

ХІ ШКОЛА «КВАНТОВАЯ ХРОМОДИНАМИКА И МОДЕЛИ ВЕЛИКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ»

(Бакуриани, ГССР, 16—23 января 1986 г.)

Институт физики АН Грузинской ССР провел с 16 по 23 января 1986 г. в Бакуриани одиннадцатую зимнюю школу, посвященную актуальным проблемам физики элементарных частиц. На школе было заслушано 36 лекций и докладов, проведено 10 семинаров.

В теоретической части наибольшее внимание было уделено следующим темам: а) теория суперструн и ее феноменологические проявления; б) суперсимметрия и супергравитация; в) космология и астрофизика; г) составные модели кварков и лептонов и большое объединение; д) теория адронов и адронных процессов в рамках квантовой хромодинамики.

Обсуждение суперструн — наиболее перспективного и быстро развивающегося фундаментального подхода — было начато в лекции Я. И. Когана «Струна для пешеходов». На популярном уровне были введены основные понятия, с которыми оперируют в этой области. Был дан краткий исторический обзор предмета, начиная от модели Венециано до современных идей, связанных с компактификацией десятимерной суперструны в четыре измерения.

В докладе Р. Э. Каллош «Супергравитация и суперструны» рассматривался теоретико-полевой предел суперструн и вытекающая теория супергравитации. Демонстрировалась необходимость введения дополнительных членов в определение напряженности полей, в частности в $H_{\mu\nu\rho}$, и в законы суперпреобразований.

А. Ю. Морозов в обзорном докладе «Феноменология суперструн» основной упор сделал на проблеме компактификации в четыре измерения $M_{10} \rightarrow M_4 \times K$. Приведены примеры многообразий Каллаби — Яо, которые обеспечивают приемлемую феноменологию с тремя либо четырьмя поколениями. Рассмотрены различные варианты нарушения калибровочной симметрии $E_8 \times E_8$ до $E_6 \times E_8$, $SU(3) \times SU(2) \times U(1) \times U(1) \times E_8$ и т. д. Показано, что из-за специфической структуры поколений, вообще говоря, может возникнуть проблема быстрого развала протона за счет обмена хиггсовскими частицами. Вероятность распада протона определяется некоторыми (супер) юкавскими константами в лагранжиане. В некоторых вариантах компактификации последние имеют топологический характер и зануляются при подходящем выборе многообразия K .

Оригинальное сообщение того же автора было посвящено чисто теоретическим аспектам бозонных струн. Существует хорошо развитая техника однопетлевых вычислений. Обобщение этой техники на много петель — чрезвычайно нетривиальная задача, решение которой удалось получить А. Ю. Морозову с соавторами. Были приведены строгие замкнутые результаты (в виде квадратур) для двух-, трех- и четырех-петлевых вкладов в S -матрицу. Продвижение основывается на работах по комплексной аналитичности в теории струн, выполненных А. А. Белавиным и В. Г. Книжником.

С оригинальным сообщением по работе Р. Э. Каллош и Б. Нильсена «Скейлинг-инвариантное ($d = 10$)-суперпространство и гетеротическая струна» выступила Р. Э. Каллош. Супергравитация с $d = 10$, взаимодействующая с теорией Янг — Миллса, описана в суперпространстве, которое имеет явно скейлинг-инвариантный вид. При этом поля естественным образом связаны с переменными, возникающими в гетеротической струне, и имеют простые законы преобразований суперсимметрии. Этот подход может облегчить исследование эффектов введения членов с высшими производными, индуцированными струной.

Доклад Я. И. Когана «Алгебраическая квантовая теория» был посвящен ковариантному вторичному квантованию струны, основанному на БРСТ-подходе и предложенному Зигелем, Невё и Вестом, Банксом и Пескиным, Каку и Луккеном. Обсуждалась работа Виттена, в которой было показано, что действие для струнного поля имеет вид Черна — Саймонса, причем аналогом калибровочных преобразований являются БРСТ-преобразования. Рассматривалось обобщение на случай неориентируемых струн, что требует введения йордановых алгебр.

Секция суперсимметрии и супергравитации открывалась лекцией М. И. Высоцкого и К. А. Тер-Мартirosяна «Экспериментальные следствия суперсимметричных моделей». В последние годы большое внимание как теоретиков, так и экспериментаторов привлекают модели с низкоэнергетической суперсимметрией. В этих моделях предсказывается существование большого количества новых фундаментальных частиц на масштабе масс $M_W \sim 100$ ГэВ. На сегодняшний день нижняя экспериментальная граница на массы новых частиц проходит на уровне 40 ГэВ. Тем не менее возможно

существование и более легких частиц: слабо взаимодействующего фотино с массой на уровне нескольких ГэВ, глюино с массой от 5 до 10 ГэВ. В ряде популярных в настоящее время вариантов теории предсказывается существование легкого нейтрального хиггсовского бозона с массой в несколько ГэВ. Прямого подтверждения теоретических представлений можно ожидать с пуском новых ускорителей: e^+e^- -коллайдера SLC и $p\bar{p}$ -коллайдера в 1986—1987 гг. Были обсуждены также косвенные свидетельства в пользу SUSY: большая величина дипольного момента нейтрона, распад протона по моде $p \rightarrow K\nu$ и упоминавшийся легкий бозон Хиггса.

Д. И. Казаков сделал отчет о работах по построению конечных ($N = 1$)-суперсимметричных моделей большого объединения. Исходная идея Казакова и соавторов состоит в том, что при достаточно большом наборе юкавских констант в теории всегда можно подобрать соотношение между юкавскими (h) и калибровочной (g) константами $h = \alpha g + \beta g^3 + \gamma g^5 + \dots$ так, чтобы обеспечить конечность всех перенормировок. Для этого требуется подбором материи устранить расходимость в g в одной петле и обеспечить $\gamma_i(h, g) = 0$, где γ_i — аномальные размерности полей материи. Оба условия выполняются в ряде конкретных моделей.

Доклад А. И. Вайнштейна и М. А. Шифмана «Решение проблемы аномалий в суперсимметричных калибровочных теориях и операторное разложение» суммирует цикл работ по β -функциям и проблеме аномалий. Показано, каким образом в стандартной теории возмущений получаются точные выражения для β -функций. Ключевое наблюдение таково: вильсоновское эффективное действие не совпадает с суммой диаграмм для вакуумных петель во внешнем поле. Отличие обусловлено инфракрасными эффектами. Коэффициент $1/g^2$ при W^2 в вильсоновском действии перенормируется только на однопетлевом уровне, что приводит к однопетлевому виду аномального операторного уравнения для суперпотока (обобщение теоремы Адлера — Бардина). Полная функция Гелл-Манна — Лоу возникает после взятия матричного элемента. Наиболее неожиданная находка — наблюдаемость затравочного Z -фактора полей материи.

В сообщении В. А. Новикова «Суперинстантонное исчисление» подробно обсуждался прогресс, достигнутый в последние три года в инстантонных вычислениях в суперсимметричных калибровочных теориях с материей. Использование явно суперинвариантной техники автоматически обеспечивает такие общие свойства, как факторизация и кластеризация корреляторов, независимость от координат n -точечных функций, индуцированных суперполями одинаковой киральности. Практический выход — возможность надежного вычисления конденсатов (возникающих только непертурбативно) в режиме слабой связи. Наиболее важный пример — конденсат полей глюино $\langle \text{vac} | \lambda_\alpha^\alpha \lambda^{a\alpha} | \text{vac} \rangle \neq 0$.

Пристальное внимание участников привлекла секция, посвященная пограничной области, — космология и астрофизика, с одной стороны, и элементарные частицы, с другой. Секция открылась докладом А. Д. Долгова «Космология и новые частицы». Был приведен краткий обзор современного состояния космологии, начиная от принятых сейчас взглядов на возникновение нашей Вселенной до теории развития первичных неоднородностей в галактике и их скоплениях. В общем виде описаны способы получения космологических ограничений на параметры элементарных частиц с помощью ограничений на возраст Вселенной, на спектр реликтового излучения, на первичный нуклеосинтез и т. п., выведены ограничения на свойства суперсимметричных партнеров элементарных частиц.

В лекции В. Н. Лукаша «Анизотропия реликтового излучения и темная материя во Вселенной» было показано, что исследование угловых флуктуаций $\Delta T/T$ фонового радиоизлучения в разных моделях Вселенной и сравнение их с наблюдаемыми ограничениями на $\Delta T/T$ позволяет сделать выводы о физической природе и количестве скрытой космической материи, а также

наложить жесткие ограничения на теории очень ранней Вселенной. Наиболее чувствительным проявлением невидимой массы, позволяющим уже сейчас отбросить ряд моделей, являются крупномасштабные флуктуации $\Delta T/T$, однозначно связанные с полем первичных космологических возмущений. Минимально предсказываемый уровень фоновой анизотропии в стандартных моделях раздувающейся Вселенной может быть достигнут в эксперименте РЕЛИКТ при чувствительности $\Delta T/T \sim 5 \cdot 10^{-6}$. Открытие флуктуаций $\Delta T/T$ в угловых масштабах $\theta > 5^\circ$ позволило бы определить как спектр первичных возмущений плотности, так и общую массу скрытой материи во Вселенной.

Б. И. Лучков дал прекрасный обзор ситуации с космическими источниками нейтрино и фотонов с $E > 10^{15}$ эВ типа Cygnus X-3. Последние данные по мюонам, индуцированным Cygnus X-3, стали настоящей сенсацией — ни одна из известных элементарных частиц не может служить источником этого эффекта! Возможно, здесь мы впервые столкнулись со сгустком «гипотетической стабильной кварковой материи», из которой состоят пульсары. Были подробно описаны методы измерений излучения от таких источников и те результаты, которые на сегодняшний день можно считать надежными.

По-прежнему не ослабевают усилия, направленные на исследование составных схем кварков и лептонов. Составные модели, а также связанные с ними вопросы большого объединения обсуждались в целом ряде докладов. Прежде всего следует отметить лекцию Дж. Л. Чкареули «Составные кварки и лептоны и горизонтальная симметрия». В ней рассматривалась составная модель кварков и лептонов с радиусом конфайнмента преонов порядка планковских расстояний. Показано, что киральный метациклет преонов $SO(9)_L \otimes SO(9)_R$ однозначно (согласно условию самосогласованности 'т Хоофта) выбирает в качестве группы симметрии составных кварков и лептонов группу $SU(8)$, содержащую стандартную симметрию великого объединения $SU(5)$ и горизонтальную симметрию $SU(3)_H$, преобразующую кварк-лептонные поколения друг в друга. Обсуждался вариант модели с составными калибровочными полями. В заключении были приведены аргументы из теории суперструн в пользу существования нового уровня элементарности, отвечающего преонам.

В сообщении Ю. Ф. Пирогова «Составные лептоны и кварки: экспериментальные ограничения и следствия» обсужден современный статус составных моделей лептонов и кварков. Рассмотрен метод эффективных лагранжианов для анализа возможных проявлений составной природы. Из анализа редких процессов и процессов рассеяния при относительно низких энергиях найдены ограничения на обратный радиус составных кварков (лептонов) Λ . Проанализированы теоретические неопределенности, входящие в определение этого масштаба. Показано, что современным экспериментальным данным не противоречит значение $\Lambda \geq 1$ ТэВ. Обсуждены возможности улучшения этого ограничения (или наблюдения эффектов составленности) на ускорителях будущего поколения. Показано, что реально продвижение до значений $\Lambda \lesssim (10) \text{ ТэВ}$.

Доклад А. А. Тяпкина назывался «Об одном варианте составной структуры кварков». В нем рассматривалась составная модель кварков на основе постулированного сильного притяжения между первичными фермионами и антифермионами, аналогичного притяжению в модели Ферми — Янга. При этом цвет интерпретировался как способность кварка находиться в трех состояниях, отличающихся наборами целочисленных значений заряда и барионного числа. Обмен заряженными и нейтральными антифермионами, по мнению автора, приводит к изменению цвета кварков и связывает их в единую систему — адрон.

Феноменология большого объединения обсуждалась в трех интересных докладах, которые продолжали идеи, изложенные в лекциях Дж. Чкареули и М. И. Высоцкого. Сообщение З. Г. Бережани и Дж. Л. Чкареули «Гори-

зонтальная симметрия и статус модели Кобаяши — Маскавы» было посвящено феноменологическим следствиям горизонтальной симметрии кварк-лептонных поколений $SU(3)_H$; центральные пункты — обратная иерархия масс нейтрино $m_{\nu_e} : m_{\nu_\mu} : m_{\nu_\tau} = m_u^{-1} : m_c^{-1} : m_t^{-1}$; усиление канала распада протона через цветные скалярные триплеты; малые углы Кобаяши — Маскавы $s_1 = 0,22$, $s_2 = 0,04-0,1$, $s_3 = 0,01-0,025$ (в зависимости от состава скаляров, нарушающих $SU(3)_H$) и фаза спонтанного CP -нарушения $\delta = \pi/2$; масса t -кварка $m_t = 35-75$ ГэВ. Рассмотрен статус модели Кобаяши — Маскавы для этих значений параметров и получено хорошее согласие с опытом.

В докладе З. Г. Бережiani, Г. Р. Двали, М. Р. Джибути, Дж. Л. Чкареули «Суперсимметрия и поколения кварков и лептонов» рассмотрен суперсимметричный вариант горизонтальной симметрии $SU(3)_H$, преобразующей поколения кварков и лептонов друг в друга. Показано, что, в отличие от обычного потенциала (допускающего два возможных решения для вакуумных средних скаляров, нарушающих $SU(3)_H$), суперпотенциал в самом общем случае оставляет только одно решение — с массовой иерархией между поколениями.

Ориентация на экспериментальные аспекты еще более проявилась в докладе В. А. Картвелишвили, Е. Т. Чиковани, Ш. М. Эсакия «Тяжелые векторные мезоны в процессах рождения и распада хиггсовских частиц». Сообщено о вычислении сечения рождения хиггсовских частиц и парциальных ширин их распадов в тяжелые кварконии (топоний, боттомоний). Показано, что фоновые условия вполне позволяют обнаружить хиггсовскую частицу (в разумном интервале масс) на строящихся ускорителях.

Традиционная тематика — сильные взаимодействия при высоких энергиях и теория адронов — также была представлена достаточно полно. В докладе «Как отличить аддитивные и вычитательные кварки» Б. З. Копелиович предложил изучать реакции квазисвободной перезарядки на ядрах типа $\pi^- \rightarrow \pi^0$, $\pi \rightarrow \eta$ и т. п. Второй тип моделей предсказывает в этом случае «просветление» ядер для адронных конфигураций малых размеров. Обзор данных и теоретической ситуации по асимптотике нуклон-нуклонных сечений был дан Н. Н. Николаевым. Показано, что положение эффективного полюса Померанчука $\Delta_{eff} \approx 0,25-0,35$, поскольку $\sigma_{eff}(pp)$ достигает $160-200$ мбн при $E = 10^9-10^9$ ГэВ.

В лекции Г. С. Ирошников «Квантование хромoeлектрического потока и действия релятивистской струны» обсуждалось квантование потока и действия из условия однозначности решения уравнений поля. Эти уравнения возникают из вариации эффективного действия для адронных полевых корреляторов в КХД. Их решение описывает релятивистскую струну с кварками на концах. Число квантов Q в потоке является топологическим числом. Явление квантования целиком обусловлено неабелевым характером теории и исчезает при переходе к абелевому пределу.

Обзор новых данных и теоретической ситуации по адронным соударениям был сделан А. Б. Кайдаловым. Согласно его результатам по описанию спектров адронов Δ_{eff} меньше, чем у Николаева, примерно $0,15$. С интересной работой, посвященной описанию рождения очарованных частиц в соударениях адронов высоких энергий, выступила О. И. Пискунова.

Исследования по проблеме структуры вакуума КХД в рамках модели «инстантонной жидкости» были доложены Э. В. Шуряком. Показано, что эта модель правильно воспроизводит явления, связанные со спонтанным нарушением киральной симметрии.

М. А. Шифман сделал обзор теоретической ситуации, возникшей после недавних измерений времен жизни очарованных частиц. Им была показана принципиальная роль обменов мягкими глюонами для понимания механизма этих распадов. Были продемонстрированы возможности КХД в описании огромного массива данных по эксклюзивным распадам D - и F -мезонов.

На школе обсуждались вопросы, связанные с физикой кварк-глюонной плазмы. Интересное сообщение об обнаружении аномальных событий в эксперименте «Памир» было сделано Г. Б. Ждановым, а обзор теоретической ситуации сделал Л. В. Фильков. Он особо остановился на аннигиляции \bar{p} и \bar{d} в ядрах как методе образования сильновозбужденных кластеров адронного вещества.

В области адронной спектроскопии резонанс вызвал доклад И. М. Дремина. В нем было показано, что достаточно резкий переход от «токовых» к «конституентным» кваркам на расстоянии $\sim 0,1$ Фм может решить ряд проблем теории ипсилон-мезонов при совершенно новых предсказаниях для топония.

И. И. Ройзен обсудил другое проявление роста эффективной массы конституентных кварков с расстоянием: им найдены траектории померона и векторных мезонов в рамках некоторых модельных предположений.

Феноменология нейтрализации цветного и электрического зарядов в струях была предметом сообщения И. М. Дремина и А. В. Леонидова. Было предложено измерять время экранировки цветного тока по излучению жестких фотонов в e^+e^- -аннигиляции.

Доклад Э. В. Шурыка «Существует ли стабильная кварковая материя?» носил междисциплинарный характер. В докладе обсуждался вопрос о том, реализуется ли минимум энергии на барион в обычном ядерном веществе или существует еще более выгодное по энергии состояние — стабильная кварковая материя (СКМ). На то, что последняя возможность не закрыта, недавно обратил внимание Виттен, показавший, что в любом случае СКМ не может рождаться в лабораторных условиях. Он предложил космологический механизм образования СКМ, который мог бы объяснить природу «темного вещества» в галактиках. Более реальный источник СКМ — пульсары, поэтому этот вопрос был поднят в связи с загадочным мюонным сигналом от Лебедя X-3, который не может быть объяснен известными элементарными частицами.

С большим вниманием было выслушано сообщение М. Высоцкого «Магнитный момент нейтрино и временные изменения потока солнечных нейтрино» (по работе М. Б. Волошина, М. И. Высоцкого, Л. Б. Окуня). Наличие у нейтрино магнитного момента $\mu_\nu \sim 10^{-10} \mu_B$ должно приводить к вариациям наблюдаемого потока солнечных нейтрино, которые связаны с магнитной активностью Солнца. Для нейтрино, образующихся в pp -реакции, должны наблюдаться 11-летние вариации потока, антикоррелирующие с солнечной активностью. Для борных и бериллиевых нейтрино в годы максимальной солнечной активности должны иметь место полугодовые вариации наблюдаемого потока нейтрино, обусловленные наличием экваториальной «щели» в тороидальном магнитном поле Солнца и наклоном солнечного экватора по отношению к плоскости эклиптики. В эксперименте Дэвиса действительно имеет место уменьшение потока нейтрино в начале марта и сентября в 1979—1982 гг. на уровне 3σ .

Нейтринная физика была также предметом сообщения В. А. Царева. Было показано, что вещество Земли может существенно увеличить амплитуду осцилляций нейтрино $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ ускорительных энергий ($E_\nu \sim 1 \div 10^3$ ГэВ) на длинах $l \sim 10^4$ км. При $\Delta m^2/E_\nu \sim 10^{-3}$ эВ²/ГэВ $P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e}$ становится порядка единицы даже при $\theta_\nu \ll 1$. Это упрощает поиски осцилляций и повышает чувствительность нейтринного зондирования Земли по сравнению с методом поглощения в 10^3 — 10^7 раз.

Нейтринная секция завершилась докладом И. М. Железных: «Экспериментальные и теоретические проблемы детектирования нейтрино в океане, массивах льда, атмосфере Земли». В нем была рассмотрена возможность регистрации потоков естественных нейтрино и других частиц сверхвысоких энергий ($E_{\nu_{\text{пор}}} \sim 10^{12}$ эВ) глубокоководными оптическими детекторами (проект ДЮМАНД) и радиодетекторами, прослушивающими объем 10^9 —

-10^{11} м³ низкотемпературного льда ($t \sim -50^\circ \text{C}$) в Антарктиде ($E_{\text{впор}} \sim 10^{14}$ эВ). Обсуждены проблемы изучения верхней границы энергетического спектра нейтрино (10^{20} — 10^{28} эВ), проблемы нейтринной астрофизики, физики космических лучей. Намечены перспективы использования радиодетекторов нейтрино в массивах льда для измерения потока $\bar{\nu}_e$ в области энергии $5 \cdot 10^{15}$ эВ по резонансной реакции $\bar{\nu}_e e \rightarrow W \rightarrow \text{адроны}$.

Несмотря на теоретическую направленность школы, много внимания было уделено экспериментальным работам. Область космофизических экспериментов и экспериментов в масштабе земного шара уже обсуждалась выше. В них сохраняют важную роль установки по регистрации ШАЛ. Обсуждению перспектив таких исследований на Цхра-Цхаро был посвящен семинар Д. М. Котляревского и Б. И. Лучкова.

В. А. Никитин представил обзор материалов традиционных конференций по взаимодействиям лептонов и фотонов и поляризационным явлениям в ядерной физике (Япония, 1985 г.). В нем были отражены результаты по уточнению свойств W^\pm - и Z^0 -бозонов, по рождению и распадам частиц, содержащих b и c кварки, об открытии второго возбужденного состояния D-мезона с массой 2420 ± 6 МэВ/с², по поиску суперсимметричных частиц, возбужденных лептонов и новых типов кварков в освоенной области энергий в с. п. м. до 900 ГэВ. Обсуждался прогресс в технике эксперимента, новые типы камер и устройств для считывания информации. Отмечено, что в условиях больших установок возникает необходимость избыточности надежности и информативности событий. Приведены программы создания ускорителей в крупнейших мировых центрах исследований по физике высоких энергий.

Представленные результаты экспериментов на Серпуховском ускорителе были получены в пучках антипротонов на установке РИСК (ОИЯИ) и пузырьковой камере «Мирабель» (ИФВЭ). Л. А. Габуния привела сравнительный анализ свойств событий с вылетающими назад протонами во взаимодействиях антипротонов с импульсом 40 ГэВ/с с ядрами. Оживленную дискуссию вызвало обсуждение зависимости характеристик таких событий от атомного номера ядра и роли каскадных процессов. Отмечалось, что при рассматриваемых энергиях существенна роль процесса аннигиляции антипротона при соударениях с нуклонами и ядрами.

Модели множественного образования частиц на ядрах обсуждались в докладе Б. Б. Левченко.

Детальный анализ-обзор свойств $\bar{p}p$ -аннигиляции по сравнению с неаннигиляционными взаимодействиями по результатам эксперимента при импульсе антипротонов 32 ГэВ/с был сделан Л. Н. Смирновой. В результате анализа характеристик пар нейтральных странных частиц в этом же эксперименте с использованием струнной кварк-глюонной модели и стандартной модели Лунда Н. А. Круглов в своем докладе отдал предпочтение первой из моделей.

Э. П. Кистенев представил полученные впервые инклюзивные спектры векторных D^* -мезонов и отношения выходов векторных и псевдоскалярных очарованных мезонов в $\bar{p}p$ - и pp -взаимодействиях при импульсе 360 ГэВ/с.

В докладе М. В. Данилова приведен ряд недавних результатов группы АРГУС. Обнаружение распада $D^0 \rightarrow \bar{K}^0 \phi$ явилось первым экспериментальным свидетельством вклада аннигиляционных диаграмм в распадах очарованных частиц. Учет такого вклада позволяет в первую очередь объяснить различие времен жизни заряженных и нейтральных D-мезонов. Обнаружение инклюзивного распада $B \rightarrow J/\psi + X$ дает новую информацию о применимости правил отбора по цвету. Большие значения массы системы X в этом распаде указывают на важность спектаторного механизма в этой реакции. Исследование свойств нового очарованного мезона D^* (2420) показало, что

спектроскопия возбужденных состояний очарованных частиц дает еще одну возможность проверки теории сильных взаимодействий.

Как всегда, несмотря на напряженную программу школы, было уделено достаточно времени для вопросов и дискуссий, что особенно привлекательно на школе, охватывающей столь широкий спектр проблем. Прекрасная организация работы школы, которую обеспечил оргкомитет во главе с Дж. Л. Чкареули, дружеская атмосфера способствовали активному общению физиков, стимулировали их дальнейшую творческую активность.

Л. Н. Смирнова, М. А. Шифман, Э. В. Шуряк