



Проф. Ф.Я. Халили



Проф. М.Л. Городецкий



Ассистент Л.Г. Прохоров

## ОБНАРУЖЕНИЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Интервью редакции бюллетеня «Новости науки» физического факультета МГУ, взятое у членов научной группы Московского университета, участвующей в международной коллаборации. Московская группа является общепризнанным лидером в области квантовых измерений для лазерных детекторов гравитационных волн и продолжает активную деятельность в этой области. В группу исследователей входят сотрудники кафедры физики колебаний физического факультета МГУ И.А. Биленко, С.П. Вятчанин, М.Л. Городецкий, В.П. Митрофанов, Л.Г. Прохоров, С.Е. Стрыгин, Ф.Я. Халили.



Проф.  
Владимир Борисович  
Брагинский



Проф. С.П. Вятчанин



Проф. В.П. Митрофанов



Проф. И.А. Биленко



Доц. С.Е. Стрыгин

## СОДЕРЖАНИЕ

- 1      **НОВОСТИ НАУКИ**
- 20     **КОНФЕРЕНЦИИ**
- 22     **УЧЕНЫЕ ФИЗФАКА**
- 25     **ФИЗФАК — ШКОЛЕ**

ISSN 2500–2392

11 февраля 2016 года на пресс-конференции в Вашингтоне ученые объявили об обнаружении гравитационных волн, существование которых еще 100 лет назад предсказал Альберт Эйнштейн. В этом крупнейшем научном открытии принимали активное участие исследователи физического факультета МГУ. До последнего времени научную группу возглавлял член-корреспондент РАН Владимир Борисович Брагинский — всемирно известный ученый, один из пионеров гравитационно-волновых исследований. Кроме профессора В.Б. Брагинского в состав этой научной группы и в число соавторов научного открытия входят профессор кафедры физики колебаний: И. А. Биленко, С. П. Вятчанин, М. Л. Городецкий, В. П. Митрофанов, Ф. Я. Халили, доцент С. Е. Стрыгин и ассистент Л. Г. Прохоров. Неоценимый вклад в проведение исследований внесли студенты, аспиранты и технический персонал кафедры. На вопросы редакции НН отвечают члены коллектива:

**НН:** Расскажите, пожалуйста, о сути открытия, которое так взволновало не только научный мир, но и многих людей, далеких от гравитации.

Гравитационные волны впервые были обнаружены в США 14 сентября 2015 года в 9:51 утра по всемирному времени. Их зафиксировали два детектора Лазерной интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории (LIGO): первый расположен в Ливингстоне, штат Луизиана, второй — в Хэнфорде, штат Вашингтон. Работу обсерватории и анализ получаемых данных обеспечивает научная коллаборация LSC — коллектив в составе более 1000 ученых из научных центров Соединенных Штатов и 14 других стран, включая Россию, которую представляют две научные группы: из МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва), а также из Института прикладной физики РАН (Нижний Новгород). Сообщение о регистрации гравитационных волн было опубликовано в журнале *Physical Review Letters*, 116, 061102 (2016).

На основании полученных сигналов ученые LIGO пришли к выводу, что обнаруженные гравитационные волны были вызваны слиянием двух черных дыр, которые образовали одну, более массивную вращающуюся черную дыру. Ранее возможность столкновения черных дыр предсказывалась теоретиками, но никогда раньше такое событие не наблюдалось. Сливающиеся черные дыры имели массы в 29 и 36 раз больше массы Солнца. На финальной стадии слияния они двигались со скоростью около половины скорости света, а само событие произошло 1,3 миллиарда лет назад. За доли секунды примерно три солнечных массы превратились в гравитационные волны. На Земле они вызвали относительные колебания пар пробных масс, разнесенных на 4 км, с амплитудой около 10–19 м. Это чрезвычайно малое изменение расстояния между пробными массами и было зарегистрировано интерферометрическими гравитационно-волновыми детекторами LIGO. Детектор в Ливингстоне записал событие на 7 миллисекунд раньше, чем детектор в Хэнфорде. На этом основании ученые определили, что источник был расположен в южном полушарии небесной сферы.

Открытие гравитационных волн имеет огромное значение для современной науки. Начинается новая эра: ученые могут уже не только видеть, но и слышать далекую Вселенную (гравитационно-волновые детекторы принимают сигналы в диапазоне звуковых волн). Несомненно, это поможет решить многие загадки мироздания.

**НН:** Что такое гравитационные волны?

В 1915 году Альберт Эйнштейн предложил Общую Теорию Относительности (ОТО), в которой гравитация трактовалась как искривление пространства-времени. Причиной такого искривления является наличие некой материи, в том числе небесных тел. В качестве простейшей аналогии можно рассмотреть резиновую пленку, натянутую на горизонтальный обруч. Если пускать по пленке маленькие шарики, они будут двигаться по прямой линии. Это аналог плоского пространства. Если же в центре обруча положить массивное яблоко, оно нарушит, «искривит» ровную поверхность пленки. Если после этого пускать по пленке маленькие шарики, то они будут двигаться уже не по прямой, а по дуге, по «кривой» линии. Подчеркну, это не объяснение, а всего лишь грубая аналогия.

Из уравнений ОТО Эйнштейн получил решение, соответствующее гравитационным волнам (ГВ). Однако было ясно, что обнаружить их вряд ли удастся из-за чрезвычайной слабости гравитационного взаимодействия. Образно говоря, ГВ — это летящие кусочки кривизны пространства-времени.

Напомню, что уравнения Джеймса Максвелла, предсказывающие электромагнитные волны, были получены в 1864 г., а экспериментально они были обнаружены Генрихом Герцем лишь двадцать лет спустя (в 1885 г.). Возможность передачи информации с их помощью (радио) была продемонстрирована Александром Поповым еще на 20 лет позже (1905 г.). Поэтому обнаружение значительно более слабых гравитационных волн всего лишь через сто лет (!) после формулировки ОТО можно рассматривать как чудесный подарок Альберту Эйнштейну.

Опыт Герца по обнаружению электромагнитных волн предполагал наличие излучателя и передатчика в лаборатории. Но такую схему типа передатчик-приемник нельзя применить для гравитационных волн — опять же из-за их слабости. Поэтому, все, что нам остается — надеяться на регистрацию ГВ от космологических катастроф: взрывов сверхновых звезд, слияния черных дыр, нейтронных звезд и пр. Кстати, в 1993 г. Р. Халс и Дж. Тейлор получили Нобелевскую премию за открытие ГВ по изменению частоты вращения двойной звезды, которое хорошо описывалось в рамках ОТО как потеря энергии на излучение ГВ. Но следует подчеркнуть, это было лишь косвенное подтверждение ГВ, сами волны еще не были зарегистрированы.

В настоящее время уже работают усовершенствованные антенны второго поколения: Advanced LIGO. Это сложнейшие и уникальные инженерные сооружения. Достаточно сказать, что они измеряют смещение двух зеркал (пробных масс), расположенных на расстоянии 4 км, с невероятной точностью — около 10–19 м. Чтобы это проиллюстрировать, напомним известный пример: если Землю уменьшить до размеров апельсина, а апельсин уменьшить во столько же раз, то получится размер атома. Если же во столько раз уменьшить атом, как мы уменьшили Землю, получим размер 10–19 м.

Интересно, что эта точность соответствует квантовым ограничениям для непрерывного измерения, называемым Стандартным Квантовым Пределом (СКП). Таким образом, если Advanced LIGO достигнет СКП (а может, и превзойдет) то мы получим еще и квантовый прибор! Причем весьма макроскопический — 4 км.

**НН:** От момента предсказания существования гравитационных волн до их обнаружения прошло 100 лет. Что Вы можете рассказать об истории поиска гравитационных волн?

Первая попытка экспериментального обнаружения гравитационных волн была предпринята примерно через 50 лет после предсказания их существования Альбертом Эйнштейном. Проблема состоит в том, что гравитационные волны, даже порожденные катастрофами вселенского масштаба, на Земле вызывают чрезвычайно слабый отклик. Первые эксперименты по фиксации гравитационных волн, поставил американский физик Джозеф Вебер. В качестве детектора он использовал 1,5 тонный алю-

мининовый цилиндр с пьезодатчиками, регистрирующими деформирование цилиндра под действием гравитационной волны. В 1969 году он объявил об обнаружении гравитационных волн. Профессор В.Б. Брагинский был первым, кто создал гравитационно-волновой детектор на кафедре физики колебаний физического факультета МГУ, проверил и не подтвердил результаты Вебера о детектировании сигналов гравитационных волн. Но хотя попытка Вебера оказалась неудачной, она положила начало исследованиям по созданию гравитационно-волновых детекторов. Сначала это были детекторы Веберовского типа, но более совершенные. Здесь ключевым моментом являлось достижение максимальной добротности для механических мод колебаний цилиндра – детектора, а также его охлаждение, что позволяло значительно уменьшить тепловой шум. Было экспериментально продемонстрировано, что такие материалы, как сапфир и кремний, позволяют получить лучшие значения механической добротности, чем алюминий. Однако создание более чувствительных детекторов этого типа в различных лабораториях мира не привело к обнаружению гравитационных волн. В это же время В.Б. Брагинский начал развивать теорию квантовых измерений. Он сформулировал концепции стандартного квантового предела чувствительности и квантово-невозмущающих измерений и вместе с коллегами применил теорию квантовых измерений для анализа чувствительности гравитационно-волновых детекторов. В 80-х годах XX века Калифорнийский технологический институт и Массачусетский институт технологии в США приступили к созданию лазерных интерферометрических гравитационно-волновых детекторов с расстоянием между пробными массами, сначала 10 м, затем 40 м. Позднее в рамках проекта LIGO были созданы четырехкилометровые современные детекторы гравитационных волн. Поскольку сигнал от гравитационных волн пропорционален расстоянию между пробными массами, переход к интерферометрическим детекторам с длинной базой позволил существенно увеличить их чувствительность. В.Б. Брагинский вместе со своей научной группой сразу включился в работу по созданию интерферометрических детекторов. Полномасштабные детекторы первого поколения, создание которых началось в 1992 г., не смогли обнаружить гравитационные волны. Только на более совершенных детекторах Advanced LIGO были обнаружены гравитационные волны от слияния двух черных дыр.

**НН:** Скажите, пожалуйста, несколько слов о том, как устроены детекторы LIGO.

Основой лазерного детектора гравитационных волн является интерферометр Майкельсона. Излучение лазера разделяется на два перпендикулярных луча, которые, отражаясь от зеркал, расположенных на расстояниях в 4 км от светоделителя, возвращаются и попадают на фотоприемник. Сигнал на его выходе зависит от разности фаз в лучах, которая, в свою очередь, зависит от разности пройденных ими путей. Чтобы увеличить набег фазы в каждом плече установлены дополнительные зеркала, образующие резонаторы Фабри-Перо. Можно сказать, что лучи 300 раз пробегают 4 километра в каждом направлении, прежде чем попадают в фотоприемник. Диапазон частот, которые регистрируют детекторы LIGO,

составляет от 10 Герц до нескольких килогерц (по совпадению, звуки именно с такими частотами воспринимает человеческий слух). Необходимо измерять очень малые колебания зеркал в этом диапазоне. Это означает, что основной проблемой при разработке детектора является снижение всех видов шумов, которые могут маскировать или имитировать полезный сигнал. Шумы имеют различную природу. Среди них колебания земной поверхности, вызванные сейсмическими возмущениями и антропогенными факторами, на много порядков большие той величины, которую необходимо измерить. Поэтому зеркала подвешиваются на сложном, многоступенчатом фильтре, подавляющем эти колебания. Лучи света распространяются внутри труб, где поддерживается глубокий вакуум. Поскольку свет имеет квантовую природу и состоит из отдельных частиц – фотонов, существует особый вид флуктуаций – фотонный дробовой шум. Для уменьшения его влияния необходимо увеличивать интенсивность света в интерферометре. В детекторах второго поколения, которые используются сейчас, мощность лазера составляет от 15 до 100 Ватт, а эффективная мощность внутри интерферометра, с учетом накопления в резонаторах и использования так называемой рециркуляции света, достигает одного мегаватта! Важнейшим фактором, ограничивающим чувствительность, является Броуновский шум – результат теплового движения атомов и молекул. Для его снижения были разработаны монокристаллические подвесы зеркал, обладающие большой механической добротностью. В целом детектор – чрезвычайно сложное устройство, в котором использованы уникальные компоненты, в том числе созданные специально для него в различных лабораториях мира. Достаточно сказать, что покрытие зеркал таково, что из каждого миллиона падающих на них фотонов теряется лишь один, что настройку положения зеркал и других оптических элементов обеспечивают более 5000 следящих систем, а для обработки поступающей информации (порядка 1 терабайта в сутки) задействованы тысячепроцессорные кластеры и глобальная распределенная вычислительная сеть.

**НН:** Расскажите, пожалуйста, об участии в проекте ученых физического факультета МГУ.

С самого начала основные усилия членов коллектива были направлены на исследование условий достижения предельной чувствительности гравитационно-волновых детекторов, определение фундаментальных квантовых и термодинамических ограничений чувствительности, на разработку новых методов измерений. Теоретические и экспериментальные исследования российских ученых нашли свое воплощение при создании детекторов нового поколения, позволивших непосредственно наблюдать гравитационные волны от слияния черных дыр. Из конкретных достижений научной группы физического факультета МГУ группы можно отметить следующие.

Кварцевые пробные массы, они же зеркала интерферометра, в детекторах первого поколения были подвешены на стальных проволоках. Такие подвесы не позволяли достигнуть минимальных потерь энергии для собственных мод упругих колебаний пробной массы и колебаний ее центра масс. Согласно флуктуационно-диссипационной теореме, это необходимо для снижения теплового шума

пробных масс. Кроме того, в них возникали крайне нежелательные дополнительные избыточные шумы. В группе В.Б. Брагинского был разработан монолитный подвес из плавленного кварца и экспериментально продемонстрировано, что время затухания маятниковых колебаний кварцевой пробной массы составляет около 5-ти лет, что соответствует добротности  $1,8 \times 10^8$ . Квазимонолитный кварцевый подвес пробных масс в детекторах Advanced LIGO - это сложнейшая 4-х ступенчатая конструкция, но все начиналось с простых моделей, исследованных в лаборатории кафедры физики колебаний.

Другим источником шума в гравитационных антеннах является дрожание поверхности зеркал. Долгое время с момента предварительных оценок чувствительности антенн предполагалось, что единственным и главным источником такого дрожания являются броуновские флуктуации пробных масс, на которые и нанесены отражающие покрытия. Существенно уменьшить вклад таких флуктуаций на низких частотах гравитационного сигнала можно, изготавливая пробные массы из высококачественного материала, имеющего максимально возможную добротность собственных акустических колебаний. Поэтому для антенн Advanced LIGO планировалось перейти от использовавшегося ранее плавленного кварца к высокочистому лейкосапфиру ( $Al_2O_3$ ). Разработки таких зеркал уже шли полным ходом, когда мы в нашей группе решили посмотреть, какие еще физические процессы приводят к появлению дрожания поверхности. Строгий расчет из первых принципов показал, что один из механизмов, связанный с термодинамическими флуктуациями температуры в объеме кристаллического материала (термоупругий шум), приводит к флуктуациям на поверхности много большим, чем броуновские не только в сапфире, но и в плавленном кварце. Эта работа произвела эффект разорвавшейся бомбы, и проект пришлось переключать на ходу, возвращаясь к кварцевым зеркалам. В дальнейшем выяснилось, что такая простая система – диэлектрический цилиндр с отражающим покрытием, порождает целый зоопарк различных фундаментальных квантовых, термодинамических и других избыточных шумов – их больше десятка. В частности, оказалось, что самым сильным шумом зеркал является не броуновский шум самой пробной массы, а шум тонкого многослойного диэлектрического отражающего покрытия. Вопросами оптимизации такого покрытия мы тоже серьезно занимались.

Еще одна проблема, над решением которой мы работали в последнее время, связана с электростатическими зарядами, которые всегда присутствуют на кварцевых пробных массах. Их источником являются любые контакты пробной массы с другими объектами, процессы десорбции газов, космические лучи и пр. Заряды взаимодействуют с окружающими пробную массу телами и электрическими полями, создавая дополнительную флуктуационную силу. Важными факторами снижения шумов, связанных с электростатическими зарядами, является уменьшение их количества и увеличение времени релаксации зарядового распределения. В наших экспериментах оно достигало 3-х лет. Летом 2015 года Л.Г. Прохоров вместе с американскими коллегами исследовал поведение зарядов на пробных массах детектора LIGO в Хэнфорде. Ими был установлен оптимальный режим работы электростатиче-

ских актюаторов, используемых для подстройки положения пробных масс – зеркал интерферометра.

Одним из важных достижений группы также является предсказанный в 2001 году В.Б. Брагинским эффект параметрической колебательной неустойчивости. В схемах гравитационно-волновых интерферометров Advanced LIGO для увеличения чувствительности предполагается уменьшить механический шум зеркал и увеличить мощность, циркулирующую в плечах интерферометра, вплоть до значения  $W = 830$  кВт. Однако большие значения циркулирующей мощности вместе с малыми механическими потерями в зеркалах могут привести к нежелательному нелинейному эффекту параметрической колебательной неустойчивости.

Параметрическое взаимодействие между двумя оптическими модами Фабри-Перо резонатора (мода накачки и стоксовая мода) и механическим осциллятором (собственные колебания зеркал) приводит к появлению параметрической неустойчивости. При существовании малых колебаний в стоксовой оптической моде возникает ponderomotive сила, действующая на подвижное зеркало на разностной частоте, которая резонансно “раскачивает” механические колебания. С другой стороны, малые механические колебания зеркала благодаря эффекту Доплера приводят к появлению отраженных от зеркала волн с комбинационными частотами, одна из которых резонансно возбуждает колебания в оптической стоксовой моде. Очевидно, что при увеличении мощности накачки указанные механизмы будут приводить к дополнительной перекачке энергии. В соответствии с соотношениями Мэнли-Роу, энергия от волны накачки будет передаваться оптической стоксовой и механической модам. Данный эффект может рассматриваться как внесение отрицательного затухания, поэтому при достижении некоторого порогового значения мощности накачки возникнет параметрическая неустойчивость. Из-за несимметричности распределения оптических мод относительно моды накачки эффект одновременного возбуждения антистоксовой моды не полностью подавляет эффект параметрической неустойчивости.

Для интерферометра с планируемой циркулирующей мощностью в плечах были разработаны методы эффективного подавления параметрической неустойчивости. Определены условия параметрической колебательной неустойчивости в гравитационно-волновых детекторах на упругих модах пробных масс. Рассчитаны с высокой точностью собственные частоты и пространственные распределения вектора смещений упругих мод, используя метод суперпозиции, и определены комбинации упругих и оптических стоксовых мод, приводящие к параметрической колебательной неустойчивости в гравитационно-волновых интерферометрах.

В 2015 году эффект параметрической колебательной неустойчивости был экспериментально обнаружен в гравитационно-волновом детекторе Advanced LIGO, полностью подтвердив все теоретические расчеты группы.

**НН:** Существуют ли какие-то фундаментальные ограничения на чувствительность детекторов гравитационных волн?

История гравитационно-волновой астрономии с самого начала была тесно связана с развитием методов макроскопических квантовых измерений. Чувствительность первых резонансных твердотельных детекторов гравитационных волн (конец 60-х — начало 70-х годов) составляла примерно ~100 аттометров. В последующие 20 лет она была улучшена примерно на два порядка, до ~1 аттометра. Эта величина была уже не столь далека от амплитуды квантовых нулевых колебаний механических мод этих детекторов, для типичных “поздних” детекторов составлявшей, по порядку величины примерно 0.01 аттометр.

Необходимость дальнейшего повышения чувствительности детекторов гравитационных волн, по крайней мере, на несколько порядков величин была очевидна уже тогда, что инициировало интерес к исследованию квантовых ограничений в экспериментах с макроскопическими механическими объектами, а также к поиску методов обхода этих ограничений. В 1968 году В.Б. Брагинским было показано наличие так называемого Стандартного Квантового Предела (СКП) для точности измерений, являющегося прямым следствием соотношения неопределенности Гейзенберга и для частного случая гармонического осциллятора совпадающего с амплитудой его нулевых колебаний. Поиск методов обхода этого предела привел к публикации двух пионерских работ, где были предложены идеологически близкие, но различные по реализации схемы измерений, позволяющих преодолеть СКП. Авторами первой был В.Б. Брагинский и его коллеги по группе, второй — один из будущих основоположников проекта LIGO Кип Торн и его коллеги.

Эти ранние работы не получили тогда прямого экспериментального продолжения в силу ограниченных возможностей тогдашних технологий, а главное, из-за того, что развитие детекторов гравитационных волн пошло

другим путем. В начале 80-х годов было начато проектирование, а в 90-е — строительство лазерных интерферометрических детекторов, обладавших, при той же примерно точности измерений механических смещений, гораздо более высокой чувствительностью к гравитационным волнам в силу просто гораздо большего их размера — километры по сравнению с метрами у твердотельных детекторов. Чувствительность по смещению детекторов Advanced LIGO сейчас в несколько раз хуже его СКП, примерно равного 0.06 аттометра. Следует подчеркнуть, что при этом чувствительность к гравитационным волнам у Advanced LIGO на несколько порядков выше, чем у лучших твердотельных детекторов.

Проектная чувствительность детекторов Advanced LIGO, которая должна быть достигнута в ближайшие годы, практически соответствует СКП. Следующие итерации Advanced LIGO, как и другие будущие детекторы, должны превзойти этот предел. Единственным альтернативным методом является дальнейшее увеличение длин плеч интерферометров до десятков километров; перспективы такого подхода сомнительны в силу финансовых соображений. Развитие методов квантовых измерений, теперь уже для лазерных интерферометров, началось в Московской группе еще в 90-е годы. Из двух известных сейчас основных вариантов схем лазерных интерферометров, не ограниченных СКП, первая — так называемый квантовый измеритель скорости — была предложена Московской группой а вторая — интерферометр с дополнительными фильтрующими резонаторами — при ее активном участии.

В настоящее время Московская группа является общепризнанным лидером в области квантовых измерений для лазерных детекторов гравитационных волн и продолжает активную деятельность в этой области.

## ПЯТЬ РОССИЙСКИХ ВУЗОВ ОКАЗАЛИСЬ В РЕЙТИНГЕ ЛУЧШИХ УНИВЕРСИТЕТОВ ЕВРОПЫ, СОСТАВЛЕННОМ БРИТАНСКИМ ЖУРНАЛОМ TIMES HIGHER EDUCATION (THE)



Об этом сообщается на сайте издания.

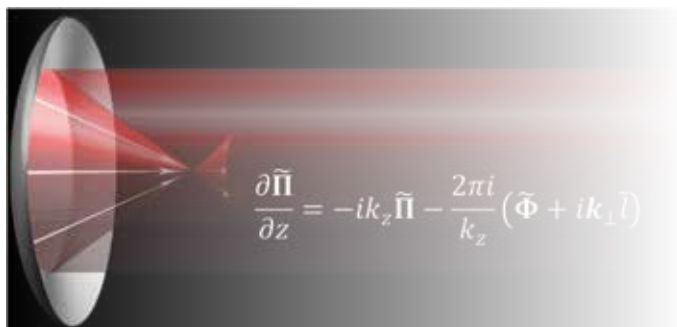
Московский государственный университет (МГУ) имени М. В. Ломоносова занял 79 место. Также в перечень попали Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (113 место), Томский политехнический университет (136 место), Казанский федеральный университет (152 место) и Национальный исследова-

тельский ядерный университет МИФИ (164 место).

Лучшими университетами в Европе, по версии THE, оказались Оксфордский и Кэмбриджский университеты. В первую десятку вошли учебные заведения Великобритании, Швейцарии, Швеции и Германии.

В марте 2015 года Московский и Санкт-Петербургский госуниверситеты были включены в первую сотню самых престижных вузов в мире по версии THE.

## УРАВНЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЛЯ ЖЕСТКОЙ ФОКУСИРОВКИ ПАРАБОЛИЧЕСКИМ ЗЕРКАЛОМ



Доцент О.Г. Косарева

Физиками МГУ (группа доц. О.Г. Косаревой: с.н.с. Н.А. Панов, аспирант В.А. Андреева, студент Д.Е. Шипило) совместно с коллегами из Франции выведено уравнение для вектора Герца, обобщающее непараксиальное уравнение однонаправленного распространения лазерного излучения на случай векторных эффектов.

На основе разработанного уравнения проведено численное моделирование жесткой фокусировки лазерного излучения идеальной тонкой линзой, задающей параболический волновой фронт пучка. Для верификации полученных результатов использованы векторные дифракционные интегралы, обобщающие интеграл Френеля на случай фокусировки параболическим зеркалом.

Получено аналитическое выражение для критической числовой апертуры, определяющей возможность корректного описания жесткой фокусировки параболической линзой с помощью уравнения для вектора Герца. Предложен метод модификации начальных условий, позволяющий обойти проблему некорректного описания.

Полученные результаты открывают возможность моделирования нелинейной трансформации жестко сфокусированного фемтосекундного излучения мощных тераваттных лазерных систем, в том числе создания новых источников терагерцового излучения на основе микроплазмы.

Результаты опубликованы в статье A. Couairon, O. G. Kosareva, N. A. Panov, D. E. Shipilo, V. A. Andreeva, V. Jukna, and F. Nesa, "Propagation equation for tight-focusing by a parabolic mirror," *Optics Express* 23, 31240 (2015).

## ФАЗОВАЯ СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В ГРАФЕНЕ И УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ ПОД ВЛИЯНИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Ученые физического факультета (группа под руководством профессора В.Ч. Жуковского, кафедра теоретической физики) совместно с российскими (группа под руководством профессора К.Г. Клименко, ИФВЭ, г. Протвино) и зарубежными (профессор Д. Эберт, Гумбольдтов Университет, г. Берлин, Германия) коллегами исследовали теоретическую модель, позволяющую описывать поведение электронных возбуждений в углеродных нанотрубках под влиянием магнитного поля.

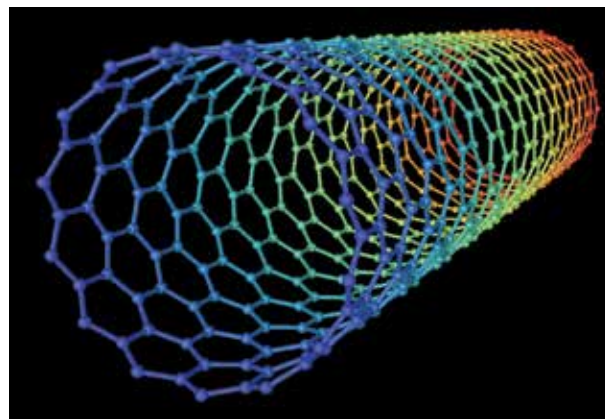


Проф. В.Ч. Жуквский

В последние годы, после сообщений об успешном синтезе графена, т.е. единичного монослоя графита (2004 г.), представляющего собой плоский полимер углерода с шестиугольной решеткой, особый интерес научной общественности прикован к исследованию свойств полимеров на основе углерода. Благодаря своим необычным свойствам графен и другие углеродные структуры, такие как углеродные нанотрубки (которые могут быть рассмотрены как скрученные в цилиндр один или несколько слоев графена), привлекают особое внимание. Как было показано еще до получения реального полимера, состояния низкоэнергетических электронов в графене эффективно описываются уравнением, совпадающим по форме с релятивистским уравнением Дирака, что позволяет установить связь между электронными свойствами графена и физикой высоких энергий и, соответственно, использовать хорошо развитый аппарат квантовой теории поля.

Модели квантовой теории поля, подобные описанным выше, исследуются на кафедре теоретической физики в группе под руководством профессора В.Ч. Жуковского совместно с коллегами из российских и зарубежных университетов (группа под руководством профессора К.Г. Клименко, ИФВЭ, г. Протвино, профессор Д. Эберт, Институт физики Гумбольдтова университета, г. Берлин, Германия). Один из новейших результатов группы, полученный профессором В.Ч. Жуковским и аспирантом П.Б. Колмаковым совместно с коллегами (профессорами К.Г. Клименко и Д. Эбертом) — исследование фазовой структуры фермионных конденсатов на свернутой в цилиндр шестиугольной полимерной решетке, моделирующей углеродные нанотрубки, и исследование магнитных свойств такой структуры во внешнем магнитном поле, вызывающем эффекты Зеемана и Ааронова-Бома.

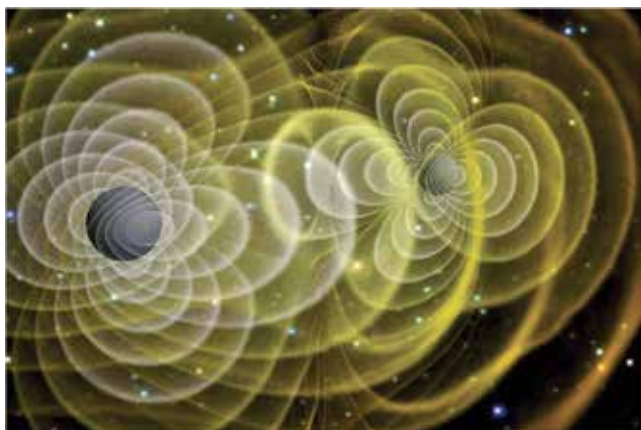
В работе аналитически вычислен эффективный потенциал ряда моделей с четырехфермионным взаимодействием, моделирующих явления в плоском графене и углеродных нанотрубках, под влиянием температуры, химического потенциала, внешнего магнитного поля и компактификации пространственного измерения (в нанотрубках).



На основе полученного потенциала исследована фазовая структура моделей и установлено возникновение симметрии между влиянием конечной температуры и пространственной компактификации при определенных значениях магнитного потока через сечение нанотрубки. Продемонстрирована зависимость фазовой структуры от величины магнитного поля. Кроме того учтен конечный химический потенциал и продемонстрировано проявление размерной редукции от  $(2+1)$ -мерного к  $(1+1)$ -мерному пространству-времени при периодических граничных условиях, и отсутствие такой редукции при наложении антипериодических граничных условий. Полученные результаты представляют интерес в контексте эффективных моделей как в физике высоких энергий, так и в физике низкоразмерных конденсированных сред.

Результаты описанных выше исследований опубликованы в работе D. Ebert, K.G. Klimenko, P.B. Kolmakov, V.Ch. Zhukovsky, *Annals of Physics*, 2016, <http://dx.doi.org/10.1016/j.aop.2016.05.001>, arXiv:1509.08093 [cond-mat.mes-hall]

## ВТОРОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ОТ СЛИВАЮЩИХСЯ ЧЕРНЫХ ДЫР ДЕТЕКТОРАМИ LIGO



15 июня 2016 года в 20 часов 15 минут по московскому времени в ходе пресс-брифинга, проходившего в Москве (ГАИШ МГУ) и Сан-Диего (Американское астрономическое общество) было объявлено, что 26 декабря 2015 года ученые во второй раз обнаружили гравитационные волны.

Волны были зарегистрированы обоими детекторами Лазерной интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории (LIGO — Laser Interferometric Gravitational-Wave Observatory)

Исследования в LIGO осуществляются в рамках научной коллаборации LIGO (LSC — LIGO Scientific Collaboration), коллективом из более 1000 ученых из университетов в Соединенных Штатах и 14 других стран. Физический факультет МГУ представлен группой член-корр. РАН В.Б. Брагинского,

в которую входят профессора В.П. Митрофанов, И.А. Биленко, С.П. Вятчанин, М.Л. Городецкий, Ф.Я. Халили, доцент С.Е. Стрыгин и ассистент Л.Г. Прохоров.

## ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ГАРМОНИКИ В ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ В ГЕОМЕТРИИ ЛАУЭ



Доц. Т.В. Мурзина

Сотрудники и аспиранты Физического факультета МГУ (доц. Т.В. Мурзина, проф. Б.И. Манцызов, ассистент С.Е. Связховский, н.с. А.И. Майдыковский, асп. Д.А. Копылов и асп. В.Б. Новиков, кафедры квантовой электроники и общей физики) экспериментально исследовали генерацию второй гармоники в одномерных фотонных кристаллах из пористого кварца в геометрии Лауэ.



Асп. Д.А. Копылов



Ассистент С.Е. Связховский



Асп. В.Б. Новиков



Н.с. А.И. Майдыковский



Проф. Б.И. Манцызов

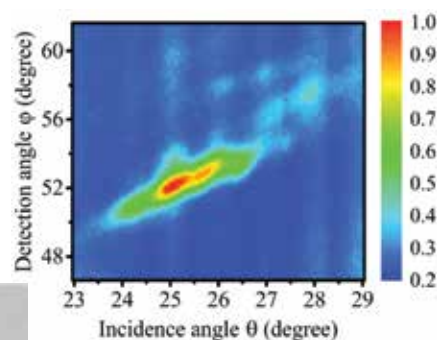


Рис. 1. Фрагмент углового распределения интенсивности ВГ в зависимости от угла падения излучения накачки.

Проблема частотного преобразования света имеет большое значение в лазерной физике. Использование периодических диэлектрических структур позволяет достигать высокой эффективности преобразования. Фотонные кристаллы (ФК) — диэлектрические структуры показатель преломления, которых модулируется на масштабах длины волны света. В таких объектах фазовый синхронизм, необходимый для генерации второй гармоники (ВГ) достигается за счет особенностей дисперсии света вблизи краев фотонных запрещенных зон. Эффективность нелинейного преобразования может быть повышена благодаря эффектам локализации электромагнитного поля и уменьшения групповой скорости света. Эффекты в одномерных фотонных кристаллах исследуются, как правило, в геометрии Брэгга и представлены в многочисленных работах. Если ФК состоит из нескольких сотен слоев и обладает достаточной толщиной, то возможно исследование нелинейных процессов в ФК в геометрии Лауэ, что до настоящего времени не проводилось.

Следует отметить, что в геометрии Лауэ в общем случае отсутствуют фотонные запрещенные зоны. Излучение внутри ФК локализуется в чередующихся слоях и перераспределяется между собственными модами: бормановской (Б) и антибормановской (аБ), соответствующими слоям с низкими и высокими показателями преломления. Генерация второй гармоники была теоретически предсказана А.П. Сухоруковым для шести типов синхронизмов между модами накачки и второй гармоники.

Группой ученых физического факультета МГУ изучены

нелинейные свойства одномерных ФК на основе пористого кварца, созданных на факультете. Оптическая нелинейность создавалась в них двумя различными способами: при введении в поры сегнетоэлектрической соли (нитрит натрия) и при помощи неполного термического окисления образца, где нелинейность создают поверхности нанокристаллитов кремния.

В первом случае подбор условия синхронизма был осуществлен теоретически при помощи варьирования относительных толщин слоев. Согласно вычисленным параметрам был изготовлен фотонный кристалл. Эксперимент реализован для фазового синхронизма между анти-бормановскими модами накачки и второй гармоники. Исследовались индикатрисы интенсивности ВГ в зависимости от угла падения излучения, длины волны и поляризации света. Обнаружено, что генерация второй гармоники происходит вблизи брэгговского угла падения и формирует два острых максимума в направлении нулевого и первого порядков дифракции. Один из максимумов представлен на рис. 1.

Во втором случае, в ФК из частично окисленного пористого кремния аналогичным образом были обнаружены фазовые синхронизмы между аБ-модами накачки и ВГ, а также между аБ- и Б-модами накачки и Б-модой ВГ, в полном согласии с разработанной ранее теорией. Измеренная индикатриса ВГ показана на рис. 2. Кроме того, был обнаружен дополнительный максимум генерации ВГ, не соответствующий имеющимся дифракционным порядкам.



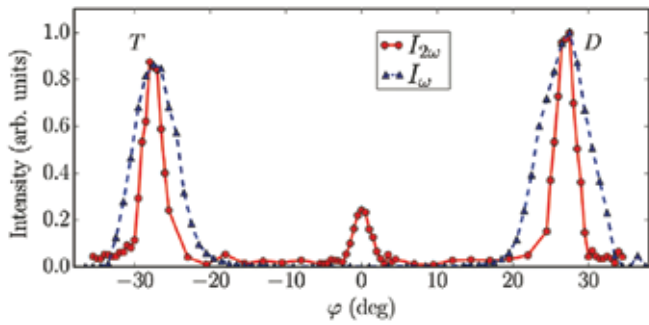


Рис. 2. Угловая зависимость интенсивности генерации ВГ в кристалле с нанокристаллитами кремния.

Этот максимум объясняется появлением в ФК периодической решетки в направлении поперек слоев. Такая решетка возникает вследствие маятникового эффекта: между собственными модами ФК возникают биения, создающие стационарное периодическое в пространстве распределение интенсивности. В максимумах этого распределения возникает электро-индуцированная квадратичная восприимчивость.

Полученные угловые и спектральные зависимости подтверждают синхронный характер генерации второй гармоники. Использование брэгговской дифракции в геометрии Лауэ для частотного преобразования света имеет преимущества по сравнению с геометрией Брэгга, поскольку позволяет использовать протяженные структуры, увеличивая оптический путь и эффективную длину взаимодействия.

D. A. Kopylov, S. E. Svyakhovskiy, L. V. Dergacheva, V. A. Bushuev, B. I. Mantsyzov, T. V. Murzina, "Observation of optical second-harmonic generation in porous-silicon-based photonic crystals in the Laue diffraction scheme", *Physical Review A* 93, 053840 (2016)

V. B. Novikov, A. I. Maydykovskiy, B. I. Mantsyzov, T. V. Murzina, "Laue diffraction in one-dimensional photonic crystals: The way for phase-matched second-harmonic generation", *Physical Review B* 93, 235420 (2016).

## ОСОБЕННОСТИ МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В СПЛАВАХ Fe-Rh



Проф. А.М. Салецкий



Аспирант Р.Р. Гимаев



Физик, к.ф.-м.н. В.И. Зверев



Проф. А.М. Тишин

Учеными Физического факультета (кафедра общей физики; кафедра общей физики и физики конденсированного состояния и кафедра физики низких температур и сверхпроводимости) в сотрудничестве с коллегами из университета Хиросаки (Япония) и университета Уорик (Великобритания) исследованы особенности магнитокалорического эффекта в сплавах на основе Fe-Rh в области фазового перехода антиферромагнетизм – ферромагнетизм и представлена теоретическая модель, описывающая эти особенности.

Магнитокалорический эффект (МКЭ) проявляется в адиабатическом изменении температуры  $\Delta T$  и изотермическом изменении энтропии  $\Delta S_M$  магнитного материала при изменении величины внешнего магнитного поля. Материалы, обладающие высокими значениями МКЭ, являются перспективными для применения в технологии

магнитного охлаждения и медицине. Помимо потенциала практического применения магнитокалорических материалов измерение МКЭ интересно с фундаментальной точки зрения для исследования механизма магнитных фазовых переходов.

Из известных на сегодняшний день материалов наибольшая величина  $\Delta T$  достигается в сплавах Fe-Rh (в составах, близких к эквипотным: 50-50) в области магнитного фазового перехода первого рода антиферромагнетизм (АФМ) – ферромагнетизм (ФМ). Если использование сплавов в магнитных холодильниках ограничивается высокой стоимостью родия, то для медицинских применений сплавы на основе Fe-Rh являются перспективными в виду того, что фазовый переход в них происходит при температурах, близких к температуре человеческого тела, и может регулироваться с хорошей точностью путем легирования сплава платиной или палладием.

Учеными Физического факультета совместно с коллегами из университета Хиросаки (Япония) и университета Уорик (Великобритания) экспериментально показано влияние незначительных дефектов в кристаллической структуре сплава Fe-Rh (ОЦК) на поведение МКЭ и температуру фазового перехода АФМ – ФМ. В результате многократных воспроизводимых прямых измерений МКЭ в динамическом режиме при непрерывном изменении магнитного поля был впервые обнаружен эффект «невозвращения»

конечной температуры сплава к начальной после полного цикла изменения внешнего магнитного поля. Теоретическое обоснование экспериментальных результатов удалось получить при использовании модели, в которой часть атомов родия (около 1 %) замещается атомами железа и наоборот. Используемая модель подразумевает сильное влияние степени замещения на величину МКЭ, а также температуру фазового перехода в сплаве Fe-Rh. В результате экспериментов обнаружено двукратное уменьшение величины МКЭ в сплавах на основе Fe-Rh во втором и последующем циклах изменения магнитного поля. Обнаруженные особенности могут сказываться на технологическом использовании данных сплавов и требуют дальнейшего детального исследования.

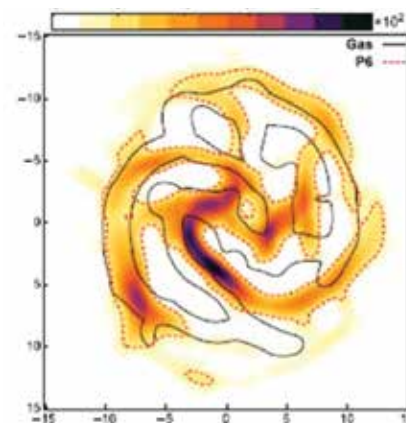
Результаты работы опубликованы в статье: V. I. Zverev, A. M. Saletsky, R. R. Gimaev, A. M. Tishin, T. Miyanaga, and J. B. Staunton. "Influence of structural defects on the magnetocaloric effect in the vicinity of the first order magnetic transition in Fe<sub>50.4</sub>Rh<sub>49.6</sub>." Applied Physics Letters, 108(19): 192405 (2016).

## САМЫЕ БОЛЬШИЕ МАГНИТЫ



Проф. Д.Д. Соколов

Д.Д. Соколов в составе группы российских, немецких, английских, испанских и чилийских специалистов установил, что магнитное поле в галактике M83 организовано в несколько рукавов, причем некоторые из этих рукавов совпадают с газовыми рукавами, а другие находятся между газовыми рукавами (см. рис. Где магнитные рукава показаны цветом, а газовые — контуром). Ранее магнитные рукава были выявлены лишь в галактике NGC6946.



В науке всегда есть некоторый элемент состязательности — кто в данном виде спорта самый-самый. Естественно, не остается без внимания вопрос и о том, какой магнит самый большой. Ответ на него очень неожиданный для человека, привыкшего к миру технических магнитов — самыми большими по размеру магнитами, известными современной науке, являются звездные острова — спиральные галактики. В частности, гигантским магнитом является та галактика, в которой мы живем — Млечный Путь. Впервые об этом догадался в конце 40-ых годов прошлого века великий Энрико Ферми, размышляя о том, что может удерживать космические лучи в галактике. Он правильно оценил напряженность магнитного поля нашей Галактики и в общих чертах правильно представлял себе его конфигурацию. Можно только позавидовать способности классиков науки делать правильные выводы из очень ограниченного набора фактов и, самое главное, удерживаться от беспочвенных спекуляций на основе этих фактов. Примерно в эту же эпоху замечательный отечественный астроном Б.А. Воронцов-Вельяминов включил

эти результаты Ферми в свой учебник по астрономии для 11 класса средней школы, причем включил так, что его текст практически без правки можно вносить в современные обзоры по магнитным полям галактик. Сейчас этому почему-то не учат в школе.

### ФОРМИРОВАНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ ГАЛАКТИК

Вообще говоря, магнетизм широко распространен в космосе. Магнитное поле есть у Солнца, у многих звезд и планет. Магнитом, в конце концов, является Земля. Обычно говорят, что магнитные поля в небесных телах и космической среде обнаруживают по эффекту Зеемана, т.е. по расщеплению спектральных линий в магнитном поле. Именно так было открыто магнитное поле Солнца. Однако наблюдать магнитные поля галактик с помощью эффекта Зеемана удастся лишь в исключительных случаях, в тех областях галактик, где эти поля аномально велики. Дело в том, что из-за движений излучающих атомов в силу эффекта Доплера спектральные линии уширяются. Так что

сравнительно небольшое расщепление, вызванное магнитным полем галактики, обычно не удается заметить. На помощь приходит другой эффект — эффект Фарадея. Он состоит в том, что в зеркально-асимметричной среде (например, в растворе сахара — в органических веществах есть лишь сахара одной из двух зеркально-симметричных конфигураций) плоскость поляризации света вращается по мере прохождения света через среду. Оказывается, что магнитное поле тоже делает среду зеркально-асимметричной, а синхротронное излучение, присутствующее во многих небесных телах, поляризовано. Угол поворота пропорционален проекции магнитного поля на луч зрения, плотности тепловых электронов среды, длине пути и квадрату длины волны излучения. Длина пути в галактиках огромная, поэтому даже при небольшом магнитном поле набегает существенный поворот плоскости поляризации. Этот поворот не должен быть и очень большим, поскольку тогда плоскость поляризации поворачивается много раз и наблюдения трудно интерпретировать. В итоге оказывается, что лучше всего наблюдать фарадеевское вращение в радиодиапазоне, на длинах волн в сантиметровом диапазоне.

Говоря о том, что магнитное поле галактик слабое, мы сравниваем его с магнитными полями технических устройств или магнитным полем Земли. На самом деле это непоучительное сравнение — в мире галактик свои масштабы. Лучше сравнить плотность энергии магнитного поля и, например, плотность энергии случайных движений межзвездного газа, в котором и находится магнитное поле. Оказывается, что эти энергии приблизительно одинаковы. Другими словами, магнитное поле галактики в своем естественном масштабе гораздо сильнее большинства привычных для нас магнитных полей — оно в состоянии влиять на динамику среды. Это же можно сказать и, например, о магнитном поле Солнца. Специалисты полагают, что магнитное поле в глубине Земли тоже в состоянии существенно влиять на течения в жидком внешнем ядре Земли.

Перед тем, как указать, какое же магнитное поле галактик количественно, нужно сказать о еще одном отличии магнитных полей в космосе и в технических устройствах. Мы обычно связываем явление магнетизма с ферромагнетиками — в детстве обычно начинают изучать явление на примере подковообразного магнита. В космической среде ферромагнетизм — большая редкость. Поэтому нет смысла различать напряженность магнитного поля и магнитную индукцию, а магнитное поле принято измерять не в эрстедах, а в гауссах. Эксперимент показывает, что зарубежные редакторы относятся к этой практике терпимо, а отечественные — не очень. Итак, напряженность магнитного поля галактик порядка нескольких микрогаусс.

За тридцать лет после догадки Ферми накопился большой объем данных о фарадеевском вращении излучения внегалактических радиоисточников и пульсаров, т.е. галактических источников поляризованного излучения. В результате на рубеже 80-ых годов XX века появилась возможность более-менее детально изучить строение магнитного поля Млечного Пути. Оказалось, что это магнитное поле лежит в плоскости галактики и примерно симметрично относительно центральной плоско-

сти галактического диска и примерно перпендикулярно направлению на центр галактики. Эта симметрия очень приблизительная — среднее магнитное поле наложены разнообразные возмущения. Такое строение магнитного поля кажется естественным. Однако привычное нам дипольное магнитное поле, скажем, магнитное поле Земли имеет совсем другое строение — магнитное поле перпендикулярно экваториальной плоскости Земли. Другими словами, магнитное поле Млечного Пути имеет симметрию квадрупольного, а не дипольного типа, оно не идет от одного магнитного полюса к другому (полоидальное магнитное поле), а направлено почти по азимутальному направлению (тороидальное поле). На самом деле, отклонения от тороидального магнитного поля тоже есть, есть и полоидальная составляющая, но они сравнительно слабы.



Рис. 1. Радиотелескоп в Эффельсберге, Германия. На этом телескопе, расположенном в красивых горах недалеко от Бонна, были получены первые наблюдения магнитных полей во внешних галактиках. Этот инструмент и сейчас играет важнейшую роль в изучении магнитных полей галактик.

К сожалению, мы видим Млечный Путь изнутри, так что за близкими деревьями легко теряется образ всего леса. Очень полезно взглянуть на ситуацию со стороны, поэтому особенно ценны наблюдения внешних галактик. Такие наблюдения появились в 80-ых годах прошлого века. Львиную долю этих наблюдений выполнили немецкие радиоастрономы из Института радиоастрономии Общества имени Макса Планка в Бонне. Заслуга в этом принадлежит Рихарду Вилебинскому — чрезвычайно колоритному человеку, выходцу из Польши, прошедшему шко-

лу радиоастрономии в Австралии и, между прочим, деятельному стороннику международного сотрудничества, включавшего и нашу страну. В это время Германия уже залечила наиболее заметные раны, нанесенные военной катастрофой, однако немецкая наука еще была далека от довоенных стандартов. Требовалось определить участки, на которых немецкая наука могла достичь лидирующих позиций с помощью разумных усилий. В частности, начинал наблюдения новый современный радиотелескоп в Эффельсберге, недалеко от Бонна. Первые наблюдения показали, что радиоизлучение внешних галактик поляризовано. Это излучение имеет синхротронную природу, т.е. вызвано движением релятивистских электронов в магнитном поле. Синхротронное излучение поляризовано с высоким процентом поляризации (около 70 %). Никого не удивляло наличие каких-то магнитных полей в галактиках — астрономы привыкли объяснять все непонятное магнитным полем. Традиционно считалось, что эти магнитные

поля имеют очень мелкий пространственный масштаб и связаны не со всей галактикой, а с какими-то ее локальными объектами. Тогда поляризация излучения, приходящего из разных частей галактики, должно иметь самые разные ориентации плоскости поляризации, так что в целом оно окажется не поляризованным. На деле же поляризация наблюдалась. Конечно, не 70 %, процент поляризации был около 10 %, но по астрономическим меркам это много. Вилебинский правильно угадал, что это — перспективное направление исследования. Подчеркнем, что от наблюдения поляризации до восстановления структуры магнитного поля внешних галактик дистанция большого масштаба. Важно, что была правильно угадана перспектива, а первоначальный импульс исследования оказался настолько сильным, что он во многом определяет ситуацию в данной области до сих пор, хотя, конечно, постепенно подрастают другие группы-конкуренты, прежде всего в Голландии.

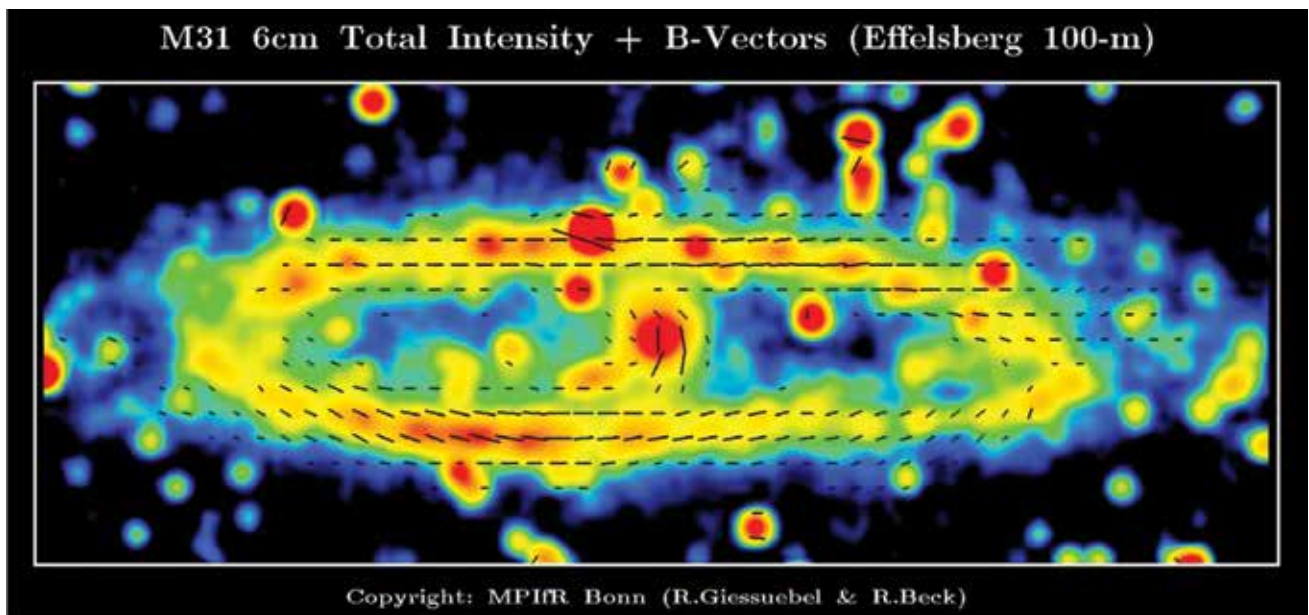


Рис. 2. Кольцо поляризованного радиоизлучения в туманности Андромеды (галактика М31) по данным на длине волны 6 см. Интенсивность радиоизлучения показана цветом, а черточки показывают прямые, вдоль которых направлены векторы магнитного поля. Для того, чтобы узнать, в какую сторону направлены эти векторы, нужно сопоставлять данные, полученные при наблюдении на разных длинах волн.

Другим удачным обстоятельством, определившим ситуацию в изучении магнитных полей галактик, было то, что в это время в Москве интенсивно работала группа теоретиков, интересовавшихся происхождением магнитных полей галактик. Научным лидером этой группы был замечательный отечественный физик Яков Борисович Зельдович, вокруг которого собирались молодые люди, занимавшиеся различными вопросами астрофизики.

Происхождение магнитных полей небесных тел и прежде всего Солнца давно занимало теоретиков. Уже в 1919 г. Лармор понял, что не видно другого механизма, способного создать магнитное поле Солнца, кроме электромагнитной индукции. В самом деле, представление о куске ферромагнетика в центре Солнца не хочется рассматривать даже в виде шутки. По аналогии с тем, что тогда называлось динамо-машиной, механизм получил название динамо. Для того, чтобы подчеркнуть, что этот механизм не предполагает наличия на Солнце твердых проводников и других не относящихся к делу деталей, к

этому слову прилагают эпитет гидромагнитное. К началу 80-ых теория солнечного динамо была хоть в какой-то мере разработана. Было понятно, что в других небесных телах объяснять происхождение магнитных полей тоже естественно с помощью механизма динамо. Было опубликовано несколько работ о том, как могло бы работать динамо в диске галактик. Первая из них, написанная С.И. Вайнштейном и А.А. Рузмайкиным, опубликована в 1972 г. одновременно с работой замечательного американского астронома Ю. Паркера — это были первые работы по галактическому динамо.

Я.Б. Зельдович был человеком, ориентированным на международную научную кооперацию, как бы трудно ни было осуществить это намерение. Одним из результатов этих усилий стала публикация в 1983 г. в Нью-Йорке издательстве Гордон энд Брич книги "Магнитные поля в астрофизике", написанной им вместе с молодыми сотрудниками А.А. Рузмайкиным и Д.Д. Соколовым. Понятное дело, что мы писали о том, в чем разбирались сами, поэтому зна-

чительная часть книги была посвящена галактическому динамо. Книга произвела впечатление на читателя. В то время наши соотечественники редко публиковали книги сразу на английском языке и за границей, но, пожалуй, важнее было то, что впервые вопрос о магнитных полях Млечного Пути занял такое место в книге. Другие группы, работавшие в этой области, больше занимались солнечным динамо.

Нам тоже стало ясно, что открывается новая область исследований. Хорошо помню, как мы слушали доклад замечательного радиоастронома из Бонна Райнера Бека, который только что открыл поляризованное радиоизлучение от туманности Андромеды — галактики М31. Это излучение было не просто размазано по всему диску галактики, а сконцентрировано в кольце. Вероятно, именно там и расположено магнитное поле этой галактики. Но почему оно концентрируется в кольцо — наблюдателям было совершенно непонятно. Мы-то знали, что студент Саши Рузмайкина, Анвар Шукуров только что написал статью о том, какое распределение магнитного поля ожидается в М31 — оно было сосредоточено именно в кольцо, которое располагалось как раз там, где оно было кольцом поляризованного излучения.

В это время было не так просто подойти к приехавшему гостю из далекой Западной Германии и рассказать ему о своих идеях. Однако Саша — человек, который способен пройти сквозь стену, так что через несколько месяцев удалось довести изыскания нашей группы до сведения немецких коллег. В результате этих усилий мы получили предложение написать книгу о магнитных полях галактик (всяких, а не только Млечного Пути) для голландского издательства Дурнебааль Райдель из города Дордрехта. В ту пору город Дордрехт как и вся Голландия воспринимался как нечто нереальное. Много лет спустя я был в Голландии и специально поехал в выходной день в этот город, где в 1988 г. вышла книга А.А. Рузмайкина, А.М. Шукурова и Д.Д. Соколова “Магнитные поля галактик”, правда, издательство уже стало называться Клувер — законы бизнеса, ничего не сделаешь. В этот раз русскую версию удалось немедленно издать дома, в издательстве Наука. Русского издания первой из книг пришлось ждать четверть века.

Счастливым для нас образом в концепцию исследователей из Бонна теория происхождения магнитных полей галактик не входила в качестве неотъемлемой части. Поэтому быстро по масштабам того времени установилось тесное сотрудничество между нашими группами, так что уже в 1989 г. мы выпустили первый совместный препринт. В это время быстро росли научные связи, а многие члены нашей группы стали зарубежными учеными. Поэтому следующий большой обзор по магнитным полям галактик, который вышел в 1996 г. и до сих пор является стандартной ссылкой по данному вопросу, писала довольно большая группа авторов из многих европейских стран. Отметим, что в Германии была признанная группа, работавшая в области динамо. Правда, эта группа работала в ГДР, в Потсдаме. Это не исключало сотрудничества с Бонном, но делало его не таким простым. Кроме того, часто легче сотрудничать с коллегой из далекой страны, чем со своим соседом. Так или иначе, среди участников обзора был и Аксель Бранденбург, вышедший из потсдамской группы и работавший тогда в Копенгагене.

Сейчас этот ведущий специалист по прямому численному моделированию космических магнитных полей работает в Стокгольме, в Институте теоретической физики северных стран (НОРДИТА).



Рис. 3. Результаты изучения магнитного поля в М31, представленные на немецкой почтовой марке.

Первые результаты о магнитных полях галактик вызвали заметный, хотя и не всегда ожидаемый общественный интерес. В те годы не было Интернета, но существовала практика запросов на отписки статей, причем считалось, что не ответить на такой запрос неприлично. Припоминаю, как отправлял отписку на запрос из Каирского зоопарка.

#### КАК ВОЗНИКАЮТ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ГАЛАКТИК

Галактическое динамо работает на тех же принципах, что и солнечное динамо. Главная трудность на пути работы этого механизма в том, как обойти известное из школы правило Ленца — электромагнитная индукция создает новое магнитное поле так, чтобы оно не увеличивало, а уменьшало начальное, затравочное магнитное поле. Поэтому для самовозбуждения магнитного поля — а это и есть динамо — нужно, чтобы в процессе было задействовано два эффективных контура. Тогда первый из них создает магнитное поле во втором, а второй использует это созданное поле и создает новое в первом контуре. При этом правило Ленца не запрещает, чтобы новое созданное поле складывалось с исходным.

Специалистам по динамо понадобилось примерно полвека для того, чтобы понять, как можно реализовать эту возможность в природных условиях. Магнитное поле первого контура можно представлять себе как поле магнитного диполя или магнитного квадруполья. Его называют полоидальным. Оно вморожено в хорошо проводящую вращающуюся среду. Вращение это практически никогда не является твердотельным — твердые тела в космосе редкость. Поскольку разные части магнитной линии вращаются с разной угловой скоростью, из полоидального магнитного поля рождается тороидальное магнитное поле, направленное по азимуту. Эта часть динамо особого сомнения не вызывает.

Проблема в том, как восстановить полоидальное магнитное поле из тороидального. К шестидесятым годам прошлого века стало ясно, что единственный реалистичный путь для этого в космических условиях связан с нарушением зеркальной симметрии конвекции (или турбулентности) во вращающемся теле. За счет этого возникает компонента электрического тока, направленная

не перпендикулярно, а параллельно магнитному полю. В ясной форме, доступной количественному изучению эта мысль была высказана и разработана физиками из тогдашней ГДР М. Штеенбеком, Ф. Краузе и К.-Х. Рэдлером. Это, пожалуй, самое из-вестное и важное открытие физиков ГДР. Оно получило название альфа-эффекта. Конечно, со временем физики научились описывать альфа-эффект на должном математическом уровне. Однако главная проблема с ним все-таки психологическая. Весь опыт школьной, университетской, да и вообще стандартной физики сформирован при молчаливом предположении о том, что мы имеем дело с зеркально-симметричными средами. Эффекты зеркальной асимметрии начинают играть существенную роль в микромире. Они были обнаружены приблизительно тогда же, когда сформировалось и представление об альфа-эффекте. В это время физики уже привыкли к тому, что поведение элементарных частиц плохо укладывается в категории здравого смысла, однако то, что это случается и в мире больших масштабов, было трудно себе представить. На самом деле зеркальную симметрию нарушает общее вращение тела, в данном случае галактики. Забавно, что в географии этот факт считается очевидным — там есть закон Бэра о том, что реки, текущие в противоположных полушариях подмывают противоположные берега. В динамо в совершенно другом контексте используется ровно та же идея.

Подчеркнем, что динамо — пороговое явление. Индукционные эффекты должны перебороть омические потери магнитного поля, связанные с конечной проводимостью среды. В мире галактик этот порог генерации преодолевается за счет огромных пространственных масштабов галактик.

В рамках свойств галактического динамо понятно, почему магнитные поля возникают в спиральных галактиках и в некоторых других близких типах галактик — именно эти галактики вращаются.

Удалось разобраться и в том, почему конфигурация магнитных полей галактик совсем не похожа на то, как устроено магнитное поле Солнца и Земли. Оказалось, что во всех этих случаях динамо работает в некотором слое, однако угловая скорость в галактиках меняется вдоль этого слоя, а в других случаях — поперек него. Заранее было, мягко говоря, неочевидно, что такая на первый взгляд несущественная деталь приводит к совершенно различным результатам. Конечно, очень важно и то, что условия наблюдения магнитных полей во всех этих случаях очень различны, так что мы видим прежде всего то, что удастся легче пронаблюдать.

### НОВЫЕ ИДЕИ И СТАРЫЕ ИЛЛЮЗИИ

Первые модели генерации магнитного поля в галактиках были, как это и естественно, обобщенными и однообразными. Конечно, крупно повезло, что и в этих моделях сразу же нашлось яркая деталь (кольцо в М31), которую удастся увидеть и в наблюдениях. Для этой детали нашлось место даже на одной из почтовых марок, выпущенных немецкой почтой.

За годы, прошедшие с тех пор, наблюдатели увидели много разнообразных и красивых деталей, а теоретики в той или иной степени научились их объяснять.

Оказалось, что в некоторых спиральных галактиках (например, в NGC 6946) магнитное поле собраны в своеобразные магнитные рукава, которые расположены между спиральными рукавами, образованными газом и звездами. Теоретики склонны объяснять эти магнитные рукава как своеобразный транзиент, т.е. магнитную структуру, которая еще не успела достичь своего равновесного состояния. Известны и другие примеры подобных транзиентов. Например, магнитное поле той галактики, в которой мы живем — Млечном Пути, несколько раз изменяет свое направление вдоль галактического радиуса. Простейшие модели галактического динамо предсказывают,

что конечная стадия эволюции магнитного поля галактик не должна содержать подобных деталей. Их появление в реальных галактиках объясняется тем, что эти, по человеческим меркам очень старые небесные тела, в магнитном смысле совсем молоды. В самом деле, оказывается, что характерное время, за которое галактическое динамо может существенно перестроить магнитное поле в данной области галактического диска, составляет порядка 0.5 млрд лет. Это, конечно, существенно меньше, чем возраст галактик, сравнимый с 10 млрд лет, однако разрыв между этими временными масштабами не такой уж большой. Важно и то, что на протяжении своей жизни галактика не оставалась неизменной. В ней происходили разнообразные явления вроде вспышек

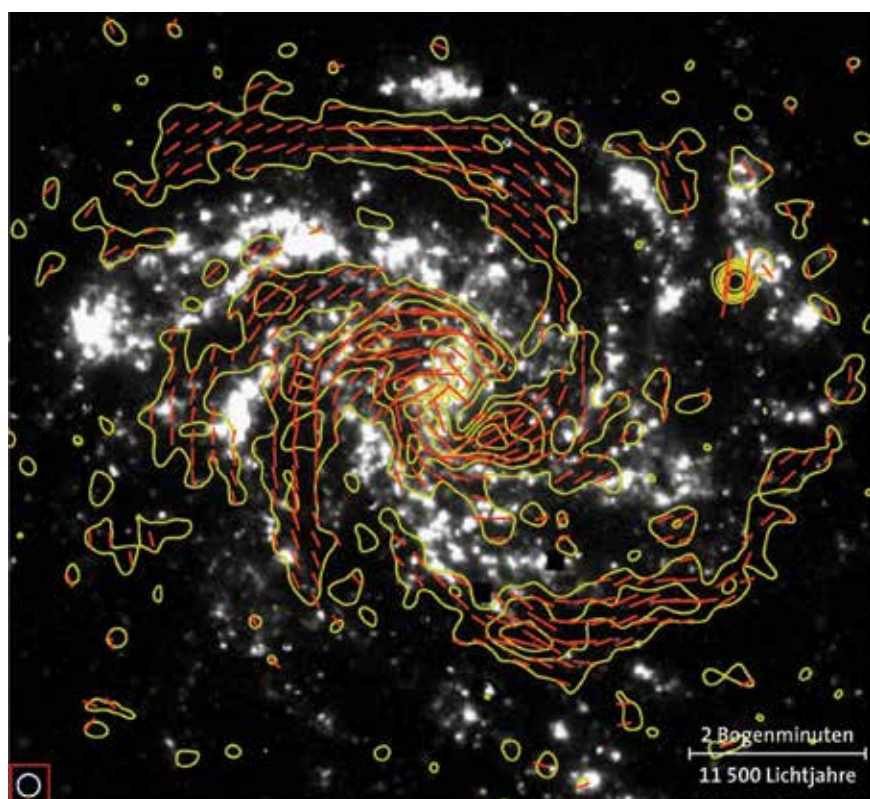


Рис. 4. Магнитные рукава (показаны цветными контурами) в галактике NGC 6946 лежат между рукавами, образованными распределениями звезд и межзвездного газа, которые видны на оптическом изображении галактики (черно-белый рисунок).

звездообразования, появления и исчезновения газовых спиральных рукавов, взаимодействий с соседними галактиками и т.п. Сравнительно неторопливое галактическое динамо не успевает сгладить следы этих событий. В итоге в разных частях галактического диска образуются фрагменты финальной магнитной конфигурации, которые плохо стыкуются друг с другом. Это и есть транзиенты. Особенно помогает их образованию то, что магнитное поле является псевдовектором. Это значит, что можно предсказать лишь величину вектора магнитного поля и ту прямую, на которой он лежит, но не может существовать физической причины, которая выделяет направление поля. Поэтому в разных фрагментах магнитной конфигурации магнитное поле может иметь противоположные направления, а на стыке фрагментов возникают долгоживущие обращения магнитного поля.

Подобные внутренние пограничные слои (их еще называют контрастными структурами) известны во многих областях физики (например, в физике полупроводников). Для изучения контрастных структур замечательным отечественным математиком А.Б. Васильевой и ее школой разработаны мощные методы их расчета. Мы, конечно, широко пользовались идеями этой группы, однако обнаруженная формальная аналогия между полупроводниками и галактиками было, конечно, совершенно неожиданной.

Конечно, спиральные галактики — не просто вращающиеся газовые и звездные диски. В них выделяются разнообразные структуры. Например, в центральных частях некоторых галактик видны своеобразная линейная структура, которая как спица протыкает центральную область. От ее концов отходят спиральные рукава, поэтому ее положено по-русски называть перемычкой, хотя в живой речи ее обычно называют английским словом бар. Магнитные поля в галактиках с баром были изучены в рамках специального немецко-российского проекта РФФИ и Немецкого научного общества, за который мы им очень благодарны. Оказалось, что вращающийся бар сильно изменяет стандартную конфигурацию магнитного поля, а главное, возникают такие магнитные линии, вдоль которых может течь вещество и питать черную дыру, которая, видимо, находится в центре галактики. До сих пор галактики с перемычками — единственный детально исследованный как наблюдательно, так и теоретически морфологический класс галактик.

Описание результатов этого детального и кропотливого исследования потребовали публикаций в разнообразных научных (и популярных) журналах, включая самые престижные, а практика написания отчетов по проектам позволила придти к неожиданным наукометрическим выводам. Мы и раньше догадывались, что неплохо публиковать свои результаты в самых высокочитруемых журналах, например, в Nature. И по мере поступления соответствующих результатов делали это. Практика же показывает, что (по крайней мере в астрономии) такая престижная публикация сама по себе не создает особенно впечатления на научное сообщество и не приводит, в частности, к потоку ссылок. Гораздо важнее оказывается поддержка этой пилотной статьи последовательной развернутой публикацией результатов во всей линейке научных журналов по данной тематике от престижного журнала, обращенного к широкой научной аудитории,

до более локальных журналов, обращенных к кругу узких специалистов. Тогда оказывается, что и индекс цитирования специальных статей примерно такой же, как и у статьи в Nature. Как говорят футболисты — порядок бьет класс.

Конечно, не все первоначальные ожидания подтвердились в ходе исследований. Например, часто создается впечатление, что магнитное поле галактик связано не столько с галактическим диском как целым, сколько со спиральными рукавами в этом диске. В самом деле, направления магнитных векторов близки к направлению спиральных рукавов. Близки, но не совпадают. Конечно, газовые рукава искажают распределение магнитного поля, однако, как оказывается, они сами по себе его не вызывают.

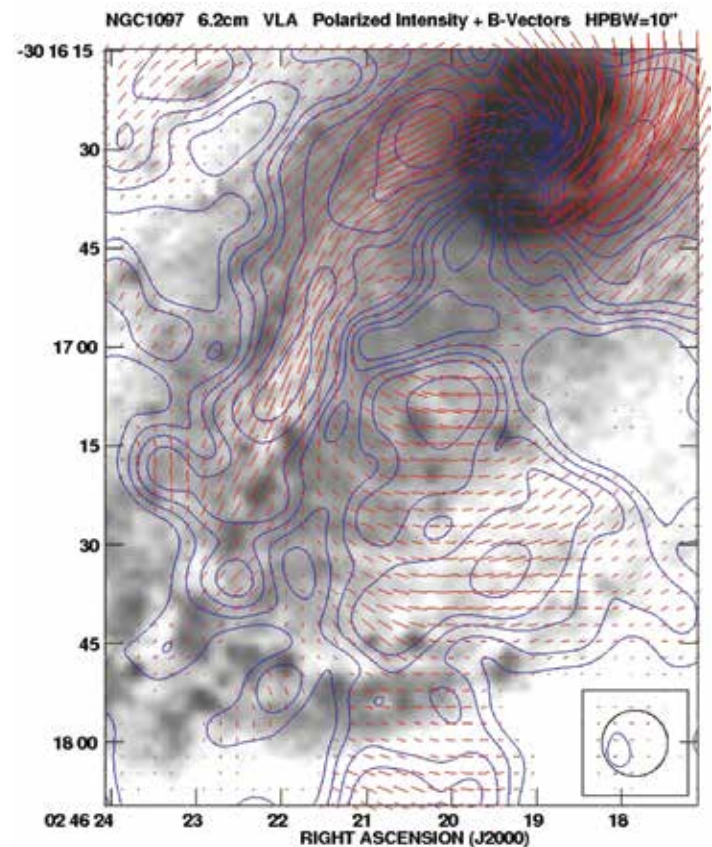


Рис. 5. Фрагмент распределения магнитного поля в галактике NGC 1097. Черточки отвечают направлениям магнитного поля, а контуры характеризуют его напряженность. Данные радионаблюдений наложены на оптическое изображение (черно-белый рисунок). Из нижнего левого в верхний правый углы рисунка идет перемычка галактики. На рисунке видно, как резко изменяется направление магнитного поля вблизи перемычки — там находится ударная волна. Вдоль магнитных линий, находящихся в центре галактики и питает находящуюся там черную дыру.

Другое заблуждение, рассеявшееся в ходе исследований, состоит в представлении, что магнитное поле галактик образовалось при закручивании первоначально однородного магнитного поля, замороженного в вещество, из которого образовалась галактика. Такое гипотетическое магнитное поле называют реликтовым. Это представление поначалу казалось очень притягательным — не нужно думать о какой-то зеркальной асимметрии и других сложностях. Однако расчеты показывают, что такое ре-

ликтное поле не выживает во вращающихся галактиках, а если бы оно каким-то чудом в выживало, то его конфигурация непохожа на наблюдаемую.

### МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В КОНТЕКСТЕ СОВРЕМЕННОСТИ

Развитие конкретной области науки далеко не всегда определяется только чисто научными соображениями. Строительство новых радиотелескопов, без которых трудно улучшать возможности наблюдений, это сложный и дорогостоящий процесс, требующий очень серьезной международной и междисциплинарной кооперации. Невозможно представить, чтобы новый мощный радиотелескоп был построен для выполнения одной научной задачи. Поэтому подготовка к наблюдениям на новом приборе занимает не один год и приводит к перестройке всей системы научных групп, занимающихся данной областью науки.

Сейчас ясно, что следующими радиотелескопами, которые будут наблюдать магнитные поля галактик, станут телескопы LOFAR и SKA. Особенность первого из них, который уже в основном построен в Голландии, состоит в том, что он состоит из основного ядра и вспомогательных станций, расположенных в различных европейских странах. Одна из этих станций находится в окрестностях Кракова, в форте времен Первой мировой войны. Поучительно присмотреться к опыту этой обсерватории Ягеллонского университета. Четверть века назад, когда я впервые увидел эту обсерваторию, в ней не было ни одного более-менее современного инструмента, не было ни денег, ни специалистов-наблюдателей, которые могут проводить современные наблюдения. Зато было четкое осознание того, что из этого сложного положения можно выйти только собственными усилиями. За прошедшие годы руководители этой группы, которыми были последовательно М. Урбаник и К. Отмянковска-Мазур, наладили тесное сотрудничество студентов-астрономов с наблюдателями из Бонна, прежде всего с уже знакомым нам Р. Беком. Эти молодые ребята выросли в опытных наблюдателей и переняли у немецких коллег многие наблюдательные проекты. Постепенно нашлись деньги для строительства станции LOFAR, тем более что технически подобная станция достаточно проста. Я хорошо помню, как еще в аспирантские годы был на подобном же радиотелескопе под Харьковом. Усилия краковских астрономов-наблюдателей были поддержаны теоретиками из Торуня. В итоге Польша вышла на лидирующие позиции в данной области, затратив на это минимальные ресурсы. Может быть, стоит поучиться?

Техническая идея, заложенная в радиотелескопе LOFAR, предполагает наблюдения на существенно более длинных волнах, чем на тех радиотелескопах, выполнивших основные имеющиеся наблюдения. Это значит, что плоскость поляризации радиоизлучения, приходящего от удаленной галактики, может много раз совершать полный оборот. Наблюдения эти полные обороты не замечают, а для восстановления магнитного поля число этих полных оборотов нужно знать. Возникает очень непростая задача расшифровки сигнала, претерпевшего многократные повороты плоскости поляризации. Эта задача трудная, но не безнадежная. Над ее решением бьются сейчас радиоастрономы многих стран. Прогресс есть, но до полной ясности еще далеко.

Для радиотелескопа SKA запланирован гораздо более широкий диапазон длин волн, который включает и короткие волны. Это — очень обнадеживающий факт. Плохо только, что строительство этого инструмента оттягивается все дальше и дальше, его разработчикам приходится экономить средства, а экономия во многом происходит за счет предполагаемого изучения магнетизма галактик. Ясно, что моему поколению уже не придется работать с данными SKA.

### ЧТО ДЕЛАЕТСЯ В ЕЩЕ БОЛЬШИХ МАСШТАБАХ

Галактики очень велики по сравнению с Землей, но по масштабам космологии это — очень маленькие объекты. Есть ли магнитные поля с еще большими пространственными масштабами, чем в галактиках?

Хорошо известно, что магнитные поля присутствуют в скоплениях галактик. Эти скопления, естественно, намного больше галактических масштабов. Однако, насколько известно сейчас, магнитные поля в них имеют примерно те же пространственные масштабы, что и галактические магнитные поля.

В мире галактик есть и образования, существенно более впечатляющие, чем спиральные галактики со своими магнитными полями. Это квазары, различные струи (джеты), вытекающие из галактических объектов и другие активные образования. Во многих из них есть или предполагается магнитное поле. Однако пока не сложились уверенные представления о магнитных полях подобных образований с масштабами, сопоставимыми с масштабами всего небесного тела. Очень хочется надеяться, что такие поля есть, а опыт изучения магнитных полей спиральных галактик окажется полезным для их изучения.

Можно ли говорить о магнитных полях еще большего, космологического пространственного масштаба? На первый взгляд кажется, что никаких надежд на существование таких магнитных полей нет — Вселенная однородна и изотропна с очень высокой степенью точности, а магнитное поле выделяло бы в ней некоторое направление, нарушая изотропию.

На самом деле в этом наивном рассуждении есть сразу два пробела, которые открывают возможность для существования космологических магнитных полей.

Во-первых, космологическое магнитное поле может быть мелкомасштабным по космологическим масштабам, но будут ли эти масштабы малыми по масштабам галактик, заранее неясно. Исследования специалистов по космологии показывают, что в ранней Вселенной действительно могут и, по-видимому, образуются магнитные поля. В самом грубом приближении логика здесь такая. Считается, что первоначально Вселенная была заполнена вакуумом, из которого по мере расширения Вселенной и падения ее температуры рождались всевозможные частицы. В рамках квантовой физики магнитное поле тоже можно трактовать как некоторые частицы. Их образование и есть образование магнитного поля.

Гораздо более сложен вопрос о том, являются ли эти магнитные поля крупномасштабными. В определенном смысле ответ положительный. Зеркальная симметрия нарушается не только во вращающейся турбулентности, но и в ядерных реакциях. Это тоже приводит к альфа-эффекту и образованию крупномасштабного магнитного поля.



Проблема лишь в том, что это поле крупномасштабно по меркам той геометрии, которая существовала во время образования этого магнитного поля. По меркам же современных галактик пространственный масштаб таких магнитных полей оказывается очень маленьким.

Ясно, что проследить, что происходит с магнитным полем, рожденным на самых ранних этапах жизни Вселенной, до настоящего времени, — очень нелегкая задача. Мнения специалистов тут расходятся, однако все-таки кажется более вероятным, что подобные космологические магнитные поля прямо не связаны с магнитными полями современных галактик. В частности, этим магнитным полям трудно пережить эпоху, когда температура Вселенной уже упала, а галактики еще не родились. В это время галактическое динамо еще не работает, а магнитное поле уже затухает в силу закона Ома — электрическое сопротивление среды уже заметное.

На другую, гораздо более экзотическую возможность обратил в свое время внимание Я.Б. Зельдович. Если однородное магнитное поле достаточно слабое, то оно мало нарушает изотропию Вселенной. Конечно, магнитное поле может быть настолько слабым, что оно не представляет никакого интереса для физических процессов в галактиках. Оказывается, что есть зазор между верхней оценкой однородного магнитного поля, который получается из изотропии Вселенной, и той нижней оценкой, которая нужна для того, чтобы это поле сохраняло свое значение для жизни галактик. Этот зазор постепенно сужается, но еще остается значительным.

До недавнего времени наука располагала лишь верхними наблюдательными оценками космологического магнитного поля, поэтому казалось, что идея Зельдовича, оставаясь очень красивой, имеет лишь чисто академический интерес. Однако несколько лет назад А. Неронов и Д.В. Семикоз привели убедительные наблюдательные аргументы о существовании космологического магнитного поля и дали нижние оценки этого магнитного поля. Получаемые таким образом оценки заметно ниже, чем напряженность магнитных полей галактик, но вполне достаточны для того, чтобы эти магнитные поля сохраняли интерес для астрофизики.

Эти оценки основаны на достаточно сложном анализе реакций элементарных частиц, происходящих в космической среде, и не позволяют судить о пространственном строении магнитного поля. Конечно, не исключено, что это магнитное поле попадает в пространство между галактиками с помощью каких-то физических процессов из самих галактик, но в целом проблема космологических магнитных полей приобрела совсем иное звучание, чем в прежние годы.

### ЗАЧЕМ ВСЕ ЭТО ЗНАТЬ?

Среди наших современников есть некоторая группа людей, для которых сами слова магнетизм галактик кажутся достаточно притягательными сами по себе для того, чтобы оправдать исследования в нашей области науки. Это можно только приветствовать — наука как область интеллектуальной деятельности людей и способ познания мира не ставит перед собой непосредственных практических целей, практические результаты получаются как побочные продукты ее деятельности. Однако все-таки

интересно узнать, есть ли какие-нибудь шансы на то, что изучение магнетизма галактик окажет какое-то воздействие на нашу повседневную жизнь.

Оказывается, что дело не так безнадежно, как можно было бы подумать. Попытки воспроизвести механизм динамо в лабораторных условиях предпринимаются начиная с 60-ых годов прошлого века. Первые опыты были проведены отечественными учеными и учеными из ГДР. В качестве проводящей среды, в которой должно действовать динамо, используются жидкие металлы, прежде всего натрий, который становится жидким при сравнительно невысоких температурах. Сейчас непросто понять, почему было принято решение проводить в Латвии. Задача оказалась очень сложной технически, но упорный труд специалистов увенчался успехом в последние недели истекшего тысячелетия — удалось получить самовозбуждающееся магнитное поле. Правда, специалисты, достигшие успеха, хотя и работали по-прежнему в окрестностях Риги, но представляли иные страны.

Примерно в это же время удалось организовать и российский экспериментальный проект по изучению динамо. Он реализуется в Перми, в Институте механики сплошных сред. В ходе этого проекта удалось, в частности, впервые в лабораторных условиях измерить альфа-эффект. Экспериментальные проекты по динамо сейчас работают в нескольких странах — во Франции, Германии, России, Латвии и США. Конечно, до технических устройств, использующих механизм динамо, еще очень далеко, однако создание экспериментальной базы по работе с потоками жидких металлов нужно и для многих технических задач. Поэтому у проекта в Перми есть и непосредственная практическая составляющая, но это уже тема другого рассказа.

Magnetic and gaseous spiral arms in M83\_  
P. Frick, R. Stepanov, R. Beck, D. Sokoloff, A. Shukurov,  
M. Ehle, and A. Lundgren *Astronomy and Astrophysics*,  
585, A21 (2016).

Beck R., Brandenburg, A., Moss, D., Shukurov, A.,  
Sokoloff, D., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 34, 1996,  
pp. 155-206.

Moss, D.; Beck, R.; Sokoloff, D.; Stepanov, R.; Krause,  
M.; Arshakian, T. G., *Astron. Astrophys.*, 556, A147,  
2013.

Moss, D.; Stepanov, R.; Arshakian, T. G.; Beck, R.;  
Krause, M.; Sokoloff, D., *Astron. Astrophys.*, Volume  
537, A68, 2012.

Beck, R.; Ehle, M.; Shoutenkov, V.; Shukurov, A.;  
Sokoloff, D., *Nature*, 397, 6717, 324-327 (1999).

Ruzmaikin A., Sokoloff D., Shukurov A. *Nature*, 336,  
1988, p. 341-347, 1988.

Beck, R., Frick P., Stepanov R., Sokoloff D., *Astron. &  
Astrophys.*, 543, A113, 2012.

Neronov, A.; Semikoz, D. V., *Phys. Rev. D*, 80, 123012,  
2009.

Соколов Д.Д.б Степанов Р.А., Фрик П.Г., УФН, 184,  
N 3, 313 -- 335, 2014

## КАЛИБРОВОЧНАЯ ТЕОРИЯ ГРАВИТАЦИИ КАК ХИГГСОВСКОГО ПОЛЯ



В.н.с., докт. ф.-мат. Г. Сарданашвили



Физики из МГУ разработали калибровочную теорию гравитации, в которой гравитационное поле эйнштейновской ОТО представляется классическим хиггсовским полем, подобно хиггсовскому вакууму в Стандартной модели элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий.

Основу большинства современных теорий элементарных частиц и объединенных моделей фундаментальных (электромагнитного, слабого и сильного) взаимодействий составляет теория Янга–Миллса калибровочных полей. В настоящее время наиболее признанной считается так называемая Стандартная модель лептонов и кварков, характеризующихся определенными группами симметрий. Она подтверждается открытием в 1983 г. так называемых промежуточных векторных бозонов с предсказанными массами (Нобелевская премия 1984 г.) и недавним, в 2012 г., обнаружением бозона Хиггса. Не поколебало пока Стандартную модель и подтверждение существования нейтринных осцилляций (Нобелевская премия 2015 г.), хотя их теория предполагает наличие массы у нейтрино, а в Стандартной модели нейтрино безмассовы.

Согласно калибровочной теории, переносчиками взаимодействий элементарных частиц (лептонов и кварков) выступают калибровочные потенциалы, общеизвестным примером которых является электромагнитное поле, описываемое уравнениями Максвелла с коммутативной группой фазовых калибровочных преобразований. Электромагнитное поле осуществляет взаимодействие заряженных частиц. Калибровочные потенциалы — переносчики слабого и сильного взаимодействия (промежуточные векторные бозоны и глюоны), описываются уравнениями Янга–Миллса, являющимися нелинейным обобщением уравнений Максвелла с некоммутативной группой калибровочных преобразований.

Калибровочная теория была предложена в 1954 г., и естественно сразу встал вопрос о включении гравитации в эту универсальную картину взаимодействий. Уже в 1956 г. появилась первая калибровочная модель гравитации Р. Утиямы. Однако построение гравитационной калибровочной теории по аналогии с теорией Янга–Миллса столкнулось с проблемой, что, во-первых, общековариантные преобразования эйнштейновской ОТО, хотя и являются калибровочными, но принципиально отличаются от калибровочных преобразований в теории Янга–Миллса, и во-вторых, эйнштейновское гравитационное поле описывается псевдоримановой метрикой, никак не похожей на электромагнитное поле и другие калибровочные потенциалы. Тем не менее, почти четверть века, до 80-х годов, калибровочная теория гравитации развивалась

преимущественно как калибровочная теория группы Пуанкаре, в которой тетрадное гравитационное поле представлялось калибровочным полем пространственно-временных трансляций. В конце 70-х годов калибровочная теория Янга–Миллса получила строгую математическую формулировку, в которой калибровочные потенциалы представляются связностями на так называемых главных расслоениях, и тогда стало математически очевидным, что гравитация — это не калибровочное поле.

Решение проблемы было предложено в 1983 году физиками-теоретиками физического факультета МГУ Дмитрием Иваненко и Геннадием Сарданашвили в статье в ведущем мировом физическом журнале *Physics Reports*, 94, 1–43 (1983). Дело в том, что в калибровочной теории со спонтанным нарушением симметрий, помимо калибровочных потенциалов, присутствуют еще хиггсовские поля. Примером служит вышеупомянутая Стандартная модель фундаментальных взаимодействий, включающая постоянный классический хиггсовский вакуум, взаимодействие с которым обуславливает наличие масс у элементарных частиц и нарушает симметрию электрослабого взаимодействия. В теории гравитации спонтанное нарушение пространственно-временных симметрий до группы Лоренца обусловлено эйнштейновским принципом эквивалентности, а его физической подоплекой является то, что все лептоны и кварки — дираковские фермионы. Соответствующим, ответственным за это нарушение симметрий, хиггсовским полем и является псевдориманово метрическое гравитационное поле.

Сотрудником кафедры теоретической физики физического факультета МГУ Геннадием Сарданашвили в рамках общей геометрической формулировки классической теории поля в формализме расслоений и многообразий струй была разработана теория классических хиггсовских полей и спонтанного нарушения симметрий, в том числе и в применении к теории гравитации. В полученной таким образом калибровочной модели гравитации, обобщающей эйнштейновскую ОТО, калибровочными симметриями являются общие ковариантные преобразования, а независимыми динамическими переменными выступают как общие линейные связности — калибровочные потенциалы, так и псевдориманова метрика — хиггсовское поле. Согласно этой модели, хиггсовский характер грави-

тации проявляется в том, что представления дираковских спиноров в присутствии разных гравитационных полей, включая операторы Дирака, не эквивалентны. Тем самым, в частности, нарушается квантовый принцип суперпозиции, и поэтому метрическое гравитационное поле, по-видимому, является принципиально классическим, не квантуемым. При этом, в отличие от хиггсовского вакуума Стандартной модели, оно динамическое (не константа) и макроскопическое.

«В перспективе разработанная нами калибровочная теория гравитации открывает возможность объединения

со Стандартной моделью фундаментальных взаимодействий, как в секторе калибровочных потенциалов, так и в секторе хиггсовских полей, претендуя на описания таких явлений как “темная энергия” и “темная материя”», — считает Геннадий Сарданашвили.

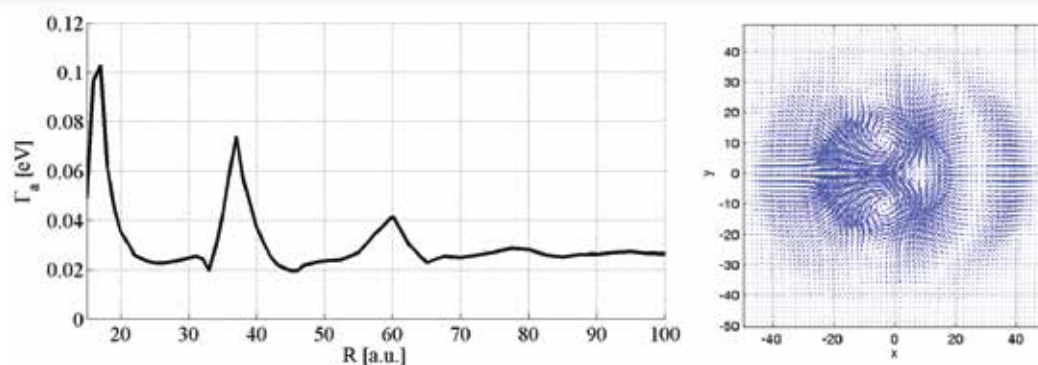
Результаты исследования опубликованы в статье: G. Sardanashvily, “Gauge gravitation theory. Gravity as a Higgs field”, *International Journal of Geometric Methods in Modern Physics*. 13, (2016) 1650086, 35 pp.

## ТРЕХМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ОБМЕНЕ МЕЖДУ АТОМНЫМИ ЧАСТИЦАМИ И НАНОСИСТЕМАМИ

Ученые физического факультета МГУ совместно с коллегами из Томского политехнического университета впервые численно промоделировали трехмерные эффекты электронного обмена при взаимодействии между атомными частицами и наносистемами. Полученные аналитические результаты важны для количественной диагностики твердых тел и наносистем с помощью ионных пучков.



Доц. И. К. Гайнуллин



Демонстрация квантово-размерного эффекта – немонотонная зависимость эффективности электронного перехода от размера наносистемы (слева) и визуализация квантовых вихрей (справа).

При помощи разработанного авторами высокоэффективного программного пакета, был численно изучен резонансный электронный обмен между отрицательным ионом и металлическими наносистемами. Было показано, что в процессе зарядового обмена, электрон последовательно занимает собственные электронные состояния наносистемы, по координатам  $z$ ,  $\rho$ ,  $\varphi$ . Электронный переход между атомной частицей и наносистемой является обратимым процессом, поэтому по прошествии определенного времени электрон туннелирует в обратном направлении (переходит на атомную частицу). Показано, что эффективность электронного обмена существенно зависит от размера наносистемы, а также от латерального положения атомной частицы (т.н. квантово-размерный и латеральный эффекты). Это значит, что конечное зарядовое

состояние атомной частицы при взаимодействии ионного пучка с поверхностью сильно зависит от траектории пучка и размера наносистем на поверхности. Также было показано, что поток электронной плотности образует квантовые вихри, что является достаточно нетривиальным результатом для рассматриваемой статической системы. В заключении были определены пределы применения широко используемого адиабатического приближения (кинетическое уравнение) для расчета зарядового обмена ионов с наносистемами.

I.K. Gainullin, M.A. Sonkin. *Physical Review A*. 92, 022710 (2015). doi:10.1103/Phys.Rev.A.92.022710.

## КОНКУРС ИМЕНИ Р.В. ХОХЛОВА НА ЛУЧШУЮ СТУДЕНЧЕСКУЮ НАУЧНУЮ РАБОТУ 2016 ГОДА

По традиции в январе каждого года на физическом факультете проводится конкурс лучших студенческих научных работ имени Р.В. Хохлова. Согласно положению, на конкурс могут выдвигаться научно-исследовательские работы студентов физического факультета: статьи, дипломные, курсовые и другие законченные работы, представляющие самостоятельные научные исследования.



Декан физического факультета Н.Н. СЫСОЕВ вручает диплом первой степени **Михаилу ГОРНОСТАЕВУ**.



Обладательница диплома первой степени, выпускница кафедры медицинской физики **Ольга ПАВЛОВА**.

В этом году кафедрами были выдвинуты 24 дипломные работы, выполненные на высоком научном уровне. Многие из них являются прекрасным заделом для будущей кандидатской диссертации. Перед жюри стоял очень непростой выбор. Высокое качество представленных на конкурс работ позволило наградить дипломами сразу 9 участников: диплома первой степени удостоено 2 человека, диплома второй – 3, диплома третьей – 4.

Дипломом первой степени и денежным призом в размере 30 000 рублей награждены выпускник кафедры астрофизики и звездной астрономии ГОРНОСТАЕВ Михаил Игоревич за работу «МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО СПЕКТРА ТРАНЗИЕНТНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ПУЛЬСАРОВ» и выпускница кафедры медицинской физики ПАВЛОВА Ольга Сергеевна за работу «Мультиядерная магнитно-резонансная визуализация ФТОРУГЛЕРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В БИОМЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ».

Дипломом второй степени и призом в размере 20 000 рублей награждены РОСНИЦКИЙ Павел Борисович (кафедра акустики), СВИРИНА Ксения Сергеевна (кафедра физики атомного ядра и квантовой теории столкновений) и ШИПИЛО Даниил Евгеньевич (кафедра ОФиВП).

Дипломом третьей степени и призом в размере 10 000 рублей награждены ГЕОРГОБИАНИ Вероника Александровна (НОЦ по нанотехнологиям МГУ), КУЗНЕЦОВ Алексей Валентинович (кафедра атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники), КУЗЬМИЧЕВ Алексей Николаевич (кафедра фотоники и физики микроволн) и ОРЛОВ Андрей Олегович (кафедра математики).

## Поздравляем

наших коллег — победителей конкурса прикладных проектов молодых ученых МГУ по направлению «НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ С УНИКАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ»:



**ЩЕРБАКОВ**  
Максим Радикович

проект «ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ  
ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ АКТИВНОЙ ФОТОНИКИ».



**ШИБАЕВ**  
Андрей Владимирович

проект «НОВЫЕ ЖИДКОСТИ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ  
НЕФТЕОТДАЧИ, СПОСОБНЫЕ РАЗРУШАТЬСЯ ПРИ  
КОНТАКТЕ С НЕФТЬЮ В ОТСУТСТВИЕ ПЕРЕМЕШИ-  
ВАНИЯ».



**ЧЕТВЕРТУХИН**  
Артем Вячеславович

проект «ДВУМЕРНЫЕ НАНОПОКРЫТИЯ С  
ЗАДАННЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ И ГИДРО-  
ФОБНЫМИ СВОЙСТВАМИ»

Указ Президента Российской Федерации № 59 от 15.02.2016  
За большой вклад в развитие науки, образования, подготовку квалифицированных  
специалистов и многолетнюю плодотворную работу



**Александр Сергеевич ИЛЮШИН** удостоен зва-  
ния «ЗАСЛУЖЕННЫЙ РАБОТНИК ВЫСШЕЙ  
ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»



**Валентин Федорович БУТУЗОВ** награжден Ме-  
далью ордена «ЗА ЗАСЛУГИ ПЕРЕД ОТЕЧЕ-  
СТВОМ» II СТЕПЕНИ»

## Поздравляем!

## КОНФЕРЕНЦИЯ «ЛОМОНОСОВ-2016»

Каждый год в начале апреля в Московском Университете проходит важное мероприятие для студентов, аспирантов и молодых ученых – конференция «Ломоносов». Конференция «Ломоносов» в Московском университете проходит 23-й раз, и с каждым годом число участников увеличивается. В этом году установлен новый рекорд секции «Физика» по количеству поданных заявок на участие – 474. Всего же на секцию «Физика» было принято 422 доклада, которые были распределены по 16 подсекциям. На подсекции «Оптика» и «Физика твердого тела» было подано самое большое количество докладов, поэтому в день проведения конференции заседания этих подсекций проходили в 6 аудиториях одновременно.

Среди участников конференции 325 представителей Москвы и Московской области, 118 участников из других городов и регионов России и 22 представителя стран СНГ и стран ближнего зарубежья. 245 студентов, аспирантов и молодых ученых физического факультета Московского университета участвовали в конференции.

Доклады участников конференции проходили на физическом факультете 14 апреля 2016 года. Открыл работу секции с приветственным словом декан физического факультета, профессор Николай Николаевич Сысов. Огромный интерес слушателей вызвала лекция ассистента Прохорова Леонида Георгиевича, посвященная открытию гравитационных волн.



В жюри подсекций вошли ведущие сотрудники физического факультета, а также молодые ученые, добившиеся значительных успехов в своей области.

- |  |  |
|--|--|
| 1. Астрофизика – I<br>Астрофизика – II   | проф. ЗАСОВ Анатолий Владимирович<br>доц. ПОТАНИН Сергей Александрович   |
| 2. Атомная и ядерная физика – I<br>Атомная и ядерная физика – II   | доц. ШИРОКОВ Евгений Вадимович<br>доц. СТЕПАНОВ Михаил Евгеньевич  |
| 3. Биофизика – I<br>Биофизика – II   | проф. ТВЕРДИСЛОВ Всеволод Александрович<br>проф. ХОМУТОВ Геннадий Борисович  |
| 4. Геофизика   | проф. МАКСИМОЧКИН Валерий Иванович   |
| 5. Математика и информатика  | проф. ЯГОЛА Анатолий Григорьевич   |
| 6. Мат. моделирование – I<br>Мат. моделирование – II   | с.н.с. ПЛОХОТНИКОВ Константин Эдуардович   |
| 7. Молекулярная физика   | проф. ЧУЛИЧКОВ Алексей Иванович  |
| 8. Нелинейная оптика – I<br>Нелинейная оптика – II   | проф. УВАРОВ Александр Викторович<br>проф. ГОРДИЕНКО Валерий Михайлович  |
| 9. Оптика – I<br>Оптика – II<br>Оптика – III   | проф. САВЕЛЬЕВ-ТРОФИМОВ Андрей Борисович<br>с.н.с. ДОЛЕНКО Татьяна Альдефонсовна   |
| 10. Медицинская физика – I<br>Медицинская физика – II  | проф. КОРОЛЕНКО Павел Васильевич   |
| 11. Радиофизика – I<br>Радиофизика – II  | проф. НАНИЙ Олег Евгеньевич<br>проф. ПИРОГОВ Юрий Андреевич  |
| 12. Сверхпроводящие и электронные свойства твердых тел   | доц. АНДРЕЕВ Валерий Георгиевич  |
| 13. Твердотельная наноэлектроника – I<br>Твердотельная наноэлектроника – II  | проф. МИТРОФАНОВ Валерий Павлович<br>доц. ХОХЛОВА Вера Александровна   |
| 14. Теоретическая физика   | проф. КУЛЬБАЧИНСКИЙ Владимир Анатольевич   |
| 15. Физика магнитных явлений – I<br>Физика магнитных явлений – II  | проф. ТИМОШЕНКО Виктор Юрьевич<br>доц. ФОРШ Павел Анатольевич  |
| 16. Физика твердого тела – I<br>Физика твердого тела – II<br>Физика твердого тела – III<br>Физика твердого тела – IV | проф. ЖУКОВСКИЙ Владимир Чеславович<br>проф. ЗУБОВ Виктор Евгеньевич<br>проф. ШАЛЫГИНА Елена Евгеньевна<br>проф. БУШУЕВ Владимир Алексеевич<br>проф. КАЗАНСКИЙ Андрей Георгиевич<br>доц. ОРЕШКО Алексей Павлович<br>доц. ОРМОНТ Михаил Александрович |



По окончании заседаний на каждой подсекции жюри выбрало лучшие доклады.

- |                                 |  |  |
|---------------------------------|--|--|
| 1. Астрофизика                  | Резаева Арина Александровна<br>Астапов Иван Иванович                                   | Физический факультет МГУ<br>НИЯУ «МИФИ»  |
| 2. Атомная и ядерная физика     | Колупаева Людмила Дмитриевна<br>Маркова Мария Леонидовна                               | Физический факультет МГУ<br>Физический факультет МГУ   |
| 3. Биофизика                    | Поспелов Никита Андреевич<br>Несмеянова Елена Сергеевна                                | Физический факультет МГУ<br>Физический факультет МГУ   |
| 4. Геофизика                    | Селин Дмитрий Игоревич   | Физический факультет МГУ   |
| 5. Математика и информатика     | Давыдов Роман Вадимович  | Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт прикладной математики и механики        |
| 6. Математическое моделирование | Сотников Ярослав Алексеевич<br>Калмыков Лев Вячеславович                               | Физический факультет МГУ<br>Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН                             |
| 7. Молекулярная физика          | Иванов Дмитрий Сергеевич   | Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики   |
| 8. Нелинейная оптика            | Швецов Сергей Александрович<br>Васильев Евгений Владимирович                           | Московский физико-технический институт<br>Физический факультет МГУ   |
| 9. Оптика                       | Попкова Анна Андреевна<br>Соколенко Богдан Валентинович<br>Ерёмин Тимофей Владимирович | Физический факультет МГУ<br>Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского<br>Физический факультет МГУ |

10. Медицинская физика	Пиоро Роман Михайлович	Физический факультет МГУ
	Соловьев Сергей Игоревич	Физический факультет МГУ
11. Радиофизика	Егоров Роман Владимирович	Физический факультет МГУ
	Бычков Антон Сергеевич	Физический факультет МГУ
12. Сверхпроводящие и электронные свойства твердых тел	Кузьмичева Татьяна Евгеньевна	Физический институт академии наук
13. Твердотельная наноэлектроника	Захаров Павел Сергеевич	Московский физико-технический институт
14. Теоретическая физика	Кондакова Анастасия Владимировна	Физический факультет МГУ
15. Физика магнитных явлений	Самухина Юлия Владимировна	Физический факультет МГУ
	Алехина Юлия Александровна	Физический факультет МГУ
	Вакуленко Антон Юрьевич	Физический факультет МГУ
16. Физика твердого тела	Панкин Илья Андреевич	Южный федеральный университет, Физический факультет
	Манджиева Юлия Борисовна	Физический факультет МГУ
	Гостева Екатерина Александровна	Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
	Антонова Ангелина Владимировна	Физический факультет МГУ



Замглавы Минпромторга посетил физический факультет Московского государственного университета, где ознакомился с последними достижениями научных групп в области создания инновационной продукции. В ходе визита обсуждались возможности внедрения разработок факультета в промышленное производство. О перспективах и о проделанной работе Георгий Каламанов говорил с деканом факультета Николаем Сыроевым.



## РЕМ ВИКТОРОВИЧ ХОХЛОВ

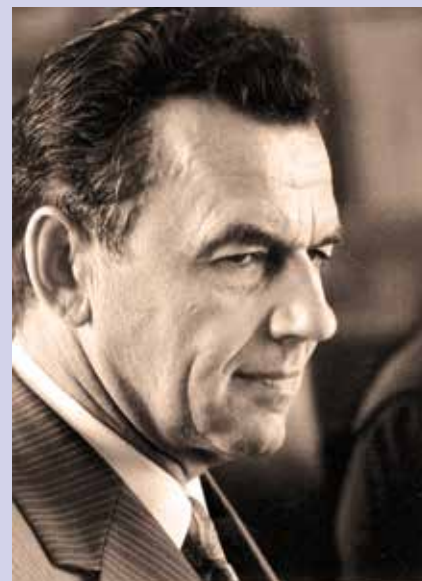
Р.В. Хохлов был пионером и первооткрывателем, дающим старт новым делам и новым людям, щедро дарящим свои идеи многочисленным ученикам. Он обладал поразительной интуицией и сверхвысоким чутьем на точки роста в науке, много работал и успевал за годы делать то, на что другим не хватало и жизни. О доброжелательности и принципиальности, искренности и порядочности, обаянии и такте Хохлова написаны статьи и книги. Он естественно проявлял эти качества и в науке, и в отношениях с людьми, везде и всегда, и на кафедре, и в ректорате МГУ.

В трудных ситуациях он не боялся брать ответственность на себя. Очень многие люди благодарны ему за то, что в тяжелые минуты их жизни, когда слово является поступком, Хохлов не молчал, хотя многие вокруг молчали. Рем Викторович Хохлов обладал феноменальной интуицией и обостренным чувством справедливости. Он мог раскопать и выделить главное среди огромного количества информации, журнальных статей, повседневных дел, бумаг, телефонных звонков. Его мысль стремительно опережала время, его рабочий день начинался очень рано, и кто знает, заканчивался ли вообще. В семь часов его видели, делающим зарядку, многим он назначал встречи и в десять, и в одиннадцать вечера. На его счету восхождения на высочайшие горные вершины. Он прекрасно водил машину, бегал, увлекался горными лыжами, плаванием, любил классическую музыку, литературу. Как и всем нам, ему приходилось ежегодно держать тяжелейший экзамен перед лицом новых молодых поколений студентов и аспирантов, приходящих в университет, в науку, и его человеческие качества позволяли из года в год с блеском выдерживать этот экзамен. Он был доступен для студентов и сотрудников университета, решал, а не откладывал вопросы, и одновременно не утратил того высочайшего профессионализма в науке, без которого творчество вообще невозможно.

Р.В. Хохлов оставил богатое научное наследие в нелинейной оптике

и акустике, квантовой электронике и лазерной физике, когерентной гамма-оптике, лазерной химии и биологии, теории нелинейных колебаний и волн. Он создал крупную научную школу по физике волновых процессов. Его ученики стали известными учеными, руководителями лабораторий, кафедр и институтов. Он подготовил более 50 докторов и кандидатов наук, многие из которых стали известными учеными и ныне сами успешно готовят научные кадры, способствуя дальнейшему развитию школы Хохлова. Тщательно вникая в детали научной работы своих сотрудников и учеников, Рем Викторович оставлял им широкое поле для самостоятельного творчества.

За двадцать пять лет активной научной работы, он сделал необыкновенно много. После окончания аспирантуры физического факультета по кафедре физики колебаний он защитил кандидатскую диссертацию, посвященную теории нестационарных явлений в волноводах. С 1954 г. Рем Викторович развивает метод поэтапного упрощения укороченных уравнений, основанный на разделении быстрых и медленных колебательных процессов, применительно к некоторым проблемам радиофизики. Эти работы составили его докторскую диссертацию, которую он с блеском защитил в 1961 г. Р.В. Хохлова привлекали проблемы распространения нелинейных волн. Для сильнодиспергирующих сред им был развит метод медленно меняющихся амплитуд, описывающий синхронное



15 июля 2016 года исполнится 75 лет со дня рождения Рема Викторовича Хохлова — выдающегося российского ученого-физика, талантливого организатора отечественной и мировой науки и высшего образования, ректора МГУ, вице-президента АН СССР, основателя и заведующего кафедрой волновых процессов. Он трагически погиб 8 августа 1977 г. после неудавшегося альпинистского восхождения на высочайшую вершину Памира.

Имя Рема Викторовича широко известно всему научному миру. Оно стало почти символом таких областей науки как нелинейная оптика, нелинейная акустика, лазерная физика. Его идеи, методы и научные разработки стали настолько классическими и настолько прочно вошли в наш научный обиход, что кажутся совершенно обыденными и существовавшими всегда.



1959 г. Е.М. Дубинина и Р.В. Хохлов — перед полетом на стажировку в Стенфордский университет

взаимодействие небольшого числа гармонических волн. При слабой дисперсии, когда число взаимодействующих спектральных компонент весьма велико, он предложил элегантный метод медленно меняющегося профиля волны.

Рем Викторович отчетливо понимал, что разнообразные нелинейные волновые явления в полной мере могут проявиться и в оптике. В 1962 г. вместе с С.А. Ахмановым он организует на физическом факультете МГУ первую в СССР Лабораторию нелинейной оптики, которая собрала молодых талантливых экспериментаторов и теоретиков. Объединение усилий радиофизиков и оптиков привело к выдающимся результатам уже в первые годы ее работы. В 1962 г. Р.В. Хохлов и С.А. Ахманов впервые предложили схемы параметрических усилителей и генераторов света с плавно перестраиваемой частотой. В этом же году вместе с А.И. Ковригиным была получена синхронная генерация второй оптической гармоники, а позднее созданы мощные генераторы высших оптических гармоник (со 2-й по 5-ю). В большом цикле теоретических работ, выполненных под руководством Р.В. Хохлова, были установлены основные особенности генерации гармоник, разностных и суммарных частот, параметрического усиления при разных уровнях начальных интенсивностей с учетом фазовой расстройки. Р.В. Хохловым совместно с В.Т. Платоненко впервые разработана классическая теория вынужденного комбинационного рассеяния.

Подытоживая выполненные исследования, Р. В. Хохлов и С. А. Ахманов опубликовали в 1964 г. первую в мировой литературе монографию «Проблемы нелинейной оптики». Эта книга способствовала быстрому развитию исследований по нелинейной оптике в СССР. Лаборатория нелинейной оптики завоевала мировое признание и в 1965 г. на ее базе была организована кафедра волновых процессов. Это позволило значительно расширить круг изучаемых проблем. Научные семинары кафедры, проводимые под неизменным председательством Р.В. Хохлова, стали местом обсуждения всех новых работ. На них приглашались сотрудники из разных лабораторий и институтов.



Зав. каф. волновых процессов проф. Р.В. Хохлов принимает у завпрактикумом лазерной физики и нелинейной оптики ассистента В.В. Фадеева отчет о запуске практикума. 1965/1966 учебный год.

В 1965 г. Р.В. Хохлов, С.А. Ахманов, А.И. Ковригин, В.В. Фадеев и А.С. Пискаркас экспериментально реализовали параметрический генератор света, в котором вторая гармоника неодимового лазера преобразовывалась в перестраиваемое по частоте инфракрасное излучение. Р.В. Хохлов вместе с А.П. Сухоруковым вел интенсивные работы по развитию математического аппарата нелинейной оптики применительно к реальным лазерным пучкам и импульсам. Ими были получены уравнения, учитывающие дифракцию взаимодействующих пучков, которые составляют в настоящее время основу квазиоптики диспергирующих анизотропных нелинейных сред. Разработанный подход был использован, в частности, для изучения самовоздействия и взаимодействия мощных световых пучков и импульсов. Полученные результаты позволили сформулировать принцип оптимальной фокусировки в удвоителях частоты, понять явление дифракционной некогерентности, предсказать трехволновую взаимофокусировку и параметрически связанные солитоны на квадратичной нелинейности.



Хохловым и Сухоруковым и их учениками был предложен удивительно ясный новый подход к описанию лазерного просветления облачной среды на основе введения водности, изменяющейся при лазерно-индуцированном испарении жидких аэрозолей. Совместно с Д.П. Криндачем были выполнены первые эксперименты по тепловой самофокусировке непрерывного лазерного излучения в нелинейных жидкостях.

В 1967 г. С.А. Ахманов, А.П. Сухоруков и Р.В. Хохлов опубликовали в УФН обзор по нелинейной дифракции и самофокусировке, занявший одно из первых мест по индексу цитирования. Разработанный ими универсальный метод безабберационного описания самофокусировки вошел в учебники и монографии. Циклу практически важных исследований по визуализации инфракрасных волн положила начало работа Р.В. Хохлова «Инфракрасная голография методами нелинейной оптики», выполненная совместно с Э.С. Ворониным, В.С. Соломатиним и Ю.А. Ильинским.



Р.В. Хохлов, А.С. Ахманов. Конец 60-х гг.

Р.В. Хохловым совместно с Ю.А. Ильинским были начаты исследования по когерентной гамма-оптике. Ими выявлены новые возможности создания гамма-лазеров на долгоживущих изомерах. Эти работы стимулировали исследования в нашей стране и за рубежом и заложили основы нового перспективного направления. В серии работ, выполненных на заре его научной деятельности, Р.В. Хохлов показал, что круг проблем нелинейной теории колебаний, которые удастся эффективно проанализировать, может быть существенно расширен при использовании предложенного им метода вторичного упрощения укороченных уравнений. Этим методом Р.В. Хохлов решил ряд важных задач синхронизации автогенераторов, продвинул вперед нелинейную теорию электронных приборов СВЧ, квантовых генераторов, параметрических усилителей бегущей волны.

В работах 1960–1970 гг., начатых вместе с С.И. Солуяном и продолженных совместно с О.В. Руденко, А.С. Чиркиным, Е.А. Заболоцкой, был фактически развит математический аппарат современной нелинейной акустики. Были выведены и проанализированы ставшие теперь классическими уравнения для плоских, сферических и цилиндрических волн конечной амплитуды, распространяющихся в диссипативных и диспергирующих средах, получен ряд важных физических результатов. Р.В. Хохловым с соавторами предложен ряд конкретных схем параметрических усилителей ультразвука.

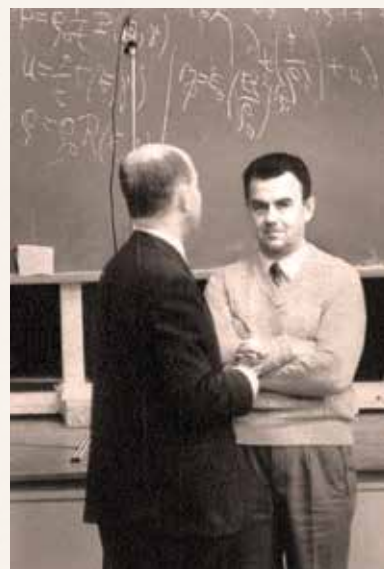
Подходы, использованные в оптике при описании самовоздействия лазерных пучков, были нетривиальным образом обобщены на задачи нелинейной акустики. Полученное уравнение для акустических пучков (называемое теперь уравнением Хохлова-Заболотской) оказалось плодотворным инструментом для решения широкого круга практически важных проблем, в том числе развития теории параметрических гидролокаторов.

Научная школа Хохлова — это не только сообщество многих ученых, успешно работающих в научных центрах всего мира и прошедших в свое время обучение на созданной им кафедре волновых процессов, а затем и на кафедрах общей физики и волновых процессов и квантовой электроники. К ней с гордостью относят себя и те, кто испытал влияние Рема Викторовича в личном общении, на научных семинарах его кафедры, на организованных

им знаменитых конференциях по когерентной и нелинейной оптике. Научная школа Хохлова — это еще и особый дух общения, заданный его безупречной научной этикой, неподдельным дружелюбием, готовностью выслушать и понять. Подлинно научная и доброжелательная атмосфера всегда сопровождала Р.В. Хохлова и пронизывала всю его деятельность.

За свои выдающиеся научные достижения Р.В. Хохлов был удостоен Ленинской, Государственной и Ломоносовской премий, орденов Ленина и Трудового Красного Знамени, академических званий. Сильнейшее влияние Рема Викторовича на отечественную и мировую науку ощущается и в наши дни, несмотря на то, что с момента его кончины прошло почти сорок лет. Научные направления, родоначальником которых был Р.В. Хохлов, сегодня интенсивно развиваются в трудах вот уже нескольких поколений его учеников и коллег.

По его инициативе в нашей стране с 1965 г. стали проводиться симпозиумы, а затем конференции по когерентной и нелинейной оптике. Все, кто участвовал в их работе, хорошо помнят его блестящие обзорные доклады о последних достижениях и тенденциях в нелиней-



Р.В. Хохлов после своей лекции по гамма-лазерам на Школе по нелинейным волнам (г. Горький, 1975 г.) Беседует с Г.И. Баренблаттом.

ной оптике и лазерной физике. В 2013 году конференция ICONO/LAT, именно так она сейчас называется, состоялась в Москве и собрала более тысячи участников. Очередная конференция ICONO/LAT состоится в сентябре этого года в Минске. В ее организации активно участвует Московский университет.

Памятником Р.В. Хохлову является Корпус нелинейной оптики, названный его именем. Более тридцати пяти лет каждый день в его вестибюль входят десятки студентов, преподавателей и научных сотрудников, инженеров, а иногда и иностранные гости, а также правительственные чины. В корпусе нелинейной оптики находится кафедра общей физики и волновых процессов. Именно так называется теперь созданная Хохловым кафедра после ее объединения в 1978 году с кафедрой общей физики

для мехмата, руководимой Сергеем Александровичем Ахмановым. В корпусе нелинейной оптики находится и созданная при этом объединении кафедра квантовой радиофизики (ныне квантовой электроники). Обе кафедры связывают не только общие родители и научные интересы, но и многолетняя искренняя дружба и научное соревнование.



Корпус нелинейной оптики, 2016 г.

Рем Викторович мечтал об институте нелинейной оптики. Международный лазерный центр МГУ, конечно не институт, о котором мечтал Хохлов. Но эта маленькая организация вот уже более двадцати пяти лет успешно работает и ее научные результаты известны в мире.

Пятидесятилетие образования кафедры в 2015 г. и девяностолетие одного из ее основателей, академика Р.В. Хохлова, в 2016 г. вызвало желание у помнящих то время сотрудников кафедры, ее выпускников и друзей поделиться воспоминаниями о тех далеких годах, о людях, оставивших значительный след в ее истории, попытаться сформулировать те научные результаты, которыми могут гордиться те, кто относит себя к научной школе Р.В. Хохлова–С.А. Ахманова. Появилась идея издать их в виде книги (ее pdf файл размещен на сайте физического факультета). Статьи в книге очень разные: от попытки в академическом стиле написать историю кафедры, до рассказа о нескольких встречах с людьми, сильно повлиявшими на судьбу автора. Затронутые в них темы, отражают самое дорогое, что сохранилось в памяти авторов. Поэтому редактирование ограничивалось ректорской правкой.

В течении 50 лет на созданной Р.В. Хохловым кафедре работали и работают люди, ставшие лауреатами различных премий. Это Лауреаты Сталинской пре-

мии В.С. Фурсов (1949, 1951, 1952) и С.П. Стрелков (1960); Лауреаты Ленинской премии Р.В. Хохлов (1970), С.А. Ахманов, Л.В. Келдыш (1974), А.П. Сухоруков (1966); Лауреаты Государственной премии СССР А.П. Сухоруков (1966), Э.С. Воронин (1975), Ю.А. Ильинский (1975), В.С. Соломатин (1975), Д.Н. Клышко (1983), А.Н. Пенин (1983), В.В. Фадеев (1983), А.И. Ковригин (1984), В.П. Кандидов (1985), О.В. Руденко (1985), Р.В. Хохлов (1985) Р.Л. Стратонович (1988), В.К. Новик (1989), Ю.Л. Климонтович (1991); Лауреаты Государственной премии РФ Р.Л. Стратонович (1996), О.В. Руденко (1997), А.С. Чиркин (1997), О.А. Акципетров (2002); Лауреаты Премии Президента Российской Федерации в области образования Л.В. Келдыш (2003), В.А. Макаров (2003); Лауреаты Ломоносовской премии С.А. Ахманов (1964), Л.В. Келдыш (1964), Р.В. Хохлов (1964), Р.Л. Стратонович (1984), А.А. Карабутов (1991), О.В. Руденко (1991), О.А. Сапожников (1991), Н.И. Коротеев (1996), В.П. Кандидов (1997), А.С. Чиркин (1997), В.А. Алешкевич (1997), В.И. Емельянов (1998), В.А. Макаров (2006), А.П. Сухоруков (2006).

Лауреаты «молодежных премий», воспитанники кафедры, стали известными учеными. Это Лауреаты премии Ленинского комсомола и Государственной премии РФ для молодых ученых А.В. Андреев (1983), С.М. Гладков (1984), Задков (1984), Карабутов (1984), И.Л. Шумай (1984), В.Э. Гусев (1987), С.А. Шленов (1987), О.А. Акципетров (1988), С.В. Говорков (1988), А.М. Желтиков (1997), А.Б. Федотов (1997).

Р.В. Хохлов рано ушел из жизни: ему был всего 51 год, когда трагическое стечение обстоятельств во время восхождения на одну из высочайших вершин Памира привело к его безвременной кончине. Его имя навечно вписано в историю Московского университета. Он оставил после себя огромное наследие, как ученый, как педагог, как личность, как мужчина. Если бы он был жив, он мог бы гордиться своими учениками, продолжающими его дело, своими детьми, имена которых широко известны в научном сообществе. Вся его короткая жизнь, была отдана Московскому университету.

Один из учеников Р.В. Хохлова В. Канер писал:

И долго будет трудно нам местами  
 Менять его на сделанное им...  
 Мы жизнь его истории оставим,  
 А для себя улыбку сохраним,  
 Портреты на девятом и на пятом  
 Рассказы и преданья — на других  
 Пойдут, как звуки горестной сонаты, —  
 Его очарования круги...  
 И в час, когда рассвет над шпилем зыбко  
 Встает, и отступает тихо мгла —  
 В сердцах — его прощальная улыбка  
 В мечтах — незавершенные дела.

Проф. В.А. Макаров



## ЦЕНТР МОЛОДЕЖНОГО ИННОВАЦИОННОГО ТВОРЧЕСТВА «НАНОТЕХНОЛОГИИ» ФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ

Выпускникам школ, пришедшим приемную комиссию факультета, задают вопрос о том, каковы же причины поступать именно на физический факультет. Ведь выбор достаточно широкий – это мог бы быть и МФТИ и МИФИ. Да и целый ряд других вузов за последние годы открыли у себя современные физические программы. Мы чаще всего имеем дело с абитуриентами, имеющими приличную подготовку и по физике и по математике. Поэтому есть выбор и в другой плоскости – Мехмат, ВМК или Физфак. Среди причин, «склонивших чашу весов» в пользу физического факультета, можно услышать, например, «слушал интересную лекцию по биофизике» или «нам показывали

красивые опыты с лазером», а в последние годы также – «выполнил практикум на физическом факультете» или «посещал занятия по численному моделированию физических процессов».

Но, пожалуй, самым привлекательным для школьников, судя по их ответам, нужно считать занятия в Центре молодежного инновационного творчества «Нанотехнологии» – в ЦМИТе и, главным образом, потому, что здесь школьники получают навыки работы на самой современной аппаратуре – 3D принтерах, 3D сканерах, обрабатывающих центрах с числовым программным обеспечением, сканирующих зондовых микроскопах.



Рис. 1. Ольга Синицына рассказывает о нанотехнологиях

Последние, кстати, созданы при непосредственном участии физического факультета МГУ. Об этом немного подробнее. За изобретение первого сканирующего зондового микроскопа – сканирующего туннельного микроскопа – в 1986 году была вручена нобелевская премия по физике Г.Биннигу и Х. Рореру. Эта премия вручена не за новый закон или новое открытие, а за изобретение. В английском тексте формулировка награды звучит дословно так «for their design of the scanning tunneling microscope». Другими словами можно сказать, что пре-

мия по физике была вручена по физике за инженерную разработку. Да, именно так. И туннельный эффект, и острые зонды с одним атомом в вершине, и точные перемещения на нанометры – многое было известно заранее. Но не было главного – микроскопа, демонстрирующего атомную решетку на поверхности вещества. В этой нобелевской работе соединились воедино глубокое понимание физики и инженерный талант – те качества, которые оказались необходимы для создания нового уникального прибора и для наблюдения атомов и молекул на



Рис. 2. Учащиеся ЦМИТ «Нанотехнологии» занимаются подготовкой работ к конкурсу

поверхности материалов с помощью металлической иглы и туннельного эффекта. Можно утверждать, что 1986 год ознаменовал новое явление, когда чрезвычайно сложные приборы успешно могут создавать люди, которые в одном лице являются учеными, физиками и инженерами. В этом случае традиционное деление на ученых и инжене-

ров пропадает, и работа становится во многом эффективнее. Таким же образом был создан и первый в России сканирующий туннельный микроскоп в группе профессора Панова В. И. на физическом факультете МГУ. Глубокая физическая эрудиция и инженерный талант, здесь дали блестящий результат.



Рис. 3. Профессор МГУ имени М.В.Ломоносова Яминский И.В. награждает победителей конкурса ЦМИТ «Нанотехнологии»

В создании туннельного микроскопа воплотился важнейший принцип - каждый раз, там, где физика и инженерная наука идут рядом, следует ждать серьезных достижений. Именно в этом направлении творческая молодежь – школьники, студенты и аспиранты получают практические навыки в ЦМИТе на физическом факультете. Важную роль в обучении играет освоение на практике программных пакетов по электронному моделированию – SolidWorks, СпрутКам, Компас. Их умелое использование позволяет учащимся ЦМИТа изготовить электронную модель детали или изделия. С помощью модели про-

водится проверка на работоспособность, оптимизация конструкции и внешнего вида, анализируется распределение механических напряжений под нагрузкой, определяются резонансные частоты, то есть учащиеся делают многое из того, что позволяет исключить возможные недостатки реального изделия. Однако, учащиеся ЦМИТа не ограничиваются изготовлением электронной модели, а уже на третьем занятии могут переходить к созданию самого изделия. Для изготовления деталей из пластмассы они используют 3D принтер. Для работы с деревом или металлами имеется коактный обрабатывающий центр.



Рис. 4. Проф. Яминский И.В. ведет занятия «3d принтеры, 3d микроскопы и 3d-технологии производства» в ЦМИТ «Нанотехнологии»

Главный лейтмотив всех занятий в ЦМИТ – это реализация самого быстрого и кратчайшего пути от физической идеи к готовой инженерной разработке. Если программа занятий пройдена, свое изделие учащиеся могут продемонстрировать друзьям и знакомым, как воплощенный в дереве, пластмассе или металле собственный творческий замысел.

В ЦМИТе «Нанотехнологии» сейчас проводится обучение по следующим направлениям: сканирующая зондовая микроскопия; 3D моделирование в системе автоматического проектирования Solid Works; основы механообработки на цифровых обрабатывающих центрах; 3D принтер; 3D сканер.

Подробная информация о курсах расположена на сайте ЦМИТа – [www.startinnovation.com](http://www.startinnovation.com)

А.И. Федосеев, И.В. Яминский



Рис. 5. Ассель Ахметова на выставке «Открытые инновации». Стенд ЦМИТ «Нанотехнологии», октябрь 2015 г.



Рис. 6. Записываем новых участников в ЦМИТ «Нанотехнологии» на выставке «Открытые инновации», октябрь 2015.



Бюллетень «НОВОСТИ НАУКИ»  
© 2016 Физический факультет МГУ

Под ред. Н.Н. Сысоева, В.Н. Задкова,  
А.А. Федянина, Н.Б. Барановой

Дизайн и верстка: И.А. Силантьева

Фотограф С.А. Савкин

Подписано в печать 27.01.16 Тираж 400 экз.

Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова,  
119991, Москва ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии «ООО Флайт-арт»

ISSN 2500-2392