

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ВСЕЛЕННОЙ НА ОСНОВЕ ПРЕЦИЗИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ МОЛЕКУЛ¹

Лапинов А.В., Левшаков С.А., Козлов М.Г., Голубятников Г.Ю.,
Белов С.П., Андриянов А.Ф., Шкаев А.П., Агафонова И.И., Зинченко И.И.²

Study of fundamental properties of the universe using precise molecular spectroscopy

Для исследования зависимости фундаментальной физической постоянной — отношения массы электрона к массе протона ($\mu = m_e/m_p$) — от величины потенциала гипотетического скалярного поля проведены спектральные наблюдения межзвездных молекулярных облаков в линиях $\text{NH}_3(J,K)=(1,1)$, $\text{HC}_3\text{N } J=2-1$ и $\text{N}_2\text{H}^+ J=1-0$ в см и мм диапазонах на трех радиотелескопах: 32-метровом в Медичине (Италия), 100-метровом в Эффельсберге (Германия), 45-метровом в Нобеяме (Япония). Сравнивались относительные частоты инверсионного перехода аммиака с вращательными линиями других молекул, которые в 4,5 раза менее чувствительны к изменению параметра μ , чем инверсионный переход в NH_3 . Получены указания на возможный систематический сдвиг между этими переходами, равный в доплеровской шкале скоростей $\Delta V = V_{\text{rot}} -$

To probe the dependence of the fundamental physical constant — the electron-to-proton mass ratio ($\mu = m_e/m_p$) — on the potential of a hypothetical scalar field, we carried out spectral observations of interstellar molecular clouds in the Milky Way using $\text{NH}_3(J,K)=(1,1)$, $\text{HC}_3\text{N } J=2-1$, and $\text{N}_2\text{H}^+ J=1-0$ molecular lines. Observations at cm and mm wavelengths were performed with three radiotelescopes: 32-m Medicina (Italy), 100-m Effelsberg (Germany), and 45-m Nobeyama (Japan). Relative frequencies of the ammonia inversion transition and rotational transitions of other molecules, which are 4.5 times less sensitive to a change of μ than the inversion line, have been compared. As a result, we found an indication of possible Doppler velocity offset, $\Delta V = V_{\text{rot}} - V_{\text{inv}} = (27,7 \pm 3,8_{\text{stat}} \pm 2,8_{\text{sys}})$ m/s. Being interpreted in terms of the electron-to-proton mass ratio variation, this gives $\Delta\mu/\mu = (\mu_{\text{obs}} - \mu_{\text{lab}})/\mu_{\text{lab}} = (2,6 \pm 0,4_{\text{stat}} \pm 0,3_{\text{sys}}) \cdot 10^{-8}$. However,

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-02-12223-офи_м).

² Лапинов Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института прикладной физики РАН, г. Н.Новгород, e-mail: lapinov@appl.sci-nnov.ru.



Левшаков Сергей Анатольевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, e-mail: lev.astro@mail.ioffe.ru.



Козлов Михаил Геннадьевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН, г. Гатчина, e-mail: kozlov@mfl309.spb.edu.ru.



Голубятников Герман Юрьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института прикладной физики РАН, г. Н.Новгород, e-mail: glb@appl.sci-nnov.ru.



Белов Сергей Павлович, старший научный сотрудник Института прикладной физики РАН, г. Н.Новгород, e-mail: belov@appl.sci-nnov.ru.

$V_{inv} = (27,7 \pm 3,8_{stat} \pm 2,8_{sys})$ м/с. Если этот сдвиг действительно вызван изменением μ , то $\Delta\mu/\mu = (\mu_{obs} - \mu_{lab})/\mu_{lab} = (2,6 \pm 0,4_{stat} \pm 0,3_{sys}) \cdot 10^{-8}$. Если же рассматривать $|\Delta V| < 30$ м/с только как консервативный верхний предел, то $|\Delta\mu/\mu| < 3 \cdot 10^{-8}$, что на два порядка точнее, чем космологические оценки параметра μ .

Благодаря поддержке РФФИ создан прецизионный субдоплеровский спектрометр для лабораторных исследований спектров молекул в миллиметровой области длин волн, обладающий более высоким разрешением, чем зарубежные аналоги. Спектрометр предназначен для высокоточных измерений частот переходов и параметров сверхтонкого расщепления молекул, представляющих интерес при изучении областей звездообразования, а также для чисто фундаментальных исследований.

Ключевые слова: вариации фундаментальных констант, межзвездная среда, спектроскопия молекул.

if only a conservative upper bound is considered, $|\Delta V| < 30$ m/s, then $|\Delta\mu/\mu| < 3 \cdot 10^{-8}$, which is two orders of magnitude stronger in comparison with constraints obtained from cosmological measurements.

Thanks to RFBR support we created a precise sub-Doppler spectrometer for laboratory investigations of molecular spectra in the millimeter wave band, which has higher resolution than their foreign counterparts. The spectrometer is designed for precise measurements of transition frequencies and parameters of the hyperfine splitting of the molecules of interest in the study of star forming regions, as well as for pure basic research.

Keywords: variation of fundamental constants, interstellar medium, molecular spectroscopy.

Введение

Более десяти лет прошло с момента обнаружения ускоренного расширения Вселенной на поздних этапах ее эволюции (Perlmutter et al. 1998; Riess et al. 1998), но причина такого ускорения все еще остается невыясненной. По существу, это явление на столько не вписывается в рамки стандартных моделей физики элементарных частиц и космологии, что для решения про-

блемы ускоренного расширения Вселенной может потребоваться пересмотр фундаментальных законов физики как на малых, так и на космологических масштабах. Многочисленные попытки решить данную проблему в рамках квантовой теории поля и общей теории относительности пока остаются неубедительными (Brah 2009).

На феноменологическом уровне было предложено множество моделей, объяснявших со-



Андриянов Александр Федорович, ведущий конструктор Института прикладной физики РАН, г. Н.Новгород, e-mail: andriyanov@appl.sci-nnov.ru.



Шкаев Александр Петрович, ведущий конструктор Института прикладной физики РАН, г. Н.Новгород, e-mail: shkaevap@mail.ru.



Агафонова Ирина Ивановна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, e-mail: ira.astro@mail.ioffe.ru.

Зинченко Игорь Иванович, доктор физико-математических наук, заведующий отделом Института прикладной физики РАН, г. Н.Новгород, e-mail: zin@appl.sci-nnov.ru.

временное ускоренное расширение Вселенной. Наиболее популярные из них рассмотрены в обзорах Peebles and Ratra (2003), Martins (2008) и Chin et al. (2009). Например, во многих моделях предполагается, что причиной ускорения может быть присутствие в космологическом вакууме сверхлегких скалярных полей с уравнением состояния $p = -\rho$. Взаимодействуя с обычным веществом (барионами и лептонами), такие поля привели бы к нарушению принципа эквивалентности и к появлению «пятой» силы. Строгий верхний предел на величину параметра Этвеша $\eta < 4 \cdot 10^{-13}$, характеризующего нарушение принципа эквивалентности, был получен в экспериментах по измерению относительного ускорения тел разного химического состава (Will 2001). Таким образом, существование пятой силы, переносчиком которой являются скалярные поля, пока не нашло подтверждения в лабораторных экспериментах.

Сложившееся противоречие между двумя экспериментальными фактами — ускоренным расширением Вселенной, с одной стороны, и отсутствием каких-либо признаков нарушения принципа эквивалентности, с другой стороны, удается разрешить в рамках так называемых «хамелеонных» моделей скалярных полей, предложенных в работах Khoury and Weltman (2004), Brax et al. (2004), Mota and Shaw (2007) и Olive and Pospelov (2008). В этих работах предполагается, что потенциал и эффективная масса кванта скалярного поля модулируются локальной плотностью вещества так, что комптоновская длина взаимодействия за счет обмена скалярными частицами становится малой при больших плотностях (условия лабораторных экспериментов) и большой в условиях космического вакуума. Таким образом, детектирование пятой силы в лабораторных условиях требует либо экспериментов на очень малых масштабах, либо при очень глубоком вакууме. Второе условие выполнено в межзвездной среде, где локальные плотности газа в «плотных» молекулярных глобулах составляют 10^4 – 10^5 частиц в см^3 , а эффективная длина взаимодействия превышает размеры Солнечной системы.

Учитывая уникальные возможности современных высокоточных астрономических наблюдений, мы можем ставить задачу по поиску скалярных полей и проверки фундаментального принципа локальной инвариантности, согласно которому результаты негравитационных измерений не зависят от пространственно-вре-

менных координат. Например, сравнивая относительные частоты молекулярных переходов, измеренных в наземных лабораториях, с частотами этих же переходов, полученных из наблюдений межзвездных молекулярных облаков, мы можем получить ограничения на возможные изменения фундаментальных физических постоянных (такое изменение, разумеется, нарушает принцип локальной инвариантности). Теоретическое обоснование зависимости от локальной плотности таких фундаментальных безразмерных констант, как постоянная тонкой структуры, $\alpha \approx 1/137$, и отношение масс электрона и протона $\mu = m_e/m_p$, было получено в работе Olive and Pospelov (2008). В современной теории эти константы определяют силу фундаментальных взаимодействий: α характеризует электромагнитное взаимодействие, m_e пропорциональна слабому взаимодействию, а m_p определяется масштабным фактором Λ квантовой хромодинамики (Chin et al. 2009).

Следует отметить, что гипотетические изменения постоянной тонкой структуры и отношения масс электрона и протона не независимы. В теориях великого объединения предсказывается, что относительное изменение μ должно существенно превышать относительное изменение α (Calmet and Fritzsche 2002; Langacker et al. 2002; Dine et al. 2003; Flambaum et al. 2004). Это обстоятельство позволяет надеяться на то, что эксперименты по поиску вариаций μ более чувствительны к локальным условиям, чем измерения α .

Несмотря на многочисленные попытки, вариации α и μ до сих пор не были обнаружены ни в лабораториях, ни в астрономических наблюдениях. Наиболее жесткие ограничения на изменения во времени этих констант таковы: $(d\mu/dt)/\mu = (3,8 \pm 5,6) \cdot 10^{-14} \text{ год}^{-1}$ (Shelkovnikov et al. 2008), $(d\mu/dt)/\mu = (1,6 \pm 1,7) \cdot 10^{-15} \text{ год}^{-1}$ (Blatt et al. 2008), и $(d\alpha/dt)/\alpha = -(1,6 \pm 2,3) \cdot 10^{-17} \text{ год}^{-1}$ (Rosenband et al. 2008). Астрономические спектральные наблюдения внегалактических объектов устанавливают пределы на относительные изменения $\Delta\alpha/\alpha = (\alpha_{\text{obs}} - \alpha_{\text{lab}})/\alpha_{\text{lab}}$ и $\Delta\mu/\mu = (\mu_{\text{obs}} - \mu_{\text{lab}})/\mu_{\text{lab}}$ на уровне 10^{-5} – 10^{-6} на временном интервале порядка 10 миллиардов лет (Quast et al. 2004; Levshakov et al. 2005; Flambaum and Kozlov 2007; King et al. 2008; Thompson et al. 2009; Henkel et al. 2009).

Эти наблюдения проводились на крупнейших оптических (Keck, VLT) и радио (100-m

Effelsberg) телескопах. Однако, обнаруженные в последнее время неустранимые систематические сдвиги спектральных линий на уровне сотен м/сек, полученных на 10-метровом телескопе Keck (Giest et al. 2010) и на 8-метровом телескопе VLT (Whitmore et al. 2010) не позволяют надеяться, что в ближайшее время станут возможны надежные измерения $\Delta\alpha/\alpha$ и $\Delta\mu/\mu$ на уровне 1 ppm ($=10^{-6}$) по оптическим спектрам квазаров. Радиоастрономические наблюдения внегалактических объектов, хотя и не подвержены таким систематическим ошибкам, также имеют предел чувствительности на уровне около 1 ppm, поскольку наблюдения внегалактических радиоисточников могут проводиться только с довольно низким спектральным разрешением даже на 100-метровых телескопах.

Существенный прогресс в исследованиях фундаментальных постоянных радиоастрономическими методами возможен, если перейти к изучению объектов в нашей Галактике. Например, холодные молекулярные облака с кинетической температурой $T_k \sim 10$ К позволяют измерять относительные частоты молекулярных переходов с точностью 1–3 м/с. В ряде случаев, например, при измерениях спектров молекул, неустойчивых при лабораторных исследованиях, такие наблюдения позволяют проводить спектроскопию даже точнее, чем при исследованиях в земных условиях (Lapinov 1999, 2006, Caselli and Dore 2005). Доплеровская погрешность на уровне 1 м/с соответствует чувствительности к изменению μ на уровне 10^{-9} , т.е. 1 ppb. Конечно же, в этом случае временной интервал не сравним с космологическим, как при наблюдениях внегалактических объектов, но такие исследования дают уникальную возможность для проверки принципа локальной инвариантности.

Одно существенное обстоятельство не позволяет пока проводить широкомасштабные наблюдения молекулярных облаков в диске нашей Галактики с использованием большого числа разных молекул. Для подавляющего большинства известных молекулярных переходов лабораторные частоты измерены с ошибками, на порядки превышающими ошибки астрономических наблюдений. Таким образом, для лабораторной спектроскопии появилась важная практическая задача — измерения молекулярных частот с ошибками в доплеровской

шкале скоростей ~ 1 м/с (относительная ошибка $\sim 3 \cdot 10^{-9}$). В перспективе решение этой задачи откроет возможности для прецизионных измерений относительных значений фундаментальных физических постоянных по независимым группам молекулярных переходов, что существенно повысит достоверность астрономических исследований.

В настоящее время только две молекулы: NH_3 (аммиак) и HC_3N (цианоацетилен), с надежно измеренными лабораторными частотами, могут быть использованы в исследованиях переменности μ на уровне ~ 1 ppb. В рамках проекта РФФИ № 09-02-12223_офи_м нами были проведены предварительные наблюдения молекулярных облаков в линиях NH_3 (J,K)=(1,1) и HC_3N J=2–1, результаты которых представлены в следующем разделе.

Измерения $\Delta\mu/\mu$ по спектрам NH_3 и HC_3N

В основе эффекта лежат результаты квантово-механического расчета, показывающие разную чувствительность частот для разного типа переходов молекул от вариаций отношения массы электрона к массе протона. Так, относительный сдвиг частоты инверсионного перехода в аммиаке от параметра μ в 4,5 раза выше, чем для чисто вращательных переходов молекул (Flambaum and Kozlov 2007, Kozlov et al. 2010). Предложенный метод исследования вариаций $\Delta\mu/\mu$ при измерениях на Земле и в разреженной межзвездной среде заключался в поиске различий доплеровских сдвигов частот вращательных переходов HC_3N относительно частоты инверсионного перехода NH_3 (1,1). Согласно проведенному нами анализу всех опубликованных лабораторных измерений вращательного спектра HC_3N частоты переходов J=2–1 и J=5–4 составляют 18196.21694(17) МГц и 45490.31378(43) МГц. Т.е. стандартное отклонение для центра линий равно 2,8 м/с. При этом ошибки относительных положений сверхтонких компонент за счет спин-вращательного взаимодействия с ядром азота, благодаря измерениям De Leon and Muentner (1985), не превышают 0,1 м/с. Что же касается спектра аммиака, то и само положение центра чисто инверсионного перехода, 24694,495487(48) МГц, и частоты сверхтонких компонент были измерены в работе Kukolich (1967), с точностью $\sim 0,6$ м/с. Наши собственные лабораторные измерения, выполненные в

университете Ганновера в январе 2010 г. в резонаторе с холодной струей, полностью подтвердили использованные нами частоты с точностью $\sim 0,2$ кГц.

Первая серия радиоастрономических измерений проводилась нами в 2009 г. при помощи 32-м антенны в Медичине (Италия), 100-м телескопа в Эффельсберге (Германия) и 45-м телескопа в Нобеяме (Япония). В качестве объектов исследования были выбраны темные облака, обладающие максимально узкими линиями как за счет крайне низких температур, так и за счет внутренних нетепловых движений. Первоначальный список охватывал 41 источник (Levshakov et al. 2010), из которого, в конечном счете, были отобраны 12 объектов с максимально узкими, близкими к тепловым, ширинами линий. Далеко не все источники обладали достаточной интенсивностью в линиях разных молекул; кроме этого, часть объектов, демонстрировала излучение сложной формы на разных лучевых скоростях. С учетом ряда факторов, влияющих на точность измерения центров линий, относительный доплеровский сдвиг вращательных линий по сравнению с инверсионным переходом аммиака составил величину $\Delta V = V_{\text{rot}} - V_{\text{inv}} = (27,7 \pm 3,8_{\text{stat}} \pm 2,8_{\text{sys}})$ м/с (рис.1).

Стоит отметить, что данный сдвиг подтвердился и при наших последующих измерениях в январе 2010 г., когда для ряда выбранных источников были получены карты в линиях $\text{NH}_3(1,1)$ и $\text{HC}_3\text{N } J=2-1$. Если интерпретировать найденный сдвиг линий вариациями в отношении массы электрона к массе протона, μ , то величина $\Delta\mu/\mu = (2,6 \pm 0,4_{\text{stat}} \pm 0,3_{\text{sys}}) \cdot 10^{-8}$. Если же рассматривать $|\Delta V| < 30$ м/с только как консервативный верхний предел, то $|\Delta\mu/\mu| < 3 \cdot 10^{-8}$, что на два порядка точнее, чем космологические оценки параметра μ .

Хотя измерения на 32-м антенне проводились в линиях $\text{HC}_3\text{N } J=2-1$ и $\text{NH}_3(1,1)$ лишь в направлении нескольких источников, они оказались крайне важны, т.к. разница доплеровских скоростей $V(\text{HC}_3\text{N}) - V(\text{NH}_3)$ в них оказалась близка к величинам, измеренным в тех же объектах в Эффельсберге. Это послужило дополнительным подтверждением достоверности полученных данных. Благодаря возможности комбинировать одновременно несколько приемников, измерения в Нобеяме проводились в большом количестве линий разных молекул: инверсионных переходах $\text{NH}_3(1,1)$ (23,694 ГГц) и $\text{NH}_3(2,2)$ (23,723 ГГц),

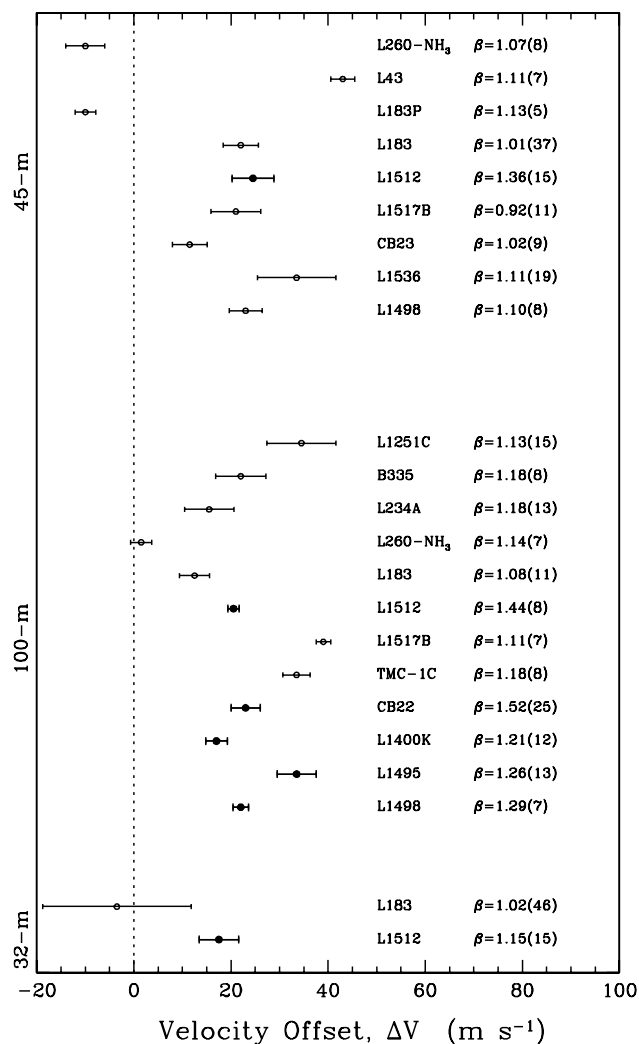


Рис. 1. Доплеровский сдвиг вращательных линий молекул относительно инверсионного перехода $\text{NH}_3(1,1)$ (для NRO – 45 м использован переход $\text{N}_2\text{H}^+ J=1-0$, для остальных телескопов — переход $\text{HC}_3\text{N } J=2-1$). Параметр β равен отношению ширины линии в аммиаке к ширине соответствующей вращательной линии. Для чисто тепловых движений отношение ширины линии NH_3 к ширине в HC_3N , $\beta = 1,7$; для турбулентного случая $\beta = 1$.

а также вращательных линиях $\text{HC}_3\text{N } J=5-4$ (45,490 ГГц), $\text{HC}_3\text{N } J=9-8$ (81,881 ГГц), $\text{HC}_5\text{N } J=9-8$ (23,964 ГГц), $\text{HC}_5\text{N } J=17-16$ (45,265 ГГц), $\text{CCS } J_N=2_1-1_0$ (22,344 ГГц), $\text{CCS } J_N=4_3-3_2$ (45,379 ГГц), $\text{CCS } J_N=7_6-6_5$ (81,505 ГГц), $\text{CCS } J_N=8_7-7_6$ (93,870 ГГц), $^{13}\text{CS } J=2-1$ (92,494 ГГц) и $\text{N}_2\text{H}^+ J=1-0$ (93,174 ГГц). И хотя все эти наблюдения имеют крайне важное значение для определения физических условий в исследованных нами объектах и даже хорошо согласуются с данными, полученными на 100-метровом зеркале

в Эффельсберге, мы не можем пока их рассматривать как достаточно надежные либо по причине недостаточно высокой точности частот именно лабораторных спектров CCS и N_2H^+ , либо недостаточно высокого отношения S/N при измерениях HC_3N . Т.о. фактически все наши оценки вариаций $\Delta\mu/\mu$ опираются лишь на измерения, полученные при помощи 100-метрового телескопа.

В ходе выполнения работ в 2009 – 2010 гг. большая часть финансирования данного проекта,

травовые спектрометры с субдоплеровским разрешением, а также в университете г. Болонья (Италия). Мы и дальше планируем продолжать наши совместные исследования с зарубежными коллегами. Однако, создание и запуск аналогичного спектрометра в ИПФ РАН явилось, несомненно, одним из главных результатов выполнения работ в рамках данного гранта РФФИ. Внешний вид созданной установки приведен на рис. 2.

Первые тестовые испытания созданного спектрометра в линиях вращательных перехо-



Рис. 2. Внешний вид субдоплеровского спектрометра мм и суб-мм диапазонов длин волн на основе провала Лэмба, созданного в ИПФ РАН при поддержке РФФИ.

а также частично средств развития материально-технической базы ИПФ РАН при поддержке РФФИ, совместного гранта РФФИ–ННИО № 09-02-91343 и программы IV.12 ОФН РАН были потрачены на разработку и изготовление собственного высокочувствительного спектрометра на основе провала Лэмба. К сожалению, до сегодняшнего времени все наиболее прецизионные измерения проводились нами за рубежом в Кильском и Кельнском университетах (Германия), где с нашей помощью были созданы субмиллиме-

тров молекулы OCS в диапазоне 85–109 ГГц и $\text{CO } J=1-0$ на 115 ГГц показали согласие с ранее выполненными измерениями лучше 1 кГц. Достигнутая ширина лэмбовского провала (~5–10 кГц) в несколько раз уже по сравнению со значением на субдоплеровском спектрометре, созданном нами в университете г. Киль под руководством А. Гварнери (Golubiatnikov et al., 2005). Типичный пример записи линии с провалом Лэмба на второй гармонике частоты модуляции и его аппроксимация модельным про-

филем, позволяющим определить центр линии и ее ширину, показаны на рис. 3.

Что же касается международного сотрудничества в данной области, то в настоящее время

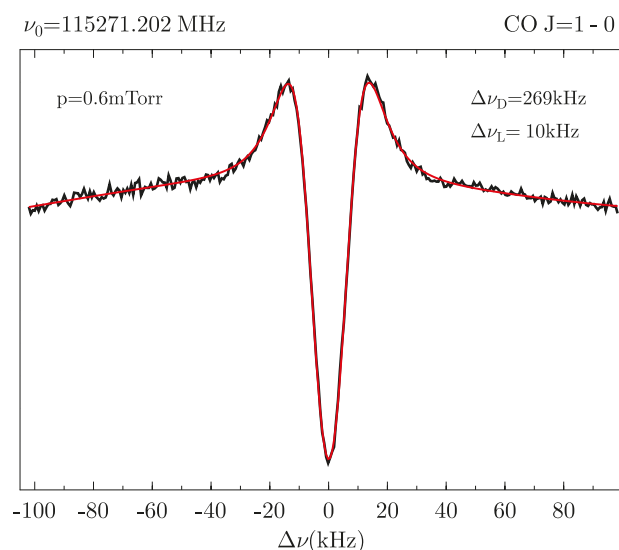


Рис. 3. Запись провала Лэмба во вращательном переходе $J=1-0$ молекулы CO. Подгонка экспериментальных данных соответствует частоте линии, равной 115 271.20214(4) МГц. Табличное значение, согласно Winnewisser G., Belov S.P. et al., 1997, J. Mol. Spectrosc. 184, 468, равно 115 271.20202(6) МГц. Восстановленная из аппроксимации ширина лэмбовского провала при давлении газа 0,6 мТорр, скорректированная на модуляцию частоты, равна 10 кГц, доплеровская ширина линии при тех же условиях равна 269 кГц.

мы нами при помощи усовершенствованного спектрометра на Техническом факультете университета г. Киль выполнена лабораторная субдоплеровская спектроскопия с провалом Лэмба большого количества инверсионно-вращательных переходов молекул NH_2D , NHD_2 и ND_3 (а также ряда других молекул), позволявшая примерно на два порядка повысить точность измерения центров линий по сравнению с традиционными доплеровскими измерениями. Достигнута точность измерения частот ~ 1 кГц. Кроме сверхтонкого расщепления, обусловленного электрическим квадрупольным моментом ядра азота, для молекул NH_2D впервые частично измерено расщепление, обусловленное дейтерием. Эти измерения представляют большой интерес, т.к. позволяют проводить исследования вариаций $\Delta\mu/\mu$ по наблюдениям разных линий одной и той же молекулы. Из-за

смешивания вращательных и инверсионных степеней свободы коэффициенты чувствительности для частично дейтерированного аммиака сильно зависят от квантовых чисел. В результате, исследования вариаций $\Delta\mu/\mu$ можно проводить, например, по одновременным измерениям линий $\text{NH}_2\text{D } J_{\text{KaKc}}=1_{1,1}-1_{0,1}$ в орто и пара состояниях на частотах 85,9 ГГц и 110,2 ГГц. Соответствующие коэффициенты чувствительности линий NH_2D и ND_2H рассчитаны нами в работе Kozlov et al. (2010).

Благодаря измерениям в холодной струе вращательных переходов от $J=1-0$ до $J=3-2$ молекул HNC , DNC , H^{15}NC , D^{15}NC , H^{13}NC , выполненным в Гарварде (MIT, США), нам удалось более чем на порядок повысить точность частот и параметров сверхтонкого расщепления данных молекул. Для ряда молекул константы сверхтонкого расщепления определены впервые. Найдено, что частота перехода $\text{H}^{15}\text{NC } J=1-0$, 88865,6966(14) МГц, определенная из лабораторных измерений в струе, находится в превосходном согласии со значением, полученным и опубликованным ранее исходя из радиоастрономических измерений, 88865,6964(26) МГц (Lapinov 2006).

В результате измерений в резонаторе с холодной струей университета г. Ганновер в январе 2010 г. мы не только подтвердили лабораторную точность частот инверсионных переходов $\text{NH}_3(1,1)$ и $(2,2)$ и вращательных линий $\text{HC}_3\text{N } J=1-0$ и $J=2-1$ с точностью $\sim 0,2$ кГц, но и улучшили примерно на 2 порядка лабораторные точности частот, включая параметры сверхтонкой структуры, для HC^{13}CCN и HCC^{13}CN в линиях $J=1-0$ и $J=2-1$, а также для H^{13}CCCN и HCCC^{15}N в линиях $J=1-0$, $J=2-1$ и $J=3-2$.

Заключение

Т.о. анализ измерений, выполненных в ходе работ по проекту, показал, что наблюдения темных межзвездных облаков могут указывать на возможность систематического доплеровского сдвига частот вращательных линий $\text{HC}_3\text{N } J=2-1$ относительно инверсионного перехода $\text{NH}_3(1,1)$. Величина сдвига составила $\Delta V = V_{\text{rot}} - V_{\text{inv}} = (27,7 \pm 3,8_{\text{stat}} \pm 2,8_{\text{sys}})$ м/с. Если данный сдвиг действительно вызван изменением частот переходов из-за вариаций в отношении массы электрона к массе протона, то $\Delta\mu/\mu = (2,6 \pm 0,4_{\text{stat}} \pm 0,3_{\text{sys}}) \cdot 10^{-8}$. Если же рассматривать $|\Delta V| < 30$ м/с только как консервативный верхний

предел, то $|\Delta\mu/\mu| < 3 \cdot 10^{-8}$, что на два порядка точнее, чем космологические оценки параметра μ . В ходе дальнейших работ нами будут продолжены исследования возможных вариаций фундаментальных констант на основе астрономических и лабораторными измерений. Благодаря созданному при поддержке РФФИ субдоплеровскому спектрометру будет выполнено большое количество лабораторных исследований спектров астрофизически важных молекул, которые позволяют существенно повысить разрешение и точность

измерений частот, а также параметров сверхтонкого расщепления.

Авторы выражают глубокую благодарность большому кругу лиц, вовлеченных в выполнение данного проекта. Неоценимый вклад оказали при радиоастрономических измерениях Р. Molaro (INAF, Trieste), С. Henkel (MPIfRA, Bonn), Т. Sakai (NRO, Nobeyama), а при лабораторных исследованиях — Н. Bechtel (MIT, USA), J.-U. Grabow (Hannover University) и А. Guarnieri (Kiel University).

Литература

1. Blatt, S., Ludlow, A. D., Campbell, G. K., et al. 2008, Phys. Rev. Lett., 100, 140801
2. Brax, P. 2009, in «Gif Lectures on Cosmic Acceleration» (arXiv: astro-ph/0921.3610)
3. Brax, P., van de Bruck, C., Davis, A.-C., Khoury, J., and Weltman, A. 2004, Phys. Rev. D, 70, 123518
4. Calmet, X., and Fritzsche, H. 2002, Eur. Phys. J. C, 24, 639
5. Casseli, P., and Dore, L. 2005, A&A, 433, 1145
6. Chin, C., Flambaum, V. V., and Kozlov, M. G. 2009, NJPh, 11, 055048
7. De Leon, R. L., Muentner, J. S. 1985, J. Chem. Phys., 82, 1702
8. Dine, M., Nir, Y., Raz, G., and Volansky, T. 2003, Phys. Rev. D, 67, 015009
9. Flambaum, V. V., and Kozlov, M. G. 2007, Phys. Rev. Lett., 98, 240801
10. Flambaum, V. V., Leinweber, D. B., Thomas, A. W., and Young, R. D. 2004, Phys. Rev. D, 69, 115006
11. Golubiatnikov, G. Yu., Lapinov, A. V., Guarnieri, A. and Knöchel, R. 2005, J. Mol. Spectrosc., 234, 190
12. Henkel, C., Menten, K. M., Murphy, M. T., et al. 2009, A&A, 500, 725
13. Khoury, J., and Weltman, A. 2004, Phys. Rev. Lett. 93, 171104
14. King, J. A., Webb, J. K., Murphy, M. T., and Carswell, R. F. 2008, Phys. Rev. Lett., 101, 251304
15. Kozlov, M. G., Lapinov, A. V., Levshakov, S. A. 2010, J. Phys. B., 43, 074003
16. Kukulich, S.G. 1967, Phys. Rev., 156, 83
17. Langacker, P., Segre, G., and Strassler, M. 2002, J. Phys. Lett. B, 528, 121
18. Lapinov, A. V. 1999, in Abstract Book of IAU Symp.197, Astrochemistry: From Molecular Clouds to Planetary Systems, ed. J.-S. Kim et al. — Korea Astron. Obs., 99
19. Lapinov, A. V. 2006, in Proc. of SPIE (15th Symp. on High-Resolution Molecular Spectroscopy), ed. Ponomarev Yu. N. et al., v.6580, 658001
20. Levshakov, S. A., Centurion, M., Molaro, P., and D’Odorico, S. 2005, A&A, 434, 827
21. Levshakov, S. A., Molaro P., Lapinov A. V., et al. 2010, A&A, 512, A44
22. Martins, C. J. A. P. 2008, in «Precision Spectroscopy in Astrophysics»,
23. eds. N. C. Santos, L. Pasquini, A. C. M. Correia, and M. Romaniello (Springer-Verlag, Berlin), p.89
24. Mota, D. F., and Shaw, D. J. 2007, Phys. Rev. D, 75, 063501
25. Olive, K. A., and Pospelov, M. 2008, Phys. Rev. D, 77, 043524
26. Peebles, P. J. E., and Ratra, B. 2003, Rev. Mod. Phys., 75, 559
27. Perlmutter, S., Aldering, G., della Valle, M., et al. 1998, Nature, 391, 51
28. Quast, R., Reimers, D., and Levshakov, S. A. 2004, A&A, 415, L7
29. Riess, A. G., Filippenko, A. V., Challis, P., et al. 1998, AJ, 116, 1009
30. Rosenband, T., Hume, D. B., Schmidt, P. O., et al. 2008, Science, 319, 1808
31. Shelkovnikov, A., Butcher, R. J., Chardonnet, C., and Amy-Klein, A. 2008, Phys. Rev. Lett., 100, 150801
32. Thompson, R. I., Bechtold, J., Black, J. H., et al. 2009, ApJ, 703, 1648
33. Will, C. M. 2001, Living Rev. Rel., 4, 4 (arXiv: gr-qc/0103036)