

Важнейшие достижения Института ядерной физики им.Г.И. Будкера СО РАН за 2004 год

В 2004 году Институт выполнял работы по 14 проектам в рамках фундаментальных исследований, по 4 проектам в рамках ориентированных и прикладных работ, выполнял интеграционные проекты РАН и СО РАН, участвовал в международном научном сотрудничестве, производил высокотехнологические элементы экспериментального оборудования для своих строящихся установок и по контрактам для российских и зарубежных лабораторий. Кроме того, в Институте велись работы по проектам РФФИ (33 проекта) и ряду других проектов, поддерживаемых различными российскими и международными фондами.

Ниже приведены наиболее важные результаты научных исследований за 2004 год.

1. Наблюдение прямого нарушения CP - чётности в распадах В мезонов.

В составе двух крупных международных коллабораций (BaBar и BELLE) получены фундаментальные экспериментальные результаты по несохранению комбинированной чётности (CP-чётности) в распадах В-мезонов.

Нарушение CP-симметрии в слабых распадах является интереснейшим и важным физическим явлением. Оно связано с возникновением наблюдаемой во Вселенной асимметрией между материей и антиматерией, проявляющейся в почти полном отсутствии последней.

До 2001 года распад нейтральных каонов был единственным наблюдаемым проявлением нарушения CP-симметрии. Для исследования этого эффекта в распадах В-мезонов в Национальной лаборатории по физике высоких энергий КЕК (Япония) и в ускорительном центре SLAC (США) были построены весьма дорогие специализированные e^+e^- -коллайдеры с чрезвычайно высокой светимостью (так называемые В-фабрики) КЕКВ и PEP-2. С 1999 года на этих коллайдерах идут эксперименты с детекторами Belle и BaBar, созданными коллективами физиков десятков институтов из разных стран, в том числе коллективом ИЯФ СО РАН. Начиная с 1994 года две команды физиков ИЯФ (примерно по 15 человек), работающие в этих экспериментах, внесли существенный вклад в разработку и создание детекторов Belle и BaBar и сейчас участвуют в проведении экспериментов и получении физических результатов.

В течение четырёх с половиной лет детекторы Belle и BaBar ведут набор экспериментальных данных. На конец 2004 г. года на каждой из установок был записан интеграл светимости около 300 фбн^{-1} , что соответствует около 350 миллионам пар В-мезонов. Такой объём экспериментальных данных позволяет изучать редкие распады В-мезонов и измерять параметры CP-нарушения.

Используя эти данные впервые удалось наблюдать прямое нарушение CP-симметрии в слабых распадах В-мезонов на заряженные каон и пион. Прямое нарушение CP-симметрии проявляется в различии вероятностей распада В-мезона в определённое конечное состояние ($K^+ \pi^-$) и анти-В-мезона в зарядово-сопряжённое конечное состояние ($K^- \pi^+$) и характеризуется асимметрией:

$$A_{CP} = \frac{\Gamma(\tilde{B}^0 \rightarrow K^- \pi^+) - \Gamma(B^0 \rightarrow K^+ \pi^-)}{\Gamma(\tilde{B}^0 \rightarrow K^- \pi^+) + \Gamma(B^0 \rightarrow K^+ \pi^-)}$$

По объединенным результатам экспериментов обоих комплексов измеренная величина асимметрии составила $A_{CP} = -0.114 \pm 0.020$. Этот результат является важным подтверждением существующих на сегодня представлений о механизме CP- нарушения в слабых взаимодействиях.

2. Эксперименты с детектором КЕДР в 2004 году

С 2002 г. в ИЯФ СО РАН им.Г.И. Будкера ведутся эксперименты с детектором КЕДР на ускорителе-накопителе со встречными электрон-позитронными пучками ВЭПП-4М. Область энергий эксперимента - от 2 до 12 ГэВ в системе центра масс. Основная цель экспериментов - это изучение физики тяжёлых с-, а также, в дальнейшем, и b-кварков в распадах состоящих из них частиц. ИЯФ СО РАН - один из 5 центров физики высоких энергий в мире и единственный в России, где проводятся такие экспериментальные исследования.

Детектор КЕДР - это самый большой и современный детектор в России, имеющий параметры, сравнимые с параметрами детекторов, работающих в других экспериментах на $e^+ e^-$ - коллайдерах. Он включает в себя вершинный детектор, дрейфовую камеру, сцинтилляционные счётчики, LKг калориметр, CsI калориметр, аэрогелевые черенковские счётчики, мюонные камеры. В 2004-м году в основном закончилось его создание: с начала года заработал электромагнитный калориметр, содержащий 27 тонн жидкого криптона, в сверхпроводящей катушке детектора (диаметр 3.3 м, длина 3.5 м) получено магнитное поле 6 кГс, при котором проводится набор статистики. Запущено в эксплуатацию криогенное оборудование детектора и получено проектное значение расхода жидкого гелия 25 литров в час (без криогенной системы детектора было бы 400 литров в час).

В настоящее время детектор КЕДР работает практически в полном объёме (кроме аэрогелевых черенковских счётчиков - пока имеется один слой из двух). Ведётся набор статистики и её обработка.

В 2004 году основная статистика событий была набрана в области Ψ' (3770) и Ψ'' -резонансов. Набран заметный интеграл светимости и проведены многократные калибровки энергии. Это позволило провести измерение Ψ' и Ψ'' -мезонов с рекордной точностью. Достигнутая относительная точность измерения составляет 3.5 ppm для Ψ' -мезона. Необходимо напомнить, что предыдущее измерение массы Ψ' -мезонов было также проведено в ИЯФ в 1980 году на накопителе ВЭПП-4М с детектором ОЛЯ. Достигнутая точность измерения массы в нашем эксперименте в десять раз лучше точности предыдущего эксперимента и превосходит среднемировую в четыре раза:

$$M(\Psi') = (3686.114 \pm 0.010 \pm 0.011) \text{ МэВ}$$

Получен предварительный результат по массе Ψ'' -мезона

$$M(\Psi'') = (3773.3 \pm 1.2 \pm 2.0) \text{ МэВ}, \text{ который имеет точность на уровне среднемировой}$$

Ведется обработка данных эксперимента по измерению масс заряженного и нейтрального D-мезонов. Ожидаемая точность измерения в 2-3 раза превосходит среднемировое значение.

Успешное завершение этого эксперимента открывает нам путь к более сложному эксперименту по прецизионному измерению массы tau-лептона. Точное знание массы tau-лептона позволит проверить одно из допущений Стандартной модели - принцип лептонной универсальности, провозглашающий равенство констант взаимодействия W-бозона со всеми поколениями лептонов. Проведение этого эксперимента планируется в сезоне 2005 года.

3. Результаты с детектора КМД-2

В 2004 году продолжалась обработка данных, набранных с детектором КМД-2 на коллайдере ВЭПП-2М. Измерено сечение рождения четырех заряженных пионов в области энергий от 1040 МэВ до максимальной энергии ВЭПП-2М в системе центра масс. В этой области энергий этот процесс является доминирующим, и прецизионное измерение сечения данного процесса позволит повысить точность вычисления адронного вклада в поляризацию вакуума при измерении аномального магнитного момента мюона. Результаты изучения этого процесса также могут быть использованы для проверки гипотезы сохранения векторного тока при сравнении полученных данных с данными по распадам τ -лептона. Кроме того, точное измерение сечения процесса рождения четырех заряженных пионов важно для исследования возбужденных состояний легких векторных мезонов и поиска новых типов частиц, состоящих из кварков и глюонов, так называемых "гибридов".

Выполнено измерение сечения процессов с тремя фотонами в конечном состоянии в области энергий от 600 до 1380 МэВ в системе центра масс. В результате получены значения относительных вероятностей распадов $\rho \rightarrow \eta\gamma$, $\omega \rightarrow \eta\gamma$, $\phi \rightarrow \eta\gamma$, $\rho \rightarrow \pi^0\gamma$, $\omega \rightarrow \pi^0\gamma$, $\phi \rightarrow \pi^0\gamma$. Данное исследование является важным для проверки ряда теоретических моделей, в частности нерелятивистской кварковой модели и Модели Доминантности Векторных Мезонов.

4. Комплекс работ по радикальному улучшению производительности коллайдеров ВЭПП -2000 (создаваемого на основе работавшего 25 лет ВЭПП-2) и ВЭПП-4:

- а) Инжекционный комплекс ВЭПП-5 как инжектор позитронов для ВЭПП-2000 и ВЭПП-4

В 2004 году был проведен монтаж и начаты испытания штатной позитронной системы Инжекционного комплекса. В ходе проведённых испытаний была достигнута проектная производительность позитронной системы ($2 \cdot 10^{10}$ позитронов в секунду). Нужно отметить, что созданная система имеет рекордную эффективность сбора позитронов. Данный результат был получен благодаря использованию нового технического решения для импульсного магнита с большим полем, который позволяет эффективно собирать выходящие из конверсионной мишени позитроны. Этот магнит имеет рекордное значение максимального магнитного поля (10 Т) при требуемом высоком качестве последнего.

В 2004 году были завершены монтажные работы на ВЧ системе накопителя-охладителя, закончено сооружение высоковольтного выпрямителя, питающего мощный непрерывный клистрон (рабочая частота – 700 МГц). В декабре 2004 года завершается

наладка высоковольтного питания клистрона накопителя-охладителя, а так же системы блокировок и защит.

В 2004 году продолжились работы по изготовлению ускоряющих структур и нагрузок третьего ускоряющего модуля. На конец 2004 года изготовлены две ускоряющие структуры (из четырёх, образующих ускоряющий модуль), развёрнуто производство нагрузок. В ускорительном зале ведётся монтаж и наладка системы умножения мощности третьего ускоряющего модуля. Клистронная станция третьего ускоряющего модуля испытана и готова к работе.

б) ВЭПП-2000 и детекторы СНД и КМД-3

В 2004 году в основном закончен монтаж магнитной и, частично, вакуумной систем накопителя ВЭПП-2000. Закончено изготовление высокочастотного генератора на 172.099 МГц мощностью 50 КВт и одномодового ускоряющего резонатора и проведены их холодные испытания. Закончен монтаж трансформаторной подстанции и двух мощных выпрямителей токов для питания основных магнитов накопителя ВЭПП-2000 и бустера БЭП. В экспериментальном производстве Института заканчивается изготовление канала транспортировки пучков от БЭП к ВЭПП-2000.

В 2004 году продолжены работы по разработке и созданию систем детектора КМД-3 для экспериментов на коллайдере ВЭПП-2000. Проведена серия заходов с электромагнитным калориметром на основе LXe с использованием космических частиц, в результате которых было измерено разрешение калориметра. После этого LXe калориметр в сборе был перевезен в зал накопителя ВЭПП-2000, где в настоящее время подготавливается к очередной серии испытаний. Закончено изготовление блоков кристаллов германата висмута торцевого калориметра. Полным ходом идут работы по подготовке кристаллов CsI цилиндрической части калориметра. Изготавливается сверхпроводящий соленоид детектора. Изготовлена и испытана гелиевая емкость сверхпроводящего соленоида. Изготовлены детали криогенной системы соленоида. Проведены испытания сверхпроводящего трансформатора для питания соленоида.

Трековая система (ТС) детектора СНД для продолжения экспериментов на ВЭПП-2000 создается заново. Основными задачами системы являются «трекинг», распознавание событий, идентификация частиц по ионизационным потерям, отбраковка фона и другие. Был создан прототип ТС – ¼ полномасштабного варианта. Получены значения пространственной точности трековой системы, согласующиеся с ожидаемыми значениями. Наибольший прогресс за прошедший период достигнут в калориметре СНД, который был собран, установлен на ВЭПП-2000 и подключен к формирующей электронике. В ближайшее время начнутся эксперименты по считыванию космических событий и записи на диск в выбранном для СНД формате.

5. Работы на лазере на свободных электронах (ЛСЭ)

Новосибирский ЛСЭ является самым мощным (по средней мощности) в мире источником субмиллиметрового (терагерцового) монохроматического излучения. Это позволяет надеяться, что с его помощью можно проводить уникальные исследования по физике, химии, биологии и др. отраслям науки

В 2004 г. смонтирован канал вывода излучения, и полученная мощность выведенного излучения достигла 350 Вт. Проведены первые качественные эксперименты рядом пользователей. Для них проектируются специализированные экспериментальные станции.

Полномасштабный ЛСЭ (т. н. вторая очередь) будет установлен на четырехдорожечном ускорителе-рекуператоре. В 2004 г. закончилось его проектирование и начинается производство узлов и деталей.

6. Работа Сибирского центра синхротронного излучения

Сибирский международный центр синхротронного излучения функционирует на базе лабораторий Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН и имеющихся источников синхротронного излучения - накопителей ВЭПП-3 и ВЭПП-4М. Центр создан в качестве структурного подразделения Института и имеет статус открытой лаборатории, в деятельности которой принимают участие российские и зарубежные организации. Работы, проводимые в Сибирском центре СИ, носят коллективный характер и перекрывают широкий спектр научных и технологических задач.

В 2004 г. работы на пучках СИ были сосредоточены на накопителе ВЭПП-3. В экспериментах на ВЭПП-3 были задействованы 10 станций из 12, расположенных на 9 каналах вывода СИ. Работы на пучках СИ на ВЭПП-4М в 2004 г. временно не проводились в связи с проведением эксперимента по физике высоких энергий на низкой (1.5 ГэВ) энергии, однако на ВЭПП-4 продолжена большая работа по завершению строительства и оборудования нового бункера СИ, рассчитанного на 14 экспериментальных станций, лабораторных помещений вокруг него, созданию каналов вывода СИ и собственно экспериментальных станций.

В настоящее время во всех видах сотрудничества участвуют 54 российских и 34 зарубежных организаций. Непосредственно в проведении исследований на пучках СИ в 2004 году приняли участие 30 российских (из них 14 институтов СО РАН) и 16 зарубежных организаций. Наиболее интересные научные результаты представлены ниже.

Исследование процесса взрыва и поведения вещества под действием детонационной ударной волны с помощью СИ:

Метод был предложен и разработан в сотрудничестве ИГиЛ СО РАН, ИХТТМ СО РАН и ИЯФ СО РАН. Первые исследования процессов в веществе в экстремальных условиях, вызванных воздействием ударных и детонационных волн были проведены на макете экспериментальной установки на ВЭПП-3 в 1999-2002 годах с временным разрешением, равным интервалу между банчами в VEPP-3 (124 или 248 нс). В 2004 году были начаты работы на новой станции "Взрыв" с увеличенной массой заряда до 50 г. Специально для этой станции в ИЯФ был разработан быстродействующий рентгеновский 1-координатный детектор DIMEX.

На станции был проведен ряд уникальных «in situ» исследований: исследование с временным разрешением 124 и 248 нс поведения структуры различных веществ при воздействии ударной и детонационной волн; исследование динамики образования и роста частиц алмаза за детонационным фронтом от исходного среднего размера порядка 30 Å до 100 Å в течении 6 мкс.; исследование динамики образования металлических наночастиц металлоорганических соединений под воздействием детонационных волн; исследование структуры газовых и металлических коммулятивных струй как в свободном полёте так и при прохождении через вещество; исследование динамики возникновения и развития микротрещин при ударноволновом воздействии; поведение наночастиц и наноматериалов при ударноволновом воздействии; исследование структуры и релаксационных процессов у "свежих" и "свободных" наночастиц, т.е. только что образованных и не имеющих контактов как с другими частицами, а также подложкой. Реализована схема эксперимента, учитывающая саморазвертку в пространстве исследуемого детонационного процесса и получено временное разрешения до 15 нс. Эта схема впервые позволила измерять поведение плотности вещества непосредственно на детонационном фронте различных ВВ. До настоящего времени получение этой информации было невозможным.

Исследование глобальных и континентальных изменений палеоклимата по анализу данных осадков озер Байкал и Телецкое:

Экспериментальная станция “Байкал” и методы реконструкции условий окружающей среды в прошлом разработаны и созданы в течение нескольких лет усилиями трех институтов СО РАН – Лимнологического института, ОИГиГ и ИЯФ. В 2004 году оборудование станции было полностью завершено. Успешно продолжены работы по реконструкции палеоклимата путем сканирующего анализа донных осадков озер (Байкал, Телецкое, Хубсугул). Были также получены первые данные по колонкам донных осадков Охотского моря. (совместно с ЛИ СО РАН и ОИГиГ СО РАН).

7. Работы на установке ГОЛ-3

На установке ГОЛ-3 исследуется нагрев плазмы мощным релятивистским электронным пучком и ее удержание в многопробочной ловушке. Основной целью экспериментов является увеличения основных «термоядерных» параметров плазмы. Недавно установка ГОЛ-3 была переведена в режим с гофрировкой магнитного поля на всей длине 12-метрового соленоида.

В 2004 году был выполнен цикл работ по повышению плотности тока пучка, инжектируемого в длинный соленоид с плотной (10^{15} - 10^{16} см⁻³) дейтериевой плазмой. С этой целью был спроектирован, изготовлен и смонтирован на ускорителе У-2 новый катодный узел, в котором площадь поверхности, эмитирующей электроны, была уменьшена вдвое. Это позволило повысить плотность тока пучка с круговым сечением, инжектируемого в плазму, с 1 кА/см² до 2 кА/см² в магнитном поле 9 Тл. В результате достигнут значительный прогресс в увеличении ионной температуры и времени удержания плазмы. При плотности плазмы $(0.2-6)10^{15}$ см⁻³ найдены условия для макроскопической стабилизации плазмы, полученное время жизни плазмы (0,5-1мс) соответствует расчетному для многопробочной ловушки в оптимальных условиях. Ионная температура, измеренная по спектру нейтралов перезарядки, доплеровскому уширению линии бальмер-альфа и эмиссии термоядерных нейтронов, достигает 2 кэВ в области оптимального нагрева.

Предложена модель быстрого бесстолкновительного нагрева ионов в ячейках многопробочной ловушки. Данная модель предсказывает ускорение ионов в неоднородном поле и последующее возбуждение волн плотности в локальных пробкотронах многопробочной ловушки. Получено экспериментальное подтверждение такой модели.

В 2004 году на установке ГОЛ-3 начаты исследования винтовой структуры магнитного поля и ее влияния на удержание плазмы. С помощью новой методики определения запаса устойчивости в линейных магнитных ловушках получены первые результаты, доказывающие существование сильного шира магнитного поля на установке ГОЛ-3.

8. Работы на установке Газодинамическая ловушка (ГДЛ)

На установке ГДЛ начаты эксперименты по созданию локального сгустка ионно-горячей плазмы большого давления в небольшом дополнительном пробкотроне. Предварительно пробкотрон одновременно со всей центральной частью заполняется холодной плазмой. Затем плазма нагревается при инжекции атомарных пучков в основную ловушку в соответствии со стандартным сценарием работы установки. В начальных экспериментах в локальный пробкотрон инжектируются сфокусированные атомарные пучки с мощностью до 0.15 МВт. В результате захвата атомарных пучков в

пробкотроне формируется компактный плазмоид из быстрых ионов со средней энергией 10 кэВ. Объем пламоида около 0.7 литра, максимальная плотность 10^{19} м^{-3} . В дальнейшем предполагается увеличить мощность атомарной инжекции в локальный пробкотрон до 2 Мвт. Согласно расчетам, основанным на результатах первых экспериментов, это позволит получить сгусток ионно-горячей плазмы с плотностью $\sim 10^{20} \text{ м}^{-3}$ и средней энергией, которая близка к предполагаемой в нейтронном источнике на основе ГДЛ. Это обстоятельство делает данные эксперименты чрезвычайно важными для моделирования поведения плазмы в нейтронном источнике.

Экспериментально изучена динамика формирования узких профилей давления с радиальным размером, близким к ларморовскому радиусу быстрых ионов.

В экспериментах по удержанию двухкомпонентной плазмы с высоким значением параметра β на установке ГДЛ измерен радиальный профиль плотности быстрых ионов с энергиями в диапазоне от 6 до 18 кэВ, которые создаются при помощи инжекции атомарных пучков дейтерия в теплую водородную плазму. Для измерения профиля использованы диагностики, специально созданные для изучения пространственного профиля плотности быстрых ионов: датчик потока продуктов термоядерных реакций и анализатор нейтралов перезарядки с искусственной мишенью. Измерения произведены вблизи области останова быстрых ионов, где их плотность максимальна. Для частиц с энергиями, меньшими энергии частиц атомарных пучков, характерная ширина полученного профиля оказывается значительно меньшей расчетной величины, определяемой процессами захвата инжектированных нейтралов, а также кулоновской кинетикой взаимодействия быстрых ионов с плазмой. Так, для частиц с энергией инжекции 18 кэВ (энергия инжектируемых нейтралов) ширина профиля на полувысоте составляет 30 см, что хорошо соответствует расчетам. Для частиц, затормозившихся до энергии 16 кэВ, его ширина оказывается 16 – 18 см, что существенно меньше расчетной ширины. В специальном эксперименте с подвижным лимитером показано, что процесс формирования узкого распределения не связан с потерями быстрых ионов. На это указывают и результаты анализа баланса энергии быстрых ионов. Таким образом, имеет место эффект быстрого радиального «стягивания» горячих ионов в процессе их остывания. Соответствующая теоретическая модель этого процесса находится в стадии разработки.

Создан дисперсионный интерферометр на основе CO_2 лазера с чувствительностью $\langle n_e l \rangle_{\min} \sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и разрешением по времени 50 мкс.

В качестве удвоителя частоты использован нелинейный кристалл ZnGeP_2 . Дисперсионный интерферометр по сравнению с интерферометрами других типов с другими схемами компактен и имеет низкую чувствительность к вибрациям. Интерферометр не требует специальной виброизолирующей структуры, его элементы установлены непосредственно на вакуумной камере установки ГДЛ.

9. Разработка и изготовление мощных источников пучков быстрых атомов водорода

Для достижения повышенных параметров популяции горячих ионов в плазме установки ГДЛ в настоящее время подготавливается новая система инжекции мощных пучков быстрых атомов водорода. В новой версии ионного источника формирование протонного пучка будет осуществляться ионно-оптическими системами с геометрической фокусировкой пучка, обеспечиваемой сферической формой сеток. В результате применения фокусировки поперечный размер пучка атомов в плазме становится меньше диаметра плазмы, что позволяет оптимизировать положение инжектируемого пучка.

В результате испытаний пилотной версии источника был получен протонный пучок с током 50 А, энергией 25 кэВ и длительностью импульса 3 мс. Перезаряженный в нейтрализаторе пучок атомов фокусируется на расстоянии 120 см от источника.

Радиус сфокусированного пучка на уровне $1/e$ составляет 2.5 см, что соответствует интегральной угловой расходимости $2 \cdot 10^{-2}$ рад. Плотность потока атомов в фокусе составляет 2.5 А/см^2 . Измерения состава пучка производилось магнитным анализатором, доля протонов в сформированном ионном пучке составляет 90%, доля ионов H_2^+ и H_3^+ - 7% и 3%, соответственно. Мощность полученного пучка быстрых атомов составила 0.9 МВт. Полученная плотность атомарного тока является рекордной. В настоящее время выполняется сборка основных узлов шести инжекторов с током пучка 50 А и фокусным расстоянием 250 см. Ведется изготовление шести комплектов систем питания с длительностью импульса 5 мс.

10. Создание многополюсного сверхпроводящего вигглера с рекордно низким расходом жидкого гелия

Для источников синхротронного излучения изготовлен и успешно прошел испытания сверхпроводящий вигглер с 63-мя полюсами и полем до 2.5 Тесла. Устройство обеспечивает высокую яркость рентгеновского пучка СИ, имеет рекордно низкий расход жидкого гелия, и поэтому очень экономично в эксплуатации.

11. Система Рентгеновского Контроля (СРК) «Сибскан» для досмотра людей.

Опыт, накопленный при разработках систем и их элементов в области медицинской цифровой сканирующей рентгенографии, позволил в 2002 – 2003 годах разработать, а в 2004 году произвести первую в России СРК для досмотра людей. Такие системы в нынешней криминогенной обстановке целесообразно использовать в аэропортах, пограничных и таможенных переходах, офисах, банках и т.п. с целью обнаружения спрятанных на теле, в теле и под одеждой опасных предметов, веществ и оружия, в т.ч. и сделанных из пластмасс. По сравнению с тремя другими СРК, созданными в Белоруссии, ЮАР и США, СРК «Сибскан» обладает более высокими характеристиками и доставляет меньше неудобств досматриваемым лицам. Пилотный экземпляр СРК по разработке ИЯФ создан на Орловском предприятии «Научприбор». В декабре 2004 года международная экспертиза подтвердила соответствие СРК «Сибскан» требованиям, представленным к системам такого назначения.

Всего Институтом опубликовано за 2004 год около 500 статей в рецензируемых журналах.

Ученый секретарь Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

к.ф.-м.н.

А.М. Кудрявцев