

КАФЕДРА ФИЗИКИ ЧАСТИЦ И КОСМОЛОГИИ

приглашает студентов

<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.



Директор ИЯИ РАН
член-корр. РАН

М.В. Либанов

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 Baikal-GVD. Среди сотрудников ИЯИ РАН - три академика и пять членов-корреспондентов РАН. В ИЯИ РАН работает очная аспирантура.

Основатели отдела теоретической физики (ОТФ) ИЯИ РАН принадлежат к научным школам академиков Н.Н. Боголюбова и М.А. Маркова. За время существования отдела в нём сформировалась собственная уникальная научная школа, связанная с именами А.Н. Тавхелидзе, В.А. Матвеева, В.А. Рубакова, В.А. Кузьмина. Отдел проводит исследования в области квантовой теории поля, физики элементарных частиц, космологии. Здесь разрабатывают методы исследования динамики взаимодействия частиц вне рамок теории возмущений, исследуют процессы, выходящие за рамки Стандартной модели элементарных частиц, строят теоретическое описание ранней Вселенной, изучают взаимосвязь 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 учёных моложе сорока лет. Кафедра сотрудничает с ИТМФ МГУ, НИИЯФ МГУ, ГАИШ МГУ, ОИЯИ (Дубна), МИ РАН им. Стеклова и многими другими.



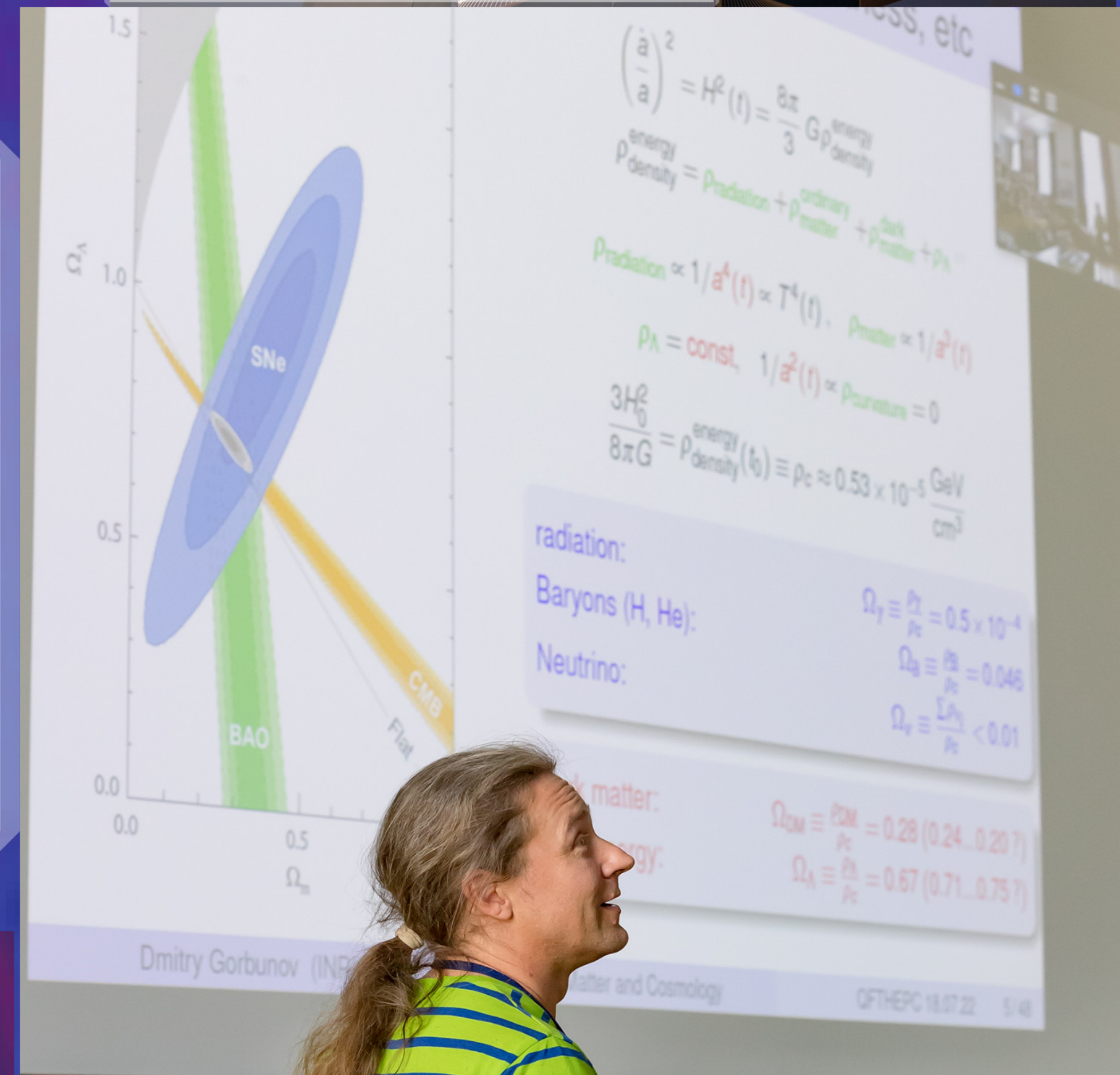
главный корпус ИЯИ РАН (фото из архива)



студенты и аспиранты кафедры на конференции по квантовой теории поля, физике элементарных частиц и космологии (ОИЯИ, Дубна, июль 2022 г.)



декан физического факультета МГУ
профессор В.В. Белокуров



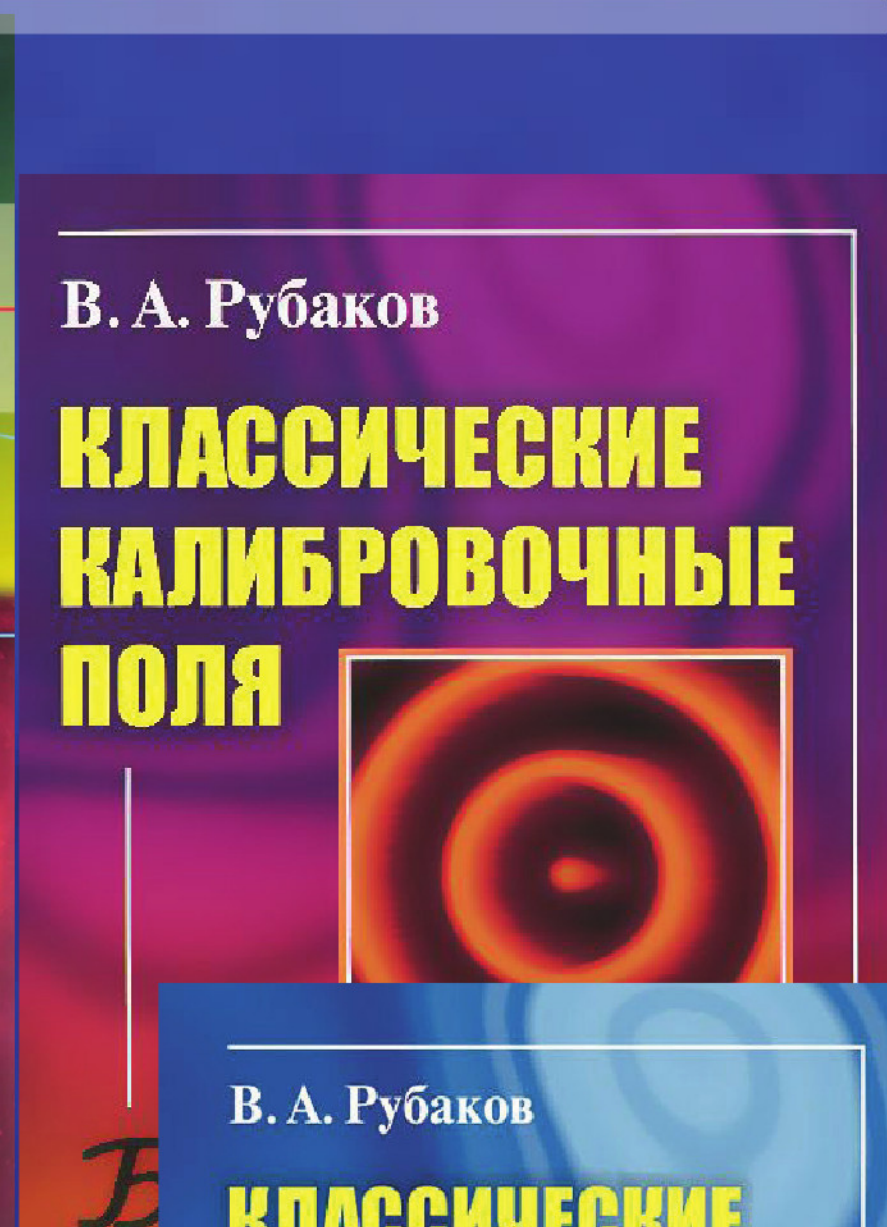
член-корр. РАН
Д.С. Горбунов



зав. кафедрой член-корр. РАН С.В.Троицкий

Спецкурсы:

- 3 курс: Классические калибровочные поля
Общая теория относительности
Введение в астрофизику частиц
Введение в теорию групп
- 4 курс: Квантовая теория поля (2 семестра)
Космология (2 семестра)
Теория групп
Стандартная Модель
- 5 курс: Континуальный интеграл в КТП
Феноменология элементарных частиц
Дополнительные главы КТП
Астрофизика частиц
- 6 курс: Доп. главы космологии
Методы статистической обработки данных
...и др.



Учебники, монографии и обзорные статьи
Белокуров В.В., Ширков Д.В. Теория взаимодействий полей: Квантовая теория поля в доступном изложении. Изд.2. М.: УРСС, 2022.
Белокуров В.В., Тимофеева О.Д., Хрусталев О.А. Квантовая телепортация — обыкновенное чудо. М.: УРСС, 2002.
Соловьев Ю.П., Садовничий В.А., Цавгулидзе 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.
Троицкий С.В. Ограничения на модели происхождения астрофизических нейтрино высоких энергий. УФН 191 1333-1360 (2021).

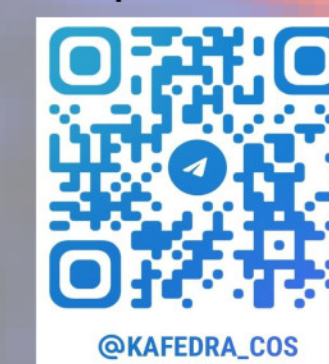


к.ф.-м.н. В.Е.Волкова

Обратная связь:

e-mail: ppc@ms2.inr.ac.ru

группа VK: телеграм-канал:



академик В.А.Рубаков

С момента основания кафедры ее научные направления и учебный план определялись под руководством академика **Валерия Анатольевича Рубакова (1955 – 2022)** — одного 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, инстантонные вклады в вероятности рождения частиц при высоких энергиях), физики за пределами Стандартной модели элементарных частиц (объединенные теории взаимодействий, модели с дополнительными пространственными измерениями). Сейчас на кафедре коллеги и ученики В.А.Рубакова продолжают и развивают эти и другие направления.

В.В. Белокуров — и.о. декана физического ф-та МГУ, 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), развит новый подход к обоснованию локальной квантовой теории поля как предела нелокальной.

Научные интересы академика **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.

Д.С. Горбунов — член-корр. РАН, специалист в области теории элементарных частиц, космологии и астрофизики частиц сверхвысоких энергий. Среди его интересов — поиск отклонений от Стандартной модели физики частиц, теоретическое объяснение экспериментальных и наблюдательных аномалий, нестандартные подходы к космологии. Им получен ряд известных результатов, относящихся к «редким процессам» за пределами Стандартной модели, инфляционной теории, физике космических лучей сверхвысоких энергий.

М.В. Либанов — член-корр. РАН, директор ИЯИ РАН, специалист в области квантовой теории поля и физики частиц, автор известных результатов, связанных с проверкой унитарности квантовой теории поля, проблемой космологической постоянной, моделями с модифицированной гравитацией, теориями с большими и бесконечными дополнительными пространственными измерениями.

С.В. Троицкий — заведующий кафедрой, член-корр. РАН — специалист в области физики и астрофизики элементарных частиц высоких и сверхвысоких энергий. Среди его научных интересов — физика частиц за пределами Стандартной модели; изучение происхождения космических заряженных и нейтральных частиц высоких и сверхвысоких энергий; поиск проявлений новой физики частиц астрофизическими методами; динамика квантовых полей в режиме сильной связи. Им был получен ряд известных результатов, относящихся к исследованию моделей теории поля в непертурбативном режиме и астрофизике элементарных частиц.

Среди направлений, интересующих других сотрудников кафедры, — теория элементарных частиц за пределами Стандартной модели, в том числе легких и сверхлегких частиц, кандидатов на роль темной материи, стерильных нейтрино и др.; квазиклассические методы; астрофизика элементарных частиц и применение в ней методов машинного обучения. Больше узнать о сотрудниках и направлениях кафедры можно на ее сайте



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

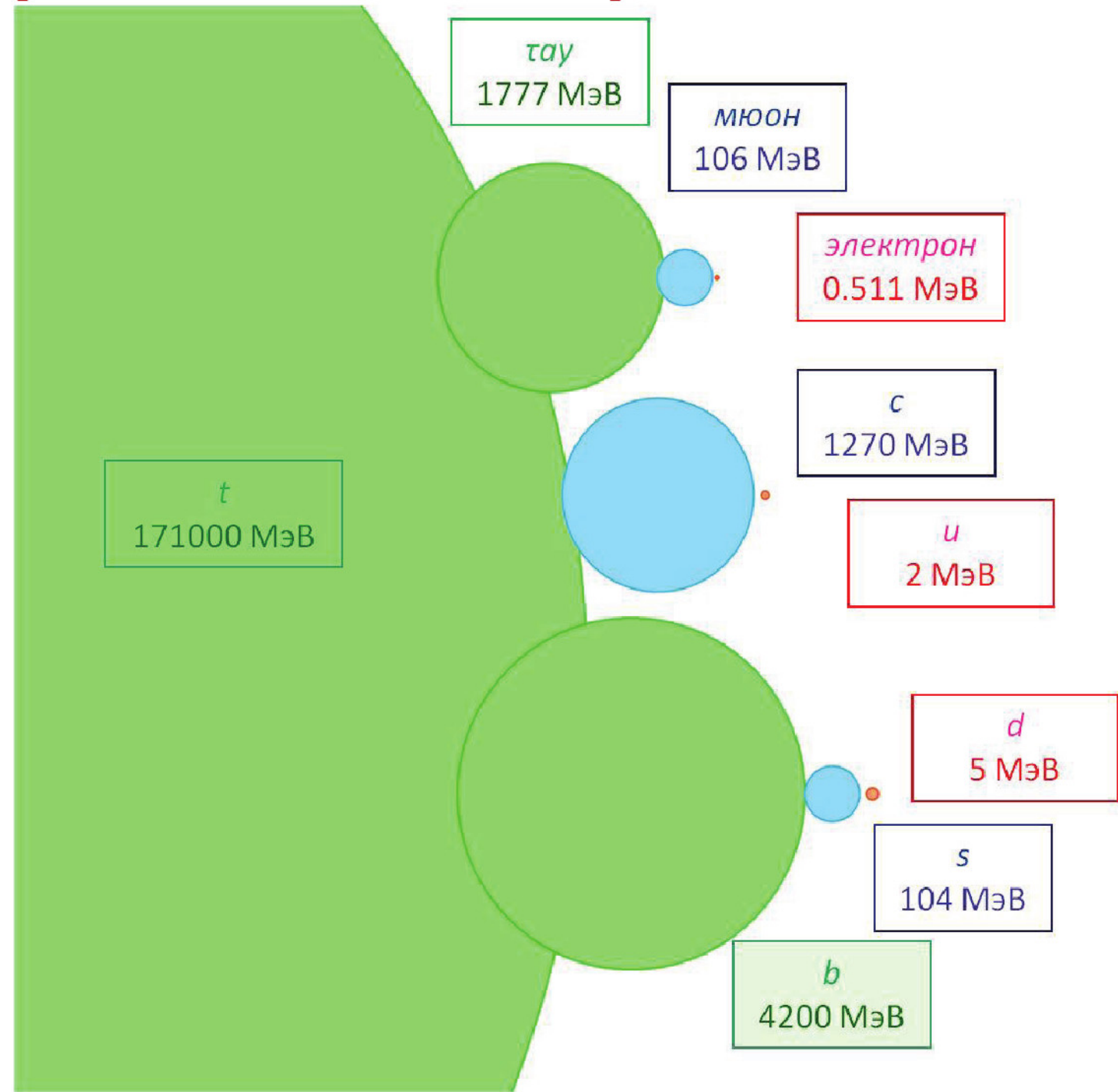
А.Н. Тавхелидзе (1930 – 2010) — академик, основатель кафедры, основатель и первый директор ИЯИ, выдающийся физик-теоретик. Совместно с Н. Н. Боголюбовым и Б. В. Струминским им было введено новое квантовое число — «цвет» кварков, с помощью которого были решены многие трудности кварковой модели адронов. Связанная с этим числом калибровочная симметрия SU(3) лежит в основе квантовой хромодинамики, сейчас являющейся стандартной теорией сильных взаимодействий элементарных частиц высоких энергий.

КАФЕДРА ФИЗИКИ ЧАСТИЦ И КОСМОЛОГИИ

Научные направления

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

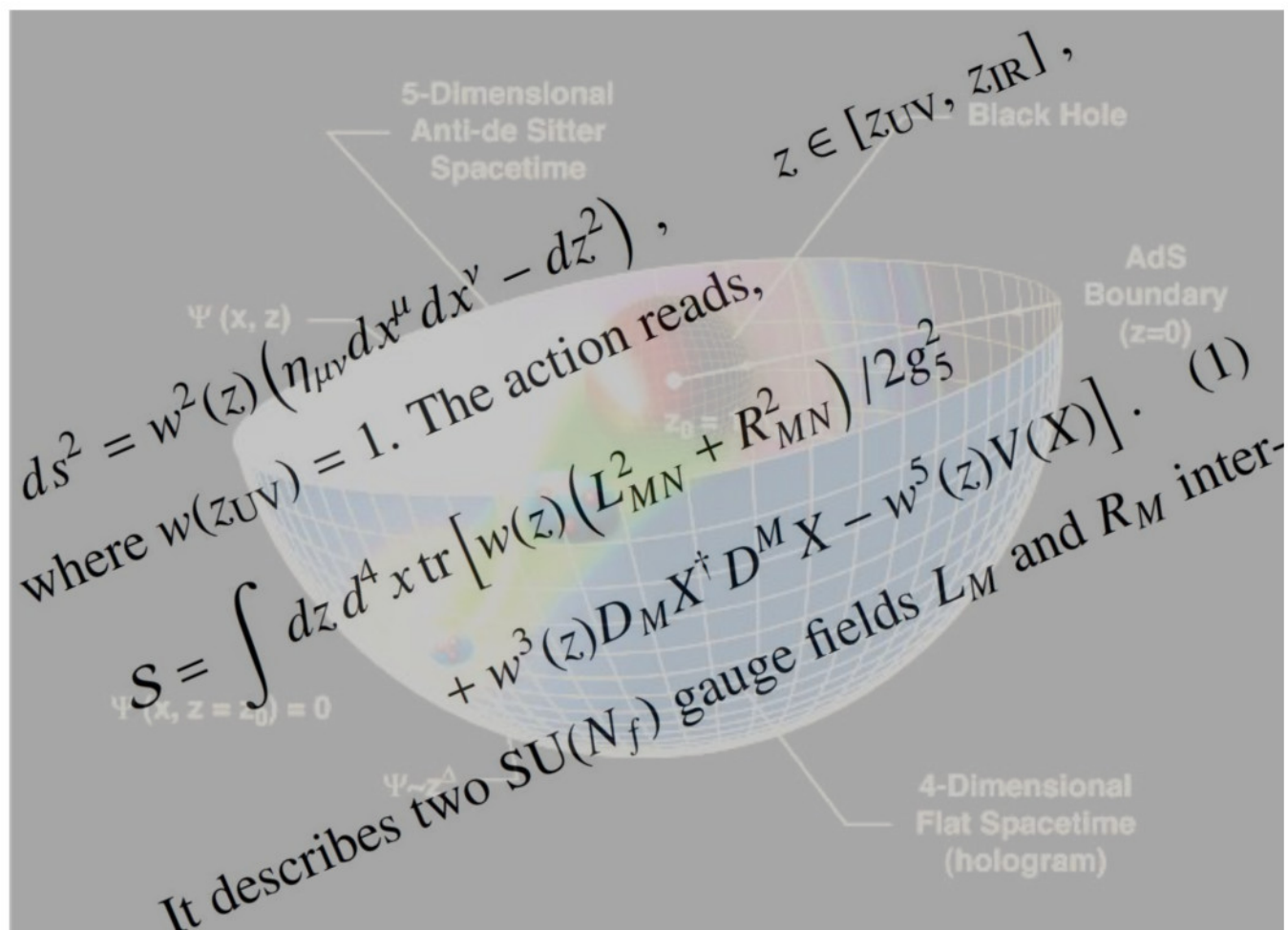
За пределами Стандартной модели



Стандартная модель элементарных частиц и их взаимодействий прекрасно согласуется с результатами ускорительных экспериментов. Она описывает частицы – кварки, лептоны, калибровочные бозоны и бозон Хиггса – и взаимодействия между ними (сильное, слабое, электромагнитное). Важная часть Стандартной модели – набор из её 19 количественных параметров, которые определяются из эксперимента, а не вычисляются. При этом Стандартная модель не является окончательной теорией – существуют надежные экспериментальные свидетельства её неполноты. Они включают взаимные превращения нейтрино разных типов, наличие темной материи, а также асимметрию между веществом и антивеществом в наблюдаемой Вселенной. Кроме того, соотношения между некоторыми параметрами Стандартной модели весьма необычны. Например, существует три поколения кварков и лептонов с абсолютно одинаковыми взаимодействиями, но на порядки отличающимися массами (рис.: площади кружков пропорциональны массам частиц).

Для решения этих вопросов требуется построение обобщений Стандартной модели и получение в них предсказаний для экспериментов в физике частиц.

Теория поля с сильной связью



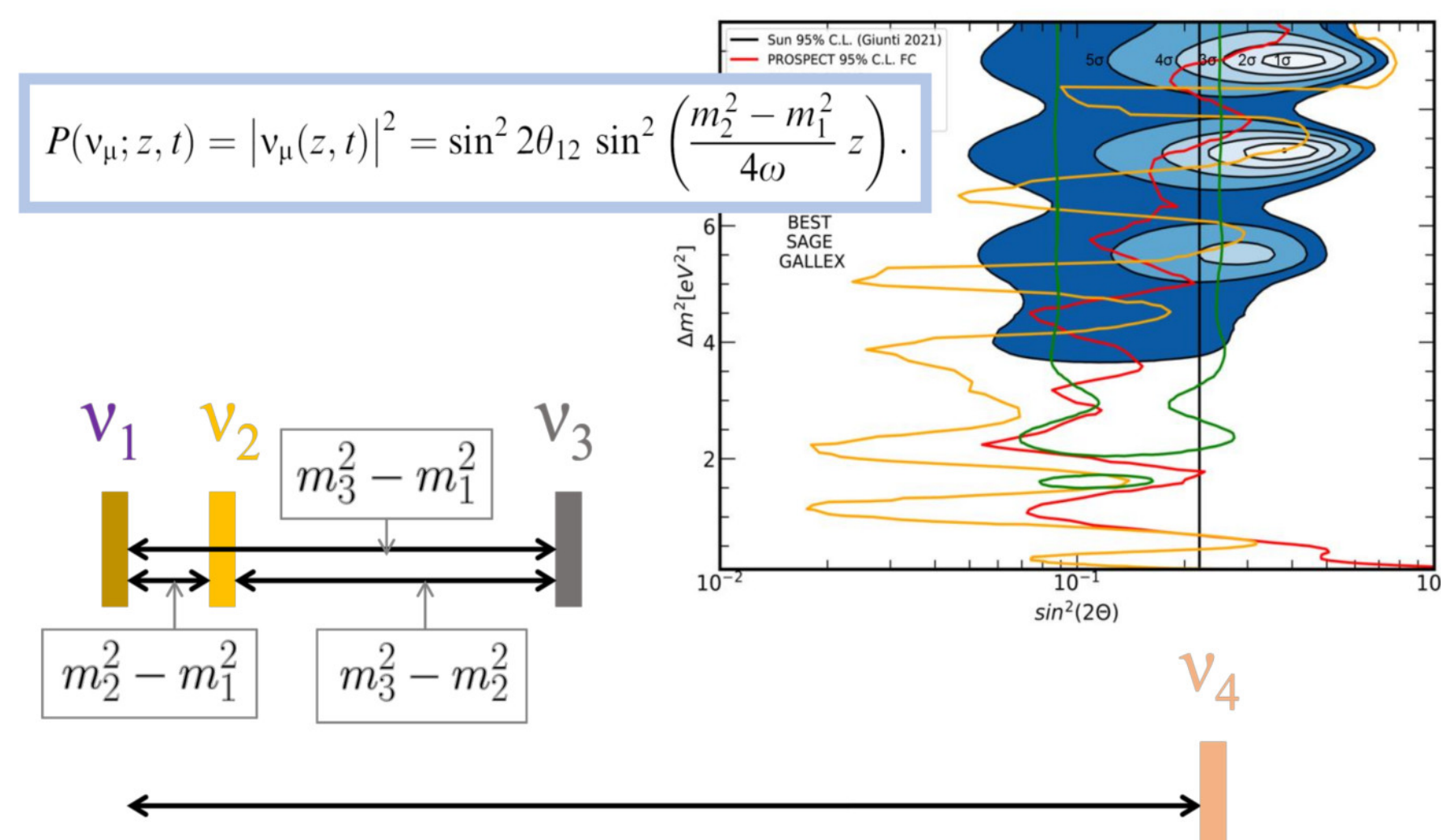
Основной рабочий метод квантовой теории поля – теория возмущений по малой константе связи. К сожалению, он не всегда применим, так как в теории сильных взаимодействий и во многих расширениях Стандартной модели константы связи не являются малыми параметрами, а сами ряды теории возмущений в высоких порядках расходятся. Универсального метода решения задач теории поля, не связанного с теорией возмущений, пока не придумано, но возможные подходы крайне разнообразны – от красивых абстрактных математических построений до масштабных вычислений на суперкомпьютерах.

Развитие надёжных и обоснованных методов вычислений за рамками теории возмущений – одна из основных нерешённых проблем квантовой теории поля.

ПРОБЛЕМЫ НА СТЫКЕ ТЕОРИИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, КОСМОЛОГИИ И АСТРОФИЗИКИ

- **квантовая теория поля**
 - ❗ развитие методов
 - ❗ исследование моделей
- **модели физики элементарных частиц**
 - ❗ расширения Стандартной модели
- **современные проблемы космологии**
 - ❗ тёмная материя
 - ❗ ускоренное расширение Вселенной
 - ❗ хаббловский кризис
 - ❗ Вселенная до Большого взрыва
- **астрофизика элементарных частиц**
 - ❗ поиск и ограничение проявлений новой физики частиц в астрофизических данных
 - ❗ происхождение космических частиц высоких энергий

Лёгкие стерильные нейтрино



Осцилляции нейтрино (взаимные превращения нейтрино трех типов – электронного, мюонного и тау) дают нам прямое свидетельство неполноты Стандартной модели физики частиц, в которой такие переходы запрещены законами сохранения. Однако результаты ряда экспериментов описать с тремя типами нейтрино не удаётся. В 2022 году были опубликованы результаты эксперимента BEST, проводившегося на Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. Они на высоком уровне достоверности подтверждают так называемую галлиевую аномалию – недостаток электронных нейтрино, указания на который были обнаружены ранее другими экспериментами. Этот результат согласуется с объяснением галлиевой аномалии, предполагающим существование четвертого типа нейтрино, отсутствующего в Стандартной модели. Чтобы не противоречить коллайдерным экспериментам, четвертое нейтрино должно быть стерильным – не испытывать даже слабого взаимодействия. Полученный результат оказался крайне неожиданным, поскольку наличие стерильного нейтрино с требуемыми параметрами трудно согласовать со стандартной космологией и с моделью Солнца.

Новые результаты, связанные со стерильными нейтрино, могут потребовать серьёзного пересмотра физики частиц, космологии и астрофизики. Какого именно – пока неизвестно.

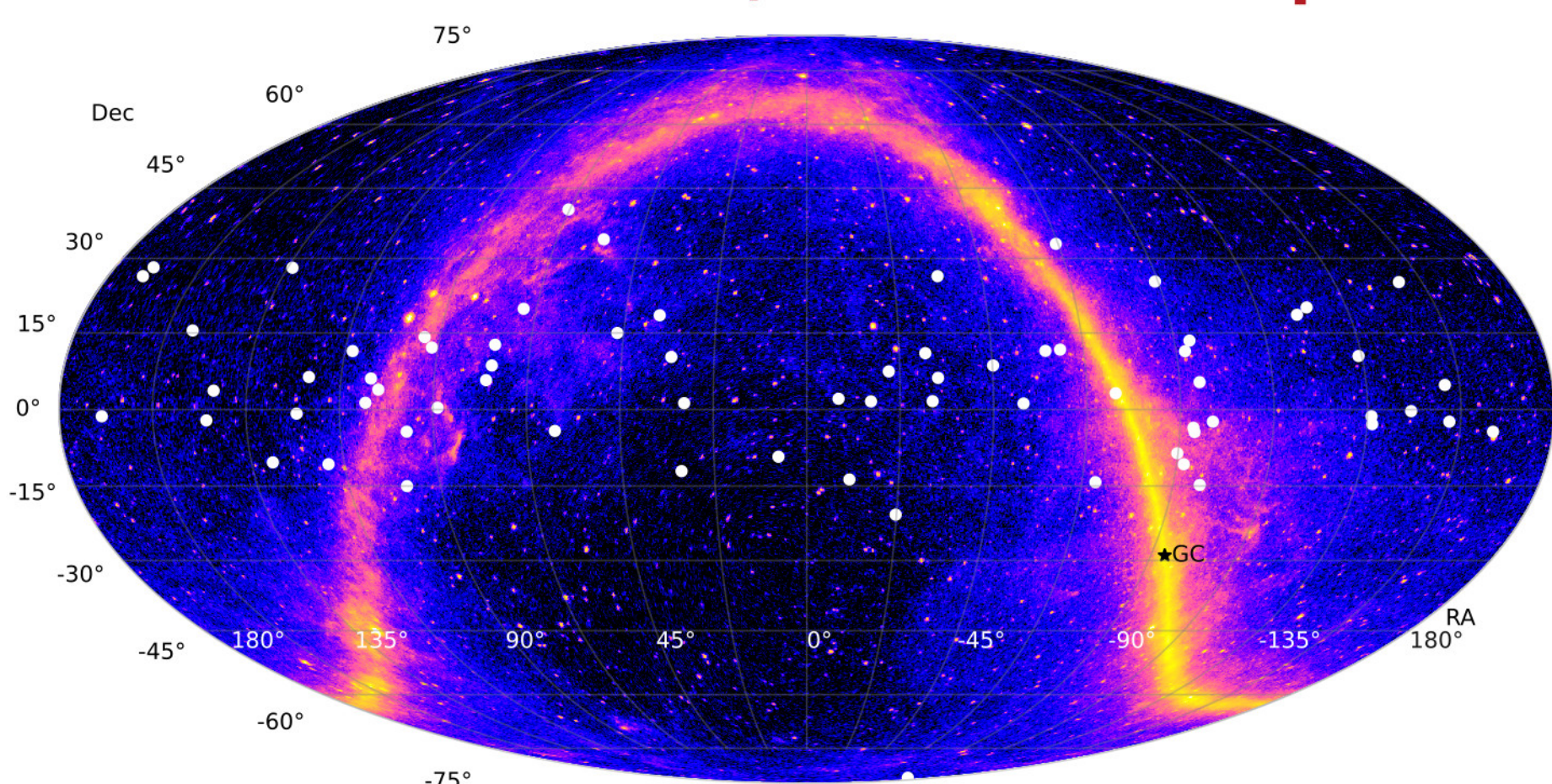
Тёмная материя во Вселенной



Данные астрофизических наблюдений указывают, что видимое вещество составляет около 1/5 от всей материи во Вселенной. Распределение массы, создающей гравитационный потенциал, и распределение обычного вещества сильно различаются. Невидимое вещество – «темная материя» – не излучает и не поглощает свет и взаимодействует существенно слабее обычного вещества.

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. Предложены десятки вариантов, но какой из них реализуется в природе?

Космические частицы высоких энергий



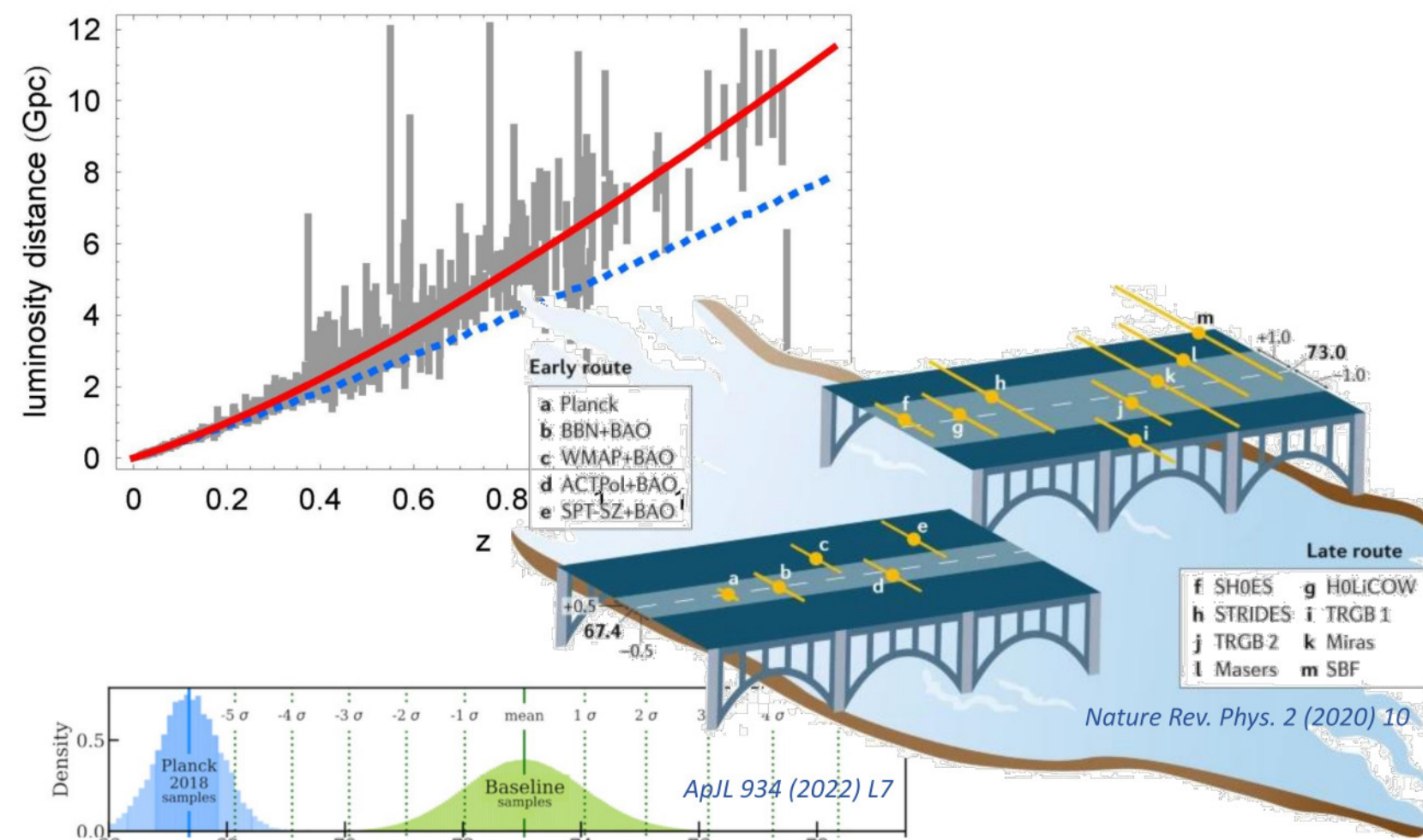
На наших глазах происходит бурное развитие наблюдательной астрофизики частиц. В последнее десятилетие были открыты астрофизические нейтрино сверхвысоких энергий (эксперименты IceCube и Baikal-GVD). В 2021 году – гамма-излучение сверхвысоких энергий от источников в нашей Галактике (эксперименты Tibet и LHAASO). Осенью 2022 года – гамма-излучение сверхвысокой энергии от удаленного гамма-всплеска (эксперименты LHAASO и Ковёр-2). Продолжается активное изучение космических лучей ультравысоких энергий в экспериментах Telescope Array и Pierre Auger. Каким образом зарегистрированные частицы получили столь большие энергии, неизвестно. После 2020 года стали появляться указания на происхождение части нейтрино высоких энергий в активных галактиках, а другой части – в нашем Млечном Пути, но конкретная модель их рождения пока отсутствует. А загадка происхождения космических лучей с наиболее высокими энергиями не поддается решению уже несколько десятилетий.

Простого решения задачи происхождения астрофизических частиц высоких энергий нет. Требуются современные сложные методы анализа – численное моделирование, машинное обучение, – вместе с серьёзной теоретической работой. Главные теоретические открытия в астрофизике частиц высоких энергий ещё впереди.

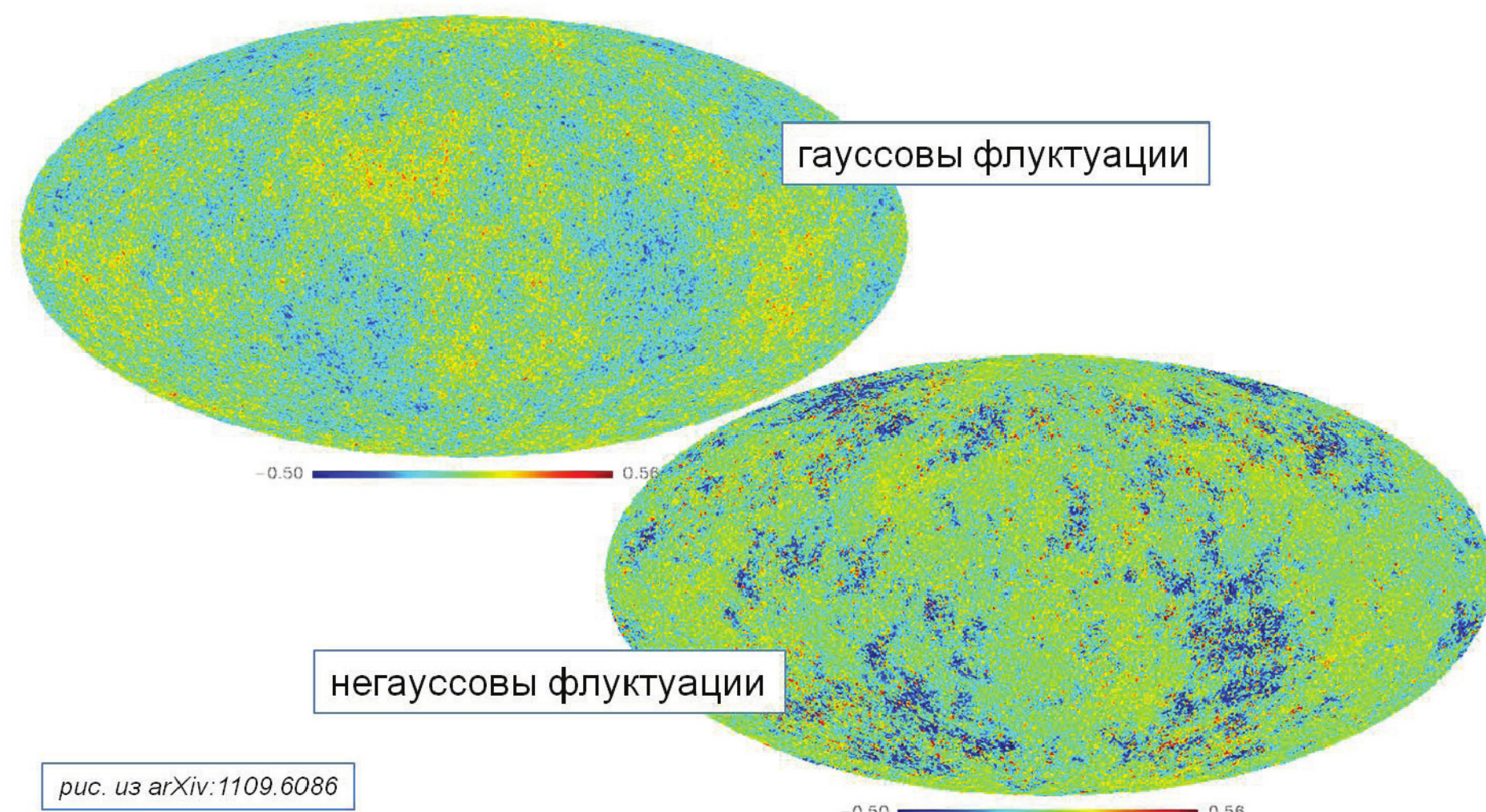
Скорость и ускорение расширения Вселенной: тёмная энергия и «хаббловский кризис»

Измерения скорости расширения Вселенной, проводимые разными способами с высокой точностью, показали, что эта скорость непостоянна – Вселенная расширяется с ускорением. Это явление, открытое на рубеже тысячелетий, стало важной составной частью современной стандартной космологической модели. Темп современного расширения можно определять на основе наблюдений астрофизических источников (диаграмма Хаббла – «от позднего к раннему») и на основе данных по анизотропии реликтового излучения («от раннего к позднему»). В последнее десятилетие точность этих измерений увеличилась, и оказалось, что различие между результатами, полученными в этих двух подходах, намного превышает ошибки измерений (так называемый «хаббловский кризис»).

Сегодня не известны ни причина ускоренного расширения («тёмная энергия»), ни объяснение хаббловского кризиса. Теоретическое решение этих проблем, вместе или по отдельности, – ключевая задача современной космологии.



Очень ранняя Вселенная



Во Вселенной ещё до стадий генерации тёмной материи и асимметрии между веществом и антивеществом почти наверняка была эпоха, ответственная за то, что наша Вселенная однородна на больших масштабах и пространственно плоская. 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 сделать затруднительно. Одним из подходов является детальное статистическое исследование флуктуаций 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?..