

Исследования в области фундаментальных взаимодействий



Юрий Курочкин,
заведующий Центром
«Фундаментальные
взаимодействия и астрофизика»
Института физики им.
Б.И. Степанова НАН Беларуси,
доктор физико-математических
наук, профессор

Отправной точкой исследований в области фундаментальных взаимодействий в Беларуси стали выполненные Ф.И. Федоровым в аспирантуре Ленинградского университета работы под руководством академика В.А. Фока, одного из создателей квантовой теории поля. С помощью метода функционалов Фока ученый рассчитал естественные ширины спектральных линий и сечение рассеяния гамма-квантов на электроны (комpton-эффект), что легло в основу его кандидатской диссертации. В дальнейшем сформировался круг интересов Ф.И. Федорова, включающий принципы симметрии, релятивистские волновые уравнения, физику частиц и их взаимодействий, а так же теорию гравитации. Данные направления легли в основу работ его учеников и определили формирование научной школы в области фундаментальных взаимодействий.

На первом этапе исследования в Институте физики носили теоретический характер. Идейную основу белорусской школы теоретической физики Ф.И. Федорова составляет разработанный для описания процесса взаимодействия частиц ковариантный подход, изложенный ученым в следующих его работах, имеющих основополагающее значение: «Проективные операторы в теории элементарных частиц» (1958) – о методе проективных операторов в теории релятивистских волновых уравнений; «О композиции параметров группы Лоренца» (1962) – трехмерная комплексно-векторная параметризация группы Лоренца; «Уравнение первого порядка для гравитационного поля» (1968) – универсальные нелинейные уравнения для взаимодействующих полей.

Первые кандидатские диссертации в области фундаментальных взаимодействий, защищенные учениками Ф.И. Федорова, были посвящены развитию его методов и актуальным в то время проблемам физики частиц: «Матрица рассеяния в квантовой электродинамике с взаимодействием Паули» Л.Г. Мороза (1961), «Применение ковариантных методов в теории элементарных частиц» А.А. Богуша (1962), «Электромагнитные и слабые взаимодействия частиц со спином $3/2$ » В.К. Гронского (1965), «К теории частицы с переменным спином $1/2-3/2$ и двумя массами покоя» С.И. Лобко (1965), «К теории электромагнитных и слабых взаимодействий векторных мезонов» А.И. Болсуна (1965), «Электромагнитные волны в проводящих магнитных анизотропных кристаллах» Л.М. Томильчика (1959), «К теории электромагнитного и слабого взаимодействия на

малых расстояниях» И.С. Сацункевича (1970).

В рамках упомянутого подхода, основанного на использовании представлений группы Лоренца, Ф.И. Федоровым впервые установлен предельно простой закон композиции (групповая операция) для введенных им трехмерных комплексных вектор-параметров, что позволило решать ряд проблем с помощью операций над ними без обращения к явным выражениям для матриц конечных преобразований. Основные идеи ковариантного (независимого от выбора инерциальной системы отсчета) подхода Федорова в физике элементарных частиц получили свое развитие в его монографии «Группа Лоренца».

Возникали новые направления в области теоретико-групповых и алгебраических исследований, например квантовая механика в пространствах постоянной кривизны (Ю.А. Курочкин, В.С. Отчик, В.М. Редьков, В.В. Грицев, Е.М. Бычкова (Овисюк)). Существенный вклад в квантовую механику в пространствах постоянной кривизны внес ученик Л.М. Томильчика В.В. Кудряшов. Методы, разработанные Ф.И. Федоровым, оказались высокоэффективными. С их помощью получены отличные научные результаты, высоко оцененные специалистами всего мира.

Важным моментом стало осознание необходимости участия белорусских ученых в крупных международных проектах. С 1994 г. до июля 2024 г. Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси – участник коллаборации ATLAS на LHC. Сотрудники института – А.А. Богуш, С.Н. Гаркуша, Ю.А. Кульчицкий, Ю.А. Курочкин, И.С. Сацункевич, П.В. Терешко – стали соавторами

публикации об экспериментальном открытии бозона Хиггса, пожалуй, самого крупного научного достижения в области фундаментальной физики последних десятилетий.

Как член международной коллаборации COMET наш Институт участвует в эксперименте, направленном на обнаружение процесса, протекающего с несохранением квантового числа аромата заряженных лептонов (поиск когерентной безнейтринной конверсии мюона в электрон). Проект, реализуемый в Японском ядерном центре J-PARC, нацелен на поиск явлений за рамками Стандартной модели физики частиц и их взаимодействий, которая с открытием бозона Хиггса триумфально завершила свое формирование.

Результаты белорусских ученых по расчетам характеристик структуры частиц включены в международные справочники. Детально исследовано фоторождение π -мезонов на дейтроне с учетом взаимодействия в конечном канале. Физики Центра «Фундаментальные взаимодействия и астрофизика» принимают активное участие в теоретических и экспериментальных исследованиях Института ядерной физики им. Г.И. Будкера (Новосибирск). В частности, доктор физико-математических наук М.И. Левчук в сотрудничестве с российскими коллегами из Физического института им. П.Н. Лебедева РАН и Института им. Г.И. Будкера получил новые важные результаты для численных значений поляризуемостей нуклонов, приведенные в мировой базе данных по свойствам элементарных частиц [2].

В дальнейшем направления в физике частиц и фундаментальных взаимодействий развивал ученик Ф.И. Федорова – член-корреспондент А.А. Богуш,

изложивший свои результаты и взгляды в трех своих фундаментальных монографиях и популярных книгах, защитивший по данной тематике докторскую диссертацию. Его деятельность была отмечена Государственной премией БССР (1988 г., совместно с Л.Г. Морозом). Исследования по учету свойств и характеристик частиц, обладающих структурой, продолжили Н.В. Максименко, М.И. Левчук, а также В.М. Редьков с учениками.

И.С. Сацункевич высказал и обосновал ряд блестящих идей: предсказал существование тяжелого лептона и установил эффект усиления электрослабого взаимодействия за счет интерференции электромагнитного и слабого взаимодействий. Последнее получило развитие в работах А.А. Панкова и его учеников в ГГТУ им. П. Сухого.

Связь подхода Федорова к параметризации группы Лоренца и ее представлений с классическим исчислением кватернионов и новый метод в релятивистской кинематике столкновений частиц и релятивистской динамике изложены в книге А.В. Березина, Ю.А. Курочкина, Е.А. Толкачева «Кватернионы в релятивистской физике». Один из важнейших результатов работы над монографией – построение теории векторов в трехмерном пространстве Лобачевского с законом сложения, совпадающим с федоровским законом композиции вектор-параметров группы Лоренца. Частным случаем этих векторов явилось определение трехмерной ковариантной релятивистской скорости (Ю.А. Курочкин).

В Институте физики впервые наблюдалось и детально изучено новое физическое явление временных осцилляций углового

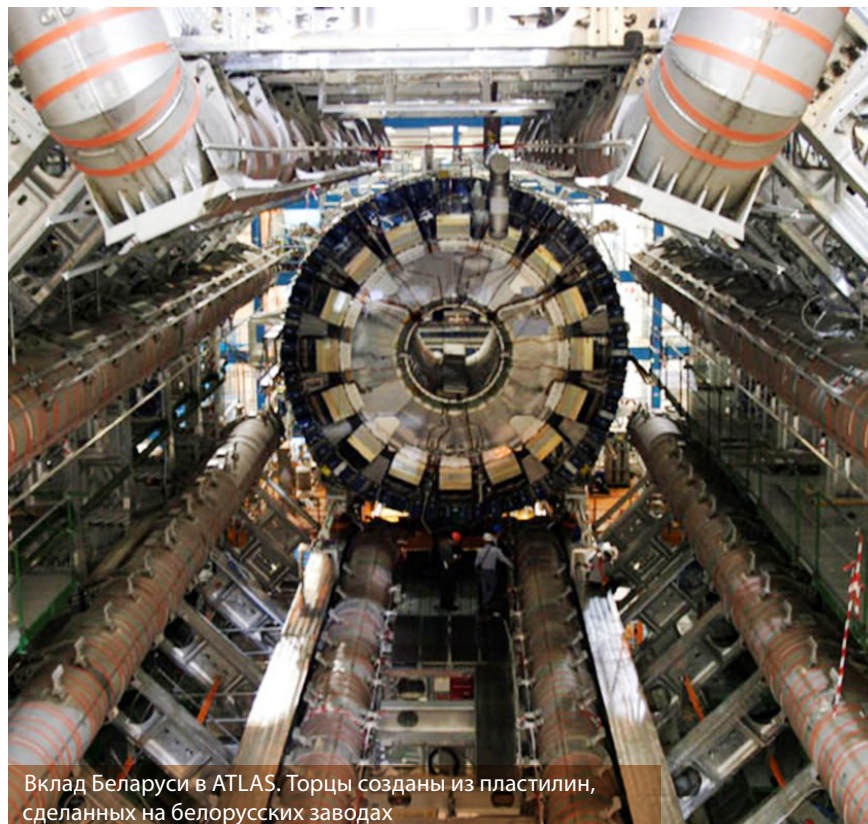
распределения γ -квантов при распаде орто-позитрония (o -Ps) в слабом магнитном поле. С помощью многокристального спектрометра измерено угловое и энергетическое распределение асимметричного 3γ -распада Ps с целью тестирования СРТ-инвариантности; в эксперименте не обнаружено ее нарушения.

Данные результаты вошли в цикл работ «Квантовая электродинамика и когерентные ядерные процессы в среде: квантовая и ядерная оптика», удостоенный Государственной премии Республики Беларусь (А.В. Берестов, С.Я. Килин, Э.А. Рудак, В.Г. Барышевский, В.В. Тихомиров, И.Д. Франчук).

Инициированные членом-корреспондентом Л.М. Томильчиком работы положили начало нового в нашей стране научного направления по весьма акту-

альной и разнообразной тематике, объединяемой термином «магнитный монополь». Результаты первого этапа исследований по данной теме обобщены в фундаментальной монографии «Электродинамика с магнитным зарядом» Л.М. Томильчиком совместно с В.И. Стражевым. Запуск Большого адронного коллайдера открыл перспективу экспериментального поиска монополя. Белорусские физики (Д.В. Шелковый и др.) внесли свои предложения по практической реализации данного проекта.

Несомненное личное научное достижение Л.М. Томильчика – использование в 1971 г. для классификации адронных резонансов специфической алгебры, содержащей одновременно как коммутаторы, так и антикоммутаторы своих образующих. Эта



Вклад Беларуси в ATLAS. Торцы созданы из пластилин, сделанных на белорусских заводах

работа явилась первым примером построения суперсимметричной алгебры. В дальнейшем результат был обобщен на случаи произвольной размерности, а также на пространства алгебр кватернионов и октав А.А. Богушем и Ю.А. Курочкиным.

Перенос методов неевклидовой геометрии в квантовую механику в развитие классических работ Э. Шредингера, Л. Инфельда, А. Шелда, А.Ф. Стивенсона позволил установить природу вырождения в спектрах энергий в квантово-механической задаче Кеплера, в трехмерных пространствах постоянной кривизны Лобачевского и Римана, а также новые алгебраические структуры – деформированные алгебры, связанные с симметрией этих пространств (а не алгебры Ли, обычно возникающие в аналогичной задаче в плоском пространстве) (А.А. Богуш, Ю.А. Курочкин, В.С. Отчик).

По предложению С.В. Гапоненко развитые методы были использованы для построения модели, описывающей спектры энергий квазичастиц, запертых в наноразмерных объектах – квантовых точках, основанной на неевклидовой геометрии.

Теорией гравитации, кроме самого Ф.И. Федорова, в институте плодотворно занималась доктор физико-математических наук О.С. Иваницкая. Важной составляющей исследований, проведенных ею совместно с Н.Н. Костюковичем, является систематизация гравитационных эффектов, предсказываемых общей теорией относительности. Ученик О.С. Иваницкой – ведущий научный сотрудник института Ю.П. Выблый – развил теорию гравитации на основе обобщения уравнений Эйнштейна за счет включения в них скалярного поля.

Работами В.И. Кувшинова и его учеников внесен значительный вклад в развитие третьей составляющей подхода Ф.И. Федорова – формулировку в описание физических теорий на основе универсальных уравнений первого порядка, а также в исследование процессов множественного рождения частиц и применение решений уравнений неабелевых калибровочных полей.

Кроме упомянутых выше, выходцами научной школы Ф.И. Федорова являются многие другие известные специалисты в области физики частиц и теории гравитации: Е.В. Докторов, А.В. Кузьмин, Л.Ф. Бабищев, М.В. Галынский, Е.С. Кокаулина, Ю. Сакович, Р.Г. Шуляковский, А.Ф. Радюк, Н.И. Гурин, А.М. Федоровых, Т.С. Романова, В.С. Румянцев, В.В. Гилевский, С.М. Сикач, М.Н. Сергеевко и др.

Открытие бозона Хиггса обеспечило завершение построения Стандартной модели частиц и их взаимодействий. Однако остаются нерешенные проблемы как в рамках самой модели, так и вне ее:

- *описания в рамках Стандартной модели сложных неточечных частиц, получение эффективных потенциалов, ответственных за образование и существование частиц, состоящих из партонов – кварков и глюонов. Фундаментальная проблема невылета (конфайнмента) кварков и существования кварк-глюонной плазмы;*
- *включение гравитации в общую схему объединения фундаментальных взаимодействий;*
- *природа нарушения таких дискретных симметрий в физике;*
- *существование дополнительных измерений сверх четы-*

рех измерений физического пространства-времени;

- *развитие и применение современных методов, средств и технологий модернизации детекторов, повышения эффективности их работы, обработки и анализа данных в экспериментах на детекторах, в том числе в проектах SPD и MPD коллайдера NICA Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) в г. Дубна (РФ).*

Перечисленные проблемы разрабатываются сотрудниками Института физики, в том числе в рамках крупных международных проектов. Важную роль в расширении участия в них белорусских ученых сыграла совместная работа с учеными ОИЯИ. Весомый вклад в развитие данного сотрудничества внес доктор физико-математических наук Ю.А. Кульчицкий, ведущий научный сотрудник института, руководитель группы института в эксперименте ATLAS на Большом адронном коллайдере с 1994 г., начальник научного сектора «Детектирующие системы, обработка и анализ экспериментальной информации» научно-экспериментального отдела множественных адронных процессов Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Observation of the new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector of the LHC. ATLAS Collaboration // *Physics Letters B*. 2012. №716 P. 1–29.
2. The 2022 edition of the Review of Particle Physics should be cited as: R.L. Workman et al. (Particle Data Group) // *Progress of Theoretical and Experimental Physics*. 2022, 083C01 (2022) and 2023 update.