СОВЕТО

ПОЗДРАВЛЕНИЕ ДЕКАНА ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ ПРОФЕССОРА Н.Н. СЫСОЕВА С ДНЕМ НАРОДНОГО ЕДИНСТВА

Дорогие преподаватели, аспиранты, студенты и все работники физического факультета!

Поздравляю вас с Днем народного единства!

Этот день появился в перечне государственных праздников недавно, в 2005 году. Однако он отражает многовековой опыт существования нашей Родины и, таким образом, символизирует важнейшие моменты истории наших предков, благодаря которым процветает сейчас могучая и независимая Россия.

Сотрудники, студенты и аспиранты нашего университета всегда отличались гражданской инициативой, ответственностью, трудолюбием и неустанной работой по выполнению наиважнейшей миссии — просвещения.

В этот знаменательный день от всей души желаю вам крепкого здоровья, стабильности, благополучия, уверенности в своих силах и в завтрашнем дне, мира и взаимопонимания в семье и в коллективе!

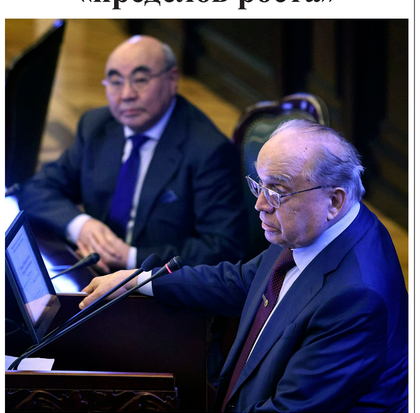
Успехов нам всем в труде на благо нашего университета, а значит, и на благо нашей любимой Родины! Желаю каждый день проживать с пользой для великой России! Пусть патриотизм не будет для нас пустым словом!

В свете сегодняшних событий этот замечательный праздник приобретает еще более актуальное значение, напоминая, что в единстве наша сила!

Единство нашего народа позволит сберечь и преумножить духовные и культурные ценности, величайшее научно-образовательное наследие, оставленные нам предками, и передать их следующим поколениям, обеспечит нашу Победу!

Декан физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова
Профессор Н.Н. Сысоев

Новые подходы к преодолению «пределов роста»



В МГУ имени М.В. Ломоносова представлен доклад Римскому клубу «Преодолевая пределы» [1], подготовленный группой ученых под руководством академиков, ректора МГУ В.А. Садовничего и А.А. Акаева. Доклад приурочен к 50-летию опубликования работы «Пределы роста» [2] и обобщает многолетний научный труд коллектива по исследованию динамики мировой системы. Работа авторов доклада «Преодолевая пределы» отличается новизной математического подхода к моделированию глобальных проблем, связывает в единый комплекс климатические, энергетические, экономические, экологические, демографические, социальные и другие процессы.

Новизна подхода к решению глобальных проблем человечества, важность полученных результатов делают необходимым ознакомление с докладом широкой общественности.

Два подхода: «Пределы роста» и «Преодолевая пределы»

Цель доклада «Преодолевая пределы» [1,3] — сформулировать новые пути решения основных глобальных проблем, стоящих перед человечеством в настоящее время и грозящих катастрофой всему человечеству. При этом уже в названии «Преодолевая пределы» подчеркивается нереальность решения этих проблем на основе предложений по решению глобальных проблем человечества, разработанных ранее зарубежными исследователями, прежде всего Римским клубом. В названии доклада подчеркивается отличие результатов и выводов представленной работы от выводов предшественников — первого доклада клуба «Пределы роста». Эти выводы, прежде всего, оптимистичны: пределы можно преодолеть, катастрофы можно избежать, но для этого требуется совместная слаженная работа всего человечества. Само название работы указывает и на возможность выхода из катастрофической ситуации, грозящей человечеству.

Следует отметить, что работа, выполненная в МГУ, значительно отличается от работ и выводов Римского клуба по целому ряду параметров: по широте рассмотренных проблем; по комплексности подхода; по методике исследований, которая значительно более сложна, более обоснована математически, а анализ глобальных изменений основан на выявлении закономерностей мировой динамики на протяжении исторического периода в несколько тысяч лет; по объему тестирования модельных расчетов; по временным интервалам, на которых рассматривается и прогнозируется состояние планеты Земля и человечества. То есть моделирование динамики человечества выполнено более обстоятельно и на более высоком уровне. Как следствие всего этого работа авторов «Преодолевая пределы» отличается от работ предшественников, в том числе Римского клуба, по прогнозам и предлагаемым подходам к решению глобальных проблем.

Катастрофичность положения, возникшего в современном мире, следует из невозможности мировой капиталистической системы стабилизировать глобальную экономическую, экологическую ситуации, поскольку необходимые меры стабилизации возможны только с использованием значительных социальных изменений. Следует отметить, что на невозможность решения глобальных проблем, угрожающих существованию человечества, на основе капиталистической системы указывалось неоднократно, например, в докладе Римскому клубу «Come on» [2]. О необходимости смены парадигмы развития человечества, ставшего на путь неограниченного роста потребления материальных благ в ущерб развитию духовному, также указывалось неоднократно. Можно напомнить известную работу Льюиса Мамфорда (Lewis Mamford): [4].

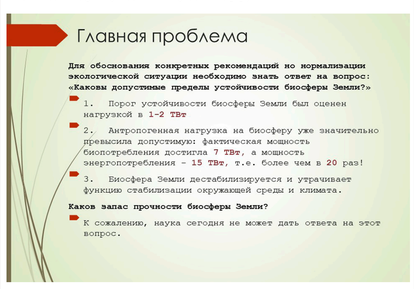
Следует упомянуть и дискуссии с участием Президента РФ и главного редактора журнала «Россия в глобальной политике» Фёдора Лукьянова на заседании клуба «Валдай» в 2020 году, в которых сделаны выводы об ограниченности возможностей капиталистической системы и необходимости солидарного решения глобальных проблем человечества [5].

Результаты авторов доклада «Преодолевая пределы» можно трактовать как конкретизацию, развитие идеи перехода человечества к ноосферному этапу эволюции человечества, основанному на последних исследованиях в целом ряде областей науки, прежде всего кибернетики, биологии, геофизики. Именно такая модель эволюции человечества позволяет дать конкретные решения глобальных проблем человечества, что авторы и делают. Выводы доклада и предложения, на них основанные по сравнению с выводами работ Римского клуба, отличаются оптимизмом, подступно в предлагаемых решениях глобальных проблем планеты ощущается вера в торжество человеческого разума.

Авторы доклада пришли к выводу, что человечество в настоящее время оказалось на переломе своей истории. Но в отличие от идей авторов Римского клуба в докладе отмечено, что возникшие глобальные проблемы — это не пределы роста, а вызовы, которые можно и нужно постараться преодолеть. Если авторы Римского клуба сосредоточились в основном на физических и биологических пределах планеты (исчерпаемых природных ресурсах, граничащих со способностью земли поглощать промышленные и сельхозяйственные загрязнения), то в исследовании ученых МГУ основной акцент делается на рассмотрении современных процессов в более широком макроэкономическом контексте с учетом особенностей долговременного технологического развития. В МГУ успешно проводятся работы по моделированию динамики мирового развития, которые указывают на возможность преодоления негативных тенденций в мировой экономике.

Какая разница между вызовом и пределом? На вызов можно и нужно ответить, а вот преодолев предел можно прийти к гибели системы (биосферы, человечества) из-за потери ее устойчивости и последующего разрушения. Поэтому и ищутся пути эволюции системы, которые не приведут к достижениям того или иного разрушительного предела, а приведут к развитию системы, позволяющему избежать достижения предела. Поэтому уже упомянутый Льюис Мамфорд говорил о необходимости новой мировой культуры, в основе которой лежит гуманизация, сотрудничество, симбиоз. По мнению авторов доклада «Преодолевая пределы» перед человечеством стоят не пределы, а вызовы и ответы на вызовы необходимо превратить в переход к ноосфере, к новому гуманистическому обществу.

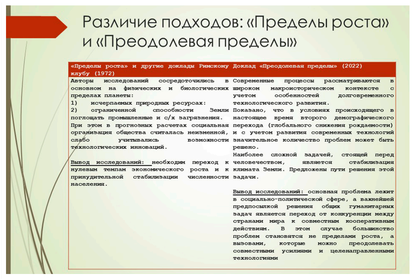
Следует отметить, что реально существуют принципиально непреодолимые пределы, например, величина потребляемой человечеством энергии или величины потоков химических элементов в биосфере. И человечество упорно движется к этим принципиально непреодолимым пределам (см. рис. — из раздела доклада «Пределы и вызовы: постановка главной проблемы», «О пределах устойчивости биосферы Земли». Источник: материалы презентации к докладу «Преодолевая пределы», [1].)



Но вопрос в том, что нужно ли человечеству для дальнейшего развития достигать и преодолевать эти пределы, можно ли выбрать другой альтернативный путь развития. С другой стороны, существуют пределы, которые вполне преодолимы, но только в условиях совместных действий всего человечества.

Нижеприведенная схема поясняет различие подходов: «Пределы роста» и «Преодолевая пределы». Источник: материалы презентации к докладу «Преодолевая пределы», [1].

В расчетах по модели «Мир-3» Римского клуба отсутствует социальный блок, что искажает динамику глобальных процессов. В модели авторов «Преодолевая пределы» социальный блок включен и играет существенную роль. В последних докладах Римского клуба отмечается, что капитализм себя исчерпал, предлагаются пути выхода из глобальных кризисов — экономического и экологического. Правда, эти предложения носят рекомендательный характер, и так как они следуют не из модельных расчетов, они не так убедительны, как выводы, основанные на ресурсных моделях. Эти предложения, основанные на концепции «полного мира», наиболее ярко изложены в докладе «Come on» 2018 года [2]. Концепция «полного мира», на наш взгляд, тоже неубедительна. До полноты мира человечеству еще следует освоить ресурсы некоторых обширных регионов Южной Америки и Азии, всего Мирового океана, которые не только далеки до исчерпания, но еще далеко не исследованы. Поэтому и все прогнозы, построенные на концепции «полного мира», требуют корректировки или даже отрицания.



Система моделирования исторической динамики и полученные результаты

Авторы доклада «Преодолевая пределы» считают, что важнейшим фактором в человеческом обществе является технологическое развитие, определяющее все сферы деятельности общества, причем это развитие происходит на фоне определенного природного фона, который тесно взаимодействует с обществом. Все основные параметры глобальной системы, взаимодействуя между собой, изменяются в историческом плане.

Важной отличительной чертой представленного доклада является значительно больший временной интервал прогнозируемых расчетов, чем в модельных расчетах предшественников. В основе моделей для разных исторических эпох лежит единая когнитивная схема. Модели развития систем тестируются на больших временных предшествующих периодах, исчисляемых веками и тысячелетиями. В этом разительное отличие от работ Римского клуба, в работах которого прогнозирование основано на пролонгации выявленных тенденций изменений в обществе в настоящее время на относительно близкое будущее.

Схема взаимодействий в глобальной системе природа- человечество включает семь сфер (блоков по терминологии авторов) деятельности человечества: климат, природная среда; экология; технологии; демография; экономика (производство, экономические отношения); социосфера (социальные взаимодействия); политика (государственное управление, политические взаимодействия). Для каждого блока были предложены базовые уравнения, характеризующие эти взаимодействия. Схема взаимодействий сфер (блоков) деятельности человечества демонстрирует существенное усложнение по сравнению с моделью, используемой в модели «Мир». С другой стороны, каждая сфера деятельности (блоков) описывается довольно простыми уравнениями: авторы, ради наглядности и для упрощения анализа, выделили наиболее важные процессы.

Главным критерием прогнозирования является критерий устойчивости системы, при этом учитывается не только взаимодействие с окружающей средой как в моделях Римского клуба, но и внутренние процессы в системе. Блок «Социосфера» является, наверное, самым трудно описываемым уравнениями блоком. Главными факторами, определяющими состояние системы, авторы считают условия, обеспечивающие устойчивость функционирования социальной сферы. Отмечается важнейшая роль идеологических установок или религии, особенно в периоды реформирования экономических устоев общества.

В блоке «Экология» подробно учитывается антропогенное изменение CO_2 , в том числе на климатическую изменчивость. Важное место в докладе уделяется проблеме изменчивости климата. Блок «Природа» включает уравнения, описывающие климатические изменения и ресурсную обеспеченность. Этапы климатического прогноза описаны достаточно подробно и включают учет энергопотребления и его структуру, в том числе при переходе на низкоуглеродную энергетику, динамику народонаселения. Климатическая изменчивость описывается только антропогенным изменением температуры. Природный блок связан с энергетическими проблемами. В современном мире, наряду с проблемами энергетики, остро стоит проблема пресной воды [6], которая будет в ближайшее время только усугубляться, поэтому проблема пресной воды должна быть одной из важнейших в природном блоке. Доступность воды определяет уровень и продолжительность жизни, численность населения, оказывает влияние на сельское хозяйство и энергетику, миграцию и т.п. Предел потребления пресной воды как раз относится к тем пределам, которые можно и нужно преодолеть путем коллективного действия ряда стран или всего мирового сообщества.

Реализация предложений авторов по решению климатических и энергетических проблем рассчитана на длительный период и фактически предусматривает слаженное, солидарное взаимодействие всех государств планеты. Авторы считают, что выходом из критической ситуации может быть переход к совместным действиям всех стран мира, а лидерами перехода человечества к более справедливому обществу могут стать Китай и Россия.

Вероятно, что особую роль в переходный период к низкоуглеродной энергетике будет играть газовая энергетика, как наиболее экологичная отрасль современной энергетики и отрасль, обеспеченная огромными природными ресурсами, в том числе в мировом океане. Атомная энергетика, несмотря на высокую ее экологичность, имеет высокую стоимость, которая ограничит ее широкое распространение, поэтому ее роль в переходный период требует дополнительных исследований [7]. На пути развития возобновляемой энергетики и поисков нетрадиционных источников энергии еще много неопределенностей, но будем надеяться, что будет и много перспективных открытий.

Новые социальные формирования

Прогнозы социальной трансформации общества представляют наибольший интерес. Согласно представлениям авторов вся прежняя история человечества объясняется на основе предположения о существовании социальных формирований: X-структур и Y-структур и их периодической смене одной на другую. X-структуры формируются в условиях стабильности, Y-структуры — в условиях роста. Смена структур связана с революционными технологическими переменами. Авторами наглядно продемонстрирована успешность такого подхода при описании прошедшей истории человечества. Интересно отметить исследования авторами роли изобретательской деятельности, как важнейшего фактора социальной деятельности, влияющей на развитие технологий и, как следствие, на важнейшие показатели развития общества. Сейчас повсеместно сокращается относительное число жителей планеты, занятых креативным трудом, то есть деятельностью связанной с изобретательностью.

В настоящее время происходит цифровая революция, которая приводит к формированию принципиально нового типа общества, авторы доклада называют его кибернетическим или W-обществом, которое отличается как от X-общества, так и от Y-общества. Переход к новому типу общества, по утверждению авторов, нельзя спрогнозировать, переход надо спроектировать и предложить обществу для реализации. Так уже и происходит в действительности. Несколько проектов будущего W-общества уже сформулировано западными учеными — это «капитализм стейкхолдеров» К.Шваба и «инклюзивный капитализм» Папы Римского, оба проекта, по сути, предполагают модернизацию капитализма.

Доклад «Преодолевая пределы» является альтернативным проектом будущего W-общества, основанным на примате принципов сотрудничества над принципами конкуренции. W-общество характеризуется глобализацией, замкнутостью, старением населения планеты и стабилизацией его численности, проникновением информационных технологий и искусственного интеллекта во все сферы жизни; активным воздействием на человека методами биотехнологии, генной инженерии и т.п. Неизбежность перехода к подобному типу общества обсуждалась неоднократно, при этом важен вариант перехода и вариант формирующегося в результате перехода W-общества. Человечество находится в точке бифуркации, причем выбор направления дальнейшего развития зависит от самого человечества. В докладе моделируются два варианта перехода человечества к W-обществу и утверждается существование только этих двух вариантов.

Первый вариант — это формирование «инклюзивного капитализма», который будет реализовываться под управлением «мирового правительства». Можно назвать конкретные шаги, которые уже реализуются в мире и направляют человечество по варианту №1. Это переход к «базовому доходу», гендерная политика, управление менталитетом масс с помощью социальных медиа и т.п.

Второй вариант представляет собой план реализации идеи о ноосферном этапе развития человечества, которая была сформулирована Вернадским и далее развивалась, в основном, в трудах российских ученых. Практических шагов по реализации этого плана пока нет, только теоретические изыскания.

Важно отметить, что оба варианта имеют многие общие характеристики, обусловленные использованием информационно-цифровых технологий и других научных отраслей, но результат — созданные общества разительно отличаются.

Авторы доклада делают фундаментальный вывод: вид глобальных взаимодействий в системе природа—человек будет зависеть от типа социальной структуры общества и варианта перехода человечества к W-обществу.

Заключение

В докладе «Преодолевая пределы» представлены результаты моделирования мировой динамики на основе анализа и математической формализации процессов развития человеческого общества. Авторами предложен новый комплексный метод моделирования, базирующийся на позициях историзма и позволяющий выполнять прогнозирование на длительных временных интервалах, тестирование которого показало его результативность. В результате исследований было показано, что на настоящем историческом этапе развития общества необходимо переходить от прогнозирования будущего к его проектированию.

Авторы предлагают такой проект будущего W-общества, продолжающий и развивающий работы отечественных исследователей и основанный на примате принципов сотрудничества над принципами конкуренции. Глобальные технологические изменения, происходящие в настоящее время, должны сопровождаться глобальными изменениями в идеологической сфере. Разработаны сценарии реализации проекта, позволяющие решить глобальные проблемы человечества.

Литература

1. *Мировое развитие и «пределы роста» в XXI веке: моделирование. Презентация доклада Римскому клубу «Преодолевая пределы». 23 марта 2022 года. https://expert.msu.ru/haos22-1*
2. *Доклады Римскому клубу. URL: https://www.clubofrome.org/publications/*
3. *Садовничий В.А., Акаев А.А., Ильин И.В., Коротаев А.В., Малков С.Ю. Моделирование и прогнозирование мировой динамики в xxi веке. Препринт. Москва. МГУ. 2022,78 с.*
4. *Льюс Мамфорд. Миф машины. Москва. Изд-во Логос. 2004. — 408 с.*
5. *Заседание дискуссионного клуба «Валдай» http://kremlin.ru/events/president/news/64261*
6. *Бушуев В.В., Соловьев Д.А. Ресурсы гидросферы: энергетика, экология, климат. Москва: ИД «Энергия», 2019.*
7. *Гордиенко В. А., Старкова М. В., Показеев К. В.Экология. Базовый курс для студентов небиологических специальностей. СПб.: Издательство «Лань», 2014. — 640 с.*

Показеев К.В., Соловьев Д.А.

О развитии квантовых технологий в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова

К 60-летию научной школы нелинейной оптики в Московском университете и 55-летию открытия спонтанного параметрического рассеяния света

В этой заметке сообщается о некоторых аспектах квантовых технологий на физическом факультете МГУ — от базовых экспериментов квантовой оптики до устройств квантовой защищенной связи и квантовых компьютеров/симуляторов. На фоне противоречивых, а порой и фантастических прогнозов развития этой высокотехнологичной отрасли, дан краткий реалистичный обзор состояния дел в тесной привязке к фундаментальным и прикладным разработкам, ведущимся на физфаке.

Статья состоит из трех частей. В первой рассказывалось о структуре Центра квантовых технологий физического факультета, Консорциуме Центра, а также об основных направлениях его деятельности. Во второй собраны материалы по подготовке кадров по квантовым технологиям на физфаке. Первые две части опубликованы в предыдущем номере «Советского физика». В третьей, заключительной, — об основных научных проектах Центра.

3. Основные научные проекты центра квантовых технологий физфака

Говоря о научной составляющей деятельности Центра квантовых технологий МГУ, отметим ряд амбициозных проектов:

В области **квантовых вычислений**: разработка квантовых вычислительных устройств, которые к 2024 году должны продемонстрировать т.н. «квантовое превосходство», т.е. обеспечить решение нескольких вычислительных задач эффективнее, чем это делают самые мощные классические суперкомпьютеры.

В области **квантовых коммуникаций**: вывод на рынок принципиально нового поколения систем связи, с гарантированной защитой от прослушивания.

В области **квантовых сенсоров**: обеспечение устройств навигации, геологоразведки, а также медицинской аппаратуры сверхчувствительными датчиками, способными регистрировать сигналы, недоступные для существующих классических сенсоров.

В области **квантовой оптики**: исследование оптических полей в квантовых и квазиклассических состояниях для прецизионных методов характеризации объектов.

Еще раз подчеркнем, что решение этих задач возможно при тесном контакте научных и производственных организаций, входящих в консорциум. Именно эта связка должна обеспечить бесшовное движение разработок, ведущихся в ЦКТ по цепочке «фундаментальная НИР» — «прикладная НИР» — «ОКР» — «технология» — «продукт».

Приведем ключевые проекты ЦКТ МГУ по каждому направлению.

Квантовые вычисления

Разработки в области квантовых вычислений подчинены главной цели — построения квантового вычислительного устройства либо компьютера, либо симулятора.

Квантовый компьютер[1] — это физическое устройство, способное решать **определенный круг** математических задач и выполняющее логические операции над квантовыми состояниями путем унитарных преобразований (т.е. сохраняющих энергию), не нарушающих квантовые суперпозиции в процессе вычислений.

Квантовый симулятор — это устройство, моделирующее сложный физический процесс, динамика которого описывается гамильтонианом более или менее воспроизводимым в другой доступной для экспериментального контроля и манипуляций физической системе.

В настоящее время известно порядка десяти физических систем, претендующих на модельные с точки зрения построения на их основе квантовых вычислительных устройств. Адекватность таких систем-кандидатов регламентируется критериями, известными как «критерии Ди Винченцо», которые сводятся к следующим положениям:

- возможность масштабирования;
- надежная инициализация;
- большие времена декогеренции (релаксации) по сравнению с временем срабатывания отдельных логических элементов (гейтов);
- возможность выполнения логических преобразований;
- передача и считывание состояний кубитов.

Здесь имеет смысл пояснить, что под *кубитом* понимается мера квантовой информации, по аналогии с *битом* — в классической информатике. Кубит может быть реализован на различных физических двухуровневых системах, таких как поляризация фотона, состояние спина электрона, невырожденных энергетических состояниях атома или иона, уровнях энергии в (нелинейном) сверхпроводящем контуре и др.

Отметим, что степень развитости разработок в области создания физических систем для реализации алгоритмов квантовых вычислений в России различается. В стране в настоящий момент в данной области развиваются четыре направления, два из которых разрабатываются в МГУ:

- холодные атомы в микродипольных ловушках (физфак МГУ),
- фотоны в линейно-оптических системах (физфак МГУ),
- сверхпроводниковые системы (МИСиС, ИФТТ, МФТИ),
- холодные ионы (ФИАН).

Также следует упомянуть о направлении, развиваемом на физфаке МГУ и ИФМ РАН — квантовые вычисления на основе примесных полупроводниковых структур.

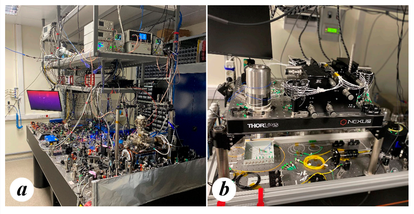
В целом отечественный уровень разработок на сегодняшний день довольно сильно уступает общемировому. Тем не менее, наиболее целесообразным для развития отрасли видится путь одновременной поддержки каждого из четырех направлений, поскольку в данный момент нет объективных предпосылок для выделения одного конкретного лидирующего направления.

Перспективной стратегией представляется разработка квантовых вычислительных устройств среднего масштаба (до 100 кубитов) на упомянутых четырех платформах. На этих устройствах могут быть отработаны системное ПО и определены перспективные прикладные алгоритмы. Одновременно с этим следует развивать интегрально-оптические технологии, с особым акцентом на интеграцию источников одиночных фотонов и многофотонных состояний на оптические чипы.

В ближнесрочной (до 5 лет) перспективе наиболее быстрого прогресса можно ожидать в системах **на основе одиночных нейтральных атомов**. Это идеальные платформы для реализации вариационных квантовых алгоритмов и симуляции квантовых систем среднего масштабав рамках парадигмы NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) — квантовых вычислений без использования кодов коррекции ошибок. Однако масштабирование этих систем до уровня десятка тысяч кубитов представляется технологически сложным. В долгосрочной перспективе, оптические квантовые вычисления **на основе фотонов** должны оказаться более перспективной платформой благодаря своей технологичности и относительно низкому уровню ошибок при выполнении логических операций.

В рамках крупного проекта Фонда перспективных исследований «Прибой», выполняемого на физическом факультете в ЦКТ МГУ, а также реализации Дорожной карты по квантовым вычислениям в течение ближайшего времени планируется:

- создать регистр из 50 атомов-кубитов (Rb_{87});
- создать 25-канальный оптический квантовый процессор;
- продемонстрировать выполнение квантово-механического расчета на двух- и трехатомных молекулах.



Установки по квантовым вычислениям на нейтральных атомах (a) и фотонных чипах (b)

Для решения этих амбициозных задач в ЦКТ построено несколько лабораторий, оснащенных самым современным оборудованием — это высоковакуумная техника, прецизионные лазерные системы, источники и приемники фотонов. Уже сегодня реализовано управление индивидуальными атомами рубидия в двумерных массивах, разработаны и изготовлены многоканальные программируемые интерферометры на основе литографической технологии и технологии фемтосекундной лазерной печати. Вместе с МГУ эти работы выполняют надежные партнеры Центра — МГТУ имени Н.Э. Баумана, ВНИИА имени Н.Л. Духова (Росатом) и физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, институт физики полупроводников СО РАН и другие. Значительную технологическую поддержку оказывает совместный научно-образовательный центр Функциональные Микро/Наносистемы (МГТУ/ВНИИА имени Н.Л. Духова), в котором изготавливаются высококачественные чипы для построения оптических квантовых процессоров.

Еще один проект, который ведется нашим Центром — это создание так называемого квантового симулятора — многокубитной квантовой вычислительной системы с возможностью удаленного сетевого доступа для решения тестовых задач, базирующихся на квантовых алгоритмах. Это вычислительное устройство включает в себя два процессора на основе двух различных физических систем — холодные атомы в оптической ловушке и одиночные фотоны в линейно-оптических сетях. Каждый из процессоров может быть использован по отдельности, либо, если возможно разбиение задачи, они могут работать параллельно. Доступ к симулятору организован через сайт ЦКТ (*rcp.qotlabs.org*). Данный проект будет интересен и научным работникам, и студентам, и представителям коммерческих компаний, которые проходят курсы повышения квалификации, получая или углубляя знания в области квантовых технологий.

Квантовые коммуникации

Квантовая коммуникация — область науки и технологии, которая связана с передачей информации посредством квантовых состояний[2]. Добые разработок по квантовой защищенной связи лежат три утверждения, фактически являющиеся следствием соотношения неопределенностей Гейзенберга и теоремы о запрете клонирования квантовых состояний: наблюдаемые, описываемые некоммутирующими операторами, нельзя измерить одновременно, неизвестное квантовое состояние нельзя копировать и измерение неизвестного состояния приводит к его возмущению.

В подавляющем большинстве случаев носителями информации в квантовой коммуникации являются фотоны по довольно очевидным причинам:

- фотоны — быстрые («flyingqubits»);
- фотоны — дешевые;
- фотоны плохо взаимодействуют с окружением из-за малых значений соответствующих восприимчивостей;
- аппаратная и технологическая часть хорошо развита — она базируется на классических технологиях телекоммуникаций и интегральной оптики.

Сегодня от «настольных» демонстрационных квантово-оптических экспериментов мир шагнул к высокотехнологическим разработкам.

Основные тенденции этих разработок, в основном, сводятся к построению систем защищенной связи на основе либо волоконно-оптических, либо атмосферных (включая космические) каналов связи.

В волоконно-оптических линиях связи это:

- шифрование квантовыми ключами данных, передаваемыми по магистральным линиям связи;
- создание локальных защищенных сетей с электронным документооборотом;
- создание крупномасштабных сетевых структур через доверенные узлы.

В атмосферных/космических каналах это:

- распределение квантовых ключей между мобильными и стационарными объектами;
- распределение ключей между низкоорбитальными спутниками и наземными объектами;
- распределение ключей между низко- и высокоорбитальными спутниками;
- создание глобальных квантовых сетей, охватывающих значительные территории.

На физическом факультете ведутся исследования по обоим направлениям. Реализовано два крупных научных проекта, в результате которых созданы реальные продукты, готовые к коммерциализации. Это QUANDOR — комплекс квантово-криптографической аппаратуры защиты информации, состоящий из 10G шифратора канального уровня (L2) и оборудования квантового распределения ключей (КРК), и «квантовый телефон» QUANTEL — устройство, в котором текстовые файлы, речь и изображения шифруются «квантовыми ключами».

Аппаратура квантового шифрования

Квантовый телефон является частью системы коммуникационного оборудования ViPNet Quantum Security System, которая позволяет организовать квантово-защищенную сеть. Первая в России локальная компьютерная сеть на базе квантового распределения секретных ключей развернута на обоих кампусах МГУ (Ленинские горы и Моховая улица). Сеть протяженностью более 40 км объединяет более 20 абонентских пунктов и связывает кабинеты Ректора, декана физического факультета, нескольких проректоров, ЦКТ и другие подразделения Университета. На базе Университетской квантовой сети (зарегистрированный товарный знак) реализован защищенный документооборот и связь (телефония, видеосвязь, обмен файлами) между легитимными абонентами.

Архитектура Университетской квантовой сети

Оба решения созданы ЦКТ в сотрудничестве с индустриальным партнером компанией «ИнфоТеКС» и компанией-оператором волоконно-оптических линий связи ЮЛ-ком Медна. Эти разработки стали прекрасным образцом плодотворной совместной работы ученых и коммерческих компаний. В результате полученные устройства не просто отвечают запросам рынка на гарантированно безопасную передачу информации, но и полностью отвечают тем функциональным, эстетическим и эргономическим требованиям, которые предъявляются к современному телеком-оборудованию.

Беседа ректора МГУ В.А. Садовничего и декана физического факультета МГУ профессора Н.Н. Сысоева по квантовому телефону (длина линии 100 км). (В центре — С.П. Кулик)

Следующим шагом развития университетской квантовой сети будет создание Национальной квантовой (исследовательской) сети — объединение российских университетов и научных центров, ведущих работы в области квантовых технологий на основе магистральных квантовых сетей, и создание инфраструктуры городских квантовых сетей.

Что касается квантовых систем связи на основе атмосферных каналов, в Центре ведется ряд проектов, в рамках которых исследовано влияние турбулентности на эффективность передачи/приема квантовых состояний света с поляризационными и фазовыми степенями свободы. Здесь ключевым моментом является использование классических систем активного трекинга, адаптированных под низкоэнергетические квантовые состояния — для захвата и удержания канала связи. Разработаны системы квантового распределения криптографических ключей между мобильными и стационарными объектами, включая размещение на низкоорбитальном спутнике.

Также стоит отметить разработанный учеными ЦКТ МГУ квантовый генератор случайных чисел, основанный на пуассоновской статистике фототочтов. Первичным источником случайности являются последовательности фотоотсчетов от квазиодномодотонного излучения, которое регистрируется матрицей кремниевых лавинных детекторов — SiPM (Silicon Photo Multiplier). Использование SiPM позволяет надежно контролировать квантовый характер пуассоновской статистики фототочтов.

Модуль компактного генератора случайных чисел

Специальный алгоритм неэкспоненциальной сложности позволяет извлекать из пуассоновского процесса всю случайность, содержащуюся в нем, а именно случайную равномерную последовательность 0 и 1. Генератор обеспечивает скорость выработки случайных битов до 270 Мбит/с.

СКИЙ ФИЗ

Квантовые сенсоры

Квантовые сенсоры — это высокоточные инструменты, основанные на квантовых системах. Предполагается, что квантовые сенсоры будут иметь характеристики, намного превышающие имеющиеся у классических аналогов. К таким характеристикам относят чувствительность (минимальное значение регистрируемого сигнала), пространственное и временное разрешение, рабочий диапазон измеряемых значений, время отклика или анализа, относительная воспроизводимость (например, частоты в стандартах времени), энергопотребление, габариты, сложность обслуживания, срок службы, стоимость производства и эксплуатации и др. Как и в случае квантовых вычислений, имеются определенные критерии применимости той или иной квантовой системы в качестве сенсора (аналог критериев Ди Винченцо):

1. Квантовая система имеет дискретные уровни энергии. В частности — двухуровневая система (или ансамбль двухуровневых систем) с нижним и верхним уровнями $|0\rangle$ и $|1\rangle$, разделенных энергией перехода $E = \hbar\omega$.
2. Должна иметься возможность приготовления (инициализации) квантовой системы в известных состояниях и выполнения операции считывания (измерения) этих состояний.
3. Квантовой системой можно когерентно манипулировать — обычно с помощью полей, зависящих от времени. Это условие не является строго обязательным для всех релаксаций.
4. Квантовая система взаимодействует с соответствующим физическим объектом $V(t)$, например, электрическим или магнитным полем. Взаимодействие количественно оценивается параметром вида $\gamma = \partial^q E / \partial V^q$, который связывает изменения энергии перехода $E\kappa$ с изменением внешнего параметра $V(t)$. В большинстве ситуаций связь либо линейная ($q = 1$), либо квадратичная ($q = 2$). Взаимодействие с $V(t)$ приводит к сдвигу энергетических уровней квантовой системы.

В основе действия квантовых сенсоров лежат три свойства квантовых состояний:

принцип суперпозиции (квантовая когерентность) — волновые функции квантовых объектов представляют собой линейную комбинацию базисных состояний $|\Psi\rangle = c_1|0\rangle + c_2|1\rangle$;

перепутывание (entanglement) — квантовое состояние составной системы может быть определено лучше, чем состояния подсистем
$|\Psi_{12}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\{|0_1\rangle|1_2\rangle + \{|0_1\rangle|1_2\rangle\}$;

и тот факт, что измерение приводит к вероятностным исходам классических состояний $E_m = M_m^{\dagger} M_m$, $\sum_m E_m = I$, $p_m = \langle\psi|M_m^{\dagger} M_m|\psi\rangle$.

Фактически, квантовый объект — кубит — служит чувствительным зондом для измерения физических (взаимодействующих) систем.

Сегодня устройства на основе квантовых сенсоров принято выделять в три основные группы: сенсоры электрических и магнитных полей; часы, гравиметры и гироскопы, а также группа под условным названием «квантовая метрология».

Один из наиболее интересных проектов в области квантовых сенсоров, реализуемых в Центре квантовых технологий МГУ, является создание детектора одиночных фотонов на основе планарных лавинных фотодиодов (ОЛФД) на гетероструктурах InGaAs/InP для систем однофотонной квантовой связи. Разработка ведется совместно со специалистами Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова (ИФП СО РАН) на основе разработанной ими базовой технологии. Данные устройства предназначены для работы в линейном и однофотонном «гейгеровском» режиме для применения в оптоволоконных системах однофотонной квантовой связи. Также их можно использовать для прецизионных измерений.

Другое устройство, которое относится к квантовым сенсорам и было разработано в ЦКТ — квантовый генератор случайных чисел. Он уже используется в устройствах квантовой связи и был рассмотрено выше.

В ЦКТ активно развивается направление разработки и создания одноэлектронных одноатомных устройств. В частности, ученые из группы О.В. Снигирева работают над созданием **твердотельного одноатомного одноэлектронного транзистора**, изготовленного на поверхности монокристалла полупроводника или диэлектрика с имплантированным в приповерхностный слой одиночным примесным атомом. Электронный транспорт осуществляется в системе исток — примесный атом — сток. Управление током через транзистор осуществляется электростатическим затвором. Свойства примесного атома и полупроводниковой или диэлектрической подложки целиком определяют транспортные свойства такого транзистора.

Одноатомные одноэлектронные транзисторы дадут возможность управлять транспортом одиночных электронов, вплоть до электрического считывания заселенности одночастичных состояний. В них реализуется возможность функционального использования особенности дискретного энергетического спектра электронов. Создание таких элементов и устройств открывает дорогу к созданию электронных устройств с атомной функциональной структурой и субнанометровыми характерными размерами рабочих элементов. Использоваться подобные устройства могут в элементах твердотельного квантового компьютера, в квантовых сенсорах, зарядовых клеточных автоматах, зарядовых резервуарных нейронных сетях.

Еще один интересный проект, над которым работают сотрудники группы нанофотоники под руководством А.А. Федянина, — создание **однофотонного источника света**.

Однофотонные излучатели являются одним из ключевых элементов во многих задачах в области квантовой информатики, в том числе в квантовых вычислениях и квантовой криптографии. Разрабатываемые в ЦКТ МГУ устройства представляют собой наноалмазы с центрами окраски, нанесенные на поверхность фотонного кристалла, который поддерживает распространение поверхностных электромагнитных волн, называемых блоховскими поверхностными волнами (БПВ). Наноалмазы покрываются слоем полимера, а затем в области наноалмазов с единичным центром окраски происходит создание волноводных структур с помощью метода двухфотонной лазерной литографии. Таким образом, реализуется метод интеграции однофотонных источников в волновод с помощью комбинирования двух технологий в рамках одной экспериментальной установки: технологии сканирования сигнала люминесценции и поиска наноалмазов, излучающих в однофотонном режиме, с последующей технологией лазерной литографии для создания волноводов над найденными наноалмазами. Отметим, что применение технологии двухфотонной лазерной литографии позволяет создавать сложные компактные волноводные структуры за один сеанс изготовления без увеличения стоимости конечного устройства.

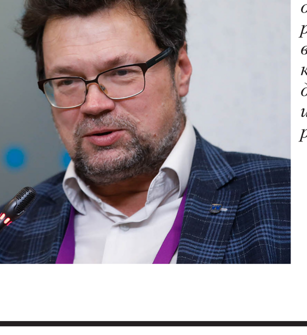
Безусловными плюсами разрабатываемых устройств является то, что они не требуют сложных алгоритмов настройки и имеют высокую скорость работы. Кроме того, для БПВ отсутствует фиксированный закон дисперсии, а у устройств на их основе — омические потери. Использование БПВ позволяет управлять законом дисперсии за счет подбора материалов и толщин слоёв фотонного кристалла, а также существование как ТМ-, так и ТЕ-поляризованных волн.

В ЦКТ традиционно продолжаются исследования **по квантовой оптике**. В последнее время усилия сосредоточены в основном на исследовании возможностей квантовой когерентной оптической томографии высокого разрешения и методов генерации тепловых полей с вычитанием/добавления определенного числа фотонов. Перспективным представляется проект по разработке методов характеризации линейно-оптических интегральных схем (ЛОИС) на основе интерферометрии тепловых полей. Преимуществом этого метода по сравнению со стандартным является то, что с одной стороны он не требует большого времени накопления данных, в отличие от метода, основанного на корреляционных измерениях бифотонов, а с другой стороны, его точность не ограничена фазовыми флуктуациями на входе в систему в отличие от метода, основанного на измерениях когерентных состояний.

Данный метод зависит лишь от уровня темновых шумов детектора. С увеличением шумов потери точности увеличиваются, но их можно скомпенсировать большим временем накопления, что с одной стороны не сильно увеличит время моделирования или эксперимента, а с другой стороны позволит уменьшить погрешности определения параметров передаточной матрицы и получить необходимую точность восстановления. Иными словами, разработанный метод позволяет получить бо́льшую точность при менее дорогом экспериментальном оборудовании.

Подводя итог, отметим, что в МГУ сконцентрированы значительные ресурсы и кадровый потенциал для решения разнообразных задач в области квантовых технологий. Выполняемые разработки еще совсем недавно были на переднем крае фундаментальных исследований, а сегодня составляют прочную основу нового технологического направления и подготовки квалифицированных кадров.

Сегодня исследования и разработки ведутся в рамках Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».



[1] Это определение далеко не единственное, но, на наш взгляд, наиболее точно соответствующее современным физическим моделям.

[2] Заметим, что квантовые коммуникации отнюдь не сводятся к квантовой криптографии, как часто можно услышать. Известно множество протоколов, таких как квантовая телепортация, сверхплотное кодирование, протоколы квантовой теории игр и проч., не имеющих отношения к проблеме распределения криптографических ключей.

С.П. Кулик, профессор кафедры квантовой электроники, научный руководитель Центра квантовых технологий физического факультета МГУ

Кафедра физики частиц и космологии: постигая единство микро- и макромира

В последние десятилетия сформировалась и стала быстро развиваться новая область фундаментальной науки на стыке физики элементарных частиц, астрофизики и космологии. Это связано с осознанием того факта, что законы микромира играют важнейшую роль в эволюции Вселенной, особенно на ранних её этапах; эти законы во многом определяют и свойства астрофизических объектов. Кроме того, результаты, полученные в космологии и астрофизике, существенно дополняют представления о мире элементарных частиц; примеры будут вскоре приведены. Наконец, звезды и квазары могут служить источниками как известных частиц высоких энергий, таких как фотоны и нейтрино, так и гипотетических частиц, например, аксионов.

Ответом на вызов времени и стало создание кафедры физики частиц и космологии на физическом факультете. Эта теоретическая кафедра была основана в декабре 2008 года по инициативе сотрудников физического факультета МГУ и Института ядерных исследований РАН.

Рис.1. Академики А.Н. Тавхелидзе (слева) и Н.Н. Боголюбов.

Первым заведующим кафедрой стал академик РАН А.Н. Тавхелидзе, а с 2011 года ее возглавляет академик РАН В.А. Рубаков.

Стоит сказать, что основатели кафедры весьма своевременно уловили тенденции развития фундаментальной физики. Кафедра была одной из первых в мире по данной тематике, а сейчас аналогичные кафедры или институты имеются во многих ведущих вузах мира, включая университеты Парижа, Нью-Йорка, Мюнхена, Барселоны, Лозанны, Токио. С коллегами из разных стран кафедра поддерживает устойчивые научные связи.

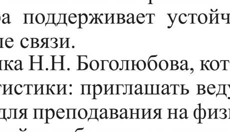
Деятельность кафедры следует идее академика Н.Н. Боголюбова, который начал воплощать её на кафедре квантовой статистики: приглашать ведущих учёных из академических институтов и ОИЯИ для преподавания на физическом факультете, которые читали бы курсы лекций и работали со студентами и аспирантами физического факультета в качестве научных руководителей, будучи внешними совместителями.

Обучение студентов на кафедре ориентировано на научную работу в сотрудничестве со специалистами из различных институтов — ИЯИ РАН, ИТМФ МГУ, НИИЯФ МГУ, ОИЯИ, ФИАН, МИ РАН, ИКИ РАН и других.

Но вернемся к физике. На наших глазах космология стала точной наукой, в первую очередь благодаря бурному развитию методов наблюдений и интерпретации их результатов. Исследования реликтового микроволнового излучения, распределения галактик, темпа расширения сегодня и в прошлом, гравитационного линзирования позволили получить стройную, количественную космологическую картину, характеризуемую высоким уровнем точности. При этом целый ряд свойств Вселенной и заполняющей её материи не вписываются в существующие представления об элементарных частицах и фундаментальных взаимодействиях, что, несомненно, является вызовом для науки.

Некоторые нерешенные проблемы фундаментальной физики

Чтобы дать представление о характере задач, возникающих на стыке физики частиц, космологии и астрофизики, коротко перечислим некоторые нерешенные проблемы в этой области.



Баланс энергий в современной Вселенной

Один круг проблем связан с составом материи/энергии в современной Вселенной, который сейчас хорошо известен благодаря космологическим и астрофизическим наблюдениям.

Плотность энергии (в основном это энергия покоя, $E=mc^2$ обычного вещества — протонов, атомных ядер, электронов — составляет около 5% полной плотности энергии в современной Вселенной, еще менее 1% дают нейтрино. Все остальное — «неизвестно что». Это «неизвестно что» делится на две фракции: тёмную материю и тёмную энергию. Они различаются своими свойствами по отношению к гравитационным взаимодействиям. Тёмная материя испытывает такие же гравитационные силы, как и обычная материя, она собирается в сгустки (галактики, скопления галактик) и играет доминирующую роль в образовании крупномасштабной структуры Вселенной. Скорее всего, тёмная материя состоит из новых нейтральных массивных стабильных (или очень долгоживущих) элементарных частиц, которые до сих пор не зарегистрированы в экспериментах на Земле. Задача теоретиков — предложить конкретные модели физики частиц с частицами тёмной материи, а экспериментаторов — открыть эти частицы.

В отличие от тёмной материи тёмная энергия в определенном смысле испытывает антигравитацию, она равномерно распределена в пространстве, не собирается в сгустки, а её главная роль — обеспечивать наблюдаемое ускоренное расширение Вселенной. Природа тёмной энергии — возможно, наиболее трудная проблема фундаментальной физики.

Наконец, само наличие обычного вещества и отсутствие антивещества в современной Вселенной само по себе представляет проблему, которую сформулировал А.Д. Сахаров в 1967 году. Дело в том, что в ранней, горячей Вселенной относительный избыток вещества над антивеществом составлял величину порядка 10^{-9}, и этот «перекос» необходимо объяснить, исходя из представлений физики микромира.

Подчеркнём, что тёмная материя и избыток вещества над антивеществом являются прямыми и неоспоримыми свидетельствами неполноты современной теории микромира — Стандартной модели физики элементарных частиц.

К этому кругу вопросов примыкает и вопрос о роли нейтрино в космологии. Реликтовые нейтрино, будучи очень лёгкими частицами, оказывают специфическое влияние как на процесс формирования структур во Вселенной (галактик и их скоплений), так и на свойства реликтового микроволнового излучения. Следующие отсюда космологические ограничения на массы нейтрино сегодня сильнее ограничений, полученных из прямых наземных экспериментов Троицк ν-масс и KATRIN; вполне возможно, что массы нейтрино будут впервые измерены именно методами космологии!

Второй круг проблем имеет отношение к астрофизике частиц и многоканальной (multimessenger) астрономии. Речь идет об источниках космических частиц высоких и сверхвысоких энергий — протонов, атомных ядер и в особенности нейтрино и γ-квантов. В самое последнее время в этой области наметился ощутимый прогресс, о котором отчасти уже написано в **«Советском физике»** (статья* А.В. Плавина и др. в номере 4(145) за 2020 год). Изучение наиболее мощных астрофизических источников, таких как квазары — гигантские черные дыры — с помощью одновременной регистрации электромагнитного излучения в широком диапазоне энергий и нейтринного излучения становится новым словом в астрофизике. Еще одним источником информации о катастрофических событиях в космосе, используемым параллельно с электромагнитным и нейтринным излучением, становятся гравитационные волны. К астрофизическим аспектам научного направления кафедры примыкает и задача поиска новых гипотетических частиц, которые могут рождаться в астрофизических объектах — звездах, квазарах и т.д.

Чрезвычайно интересным является **вопрос о самых первых стадиях эволюции Вселенной**, предшествовавших горячей стадии. Результаты наблюдательной космологии, и в первую очередь данные по реликтовому микроволновому излучению, однозначно свидетельствуют о том, что известная горячая стадия не была первой в развитии Вселенной, что ей предшествовала совершенно иная стадия (а, возможно, несколько различных стадий), про которую можно сказать, что именно на ней происходило образование первичных неоднородностей во Вселенной, которые в конечном итоге развились в галактики, скопления галактик и другие структуры. Наиболее популярной и разработанной гипотезой здесь служит космическая инфляция — экспоненциальное расширение Вселенной с гигантским темпом. Однако пока нельзя исключить и другие возможности, такие как модель с отскоком (сжатие — остановка сжатия — расширение Вселенной). Теоретические исследования в этой области направлены на разработку конкретных моделей и получение предсказаний, доступных проверке в идущих и будущих экспериментах.

Научные направления кафедры и результаты 2017–2022 г.г.

Этот краткий список нерешенных проблем иллюстрирует те научные направления, которые являются основными для кафедры: космология, астрофизика частиц, физика микромира. Разумеется, исследования на стыке физики частиц, астрофизики и космологии требует развития соответствующих теоретических подходов, среди которых особое место занимает квантовая теория поля, а также построения моделей физики частиц, выходящих за рамки Стандартной модели, и разработки теории гравитации. Все эти направления представлены в научной программе кафедры и отражены в научной работе студентов и аспирантов. Кроме того, сотрудники кафедры обучают студентов и ведут научную работу по развитию методов компьютерного моделирования физических процессов в космологии, астрофизике и физике частиц, а также методов обработки экспериментальных данных, включая методы машинного обучения.

Среди результатов, полученных сотрудниками кафедры вместе со студентами и аспирантами, можно обратить внимание на следующие:

- Подтверждение на высоком уровне достоверности галлиевой нейтринной аномалии в эксперименте BEST, которая указывает на существование стерильного нейтрино (рис. 2).
- Построение самосогласованных моделей ранней Вселенной без начальной сингулярности.
- Построение моделей космической инфляции с низким энергетическим масштабом и получение предсказаний для будущих экспериментов.
- Создание феноменологической модели и стратегии поиска новых тяжелых нейтральных лептонов (рис. 3).
- Построение метода функционального интегрирования для моделей квантовой гравитации.
- Наблюдение фотонов с энергией выше 300 ТэВ, связанных с высокоэнергетическим нейтрино из области Лебедя, в эксперименте Ковёр-2.
- Обнаружение корреляции прихода высокоэнергичных нейтрино с радиовспышками от радио-ярких блазаров.
- Численный расчет гравитационной Бозе-Эйнштейновской конденсации скалярной тёмной материи с образованием Бозе-звёзд (рис. 4).
- Численный расчет гравитационной Бозе-Эйнштейновской конденсации скалярной тёмной материи с образованием Бозе-звёзд (рис. 4).
- Получение ограничений на компоненту тёмной материи, распадающуюся после рекомбинации.

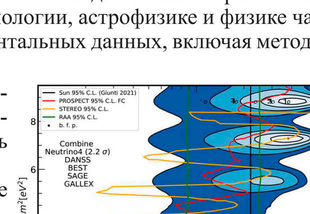


Рис.2. Область в пространстве параметров стерильных нейтрино, предпочтительная с точки зрения существующих экспериментов, в том числе эксперимента BEST на Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.

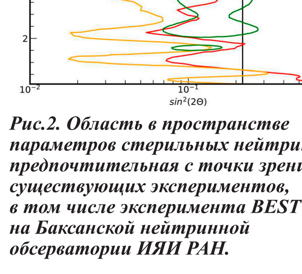


Рис.3.Чувствительность идущих и будущих экспериментов к тяжелым нейтральным лептонам.

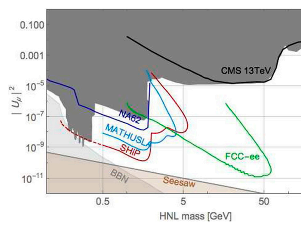


Рис.4. Образование Бозе-звезды (правый рисунок) в результате эволюции облака скалярной тёмной материи, изображенного на левом рисунке.

Разумеется, этот краткий перечень — далеко не исчерпывающий. За истекшие 5 лет сотрудниками кафедры опубликовано более 100 статей в ведущих мировых научных журналах, из них 15 статей с участием студентов кафедры, включая 4 статьи с участием учащихся бакалавриата.

Ещё о кафедре

Кроме заведующего кафедрой академика РАН В.А. Рубакова и заместителя заведующего профессора В.В. Белокурова, сотрудниками кафедры являются другие активные ученые — доктора или кандидаты наук, основным местом работы которых служит Институт ядерных исследований РАН. Их — 12 человек, включая академика РАН И.И. Ткачёва, членов-корреспондентов РАН Д.С. Горбунова, М.В. Либанова и С.В. Троицкого. Кафедра обеспечивает научное руководство студентами и аспирантами и чтение набора спецкурсов, необходимого для подготовки физиков-теоретиков по следующим основным направлениям:

- космология,
- физика элементарных частиц,
- квантовая теория поля,
- астрофизика частиц,

а также по смежным направлениям, таким как

- методы обработки экспериментальных данных, включая методы машинного обучения,
- методы компьютерного моделирования физических процессов в космологии, астрофизике и физике частиц.

Кроме того, сотрудники кафедры ведут 3 спецкурса по магистерской программе Н9 Школы «Космос» — «Физика астрочастиц и тёмная материя» и 5 спецкурсов в Филиале МГУ в г. Сарове (некоторые — совместно с сотрудниками Отделения ядерной физики и кафедры теоретической физики физфака).

На основе курсов, чтение которых ведётся на кафедре, сотрудниками кафедры опубликовано около десятка монографий; практически все они переведены на английский язык и пользуются популярностью в России и мире.

Студенты кафедры почти ежегодно занимают призовые места на конкурсе дипломных работ им. Р.В. Хохлова, многие имеют именные стипендии или стипендии фонда «Базис». Успешные студенты и аспиранты участвуют в работах по грантам их научных руководителей (в общей сложности 30 студентов и аспирантов в 2017–2022 годах), принимают активное участие в конференциях и школах для молодых учёных по тематике кафедры. Можно с удовлетворением отметить, что около 60% выпускников магистратуры кафедры сегодня продолжают заниматься научной работой в университетах и исследовательских институтах, в основном в России.

Задачи, стоящие перед фундаментальной физикой на стыке космологии, физики частиц и астрофизики, чрезвычайно сложны, но и исключительно интересны. Представляется, что кафедра физики частиц и космологии вносит достойный вклад в решение этих задач как своими научными результатами, так и подготовкой учёных высшей квалификации. Можно с уверенностью сказать, что дальнейшее развитие научных направлений кафедры приведет к ещё более впечатляющим продвижениям в наиболее фундаментальной области знаний, ориентированной на изучение глубинной структуры вещества и её связи с физическими процессами, происходящими во Вселенной.

Заведующий кафедрой физики частиц и космологии профессор, академик РАН В.А. Рубаков,
Заместитель заведующего кафедрой физики частиц и космологии профессор В.В. Белокуров

Примечание Главного редактора:
А.В. Плавин, Ю.Ю. Ковалев, Ю.А. Ковалев, С.В. Троицкий. Нейтрино высоких энергий от ядер активных галактик. «Советский физик» №4(145), 2020. *https://phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2020/04(145)-2020/28492/*
Ежегодник газеты «Советский физик».2020 год. С.206-209.

Космическая миссия GAIA

На кафедрах астрономического отделения и в отделах ГАИШ активно ведутся работы по комплексному изучению строения и динамики нашей Галактики и её подсистем, а также уточнению универсальной шкалы расстояний. Работы в этом важнейшем направлении опираются на созданные в нашем коллективе эффективные оригинальные алгоритмы анализа наблюдательных данных и использование уникальных результатов астрометрических, фотометрических и спектральных наблюдений, недавно полученных на созданной Европейским Космическим Агентством (ESA) космической обсерватории GAIA. Достигнутая невообразимая астрометрическая точность расстояний и скоростей сотен миллионов звёзд стимулировала новый виток проводимых в МГУ исследований Млечного Пути и его населений, поддержанных грантами РФФИ и РНФ.

Под руководством проф. А.С. Расторгуева, доц. Е.В. Глушковой и зав. отделом ГАИШ А.К. Дамбиса при активном участии студентов и аспирантов физического факультета Н.Д. Уткина, А.А. Чемеля, Л.Г. Ялялиевой, Е.Н. Подзолковой и Я.А. Лазовика на основе данных GAIA выполнены работы по определению гравитационного потенциала Галактики, определены орбиты шаровых скоплений в нестационарном гравитационном поле Млечного Пути, детально изучен состав звёздных скоплений и оценен их возраст. Исследованы особенности движений звёзд в диске и гало Млечного Пути и характер его спирального узора; разработаны новые методы определения радиусов и светимостей звёзд, используемых в качестве »стандартных свечей» для определения расстояний до галактик, а также и другие эффективные средства уточнения шкал расстояний, такие как метод статистических параллаксов. Обнаружено и доказано быстрое расширение молодых звёздных группировок. Эти результаты опубликованы примерно в 50 наших статьях, в том числе в ведущих рецензируемых журналах (например, Yalyalieva et al., Astrophysical Bulletin, V.73, pp.335-343, 2018; Melnik and Dambis, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, V.493, p.2339-2351, 2020; Chemel et al., Astrophysical Bulletin, V.73, pp.162-177, 2018; Bobylev et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, V.502, pp.4377-4391, 2021; Lazovik and Rastorguev, The Astronomical Journal, V.160, id.136, 2020; Utkin and Dambis, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, V.499, pp.1058-1071, 2020; Utkin et al., Astronomy Letters, V.44, pp.688-698, 2018; Rastorguev et al, Astrophysical Bulletin, V.77, pp. 144-149, 2022; Chemel et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, V.515, pp.4359-4370, 2022; Yalyalieva et al., Astrophysical Bulletin, V.77, p.78-83, 2022; Melnik et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, V.507, pp.4409-4424, 2022 и другие.). Эти работы высоко оценены астрономическим сообществом и хорошо цитируются.

Полученные в МГУ важные результаты стали возможными благодаря запущенной 19 декабря 2013 г. с космодрома Куру (Французская Гвиана) с помощью российского носителя «Союз» обсерватории GAIA («Гея»), созданной Европейским космическим агентством и предназначенной для астрометрических, фотометрических и спектральных наблюдений около 2 млрд звёзд Млечного Пути и близких галактик. Постараемся рассказать читателям об особенностях устройства этой необычной обсерватории, её возможностях, последних результатах и имеющихся трудностях.

Разработка проекта этой обсерватории началась ещё в 1980-х годах, и её первоначальное название — GAIA — было акронимом от «Global Astrometric Interferometer for Astrophysics» (предполагалось, что прецизионные астрометрические наблюдения звёзд будут вестись методами оптической интерферометрии). Впоследствии от интерферометрического метода измерений вследствие большой сложности и стоимости реализации такого проекта отказались, решив сохранить первоначальное название. С помощью разгонного блока «Фрегат» обсерватория была доставлена в окрестность точки Лагранжа L2 (рис. 1), которая находится на расстоянии около 1.5 млн км от Земли в антисолнечном направлении (как известно, это область устойчивого движения космических аппаратов). Примечательно, что в июле 2019 года в ту же область пространства была запущена российско-германская рентгеновская обсерватория «Спектр-РГ» (включающаяроссийскийтелескопART-XC и германский телескоп eROSITA), а в декабре 2021 года — крупнейший космический телескоп имени Джеймса Уэбба JWSTс зеркалом диаметром 6.5м, предназначенный для наблюдений в оптике и ближнем ИК-диапазоне.

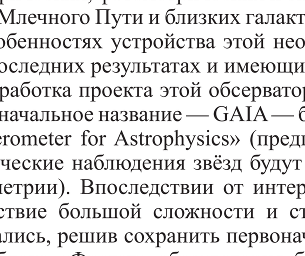


Рис. 1. Схема запуска обсерватории GAIA в точку Лагранжа L2 (около 1.5 млн км от Земли в сторону, противоположную от Солнца)

Одной из главнейших задач обсерватории GAIA являются прецизионные астрометрические наблюдения, с помощью которых, в частности, определяются тригонометрические параллаксы и собственные движения звёзд. Как известно, геометрический метод определения межзвёздных расстояний не требует никаких дополнительных знаний о физических свойствах звёзд и поэтому считается базовым, и именно он лежит в самой основе измерения расстояний во Вселенной, будучи первой ступенькой иерархической «лестницы» расстояний. Метод тригонометрических параллаксов сводится к измерению предельно малых углов смещения звёзд, описывающих на небесной сфере параллактические эллипсы вследствие орбитального движения Земли вокруг Солнца. Попутно измеряются так наз. «собственные движения» звёзд — их годичные систематические угловые смещения, отражающие индивидуальные скорости движения поперёк луча зрения относительно земного наблюдателя.

Если вспомнить не такое уж далёкое прошлое, то в 1990-е годы астрономическое сообщество поражала точность параллаксов, измеренных космической обсерваторией HIPPARCOS: около 1 мсд (миллисекунды дуги), что было примерно в 100 раз точнее результатов, имевшихся в то время лучших наземных наблюдений. (К слову, под углом 1 мсд был бы виден лист бумаги толщиной около 0.1 мм или человеческий волос с расстояния 20 км! На рубеже XX–XXI веков это казалось фантастическим инженерным достижением прецизионных измерительных технологий.) Однако космическая обсерватория GAIA доказала, что и это не предел. По расчётам к концу миссии GAIA — а это ориентировочно 2025 год точность измерения небесных координат и тригонометрических параллаксов звёзд 15–17 звёздной величины (они в 10–30 тыс. раз слабее самых тусклых звёзд, доступных невооружённому глазу) должна достичь 10 мксд, т.е. возрасти ещё в 100 раз по сравнению с HIPPARCOS. А это уже волос, наблюдаемый с расстояния порядка 2000 км! Пропорционально возрастёт и точность собственных движений.

Столь высокие точности позиционных измерений обусловлены, с одной стороны, большим числом измерений (достигающим 100–200) каждой звезды, а с другой — измерением координат звёзд относительно большого числа (более 1.6 млн) космических реперов — квазаров, которые из-за своей огромной удалённости можно считать практически неподвижными объектами, не меняющими со временем своего положения на небе. Современная координатная небесная сеть использует квазары как надёжные и уникальные реперы системы координат. Легко сообразить, что на 1 кв. градус небесной сферы в среднем приходится около 40 квазаров, обеспечивающих точные вычисления координат объектов. Разумеется, свой вклад в фантастическое увеличение астрометрической точности вносит и отсутствие атмосферной турбулентности, что позволяет в полной мере использовать дифракционное разрешение зеркал телескопа.

Техника наблюдений обсерватории GAIA принципиально отличается от того, как это происходит на других наземных и космических телескопах. Во-первых, на общей фокальной плоскости создаются изображения сразу двух участков неба, наблюдающихся двумя прямоугольными зеркалами, разнесёнными на угол 106.5°. Этот принцип астрометрии широкого поля позволяет производить взаимную координатную привязку объектов в двух далёко отстоящих звёздных полях, что позволяет существенно повысить точность позиционных наблюдений ив конечном счёте создать единую координатную сеть, опирающуюся на квазары. Во-вторых, наблюдения ведутся не путём последовательных наведений на конкретные объекты наблюдательной программы, а методом сканирования небесной сферы.

Рис. 2. Сканирующий метод наблюдений: вращение обсерватории вокруг оси и прецессия оси относительно направления на Солнце. Вследствие прецессии после одного осевого оборота большой круг сканирования смещается примерно на 106.5 угловых минут

Обсерватория вращается вокруг своей оси с периодом около 6 часов, ось вращения прецессирует вокруг направления на Солнце под углом 45° с периодом 63 дня, и сама обсерватория следует за Землёй в её орбитальном движении (рис. 2). Сочетание этих движений позволяет со временем много раз покрыть наблюдениями всю небесную сферу, причём за планируемое время работы обсерватории каждая звезда в среднем будет наблюдаться примерно 70 раз. Благодаря хорошо продуманной схеме сканирования наблюдениями будет покрыто всё небо (к настоящему времени обсерватория выполнила 20 сканов всего неба).

Рис. 3. Устройство обсерватории GAIA. 1, 2 — главные зеркала с углом 106.5 град. между ними; 3 — общая фокальная плоскость. Диаметр несущего тора около 3 м

На рис. 3 показана схема научного модуля GAIA. Его основой служит жёсткий несущий тор из карбида кремния с закрепленными на нём прямоугольными главными зеркалами размером 140x55 см, общей фокальной плоскостью размером 104x43 см, содержащей 106 ПЗС-матриц формата 4500x1966 px, а также вспомогательными зеркалами (обеспечивающими эффективное фокальное расстояние главных зеркал 35 м), блоками призменного фотометра, дифракционного спектрографа и средствами контроля. Требования к стабильности всего модуля чрезвычайно высоки: так, например, для реализации заявленной астрометрической точности порядка 10 мксд требуется осуществлять постоянный контроль за положением фокальной плоскости и зеркал с точностью около 0.001 мкм.

Схема общей фокальной плоскости показана на рис. 4. GAIA обладает самым большим астрономическим ПЗС-сенсором с общим числом пикселей около 1 млрд. Фокальная область поделена на область отождествления звёзд (SM — SkyMapper), астрометрическое поле AF, синий и красный фотометрические массивы ВРи RP, и спектральный массив ПЗС-матриц RVS. Изображение звезды проходит слева направо последовательно по всем этим массивам матриц примерно за 60 сек. Поле зрения составляет около 0.7°. Для считывания сигнала используется специальный контроллер, функционирующий в режиме ВЗН (временная задержка с накоплением).

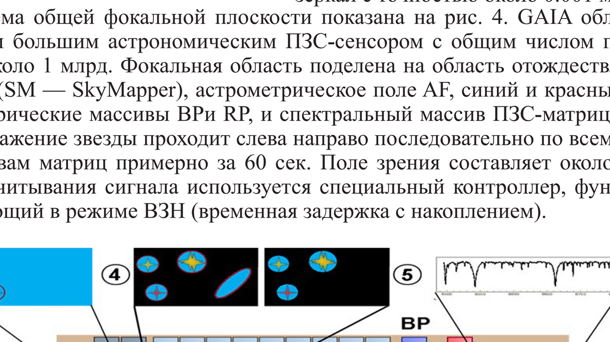


Рис. 4. Схема фокальной плоскости обсерватории GAIA. Путь звезды при сканировании — слева направо. SM (1–3) — массив отождествления объектов; AF (4–6) — астрометрический массив; BP, RP (7) — фотометрические массивы ПЗС-матриц; RVS (8) — спектральный массив и измерение лучевых скоростей. BAM — ПЗС-матрицы мониторинга базового угла между главными зеркалами; WFS — ПЗС-матрицы контроля качества фокальной плоскости

Во время каждого прохождения звезды вдоль фокальной плоскости последовательно регистрируется информация о её текущем положении относительно реперной системы координат, определяется её блеск и со спектральным разрешением R~11500 регистрируется спектр в узком диапазоне 845–870 нм. Все данные автоматически обрабатываются и сохраняются на мощном бортовом компьютере. Для правильного отождествления звёзд от скана к скану и распознавания объектов реализован метод машинного самообучения. Об эффективности используемого алгоритма можно судить по тому, что даже в плотных звёздных полях в поясе Млечного Пути система успешно распознаёт треки нескольких миллионов объектов, одновременно проходящих по фокальной плоскости.

GAIA представляет собой многоцелевую универсальную обсерваторию, выполняющую, помимо прецизионных астрометрических измерений, астрофизические наблюдения. Они включают измерения блеска звёзд до 21-й звёздной величины (эти предельно слабые звёзды в 200–300 млн раз слабее Веги) в двух широких полосах, синей и красной, в белом свете, а также спектральные наблюдения, в том числе измерения лучевых скоростей звёзд. 13 июня 2022 года астрономам стал доступен 3-й каталог звёздных данных GAIA, содержащий более 1.8 млрд объектов. В нём более 1.55 млрд звёзд с высокоточными измерениями блеска и цвета, 1.47 млрд звёзд с измеренными параллаксами и собственными движениями, почти 34 млн звёзд с измеренными лучевыми скоростями (это в пять раз больше того, что было до того сделано на наземных обсерваториях). Для 471 млн звёзд впервые по фотометрическим и спектральным данным с привлечением библиотек теоретических спектров оценены основные физические характеристики — эффективные температуры, поверхностные ускорения силы тяжести, химический состав; несмотря на относительно небольшую точность параметров, небывалая массовость измерений открывает широкие возможности исследования звёздных населений Млечного Пути.

Дополнительно было открыто почти 10 млн переменных звёзд, разбитых на 24 класса по типам переменности. Особо следует отметить, что среди них около 15000 цефеид и 271000 лирид — пульсирующих переменных звёзд, давно используемых астрономами в качестве «стандартных свечей», т.е. объектов с заранее известной светимостью; для них существуют зависимости «период — светимость — химический состав». Эти объекты издавна используются астрономами для определения расстояний до близких и далёких галактик, геометрические расстояния до которых принципиально невозможно определить прямыми методами из-за их большой удалённости. Прецизионные тригонометрические параллаксы этих и некоторых других «стандартных свечей» нашей Галактики, как можно надеяться, позволят существенно уточнить их светимости и как следствие — всю универсальную шкалу расстояний, что и является одной из основных задач миссии GAIA. Кроме того, найдено более 6 млн кандидатов в квазары и 4.8 млн кандидатов в галактики, выглядящих как диффузные объекты; наблюдались более 158000 объектов в Солнечной системе, в основном астероиды.

Вернёмся, однако, к самому ценному содержанию последних каталогов миссии GAIA — тригонометрическим параллаксам и собственным движениям. Здесь имеется ряд нерешённых проблем. Во-первых, около 20% из общего числа 1.47 млрд измеренных тригонометрических параллаксов оказались отрицательными, что совершенно не соответствует их физическому смыслу. Дело в том, что тригонометрический параллакс определяется не как физический эквивалент расстояния до объекта, а как математический параметр, входящий в простую модель изменения координат, включающую линейное изменение координат со временем (собственное движение), на которое накладываются параллактические колебания, отражающие орбитальное движение Земли. Поскольку текущие координаты неизбежно определяются с ошибками, то для далёких звёзд, у которых истинный параллакс близок к нулю, измеренный «параллакс» с большой вероятностью может оказаться отрицательным. Однако даже такие «параллаксы» не стоит отбрасывать: зачастую Байесовские оценки, оперирующие априорными и апостериорными распределениями параллаксов, даже в этих случаях позволяют найти правдоподобные наивероятнейшие расстояния до звёзд: математическая статистика и здесь выручает нас.

Во-вторых, и это более серьёзно, в 3-й версии каталога GAIA измеренные параллаксы имеют систематическую ошибку: они в среднем меньше истинных на 17–20 мксд (это означает, что вычисляемые по ним расстояния будут систематически завышенными). Величина систематической ошибки сравнима с точностью определения самых надёжных параллаксов, и это не так хорошо для интерпретации данных. Впервые это было отмечено ещё во 2-й версии каталога миссии GAIA: оказалось, что средний параллакс выборки, включающей более чем 550000 квазаров, с большой степенью уверенности составляет -29 мксд; то же самое отмечено и в 3-й версии каталога, в котором система координат опирается уже на 1.6 млн квазаров. Причины появления систематической ошибки параллаксов пока не вполне понятны. Самое печальное, что систематическая ошибка не только является зональной (т.е. зависит от положения объекта на небе), но и зависит от видимого блеска и цвета объекта. Не исключено, что какая-то часть систематической ошибки может быть связана со включением в выборку квазаров нормальных звёзд с малыми параллаксами и собственными движениями (а это был один из критериев отбора квазаров). И также не исключены аппаратные эффекты, например, связанные с нестабильностью оптической системы. Хочется верить, что в последующих версиях каталога GAIA, появление которых ожидается в 2024/2025 годах, эта проблема будет эффективно решена, а в ожидании этого пользователям предлагается ряд эмпирических алгоритмов исправления систематической ошибки.

В-третьих, несмотря на в общем эффективную работу алгоритма идентификации объектов, существуют проблемы определения астрометрических данных в плотных звёздных полях — в плоскости Млечного Пути, в близких галактиках, таких как Магеллановы Облака и галактика Андромеды. На рис. 5 показана характерная для этих объектов «вафельная» структура поля тригонометрических параллаксов, представляющая собой периодическое чередование больших и малых усреднённых значений тригонометрического параллакса. Характерный масштаб «вафельного» узора — около 1°, а амплитуда достигает 15 мксд; примечательно, что масштаб узора близок к размеру поля зрения обсерватории GAIA. Причины этого явления пока не выяснены.

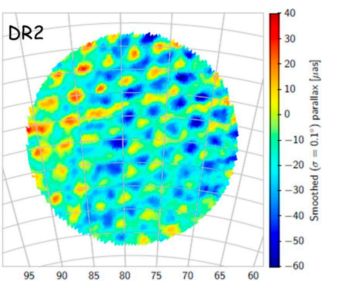


Рис. 5. «Вафельная» структура поля средних параллаксов во 2-м каталоге GAIA в направлении на Большое Магелланово Облако. По осям отложены выраженные в градусах экваториальные координаты

Несмотря на указанные проблемы астрометрии, имеющиеся в распоряжении астрономов, результаты наблюдений GAIA уже привели к подлинной революции в изучении Млечного Пути и его населений. Так, для звёзд ярче 15-й звёздной величины уже достигнута точность параллаксов около 20–30 мксд. Легко сообразить, что при такой точности параллаксов радиус сферы, в которой расстояния до звёзд нам стали известны с точностью лучше 10%, увеличился до 5 кпк (это более половины расстояния от Солнца до центра Млечного Пути, а к концу миссии может ещё возрасти до 10 кпк) по сравнению со 100 пк на рубеже веков для обсерватории HIPPARCOS. Кроме того, достигнутая фантастическая точность собственных движений — 20–30 мксд/год — позволяет даже на столь большом расстоянии вычислять тангенциальные скорости многих звёзд с точностью порядка 0.5 км/с (это при том, что реальный разброс скоростей в диске Млечного Пути составляет от 30 до 60 км/с). Легко понять, что наблюдательный материал по расстояниям и собственным движениям даёт возможность изучать кинематику населений Млечного Пути с немыслимой ранее детальностью. Как уже отмечалось, высокоточные тригонометрические расстояния позволят существенно уточнить светимость таких «стандартных свечей», как цефеиды, лириды, долгопериодические красные переменные, а также некоторые классы ярких красных гигантов. В конечном счёте это приведёт к уточнению всей используемой универсальной шкалы расстояний, где для оценки космологических расстояний до далёких галактик чаще всего используются термоядерные Сверхновые типа Ia. Можно ожидать, что работы в этом направлении помогут решить остро стоящую в наше время проблему «Hubble Tension» (значимых расхождений между значениями постоянной Хаббла, характеризующей расширение Вселенной, выведенных разными методами — по анизотропии реликтового излучения и по «стандартным свечам»).

Помимо астрометрических измерений, GAIA проводит трёхполосные фотометрические измерения потока излучения от звёзд с относительной точностью, достигающей 0.02–0.05% для ярких звёзд. Но даже в неблизких галактиках-спутниках Млечного Пути GAIA позволяет детально исследовать свойства и стадии эволюции разных типов звёздных населений с использованием принятых в астрономии диаграмм «цвет — звёздная величина» (цвет звёзды с учётом межзвёздного покраснения характеризует её эффективную температуру, а светимость связана с температурой и радиусом). На рис. 6 показаны диаграммы «цвет — звёздная величина» для звёзд Млечного Пути и Большого Магелланова Облака, на которых цветом обозначена двумерная плотность числа звёзд (диаграмма Гесса). В Млечном Пути хорошо выделяется Главная Последовательность звёзд-карликов (первая и самая длительная стадия термоядерного «горения» водорода), ветвь красных гигантов и большая популяция белых карликов. На такой же диаграмме для БМО указаны звёзды на разных стадиях эволюции.

ЗИК

6(158)/2022

ОРГАН УЧЕНОГО СОВЕТА, ДЕКАНАТА И ОБЩЕСТВЕННЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ

Отпечатано Издательской группой физического факультета МГУ, тел. 939-5494

Зная расстояния, лучевые скорости и собственные движения сотен тысяч и миллионов звёзд, мы сравнительно легко можем вычислить их пространственные скорости и детально исследовать характер звёздных движений, т.е. изучить кинематику звёздных населений. На рис. 7 показан вертикальный кинематический разрез Млечного Пути, на котором цветом обозначены скорости вращения на разном расстоянии от оси и от плоскости нашей Галактики. Подобные карты составлены впервые именно по данным GAIA о тригонометрических параллаксах, собственных движениях и лучевых скоростях и наглядно показывают зависимость кинематических параметров от положения объектов в Млечном Пути.Хорошо видно, что скорость вращения сильно зависит от вертикальной координаты; она максимальна в тонком диске, толщина которого составляет около 1 кпк, и заметно уменьшается с вертикальной координатой примерно от 235 км/с до 155 км/с на расстоянии порядка 2.5–3 кпк от плоскости (где доминирует так наз. «толстый диск»). Дисперсия скоростей, характеризующая «температуру» звёздной популяции, показывает противоположное поведение, она растёт примерно от 20 км/с для тонкого диска до 80 км/с в толстом диске. Подобная карта — зримое и наглядное доказательство пространственно-кинематических различий между такими важными компонентами Галактики, как «холодный» и быстро вращающийся тонкий диск и более «горячий» и существенно медленнее вращающийся толстый диск, которые также различаются происхождением, возрастом и химическим составом. В этом плане обсерватория GAIA предоставляет исследователям богатейший материал, способствующий более глубокому пониманию происхождения и эволюции звёздных населений Млечного Пути.

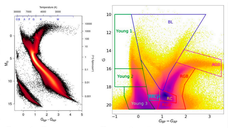


Рис. 6. Диаграммы Гесса (трёхмерные диаграммы «цвет — звёздная величина») для 4 млн звёзд Млечного Пути с малым поглощением света межзвёздной пылью (слева) и для 11 млн звёзд Большого Магелланова Облака (справа) по данным GAIA. Цветовая гамма показывает населённость ветвей диаграммы показатель цвета (G_{BP}-G_{RP}) — абсолютная звёздная величина M_G (слева) и видимая величина G (справа). На диаграмме для БМО отмечены популяции звёзд, находящихся на разных стадиях эволюции: Young 1-3 — молодые массивные звёзды на стадии термоядерного «горения» водорода; BL — массивные молодые прозволюционировавшие звёзды, включая цефеиды; AGB–асимптотическая ветвь гигантов; RGB — ветвь красных гигантов; RC — звёзды красного «сгущения»; RRLyr — лирды, старые звёзды halo на стадии термоядерного «горения» гелия

Отметим ещё один из интереснейших и перспективных результатов, полученных в ходе наблюдений обсерватории GAIA. Как известно, звёздные скопления, карликовые галактики — спутники Млечного Пути, как и вообще все звёздные системы, динамически эволюционируют. Случающиеся сближения между звёздами сопровождаются обменом энергией, благодаря чему некоторые звёзды, получившие дополнительную энергию и достигшие критической скорости, могут покидать систему, уменьшая её массу. Этот процесс, часто называемый «испарением», идёт даже в изолированных системах, но его эффективность многократно усиливается в приливном поле массивной галактики, такой, как Млечный Путь. Покидая скопление с относительно небольшой избыточной скоростью, звёзды длительное время продолжают двигаться по той же орбите, что и само скопление: половина звёзд опережает его, а вторая половина отстаёт; образуется своеобразный «шлейф», в центре которого находится скопление или карликовая галактика. Расчёты показывают, что длина «шлейфа» растёт со скоростью около 1 км/с(или 1 пк /млн лет). Звезды «шлейфа» на звёздном фоне выделяются несколько повышенной видимой плотностью и имеют близкие значения пространственных скоростей. Важно, что их угловая протяжённость достигает десятков градусов.

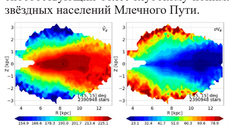


Рис. 7. Кинематическая карта Млечного Пути (вертикальное сечение) по данным GAIA о пространственном распределении и скоростях около 2.5 млн красных звёзд. Центр Млечного Пути слева, Солнце в центре с координатами (8 кпк, 0 кпк). Левая панель — скорость вращения; правая панель — соответствующая дисперсия скоростей. Значения скорости обозначены цветовой гаммой

До миссии GAIA было известно всего несколько таких «шлейфов» от распадающихся шаровых скоплений и карликовых галактик-спутников. По наблюдениям GAIA, число таких звёздных «шлейфов» на всём небе многократно возросло (рис. 8). Их огромная ценность в том, что своей формой они обрисовывают фрагмент галактической орбиты «родительского» звёздного скопления или карликовой галактики в довольно сложно устроенном гравитационном поле Млечного Пути. Следовательно, по наблюдениям «шлейфов» появляется уникальная возможность восстановить вид гравитационного потенциала Галактики и распределения масс в ней, что практически невозможно сделать другими методами. Помимо формы потока на небе GAIA предоставляет также данные о блеске звёзд, их расстояниях, собственных движениях и лучевых скоростях, т.е. даже о возрасте скопления и пространственно-кинематических свойствах популяции звёзд. По сути дела речь идёт о 6-мерном фазовом наборе данных, позволяющем даже по одному «шлейфу» наложить ограничения на вид гравитационного потенциала. Обладание многомерной физической информацией о большом числе звёздных «шлейфов» многократно углубляет наши знания о распределении масс в Млечном Пути, что особенно важно в свете доминирования тёмной материи на периферии нашей звёздной системы, свойства которой проявляются только по её вкладу в гравитационный потенциал, поскольку наблюдать её иными средствами невозможно. Кроме того, многомерные данные о приливных «шлейфах» несут важнейшую информацию о судьбе распадающихся скоплений и карликовых галактик, многие из которых были разрушены и поглощены Млечным Путём за его долгую жизнь.

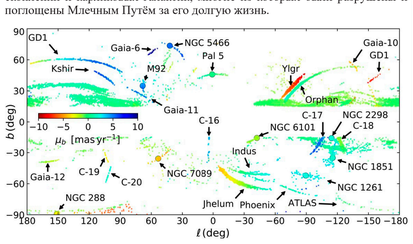


Рис. 8. Вид приливных «шлейфов», обнаруженных миссией GAIA, на небесной сфере. Цветом обозначена величина собственного движения

Мы привели в этом рассказе только небольшую часть ценных и важных результатов, недавно полученных космической обсерваторией GAIA. Многие открытия буквально перевернули наши представления о Млечном Пути и его населениях, но до завершения миссии еще несколько лет — чем больше, тем богаче будут наши знания — и новые открытия ещё впереди…

Литература:

https://sci.esa.int/web/gaia/ https://gea.esac.esa.int/archive/documentation/GDR3/index.html
Gaia Collaboration, Astronomy and Astrophysics, V.595, A1, 2016

01 сентября 2022 г.

А.С. Расторгуев, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой экспериментальной астрономии физического факультета; заведующий отделом изучения Галактики переменных звёзд ГАИШ МГУ имени М.В. Ломоносова.

LXXII Международная конференция «Ядро-2022: Фундаментальные вопросы и приложения»

В жаркие дни июля 2022 года двери Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова распахнулись для участников LXXII Международной конференции «Ядро-2022: Фундаментальные вопросы и приложения». Специалисты из более чем трех десятков научных центров России и зарубежных стран, ведущие исследователи и молодые ученые, представляющие все направления современной ядерной физики, собрались вместе для того, чтобы поделиться друг с другом результатами своей работы, узнать из первых рук новости о важнейших событиях в своей области, увидеть старых друзей и встретить новых.

В день открытия конференции 11 июля сотни гостей заполнили актовый зал Шуваловского корпуса, где с приветственного видеообращения председателя оргкомитета академика В.А. Садовничего началась торжественная церемония открытия. В своей речи ректор Московского университета отметил ключевую роль, которую ежегодные конференции «Ядро» сыграли в развитии ядерной физики в нашей стране, и пожелал всем участникам плодотворной работы и дальнейших творческих успехов. Перед аудиторией выступили директор НИИЯФ МГУ Э.Э. Боос, ректор НИЯУ МИФИ В. И. Шевченко, директор ИЯИ РАН М.В. Либанов. От лица ГК «Росатом» и Национального центра физики и математики к присутствующим обратился М.Ю. Романовский. На следующие пять дней учебные аудитории физического факультета превратились в залы секционных и пленарных заседаний.

Крупнейшая на постсоветском пространстве и одна из наиболее авторитетных в научном мире, конференция «Ядро-2022» вернулась в Московский университет после почти пятнадцатилетнего перерыва: в последний раз перед этим она проходила у нас в 2008 году. Между тем традиция, связывающая Международные совещания по ядерной спектроскопии и структуре ядерного ядра, позднее ставшие серией Международных конференций «Ядро», и Университет, насчитывает не один десяток лет. Именно здесь в феврале 1951 года прошло первое Совещание, председателем программного комитета которого был президент Академии наук СССР М.В. Келдыш, а руководил работой оргкомитета основатель и директор научно-исследовательского института ядерной физики МГУ академик Д.В. Скобельцын. Совещания проводились в МГУ в течение пяти последующих лет, а затем стремительное развитие ядерной физики и возрастающий размах исследований сделали необходимым выход на всесоюзный, а затем и международный уровень, вследствие чего и зародилась знакомая столь многим традиция проводить конференцию каждый год в одном из крупнейших научных центров на территории нашей страны или ближнего зарубежья. Довольно скоро благодаря активной деятельности выдающихся ученых Б.С. Джелепова, К.Я. Громова и К.А. Гриднева еще одним привычным местом ее проведения стал Санкт-Петербургский университет. Внесшие значительный вклад в развитие отечественной ядерной физики исследовательские и образовательные организации — Воронежский государственный университет, Объединенный институт ядерных исследований, Институт ядерной физики республики Казахстан, Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики РФЯЦ-ВНИИЭФ и многие другие — также неоднократно принимали в своих стенах участников конференции. За 72 года своей истории ежегодная Международная конференция «Ядро» стала одним из важнейших мероприятий научного календаря, превратившись в крупнейший научный форум, привлекающий внимание ученых всего мира. В разные годы здесь выступали с докладами знаменитые физики, в том числе лауреаты Нобелевской премии Л.Д. Ландау, П.А. Черенков, первооткрывательница нарушения закона сохранения четности в слабых взаимодействиях Ву Цзяньсюн, а также Б.М. Понтекорво, Я.Б. Зельдович и др.

Конференция «Ядро-2022» прошла в непростое время. К длящимся уже более двух лет транспортным и санитарным ограничениям, введенным после начала пандемии, прибавились беспрецедентные торговые и финансовые запреты, вызванные внешнеполитической ситуацией. В этих условиях, приняв участие в «Ядре-2022», ученые из разных стран в очередной раз продемонстрировали правоту банальной истины: сфера научного знания стоит выше государственной политики, для нее не существует государственных границ и сиюминутной конъюнктуры. Помимо более чем четырехсот участников из России и стран СНГ свои доклады на конференции представили исследователи из Вьетнама, Индии, Китая, Мексики, Монголии, Сербии, США, Франции и еще около двух десятков государств. Это стало возможным благодаря современному гибридному формату проведения заседаний, который позволил дистанционным докладчикам, подключающимся через интернет, выступать и участвовать в дискуссии наравне с остальными. Изображение и звук из реальной аудитории транслировались в видеоконференции, благодаря чему для находящихся на расстоянии тысяч километров пользователей удалось воспроизвести полный опыт присутствия, практически не уступающий непосредственному участию. Всего таким дистанционным форматом воспользовалось около трети участников. При проведении международной научной конференции такого масштаба этот подход был реализован, пожалуй, впервые.

Участники LXXII Международной конференции «ЯДРО-2022: Фундаментальные вопросы и приложения».

Одной из тенденций, наметившихся в последнее годы, является постепенное расширение тематики конференции. Первые Совещания были посвящены почти исключительно вопросам спектроскопии и ядерной структуры, затрагивая в значительно меньшей степени даже такую область, как ядерные реакции. Однако по мере прогресса в привычных для ядерной физики направлениях интерес исследователей смещался в пограничные области, находящиеся на стыке с другими дисциплинами. В результате уже достаточно давно в программе конференции присутствуют секции, посвященные прикладным аспектам использования ядерно-физических технологий, физике ускорителей и медицинской физике. Научные достижения последних лет привели к появлению докладов из области физики высоких и сверхвысоких энергий, которые достигаются в столкновениях тяжелых ионов, а также физики нейтрино. В этом году в программу конференции впервые была включена секция, посвященная вопросам ядерной астрофизики, в последнее время привлекающей особенно пристальное внимание научного сообщества в связи с необычными свойствами экзотических ядер, задействованных в экстремальных астрофизических процессах.

В ходе привлекших всеобщий интерес докладов на пленарных заседаниях наиболее актуальные сведения о текущем статусе масштабных исследовательских программ были представлены их руководителями и первыми лицами научных коллабораций. Речь идет о таких экспериментальных проектах, как синтез трансурановых изотопов и исследование их свойств на фабрике сверхтяжелых элементов в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова ОИЯИ, строительство коллайдера тяжелых ионов NICA, а также его экспериментов NICA MPD, NICA SPD и NICA BM@N, программы исследования столкновений ионов на Большом Адронном Коллайдере в рамках коллабораций ALICE и CMS, ведущие нейтринные детекторы БАЙКАЛ-ГВД, JUNO, KamLAND, строительство источника синхротронного излучения четвертого поколения СКИФ, исследовательский реактор ПИК, эксперименты в области нуклонной структуры CLAS и CLAS12, а также о теоретических исследованиях в области ядерных моделей *ab initio*, спектроскопических свойств ядерных состояний сложной природы и др.

Значительная часть докладов на конференциях «Ядро» делается молодыми учеными. Для недавних выпускников, молодых специалистов и аспирантов возможность представить результаты своей работы на авторитетной международной конференции всегда представляла особую ценность. Сегодня это вдвойне важно ввиду насущной задачи привлечения молодых людей в науку, поэтому и организаторы в свою очередь старались идти навстречу пожеланиям и потребностям молодого поколения ученых. Конференция «Ядро-2022» не стала исключением: четверть из примерно пятисот сделанных докладов были представлены молодыми учеными, а в постерной секции этот показатель был еще выше.

Проведение столь масштабного научного мероприятия международного уровня — непростая задача. Решить ее позволило только тесное сотрудничество НИИЯФ МГУ, кафедр отделения ядерной физики физического факультета и ректората. Их сотрудники отвечали за работу оргкомитета, контакты со спонсорами, техническое оснащение аудиторий и т. д. Неоценимую помощь в этом им оказали студенты и аспиранты кафедры физики ускорителей и радиационной медицины, для которых работа в качестве волонтеров стала частью летней практики, и чей молодой энтузиазм участники конференции отмечали в теплых словах благодарности в адрес организаторов.

В этом году на конференции отмечалось 100-летие систематических исследований свойств атомных ядер и ядерных реакций в России. В 1922 году был основан Радиевый институт им. В.Г. Хлопина и в его лабораториях начались эксперименты, приведшие к открытию спонтанного деления, явления ядерной изомерии, строительство первого циклотрона в Европе. Многое изменилось с тех пор во всех областях ядерной физики и в организации исследований, ведь и по сей день это одна из наиболее динамично развивающихся сфер науки. Всего за пятнадцать лет, прошедших с момента последней проведенной в МГУ конференции «Ядро-2008» масштабные программы развития обновили и преобразили и сам Университет, но одна вещь не изменилась. Осталась той же свободная от искусственных ограничений и предрассудков открытая атмосфера научного сотрудничества, и это та традиция, которую несомненно и в будущем сохранит содружество ядерных физиков.

К.А. Стопани, научный сотрудник НИИЯФ МГУ

Наши поздравления!

25 сентября 2022 года исполнилось 75 лет заслуженному профессору МГУ, заведующему кафедрой акустики, академику Олегу Владимировичу Руденко

О.В. Руденко родился в 1947 году в семье служащих. Окончив школу с золотой медалью и победив на республиканской олимпиаде по физике, он поступил на физфак. На третьем курсе его руководителем стал будущий ректор МГУ Р.В. Хохлов. В 1971 г. дипломная работа О. Руденко была удостоена медали Министерства Высшего образования СССР за лучшую научную студенческую работу. В аспирантуре он занимался теорией нелинейных волн, лазерной фотохимией, проблемой создания гамма-лазеров. В 1973 г. О.В. Руденко написал монографию «Теоретические основы нелинейной акустики» (вместе с С.И. Солуяном), которая вышла в издательстве «Наука» в 1975 г., а в 1977 г. была издана на английском языке (Пергамон Пресс). В 1973 г. он досрочно защитил кандидатскую диссертацию «Смежные проблемы нелинейной акустики и гидродинамики» и был оставлен на работу в МГУ младшим научным сотрудником. Его работы середины 70-х г. легли в основу таких направлений как статистическая нелинейная акустика, лазерная оптоакустика и нелинейная гидроакустика. В 1977 г. Р.В. Хохлов поручил О.В. Руденко организовать экспериментальную лабораторию нелинейной и лазерной акустики, за работы в которой четверо его аспирантов позднее (в 1983–1985 гг.) были удостоены премий Ленинского комсомола. В 1979 г. было опубликовано учебное пособие «Теория волн» (вместе с М.Б. Виноградовой и А.П. Сухоруковым), а в 1981 — книга «Нелинейная гидроакустика» (с Б.К. Новиковым и В.И. Тимошенко), посвященная расчету и проектированию параметрических приборов для подводных приложений. В 1981 г. Руденко защитил докторскую диссертацию «Взаимодействие модулированных слабо диспергирующих волн большой интенсивности».

В 1985 г. коллектив авторов с его участием был награжден Государственной премией СССР за цикл работ «Создание основ нелинейной акустики и её приложений». В 1987 г. О.В. Руденко принял заведование кафедрой акустики, где организовал экспериментальную группу из числа защитившихся аспирантов. Были проведены эксперименты по распространению и фокусировке пилообразных волн, создан первый лазерно-акустический литотриптер - прибор для бесконтактного разрушения почечных камней. В 1991 г. эти работы были удостоены премии имени М.В. Ломоносова (А.А. Карабутов, О.А. Сапожников).

В 1991–95 гг. О.В. Руденко инициировал работы по звуковому удару сверхзвуковых пассажирских самолетов и руководил работой большой группы физиков, механиков, программистов и биологов. Было показано, что удар погасить нельзя, и единственная возможность избежать его вредного воздействия — создать экспертную систему для выбора оптимальных режимов и трасс полета в заданном районе при конкретных погодных условиях.

В 1997 г. О.В. Руденко избран членом-корреспондентом РАН. В этом же году ему с коллегами присуждена Государственная премия РФ за цикл «Динамика интенсивных шумовых волн и нелинейных структур в средах без дисперсии». В 2008 году О.В. Руденко избран академиком РАН.

В последующие годы продолжались исследования в области нелинейной физики и акустики, а также связанных с ними прикладных разделов науки, получившие признание научного сообщества. Эти результаты заложили основы новых направлений — статистической физики нелинейных шумовых волн, физики пилообразных волн и интенсивных акустических пучков, генерации мощных ударных импульсов для связи, технологии, медицины, фокусированного ультразвука.

Одним из ведущих направлений на кафедре стали медицинские приложения мощного ультразвука. Были созданы и запатентованы приборы для диагностики мягких биотканей, в том числе для визуализации опухолей. Исследовалось воздействие мощного ультразвука на злокачественные опухоли. Создана математическая модель, объяснявшая способность напряженной скелетной мышцы «затягивать» и демпфировать удары. Весом вклад О.В. Руденко и в прикладную геофизику. Им разработаны модели структурно-неоднородных сред, включающих гранулы и газовые полости. Работы в области математической физики и теории волн расширили спектр классических моделей, добавив к нему точно решаемые неоднородные уравнения типа Бюргерса и уравнения для сред с модульной и квадратично-кубичной нелинейностью.

Еще в 1977 г. Р.В. Хохлов привлек О.В. Руденко к преподаванию. В разные годы он читал оригинальные курсы: «Введение в физику упругих волн», «Теория волн», «Электродинамика», «Динамика сплошных сред для радиофизиков», «Нелинейная акустика», «Материаловедение и методы диагностики микро- и наноструктурных материалов», «Нелинейная динамика», «Информационно-технологическое обеспечение научной деятельности аспирантов». Руденко читал лекции студентам в университетах США, Швеции, Японии, Норвегии и ряде других стран, в Нижегородском университете и других Вузах России, молодым врачам-диагностам и преподавателям школ. Он является автором более 500 журнальных публикаций, 20 монографий и учебных пособий, прочно вошедших в классический инструментарий как студентов, так и научных работников у нас в стране и за рубежом. В 2019 г. О.В. Руденко стал лауреатом премии им. М.В. Ломоносова за педагогическую деятельность.

Олег Владимирович заметную часть времени и сил тратил на общественную и организационную работу. В период 1990-1997 гг. он был заведующим Отделения радиофизики и электроники физфака, руководил работой совета отделения и диссертационного совета, более десяти лет работал в РФФИ и 25 лет — в ВАКе. Уже 30 лет — член Ученого совета МГУ.

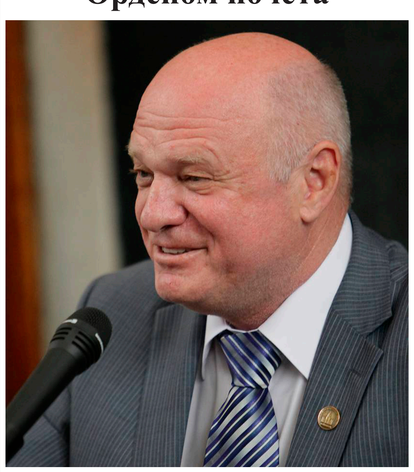
Член бюро Отделения физических наук РАН (2008–2022), председатель комиссии по премиям и медалям для молодых ученых и студентов-физиков. Много усилий посвятил развитию отечественных журналов. Он был главным редактором академических изданий «Акустический журнал», «Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки», а также заместителем главного редактора журнала «Успехи физических наук». Исследовательские инициативы О.В. Руденко неизменно поддерживались грантами Президента РФ для ведущих научных школ, грантами РНФ, РФФИ и других фондов, он был удостоен Мега-гранта Правительства РФ для поддержки исследований под руководством ведущих ученых мира. За плодотворную деятельность Олег Владимирович награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» (2005), орденом Дружбы (2015).

О.В. Руденко уже 35 лет заведует кафедрой акустики. За это время на кафедре защищены 10 докторских и 60 кандидатских диссертаций. Среди ученых, у которых он был научным руководителем, — лауреаты различных отечественных и международных премий, профессора, заведующие кафедрами. Неоценима его роль в создании творческой и дружеской атмосферы в нашем коллективе, в умении заинтересовать, разжечь исследовательский пыл и быть примером ученого и гражданина как для студентов, так и для сотрудников кафедры.

Сотрудники кафедры акустики и физического факультета, друзья и коллеги от всей души поздравляют Олега Владимировича с 75-летием, желают крепкого здоровья, многих светлых лет жизни и новых свершений.

Коллектив кафедры акустики

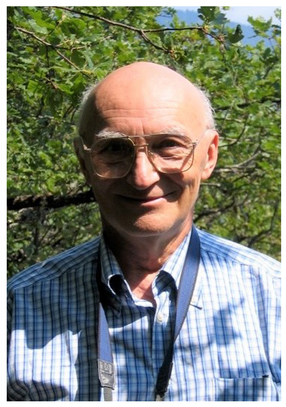
Александр Михайлович Салецкий награжден Орденом почета



В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 5 сентября 2022 года № 606 за «заслуги в научно-педагогической деятельности, подготовке квалифицированных специалистов и многолетнюю добросовестную работу» заведующий кафедрой общей физики физического факультета МГУ Александр Михайлович Салецкий награжден орденом Почета.

От всей души поздравляем и желаем дальнейших успехов в научно-педагогической деятельности, подготовке квалифицированных специалистов!

Поздравляем Дмитрия Владимировича Гальцова!



17 июня 2022 года исполнилось 80 лет профессору кафедры теоретической физики Дмитрию Владимировичу ГАЛЬЦОВУ, выпускнику физического факультета 1965 года, который бессменно работает на кафедре по окончании аспирантуры в 1968 г., защитив в 1969 г. кандидатскую, а в 1980 г. докторскую диссертации.

Профессор Д.В. Гальцов — известный физик-теоретик, автор фундаментальных работ по классической и квантовой теории поля, теории электромагнитного и гравитационного излучения, теории черных дыр и математическим методам в гравитации, широко цитируемых в мировой научной литературе (суммарный индекс цитируемости превышает 5000). В 60–70-х годах прошлого века им были решены важные проблемы теории синхротронного излучения и электронных мазеров, построена теория фотонейтринных процессов в сильном магнитном поле, теория нелинейных процессов в оптике, обусловленных поляризацией вакуума, которые до сих пор находятся в центре внимания.

Позже он обратился к теории гравитации, развив теорию гравитационного синхротронного излучения тел в окрестности черных дыр, теорию черных дыр во внешнем магнитном поле, теорию гравитационно-волновых процессов в электродинамических системах. В его работе впервые была рассчитана реакция гравитационного излучения в сильном гравитационном поле Керра, это направление стало одним из самых важных в теории гравитации при создании шаблонов для гравитационно-волновых экспериментов (в 2022 г. прошла 25-я международная конференция из серии «Capra Meetings on Radiation Reaction»). Работы Д.В. Гальцова 90-х годов совместно с тогдашним аспирантом, а ныне одним из ведущих ученых Франции, М.С. Волковым, по микроскопическим черным дырам с полями Янга — Миллса открыли новый тип солитонов на стыке калибровочных теорий и гравитации, а космологические решения с полями Янга –Миллса легли в основу новых направлений в космологии, таких как «Gauge-flation» и «Chromo-natural inflation». Широко известны работы Д.В. Гальцова совместно с О.В. Кечкиным и Ж. Клеманом по классическим решениям в супергравитации, где были исследованы черные дыры в гравитации с дилатоном и аксионом, найдены ранее неизвестные решения с неплоской асимптотикой. При этом были созданы новые математические методы интегрирования уравнений Эйнштейна, применимые как в стандартной, так и альтернативных теориях гравитации. В последних работах совместно с Клеманом была предложена новая интерпретация точных решений уравнений Эйнштейна с так называемыми струнами Мизнера, развита общая теория многоцентровых решений с особенностями на полярной оси, построена их термодинамическая интерпретация.

Работы Д.В. Гальцова по теории излучения в пространстве-времени размерности, отличной от четырех, привели к важным предсказаниям, которые могут быть проверены при поисках новой физики в будущих гравитационно-волновых экспериментах. Это направление сейчас развивается им совместно с аспирантом М.Ю. Хлопуновым в рамках моделей с «большими» дополнительными измерениями. В последнее время Д.В. Гальцов со своими учениками, И.В. Кобзько и Б.А. Богушем, также обратился к теории теней черных дыр, недавно исследованных экспериментально в галактике M87 и в центре нашей Галактики. Был развит новый метод теоретического описания сильного гравитационного линзирования и теней, описаны эффекты, по которым можно отличить черные дыры от гипотетических кротовых нор и других возможных ультракомпактных объектов. Важные результаты по теории возмущений в супергравитации были недавно получены им совместно с аспирантом А.В. Кулицким. Д.В. Гальцов и его группа участвуют в научно-образовательной школе «Космос» Московского университета. За последние 30 лет он руководил десятью проектами, финансировавшимися РФФИ.

Активная научная работа проф. Д.В. Гальцова неразрывно связана с подготовкой высококвалифицированных физиков-теоретиков. В течение многих лет на высоком научно-методическом уровне он читает общий курс лекций по теоретической физике на механико-математическом факультете МГУ, а на кафедре теоретической физики — специальные курсы по теории гравитации и теории суперструн. Он постоянно руководит группой, в которую, помимо сотрудников физфака, входят бакалавры, магистры и аспиранты, а также научным семинаром «Современная гравитация». Им опубликованы монографии «Гравитационное излучение электродинамических систем», «Частицы и поля в окрестности черных дыр», учебные пособия для университетов «Классические поля», «Теоретическая физика для студентов-математиков». Он подготовил 32 кандидата наук, из которых семь стали докторами наук, работающими в России, а еще семь стали известными учеными, работающими в США, Франции, Бразилии, Мексике, Турции и на Тайване.

На протяжении многих лет Д.В. Гальцов участвует в международных коллаборациях. Он был членом оргкомитетов более 40 международных конференций, с 2018 по 2021 г. был членом управляющего комитета европейского международного проекта «Гравитационно-волновая Вселенная». Был членом редколлегии журнала «Classical and Quantum gravity» (1996–2003), является зам. главного редактора отечественного журнала «Гравитация и космология» со времени его основания в 1997 г., а также членом редколлегии журнала «Теоретическая и математическая физика». В 2017 г. Д.В. Гальцов был одним из основателей международной гравитационной ассоциации стран БРИКС (BRICS-AGAC), которая уже провела несколько конференций в России, Китае и Южной Африке. Он — вице-президент Российского гравитационного общества.

Дмитрий Владимирович — не только физик-теоретик, но и талантливый музыкант: композитор и исполнитель, многолетний участник Фортепианного класса МГУ. Он был одним из зачинателей бардовского движения, его песня «Ласкающийся ёж» (1961) вошла в изданный в 2004 г. фундаментальный том «Авторская песня: Антология» и в «Список знаменитых бардовских песен» в Википедии. Д.В. Гальцовым написан целый ряд вокальных циклов на стихи русских классиков и современных российских поэтов. Он постоянно принимает участие в концертах и музыкальных вечерах, его выступления транслировались по телевидению. Д.В. Гальцов — лауреат всероссийских и международных конкурсов композиторов «Романс — 21 век» (2011), «Новые мелодии» (2021 и 2022), его произведения прозвучали в исполнении лучших профессиональных музыкантов Москвы и Санкт-Петербурга.

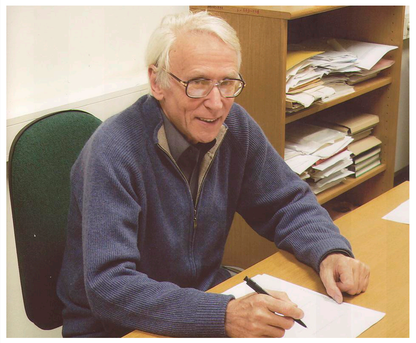
Поздравляем Дмитрия Владимировича Гальцова с замечательным юбилеем и желаем ему крепкого здоровья и новых творческих достижений.

Сотрудники кафедры теоретической физики, друзья, коллеги

Примечание Главного редактора: В библиотеке физического факультета выставлен стенд, посвященный юбиляру.

Светлой памяти Андрея Алексеевича Славнова

(22.12.1939 — 25.08.2022)



25 августа 2022 года не стало замечательного человека, выдающегося ученого, академика РАН, заведующего кафедрой теоретической физики с 1990 по 2020 годы Андрея Алексеевича Славнова.

Андрей Алексеевич Славнов родился 22 декабря 1939 года. В 1962 году он с отличием окончил физический факультет МГУ, затем учился в аспирантуре Математического института им. В.А. Стеклова АН СССР. В 1965 году он защитил кандидатскую диссертацию на тему «Некоторые вопросы теории векторных полей», после чего стал сотрудником этого института. Докторскую диссертацию «Перенормировки в теориях с внутренними симметриями» Андрей Алексеевич защитил в 1972 году. В 1987 году он был избран членом-корреспондентом АН СССР по отделению ядерной физики, а в 2000 году — действительным членом Российской академии наук. В декабре 1990 года он стал заведующим кафедрой теоретической физики физического факультета МГУ, а в 1992 году — заведующим отделом теоретической физики Математического института имени В.А. Стеклова РАН. Также в течение долгого времени Андрей Алексеевич был главным редактором журнала «Теоретическая и математическая физика».

Андрей Алексеевич внес выдающийся вклад в становление квантовой теории калибровочных полей, которая в настоящее время является основой современных моделей физики фундаментальных взаимодействий. Им были открыты важнейшие соотношения между функциями Грина, которые получили в литературе название «тождества Славнова — Тейлора» и впоследствии привели к открытию БРСТ-симметрии. Важнейшим приложением тождеств Славнова — Тейлора является доказательство перенормируемости неабелевых калибровочных теорий, в котором они играют ключевую роль. При этом доказательство перенормируемости суперсимметричных калибровочных теорий (а именно они в настоящее время рассматриваются как наиболее вероятные кандидаты на описание физики за рамками Стандартной модели) было впервые сделано Андреем Алексеевичем. Также им была предложена регуляризация высшими ковариантными производными, которая в настоящее время активно используется для вычисления квантовых поправок в различных теориях и исследования их структуры. Как оказалось, она имеет целый ряд существенных преимуществ перед наиболее известной и распространенной размерной регуляризации, предложенной нобелевскими лауреатами Г. т'Хоофтом и М. Вельтманом. В частности, в применении к суперсимметричным теориям она позволила выявить целый ряд интересных закономерностей в структуре квантовых поправок, вывести точные соотношения, связывающие ренормгрупповые функции, и построить перенормируемые предписания, в которых они справедливы, что не удавалось сделать с использованием размерной регуляризации. Также Андрей Алексеевич занимался развитием непертурбативных методов теории поля, в частности предложил новый подход к 1/N-разложению и явно калибровочно инвариантную формулировку Стандартной модели на решетке, в которой отсутствует вырождение спектра фермионов, в составе международной коллаборации исследовал температурные переходы конфайнмент-деконфайнмент в квантовой хромодинамике с динамическими фермионами на решетке.

Заслуги Андрея Алексеевича были отмечены рядом научных премий и наград. В 1995 году он стал лауреатом Государственной премии Российской Федерации, в 1999 году ему была присуждена исследовательская премия Фонда Гумбольдта, в 2007 году — премия В.А. Фока РАН, в 2009 году — премия «Триумф» в области науки, в 2013 — премия имени И.Я. Померанчука. В 2014 году Андрей Алексеевич был награжден золотой медалью имени Н.Н. Боголюбова.

Я пришел на кафедру теоретической физики примерно в то время, когда ее возглавил Андрей Алексеевич. Мне довелось в течение двух семестров слушать его спецкурс «Метод континуального интеграла и его приложения в теории калибровочных полей», который он читал на протяжении многих лет. Безусловно, этот курс был одним из наиболее интересных и полезных из всех, которые я слушал. Впоследствии записи лекций этого курса неоднократно помогали мне в научной работе. Также немало пользы принесло мне изучение книги «Введение в квантовую теорию калибровочных полей», написанную Андреем Алексеевичем совместно с Л.Д. Фаддеевым. Андрей Алексеевич подписывал приказ о моем оставлении на кафедре теоретической физики, на которой я работал под его руководством до 2020 года, когда он ушел с должности заведующего. Во многом благодаря его руководству на кафедре сформировалась теплая и доброжелательная обстановка. Андрей Алексеевич всегда был очень мягким и интеллигентным, но одновременно и достаточно строгим руководителем. Особенно хочу отметить его честность и порядочность, очень пунктуальное соблюдение всех своих обещаний. Андрей Алексеевич не был моим непосредственным научным руководителем, но у нас были две совместные работы, и в течение нескольких десятилетий я старался развивать предложенные Андреем Алексеевичем идеи, которые оказались чрезвычайно полезными в интересующей меня области. У меня нет никаких сомнений, что дальнейшее развитие этих идей позволит решить еще целый ряд важных и интересных проблем, которые существуют в настоящее время. Сейчас над ними во всем мире работают ученики Андрея Алексеевича, многие из которых уже давно стали известными учеными.

В 2020 году из-за плохого самочувствия Андрей Алексеевич покинул должность заведующего кафедрой теоретической физики, а 25 августа 2022 года он скончался. Уход Андрея Алексеевича стал для меня огромной потерей, так же как и для всех сотрудников кафедры теоретической физики, сотрудников физического факультета.

Конечно, всем нам будет очень не хватать Андрея Алексеевича, и мы сохраним о нем самые лучшие воспоминания.

Светлая память Андрею Алексеевичу Славнову!

Доцент кафедры теоретической физики

Главный редактор К.В. Показеев
sea@phys.msu.ru
http://www.phys.msu.ru/rus/about/sovphys/
Выпуск готовили: И.А. Силантьева, Н.В. Губина, В.Л. Ковалевский, Н.Н. Никифорова, К.В. Показеев, Е.К. Савина, О.В. Салецкая.
Фото из архива газеты «Советский физик» и С.А. Савкина.
31.10.2022