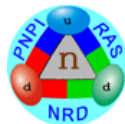


Использование радиочастотных спектров молекул для поиска вариации m_e/m_p на больших пространственно временных масштабах

Михаил Козлов



Петербургский институт ядерной физики



Школа ПИЯФ 26.02.12

Соавторы

- Виктор Фламбаум, Сидней
- Сергей Левшаков, ФТИ
- Сергей Порсев, ПИЯФ
- Дитер Раймерс, Гамбург
- Александр Лапинов, Нижний Новгород
- Паоло Моларо, Триест
- Вадим Ильюшин, Харьков

Фундаментальные постоянные в атомной физике

На атомно-молекулярные спектры влияют следующие постоянные:

- Постоянная тонкой структуры $\alpha = e^2/(\hbar c)$ является константой связи в КЭД.
- Отношение масс электрона и протона $\mu = m_e/m_p$. В первом приближении $m_p \sim \Lambda_{QCD}$, $\mu \sim m_e/\Lambda_{QCD}$.
- Ядерное гироманнитное отношение g_n зависит и от Λ_{QCD} , и от масс кварков. Для атомной физики g_n является независимой постоянной. Она **всегда** входит в комбинации $g_n\mu$.

Безразмерные коэффициенты чувствительности

Частоты атомных переходов зависят от фундаментальных постоянных:

$$\omega = \omega_0 \left[1 + Q_\alpha \frac{\delta\alpha}{\alpha} + Q_\mu \frac{\delta\mu}{\mu} + Q_g \frac{\delta g_n}{g_n} \right].$$

Для того, чтобы обнаружить вариацию надо сравнить две частоты. При этом эффект зависит от разностей коэффициентов чувствительности ΔQ :

$$\frac{\omega_j}{\omega_k} = \left(\frac{\omega_j}{\omega_k} \right)_0 \left[1 + \frac{\delta\Phi}{\Phi} \right], \quad \Phi = \alpha^{\Delta Q_\alpha} \mu^{\Delta Q_\mu} g_n^{\Delta Q_g}.$$

Коэффициенты чувствительности для разных диапазонов частот

- Для оптических переходов в *легких* ($Z \leq 30$) атомах и молекулах $Q_\alpha, Q_\mu, Q_g \ll 1$.
- Для оптических переходов в *тяжелых* ($Z \gtrsim 80$) атомах и молекулах $Q_\alpha \sim 1$.
- Тонкая структура (ИК диапазон) $\sim \alpha^2 \Rightarrow Q_\alpha = 2$.
- Колебательные переходы (ИК) $\sim \mu^{1/2} \Rightarrow Q_\mu = \frac{1}{2}$.
- Вращательные переходы (ИК — СВЧ) $Q_\mu = 1$.
- Магнитная СТС (СВЧ) $Q_\alpha = 2; Q_\mu = 1; Q_g = 1$.
- Туннельные переходы (ИК — СВЧ) $2 \lesssim Q_\mu \lesssim 6$.
- Смешанные вращательно-туннельные переходы в СВЧ $|Q_\mu| \gg 1$.

Субъективная, штрих-пунктирная история

1956: Саведофф сравнил красные смещения оптических переходов, тонкой структуры и сверхтонкого перехода в водороде (21 см) для объекта на расстоянии **300 миллионов световых лет**. Были получены ограничения на вариацию α и μg_n на уровне 10^{-3} .

1975: Томсон предложил использовать оптические линии поглощения молекулы H_2 в спектрах квазаров для наблюдения вариации m_e/m_p . На два порядка меньшая чувствительность компенсировалась выигрышем в расстоянии.

1999: Вэбб и Фламбаум предложили многомультиплетный метод поиска вариации α по оптическим линиям ионов в спектрах квазаров. Предлагалось компенсировать малую чувствительность к вариации α за счет набора статистики по многим линиям многих квазаров.

2001: Австралийская группа заявляет о ненулевой вариации α на уровне 10^{-5} для $z \gtrsim 2$. Другие группы это не подтверждают.

Про высокую чувствительность СВЧ спектров стали забывать!

...история II: Возрождение интереса к СВЧ

Обнаружены молекулярные линии в СВЧ спектрах гравитационных линз с красными смещениями $z = 0.68$, $z = 0.77$ и $z = 0.89$.

2003: Дарлинг и Канекар показали, что 18 см линия Λ -дублета молекулы OH чувствительна к вариации α и μ .

2004: ван Вельдховен и др. показали, что туннельный переход в аммиаке имеет высокую чувствительность к вариации μ .

2005: Хенкель и др. наблюдают туннельные линии аммиака на $z=0.68$.

2007: Фламбаум и Козлов получают рекордное ограничение $|\Delta\mu/\mu| < 7 \times 10^{-6}$ на $z = 0.68$ с помощью спектров Хенкеля.

2008: Левшаков и др. видят вариацию $|\Delta\mu/\mu| \sim 10^{-7}$ в Галактике.

2010: Показано, что **смешанные** туннельно-вращательные СВЧ переходы могут иметь чувствительность к вариации μ порядка 10^2 .

2010: Австралийская группа заявляет о наблюдении «пространственного диполя» для α .

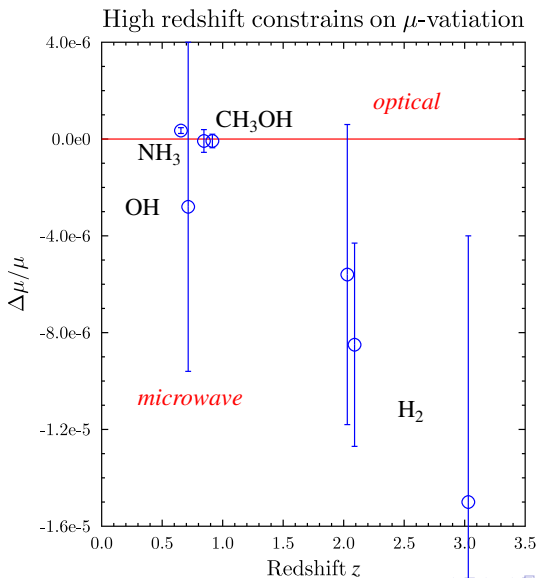
...история III: 2011 год

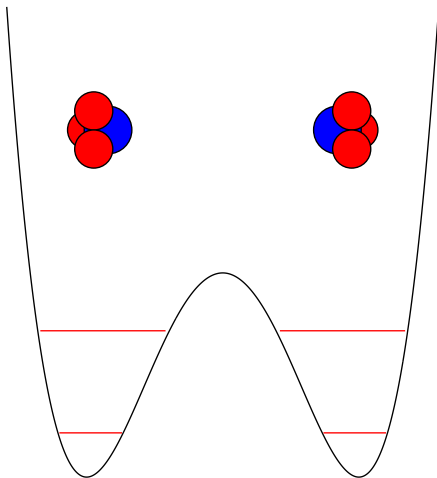
- Аммиачным методом получено ограничение:
 $|\Delta\mu/\mu|_{z=0.68} < 7 \times 10^{-7}$.
- Вычислены коэффициенты чувствительности смешанных переходов в гидронии, метаноле, перекиси водорода и метиламине. Обнаружены линии с чувствительностями на порядок больше, чем у туннельной линии аммиака. **Каждая молекула имеет линии с чувствительностями разной величины и знака!**
- Впервые наблюдаются внегалактические СВЧ спектры метанола и метиламина в гравитационной линзе $z = 0.89$.
- Впервые наблюдается СВЧ спектр перекиси водорода в межзвездной среде.

Возможен переход от аммиачного метода к методу смешанных туннельно-вращательных линий.

...история IV: 2012 год

- Эллинген и др. получили ограничение с помощью двух туннельно-вращательных линий метанола:
 $|\Delta\mu/\mu|_{z=0.89} < 3 \times 10^{-7}$.
- Левшаков и др. получили ограничение на вариацию α из сравнения тонкого перехода $^3P_2 - ^3P_1$ в углероде и вращательного перехода CO:
 $|\Delta\alpha/\alpha|_{z=5.2} < 8 \times 10^{-6}$.

Ограничения на вариацию μ на больших z 

Инверсионный переход в аммиаке (NH_3)

Коэффициенты чувствительности Q_μ для инверсионного перехода в разных изотопах аммиака.

Молекула	S	Q_μ
$^{14}\text{NH}_3$	5.9	4.4
$^{15}\text{NH}_3$	6.0	4.4
$^{14}\text{NH}_2\text{D}$	6.5	4.7
$^{14}\text{ND}_2\text{H}$	7.3	5.1
$^{14}\text{ND}_3$	8.4	5.7
$^{15}\text{ND}_3$	8.5	5.7
$^{15}\text{ND}_3^*$		5.6

*) van Veldhoven *et al.* [Eur. Phys. J. D, **31**, 337 (2004)].

Смешанные туннельно-вращательные переходы

В некоторых молекулах туннельные моды сильно смешаны с вращательными степенями свободы. Например, в частично дейтерированом аммиаке инверсионные уровни имеют разную орто-пара симметрию. Поэтому, прямые инверсионные переходы запрещены, и наблюдаются только смешанные переходы.

Для таких переходов

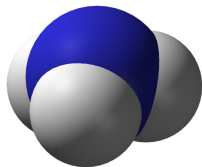
$$\omega = \omega_r \pm \omega_{\text{tun}},$$

и коэффициенты чувствительности равны

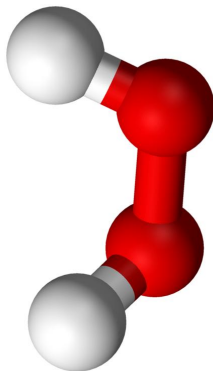
$$Q_\mu = \frac{\omega_r}{\omega} Q_{r,\mu} \pm \frac{\omega_{\text{tun}}}{\omega} Q_{\text{tun},\mu},$$

где $Q_{r,\mu} = 1$ и $Q_{\text{tun},\mu} \gtrsim 2$. Если $\omega \ll \omega_{r,\text{tun}}$, то $|Q_\mu| \gg 1$.

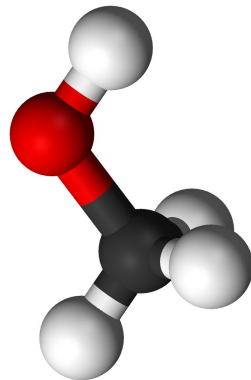
Молекулы с туннельными переходами



гидроний – H_3O^+
(зонтичная мода)

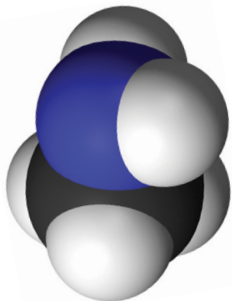


перекись – H_2O_2
(инверсия)



метанол – CH_3OH
(заторможенное вращение)

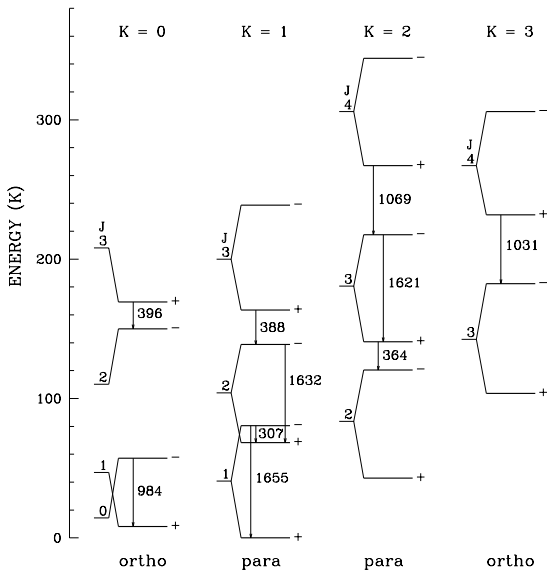
Молекулы с несколькими туннельными модами



мети́ламин – CH_3NH_2
(изгибная и торсионная)



гидра́зин – N_2H_4
(две изгибных и торсионная)

Низкочастотные смешанные переходы в H_3O^+ 

Чувствительности смешанных переходов в гидронии

J	K	Transition				Frequency (MHz)	Q_μ	ISM
		s	J'	K'	s'			
1	1	-1	2	1	+1	307192.41	+6.4	✓
3	2	+1	2	2	-1	364797.43	-3.5	✓
3	1	+1	2	1	-1	388458.64	-3.1	✓
3	0	+1	2	0	-1	396272.41	-3.0	
0	0	-1	1	0	+1	984711.91	+2.7	
4	3	-1	3	3	+1	1031293.74	-0.6	
4	2	-1	3	2	+1	1069826.63	-0.5	
3	2	-1	3	2	+1	1621738.99	+2.0	
2	1	-1	2	1	+1	1632090.98	+2.0	
1	1	-1	1	1	+1	1655833.91	+2.0	

Чувствительности смешанных переходов в перекиси водорода

$J_{K_A, K_C}(\tau)$	E_{up} (K)	ω (MHz)		Q_μ	ISM	
		upper	lower			theory
$0_{0,0}(3) - 1_{1,0}(1)$	17		14818.8	14829.1	+37(3)	
$2_{1,1}(1) - 1_{0,1}(3)$	21		37537.0	37518.3	-13(1)	
$1_{0,1}(3) - 1_{1,1}(1)$	19		67234.5	67245.7	+8.8(6)	
$2_{0,2}(3) - 2_{1,2}(1)$	24		68365.3	68385.0	+8.7(6)	
$3_{0,3}(3) - 3_{1,3}(1)$	31		70057.4	70090.2	+8.5(6)	
$3_{0,3}(3) - 2_{1,1}(1)$	31		219163.2	219166.9	+3.4(2)	✓
$6_{1,5}(1) - 5_{0,5}(3)$	66		252063.6	251914.7	-1.1(2)	✓
$4_{0,4}(3) - 3_{1,2}(1)$	41		268963.7	268961.2	+3.0(2)	✓
$5_{0,5}(3) - 4_{1,3}(1)$	53		318237.7	318222.5	+2.7(1)	✓

✓ Bergman *et al.* (2011)

Чувствительности смешанных переходов в метаноле

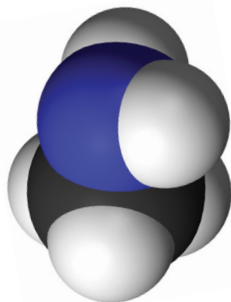
J_1	K_1	J_2	K_2	σ	$\nu(\text{MHz})$	$T(\text{K})$	Q_μ	ISM
6	0	5	1	A^+	6669	48	+42.9	✓
3	-1	2	0	E	12179	19	+32.4	✠
3	1	3	2	E	24929	35	-16.6	✓
4	1	4	2	E	24933	43	-16.6	✓
2	1	2	2	E	24934	27	-16.6	✓
3	0	4	-1	E	36169	26	-9.6	✓
6	1	7	0	A^+	44069	63	-5.3	✓
2	-1	1	0	E	60531	13	+7.3	♠
4	0	3	1	A^+	107014	23	+3.6	✓
5	-1	5	0	E	157179	39	+3.4	✓
4	-1	4	0	E	157246	27	+3.4	✓
2	0	2	1	A^+	304208	7	+1.9	✓

✓ Milky Way; ♠ redshift $z = 0.89$ (Muller *et al.* 2011)

✠ redshift $z = 0.89$ (Ellingsen *et al.* 2012)

Метиламин

- Частоты туннельных переходов: 7480.542 MHz (торсионная мода) и 3098.372 MHz (изгибная мода). Можно ожидать высокой чувствительности для переходов с частотами в несколько гигагерц.
- Недавно метиламин впервые наблюдался на больших красных смещениях ($z = 0.89$) [Muller *et al.* 2011].

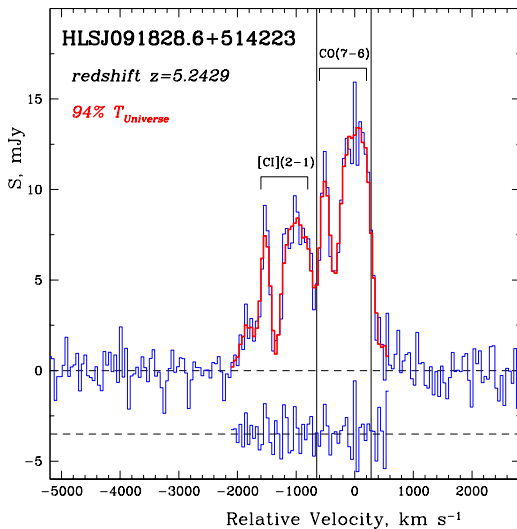


Коэффициенты чувствительности только что вычислены Вадимом Ильиным.

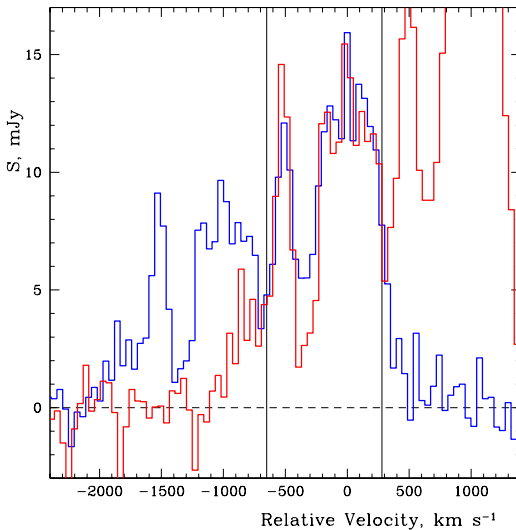
Вариация α на больших красных смещениях и «Австралийский диполь»

- В 2012 году F. Combes и др. наблюдали эмиссионную линию тонкого перехода ${}^3P_2 - {}^3P_1$ в углероде и вращательные переходы в молекуле CO на красном смещении $z = 5.2$ [arXiv:1201.2908]. Это соответствует примерно 94% времени жизни Вселенной.
- Из сравнения красных смещений для тонкого перехода ($\sim \alpha^2$) и вращательного перехода ($\sim \mu$) можно получить ограничение на вариацию $F = \alpha^2/\mu$ (Левшаков и др. 2008).
- С учетом жестких ограничений на вариацию μ отсюда получается ограничение на вариацию α .
- Направление наблюдения для объекта $z = 5.2$ составляет угол $\theta = 148^\circ$ с направлением «Австралийского диполя» ($\cos \theta = -0.8$). Так что можно сравнить полученное ограничение на вариацию α с предсказанием «диполя».

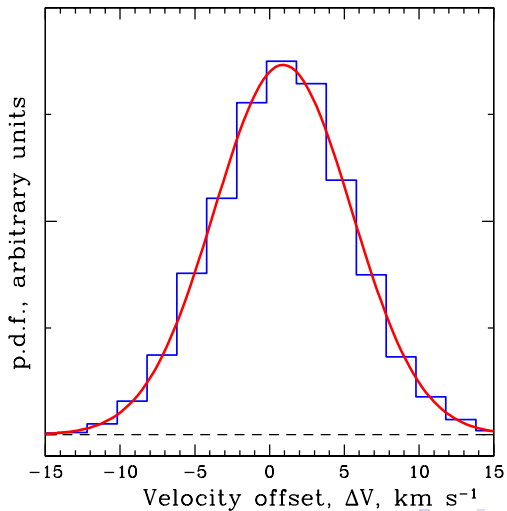
Спектр F. Combes и др. [arXiv:1201.2908 (2012)]



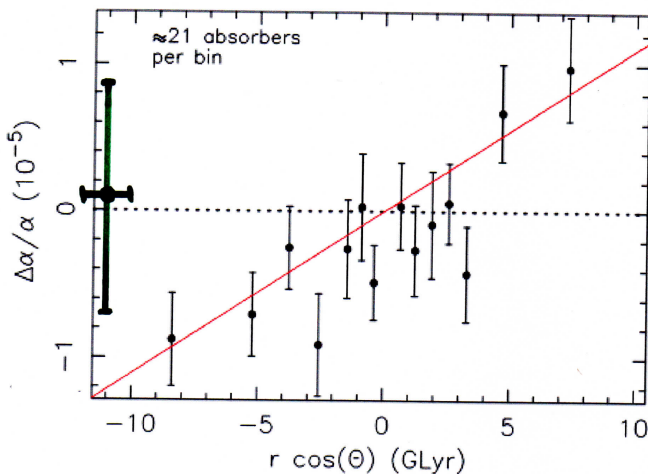
Сравнение линий C I и CO (Левшаков 2012)



Сравнение красных смещений для C I и CO (Левшаков 2012)



Австралийский диполь [Webb et al. PRL, **107**, 191101 (2011)]



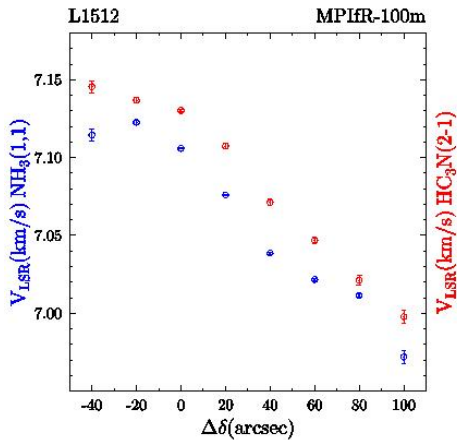
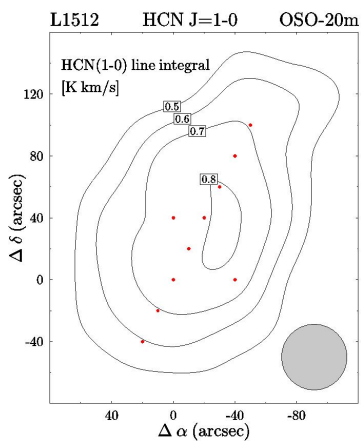
Заклучение

- Молекулы с туннельными переходами имеют высокую чувствительность к вариации μ .
- Смешанные туннельно-вращательные переходы имеют еще более высокую чувствительность, чем чисто туннельные переходы.
- Смешанные переходы в гидронии, перекиси водорода, метаноле и метиламине наблюдаются в межзвездной среде, *в том числе на больших красных смещениях.*
- Тонкие переходы в углероде позволяют получать ограничения на вариацию α на очень больших красных смещениях.
- **Можно ожидать существенного прогресса в ближайшем будущем!**
[За 2012 год в arXiv выложено три новых препринта.]

Холодные молекулярные облака в нашей Галактике

Линии испускания аммиака часто наблюдают из холодных молекулярных облаков вместе с вращательными линиями молекул CCS , N_2H^+ и HC_3N . Такие облака включают сгустки с типичной плотностью $\lesssim 10^5 \text{ cm}^{-3}$ и температурой $T \lesssim 10 \text{ K}$. Характерная ширина молекулярных линий $\gtrsim 100 \text{ m/s}$, что позволяет измерять частоты с относительной точностью 10^{-8} .

Картирование молекулярного сгустка L1512 (2010)



Результаты картирования 2010 года

Изучено 4 сгустка. Наблюдаемые профили скоростей и ширин линий для двух сгустков (L1498 и L1512) согласуются с предположением, что обе молекулы принадлежат одному и тому же газу. *Для двух других сгустков молекулы пространственно разделены.*

Результаты 2010 года для сгустков L1498 и L1512 дают:

$$\Delta V = (26.9 \pm 1.2_{stat} \pm 3_{sys}) \text{ m/s},$$

$$\Delta\mu/\mu = (2.6 \pm 0.1_{stat} \pm 0.3_{sys}) \times 10^{-8}.$$

Это согласуется с результатами 2009 года.

Текущее состояние

На 100-м телескопе в Эффельсберге идет изучение возможных систематических ошибок.

- Проверяется мат. обеспечение телескопа.
- Сравниваются результаты с разных детекторов и в разных поляризациях.
- Обнаружено несколько эффектов на уровне ~ 1 m/s, но ничего, что объяснило бы эффект масштаба 20 m/s.
- Планируется картирование других объектов.
- Планируются новые измерения лабораторных частот.
- Планируется использование других молекул с высокой чувствительностью к вариации μ .