



Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY

М.М. Давыдов¹

28 ноября 2021 г.

¹*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей ядерной физики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

Аннотация

Национальный исследовательский центр *DESY* является одним из ведущих центров в мире по изучению структуры материи. Здесь проводится широкий спектр междисциплинарных научных исследований в трех основных областях: физика элементарных частиц и высоких энергий, фотонная наука и разработка ускорителей элементарных частиц. На протяжении всей своей истории *DESY* олицетворял собой оплот актуальной современной исследовательской физики. Здесь было реализовано множество интересных проектов, открыт целый ряд завораживающих физических явлений и найдены ответы на одни из самых трудных вопросов, которые ставила перед собой физика элементарных частиц. Данный реферат освещает основные события из истории данного исследовательского центра. Рассматривая его различные реализованные эксперименты, мы сможем коротко охарактеризовать интересы научного сообщества прошлого столетия и проникнуться значимостью проведенных исследований.

Содержание

1	Введение	3
2	Проведенные исследования	4
2.1	DESY	4
2.2	DORIS III	5
2.2.1	<i>b</i> -физика с ARGUS	6
2.2.2	Нейтральные осцилляции В-мезона	6
2.3	PETRA II	8
2.3.1	Открытие глюона	8
2.4	HASYLAB	10
2.5	HERA	11
2.5.1	H1	11
2.5.2	ZEUS	12
2.5.3	HERA-B	12
2.5.4	HERMES	15
3	Современные эксперименты и актуальные направления исследований	17
3.1	OLYMPUS	18
3.2	PETRA III	19
3.3	FLASH	20
3.4	European XFEL	21
3.5	ILC	22
4	SARS-CoV-2 Research	23
5	Заключение	24

1 Введение

Название центра взято от электронного синхротрона *DESY* (Deutsches Elektronen Synchrotron, "Немецкий электронный синхротрон"). Задача *DESY* заключается в проведении фундаментальных исследований. Он специализируется на разработке, строительстве и эксплуатации ускорителей элементарных частиц, исследованиях физики элементарных частиц для изучения фундаментальных характеристик материи и сил, включая физику астрономических частиц и фотонов, исследованиях в области физики поверхности, материаловедения, химии, молекулярной биологии, геофизики и медицины через использование синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах.

Помимо эксплуатации собственных ускорителей, *DESY* также предоставляет консультационные услуги исследовательским организациям, институтам и университетам. Центр принимает активное участие в крупных международных проектах, таких как европейский рентгеновский лазер на свободных электронах ([European X-Ray Free-Electron Laser](#)), Большой адронный коллайдер ([LHC](#)) в Женеве, нейтринная обсерватория ([IceCube](#)) на Южном полюсе и Международный линейный коллайдер ([ILC](#)).

Исследовательский центр расположен в двух локациях. Основное местоположение - пригород Гамбурга. В 1992 году *DESY* расширилась и открыла вторую площадку в Цойтене (Zeuthen), недалеко от Берлина.

Гамбург

Офис *DESY* в Гамбурге расположен в пригороде Бахренфельд, к западу от города. Большая часть исследований *DESY* в области физики высоких энергий с элементарными частицами проводится здесь с 1960 года. Это место ограничено кольцом бывшего ускорителя частиц *PETRA* и частью более крупного *HERA* (Hadron Elektron Ring Anlage). Помимо этих ускорителей, существует также лазер на свободных электронах *FLASH* и его потомок *XFEL*, который был введен в эксплуатацию в 2017 году.



Цойтен

После воссоединения Германии *DESY* расширился на второй объект: Институт физики высоких энергий (нем. Institut für Hochenergiephysik IfH) в Цойтене, к юго-востоку от Берлина.

Бюджет и финансирование

Годовой бюджет исследовательского центра составляет около 192.000.000€. Из этой суммы примерно 173.000.000€ заложено в бюджет Гамбургского филиала и 19.000.000€ - в бюджет филиала в Цойтене. Основным источником финансирования является **Федеральное министерство образования и исследований** (нем. *Bundesministerium für Bildung und Forschung*) с 10% -ной поддержкой со стороны Гамбурга и Бранденбурга на федеральном уровне. Отдельные эксперименты и проекты на ускорителях финансируются участвующими немецкими и зарубежными институтами, которые, в свою очередь, по большей части финансируются государством. Нередко некоторые проекты финансируются **Немецким исследовательским фондом**.

2 Проведенные исследования

Гамбургский филиал *DESY* насчитывает больше множество ускоряющих установок различного типа и предназначения. Ускорители филиала не были созданы в одночасье, а добавлялись один за другим для удовлетворения растущего спроса ученых на все более высокие энергии. В ходе строительства новых ускорителей старые преобразовывались в предускорители или в источники синхротронного излучения для лабораторий с новыми исследовательскими задачами (например, для HASYLAB).

В настоящее время, после остановки ускорителя HERA в 2007 году, наиболее важными объектами *DESY* являются источник высокоинтенсивного синхротронного излучения, PETRA III, лаборатория синхротронных исследований HASYLAB, лазер на свободных электронах FLASH (ранее называвшийся VUV-EL), испытательная установка для европейского XFEL и самого европейского XFEL.

2.1 DESY

Строительство первого ускорителя элементарных частиц *DESY* (Deutsches Elektronen Synchrotron, "Немецкий электронный синхротрон") началось в 1960 году. В то время это была крупнейшая уникальная установка, способная ускорять электроны до 7.4 ГэВ. В феврале 1964 года на синхротроне были ускорены первые электроны, что положило начало исследованиям квантовой электродинамики и поискам новых элементарных частиц.

DESY впервые привлекло международное внимание в 1966 году за свой вклад в развитие квантовой электродинамики. Результаты полученные на ускорителе позволили не только проверить многие аспекты этой теории, но также исследовать особенности других взаимодействий. В дальнейшем *DESY* зарекомендовала себя как центр передового опыта в области разработки и эксплуатации ускорителей высоких энергий.

Из воспоминаний научной группы ускорителя:

То было 25 февраля 1964 года, незадолго до полуночи, когда первые частицы многократно обогнули вакуумную систему синхротрона длиной около 300 метров. После двух недель тщетных усилий команды ученых все прошло без затруднений, ускоритель был успешно запущен. Первые электроны в карусели частиц достигли энергии 2.5 ГэВ примерно за 8000 раундов, и уже на следующий день можно было получить 5 ГэВ, на 1 ГэВ меньше расчетной энергии.



В 1967 году было найдено применение синхротронному излучению: его использовали в экспериментах с поглощением. Европейская лаборатория молекулярной биологии ([EMBL](https://www.embl.org/)) смогла использовать возможности этого явления, а в 1972 году создала постоянное отделение в филиале с целью анализа структуры биологических молекул с помощью синхротронного излучения.

Достижения синхротрона:

- Впервые создан антипротон
- Поляризационные исследования фотонов
- Первые исследования структуры протонов
- Проверка квантовой электродинамики (Под руководством **Samuel C.C.Ting**)

2.2 DORIS III

DORIS (Doppel-Ring-Speicher, «двойное кольцо-накопитель»), построенный между 1969 и 1974 годами, был вторым кольцевым ускорителем DESY и его первым накопительным кольцом с окружностью почти 300 м. Новое электрон-позитронное кольцо позволяло проводить эксперименты по столкновению электронов и их античастиц при энергиях 3.5 ГэВ на пучок. В 1977 году Л.Ледерман во главе группы ученых из FNAL объявили об открытии Υ -мезона и b -кварка. Как следствие было решено повысить энергию DORIS для возможности исследовать Υ -состояния в e^+e^- столкновениях. В 1978 году энергия каждого пучка была увеличена до 5 ГэВ.

Два низших состояния, $\Upsilon(1S)$ и $\Upsilon(2S)$, были обнаружены в DORIS совместно с PLUTO, и их параметры были точно измерены в 1978 году. Доказав наличие «возбужденных состояний чармония», DORIS внес важный вклад в доказательство существования тяжелых кварков [1, 2, 3, 4, 5]. В том же году в DESY были проведены первые испытания рентгеновской литографии.

2.2.1 b -физика с ARGUS

Отправной точкой для изучения слабого взаимодействия b -кварка является состояние $\Upsilon(4S)$, которое является связанным состоянием $b\bar{b}$. Оно создается в реакции e^+e^- аннигиляции, как показано на рисунке 1. Его масса достаточно велика, чтобы он мог распадаться на пару B -мезонов.

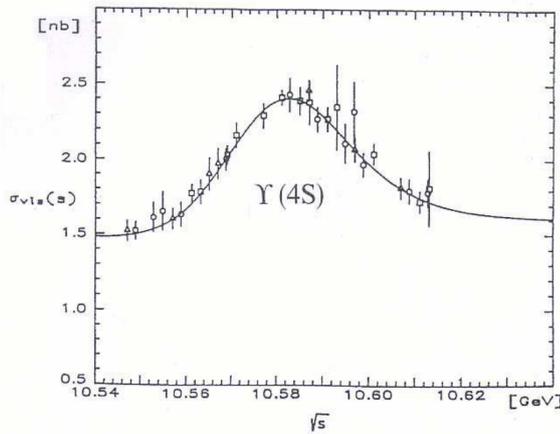


Рис. 1: Состояние $\Upsilon(4S)$

Образующиеся B -мезоны либо нейтральны, либо заряжены. Их кварковый состав $B^0 = \bar{b}d$ и $B^+ = \bar{b}u$.

Таким образом, рождение $\Upsilon(4S)$ мезонов можно исследовать по следующим каналам:

$$e^+e^- \longrightarrow \Upsilon(4S) \longrightarrow B^0\bar{B}^0 \text{ или } B^+B^-$$

В терминах кварков:

$$e^+e^- \longrightarrow b\bar{b} \longrightarrow \bar{b}d\bar{d}b \text{ или } \bar{b}u\bar{u}b$$

Полученные таким образом b -кварки позволяют изучать слабое взаимодействие. Оно происходит при переходе кварка i в кварк k посредством испускания или поглощения W^\pm бозона.

$$q_i \longrightarrow q_k + W^\pm$$

Связь любой разноименно заряженной пары кварков i, k с W^\pm бозоном пропорциональна амплитудам V_{ik} , элементы матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскавы (СКМ). Эти параметры Стандартной модели определяются экспериментально.

2.2.2 Нейтральные осцилляции B -мезона

В 1987 году детектор ARGUS накопительного кольца DORIS зарегистрировал превращение B -мезона в его античастицу, \bar{B} -мезон. Наблюдение осцилляций B -мезона позволили сделать первые предположения о массе t кварка (топ-кварк был обнаружен в 1995 году в Фермилабе в США).

Превращение B^0 -мезонов показано на диаграммах рисунка 2. Такая прямоугольная диаграмма представляет особый интерес, поскольку в ней преобладает обмен самой тяжелой частицей, вносящей вклад в петлю.

Подобная диаграмма для K^0 -мезона уже сыграла важную роль в физике элементарных частиц - предсказание c -кварка.

В экспериментах по $B\bar{B}$ -смешиванию использовались реакции, в которых в основном создаются $B\bar{B}$ мезонные пары. При смешивании B -мезон превращается в свою античастицу, что приводит к парам $B\bar{B}$ или $\bar{B}B$. Наблюдение таких однотипных пар B -мезонов

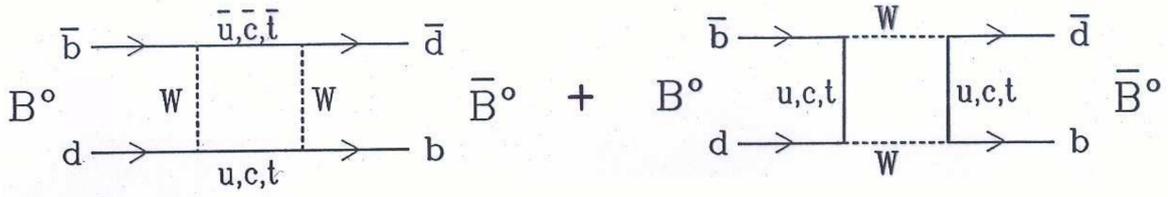


Рис. 2: Диаграммы Фейнмана, обозначающие переход B^0 -мезона в его античастицу

затем интерпретируется как свидетельство смешивания. Вместо полной реконструкции B -мезонов можно использовать полуплеptonные B -распады. Это позволяет маркировать B -мезоны лептонным зарядом, который коррелирует с зарядом распадающегося b -кварка.

$$B^0 \longrightarrow l^+ X \quad \bar{B}^0 \longrightarrow l^- \bar{X}$$

Таким образом, наблюдение пар лептонов одного знака, возникающих в результате распадов B -мезонов, свидетельствует о $B\bar{B}$ -смешивании. Однако лептоны также возникают в распадах c и s кварков, поэтому для более чистого результата требуется глубокий анализ фоновых событий.

Walter Schmidt-Parzefall в период поиска осциллирующих B -мезона:

Поскольку в ИТЭФ в Москве были специалисты по лептонам, в начале 1987г. я попросил студента ИТЭФ изучить пары лептонов с одинаковыми знаками. Я сказал ему: «Теоретики говорят, что это очень важно, но вы ничего не увидите». Через некоторое время студент представил свой результат. Он не обнаружил пар лептонов с одинаковым знаком. Фактически, он изобрел очень невинно выглядящие умные каты, которые отсеяли все подходящие события, чтобы оправдать ожидания.

Из-за большой скорости смешивания стало ясно, что CP -нарушение наблюдается в распадах B -мезонов. Это дает уникальную возможность определить мнимую часть матрицы СКМ. Таким образом, открылась новая область исследований, которую затем продолжили Бабар из SLAC и Белл из КЕК.

Наблюдение $B^0\bar{B}^0$ -смешивания могло бы стать важным событием в физике элементарных частиц в 1987 году, если бы во Вселенной не произошло еще более впечатляющего события - взрыва сверхновой SN 1987A.

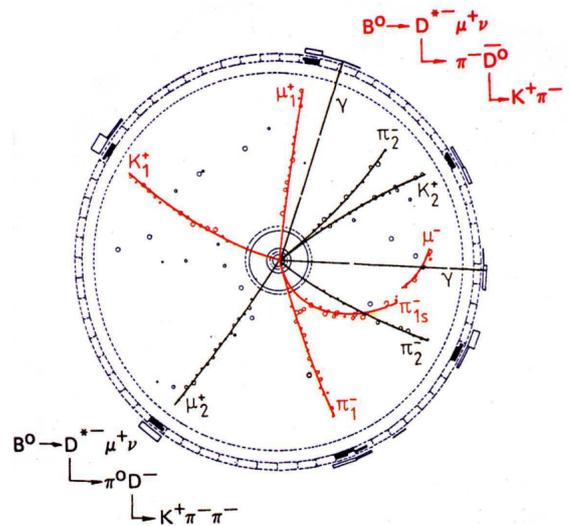


Рис. 3: Золотое событие, найденное Х.Шредером. На нем показана реакция $\Upsilon(4S) \longrightarrow B^0\bar{B}^0 \longrightarrow B^0B^0$, что свидетельствует о перемешивании $B\bar{B}$ -смешивании

2.3 PETRA II

PETRA была построена между 1975 и 1978 годами. На момент постройки это было крупнейшее накопительное кольцо в своем роде и до сих пор является вторым по величине накопительным кольцом *DESY* после HERA. PETRA изначально служила для исследования элементарных частиц. Открытие глюона, частицы-носителя сильного ядерного взаимодействия, в 1979 году считается одним из самых больших успехов данного эксперимента. PETRA может ускорять электроны и позитроны до 19 ГэВ.

Исследования в PETRA привели к более активному международному сотрудничеству. Ученые из Китая, Франции, Израиля, Нидерландов, Норвегии, Великобритании и США участвовали в первых экспериментах в PETRA вместе со многими немецкими коллегами.

В 1990 году установка была введена в эксплуатацию под названием PETRA II как предварительный ускоритель протонов и электронов/позитронов для нового ускорителя частиц HERA. В марте 1995 года PETRA II была оснащена ондуляторами для создания большего количества синхротронного излучения с более высокими энергиями, особенно в рентгеновской части спектра. С тех пор PETRA используется HASYLAB в качестве источника высокоэнергетического синхротронного излучения. В настоящее время позитроны ускоряются до 12 ГэВ.

2.3.1 Открытие глюона

Вскоре после постулирования кварков было высказано предположение, что они взаимодействуют через глюоны, но прямые экспериментальные доказательства отсутствовали более десяти лет. В 1976 году Мэри Гайлард, Грэм Росс и Джон Эллис предложили искать глюон через 3-струйные события, связанные с тормозным излучением глюонов в e^+e^- -столкновениях. Глюон был открыт в *DESY* в 1979 году TACCO и другими экспериментами на коллайдере PETRA [6].

Процесс тормозного излучения глюонов в КХД показан на рис. 4. Для его описания было рассмотрено следующее утверждение: при соответствующих кинематических условиях при высоких энергиях асимптотическая свобода гарантирует, что интересующий процесс будет ведущей поправкой (Leading Order) к процессу $e^+e^- \rightarrow \bar{q}qg$, что в свою очередь обуславливает образование двухструйных конечных состояний. Было показано, что тормозное глюонное излучение сначала проявится через расширение одной из струй в планарной конфигурации, и что появление трехструйных событий будет сигнализировать о присутствии глюона, как показано в части (d) рис. 4.

Другая возможность для обнаружения глюонных эффектов появилась в 1977 г. с открытием состояний Υ боттомония. Согласно пертурбативной КХД, доминирующий распад векторного состояния $\Upsilon(1S)$ должен происходить на три глюона, поэтому конечное состояние должно отличаться от доминирующих конечных состояний двух струй, видимых от $e^+e^- \rightarrow \bar{q}q$.

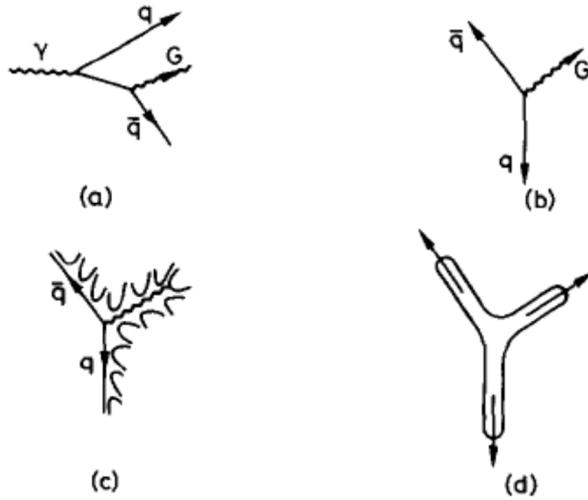


Рис. 4: (а) Диаграмма Фейнмана для тормозного глюонного излучения. (б) Широкоугольное тормозное глюонное излучение, визуализированное в импульсном пространстве в системе центра масс. (в) Адронизация широкоугольного тормозного глюонного излучения. (д) Получающееся в результате 3-струйное конечное состояние.

В течение второй половины 1978 и первой половины 1979 года машинная группа в DESY систематически увеличивала энергию столкновения PETRA, достигая диапазона энергий, в котором, как ожидалось, можно было обнаружить трехструйные события тормозного глюонного излучения. Первые результаты появились в июне 1979 года.

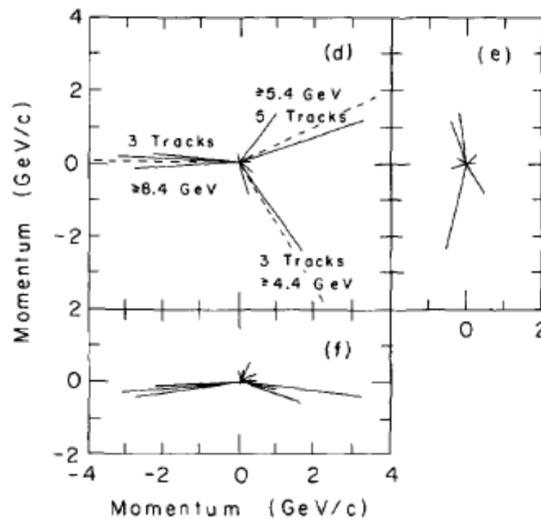


Рис. 5: Событие, обнаруженное коллаборацией TASSO [7, 8, 9], демонстрирующее планарную трехструйную структуру.

John Ellis о пресс-конференции на симпозиуме "Lepton/Photon" состоявшемся в Фермилабе в августе 1979 года:

Была пресс-конференция, на которой было представлено одно из событий с тремя струями, и журналист спросил, какая струя является глюоном. Ему сказали, что ставить лучше на струю слева (Хотя может она была справа...?)

2.4 HASYLAB

HASYLAB (Hamburger Synchrotronstrahlungslab или «Гамбургская лаборатория синхротронного излучения») используется для исследований синхротронного излучения в *DESY*. Он был открыт в 1980 году с 15 опытными участками (сегодня их 42). Лаборатория примыкает к накопителю DORIS, используя его синхротронное излучение для своих исследований. Если вначале DORIS служил источником синхротронного излучения для HASYLAB только треть времени, то начиная с 1993 года HASYLAB использовал все время его работы. Помимо 42 экспериментальных зон, которые предоставляет DORIS, есть также три тестовых экспериментальных зоны, доступные для экспериментов с высокоэнергетическим излучением, генерируемым накопительным кольцом PETRA.

После модернизации DORIS с помощью первых вигглеров, которые производили гораздо более интенсивное излучение, стало возможным изучать мессбауэровские спектры (Первый был зарегистрирован в 1984 году).

В 1985 году развитие более совершенной рентгеновской технологии позволило выявить структуру вируса гриппа. В следующем году исследователи HASYLAB первыми успешно попытались возбудить сингулярные колебания сетки в твердых телах. Таким образом, стало возможным проводить анализ упругих материалов, который до этого был возможен только с ядерными реакторами посредством рассеяния нейтронов.

В 1987 году рабочая группа по структурной молекулярной биологии Общества Макса Планка основала постоянное отделение в HASYLAB. Оно использует синхротронное излучение для изучения структуры рибосом.

В настоящее время в HASYLAB проводят свои эксперименты многие национальные и зарубежные группы исследователей: всего в работе принимают участие около 1900 ученых. В целом спектр исследований простирается от фундаментальных исследований до экспериментов в области физики, материаловедения, химии, молекулярной биологии, геологии и медицины.

Одним из примеров является компания OSRAM, которая с недавнего времени использует HASYLAB для изучения технических особенностей своих лампочек. Полученные знания помогли значительно увеличить срок службы ламп в определенных областях применения.

Кроме того, исследователи HASYLAB проанализировали, среди прочего, мельчайшие примеси в кремнии для компьютерных микросхем, работу катализаторов, микроскопические свойства материалов и структуру белковых молекул.

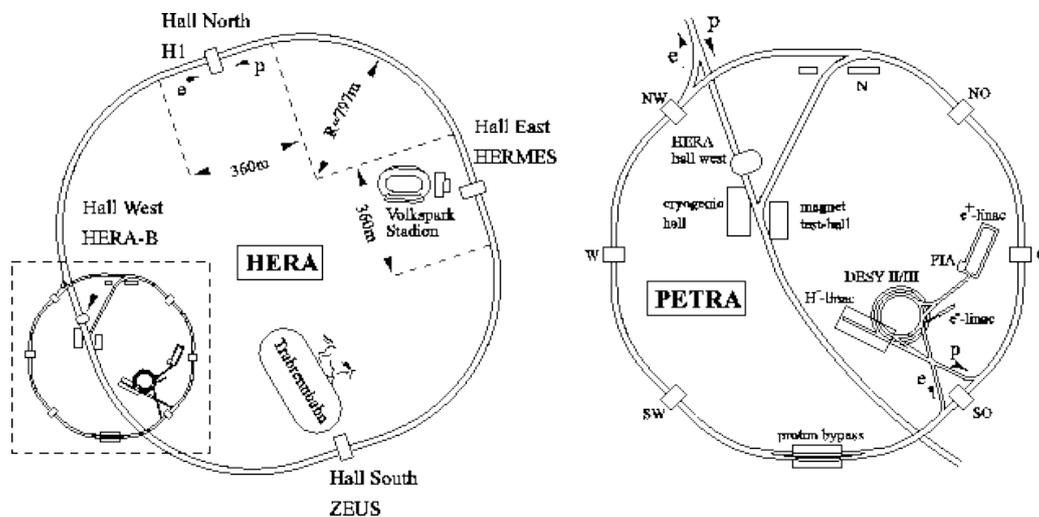


2.5 HERA

HERA (Hadron-Elektron-Ring-Anlage, «Адрон-электронное кольцо») был самым большим синхротроном и накопительным кольцом DESY с окружностью 6336 метров. Строительство подземного сооружения началось в 1984 году. В строительстве проекта помимо Германии участие принимали еще 11 стран. Ускоритель начал работу 8 ноября 1990 года, а первые два эксперимента начали собирать данные в 1992 году. HERA в основном использовалась для изучения структуры протонов и свойств кварков. Он был закрыт 30 июня 2007 года.

HERA был единственным ускорителем в мире, который мог сталкивать протоны либо с электронами, либо с позитронами. Для реализации этого проекта HERA использовала сверхпроводящие магниты. В HERA удалось изучить структуру протонов до 30 раз точнее, чем раньше. Разрешение охватывало структуры размером $1/1000$ протона. В последующие годы было сделано много открытий, касающихся состава протонов, кварков и глюонов.

Туннели HERA проходят от 10 до 25 метров ниже уровня земли и имеют внутренний диаметр 5.2 метра. При строительстве использовалась та же технология, что и при строительстве тоннелей метро. Внутри трубы работают два кольцевых ускорителя частиц. Один ускорял электроны до энергии 27.5 ГэВ, другой - протоны до энергии 920 ГэВ в обратном направлении. Всего на HERA оперировали 4 детектора.



2.5.1 H1

H1 - универсальный детектор¹ столкновений электронов и протонов, расположенный в HERA-Hall North. Он был разработан для исследования внутренней структуры протона, сильного взаимодействия, а также поиска новых видов материи и неожиданных явлений в физике элементарных частиц.

¹На [сайте](#) детектора есть интересная интерактивная картинка

Цели, измерения и достижения:

- Достигли точности, превосходящей все ожидания, и опередили теорию с точки зрения систематических ошибок.
- Детально исследовать теорию КХД и подтвердить некоторые аспекты теории сильных взаимодействий в мелких деталях.
- Изучить структуру элементарных частиц.
- Задать задел для исследований на БАК для будущих открытий.

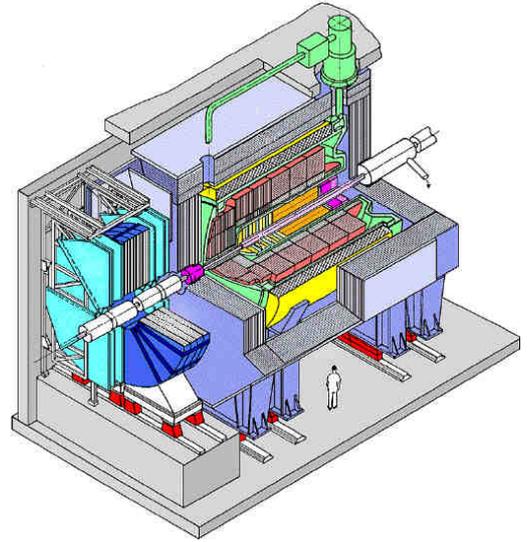


Рис. 6: H1 detector

2.5.2 ZEUS

ZEUS похож на H1 детектор электрон-протонных столкновений и находился в HERA-Hall South. Его задачи схожи с H1.

За весь период функционирования эксперименты H1 и ZEUS собирали данные о столкновениях электронов и протонов высоких энергий с помощью универсальных детекторов. И хоть они и измеряли одни и те же физические процессы, конструкция детекторов сильно отличалась. Основными элементами программы по физике были изучение структуры протона в широком кинематическом диапазоне, исследование физики на масштабах объединения электромагнитных и слабых взаимодействий, определение константы сильной связи. Взаимодополняемость двух детекторов позволила сотрудникам не только объединить измерения (удвоить статистику), но также получить дополнительную точность. Несмотря на то, что проект был закрыт в 2007 году, ученые со всего мира до сих пор продолжают обрабатывать набранные данные.

2.5.3 HERA-B

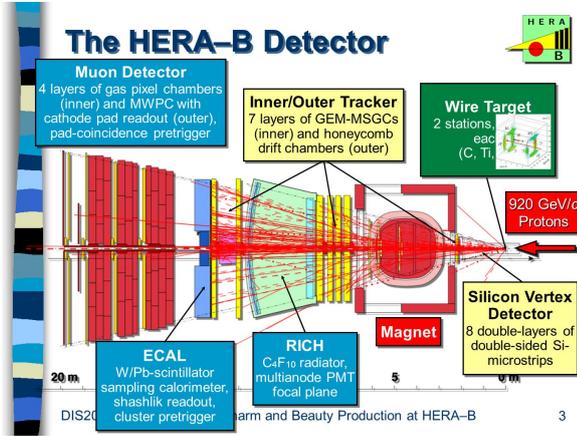
Эксперимент HERA-B расположен в HERA-Hall West. В коллаборации участвуют 32 института и около 250 сотрудников из 13 стран. Используя протонный пучок HERA, исследователи HERA-B проводили эксперименты с тяжелыми кварками.

Одно из главных направлений исследования этого детектора было изучение нарушения CP -четности в "золотых" распадах B -мезонов.

$$B \longrightarrow J/\Psi K^0$$

Хотя HERA-B не был разработан для проведения подробных исследований CP -нарушения идея исследовать такое явление в распадах B -мезонов имела смысл (Для первого наблюдения). Достижение необходимой интегральной светимости потребовало частоты столк-

новений 40 МГц, что, в свою очередь, потребовало использования радиационно-стойких технологий и сложных многоуровневых дилептонных триггеров и систем сбора данных, подобных тем, которые тогда разрабатывались для экспериментов на ЛНС. Другими словами, HERA-B представляла из себя тестовый стенд для новых технологий до запуска ЛНС.



Возможности HERA-B позволяли измерять все заряженные частицы и фотоны в центральной области быстроты. Сбор данных начался в октябре 2002 г. и продолжался до марта 2003 г. Большая часть времени пучка шла на сбор данных с помощью дилептонного триггера и углеродных и вольфрамовых мишеней для исследований физики тяжелых ароматов (sbt). Всего было зарегистрировано 160 миллионов дилептонных триггеров, включая 250 000 реконстру-

ированных распадов $J/\Psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ или $J/\Psi \rightarrow e^+e^-$. Кроме того, была собрана выборка из 180 миллионов событий для исследований процессов с более высоким поперечным сечением, таких как образование очарования и странности.

Основные результаты коллаборации:

- Было выполнено два измерения сечения B -мезона [10]. В первом использовался распад $B \rightarrow J/\Psi + X$. Второй вариант заключался в извлечении числа событий, в которых цепочки распадов образовавшихся B и \bar{B} -мезонов включали два противоположно заряженных мюона, за исключением распада $B \rightarrow J/\Psi + X$, когда образовавшийся J/Ψ распадается на два мюона.

Результаты двух методов сходились. Для увеличения точности результатов сечения были объединены:

$$\sigma_{B\bar{B}} = 15.4 \pm 1.7_{\text{stat.}} \pm 1.2_{\text{sys.}}^{\text{uncorr.}} \pm 1.9_{\text{sys.}}^{\text{corr.}} \text{ nb nucleon}^{-1}$$

На рисунке 7 приведено сравнение измерения с двумя результатами от Fermilab и двумя прогнозами теоретических моделей. В околопороговой области измерения предсказания КХД должны включать не только члены LO и NLO, но также члены, обусловленные излучением мягких и коллинеарных партонов в конечном состоянии. Результаты HERA-B и хорошо согласуются с модельными представлениями, хотя неопределенности в теоретических моделях все еще велики.

- В 1986 году Мацуи и Сац предположили, что явным признаком образования кварк-глюонной плазмы при столкновениях тяжелых ионов должно быть наблюдение силь-

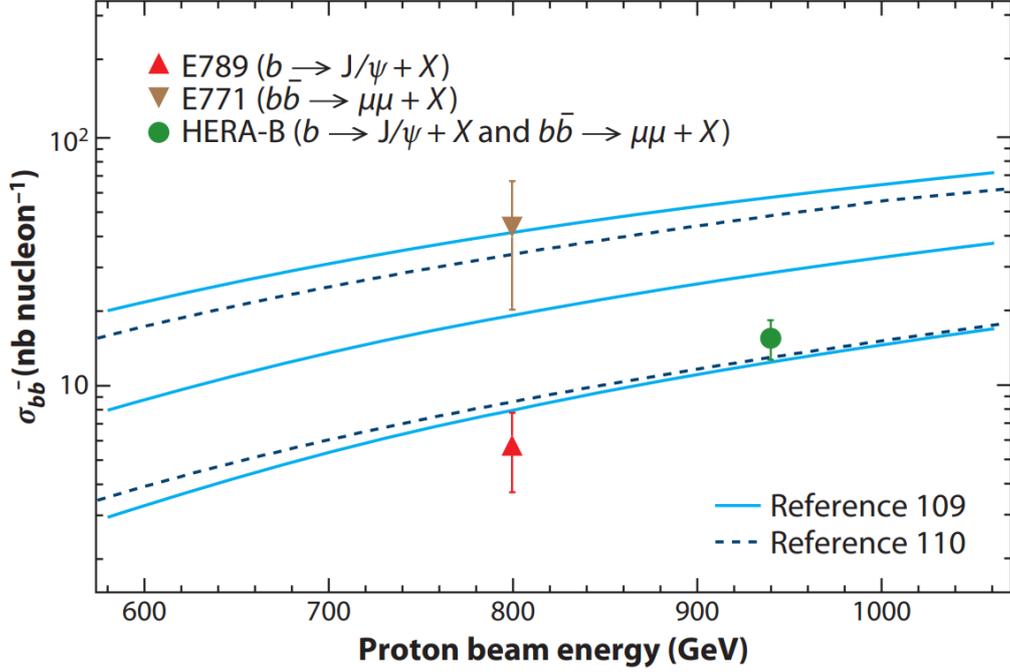


Рис. 7: Три измерения полного сечения образования $b\bar{b}$ как функции энергии протонов для столкновений с неподвижной мишенью. Кривые указывают верхнюю и нижнюю границы расчетов рассмотренных моделей

ного подавления образования J/Ψ из-за эффектов цветовой экранировки. Эта гипотеза послужила сильным мотиватором для нескольких экспериментальных исследований образования J/Ψ как в столкновениях тяжелых ионов, так и в столкновениях протонов с различными ядерными мишенями. Эксперименты по столкновению протонов с ядрами были разработаны для измерения плохо изученного подавления образования J/Ψ в холодной ядерной материи, то есть в отсутствие кварк-глюонной плазмы. Коллаборация E866 занималась измерением подавления J/Ψ для протонов с энергией 820 ГэВ на двух разных ядерных мишенях в широком диапазоне по переменной Фейнмана x_F . В 2000 году коллаборация E866 сообщила об удивительно большом подавлении, когда x_F приближается к единице.

Результирующая зависимость α от x_F показана на рисунке 8 вместе с измерениями E866 и NA50 (с более низкой энергией 450 ГэВ). В области перекрытия измерения HERA-B и E866 хорошо согласуются.

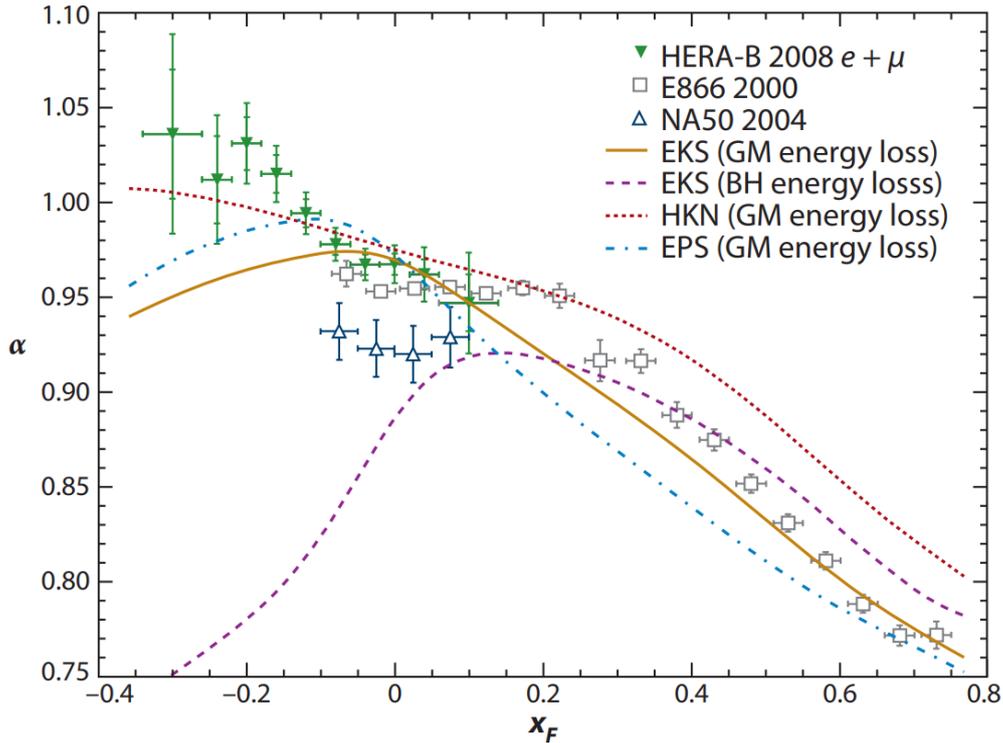
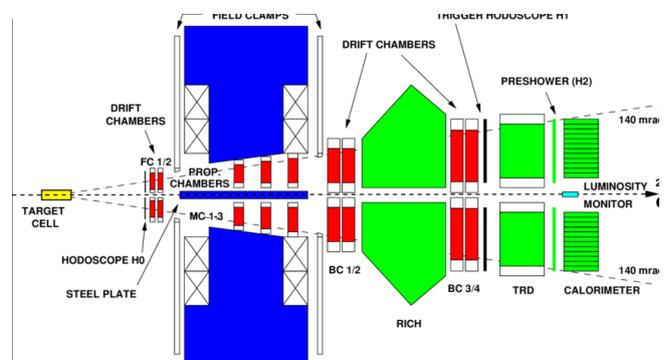


Рис. 8: Измерения параметра ядерного подавления α как функции x_F при энергии пучка 920 ГэВ с помощью HERA-B (заштрихованные зеленые треугольники), при 820 ГэВ с помощью E866 (серые квадраты) и при 450 ГэВ с помощью NA50. Кривыми показаны модельные расчеты.

2.5.4 HERMES

Эксперимент HERMES в HERA-Hall East был запущен в 1995 году. Продольно поляризованный электронный пучок HERA был использован для исследования спиновой структуры нуклонов. Для этого электроны рассеивались с энергиями 27.5 ГэВ на внутренней газовой мишени. Эта мишень и сам детектор были разработаны специально для спин-поляризованной физики.

Детектор HERMES представлял из себя передний спектрометр с большим количеством камер слежения и несколькими детекторами идентификации частиц. Дипольный магнит окружал трубки электронного и протонного пучков. Спектрометр был сконструирован в виде двух идентичных половин, установленных над и под лучевыми трубами.



За все свое время работы детектора ученые исследовали большое множество интересных явлений физики нуклонов. В качестве примера достижений этой коллаборации

рассмотрим следующие результаты: (а) определение спин-зависимой структурной функции $g_1(x)$ из измерений инклюзивного DIS с продольной поляризацией как пучка, так и мишени; (б) измерение азимутальных асимметрий в полуинклюзивном DIS с поперечно поляризованной H -мишенью, которая предоставляет информацию о PDF и FF, зависящих от поперечного импульса.

- а. Информация о суммарном вкладе спинов кварков в спин нуклона, $\frac{1}{2}\Sigma$, может быть получена из двухспиновых асимметрий (DSA) в инклюзивном DIS продольно поляризованными лептонами на продольно поляризованных нуклонах. Соответствующая асимметрия виртуальных фотонов A_1 пропорциональна отношению спин-зависимой структурной функции g_1 и неполяризованной структурной функции F_1 . В главном порядке (LO) КХД g_1 определяется как $g_1(x) = \frac{1}{2} \sum_q e_q^2 (\Delta q + \Delta \bar{q})$, где $\Delta q = q^+ - q^-$ - распределение кварковой спиральности для безмассовых кварков аромата q в продольно поляризованном нуклоне в так называемой системе бесконечного импульса. Результаты HERMES для $xg_1(x)$ как для протона, так и для дейтрона представлены как функция от x на рисунке 9. При $x < 0.04$ $xg_1(x)$ стремится к нулю.

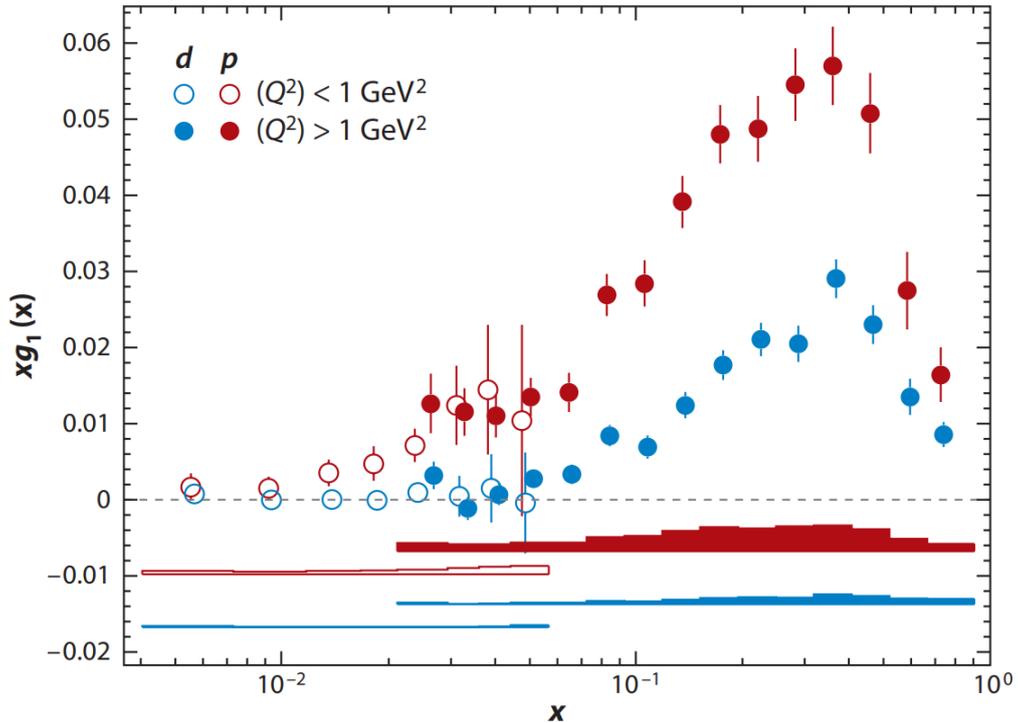


Рис. 9: Зависящая от спина структурная функция $xg_1(x)$ для протона и дейтрона. Полосы в нижней части графика представляют систематические погрешности.

- б. Экспериментальная информация о PDF $s(x)$ странных кварков (антикварков) как функции от x на удивление скудна. Большинство экспериментальных ограничений

основано на измерениях разноименно заряженных мюонных пар в глубоконеупругом рассеянии нейтрино и антинейтрино. В отсутствие значительных экспериментальных ограничений большинство современных КХД-аппроксимаций PDF предполагают, что $s(x)$ [$\bar{s}(x)$] связаны с функциями распределения легких антикварков соотношением $s(x) = \bar{s}(x) = r[\bar{u}(x) + \bar{d}(x)]/2$, где $r \approx 0.3 - 0.5$ при некотором малом масштабе факторизации.

HERMES извлек $S(x) = s(x) + \bar{s}(x)$ из множественности заряженных каонов в полуклассическом DIS на дейтронной мишени. Измеренная множественность каонов не может быть воспроизведена с помощью аппроксимации с использованием функций распределения странных кварков CTEQ6L [11] и с ФФ легких и странных кварков. Распределение $xS(x)$, извлеченное из этих множественностей, представлено на рисунке 10.

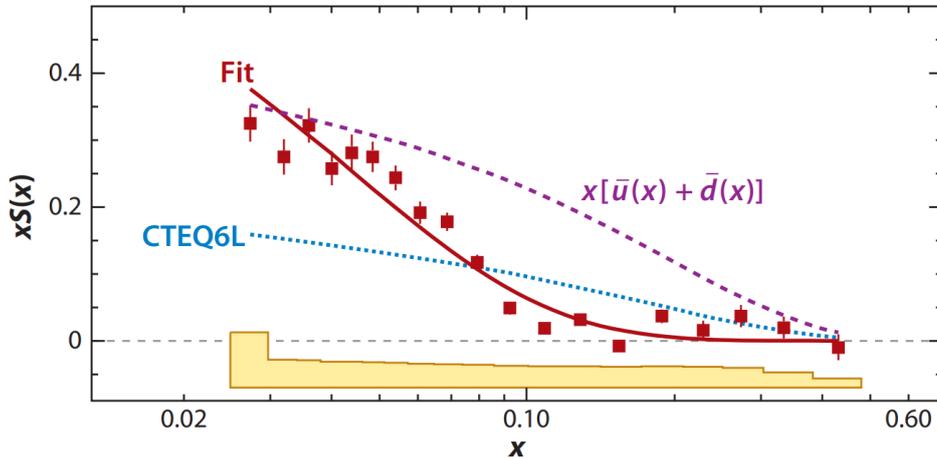


Рис. 10: Странное партонное распределение $xS(x)$ при $Q^2 = 2.5 \text{ ГэВ}^2$, полученное из множественности заряженных каонов в полуклассическом глубоконеупругом рассеянии на дейтериевой мишени. Сплошная кривая соответствует данным. Форма несовместима с $xS(x)$ из CTEQ6L, а также с предположением, что она пропорциональна морю легких кварков.

3 Современные эксперименты и актуальные направления исследований

История исследовательского центра *DESY* насчитывает большое количество знаменательных открытий. Проведенные здесь уникальные эксперименты заложили основу для исследовательской деятельности многих других исследовательских центров, а бесценный опыт кадрового состава до сих пор востребован во многих областях физики высоких энергий по всему миру. К настоящему времени бо́льшая часть экспериментов в *DESY* уже закончила свои исследовательские программы, и за последние 15 лет этот центр адаптируется

к новым вызовам современной физики. На данный момент, значительная часть ученого состава *DESY* принимает участие во множестве различных интернациональных коллабораций (ATLAS, CMS, FermiLab ...). В то же время в Гамбурге ведется активная работа над реализацией амбициозного проекта ILC.

Используя накопленный опыт и адаптируя старые ускорительные установки, в *DESY* реализовали следующие проекты/эксперименты:

3.1 OLYMPUS

Бывшая площадка ARGUS в DORIS стала местом проведения эксперимента OLYMPUS, установка которого началась в 2010 году. OLYMPUS использовал тороидальный магнит и пару дрейфовых камер из эксперимента MIT-Bates BLAST вместе с модернизированными времяпролетными детекторами и несколькими системами контроля светимости. OLYMPUS измерил отношение сечений e^+p и e^-p взаимодействий, чтобы точно определить вклад двухфотонного обмена в упругом ер-рассеянии. Двухфотонный обмен может решить проблему несоответствия форм-фактора протона между недавними измерениями, выполненными с использованием методов поляризации, и измерениями с использованием метода разделения Розенблюта. OLYMPUS произвел набор данных за 2012 и 2013 годы, а первые результаты были опубликованы в 2017 году [12].

В 2021г. группа исследователей OLYMPUS представила первые результаты по измерению среднего сечения упругого рассеяния электронов на протонах и позитронах [13]. Это сечение с усредненным лептонным зарядом нечувствительно к основным эффектам жесткого двухфотонного обмена, что дает более надежный доступ к электромагнитным форм-факторам протона. События упругого рассеяния были идентифицированы по совпадающему детектированию рассеянного лептона и протона отдачи в тороидальном спектрометре.

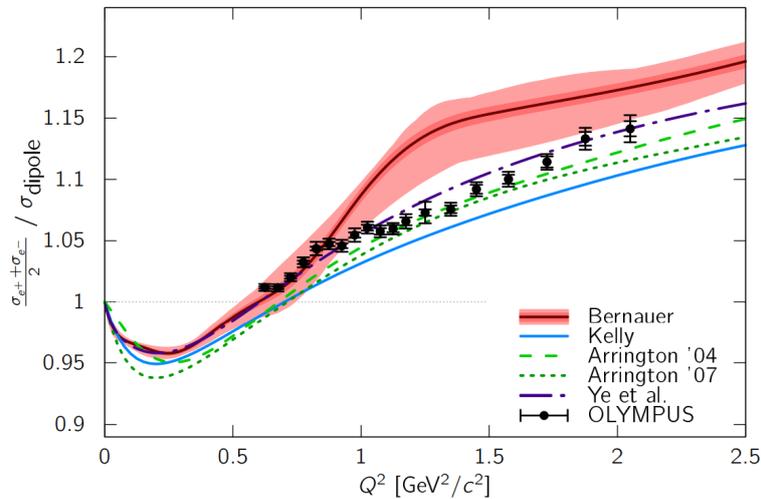


Рис. 11: Данные для среднего сечения заряда как функции Q^2 , в сравнении с рядом предсказаний. Как можно заключить из ширины полос и различий между моделями, полученные данные не дают сильные ограничения на модели в диапазоне $0.8 < Q^2 < 2.5 \text{ ГэВ}^2$.

3.2 PETRA III

PETRA III - это третье поколение накопительного кольца PETRA, самого блестящего источника рентгеновского излучения на основе накопительного кольца в мире с августа 2010 года. Ускоритель вырабатывает частицы с энергией 6 ГэВ. В настоящее время существует три экспериментальных зала (названных в честь различных известных ученых), в которых одновременно проводится до 30 экспериментов. Самый большой из них, названный «Зал Макса фон Лауэ», имеет бетонный пол длиной более 300 м.



Рентгеновские лучи PETRA III позволяют изучать такие маленькие образцы, как крошечные кристаллы белка или нанокристаллы, которые будут использоваться в жестких дисках будущего.

Молекулярные биологи, например, используют рентгеновские лучи для исследования пространственной атомной структуры кристаллов белка. Важным

приложением является разработка новых лекарств, которые могут быть нацелены именно на то место, где атакует патоген. С этой целью Европейская лаборатория молекулярной биологии EMBL построила комплексный исследовательский центр структурной биологии в PETRA III. Его три современные измерительные станции решительно ускоряют исследования молекул.

PETRA III также может генерировать очень «жесткое» рентгеновское излучение, которое проникает в материалы гораздо глубже. Это важное преимущество открывает множество новых возможностей в материаловедении - например, при испытании сварных швов, проверке производственных деталей на признаки деформации или анализе новых металлических сплавов для автомобилей и самолетов будущего. Helmholtz-Zentrum Geesthacht HZG использует эти преимущества на своих двух измерительных станциях для материаловедения на выставке PETRA III.

PETRA IV

DESY разрабатывает передовой рентгеновский микроскоп для nanoисследований с выдающимся потенциалом для промышленных пользователей и социально значимых приложений в исследованиях энергетики, информационных технологий, мобильности, окружающей среды и медицины.

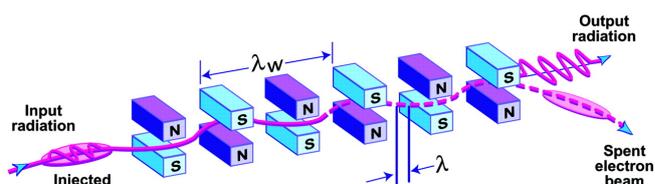
DESY использует PETRA III с одним из лучших накопительных источников рентгеновского излучения в мире. Исследовательские группы со всего мира используют это интенсивное рентгеновское излучение для различных экспериментов - от медицинских до исследований материалов. Но накопительное кольцо PETRA длиной 2300 метров имеет еще больший потенциал: DESY планирует расширить его до трехмерного рентгеновского микроскопа высокого разрешения для химических и физических процессов - будущего проекта PETRA IV.

PETRA IV расширяет рентгеновское изображение на все масштабы длины, от атома до миллиметров. Таким образом, исследователи могут анализировать процессы внутри катализатора, батареи или микрочипа в реальных условиях эксплуатации и специально подбирать материалы с наноструктурами. PETRA IV также предлагает выдающиеся возможности и оптимальные экспериментальные условия для промышленности.

3.3 FLASH

Уникальный лазер на свободных электронах в рентгеновском диапазоне FLASH начал оперировать в 2005 году. FLASH ускоряет электроны почти до скорости света.

Специальные устройства магнитов, ондуляторы, заставляют электроны двигаться по волнообразной траектории. На кривых быстрые частицы излучают короткие вспышки рентгеновского излучения. Эти вспышки перекрываются и колеблются



синхронно, создавая невероятно интенсивные и короткие световые вспышки с временной шкалой фемтосекунд - другими словами, квадриллионными долями секунды, что очень актуально для многих областей химии, так как химические реакции также происходят с фемтосекундными скоростями.

Он работает в режиме «самоусиливающегося спонтанного излучения» (SASE) и в настоящее время охватывает диапазон длин волн от 4.2 нм до примерно 5.2 нм.

Принцип лазера на свободных электронах:

Пучок электронов пролетает через секцию со знакопеременным магнитным полем - ондулятор. Под действием этого поля электроны вынуждены лететь не по прямой, а по некоей синусоидальной, волнообразной траектории. Если энергия электронов и длина волны таковы, что удовлетворяется условие синхронизма, то одна половина электронов начинает терять энергию, а другая, поступившая в ондулятор на половину периода волны позже - набирать. Таким образом, сначала средняя энергия электронов не меняется, но происходит модуляция энергии, т. е., пучок разбивается на слои толщиной в половину длины волны с чередующимся отклонением энергии от начальной. Однако частицы с меньшей энергией

летят медленнее, а с большей – быстрее. Поэтому «быстрые» слои догоняют «медленные». Следовательно, возникают уплотнения и разрежения, т. е. модуляция плотности электронов с пространственным периодом, примерно равным длине волны. Далее повторяется то же, что было в первой половине ондулятора: одни «полуволновые» слои пучка замедляются, а другие – ускоряются, но теперь энергию теряют слои с большей плотностью частиц, а приобретают - слои с меньшей плотностью. В результате средняя энергия электронов уменьшается, а мощность электромагнитной волны растет. Электроны, двигаясь по искривленным траекториям, начинают излучать.

3.4 European XFEL

Европейский XFEL имеет длину более трех километров и простирается от площадки DESY в Гамбурге до города Шенефельд в федеральной земле Шлезвиг-Гольштейн, где находится исследовательский кампус с большим экспериментальным залом. Проект стоимостью миллиард евро - международная инициатива, для которого была создана отдельная компания European XFEL GmbH. Проект реализуется Германией и еще 10 странами, включая Россию, Францию и Италию.

Ускоритель европейского XFEL доводит электроны до скорости, близкой к скорости света, а затем отправляет их через длинные ондуляторы. Эти специальные магниты заставляют электроны двигаться по синусоидальным траекториям, в результате чего частицы испускают чрезвычайно короткие и мощные рентгеновские вспышки. В отличие от рентгеновских импульсов, производимых в накопительном кольце, эти вспышки обладают лазерными свойствами. Рентгеновские лазеры аналогичного размера есть в Японии и США. Однако, в отличие от европейского XFEL, они не используют сверхпроводящие ускорители и, следовательно, производят относительно небольшое количество рентгеновских вспышек в секунду. Европейский XFEL, с другой стороны, генерирует 27.000 вспышек в секунду, что дает решающее преимущество в различных экспериментах. Минимальная длина волны излучения - 0.05 нм (25 кэВ).



Этот лазер востребован во многих областях точных наук: биологи получают подробные изображения клеточных компонентов, отдельных белковых молекул и вирусов. Результаты помогают бороться с болезнями и разрабатывать новые лекарства. Химики снимают реакции и в замедленном режиме наблюдают, как отдельные атомы взаимодействуют друг с другом. Полученные таким образом знания

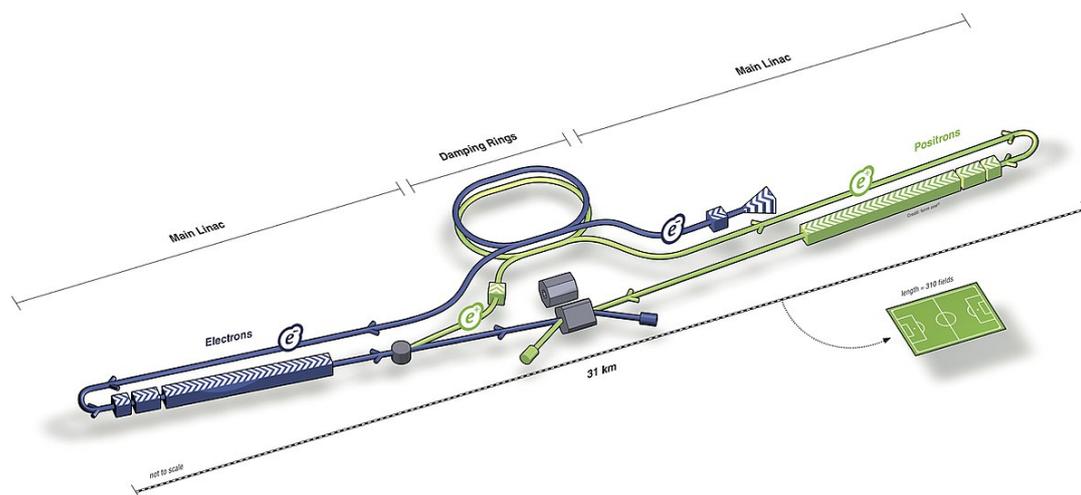
могут помочь, например, в оптимизации промышленных катализаторов. Физики и материаловеды изучают структуру наноматериалов. Такие материалы играют важную роль

при разработке более эффективных солнечных элементов, топливных элементов и систем хранения данных. Астрофизики анализируют образцы чрезвычайно горячих и сжатых материалов. Это дает представление о недрах звезд и планет и помогает выявить, в какой степени процессы ядерного синтеза подходят в качестве нового источника энергии.

3.5 ILC

Международный линейный коллайдер (ILC) - это предлагаемый линейный ускоритель частиц. Первоначально планируется иметь энергию столкновения 500 ГэВ с возможностью дальнейшего повышения до 1000 ГэВ (1 ТэВ). Его длина составит от 30 до 50 км (19–31 миль), что более чем в 10 раз превышает длину Стэнфордского линейного ускорителя на 50 ГэВ, самого длинного из существующих линейных ускорителей частиц.

Также ведутся исследования для альтернативного проекта - компактного линейного коллайдера (CLIC), который будет работать при более высоких энергиях (до 3 ТэВ). Длина CLIC аналогична ILC. Эти два проекта были объединены в рамках LCC коллаборации.



Многие ожидают, что при расчетных энергиях доступных ILC откроется возможность наблюдать новые физические явления, выходящие за рамки Стандартной модели. При таком раскладе планируется поиск новых частиц с дальнейшим описанием их характеристик. На данный момент перед ILC ставят следующие задачи:

- Измерить массу, спин и константы взаимодействия бозона Хиггса.
- Измерить количество, размер и форму любых дополнительных измерений шкалы ТэВ (Если есть).
- Исследовать легчайшую суперсимметричную частицу (LSP).

Для достижения этих целей необходимы детекторы частиц нового поколения.

4 SARS-CoV-2 Research

За последние два года кризис коронавируса коснулся каждого человека на этой планете. Перевернув наши жизни с ног на голову, эта болезнь не обошла и научную сферу нашей жизнедеятельности. Перед научным сообществом встала новая серьезная задача, требующая незамедлительных мер и решительных действий. За очень короткие сроки требуется серьезный прогресс в изучении патогена SARS-CoV-2. Источники рентгеновского излучения DESY - идеальные инструменты для изучения вируса и возможных лекарств на молекулярном уровне. Эксперты кампуса DESY участвуют в исследовании разными способами:

- С помощью рентгеновского излучения PETRA III исследовательская группа проанализировала несколько тысяч активных ингредиентов на предмет их фундаментальной пригодности в качестве лекарства от Covid-19. Было обнаружено несколько веществ, которые блокируют фермент, важный для репликации вируса. Другая рабочая группа определила синтетические антитела среди сотен кандидатов, способных нейтрализовать вирус. **Ссылка на видео**
- Используя рентгеновский метод, разработанный для исследования головного мозга, исследователи проанализировали поврежденную ткань легких пациентов с Covid-19 в PETRA III с предельной точностью.
- IT-отделы DESY предоставляют часть своих вычислительных мощностей для анализа данных и сложного компьютерного моделирования. Среди прочего, он вычисляет, как ведут себя определенные вирусные белки. Только к 30 сентября 2020 года было накоплено 13 997 439 часов процессорного времени, что соответствует полной производительности около 800 ноутбуков и около шести процентов от общей вычислительной мощности DESY.
- С помощью PETRA III специалисты ищут инновационные формы введения препаратов от Covid-19. Цель состоит в том, чтобы уменьшить возможные побочные эффекты.
- Компания BioNTech из Майнца, разработчик одной из первых противокоронавирусных вакцин, проводит в PETRA III исследования по поиску способов улучшения РНК-вакцин.
- Теоретики DESY смоделировали распространение SARS-CoV-2 с помощью моделей больших данных. Среди прочего, результатом стал алгоритм, который отслеживает развитие иммунитета и может снизить нагрузку на клиники.

- Несколько команд в кампусе DESY работают над экспресс-тестами на Covid-19, с помощью которых вирус может быть обнаружен быстрее, проще и дешевле, чем это было возможно раньше.

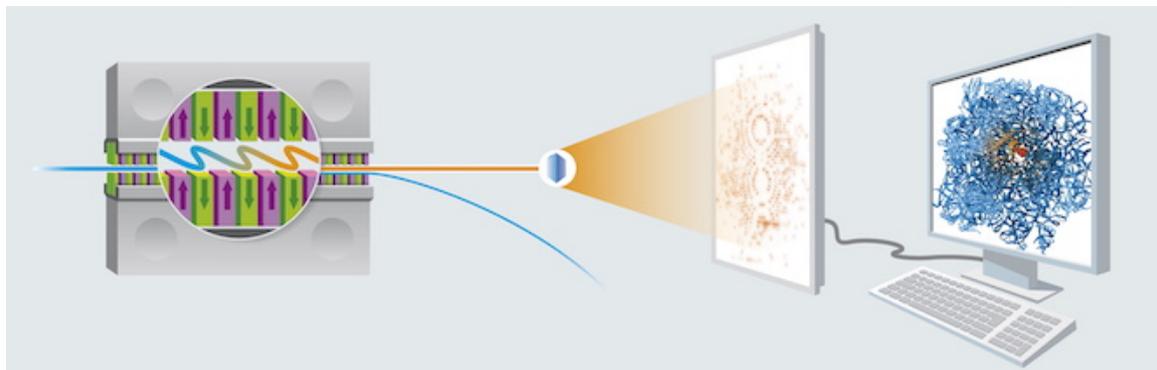


Рис. 12: Изучение структуры белков с помощью рентгеновского излучения. [Ссылка на видео](#)

5 Заключение

Насыщенная событиями богатая история исследовательского центра *DESY* служит прекрасным примером успешного международного сотрудничества ученых всей планеты. С каждым годом человечество сталкивается с новыми вызовами реального мира. Для успешного преодоления таких преград люди, как никогда раньше, испытывают необходимость объединяться для противостояния трудностям и разрешения проблем. Такие исследовательские проекты как *DESY*, *CERN*, *JLab*, *FermiLab* и др. показывают, чего может достичь человечество, если слаженно работать вместе для достижения общей цели. Только синергическое взаимодействие позволит нам прогрессировать дальше, ставить и достигать новые невыполнимые цели.

"The role of international science projects is not only to innovate, discover, publish, and share, but to bring the world together"

- Professor Rolf-Dieter Heuer, Director General of CERN (2009 - 2015)

Список литературы

- [1] A. Golutvin, AIP Conf. Proc. **196**, 111-115 (1989) doi:10.1063/1.38918
- [2] M. Schäfer, AIP Conf. Proc. **196**, 97-102 (1989) doi:10.1063/1.38913
- [3] B. Spaan [ARGUS], AIP Conf. Proc. **196**, 136-141 (1989) doi:10.1063/1.38922
- [4] M. V. Danilov, Conf. Proc. C **890807**, 139-154 (1989) DESY-89-147.
- [5] K. R. Schubert, AIP Conf. Proc. **196**, 79-96 (1989) doi:10.1063/1.38912
- [6] J. Ellis *et al.* [PETRA], Contribution to the book ‘50 Years of Quarks’ to be published by World Scientific doi:10.1142/S0217751X14300725 [arXiv:1409.4232 [hep-ph]].
- [7] B. Wiik *Proc. 7th. International Conference on Neutrinos, Weak Interactions and Cosmology - Neutrino 79* June 18-22, 1979 Bergen, Norway Eds. A. Haatuft and C. Jarlskog, Bergen Univ. Bergen, Norway (1979), p.1.113
- [8] J. Ellis, *ibid.*, p.1.451
- [9] R. Brandelik *et al.* [TASSO Collaboration], *Evidence for Planar Events in e^+e^- Annihilation at High-Energies* Phys. Lett. B **86**, 243 (1979)
- [10] C. Diaconu, T. Haas, M. Medinnis, K. Rith and A. Wagner, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **60**, 101-128 (2010) doi:10.1146/annurev.nucl.012809.104458
- [11] J. Pumplin *et al.* *J. High Energy Phys.* 0207:012 (2002) doi:10.1088/1126-6708/2002/07/012 [arXiv:hep-ph/0201195].
- [12] B. S. Henderson *et al.* [OLYMPUS], Phys. Rev. Lett. **118**, no.9, 092501 (2017) doi:10.1103/PhysRevLett.118.092501 [arXiv:1611.04685 [nucl-ex]].
- [13] J. C. Bernauer *et al.* [OLYMPUS], Phys. Rev. Lett. **126**, no.16, 162501 (2021) doi:10.1103/PhysRevLett.126.162501 [arXiv:2008.05349 [nucl-ex]].
- [14] Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
<https://www.desy.de/>