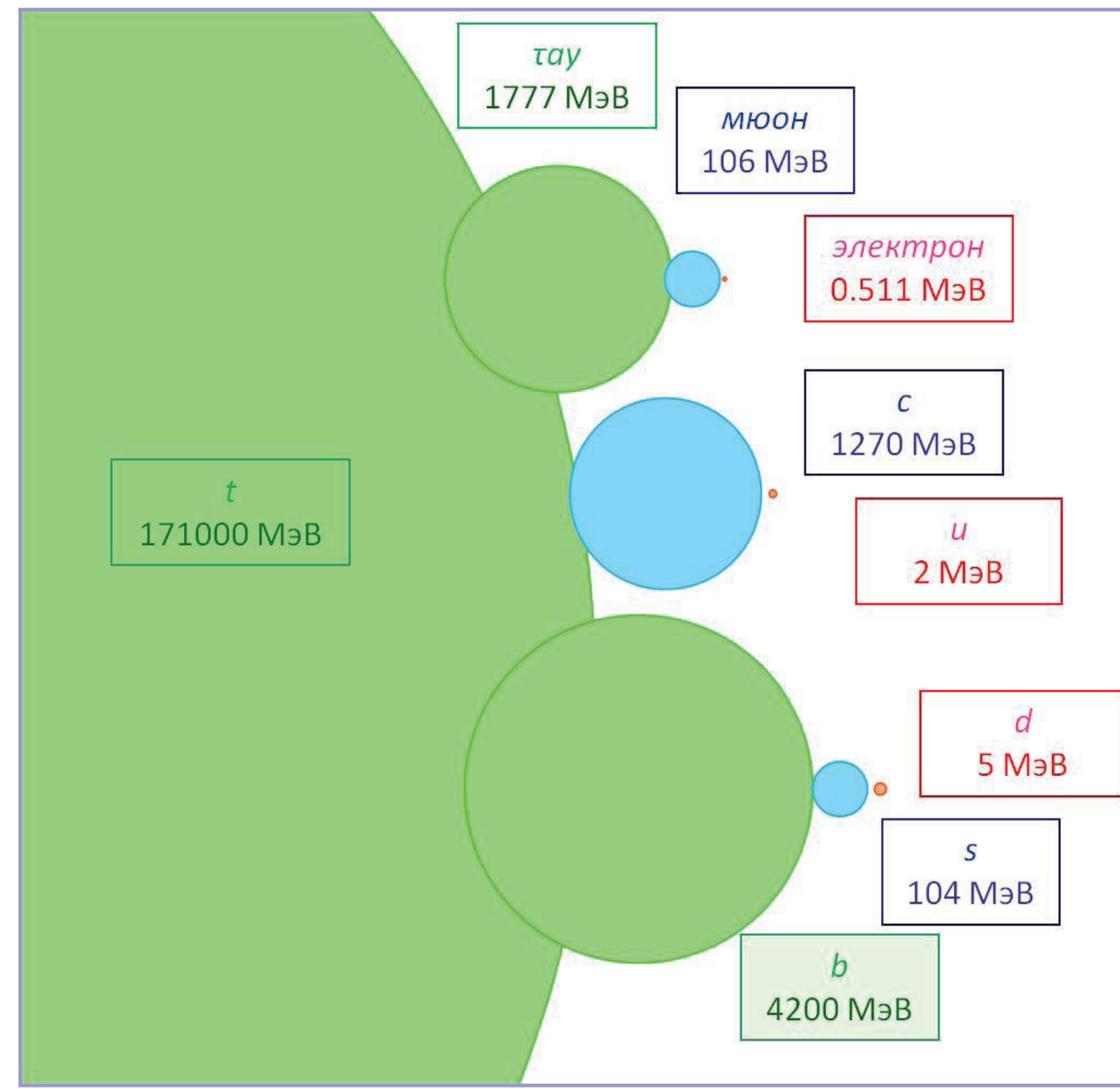


КАФЕДРА ФИЗИКИ ЧАСТИЦ И КОСМОЛОГИИ

Научные направления

<http://ppc.inr.ac.ru>

Параметры Стандартной модели



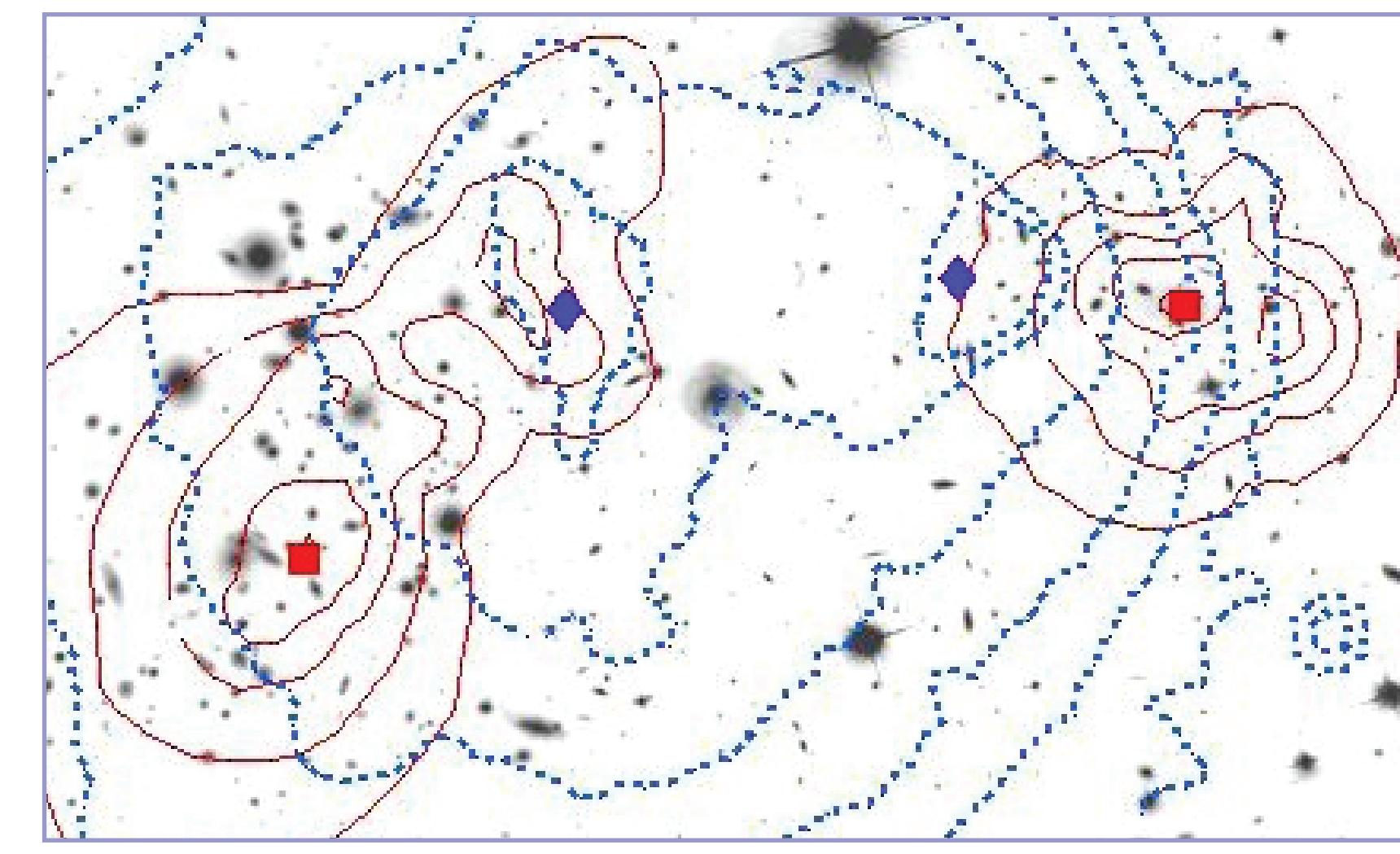
Стандартная модель элементарных частиц и их взаимодействий прекрасно описывает результаты коллайдерных экспериментов, однако содержит 19 произвольных параметров с весьма специфическими значениями. Так, в природе имеется три поколения夸克ов и лептонов с абсолютно одинаковыми взаимодействиями, но на порядки отличающимися массами (рис. слева: площади кружков пропорциональны массам). Параметр, отвечающий за нарушение CP-симметрии в сильных взаимодействиях, равен или почти равен 0, что означает точное сокращение больших вкладов разного происхождения. Энергетические масштабы взаимодействий Стандартной модели (например, электротяговый масштаб, связанный с массой бозона Хиггса) на много порядков меньше масштаба гравитационного взаимодействия (рис. вверху).

Объяснение иерархии значений параметров Стандартной модели требует построения более общей теории.

ПРОБЛЕМЫ НА СТЫКЕ ТЕОРИИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, КОСМОЛОГИИ И АСТРОФИЗИКИ

- квантовая теория поля
 - развитие методов
 - исследование моделей
 - модификация ОТО
- модели физики элементарных частиц
 - расширения Стандартной модели
 - суперсимметрия
 - дополнительные пространственные измерения
 - модели на основе AdS/CFT-соответствия
- современные проблемы космологии
 - тёмная материя
 - ускоренное расширение Вселенной (тёмная энергия)
 - инфляция и альтернативные модели
- астрофизика элементарных частиц
 - изучение частиц методами астрофизики
 - поиск новых частиц и взаимодействий
 - изучение астрофизических объектов методами физики частиц

Тёмная материя во Вселенной



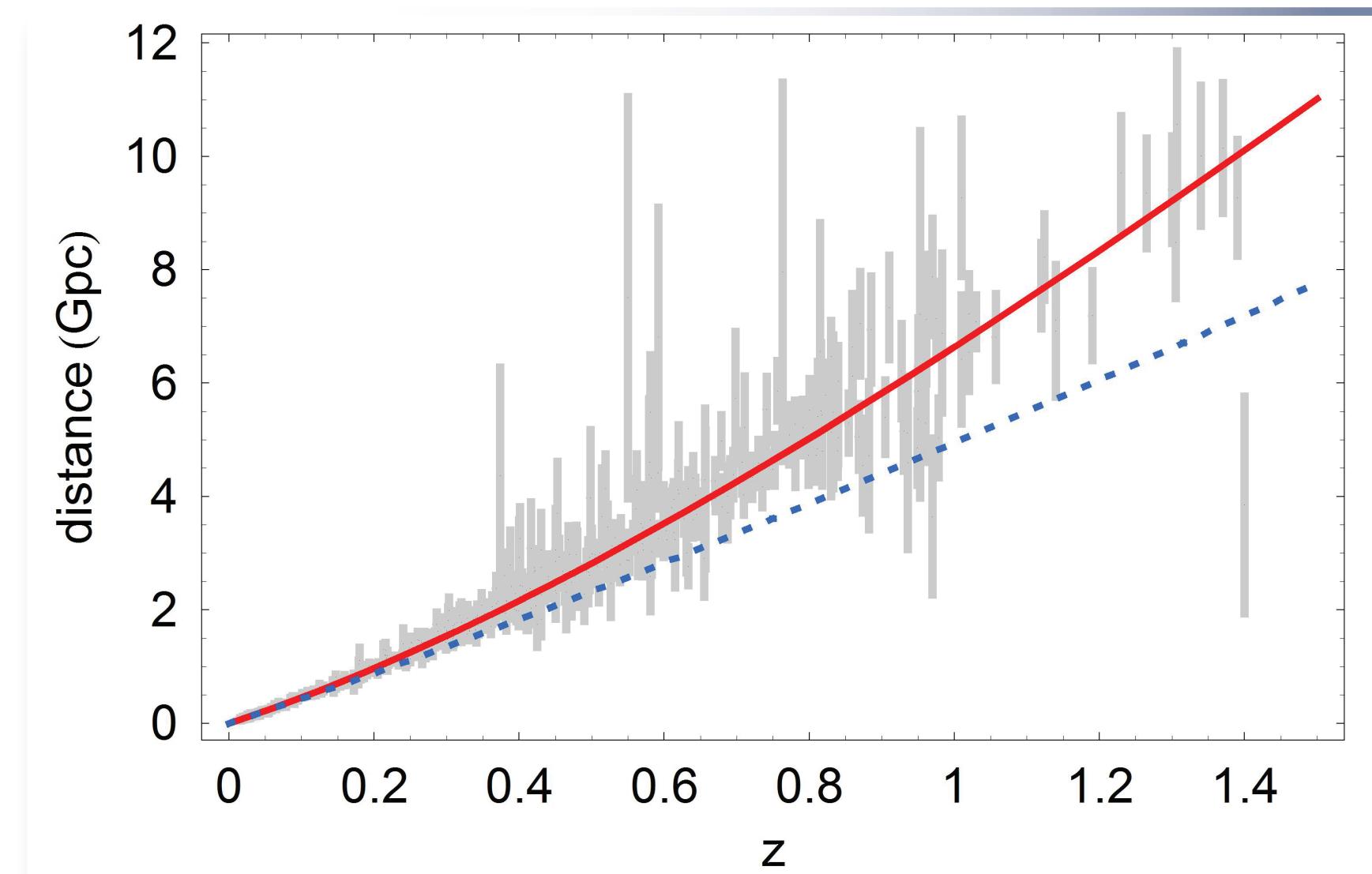
Данные астрофизических наблюдений указывают, что видимое вещество составляет около 1/5 от всей материи во Вселенной. Пунктирные кривые показывают распределение горячей плазмы (90% видимого вещества) скапливающихся скоплений галактик 1E0657-558 (рентгеновский телескоп Chandra; максимумы — ромбы). Сплошные контуры — гравитационный потенциал (восстановленный по гравитационному линзированию галактик, лежащих за скоплениями; максимумы — квадраты). Видно, что распределение массы, создающей гравитационный потенциал, и распределение обычного вещества сильно различаются.

Множество экспериментов, в том числе на Большом адронном коллайдере, пока не обнаружили частиц темной материи. Свойства этих частиц, определенные из астрономических наблюдений и ограниченные отрицательными результатами поисков, указывают, что для их описания требуется новая теоретическая модель.

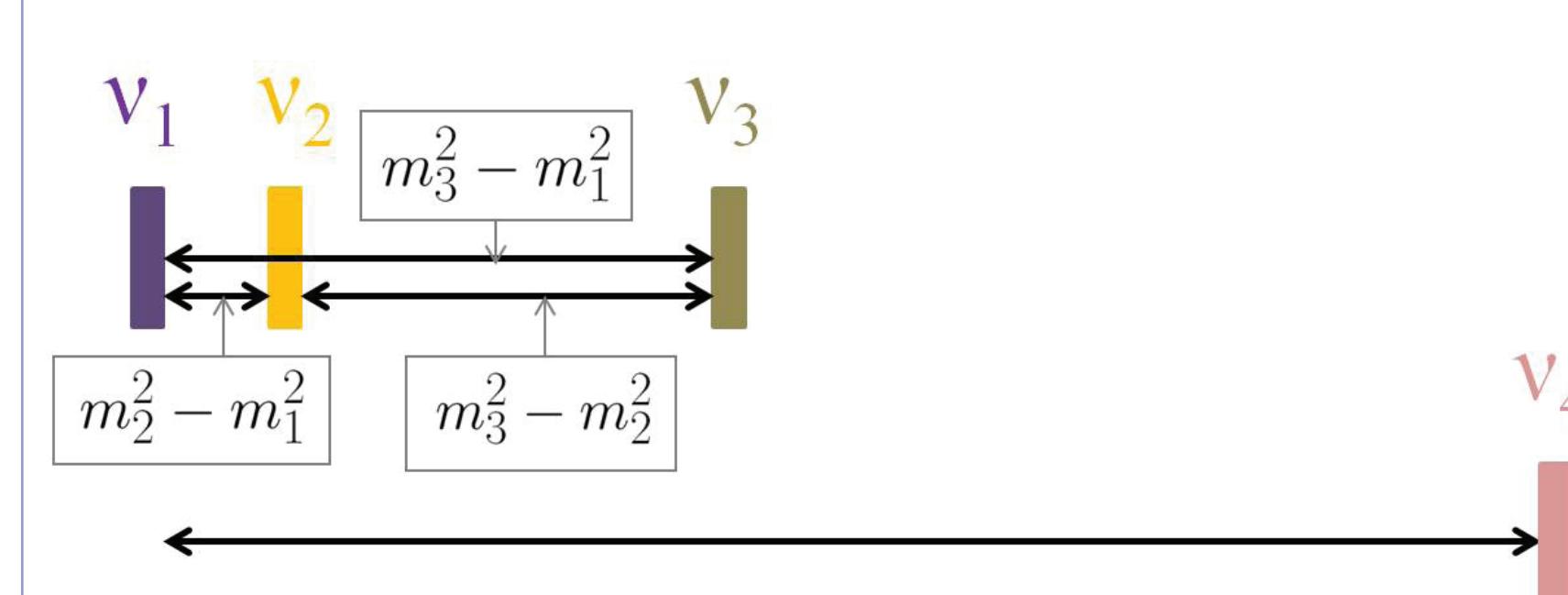
Ускоренное расширение Вселенной (тёмная энергия)

(Нобелевская премия по физике 2011 года)
Диаграмма Хаббла — зависимость расстояния от красного смещения з спектральных линий далёких галактик, — построенная по наблюдениям сверхновых типа Ia. Серые линии — данные по отдельным сверхновым с экспериментальными ошибками (2010 г.). Равномерное расширение Вселенной соответствует нижней линии (пунктирной), ускоренное — верхней (сплошной). Вывод об ускоренном расширении Вселенной можно сделать и из многих других результатов наблюдений.

Ускоренное расширение можно объяснить тем, что ~70% энергии Вселенной составляет неизвестная, равномерно распределенная (не образующая галактики и скопления) компонента — тёмная энергия. Природа темной энергии — одна из важнейших загадок естествознания.



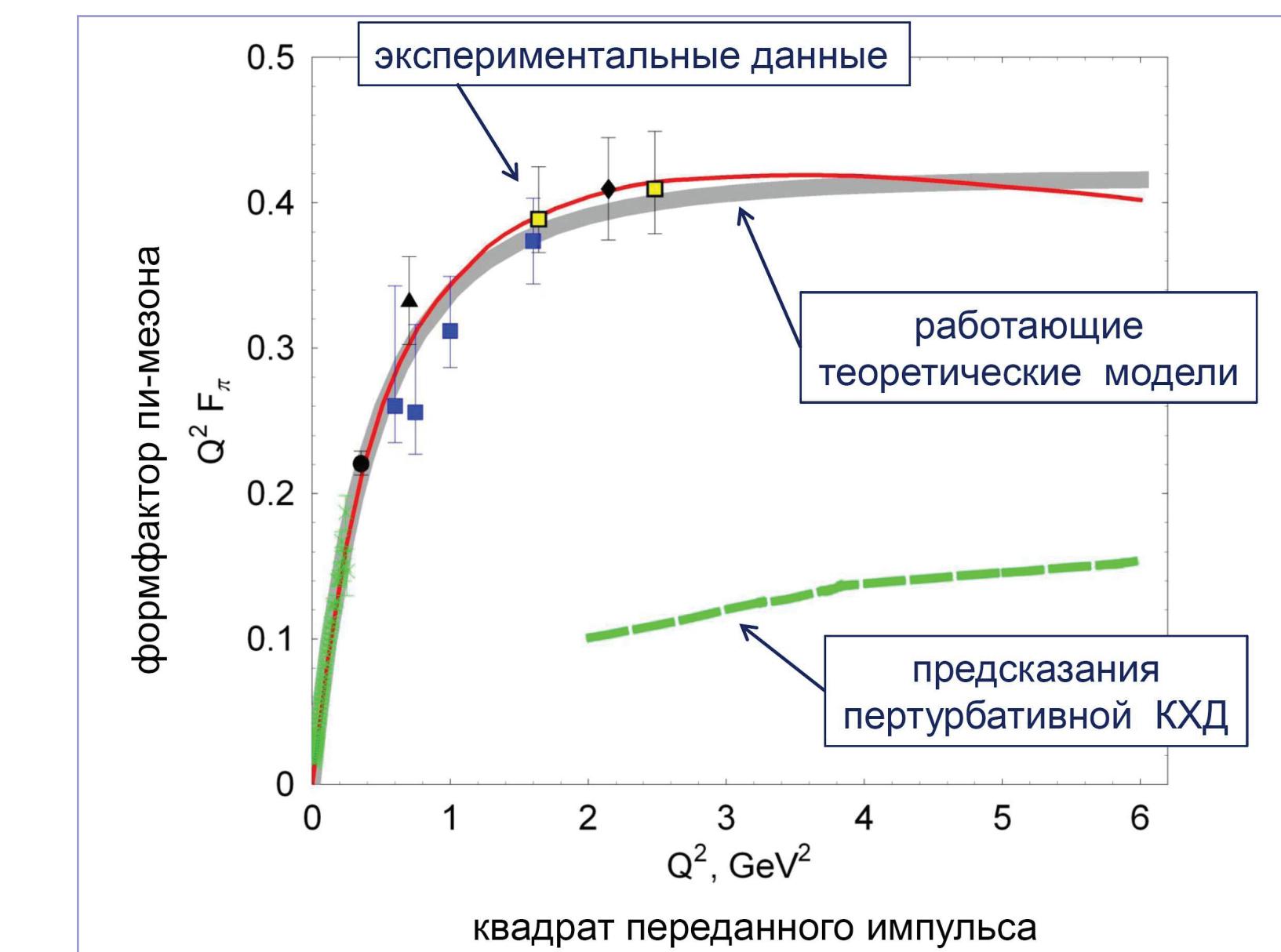
Осцилляции нейтрино и антинейтрино



В Стандартной модели — три типа нейтрино (электронное, мюонное и тау), и их взаимные превращения запрещены законами сохранения. Надежно установленный в экспериментах факт таких превращений нейтрино (осцилляции нейтрино) является экспериментальным доказательством необходимости расширения Стандартной модели — пока неизвестно, какого именно. Осцилляционные эксперименты позволяют определить разницу квадратов масс нейтрино со соответствующими типами. В последнее время появился целый ряд указаний на то, что таких линейно независимых разниц квадратов масс больше, чем две, а значит, типов нейтрино больше, чем три. Доказано, что такие дополнительные нейтрино не взаимодействуют обычным образом, поэтому их называют стерильными.

Осцилляции нейтрино требуют расширения Стандартной модели и вносят в теорию частиц новые необъясненные параметры.

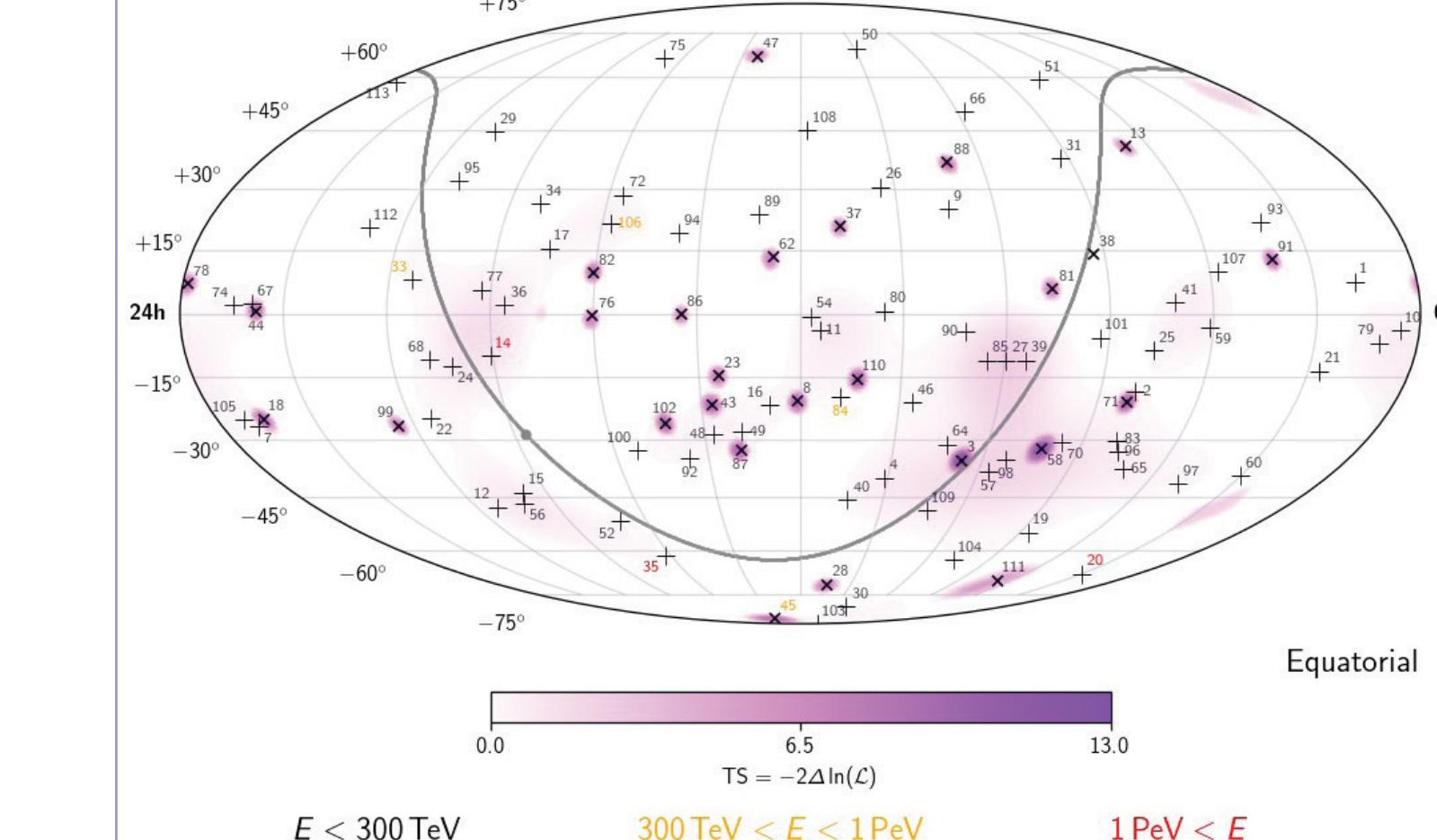
Сильные взаимодействия



В настоящее время основным методом квантовой теории поля является теория возмущений по малой константе связи. Метод теории возмущений, однако, неприменим для описания теории сильных взаимодействий — квантовой хромодинамики (сильные взаимодействия — большая константа связи!). Это не означает, что квантовая хромодинамика — неправильная теория. Это означает, что её нельзя применить и проверить в области низких энергий.

Описание квантовой хромодинамики в режиме сильной связи составляет одну из основных нерешенных проблем квантовой теории поля.

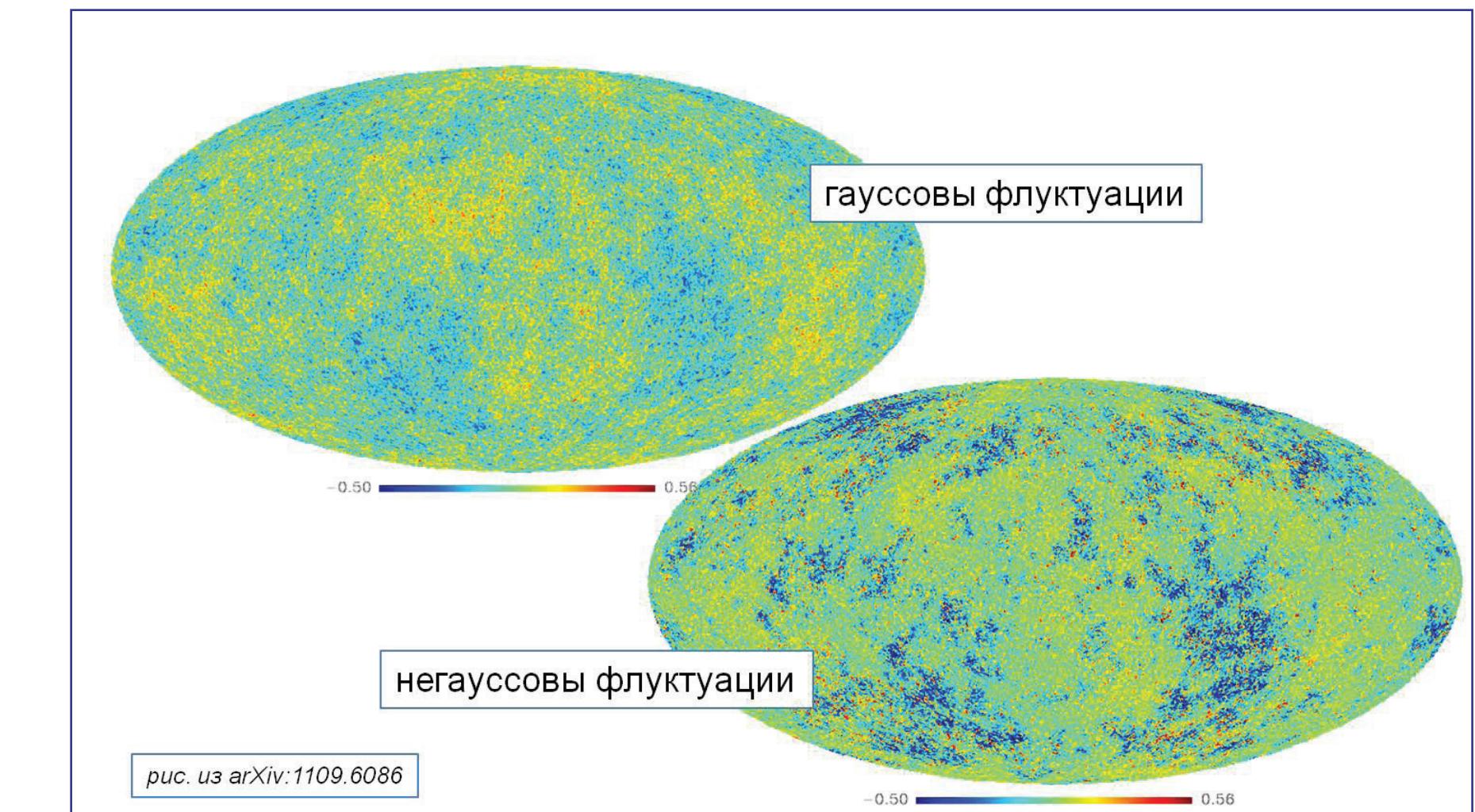
Астрофизические нейтрино



Нейтрино высоких энергий, регистрируемые специальными детекторами, в основном рождаются во взаимодействиях космических лучей с атмосферой Земли (так называемые атмосферные нейтрино). Однако с 2013 эксперимент IceCube (а с 2019 года также и Baikal-GVD) регистрирует и нейтрино, которые имеют, по-видимому, астрофизическое происхождение. Потоки этих нейтрино, распределение направлений прихода на небе и отсутствие ожидаемого сопутствующего гамма-излучения плохо согласуются с предсказаниями большинства известных моделей астрофизических источников. Лишь в 2020 году удалось получить статистически значимые наблюдательные указания на происхождение значительной части таких нейтрино в активных галактиках. При этом возможно, что часть нейтрино рождается в нашей Галактике.

Объяснение природы астрофизических нейтрино высоких энергий и механизмов их рождения — одна из наиболее горячих тем сегодняшней астрофизики частиц.

Очень ранняя Вселенная



Во Вселенной ещё до стадий генерации тёмной материи и асимметрии между веществом и антивеществом почти навсегда была эпоха, ответственная за то, что наша Вселенная имеет такой большой размер и такую малую кривизну. Наиболее популярная гипотеза об этой эпохе — теория инфляции, многие из вариантов которой хорошо описывают имеющиеся наблюдательные данные. Но имеются и другие работающие модели, выбор между которыми на сегодня сделает затруднительно. Одним из подходов является детальное статистическое исследование флюктуаций реликтового излучения: отклонения от гауссовой статистики могут указать на справедливость более сложных моделей.

Вопрос о том, как конкретно и почему происходила инфляция, остается нерешенным. А может быть, окажутся справедливыми неинфляционные модели?..

КАФЕДРА ФИЗИКИ ЧАСТИЦ И КОСМОЛОГИИ

приглашает студентов



Заведующий кафедрой, академик В.А. Рубаков — один из ведущих мировых специалистов в области квантовой теории поля, физики элементарных частиц и космологии. Его работы внесли основополагающий вклад в различные разделы теории ранней Вселенной (происхождение барионной асимметрии Вселенной, инфляция и ее альтернативы), непертурбативной квантовой теории поля (квазиклассические методы, инстантные вклады в вероятности рождения частиц при высоких энергиях), физики за пределами Стандартной модели элементарных частиц (объединенные теории взаимодействий, модели с дополнительными пространственными измерениями).

В.В. Белокуров — доктор физ.-мат. наук, профессор. Его научные интересы связаны с математическими проблемами квантовой теории поля, квантовыми вычислениями и квантовыми коммуникациями. Им разработаны принципиально новые подходы к теории возмущений в квантовой теории поля и теории суперструн; для задач квантовой механики, квантовой теории поля и статистической физики разработана новая теория возмущений со сходящимися рядами (в отличие от традиционной, оперирующей расходящимися асимптотическими разложениями), разработан новый подход к обоснованию локальной квантовой теории поля как предела нелокальной.

Научные интересы академика РАН **И.И. Ткачёва** включают космологию, физику частиц и астрофизику. Им было показано, что процессы распада вакуумного состояния раздувающейся Вселенной и её разогрева допускают классическое описание, что позволило решить задачу интенсивного рождения полей материи в конце стадии инфляции, установления равновесия и перехода Вселенной в горячее состояние. Введенные им явления мелкомасштабной кластеризации и потоков в фазовом пространстве, вызванных аккрецией темного вещества в гало Галактики, важны при экспериментальном поиске и отождествлении природы тёмной материи. Он является автором пионерских работ по астрономии космических лучей сверхвысоких энергий.

Д.С. Горбунов — доктор физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН, специалист в области теории элементарных частиц, космологии и астрофизики частиц сверхвысоких энергий. Среди его интересов — поиск отклонений от Стандартной модели физики частиц, суперсимметрия, нестандартные подходы к космологии. Им получен ряд известных результатов, относящихся к «редким процессам» в суперсимметрических моделях, инфляционной теории, физике космических лучей сверхвысоких энергий. Совместно с В.А. Рубаковым, он является автором двухтомного учебника «Введение в теорию ранней Вселенной».

С.В. Троицкий — доктор физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН — специалист в области физики и астрофизики элементарных частиц высоких и сверхвысоких энергий. Среди его научных интересов — физика частиц за пределами Стандартной модели и исследования на стыке физики частиц и астрофизики, в том числе модели с новыми сверхлёгкими частицами и с дополнительными пространственными измерениями; объяснение иерархии констант Стандартной модели, в том числе фермионных масс; изучение происхождения космических частиц и астрофизических нейтрино высоких и сверхвысоких энергий; поиск проявлений новой физики частиц в космических лучах, а также методами гамма-, нейтрино и обычной астрономии; динамика квантовых полей в режиме сильной связи. Им был получен ряд известных результатов, относящихся к исследованию моделей теории поля в непертурбативном режиме, физике космических лучей и астрофизике элементарных частиц.

Среди направлений, интересующих других сотрудников кафедры, — теория элементарных частиц за пределами Стандартной модели, в частности суперсимметрия (Д.С. Горбунов, С.В. Демидов) и модели с дополнительными пространственными измерениями (М. В. Либанов); квазиклассические методы (Д.Г. Левков, Э.Я. Нураев, А.Г. Панин, П.С. Сатунин); астрофизика элементарных частиц (Г.И. Рубцов, С. В. Троицкий).

Альберт Никифорович Тавхелидзе — (1930 — 2010) — академик, основатель кафедры, выдающийся физик-теоретик, занимавшийся проблемами теории элементарных частиц и физики высоких энергий. Ученник и соавтор Н. Н. Боголюбова, он всемирно известен своими работами по квантовой теории поля и физике частиц. Совместно с Н. Н. Боголюбовым и Б. В. Струминским им было введено новое квантовое число — «цвет»夸克ов, с помощью которого были решены многие трудности кварковой модели адронов. Связанная с этим числом калибровочная симметрия $SU(3)$ лежит в основе квантовой хромодинамики, сейчас являющейся стандартной теорией сильных взаимодействий элементарных частиц высоких энергий. Совместно с В. А. Матвеевым и Р. М. Мурядном им была открыта общая закономерность поведения сечений упругого рассеяния с участием адронов при больших передачах импульса. А. Н. Тавхелидзе — основатель и первый директор Института ядерных исследований РАН.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ КУРСЫ

Квантовая теория поля

- введение в квантовую теорию поля
- калибровочные поля
- избранные главы квантовой теории поля

Классические калибровочные поля

Введение в теорию ранней Вселенной

- теория горячего Большого Взрыва
- инфляционная теория

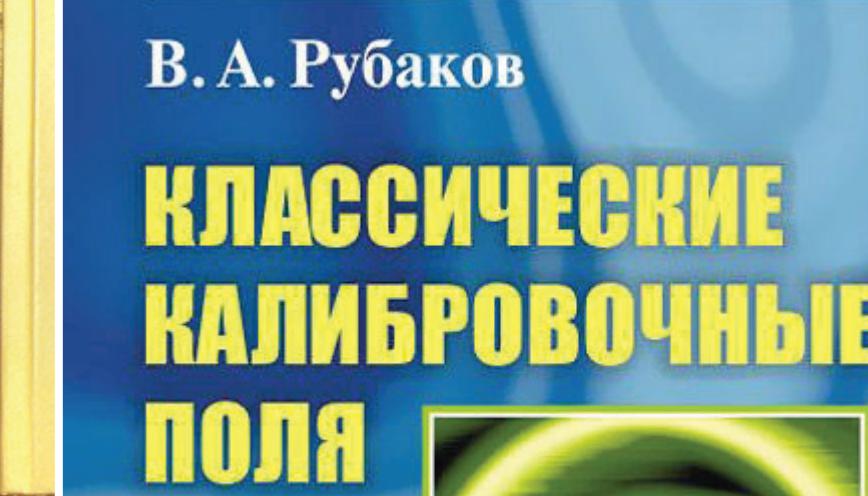
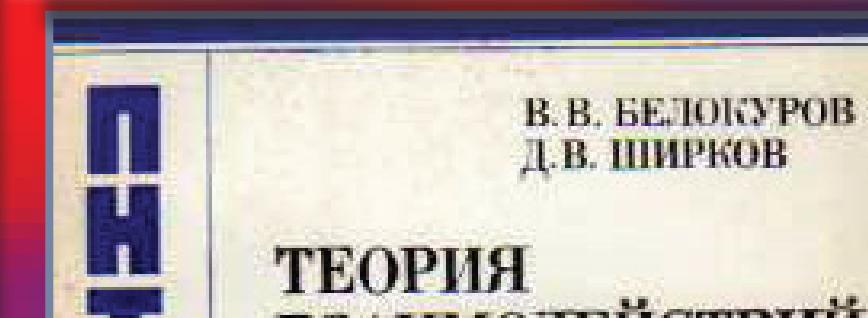
Теория элементарных частиц

- физика элементарных частиц
- суперсимметрия
- физика на коллайдерах

Элементарные частицы и астрофизика

Общая теория относительности

Теория групп



Учебники и монографии

Белокуров В.В., Ширков Д.В. Теория взаимодействий частиц. М.: Наука, 1986.

Белокуров В.В., Тимофеевская О.Д., Хрусталев О.А. Квантовая телепортация — обыкновенное чудо. М.: УРСС, 2002.

Соловьев Ю.П., Садовничий В.А., Шавгунидзе Е.Т., Белокуров В.В. Эллиптические кривые и современные алгоритмы теории чисел. М.: УРСС, 2003.

Рубаков В. А. Классические калибровочные поля. Бозонные теории. М.: УРСС, 2005.

Рубаков В. А. Классические калибровочные поля. Теории с фермионами. Некоммутативные теории. М.: УРСС, 2009.

Горбунов Д. С., Рубаков В. А. Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого Взрыва. М.: УРСС, 2008.

Горбунов Д. С., Рубаков В. А. Введение в теорию ранней Вселенной: Космологические возмущения, инфляционная теория. М.: УРСС, 2010.

Горбунов Д. С., Рубаков В. А. Введение в теорию ранней Вселенной: Космологические возмущения, инфляционная теория. М.: УРСС, 2010.

Рубаков В. А., Шапошников М.Е. Электролюминесценция несокрушенные барионные числа в ранней Вселенной и в столкновениях частиц при высоких энергиях // УФН 166 (1996) 493.

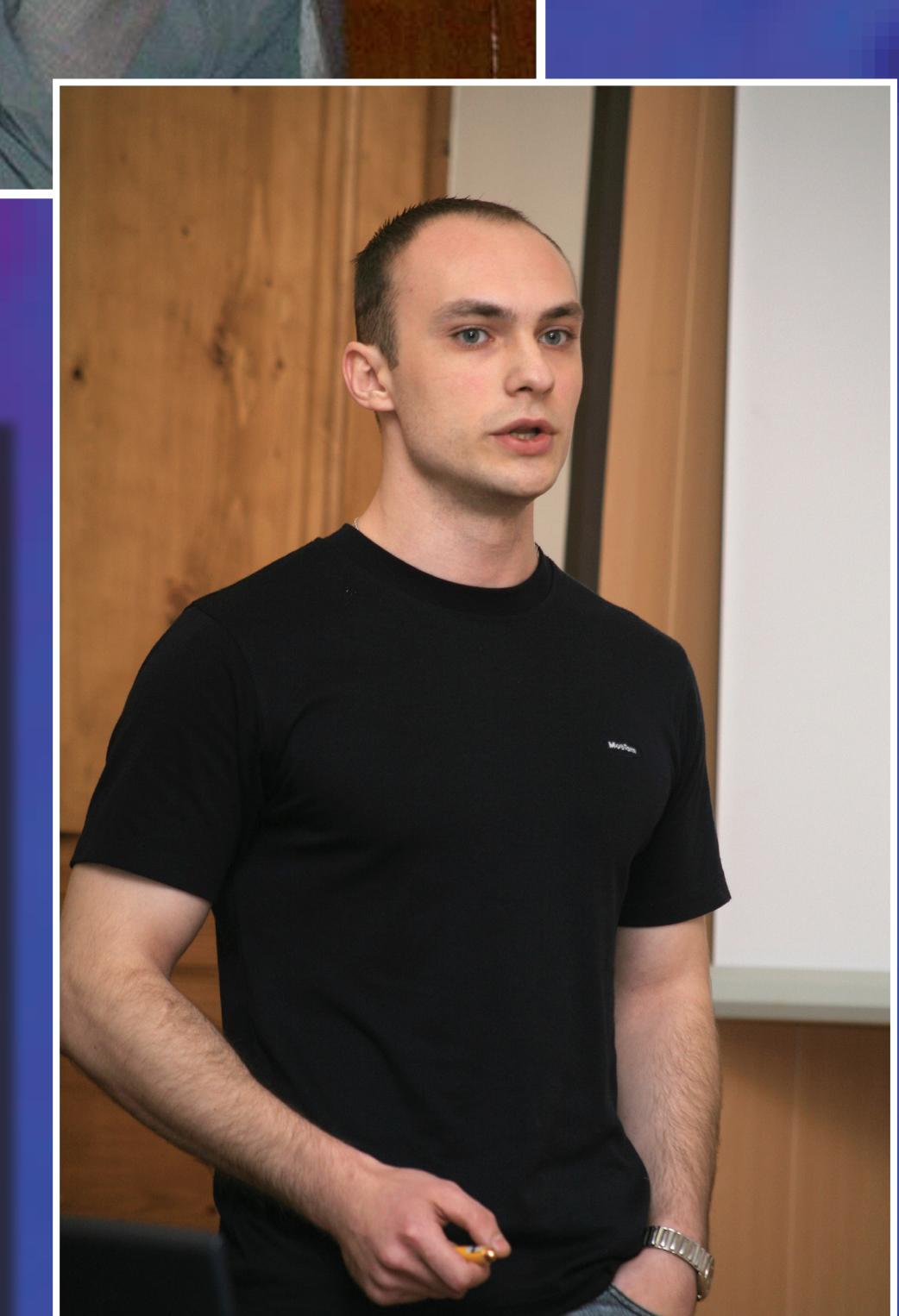
Горбунов Д. С., Дубовский С.Л., Троицкий С. В. Калибровочный механизм передачи нарушения суперсимметрии // УФН 169 (1999) 705.

Рубаков В. А. Большие и бесконечные дополнительные измерения // УФН 171 (2001) 913.

Tkachev I.I. Astroparticle Physics. — arXiv:hep-ph/0405168 (доступно на сайте arxiv.org).

Рубаков В. А., Тиняков П. Г. Модификация гравитации на больших расстояниях и массивный гравитон // УФН 178 (2008) 785.

<http://ppc.inr.ac.ru>



Обучение и наука

Обучение студентов на кафедре ориентировано на научную работу в сотрудничестве со специалистами из различных институтов. Наиболее тесные научные связи кафедры установлены с отделом теоретической физики Института ядерных исследований Российской академии наук.

Институт ядерных исследований (ИЯИ) РАН — созданный в 1970 г. научный центр, в котором ведутся исследования мирового класса в области физики элементарных частиц, атомного ядра, физики космических лучей и нейтринной астрофизики. В составе института работают всемирно известные экспериментальные установки — Московская мезонная фабрика, эксперимент «Троицк-ню-масс», Баксанская нейтринная обсерватория, глубоководный нейтринный телескоп на озере Байкал. Среди сотрудников ИЯИ — два академика и шесть членов-корреспондентов РАН. Научно-образовательный центр ИЯИ РАН включает очную аспирантуру. Основатели отдела теоретической физики (ОТФ) ИЯИ РАН принадлежат к научным школам академиков Н. Н. Боголюбова и М. А. Маркова.

За время существования отдела в нем сформировалась собственная уникальная школа, связанная с именами академиков А. Н. Тавхелидзе, В. А. Матвеева, В. А. Рубакова, член-корреспондента РАН В. А. Кузьмина. Отдел проводит исследования в области физики высоких энергий, теории возмущений в квантовой теории поля, основного состояния (вакуума) в калибровочных теориях. Здесь разрабатывают методы исследования динамики взаимодействий частиц вне рамок теории возмущений, исследуют процессы, выходящие за рамки Стандартной модели элементарных частиц, строят теоретическое описание ранней Вселенной, изучают взаимосвязи физики частиц, астрофизики и космологии. В отделе установлены многолетние научные связи с мировыми исследовательскими центрами в Европе, США и Японии. Примерно половина работающих в отделе ученых моложе сорока лет.

Также кафедра сотрудничает с Научно-исследовательским институтом ядерной физики МГУ (НИИЯФ МГУ), Объединенным институтом ядерных исследований в Дубне (ОИЯИ), Математическим институтом РАН (МИАН) и др.



Директор ИЯИ РАН
доктор физ.-мат. наук
профессор РАН
М. В. Либанов

