Письма в ЖЭТФ, том 124, вып. 7, с. 514 – 522 © 2026 г. 10 октября

Ограничения на μ-вариации по тепловым линиям метанола CH_3OH в Галактике на галактоцентрических расстояниях $1.5 < D_{GC} < 13$ кпс

А. И. Штейн[+], *Ю. С. Воротынцева*[+*1)], *С. А. Левшаков*[*]

[+] *Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ", 197376 С.-Петербург, Россия*

[*] *Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, 194021 С.-Петербург, Россия*

Поступила в редакцию 14 июля 2026 г.
После переработки 30 августа 2026 г.
Принята к публикации 31 августа 2026 г.

В настоящей работе установлены ограничения на гипотетические вариации фундаментальной физической постоянной $\mu = m_e/m_p$ – отношение массы электрона к массе протона – с использованием линий теплового излучения E-метанола CH_3OH в диапазоне частот 216–220 ГГц. Проанализированы молекулярные спектры в направлении 7 массивных облаков, локализованных в широкой полосе галактоцентрических расстояний: $1.5 < D_{GC} < 13$ кпс. Полученное средневзвешенное значение $\langle \Delta\mu/\mu \rangle = (0.5 \pm 0.5) \times 10^{-7}$ не указывает на статистически значимые изменения параметра μ на уровне точности 5×10^{-8}, что находится в хорошем согласии с ранее установленными верхними пределами в ряде молекулярных облаков Галактического диска.

DOI: 10.7868/S3034576626100021

1. Введение. Поиск гипотетических вариаций фундаментальных физических постоянных является одной из наиболее интересных задач в современных лабораторных и астрофизических исследованиях. Актуальность этой темы облусловлена тем, что в последнее время активно обсуждаются теории, расширяющие Стандартную модель физики элементарных частиц, в частности, теории так называемого темного сектора – темной материи (*dark matter*, DM) и темной энергии (*dark energy*, DE). Считается, что среди них наиболее перспективными являются теоретические модели DM в форме скалярных полей, которые могут взаимодействовать с элементарными частицами через скалярное поле Хиггса: с электроном – непосредственно, и с протоном – через кварки. Подобные взаимодействия, в свою очередь, приводили бы к модуляции масс этих частиц, и, как следствие, – к изменению одной из фундаментальных физических постоянных $\mu = m_e/m_p$ – отношение массы электрона к массе протона (см. подробный обзор [1]).

В астрофизических приложениях тестировать константу μ на неизменность возможно, например, при помощи наблюдений молекулярных спектров. В 1993 году было показано, что электронно-колебательно-вращательные переходы в молекуле H_2 имеют специфическую зависимость от μ, индивидуальную для каждого перехода [2]:

$$\tilde{f} = f + q\frac{\Delta\mu}{\mu}\,, \tag{1}$$

где $\Delta\mu/\mu = (\mu_{\rm obs} - \mu_{\rm lab})/\mu_{\rm lab}$ – относительная разность между лабораторным значением $\mu_{\rm lab}$ и значением в астрофизическом объекте $\mu_{\rm obs}$, f – лабораторная частота перехода, а $\tilde{f}$ – смещенная частота в сопутствующей системе отсчета при $\Delta\mu/\mu \neq 0$. В этом выражении q-фактор вычисляется квантовомеханическими методами и определяется как разность q-факторов $q = q_u - q_\ell$ верхнего u и нижнего ℓ энергетических уровней.

Разделив обе части (1) на лабораторную частоту, получаем безразмерный коэффициент чувствительности $Q = q/f$, с помощью которого выводится выражение для оценки $\Delta\mu/\mu$ из сравнения радиальных скоростей V_i, V_j молекулярных линий с различными коэффициентами Q_i, Q_j [3]:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{V_i - V_j}{c(Q_j - Q_i)}\,, \tag{2}$$

где c – скорость света; радиальная скорость V вычисляется по измеренной астрономической частоте $\hat{f}$ в соответствии с радиоастрономическим соглашением:

$$\frac{V}{c} = 1 - \frac{\hat{f}}{f}. \tag{3}$$

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

Теоретические расчеты показали, что наиболее чувствительной молекулой к вариациям μ является метанол CH_3OH и его изотопологи, широко распространенные в молекулярных облаках Галактического диска. Так, для торсионно-вращательных переходов в метаноле значения Q лежат в промежутке от -53 до $+42$ [3, 4], для $^{13}CH_3OH$ от -32 до $+78$, и для $CH_3{}^{18}OH$ – коэффициенты чувствительности меняются в диапазоне от -109 до $+33$ [5]. Среди дейтерированных изотопологов метанола выделяется CD_3OH с $-300 < Q < +73$, две другие молекулы с дейтерием по чувствительности сравнимы с основным метанолом: для CH_3OD коэффициенты Q принимают значения от -32 до $+25$ и для CD_3OD – от -44 до $+38$ [6].

Другие молекулы, которые использовались при оценках $\Delta\mu/\mu$, имеют, для сравнения, следующие значения Q: для линий лаймановской и вернеровской полос H_2 характерны небольшие коэффициенты чувствительности $|Q| \sim 0.01$ [2, 7, 8], инверсионные переходы в аммиаке NH_3 имеют $Q = +4.46$ [9], коэффициенты Q торсионно-вращательных переходов в ацетальдегиде CH_3CHO изменяются от $+0.62$ до $+3.61$ [10].

В данной работе наши оценки $\Delta\mu/\mu$ связаны с источниками в Галактическом диске, имеющими различные галактоцентрические расстояния, D_{GC}. Предыдущие исследования индивидуальных молекулярных облаков показали, что современные радиоастрономические наблюдения позволяют достигать точности в оценках $\Delta\mu/\mu$ на уровне несколько единиц на 10^{-8}. Так, например, по тепловым линиям[2)] CH_3OH в направлении молекулярного облака L1498 ($D_{GC} \sim 8$ кпс) получен верхний предел $|\Delta\mu/\mu| < 3 \times 10^{-8}$ [11][3)], а в направлении Orion-KL ($D_{GC} \sim 9$ кпс) – $|\Delta\mu/\mu| < 8 \times 10^{-8}$ [12]. Тепловые линии молекулы $^{13}CH_3OH$ в спектрах Orion-KL и NGC6334I ($D_{GC} \sim 7{-}9$ кпс) приводят к оценке $|\Delta\mu/\mu| < 4 \times 10^{-8}$ [5, 13]. Комбинации переходов CH_3OH и CH_3CHO в молекулярных облаках L1544, Barnard-1 и IRAS4A ($D_{GC} \sim 7{-}8$ кпс) ограничивают вариацию μ на уровне $|\Delta\mu/\mu| < 4 \times 10^{-8}$ [10]. Наконец, инверсионные переходы в аммиаке в сравнении с чисто вращательными ($Q_{\rm rot} = 1$) переходами в HC_3N, HC_5N и HC_7N в направлении L1512 и L1498 ($D_{GC} \sim 8$ кпс) соответствуют $|\Delta\mu/\mu| < 0.7 \times 10^{-8}$ [14]. Подобные исследования использовали и мазерные линии метанола, установив верхний предел $|\Delta\mu/\mu| < (2{-}3) \times 10^{-8}$ в ряде метанольных мазеров на галактоцентрических расстояниях $4 < D_{GC} < 12$ кпс [15, 16].

Интересно отметить, что указание на статистически значимые вариации μ были недавно обнаружены вблизи центра Галактики в направлении объекта Sgr B2 ($D_{GC} \simeq 0.1$ кпс): $\Delta\mu/\mu = (-3.4 \pm 0.4) \times 10^{-7}$ [12, 17]. В связи с этим, актуальной задачей остается как продолжение исследований области около галактического центра ($D_{GC} < 3$ кпс), которая остается мало изученной, так и галактической периферии ($D_{GC} > 12$ кпс). Как известно, эти две области в галактиках отличаются распределением плотности темной материи, ρ_{DM}. Например, широко используемый в численных расчетах профиль NFW [18] предсказывает рост плотности DM вблизи центра, $\rho_{DM} \propto r^{-1}$, и убывание на периферии, $\rho_{DM} \propto r^{-3}$.

В данной работе мы приводим оценки $\Delta\mu/\mu$, полученные по тепловым линиям метанола, наблюдаемым в ряде источников в интервале галактоцентрических расстояний от 1.5 до 13 кпс.

2. Параметры наблюдений и выбор объектов для оценок $\Delta\mu/\mu$. Для оценок $\Delta\mu/\mu$ были использованы данные из работы [19]. Наблюдения проводились на 30-м телескопе IRAM[4)] в различных спектральных полосах: 3 мм (90.6–98.2 ГГц), 2 мм (108.0–115.4 и 138.4–146.0 ГГц), а также 1.3 мм (215.6–224.2 ГГц). Спектральное разрешение (ширина канала) составляло $\Delta_{\rm ch} = 200$ кГц или 0.27 и 0.64 км с$^{-1}$ в шкале скоростей в середине соответствующих крайних полос на 1.3 и 3 мм.

В оригинальной статье [19] опубликованы спектральные наблюдения 148 массивных молекулярных облаков (зон звездообразования), локализованных на различных галактоцентрических расстояниях в диапазоне $0.14 < D_{GC} < 22.6$ кпс. Расстояния до отобранных объектов известны с хорошей точностью благодаря измеренным тригонометрическим параллаксам и собственным движениям мазеров, опубликованным в [20, 21]. Целью работы [19] был поиск линий метанола в тепловом или мазерном излучении (полный список из 19 линий CH_3OH и координаты молекулярных облаков приводятся в табл. 2 и 3 в [19]) и измерение физических характеристик зон звездообразования.

Помимо этих важных задач, обращают на себя внимание эмиссионные линии метанола в некоторых объектах, имеющие простые однокомпонентные гаус-

[2)] Термин "тепловая линия" используется в данной работе, чтобы подчеркнуть отличие от чисто мазерной эмиссии.

[3)] Все оценки значений физических величин указаны на уровне значимости 1σ.

[4)] Институт радиоастрономии миллиметрового диапазона (IRAM) – международный научно-исследовательский институт и ведущий европейский центр радиоастрономии.

совские профили, которые даже при умеренном отношении сигнала к шуму ($SNR \gtrsim 10$) позволяют измерять радиальные скорости с точностью до долей канала. Действительно, статистическая ошибка положения одиночной гауссианы задается выражением [22]:

$$\sigma_{\rm stat} = 0.7\frac{\Delta_{\rm ch}}{SNR}\sqrt{M}, \qquad (4)$$

в котором $M = FWHM/\Delta_{ch}$ – полная ширина линии на половине высоты в единицах ширины канала.

Из (4) следует, что, например, в полосе 1.3 мм, где $\Delta_{\rm ch} \simeq 0.27$ км с$^{-1}$, положение линии метанола с характерной шириной $FWHM \sim 5{-}6$ км с$^{-1}$ и отношением сигнала к шуму $SNR \gtrsim 10$ может быть измерено с ошибкой менее $\frac{1}{3}\Delta_{\rm ch}$. При этом, если в соотношении (2) обе скорости V_i и V_j имеют сравнимые ошибки и разность коэффициентов чувствительности $|\Delta Q|$ приблизительно равна 3, то статистическая ошибка величины $\Delta\mu/\mu$ в одном измерении не превышает 1.4×10^{-7}. Данный пример можно использовать при отборе наиболее подходящих источников и спектральных линий, с помощью которых доступны оценки $\Delta\mu/\mu$ на уровне нескольких единиц на 10^{-7}.

К вышесказанному следует добавить еще одно дополнительное условие, чтобы линии метанола имели близкие частоты и попадали в одну и ту же спектральную полосу при одновременных экспозициях для исключения систематических ошибок, связанных с калибровкой шкалы частот и ошибок наведения радиотелескопа на объект (pointing errors).

Молекулярные облака из работы [19], в которых наблюдаются линии CH_3OH с требуемыми характеристиками, перечислены в табл. 1. В первой колонке этой таблицы приводятся названия объектов, координаты – прямое восхождение *R.A.* и склонение *Dec.* – во второй колонке и галактоцентрические расстояния D_{GC} – в третьей колонке. Итого выборка объектов покрывает интервал галактоцентрических расстояний $1.5 < D_{GC} < 13$ кпс.

Таблица 1. Координаты отобранных объектов и их галактоцентрические расстояния, D_{GC} из [19]

Object	*R.A.*(J2000)	*Dec.* (J2000)	D_{GC}, kpc
G010.47+00.02	18 08 38.22	–19 51 50.26	1.58
G010.62–00.38	18 10 28.56	–19 55 48.73	3.38
G029.95–00.01	18 46 03.74	–02 39 22.32	4.62
G037.42+01.51	18 54 14.34	+04 41 39.64	6.73
G078.88+00.70	20 29 24.82	+40 11 19.59	8.17
G092.67+03.07	21 09 21.73	+52 22 37.08	8.36
G135.27+02.79	02 43 28.56	+62 57 08.38	13.08

Отобранные линии *E*-метанола показаны в табл. 2, в которую включены тепловые линии с ширинами $v_{\rm tur} \sim 2{-}3$ км с$^{-1}$ (здесь $v_{\rm tur} = FWHM/2.255$ – среднеквадратичная турбулентная скорость)[5)]. На турбулентный характер движений в объектах из обзора [19] указывают большие числа Маха (>4). Учитывая, что кинетические температуры в плотных зонах звездообразования $T_{\rm kin} \lesssim 100$ K, а тепловые скорости молекул CH_3OH $v_{\rm th} \lesssim 0.2$ км с$^{-1}$, измеренные ширины молекулярных линий можно интерпретировать, как результат свертки локального коэффициента поглощения в линии с крупномасштабным полем скоростей в области, ограниченной апертурой телескопа. При этом большое число турбулентных ячеек (различающихся по линейным размерам, плотности газа, температуре и скорости) приводит в результате перемешивания к нормальному распределению проекций вектора скорости на оси координат в случае изотропной турбулентности, т.е. к симметричному гауссоподобному профилю одиночной линии при отсутствии блендирования с другими линиями.

Такие симметричные линии должны быть центрированы в начале координат в сопутствующей системе отсчета. Тем не менее, возможные скрытые бленды небольшой амплитуды (или инструментальные дефекты) могут влиять на измеряемое положение центра линии, слегка сдвигая его в ту или иную сторону и оставляя форму профиля линии практически неотличимой от гауссовской при умеренных значениях SNR. Такие случайные сдвиги центра линии (так называемый *доплеровский шум*) могут возникать при оценках $\Delta\mu/\mu$ по формуле (2). С этой точки зрения разность двух радиальных скоростей $\Delta V = V_i - V_j$ в (2) можно представлять в виде суммы двух компонент [23]:

$$\Delta V = \Delta V_\mu + \Delta V_{\rm dop}, \qquad (5)$$

где ΔV_μ – сдвиг, обусловленный вариацией μ, а $\Delta V_{\rm dop}$ – сдвиг из-за доплеровского шума. Сигнал ΔV_μ может быть оценен статистически через вычисление выборочного среднего

$$\langle \Delta V \rangle = \langle \Delta V_\mu \rangle, \qquad (6)$$

поскольку $\langle \Delta V_{\rm dop} \rangle = 0$ км с$^{-1}$. При этом дисперсия сигнала равна

$$Var(\Delta V) = Var(\Delta V_\mu) + Var(\Delta V_{\rm dop}). \qquad (7)$$

[5)] Мазерные линии из обзора [19] имеют ширины $v_{\rm tur} < 1$ км с$^{-1}$.

Что касается доплеровского шума $Var(\Delta V_{dop})$, то он может быть минимизирован путем подходящего выбора молекулярных линий и специальным отбором молекулярных облаков.

В этом же ключе требование, связанное с тем, чтобы кинематический эмиссионный профиль был тепловым, исключает возможное смещение (относительно лабораторного значения) центра линии, характерное для мазерных линий. Во-первых, мазерные пятна имеют размеры, на порядки меньшие по сравнению с областью, охватываемой апертурой телескопа, и зачастую в одном объекте наблюдается несколько мазерных пятен, разделенных пространственно, что разрешить возможно только при интерферометрических наблюдениях с высоким угловым разрешением. Во-вторых, молекула метанола имеет сверхтонкую структуру, и при мазерном излучении доминирует только одна сверхтонкая компонента [24], поэтому точно определить центр линии в таком случае становится затруднительно. Например, расщепление сверхтонких компонент торсионно-вращательных переходов в метаноле на 25 ГГц (основное торсионное состояние, $v_t = 0$) составляет приблизительно $0.2\,\text{км}\,\text{с}^{-1}$ [25, 26].

Неопределенности лабораторных частот переходов необходимо также знать для учета вклада в ошибку радиальной скорости σ_v, которая формируется, в общем случае, из двух составляющих:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_{\text{stat}}^2 + \sigma_{\text{sys}}^2}, \tag{8}$$

где σ_{stat} – вклад от измерения положения спектральной линии и σ_{sys} – вклад от лабораторных измерений.

В итоге, нашим требованиям удовлетворили 3 метанольных перехода, перечисленных в табл. 2. Все они лежат в высокочастотной полосе на 1.3 мм (где наибольшее спектральное разрешение, $\Delta_{\text{ch}} \simeq$ $\simeq 0.27\,\text{км}\,\text{с}^{-1}$), имеют разности коэффициентов чувствительности $|\Delta Q| \geq 1.8$ и симметричные профили, которые описываются одиночной гауссианой (см. рис. 1 в [19]).

Характеристики отобранных переходов следующие: квантовые числа – J – полный угловой момент и его проекция K – для верхнего u и нижнего ℓ уровней даны в первой колонке табл. 2, во второй колонке – измеренная лабораторная частота из [27], энергии верхних уровней E_u указаны в третьей колонке и коэффициент чувствительности Q из [4] – в последней колонке (обращаем внимание, что в [4] коэффициент чувствительности $K_\mu = -Q$). В четвертой и пятой колонках мы приводим критические плотности $n_{\text{cr}}^{(50)}$ и $n_{\text{cr}}^{(100)}$, рассчитанные для двух кинетических температур 50 K и 100 K в оптически тонком случае:

$$n_{\text{cr}} = \frac{A_{\text{ul}}}{\gamma_{\text{ul}}(T_{\text{kin}})}. \tag{9}$$

Значения коэффициентов Эйнштейна A_{ul} и коэффициентов столкновительной деактивации верхнего уровня γ_{ul} при столкновениях с молекулами H_2 взяты из Лейденовской базы молекулярных данных[6)]. Обычно считается, что если плотность газа меньше критической ($n < n_{\text{cr}}$), излучение на данной частоте слабое. В противном случае ($n > n_{\text{cr}}$), светимость в линии высокая и верхний уровень термализуется, т.е. его температура возбуждения стремится к кинетической температуре газа. Однако, эти оценки носят приблизительный характер, поскольку в них не учитываются эффекты многократного рассеяния в линии внутри облака. Роль процессов захвата фотонов (*photon trapping*) повышается с увеличением оптической толщины, что приводит к завышенным в несколько раз значениям n_{cr}, следующим из формулы (9) [28]. Таким образом, можно ожидать, что все три линии E-метанола из табл. 2 трассируют один и тот же газ с плотностью $n \sim 10^7\,\text{см}^{-3}$.

Отметим, что в табл. 2 для линии 220.078 ГГц указано теоретическое значение частоты, рассчитанное квантовомеханическими методами в [27, 29], поскольку данный переход не наблюдался в лабораторных условиях. Однако ошибка для этой частоты взята 50 кГц, поскольку такая величина характерна для лабораторных измерений в данном частотном диапазоне (см. [27]). Кроме этого, такое значение ошибки согласуется с разбросом теоретических значений частоты этого перехода из цитированных работ: 220078.490 ± 0.013 МГц [27] и 220078.561 ± 0.008 МГц [29].

3. Оценки $\Delta\mu/\mu$. Параметры наблюдаемых линий CH_3OH выборки из 7 объектов сведены в табл. 3. Здесь в первой колонке указаны названия объектов, во второй – лабораторные частоты линий в ГГц, в третьей – измеренные радиальные скорости V_{LSR}, пиковые значения температуры T_{mb} и отношение сигнала к шуму SNR даны в четвертой и пятой колонках соответственно (см. табл. 4 в [19]). Ошибки радиальных скоростей σ_v, указанные в третьей колонке, рассчитывались по формуле (8) с учетом неопределенностей в значениях лабораторных частот (50 кГц или $0.069\,\text{км}\,\text{с}^{-1}$ в данном случае). Таким образом, указанные значения σ_v превышают статистические ошибки центров линий из табл. 4 в работе [19], в которой положения спектральных линий ме-

[6)] http://home.strw.leidenuniv.nl/∼moldata/.

Таблица 2. Отобранные линии E-метанола CH_3OH из работы [19]. Лабораторные частоты взяты из [27], коэффициенты чувствительности Q – из [4]. В скобках указаны ошибки 1σ в последних цифрах

Transition $J_{K_u} \to J_{K_\ell}$	Laboratory frequency f, MHz	E_u/k K	$n_{\rm cr}^{(50)}$ $\rm cm^{-3}$	$n_{\rm cr}^{(100)}$ $\rm cm^{-3}$	Q
$5_1 \to 4_2E$	216945.600(50)	47.98	4×10^6	7×10^6	+3.2
$4_2 \to 3_1E$	218440.050(50)	37.57	4×10^7	8×10^7	–1.2
$8_0 \to 7_1E$	220078.561(50)*	88.72	2×10^7	3×10^7	+0.6

*Теоретическое значение частоты с ошибкой, характерной для лабораторных измерений в данном частотном диапазоне.

танола и их неопределенности определялись с помощью пакета программ CLASS[7)].

Таблица 3. Параметры линий CH_3OH в направлении объектов выборки из [19]. В скобках указаны ошибки 1σ в последних цифрах

Object	f, GHz	V_{LSR}, km s^{-1}	T_{mb}, K	SNR
G010.47 + 00.02	218.440	66.31(8)	6.24	39
	220.078	66.59(12)	2.54	25
G010.62 – 00.38	216.945	–2.64(11)	0.87	22
	218.440	–2.69(7)	4.06	81
G029.95 – 00.01	216.945	97.86(13)	1.04	52
	218.440	97.95(7)	2.58	65
	220.078	98.12(11)	0.91	30
G037.42 + 01.51	216.945	43.95(17)	0.74	19
	218.440	43.93(9)	2.04	68
G078.88 + 00.70	216.945	–5.68(19)	0.42	21
	218.440	–5.63(8)	0.75	25
G092.67 + 03.07	216.945	–6.02(12)	0.18	16
	218.440	–5.85(7)	4.6	92
	220.078	–5.88(11)	0.91	10
G135.27 + 02.79	216.945	–71.73(14)	0.1	10
	218.440	–71.49(10)	0.36	36

Ограничения на вариации μ и пары линий, по которым они были получены, представлены в табл. 3. Эта таблица требует ряд пояснений. Во-первых, полный набор линий метанола из полосы 1.3 мм (табл. 2) использовался лишь в двух источниках: G029.95 – 00.01 и G092.67 + 03.07. Во-вторых, линия 220 ГГц не вошла в расчеты в четырех случаях: (i) в G010.62 – 00.38 из-за сдвига более, чем на 3 канала по сравнению с двумя другими линиями, которые, имея максимальную разность коэффициентов чувствительности $|\Delta Q| = 4.4$, согласуются в пределах $\frac{1}{5}\Delta_{ch}$; (ii) в G037.42 + 01.51 из-за асимметрии профиля; (iii) в G078.88 + 00.70 из-за низкого отношения сигнала к шуму $SNR = 7$; (iv) в G135.27 + 02.79 эта линия имеет П-образный профиль с плоской вершиной. В-третьих, линия 216 ГГц в G010.47 + 00.02 не взята в оценку $\Delta\mu/\mu$, поскольку она блендируется другой эмиссионной линией, отчетливо видной в правом крыле профиля линии 216 ГГц (см. рис. 1 в [19]).

Таблица 4. Результаты оценок $\Delta\mu/\mu$

Object	Used lines	$\Delta\mu/\mu \times 10^{-7}$
G010.47 + 00.02	220 & 218	(-5.2 ± 2.7)
G010.62 – 00.38	216 & 218	(-0.4 ± 1.0)
G029.95 – 00.01[a]	218& 216 и 218 & 220	(0.2 ± 1.1)
	216 & 220	(3.3 ± 2.2)
G037.42 + 01.51	216 & 218	(-0.2 ± 1.5)
G078.88 + 00.70	216 & 218	(0.4 ± 1.6)
G092.67 + 03.07[b]	218 & 216 и 218 & 220	(1.2 ± 1.1)
	216 & 220	(1.8 ± 2.1)
G135.27 + 02.79	216 & 218	(1.8 ± 1.3)

[a]Средневзвешенное значение $\langle\Delta\mu/\mu\rangle$ для G029.95 – 00.01 равно $(0.8 \pm 1.2) \times 10^{-7}$.
[b]Средневзвешенное значение $\langle\Delta\mu/\mu\rangle$ для G092.67 + 03.07 равно $(1.3 \pm 0.6) \times 10^{-7}$.

Вычисления $\Delta\mu/\mu$ по оставшимся парам линий E-метанола из табл. 3 проводились по формуле (2). При этом, в случае статистически независимых измерений разностей радиальных скоростей $(V_i - V_j)$, ошибка $\Delta\mu/\mu$ задается для одной пары линий выражением

$$\sigma_{ij} = \frac{\sqrt{\sigma_{v_i}^2 + \sigma_{v_j}^2}}{c|Q_j - Q_i|}, \qquad (10)$$

в котором ошибки соответствующих радиальных скоростей $\sigma_{v_i}, \sigma_{v_j}$ вычислялись по формуле (8).

Однако для расчета средних ошибок $\sigma_{\langle\Delta\mu/\mu\rangle}$ в объектах G029.95 – 00.01 и G092.67 + 03.07, где используются разности радиальных скоростей относительно одной и той же реперной линии 218 ГГц, необходимо учесть статистическую зависимость между этими разностями, которая приводит к дополнительным корреляционным поправкам к формуле (10). В общем случае, для ряда измерений разностей $V_1 - V_0, V_2 - V_0, V_3 - V_0 \ldots$, в котором все V_i – независимые случайные величины, а V_0 – выбранный репер, ко-

[7)]Continuum Line Analysis Single-dish Software of the Grenoble Image and Line Data Analysis Software packages.

эффициент корреляции κ_{ij} между парой разностей $(V_i - V_0)$ и $(V_j - V_0)$ рассчитывается как [5, 23]

$$\kappa_{ij} = \frac{1}{\sqrt{(1+\frac{\sigma^2_{v_i}}{\sigma^2_{v_0}})(1+\frac{\sigma^2_{v_j}}{\sigma^2_{v_0}})}}, \qquad (11)$$

где σ_{v_0} – ошибка скорости реперной линии (линия 218 ГГц в нашем случае), $\sigma_{v_i}, \sigma_{v_j}$ – ошибки скоростей сравниваемых линий (в нашем случае – линии 216 и 220 ГГц соответственно).

Ошибка средневзвешенного значения $\langle \Delta\mu/\mu \rangle$ в таком случае будет равна (см., например, [30])

$$\sigma_{\langle \Delta\mu/\mu \rangle} = \frac{1}{W}\left[\left(\frac{1}{\sigma^2_{i0}} + \frac{1}{\sigma^2_{j0}}\right) + 2\frac{\kappa_{ij}}{\sigma_{i0}\sigma_{j0}}\right]^{1/2}, \qquad (12)$$

где σ_{i0}, σ_{j0} – ошибки оценок $\Delta\mu/\mu$ по соответствующим парам $(V_i - V_0)$ и $(V_j - V_0)$ (формула (10)). $W = \sum w_k = \sum 1/\sigma^2_{k0}$ – суммарный вес, а само средневзвешенное значение $\langle \Delta\mu/\mu \rangle$ вычисляется по стандартной формуле

$$\langle \Delta\mu/\mu \rangle = \frac{1}{W}\sum w_k (\Delta\mu/\mu)_k \,. \qquad (13)$$

Здесь, согласно принятым обозначениям, $k = i$ (линия 216 ГГц) и $k = j$ (линия 220 ГГц), и

$$\left(\frac{\Delta\mu}{\mu}\right)_i = \frac{V_i - V_0}{c(Q_0 - Q_i)}, \quad \left(\frac{\Delta\mu}{\mu}\right)_j = \frac{V_j - V_0}{c(Q_0 - Q_j)}.$$

Третья пара – линии 216 и 220 ГГц в спектрах G029.95 – 00.01 и G092.67 + 03.07 – образована статистически независимыми значениями радиальных скоростей, и поэтому ошибка $\Delta\mu/\mu$ вычислялась по формуле (10).

Таким образом, был получен ряд из 9 неравноточных значений $\Delta\mu/\mu$, которые перечислены в табл. 4. Процедура обработки рядов неравноточных данных описана, например, в [31]. В этой процедуре сравниваются – ошибка средневзвешенного σ_ξ, полученная по формуле переноса ошибок (в [31] она называется ошибкой до уравнивания), и ошибка после уравнивания ряда неравноточных измерений σ^*_ξ. Отметим, что σ_ξ учитывает значения средних ошибок каждого элемента ряда измерений, но не учитывает величины отклонений этих элементов измерений от их средневзвешенного ξ, в то время как σ^*_ξ учитывает такие отклонения. В общем случае $\sigma_\xi \neq \sigma^*_\xi$, поскольку обе эти ошибки являются случайными величинами.

В случае, если $\sigma_\xi > \sigma^*_\xi$, причина расхождения чисто случайная, и за окончательное значение средней ошибки средневзвешенного принимается среднее арифметическое этих двух ошибок: $\frac{1}{2}(\sigma_\xi + \sigma^*_\xi)$. В противном случае, если $\sigma_\xi < \sigma^*_\xi$, то за окончательное значение средней ошибки средневзвешенного принимается σ^*_ξ, так как последнее неравенство, вероятно, вызвано систематическими ошибками внутри ряда измерений.

Согласно описанной процедуре, для нашего ряда измерений получается следующее средневзвешенное значение $\langle \Delta\mu/\mu \rangle_{\rm disk} = (0.5 \pm 0.5) \times 10^{-7}$, которое указывает на отсутствие статистически значимых вариаций μ, превышающих уровень 0.5×10^{-7} в интервале галактоцентрических расстояний $1.5 < D_{GC} < 13$ кпс. Совсем иные оценки получаются, как отмечалось во введении, вблизи галактического центра в объекте Sgr B2, где при сравнимых ошибках средняя величина $\Delta\mu/\mu$ значительно отличается от нуля, $\langle \Delta\mu/\mu \rangle_{\rm cent} = (-3.4 \pm 0.4) \times 10^{-7}$.

Отдельно стоит прокомментировать измерения $\Delta\mu/\mu$ в молекулярном облаке G010.47 + 00.02, расположенном относительно близко к центру Галактики ($D_{GC} = 1.58$ кпс, табл. 1). В этом объекте $\Delta\mu/\mu = (-5.2 \pm 2.7) \times 10^{-7}$, что совпадает в пределах 1σ с измерениями в Sgr B2. Однако, статистическая значимость такого совпадения низкая из-за большой ошибки и оценки $\Delta\mu/\mu$ только по двум линиям метанола. Помимо этого, в анализе использована линия 220 ГГц, не имеющая лабораторных измерений. Тем не менее, близкое к центру молекулярное облако G010.47 + 00.02 заслуживает дальнейшего внимания в качестве объекта для повторных наблюдений с использованием большего числа линий метанола для повышения точности оценок $\Delta\mu/\mu$.

Графическое отображение полученных данных проиллюстрировано на рис. 1, где показаны измеренные значения $\Delta\mu/\mu$ на разных галактоцентрических расстояниях. Красным цветом отмечены точки, соответствующие оценкам $\Delta\mu/\mu$ по *тепловым* линиям метанола в Sgr B2 ($D_{GC} \simeq 0.1$ кпс) и в Orion-KL ($D_{GC} = 8.7$ кпс), а синим цветом – результаты данной работы. Объединенные точки аппроксимированы (чисто иллюстративно) экспоненциальным законом: $y = -5.2e^{-0.39x} + 0.80$, $\chi^2_\nu = 1.46$ (при числе степеней свободы $\nu = 6$, ожидаемое среднеквадратичное отклонение $\sigma(\chi^2_\nu)$ равно $\sqrt{2/\nu} = 0.577$ [32]). Убывание аппроксимирующей кривой при малых значениях D_{GC} и ее околонулевые значения вдали от центра ($D_{GC} > 3$ кпс) могут свидетельствовать о различном влиянии скалярных полей на массы элементарных частиц в центре и на периферии Галактики. Однако данное утверждение требует дальнейших экспериментальных проверок.

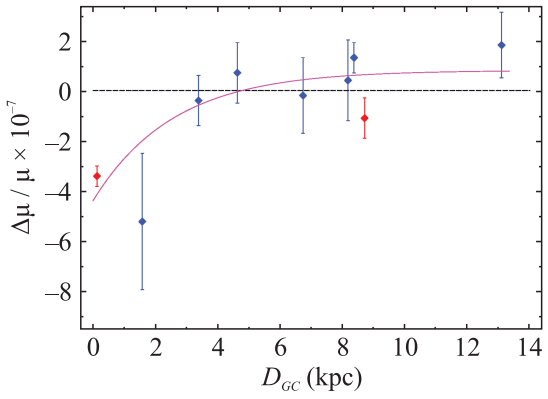

Рис. 1. (Цветной онлайн) Зависимость $\Delta\mu/\mu$ от галактоцентрического расстояния D_{GC}. Красным цветом показаны измерения $\Delta\mu/\mu$ из [17], синим – результаты данной работы. Розовым цветом изображена аппроксимация экспоненциальным законом $y = -5.2e^{-0.39x} + 0.80$ ($\chi^2_\nu = 1.46$). Горизонтальная пунктирная линия отмечает уровень $\Delta\mu/\mu = 0$

4. Заключение и выводы. Основная цель данной работы – провести оценки $\Delta\mu/\mu$ по тепловым линиям E-метанола (CH_3OH) в направлении массивных молекулярных облаков Галактического диска, находящихся на различных галактоцентрических расстояниях, в том числе, в направлении облака вблизи Галактического центра. Несмотря на то, что Галактический центр выделяется пикообразным ростом плотности темной материи (cuspy halo, [18]), эта область остается малоизученной в задачах поиска вариаций фундаментальных физических постоянных. Поэтому получение новых данных по гипотетическим вариациям μ в масштабах всего Галактического диска представляет несомненный интерес. Подчеркнем еще раз, что предполагаемая связь темной материи со скалярным полем Хиггса должна носить именно крупномасштабный характер и влиять на значения фундаментальных физических постоянных независимо от локальной плотности барионного вещества и/или гравитационного потенциала отдельных объектов, как это рассматривалось, например, в некоторых теоретических моделях [33–38].

В заключение отметим основные результаты выполненной работы.

1. Установлены ограничения на μ-вариации в Галактике в направлении семи массивных зон звездообразования из обзора [19]: $\langle\Delta\mu/\mu\rangle_{\rm disk} = (0.5 \pm 0.5) \times \times 10^{-7}$. Отобранные объекты охватывают практически весь видимый галактический диск ($1.5 < D_{GC} < < 13$ кпс). С учетом всех возможных систематических эффектов, вычисленное средневзвешенное значение вариации μ не превышает 5×10^{-8}, что согласуется с верхними пределами в отдельных молекулярных облаках Галактического диска, рассмотренных во введении.

2. Получена оценка $\Delta\mu/\mu$ для молекулярного облака G010.47 + 00.02, близкого к центральной части Галактики ($D_{GC} = 1.58$ кпс). Несмотря на то, что в данном случае $\Delta\mu/\mu = (-5.2 \pm 2.7) \times 10^{-7}$ имеет отрицательное значение, как и в объекте Sgr B2 ($D_{GC} \simeq 0.1$ кпс), большая ошибка измерений не позволяет сделать какой-либо статистически значимый вывод о сигнале. Для проверки полученного результата необходимо проведение независимых исследований с применением большего числа метанольных переходов и более точными измерениями центров спектральных линий.

3. Рассмотренная процедура отбора спектральных линий и молекулярных облаков, пригодных для прецизионных измерений вариаций μ в Галактике и тестирования предполагаемой связи темной материи со скалярным полем Хиггса, может служить начальным базисом для дальнейших исследований на более высоком уровне точности, 10^{-8} и выше.

Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту за конструктивные замечания.

Финансирование работы. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Электротехнического университета ЛЭТИ и Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе. 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, "Fundamental constants: from measurement to the universe, a window on gravitation and cosmology", Living Rev. Relativ. **26**, 6 (2025).
2. Д. А. Варшалович, С. А. Левшаков, "К вопросу о зависимости физических констант от времени", Письма в ЖЭТФ **58**, 231 (1993) [D. A. Varshalovich and S. A. Levshakov, "On a time dependence of physical constants", JETP Lett. **58**, 237 (1993)].
3. S. A. Levshakov, M. G. Kozlov, and D. Reimers, "Methanol as a tracer of fundamental constant", Astrophys. J. **738**, 26 (2011).
4. P. Jansen, L.-H. Xu, I. Kleiner, W. Ubachs, and H. L. Bethlem, "Methanol as a sensitive probe for spatial and temporal variations of the proton-to-electron mass ratio", Phys. Rev. Lett. **106**, 100801 (2011), Suppl. material.
5. J. S. Vorotyntseva, M. G. Kozlov, and S. A. Levshakov, "Methanol isotopologues as a probe for spatial and

temporal variations of the electron-to-proton mass ratio", Mon. Not. R. Astron. Soc. **527**, 2750 (2024).

6. J. S. Vorotyntseva, S. A. Levshakov, and M. G. Kozlov, "Spectroscopic shifts in deuterated methanol induced by variation of m_e/m_p", Phys. Rev. A **110**, 012802 (2024).
7. D. A. Varshalovich and A. Y. Potekhin, "Cosmological Variability of Fundamental Physical Constants", Space Sciens Rev. **74**, 259 (1995).
8. W. Ubachs, E. J. Salumbides, M. T. Murphy, H. Abgrall, and E. Roueff, "H_2/HD molecular data for analysis of quasar spectra in search of varying constants", Astron. Astrophys. **622**, A127 (2019).
9. V. V. Flambaum and M. G. Kozlov, "Limit on the cosmological variation of m_p/m_e from the inversion spectrum of ammonia", Phys. Rev. Lett. **98**, 240801 (2007).
10. J. S. Vorotyntseva, S. A. Levshakov, and M. G. Kozlov, "Acetaldehyde as a molecule for testing variations of electron-to-proton", Phys. Rev. A **113**, 012821 (2026).
11. M. Daprà, C. Henkel, S. A. Levshakov, K. M. Menten, S. Muller, H. L. Bethlem, S. Leurini, A. V. Lapinov, and W. Ubachs, "Testing the variability of the proton-to-electron mass ratio from observations of methanol in the dark cloud core L1498", Mon. Not. R. Astron. Soc. **472**, 4434 (2017).
12. Ю. С. Воротынцева, С. А. Левшаков, "Указание на вариацию отношения масс электрона и протона в пределах Галактики", Письма в ЖЭТФ **121**, 619 (2025) [J. S. Vorotyntseva and S. A. Levshakov, "Indication of the electron-to-proton mass ratio variation in the Galaxy", JETP Lett. **121**, 589 (2025)].
13. Ю. С. Воротынцева, С. А. Левшаков, "Торсионно-вращательные переходы в метаноле как зонды фундаментальных физических постоянных – масс электрона и протона", Письма в ЖЭТФ **119**, 635 (2024) [J. S. Vorotyntseva and S. A. Levshakov, "Torsion-rotational transitions in methanol as a probe of fundamental physical constants – electron and proton masses", JETP Lett. **119**, 649 (2024)].
14. S. A. Levshakov, C. Henkel, D. Reimers, and P. Molaro, "Limits on the space-time variations of fundamental constants", Memorie della Societa Astronomica Italiana **85**, 90 (2014).
15. S. A. Levshakov, I. I. Agafonova, C. Henkel, K.-T. Kim, M. G. Kozlov, B. Lankhaar, and W. Yang, "Probing the electron-to-proton mass ratio gradient in the Milky Way with Class I methanol masers", Mon. Not. R. Astron. Soc. **511**, 413 (2022).
16. S. Ellingsen, M. Voronkov, and S. Breen, "Practical limitations on astrophysical observations of methanol to investigate variations in the proton-to-electron mass ratio", Phys. Rev. Lett. **107**, 270801 (2011).
17. Ю. С. Воротынцева, С. А. Левшаков, "Указание на вариацию отношения масс электрона и протона в пределах Галактики. III. Линии метанола на 0.6 мм в спектрах Sgr B2(N) и Orion-KL", Письма в ЖЭТФ **123**, 443 (2026) [J. S. Vorotyntseva and S. A. Levshakov, "Indications of the electron-to-proton mass ratio variation in the Galaxy. III. 0.6 mm methanol lines toward Sgr B2(N) and Orion-KL", JETP Lett. **123**, 433 (2026)].
18. J. F. Navarro, C. S. Frenk, and S. D. M. White, "A universal density profile from hierarchical clustering", Astrophys. J. **490**, 493 (1997).
19. J. Y. Zhao, J. S. Zhang, Y. X. Wang, J. J. Qiu, Y. T. Yan, H. Z. Yu, J. L. Chen, and Y. P. Zou, "A multitransition methanol survey toward a large sample of high-mass star-forming regions", Astrophys. J. Suppl. Ser. **266**, 29 (2023).
20. M. J. Reid, K. M. Menten, A. Brunthaler et al. (Collaboration), "Trigonometric parallaxes of high mass star forming regions: The structure and kinematics of the Milky Way", Astrophys. J. **783**, 130 (2014).
21. M. J. Reid, K. M. Menten, A. Brunthaler et al. (Collaboration), "Trigonometric parallaxes of high-mass star-forming regions: Our view of the Milky Way", Astroph. J. **885**, 131, (2019).
22. D. A. Landman, R. Roussel-Dupre, and G. Tanigawa, "On the statistical uncertainties associated with line profile fitting", Astroph. J. **261**, 732 (1982).
23. S. A. Levshakov, P. Molaro, A. V. Lapinov, D. Reimers, C. Henkel, and T. Sakai, "Searching for chameleon-like scalar fields with the ammonia method", Astron. Astrophys. **512**, A44 (2010).
24. B. Lankhaar, W. Vlemmings, G. Surcis, H. J. van Langevelde, G. Groenenboom, and A. van der Avoird, "Characterization of methanol as a magnetic field tracer in star-forming regions", Nat. Astron. **2**, 145 (2018).
25. L. H. Coudert, C. Gutlé, T. R. Huet, J.-U. Grabow, S. A. Levshakov, "Spin-torsion effects in the hyperfine structure of methanol", J. Chem. Phys. **143**, 044304 (2015).
26. J. S. Vorotyntseva and S. A. Levshakov, "Hyperfine structure of methanol lines at 25 GHz", Astron. Astrophys. Trans. **34**, 103 (2024).
27. L.-H. Xu and F. J. Lovas, "Microwave spectra of molecules of astrophysical interest XXIV: methanol (CH_3OH and $^{13}CH_3OH$)", J. Phys. Chem. Ref. Data **26**, 1 (1997).
28. Y. L. Shirly, "The critical density and the effective excitation density of commonly observed molecular dense gas traces", Publ. Astron. Soc. Pac. **127**, 299 (2015).
29. L.-H. Xu, J. Fisher, R. M. Lees, H. Y. Shi, J. T. Hougen, J. C. Pearson, B. J. Drouin, G. A. Blake, and R. Braakman, "Torsion-rotation global analysis of the first three torsional states (vt = 0, 1, 2) and terahertz database for methanol", J. Mol. Spectros. **251**, 305 (2008).

30. E. R. Cohen and J. W. Dumond, "Our knoledge of fundamental constants of physics andchemistry in 1965", Rev. Mod. Phys. **37**, 537 (1965).
31. Т. А. Агекян, *Основы теории ошибок для астрономов и физиков* (Наука, М., 1972), с. 144 [T. A. Agekyan, *Fundamentals of Error Theory for Astronomers and Physicists* (Nauka, Moscow, 1972), p. 144].
32. С. Уилкс, *Математическая статистика* (Наука, М., 1967), с. 197 [S. S. Wilks, *Mathematical Statistics* (N.Y., Wiley & Sons, London, 1962)].
33. J. Magueijo, J. D. Barrow, and H. Sandvik, "Is it e or is it c? Experimental tests of varying alpha", Phys. Lett. B **549**, 284 (2002).
34. J. Khoury and A. Weltman, "Chameleon fields: awaiting surprises for tests of gravity in space", Phys. Rev. Lett. **93**, 171104 (2004).
35. V. V. Flambaum and E. V. Shuryak, "How changing physical constants and violation of local position invariance may occur?" in Nuclei and Mesoscopic Physics, ed. by P. Danielewicz, P. Piecuch, and V. Zelevinsky, Michigan, AIP Conf. Proc. **995**, 1 (2008).
36. S. Blatt, A. D. Ludlow, G. K. Campbell et al. (Collaboration), "New limits on coupling of fundamental constants to gravity using ^{87}Sr optical lattice clocks", Phys. Rev. Lett. **100**, 140801 (2008).
37. K. F. Olive and M. Pospelov, "Environmental dependence of masses and coupling constants", Phys. Rev. D **77**, 043524 (2008).
38. P. Brax, "An environmental variation of constants", Phys. Rev. D **90**, 023505 (2014).