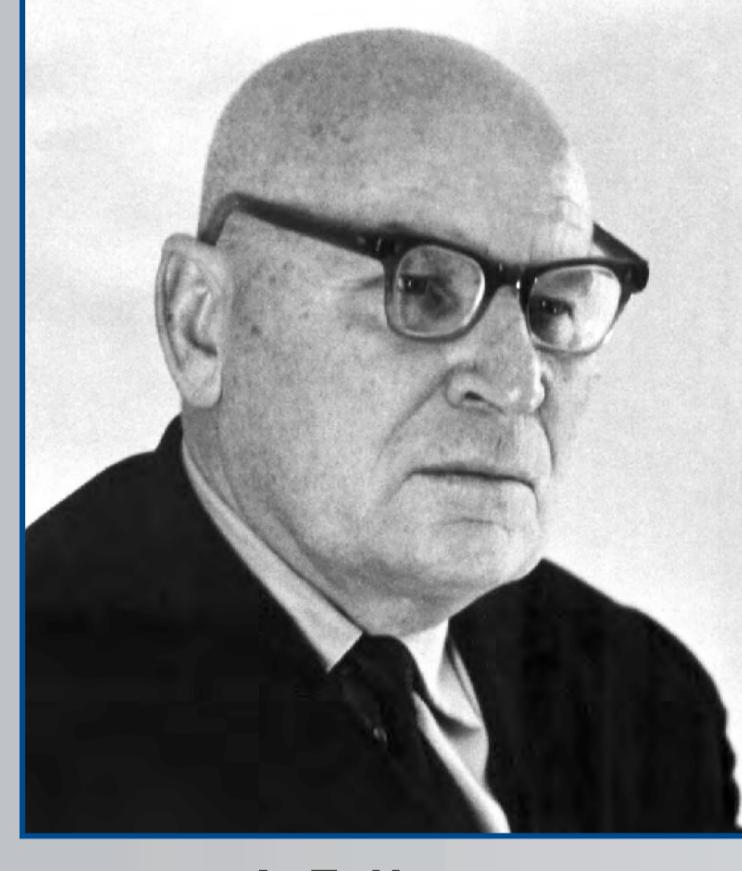




# ОТДЕЛЕНИЕ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

## ИСТОРИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

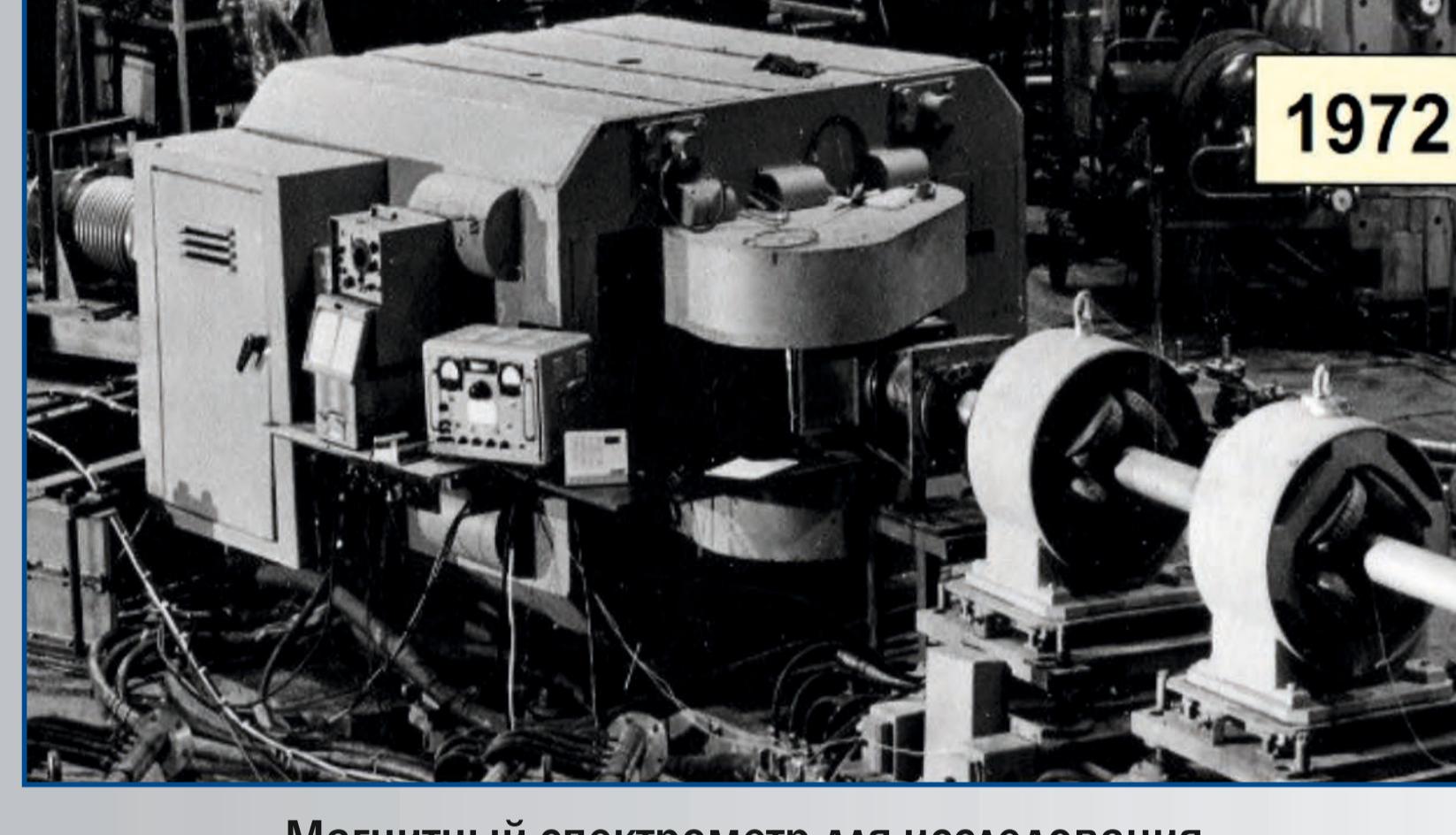
Основная научная деятельность Отделения физики высоких энергий (ОФВЭ) связана с экспериментальными исследованиями на базовых установках Института и ускорителях российских и зарубежных центров в области ядерной физики, физики элементарных частиц и прикладных исследований.



А. П. Комар,  
академик АН УССР

История ОФВЭ началась в стенах Физико-технического института задолго до официального образования ПИЯФ. В середине 50-х гг. в Физтехе были две небольшие лаборатории, ориентировавшие свою деятельность на экспериментальные исследования с помощью ускорителей частиц: циклотронная лаборатория (Д. Г. Алхазов) и лаборатория рентгеновских и  $\gamma$ -лучей (А. П. Комар). Для проведения исследований в области ядерной физики высоких энергий в 1957 г. было решено построить в филиале ФТИ в Гатчине протонный синхроциклotron (СЦ-1000) на рекордную для этого типа ускорителей энергию 1 000 МэВ. Проект синхроциклиотрона был разработан в НИИЭФА с участием Д. Г. Алхазова, Д. М. Каминкера, Н. К. Абросимова и ряда других сотрудников ФТИ.

Строительство СЦ-1000 было начато в 1959 г. В конце 1967 г. состоялся пробный пуск ускорителя, а эксплуатация в полном объеме началась с апреля 1970 г. Для организации исследований на синхроциклиотроне в 1963 г. была образована Лаборатория физики высоких энергий (ЛФВЭ), основу которой составил коллектив лаборатории рентгеновских и  $\gamma$ -лучей. Первым заведующим ЛФВЭ стал академик АН УССР А. П. Комар, руководивший этой лабораторией вплоть до 1971 г. Затем преобразованную в Отделение физики высоких энергий лабораторию возглавил член-корреспондент РАН А. А. Воробьев, а в 2017 г. руководителем Отделения стал доктор физико-математических наук О. Л. Федин.



Магнитный спектрометр для исследования упругого рассеяния протонов на ядрах (1972)

Уже первые эксперименты, выполненные на синхроциклиотроне и реакторе ВВР-М, принесли ОФВЭ известность в мировом научном сообществе. К таким экспериментам можно отнести исследования:

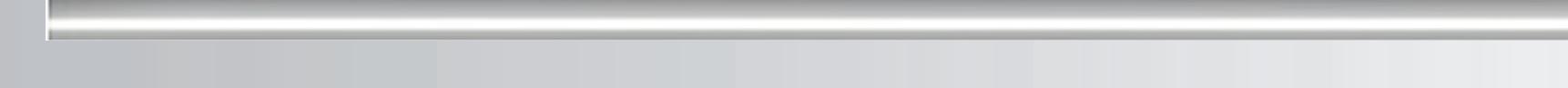
- пространственного распределения ядерной плотности методом упругого рассеяния протонов с энергией 1 000 МэВ на ядрах (руководитель С. Л. Белостоцкий; Г. Д. Алхазов). В этих исследованиях принимала участие группа физиков из Центра ядерных исследований Saclay (Франция). Всего за период 1974–1983 гг. было выполнено 15 совместных экспериментов на ускорителях ПИЯФ и Saclay;
- структуры ядер методом лазерной масс-спектроскопии (проект ИРИС, руководитель Э. Е. Берлович; Г. Д. Алхазов, В. Н. Пантелеев);
- мюонного катализа ядерного  $dd$ -синтеза (руководитель А. А. Воробьев);
- пион-нуклонного взаимодействия (руководитель С. П. Круглов);
- процесса тройного деления ядер (руководитель А. А. Воробьев; Д. М. Селиверстов), а также
- измерение времени жизни  $K$ -мезона (руководитель В. П. Коптев);
- изучение процесса канализации протонов в изогнутых кристаллах (руководители О. И. Сумбаев и В. М. Самсонов);
- протонной терапии на СЦ-1000 – «Гатчинский метод» (руководитель Н. К. Абросимов).

Начало участия ПИЯФ в международном сотрудничестве относится к 1967 г., когда было заключено двустороннее соглашение о сотрудничестве между ФТИ и Институтом Нильса Бора (Дания) и были выполнены первые совместные эксперименты. Затем аналогичное соглашение было заключено с Европейским центром ядерных исследований (ЦЕРН, Швейцария). Решающим этапом вхождения ОФВЭ в мировое научное сообщество, занимающееся физикой высоких энергий, явились эксперименты WA9 и NA8 в ЦЕРН по исследованию малоуглового пион-протонного рассеяния, выполненные с использованием разработанного в Отделении детектора протонов отдачи ИКАР. Измерения были проведены в 1978–1981 гг. на пучке  $\pi$ -мезонов с энергией 30–345 ГэВ. Эксперимент прошел успешно и был включен в число основных достижений ЦЕРН того времени. В нашей стране он был отмечен Государственной премией СССР (А. А. Воробьев). Заложенный в основу ИКАР принцип водородной времепрекурсорной камеры был использован в целом ряде экспериментов, поставленных по инициативе ОФВЭ.

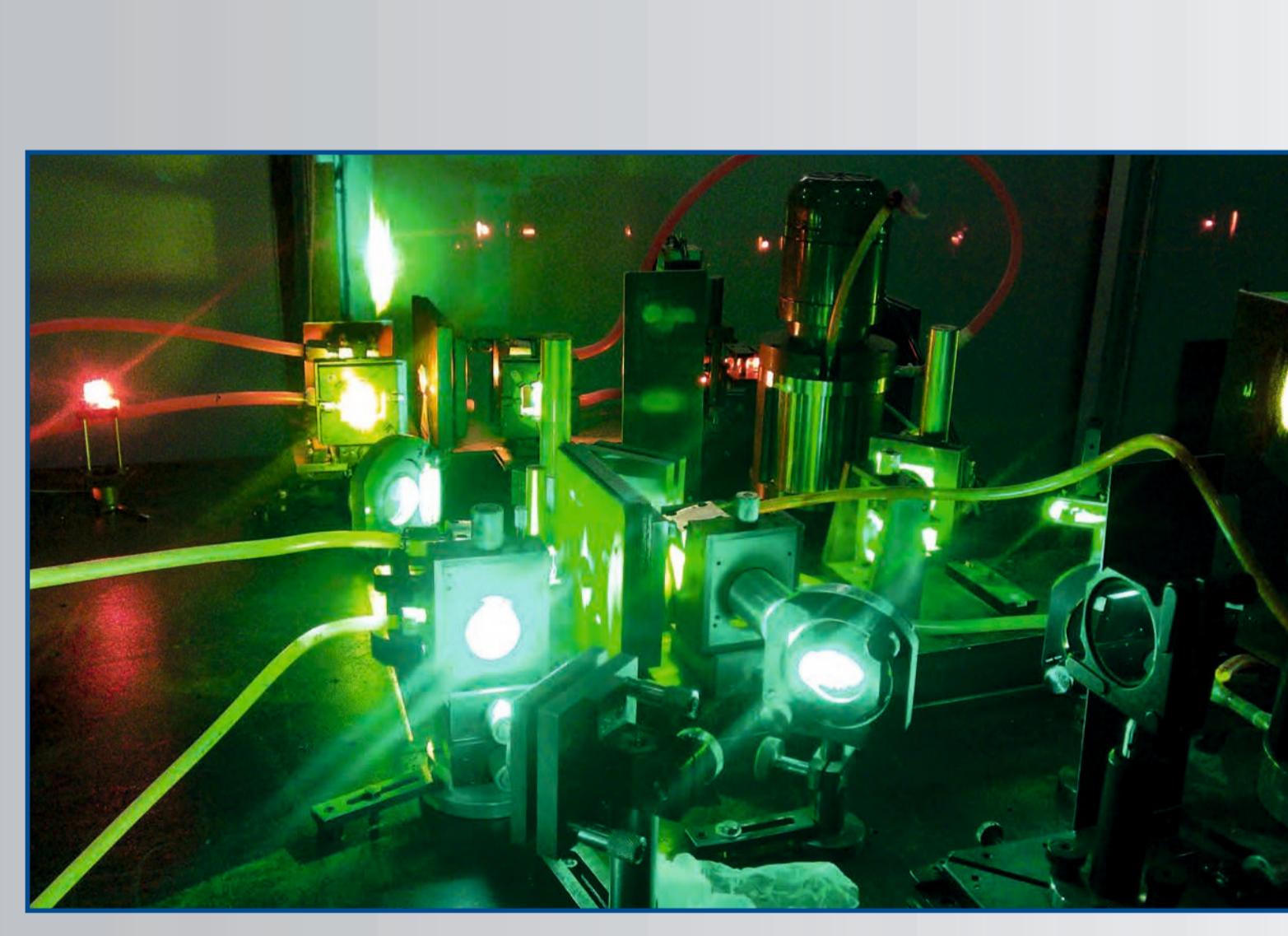
В дальнейшем сотрудничество с ЦЕРН постоянно расширялось. Знаковым было участие ОФВЭ в эксперименте L3 на коллайдере LEP. Так же было установлено эффективное сотрудничество с рядом ведущих ядерных центров, таких как Национальная ускорительная лаборатория им. Энрико Ферми (FNAL, США), Брукхейвенская национальная лаборатория (BNL, США), мезонная фабрика Института им. Пауля Шерпера (PSI, Швейцария), Центр по изучению тяжелых ионов им. Гельмгольца (GSI, Германия). Участие ОФВЭ в совместных проектах всегда сопровождалось существенным (часто определяющим) вкладом в разработку идеи эксперимента и его реализацию.

С начала этого столетия мир физики элементарных частиц вступил в эпоху Большого адронного коллайдера (LHC). Институт принял активное участие в разработке и создании всех четырех основных установок (CMS, ATLAS, LHCb, ALICE), поддержании их в рабочем состоянии и анализе получаемых экспериментальных данных. Эксперименты на LHC оказались исключительно продуктивными. Ежегодно по их результатам публикуется более 100 научных работ. Важнейшим на данный момент достижением LHC считается открытие бозона Хиггса.

В настоящее время ОФВЭ принимает участие в 16 экспериментах, выполняемых в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ и за рубежом. Также ведутся работы по модернизации коллайдерных установок на LHC. Идет реализация утвержденных новых проектов: эксперименты CBM, PANDA, R3B, MATS на создаваемом в GSI ускорительном комплексе FAIR; эксперименты MPD и SPD на строящемся в Объединенном институте ядерных исследований коллайдере NICA (Дубна); эксперимент Proton по измерению зарядового радиуса протона на пучке электронов ускорителя MAMI (Майнц, Германия) и пучке мюонов ЦЕРН. Приоритетным является проект ИРИНА для исследования нейтронно-избыточных ядер на реакторе ПИК методом лазерной масс-спектроскопии.



Детектор протонов отдачи ИКАР. Разработан в ОФВЭ, являлся основой экспериментов WA9 и NA8 (ЦЕРН, 1978–1981)



Лазерная система установки ИРИС

Лазеры, настроенные на определенные длины волн в соответствии со специфическими частотами переходов между атомными уровнями, обеспечивают селективную ионизацию исследуемого элемента в лазерном ионном источнике

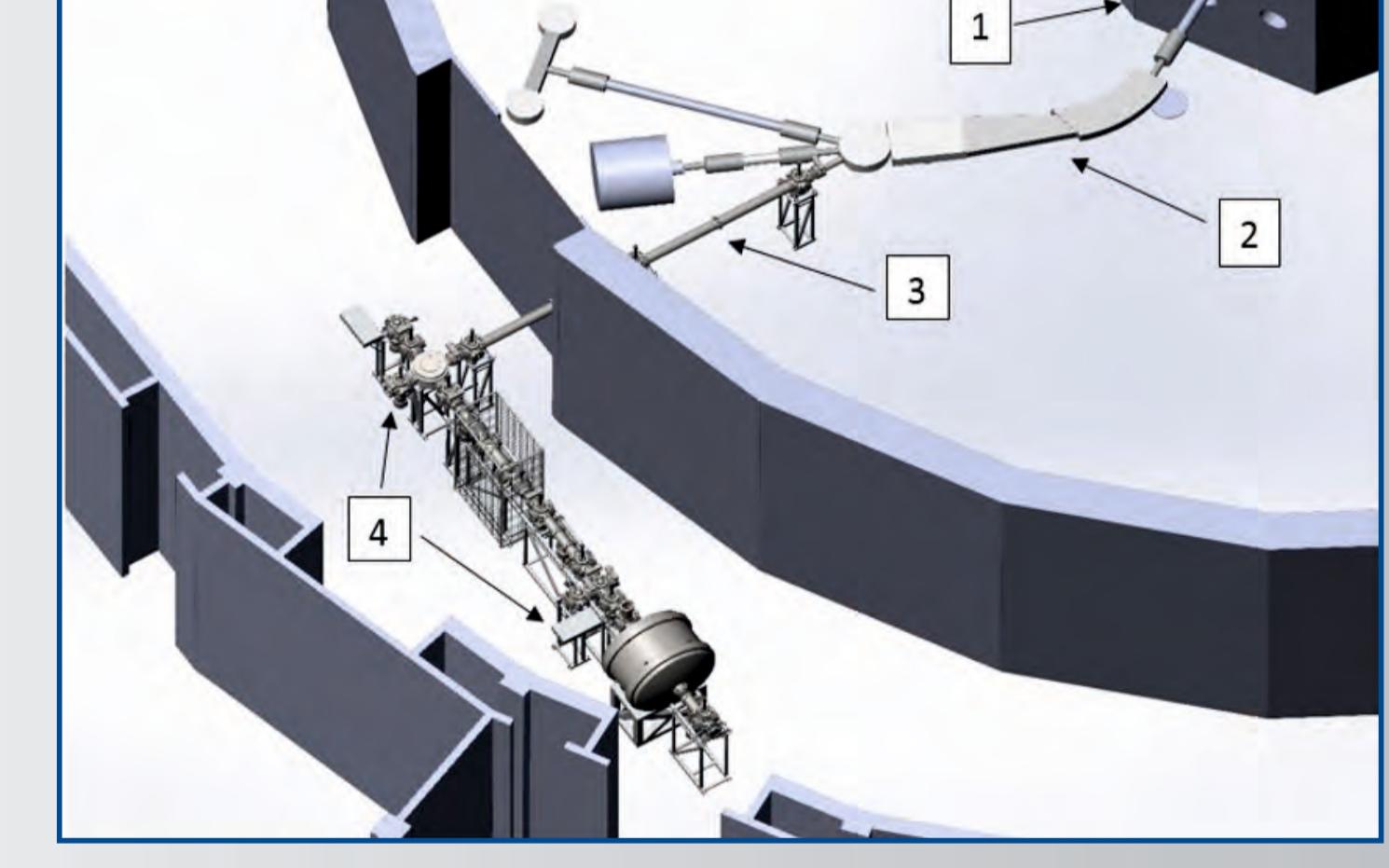
## УСТАНОВКИ ИРИС, ISOLDE И ПРОЕКТ ИРИНА

Единственная в России установка ИРИС (Исследование Радиоактивных Изотопов на Синхроциклиотроне) работает «в линию» на протонном пучке СЦ-1000. На установке проводятся исследования нейтронно-дефицитных ядер, удаленных от полосы  $\beta$ -стабильности. За время работы ИРИС изучено более 300 ядер, причем 17 из них были получены и исследованы впервые. Был впервые предложен и осуществлен метод селективного лазерного источника для селективной ионизации радиоактивных изотопов и проведения лазерно-спектроскопических исследований удаленных ядер. Использование данного метода позволило на несколько порядков увеличить эффективность лазерной ионизации.

С ведущим участием группы сотрудников установки ИРИС метод резонансной фотоионизационной спектроскопии в лазерном ионном источнике (in-source spectroscopy) был внедрен на установке ISOLDE (ЦЕРН). В настоящее время данный метод используется в совместных экспериментах по исследованию крайне удаленных нейтронно-дефицитных ядер с выходами менее чем одно ядро за 10 с.

Для исследований экзотических нейтронно-избыточных ядер вблизи границы нейтронной устойчивости на пучке тепловых нейтронов реактора ПИК реализуется проект ИРИНА (Исследование Радиоактивных Изотопов на Нейтронах).

Установка ИРИНА обеспечивает самые высокие в мире выходы крайне удаленных от полосы  $\beta$ -стабильности нейтронно-избыточных ядер.



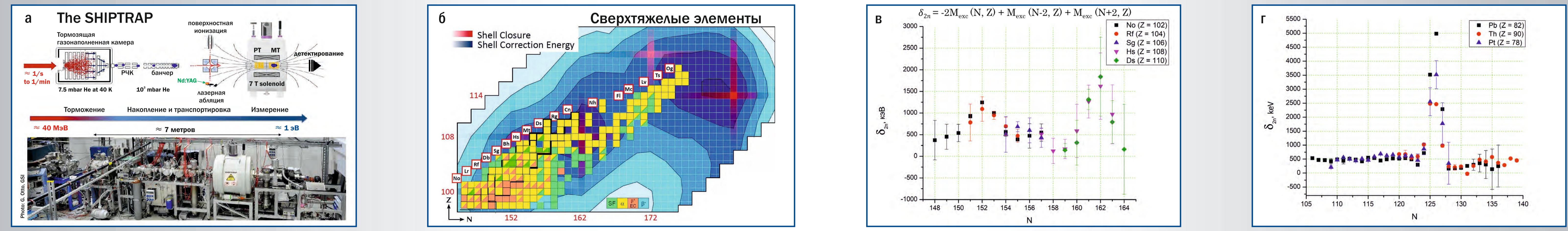
Установка ИРИНА с ионной ловушкой ПИТРАП реактора ПИК  
Основной частью установки ИРИНА является масс-сепаратор, мишенно-ионное устройство которого будет установлено на канале реактора ПИК в потоке нейтронов  
3 · 10<sup>13</sup> см<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup>. 1 – реактор; 2 – масс-сепаратор; 3 – ионные тракты; 4 – ионная ловушка ПИТРАП

## УСТАНОВКА SHIPTRAP – ИОННАЯ ЛОВУШКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАСС СВЕРХТЯЖЕЛЫХ НУКЛИДОВ

Установка SHIPTRAP (рис. а), запущенная в GSI с участием Лаборатории физики экзотических ядер ОФВЭ, является единственной в мире системой, способной прямым способом прецизионно измерять массы трансурановых нуклидов, в том числе и сверхтяжелых ( $Z \geq 104$ ). Измерениями абсолютных масс отдельных нуклидов (помечены на карте сверхтяжелых элементов, рис. б), принадлежащих длинным цепочкам  $\alpha$ -распадов с истоками в области сверхтяжелых элементов, впервые удалось получить значения масс большого массива нуклидов с относительной точностью  $\approx 10^{-8}$  (красные квадраты). Тем самым была получена поверхность экспериментальных масс большого участка сверхтяжелых элементов. Анализ показал, что при значениях количества нейтронов  $N = 152$  и  $N = 162$  наблюдаются пики в кривой оболочечной щели  $\delta_{Zn} = -2M_{exc}(N, Z) + M_{exc}(N-2, Z) + M_{exc}(N+2, Z)$  (рис. в). На пути к предсказанному острову сверхтяжелых элементов ( $Z = 114$  и  $N = 184$ ) наблюдаются малые островки стабильности (рис. г), позволяющие уточнить исследования релятивистических эффектов и непрерывной квантовой электродинамики, которая характеризует сверхтяжелые атомные структуры. Сделать это возможно еще до открытия предсказанного острова стабильности.

Сотрудниками ОФВЭ накоплен большой опыт работы на ионной ловушке SHIPTRAP, которая может стать прототипом ионной ловушки ПИТРАП. Ее планируется установить на пучок продуктов деления реактора ПИК.

Результаты проведенных исследований отмечены Международной премией им. Г. Н. Флерова (Ю. Н. Новиков).





## ОТДЕЛЕНИЕ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

### СОТРУДНИЧЕСТВО С НАЦИОНАЛЬНЫМИ ЛАБОРАТОРИЯМИ США

Сотрудничество с Национальной ускорительной лабораторией им. Энрико Ферми (FNAL) стало важным этапом в становлении ОФВЭ как исследовательского центра в области физики высоких энергий. В конце 1983 г. в FNAL был введен в строй Теватрон – протонный ускоритель на энергию 1 000 ГэВ. На базе этого ускорителя был создан уникальный гиперонный канал, формирующий пучок поляризованных  $\Sigma$ -гиперонов с энергией до 250 ГэВ. По предложению ОФВЭ совместно с американскими коллегами в 1983–1984 гг. был проведен эксперимент E715, направленный на решение широко обсуждавшейся «загадки  $\Sigma$ -гиперона», заключающейся в том, что существовавшие в то время экспериментальные данные по асимметрии  $\beta$ -распада  $\Sigma$ -гиперона резко отличались от теоретического предсказания. Преимуществом эксперимента E715 было использование разработанного в ОФВЭ детектора переходного излучения, позволившего отделить электроны от распада  $\Sigma \rightarrow n + e^- + \nu$  от  $\pi$ -мезонов из 1 000 раз более интенсивного распада  $\Sigma \rightarrow n + \pi^-$ . Эксперимент прошел успешно. Полученные экспериментальные данные с большой точностью подтвердили теоретические предсказания. После E715 были проведены еще два совместных эксперимента: E761 по исследованию радиационного распада  $\Sigma^+$ -гиперона и SELEX (E781) по спектроскопии очарованных барионов.

Начиная с 2000 г. ОФВЭ сотрудничает с Брукхейвенской национальной лабораторией (BNL, США) в эксперименте PHENIX. Он выполняется на коллайдере релятивистских тяжелых ионов RHIC при энергии столкновений  $\sqrt{s_{NN}} = 39$ –200 ГэВ. НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ разработал и изготовил одну из основных подсистем установки PHENIX – центральный трековый детектор. Основное достижение эксперимента – открытие кварк-глюонной плазмы (QGP), нового состояния материи.



Детектор переходного излучения  
эксперимента E715



«Загадка  $\Sigma$ -гиперона» решена  
(фото из публикации CERN Courier)



Генеральный директор FNAL Л. Ледерман подписывает  
соглашение о проведении эксперимента E761



Эксперимент PHENIX в BNL.  
Центральный трековый детектор

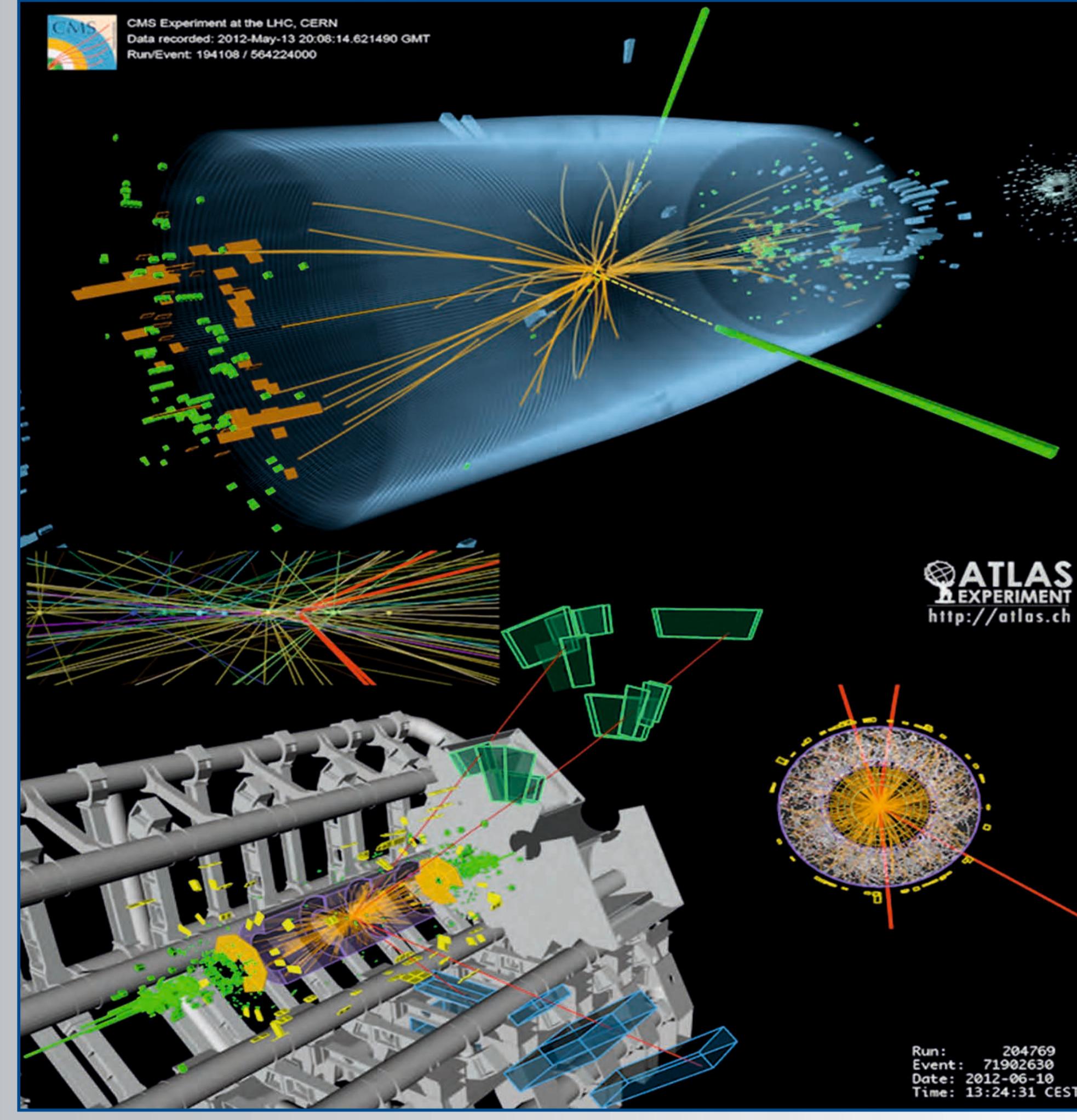
### СОТРУДНИЧЕСТВО С ЕВРОПЕЙСКИМ ЦЕНТРОМ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ (ЦЕРН)

Одним из важнейших направлений научной деятельности ОФВЭ является подготовка и участие в экспериментах на LHC (CMS, ATLAS, LHCb и ALICE). ОФВЭ внесло значительный вклад на всех стадиях подготовки этих экспериментов, начиная с концептуальной проработки проектов создаваемых детекторов. На стадии реализации этих проектов ОФВЭ взяло на себя беспрецедентные для Института обязательства по участию в разработке и изготовлении важнейших подсистем коллайдерных детекторов, таких как торцевая мюонная система (EMU) в CMS, центральный трекер – детектор переходного излучения (TRT) в ATLAS, мюонная система в LHCb, мюонная система в ALICE.

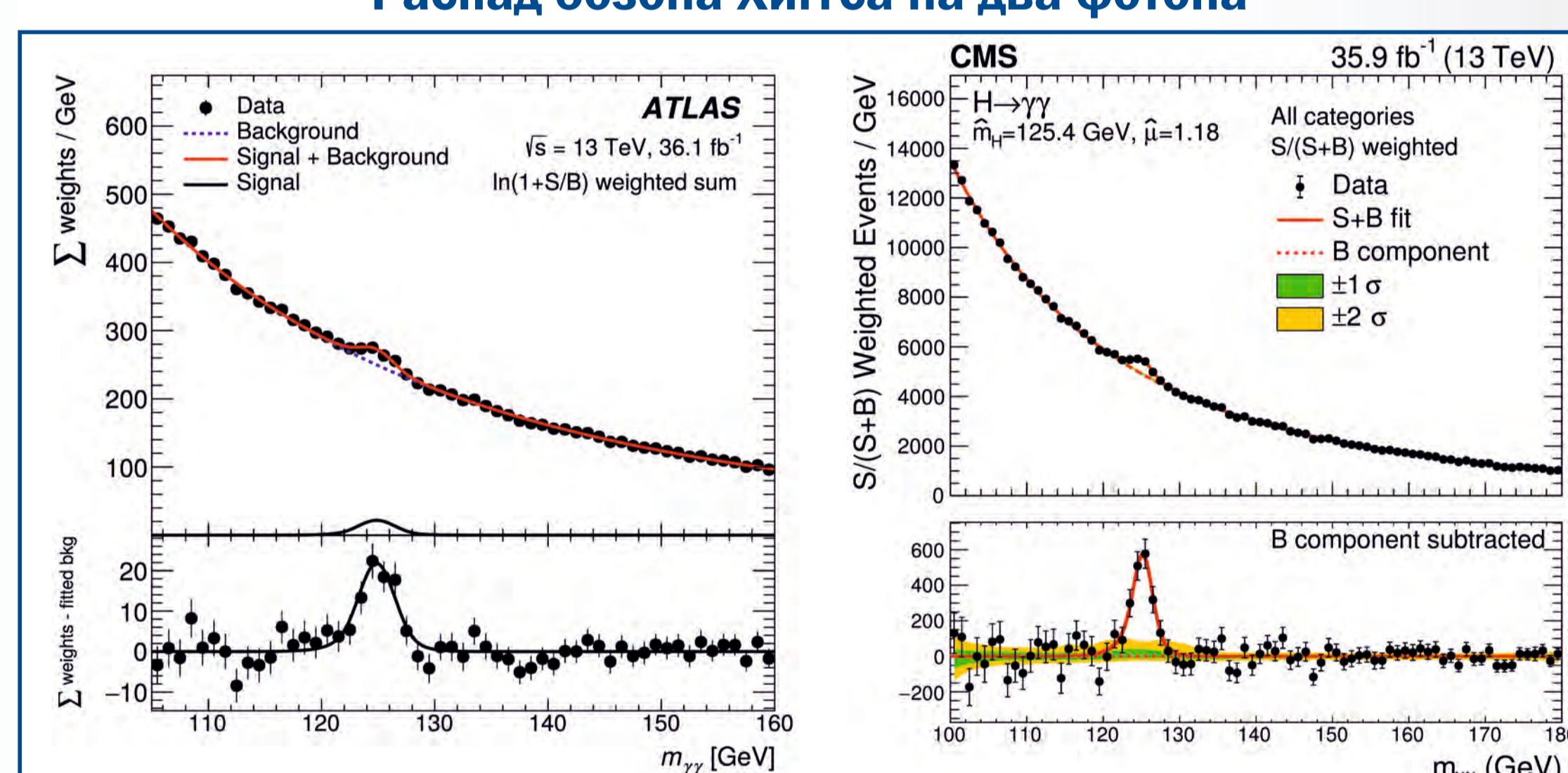
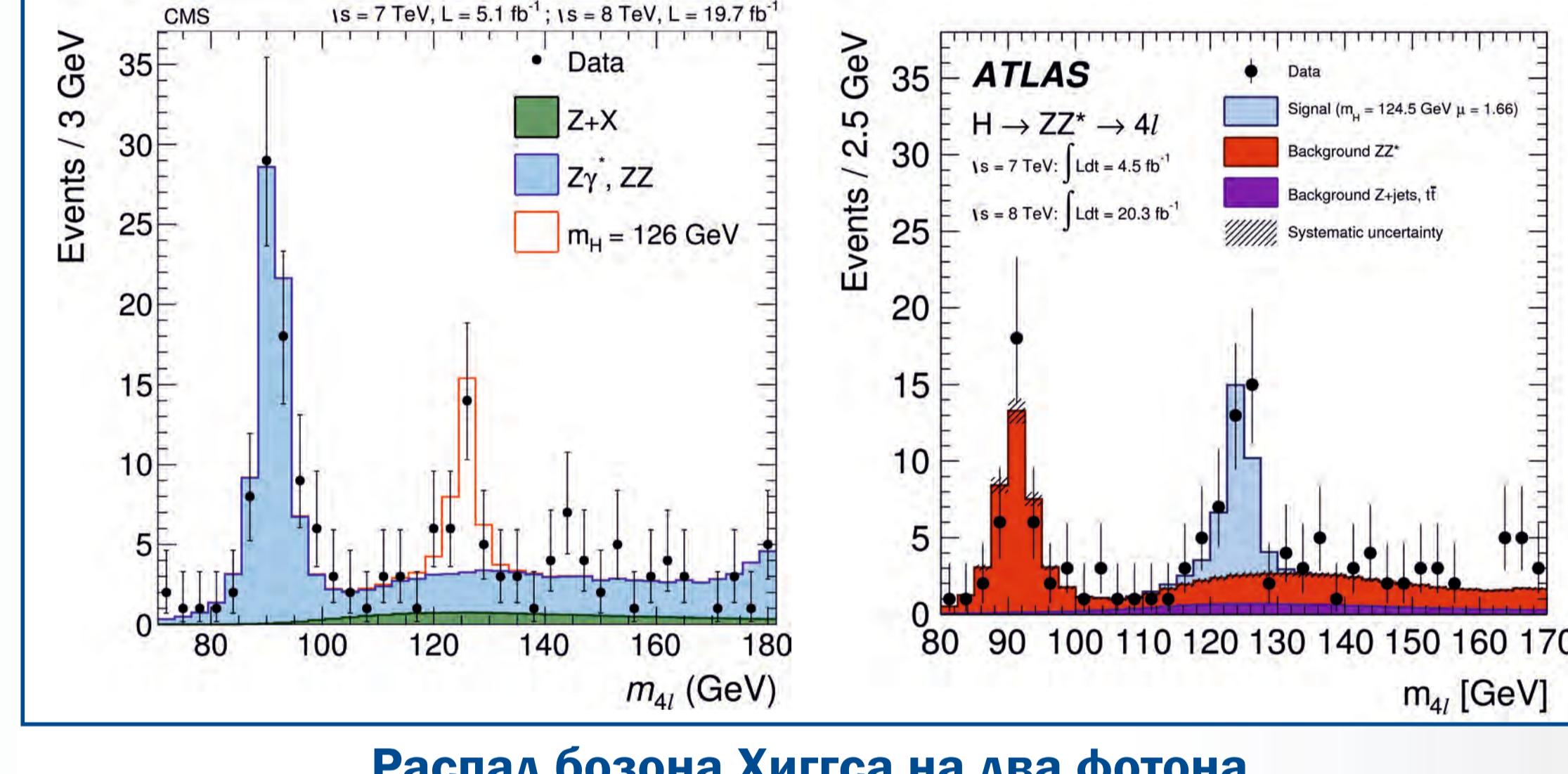
#### ЭКСПЕРИМЕНТЫ ATLAS И CMS

В экспериментах ATLAS и CMS в 2012 г. был открыт бозон Хиггса – ключевая частица современной теории элементарных частиц.

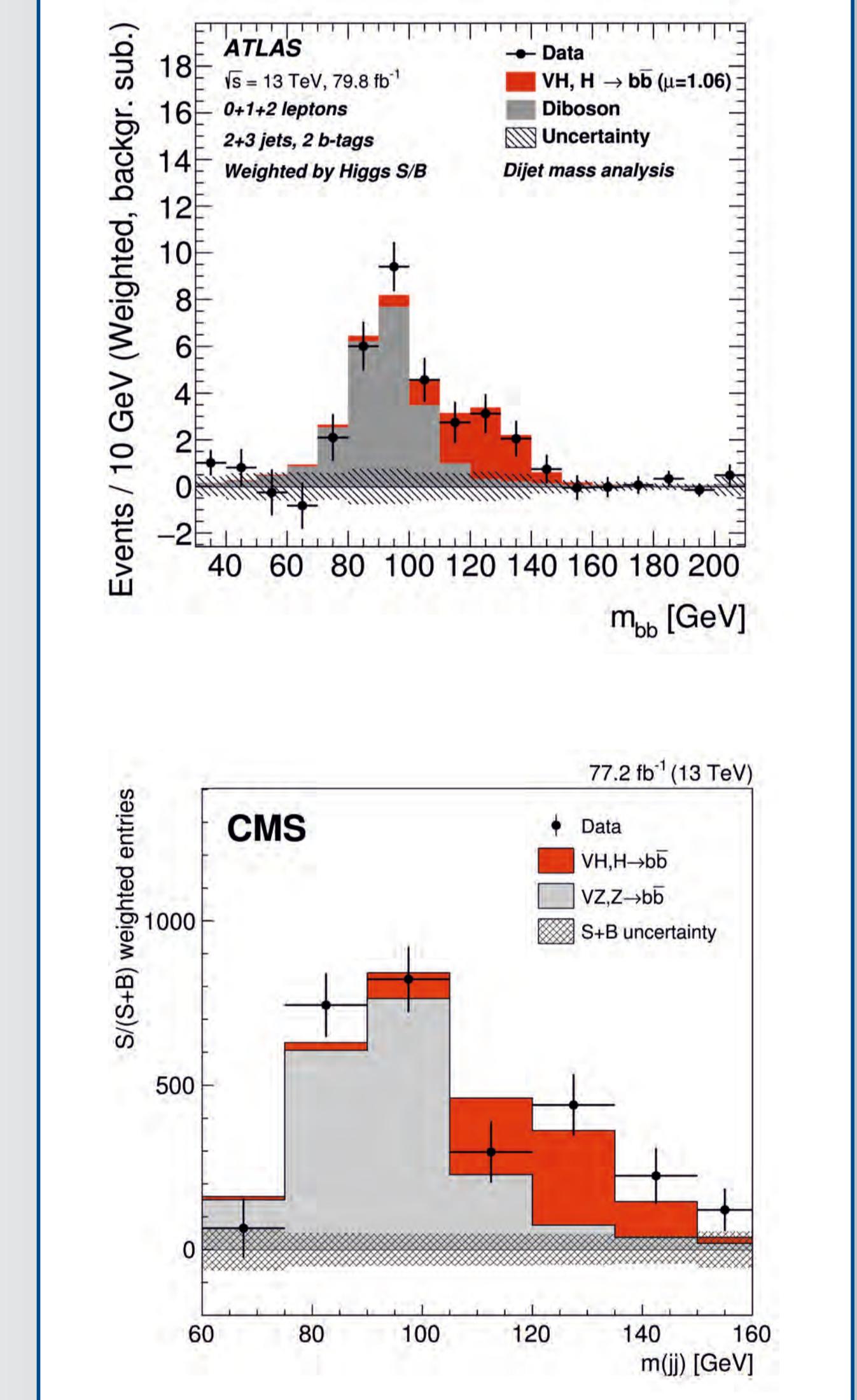
##### Отображение событий рождения бозона Хиггса



##### Распад бозона Хиггса на четыре лептона

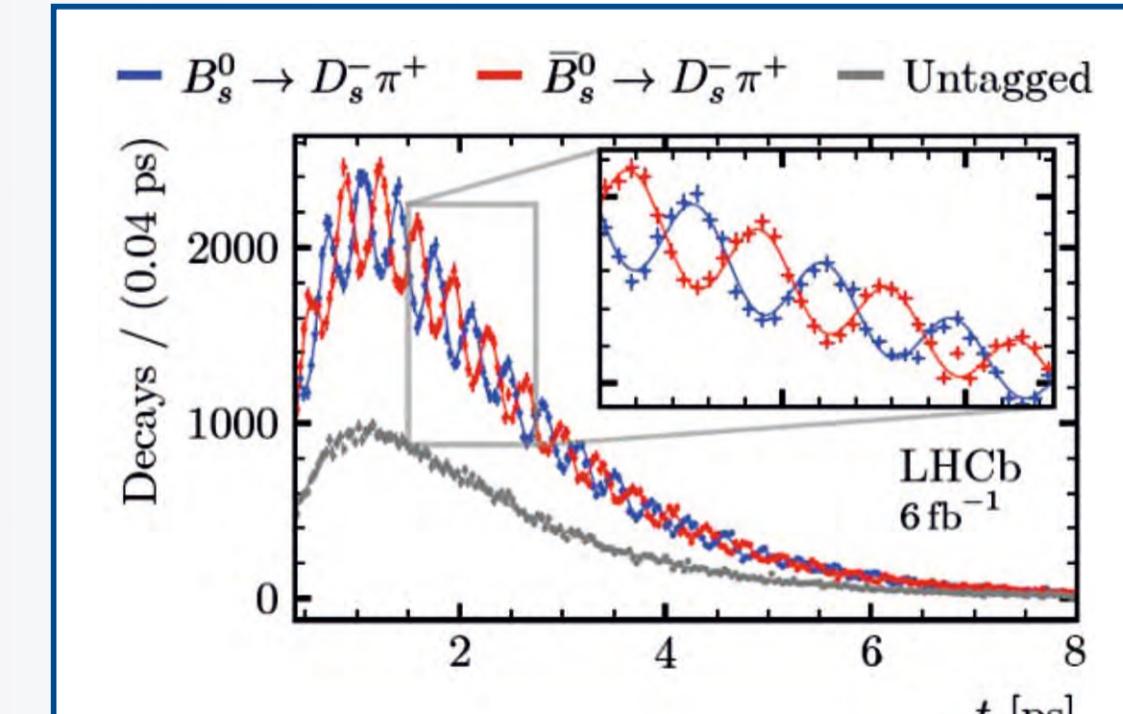


##### Распад бозона Хиггса на два b-кварка



### ЭКСПЕРИМЕНТ LHCb

В ходе двух сеансов эксперимент LHCb, направленный на изучение частиц, содержащих тяжелые кварки, накопил статистику, на порядки превышающую набранную всеми предыдущими экспериментами. Опубликовано более 500 статей. Эксперимент открыл более 50 новых адронных состояний. Одним из примеров являются обнаруженные при изучении распадов  $A_0^0 \rightarrow J/\psi K^- p$  в спектре масс системы «протон –  $\psi$ » три узких пика,  $P_c(4312)^+$ ,  $P_c(4440)^+$  и  $P_c(4457)^+$ , показанные на рис. слева. Эти пики интерпретируются как проявление новой формы адронной материи – адроны, состоящие из пятери кварков (пентакварки).



Иллюстрацией возможностей LHCb для проведения прецизионных измерений может служить приведенное на рис. справа распределение по времени жизни  $B_s^0$ -мезонов. Спектр обладает осциллирующим поведением, которому соответствует многократное спонтанное превращение частицы в античастицы и обратно.

Уникальные характеристики LHCb позволяют не только прецизионно измерять параметры Стандартной модели, но и искать указания на явления, выходящие за рамки современной теории физики частиц.

### ЭКСПЕРИМЕНТ ALICE

В эксперименте ALICE подтверждено фундаментальное открытие, сделанное на коллайдере RHIC в экспериментах PHENIX и STAR: в центральных столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ионов формируется сильно взаимодействующая кварк-глюонная плазма, обладающая признаками почти идеальной жидкости с отношением сдвиговой вязкости к энтропии, близким к унитарному пределу.

Одно из указаний на формирование кварк-глюонной плазмы – наблюдение коллективных эллиптических потоков адронов, рожденных в столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ядер (рис. а). Такие потоки характерны для гидродинамической эволюции почти идеальной жидкости с эллиптическим значительным градиентом давления. Приближенный кварковый скейлинг этих потоков свидетельствует о том, что они формируются при эволюции кварковой среды.

При значительном вкладе сотрудников ОФВЭ в экспериментах ALICE и LHCb впервые измерено сечение жесткого экслюзивного адронного процесса  $\gamma p \rightarrow J/\psi \rho$  вплоть до энергии фотонов  $E_\gamma \approx 2 \cdot 10^{15}$  эВ в эквивалентной лабораторной системе с фиксированной мишенью. Наблюдаемый в области энергий 0,4 ТэВ  $\leq W_{\gamma p} \leq 2$  ТэВ степенный рост измеренного сечения  $\sigma_{\gamma p} \rightarrow J/\psi \rho \sim s^\delta$  с величиной  $\delta$  в интервале 0,33–0,35 (рис. б) с разумной точностью согласуется с теорией БФКЛ-померона, разработанной теоретиками Института.

