,7	250
Макс. поле, кГс	140*	100 (e^-), 110 (e^+)
Апертура, диаметр, см	2	0,5 (e^-), 0,6 (e^+)
Фокусное расстояние, см	17,5 (e^-), 7 (e^+)	1,7 (e^-), 1,4 (e^+)
Коэфф. конверсии	10^{-4}	$3 \cdot 10^{-4}$

*- поле на диаметре (4мм) шейки линзы.

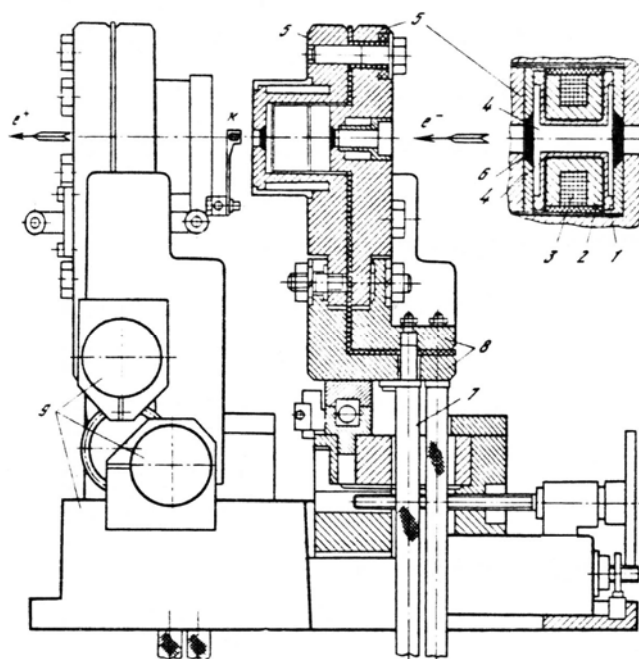


Рис.13. Блок литиевых линз. 1-титановый контейнер, 2-медная катушка, разрезанная на две части, 3-стальной проволочный бандаж, 4-литий, 5-токоподводы, 6-бериллиевые пробки, 7-гибкие токоподводы, 8-токосборные шины, 9-координатные механизмы, к-конвертор.

Расчеты конверсионной системы выполнялись Т.Всеволожской при поддержке теоретиков В.Сынаха и позднее В.Таюрского. В системе впуска в ВЭПП-2 не было предудара по накопленному пучку, поэтому в режиме накопления использовалась только часть акцептанса. Это существенно уменьшало захват позитронного пучка.

4. Проведение экспериментов

Первая инжекция электронного пучка в ВЭПП-2 была осуществлена в июне 1964 года, первые позитроны в накопителе были получены в мае 1965 года. Накопленный ток составлял 0,4 мА. Первые эксперименты начались в июле 1966 года на энергии $2 \cdot 380$ МэВ. Позитронный ток был около 5 мА, электронный - десятки миллиампер. В 1966 году система искровых оптических камер зарегистрировала первые пи-мезоны. Это было начало физики на встречных электрон-позитронных пучках. На ВЭПП-2 стали часто появляться журналисты и кинооператоры, тема экспериментов с антивеществом стала очень популярной. Приведём небольшой фрагмент:

« Удалось накопить интенсивный пучок позитронов. Это значит, что исследователи заставили искусственно родиться и организовать гостей из антимира, очень редко залетающих на нашу планету с космическими лучами. Ученые накопили их огромное количество и заставили коротко живущие в земных условиях позитроны жить часы и сутки, необходимые для эксперимента. ... Зловещая опасность над исходом эксперимента нависла, едва начали сводить два пучка - электронов и позитронов. Пучок электронов, имея более сильное магнитное поле, угнетал гостей из антимира. Сначала он только уродовал пучок позитронов, у того как говорили сибиряки, «отрастали уши», а при более сильном токе вовсе уничтожил его. Надо было понять это явление, провести длинный цикл экспериментальных и теоретических работ и, наконец, восстановить справедливость. И сибиряки нашли эти методы, образно говоря, доказали, что с помощью разума можно наладить сосуществование и с представителями антимира». Луч из антимира. Ванда Белецкая, Огонёк №16, 1966, стр.16.

Постепенно усилиями большого коллектива улучшались параметры установки: увеличивался ток инжектора, в связи с установкой параболических, а потом литиевых линз увеличивался коэффициент конверсии. В режиме накопления позитронов время жизни пучка определялось в основном эффектом внутреннего рассеяния (ЭВР), и это должно было сильно ограничивать максимальный накопленный ток. Однако в промежутках времени между ударами импульсом инжектора пучок не успевал затухать до равновесного размера, и влияние ЭВР оказывалось незначительным. В итоге начальная скорость накопления позитронов 1мА/мин не сильно падала, а накопленный ток позитронов поднялся до 40мА. На таких токах велись эксперименты в последние годы работы комплекса при средней светимости $1 \cdot 10^{28}$ см² сек⁻¹. Режим работы был следующий. Вначале велось накопление позитронов на энергии 120 МэВ при энергии конвертируемого электронного пучка 250 МэВ. Время накопления составляло не более часа. Затем позитроны ускорялись до энергии 200 МэВ, включалась 3-я гармоника ВЧ напряжения и электростатическое разведение орбит электронов и позитронов. В течение примерно минуты накапливался нужный ток электронов, далее ускорение до энергии эксперимента и сведение пучков. Максимальная энергия пучков составляла $2 \cdot 670$ МэВ. На первом этапе оперативное измерение светимости велось по рассеянию на малые углы посредством счетчиков, расположенных в промежутках впуска. В процессе модернизации были созданы условия для регистрации однократного и двойного тормозного излучения. С этой целью на пути гамма-квантов тормозного излучения были сделаны окна в ярах и шинах и уменьшена толщина стенки вакуумной камеры. Использование квантов однократного и двойного тормозного излучения позволило точнее измерять светимость и поставить первые эксперименты по двух-фотонной физике.

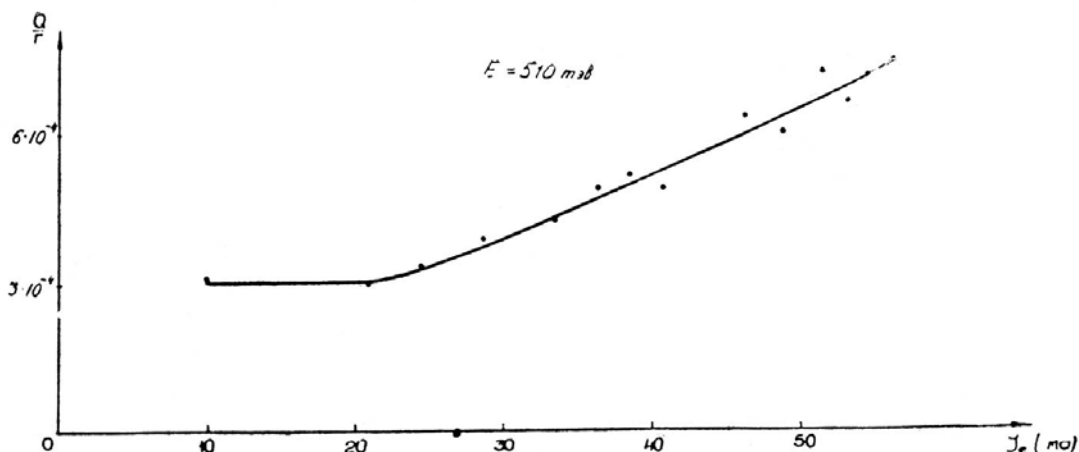


Рис.14. Отношение кулон-амперов (Q) к числу событий (Γ) тормозного излучения от тока. График отражает увеличение размера пучков при увеличении тока встречного пучка.

На рис. 14 представлены результаты по эффективности встречи в зависимости от тока электронов (сильный-слабый пучки). По вертикальной оси отложено отношение интеграл произведения токов электронов и позитронов (кулон-амперы) к количеству гамма-квантов двойного тормозного излучения. График отражает увеличение вертикального размера позитронного пучка.

На установке ВЭПП-2 были впервые наблюдаемы и изучены многие коллективные эффекты. В изучении когерентных явлений помимо руководителей работы А.Скринского и В.Ауслендера, большой вклад внесли С.Мишнев, Н.Диканский, М.Карлинер, И.Шехтман, Вик. Петров, И.Седяров.

О том, как были объяснены механизмы возникновения этих неустойчивостей и найдены способы их подавления, рассказывает Николай Диканский:

Первый в мире электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2 начал работать с двумя пучками в 1965 году. Эта установка была интересна во всех отношениях не только тем, что на ней начались первые в мире эксперименты по столкновению электронов и позитронов, но и целым фейерверком различных эффектов в динамике частиц. Возможность наблюдения за поведением пучков с помощью телевизионных камер позволила увидеть форму пучков и их долговременное поведение. Кроме этого можно было наблюдать быстрые процессы с помощью электронно-оптических преобразователей и фотозатворными умножителями. Значительный пласт информации мы получали с помощью пикап электродов.

В 1965 году мне было поручено изучение вопросов когерентной устойчивости пучков в накопителе. А.Н. Скринский предложил мне заняться эффектом конечной проводимости стенок вакуумной камеры. В это время уже была работа А. Сесслер и Дж.Ласлета для несгруппированного пучка. Нам же нужно было понять, а что будет для сгруппированного пучка. А.Скринский рассуждал в терминах остаточного поля, моей задачей было получить поле в конкретной прямоугольной трубе. Каково было удивление у меня, когда я просуммировал гармоники поля, связанные с конечной проводимостью стенок, и увидел, что поле медленно убывает со временем как $\frac{z(t-\tau)}{\sqrt{t}}$. Я показал этот

результат А.Скринскому и М.Карлинеру, который стоял с ним рядом. Марлен Моисеевич сказал – это диффузия поля из стенок. Конечно поле, которое проникло в стенки медленно выходит обратно и помнит координату смещения при пролете. Суммируются

поля за много оборотов и в результате, если $\kappa - \frac{1}{2} < \nu_z < \kappa$ - неустойчивость, $\kappa < \nu_z < \kappa + \frac{1}{2}$ - демпфирование.

Весной 1965 года в ИЯФ приехала группа американских ускорительщиков из Стэнфорда, Бэркли и Брукхейвена. Э.Курант доложил результаты своих расчетов, они точно совпали с нашими.

Начиная с токов более 1 мА мы обнаружили, что скорость затухания вертикальных колебаний становится значительно быстрее, чем обычное радиационное затухание. Визуально (на телеэкране) уже невозможно было видеть процесс уменьшения вертикального размера. На осциллографе в этом случае 100% некогерентные колебания. Было обнаружено, что декремент когерентного затухания пропорционален числу частиц в сгустке. Независимость декремента от бетатронной частоты проверялась в широком диапазоне перестройки частоты $\Delta \nu_z = \pm 0,1$, за исключением области разностного машинного резонанса связи и на когерентном вертикальном резонансе. Исчезновение когерентного затухания на резонансе связи обусловлено тем, что дипольный момент сгустка на этом резонансе равен нулю. Появление же вертикальной когерентной неустойчивости (вне области резонанса связи) означало превышение инкремента вертикальной неустойчивости над декрементом вертикального быстрого затухания.

Как выяснилось впоследствии, явление быстрого когерентного затухания связано с излучением энергии сгустка частиц в ТЕМ волну пластин инфлектора.

Появление вертикальной когерентной резонансной неустойчивости было связано с пластинами вертикального разведения электронов и позитронов. Эти пластины были подсоединены с высоковольтными источниками через большое сопротивление длинными кабелями. Оказалось, что собственная частота этой системы (пластина, в.ч. кабель) была близка: $\omega_z + \omega_{п.к.} = \omega_0$, что соответствует суммовому когерентному резонансу.

После нагрузки этих кабелей на волновое сопротивление, скорость быстрого затухания возросла вдвое (Рис.15).

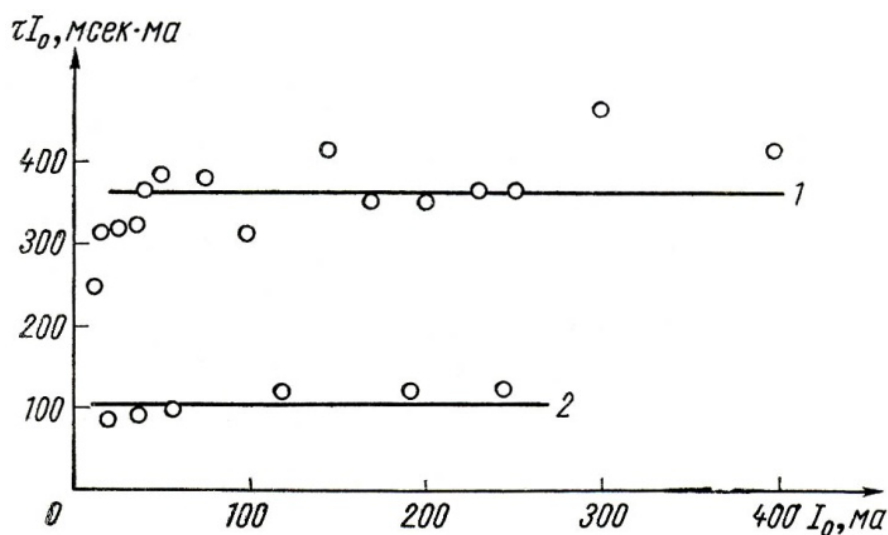


Рис. 15. Зависимость произведения времени быстрого затухания на ток пучка в зависимости от тока. Пластины разведения пучков не согласованы(1), нагружены на волновое сопротивление(2).

Радиальная неустойчивость. Возникновение этой неустойчивости препятствовало накоплению больших позитронных токов в выбранной рабочей точке по ν_r . Неустойчивость появлялась в узкой полосе бетатронных частот $\Delta \nu_x = \pm 2,5 \cdot 10^{-3}$

при токах свыше 2 мА. Обычно возбуждение неустойчивости происходило после возбуждения вертикальных колебаний. Пучок, не успев затухнуть по вертикали до установленного размера, быстро увеличивал радиальный размер до $\alpha_s \approx 1,5$ см. Инкремент неустойчивости линейно зависел от числа частиц. Основная часть частиц совершала когерентные колебания в течение нескольких минут, картина этого явления напоминала Сатурн с его кольцом. К сожалению, не удалось найти соотношение частот, которое оставляло бы постоянной комбинацию $\omega (m_r v_r + m_z v_z - n) \omega_0 = \omega_k$ при изменении v и ω_0 . Подавление неустойчивости было достигнуто введением системы радиальной обратной связи.

Продольные неустойчивости. Естественно, первая неустойчивость, которую увидели, была Робинсоновская – связанная с неправильной настройкой резонатора по отношению к частоте обращения частиц. В релятивистском случае когерентные фазовые колебания неустойчивы, если частота обращения частиц (частота ВЧ генератора) выше резонансной частоты ускоряющего резонатора. Физический смысл неустойчивости прост. Если когерентные потери уменьшаются с отклонением энергии сгустка от равновесной, то это приводит к раскачке когерентных колебаний.

При правильной настройке резонатора тем не менее появлялась продольная неустойчивость. Объяснил это явление М.М. Карлинер возбуждением 18 паразитной моды основного резонатора. Поэтому после модернизации в новом резонаторе все паразитные моды были перестроены в нужном направлении. Поскольку паразитных мод великое множество, то в машинах следующих поколений были разработаны так называемые одномодовые резонаторы. Однако, в то время, используя весь арсенал метода подавления неустойчивостей, нам удалось получить рекордные токи накопленных пучков. Так, например, на энергии инжекции электронов 200 мэВ, нам удалось накопить 10^{12} электронов в одном сгустке. Это соответствовало 4 А циркулирующего тока.

Как это удалось: если есть резонансные неустойчивости, то должны быть режимы, когда резонансная система поглощает энергию когерентного движения, т.е. демпфирует когерентное возбуждение. После модернизации в резонаторе можно было работать на 1 и 3 гармониках частоты обращения, при этом резонатор гармоники имел высокое шунтовое сопротивление 1 МоМ и добротность 12000. Используя идею резонансного демпфирования, надо было создать разностный когерентный резонанс $\omega_z + \omega_c = 3\omega_0$, здесь ω_z – частота резонатора гармоники, ω_c – частота фазовых колебаний. Знак «+» перед частотой фазовых колебаний соответствует разностному резонансу, т.к. синхротронная масса отрицательная! Значит, энергия дипольных фазовых колебаний поглощается в резонаторе гармоники. Время когерентного затухания при токах порядка ампера достигало сотен микросекунд.

К сожалению, ограничения по эффектам встречи не позволили использовать большие накопленные токи.

Как и на ВЭП-1, на ВЭПП-2 была выполнена большая программа экспериментов по изучению эффектов встречи и нелинейных резонансов. Были исследованы критерии разведения орбит электронов и позитронов и их частот бетатронных колебаний, необходимые для получения больших токов. В частности, наблюдалось и исследовано когерентное возбуждение одного пучка при накоплении другого. В изучении когерентных и некогерентных эффектов встречи важная роль принадлежит С.И.Мишневу. Ещё на этапе запуска будучи студентами в работу на ВЭПП-2 включились И.Вассерман, Ю.Пупков, Ю.Шатунов. В дальнейшем при ведущем участии Ю.Шатунова на ВЭПП-2 были поставлены первые эксперименты по обнаружению радиационной поляризации, явления предсказанного советскими физиками А.Соколовым и И.Терновым.

Вспоминает Ю.М. Шатунов:

Хорошо известно, что история радиационной поляризации началась в 1963 году с работы теоретиков МГУ (А.Соколов, И.Гернов и др.), которые, решая уравнение Дирака в однородном магнитном поле, обнаружили эффект само-поляризации электрона. Когда на ВЭПП-2 «запахло» пучком, разговоры на эту тему достигли и пультовой комплекса, где мы проводили ежедневно большую часть суток. По-видимому, я больше других проявлял интерес к этой новости, так что в июле 1966 года при поступлении в аспирантуру мне была записана тема: «Радиационная поляризация электронов и позитронов» (руководитель А.Н.Скринский). Реальность на комплексе в то время была крайне далека от столь высоких материй. Стоило только задуматься на какую-нибудь «постороннюю» тему, как тут же бдительный А.А.Наумов возвращал тебя на землю-началась битва за ρ -мезон. Первые события, были наблюдаемы в июле 1966 года, а уже в апреле 1967 года работы Института по встречным пучкам были удостоены Ленинской премии.

Но жизнь на ВЭППе продолжалась своим чередом. Продолжалась битва за ρ -мезон. Операторы на ВЭПП-2 работали по два человека: одну неделю в ночь – другую в день. Благодаря усилиям всех служб ВЭППа постепенно росла светимость и с ней увеличивалась загрузка детектора, который состоял из искровых камер с орг. стеклянными изолирующими рамками между высоковольтными пластинами. И вот однажды ночью в конце ноября от большого количества событий (вернее сказать искр – камера-то была искровая) орг. стекло разогрелось и воспламенилось. И детектор загорелся желтым пламенем. Поскольку съем информации с детектора был оптический, вся эта феерия “on-line” записалась на РФК. На пульте мы (я в то ночь был в смене) продолжали «кочегарить» до тех пор, пока не сработала вакуумная блокировка. Дальше была борьба с огнем, в которой мы с В.Матросовым победили, но на мне обгорели единственные брюки. Доложил в 3 часа ночи А.Н.Скринскому про аварию и попросил привезти что-нибудь потеплее. Этот эпизод, наверное, не сохранился бы в памяти, если бы не связанные с ним события. Во-первых, через день должна была состояться докторская защита В.А.Сидорова, оппонентом у которого был Бруно Понтекорво. Естественно, Сидоров и Будкер привели оппонента в зал ВЭПП-2, где вид был, мягко говоря, непрезентабельный. Но Андрея Михайловича это не смутило, и он выдал гостю тираду: «Вот это по-настоящему экспериментальная установка. Такие нельзя делать с большим запасом прочности – будешь долго строить. Это не какая-то фабрика, которая должна работать многие годы». Во-вторых, эта авария стала спусковым крючком для первой модернизации ВЭПП-2, подготовка к которой уже шла. Начало модернизации для пультового народа означало, что наконец-то можно заняться чем-то более интересным, чем кручение ручек на вариаторах. В частности, нашлись желающие пообсуждать измерение поляризации. С расстояния в почти 50 лет трудно вспомнить, кто сказал «а», а кто-«б», но шаг за шагом стала вырисовываться схема эксперимента. К этому времени В.Байер и В.Хозе (по просьбе А.Н.Скринского) уже написали статью на тему поляриметрии на электронных накопителях. И, естественно, мы выбрали самый дешевый способ измерения поляризации по внутрисгустковому рассеянию электронов (Тушек-эффект). Но оказалось, что на ВЭПП-2 это можно сделать вообще бесплатно. На кольце имелись два сцинтилляционных счетчика, расположенные в противоположных промежутках, для измерения светимости по e^+e^- рассеянию на малые углы. Г.Тумайкин, который в ходе модернизации сменил В.Ауслендера на посту начальника комплекса, нашел вариант использования этих счетчиков для измерения поляризации. Рассеиваясь друг на друге, электроны обменивались энергией и выходили из пучка. При этом один из электронов регистрировался счетчиком №1 вскоре после рассеяния, в то время как второй достигал счетчика №2 через 1,5 оборота.

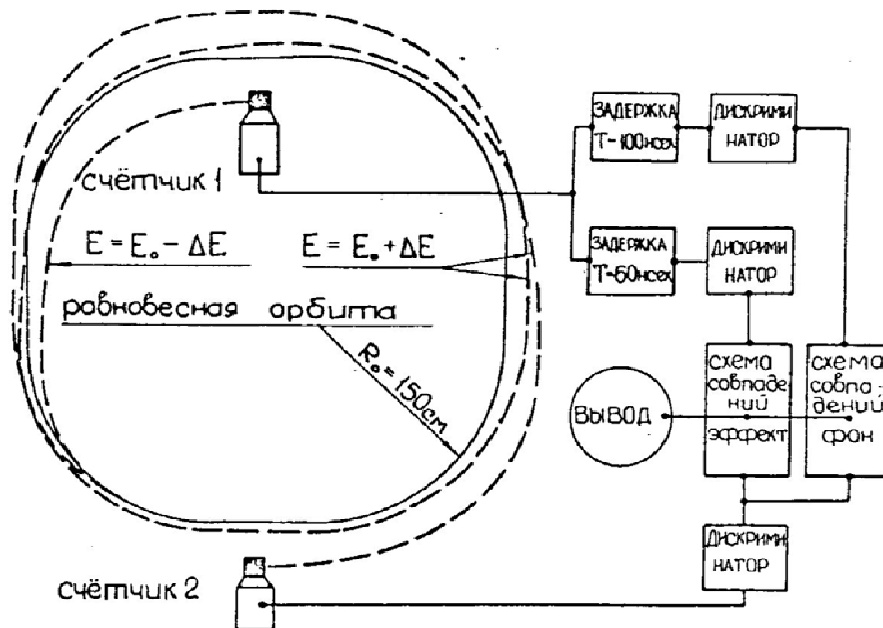


Рис.16. Схема эксперимента по измерению поляризации.

Перерыв на модернизацию позволил вставить в вакуумную камеру ВЭПП-2 первый в мире деполяризатор. На всякий случай для его питания нашли хороший ВЧ генератор. По оценке, из-за большой неопределенности энергии ВЭПП-2 требовался генератор мощностью около 1 Квт с быстрой перестройкой частоты и шумовой модуляцией. В ИЯФ такого не нашлось и мы с Е.П.Мельниковым поехали на глушилку (на Горской), где он раньше работал. Там у нас ничего не получилось, но мы увидели новенький «ВЯЗ». И вскоре удалось получить такой генератор в ИЯФ прямо с завода в Красноярске. Блок управления этим генератором был разработан М.Егорычевым.

Модернизация в то время, не то, что ныне, по всем линиям велась быстро. Я бы даже сказал, с огоньком – для новой коммутации шины перепаивались непосредственно в зале возле ВЭППа. Но ближе к концу этого мероприятия появились неожиданности.... потекли спаи трубок охлаждения в обмотках магнитов. Проявилось это не сразу, но устраняли это безобразие почти целый год. Так что светимость для А.Г.Хабахпашева (изучение Фи-мезона) появилась только зимой 1969 года. А на очереди был еще один детектор – А.П.Онучина/Л.Курдадзе, на котором в 1970 году было обнаружено множественное рождение адронов. В общем, ясно, что пучковое время для радиационной поляризации появилось не скоро. Конечно, нам удавалось иногда увидеть в счетчиках Тушек эффект, но не более того. Кстати, этими счетчиками в лаб.3 «заведовал» С.Середняков. Таким образом, он автоматически присоединился к измерению поляризации.

Реальные измерения удалось начать только осенью 1970 года. Надо сказать, что оценка спиновой диффузии на деполярирующих резонансах показывала, что наилучшие условия для поляризации должны быть в районе 640 – 650 МэВ. Время поляризации на ВЭПП-2 для этой энергии было около часа и ожидаемая степень поляризации 50 – 60%. Время жизни пучка было явно недостаточно (2-3 часа). Нормированная на квадрат тока пучка скорость счета Тушек эффекта изменялась во много раз больше чем от ожидаемого вклада поляризации. Сказывалось изменение размеров пучка из-за накопления ионов и сдвига частот от них и от пространственного заряда. Но со временем ситуация улучшалась, так что стало возможным провести измерения, Делалось это следующим образом: электронный ток 100 мА выдерживался при заданной энергии 2 часа, после чего начинался набор статистики в несколько циклов по 200 секунд. Затем включался деполяризатор в некотором интервале частот; снова набиралась статистика, и опять

включалось ВЧ поле уже в следующем диапазоне. Всего в каждом цикле делалось пять шагов по частоте с заполнением шумовой модуляцией. Поведение усредненной по трем заходам нормированной скорости счета через 2,5 часа после начала захода показано на Рисунке 17.

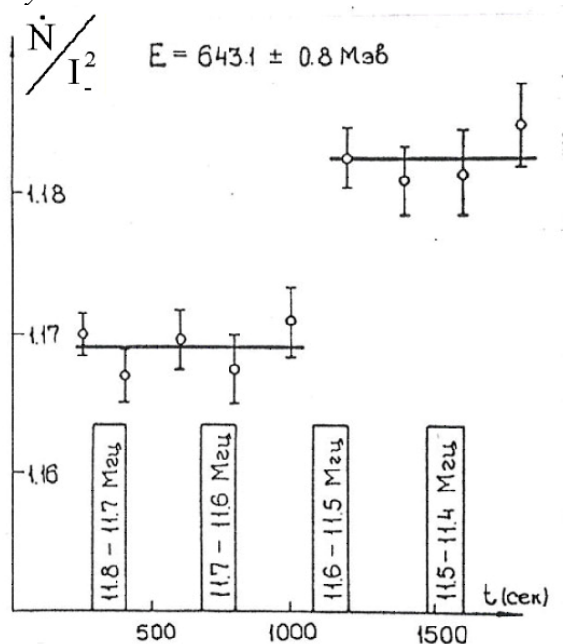


Рис. 17. Отношение скорости счета рассеянных электронов к квадрату тока пучка циркулирующего тока после каждого включения деполяризатора.

Скачок скорости счета составляет 1,1%, что соответствует степени поляризации $0,52 \pm 0,13$, а частота деполяризации дает измерение энергии $E = 643,1 \pm 0,8$ МэВ. В контрольных заходах без включения ВЧ или с включением заведомо в другом месте скачков не наблюдалось. Аналогичные измерения были сделаны еще в 4-х точках по энергии. Частота деполяризации при этом изменялась линейно. Однако, при этом сканировании обнаружилось 3 или 4 точки, которые явно выпадали из линейной зависимости частоты деполяризации. К сожалению, ещё одна авария вывела из строя ВЭПП-2. При попытке поднять энергию обмотка одного из магнитов с ослабленным охлаждением основательно приварилась на «землю». Так как в этот момент разворачивались работы по созданию ВЭПП-2М, было решено начать вторую модернизацию

комплекса. Шел тогда ноябрь 1970 года.

Судьба полученных данных по поляризации на ВЭПП-2 была следующей. В декабре был подготовлен черновик препринта, который попал на глаза теоретикам, и они объявили научной общественности об открытии радиационной поляризации. Сначала В.Хозе на Зимней школе ЛИЯФ, затем В.Байер в УФН. Но наша публикация так и не появилась. Упомянутые 3-4 точки, которые впоследствии были объяснены деполяризацией мощным ВЧ полем на боковых резонансах, вызывали тогда сомнения.

Заключение

Эксперименты на ВЭПП-2 продолжались до ноября 1970 года. В связи решением о создании нового коллайдера ВЭПП-2М кольцо ВЭПП-2 было переоборудовано в бустер. Электронный канал был ликвидирован, была организована переполюсовка поля и элементов канала. До июня 1987 года бустер обеспечивал электронами и позитронами экспериментальную программу ВЭПП-2М.

Литература.

1. В.Л.Ауслендер, Т.А.Всеволожская, Л.Л.Данилов, С.И.Мишнев, А.А.Наумов, Г.И.Сильвестров, А.Н.Скринский. Инжекция и накопление позитронов. Атомная энергия, 1967, 22, в.3, с.206.
2. Г.И.Будкер. Ускорители со встречными пучками частиц. Успехи физических наук, 1966, 89, №4, с.533
3. В.Л.Ауслендер, Г.А.Блинов, Г.И.Будкер, М.М.Карлинер, А.В.Киселев, А.А.Лифишиц, С.И.Мишнев, А.А.Наумов, В.С.Панасюк, Ю.Н.Пестов, В.А.Сидоров, Г.И.Сильвестров, А.Н.Скринский, А.Г.Хабахпашев, И.А.Шехтман. Состояние работ на позитрон-электронном накопителе ВЭПП-2. Атомная энергия, 1965, 19, №6, с.502.

4. *В.Л.Ауслендер, В.Н.Байер, Г.А.Блинов, Г.И.Будкер, А.В.Киселев, Е.А.Кушниренко, А.А.Лифшиц, Е.С.Миронов, А.А.Наумов, В.С.Панасюк, С.Н.Родионов, В.А.Сидоров, Г.И.Сильвестров, А.Н.Скринский, В.С.Сынах, Л.И.Юдин.* Встречные позитрон-электронные пучки (Работы по встречным электрон-электронным, позитрон-электронным и протон-протонным пучкам в Институте ядерной физики СО АН СССР) Труды Междунар.конф. по ускорителям, Дубна, 1963. Атомиздат, 1964, с.274.
5. *Л.Л.Данилов, С.Н.Родионов, Г.И.Сильвестров.* Параболическая линза для аксиально-симметричной фокусировки релятивистских частиц. ЖТФ, 1967, т. XXXVII, в.5, стр.914.
6. *В.Л.Ауслендер, Г.И.Будкер, И.Б.Вассерман, Н.С.Диканский, М.М.Карлинер, М.Д.Малеев, С.И.Мишнев, В.А.Сидоров, А.Н.Скринский, Г.М.Тумайкин, А.Г.Хабахнашев, Ю.М.Шатунов, И.А.Шехтман.* Реконструкция установки со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2. Труды VII Междунар. конф. по ускор. частиц высоких энергий, Ереван: Изд. АН АрмССР, 1970, т.2, с.26.
7. *Н.С.Диканский, Д.В.Пестриков.* Физика интенсивных пучков в накопителях, Новосибирск, Наука, Сиб.Отделение, стр.224, 336.
8. *Н.С.Диканский, А.Н.Скринский,* Поперечная когерентная неустойчивость сгустка заряженных частиц. Атомная энергия, 21, 1966, стр.176.
9. *Н.С.Диканский, М.М.Карлинер, А.Н.Скринский, В.Е.Шапиро, И.А.Шехтман.* Взаимодействие когерентных бетатронных колебаний с внешними системами. Атомная энергия, 22, 1967, стр.188.
10. *Т.А.Всеволожская, В.Н.Пакин, Г.И.Сильвестров.* Впускные магниты электрон-позитронного накопителя ВЭПП-2. Атомная энергия, 22, 1967, стр.210..
11. *В.С.Панасюк.* Радиотехнические устройства безжелезных ускорителей и установок встречных пучков института ядерной физики. Сильноточный синхротрон со специальной конструкцией электромагнита и внешней инжекцией электронов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Новосибирск, 1964 г.
12. *Л.И.Юдин.* Радиотехнические устройства для однооборотной инжекции электронов в сильноточный синхротрон. Диссертация на соискание ученой степени канд. т.н. Новосибирск, 1964 г.
13. *Н.Г.Коньков.* Разработка и исследование импульсного синхротрона без магнитных полей рассеяния. Диссертация на соискание уч. степ. канд. физ.-мат. наук, Новосибирск, 1965 г.
14. *Вал.В.Петров.* Сильноточный синхротрон Б-3М – инжектор для позитрон-электронного накопителя ВЭПП-2. Диссертация на соискание уч. степ. канд. физ.-мат. наук, Новосибирск, 1969 г.
15. *Г.И.Яснoв.* Высоковольтные инжекторы сильноточных импульсных синхротронов. Диссертация на соискание уч. степ. канд. физ.-мат. наук, Новосибирск, 1973 г.
16. *В.Ф.Туркин.* Ускорительный комплекс электрон-позитронного накопителя ВЭПП-2М. Диссертация на соискание уч. степ. канд. физ.-мат. наук, Новосибирск, 1990 г.
17. *Г.И.Сильвестров.* Электронно-оптические каналы установок со встречными пучками. Диссертация на соискание уч. степ. канд. физ.-мат. наук, Новосибирск, 1969 г.
18. *В.Л. Ауслендер.* Накопление электронов и позитронов в установке ВЭПП-2. Диссертация на соискание уч. степ. канд. физ.-мат. наук, Новосибирск, 1965 г.
19. *С.И.Мишнев.* Исследование взаимодействия встречных пучков. Диссертация на соискание уч. степ. канд. физ.-мат. наук, Новосибирск, 1975 г.
20. *Н.С.Диканский.* Исследование когерентной устойчивости пучков в накопителях. Диссертация на соискание уч. степ. канд. физ.-мат. наук, Новосибирск, 1969 г.
21. *Вик.В.Петров.* Высокочастотная система установки со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-2. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новосибирск, 1971г.

22. *В.Н.Пакин*. Исследование и создание импульсных систем для впуска и выпуска на комплексах со встречными пучками ВЭП-1, ВЭПП-2 и ВЭПП-3. Диссертация на соискание уч. степ. канд. физ.-мат. наук, Новосибирск, 1976г.
23. *А.В.Киселев*. Однооборотный выпуск из синхротрона Б-3М ИЯФ СО РАН СССР и инжекция в накопитель ВЭПП-2. Диссертация на соискание уч. степ. канд. физ.-мат. наук, Новосибирск, 1965.
24. *А.Н.Скринский*. Разработка и запуск установок со встречными электрон-электронными и позитрон-электронными пучками. Обзор работ на соискание ученой степени доктора ф.-м. наук. Новосибирск, 1965.

IV. ДЕТЕКТОРЫ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ВЭПП-2.

Первоначально целью физических экспериментов на ВЭПП-2 было изучение рождения векторных мезонов $\rho(770)$, $\omega(783)$ и $\phi(1020)$ и проверка квантовой электродинамики. В дальнейшем, к 1970 году, в программу было дополнительно включено изучение формфакторов π - и K -мезонов в зависимости от энергии и процессы множественного рождения π - и K -мезонов при полной энергии выше 1 ГэВ.

Во время экспериментов основные параметры коллайдера ВЭПП-2 были следующие: средние токи электронов и позитронов составляли, соответственно, 50 и 20 мА, время жизни пучков — около 1 часа, мгновенная светимость — 10^{28} см $^{-2}$ с $^{-1}$, диапазон энергии — 290-670 МэВ в пучке, частота обращения составляла 25 МГц (период — 40 нс). Максимальная энергия ВЭПП-2 была выше энергии нашего ближайшего конкурента — французского накопителя АСО (550 МэВ в пучке) в лаборатории ОРСЭ.

Эксперименты на ВЭПП-2 начались в 1966 году. Это было на год раньше, чем на накопителе АСО. В период 1966-1970 годов на ВЭПП-2 было проведено три эксперимента. В то время детекторы не имели названий, а назывались «системами регистрации». Базовая конфигурация детектора была неизменной во всех трех экспериментах, менялись лишь элементы детектора, ближайшие к месту встречи.

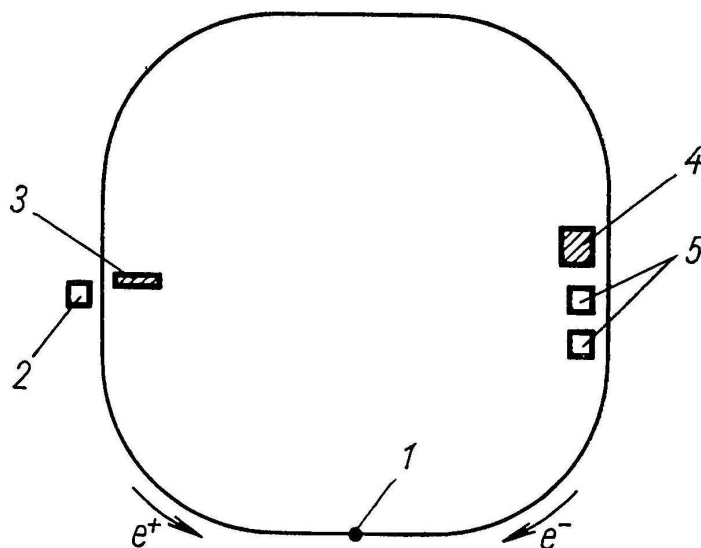


Рис. 1: Расположение счетчиков для регистрации e^+e^- рассеяния под малыми углами на ВЭПП-2. 1 — область встречи; 2,5 — счетчики; 3,4 — элементы защиты.

Контроль светимости проводился по процессу e^+e^- рассеяния на малые углы. Для этого на четверти оборота от места встречи, вблизи орбиты были установлены счетчики, регистрирующие в совпадениях этот процесс (рис. 1). Для уменьшения фона счетчики были прикрыты экранами.

Три эксперимента на ВЭПП-2 проводились под руководством В.А. Сидорова. Первый эксперимент проводился в области ρ -мезона (1966-1967), второй в области ϕ -мезона (1968-1969) и третий — многоадронный эксперимент — проводился в области выше ϕ -мезона (1969-1970).

1. ρ -мезонный эксперимент

Первые эксперименты на ВЭПП-2 были нацелены на регистрацию коллинеарных событий процессов $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$. Поэтому детектор (рис. 2) состоял из двух «коллинеарных башен», расположенных в вертикальном направлении. Каждая башня содержала пару сцинтилляционных счетчиков, оптические искровые камеры — трековые, «ливневые» и «пробежные», сверху башен располагался сцинтилляционный счетчик антисовпадений. Телесный угол детектора был невелик, $\sim 10\%$ от 4π . Запуск триггера осуществлялся двумя парами сцинтилляционных счет-

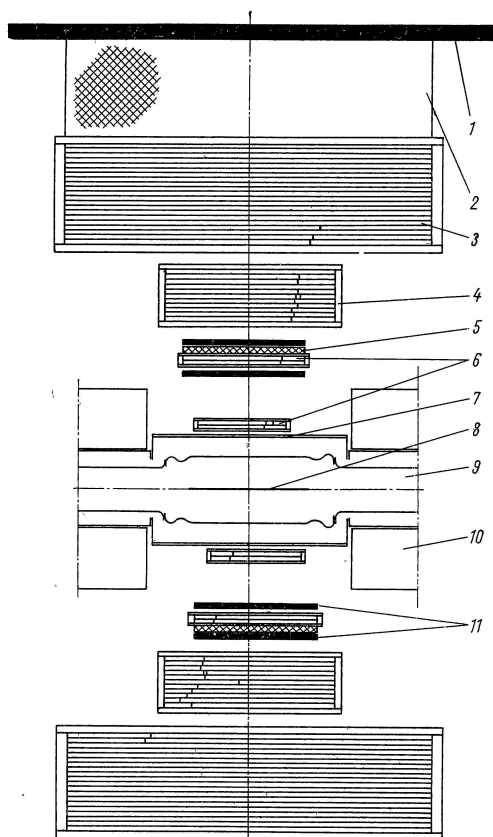


Рис. 2: Схема детектора на ВЭПП-2 в эксперименте 1967 г. 1 — сцинтилляционный счетчик антисовпадений; 2 — поглотитель из свинца толщиной 20 см; 3-4 — пробежная и ливневая искровые камеры; 5 — поглотитель; 6 — трековые искровые камеры; 7,9 — элементы вакуумной камеры; 8 — область встречи пучков; 10 — магнит накопителя; 11 — сцинтилляционные счетчики.

чиков в обеих «башнях». Точность трековой системы составляла 1 мм. В «ливневых» камерах толщиной около $4.5 X_0$ наблюдалась первая фаза размножения частиц в ливнях от электронов и фотонов. С их помощью выделялись события процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$. В «пробежной» камере по длине пробега разделялись π - и μ -мезоны. Космический фон подавлялся счетчиком антисовпадений. Положение искр в камерах с помощью довольно сложной системы зеркал сводилось на один кадр фотокамеры. Пленки просматривались на аппарате ПУОС, где проводилась их оцифровка и запись результата на перфоленду. Перфоленда считывалась на ЭВМ Минск-22 для дальнейшей обработки.

Скорость счета фона, в основном, космического, составляла около 0.003 Гц. Скорость триггера была 0.01 Гц. Время блокировки — 0.3 сек. Всего было записано 45 тыс.

событий. После отбраковки явного фона осталось 4 тыс. событий. В дальнейшем было выделено около 300 событий процессов с рождением коллинеарных пар частиц в районе массы ρ -мезона. Понятием интегральной светимости в то время не пользовались, но по числу e^+e^- событий можно оценить, что интеграл светимости был несколько обратных нанобарн. В результате эксперимента было идентифицировано более 100 $\pi^+\pi^-$ событий, распределение по энергии которых имело явно резонансный характер (рис.3). При даль-

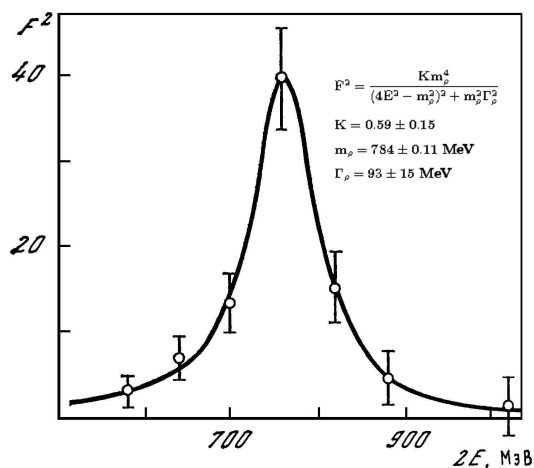


Рис. 3: Первый ρ -мезон на встречных пучках, измеренный на ВЭПП-2 в 1967 г.

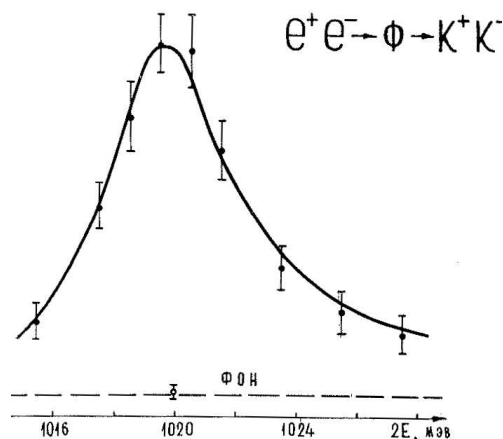


Рис. 4: Первый φ -резонанс на ВЭПП-2 в эксперименте 1969 г.

нейшей аппроксимации данных формулой Брейта-Вигнера были получены параметры ρ -мезона, неплохо согласующиеся с современными значениями.

Вспоминает Е.В. Пахтусова:

Первый эксперимент на ВЭПП-2 по исследованию ρ -мезона проводил Пестов Юра, разрабатывавший и использующий в эксперименте в нашем Институте методику искровых камер. Юра удивлял широтой своих познаний: от тонкостей экспериментальной методики до теоретических основ физики частиц. Пестовым, в основном, был создан новый модифицированный детектор для экспериментов на ВЭПП-2, но эксперименты на нем проводились уже под руководством Алексея Георгиевича Хабахпашева.

Алексей Георгиевич был одним из старейшин Института, ведь ему недавно уже исполнилось 40(!) лет. Ветеран ВОВ, опытный и мудрый, специалист в области экспериментальной физики, Алексей Георгиевич обладал способностью осваивать новые методы в технике эксперимента и обработки экспериментальных данных. В результате экспериментов на ВЭПП-2 под его руководством были получены данные, вошедшие в таблицы свойств элементарных частиц.

Эти люди стояли у истоков создания того, что называется школой эксперимента, и, в основном, формировали те правила и подходы, которые в настоящее время обеспечивают эффективность проводимых на установках Института экспериментов по физике элементарных частиц.

Этот эксперимент вошел в историю развития метода встречных пучков как первый эксперимент на встречных электрон-позитронных пучках по рождению адронов. Работа получила большой резонанс в мире, она включалась в обзоры, цитировалась, докладывалась на конференциях. Измеренные параметры ρ -мезона вошли в таблицы Розенфельда, так в то время назывались таблицы частиц PDG.

2. ϕ -мезонный эксперимент

В 1968 году во Франции в Орсе заработал коллайдер АСО в области ϕ -мезонного резонанса. В дальнейшем наши эксперименты проходили параллельно с экспериментами в Орсе.

Ко второму эксперименту на ВЭПП-2 была проведена значительная модернизация. Резонатор был перестроен на третью гармонику частоты обращения 75 МГц, что дало сокращение длины области встречи. Был улучшен вакуум, и время жизни пучков увеличилось до 4-5 часов. Были сделаны отверстия в магнитах для вывода пучка двойного тормозного излучения и установлены счетчики с кристаллами NaI(Tl). После реконструкции промежуток встречи элементы детектора были придвинуты к пучку и телесный угол координатной системы увеличился в 1.5 раза.

Целью эксперимента было измерение параметров ϕ -мезонного резонанса. Для регистрации заряженных К-мезонов были установлены предельно тонкие вакуумная камера и первая по ходу частиц искровая камера. Заряженные К-мезоны пересекали эту камеру и останавливались в сцинтилляционном счетчике, давая большое энерговыделение. Остальные частицы — электроны, пионы, мюоны регистрировались так же, как и в ρ -мезонном эксперименте.

Эксперимент продолжался 40 дней, было сделано около 100 тыс. кадров, из которых в процессе обработки было отобрано 1600 событий e^+e^- взаимодействия. Полный интеграл светимости составил 8.5 обратных нанобарн. На рис. 4 показано наблюдаемое сечение рождения ϕ -мезонов, распадающихся по каналу $\phi \rightarrow K^+K^-$.

Было измерено более 10 основных параметров ϕ -мезона. Сюда входят вероятности распада по основным каналам $\phi \rightarrow K^+K^-$, $K_S K_L$, $\pi^+\pi^-\pi^0$, сечение в максимуме, масса и полная ширина, константы связи. Полученные результаты были опубликованы в журналах, докладывались на конференциях и вошли в таблицы частиц.

Кроме параметров ϕ -мезона, в данном эксперименте было сделано еще несколько пионерских измерений. Впервые наблюдался процесс 2-х квантовой аннигиляции $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$. Для этого между трековыми камерами были установлены конверторы толщиной 10 мм свинца. Всего было обнаружено примерно 50 событий 2-х квантовой аннигиляции, что соответствует расчету по КЭД. В области энергии ϕ -мезона было измерено сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ и получен формфактор π -мезона (снимок события показан на рис. 5). Было также измерено сечение важного КЭД процесса $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$.

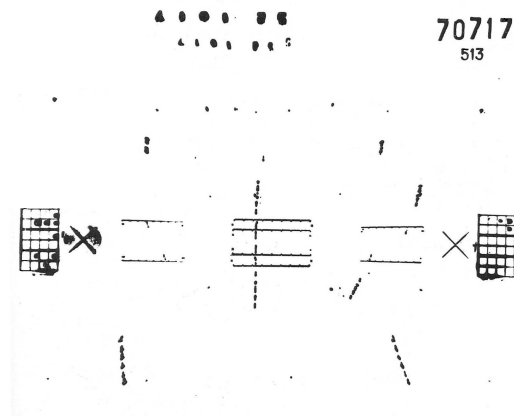


Рис. 5: Снимок события процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ на ВЭПП-2 в области ϕ -резонанса в 1969 г. Вертикальные линии в центре — треки в координатных камерах.

Особо нужно отметить первое наблюдение и измерение сечения процесса двухфотонного рождения e^+e^- пар. В эксперименте наблюдались «вилки» — пары неколлинеарных короткопробежных частиц, которые в первое время считали фоном, но в дальнейшем эти события были правильно идентифицированы как процесс $e^+e^- \rightarrow e^+e^-e^+e^-$. Из этого первого измерения выросло новое направление — двухфотонная физика на встречных пучках.

Уже в то время обращалось внимание на возможное влияние поляризации пучков на результаты, что особенно важно было для детектора ВЭПП-2 с малым телесным углом. Позднее, в конце 1970 года, были проведены первые поиски поляризации пучков с использованием счетчиков системы малых углов.

3. Многоадронный эксперимент

В 1970 году впервые был проведен эксперимент при энергии выше ϕ -мезона. Измерения проводились при трех значениях полной энергии $2E=1.18, 1.26$ и 1.34 ГэВ. Состояние коллайдера во время проведения эксперимента характеризовалось следующими параметрами. Начальный ток позитронов был равен 40 мА, электронов — 70 мА. Среднее время жизни пучков составляло 5 часов. Светимость, усредненная по времени измерений, была равна $10^{28} \text{см}^{-2} \text{сек}^{-1}$. Набранный интеграл светимости составил несколько обратных нанобарн.

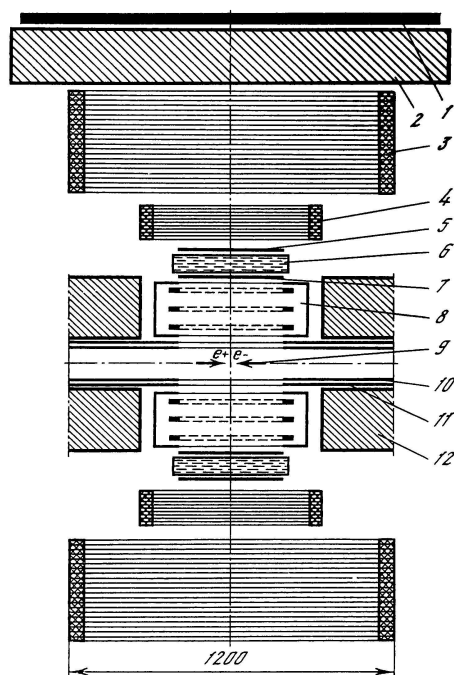


Рис. 6: Модифицированный детектор на ВЭПП-2 в эксперименте 1970 года. 1 — счетчик антисовпадений, 2 — поглотитель, 3-4 — пробегная и ливневая камеры, 5-7 — сцинтилляционные счетчики, 6 — черенковский счетчик, 8 — проволочные камеры, 9 — траектория пучков, 10-11 — вакуумная камера, 12 — магниты накопителя.

Для данного эксперимента в детекторе координатные оптические искровые камеры были заменены на проволочные искровые камеры (рис. 6), и поставлены водяные черенковские счетчики (рис. 7). Телесный угол системы составлял 2×0.8 стерадиана. Геометрические характеристики событий определялись с помощью проволочных камер. С каждой стороны от места встречи находилось по три двухкоординатных камеры

с памятью на ферритовых кольцах. Проволочные камеры работали в режиме непосредственной связи с ЭВМ "Минск-22" одновременно вся информация записывалась на магнитную ленту. При обработке эксперимента просматривались фотографии с оптических искровых камер событий, отобранных с помощью проволочных камер. Использование проволочных камер позволило существенно сократить время от набора статистики до получения результата.

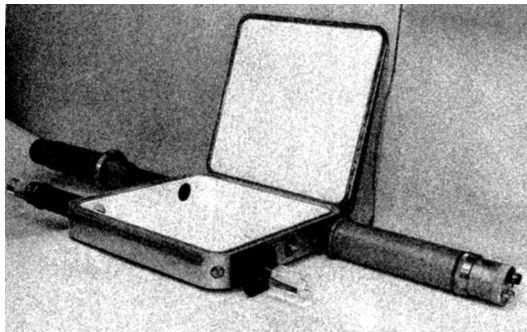


Рис. 7: Водяной черенковский счетчик в детекторе для ВЭПП-2 в 1970 г.

В черенковских счетчиках в качестве радиатора использовалась вода. Эффективность счетчика, измеренная по событиям упругого позитрон-электронного рассеяния, составила 99%. Расчетное значение эффективности регистрации К-мезонов с полной энергией 670 МэВ было равно 7%, причем при энергии 630 и 590 МэВ эффективность была меньше 1%. Применение черенковских счетчиков обеспечило надежное разделение процессов рождения пар пионов и каонов, а также дало возможность отделить процесс двойного электророждения позитрон-электронной пары от многочастичных процессов.

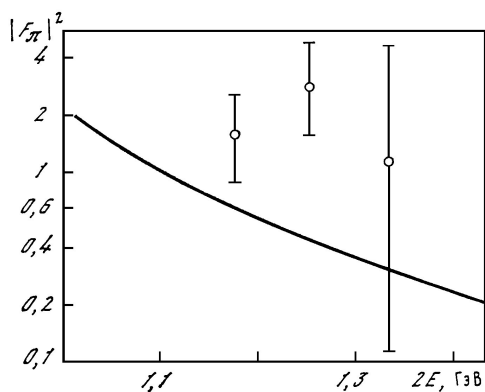


Рис. 8: Формфактор π -мезона на ВЭПП-2 в эксперименте 1970 г.

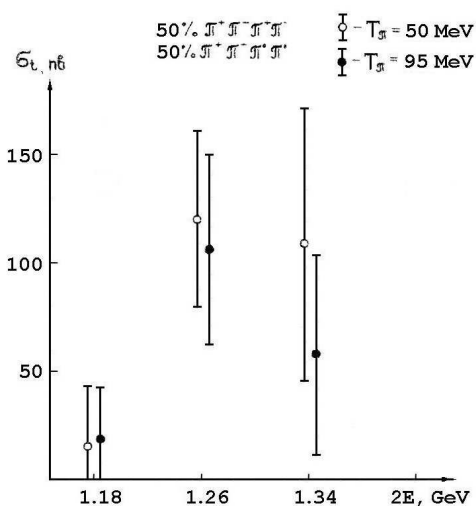


Рис. 9: Сечение рождения 4-х пионов на ВЭПП-2 в эксперименте 1970 г.

Заметим, что в этом детекторе впервые на встречных пучках использовались и проволочные камеры и черенковские счетчики.

Самым важным результатом этого эксперимента было открытие многоадронных событий (рис. 9). В основном это были двухчастичные неколлинеарные события. Информация с черенковских счетчиков и с оптических камер позволила заключить, что

наблюдаемые частицы являются π -мезонами. Число событий существенно превышало теоретические оценки.

Набор статистики закончился в мае. Был подготовлен препринт, и в августе 1970 года эти результаты были представлены на Рочестерской конференции в Киеве. Туда поехали В. А. Сидоров и А.П.Онучин, доклад делал Онучин. Важным событием на этой конференции было то, что итальянские физики на установке ADONE тоже обнаружили и представили аналогичные многоадронные события, но при более высокой энергии. Вокруг этих результатов была бурная дискуссия. Природа их казалась загадочной.

Обработка эксперимента продолжалась еще два года. Изучались различные возможные процессы, которые могли бы дать объяснение полученным результатам. В частности, Алтухов и Хрипович произвели расчеты сечения рождения четырех процессов: $\rho\pi$, $\omega\pi$, $A_1\pi$, $\rho\epsilon$. В заключительной публикации было сказано, что не существует теории, которая бы объясняла природу многоадронных событий. Лишь позже, когда восторжествовала кварковая модель, стало ясно, что это было одно из первых наблюдений легких кварков.

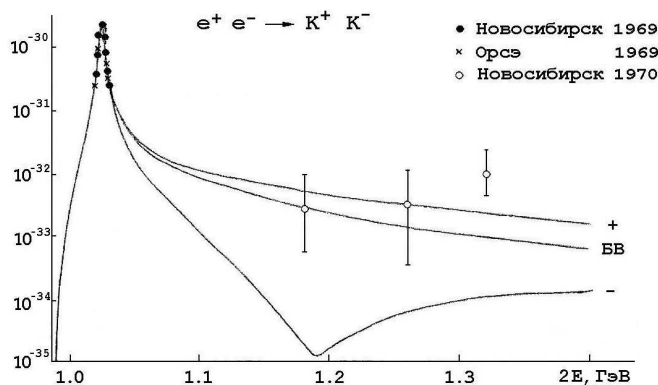


Рис. 10: Сечение процесса $e^-e^- \rightarrow K^+K^-$ на ВЭПП-2 в эксперименте 1970 г.

Кроме открытия многоадронных событий, в этом эксперименте был получен еще один неожиданный результат — сечение рождения пар пионов и каонов превышало расчет по модели векторной доминантности (рис. 8, 10). Позже в этой области энергии были открыты тяжелые векторные мезоны.

В эксперименте 1970 года были изучены еще два процесса — рождение пар мюонов и двухфотонное рождение электрон-позитронных пар. Для проверки справедливости квантовой электродинамики была проведена совместная обработка экспериментальных данных, полученных в 1969 г. и 1970 г. Ранее, в 1969 году, была набрана статистика в процессе рождения мюонных пар, а также в процессе двухквантовой аннигиляции. В 1970 году набрана статистика по рождению мюонных пар. Был получен верхний предел применимости квантовой электродинамики $\Lambda < 6 \cdot 10^{-15}$ см.

При изучении двухфотонного рождения электрон-позитронных пар наличие черенковских счетчиков позволило надежно произвести идентификацию событий. Результаты эксперимента согласуются с расчетами сечений, полученными Байером и Фадиным.

После киевской конференции 1970 года в ИЯФе было принято два важных решения. Первое — построить коллайдер ВЭПП-2М на ту же энергию, что у ВЭПП-2, но увеличить светимость на два порядка и иметь два места встречи. Началась разработка коллайдера и детекторов. Л.М.Курдадзе возглавил разработку детектора ОЛЯ на

основе проволочных искровых камер, а Л.М.Барков — разработку детектора КМД на основе оптических искровых камер.

И второе решение — форсировать работы в области более высоких энергий, чем достигнутые в Италии. Возросла активность работ на ВЭПП-3. Для этого коллайдера группа Балакина начала разрабатывать детектор на основе оптических искровых камер. А.П.Онучин с учениками начал разрабатывать большой магнитный детектор МД-1 на основе многопроволочных пропорциональных камер.

В это же время СЛАК принял решение форсировать сооружение коллайдера СПЕ-АР.

Наиболее значительные физические результаты экспериментов на ВЭПП-2.

1 — первые наблюдения и измерение параметров векторных мезонов на встречных пучках, 2 — проверка квантовой электродинамики, 3 — первое наблюдение процесса двухфотонного рождения e^+e^- пар, 4 — первое наблюдение процесса многоадронного рождения, 5 — первое наблюдение превышения формфакторов пи- и К-мезонов над предсказаниями модели векторной доминантности

Наиболее важные методические достижения экспериментов на ВЭПП-2.

1 — первое применение проволочных камер в детекторе на встречных пучках в ИЯФ,
2 — первый эксперимент on-line — прямая запись данных с детектора на магнитофоны ЭВМ,
3 — впервые использовался черенковский счетчик для идентификации частиц.

Диссертации.

По материалам экспериментов на ВЭПП-2 были защищены кандидатские диссертации Ю.Н. Пестовым, Е.В. Пахтусовой, Л.М. Курдадзе, В.Е. Балакиным и докторские диссертации В.А. Сидоровым, А.Г. Хабахпашевым и А.П. Онучиным.

Некоторые из участников экспериментов на ВЭПП-2

Физики: В.А. Сидоров, Г.И. Будкер, А.Н. Скринский, Ю.Н. Пестов, А.П. Онучин, В.Е. Балакин, А.Г. Хабахпашев, Л.М. Курдадзе, Е.В. Пахтусова, С.И. Середняков. В дальнейшем к анализу данных подключились А.Д. Букин и С.И. Эйдельман.

Стоит упомянуть теоретиков, которые в те годы активно осуществляли теоретическую поддержку экспериментов, обеспечивали расчеты и обсуждали полученные результаты с экспериментаторами: В.Н. Байер, И.Б. Хриплович, В.С. Фадин, В.А. Хозе.

Электронщики: Ю.В. Коршунов, Г.Г. Мелехов, С.Е. Бару, В.И. Фоминых, В.М. Аульченко, Н. Тумайкина, Г.А. Савинов, И.Г. Фельдман, Г.Д. Минаков, М.Д. Минаков. Участники от ВЦ: В.М. Попов, А. Романов, от КБ: Г.М. Колачев, А.И. Романчук.

Лаборанты и механики: В.Н. Баев, В. Целуйкин, А.А. Живалев, А.А. Белавин, В.А. Яковлев, Г.А. Савинов, В. Шохин, А. Богатырев, А. Чуев, А.Е. Волков и другие.

Просмотр фотопленок производился группой сотрудников лаборатории 3, основное ядро которых составляли: В.Г. Шленкина, Г.Т. Шепель, Г.В. Щенникова.

О многих годах совместной работы с физиками-экспериментаторами вспоминает Г.М. Тумайкин:

Пройдя длинный путь работы почти на всех коллайдерах ИЯФ, я с благодарностью вспоминаю наше взаимодействие с физиками-экспериментаторами. При начале совместной работе на ВЭП-1 мы столкнулись с другой школой, отличной от школы ускорительщиков. Принципиальное отличие этих школ в том, что задачей ускорительщиков было получение

необходимых параметров установки, а детекторщиков — получение надежных физических результатов. На первых этапах совместной работы у нас часто было непонимание, относящееся к их стилю работы. Например, нам жалко было тратить целую смену, чтобы получить десятипроцентное уменьшение фона. Но постепенно эти проблемы утрясались, и мы стали много заимствовать из того, что приходило к нам от школы Сидорова-Онучина. С какого-то момента мы осознали, что получение физических результатов является нашей общей задачей. Несмотря на невысокую светимость наших первых установок, сложные условия работы, малую надежность оборудования, физикам-экспериментаторам удалось выжать все возможное и невозможное из первых детекторов и коллайдеров и получить физические результаты мирового уровня.

ЛИТЕРАТУРА

1. V.L. Auslender, G.I. Budker, Yu.N. Pestov, V.A. Sidorov, N.A. Skrinsky, A.G. Khabakhpashev. Investigation of ρ -meson resonance with electron-positron colliding beams. Physics Letters, 1967, **25B**, p. 433.
2. В.Л. Ауслендер, Г.И. Будкер, Е.В. Пахтусова, Ю.Н. Пестов, В.А. Сидоров, А.Н. Скринский, А.Г. Хабахпашев. Исследование ρ -мезонного резонанса на встречных электрон-позитронных пучках. Ядерная физика, 1969, **9**, с. 114.
3. V.E. Balakin, G.I. Budker, E.V. Pakhtusova, V.A. Sidorov, A.N. Skrinsky, G.M. Tumaikin, A.G. Khabakhpashev. Experiment on 2γ -quantum annihilation on the VEPP-2. Physics Letters, 1971, **34B**, p. 99.
4. V.E. Balakin, G.I. Budker, E.V. Pakhtusova, V.A. Sidorov, A.N. Skrinsky, G.M. Tumaikin, A.G. Khabakhpashev. Investigation of the ϕ -meson resonance by electron-positron colliding beams. Physics Letters, 1971, **34B**, p. 328.
5. V.E. Balakin, A.D. Bukin, E.V. Pakhtusova, V.A. Sidorov, A.N. Skrinsky, G.M. Tumaikin, A.G. Khabakhpashev. Evidence for electron-positron pair electroproduction. Physics Letters, 1971, **34B**, p. 663.
6. V.E. Balakin, G.I. Budker, L.M. Kurdadze, A.P. Onuchin, E.V. Pakhtusova, S.I. Serebnyakov, V.A. Sidorov, A.N. Skrinsky, A.G. Khabakhpashev. Physics Letters, 1971, **37B** p. 435.
7. V.E. Balakin, G.I. Budker, L.M. Kurdadze, A.P. Onuchin, E.V. Pakhtusova, S.I. Serebnyakov, V.A. Sidorov, A.N. Skrinsky. Measurement of the electron-positron annihilation cross-section into $\pi^+\pi^-$, K^+K^- -pairs at the total energy 1.18-1.34 GeV. Physics Letters, 1972, **41B**, p. 205.
8. L.M. Kurdadze, A.P. Onuchin, S.I. Serebnyakov, V.A. Sidorov, S.I. Eidelman. Observation of multihadronic events in e^+e^- collisions at energy of 1.18-1.34 GeV. Physics Letters, 1972, **42B**, p. 515.
9. В.Е. Балакин, А.Д. Букин, Л.М. Курдадзе, А.П. Онучин, Е.В. Пахтусова, С.И. Середняков, А.Г. Хабахпашев. Наблюдение двойного электророждения e^+e^- -пары. Ядерная физика, 1972, **16**, с. 729.
10. А.П. Онучин, С.И. Середняков. Пороговый черенковский счетчик. ПТЭ, 1972, **6**, с.57.
11. В.А. Сидоров. Эксперименты на встречных электрон-электронных и электрон-позитронных пучках. Диссертация д.ф.-м.н. Институт ядерной физики, Новосибирск, 1967 г.
12. Ю.Н. Пестов. Измерение сечения образования пар π -мезонов на встречных электрон-позитронных пучках. Диссертация к.ф.-м.н. Институт ядерной физики, Новосибирск, 1968 г.
13. А.Г. Хабахпашев. Исследование ϕ -мезонного резонанса на встречных электрон-позитронных пучках. Диссертация д.ф.-м.н. Институт ядерной физики, Новосибирск,

1970 г.

14. Е.В. Пахтусова. Анализ данных в экспериментах по изучению ρ^0 и Φ -резонансов на встречных электрон-позитронных пучках. Диссертация к.ф.-м.н. Институт ядерной физики, Новосибирск, 1971 г.

15. В.Е. Балакин. Исследование двухквантовой аннигиляции электрон-позитронной пары на встречных пучках. Диссертация к.ф.-м.н. Институт ядерной физики, Новосибирск, 1971 г.

16. А.П. Онучин. Рождение заряженных частиц на встречных позитрон-электронных пучках с энергией 1.18-1.34 ГэВ. Диссертация д.ф.-м.н. Институт ядерной физики, Новосибирск, 1972 г.

17. Л.М. Курдадзе. Исследование электрон-позитронной аннигиляции в пары $\mu^+\mu^-$, $\pi^+\pi^-$ при полной энергии 1.18-1.34 ГэВ. Диссертация к.ф.-м.н. Институт ядерной физики, Новосибирск, 1973 г.

Содержание

Введение.....	3
I. ВЭП-1 - первый коллайдер ИЯФ.....	7
Введение.....	7
1. Описание комплекса ВЭП-1.....	9
1.1. Синхротрон и канал.....	10
1.2. Коллайдер.....	16
2. Немного об ускорительной физике.....	21
Заключение.....	26
Литература.....	27
II. Детекторы и эксперименты на ВЭП-1.....	29
1. Рассеяние на большие углы.....	32
2. Рассеяние на малые углы.....	35
3. Двойное тормозное излучение.....	36
4. Тормозное излучение при рассеянии электронов.....	36
5. Методические работы.....	37
Литература.....	39
III. ВЭПП-2 первый электрон-позитронный коллайдер ИЯФ.....	41
Введение.....	41
1. Инжектор.....	42
2. Накопительная дорожка.....	47
3. Электронно-оптические каналы. Получение позитронов.....	51
4. Проведение экспериментов.....	54
Заключение.....	60
Литература.....	60
IV. Детекторы и эксперименты на ВЭПП-2.....	63
1. ρ -мезонный эксперимент.....	64
2. φ -мезонный эксперимент.....	66
3. Многоадронный эксперимент.....	67
Литература.....	71

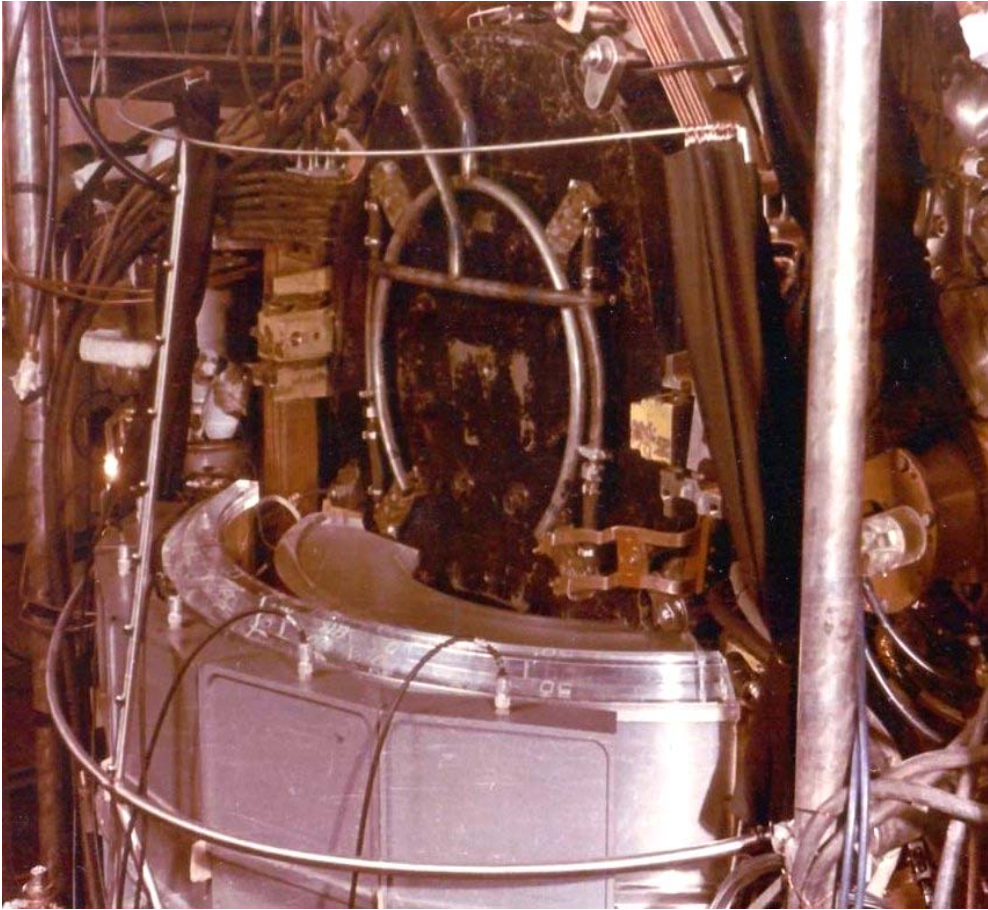
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г. И. БУДКЕРА
Сибирского отделения РАН

ПЕРВЫЕ КОЛЛАЙДЕРЫ ИЯФ.
К 50-летию начала экспериментов
по физике элементарных частиц.

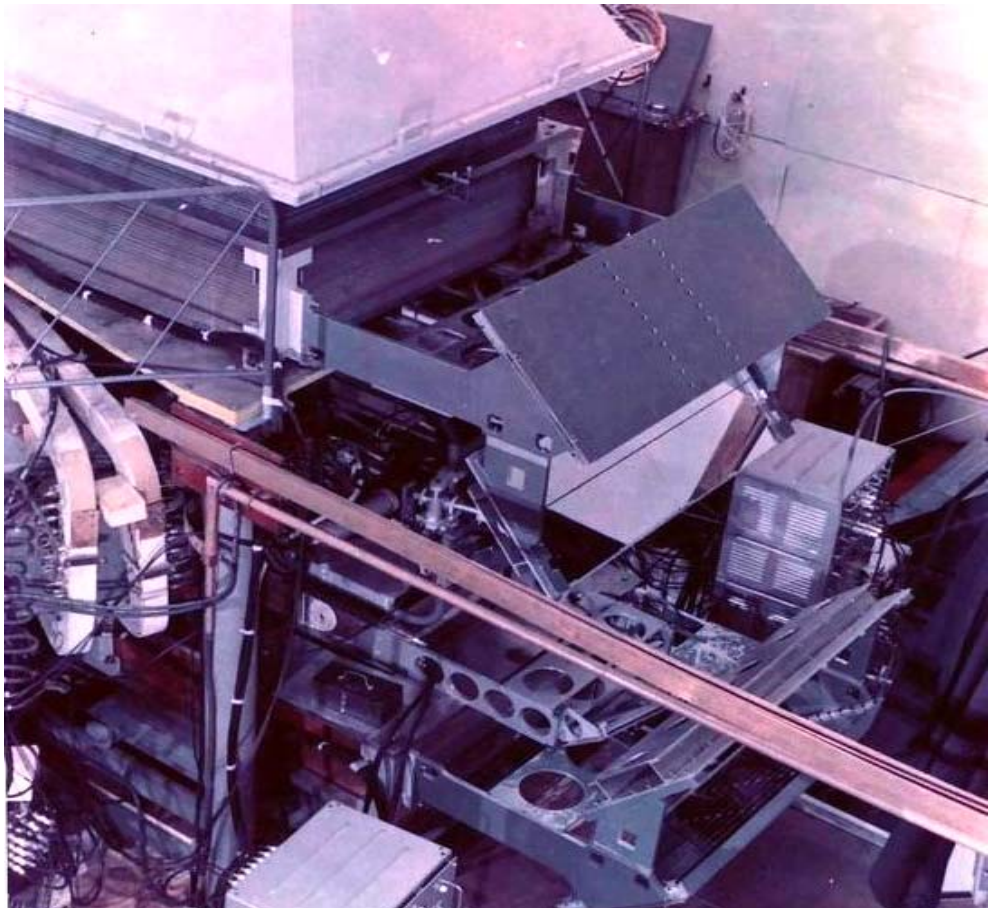
Ответственный за выпуск А.В. Васильев
Работа поступила 14.04.2014 г.

Сдано в набор 15.04.2014 г.
Подписано в печать 23.04.2014 г.
Формат 60x90 1/16 Объем 4,6 печ.л., 3,7 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 6

Обработано на РС и отпечатано
на ротапинтере ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11



Детектор ВЭП-1



Детектор ВЭП-2

