

П. С. БАРАНОВ, А. И. ЛЕБЕДЕВ, Е. П. ЧЕРЕНКОВА

АКАДЕМИК ПАВЕЛ АЛЕКСЕЕВИЧ ЧЕРЕНКОВ: НАУЧНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО ФИАН – ДЕЗИ

В мае 1983 г. в Италии (Сан-Ремо) и Ватикане прошла юбилейная конференция, посвященная 150-летию со дня рождения Альфреда Нобеля и 350-летию опубликования сочинения Галилео Галилея «Диалог о двух главнейших системах мира». Торжества проходили под патронатом президента Италии Сандро Пертини и короля Швеции Карла XVI Густава. На празднествах присутствовали папа римский Иоанн Павел II и президент Италии. Почетными гостями конференции были нобелевские лауреаты, известнейшие ученые всего мира и среди них академик Павел Алексеевич Черенков и обаятельный,



*Церемония представления академика П. А. Черенкова Папе римскому Иоанну Павлу II.
Рим, Ватикан. Май 1983 г.*

энергичный немецкий профессор Фолькер Зоргель, незадолго до этих событий назначенный директором Национальной лаборатории ФРГ Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY) – «Немецкий электронный синхротрон» (ДЕЗИ) в Гамбурге. Во время бесед в мае 1983 г. о подготавливаемой каталической церковью реабилитации «узника инквизиции» Галилео Галилея между этими выдающимися учеными возникла симпатия, основанная на единстве взглядов на роль ученых в науке и обществе.

В конце 70-х – начале 80-х гг. прошлого столетия мировая научно-техническая общественность широко обсуждала проекты создания ускорителей и накопителей электронов (е) и протонов (р) высоких энергий и реализации с их помощью встречных столкновений этих частиц с целью изучения строения вещества на все меньших расстояниях. В связи с предполагаемым началом строительства в ДЕЗИ крупного ускорительного комплекса – *ер*-коллайдера ¹ ГЕРА (HERA – Hadron-Elektron Ring Anlage) Зоргель пригласил Павла Алексеевича приехать в Гамбург, чтобы обсудить программу научных работ на коллайдере. Предметом обсуждения было также возможное участие в этих исследованиях сотрудников руководимой Черенковым Лаборатории фотомезонных процессов Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) в Москве и в подмосковном Троицке.

Началу совместных действий предшествовала деловая переписка ². Вот перевод на русский язык письма Черенкова Зоргелю от 7 июля 1983 г.:

Глубокоуважаемый профессор Зоргель!

Позвольте поблагодарить Вас за любезное приглашение посетить ДЕЗИ. Как Вы знаете из нашего с Вами обмена мнениями во время симпозиума, посвященного Нобелю и Галилею, для меня было бы удобно, если кто-то из моих сотрудников принял участие в этом визите. Поэтому я буду очень признателен Вам, если Вы сочтете возможным, прислать приглашения профессорам П. С. Баранову и А. И. Лебедеву – экспериментатору и теоретику, которые занимаются вопросами физики электромагнитных взаимодействий адронов.

Нам было бы также интересно посетить синхротроны в Бонне во время поездки в ФРГ. Наиболее приемлемое время для такого визита – начало следующего года.

Надеюсь вскоре получить от Вас известие.

Искренне Ваш

П. А. Черенков

В ответном письме от 17 августа 1983 г. Зоргель сообщает, что ему очень приятно пригласить в Гамбург Павла Алексеевича вместе с коллегами П. С. Барановым и А. И. Лебедевым, и что ДЕЗИ берет на себя расходы по пребыванию ученых в Германии.

Примерно в то же время Павел Алексеевич получил письмо, посланное 31 августа 1983 г., от директора Физического института Боннского университета профессора К. Альтхоффа с приглашением приехать в Бонн. Он писал:

¹ Термин «коллайдер» происходит от английского слова collide – сталкиваться.

² Переписка и фотографии хранятся в семейном архиве Сергея Павловича Баранова. Перевод писем выполнен П. С. Барановым.

Prof. V. Soergel
Notkestr 85
200 Hamburg 52
DESY F.R.G.

Moscow, July 7, 1983

Dear Professor Soergel:

Thank you very much for your kind invitation to visit DESY. As you know from our talk during Nobel and Galilei-Symposium it will be convenient for me if some of my colleagues join the visit. Therefor I would appreciate if you find it possible to send invitations also to Professors P.S. Baranov and A.I. Lebedev-experimentalist and theorist who work on physics of electromagnetic interactions of hadrons. I wonder will it be possible to visit Bonn synchrotrons during our stay at F.R.G.

The most suitable time for the visit will be the beginning of the next year.

Hope to hear from you soon.

Yours Sincerely,

P.A. Cherenkov

Письмо П. А. Черенкова профессору Ф. Зоргелю от 7 июля 1983 г.

«Возможно, для Вас представляет интерес тот факт, что мы сооружаем электронный накопитель на энергию 3,5 ГэВ – установку с большим коэффициентом заполнения».

В письме от 30 ноября 1983 г. Павел Алексеевич благодарит Ф. Зоргеля за приглашение, сообщает о предполагаемом времени приезда в марте-апреле 1984 г. и о желании посетить физические лаборатории в Бонне и Майнце, а в своем ответе (30 декабря 1983 г.) профессору Альтхоффу он пишет, что готов посетить синхротронную лабораторию в Бонне, «если обстоятельства позволят это сделать».

Научная командировка Черенкова, Баранова и Лебедева в Германию с целью предварительного обсуждения сотрудничества состоялась с 18 по 25 апреля 1984 г. Она началась с посещения лаборатории ДЕЗИ в Гамбурге и затем (уже на обратном пути в Москву через Франкфурт-на-Майне) – Лаборатории ядерной физики при университете в Майнце. К сожалению, времени для визита в Физический институт Боннского университета уже не оставалось. Эта поездка Павла Алексеевича в ФРГ, положившая начало плодотворному научному сотрудничеству ФИАН – ДЕЗИ, совпала с решением прави-

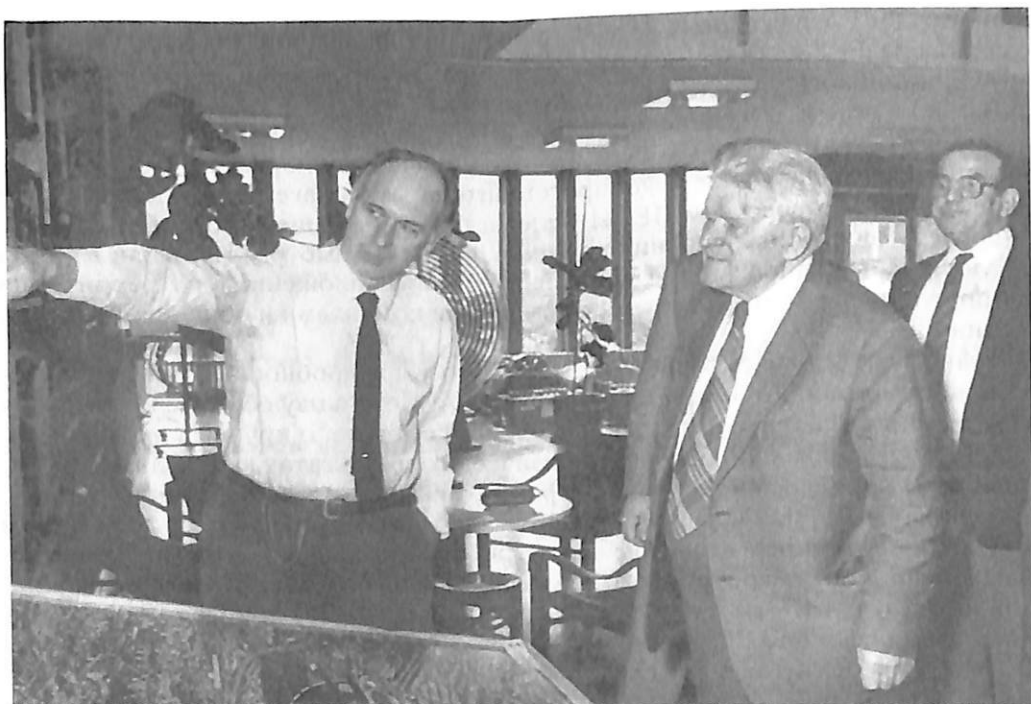
тельства ФРГ от 6 апреля 1984 г. о начале финансирования строительства коллайдера ГЕРА. В мае в Гамбурге начались строительные работы по сооружению нового ускорительного комплекса.

В 1980-е гг. (до объединения ФРГ и ГДР в единую Германию) не было прямых рейсов из Москвы в Гамбург. Поэтому мы полетели рейсом «Аэрофлота» во Франкфурт-на-Майне, где представитель этого агентства передал нам заказанные руководством ДЕЗИ билеты для дальнейшего полета в Гамбург (и последующего возвращения во Франкфурт). В Гамбурге мы жили в одной из уютных гостиниц ДЕЗИ (Gästehaus III), расположенной на территории лаборатории, в квартире с тремя отдельными комнатами и общей просторной гостиной.

Знакомство с лабораторией ДЕЗИ началось с подробной беседы с директором лаборатории. Ф. Зоргель рассказал П. А. Черенкову об истории создания электронных ускорителей и накопителей в Гамбурге, о крупных экспериментальных установках, об основных физических результатах, о планах по строительству коллайдера ГЕРА и программе физических исследований на нем. Лаборатория ДЕЗИ была основана 18 декабря 1959 г. и вскоре заняла одно из ведущих мест в мире в исследованиях строения материи и в создании интенсивных источников синхротронного излучения. В 1984 г. годовой бюджет лаборатории составлял 150 млн марок ФРГ, а в штате ДЕЗИ было более 1200 сотрудников, из них около 200 физиков. Кроме того, здесь работали специалисты из ряда университетов ФРГ и научных организаций различных стран.

В 1964 г. был запущен синхротрон ДЕЗИ-I с энергией пучка электронов 6 ГэВ. Создание синхротронов стало возможным после того, как В. И. Векслер сформулировал принцип автофазировки частиц в процессе ускорения. Черенков проработал с Векслером несколько десятков лет и участвовал в запуске первых электронных синхротронов.

Вначале на ДЕЗИ-I проводились исследования по физике электромагнитных взаимодействий адронов (сильно взаимодействующих частиц). Инжектором для него служил линейный ускоритель электронов (e^-) на энергию, достаточную для рождения позитронов (e^+), которые накапливались в небольшом аккумуляторном кольце (PIA) и затем могли быть ускорены в ДЕЗИ-I. С 1974 г. синхротрон использовался в основном как инжектор электронов и позитронов в накопительное кольцо ДОРИС (DORIS – DOppel-RIngSpeicher), где происходили встречные e^+e^- – столкновения при энергии пучков по 4,5 ГэВ. На установке ДОРИС велись работы как по физике элементарных частиц, так и по использованию синхротронного и ондуляторного излучений для исследований в области молекулярной биологии и физики твердого тела. В 1978 г. начал работать электронно-позитронный накопитель ПЕТРА (PETRA – Positron-Elektron Tandem Ring Anlage) с протяженностью орбиты 2,3 км на энергии встречных пучков по 23 ГэВ. На e^+e^- – коллайдерах ДОРИС и ПЕТРА были выполнены важные эксперименты по образованию адронов во встречных столкновениях электронов и позитронов. Так, на коллайдере ПЕТРА обнаружены события рождения трех струй адронов, что свидетельствовало о существовании глюонов – квантов поля сильного взаимодействия, обмен которыми приводит к притяжению между кварками, обеспечивающему их жесткую связь в адронах. В исследованиях, выполненных на ускорителях и накопителях ДЕЗИ, применялись наиболее современные методики регистрации и идентификации частиц. Черенков был весьма поль-



Академик П. А. Черенков и профессор Ф. Зоргель в ДЕЗИ, апрель 1984 г.

щен, убедившись, что открытый им в 1934 г. эффект излучения фотонов заряженными частицами, движущимися в среде со скоростью, превышающей скорость света в ней, широко используется в значительном числе экспериментов в ДЕЗИ.

Зоргель сообщил, что многие имеющиеся ускорительные системы (линейные ускорители, синхротрон, накопитель ПЕТРА) будут модернизированы и использованы в многоступенчатой системе инжекции электронов (или позитронов) и протонов в вакуумные камеры двух ускорительных колец коллайдера ГЕРА, расположенных в тоннеле под землей на глубине примерно 20 м. Поэтому ДЕЗИ-I был переделан в ДЕЗИ-II для увеличения энергии пучка электронов до 8 ГэВ и в ДЕЗИ-III – для ускорения в нем протонов. Электронный накопитель ПЕТРА был приспособлен и для протонов. В вакуумной камере одного кольца *ер*-коллайдера будут накапливаться и затем ускоряться электроны (или позитроны), а в камере другого кольца – протоны. Для удержания протонов высокой энергии на круговой орбите необходимо существование сильного магнитного поля, создаваемого сверхпроводящими магнитами. Они будут охлаждаться жидким гелием, для получения которого строится криогенный завод на территории ДЕЗИ. Протяженность пересекающихся в двух местах колец составляет 6,3 км, а в местах пересечений будут расположены детекторы элементарных частиц – продуктов взаимодействия электронов или позитронов с протонами.

Коллайдер ГЕРА – гигантский прибор для изучения встречных столкновений электронов и протонов с энергиями соответственно 30 ГэВ и 920 ГэВ.

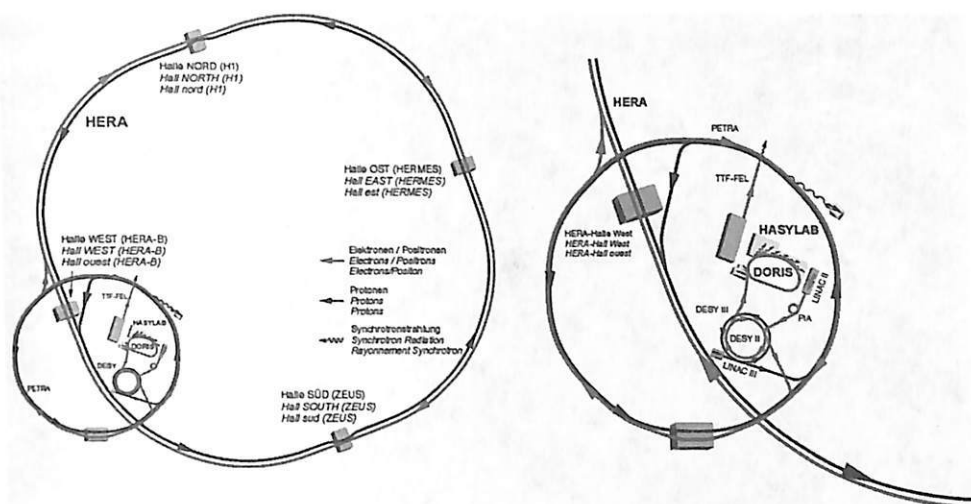


Схема многоступенчатой системы ускорителей ДЕЗИ

Для покоящейся протонной мишени это эквивалентно энергии электронов ~ 50 ТэВ ($5 \cdot 10^{13}$ эВ), что относится к диапазону энергий космических лучей. Проектное значение светимости коллайдера, которая служит мерой числа столкновений, равно $1,5 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Это означает, что за сутки работы ускорителя можно наблюдать процессы, происходящие с сечениями 10^{-36} см^2 . Этот прибор — единственный в мире крупный электронно-протонный коллайдер, который позволяет исследовать структуру элементарных частиц в области предельно малых расстояний вплоть до 10^{-16} см , что в тысячу раз меньше радиуса протона. Поэтому этот прибор иногда называют супермикроскопом.

Следует отметить, что взаимодействие e^- и e^+ -частиц с протонами происходит через обмен фотонами и промежуточными бозонами; это открывает возможности проводить на ep -коллайдере изучение слабых взаимодействий и процессов, вызванных высокоэнергичными фотонами.

На с. 146 показан общий вид лаборатории ДЕЗИ и ее окрестностей с высоты птичьего полета. В середине виден лесной массив. Это — парк, в северной его части находится экспериментальный зал (помеченный на рисунке буквой «N») для размещения детектора H1, в исследованиях на нем впоследствии приняли участие сотрудники ФИАНа; пунктиром на снимке обозначено расположение под землей кольца накопителя ПЕТРА (круг меньшего диаметра) и кольца электрон-протонного коллайдера ГЕРА (кольцо большого диаметра).

Следующие несколько дней пребывания в ДЕЗИ были посвящены подробному знакомству с экспериментальными установками, прошли экскурсии по лаборатории и беседы с заместителем директора ДЕЗИ по планированию и науке профессором П. Зодингом. (После объединения Германии Зодинг был назначен директором филиала лаборатории ДЕЗИ в г. Цойтен, недалеко от Берлина.)

На плане лаборатории ДЕЗИ показаны многочисленные корпуса, служебные помещения, актовый зал, столовая и гостиницы; внизу справа кружочек с номером 33 — гостиница, где останавливался П. А. Черенков с сотрудниками во время командировки в лабораторию ДЕЗИ в 1984 г.

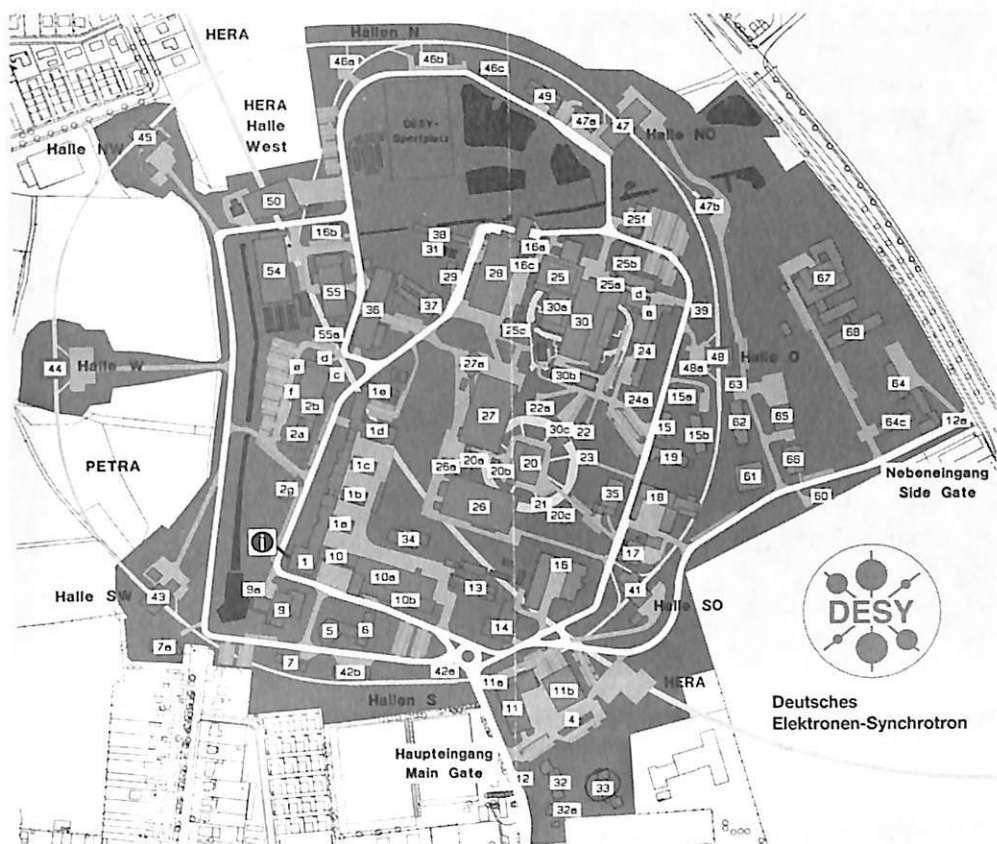


Общий вид лаборатории ДЕЗИ в Гамбурге. Пунктиром помечены орбиты ускорителей – накопителей ПЕТРА и ГЕРА

После визита в Гамбург мы отправились в Институт ядерной физики Университета им. И. Гуттенберга в Майнце. Небольшой, но уютный Майнц с замком и католическими костелами расположен на берегу р. Рейн всего лишь в 40 км к западу от Франкфурта-на-Майне. Мы пробыли в Майнце два дня и жили в гостинице «Гарни» недалеко от университета.

Во второй половине дня после приезда в Майнц нам предложили выступить на научном семинаре Института ядерной физики в лаборатории МАМИ (МАМИ – MAInz MIkrotron) по работам, выполненным с использованием электронных ускорителей ФИАНа на энергии 250 МэВ и 1300 МэВ. На этом семинаре были сделаны два доклада: «Адронный комптон-эффект» (П. С. Баранов) и «Фоторождение мезонов на нуклонах» (А. И. Лебедев). В первом докладе речь шла об открытии свойства поляризуемости у протона (т. е. его способности «деформироваться» в электромагнитном поле), об измеренных константах электрической и магнитной поляризуемости протона, о пионерской работе по наблюдению процесса упругого рассеяния γ -квантов на π -мезоне и определении поляризуемости заряженного пиона.

Второй доклад был посвящен изложению результатов приоритетных работ по фоторождению заряженных и нейтральных π -мезонов вблизи порога их образования. Эти процессы играют важную роль в астрофизике, обеспечивая обрезание высокоэнергичной части спектра космических лучей за счет убывания числа ультрарелятивистских протонов вследствие процессов рождения ими пионов при столкновении с фотонами реликтового излучения. Определенные пороговых значений электрических и магнитных дипольных амплитуд

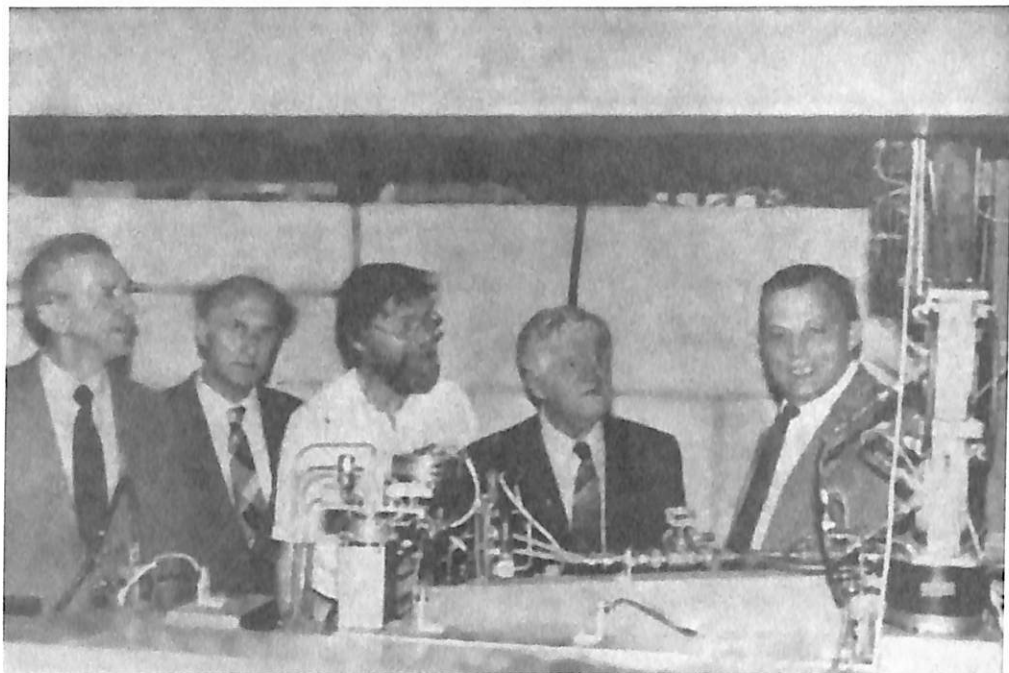


План лаборатории ДЕЗИ

пионного фотоэффекта на протонах и нейтронах внесло важный вклад в развитие теоретических подходов в физике адронов (теории дисперсионных соотношений, алгебры токов, киральных и кварковых моделей).

В ФРГ придавалось большое значение визитам русских ученых в исследовательские центры страны. Так, руководство ДЕЗИ в Гамбурге потратило несколько дней пасхальных каникул для того, чтобы ознакомить нас с лабораторией. А в Майнце немецкие газеты откликнулись на наше пребывание публикациями. В газете «Allgemeine Zeitung» (25 апреля 1984 г.) была опубликована фотография, сделанная во время посещения П. А. Черенковым с коллегами Института ядерной физики университета Майнца. На ней видны элементы сооружаемого разрезного сверхточного электронного микротрона непрерывного действия с энергией пучка 840 МэВ, о которых рассказывает профессор Г. Хермингхауз. На этом микротроне планировали проведение экспериментов по тематике, близкой к работам, выполняемым на синхротронах ФИАН.

В ходе обсуждения общих научных проблем с проф. П. Бекманном было высказано пожелание о развитии сотрудничества (оно позже было реализовано) в исследованиях по ядерной физике при средних энергиях. На физическом факультете университета Черенков выступил перед студентами с докладом об истории открытия им свечения, вызванного движущимися в среде электронами.



Институт физики университета Майнца, апрель, 1984 г. Слева направо: П. С. Баранов и А. И. Лебедев, Г. Хермингхауз, П. А. Черенков, П. Бекманн

На приеме, устроенном в честь гостей в университете Майнца, Павел Алексеевич в аргументированной речи остановился на необходимости борьбы за сохранение мира, чему, несомненно, способствует укрепление научного сотрудничества между различными странами. Его выступление не было случайным: в течение многих лет П. А. Черенков был членом президиума Советского комитета защиты мира, участником Пагуошского движения ученых, членом Комитета за Европейскую безопасность и сотрудничество.

В августе 1984 г. Зоргель по приглашению Черенкова посетил Лабораторию фотомезонных процессов Физического института, преобразованную в 1985 г. в Отдел физики высоких энергий (ОФВЭ), с ответным визитом. Во время встречи обсуждалась организация совместных работ. В частности, говорилось о заинтересованности ДЕЗИ в участии сотрудников ФИАН в исследованиях на e^+e^- -коллайдере и о возможности проведения на синхротроне «ПАХРА» в Троицке испытаний и калибровки калориметров, необходимых для проведения экспериментов на коллайдере. Возвратившись в Гамбург, Зоргель в своем письме от 6 августа 1984 г. выразил глубокую благодарность за оказанный ему теплый прием.

Определяющим шагом в организации международного сотрудничества стала переписка руководства ДЕЗИ с президентом АН СССР А. П. Александровым. В письме от 23 апреля 1986 г. Александрову (копии письма были направлены академику-секретарю Отделения ядерной физики АН СССР М. А. Маркову и П. А. Черенкову) Зоргель сообщил, что

в ДЕЗИ создается новое устройство для проведения исследований по физике элементарных частиц – *ер*-коллайдер ГЕРА, состоящий из двух накопительных колец: одно для электронов, другое – для протонов. Столкновение пучков позволит исследовать глубоко-неупругое рассеяние электронов и позитронов на протонах при переданных импульсах, на два порядка превышающих возможности ныне действующих ускорителей. Физические исследования на коллайдере ГЕРА являются уникальными, так как в настоящее время нигде больше не планируется изучение взаимодействий электронов и протонов при таких больших энергиях. Мы ожидаем, что в ближайшие 10 лет будет реализована большая физическая программа, к участию в которой приглашаются ученые всех стран мира. Сооружение коллайдера ГЕРА уже началось в мае 1984 г. и планируется получить первые *ер*-столкновения в 1990 году. Экспериментальная программа работ на коллайдере ГЕРА будет реализовываться международными коллективами, которые совместно изготовят и будут эксплуатировать большие детекторы частиц. В настоящее время обсуждаются предложения по двум детекторам, решение по которым будет принято уже в середине этого года. Академик Черенков и его коллеги из Физического института им. П. Н. Лебедева после интенсивных обсуждений в течение прошедшего года выразили заинтересованность в проведении исследований на коллайдере ГЕРА. Физический институт готов присоединиться к коллаборации Н1, которая предлагает сооружение большой установки с различными детекторами, окружающими точку взаимодействия встречных пучков.

Далее директор отметил, что

важной частью установки Н1 является крупная железная конструкция мюонного калориметра, которая одновременно служит опорой значительного числа компонент детектора Н1, включая и жидко-аргоновый калориметр, сверхпроводящий соленоид и другие приборы. Участие группы академика Черенкова в этом проекте весьма важно для коллаборации, поскольку ФИАН имеет большой опыт, как в постановке физических задач, так и в создании калориметров электронов и фотонов.

Профессор Ф. Зоргель сообщил также, что он обратился в Немецкое научно-исследовательское общество (ННИО) с предложением, чтобы сотрудничество ФИАНа – ДЕЗИ проводилось в рамках соглашения между АН СССР и ННИО и надеется, что Академия наук одобрит участие ФИАН в эксперименте Н1 и окажет необходимую поддержку. Заканчивая письмо президенту Академии наук, Ф. Зоргель пишет:

Я предвижу хорошее и полезное сотрудничество между Физическим институтом и ДЕЗИ.

В 1985 г. после подробного обсуждения участия ФИАНа в совместных работах на коллайдере, П. А. Черенков сформировал из различных групп отдела «внеструктурную» группу и принял решение о вступлении в коллаборацию Н1 – более молодую, чем другая коллаборация – ЗЕВС, также приглашавшая П. А. Черенкова с коллегами в свой коллектив.

Вместе с Павлом Алексеевичем в первоначальный состав группы ФИАНа вошли 12 сотрудников Отдела физики высоких энергий. Состав группы оказался очень стабильным: он практически не изменился до сих пор. В 1986 г. сотрудники ФИАНа были приняты в международную коллаборацию Н1,

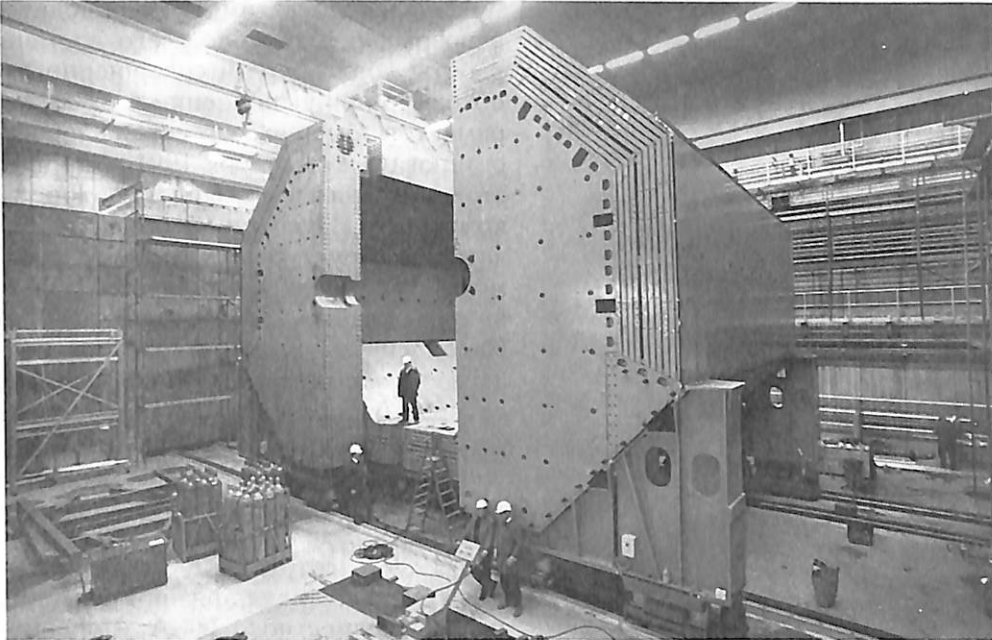
в которую в то время уже входили ученые из 22-х научных центров восьми стран. Участником сотрудничества Н1 был и профессор Центра стэнфордского линейного ускорителя в Калифорнии (США) Р. Тэйлор, также лауреат Нобелевской премии. Он получил премию (вместе с коллегами) за пионерские исследования глубоконеупругого рассеяния электронов на нуклонах, сыгравших важную роль в разработке кварковой модели в физике частиц. Участники Н1 очень гордились присутствием в своих рядах столь известных ученых.

Бюро Отделения ядерной физики и Президиум АН СССР (распоряжение от 02.10.86 № 11300-1770 «Об обеспечении участия институтов АН СССР в крупномасштабных зарубежных исследованиях в области физики высоких энергий») одобрило участие Физического института в совместных исследованиях. Оно осуществлялось в рамках межправительственного (ФРГ–СССР) рамочного Соглашения о научно-техническом сотрудничестве от 22 июля 1986 г. Это сотрудничество поддерживалось Немецким научно-исследовательским обществом, которое курировало работы, проводимые с институтами Академии наук. На основании этих документов был составлен протокол о совместных работах, подписанный директорами ДЕЗИ и ФИАНа. В этом протоколе отмечается, что научные результаты (открытия, патенты, публикации, изобретения) являются достоянием всех участников коллаборации Н1, независимо от их государственной принадлежности. Долгосрочные научные командировки сотрудников ФИАНа в ДЕЗИ начались летом 1987 г.

Для участия в совместных работах отдел Черенкова принял на себя обязательства по изготовлению магнита мюонного детектора (слоистой железной конструкции), по моделированию и анализу событий рождения частиц и по созданию системы для измерения светимости коллайдера ГЕРА.

Конструкцию магнита весом ~2 тыс. тонн и стоимостью 5,5 млн рублей (в ценах 1986 г.) предполагалось изготовить на производственном объединении «Ижорский завод» в Ленинграде. В середине 1986 г. «влезть» в уже принятый План развития народного хозяйства СССР, чтобы получить несколько тысяч тонн специальной стали и средства на изготовление магнитной системы, было чрезвычайно сложно.

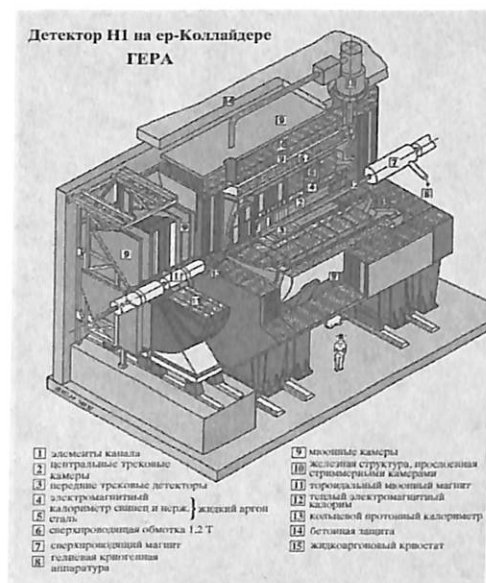
Большую помощь П. А. Черенкову в преодолении этой трудности оказал М. А. Марков. Но кроме этой поддержки все же потребовалось и личное участие Павла Алексеевича. Он решил (наверное, это был единственный случай) использовать свое высокое звание лауреата Нобелевской премии. На личном бланке он обратился непосредственно в Госплан СССР. Вопрос был решен немедленно и положительно. Стоимость материалов и изготовление магнитной структуры оплатила Академия наук. Изготовление магнита велось, как и было запланировано, на Ижорском заводе с использованием консультаций немецких инженеров. Компоненты конструкции доставили морем из Ленинграда в порт Гамбурга, откуда их перевезли в ночное время на специальных большегрузных платформах в ДЕЗИ и опустили в подземный Северный экспериментальный зал, предназначенный для размещения детектора коллаборации Н1. На с. 151 показан момент сборки магнита в Северном экспериментальном зале коллайдера ГЕРА в 1988 г. Сборку магнита проводила группа инженеров и высококвалифицированных техников ДЕЗИ под контролем и при участии двух инженеров Ижорского завода и под наблюдением сотрудников Физического института АН СССР.



Монтаж в Северном зале магнита для детектора Н1, 1986 г.

Конструкция имеет форму восьмигранной бочки длиной 9,6 м и диаметром 8,7 м, которую собирали из пакетов пластин, разделенных промежутками в 20 мм. Пластины из специальной магнитной стали толщиной 5 см были изготовлены на прецизионном прокатном стане завода. Промежутки были заполнены стримерными камерами для регистрации мюонов. Внутри бочки находился сверхпроводящий соленоид, который создавал сильное магнитное поле (1,15 Тесла) в центральной части детектора, где размещены многие приборы: трековые камеры, адронный и электромагнитный калориметры, сцинтилляционные счетчики время-пролетной системы и др. Они предназначены для идентификации частиц, рождающихся во встречных столкновениях электронов и протонов. По искривлению траекторий движения заряженных частиц в магнитном поле определялись их импульсы.

В Троицке в отделе Черенкова были созданы системы измерения светимости *ер*-столкновений в коллайдере ГЕРА и мечения электронов. Система мечения, в которой регистрировались («метились») рассеянные под малыми углами электроны, предназначалась для идентификации процессов рождения адронов фотонами (ими обмениваются электрон и протон при взаимодействии). Разница в энергиях начального и конечного электрона при *ер*-рассеянии равна энергии этого фотона. Светимость определялась по числу фотонов тормозного излучения электронов на протонах. Энергии таких фотонов или меченых электронов измерялись двумя калориметрами – годоскопом черенковских счетчиков полного поглощения. Счетчики были созданы в России на основе прозрачных кристаллов высокой плотности и высокой радиационной стойкости, в них энергичные фотоны инициировали электрон-позитронные ливни. Черенковское излучение этих заряженных частиц регистрировалось фотоумножителями.



Многоцелевой детектор
коллораации H1

калориметре H1 ускорителя ГЕРА» (препринт ФИАН. № 102. 1989). В 1993 г. вышла работа «Измерение светимости ускорителя ГЕРА монитором светимости установки H1» (препринт ФИАН. № 28. 1993). Обе работы были использованы при описании детектора H1 в публикации «The H1 Detector at HERA» (Nuclear Institute Methods. A386. 1997. 310–450).

В 1990 г. П. А. Черенков и наша группа разработали проект эксперимента: «Полное поперечное сечение адронного фотопоглощения на протоне». Этот проект (препринт ФИАН. № 80. 1990) является последней работой, написанной совместно с Павлом Алексеевичем. Предложенный эксперимент проводился в условиях, когда светимость коллайдера еще не достигла своего проектного значения. Результаты эксперимента опубликованы в журнале *Physics Letters*. B266. 1993. 374. Эта работа была одной из самых первых публикаций коллаборации H1. На с. 153 приводятся полные поперечные сечения $\sigma_{\text{пр}}$ (в единицах 10^{-30} см²) фоторождения адронов на протонах. По оси абсцисс отложена полная энергия ($W_{\text{пр}}$) взаимодействующих частиц (фотона и протона) в системе центра масс. На рисунке нанесены ранее полученные экспериментальные данные при «малых» энергиях (low energy data). В 1975 г. группа из ФИАНа также проводила измерения сечений в интервале 5–8 ГэВ на пучке фотонов от протонного ускорителя Института физики высоких энергий в Протвино (вблизи Серпухова). Такие пучки формируются при распаде на два гамма-кванта нейтральных пионов, образованных энергичными протонами на ядерной мишени. Предоставилась уникальная возможность на коллайдере ГЕРА провести измерения сечений в области существенно более высоких энергий ~200 ГэВ, которые соответствуют энергиям фотонов ~20 ТэВ в системе координат, где протон покоится. Результаты измерений на детекторах H1 и ЗЕВС представлены двумя точками, их положение свидетельствует о некотором росте полных

Измерение светимости проводится непрерывно в течение всего времени работы коллайдера и совершенно необходимо при выполнении всех экспериментов. Именно эта система зарегистрировала 19 октября 1991 г. первые столкновения электронов и протонов в коллайдере. Эксперименты по исследованию структуры частиц и их взаимодействий начались с января 1992 г. и продолжались до 30 июня 2007 г. Накопленные за время работы коллайдера экспериментальные данные, которые были записаны на магнитные носители, будут обрабатываться еще в течение нескольких лет для извлечения новой информации о строении микромира.

В 1989 г. сотрудники внеструктурной группы отдела физики высоких энергий совместно с П. А. Черенковым написали работу «Мечение электронов под малыми углами вылета на

поперечных сечений фоторождения адронов на протонах при возрастании энергии фотонов. Сами величины сечений зависят как от фундаментальных свойств взаимодействия фотонов с протонами, так и от структуры взаимодействующих частиц.

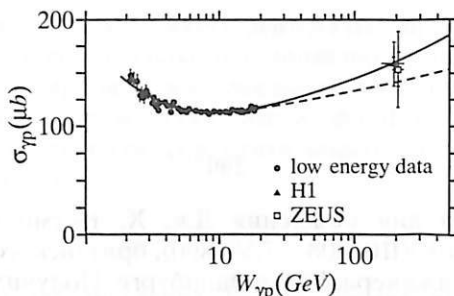
До своего самого последнего дня (6 января 1990 г.) Павел Алексеевич Черенков живо интересовался всем ходом работ по подготовке экспериментов на коллайдере ГЕРА, но, к сожалению, он не успел порадоваться публикации результатов первых экспериментов, в которые он вложил заметную долю своего труда.

За период с 1992 г. по 2006 г. коллаборацией H1 было опубликовано 166 работ в ведущих научных журналах и сделано много докладов на представительных международных конференциях. Благодаря высокому уровню научных исследований на уникальном коллайдере ГЕРА многие экспериментальные результаты были включены в хорошо известные физикам компиляции данных по физике частиц – «Review of Particle Physics».

За время работы коллайдера было наиболее полно изучено кварк-глюонное строение протонов, исследованы процессы образования струй адронов, измерены константы взаимодействия кварков с глюонами, выявлен рост сечений фоторождения векторных мезонов с увеличением энергии, обнаружены дифракционные явления в глубоко-неупругом рассеянии электронов на протонах. Проведенные работы сыграли важную роль в разработке квантовой хромодинамики – современной теории сильных взаимодействий. Существенный прогресс был достигнут в изучении электрослабых взаимодействий в неисследованной ранее области высоких энергий: измерены сечения процессов, вызванных нейтральными и заряженными токами, подтверждено отсутствие правых токов, продемонстрировано замедление роста сечений процессов с участием нейтрино, связанное с существованием промежуточного векторного бозона W с массой ~ 90 ГэВ/ c^2 . Эти исследования внесли весомый вклад в развитие Стандартной модели сильных, электромагнитных и слабых взаимодействий.

На коллайдере также искали отклонения от предсказаний Стандартной модели и вели поиски гипотетических частиц, некоторые из которых могут быть ответственны за существование в космосе ненаблюдаемой темной материи и темной энергии. Были получены ограничения на массы, константы взаимодействия и сечения рождения таких частиц.

Содружество академика П. А. Черенкова – ученого с мировым именем, с ведущими физиками Германии в 1983–1989 гг. значительно способствовало успеху и результативности международного научного сотрудничества ФИАН – ДЕЗИ в исследованиях на коллайдере ГЕРА. В организации совместных работ с крупными исследовательскими центрами Германии большую роль сыграли и ответные визиты немецких ученых в СССР и Россию в 1984–2005 гг.



Зависимость поперечного сечения $\sigma_{\gamma p}$ процессов образования адронов фотонами на протонах от полной энергии фотона и протона в системе центра масс