

# «Спиновый кризис» и эксперимент HERMES

1993 – 2019 годы

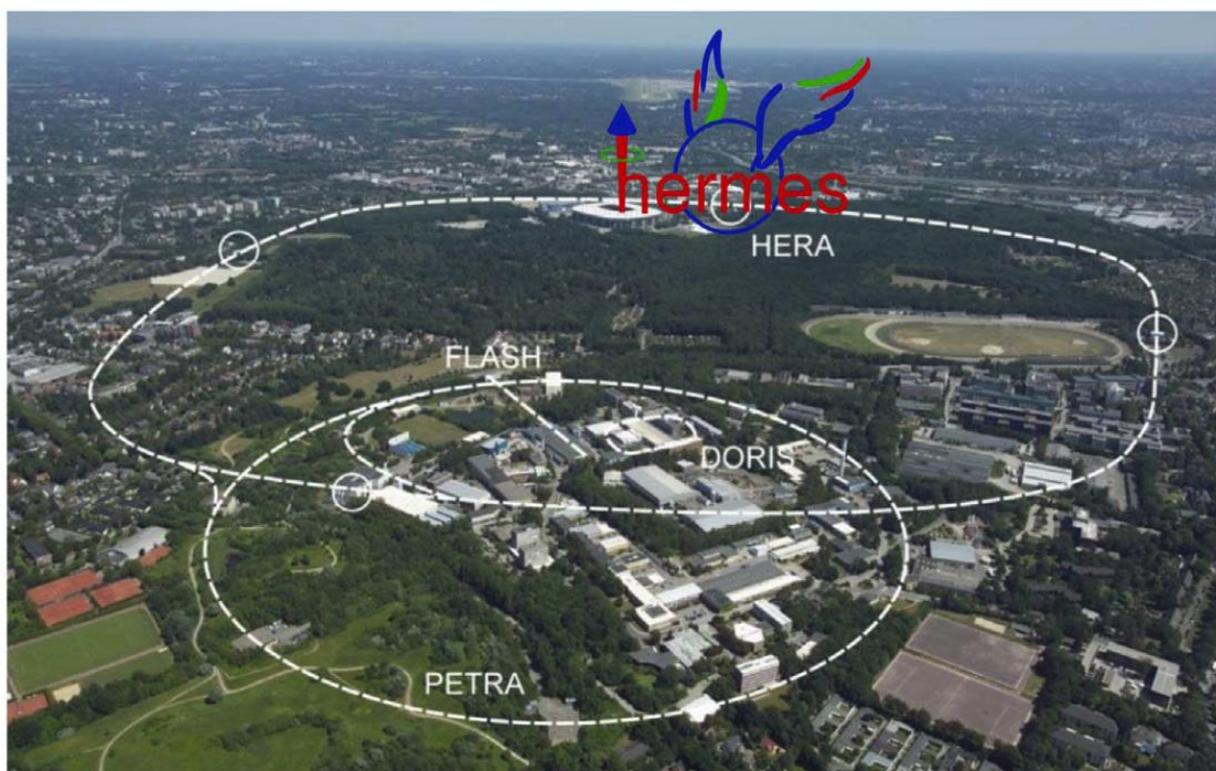
С.Л. Белостоцкий

## Эксперимент HERMES на электронном пучке коллайдера HERA

*Так называемый «Спиновый кризис» возник около 30-ти лет назад, когда Европейская мюонная коллаборация EMC сообщила о результатах своего эксперимента по глубоконеупругому рассеянию поляризованных мю-мезонов на поляризованных протонах при энергиях мюонного пучка несколько сотен ГэВ. Из эксперимента следовало, что суммарный спин составляющих протон кварков близок к нулю. Этот факт казался тем более удивительным, что магнитные моменты протона и нейтрона, а также измеренные в Лаборатории Ферми (FNAL) магнитные моменты гиперонов хорошо описывались в модели т.н. конституентных кварков, в которой автоматически предполагалось, что спин любого члена барионного октета (протона, нейтрона, лямбда-, сигма- и кси- гиперонов) представлял собой результат сложения спинов трех кварков, находящихся в S состоянии.*

*Как очевидно сейчас, эксперимент EMC был лишь первым шагом в направлении более глубокого понимания структуры нуклона. Последовал «вал» теоретических работ. Появилось новое, более современное правило сумм – если странные кварки/антикварки в нуклоне не поляризованы, то суммарный вклад кварков составляет  $\Delta\Sigma_q = 0.59$  (Robert L. Jaffe, 1994 г.), т.е. может быть меньше единицы. Это был важный результат – но, конечно, не решение проблемы. Требовались более тщательные детальные исследования поляризационных характеристик при высоких энергиях, в том числе продолжение измерений зависящих от спина структурных функций кварков и глюонов в глубоконеупругом рассеянии на протоне и нейтроне, получение информации об орбитальном движении кварков, «поперечности» и пр. Основной вклад в эту программу по линии эксперимента внесли коллаборации HERMES (DESY) и COMPASS (CERN), а также эксперименты SLAC и измерения в США на пучках поляризованных протонов коллайдера RHIC.*

Эксперимент HERMES был предложен профессором Клаусом Ридом (Klaus Rith) в 1991 году. Целью эксперимента HERMES было изучение спиновой структуры протонов и нейтронов в глубоконеупругом рассеянии (ГНР) позитронов. Предложенный эксперимент **являлся уникальным по возможностям доступа к спиновым характеристикам при высоких энергиях.** Набор данных был начат в 1994 году и закончился в июле 2007 года в связи с остановкой ускорителя. Был получен обширный экспериментальный материал, обработка и анализ которого продолжаются по сей день.



Коллайдер HERA (DESY, Hamburg). Эмблема HERMES указывает расположение измерительной станции HERMES на кольце коллайдера. DORIS и PETRA – пред-ускорители. В коллайдере HERA позитроны (электроны) ускорялись до 27,6 ГэВ, протоны - до 930 ГэВ

### *Экспериментальная установка*

Предполагалось, что исследования будут проводиться на коллайдере HERA с помощью пучка продольно-поляризованных позитронов (электронов) с энергией 27,6 ГэВ. В эксперименте была практически реализована идея самополяризации пучка релятивистских заряженных частиц в магнитном поле. Поперечная поляризация появлялась за счет испускания фотонов синхротронного излучения – эффект, предсказанный А.А. Соколовым и И.М. Терновым в 1963 г. Получение необходимой для исследований продольной поляризации в циркулирующем пучке позитронов (электронов) – сложная техническая задача поворота спина – осуществлялось с помощью специально разработанных в DESY спин-ротаторов.

Возможность достижения на практике достаточно высокой поляризации пучка не представлялась заранее очевидной. Получение поляризации пучка как минимум 30% было главным условием Программного комитета DESY. После тщательной оптимизации работы ускорительного кольца была достигнута поляризация пучка 51% при времени нарастания и установления поляризации 20–25 минут, и эксперимент HERMES был принят к постановке. В эксперименте использовались позитронные (в основном) и электронные пучки. Поляризация контролировалась с точностью около 1% с помощью поляриметров путем рассеяния небольшой части позитронов пучка на лазерных фотонах.

Набор данных проводился на внутренней газовой поляризованной или неполяризованной мишенях с накопительной ячейкой. Исследовалось рассеяние на ядрах H, D,  $^3\text{He}$ , продольно или поперечно поляризованных, а также на более тяжелых неполяризованных ядрах  $^4\text{He}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{84}\text{Kr}$ ,  $^{129,132}\text{Xe}$ . Плотность ядер в накопительной ячейке лимитировалась условием времени жизни пучка (5–8 часов) и задавалась на основе программы работы коллайдера.

Светимость измерялась двухплечевым калориметром Баба-Меллер. Вторичные частицы регистрировались с помощью широкоапертурного трекового детектора со спектрометрическим магнитом. Идентификация частиц осуществлялась с помощью электромагнитного калориметра, детектора переходного излучения и многоканального черенковского детектора.

Коллаборация HERMES состояла из ~250 физиков из Германии, США, Франции, Италии, России и других стран. Из России помимо ПИЯФ в коллаборацию входили группы ОИЯИ (Дубна), Физический Институт им. Лебедева (Москва), Институт Физики Высоких Энергий (Протвино).

### *Материальный и интеллектуальный вклад ПИЯФ*

Группа ПИЯФ под руководством автора этой статьи включилась в эксперимент HERMES на ранних стадиях в 1992 году, когда предложение о проведении этого эксперимента было еще в процессе рассмотрения. Группа состояла из 15 физиков (в основном из Лаборатории малонуклонных систем), экспертов по трековым приборам, специалистов по быстрой электронике, специалистов по системам охлаждения.



Часть группы физиков ПИЯФ перед установкой пропорциональных камер в зазор магнита спектрометра HERMES.

Слева направо: С. Патричев, А. Изотов, Г. Гаврилов, А. Киселев, О. Миклухо



Установка пропорциональных камер в зазор магнита

Группа ПИЯФ внесла существенный вклад в эксперимент, который состоял в следующем.

- Разработка и изготовление спектрометрического (основного) магнита эксперимента HERMES производились в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова. Координаторами были С. Белостоцкий, К. Зинрам (DESY) и А. Петров (Институт Ефремова). Финансирование осуществлялось из гранта INTAS, полученного на эту работу INFN (Италия) совместно с ПИЯФ.

- Детектирование треков в зазоре магнита осуществлялось с помощью изготовленных в ПИЯФ пропорциональных камер на 12 тысяч каналов с быстрым съемом информации и системой охлаждения. Как всегда, работа научно-технических экспертов ОФВЭ А. Крившича, Г. Гаврилова, В. Андреева, В. Головцова, Л. Уварова, А. Васильева и многих других оказалась на высоте. Изготовленная в ПИЯФ аппаратура работала безупречно.
- Программа реконструкции треков в спектрометре HERMES была существенно модернизирована А. Киселевым.
- Поддержание DAQ и систем медленного контроля проводилось (частично) с помощью В. Батурина и А. Истова.
- Контроль работы трековых детекторов спектрометра выполнял Г. Гаврилов.

### **Основные результаты эксперимента HERMES**

В формате данной статьи мы можем лишь перечислить основные направления программы исследований эксперимента HERMES и очень кратко обсудить полученные результаты. Они приведены ниже.

1. **Вклад кварков и глюонов в спин нуклона.**  
*Было получено  $\Delta\Sigma_q = 0,330 \pm 0,025$  (см. следующую секцию).*
2. **Функции фрагментации Коллинза и Сиверса, связанные с поперечным движением кварков.**  
*Тщательно исследовались спиновые эффекты поперечного движения кварков в нуклоне в покое и в фазе фрагментации вторичных адронов. Впервые измерены асимметрии Сиверса (внутреннее движение) и Коллинза (фрагментация).*
3. **Обобщенные партонные распределения и орбитальное движение.**  
*Информация об орбитальных моментах партонов может быть получена из данных по глубоко-виртуальному комптоновскому рассеянию (DVCs). В результате интерференции DVCs и Bethe-Heitler амплитуд возникает асимметрия, которая коррелирует с орбитальным моментом кварка. Выполнены первые измерения этой асимметрии.*
4. **Поляризационные параметры в рождении векторных мезонов.**  
*Проведено полное восстановление спин-зависящей матрицы перехода виртуального фотона в  $\rho$  и  $\omega$  мезоны. Предложен и реализован метод прямого восстановления амплитуд перехода.*
5. **Поляризация в рождении лямбда-гиперонов и параметры передачи спина.**  
*Впервые измерена «спонтанная» поляризация лямбда-гиперона в реакции фоторождения, т.е. на почти реальных фотонах со средней энергией около 15 ГэВ. В отличие от большинства реакций на протонных (адронных) пучках, поляризация оказалась положительной, достигая максимума  $P_A = 0,15$  в области фрагментации мишени при поперечном импульсе  $p_{\text{перп}} = 1$  ГэВ/с. Поляризация антилямбда-гиперона везде совместима с нулем, так же как в  $pp$  соударениях. Изучена  $A$ -зависимость. Средняя по  $p_{\text{перп}}$  поляризация лямбда остается на уровне  $0,0 - 0,07$  в интервале ядер-мишеней от  $H$  до  $Ne$  и обращается в ноль на тяжелых ядрах  $Kr$  и  $Xe$ . Был предпринят ряд попыток объяснения спонтанной поляризации гиперонов в кварковой модели. Однако этот богатейший экспериментальный материал до сих пор ждет адекватного теоретического объяснения.*
6. **Была тщательно исследована передача спина лямбда-гиперону от поляризованного позитронного пучка в ГНР.**  
*Вектор передачи спина лежит в плоскости рождения гиперона, образованной импульсом гиперона и линией пучка. Оба компонента вектора передачи импульса лямбда- (и антилямбда-) гиперону оказались равными нулю.*

Главный (по мнению автора) результат эксперимента – ответ на вопрос о «спиновом кризисе» – мы обсудим более подробно в следующей секции.

Следует отметить высокий творческий вклад сотрудников ПИЯФ в обработку и анализ экспериментальных данных. Модернизированная А. Киселевым программа реконструкции треков легла в основу всех анализов. С ее помощью «сырые» данные превращались в пособытийный набор со всеми необходимыми для физического анализа параметрами. Существенный вклад в физический анализ и интерпретацию результатов по темам, перечисленным выше, внесли

С. Белостоцкий, О. Гребенюк, Д. Веретенников, А. Жгун, П. Кравченко, С. Манаенков, Ю. Нарышкин.

### **Вклад кварков в спин нуклона**

Эта работа имела высший приоритет, т.к. была связана с проблемой «спинового кризиса». Данные ЕМС требовали уточнения и детализации. В частности, было важно вновь измерить сумму спинов кварков  $\Delta\Sigma_q$ , понять поляризованы ли странные кварки ( $\Delta s + \Delta\bar{s} = ?$ ), как распределяется спин между валентными  $u$  и  $d$  кварками и пр. Информация о поляризации кварков извлекалась независимо из двух типов ГНР при  $Q^2 > 1 \text{ GeV}^2$ : из инклюзивного рассеяния, в котором детектировался только рассеянный позитрон, и полуинклюзивного рассеяния, где один из адронов регистрировался на совпадение с рассеянным позитроном.

Оба подхода дали близкие результаты. Так, интегральные вклады кварков ( $\Delta\Sigma_q$ ) оказались очень близки. Что касается разложения по ароматам, то ввиду сильной модельной зависимости второго метода, мы приводим здесь результаты, полученные из инклюзивного ГНР:  $\Delta\Sigma_q = 0,330 \pm 0,025$  ( $0,359 \pm 0,026$  из полуинклюзивного ГНР),  $\Delta u + \Delta\bar{u} = 0,842 \pm 0,008$ ,  $\Delta d + \Delta\bar{d} = -0,427 \pm 0,008$ ,  $\Delta s + \Delta\bar{s} = -0,085 \pm 0,008 \pm 0,013_{theo}$ .

Ошибка теоретического анализа наиболее важна для странных кварков, хотя результат остается статистически значимым. Как показал анализ, небольшая отрицательная поляризация «странного моря» сильно влияет на  $\Delta\Sigma_q$ , приводя к нарушению правила сумм R. Jaffe. Данные эксперимента HERMES оказались в хорошем согласии с результатами, полученными на мюонном пучке в эксперименте COMPASS, который продолжил начатое ЕМС изучение спиновой структуры нуклона.

### **Спиновый кризис – итоги**

*«The European Muon Collaboration, and later experiments, confirmed that the sum of the Z-components of the partonic quarks was very different, much smaller than 1/2. But we do not understand the connection between partonic and constituent quarks – a non-perturbative dynamical question – so that there is no basis for regarding this difference as a crisis.» – Eliot Leader, 2016 г.*

Как следует из даты высказывания Элиота Лидера, одного из ведущих теоретиков в области КХД и спиновой физики, проблема спина протона остается не решенной по сей день. По сути, она сводится к вопросу, что есть спин в партонной модели, и какова связь этой модели с моделью конститuentных кварков, дающей в ряде случаев прекрасное описание барионных состояний (например, магнитных моментов барионного спин-1/2 октета).

### **Заключение**

Возвращаясь к эксперименту, можно утверждать, что суммарный спин кварков-партонов измерен в эксперименте HERMES достаточно надежно. Он составляет  $\Delta\Sigma_q = 0,330 \pm 0,025$ . Получены вклады  $u$  и  $d$  кварков и отдельно валентных и морских кварков. При этом естественным образом дано объяснение нарушения правила сумм R. Jaffe.

HERMES предпринял попытку измерить поляризацию глюонов. Было получено интегральное значение  $\Delta g/g = 0,049 \pm 0,034$ . Этот результат носит характер оценки.

HERMES впервые измерил асимметрии, связанные с поперечным движением кварков в протоне и в процессах адронизации. Было показано, что поперечное движение партонов играет важную роль для понимания структуры барионов.

HERMES провел первые измерения асимметрии в DVCs.

HERMES впервые измерил поляризацию лямбда- и антилямбда- гиперонов в фоторождении.

Эксперимент HERMES внес существенный вклад в современное понимание структуры нуклона. Он еще раз продемонстрировал, что в физике элементарных частиц спин играет исключительно важную роль.