

Лабораторные молекулярные эксперименты по поиску вариации фундаментальных констант

Михаил Г. Козлов



Петербургский институт
ядерной физики
Отделение нейтронной физики



ВНИИМ, 4 декабря 2008

План доклада

- 1 Фундаментальные константы в атомной физике
 - Безразмерные константы
 - Эксперименты с атомными часами
- 2 Молекулярные эксперименты
 - Эксперимент на пучке SF₆
 - Ультрахолодные двухатомные молекулы
 - Инверсионная линия аммиака
 - Молекулы в астрофизике
- 3 Заключение
 - Выводы
 - Соавторы и публикации

Безразмерные фундаментальные постоянные

- Постоянная тонкой структуры $\alpha = e^2/(\hbar c)$ является константой связи в квантовой электродинамике.
- Отношение масс электрона и протона $\mu = m_e/m_p$. Масса протона пропорциональна фундаментальному параметру квантовой хромодинамики Λ_{QCD} , т.е. $\mu \sim m_e/\Lambda_{QCD}$.
- Ядерный g-фактор g_n . В QCD g_n должен выражаться через массы кварков и постоянную Λ_{QCD} , но для атомной физики g_n является независимой постоянной (которая всегда входит в комбинации $g_n\mu$).

Безразмерные коэффициенты чувствительности

Предположим, что фундаментальные постоянные могут меняться. Тогда для частоты произвольного атомного или молекулярного перехода можно написать:

$$\omega = \omega_0 \left[1 + K_\alpha \frac{\delta\alpha}{\alpha} + K_\mu \frac{\delta\mu}{\mu} + K_g \frac{\delta g_n}{g_n} \right],$$

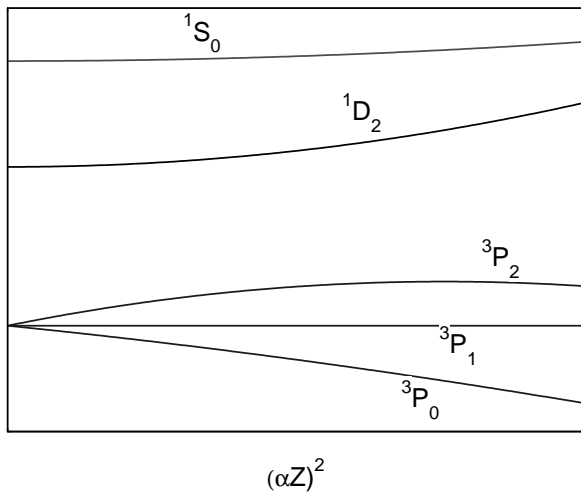
$$\frac{\delta\omega}{\omega} = \frac{\delta F}{F}, \quad F = \alpha^{K_\alpha} \mu^{K_\mu} g_n^{K_g}.$$

Для того чтобы обнаружить это изменение надо сравнить по крайней мере две частоты:

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

Видно, что эффект пропорционален разности безразмерных коэффициентов чувствительности ΔK .

Термы конфигурации s^2p^2



Зависимость спектров атомов и молекул от фундаментальных констант

- Тонкая структура $\sim \alpha^2 \Rightarrow K_\alpha \approx 2$.
- Магнитная сверх тонкая структура $\sim \alpha^{2+x} g_{\text{H}\mu}$.
- Колебательная структура $\sim \mu^{1/2}$.
- Вращательная структура $\sim \mu$.
- Инверсионная линия NH_3 (1.2 см) $\sim \mu^{4.46}$.
- Линия Λ -дублета OH (18 см) $\sim \alpha^{-2} \mu^3$.

Ограничения из экспериментов с атомными часами

Некоторые недавние ограничения, полученные из сравнения различных атомных часов.

Группа, год	Ограничение	Используемые часы	
	$10^{15} \times \dot{\alpha}/\alpha \text{ yr}^{-1}$		
Rosenband et al. (2008)	-0.016 ± 0.023	$^{27}\text{Al}^+$	$^{199}\text{Hg}^+$
Fortier et al. (2007)	-0.55 ± 0.95	^{133}Cs	$^{199}\text{Hg}^+$
Peik et al. (2006)	-0.26 ± 0.39	$^{171}\text{Yb}^+$	$^{199}\text{Hg}^+$
Cingöz et al. (2006)	-2.7 ± 2.6	^{163}Dy	^{162}Dy
Fischer et al. (2004)	-0.9 ± 2.9	H	$^{199}\text{Hg}^+$
	$10^{15} \times \dot{x}/x \text{ yr}^{-1}, x = g_n m_e/m_p$		
Fortier et al. (2007)	3.0 ± 5.7	^{133}Cs	$^{199}\text{Hg}^+$

Сравнение лабораторных и астрофизических наблюдений

- Характерное время лабораторного эксперимента порядка одного года, тогда как в астрофизике – порядка 10^{10} лет.
- Точность лабораторных измерений в $10^9 - 10^{10}$ раз выше.
- Лабораторные и астрофизические наблюдения дополняют друг друга: в первых измеряется \dot{x}/x , во вторых – $\Delta x/x$.
- В лабораторных экспериментах лучше изучены возможные систематические ошибки.

Сравнение лабораторных и астрофизических наблюдений

- Характерное время лабораторного эксперимента порядка одного года, тогда как в астрофизике – порядка 10^{10} лет.
- Точность лабораторных измерений в $10^9 - 10^{10}$ раз выше.
- Лабораторные и астрофизические наблюдения дополняют друг друга: в первых измеряется \dot{x}/x , во вторых – $\Delta x/x$.
- В лабораторных экспериментах лучше изучены возможные систематические ошибки.

Сравнение лабораторных и астрофизических наблюдений

- Характерное время лабораторного эксперимента порядка одного года, тогда как в астрофизике – порядка 10^{10} лет.
- Точность лабораторных измерений в $10^9 - 10^{10}$ раз выше.
- Лабораторные и астрофизические наблюдения дополняют друг друга: в первых измеряется \dot{x}/x , во вторых – $\Delta x/x$.
- В лабораторных экспериментах лучше изучены возможные систематические ошибки.

Сравнение лабораторных и астрофизических наблюдений

- Характерное время лабораторного эксперимента порядка одного года, тогда как в астрофизике – порядка 10^{10} лет.
- Точность лабораторных измерений в $10^9 - 10^{10}$ раз выше.
- Лабораторные и астрофизические наблюдения дополняют друг друга: в первых измеряется \dot{x}/x , во вторых – $\Delta x/x$.
- В лабораторных экспериментах лучше изучены возможные систематические ошибки.

Эксперимент на SF₆ [A Shelkovnikov et al (2008)].

Двухфотонный колебательный переход в молекуле SF₆ измерялся в сверхзвуковом пучке в эксперименте рамзеевского типа. Частота перехода сравнивалась с цезиевым стандартом. В результате получено ограничение на комбинацию $F = g_n \mu^{-1/2} \alpha^{2.83}$:

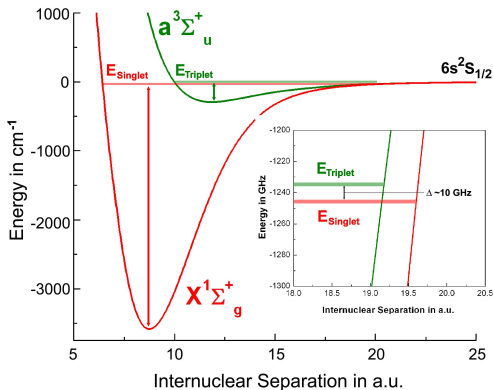
$$\dot{F}/F = (1.4 \pm 3.2) \times 10^{-14} \text{ yr}^{-1}.$$

Объединяя это ограничение с полученными на атомных часах можно получить модельно независимое ограничение на вариацию μ :

$$\dot{\mu}/\mu = (3.4 \pm 6.5) \times 10^{-14} \text{ yr}^{-1}.$$

Эксперимент на Cs₂ [David DeMille]

Ультра холодные молекулы Cs₂ могут быть получены в результате фотоассоциации в атомных ловушках. У Cs₂ имеется очень узкий запрещенный переход ${}^3\Sigma_u^+ \rightarrow {}^1\Sigma_g^-$.

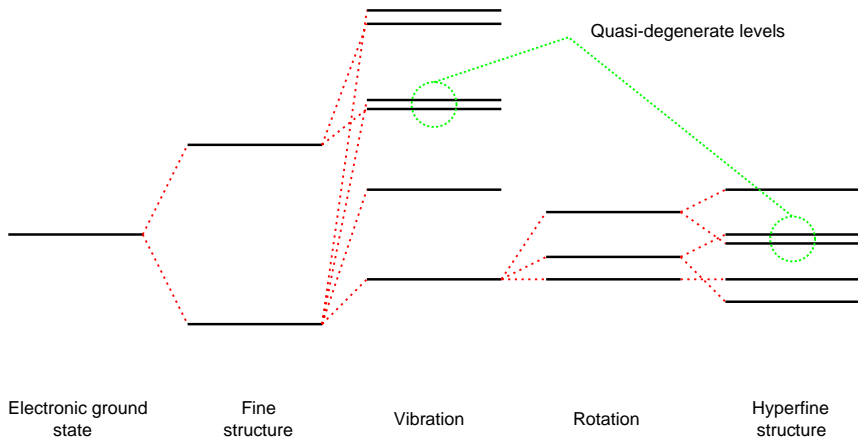


Электронная энергия этого перехода близка к $n \sim 10^2$ колебательным квантам:

$$\omega = \omega_{el} - n\omega_{vib} \approx 0.$$

Частота ω очень чувствительна к вариации μ : $\delta\omega = n\delta\omega_{vib}$.

Случайные вырождения в молекулярных спектрах.



Двухатомные молекулы с основным состоянием $^2\Pi_{\Omega}$

Тонкое расщепление между уровнями $^2\Pi_{1/2}$ и $^2\Pi_{3/2}$ зависит от α :

$$\omega_f \sim \alpha^2 Z^2 \text{ Hartree,}$$

а колебательная энергия зависит от $M_r m_p$:

$$\omega_v \sim (\mu/M_r)^{1/2} \text{ Hartree.}$$

Подбирая параметры Z и M_r можно добиться вырождения:
 $\omega = \omega_f - n\omega_v \approx 0, \quad n = 1, 2, \dots$

Зависимость частоты ω от фундаментальных констант дается выражением:

$$\frac{\delta\omega}{\omega} \approx K \left(2\frac{\delta\alpha}{\alpha} - \frac{1}{2}\frac{\delta\mu}{\mu} \right), \quad K \equiv \frac{\omega_f}{\omega} \gg 1.$$

Примеры молекул с квазивыврождением частот ω_f и ω_v

Молекула	ω_f	ω_v
Cl ₂ ⁺	645	645.6
CuS	433.4	415
SiBr	423.1	424.3

Чувствительность к вариации фундаментальных констант:

$$\delta\omega = 2\omega_f \left(\frac{\delta\alpha}{\alpha} - \frac{1}{4} \frac{\delta\mu}{\mu} \right)$$

Полагая $\delta\alpha/\alpha \sim 10^{-16}$ и $\omega_f \sim 500 \text{ см}^{-1}$, мы получаем
 $\delta\omega \sim 3 \times 10^{-3} \text{ Гц}$.

Естественная ширина приведенных переходов $\Gamma \sim 10^{-2} \text{ Гц}$.

Молекулярный ион HfF⁺

Ион HfF⁺ рассматривается группой **Корнелла (JILA)** для эксперимента по поиску электрического дипольного момента (ЭДМ) электрона.

В принципе ЭДМ эксперимент и эксперимент по поиску вариации констант похожи, поскольку оба требуют **прецизионных измерений частоты.**

Молекулярный ион HfF⁺

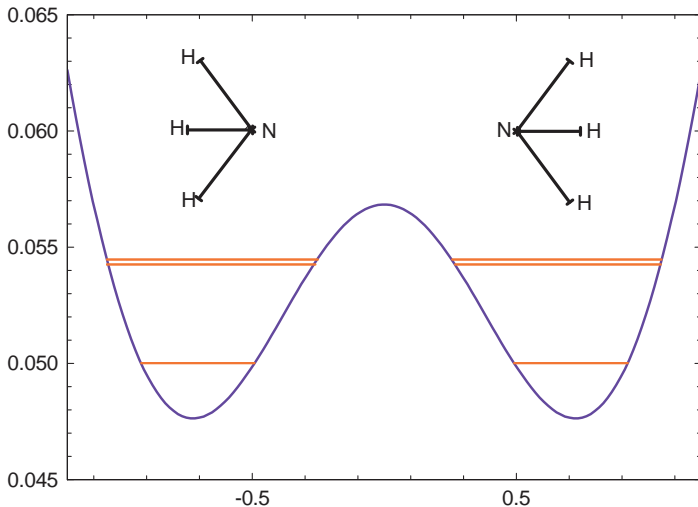
Недавно **Петров и др (2007)** показали, что основное состояние этого иона $^1\Sigma^+$ и первое возбужденное состояние $^3\Delta_1$ отстоят всего на 1633 cm^{-1} . \Rightarrow уровни $(^1\Sigma^+, v = 3)$ и $(^3\Delta_1, v = 1)$ очень близки.

Грубая оценка для перехода $(^1\Sigma^+, v = 3) \rightarrow (^3\Delta_1, v = 1)$ дает:

$$\delta\omega \approx 20000 \text{ cm}^{-1} (\delta\alpha/\alpha - 0.04\delta\mu/\mu),$$

где мы использовали атомное значение параметра q для $6s \rightarrow 5d$ перехода. Этот результат подтверждается молекулярным расчетом **Титова и др (2008)**.
Полагая $\delta\alpha/\alpha \sim 10^{-16}$, получаем $\delta\omega \sim 0.06 \text{ Гц}$.

Инверсионная мода молекулы NH₃



Аналитическое решение [Ландау & Лифшиц]

Квазиклассическое приближение для частоты туннелирования дает:

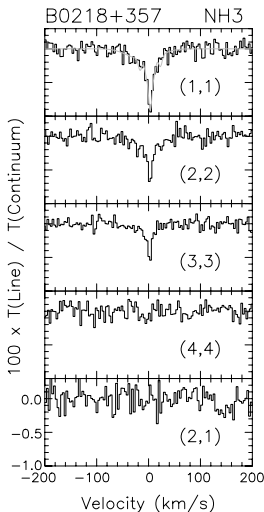
$$\begin{aligned}\omega_{\text{inv}} &= \frac{\omega_V}{\pi} \exp(-S) \\ &= \frac{\omega_V}{\pi} \exp\left(-\frac{1}{\hbar} \int_{-a}^a \sqrt{2M_1(U(x) - E)} dx\right), \\ \frac{\delta\omega_{\text{inv}}}{\omega_{\text{inv}}} &\approx \frac{\delta\mu}{2\mu} \left(1 + S + \frac{S}{2} \frac{\omega_V}{U_{\text{max}} - E}\right) = 4.4 \frac{\delta\mu}{\mu}.\end{aligned}$$

Для ND₃ аналогичный результат был получен в работе van Veldhoven et al. [Eur. Phys. J. D,31, 337 (2005)].

Аммиак в астрофизике

Наиболее далекий объект, где наблюдались линии NH₃, это галактика B0218+357 имеющая красное смещение $z \approx 0.68466$. Это соответствует примерно 6×10^9 лет.

Рис. Инверсионные линии аммиака $\omega_{\text{inv}}(J, K)$ [Henkel et al. *Astronomy and Astrophysics*, 440, 893 (2005)].



Ограничение на вариацию μ на основании СВЧ спектра галактики B0218+357

Сравнивая видимое красное смещение для NH₃ со средним красным смещением СВЧ линий других молекул (0.68466(1)), определяем сдвиг:

$$\Delta z_{\text{av}}^{\text{unweighted}} = (0.2 \pm 0.9) \times 10^{-5},$$

$$\Delta z_{\text{av}}^{\text{weighted}} = (0.6 \pm 0.9) \times 10^{-5}.$$

Это дает следующее ограничение на вариацию μ :

$$\delta\mu/\mu = -(0.6 \pm 1.9) \times 10^{-6}.$$

Сравнение тонкой структуры C⁺ и вращательных переходов в CO

Тонкая структура C⁺ чувствительна к вариации α с коэффициентом $K = 2$, а вращательные переходы CO чувствительны к вариации μ с $K = 1$.

Сравнивая видимые красные смещения этих линий получаем ограничение на вариацию параметра $F = \alpha^2/\mu$.

Линия тонкой структуры C⁺ и (6 – 5) переход в CO наблюдались (Maiolino et al. (2005) и Bertoldi et al. (2003)) для квазара с $z = 6.42$ (время ~ 14 Gyr):

$$\begin{aligned} \text{C}^+ : z_{\text{fs}} &= 6.4189 \pm 0.0006, \\ \text{CO (6 - 5)} : z_{\text{rot}} &= 6.4189 \pm 0.0006. \end{aligned}$$

Это дает:

$$\left| \frac{\Delta F}{F} \right| \leq 1.1 \times 10^{-4}.$$

Краткие выводы

- Поиски вариации α и $\mu = m_e/m_p$ позволяют проверять теории великого объединения.
- Лабораторные эксперименты с молекулами пока уступают атомным экспериментам по точности. Тем не менее они уже дают наиболее жесткое модельно независимое ограничение на $\dot{\mu}$. Новые эксперименты с ультрахолодными молекулами могут существенно уточнить существующие ограничения.
- Наиболее жесткое ограничение на вариацию μ на космологических временах следует из наблюдений аммиака.
- Сравнение тонкой структуры C II с вращательными линиями CO позволяет получить ограничение на вариацию α^2/μ при $z = 6.42$.

Соавторы

- Виктор Фламбаум [UNSW, Sydney]
- Сергей Порсев [ПИЯФ, Гатчина]
- Сергей Левшаков [ФТИ, Петербург]
- Dieter Reimers [Hamburg University]
- Paolo Molaro [Triest]

Публикации

- V F Flambaum & M G Kozlov,
Phys.Rev.Lett. 98, 240801 (2007);
arXiv: [0704.2301\[astro-ph\]](#).
- V F Flambaum & M G Kozlov,
Phys.Rev.Lett. 99, 150801 (2007);
arXiv: [0705.0849\[physics.atom-ph\]](#).
- S A Levshakov, D Reimers, M G Kozlov, S G Porsev, and
P Molaro, Astron. & Astrophys, 479, 719 (2008); arXiv:
[0712.2890](#).