

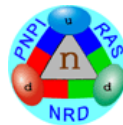
Использование инверсионных переходов в аммиаке для поиска вариации отношения масс m_e/m_p

Михаил Г. Козлов



*Петербургский институт
ядерной физики*

Отделение нейтронной физики



Дубна, 3 декабря 2009

План доклада

- 1 Фундаментальные константы в молекулярных спектрах
 - Безразмерные константы
 - Эксперименты с атомными часами
 - Инверсионная линия аммиака
 - Частично дейтерированный аммиак
- 2 Аммиак в астрофизике
 - Гравитационная линза B0218+357
 - Гравитационная линза PKS 1830-211
 - Молекулярные облака в Галактике
 - NH_2D в астрофизике
- 3 Линии Λ -удвоения в астрофизике
- 4 Заключение

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

Если фундаментальные постоянные могут меняться, то для частоты произвольного атомного перехода можно написать:

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

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

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

Видно, что эффект пропорционален разности безразмерных коэффициентов чувствительности ΔQ .

Примеры зависимости частот переходов атомов и молекул от фундаментальных констант (в а.е.)

- Для оптических переходов в легких атомах
 $Q_\alpha \approx Q_\mu \approx Q_g \approx 0$
- Тонкая структура $\sim \alpha^2 \Rightarrow Q_\alpha \approx 2$.
- Магнитная сверхтонкая структура водорода $\sim \alpha^2 g_n \mu$.
- 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) $\sim \alpha^{-1.14} \mu^{2.55}$.

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 <i>et al.</i> (2008)	-0.016 ± 0.023	$^{27}\text{Al}^+$	$^{199}\text{Hg}^+$
Fortier <i>et al.</i> (2007)	-0.55 ± 0.95	^{133}Cs	$^{199}\text{Hg}^+$
Peik <i>et al.</i> (2006)	-0.26 ± 0.39	$^{171}\text{Yb}^+$	$^{199}\text{Hg}^+$
Cingöz <i>et al.</i> (2006)	-2.7 ± 2.6	^{163}Dy	^{162}Dy
Fischer <i>et al.</i> (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 <i>et al.</i> (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 – от сотен лет до 10^{10} лет.
- Точность лабораторных измерений в $10^7 - 10^{10}$ раз выше.
- Лабораторные и астрофизические наблюдения дополняют друг друга: в первых измеряется $\dot{x}/x$, во вторых измеряется $\Delta x/x$ как во времени, так и в пространстве.
- В астрофизике труднее контролировать возможные систематические ошибки, поэтому важно использовать линии с большими коэффициентами Q .

Сравнение лабораторных и астрофизических наблюдений

- Характерное время лабораторного эксперимента порядка одного года, тогда как в астрофизике – от сотен лет до 10^{10} лет.
- Точность лабораторных измерений в $10^7 - 10^{10}$ раз выше.
- Лабораторные и астрофизические наблюдения дополняют друг друга: в первых измеряется $\dot{x}/x$, во вторых измеряется $\Delta x/x$ как во времени, так и в пространстве.
- В астрофизике труднее контролировать возможные систематические ошибки, поэтому важно использовать линии с большими коэффициентами Q .

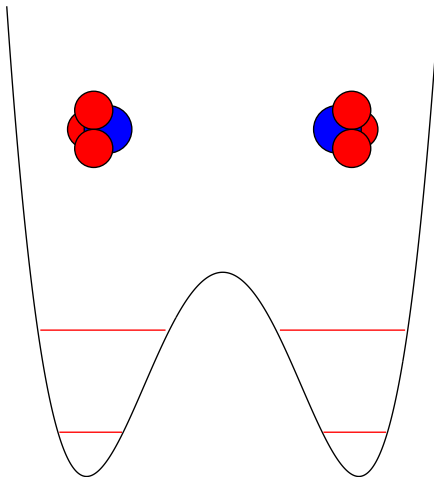
Сравнение лабораторных и астрофизических наблюдений

- Характерное время лабораторного эксперимента порядка одного года, тогда как в астрофизике – от сотен лет до 10^{10} лет.
- Точность лабораторных измерений в $10^7 - 10^{10}$ раз выше.
- Лабораторные и астрофизические наблюдения дополняют друг друга: в первых измеряется $\dot{x}/x$, во вторых измеряется $\Delta x/x$ как во времени, так и в пространстве.
- В астрофизике труднее контролировать возможные систематические ошибки, поэтому важно использовать линии с большими коэффициентами Q .

Сравнение лабораторных и астрофизических наблюдений

- Характерное время лабораторного эксперимента порядка одного года, тогда как в астрофизике – от сотен лет до 10^{10} лет.
- Точность лабораторных измерений в $10^7 - 10^{10}$ раз выше.
- Лабораторные и астрофизические наблюдения дополняют друг друга: в первых измеряется $\dot{x}/x$, во вторых измеряется $\Delta x/x$ как во времени, так и в пространстве.
- В астрофизике труднее контролировать возможные систематические ошибки, поэтому важно использовать линии с большими коэффициентами Q .

Инверсионная мода молекулы NH_3



Аналитическое решение [Ландау & Лифшиц]

Квазиклассическое приближение для частоты туннелирования дает:

$$\begin{aligned}\omega_{\text{inv}} &= \frac{\omega_v}{\pi} \exp(-S) \\ &= \frac{\omega_v}{\pi} \exp\left(-\frac{1}{\hbar} \int_{-a}^a \sqrt{2M_1(U(x) - E)} dx\right), \\ \frac{\delta\omega_{\text{inv}}}{\omega_{\text{inv}}} &\approx \frac{\delta\mu}{\mu} \left(\frac{1}{2} + \frac{S}{2} + \frac{S}{4} \frac{\omega_v}{U_{\text{max}} - E}\right).\end{aligned}$$

Коэффициенты чувствительности Q_μ для инверсионного прехода в различных изотопологах аммиака.

Молекула	Действие 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 (2005)].

Смешанные переходы в NH_2D и ND_2H

Для частично дейтерированного аммиака инверсионные уровни имеют разную орто-пара симметрию. Поэтому, инверсионные переходы наблюдаются только в сочетании с вращательными. Для таких смешанных переходов

$$\omega = \omega_{\text{r}} \pm \omega_{\text{inv}} ,$$

и коэффициенты чувствительности имеют величину

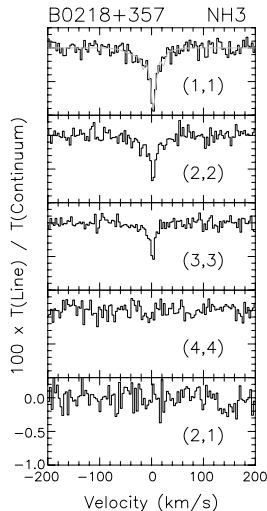
$$Q_{\mu} = \frac{\omega_{\text{r}}}{\omega} Q_{\text{r},\mu} \pm \frac{\omega_{\text{inv}}}{\omega} Q_{\text{inv},\mu} ,$$

где $Q_{\text{r},\mu} = 1$ и $Q_{\text{inv},\mu} = 4.7$ (NH_2D) или $Q_{\text{inv},\mu} = 5.1$ (ND_2H).

Гравитационная линза B0218+357

Наиболее изученный 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 $\omega_{\text{inv}}(J, K)$ [C 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:

$$\begin{aligned}\Delta z_{\text{av}}^{\text{unweighted}} &= (0.2 \pm 0.9) \times 10^{-5}, \\ \Delta z_{\text{av}}^{\text{weighted}} &= (0.6 \pm 0.9) \times 10^{-5}.\end{aligned}$$

Это дает следующее ограничение на вариацию μ :

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

Новые данные для B0218+357

В недавней работе [M T Murphy, V V Flambaum, S Muller, and C Henkel, *Science*, **320**, 1611 (2008)] проведен новый анализ СВЧ спектров от объекта B0218+357. Использованы те же три линии аммиака, но новые наблюдения вращательных линий молекул HCO⁺ и HCN. Это позволило несколько уточнить ограничение на вариацию μ :

$$\delta\mu/\mu = -(0.74 \pm 0.47) \times 10^{-6}.$$

Гравитационная линза PKS 1830-211 ($z = 0.89$)

В работе [C Henkel *et al.* A&A, **500**, 725 (2009)] исследованы 10 оптически тонких инверсионных линий NH₃ и пять вращательных линий HC₃N от молекулярного облака PKS 1830-211 для $z = 0.89$. Получено ограничение на вариацию μ на уровне 3σ :

$$|\delta\mu/\mu| < 1.4 \times 10^{-6}.$$

Молекулярные облака в Галактике

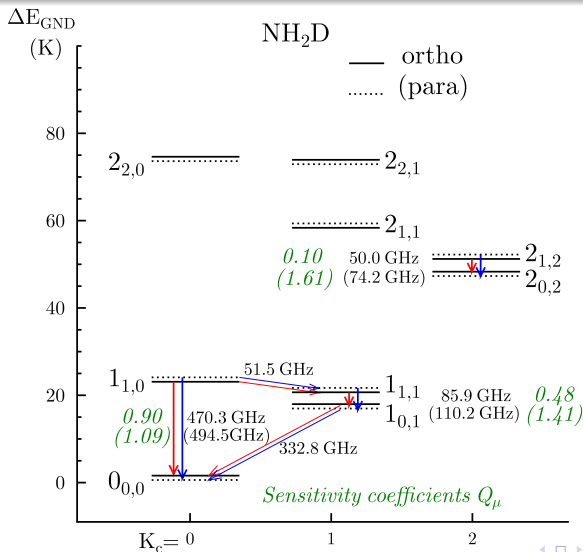
Эмиссионные линии аммиака часто наблюдаются в холодных молекулярных облаках в Галактике. Типичная ширина таких линий на два порядка уже, чем для внегалактических линий поглощения. Это позволяет исследовать пространственную вариацию μ на уровне $< 10^{-8}$.

Об этом доклад С А Левшакова.

NH₂D в астрофизике

- Несколько нижних инверсионно-вращательных линий молекулы NH₂D неоднократно наблюдались в молекулярных облаках в Галактике.
- Такие линии имеют существенно разные коэффициенты чувствительность от $Q_\mu = 0.1$ до $Q_\mu = 1.6$.
- Использование нескольких линий одной и той же молекулы **позволяет подавить систематические ошибки**, связанные с разным пространственным (и скоростным) распределением разных молекул.

Спектр NH₂D

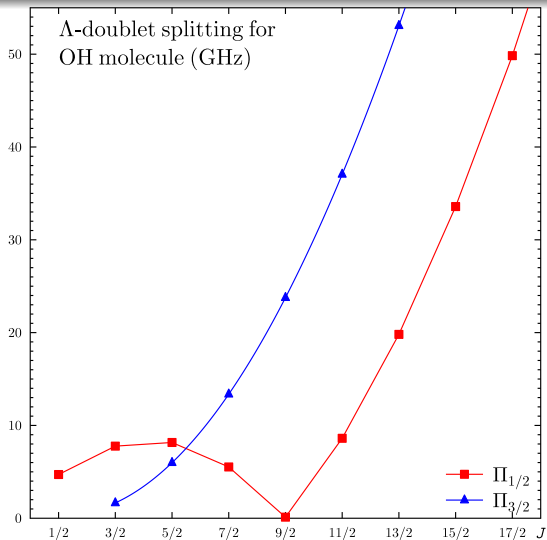


Роль связи спина с осью в Λ -переходах

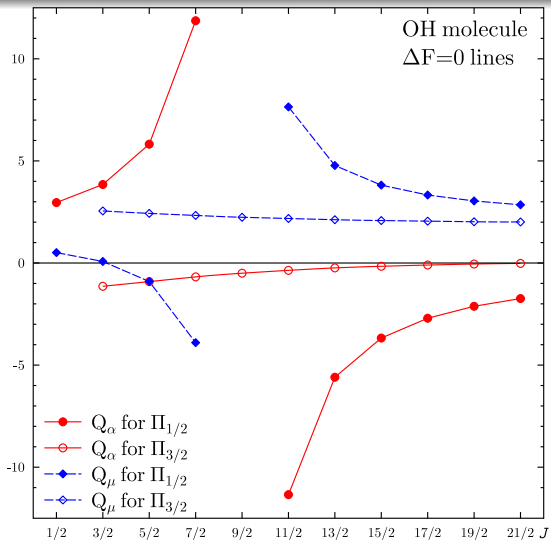
В молекулах OH и CH электронный спин S слабо связан с осью молекулы. С ростом квантового числа J , спин S отвязывается от оси. В результате происходит переход от Ω -удвоения при малых J к Λ -удвоению для больших J .

Для электронного состояния $\Pi_{1/2}$ молекулы OH и состояния $\Pi_{3/2}$ молекулы CH смена схемы связи приводит к пересечению уровней и большому увеличению коэффициентов чувствительности Q_α и Q_μ . Для двух других уровней тонкой структуры частоты переходов и коэффициенты чувствительности плавно зависят от квантового числа J .

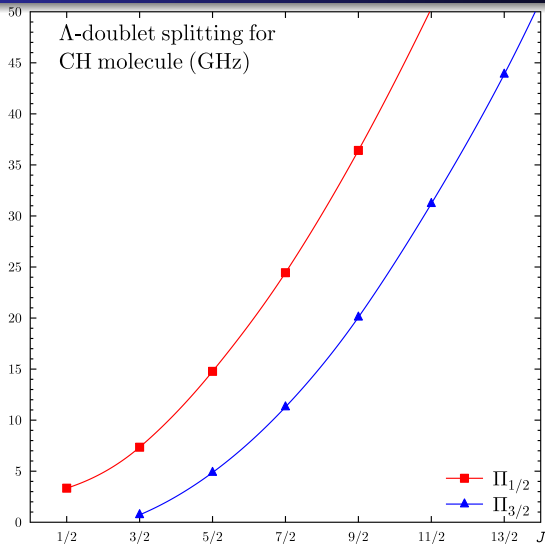
Частоты Λ -переходов в ОН



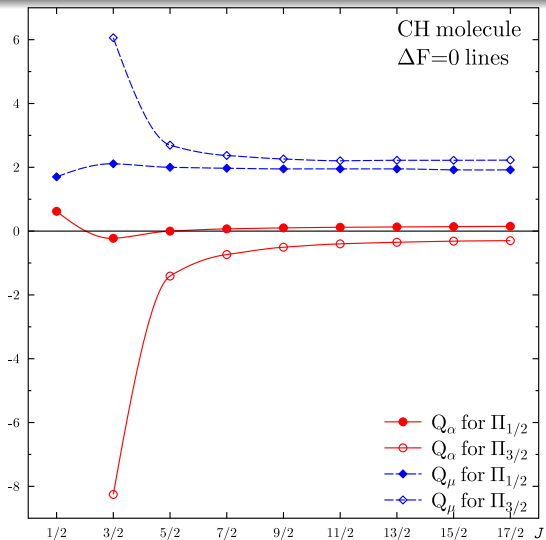
Чувствительности Λ -переходов в ОН



Частоты Λ -переходов в CH



Чувствительности Λ -переходов в CH



Краткие выводы

- Поиски вариации α и $\mu = m_e/m_p$ позволяют проверять теории великого объединения.
- Наиболее жесткое современное ограничение на вариацию μ на космологических временах следует из наблюдений аммиака.
- Наблюдения аммиака в Галактике позволяет исследовать зависимость параметра μ от локальной плотности вещества.
- Наблюдения частично дейтерированного аммиака позволит устранить возможные систематические ошибки, связанные с различием пространственных распределений разных молекул.

Краткие выводы

- Наблюдения Λ -переходов в молекулах СН и ОН позволяет изучать пространственно-временные вариации как постоянной тонкой структуры α , так и отношения масс μ .

Соавторы

- Александр Лапинов [ИПФ, Нижний Новгород]
- Сергей Левшаков [ФТИ, Петербург]
- Paolo Molaro [Triest]
- Виктор Фламбаум [UNSW, Sydney]

Публикации

- V F Flambaum & M G Kozlov,
Phys.Rev.Lett. **98**, 240801 (2007);
arXiv: [0704.2301](#).
- S A Levshakov, P Molaro, and M G Kozlov,
arXiv: [0808.0583](#) & [0907.1192](#).
- M G Kozlov, A V Lapinov, and S A Levshakov,
accepted to J.Phys.B; arXiv: [0908.2983](#).
- M G Kozlov,
Phys.Rev.A, **80**, 022118 (2009);
arXiv: [0905.1714](#).