Письма в ЖЭТФ, том 121, вып. 8, с. 619 – 624

Указание на вариацию отношения масс электрона и протона в пределах Галактики

Ю. С. Воротынцева[1)], С. А. Левшаков

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, 194021 С.-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 18 марта 2025 г.
После переработки 21 марта 2025 г.
Принята к публикации 21 марта 2025 г.

Близкое (≈ 100 пк) и далекое (≈ 8.7 кпк) относительно Галактического центра молекулярные облака SgrB2(N) и Orion-KL демонстрируют различные значения фундаментальной физической постоянной $\mu = m_{\rm e}/m_{\rm p}$ – отношение массы электрона к массе протона. Измеренная разница частот между эмиссионными линиями метанола (CH_3OH), – $J_{K_u} \to J_{K_\ell} = 6_3 \to 5_2 A^+$ 542000.981 МГц, $6_3 \to 5_2 A^-$ 542081.936 МГц, и $8_0 \to 7_{-1}E$ 543076.194 МГц, – наблюдавшимися на космической обсерватории Herschel в SgrB2(N) и Orion-KL соответствует (Sgr-Ori): $\Delta\mu/\mu = (-3.7 \pm 0.5) \times 10^{-7}$ (указана ошибка 1σ). В то же время сравнение тех же линий метанола в Orion-KL с лабораторными частотами не показывает никаких значимых изменений μ (Ori-lab): $\Delta\mu/\mu = (-0.5 \pm 0.6) \times 10^{-7}$, а сравнение между SgrB2(N) и лабораторными линиями указывает на меньшее значение μ вблизи Галактического центра (Sgr-lab): $\Delta\mu/\mu = (-4.2 \pm 0.7) \times 10^{-7}$. Уменьшенное значение μ в SgrB2(N) не объясняется известными систематическими эффектами и требует дополнительных исследований

DOI: 10.31857/S0370274X25040123, EDN: ZTYUGL

1. Введение. Прецизионные измерения фундаментальных физических постоянных остаются на протяжении долгого времени актуальной задачей как для лабораторных, так и для космических исследований. В земных условиях в экспериментах с атомными часами, и, в последнее время, с ядерными часами были достигнуты необычайно жесткие ограничения на изменения со временем безразмерных физических констант – постоянной тонкой структуры ($\alpha = e^2/\hbar c$) на уровне 10^{-19}/год, и отношения массы электрона к массе протона ($\mu = m_e/m_p$) на уровне 10^{-16}/год. Дифференциальные измерения этих величин в различных точках земной орбиты в условиях изменяющегося гравитационного потенциала Солнца также не выявили заметных отклонений в частотах атомных часов на уровне 10^{-8}. Обширный материал по этой теме был собран и проанализирован в недавнем обзоре [1].

Пространственно-временные изменения физических постоянных предсказаны в различных теориях, расширяющих границы Стандартной модели (СМ) физики элементарных частиц. Необходимость в таком расширении проистекает, в частности, из попыток объяснить природу темного вещества.

Поскольку не удалось до сих пор обнаружить частицы темной материи, были выдвинуты предположения о скалярных полях, которые могли бы проявлять себя как темная материя. Эти поля могут модулировать массы элементарных частиц – электрона и кварков, что, в свою очередь, должно приводить к небольшим вариациям μ [2–6]. Такие изменения могут влиять на структуру энергетических уровней в молекулах, а значит, могут быть зафиксированы экспериментально.

Поиск пространственно-временных изменений μ связан с оценкой величины

$$\Delta\mu/\mu = (\mu_{\rm obs} - \mu_{\rm lab})/\mu_{\rm lab}, \qquad (1)$$

где $\mu_{\rm lab}$ – лабораторное значение параметра μ, а $\mu_{\rm obs}$ – наблюдаемое в астрономических объектах.

Такие сравнения возможны ввиду того, что электронно-колебательно-вращательные переходы в молекулярных спектрах имеют специфическую зависимость от локального значения μ, индивидуальную для каждого перехода [7, 8]. Эта зависимость характеризуется безразмерным коэффициентом чувствительности Q, показывающим реакцию конкретного молекулярного перехода с частотой f на небольшое изменение μ:

$$Q = \frac{df/f}{d\mu/\mu}, \qquad (2)$$

где df/f – относительный сдвиг частоты, а $d\mu/\mu$ определяется формулой (1). Величины Q вычисля-

[1)]e-mail: j.s.vorotyntseva@mail.ioffe.ru

ются квантовомеханическими методами для перехода $f = E_u - E_\ell$ с помощью так называемого q-фактора [9]:

$$\Delta f = q\frac{\Delta\mu}{\mu}\,, \tag{3}$$

где Δf – изменение частоты, вызванное небольшой вариацией μ, $q = q_u - q_\ell$ (в см$^{-1}$), и

$$Q = \frac{q}{f}. \tag{4}$$

Для оценки гипотетических вариаций μ необходимо использовать пары линий с разными коэффициентами чувствительности Q_1 и Q_2, наблюдаемыми в одном и том же молекулярном облаке:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{V_1 - V_2}{c(Q_2 - Q_1)}, \tag{5}$$

где V_1 и V_2 – измеренные радиальные скорости, а c – скорость света. Отметим, что переход в шкалу скоростей из шкалы частот осуществляется по радиоастрономическому соотношению

$$\frac{V}{c} = \frac{f_{\rm lab} - f_{\rm sky}}{f_{\rm lab}}. \tag{6}$$

В настоящее время самые жесткие ограничения на μ-вариации в Галактическом диске были получены из наблюдений инверсионного перехода аммиака NH_3 ($Q = 4.46$ [10]) и чисто вращательных переходов ($Q = 1$) HC_3N, HC_5N и HC_7N: $\Delta\mu/\mu < 7\times10^{-9}$ [11]. Другой перспективной молекулой для таких целей оказался метанол CH_3OH и его изотопологи – метанольные переходы имеют высокие коэффициенты чувствительности обоих знаков [9, 12, 13]. Ограничения на μ-вариации на основе наблюдений метанола в Галактике установлены на уровне $\Delta\mu/\mu < 1\times10^{-8}$ [14], а для внегалактических объектов (на красном смещении $z = 0.89$) $\Delta\mu/\mu < 5\times10^{-8}$ [15].

Таким образом, предполагаемое влияние гипотетических скалярных полей на массы элементарных частиц выявлено не было на данном уровне точности.

2. Методы. Наиболее существенной проблемой в достижении более высокого уровня точности ($\sim 10^{-9}$), являются ошибки лабораторных частот, которые для линий метанола – наиболее перспективной молекулы для оценок вариаций μ – достигают значений 50 кГц в высокочастотном диапазоне ($f \sim 540$ ГГц). Чтобы достичь уровень 10^{-9}, точность должна быть порядка нескольких кГц, получение которой проблематично в лабораторных измерениях. В то же время астрономические наблюдения позволяют достичь достаточно высокую точность, приемлемую для прецизионных измерений $\Delta\mu/\mu$ на уровне 10^{-9}.

Чтобы минимизировать зависимости от лабораторных частот, можно использовать слегка модифицированный подход для оценок μ-вариаций, который заключается в следующем. Предлагается сравнивать разность измеренных частот $f_1 - f_2$ одних и тех же пар линий метанола с различными коэффициентами чувствительности Q_1 и Q_2, наблюдаемых в двух астрономических объектах (a) и (b) на различных галактоцентрических расстояниях. Из соотношений (1)–(4) следует, что

$$\frac{\Delta\mu_{a,b}}{\mu} = \frac{\mu_a - \mu_b}{\mu_{\rm lab}} = \frac{(f_{1,a} - f_{2,a}) - (f_{1,b} - f_{2,b})}{\Delta q}, \tag{7}$$

где $f_{1,a}, f_{2,a}$ и $f_{1,b}, f_{2,b}$ – наблюдаемые частоты переходов в сопутствующей системе отсчета (исправленные за радиальную скорость V_{LSR} объекта), а $\Delta q = q_1 - q_2$ – разность q-факторов сравниваемых линий. Такой метод оценки позволяет использовать только астрономические частоты, не прибегая к лабораторным измерениям.

3. Наблюдения и параметры спектров Herschel. Спектры, используемые в настоящей работе, были взяты из архива наблюдений космической обсерватории Herschel[2)] [16]. Наблюдения проводились при помощи инструмента HIFI (Hetorodyne Instrument for the Far-Infrared) с широкополосным спектрометром WBS (Wide–Band Spectrometer) в режиме сканирования Spectral Scan. Этот режим включал в себя наблюдения с перестройкой частоты локального осциллятора (LO), что позволяло получать после разделения нижней (LSB) и верхней (USB) полосы частот единый спектр объекта в широком спектральном диапазоне. Технические характеристики наблюдаемого диапазона 480–560 ГГц (полоса 1a) следующие: размер апертуры телескопа в центре диапазона – $40''$, ширина промежуточной полосы частот (IF) – 4 ГГц и спектральное разрешение (ширина канала) $\Delta_{\rm ch} \sim 0.3$ км/с (500 кГц). Медианная ошибка калибровки шкалы частот для каждой их четырех ПЗС линеек спектрометра WBS не превашает 50 кГц при практически нулевом среднем значении сдвига центральной частоты спектральной линии для различных частот LO в тестовом режиме [17]. Также не было выявлено никаких трендов внутри промежуточной полосы частот при преобразовании номеров каналов ПЗС линеек в частоты.

[2)] Herschel является космической обсерваторией ESA, оснащенной инструментами, которые разрабатывались ведущими европейскими центрами при значительном участии NASA.

Из всех наблюдаемых телескопом Herschel астрономических объектов мы отобрали два – Orion-KL и SgrB2(N). Orion-KL является большим молекулярным комплексом в Орионе, где активно происходит звездообразование. SgrB2(N) – массивный молекулярный комплекс в Стрельце, находящийся вблизи центра нашей Галактики, в котором никогда ранее не проводились оценки $\Delta\mu/\mu$. Координаты объектов – прямое восхождение ($R.A.$) и склонение ($Dec.$), а также расстояние от центра Галактики (D_{GC}) отображены в табл. 1.

Таблица 1. Координаты наблюдаемых объектов [16]

Объект	$R.A.$ (J2000)	$Dec.$ (J2000)	D_{GC}, кпк
Orion-KL	$05^h35^m14.36^s$	$-05°22'33.63''$	8.7
SgrB2(N)	$17^h47^m20.06^s$	$-28°22'18.33''$	0.1

Мы использовали спектры высокого уровня обработки (2.5) из архива Herschel. Уровень обработки 2.5 подразумевает перевод в шкалы антенных температур T_A^* (в кельвинах) и наблюдаемых частот $f_{\rm sky}$ (в ГГц) [18]. Спектры для каждого астрономического объекта предоставляются в двух поляризациях – горизонтальной H и вертикальной V. Мы вычли континнум из каждого такого спектра и усреднили их с весами, обратно пропорциональными квадратам уровня шума каждого из этих спектров.

4. Вычисленные параметры линий. Из спектральных обзоров Herschel известно, что микроволновые спектры Orion-KL и SgrB2(N) [19, 20] имеют богатый молекулярный состав, особенно в полосе частот 480–560 ГГц – от простых молекул (например, CO), до сложных органических, таких как метанол CH_3OH. Для наших целей мы отобрали по 3 близких линии метанола в спектрах Orion-KL и SgrB2(N), попадающих в один спектральный диапазон IF = 4 ГГц – две линии на 542 ГГц и одна – на 543 ГГц. Такой выбор позволяет минимизировать возможные инструментальные систематические ошибки, связанные с калибровками спектрометра WBS. Параметры отобранных линий метанола представлены в табл. 2: переход, который можно описать двумя квантовыми числами – полный угловой момент J и его проекция на ось симметрии молекулы K для верхнего u и нижнего ℓ уровней, лабораторная частота $f_{\rm lab}$, сила линии $S\mu_e^2$, энергия нижнего уровня E_ℓ [21] и коэффициент чувствительности Q [22].

Из таблицы 2 видно, что переходы имеют близкие энергии нижних уровней, что характерно для переходов, образующихся в одной и той же области молекулярного облака.

Для описания формы профиля линий мы использовали многокомпонентную модель, состоящую из

Таблица 2. Параметры отобранных переходов CH_3OH. В скобках указаны лабораторные ошибки в последних цифрах

Переход $J_{K_u} \to J_{K_\ell}$	$f_{\rm lab}$, МГц	$S\mu_e^2$, D^2	E_ℓ, см$^{-1}$	Q
$6_3 \to 5_2A^+$	542000.981(50)	5.5658	50.413	0.0
$6_3 \to 5_2A^-$	542081.936(50)	5.5638	50.411	0.0
$8_0 \to 7_{-1}E$	543076.194(50)	4.1354	49.035	1.7

набора гауссиан. При этом выбиралось минимальное число гауссовских компонент, при котором обеспечивается значение $\chi^2_\nu \lesssim 1$. Результирующие огибающие профили показаны на рис. 1 красным цветом: левая панель – наблюдаемые линии в SgrB2(N), правая панель – в Orion-KL. Для каждой линии указана лабораторная частота, уровень шума rms, отношение сигнала к шуму SNR и значение χ^2_ν. Параметры наблюдаемых линий для каждого источника перечислены в табл. 3 – частота максимума огибающего контура $f_{\rm sky}$, соответствующая радиальная скорость V_{LSR} и полная ширина профиля линии на полувысоте $FWHM$.

Также в табл. 3 перечислены частоты в сопутствующей системе отсчета f_c – наблюдаемые частоты, приведенные на среднее значение радиальной скорости, определенное по линиям $6_3{-}5_2A^+$ и $6_3{-}5_2A^-$, которые имеют нулевые коэффициенты чувствительности Q. Для SgrB2(N) значение средней скорости $\langle V_a\rangle = 65.12(2)$ км/с, для Orion-KL – $\langle V_b\rangle = 8.15(2)$ км/с.

В последней колонке табл. 3 дана оценка ожидаемой точности определения положения линии. Ожидаемая статистическая ошибка центра одиночной линии гауссовского профиля определяется выражением [23]

$$\sigma_f = 0.7\frac{\Delta_{\rm ch}}{\rm SNR}\sqrt{{\rm FWHM}/\Delta_{\rm ch}}. \qquad (8)$$

Из таблицы 3 видно, что аналитические оценки ошибки по формуле (8) практически совпадают с численными, указанными в скобках во второй колонке, которые были получены методом $\Delta\chi^2$ для огибающих кривых.

5. Оценки $\Delta\mu/\mu$ и обсуждение. Как было отмечено выше, для оценки величины $\Delta\mu_{a,b}/\mu$ были выбраны два массивных молекулярных облака – SgrB2(N) (объект a) и Orion-KL (объект b). Оценки на μ-вариации получены из сравнения разностей измеренных частот линий метанола, приведенных в сопутствующую систему отсчета объектов a и b. Переходы с нулевым коэффициентом чувствительности на частотах 542000 и 542081 МГц, которые сравнивались с переходом на 543076 МГц с $Q = 1.7$, привели к следующим результатам:

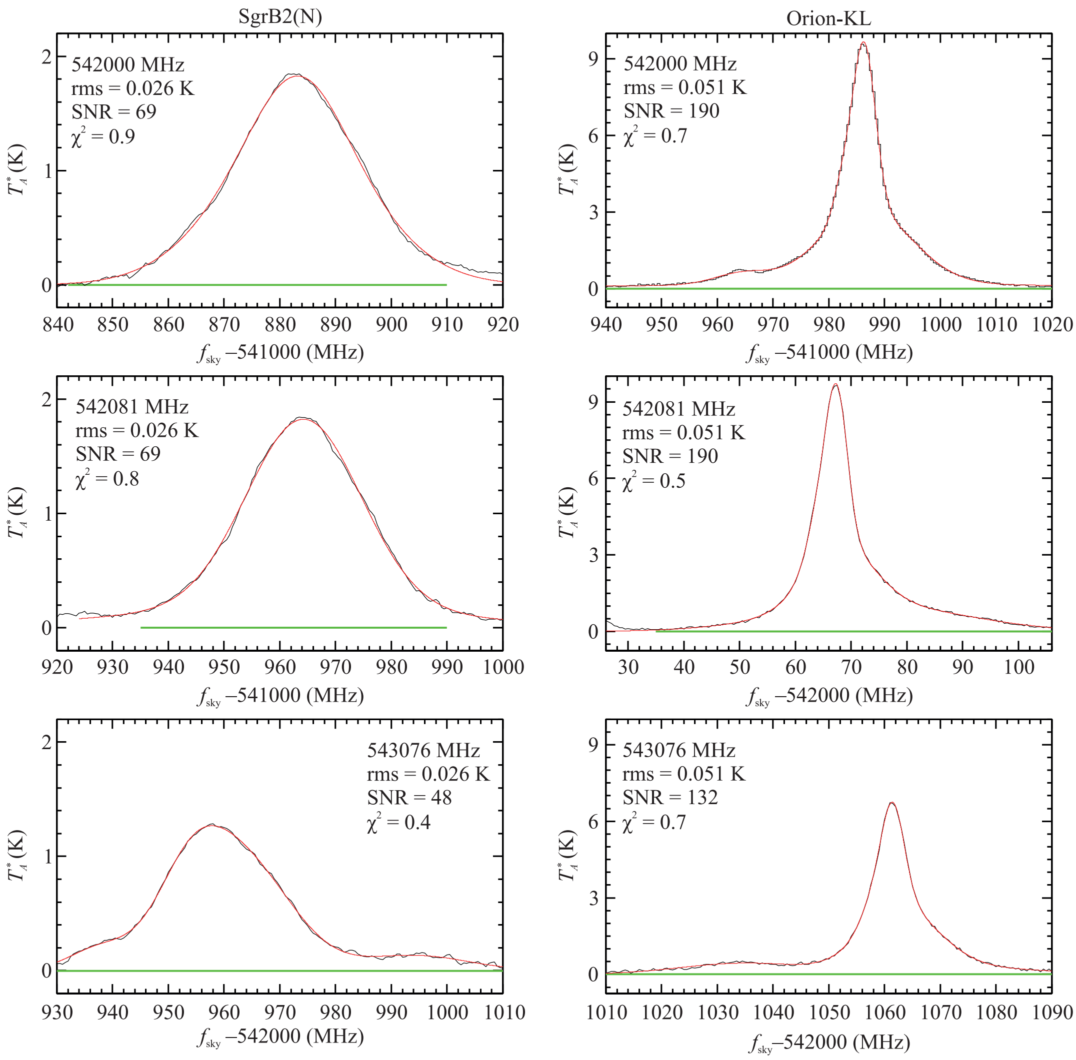

Рис. 1. (Цветной онлайн) Линии метанола в направлении двух источников – SgrB2(N) и Orion-KL, полученные на космической обсерватории Herschel. Черным цветом показаны оригинальные спектры, красным – модельные. Горизонтальные зеленые линии отмечают диапазоны, использованные в минимизации χ^2. Параметры линий перечислены в табл. 3.

$$\frac{\Delta\mu_{a,b}}{\mu} = (-3.2 \pm 0.7) \times 10^{-7} \tag{9}$$

для пары линий 543076 и 542000 МГц, и

$$\frac{\Delta\mu_{a,b}}{\mu} = (-4.2 \pm 0.7) \times 10^{-7} \tag{10}$$

для пары линий 543076 и 542081 МГц.

Это дает среднее значение

$$\langle \Delta\mu_{a,b}/\mu \rangle = (-3.7 \pm 0.5) \times 10^{-7}. \tag{11}$$

Результирующая ошибка $\sigma_{\Delta\mu/\mu}$ в данном случае вычисляется как квадратный корень из суммы квадратов ошибок определения измеренных частот (см. пятую колонку в табл. 3), деленный на разность q-факторов Δq (данное значение принимается известным точно). Ошибки определения средних скоростей $\langle V_a \rangle$ и $\langle V_b \rangle$ при переводе наблюдаемых частот в сопутствующие системы отсчета не учитывались, так как они не являются доминирующими в общем балансе ошибок $\sigma_{\Delta\mu/\mu}$.

Другой возможный источник ошибок – ошибка калибровки $\sigma_{\mathrm{sys}} \lesssim 50$ кГц, о которой шла речь выше. В нашем случае сравниваются не абсолютные значения частот, а их разности. Поэтому ошибка калибровки нивелируется, так как частоты попадают в одну полосу IF = 4 ГГц.

Таким образом, полученный результат $\langle \Delta\mu_{a,b}/\mu \rangle = (-3.7 \pm 0.5) \times 10^{-7}$ свидетельствует о наличии сигнала на уровне 7.5σ. Даже если

Таблица 3. Параметры наблюдаемых линий. В скобках указаны статистические ошибки в последних цифрах (1σ)

Объект	$f_{\rm sky}$, МГц	V_{LSR}, км/с	FWHM, МГц	f_c, МГц	σ_f, кГц
Orion-KL	541986.222(8)	8.16(3)	7.3	542000.964(8)	7
	542067.209(8)	8.15(3)	7.2	542081.953(8)	7
	543061.376(12)	8.18(3)	7.7	543076.147(12)	10
SgrB2(N)	541883.185(38)	65.16(4)	26.1	542000.921(38)	37
	541964.243(37)	65.09(3)	25.6	542081.996(37)	36
	542957.837(51)	65.34(4)	23.7	543075.806(51)	50

разности частот в этих измерениях подвержены систематическим сдвигам ~ 50 кГц, то статистическая значимость обнаруженного сигнала не пропадает: $\langle \Delta\mu_{a,b}/\mu \rangle = (-3.7 \pm 0.7) \times 10^{-7} (5.3\sigma)$.

Если применять другой метод оценки $\Delta\mu/\mu$ (см. формулу (5)), отдельно для SgrB2(N) и для Orion-KL, получаются следующие средние значения:

$$\langle \Delta\mu/\mu \rangle_a = (-4.2 \pm 0.7) \times 10^{-7}, \qquad (12)$$

$$\langle \Delta\mu/\mu \rangle_b = (-5 \pm 6) \times 10^{-8}, \qquad (13)$$

которые указывают на то, что в Orion-KL сигнал не обнаруживается, а в SgrB2(N) видно изменение μ на уровне 6σ.

Отметим также, что наиболее жесткие верхние пределы на $\Delta\mu/\mu$ (см. выше), были установлены ранее по наблюдениям молекулярных облаков в диске Галактики, находящихся на относительно близких расстояниях к Солнечной системе, $D_{GC} = 8.5{-}8.7$ кпс (галактоцентрическое расстояние Солнечной системы – 8.34 кпс [24]). В настоящей работе сравнивается относительно близкий объект к Солнечной системе Orion-KL ($D_{GC} = 8.7$ кпс), для которого сигнал на уровне 10^{-8} не фиксируется, и SgrB2(N) в центре Галактики, показывающий меньшее отношение $\Delta\mu/\mu$. Поскольку считается, что отношение плотности барионной материи ρ_{BM} к плотности темной материи ρ_{DM} меняется вдоль Галактического радиуса, и ближе к центру Галактики $\rho_{BM}/\rho_{DM} > 1$, а на периферии $\rho_{BM}/\rho_{DM} < 1$, можно предположить, что обнаруженный сигнал коррелирует с распределением темной материи.

В заключение сформулируем основные результаты работы. Обнаружена статистически значимая вариация фундаментальной физической постоянной μ на уровне 7.5σ, по сравнению одних и тех же линий метанола CH_3OH в двух объектах, разнесенных приблизительно на 9 кпс – SgrB2(N), локализованного в центре Галактики, и Orion-KL, находящегося ближе к ее периферии. Измеренный относительный сдвиг спектральных линий в метаноле не объясняется известными систематическими эффектами, и может быть интерпретирован как проявление взаимодействия темной материи с барионным веществом. Однако для подтверждения данного предположения необходимо проведение независимых измерений $\Delta\mu/\mu$ в других источниках в направлениях на Галактический центр и антицентр.

Финансирование работы. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института в рамках темы Государственного задания Физико-технического института имени А. Ф. Иоффе номер FFUG-2024-0002. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. J.-P. Uzan, arXiv:2410.07281 (2024).
2. R. Onofrio, Phys. Rev. D **82**, 065008 (2010).
3. F. D. Albareti, A. L. Maroto, and F. Prada, Phys. Rev. D **95**, 044030 (2017).
4. S. Alexander, J. D. Barrow, and J. Magueijo, CQG **33**, 14LT01 (2016).
5. D. Antypas, O. Tretiak, A. Garcon, R. Ozeri, G. Perez, and D. Budker, Phys. Rev. Lett. **123**(14), 141102 (2019).
6. Y. V. Stadnik and V. V. Flambaum, Phys. Rev. Lett. **115**, 201301 (2015).
7. D. A. Varshalovich and S. A. Levshakov, JETP Lett. **58**, 237 (1993).
8. M. G. Kozlov and S. A. Levshakov, Ann. Phys. **525**, 452 (2013).
9. S. A. Levshakov, M. G. Kozlov, and D. Reimers, ApJ **738**, 26 (2011).
10. V. V. Flambaum and M. G. Kozlov, Phys. Rev. Lett. **98**, 240801 (2007).
11. S. A. Levshakov, C. Henkel, D. Reimers, and P. Moralo, Mem. S. A. It. **85**, 90 (2014).
12. P. Jansen, L. H. Xu, I. Kleiner, W. Ubachs, and H. L. Bethlem, Phys. Rev. Lett. **106**, 100801 (2011).
13. J. S. Vorotyntseva, M. G. Kozlov, and S. A. Levshakov, MNRAS **527**, 2750 (2024).

14. J. S. Vorotyntseva and S. A. Levshakov, JETP Lett. **119**(9), 649 (2024).
15. N. Kanekar, W. Ubachs, K. M. Menten, J. Bagdonaite, A. Brunthaler, C. Henkel, S. Muller, H. L. Bethlem, and M. Dapra, MNRAS **488**, L104 (2015).
16. https://archives.esac.esa.int/hsa/whsa/.
17. I. M. Avruch, Cycle38 Frequency Calibration Tests, Tech. Rep. HIFI-ICC-TN-2015-002, SRON Groningen (2011).
18. D. Teyssier, I. Avruch, S. Beaulieu, J. Braine, A. Marston, P. Morris, M. Olberg, M. Rengel, and R. Shipman, The Heterodyne Instrument For The Far Infrared (HIFI) Handbook, HERSCHEL-HSC-DOC-2097, version 2.1 (2017), 157 p.
19. N. R. Crockett, E. A. Bergin, J. L. Neill, C. Favre, G. A. Blake, E. Herbst, D. E. Anderson, and G. E. Hassel, ApJ **806**, 239 (2015).
20. J. L. Neill, E. A. Bergin, D. C. Lis et al. (Collaboration), ApJ **789**, 8 (2014).
21. L.-H. Xu and F. J. Lovas, J. Phys. Chem. Ref. Data **26**, 1 (1997).
22. P. Jansen, L.-H. Xu, I. Kleiner, W. Ubachs, and H. L. Bethlem, Phys. Rev. Lett. **106**, 100801 (2011), Suppl. material.
23. D. A. Landman, R. Roussel-Dupre, and G. Tanigawa, ApJ **261**, 732 (1982).
24. P. Mege, D. Russeil, A. Zavagno et al. (Collaboration), A&A **646**, A74 (2021).