Письма в ЖЭТФ, том 123, вып. 7, с. 443 – 453

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

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

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

Поступила в редакцию 2 февраля 2026 г.
После переработки 27 февраля 2026 г.
Принята к публикации 28 февраля 2026 г.

В настоящей работе показано, что торсионно-вращательные переходы в метаноле (CH_3OH), обладающие повышенной чувствительностью к малым вариациям μ – отношению масс электрона и протона, сдвинуты относительно менее чувствительных переходов в спектре молекулярного облака Sgr B2(N) в центре Галактики. В то же время, идентичный набор линий метанола в спектре молекулярного облака Orion-KL, находящегося вдали от центра, сдвигов не показывает. Интерпретация подобного поведения молекулярных частот в терминах $\Delta\mu/\mu = (\mu_{\rm obs} - \mu_{\rm lab})/\mu_{\rm lab}$ приводит к следующим средневзвешенным величинам $\langle\Delta\mu/\mu\rangle = (-3.4 \pm 0.4) \times 10^{-7}$ для Sgr B2 и $\langle\Delta\mu/\mu\rangle = (-1.1 \pm 0.8) \times 10^{-7}$ для Orion-KL (указаны результирующие ошибки $\pm 1\sigma$ средневзвешенных значений $\langle\Delta\mu/\mu\rangle$, включающие в себя статистические и систематические неопределенности). Обсуждается возможная корреляция между величинами $\Delta\mu/\mu$, измеренными в различных молекулярных облаках диска Галактики, и распределением темного вещества вдоль Галактического радиуса, которая может указывать на гипотетическую модуляцию темным веществом скалярного поля Хиггса, приводя к изменению μ.

DOI: 10.7868/S30345766X26040019

1. Введение. Сложные органические молекулы, такие как метанол (CH_3OH), распространенные в молекулярных облаках, заполняющих диск нашей Галактики от околоядерных областей с галактоцентрическими расстояниями $R_{\rm GC} \lesssim 100$ пс, подобно Sagittarius (Sgr) B2 [1, 2], до периферии ($R_{\rm GC} \lesssim$ $\lesssim 23$ кпс [3, 4]) являются удобными зондами не только физических условий в зонах звездообразования, но и уникальным инструментом в поисках Новой физики (см., например, обзор [5]). Особая роль метанола в этих задачах объясняется тремя факторами: (i) частоты торсионно-вращательных переходов в CH_3OH показывают высокую чувствительность к малым вариациям параметра $\mu = m_{\rm e}/m_{\rm p}$ – отношению масс электрона и протона [6, 7]; (ii) линейчатый спектр метанола заполняет обширный частотный диапазон от ГГц до ТГц, доступный наблюдениям на современных наземных и орбитальных телескопах; (iii) линии метанола достаточно интенсивные, что позволяет получать качественные спектры с высоким отношением сигнала к шуму.

Поясним теперь, что подразумевает термин “Новая физика”. Согласно эйнштейновскому принципу эквивалентности (EEP) и его фундаментальной составной части – принципу локальной инвариантности (LPI), результаты негравитационных экспериментов не должны зависеть от пространственных и временных координат. Обнаружение отклонения от LPI в лабораторных экспериментах с атомными и ядерными часами и/или в астрофизических спектральных наблюдениях означало бы проявление новых физических законов, выходящих за рамки Стандартной модели физики элементарных частиц. Нарушение EEP предполагается в различных хамелеоновских сценариях проявления пятой силы, в многомерных моделях, в моделях темного сектора (dark matter, DM, и dark energy, DE) и в ряде других теорий, рассмотренных, например, в обзоре [8].

В практических задачах поиска Новой физики широко используются спектральные линии различных химических элементов, поскольку структура энергетических уровней атомов и молекул зависит от значений фундаментальных физических постоянных, которые при нарушении LPI меняли бы свои значения, вызывая тем самым сдвиги соответствующих частот. В частности, небольшие изменения постоянной μ приводили бы к существенным сдвигам частот туннельных переходов в таких молекулах, как NH_3, CH_3OH и др. [5, 9–12].

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

Массы элементарных частиц (электрон и три кварка), от которых зависит отношение m_e/m_p, в свою очередь модулируются скалярным полем Хиггса. Однако масса протона (938 МэВ$/c^2$) определяется в основном энергией связи трех кварков, суммарная масса которых (~ 10 МэВ$/c^2$) составляет примерно 1 % от полной массы протона. Поэтому, можно предположить, что, в первую очередь, вариации μ должны были быть связаны с изменением массы электрона, которая задается как произведение юкавской константы связи для электрона $\lambda_e \approx 2.9 \times 10^{-6}$ и массы бозона Хиггса v (~ 246 ГэВ): $m_e = \lambda_e v/\sqrt{2}$ [13].

Космологическая эволюция массы хиггсовского бозона v в расширяющейся Вселенной, а значит и зависимость μ от космологического времени, рассматривалась, например, в [13]. Вопрос, на который мы попытаемся ответить в данной работе – это локальное поведение μ, а именно – существует ли какая-либо корреляция между локальной плотностью темной материи $\rho_{\rm DM}$ и измеряемой в Галактическом диске величиной $\Delta\mu/\mu = (\mu_{\rm obs} - \mu_{\rm lab})/\mu_{\rm lab}$.

В Галактике, как известно, с увеличением $R_{\rm GC}$ существенно меняется отношение $\rho_{\rm br}/\rho_{\rm DM}$: плотность барионной составляющей $\rho_{\rm br}$ резко уменьшается с увеличением $R_{\rm GC}$, в то время как $\rho_{\rm DM}$ возрастает [14–18]. Обе плотности выравниваются примерно на двух эффективных радиусах ($R_{\rm eff}$)[2], после чего темная материя становится доминирующей составляющей Галактического диска и гало.

Ограничения на вариации μ вдали от Галактического центра ($R_{\rm GC} \gtrsim R_{\rm eff}$) устанавливались ранее разными методами. Наиболее жесткие пределы были получены на уровне $\Delta\mu/\mu < (1-4) \times 10^{-8}$ [10–12, 22–25]. Галактический центр оставался до недавнего времени неизученным.

Первые попытки оценки $\Delta\mu/\mu$ по трем переходам метанола на частотах ~ 540 ГГц (наблюдения космического телескопа Herschel[3]), а также по одиннадцати линиям метанола из атмосферного окна на 3 мм (наблюдения 30-м телескопа IRAM[4]) показали возможное уменьшение μ в молекулярном комплексе Sgr B2(N): $\Delta\mu/\mu = (-4.2 \pm 0.7) \times 10^{-7}$ [26] и $\Delta\mu/\mu = (-2.1 \pm 0.6) \times 10^{-7}$ [27] соответственно.

В настоящей работе мы продолжаем исследования в высокочастотном диапазоне (490–640 ГГц) по наблюдениям космического телескопа Herschel, в двух направлениях – на Галактический центр – молекулярный комплекс Sgr B2(N), а также, для контроля, на объект, локализованный вдали от центра Галактики на расстоянии $R_{\rm GC} \sim 9$ кпс – молекулярный комплекс Orion-KL. Новый анализ реализован на расширенной выборке линий метанола по сравнению с [26]: к трем предыдущим линиям добавлены десять новых, отобранных в каждом из гершелевских спектров этих двух объектов.

2. Параметры наблюдений Herschel. В настоящей работе используются архивные спектры космической обсерватории Herschel [28], полученные в направлении двух молекулярных комплексов – Sgr B2(N) и Orion-KL. Оба объекта принадлежат к активным зонам звездообразования с массами и линейными размерами $M_{\rm Sgr\,B2(N)} \sim 2 \times 10^3 M_\odot$, $D_{\rm Sgr\,B2(N)} \sim 0.2$ пс [29] и $M_{\rm Ori-KL} \sim 2 \times 10^2 M_\odot$, $D_{\rm Ori-KL} \sim 0.02$ пс [30].

Описание аппаратуры, при помощи которой были получены спектры, а также сведения о первичной обработке спектров приведены в нашей работе [26]. Здесь мы сообщаем только основные технические характеристики, перечисленные в табл. 1: наблюдаемые диапазоны частот, соответствующие спектральные полосы, координаты наведения телескопа (прямое восхождение и склонение), даты наблюдений, размер апертуры $\theta_{\rm HPBW}$ и спектральное разрешение $\Delta_{\rm ch}$.

Среди спектров, соответствующих указанным диапазонам, имеется ряд линий метанола CH_3OH, наблюдаемых как в Sgr B2(N), так и в Orion-KL, наиболее подходящих для оценок $\Delta\mu/\mu$. Критерии отбора таких линий следующие: (1) достаточный уровень отношения сигнала к шуму $SNR \geq 40$; (2) попадание линий в одну полосу IF (4 ГГц); (3) близкие значения энергий верхних уровней E_u; (4) различные коэффициенты чувствительности (см. табл. 2) к малым вариациям μ ($|\Delta Q| > 0$); (5) известная лабораторная частота $f_{\rm lab}$. Также линии были поделены на 4 поддиапазона, условно названных 495, 542, 590 и 638 ГГц. Такой отбор и распределение линий по поддиапазонам выбран во избежание возможных систематических ошибок, связанных с калибровкой шкалы частот и шкалы температур. В первую очередь нивелируется ошибка калибровки шкалы частот, которая может быть значительной для разных полос IF и разных спектральных

[2]Эффективный радиус ($R_{\rm eff}$) определяется как длина большой полуоси эллиптической изофоты, включающей в себя половину света звездной составляющей галактики. Для Галактики $R_{\rm eff} \approx 4.5$ кпс, а галактоцентрическое расстояние солнечной системы $R_\odot \approx 1.8 R_{\rm eff}$ [19–21].

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

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

Таблица 1. Характеристики наблюдений и координаты объектов [1, 31]. Во второй колонке указаны интервалы частот Δf, в которых были отобраны линии метанола CH_3OH. Соответствующие наблюдаемые полосы частот имеют следующие значения: 479.5–561.5 ГГц (*band 1a*), 554.5–635.5 ГГц (*band 1b*) и 626.0–726.0 ГГц (*band 2a*). Апертура телескопа θ_{HPBW} (Half Power Beam Width) в центре полосы и спектральное разрешение Δ_{ch} (ширина канала) приводятся в пятой и шестой колонках. Для всех трех спектральных диапазонов ширина промежуточной частотной полосы (Intermediate Frequency band, IF) равна 4 ГГц [1, 32]

Target	Frequency range, Δf	Coordinates (J2000)	Observation date	θ_{HPBW} ($''$)	Δ_{ch} (km s^{-1})
Sgr B2(N)	493–496 GHz	$17^{\text{h}}47^{\text{m}}20\overset{\text{s}}{.}06$	22.09.2010	40.4	0.3
	541–544 GHz	$-28^\circ22'18\overset{''}{.}33$			
	(*band 1a*)				
	589–591 GHz	$17^{\text{h}}47^{\text{m}}20\overset{\text{s}}{.}04$	12.10.2010	35.3	0.25
	(*band 1b*)	$-28^\circ22'18\overset{''}{.}29$			
	637–639 GHz	$17^{\text{h}}47^{\text{m}}19\overset{\text{s}}{.}55$	15.09.2010	31.1	0.23
	(*band 2a*)	$-28^\circ22'18\overset{''}{.}33$			
Orion-KL	493–496 GHz	$05^{\text{h}}35^{\text{m}}14\overset{\text{s}}{.}36$	01.03.2010	40.4	0.3
	541–544 GHz	$-05^\circ22'33\overset{''}{.}63$			
	(*band 1a*)				
	589–591 GHz	$05^{\text{h}}35^{\text{m}}14\overset{\text{s}}{.}35$	02.03.2010	35.3	0.25
	(*band 1b*)	$-05^\circ22'33\overset{''}{.}06$			
	637–639 GHz	$05^{\text{h}}35^{\text{m}}14\overset{\text{s}}{.}32$	12.04.2010	31.1	0.23
	(*band 2a*)	$-05^\circ22'32\overset{''}{.}91$			

диапазонов. Другой источник инструментальных ошибок – разные даты наблюдений и отличающиеся размеры апертуры. Также отобранные линии не попадают в крайние области спектральной полосы во избежание известного "эффекта аккордеона" – изменения ширин каналов на краях спектрального диапазона. Медианная ошибка калибровки шкалы частот внутри полосы IF не превышает 50 кГц [35]. Калибровка шкалы температур (T_{A}) осуществлялась с точностью 1.6–4 % в полосе 1 и 1.3–3 % в полосе 2 (см. табл. 5.6 в [32]).

Параметры отобранных таким образом метанольных переходов сведены в табл. 2: в первой колонке указан номер линии, во второй – квантовые числа – полный угловой момент J и его проекция на ось симметрии молекулы K для верхнего u и нижнего ℓ уровней, в третьей колонке даны энергии верхних уровней E_u, взятые из [33], в четвертой и пятой колонках отображены лабораторные f_{lab} [33] и вычисленные f_{cal} [34] частоты соответственно. В последней колонке приводятся значения коэффициентов чувствительности Q [7].

3. Обработка спектров и вычисленные параметры линий. Обработка спектров сводилась к описанию формы профиля наблюдаемой линии с помощью огибающей кривой и определения ее центра – той точки, в которой огибающая достигает максимума. Для этой цели мы использовали набор гауссиан с наименьшим числом компонент, который обеспечивал значение $\chi^2_\nu \lesssim 1$, где ν – число степеней свободы.

Подобранные таким образом огибающие показаны на рис. 1 красным цветом, а черным – отображены оригинальные спектры. Для каждого спектра подписан объект и лабораторные частоты наблюдаемых линий.

Вычисленные параметры метанольных линий из спектра Sgr B2(N) приведены в табл. 3: порядковый номер линии (в соответствии с табл. 2) – в первой колонке, наблюдаемая частота (измеренный центр линии) f_{obs} – во второй колонке с обозначением типа молекулы – A или E, в третьей и четвертой колонках показаны ширины линий $FWHM$ и наблюдаемые пиковые значения температур главного луча антенны $T_{\text{A}}^{\text{peak}}$ соответственно, в пятой и шестой колонках даны радиальные скорости $V_{\text{LSR}}^{(k)}$, рассчитанные в соответствии с радиоастрономическим соотношением

$$V_{\text{LSR}}^{(1)} = c\,(1 - f_{\text{obs}}/f_{\text{lab}})\,,\quad V_{\text{LSR}}^{(2)} = c\,(1 - f_{\text{obs}}/f_{\text{cal}})\,. \quad (1)$$

Ошибки ширин линий составляют $\sim 5\,\%$, учитывая вклад от неопределенности калибровки по потоку и вклад от ошибок измерений ширин линий из наблюдаемых спектров. Неопределенности пиковых значений температур включают в себя статистическую составляющую – среднюю локальную амплитуду шума (rms) вблизи рассматриваемой линии метанола – и систематическую – мажорирующую ошибку калибровки шкалы температур (см. раздел 2). Оба вклада складывались квадратично. Неопределенности радиальных скоростей вычислялись из статистической ошибки определения центра линии $\sigma_{f_{\text{obs}}}$, ошибки опорной частоты $\sigma_{f_{\text{lab}}}$, а также из медиан-

Таблица 2. Параметры отобранных линий метанола CH_3OH. Измеренные лабораторные $f_{\rm lab}$ и вычисленные $f_{\rm cal}$ частоты линий (в МГц) взяты соответственно из [33] и [34]. Энергии верхних торсионно-вращательных уровней E_u указанны в третьей колонке. Значения коэффициентов чувствительности Q вычислены в [7], где $K_\mu = -Q$. Неопределенности 1σ в последних цифрах приводятся в скобках

#	Transition $J_{K_u} \to J_{K_\ell}$	E_u (K)	Measured frequencies, $f_{\rm lab}$	Calculated frequencies, $f_{\rm cal}$	Q
1	$5_3 \to 4_2 A^+$	84.6	493699.095(50)	493699.112(15)	–0.1
2	$5_3 \to 4_2 A^-$	84.6	493733.672(50)	493733.687(15)	–0.1
3	$7_2 \to 7_1 A^{-+}$	102.7	494481.683(50)	494481.555(12)	1.5
4	$7_0 \to 6_{-1} E$	78.0	495173.104(50)	495173.105(12)	1.8
5	$6_3 \to 5_2 A^+$	98.5	542000.981(50)	542000.954(14)	0.0
6	$6_3 \to 5_2 A^-$	98.5	542081.936(50)	542081.952(14)	0.0
7	$8_0 \to 7_{-1} E$	96.6	543076.194(50)	543076.175(12)	1.7
8	$7_3 \to 6_2 A^+$	115.0	590277.688(50)	590277.712(14)	0.1
9	$7_3 \to 6_2 A^-$	114.7	590440.291(50)	590440.430(14)	0.1
10	$9_0 \to 8_{-1} E$	117.4	590790.957(50)	590790.939(12)	1.6
11	$10_0 \to 9_{-1} E$	140.5	638279.564(50)	638279.651(12)	1.6
12	$8_3 \to 7_2 A^+$	133.3	638523.486(50)	638523.509(13)	0.1
13	$8_3 \to 7_2 A^-$	133.3	638817.830(50)	638817.824(13)	0.1

ной ошибки калибровки шкалы частот 50 кГц [35]. Статистические неопределенности $\sigma_{f_{\rm obs}}$ рассчитывались методом $\Delta\chi^2$ [36] с учетом корреляции шума в спектрах. Корректирующий фактор $\gamma \sim 1.15$ (уравнение (5) в [27]) слегка подправлял амплитуду шума $\sigma^{\rm cor}_{\rm rms} = \gamma\sigma_{\rm rms}$. Данный метод вычисления статистической ошибки является оправданным, поскольку рассчитанные величины $\sigma_{f_{\rm obs}}$ совпадают с хорошей точностью с ожидаемыми, которые выражаются через ширину канала $\Delta_{\rm ch}$, полную ширину линии $FWHM$ и отношение сигнала к шуму SNR (см. формулу (8) и табл. 3 в работе [26]).

Исключение составляют линии 1 и 2 из спектра Sgr B2(N), которые оказались частично разрешенными (см. рис. 1). Крылья этих линий оказывают влияние на определение центров огибающих, смещая их либо влево (линия 1), либо вправо (линия 2) почти на ширину канала относительно среднего значения $V_{\rm LSR} = 65.138$ км с$^{-1}$, несмотря на то, что обе линии имеют одинаковые коэффициенты чувствительности $Q = -0.1$. Аналогичные линии в спектре Orion-KL, где перекрытие крыльев отсутствует, показывают одинаковые радиальные скорости (см. табл. 4). Поэтому мы увеличили ошибки линий 1 и 2 в спектре Sgr B2(N) до значения ширины канала $\Delta_{\rm ch} = 0.3$ км с$^{-1}$. В остальных случаях результирующая ошибка радиальной скорости вычислялась как квадратичная сумма ошибок $\sigma_{f_{\rm obs}}$, $\sigma_{f_{\rm lab}}$ и систематической ошибки $\sigma_{f_{\rm sys}} = 50$ кГц, о которых шла речь выше.

Перед тем, как переходить непосредственно к оценкам $\Delta\mu/\mu$, которые получаются из различных комбинаций линий A- и E-метанола, необходимо проанализировать измеренную последовательность пиковых температур для определения физических условий, в которых данная последовательность могла бы сформироваться. Этот вопрос возникает в связи с тем, что прямые радиационные или столкновительные процессы запрещены между A- и E-метанолом, и отношение концентраций A/E в молекулярном облаке практически не меняется с момента образования молекул CH_3OH. При этом образование метанола в холодном газе при $T_{\rm kin} = 10-15$ K приводит к переизбытку A-метанола, а в теплом или горячем газе при $T_{\rm kin} \gtrsim 40$ K отношение A/E выравнивается [37]. Поэтому в некоторых случаях эти две формы метанола рассматриваются как две молекулы, и нужна проверка, трассируют ли они один и тот же газ.

Пиковые температуры из табл. 3 проверялись с помощью программы RADEX [38], которая рассчитывает перенос излучения в молекулярных линиях при отклонении от локального термодинамического равновесия (non-LTE). Использовалась модель однородного плоскопараллельного слоя, которая наиболее близко описывает наблюдаемые интенсивности линий метанола. В качестве температуры фонового излучения мы брали $T_{\rm bg} = 2.73$ K, а в качестве ширины линии – медианное значение из табл. 3, $FWHM = 14$ км с$^{-1}$. Скорости столкновительных процессов с H_2 известны с ошибкой 3 % [39], которая учитывалась при сравнении вычисленных модельных значений пиковых температур с наблюдаемыми. Оказалось, что наблюдаемую последователь-

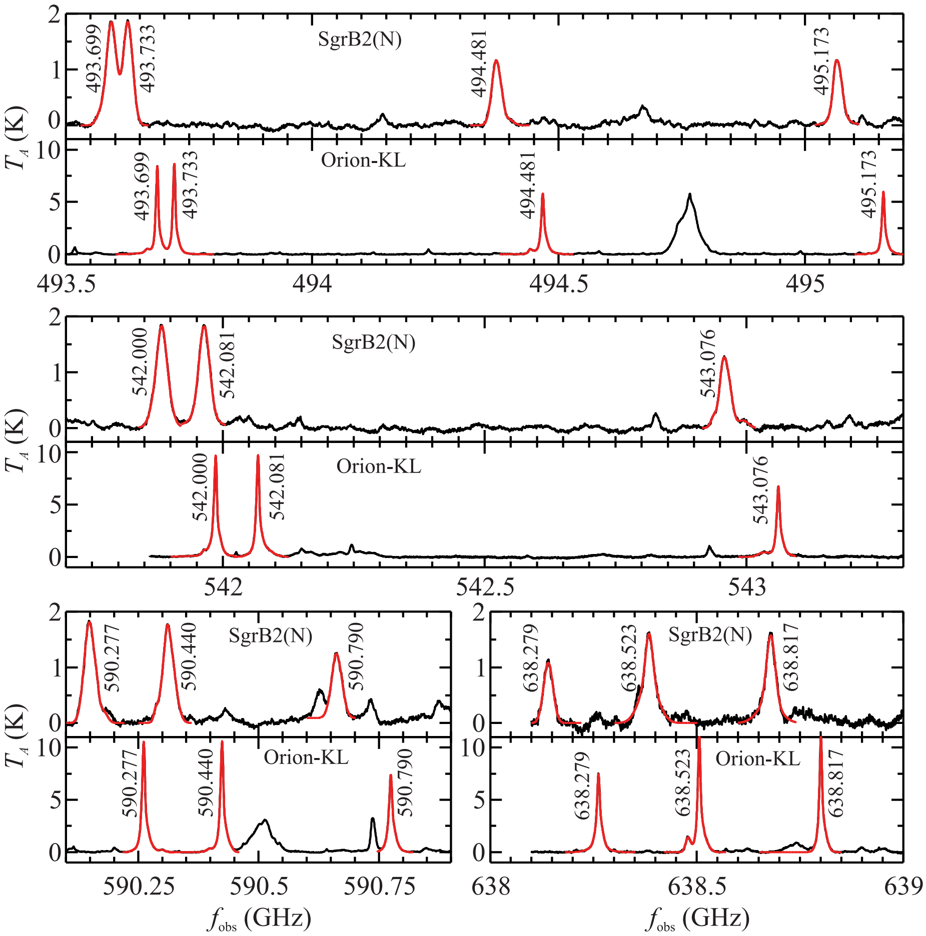

Рис. 1. (Цветной онлайн) Линии метанола (CH_3OH) в направлении двух источников – Sgr B2(N) и Orion-KL, полученные на космической обсерватории Herschel. Черным цветом показаны оригинальные спектры, красным – модельные. Цифры рядом с линиями обозначают лабораторные частоты $f_{\rm lab}$ в ГГц (см. табл. 2)

ность пиковых температур удается согласовать с модельными значениями лишь в узком диапазоне плотностей газа 1.5×10^7 см$^{-3}$ $\le n(H_2) \le 1.75 \times 10^7$ см$^{-3}$ и кинетических температур $80\,\text{К} \le T_{\rm kin} \le 100\,\text{К}$. Эта область отмечена двумя пунктирными вертикальными линиями на рис. 2. При уменьшении плотности газа, $n(H_2) < 1.5 \times 10^7$ см$^{-3}$, отношение A/E становится больше единицы, а при $n(H_2) > 1.75 \times 10^7$ см$^{-3}$ это отношение уменьшается, A/E < 1. Если внутри выделенной области уменьшать или увеличивать кинетическую температуру, то χ^2 резко возрастает.

Нижняя панель на рис. 2 иллюстрирует одно из возможных решений, положение которого отмечено звездочкой на верхней панели. По нижней горизонтальной оси отложены номера линий метанола согласно табл. 2, а вверху – соответствующий им тип метанола – A или E. Черным цветом отмечены измеренные пиковые температуры и их интервалы неопределенности, которые включают в себя систематические ошибки калибровки шкалы температур (4 % – для полос 1a, 1b и 3 % – для полосы 2a [32]) и среднюю амплитуду шума ($\sigma_{\rm rms}$). Красный цвет соответствует расчетным пиковым температурам.

Относительно низкие величины χ^2 в области допустимых значений физических параметров отражают тот факт, что мы использовали мажорирующие оценки ошибок калибровки шкалы температур. Однако это не сказывается на основном выводе, что отобранные линии A- и E-метанола трассируют одни и те же области газа с похожими физическими параметрами в молекулярном комплексе Sgr B2(N).

4. Оценки $\Delta\mu/\mu$. Для выполнения дифференциальных измерений фундаментальной физической постоянной μ необходимо иметь пары линий метанола с разными коэффициентами чувствительности Q_i, Q_j и измеренными радиальными скоростями $V_i^{(k)}$, $V_j^{(k)}$ [6]:

$$(\Delta\mu/\mu) \equiv (\mu_{\rm obs}-\mu_{\rm lab})/\mu_{\rm lab} = (V_i^{(k)}-V_j^{(k)})/[c(Q_j-Q_i)]\,, \quad (2)$$

Таблица 3. Параметры наблюдаемых линий метанола в спектре Sgr B2(N) – центральная частота $f_{\rm obs}$, полная ширина линии на половине высоты $FWHM$ и пиковое значение интенсивности в центре линии $T_{\rm A}^{\rm peak}$. Линии пронумерованы в соответствии с табл. 2. $V_{\rm LSR}^{(1)}$ и $V_{\rm LSR}^{(2)}$ – радиальные скорости, вычисленные с использованием измеренных лабораторных частот $f_{\rm lab}$ и предсказанных в теоретических расчетах $f_{\rm cal}$, соответственно (см. табл. 2). В скобках указаны ошибки 1σ в последних цифрах. Ошибки ширин линий ~ 5 %

#	$f_{\rm obs}$ (MHz)	$FWHM$ (km s^{-1})	$T_{\rm A}^{\rm peak}$ (K)	$V_{\rm LSR}^{(1)}$ (km s)	$V_{\rm LSR}^{(2)}$ (k ms)
1	493592.41(50) A	15	1.85(8)	64.78(30)	64.79(30)
2	493625.81(50) A	14	1.85(8)	65.49(30)	65.50(30)
3	494373.85(10) A	14	1.16(5)	65.38(7)	65.30(7)
4	495064.98(7) E	13	1.16(5)	65.46(6)	65.47(5)
5	541883.19(6) A	15	1.83(8)	65.15(5)	65.14(4)
6	541964.24(6) A	14	1.82(8)	65.09(5)	65.10(4)
7	542957.84(8) E	13	1.27(6)	65.34(6)	65.32(5)
8	590148.89(6) A	14	1.81(8)	65.41(5)	65.43(4)
9	590311.39(6) A	13	1.76(8)	65.45(5)	65.52(4)
10	590661.67(9) E	13	1.24(6)	65.61(6)	65.60(5)
11	638140.50(20) E	13	1.08(7)	65.32(10)	65.36(10)
12	638384.62(18) A	14	1.60(8)	65.20(9)	65.21(9)
13	638679.10(17) A	13	1.57(8)	65.11(9)	65.10(8)

Таблица 4. То же, что и табл. 3, но для наблюдаемых линий метанола в спектре Orion-KL

#	$f_{\rm obs}$ (MHz)	$FWHM$ (km s^{-1})	$T_{\rm A}^{\rm peak}$ (K)	$V_{\rm LSR}^{(1)}$ (km s^{-1})	$V_{\rm LSR}^{(2)}$ (km s^{-1})
1	493685.675(7) A	4	8.4(3)	8.15(4)	8.16(4)
2	493720.247(7) A	4	8.6(3)	8.15(4)	8.16(4)
3	494468.182(8) A	4	5.8(2)	8.19(4)	8.11(4)
4	495159.606(8) E	4	6.0(2)	8.17(4)	8.17(4)
5	541986.222(8) A	4	9.7(4)	8.16(4)	8.15(4)
6	542067.209(8) A	4	9.7(4)	8.14(4)	8.15(4)
7	543061.376(12) E	4	6.7(3)	8.18(4)	8.17(4)
8	590261.731(4) A	4	10.5(4)	8.10(4)	8.12(4)
9	590424.408(4) A	4	10.6(4)	8.06(4)	8.14(4)
10	590774.822(7) E	5	7.4(3)	8.19(4)	8.18(4)
11	638262.142(13) E	5	7.5(2)	8.18(3)	8.22(3)
12	638506.307(8) A	4	11.1(3)	8.07(3)	8.08(3)
13	638800.633(8) A	4	11.0(3)	8.07(3)	8.07(3)

где $c = 299792.458$ км с$^{-1}$ – скорость света, $k = 1$ или 2 в случае использования лабораторных или вычисленных частот соответственно.

Во избежание различных систематических ошибок, указанных в разделе 2, мы сравнивали наборы линий, попадающих в один поддиапазон. Кроме того, чтобы нивелировать корреляцию в ошибках $\Delta\mu/\mu$ (см. [27, 40]), мы берем для оценок средние значения радиальных скоростей для линий, имеющих близкие по значению коэффициенты Q. В таблице 5 это отмечено на верхней панели: обозначения V_1 и V_2 означают скорости сравниваемых линий, цифры под этими обозначениями показывают, по каким линиям вычислялось среднее значение (нумерация соответствует табл. 1). Так, например, запись 1 + 2 означает, что средняя скорость вычислялась из значений радиальных скоростей линий 1 и 2. Ниже указаны средние значения коэффициентов чувствительности сравниваемых линий Q_1 и Q_2. В таблице 5 приведены значения средних скоростей с использованием как лабораторных, так и вычсиленных частот, а под этими значениями показан результат вычисления $\Delta\mu/\mu$ в единицах 10^{-7}. Также в этой таблице указаны средневзвешенные оценки $\langle\Delta\mu/\mu\rangle^{(k)}$, полученные с использованием лабораторных ($k = 1$) или вычисленных ($k = 2$) опорных частот.

Средневзвешенные оценки $\langle\Delta\mu/\mu\rangle^{(k)}$ вычислялись при помощи метода обработки ряда неравно-

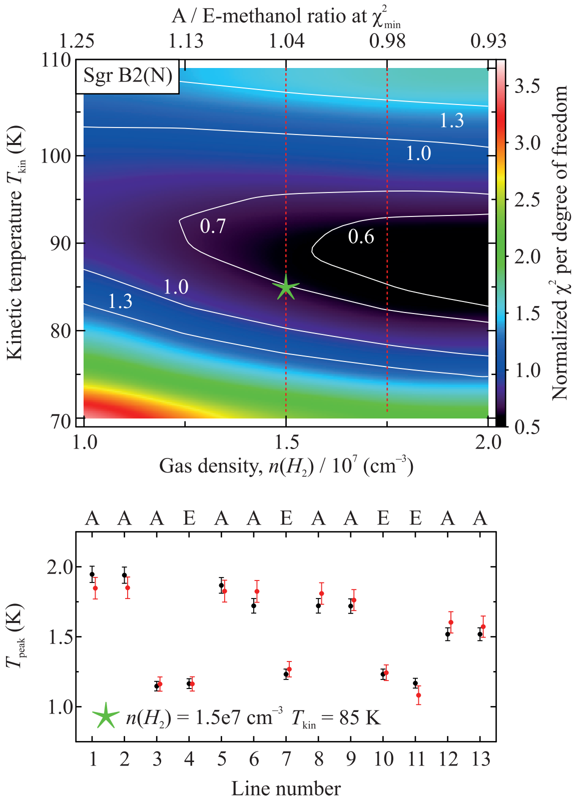

Рис. 2. (Цветной онлайн) (Верхняя панель.) Карта нормированных минимальных значений $\chi^2_{\min}$ как функция плотности газа $n(H_2)$ и кинетической температуры $T_{\rm kin}$ при различных значениях лучевых плотностей $N_{\rm A}$ и $N_{\rm E}$. Вертикальные пунктирные линии ограничивают область допустимых значений A/E. Звездочкой отмечена точка $\{n(H_2), T_{\rm kin}, N_{\rm A}, N_{\rm E}\} = \{1.5\text{e}7,\ 85,\ 1.96\text{e}15,\ 1.86\text{e}15\}$. (Нижняя панель.) Пример расчетных и наблюдаемых пиковых температур (красный и черный цвет, соответственно) для тринадцати линий метанола из табл. 3 в точке, отмеченной звездочкой на верхней панели. Минимальные значения χ^2 в этой точке следующие: $\chi^2_{\rm A} = 0.7$, $\chi^2_{\rm E} = 0.8$, и $\chi^2_{\rm A+E} = 0.7$

точных данных [41]. Для Sgr B2(N) в центральной части Галактики $\langle\Delta\mu/\mu\rangle^{(1)} = (-4.1\pm0.6)\times10^{-7}$ (6.8σ C.L.)[5], если использовать лабораторные измерения частот, или $\langle\Delta\mu/\mu\rangle^{(2)} = (-3.5\pm0.5)\times10^{-7}$ (7σ C.L.), если вместо лабораторных использовать вычисленные частоты. В любом случае, результат указывает на уменьшенное значение μ при высоком уровне статистической значимости. При этом параметр κ, сигнализирующий присутствие в выборке неучтенных систематических ошибок или промахов при $\kappa > 2$ (уравнение (4.138) в [41]), в нашем случае равен 1.17 и 0.98 для первой и второй выборки $\Delta\mu/\mu$ соответственно.

В то же время для Orion-KL – объекта вдали от Галактического центра, $\langle\Delta\mu/\mu\rangle^{(1)} = (-1.4\pm0.6)\times10^{-7}$ (2.3σ C.L.) по лабораторным значениям частот и $\langle\Delta\mu/\mu\rangle^{(2)} = (-1.1\pm0.8)\times10^{-7}$ (1.4σ C.L.) по вычисленным. Полученные значения для Orion-KL показывают только верхний предел на вариацию μ на уровне $\Delta\mu/\mu < (6-8)\times10^{-8}$.

Представленные в табл. 5 значения $\Delta\mu/\mu$, полученные с использованием лабораторных частот метанола, можно объединить с подобными данными из табл. 3 в работе [27], которая содержит измерения $\Delta\mu/\mu$ по наблюдениям на IRAM 30-м телескопе двух областей Sgr B2(N) и (M). В этом случае объем выборки увеличивается до $n = 14$ и получаются следующие значения: $\langle\Delta\mu/\mu\rangle^{(1)} = (-3.4\pm0.4)\times10^{-7}$ (8.5σ C.L.) и $\kappa = 0.13$.

К объединенной выборке объемом $n = 14$ можно применить статистический критерий проверки нормальности. Для малых выборок ($n \sim 10$) наиболее эффективным считается критерий Шапиро–Уилка [42][6]. В нашем случае $W = 0.94$ и p-value $= 0.36$ при $\alpha = 0.05$, т.е. выборка близка к нормальной.

Поскольку в ходе данного исследования все известные нам систематические эффекты были учтены, полученный результат в направлении центра Галактики $\langle\Delta\mu/\mu\rangle^{(1)} = (-3.4\pm0.4)\times10^{-7}$ может указывать на возможное уменьшение параметра μ по сравнению с его лабораторным значением. В качестве подтверждения отсутствия какой-либо систематики были также проанализированы спектры молекулярного облака Orion-KL, находящегося вдали от Галактического центра, где достоверных вариаций μ не обнаружено.

5. Обсуждение результатов и заключение. Подводя итоги проделанной работы, интересно сравнить значения $\Delta\mu/\mu$ в спектрах Sgr B2(N) и Orion-KL с полученными ранее для различных молекулярных облаков, распределенных в Галактическом диске в диапазоне от $R_{\rm GC} \approx 4$ кпс до $R_{\rm GC} \approx 12$ кпс. Такое сравнение проиллюстрировано на рис. 3, где точки с интервалами неопределенности $\pm1\sigma$ показывают оценки $\Delta\mu/\mu$, в которых использовались различные линии сложных органических молекул CH_3OH, $^{13}CH_3OH$ и CH_3CHO. Эти линии наблюдались на различных наземных телескопах и на космической обсерватории Herschel. Светло-серым и темно-серым

[5] C.L. означает уровень статистической значимости.

[6] Статистика Шапиро–Уилка W лежит в интервале $0 < W < 1$, правая граница которого указывает на то, что данные близки к нормальным. При этом, чтобы не было оснований отвергать гипотезу о нормальности, заданному уровню значимости, например, $\alpha = 0.05$ (доверительная вероятность 95 %) должно соответствовать p-value > 0.05.

Таблица 5. Оценки $\Delta\mu/\mu$ (в единицах 10^{-7}) в Sgr B2(N) и Orion-KL по линиям метанола CH_3OH (см. уравнение (2)). Измеренные средние значения радиальных скоростей V_1 и V_2 (в км c^{-1}) сгруппированны, согласно табл. 2, в четырех спектральных диапазонах. Номера линий с приблизительно одинаковыми коэффициентами чувствительности расположены под символами V_1 и V_2, а сами средние значения коэффициентов чувствительности приводятся строкой ниже. В скобках указаны ошибки 1σ в последних цифрах

V_1	V_2	V_1	V_2	V_1	V_2	V_1	V_2
1+2	3+4	5+6	7	8+9	10	11	12+13
$Q_1=-0.1$	$Q_2=1.65$	$Q_1=0.0$	$Q_2=1.7$	$Q_1=0.1$	$Q_2=1.6$	$Q_1=1.6$	$Q_2=0.1$
Sagittarius B2(N), $f_{\rm obs}$ & $f_{\rm lab}$ results							
65.14(21)	65.42(5)	65.12(4)	65.34(6)	65.43(3)	65.61(6)	65.32(10)	65.15(6)
$\Delta\mu/\mu = -5.4 \pm 4.2$		$\Delta\mu/\mu = -4.2 \pm 1.4$		$\Delta\mu/\mu = -3.9 \pm 1.5$		$\Delta\mu/\mu = -3.7 \pm 2.6$	
Weighted mean $\langle\Delta\mu/\mu\rangle^{(1)} = -4.1 \pm 0.6$							
Sagittarius B2(N), f_{obs} & f_{cal} results							
65.15(21)	65.38(4)	65.12(3)	65.32(5)	65.47(3)	65.60(5)	65.36(10)	65.16(6)
$\Delta\mu/\mu = -4.4 \pm 4.2$		$\Delta\mu/\mu = -3.9 \pm 1.1$		$\Delta\mu/\mu = -2.9 \pm 1.1$		$\Delta\mu/\mu = -4.4 \pm 2.6$	
Weighted mean $\langle\Delta\mu/\mu\rangle^{(2)} = -3.5 \pm 0.5$							
Orion-KL, f_{obs} & f_{lab} results							
8.15(3)	8.18(3)	8.15(3)	8.18(3)	8.08(3)	8.19(4)	8.18(4)	8.07(2)
$\Delta\mu/\mu = -0.5 \pm 0.8$		$\Delta\mu/\mu = -0.5 \pm 1.0$		$\Delta\mu/\mu = -2.3 \pm 1.0$		$\Delta\mu/\mu = -2.6 \pm 0.9$	
Weighted mean $\langle\Delta\mu/\mu\rangle^{(1)} = -1.4 \pm 0.6$							
Orion-KL, f_{obs} & f_{cal} results							
8.16(3)	8.14(3)	8.15(3)	8.17(4)	8.13(3)	8.18(4)	8.22(3)	8.07(2)
$\Delta\mu/\mu = 0.4 \pm 0.8$		$\Delta\mu/\mu = -0.4 \pm 1.0$		$\Delta\mu/\mu = -1.2 \pm 1.0$		$\Delta\mu/\mu = -3.4 \pm 0.9$	
Weighted mean $\langle\Delta\mu/\mu\rangle^{(2)} = -1.1 \pm 0.8$							

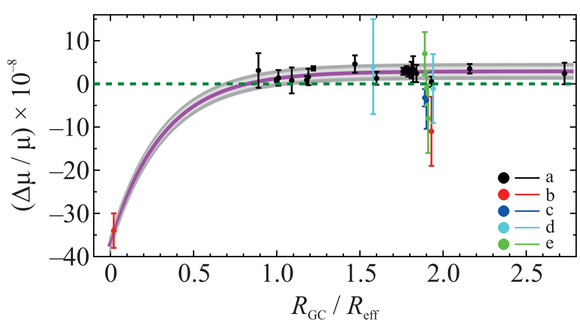

Рис. 3. (Цветной онлайн) Измеренные значения $\Delta\mu/\mu$ вдоль галактоцентрического радиуса $R_{\rm GC}$, нормированного на эффективный радиус Галактики $R_{\rm eff} \approx \approx 4.5$ кпс. Точки с интервалами неопределенности $\pm 1\sigma$ взяты из следующих публикаций: a – [25]; b – данная работа; c –[24]; d – [9, 11] и e – [12], в которых величины $\Delta\mu/\mu$ оценивались по линиям CH_3OH (три первые ссылки), $^{13}CH_3OH$ (две следующие ссылки) и CH_3CHO (последняя ссылка). Линия регрессии (розовый цвет) окружена доверительными зонами $\pm 1\sigma$ (светло-серый цвет) и $\pm 3\sigma$ (темно-серый цвет)

цветом заштрихованы две зоны статистической значимости $\pm 1\sigma$ и $\pm 3\sigma$ соответственно для регрессионной кривой, показанной розовым цветом. Небольшое превышение этой кривой над нулевым значением $\Delta\mu/\mu$ зависит от выбора опорных частот (см. табл. 4 в работе [25]) и не является статистически значимым. Поэтому основное назначение такой регрессии – просто показать графически резкое изменение величины $\Delta\mu/\mu$ в интервале $0 < R_{\rm GC}/R_{\rm eff} \lesssim 1$.

Аналогичное по характеру резкое возрастание круговых скоростей звезд в этом же интервале галактоцентрических расстояний наблюдается в нашей и других спиральных галактиках (например, [17, 21, 43]). При этом, принято считать, что в области $0 < R_{\rm GC}/R_{\rm eff} \lesssim 1$ происходит увеличение средней плотности темного вещества на фоне уменьшения средней плотности обычного барионного вещества, а выравнивание $\rho_{\rm br}$ и $\rho_{\rm DM}$ наступает при $R_{\rm GC}/R_{\rm eff} \gtrsim 1$, после чего при увеличении $R_{\rm GC}$ темное вещество доминирует, образуя Галактическое гало с вириальной массой $M_{\rm vir} \approx 7 \times 10^{11} M_\odot$ [43]. В области $R_{\rm GC}/R_{\rm eff} \gtrsim 1$ наблюдаются плоские кривые вращения звезд и нулевые значения $\Delta\mu/\mu$ на уровне нескольких единиц на 10^{-8}.

Отдельно отметим, что результаты данной работы ограничивают целый ряд теоретических моделей, предложенных для объяснения возможных пространственных изменений фундаментальных физических постоянных. Так, в теориях, рассматривающих дополнительные скалярные поля, которые трассируют неоднородности гравитационного поля, изменение μ связывают с градиентом гравитационного потенциала, $\Delta\mu/\mu = k_\mu \Delta\Phi$ (например, [44–46]). Такая связь не подтверждается измерениями $\Delta\mu/\mu$ в Sgr B2(N) и Orion-KL, поскольку оба молекулярных комплекса имеют сравнимые гравитационные потенциалы, $\Phi = GM/c^2 r \sim 10^{-9}$ (здесь r – радиус объекта), а оценки $\Delta\mu/\mu$ существенно различаются.

Другие модели (например, [47–49]), в основе которых лежит идея экранировки пятой силы в зависимости от локальной плотности барионного вещества, которая на много порядков отличается в межзвездной среде от ее значений в земных лабораториях, также не получают поддержку данными измерениями $\Delta\mu/\mu$ в Sgr B2(N) и Orion-KL. Локальные плотности барионного вещества в этих облаках сравнимы, $n(H_2) \sim 10^7$ см$^{-3}$, а оценки $\Delta\mu/\mu$ разные.

Итак, поскольку оценки $\Delta\mu/\mu$ оказываются, как мы показали, нечувствительными ни к значениям гравитационного потенциала, ни к локальной плотности барионного вещества, напрашивается вывод, что обнаруженная возможная корреляция в распределениях $\rho_{\rm DM}/\rho_{\rm br}$ и $\Delta\mu/\mu$ вдоль Галактического диска может быть связана именно с плотностью темного вещества. При этом, если темное вещество модулирует скалярное поле Хиггса, то можно ожидать пространственных изменений параметра μ. Подобный сценарий рассматривался, например, в многомерных моделях Калуцы–Кляйна в [50].

В заключение перечислим основные результаты, полученные в данной работе.

(1) Обработка двух идентичных наборов высокочастотных линий метанола (490–640 ГГц) в спектрах двух молекулярных облаков Sgr B2(N) и Orion-KL показывает систематические сдвиги этих линий относительно друг друга в первом случае и отсутствие во втором.

(2) Интерпретация такого поведения частот линий в терминах малых вариаций μ с учетом всех систематических поправок приводит к средним значениям $\langle\Delta\mu/\mu\rangle = (-3.4 \pm 0.4) \times 10^{-7}$ для Sgr B2(N) и (M) и $\langle\Delta\mu/\mu\rangle = (-1.1 \pm 0.8) \times 10^{-7}$ для Orion-KL.

(3) Показано с помощью расчетов по программе RADEX, что линии A- и E-метанола в Sgr B2(N) трассируют один и тот же газ с параметрами $n(H_2) \approx \approx 1.5 \times 10^7$ см$^{-3}$, $T_{\rm kin} \approx 85$ K, $N_{\rm A} \approx 2 \times 10^{15}$ см$^{-2}$ и ожидаемым для горячего газа отношением концентраций $A/E \approx 1$.

(4) Сравнение распределения величин $\Delta\mu/\mu$ вдоль галактоцентрического радиуса с плоскими кривыми вращения звезд в Галактике демонстрирует аналогичный характер этих двух распределений с резким возрастанием плотности темного вещества в диапазоне $0 < R_{\rm GC}/R_{\rm eff} \lesssim 1$ и таким же резким изменением значения $\Delta\mu/\mu$ в этом же диапазоне. Подобная корреляция может указывать на модуляцию темным веществом скалярного поля Хиггса.

Авторы выражают благодарность обоим анонимным рецензентам за конструктивные замечания.

Финансирование работы Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института в рамках темы Государственного задания Физико-технического института им. 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. L. Neill, E. A. Bergin, D. C. Lis et al. (Collaboration),“Herschel Observations of Extraorginary Sources: Analysis of the Herschel/HIFI Molecular Line Survey of Sagittarius B2(N)”, Astrophys. J. **789**, 8 (2014).
2. E. A. C. Mills, J. Corby, A. R. Clements, N. Butterfield, P. A. Jones, M. R. Cunningham, and J. Ott, “A Centimeter-wave Study of Methanol and Ammonia Isotopologues in Sgr B2(N): Physical and Chemical Differentiation between Two Hot Cores Astrophys. J. **869**, 121 (2018).
3. J. J. Bernal, C. D. Sophus, and L. M. Ziurys, “Methanol at the Edge of the Galaxy: New Observations to Constrain the Galactic Habitable Zone”, Astrophys. J. **922**, 106 (2021).
4. J. Braine, Y. Sun, Y. Shimajiri, F. F. S. van der Tak, M. Fang, Ph. André, H. Chen, and Y. Gao, “Dense gas and star formation in the outer Milky Way”, Astron. Astrophys. **676**, A27 (2023).
5. M. G. Kozlov and S. A. Levshakov, “Microwave and submillimeter molecular transitions and their dependence on fundamental constants”, Ann. Phys. **525**, 452 (2013).
6. S. A. Levshakov, M. G. Kozlov, and D. Reimers, “Methanol as a tracer of fundamental constant”, Astrophys. J. **738**, 26 (2011).
7. 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”, Suppl. material., Phys. Rev. Lett. **106**, 100801 (2011),.
8. J.-P. Uzan, “Fundamental constants: from measurement to the universe, a window on gravitation and cosmology”, Living Rev. Relativity **26**, 6 (2025).
9. 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).

10. 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).
11. Ю. С. Воротынцева, С. А. Левшаков, “Торсионно-вращательные переходы в метаноле как зонды фундаментальных физических постоянных – масс электрона и протона”, Письма ЖЭТФ **119**, 635 (2024) [J. Vorotyntseva and S. Levshakov, “Torsion-Rotational Transitions in Methanol as a Probe of Fundamental Physical Constants – Electron and Proton Masses”, JETP Lett. **119**, 649 (2024)].
12. 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).
13. X. Calmet, “Cosmological evolution of the Higgs boson’s vacuum expectation value”, Europ. Phys. J. C **77**, 729 (2017).
14. Y. Sofue, M. Honma, and T. Omodaka, “Unified Rotation Curve of the Galaxy – Decomposition into de Vaucouleurs Bulge, Disk, Dark Halo, and the 9-kpc Rotation Dip”, Pub. Astron. Soc. Japan **61**, 227 (2009).
15. F. Nesti, and P. Salucci, “The Dark Matter halo of the Milky Way, AD 2013”, J. Cosmol. Astropart. Phys. **07**, 016 (2013).
16. M. Portail, O. Gerhard, C. Wegg, and M. Ness, “Chemodynamical modelling of the galactic bulge and bar”, Mon. Not. R. Astron. Soc. **465**, 1621 (2017).
17. N. G. de Isídio, K. Menéndez-Delmestre, T. S. Gonçalves, M. Grossi, D. C. Rodrigues, N. Garavito-Camargo, A. Araujo-Carvalho, P. P. B. Beaklini, Y. Cavalcante-Coelho, A. Cortesi, L. H. Quiroga-Nuñez, and T. Randriamampandry, “Dark Matter Distribution in Milky Way analog Galaxies”, Astrophys. J. **971**, 69 (2024).
18. T. Totani, “20 GeV halo-like excess of the Galactic diffuse emission and implications for dark matter annihilation”, J. Cosmol. Astropart. Phys. **11**, 080 (2025).
19. T. C. Licquia, and J. A. Newman, “Improved Estimates of the Milky Way’s Stellar Mass and Star Formation Rate from Hierarchical Bayesian Meta-Analysis”, Astrophys. J. **806**, 96, (2015).
20. S. Zhou, A. Aragón-Salamanca, M. Merrifield, B. H. Andrews, N. Drory, and R. R. Lane, “Are Milky-Way-like galaxies like the Milky Way? A view from SDSS-IV/MaNGA”, Mon. Not. R. Astron. Soc. **521**, 5810 (2023).
21. M. C. Cavalcante-Siviero, K. Menéndez-Delmestre, P. P. B. Beaklini, T. S. Gonçalves, D. C. Rodrigues, N. G. de Isídio, and A. Araujo-Carvalho, “The Universality of Dark Matter Density Profiles for Milky Way Analog Galaxies”, Astrophys. J., arXiv: 2511.00241.
22. 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).
23. S. A. Levshakov, D. Reimers, C. Henkel, B. Winkel, A. Mignano, M. Centurión, and P. Molaro, “Limits on the spatial variations of the electron-to-proton mass ratio in the Galactic plane”, Astron. Astrophys. **559**, A91 (2013).
24. 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).
25. 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).
26. Ю. С. Воротынцева, С. А. Левшаков, “Указание на вариацию отношения масс электрона и протона в пределах Галактики”, Письма ЖЭТФ **121**, 619 (2025) [J. Vorotyntseva , S. Levshakov, “Indication of the Electron-to-Proton Mass Ratio Variation in the Galaxy”, JETP Lett. **121**, 619 (2025)].
27. Ю. С. Воротынцева, С. А. Левшаков, К. Хенкель, “Указание на вариацию отношения масс электрона и протона в пределах Галактики. II. Линии метанола на 3 мм в спектрах SgrB2(N) и (M)”, Письма ЖЭТФ **122** (2025) [J. Vorotyntseva, S. Levshakov, and C. Henkel, “Indications of Electron-to-proton Mass Ratio Variations in the Galaxy. II. 3 mm Methanol Lines Toward Sgr B2(N) and (M)”, JETP Lett. **122**, 715 (2025)].
28. https://archives.esac.esa.int/hsa/whsa/.
29. A. Schwörer, Á. Sánchez-Monge, P. Schilke, T. Möller, A. Ginsburg, F. Meng, A. Schmiedeke, H. S. P. Müller, D. Lis, and S.-L. Qin, “The physical and chemical structure of Sagittarius B2. IV. Converging filaments in the high-mass cluster forming region Sgr B2(N)”, Astron. Astrophys. **628**, A6 (2019).
30. L. Pagani, C. Favre, P. F. Golgsmith, E. A. Bergin, R. Snell, and G. Melnick, “The complexity of Orion: an ALMA view. I. Data and first results”, Astron. Astrophys. **604**, A32 (2017).
31. N. R. Crockett, E. A. Bergin, J. L. Neill, C. Favre, G. A. Blake, E. Herbst, D. E. Anderson, and G. E. Hassel, “Herschel Observations of Extraordinary Sources: Analysis of the HIFI 1.2 THz Wide Spectral Survey toward Orion KL. I. Methods”, Astrophys. J. **806**, 239 (2015).
32. D. Teyssier, I. Avruch, S. Beaulieu, J. Braine, A. Marston, P. Morris, M. Olberg, M. Rengel, and R. Shipman, HIFI Handbook, ver.2.1 (2017).
33. 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).

34. 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. Spec. **251**, 305 (2008).
35. I. M. Avruch, Cycle38 Frequency Calibration Tests, Tech. Rep. HIFI- ICC-TN-2015-002, SRON Groningen (2011).
36. W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical Recipies in C* (Cambridge, Cambridge University Press, (2002), p. 693.
37. E. S. Wirström, W. D. Geppert, Å. Hjalmarson, C. M. Persson, J. H. Black, P. Bergman, T. J. Millar, M. Hamberg, and E. Vigren, "Observational tests of interstellar methanol formation", Astron. Astrophys. **533**, A24 (2011).
38. F. F. S. van der Tak, J. H. Black, F. L. Schöier, D. J. Jansen, E. F. van Dishoeck, "A computer program for fast non-LTE analysis of interstellar line spectra. With diagnostic plots to interpret observed line intensity ratios", Astron. Astrophys. **468**, 627 (2007).
39. D. Rabli, and D. R. Flower, "The rotational structure of methanol and its excitation by helium", Mon. Not. R. Astron. Soc. **406**, 95 (2010).
40. 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).
41. Т. А. Агекян, *Основы теории ошибок для астрономов и физиков* (Наука, М., 1972), с.144.
42. S. S. Shapiro, and M. B. Wilk,"Analysis of variance test for normality" Biometrika **52**, 591 (1965).
43. A.-C. Eilers, D. W. Hogg, H.-W. Rix, and M. K. Ness, "The Circular Velocity Curve of the Milky Way from 5 to 25 kpc", Astrophys. J. **871**, 120 (2019).
44. 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).
45. V. V. Flambaum and E. V. Shuryak, in *Nuclei and Mesoscopic Physics*, ed. by P. Danielewicz, P. Piecuch, and V. Zelevinsky, AIP Conf. Proc. **995**, 1 (2008).
46. S. Blatt, A. D. Ludlow, G. K. Campbell et al. (Collaboration), "New Limits on Coupling of Fundamental Constants to Gravity Using Sr87 Optical Lattice Clocks", Phys. Rev Lett. **100**, 140801 (2008).
47. J. Khoury and A. Weltman A., "Chameleon Fields: Awaiting Surprises for Tests of Gravity in Space", Phys. Rev. Lett. **93**, 171104 (2004).
48. K. F. Olive, and M. Pospelov, "Environmental dependence of masses and coupling constants", Phys. Rev. D **77**, 043524 (2008).
49. P. Brax, "An Environmental Variation of Constants", Phys. Rev. D **90**, 023505 (2014).
50. A. Carmona, J. C. Ruiz, and M. Neubert, "A warped scalar portal to fermionic dark matter", Europ. Phys. J. C **81**, 58 (2021).