Письма в ЖЭТФ, том 122, вып. 11, с. 709 – 716

Указание на вариацию отношения масс электрона и протона в пределах Галактики. II. Линии метанола на 3 мм в спектрах Sgr B2(N) и (M)

Ю. С. Воротынцева[+1)], *С. А. Левшаков*[+], *К. Хенкель*[*2)]

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

[*] *Max Planck Institut für Radioastronomie, Auf dem Hügel 69, D-53121 Bonn, Germany*

Поступила в редакцию 5 сентября 2025 г.
После переработки 24 октября 2025 г.
Принята к публикации 24 октября 2025 г.

Дифференциальные измерения фундаментальной постоянной $\mu = m_e/m_p$ (отношение массы электрона к массе протона) для двух источников вблизи Галактического центра – молекулярных облаков Стрелец B2(N) и B2(M) – показали, что ее значение в этих областях ниже лабораторного. По наблюдениям линий излучения метанола (CH_3OH) в диапазоне 80–112 ГГц (данные 30-м телескопа IRAM) было получено средневзвешенное значение величины $\langle \Delta\mu/\mu \rangle \equiv \langle (\mu_{\rm obs} - \mu_{\rm lab})/\mu_{\rm lab} \rangle$ для облака Sgr B2(N), составившее $(-2.1 \pm 0.6) \times 10^{-7}$ (1σ C.L.) при объеме выборки $n = 9$. Это значение $\Delta\mu/\mu$ имеет тот же знак, что и результат недавних измерений по линиям метанола в более высокочастотном диапазоне 542–543 ГГц (данные космического телескопа Herschel) для Sgr B2(N): $\langle \Delta\mu/\mu \rangle = (-4.2 \pm 0.7) \times 10^{-7}$, $n = 2$.

DOI: 10.31857/S0370274X25120018

1. Введение. Фундаментальные физические константы естественным образом входят во все законы физики, их численные значения должны отражать свойства окружающего нас мира, но их происхождение остается необъяснимым до наших дней. В 1937 году Дираком [1] было высказано предположение, что в динамично развивающейся Вселенной физические константы также могут быть динамическими переменными, соответствующими локальному возрасту Вселенной. Однако, многочисленные лабораторные эксперименты с атомными, а в последнее время и ядерными часами, так и не выявили никаких изменений. Наиболее строгий верхний предел на данный момент, например, для, постоянной тонкой структуры $\alpha = e^2/\hbar c$ установлен на уровне $\Delta\alpha/\alpha < 10^{-19}$ yr^{-1} (1σ)[3)].

Другие модели рассматривают зависимость величин физических констант от значений локальной плотности барионного вещества [2] или от напряженности гравитационного поля [3]. Однако, для того чтобы получить самосогласованную картину с квантовой физикой, вариации констант не могут носить произвольный характер [4]. Например, выполнение требования сохранения энергии влечет за собой включение в теорию дополнительных скалярных полей, которые могут быть связаны с другой, неизвестной (темной) формой материи [5]. Если такая связь существует, тогда можно ожидать, что величины некоторых физических констант будут функционально связаны с локальными изменениями плотности темной материи. Такая картина характерна, например, для различных областей Галактики – центра и периферии. Подробный анализ имеющихся измерений и теоретических моделей в этой области исследований приводится в недавнем обзоре [6].

Астрономические наблюдения позволяют значительно расширить лабораторные эксперименты и проверить безразмерные константы в различных условиях окружающей среды локально и на космологических масштабах времени. Оказалось, что в данном случае наиболее чувствительной величиной к гипотетическим пространственным и временным изменениям констант является отношение массы электрона к массе протона, $\mu = m_e/m_p$. Наиболее жесткое космологическое ограничение на временном интервале ~ 10 млрд лет, основанное на анализе переходов в метаноле (CH_3OH) дает $\Delta\mu/\mu \equiv (\mu_{\rm obs} - \mu_{\rm lab})/\mu_{\rm lab} < 5 \times 10^{-8}$ [7]. Верхний предел того же порядка величины ($\sim 10^{-8}$) был получен из наблюдений линий CH_3OH и $^{13}CH_3OH$ в диске нашей Галактики на относительно больших галактоцентрических расстояниях, $D_{\rm GC} \sim 8$ кпс [8–10].

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

[2)] C. Henkel.

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

Однако, окрестности центральной части Галактики до недавнего времени подробно не исследовались. Были предприняты две попытки тестирования принципа локальной инвариантности в окрестности сверхмассивной черной дыры (СМЧД) Sgr A* по атомным абсорбционным линиям в спектрах звезд, находящихся в окрестности СМЧД [11, 12]. Обе попытки относились к оценке вариаций постоянной тонкой структуры α на уровне чувствительности $\Delta\alpha/\alpha \lesssim 10^{-5}$. На два порядка более высокая чувствительность к вариациям фундаментальных констант может быть достигнута в радиоастрономических спектральных наблюдениях, в частности, при оценках $\Delta\mu/\mu$ по микроволновым спектрам различных молекул. Такие оценки в центральных областях Галактики до сих пор не проводились. В связи с этим, была предпринята попытка восполнить этот пробел в [13], где вариации $\Delta\mu/\mu$ оценивались по линиям метанола из высокочастотного диапазона $\Delta f = 542{-}543$ ГГц, наблюдаемым с помощью космического телескопа Herschel[4] в направлении молекулярного облака в Стрельце (Sgr B2(N)), которое расположено вблизи СМЧД, центра Галактики, на расстоянии $D_{\rm GC} \sim 130$ пс [14]. Результат этого предварительного анализа относительных положений трех линий метанола показал возможное снижение μ на статистически значимом уровне $\Delta\mu/\mu = (-4.2 \pm 0.7) \times \times 10^{-7}$ [13].

В настоящей работе мы продолжаем эти исследования, используя другой набор линий метанола, другой частотный диапазон, другой телескоп, другое спектральное разрешение и новый объект Sgr B2(M), наряду с Sgr B2(N).

2. Объекты и наблюдения. Молекулярное облако Sgr B2 является крупнейшим молекулярным облаком в центральной части Галактики с массой $M_{\rm SgrB2} \sim 10^7 M_\odot$ [15], а также одним из самых массивных облаков в Галактике в целом [16]. Это активная область звездообразования, состоящая в основном из четырех обширных комплексов – Sgr B2(N) в северной части, Sgr B2(M) в средней части, Sgr B2(S) в южной части и, возможно, области G+0.693-0.027, расположенной немного восточнее Sgr B2(N).

В настоящей работе мы используем общедоступные спектры Sgr B2(N) и (M), которые были получены с помощью 30-метрового телескопа IRAM[5] в 2004–2005 гг. [17]. Подробные данные об этих наблюдениях приведены в оригинальной статье [17], а спектры доступны по ссылке [18]. Ниже мы перечислим только основные параметры этих наблюдений.

Частотный диапазон наблюдений 80–116 ГГц (атмосферное окно 3 мм) разделен на четыре поддиапазона (80.0–89.9 ГГц, 89.9–100.2 ГГц, 100.2–114.6 ГГц и 114.6–116.0 ГГц); наблюдения велись одновременно при помощи двух гетеродинных приемников, соединенных со спектрометром-автокоррелятором VESPA (VErsatile Spectrometric and Polarimetric Array). Спектральное разрешение составило 312.5 кГц, ширина полосы – 420 МГц, размер апертуры $HPBW \sim 30''$, и точность наведения телескопа – $2'' - 3''$ (rms). Координаты наведения телескопа – $R.A. = 17^{\rm h}47^{\rm m}20\overset{\rm s}{.}0$, $Dec. = -28°22'19\overset{''}{.}0$ (J2000), радиальная скорость облака $V_{\rm LSR} = 64$ км с$^{-1}$ для Sgr B2(N), и $R.A. = 17^{\rm h}47^{\rm m}20\overset{\rm s}{.}4$, $Dec. = -28°23'07\overset{''}{.}0$ (J2000), $V_{\rm LSR} = 62$ км с$^{-1}$ для Sgr B2(M).

Следует отметить, что центральные координаты и апертура телескопа в наблюдениях Sgr B2(N) Herschel, используемых в [13], практически идентичны параметрам IRAM: $R.A. = 17^{\rm h}47^{\rm m}20\overset{\rm s}{.}06$, $Dec. = = -28°22'18\overset{''}{.}33$ (J2000), $HPBW \sim 40''$. При этом спектральное разрешение в высокочастотном диапазоне на 0.6 мм (Herschel) было в 3 раза выше, чем на 3 мм (IRAM).

Полученные спектры были откалиброваны в антенных температурах ($T_{\rm mb}$) и частотах $f_{\rm obs}$ с использованием стандартного пакета программ CLASS[6].

3. Отбор и обработка линий. Из опубликованных спектров Sgr B2(N) и (M) были отобраны (i) близкие по частоте группы эмиссионных линий метанола, попадающие в один частотный поддиапазон, (ii) сильные линии с отношением сигнала к шуму $SNR > 60$, (iii) с известными коэффициентами чувствительности Q к малым изменениям параметра μ и (iv) без существенного блендирования центральных пиков соседними линиями других молекул. Характеристики отобранных метанольных линий перечислены в табл. 1, где они сгруппированы в соответствии с упомянутыми выше частотными поддиапазонами: во второй колонке даны квантовые числа J и K для верхнего u и нижнего ℓ уровней, в третьей колонке – энергия нижнего уровня E_ℓ, в четвертой колонке – измеренные лабораторные частоты $f_{\rm lab}$ с ошибками, в пятой колонке – вычисленные теоретически частоты $f_{\rm cal}$ [22], и в последней колонке – коэффициент чувствительности Q данного перехода к вариациям μ, взятый либо из [23] (где $Q = -K_\mu$), либо рассчи-

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

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

[6] Continuum and Line Analysis Single-dish Software [19].

Таблица 1. Параметры отобранных линий CH_3OH. Измеренные $f_{\rm lab}$ и вычисленные $f_{\rm cal}$ частоты линий (в МГц) и значения энергии нижних торсионно-вращательных уровней E_ℓ взяты из указанных ссылок. В скобках приводятся ошибки 1σ в последних цифрах

#	Transition $J_{K_u} \to J_{K_\ell}$	E_ℓ, cm^{-1}	Measured frequencies, $f_{\rm lab}$	Calculated frequencies, $f_{\rm cal}$	Q
	First subband 80.0−89.9 GHz				
1	$7_2 \to 8_1 A^-$	68.7^a	$80993.160(50)^a$	$80993.245(12)^c$	4.0^d
2	$13_{-3} \to 14_{-2} E$	187.6^a	$84423.810(50)^a$	$84423.769(12)^c$	5.8^e
3	$7_2 \to 6_3 A^-$	68.5^a	$86615.600(5)^b$	$86615.574(13)^c$	7.3^d
4	$7_2 \to 6_3 A^+$	68.5^a	$86902.949(5)^b$	$86902.916(5)^c$	7.3^d
5	$15_3 \to 14_4 A^+$	225.2^a	$88594.960(50)^a$	$88594.787(11)^c$	2.3^e
6	$15_3 \to 14_4 A^-$	225.2^a	$88940.090(50)^a$	$88939.971(11)^c$	2.3^e
	Second subband 89.9−100.2 GHz				
7	$8_3 \to 9_2 E$	88.1^a	$94541.787(50)^a$	$94541.785(14)^c$	0.2^d
8	$8_0 \to 7_1 A^+$	54.9^a	$95169.463(10)^b$	$95169.391(11)^c$	-1.9^d
9	$2_1 \to 1_1 A^-$	11.7^a	$97582.804(7)^b$	$97582.798(2)^c$	1.0^d
	Third subband 100.2−114.6 GHz				
10	$13_2 \to 12_3 E$	159.0^a	$100638.900(50)^a$	$100638.872(15)^c$	0.9^e
11	$17_{-2} \to 17_1 E$	261.4^a	$111626.530(50)^a$	$111626.514(15)^c$	-1.8^e

Ссылки: *a* – [20]; *b* –[21]; *c* – [22]; *d* – [23]; *e* – Q рассчитан в данной работе.

танный в настоящей работе с использованием нашей процедуры, описанной в [24].

Учитывая сложную пространственную и динамическую структуру молекулярных облаков, сначала необходимо определить, что понимается под центром эмиссионной линии, профиль которой отражает распределение газа и его кинематику в пространственных масштабах, охватываемых апертурой телескопа. Под центром эмиссионной линии мы будем понимать точку, в которой огибающая профиля линии достигает максимума. В случае одиночной линии с симметричным доплеровским ядром, это определение совпадает с центром тяжести линии. Однако, в случае более сложного профиля с блендами в крыльях, это определение обеспечивает более надежные оценки радиальных скоростей, по сравнению с центром тяжести линии, так как спектры Sgr B2(N) и (M) содержат множество слабых эмиссионных деталей, некоторые из которых перекрываются сильными линиями метанола и искажают их крылья. При таком подходе огибающая кривая может быть определена с помощью многокомпонентной гауссовой модели (с наименьшим числом гауссиан), которая описывает наблюдаемый профиль линии метанола при достижении $\chi^2_\nu \lesssim 1$, где ν – число степеней свободы.

Результаты вычислений показаны на рис. 1, где исходные спектры представлены черными точками, а результирующие огибающие кривые – красным цветом. Горизонтальной зеленой линией отмечены диапазоны, где находился глобальный минимум функции χ^2. На каждой панели в верхнем левом углу указаны величины SNR и χ^2 (на степень свободы), а в верхнем правом углу – название объекта и лабораторная частота линии. Идентифицированные бленды, показанные на рис. 2 и 5 в [17], также отмечены вертикальными синими отрезками на рис. 1. Наблюдаемая асимметрия красного крыла всех линий метанола в Sgr B2(N) вызвана более слабой эмиссией тех же линий метанола от второго горячего ядра N2, смещенных приблизительно на 11 км с$^{-1}$. Эти вторичные составляющие скорости не будут проанализированы, поскольку они не обеспечивают достаточной точности в определении центров линии.

Рассчитанные параметры огибающих кривых – наблюдаемая частота пика линии $f_{\rm obs}$ и ширина на половине высоты ($FWHM$) для каждого перехода – представлены в табл. 2 во второй и третьей колонках соответственно. В четвертой колонке указаны коэффициенты асимметрии As доплеровского ядра линии (для чисто гауссовского профиля $As = 0$). В пятой и шестой колонках указаны радиальные скорости $V_{\rm LSR}$, рассчитанные в соответствии с радиоастрономическим соотношением

$$V^{(1)}_{\rm LSR} = c\,(1 - f_{\rm obs}/f_{\rm lab})\,, \;\; V^{(2)}_{\rm LSR} = c\,(1 - f_{\rm obs}/f_{\rm cal})\,. \quad (1)$$

Ошибки измерений радиальной скорости, $\sigma_{V_{\rm LSR}}$, включают как неопределенности измерения положения спектральных линий $\sigma_{f_{\rm obs}}$, так и неопределенности измерения лабораторных частот $\sigma_{f_{\rm lab}}$, которые указаны в табл. 1:

$$\sigma_{V_{\rm LSR}} = c\frac{f_{\rm obs}}{f_{\rm lab}}\sqrt{\delta^2_{\rm obs} + \delta^2_{\rm lab}}, \quad (2)$$

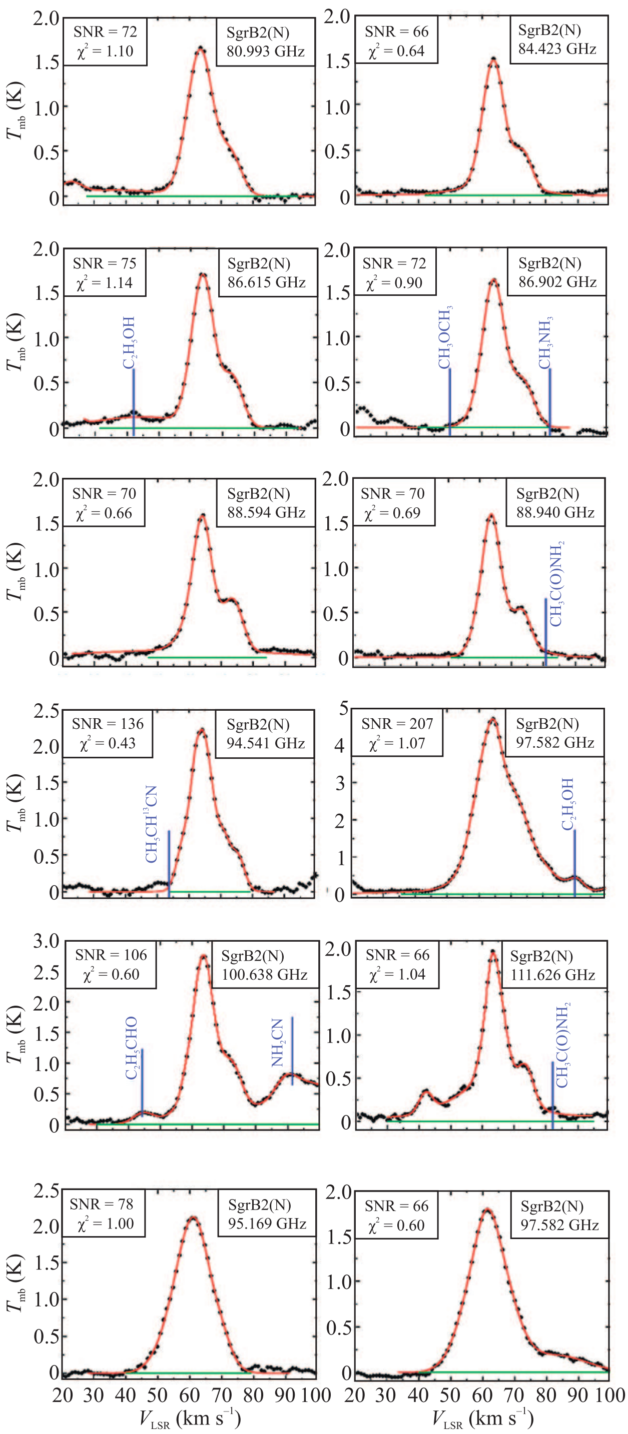

Рис. 1. (Цветной онлайн) Отобранные линии метанола (CH_3OH) в направлениях Sgr B2(N) и (M). Исходные спектры отображены черными точками, а соответствующие огибающие кривые – красным цветом. Горизонтальными зелеными линиями показаны диапазоны, в которых вычислялся χ^2. Вертикальные синие отрезки отмечают идентифицированные бленды в соответствии с рис. 2 и 5 из [17]

где $\delta_{\rm obs} = \sigma_{f_{\rm obs}}/f_{\rm obs}$, и $\delta_{\rm lab} = \sigma_{f_{\rm lab}}/f_{\rm lab}$. Сравнение ошибок измеренных частот из табл. 2 с ошибками лабораторных частот из табл. 1 показывает, что в результирующих ошибках радиальной скорости преобладают лабораторные неопределенности. Теоретические ошибки вычислялись методом наименьших квадратов, в котором наблюдаемые лабораторные частоты и их неопределенности использовались для подгонки параметров гамильтониана, при помощи которого рассчитывались частоты $f_{\rm cal}$ [22]. Поэтому, в дальнейших расчетах $\Delta\mu/\mu$ использовались ошибки реальных лабораторных измерений, а не ошибки вычисленных частот. Эти ошибки в большинстве случаев составляют $\sim 10\,\%$ от ширины канала, и изменением радиальной скорости ~ 1 м с$^{-1}$ из-за вращения Земли между сбросами гетеродина приемника можно пренебречь.

Мы также не учитывали систематические ошибки из-за нелинейности преобразования шкалы частот в шкалу скоростей, которые могут достигать нескольких кГц для объектов из диска Галактики при использовании стандартного пакета программ CLASS [25]. В нашем анализе эти ошибки несущественны, поскольку мы обработали профили линий в шкале частот, которая является линейной для автокорреляторов [26], а лишь затем перевели полученные центры линий в радиальные скорости согласно рекомендациям из [26].

Следует отметить, что существует еще один источник систематических ошибок, связанный с неточностями наведения телескопа в серии наблюдений и последующего сложения отдельных экспозиций для увеличения отношения сигнала к шуму. Ошибки наведения ($2''-3''$) могут приводить к дополнительным неопределенностям в положениях линий, поскольку луч телескопа может не всегда покрывать в точности одну и ту же область в молекулярном облаке. Оценить такие ошибки в отдельных экспозициях не представляется возможным. Однако, процедура сложения большого числа независимых экспозиций должна нивелировать такие неопределенности в интегральных спектрах, а сравнение результатов измерений с данными, полученными на другом телескопе [13], может служить дополнительным контролем возможных систематических сдвигов.

Ширины линий, приведенные в табл. 2, кроме кинематических характеристик излучаемой области, отражают также неопределенности наведения телескопа между отдельными экспозициями. Ошибки ширин линий и ошибки измеряемых потоков в эмиссионных линиях достигают величин 15–20 % на 3 мм [17]. Поэтому, приведенные значения ширин линий

Таблица 2. Рассчитанные параметры линий метанола – центральная частота $f_{\rm obs}$ и полная ширина линии на половине высоты $FWHM$ – из диапазона 80–112 ГГц в спектрах Sgr B2(N) и (M). Линии пронумерованы и сгруппированы в соответствии с наблюдаемыми поддиапазонами частот из [17] и как показано в табл. 1. As – коэффициент асимметрии доплеровских ядер линий. $V^{(1)}_{\rm LSR}$ и $V^{(2)}_{\rm LSR}$ – радиальные скорости, вычисленные с использованием измеренных лабораторных частот $f_{\rm lab}$ и предсказанных в теоретических расчетах $f_{\rm cal}$, соответственно (см. табл. 1). В скобках указаны ошибки 1σ в последних цифрах. Ошибки ширин линий составляют 15–20 %, а ошибки коэффициентов асимметрии меньше 1 %

#	$f_{\rm obs}$, MHz	$FWHM$, km s^{-1}	As	$V^{(1)}_{\rm LSR}$, km s^{-1}	$V^{(2)}_{\rm LSR}$, km s^{-1}
			Sgr B2(N), 1st subband 80.0–89.9 GHz		
1	80976.030(10)	10.0	0.06	63.41(19)	63.72(6)
2	84405.922(10)	9.0	0.02	63.52(18)	63.38(6)
3	86597.175(9)	9.0	0.05	63.77(4)	63.68(5)
4	86884.478(9)	9.0	0.05	63.72(4)	63.61(4)
5	88576.056(10)	8.0	0.03	63.97(17)	63.39(5)
6	88921.240(9)	8.0	0.04	63.54(17)	63.14(5)
			Sgr B2(N), 2nd subband 89.9–100.2 GHz		
7	94521.609(7)	9.0	0.04	63.98(16)	63.98(5)
9	97561.888(4)	15.0	0.008	64.26(2)	64.239(14)
			Sgr B2(N), 3rd subband 100.2–114.6 GHz		
10	100617.577(7)	9.0	0.05	63.52(15)	63.44(5)
11	111602.917(12)	8.0	0.05	63.42(14)	63.37(5)
			Sgr B2(M), 2nd subband 89.9–100.2 GHz		
8	95150.073(11)	14.0	0.01	61.08(5)	60.85(5)
9	97562.772(14)	15.0	0.03	61.54(5)	61.52(4)

могут служить лишь дополнительным фильтром при отборе пар линий для оценок $\Delta\mu/\mu$, у которых ширины различаются не более чем на 1–2 км с$^{-1}$. Этому условию удовлетворяют линии из 1-го и 3-го поддиапазонов в спектре Sgr B2(N) и линии из 2-го поддиапазона в спектре Sgr B2(M). Линия 9 из 2-го поддиапазона в спектре Sgr B2(N) существенно уширена за счет значительного вклада от компоненты N2, влияние которой на ширину более слабой линии 7 из этого же поддиапазона менее заметно (см. рис. 1). Поэтому, линии 7 и 9 непригодны для прецизионных оценок $\Delta\mu/\mu$, несмотря на то, что они имеют наибольшие SNR среди отобранных линий метанола в спектре Sgr B2(N). Оставшиеся линии, перечисленные в табл. 2, имеют малые значения коэффициентов асимметрии ($As \ll 0.1$) и примерно одинаковые ширины доплеровских ядер, что указывает на их происхождение из одной и той же пространственной области.

Кроме контроля формы ядер линий, можно провести сравнение пиковых значений относительных интенсивностей с теоретическими величинами, вычисленными для определенных температур возбуждения. Для этой цели мы использовали процедуру из CDMS [27]. Рисунок 2 отображает результаты такого сравнения – цветными линиями показаны теоретические значения для различных температур в оптически тонком случае: 300, 150, 75 и 37.5 K, а черным цветом – наблюдаемые относительные интенсивности, нормированные на интенсивность линии 86.615 ГГц (# 3 на верхней панели, Sgr B2(N)) и на интенсивность линии 95.169 ГГц (# 8 на нижней панели, Sgr B2(M)). Заштрихованные области показывают доверительные зоны $\pm 1\sigma$, вычисленные с максимальной ошибкой калибровки потоков в 20 % [17]. Цифры на панелях соответствуют номерам линий из табл. 1.

Из рисунка 2 видно, что относительные интенсивности линий, отобранных в спектре Sgr B2(M), соответствуют низкой температуре возбуждения 37.5 K, в то время как в Sgr B2(N) наблюдаемая картина сложнее. Относительные интенсивности линий из 1-го поддиапазона (80–89.9 ГГц) соответствуют более высокой температуре 150 K, так же, как и линии из 3-го поддиапазона (100.2–114.6 ГГц) – все эти линии, вероятно, происходят из одной области, о чем говорят и их похожие профили, и скорости. Однако, линия 9 из 2-го поддиапазона (89.9–100.2 ГГц) более всего подходит под температуру в 75 K. В то же время увеличенное значение относительной интенсивности в точке 9 по сравнению с теоретически ожидаемым значением для $T_{\rm ex} = 150$ K (зеленая линия на рис. 2) может также указывать на значительный вклад внутренней бленды от источника N2, что обсуждалось выше. И это является третьей причиной не рассматривать линии 7 и 9 в вычислениях $\Delta\mu/\mu$ для Sgr B2(N).

4. Оценки $\Delta\mu/\mu$. Дифференциальные измерения фундаментальной физической постоянной μ про-

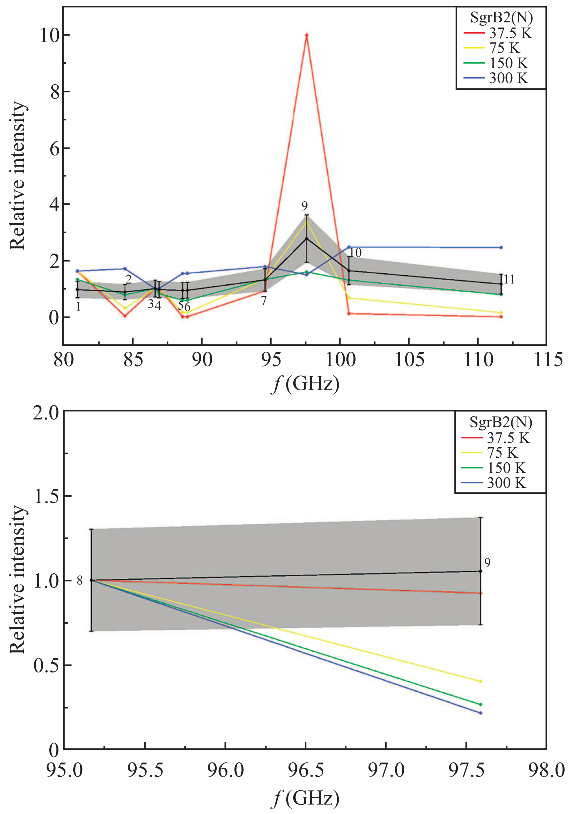

Рис. 2. (Цветной онлайн) Сравнение пиковых относительных интенсивностей наблюдаемых линий (черный цвет) с теоретическими (цветные линии). Цифры соответствуют номерам линий из табл. 1. На верхней панели показаны относительные интенсивности линий в Sgr B2(N), нормированные на линию 86.615 ГГц (# 3), а на нижней – для Sgr B2(M) – относительно линии 95.169 ГГц (# 8). Заштрихованные области отмечают доверительные зоны $\pm 1\sigma$, для максимальной ошибки калибровки потоков в 20 % [17]

изводятся из сравнения пар линий метанола с известными коэффициентами чувствительности Q_i, Q_j, которые образуются в одной и той же области молекулярного облака и имеют радиальные скорости V_i^k, V_j^k [24]:

$$(\Delta\mu/\mu)^{(k)} \equiv (\mu_{\rm obs}-\mu_{\rm lab})/\mu_{\rm lab} = (V_i^k-V_j^k)/[c(Q_j-Q_i)], \quad (3)$$

где c – скорость света, $k = 1$ или 2 для скоростей, вычисленных по лабораторным значениям частот или по теоретическим, соответственно.

При расчете разности радиальных скоростей между парами линий метанола, которые используются для оценки $\Delta\mu/\mu$, есть некоторая свобода выбора. А именно, наиболее чувствительные оценки получаются с наибольшим по модулю знаменателем, $\Delta Q_{j-i} = Q_j - Q_i$, в уравнении (3). Из этих соображений были вычислены значения $\Delta\mu/\mu$, представленные в табл. 3 для двух наборов опорных частот f_{lab} и f_{cal}. Используя два независимых измерения положения линий 3 и 4, имеющих одинаковые значения Q, наибольшие для линий из 1-го частотного поддиапазона, можно составить 8 пар разностей ΔV_{i-j} и 8 соответствующих значений $\Delta\mu/\mu$, указанных в пятой и шестой колонках табл. 3. Общая выборка $(\Delta\mu/\mu)_1, (\Delta\mu/\mu)_2, \ldots, (\Delta\mu/\mu)_n$ для Sgr B2(N) включает в себя также измерение по одной паре линий из 3-го поддиапазона, т.е. размер выборки равен $n = 9$. При этом необходимо учесть следующее обстоятельство. Ошибки измерений $\sigma_{\Delta\mu/\mu}$ не являются статистически независимыми, потому что разности ΔV_{i-j} были рассчитаны относительно двух линий 3 и 4 в 1-м поддиапазоне Sgr B2(N).

Это приводит к коррелированным значениям величин $\Delta\mu/\mu$ (подробнее см. [28, 29]). Такие корреляции должны увеличить расчетные ошибки $\sigma_{\Delta\mu/\mu}$ на поправочный коэффициент

$$\gamma = (1 - r^2)^{-1/2}, \quad (4)$$

где r – средний коэффициент корреляции, который может быть оценен из уравнения (16) в [29].

Величина $r = 0.5$ для 8 пар линий из рассматриваемой выборки, что соответствует поправочному коэффициенту $\gamma = 1.15$:

$$\sigma^{\rm cor}_{\Delta\mu/\mu} = \gamma\sigma_{\Delta\mu/\mu}. \quad (5)$$

Одна пара линий 10–11 из 3-го поддиапазона в спектре Sgr B2(N) дает значение $\Delta\mu/\mu$, которое включено в выборку с его собственной ошибкой $\sigma_{\Delta\mu/\mu} = 2.5 \times 10^{-7}$.

Оценка $\Delta\mu/\mu$ в Sgr B2(M) вычисляется по паре линий 8 и 9: $\Delta\mu/\mu = (-5.3 \pm 0.8) \times 10^{-7}$. Поскольку в спектре Sgr B2(M) не удалось подобрать линии метанола, удовлетворяющие критериям отбора, величина $\Delta\mu/\mu$ в этом случае не может рассматриваться как статистически значимая, несмотря на малую ошибку $\sigma_{\Delta\mu/\mu} = 0.8 \times 10^{-7}$. Поэтому наш основной результат будет базироваться на выборке Sgr B2(N), состоящей из $n = 9$ неравноточных измерений $\Delta\mu/\mu$. Процедура обработки неравноточных измерений подробно описана в [30].

Отметим, что три из отобранных линий – 1, 6 и, в особенности, 5 – имеют сильно отличающиеся значения $f_{\rm lab}$ и $f_{\rm cal}$ (см. табл. 1). Поэтому скорость 5 линии $V_5^{(1)}$ определялась по теоретически вычисленной частоте $f_{\rm cal}$, поскольку измеренная лабораторная частота этой линии дает величину скорости

Таблица 3. Результаты оценок $\Delta\mu/\mu$ по независимым группам линий метанола. Сравниваемые линии пронумерованы в первой колонке в соответствии с табл. 1, а нижние индексы обозначают разности $\Delta Q_{j-i} = Q_j - Q_i$ и $\Delta V^k_{i-j} = V^k_i - V^k_j$ для двух типов частот – измеренных в лаборатории ($k = 1$) и вычисленных теоретически ($k = 2$). В круглых скобках указаны ошибки 1σ в последних цифрах

# $(i–j)$	ΔQ_{j-i}	$\Delta V^{(1)}_{i-j}$, km s^{-1}	$\Delta V^{(2)}_{i-j}$, km s^{-1}	$(\Delta\mu/\mu)^{(1)}$, $[\times 10^{-7}]$	$(\Delta\mu/\mu)^{(2)}$, $[\times 10^{-7}]$
		Sgr B2(N), 1st subband 80.0–89.9 GHz			
3–1	−3.3	0.36(19)	−0.04(19)	-3.6 ± 2.3	$+0.4 \pm 2.3$
3–2	−1.5	0.25(18)	0.30(18)	-5.6 ± 4.7	-6.7 ± 4.7
3–5	−5.0	0.38(18)*	0.29(18)	-2.5 ± 1.4	-1.9 ± 1.4
3–6	−5.0	0.23(18)	0.54(18)	-1.5 ± 1.3	-3.6 ± 1.3
4–1	−3.3	0.31(19)	−0.11(19)	-3.1 ± 2.3	$+1.1 \pm 2.3$
4–2	−1.5	0.20(18)	0.23(18)	-4.4 ± 4.7	-5.1 ± 4.7
4–5	−5.0	0.33(18)*	0.22(18)	-2.2 ± 1.3	-1.5 ± 1.3
4–6	−5.0	0.18(18)	0.47(18)	-1.2 ± 1.3	-3.1 ± 1.3
		Sgr B2(N), 3rd subband 100.2–114.6 GHz			
10–11	−2.7	0.10(21)	0.07(21)	-1.2 ± 2.5	-0.9 ± 2.5
		weighted mean $\langle\Delta\mu/\mu\rangle$:		-2.1 ± 0.5	-2.1 ± 0.6
		Sgr B2(M), 2nd subband 89.9–100.2 GHz			
8–9	+2.9	−0.46(7)	−0.67(7)	-5.3 ± 0.8	-7.7 ± 0.8

*Скорость $V^{(1)}_5$ оценивалась по теоретически вычисленной частоте $f_{\rm cal}$.

$V^{(1)}_5 = 63.97$ км с$^{-1}$, что существенно отличается от скорости 6 линии $V^{(1)}_6 = 63.54$ км с$^{-1}$, имеющей тот же коэффициент чувствительности. В то же время линии 3 и 4, также имеющие одинаковые значения Q, и для которых лабораторные частоты известны с хорошей точностью (5 кГц), дают приблизительно одинаковые скорости (см. табл. 2).

Более того, как отмечается в [21], теоретически вычисленные частоты оказываются ближе к лабораторным в тех случаях, когда последние измерены с точностью выше 50 кГц. Поэтому мы приводим вторую выборку значений $\Delta\mu/\mu$, рассчитанную с использованием частот $f_{\rm cal}$. Обе выборки представлены в табл. 3 в пятой и шестой колонках соответственно.

Следуя алгоритму обработки рядов неравноточных измерений [30], мы получили следующие средневзвешенные значения:

$$\langle\Delta\mu/\mu\rangle^{(1)} = (-2.1 \pm 0.5) \times 10^{-7} \quad (6)$$

и

$$\langle\Delta\mu/\mu\rangle^{(2)} = (-2.1 \pm 0.6) \times 10^{-7}. \quad (7)$$

Параметр κ, характеризующий наличие в выборке существенных систематических ошибок при значении $\kappa > 2$ (соотношение 4.138 в [30]), равен 1.42 для первой выборки Sgr B2(N) и 0.26 для второй выборки, т.е. явных систематических ошибок, случайных выбросов или заниженных оценок ошибок измеряемых величин в данных выборках не обнаруживается.

Сравнение выборок $(\Delta\mu/\mu)^{(1)}$ и $(\Delta\mu/\mu)^{(2)}$ в табл. 3 показывает высокую зависимость оценок вариаций μ от опорных частот $f_{\rm lab}$ и $f_{\rm cal}$. Тем не менее, средневзвешенные значения $\langle\Delta\mu/\mu\rangle^{(1)} = \langle\Delta\mu/\mu\rangle^{(2)}$ в пределах интервалов неопределенностей. Поэтому замена лабораторной частоты 5 линии на теоретически вычисленную не приводит к фиктивным оценкам $\Delta\mu/\mu$.

За окончательный результат мы принимаем средневзвешенное значение $\langle\Delta\mu/\mu\rangle^{(2)} = (-2.1 \pm 0.6) \times \times 10^{-7}$, полученное по измеренным частотам $f_{\rm obs}$ центров метанольных линий в Sgr B2(N) и теоретически вычисленным частотам $f_{\rm cal}$.

5. Заключение. В заключение отметим, что как предыдущая оценка $\Delta\mu/\mu$ в высокочастотном спектре Sgr B2(N) на 0.6 мм, полученном на космическом телескопе Herschel, так и оценки на 3 мм в спектрах Sgr B2(N) и (M), полученных на 30-метровом телескопе IRAM, приводят к отрицательным значениям $\Delta\mu/\mu$ на уровне нескольких единиц на 10^{-7}. Этот результат может указывать на возможные пространственные вариации параметра μ в направлении молекулярного облака Sgr B2. Однако абсолютные значения $\Delta\mu/\mu$ пока не удается согласовать в пределах интервала неопределенности $\pm 1\sigma$. По-видимому, одной из причин является недостаточно высокое спектральное разрешение используемых спектров. Во-вторых, желательно иметь более точные лабораторные измерения частот метанольных линий, чтобы уменьшить ошибки в измеренных радиальных скоростях и проверить сдвиги частот между линиями CH_3OH, анализируемыми в данном исследовании. И, наконец, поиск других молекул в окрестностях центра Галактики, подходящих для оценки $\Delta\mu/\mu$, крайне желателен для независимых будущих тестов полученного результата. Такого рода тесты было бы предпочтительно также проводить на интерферометрах с высоким пространственным разрешением.

Авторы выражают благодарность Арнауду Беллоче за дополнительную информацию по наблюдениям и калибровке спектров Sgr B2(N) и (M), полученных на 30-м телескопе IRAM. Мы также благодарим нашего анонимного рецензента за конструктивные замечания.

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. P. A. M. Dirac, Nature **139**, 323 (1937).
2. J. Khoury and A. Weltman, Phys. Rev. Lett. **93**, 171104 (2004).
3. V. V. Flambaum and E. V. Shuryak, in *Nuclei and Mesoscopic Physics*, ed. by P. Danielewicz, P. Piecuch, and V. Zelevinsky, AIP Conf. Series, AIP Publishing, N.Y. (2008), v. 995, p. 1.
4. W. Ubachs, Space Sci. Rev. **214**, 3 (2018).
5. J. Barrow, H. Sandvik, and J. Magueijo, Phys. Rev. D **65**, 063504 (2002).
6. J.-P. Uzan, Living Rev. Relativity **26**, 6 (2025).
7. N. Kanekar, W. Ubachs, K. M. Menten, J. Bagdonaite, A. Brunthaler, C. Henkel, S. Muller, H. L. Bethlem, and M. Daprà, Mon. Not. R. Astron. Soc. **448**, L104 (2015).
8. S. A. Levshakov, M. G. Kozlov, and D. Reimers, Astrophys. J. **738**, 26 (2011).
9. M. Daprà, C. Henkel, S. A. Levshakov, K. M. Menten, S. Muller, H. L. Bethlem, S. Leurini, A. V. Lapinov, and W. Ubachs, Mon. Not. R. Astron. Soc. **472**, 4434 (2017).
10. Ю. С. Воротынцева and С. А. Левшаков, Письма в ЖЭТФ **119**, 635 (2024).
11. A. Amorim, M. Bauböck, J. P. Berger et al. (Collaboration), Phys. Rev. Lett. **122**, 101102 (2019).
12. A. Hees, T. Do, B. M. Roberts, A. M. Ghez, S. Nishiyama, R. O. Bentley, A. K. Gautam, S. I. Jia, T. Kara, J. R. Lu, H. Saida, S. Sakai, M. Takahashi, and Y. Takamori, Phys. Rev. Lett. **124**, 081101 (2020).
13. Ю. С. Воротынцева, С. А. Левшаков, Письма ЖЭТФ **121**, 619 (2025) [J. S. Vorotyntseva and S. A. Levshakov, JETP Lett. **121**, 589 (2025)].
14. M. J. Reid, K. M. Menten, X. W. Zheng, A. Brunthaler, and Y. A. Xu, Astrophys. J. **705**, 1548 (2009).
15. 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, Astron. Astrophys. **628**, A46 (2019).
16. N. Z. Scoville, P. M. Solomon, and A. A. Penzias, Astrophys. J. **201**, 352 (1975).
17. A. Belloche, H. S. P. Müller, K. M. Menten, P. Schilke, and C. Comito, Astron. Astrophys. **559**, A47 (2013).
18. http://cdsarc.u-strasburg.fr/viz-bin/qcat?J/A+A/559/A47.
19. http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS.
20. L.-H. Xu and F. J. Lovas, J. Phys. Chem. Ref. Data **26**, 1 (1997).
21. H. S. P. Müller, K. M. Menten, and H. Mäder, Astron. Astrophys. **428**, 1019 (2004).
22. 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, J. Mol. Spec. **251**, 305 (2008).
23. P. Jansen, L. H. Xu, I. Kleiner, W. Ubachs, and H. L. Bethlem, Phys. Rev. Lett. **106**, 100801 (2011).
24. S. A. Levshakov, M. G. Kozlov, and D. Reimers, Astrophys. J. **738**, 26 (2011).
25. J. Pety and S. Bardeau, IRAM Memo 2011-4 (2019).
26. W. G. Tifft and W. K. Huchtmeier, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **84**, 47 (1990).
27. Cologne Database for Molecular Spectroscopy, https://cdms.astro.uni-koeln.de/cgi-bin/cdmssearch
28. S. A. Levshakov, P. Molaro, A. V. Lapinov, D. Reimers, C. Henkel, and T. Sakai, Astron. Astrophys. **512**, A44 (2010).
29. J. S. Vorotyntseva, M. G. Kozlov, and S. A. Levshakov, Mon. Not. R. Astron. Soc. **527**, 2750 (2024).
30. Т. А. Агекян, *Основы теории ошибок для астрономов и физиков*, Наука, М. (1972), с. 144.