



А. А. Богуш

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
Институт физики им. Б.И. Степанова

А. А. Богуш

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ



Минск
«Беларуская навука»
2011

УДК 53(476)(092) + 929 Богуш
ББК 22.3г (4 Бей)
Б74

Редакционная коллегия:

Ю. А. Курочкин (гл. редактор), В. М. Редьков (отв. редактор), В. С. Отчик, В. В. Кисель,
М. И. Левчук, И. С. Сацункевич

Богуш, А. А.

Б74 Избранные труды / А. А. Богуш; редкол.: Ю. А. Курочкин (гл. редактор) [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 578 с.

ISBN 978-985-08-1347-3.

Книга посвящена научной и педагогической деятельности видного белорусского физика, члена-корреспондента НАН Беларуси А. А. Богуша. Представлены научные статьи, характеризующие его вклад в развитие теории элементарных частиц и их взаимодействий. В книгу включены воспоминания жены ученого Евгении Александровны Богуш, коллег, библиография его трудов.

Рассчитана на специалистов в области физики и всех, кто интересуется историей и развитием отечественной науки.

УДК 53(476)(092) + 929 Богуш
ББК 22.3г (4 Бей)

ISBN 978-985-08-1347-3

© Оформление. РУП «Издательский дом
«Беларуская навука», 2011

СОДЕРЖАНИЕ

Основные даты жизни и деятельности А.А. Богуша	7
Богуш Евгения Александровна. Воспоминания	10
Важнейшие направления и результаты научной и педагогической деятельности А.А. Богуша. (Ю.А. Курочкин, И.С. Сацункевич)	13
А.А. Богуш и физика высоких энергий в Гомельском регионе (Н.В. Максименко, В.В. Андреев)	30

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

Богуш А.А., Мароз Л.Г. Да каварыянтнай тэорыі электрамагнітнага поля	32
Богуш А.А., Федоров Ф.И. Инвариантное выражение для матрицы Лоренца, преобразующей один вектор в другой	39
Богуш А.А., Федоров Ф.И. Общее преобразование представления группы Лоренца в биспинорном пространстве	43
Федоров Ф.И., Богуш А.А. О преобразовании четырехмерных векторов	47
Богуш А.А. О преобразовании волновых функций для спина $1/2, 0, 1$	51
Богуш А.А., Сацункевич И.С. Рассеяние электрона на протоне с учетом дипольных моментов	55
Богуш А.А., Сацункевич И.С. К вопросу об определении формфакторов электрона	59
Богуш А.А. Волновые функции и расчет матричных элементов для продольно поляризованных векторных частиц	62
Богуш А.А., Болсун А.И., Мороз Л.Г. Общий расчет матричных элементов для векторных частиц с различными массами	66
Богуш А.А., Федоров Ф.И. Обобщенные символы Кронекера	69
Богуш А.А. Об инфинитезимальных операторах унитарных преобразований	73
Богуш А.А., Мороз Л.Г., Федоров Ф.И. Тензор-параметр и плоские преобразования Лоренца	77
Богуш А.А., Федоров Ф.И. О плоских ортогональных преобразованиях	83
Богуш А.А. О матрицах конечных унитарных преобразований	87
Богуш А.А. О подгруппах группы $SU(n)$, изоморфных группе $SU(2)$, и плоских унитарных преобразованиях	94
Богуш А.А., Чан Куок Чан. ЭДМ лептонов и поляризационный опыт	99
Богуш А.А., Курочкин Ю.А., академик АН БССР Федоров Ф.И. Об амплитудах бинарных реакций для частиц со спином	102

Богуш А.А., Курочкин Ю.А., Лапковский А.К., Федоров Ф.И. Векторная параметризация комплексной группы Лоренца и кватернионы.	106
Bogush A.A., Fedorov F.I. Finite Lorentz transformations in quantum field theory.	113
Богуш А.А., Жирков Л.Ф. Калибровочные поля в формализме Даффина – Кеммера	128
Богуш А.А., Круглов С.И., Стражев В.И. О группе внутренней симметрии 16-компонентной теории векторной частицы.	137
Богуш А.А., Кисель В.В. Уравнения с кратными представлениями группы Лоренца и взаимодействие типа Паули.	140
Богуш А.А., Курочкин Ю.А., Отчик В.С. О квантовомеханической задаче Кеплера в трехмерном пространстве Лобачевского	144
Богуш А.А. Конечные локальные преобразования и матричная формулировка теории калибровочных полей	148
Богуш А.А., Остапенко А.В., Толкачев Е.А. Синглет-триплетное расщепление состояний ($c\bar{c}$)- и ($b\bar{b}$)- конфигураций в релятивистской кварковой модели	153
Богуш А.А., Отчик В.С., Редьков В.М. Разделение переменных в уравнении Шредингера и нормированные функции состояний для задачи Кеплера в трехмерных пространствах постоянной кривизны	157
Богуш А.А., Кисель В.В. Уравнения для частицы со спином $3/2$, обладающей аномальным магнитным моментом	163
Богуш А.А., Кисель В.В., академик АН БССР Федоров Ф.И. Об интерпретации дополнительных компонент волновых функций при электромагнитном взаимодействии	168
Богуш А.А., Отчик В.С., Редьков В.М. Векторная частица в пространстве де Ситтера.	172
Bogush A.A., Ostapenko A.V. Relativistic fermion-antifermion equation and mass spectrum of mesons	177
Bogush A.A., Otchik V.S. Representations of $SO(4, 1)$ and the Hawking effect in de Sitter space	190
Богуш А.А., Кисель В.В. Об описании аномального магнитного момента массивной частицы со спином 2 в теории релятивистских волновых уравнений	197
Богуш А.А., Курочкин Ю.А. Вектор-параметры Федорова и аксиоматическое описание геометрии пространств постоянной кривизны S_3 и 1S_3	203
Богуш А.А., Отчик В.С. О движении заряженной частицы в поле двух удаленных кулоновских центров.	210
Bogush A.A., Otchik V.S. Problem of two Coulomb centres at large intercentre separation: asymptotic expansions from analytical solutions of Heun equation	215
Bogush A.A., Kurochkin Yu.A., Otchik V.S. Algebra of conserved operators for the Kepler–Coulomb problem in spaces of constant curvature.	229
Bogush A.A., Gritsev V.V., Kurochkin Yu.A., Otchik V.S. An algebraic treatment of the MIC-Kepler problem on the sphere S^3	235
Bogush A.A., Gritsev V.V., Kurochkin Yu.A. String inspired model and superluminal Lorentz transformations.	242

Богуш А.А., Кисель В.В., Токаревская Н.Г., Редьков В.М. О теории скалярной частицы в пространствах с расширенным набором представлений группы Лоренца	247
Bogush A.A., Tokarevskaya N.G., Kisel V.V., Red'kov V.M. Yang–Mills equations based on extended 15-component description of spin 1 massless field	254
Богуш А.А., Курочкин Ю.А. Двойные числа и состояния непрерывного спектра в задаче Кеплера	261
Богуш А.А., Кисель В.В., Токаревская Н.Г., Редьков В.М. Нерелятивистский предел в общековариантной теории векторной частицы	265
Богуш А.А., Кисель В.В., Токаревская Н.Г., Редьков В.М. Теория Петраша для частицы со спином $1/2$ в искривленном пространстве-времени	272
Bogush A.A., Kisel V.V., Tokarevskaya N.G., Red'kov V.M. On equations for the spin-2 particle in external gravitational field	278
Bogush A.A., Kurochkin Yu.A. Physics of particles and non-Euclidean geometry	286
Богуш А.А. О трехмерных квантовых вектор-параметрах и генераторах \hbar -деформированной группы $SL_{\hbar}(2, C)$	298
Богуш А.А., Кисель В.В., Токаревская Н.Г., Редьков В.М. Об уравнениях для частицы со спином 2 во внешних электромагнитных и гравитационных полях.	303
Bogush A.A., Kurochkin Yu.A., Otchik V.S. Coulomb scattering in the Lobachevsky space	311
Bogush A.A., Gazizov A.Z., Kurochkin Yu.A., Stosui V.T. Symmetry properties of quaternionic and biquaternionic analogs of Julia sets	316
Bogush A.A. Fedorov's covariant approach in particle physics and vector parametrization of the quantum groups	322
Богуш А.А., Курочкин Ю.А., Отчик В.С., Шёлковский Д.В. Квантовомеханическая задача рассеяния в пространстве Лобачевского	337
Богуш А.А., Курочкин Ю.А., Януш С.И., Жукович С.Я. Фракталы глазами физиков.	343
Bogush A.A., Kurochkin Yu.A., Otchik V.S., Shoukavy Dz.V. Some peculiarities of quantum-mechanical scattering in the Lobachevsky space	348
Богуш А.А., Редьков В.М. О четырехмерной векторной параметризации группы $GL(4, C)$ и некоторых ее подгрупп	357
Bogush A.A., Otchik V.S., Red'kov V.M. The Runge–Lenz vector for quantum Kepler problem in the space of positive curvature and complex parabolic coordinates	364
Bogush A.A., Kurochkin Yu.A., Otchik V.S., Vyckouskaya E.M. Analog of the plane electromagnetic waves in the Lobachevsky space	378
Bogush A.A., Kisel V.V., Tokarevskaya N.G., Red'kov V.M. Duffin–Kemmer–Petiau formalism reexamined: non-relativistic approximation for spin 0 and spin 1 particles in a Riemannian space-time	383
Богуш А.А., Длугунович В.А., Жукович С.Я., Курочкин Ю.А., Снопко В.Н. Бикватернионы и матрицы Мюллера	403
Богуш А.А., Токаревская Н.Г., Редьков В.М. О вектор-параметрах 4-мерных матриц обратных преобразований в теории группы $GL(4, C)$	409
Богуш А.А., Токаревская Н.Г., Редьков В.М. О требовании унитарности для 4-мерных матриц и 2-параметрических унитарных преобразованиях	416

Богуш А.А. О матрицах Мюллера в поляризационной оптике.	423
Bogush A.A., Red'kov V.M. On Unique Parametrization of the linear group $GL(4,C)$ and its subgroups by using the Dirac algebra basis	430
Bogush A.A., Red'kov V.M., Krylov G.G. Schrödinger particle in magnetic and electric fields in Lobachevsky and Riemann spaces	461
Red'kov V.M., Bogush A.A., Tokarevskaya N.G. On parametrization of the linear $GL(4,C)$ and unitary $SU(4)$ groups in terms of Dirac matrices	481
Богуш А.А., Редьков В.М., Крылов Г.Г. Квантовомеханическая частица в однородном магнитном поле на фоне пространства Лобачевского	535
Богуш А.А., Редьков В.М., Крылов Г.Г. Квантовомеханическая частица в однородном магнитном поле в сферическом пространстве S_3	542
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ТРУДОВ А.А. БОГУША	549

Евгения Александровна Богуш

ВОСПОМИНАНИЯ

Прежде всего, хочется поблагодарить всех, кто принимал участие в издании книги, в которую вошли некоторые труды Андрея Александровича. Это прекрасный подарок нашей семье, означающий, что его ценят и помнят.

Надеюсь, книга станет не только учебником и пособием для изучающих физику элементарных частиц, но послужит образцом написания научных работ и ответственного отношения к тому, чем занимается человек.

Биография Андрея Александровича – это учебник истории. Он родился через год после смерти Ленина, испытал на себе правления всех генсеков, начиная со Сталина и включая Горбачева. И во все времена оставался беззаветно преданным родной Беларуси, науке, семье.

По крупицам собирал сведения о физиках - белорусах: Н. Кемере, А. Садовском, Г. Минковском, Э. Врублевском. Гордился тем, что Л.А. Арцимович, Я.Б. Зельдович, Л.И. Мандельштам, Ж.И. Алферов, Ф.И. Федоров, Н.А.Борисевич – выходцы земли белорусской.

Судьба подарила мне встречу с человеком, ставшим главным в моей жизни.

В трудном послевоенном 1947 году мы стали однокурсниками физико-математического факультета БГУ (отделение физики). Хлеб по карточкам, общежитие, субботники по уборке развалин (весь Минск лежал в руинах), лекции, после небольшого перерыва самостоятельная подготовка в освободившихся после лекций аудиториях.

Чаще других там можно было увидеть Андрея – скромно одетого, целеустремленного, с большой копной волос на голове и опухшими после голодных военных лет руками. Он всегда все знал. Ни один из студентов не дал столько консультаций своим однокурсникам, сколько Андрей. Самый трудный материал он умел объяснить доходчиво, понятно, а, главное, охотно. В зачетке у него были только “пятерки”.

Не следует думать, что в то трудное время все было мрачно. Мы были молоды, радовались окончанию войны, в стране налаживалась мирная жизнь. Мы учились, участвовали в общественной жизни и художественной самодеятельности (Андрей играл на мандолине, я пела), посещали кино и театры, танцевали на факультетских вечерах.

Дружеские отношения переросли в любовь на все оставшиеся годы. Андрей покорила меня умом, талантом, трудолюбием, честностью, добротой и глубокой интеллигентностью. В этом скромном студенте чувствовалась неординарная личность, всегда стремящаяся к знаниям и уважающая других людей.

На пятом курсе мы стали мужем и женой.

После окончания учебы в 1952 году были направлены в распоряжение Могилевского ОблОНО и стали работать в школе № 8 г. Могилева.

Аспирантуру Андрею не предложили. К тем, кто оставался на оккупированной территории (а ему еще пришлось испытать рабство, будучи угнанным немцами в Германию), относились настороженно. Только после смерти Сталина он смог поступить в аспирантуру Института физики Академии наук и навсегда связать свою судьбу с этим научным учреждением. Здесь он прошел путь от аспиранта до доктора наук, профессора, члена-корреспондента. Его научным руководителем был Ф.И. Федоров – выдающийся белорусский физик.

Призванием Андрея Александровича стало не только приобретение и создание новых научных знаний. Плодотворно занимаясь научно-исследовательской работой, он руководил лабораторией, более 50 лет своей жизни передавал свои знания другим – школьникам, студентам, учителям, аспирантам – всем, кто интересовался физикой. Широко известны его научно-популярные работы, рассчитанные на массового читателя.

Андрей Александрович вел большую общественную работу, выполнял различные научно-организационные нагрузки, способствовал установлению и укреплению международных научных связей. Обширна и плодотворна его редакционно-издательская работа.

Заслуги его многогранной деятельности высоко оценены в республике. Он награжден Почетной грамотой Верховного Совета БССР, удостоен Государственной премии БССР, избран членом-корреспондентом Академии наук Беларуси, награжден Почетным дипломом Объединенного института ядерных исследований. Ему присвоено почетное международное звание "Международный человек года за 1995/96".

До конца своих дней Андрей Александрович оставался трудолюбивым, дисциплинированным, ответственным, пунктуальным и добропорядочным. Все эти качества проявлялись в семье, отношениях с родственниками и коллегами.

Он всегда был готов облегчить мой труд, взять часть моих обязанностей на себя, проявлял заботу и ласку. От него исходило тепло и внимание, поэтому с ним приятно было поговорить на любую тему, обсудить возникшую проблему или событие, а иногда просто посидеть и помолчать. Рядом с таким человеком я чувствовала себя спокойно и уверенно.

Андрей Александрович очень любил своих детей и внуков, был всегда в курсе их дел и интересов, не читал нравоучений, а воспитывал своим собственным примером, поэтому они выросли достойными людьми.

Сын и дочь всегда хорошо учились, оба окончили аспирантуру и стали хорошими специалистами (дочь – биохимик, кандидат наук, сын – архитектор). Старший внук окончил аспирантуру ОИПИ НАН Беларуси (он – математик-программист), средний – студент БГУ, младший отлично учится в гимназии. Подрастает маленькая правнучка.

Отдавая всего себя работе, Андрей Александрович оставался внимательным к коллегам, не был лишен чувства юмора, умел провозгласить красивый тост, сказать проникновенные слова, разгадать кроссворд, охотно поработать на даче.

Он не умел бездельничать, предавать людей, быть грубым и злопамятным, строить свое благополучие за счет других.

Думаю, я счастливая женщина, потому что рядом со мной был человек, которым гордилась я и наши дети: трудолюбивый, надежный, добрый, верный и внимательный, честно выполняющий свою миссию как ученый, супруг, отец и дедушка.

В минуты особенной тоски и горя от утраты мне захотелось излить свои чувства на бумаге. Вот что получилось.

*Мы с тобой жили в разных странах,
Ты – на польской, на советской я земле.
Никогда не думали, не знали,
Что учиться будем на одной скамье.
Только что минула злая бойня,
Наступила мирная пора.
Мы с тобой студенты-первокурсники;
Жизнь прекрасна, мы – не детвора.
Хлеб по карточкам, аудитории,
Фишер, Федоров, Ламбин.
Дружба, сессии, субботники,
Украшенья – безделушки, не рубин.
Покорил меня ты чистотою,
Скромностью, талантом и умом,
Взором, полным обожанья,*

Преданностью и добром.
И уже не Гончарова я, а Богуш,
Мы теперь жена и муж.
Скромный ЗАГС, студенческая свадьба,
И оркестр не играет туш.
Могилев... Рождение дочурки,
Частные квартиры, смерть вождя.
Можно поступать в аспирантуру,
Жить, работать, не щадя себя.
Годы пролетели как мгновенье:
Книги, диссертации, труды...
Я благодарю тебя за вдохновенье
И за то, что рядом были мы.
57 лет прожили вместе,
Я готова повторить все вновь.
Ты моя не ноша и обуза,
Ты моя награда и любовь.
Спи спокойно – жизнь прожил достойно:
Честен был и людям помогал.
Вырастил детей и внуков,
И трудов немало написал.
Дорогие сын и дочь, любимые три внука,
Правнучка – прелестное дитя –
Все гордятся дедушкой и папой,
Вспоминают с благодарностью тебя.
За твою любовь и верность,
Преданность работе и семье
Имя твое честное, святое
Понесем достойно по земле.

ВАЖНЕЙШИЕ НАПРАВЛЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНОЙ И ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ А.А. БОГУША

Известный белорусский физик, член-корреспондент НАН Беларуси Андрей Александрович Богуш уже на университетской скамье начал приобщаться к серьезной научной деятельности. Он редактирует в годы учёбы в БГУ студенческий журнал, активно участвует в преподавательско-студенческом семинаре, руководимом преподавателями БГУ Ф.И. Фёдоровым и И.З. Фишером (курсовую и дипломную работы он выполнил под руководством последнего). Но наибольшее впечатление на молодого начинающего физика произвёл вышедший на пик своей плодотворной творческой работы старейшина белорусских физиков - академик Федор Иванович Федоров (1911–1994 гг.). Развитие физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий в Беларуси неразрывно связано с его именем.

Ковариантный подход Федорова оказался необычайно общим и плодотворным. Большинство результатов научно-исследовательских работ, выполненных в его рамках белорусскими физиками, было бы весьма затруднительным получить с помощью обычных, традиционных методов исследования. Этот подход стал и остается до сих пор той основой, на которой развернулись широкомасштабные исследования по физике частиц в нашей республике.

Андрей Александрович Богуш начал свою систематическую научную деятельность в 1957 г. после поступления в аспирантуру Института физики и математики Академии наук БССР, ИФМ АН БССР (теперь – Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, ИФ НАН Беларуси). Его научным руководителем стал выдающийся ученый, основатель лаборатории теоретической физики ИФМ АН БССР (1955-1987), первый заведующий одноименной кафедрой Белгосуниверситета (1938-1962), создатель белорусской научной школы физиков-теоретиков, академик Федор Иванович Федоров. Именно он задал основные направления и предопределил поле научно-исследовательской и педагогической деятельности А.А. Богуша на все последующие годы. Базой для этих исследований стал созданный Ф.И. Федоровым общий и эффективный ковариантный подход к решению проблем и задач теоретической физики.

Основное содержание ковариантного подхода Федорова в теории элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий составляют три основополагающие разработки Федора Ивановича: общий метод проективных операторов (1958), векторная параметризация группы Лоренца (1958–1962) и универсальные нелинейные уравнения для взаимодействующих полей (1968).

В рамках этого подхода Ф.И. Федоровым и его учениками была по существу впервые решена глобальная проблема: дано описание на единой универсальной математической основе всех типов элементарных частиц – массивных и безмассовых фермионов и бозонов, всех основных типов фундаментальных взаимодействий – гравитационного, электромагнитного, слабого (электрослабого) и сильного, а также всех типов непрерывной физической симметрии в мире частиц – геометрической, динамической и квантовой.

На решении этой проблемы и сосредоточилась научная деятельность А.А. Богуша. Он внес определяющий вклад в установление и развитие различных направлений исследований в данной области, в поиск и выявление конкретных физических приложений получаемых результатов, во внедрение их в научно-исследовательскую и учебную практику.

Для обеспечения возможности широкого и эффективного использования ковариантного подхода в теории элементарных частиц потребовалась большая подготовительная работа по развитию самой этой теории. В частности, применение общего метода проективных операторов Федорова требовало описания всех рассматриваемых типов элементарных частиц, не только с полужелым, но и с целым спином с помощью релятивистских волновых уравнений (РВУ) пер-

вого порядка в универсальной матричной форме. При этом за основу была взята классическая (квантоворелятивистская, без вторичного квантования) теория поля, которая не получила (до 1968 г.) в мировой научной литературе должного развития и нашла свое надлежащее признание лишь после того, как доминирующей стала калибровочная полевая концепция. В ее рамках были устранены, казалось бы, непреодолимые барьеры, разделявшие долгое время классическую и квантовую теории поля. По существу, развитый Ф.И. Федоровым, его учениками и, прежде всего А.А. Богушем, подход явился предвестником теории суперструн, претендующей на роль единой теории элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий.

Известно, что основным источником физической информации об элементарных частицах было и остается теоретическое и, в особенности, экспериментальное изучение конкретных процессов их взаимодействия. В связи с этим в самом начале своих исследований Андрей Александрович Богуш особое внимание уделял поиску, разработке и применению эффективных методов описания, расчета и анализа таких реакций.

Логика развития исследований привела к пониманию необходимости выхода белорусских физиков на эксперимент. Ввиду отсутствия в республике современных ускорителей элементарных частиц было установлено долгосрочное (с 1973 г. и по настоящее время) сотрудничество с экспериментаторами из Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна, Россия), оказавшееся весьма плодотворным и взаимовыгодным. Сотрудники Лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ) ИФ АН БССР (ИФ НАН Беларуси), возглавляемой А.А. Богушем со времени ее образования (1978 г.) вплоть до 2004 г., впервые в республике приняли непосредственное участие в реализации крупных международных экспериментальных программ. В итоге совместных исследований, выполненных на ускорителях гг. Дубны, Серпухова, Женева и др., получено большое количество физических результатов принципиального приоритетного характера, многие из которых вошли в банк мировых данных по физике частиц.

В частности, начиная с 1976 года, сотрудники ИФ АН БССР и ГГУ активно включились (под руководством директора ЛЯП ОИЯИ В.Д. Джелепова) в реализацию всех этапов экспериментальной программы ГИПЕРОН на Серпуховском 76 ГэВ-протонном синхротроне: от проектирования, создания и испытаний оригинального спектрометра ГИПЕРОН, разработки необходимого программно-математического обеспечения – до проведения экспериментальных сеансов, обработки и физической интерпретации полученных экспериментальных данных. Эти работы проводились нашими физиками (Н.А. Русакович, А.С. Курилин, Ю.А. Кульчицкий, В.С. Румянцев, М.Н. Сергеенко) совместно с учеными и специалистами гг. Дубны и Серпухова, а также Баку, Братиславы, Гомеля, Еревана, Кошице, Кракова, Самарканда, Софии, Тбилиси. При физической интерпретации получаемых экспериментальных данных белорусскими физиками (Ю.А. Кульчицкий и М.Н. Сергеенко) была существенно модифицирована и эффективно использована модель кварк-глюонных струн. Многие из полученных результатов остаются и до сих пор единственными для своей области в мировой исследовательской практике.

Важнейшим стимулом для установления многолетнего плодотворного сотрудничества физиков Беларуси с учеными и специалистами из ОИЯИ стало проведение в 1971 г. первой в республике Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий (Гомель-71), к подготовке и проведению которой А.А. Богуш приложил исключительные усилия. Кстати, в дальнейшем прошло еще десять таких школ ОИЯИ (Гомель-73, 77; Минск-79, Гомель-97, 99, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009).

Таким образом, научная деятельность А.А. Богуша проходила в трех связанных между собой направлениях: разработка новых методов исследования; развитие общей теории элементарных частиц и их взаимодействий; теоретическое и экспериментальное изучение процессов взаимодействия. Краткие итоги исследований по каждому из них и будут приведены ниже.



На открытии Международной школы-семинара ОИЯИ "Актуальные проблемы физики микромира" (Гомель-2003). Слева направо: А.Н. Сисакян (вице-директор ОИЯИ), В.И. Недилько (полномочный представитель РБ в ОИЯИ), Н.М. Шумейко (директор Национального центра физики частиц и высоких энергий БГУ), Ю.М. Плескачевский (вице-президент НАН Беларуси), А.А. Богуш

Развитие, разработка и применение ковариантных (алгебраических, теоретико-групповых и геометрических) методов и методик исследования

Метод обобщенных символов Кронекера и базисных элементов матричных алгебр. А.А. Богуш и Ф.И. Федоров ввели новое алгебраическое понятие – обобщенные символы Кронекера (ОСК), которые, в отличие от обычных символов Кронекера, рассматриваемых как элементы единичной матрицы, определяют элементы проективных матриц. Такие матрицы выделяют из пространства многоиндексных тензорных величин общего вида инвариантные подпространства тензоров с теми или иными свойствами симметрии относительно парных перестановок индексов. Позже были построены явные выражения для базисных элементов полных алгебр квадратных и кубических матриц e^{AB} и e^{AB} в пространствах произвольной размерности, определяемых через ОСК и обладающие проективными свойствами.

Андрей Александрович на этой основе разработал общую и простую методику перехода от систем линейных и нелинейных дифференциальных уравнений для свободных и взаимодействующих бозонных полей, записанных в явной тензорной форме, к матричным РВУ первого порядка и универсальным нелинейным уравнениям Федорова. Получаемые при этом квадратные и кубические матрицы уравнений автоматически выражаются в предельно компактной форме, в виде линейных комбинаций базисных элементов e^{AB} и e^{AB} . В частности, А.А. Богуш и Б.В. Крылов под руководством Ф.И. Федорова с помощью ОСК осуществили переход (1968 г.) от системы тензорных уравнений для массивных и безмассовых частиц со спином 2 к стандартной матричной форме РВУ первого порядка.

А.А. Богуш и его дипломник Л.Ф. Жирков (1968, 1977 гг.) впервые (за много лет до работы известного американского физика С. Окубо) ввели матричную формулировку теории неабелевых калибровочных полей Янга–Миллса. Лагранжиан и нелинейные уравнения этих полей

представлены в универсальной матричной форме. Было дано также описание теории нелинейных скалярных полей Хиггса на основе универсальных нелинейных матричных уравнений Федорова.

Андрей Александрович в 1968–1988 гг. впервые ввел универсальную матричную формулировку для нелинейных уравнений объединенного поля лептонов, кварков, калибровочных векторных бозонов и частиц Хиггса и соответствующего лагранжиана в стандартной калибровочной полевой теории электрослабых взаимодействий Вайнберга–Глэшоу–Салама. С помощью указанной выше методики квадратные и кубическая матрицы получены в терминах базисных элементов e^{AB} и e^{AB} полных матричных алгебр в пространстве функций объединенного поля. Проективные свойства элементов e^{AB} и e^{AB} позволяют выделять из общего лагранжиана теории те части, которые необходимы для описания конкретных процессов электрослабого взаимодействия. Предложенная методика была также развита и применена (1968–1988 гг.) в работах Ф.И. Федорова, В.И. Кувшинова, Л.Ф. Жиркова, Л.Ф. Бабичева, А.А. Григорьева, В.В. Гилевского, А.А. Бабича и др. при переходе к описанию полевой теории гравитационных, электромагнитных и сильных взаимодействий, а также суперсимметричных и других полевых моделей на основе универсальных нелинейных уравнений Федорова.

Общая методика конечных преобразований физической симметрии. Крупным достижением А.А. Богуша стала разработанная им общая методика конечных (в дополнение к обычно используемому в теории частиц бесконечно малым) преобразований геометрической (совместно с Ф.И. Федоровым и др.), динамической (калибровочной) и квантовой симметрии на единой математической основе – векторной параметризации Ф.И. Федорова. Векторная параметризация была распространена на широкий класс непрерывных групп Ли, используемых в теории элементарных частиц и их взаимодействий, что позволило выявить перспективные области физических приложений данной методики.

Одна из первых задач, которая была поставлена Ф.И. Федоровым перед А.А. Богушем в период его обучения в аспирантуре (1957–1960 гг.), состояла в создании предпосылок, необходимых для применения конечных преобразований Лоренца для решения задач теории элементарных частиц. Нужно было выразить матрицы таких преобразований в терминах физических величин, используемых для описания состояний частиц: четырехмерных векторов энергии-импульса и спиновых векторов.

Были найдены и исследованы наиболее простые выражения для матриц конечных преобразований одного четырехмерного вектора энергии-импульса в другой – плоских (простых) преобразований Лоренца, определены отвечающие им вектор-параметры. В рамках ВП группы Лоренца А.А. Богуш и Ф.И. Федоров решили аналогичную задачу и в общем виде. В этом случае вектор-параметры преобразований Лоренца, осуществляющих переход от одного 4-импульса к другому, определяются неоднозначно, с точностью до вектор-параметра произвольного пространственного вращения. В итоге оказалось возможным проводить одновременно преобразования векторов импульса и спиновых векторов частицы с помощью одной и той же матрицы Лоренца. Введены вектор-параметры широко используемых в релятивистской кинематике преобразований буста и малых групп Лоренца.

В это же время (1961, 1962 гг.) А.А. Богуш под руководством и при участии Ф.И. Федорова построил общие выражения для матриц конечных преобразований представлений группы Лоренца $SO(3,1)$ в пространствах функций состояний частиц со спином 0, $1/2$ и 1. Он показал, что такие операторы преобразований при соответствующем выборе вектор-параметров могут быть использованы в качестве операторов перехода от одного состояния свободной частицы к другому, например, до и после рассеяния, обеспечивающих требуемое изменение импульса и спиновых переменных частиц.

В 1972 г. А.А. Богуш ввел векторную параметризацию комплексной группы Лоренца $SO(4,C)$.

Трехмерные комплексный вектор-параметр (\mathbf{q}) и ему комплексно сопряженный (\mathbf{q}^*) в теории обычной группы Лоренца $SO(3,1)$ заменены на два независимых трехмерных комплексных вектор-параметра (\mathbf{q} и \mathbf{g}). Установлено новое важное преимущество векторной параметризации – она является существенно регулярной. Благодаря этому А.А. Богуш и его дипломник А.А. Мироненко (1973 г.) радикально упростили доказательство одной из основных теорем в аксиоматической квантовой теории поля – теоремы Баргмана–Холла–Уайтмана.

Впоследствии, когда возникла идея тесной связи векторной параметризации преобразований группы трехмерных вращений и Лоренца с кватернионным исчислением, именно предложение А.А. Богуша установить эту связь на уровне комплексной группы Лоренца оказалось особенно плодотворным. Оно позволило сразу установить единую математическую природу преобразований групп, допускающих векторную параметризацию Ф.И. Федорова (А.К. Лапковский, Ю.А. Курочкин, А.А. Богуш, Ф.И. Федоров), а затем существенно расширить круг этих групп за счет использования бикватернионов, определенных над двойными и дуальными числами (Ю.А. Курочкин, А.А. Богуш).

Позже (1978 г.) в исследованиях А.А. Богуша, О.С. Иваницкой, В.В. Киселя, и Н.Н. Костюковича была дана релятивистски ковариантная четырехмерная (бивекторная) формулировка векторной параметризации комплексной группы Лоренца $SO(4,C)$ и ее подгруппы $SO(3,1)$. Выявлены возможности использования конечных локальных преобразований Лоренца при решении задач общей теории относительности (см. монографии О.С. Иваницкой "Обобщенные преобразования Лоренца и их применение". Мн., 1969; "Лоренцев базис и гравитационные эффекты в эйнштейновой теории гравитации". Мн., 1979).

Развита общая теория простых (кратно-простых) и плоских ортогональных (унитарных) преобразований. Предложен простой подход к решению общей задачи о построении матриц конечных преобразований представлений произвольной вещественной ортогональной группы $SO(n,R)$. Матрица преобразования представления группы $SO(n,R)$ найдена в виде произведения матриц преобразований представлений, отвечающих простым (кратно-простым) ортогональным преобразованиям и имеющих ту же полиномиальную структуру, что и соответствующие преобразования представления группы трехмерных вращений $SO(3,R)$, полученные ранее в рамках ВП. Это и решало поставленную задачу (1972–1974 гг., А.А. Богуш, Ф.И. Федоров, А.М. Федоровых).

Следует отметить, что использование такого рода преобразований в сочетании с представлением 4-импульсов как бикватернионов специального типа и методами геометрии Лобачевского позволили развить ковариантный подход в кинематике столкновений частиц, обладающий геометрической наглядностью, с одной стороны, и возможностью алгебраической алгоритмизации расчетов, с другой (Ю.А. Курочкин).

А.А. Богушем и В.С. Отчиком (1976 г.) решены в общем виде задачи о распространении ВП на группы де Ситтера, а также на группу Пуанкаре. На той основе построение общих выражений для матриц преобразований конечномерных представлений группы $SO(5,C)$ сведено к использованию результатов, полученных в рамках векторной параметризации групп $SO(3,C)$ и $SO(4,C)$. С помощью процедуры контракции Иненю–Вигнера осуществлен переход от введенной векторной параметризации группы де Ситтера $SO(4,1)$ к соответствующей параметризации неоднородной группы Пуанкаре и ее конечномерных представлений, выражаемых в итоге через известные представления группы четырехмерных трансляций и группы Лоренца.

Новый этап в развитии общего метода векторной параметризации Федорова начался после того, как А.А. Богуш (1981, 1987) впервые распространил эту параметризацию на группу локальных преобразований $SU(2)$, играющую роль группы динамической (калибровочной) симметрии в теории полей Янга–Миллса. Установлено новое важное преимущество векторной параметризации: явная полиномиальная форма векторно-параметрических выражений

для матриц конечных локальных преобразований (в отличие от обычной, экспоненциальной) позволяет проводить их дифференцирование. Благодаря этому впервые определены трансформационные свойства потенциалов полей Янга–Миллса относительно конечных, а не бесконечно малых, как обычно, преобразований. На этой основе А.А. Богущем и Л.Ф. Жирковым (1981) построен лагранжиан и получены нелинейные уравнения для главного кирального поля на группе локальных трехмерных вектор-параметров в теории калибровочных полей Янга–Миллса. Е.В. Докторовым (1991 г.) было показано, что эти уравнения после перехода к двумерному пространству-времени допускают солитонные решения.

Результаты, полученные при использовании ВП калибровочной группы $SU(2)$ ($SO(3, R)$) в простейшей теории калибровочных полей, распространены на общий случай такой теории, когда роль группы калибровочной симметрии играет произвольная унитарная группа $SU(n)$ (1981–1987, А.А. Богущ, Л.Ф. Жирков, А.М. Федоровых).

В развитие этих исследований был разработан простой и общий подход к построению дифференциальных форм Картана, не требующий решения уравнений Картана–Маурера, эффективно использованный в обширной серии нелинейных полевых моделей. (См. обзор: В.И. Кувшинов, Нгуен Вьен Тхо. "Локальные вектор-параметры групп, формы Картана и приложения к теориям калибровочных и киральных полей". ЭЧАЯ. 1994)

В 1992–2005 гг. Андрей Александрович выполнил обширную серию исследований, направленных на распространение метода векторной параметризации на группы физической симметрии нового типа – группы квантовой симметрии, действующие в пространствах с некоммутативной геометрией.

Дано описание q -деформированной группы $GL_q(2, C)$ в терминах введенных четырехмерных квантовых вектор-параметров. Установлены простые и конечные правила (в отличие от известных бесконечных выражений) композиции квантовых параметров и вытекающие из них соотношения линейности. Применение этих правил композиции позволило вывести базовые перестановочные соотношения, определяющие квантовую специфику рассматриваемой группы, непосредственно для квантовых вектор-параметров группы $GL_q(2, C)$, а не для элементов квантовых матриц, как это делается обычно. Благодаря этому такие соотношения приобретают своего рода инвариантный характер, поскольку они сохраняют свою силу и для представлений данной группы, записанных в векторно-параметрическом виде.

Предложена простая процедура перехода от квантовой группы $GL_q(2, C)$ к унимодулярным q -деформированным группам $SL_q(2, C)$ и $SU_q(2)$. Для описания этих групп введены, вместо четырехмерных, два трехмерных квантовых вектор-параметра: *правый* и *левый*, подчиняющиеся простому, совпадающему с классическим закону композиции. Построены q -деформированные 4×4 -матрицы преобразований квантовых биспиноров Дирака, заданных в пространстве с некоммутативной геометрией.

Разработан простой и естественный подход к самой процедуре реализации квантовой деформации классических групп $GL(2, C)$ и $SL(2, C)$ (алгебр Ли $gl(2, C)$ и $sl(2, C)$), к процедуре перехода к q -деформированным группам $GL_q(2, C)$ и $SL_q(2, C)$ (алгебрам Ли $gl_q(2, C)$ и $sl_q(2, C)$) и h -деформированным группам, $GL_h(2, C)$ и $SL_h(2, C)$ (алгебрам $gl_h(2, C)$ и $sl_h(2, C)$) соответственно, основанный на использовании квантовых аналогов характерных для векторной параметризации соотношений линейности. Искомые явные выражения для q -деформированных и h -деформированных четырех- и трехмерных вектор-параметров, а также генераторов квантовых групп получены с помощью соответствующих простых линейных преобразований вектор-параметров (генераторов), порождаемых специально введенными преобразованиями подобия над квантовыми аналогами исходных классических матриц и обратных по отношению к ним матриц.

Эти явные примеры показывают, что использование характерных для векторной парамет-

ризации предельно простого закона композиции вектор-параметров и вытекающих из него соотношений линейности позволяет свести достаточно громоздкие соотношения с матрицами конечных преобразований к значительно более простым операциям над соответствующими вектор-параметрами. Распространение этой параметризации на группы локальных преобразований динамической (калибровочной) симметрии, а затем на группы квантовой симметрии в пространствах с некоммутативной геометрией привело к установлению новых, как правило, неожиданных особенностей и преимуществ метода векторной параметризации и, что важно, новых возможностей ее применения.

Общий метод ковариантизации операторов проекции спина для массивных и безмассовых частиц. Одной из ключевых задач в полевой теории элементарных частиц, которая была решена А.А. Богушем (1961, 1962) под руководством Ф.И. Федорова, стала разработка общего метода ковариантизации операторов проекций спина. Предложенная процедура проводилась с помощью преобразований буста, построенных в рамках векторной параметризации группы Лоренца и осуществляющих переход от системы отсчета, в которой частица покоится, к системе, в которой она движется, заданных в пространствах функций состояний элементарных частиц, рассматриваемых как пространства представлений группы Лоренца. Полученные ковариантные выражения для операторов проекций спина допускают естественную интерпретацию в рамках многовременного формализма Фока–Томонаги–Швингера и обеспечивают описание состояний движущихся элементарных частиц с проекцией спина на произвольное направление, т. е. описание произвольно поляризованных частиц. Разработанный Ф.И. Федоровым общий метод проективных операторов (матриц-диад) в теории элементарных частиц распространен на случай, когда в этой теории используются ковариантные выражения для операторов проекции спина.

Ковариантная методика (метод Богуша–Федорова) прямого расчета амплитуд рассеяния. Весьма перспективным оказался предложенный А.А. Богушем новый подход (1961–1964 гг.) к расчету эффективных сечений процессов взаимодействия поляризованных частиц, основанный на непосредственном вычислении амплитуд рассеяния, а не квадратов их модулей. Показано, что такая амплитуда всегда может быть представлена в виде следа от произведения трех матричных операторов: вершинного, определяющего специфику процесса взаимодействия, проективной матрицы-диады для начального или конечного состояний частицы и оператора перехода, связывающего эти состояния. В рамках указанного подхода разработана ковариантная методика расчета матричных элементов электромагнитного взаимодействия продольно-поляризованных частиц со спином $1/2$. Проведен общий расчет матричных элементов при использовании в качестве вершинных операторов взаимодействия всех элементов базиса алгебры матриц Дирака (в системе центра масс, лабораторной и общего вида системах). Построены общие выражения для амплитуд электромагнитного рассеяния двух одинаковых и двух различных продольно поляризованных дираковских частиц с учетом возможной их электромагнитной структуры.

А.А. Богушем была предложена (1963 г.), а затем развита совместно с А.И. Болсуном (1964 г.) отличная от указанной выше ковариантная методика расчета матричных элементов взаимодействия произвольно поляризованных массивных частиц со спином 1. Она основана на использовании матричных выражений для 10-компонентных функций начального и конечного состояний частиц с учетом записи 10×10 -матриц Даффина–Кеммера в терминах базисных элементов e^{AB} . Произведен общий расчет всех возможных матричных элементов взаимодействия поляризованных частиц.

Предложенная методика расчета распространена (при участии Л.Г. Мороза) на случай векторных частиц с различными массами. В качестве иллюстрации рассчитаны дифференци-

альные сечения рассеяния векторных частиц на скалярной частице и кулоновском центре, построена амплитуда радиационного распада векторного мезона.

А.А. Богуш и Ю.А. Курочкин под руководством Ф.И. Федорова (1976 Г.) показали, что полученные общие выражения для матричных элементов взаимодействия частиц со спином 0, 1/2 и 1 могут быть использованы в общей теории бинарных реакций (не обязательно электромагнитных) в качестве кинематических ковариантов в рамках формализма M -функций. Была также установлена связь спиральных амплитуд рассеяния со спинорными M -функциями для тех случаев, когда инвариантные коэффициенты этих функций не содержат кинематических сингулярностей.

Ф.И. Федоров радикально усовершенствовал ковариантную методику прямого расчета амплитуд рассеяния в квантовой электродинамике. Он довел до логического завершения разработку данной методики, распространив ее на общий случай произвольно поляризованных дираковских частиц, в частности, за счет использования введенных им ковариантных операторов проекций спина, определяемых через вектор-параметры малых групп Лоренца. Эти разработки (а также многие из перечисленных выше результатов) вошли в фундаментальную монографию Ф.И. Федорова "Группа Лоренца" (Москва, 1979, 2003).

Развитие рассматриваемой методики продолжалось и все последующие годы. Она нашла широкое и эффективное применение при расчетах серии сложных квантовоэлектродинамических процессов, в том числе с учетом нелинейных эффектов (см., например, обзоры: М.В. Галынский, С.М. Сикач "Диагональный спиновый базис и расчет процессов с участием поляризованных частиц". ЭЧАЯ. 1998; Э.А. Кураев (ОИЯИ), М.В. Галынский, М.И. Левчук "О принципах и физической программе гамма-гамма коллайдеров". ЭЧАЯ. 2000). Результаты новейших исследований в данной области нашли свое отражение в монографии В.В. Андреева "Вычисление амплитуд рассеяния в квантовополевых теориях и моделях".

Теперь известно, что использование подобных методов прямого расчета амплитуд рассеяния (а не квадратов их модулей) стало общепринятым в современной мировой практике научных исследований в области физики высоких энергий.

Построение логически замкнутой классической полевой теории элементарных частиц в ковариантной (матричной) формулировке

Развитие классической полевой теории свободных бозонов и фермионов. В 1968 г. А.А. Богуш подробно исследовал особенности процедуры обобщения вариационных принципов механики на случай классических полей. Внесены существенные уточнения в формулировку и общее доказательство теоремы Нетер с учетом современных ее приложений в полевой теории элементарных частиц и их взаимодействий. Впервые последовательно разработана характерная для классической теории поля одночастичная (квантовомеханическая, вероятностная) интерпретация положительно- и отрицательно-частотных частей общих решений РВУ для бозонных полей, рассматриваемых и нормируемых независимо, как квантовомеханические функции состояний свободных частицы и античастицы. Показано, что получаемые с помощью теоремы Нетер выражения для динамических инвариантов классического поля представляют собой квантовомеханические средние от соответствующих операторов (генераторов групп симметрии) в состояниях частицы и античастицы.

А.А. Богуш совместно с Л.Г. Морозом дали (1961, 1968 гг.) ковариантное описание классической теории свободного электромагнитного поля в рамках единой, общей для рассматриваемых элементарных частиц лагранжевой схемы. Используются эквивалентные уравнения Максвелла квантовомеханические РВУ для свободной безмассовой частицы со спином 1 (фотона), записанные в универсальной матричной форме. Приведена одночастичная интерпретация

общих решений этих уравнений, как функций состояний свободного фотона. Построен ковариантный оператор проекций спина фотона, выраженный в терминах четырехмерных круговых векторов – собственных векторов этого оператора, отвечающих собственным значениям, равным ± 1 . Он использован при построении проективных матриц-диад, определяющих состояния свободного фотона с заданными значениями 4-вектора энергии-импульса и проекции спина. Показано, что ковариантизация оператора проекций спина фотона приводит к релятивистской формулировке кулоновской калибровки потенциалов свободного электромагнитного поля.

А.А. Богуш последовательно развил (1962, 1968 гг.) классическую полевую теорию свободных комплексных скалярного и векторного (при участии А.Т. Болсуна и Л.Г. Мороза) полей на основе использования РВУ в матричной форме Даффина–Кеммера. Исследованы общие свойства алгебр 5×5 - и 10×10 -матриц Даффина–Кеммера, построены базисы этих алгебр, получены общие формулы для следов от произведений произвольного числа матриц. Решена проблема физической (одночастичной) интерпретации общих решений этих уравнений как функций состояний свободных частиц и античастиц со спином 0 и 1. Введены ковариантные выражения для операторов проекций спина векторного бозона. Построены с их помощью проективные матрицы-диады, описывающие состояния частиц со спином 0 и 1 с заданными значениями 4-вектора энергии-импульса и проекции спина. Найдены явные выражения для динамических инвариантов скалярного и векторного полей, отвечающих частицам и античастицам. Существенно упрощена процедура перехода от координатного к импульсному представлению.

Дана последовательно ковариантная формулировка теории свободных массивных и безмассовых частиц со спином $1/2$ в рамках классической теории поля. Построены проективные матрицы-диады для состояний дираковской частицы с использованием введенных ковариантных выражений для операторов проекций спина, в том числе в терминах четырехмерных круговых векторов. Установлена связь этих проективных операторов с поляризационной матрицей плотности для частицы со спином $1/2$. Получены явные выражения для динамических инвариантов поля в координатном и импульсном представлениях, отвечающие состояниям электрона и позитрона, а также нейтрино и антинейтрино соответственно.

Построение классической полевой теории электромагнитных и электрослабых взаимодействий. А.А. Богуш и Л.Г. Мороз построили (1968, 1987 гг.) последовательную, логически замкнутую ковариантную формулировку классической полевой теории электромагнитных взаимодействий дираковских частиц. По предложению А.А. Богуша и при его участии Л.Г. Мороза в рамках этой теории была разработана (1968 г.) простая рабочая схема построения амплитуд электромагнитного рассеяния, основанная на непосредственном использовании решений уравнений для взаимодействующих полей, находимых с помощью функций Грина в рамках теории возмущений. Такая схема позволяет получать результаты для основных типовых процессов электромагнитного взаимодействия, совпадающие с теми, которые дает квантовая электродинамика, но при значительно меньших затратах труда и времени, поскольку отпадает необходимость в проведении вторичного квантования взаимодействующих полей и построении квантовоэлектродинамической матрицы рассеяния.

А.А. Богуш, В.В. Кисель, Ф.И. Федоров предложили (1979– 1988 гг.) новый подход к построению теории электромагнитных взаимодействий частиц, обладающих внутренней структурой. Он основан на описании исходных свободных частиц с помощью РВУ первого порядка, заданных в пространствах, в которых реализуются расширенные наборы неприводимых представлений группы Лоренца. Показано, что можно выбрать такой набор представлений, при котором расширенные таким образом уравнения после введения электромагнитного взаимодействия будут описывать это взаимодействие частиц с учетом заданной их внутренней электромагнитной структуры. Дано описание электромагнитных взаимодействий частиц со спином

$1/2$, $3/2$ и 2 , обладающих аномальным магнитным моментом, а также частиц со спином 0 , 1 и $3/2$ со статической поляризуемостью.

В последние годы расширенные волновые уравнения были обобщены на случай, когда, наряду с электромагнитным взаимодействием, учитывается взаимодействие с гравитационным фоном за счет использования калибровочного правила Тетроде–Вейля–Фока–Иваненко, т. е. за счет перехода к общековариантным уравнениям, заданным в римановом пространстве-времени (с кривизной). Установлено, что в этом случае возникают дополнительные гравитационные эффекты, обусловленные наличием у частицы аномального магнитного момента, в то время как наличие поляризуемости у частиц не приводит к подобным эффектам, если не учитывается кручение (2001–2004 гг., А.А. Богущ, В.В. Кисель, В.М. Редьков, Н.Г. Токаревская).

А.А. Богущем в рамках разработанной им классической полевой формулировки стандартной калибровочной теории электрослабых взаимодействий последовательно развита (1987 г.), по аналогии со случаем указанной выше теории электромагнитных взаимодействий, простая рабочая схема получения амплитуд рассеяния для конкретных процессов. В ее основе лежит прямое использование решений уравнений для взаимодействующих полей. На конкретных примерах расчета процессов слабого взаимодействия показано, что при этом получаются те же результаты, как и в случае вторично-квантованных полей, но при значительно меньших затратах труда и времени.

Теоретическое описание и расчет наблюдаемых характеристик процессов взаимодействия элементарных частиц. Работы по экспериментальной физике высоких энергий

Сразу после разработки ковариантной методики непосредственного расчета матричных элементов взаимодействия А.А. Богущ и И.С. Сацункевич (1962 г.) вычислили с ее помощью дифференциальные сечения для процесса упругого рассеяния поляризованного электрона на поляризованном протоне. Показано, что учет начальных и конечных продольных поляризаций взаимодействующих частиц открывает новые возможности для экспериментального определения формфакторов, характеризующих внутреннюю электромагнитную структуру протона. При этом было высказано предположение о существовании у протона, наряду с распределенным электрическим зарядом и аномальным магнитным моментом, электрического дипольного момента. Предложены схемы обнаружения обусловленного таким предположением нарушения инвариантности, оказавшейся впоследствии характерным для слабого взаимодействия (1964), и определения соответствующего вклада в эффективное сечение рассматриваемого процесса.

А.А. Богущем, А.И. Болсуном и И.С. Сацункевичем (1965 г.) рассчитаны дифференциальное и полное сечения упругого рассеяния антинейтрино на электроны. Учтены вклады не только слабого взаимодействия за счет обмена слабыми нейтральными и заряженными калибровочными бозонами (задолго до их экспериментального обнаружения), но и электромагнитного – за счет обмена фотонами. Использована обобщенная на случай слабых взаимодействий (благодаря применению правила Паули–Фирца) ковариантная методика прямого расчета амплитуд рассеяния. Обсуждены возможные схемы определения параметра нелокальности, обусловленной калибровочными бозонами, и дираковского зарядового формфактора нейтрино.

Предложенное рассмотрение этих двух процессов интересно тем, что здесь задолго до создания единой теории электрослабых взаимодействий были учтены вклады в сечения рассеяния электромагнитного и слабого взаимодействий одновременно.

Первые приложения ковариантной методики расчета амплитуд рассеяния убедительно подтвердили ее эффективность. Оказалось возможным дать описание конкретных процессов взаимодействия поляризованных частиц с учетом возможной их внутренней структуры, в более

широком, чем это делалось ранее, плане, существенно сократить затраты труда и времени, получать новые результаты, опережающие свое время.

В разное время А.А. Богуш, самостоятельно или совместно со своими коллегами и учениками, исследовал большое количество самых разнообразных конкретных процессов взаимодействия элементарных частиц. Для всех рассматриваемых реакций были проведены расчеты их экспериментально наблюдаемых характеристик.

Под руководством А.А. Богуша в возглавляемой им лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ) Института физики АН БССР были завершены первые в республике систематические исследования в области экспериментальной физики высоких энергий. Они проводились в рамках установленного, начиная с 1973 г., сотрудничества с экспериментаторами и инженерами Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ (в составе экспериментальной группы Ю.А. Будагова). Первоначально, в итоге обработки экспериментальной пленочной информации, снимаемой с помощью пузырьковой камеры на Дубненском синхрофазотроне, были получены новые важные физические результаты по изучению процессов множественного рождения частиц в пион-протонных и пион-углеродных столкновениях при энергии 5 ГэВ. В частности, было установлено существенное расширение границ применимости скейлинга (масштабной инвариантности) в среднем по диапазону энергий и типу частиц (1976–1986 гг., Л.Г. Мороз, А.С. Курилин, Н.А. Русакович, В.С. Румянцев, А.М. Дворник и др.).



Члены Научного совета Центра по обработке пленочной информации (слева направо):
А.А. Богуш, академик АН БССР Ф.И. Федоров (председатель), Л.Г. Мороз (ученый секретарь), академик АН БССР В.С.Бураков (зам. председателя), Л.Ф. Жирков

К моменту образования ЛФВЭ в завершающую стадию вступили работы по материально-техническому и программно-математическому оснащению образованного в 1976 г. на базе Института физики АН БССР и Гомельского государственного университета (ГГУ) межведомственного объединения – Центра по обработке пленочной информации (ЦОФИ). Экспериментальные материалы для обработки поступали в ЦОФИ из Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в виде фотопленок, снятых в пузырьковых камерах на Дубненском синхрофазотроне.

Научное издание

Богущ Андрей Александрович

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

Редактор *И. С. Александрович*
Художественный редактор *Т. Д. Царева*
Технический редактор *М. В. Савицкая*
Компьютерная верстка *В. М. Редьков*

Подписано в печать 31.10. 2011. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 67,2 + 0,7 вкл. Уч.-изд. л. 33,3. Тираж 120 экз. Заказ 255.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».
ЛИ № 02330/0494405 от 27.03.2009. Ул. Ф. Скорины, 40, 220141, г. Минск.