

# Ограничения на $\mu$ -вариации по тепловым линиям метанола $\text{CH}_3\text{OH}$ в диске Галактики и на ее периферии

А. И. Штейн

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

h34dsupjd@gmail.com

**Аннотация.** В настоящей работе установлены ограничения на гипотетические вариации фундаментальной физической постоянной  $\mu$  - отношения массы электрона к массе протона, с использованием линий теплового излучения метанола  $\text{CH}_3\text{OH}$ . Были проанализированы молекулярные спектры в направлении шести молекулярных облаков, локализованных на протяжении радиуса Галактики на галактоцентрических расстояниях от 3 до 13 кпс. Полученный верхний предел на  $\mu$ -вариации  $\Delta\mu/\mu < 4 \times 10^{-8}$  не указывает на какие-либо значимые отклонения параметра  $\mu$  в диске Галактики и находится в хорошем согласии с ранее опубликованными значениями. Дополнительно был установлен верхний предел для трех объектов на периферии Галактики  $\Delta\mu/\mu < 3 \times 10^{-8}$ , который также не свидетельствует о каких-либо значимых вариациях  $\mu$ .

**Ключевые слова:** фундаментальные постоянные; вариации фундаментальных постоянных; отношение масс протона и электрона; метанол  $\text{CH}_3\text{OH}$ ; молекулярная спектроскопия; радиоастрономия; межзвездная среда

## I. ВВЕДЕНИЕ

Поиск возможных вариаций фундаментальных физических постоянных является одной из актуальных задач современной астрофизики. Интерес к этой проблеме обусловлен развитием теорий, расширяющих Стандартную модель, в частности, моделей темного сектора — темной материи и темной энергии. Дополнительные скалярные поля, предсказываемые такими теориями, гипотетически, могут взаимодействовать с элементарными частицами, модулируя их массы. Это, в свою очередь, приводило бы к изменению отношения массы электрона к массе протона  $\mu = m_e/m_p$  [1].

Эффективным методом проверки неизменности  $\mu$  является анализ молекулярных спектров астрофизических объектов, поскольку электронно-колебательно-вращательные переходы в молекулах обладают индивидуальной чувствительностью к изменению  $\mu$  [2, 3]. Для проведения оценок  $\Delta\mu/\mu$  необходимо использовать пары линий с измеренными радиальными скоростями  $V_i$  и  $V_j$ , имеющих различные коэффициенты чувствительности к изменению  $\mu$  [3]:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{V_i - V_j}{c(Q_j - Q_i)}, \quad (1)$$

где  $c$  — скорость света,  $\Delta\mu/\mu = (\mu_{\text{obs}} - \mu_{\text{lab}})/\mu_{\text{lab}}$  — разность значений  $\mu$  в лаборатории (lab) и космосе (obs), а радиальная скорость ( $V_{\text{LSR}}$ ) вычисляется в соответствии с

радиоастрономическим соглашением:  $V/c = (f_{\text{lab}} - f_{\text{obs}})/f_{\text{lab}}$ .

В нескольких работах было показано, что наибольшей чувствительностью к изменению  $\mu$  обладает метанол  $\text{CH}_3\text{OH}$  и его изотопологи [4]–[6]. Ранее в диске Галактики получены ограничения на  $\mu$ -вариации с использованием метанольных линий  $\Delta\mu/\mu \square 10^{-8}$  по разным молекулам [6]–[12], в то время как в центре Галактики были обнаружены статистически значимые вариации  $\Delta\mu/\mu = (-3.4 \pm 0.4) \times 10^{-7}$  [13]–[15]. Периферия Галактики ( $D_{\text{GC}} > 12$  кпс) остается мало изученной, несмотря на то, что именно там предполагается обилие темной материи [16]. Следовательно, цель работы — оценить  $\Delta\mu/\mu$  по тепловым линиям  $\text{CH}_3\text{OH}$  в объектах на различных галактоцентрических расстояниях вплоть до периферийных областей Галактики.

## II. ОБЪЕКТЫ И НАБЛЮДЕНИЯ

В работе были использованы данные наблюдений 30-м телескопа IRAM, опубликованные в [17]. Для анализа отобраны объекты и линии, удовлетворяющие критериям, сводящим к минимуму различные систематические эффекты: различные коэффициенты  $Q$ ; известные лабораторные частоты  $f_{\text{lab}}$ ; близкие ширины на половине высоты  $FWHM$  и похожие формы профилей спектральных линий; близкие энергии верхних уровней ( $\Delta E_u \sim 10$  K); близкие частоты переходов; отношение сигнал/шум  $SNR \geq 10$ ; тепловой характер излучения.

Описанные критерии призваны минимизировать известные источники ошибок определения центров линий. Так, идентичные формы профилей и близкие значения  $FWHM$  обычно указывают на то, что излучение различных линий исходит из одной и той же пространственной области. Требование теплового характера излучения исключает возможное смещение центра линии, характерное для мазеров: мазерные пятна имеют размеры, на порядки меньшие апертуры телескопа, часто пространственно разделены, а из-за сверхтонкой структуры молекулы метанола при мазерном излучении доминирует лишь одна компонента, что затрудняет точное определение центра линии. Лабораторные частоты переходов необходимы для учета вклада в ошибку радиальной скорости  $\sigma_V$ , которая формируется из двух составляющих:  $\sigma_V = \sqrt{(\sigma_{\text{obs}}^2 + \sigma_{\text{lab}}^2)}$ , где  $\sigma_{\text{obs}}$  — ошибка измерения положения линии в наблюдаемом спектре,  $\sigma_{\text{lab}}$  — ошибка лабораторного измерения частоты. В [17] все профили аппроксимировались однокомпонентной гауссовой моделью. В данной работе мы дополнительно

требовали, чтобы модельная кривая хорошо описывала центральный пик наблюдаемого профиля.

Перечисленным критериям удовлетворяют два перехода  $\text{CH}_3\text{OH}$ , наблюдаемых в направлении шести объектов. Параметры линий сведены в табл. 1 – квантовые числа (полный угловой момент  $J$  и его проекция  $K$  на ось симметрии молекулы для верхнего ( $u$ ) и нижнего ( $l$ ) уровней), лабораторная частота  $f_{\text{lab}}$  из [18], энергия верхнего уровня  $E_u$  в Кельвинах и коэффициент чувствительности  $Q$  из [4]. В табл. 2 представлены характеристики выбранных объектов – название объекта, галактоцентрическое расстояние  $D_{\text{GC}}$  и измеренные скорости  $V_{\text{LSR}}$  отобранных линий. В обеих таблицах в скобках указаны ошибки в последних цифрах. Ошибки радиальных скоростей также включают неопределенность лабораторной частоты.

ТАБЛИЦА I. ОТОБРАННЫЕ ПЕРЕХОДЫ МЕТАНОЛА ИЗ [17].

Переход $J_{Ku} - J_{Kl}$	Лабораторная частота $f_{\text{lab}}$ , МГц	$E_u$ , К	$Q$
$5_1 - 4_2 E$	216945.600(50)	47.98	3.2
$4_2 - 3_1 E$	218440.050(50)	37.57	-1.2

ТАБЛИЦА II. ОТОБРАННЫЕ ОБЪЕКТЫ И ИЗМЕРЕННЫЕ РАДИАЛЬНЫЕ СКОРОСТИ ИЗ [17].

Объект	$D_{\text{GC}}$ , кпс	$V_{\text{LSR } 216}$ , км/с	$V_{\text{LSR } 218}$ , км/с
G135.27+02.79	13.08	-71.73(14)	-71.49(10)
G010.62-00.38	3.38	-2.64(11)	-2.69(7)
G029.95-00.01	4.62	97.86(13)	97.95(7)
G037.42+01.51	6.73	43.95(17)	43.93(9)
G078.88+00.70	8.17	-5.68(19)	-5.63(8)
G092.67+03.07	8.36	-6.02(12)	-5.85(7)

ТАБЛИЦА III. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ВЫБОРКА

Объект	$D_{\text{GC}}$ , кпс	$V_{\text{LSR } 108}$ , км/с	$V_{\text{LSR } 218}$ , км/с
G135.27+02.79	13.08	-71.67(8)	см. Табл. II
G168.06+00.82	13.4	-25.35(4)	-25.36(7)
G160.14+03.15	4.62	-16.38(5)	-16.28(7)

Для объектов дальней периферии ( $D_{\text{GC}} > 12$  кпс) была составлена дополнительная выборка (табл. 3) с привлечением линии перехода  $0_0 \rightarrow 1_{-1}E$  на 108893.963(7) МГц ( $Q = 4.6$ ), наблюдаемым наряду с линией на 218 ГГц в трех источниках – G135.27+02.79 (13.08 кпс), G168.06+00.82 (13.4 кпс), G160.14+03.15 (12.06 кпс). К сожалению, в последних двух объектах линия на 216 ГГц не обнаружена, и в таких оценках полностью учесть систематические эффекты, связанные с аппаратурой, нельзя, поскольку линии разнесены почти на 100 ГГц. Тем не менее, в данной работе приводятся оценки для дополнительной выборки.

### III. ОЦЕНКИ $\Delta\mu/\mu$

Применяя формулу (1), можно получить оценки  $\Delta\mu/\mu$  в отобранных объектах. Результаты таких вычислений сведены в табл. 4 – для основной и в табл. 5 – для дополнительной выборки. Для получения окончательного результата бралось средневзвешенное значение. Таким образом, для основной выборки получено средневзвешенное значение  $\langle \Delta\mu/\mu \rangle = (0.6 \pm 0.4) \times 10^{-7}$ , что соответствует верхнему пределу  $\Delta\mu/\mu < 4 \times 10^{-8}$ , для дополнительной выборки  $\langle \Delta\mu/\mu \rangle = (1.4 \pm 3.0) \times 10^{-8}$ , и верхний предел пределу  $\Delta\mu/\mu < 3 \times 10^{-8}$ . Оба ограничения согласуются с полученными ранее значениями верхних

пределов и не свидетельствуют о значимых отклонениях параметра  $\mu$ .

Для иллюстрации значений  $\Delta\mu/\mu$  на разных галактоцентрических расстояниях приводится рис. 1, на котором отображены величины  $\Delta\mu/\mu$ , указанные в табл. 4, в зависимости от  $D_{\text{GC}}$ . Синим цветом показаны величины, вычисленные в данной работе, красным – данные из работы [15]. Из рисунка видно, что на расстояниях  $D_{\text{GC}} > 3$  кпс значения  $\Delta\mu/\mu$  колеблются около нуля.

ТАБЛИЦА IV. ВЫЧИСЛЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ  $\Delta\mu/\mu$  ДЛЯ ОСНОВНОЙ ВЫБОРКИ

Объект	$\Delta\mu/\mu \times 10^{-7}$
G135.27+02.79	$(1.8 \pm 1.3)$
G010.62-00.38	$(-0.4 \pm 1.0)$
G029.95-00.01	$(0.7 \pm 1.1)$
G037.42+01.51	$(-0.2 \pm 1.5)$
G078.88+00.70	$(0.4 \pm 1.6)$
G092.67+03.07	$(1.3 \pm 1.1)$

ТАБЛИЦА V. ВЫЧИСЛЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ  $\Delta\mu/\mu$  ДЛЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ВЫБОРКИ

Объект	Использованные линии	$\Delta\mu/\mu \times 10^{-7}$
G135.27+02.79	108 и 216 ГГц	$(-1.4 \pm 4.0)$
	108 и 218 ГГц	$(-1.0 \pm 0.9)$
	216 и 218 ГГц	$(1.8 \pm 1.6)$
G168.06+00.82	108 и 218 ГГц	$(-0.6 \pm 4.6) \times 10^{-1}$
G160.14+03.15	108 и 218 ГГц	$(0.6 \pm 0.5)$

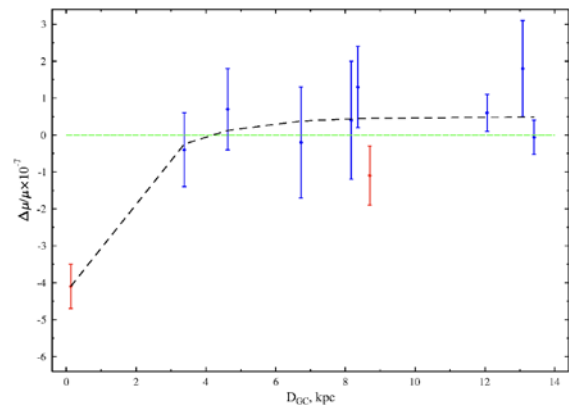


Рис. 1. Зависимость  $\Delta\mu/\mu$  от галактоцентрического расстояния

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим основные выводы выполненной работы. В ходе исследования проанализированы метанольные спектры, наблюдаемые в молекулярных облаках межзвездной среды нашей Галактики, находящихся на различных расстояниях от Галактического центра  $3 < D_{\text{GC}} < 13$  кпс в рамках поисков вариаций  $\mu$ . Установлен верхний предел  $\Delta\mu/\mu < 4 \times 10^{-8}$ . Дополнительно исследованы объекты периферии Галактики ( $D_{\text{GC}} > 12$  кпс), для которых также не обнаружено статистически значимых вариаций на уровне  $\Delta\mu/\mu < 3 \times 10^{-8}$ . Оба верхних предела согласуются с ранее установленными ограничениями для молекулярных облаков Галактического диска.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаем особую благодарность научной руководительнице – Юлии Сергеевне Воротынцевой за обширную помощь в исследовании.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Uzan J.-P.* Fundamental constants: from measurement to the universe, a window on gravitation and cosmology, *Living Rev. Relativity* **26**, 6 (2025).
- [2] *Varshalovich D.A., Levshakov S.A.* On a time dependence of physical constants, *JETP Lett.* **58**, 237 (1993).
- [3] *Levshakov S.A., Kozlov M.G., Reimers D.* Methanol as a tracer of fundamental constants, *Astrophys. J.* **738**, 26 (2011).
- [4] *Jansen P. et al.* Methanol as a sensitive probe for spatial and temporal variations of the proton-to-electron mass ratio, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 100801 (2011).
- [5] *Vorotyntseva J.S., Kozlov M.G., Levshakov S.A.* 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] *Vorotyntseva J.S., Levshakov S.A., Kozlov M.G.* Spectroscopic shifts in deuterated methanol induced by variation of  $m_e/m_p$ , *Phys. Rev. A* **110**, 012802 (2024).
- [7] *Vorotyntseva J.S., Levshakov S.A., Kozlov M.G.* Acetaldehyde as a molecule for testing variations of electron-to-proton mass ratio, *Phys. Rev. A* **113**, 012821 (2026).
- [8] *Daprà M. et al.* 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).
- [9] *Vorotyntseva J.S., Levshakov S.A.* Torsion-rotation transitions in the methanol as a probe for fundamental physical constants - electron and proton masses, *JETP Lett.* **119**(9), 649 (2024).
- [10] *Levshakov S.A. et al.* Limits on the space-time variations of fundamental constants, *Mem. S.A. It.* **85**, 90 (2014).
- [11] *Levshakov S.A. et al.* 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).
- [12] *Ellingsen S., Voronkov M., Breen S.* Practical limitations on astrophysical observations of methanol to investigate variations in the proton-to-electron mass ratio, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 270801 (2011).
- [13] *Vorotyntseva J.S., Levshakov S.A.* Indication of the electron-to-proton mass ratio variation in the Galaxy, *JETP Lett.* **121**, 589 (2025).
- [14] *Vorotyntseva J.S., Levshakov S.A., Henkel C.* Indications of electron-to-proton mass ratio variations in the Galaxy. II. 3 mm methanol lines toward SgrB2(N) and (M), *JETP Lett.* **122**(11), 709 (2025).
- [15] *Vorotyntseva J.S., Levshakov S.A.* Indications of electron-to-proton mass ratio variations in the Galaxy. III. 0.6 mm methanol lines toward SgrB2(N) and Orion-KL, *JETP Lett.* **123** (2026, in press).
- [16] *Rubin V.C., Ford W.K.* Rotation of the Andromeda nebula from a spectroscopic survey of emission regions, *Astrophys. J.* **159**, 379 (1970).
- [17] *Zhao J.Y. et al.* A multitransition methanol survey toward a large sample of high-mass star-forming regions, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **266**, 29 (2023).
- [18] *Xu L.-H., Lovas F.J.* Torsion-rotation global analysis of the first three torsional states  $v_t = 0, 1, 2$  and terahertz database for methanol, *J. Phys. Chem. Ref. Data* **26**, 17 (1997).