

**МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА ПО ГРАВИТАЦИИ И КОСМОЛОГИИ:
КУРС 10 «ГРАВИТАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ,
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ И КОНСТАНТЫ»**

(Эриче, Сицилия, 2—12 мая 1987 г.)

«Международная школа по гравитации и космологии» — одна из 70 различных школ, которые организует и финансирует Итальянский центр «Научная культура» им. Э. Майораны. Директор центра — профессор А. Зикикки, директор школы — профессор В. Де Саббата.

Директор школы предлагает проведение очередных курсов известным специалистам из разных стран. Курсы по гравитации и космологии ранее возглавляли Дж. Вебер, П. Бергманн, Н. Розен, Э. Шмутцер и др.

Со 2-го по 12-е мая 1987 г. в г. Эриче, Сицилия, школа по гравитации и космологии проводила свой 10-й курс на тему «Гравитационные измере-

ния, фундаментальная метрология и константы». Директором этого курса был сотрудник Госстандарта СССР В. Н. Мельников. С советской стороны в состав лекторской группы входили также Р. Н. Фаустов, В. П. Шелест (Госстандарт) и Ю. М. Лоскутов, В. Н. Руденко (МГУ).

Среди зарубежных участников лекторской группы следует выделить таких известных ученых, как Дж. Вебер (Мэрилендский университет), Р. Драйвер (Калтек), Р. Бергман (Нью-Йоркский университет), Э. Р. Коэн (научный центр компании «Рокуэлл интернейшенл») — все из США, Н. Розен (Технологический институт, г. Хайфа, Израиль). Кроме того, участвовали: Э. Фишбах, Дж. Гилли, Р. Хеллингс, Р. Ризенберг (США), Дж. Пицелла, Ф. Риччи, Дж. Проди (Италия), Э. Браун, В. Кнабе (ФРГ), У. Такано, Н. Танака (Япония) и др. Полное число участников вместе со студентами составляло около 50 человек.

Основные темы школы: гравитационно-релятивистская метрология (прецизионные пространственно-временные и гравитационные измерения), квантовая метрология и фундаментальные физические константы. Основное внимание было уделено таким проблемам, как: 1) гравитационно-релятивистские модели для синхронизации эталонов времени и частоты; 2) гравитационно-релятивистские модели для астрономических измерений (РСДБ, пульсарная шкала, дальнометрия); 3) теории, допускающие вариации фундаментальных констант; 4) измерения гравитационной постоянной, ее возможной зависимости от времени, расстояния, состава и т. п., идея о «пятой силе»; 5) гравитационно-волновые детекторы (твердотельные и лазерно-интерферометрические); 6) гравитационно-релятивистские эффекты в Солнечной системе, новые проекты и техника гравитационных измерений; 7) фундаментальные физические константы, теория и эксперимент, их согласование и проверка квантовой электродинамики; 8) квантовый эффект Холла и другие макроскопические квантовые эффекты, перспективные квантовые эталоны электрических единиц; 9) метрологические аспекты физики высоких плотностей энергии.

Советские специалисты прочитали по две - три лекции: В. Н. Мельников — «Гравитационно-релятивистская метрология», «Проблемы связи и возможных вариаций фундаментальных физических констант», В. Н. Руденко — «Сейсмографическое детектирование гравитационных волн», «Оптоакустическая гравитационная антенна» и «Методы квантовых невозмущающих измерений для оптических гравитационных антенн», Ю. М. Лоскутов — «Релятивистская теория гравитации», Р. Н. Фаустов — «Квантовая электродинамика и фундаментальные константы», В. П. Шелест — «Введение в физику высоких плотностей энергии».

Лекции 10-го курса школы опубликованы в издательстве «Рейдель» (Нидерланды) в начале 1988 г. под редакцией В. Н. Мельникова (СССР) и В. Де Саббаты (Италия).

Остановимся на наиболее существенных лекциях, прочитанных на школе, с выделением новых результатов и тенденций развития.

1. МЕТРОЛОГИЯ

1.1. Лекции по этому разделу были прочитаны проф. Э. Р. Коэном (Международный научный центр в Рокуэлле, США). Он изложил результаты работы международной метрологической комиссии CODATA по согласованию фундаментальных физических констант в 1986 г. Представляют интерес итоговые таблицы численных значений констант с указанием погрешности по измерениям до 1986 г. включительно. Таблицы имеются в бюллетене CODATA и будут опубликованы в «Трудах» школы. По большинству атомных констант погрешности отвечают расчетам в 6–8 порядках по теории возмущений. Наименее точно определенной константой остается гравитационная постоянная (погрешность в четвертом значащем разряде).

1.2. Лекция Э. Брауна (Физико-технический институт, Брауншвейг, ФРГ) была посвящена разработке новых эталонов электрических единиц, — ома и вольта — на основе квантовых эффектов Холла и Джозефсона. Созданные в ФРГ стандарты в настоящее время еще не удовлетворяют необходимым метрологическим требованиям и могут быть использованы только для калибровки традиционных эталонов.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ГРАВИТАЦИОННОЙ ПОСТОЯННОЙ И РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭФФЕКТОВ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Принято в CODATA численное значение $G = (6,67259 \pm 0,00085) \times 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$, т. е. погрешность существует уже в четвертом значащем разряде.

2.1. Дж. Гиллис (Университет шт. Виргиния, США) сделал сообщения о новой установке (представляющей модернизацию известной установки Дж. Бимса), предназначенной для измерения G с точностью $1 \cdot 10^{-5}$. Установка представляет собой модификацию опыта Кавендиша с использованием магнитной подвески пробных масс, размещенных на равномерно вращающейся платформе. Основные усилия были затрачены на обеспечение высокой степени равномерности вращения, такой, что $\dot{\omega}/\omega \approx 10^{-20} \text{ ч}^{-1}$. Стоимость установки 1,5 млн. долларов. Установка позволяет фиксировать вариации массы вращающегося пробного тела $\dot{m}/m \sim 5 \cdot 10^{-12} \text{ год}^{-1}$. В настоящее время это единственная в мире система для измерения абсолютного значения G с точностью до пяти значащих цифр. Она также предназначена для измерения временных вариаций $\dot{G}/G \sim 10^{-11} \div 10^{-12} \text{ год}^{-1}$. Проводятся также эксперименты по обнаружению аномального спинового взаимодействия магнитных моментов электронов. Предполагается, что это тензорное взаимодействие диполь-дипольного типа. Используется крутильный маятник. Большие притягивающие массы имеют $2 \cdot 10^{23}$ поляризованных электронов, а малые притягиваемые массы — в 10 раз меньше. Измеряется сдвиг периода при изменении поляризации пары масс. Проведено 19 серий измерений в течение 1200 часов. Отношение аномального спинового взаимодействия (тензорного) к взаимодействию магнитных моментов оказалось равным $\alpha = (-0,45 \pm \pm 3,7) \cdot 10^{-10}$.

2.2. Э. Фишбах (Вашингтонский университет, США) представил три лекции с обсуждением гипотетической «пятой силы» — нового типа взаимодействия пробных масс, которое эквивалентно могло бы описываться на языке пространственных вариаций гравитационной константы $G(r)$. Результаты последних экспериментов, выполненных в США в этом направлении, уже опубликованы в «Physical Review Letters» (март 1987 г.). Новые эксперименты, о которых сообщил докладчик, сводятся к модификациям опыта Кавендиша с целью прецизионной проверки закона тяготения для расстояний 50—1000 метров. В этом диапазоне имеющиеся экспериментальные данные позволяют дать лишь весьма грубое ограничение величины возможного отклонения от закона Ньютона — меньше 10^{-3} части ньютоновской силы. В частности, доложено о результате Тиббергера в эксперименте с горой. Получено, что $|\alpha\lambda| \approx 1,2 \div 0,4$ в согласии с экспериментами Стейси в шахтах.

Другой эксперимент (Стаббс и др.) с четырьмя подвешенными массами (две из меди и две из бериллия) дал противоречие с предыдущими оценками:

$$|\alpha\lambda| < 0,1 \text{ м.}$$

Его результаты (Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. P. 1070) анализируются. Поскольку эффект зависит от состава согласно повторному анализу экспериментов Этвеша, то расхождения связаны, возможно, с этим: $\alpha = \alpha(B/\mu)$.

Необходимы многокомпонентные модели с разной зависимостью пятой силы от зарядов B , L , N , Z и соответствующие экспериментальные проверки.

Данные о новых экспериментах на начало 1988 г. продолжают оставаться противоречивыми: большая часть лабораторных экспериментов не согласуется с экспериментами в шахтах. Для их объяснения используются теоретические модели с зависимостью пятой силы как от барионного заряда, так и от изоспина и даже числа кварков.

2.3. Р. Ризенберг (Массачусетский технологический институт, Бостон, США) прочел лекции о состоянии дел с известным американским проектом POINTS — оптическим интерферометром из четырех прецизионных оптических телескопов на жесткой платформе размером 2 м на орбите ИСЗ. Проект существует в настоящее время в чертежах; ведутся (в МТИ) лабораторные эксперименты по исследованию свойств материалов для несущей платформы. Проект преследует три крупные цели: а) поиск других планетных систем в пределах Галактики; б) проверку ОТО во втором порядке по параметру слабого поля $\sim(\varphi/c^2)^2$ (отклонение светового луча в поле Солнца 11 угл. мксек; в) межгалактическую астрометрию и измерение постоянной Хаббла с точностью не хуже 10 %. Заложенная в проекте точность угловых измерений удаленных звезд соответствует измерению угла $\sim\pi/2$ с погрешностью $\sim 10^{-6}$ угл. сек; в настоящее время точность оптических измерений достигает лишь $\sim 10^{-2}$ угл. сек. Хотя проект значительно иницировался группой И. Шапиро из МТИ, к которой принадлежит докладчик, в настоящее время в него вовлечены другие коллективы: их список содержит 16 ученых из различных научных центров США. Проект предполагает развитие новой технологии по обеспечению жестких требований к системам ориентации и стабилизации несущей платформы и, таким образом, имеет несомненное прикладное значение. Конкретных данных о финансировании этого проекта и включения его в программы НАСА пока нет.

2.4. Р. Хеллингс (Лаборатория реактивного движения, Пасадина, США) представил лекции, в которых обсуждал использование данных по точной радиолокации планет Солнечной системы и искусственных станций для оценки **временных** вариаций гравитационной постоянной. Новая уточненная обработка данных по «Викингам» подтвердила оценку трехгодичной давности $\dot{G}/G \leq (0,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-11}$ год⁻¹. Лектор сообщил о планах совместных со специалистами ИКИ АН СССР работ по использованию возможного ретранслятора на Фобосе. Слежение за эволюцией орбиты Фобоса относительно Марса с использованием ретрансляторов, по оценкам Хеллингса, даст $\dot{G}/G \leq 16 \cdot 10^{-13}$ год⁻¹ при времени наблюдения один год и $\dot{G}/G \leq 8 \cdot 10^{-13}$ год⁻¹ за 5 лет наблюдений. Кроме того, в лекциях обсуждалась проблема корректного измерения **временных** интервалов в релятивистских экспериментах в связи с использованием различных систем отсчета. По данным этих лекций в настоящий момент на станциях космической связи НАСА используются водородные стандарты в системах измерения вариаций частоты со стабильностью $\Delta f/f \sim 10^{-13} \div 10^{-14}$ за время $\tau \sim 10^3$ с; точность измерения вариаций скорости $\delta v \sim 0,01$ см/с.

2.5. Н. Кришнан (Тата-Институт, Бомбей, Индия). Сообщил о создании лабораторной установки для измерения пространственных вариаций гравитационной константы. Та же установка планируется для проверки принципа эквивалентности инертной и гравитационной масс с погрешностью 10^{-14} , что на два порядка лучше результатов эксперимента Брагинского и Панова (МГУ, 1971 г.). Методика индийского эксперимента остается аналогичной эксперименту МГУ; улучшение чувствительности ожидается за счет

использования форсированных параметров крутильного подвеса; масса ~ 200 г и время релаксации $5 \cdot 10^8$ с; предполагаемое время измерения 20—30 дней.

2.6. В докладе доктора Ж. А. Проди (Университет г. Тренто, Италия) содержалось описание предложенного и реализуемого под руководством М. Сердоньо и С. Витале земного эксперимента по детектированию увлечения инерциальных систем отсчета Лензе — Тирринга вследствие вращения Земли. Метод — сравнение астрометрического измерения вращения Земли и инерциального измерения угловой скорости в лаборатории. Предполагается достичь результата за счет создания динамического детектора локальной угловой скорости на новом принципе — гиромагнитном электронном гироскопе (ГЭГ), не содержащем механических движущихся конструкций. ГЭГ состоит из сверхпроводящего экрана вокруг ферромагнитного стержня, намагничивание которого измеряется сквидом. Принципы действия — гиромагнитный эффект, т. е. разница в гиромагнитных отношениях соответственно куперовских пар в сверхпроводниках и электронных спинов в магнитном стержне. Необходимая для эксперимента точность измерения ($\sim 3\%$) в технике РСДБ уже достигнута. Дается теория эксперимента в ГЭГ. Сейчас идут эксперименты с ГЭГ.

3. ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВОЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

На школе присутствовали представители трех исследовательских центров, занятых проблемой поиска гравитационных волн.

3.1. Дж. Вебер (Мэрилендский университет, США) — один из основателей данного направления, руководитель работ по гравитационным антеннам в Мэрилендском университете — сообщил о регистрации на одной из гравитационных антенн повышенного шумового уровня, коррелированного по времени со вспышкой Сверхновой 1987. Антенна работала при комнатной температуре и обладала чувствительностью $\Delta l/l \sim 10^{-16}$ в полосе $\Delta f \sim 10$ Гц. Данные не обработаны полностью, статистическая вероятность события не оценивалась. В своих лекциях Дж. Вебер обсуждал возможность переосмысления и пересчета сечения поглощения резонансной гравитационной антенны при учете коллективных когерентных процессов на молекулярном уровне; одновременно он обращался к вычислению сечения поглощения для нейтринного потока. Эти результаты пропагандировались им ранее, расчеты уже опубликованы (юбилейный сборник, посвященный Эддингтону, а также статья в «Foundations of Physics» в 1986 г.). Однако эти идеи не поддерживаются другими специалистами.

3.2. Р. Драйвер (Калифорнийский Технологический институт, Пасадина, США) изложил положение дел с проектом построения больших лазерно-интерферометрических гравитационных антенн «на свободных массах» с базой 3—5 км. Стоимость проекта ~ 40 млн. долларов на антенну. Антенн две: одна в Калифорнии, другая под Бостоном (Новая Англия, Массачусетс) под эгидой МТИ. Назначен директор проекта проф. Р. Вогт (Калтек); окончательное решение о финансировании ожидалось в конце 1987 г. Планируется также постройка в Шотландии аналогичной антенны с меньшей базой, 1 км, стоимостью 3 млн. долларов, однако сроки не ясны.

Профессор Драйвер сообщил также о дальнейшем совершенствовании технологических деталей на малом макете, 40 м, работающем в Калтеке. В 1984 г. этот макет имел чувствительность к смещению пробных масс $\sim 3 \cdot 10^{-15}$ см за время 1 с. В настоящее время чувствительность увеличена до $8 \cdot 10^{-16}$ см/Гц^{1/2}; недавно была произведена замена пробных масс из латуни на массы из плавленного кварца с полированными торцами. Зеркала на

таких массах держатся за счет сил молекулярного взаимодействия, нет необходимости в применении склеивающей прокладки, которая служила источником избыточных шумов. Ожидается улучшение чувствительности в 5 раз и выход на уровень $1,6 \cdot 10^{-16}$ см/Гц^{1/2}; это означает, что чувствительность большой антенны к возмущению метрики в полосе 1000 Гц будет составлять $h = \Delta l/l \sim 10^{-20}$.

3.3. Дж. Пипелла (Римский университет и ЦЕРН, Женева) повторил в докладе известную ранее информацию о регистрации повышенного шумового фона гравитационной антенной в Риме перед вспышкой Сверхновой 1987. Оценка расхода энергии в центре Галактики — 2400 солнечных масс, что исключает гравитационно-волновую природу возбуждения (антенна в Риме работала при комнатной температуре). Антенна в ЦЕРНе (Женева), описанная в публикациях (Nuovo Cimento, 1986), обладает чувствительностью $h \sim 10^{-17}$ в полосе 1000 Гц, но во время вспышки Сверхновой она не работала.

Кроме участия в работе школы, авторы этой заметки посетили Римский университет, Центр ядерных исследований (CNR) во Фраскати (В. Н. Руденко) и нейтринную лабораторию в Гран-Сассо (В. Н. Мельников). Целью посещения было ознакомление с гравитационными антеннами веберовского типа, созданными в группе проф. Амальди (Римский университет) и в группе проф. Ф. Бордони (CNR). Неохлаждаемая антенна в Римском университете — малый макет антенны в ЦЕРНе — служит для отработки технических деталей, которые затем переносятся на большую антенну. Контроль за работой антенны и анализ данных целиком обеспечен компьютерным оборудованием американского производства. Антенна в CNR также малой массы, 400 кг, но уже охлаждаемая до 4 К; система регистрации состоит из трансформатора смещений и сквида постоянного тока американского производства (Боулдер, Колорадо, США). Группа Бордони планирует работу в режиме «поиска совпадений» с антенной в ЦЕРНе.

Кроме того, группа Бордони в экспериментальном плане активно работает по программе развития квантово-невозмущающихся методов регистрации в экспериментах с простыми телами. В кооперации с Рочестерским университетом (США) в группе проф. Д. Дагласа исследуются радиотехнические СВЧ системы (70 ГГц), построенные по принципам QND, с целью снижения их шумовой температуры до квантового уровня $kT_m \approx \hbar\omega_\mu$, где $\omega_\mu \sim 10^{-4}$ — частота измеряемых механических колебаний (гравитационного детектора). Используется лучшая японская и американская электроника, полевые транзисторы на GaAs при температуре 4 К и параметрические усилители на сквидах. Достигнута температура $T_m \approx 10^{-2}$; требуется $10^{-6} \div 10^{-7}$ К. В Гран-Сассо полным ходом идут строительные работы; туннели уже готовы, идет отделка перед установкой измерительной аппаратуры. Помимо нейтринных датчиков предполагается в дальнейшем установка гравитационной антенны.

Следующий, 11-й курс будет проведен в Эриче в 1989 г. по теме «Квантовая теория в искривленном пространстве-времени». Его директором назначен Аудреч (Audretsch, ФРГ).

В. Н. Мельников, В. Н. Руденко