

Поиски Новой физики в  
экспериментах по несохранению  
чётности в атомах

А.И. Мильштейн

ИЯФ СО РАН

Семинар, посвящённый 90-летию Л.Н. Баркова  
24.10.2018

# Предыстория

40-летие публикации результатов эксперимента:  
Л.М.Барков, М.С. Золоторёв; Письма в ЖЭТФ, т. 27, с. 379 (1978); т. 28, с. 544 (1978).

- ▶ Несохранение чётности в атомах, обусловленное нейтральными токами: Я.Б. Зельдович; ЖЭТФ, т. 36, с.964 (1959).
- ▶ Усиление эффектов несохранения чётности в тяжёлых атомах: М.-А. Bouchiat, С. Bouchiat; Phys. Lett. 48B, 111 (1974).
- ▶ Первое успешное наблюдение PNC в тяжёлых атомах: Л.М.Барков, М.С. Золоторёв (1978).

Легче вычислить то, что тяжелее измерить; легче измерить то, что тяжелее вычислить.

# Что можно измерять

- ▶ Вращение плоскости линейной поляризации.
- ▶ Разность сечений фотопоглощения для фотонов с противоположными спиральностями.
- ▶ Степень циркулярной поляризации излучения.

## Теория:

$$H_W = \frac{G_F}{2\sqrt{2}}(-\bar{e}\gamma_\alpha\gamma_5 e) [-\bar{n}\gamma^\alpha n + (1 - 4\sin^2\theta_W)\bar{p}\gamma^\alpha p]$$

$$Q_W = -N + (1 - 4\sin^2\theta_W)Z$$

$Q_W$  - слабый заряд,  $\sin^2\theta_W \approx 1/4$ . Основной вклад дают нейтроны!

# Смешивание состояний с противоположной чётностью

$$\eta \sim \frac{\langle H_W \rangle}{\Delta E} \sim \frac{G_F Q_W Z \alpha \psi^2(0)}{\Delta E}.$$

Всё происходит на размерах порядка радиуса ядра  $r_0$ .  
Релятивизм абсолютно важен! Для  $j = 1/2$

$$\psi^2(0) \sim \frac{Z}{a_B^3} R, \quad R \sim \left( \frac{\lambda_c}{Z \alpha r_0} \right)^{2(1-\gamma)}, \quad \gamma = \sqrt{1 - (Z\alpha)^2}.$$

$R \approx 3$  для  ${}_{55}\text{Cs}$  и  $R \approx 9$  для  ${}_{81}\text{Tl}$ ,  ${}_{82}\text{Pb}$ ,  ${}_{83}\text{Bi}$ .

$$\eta \sim m^2 G_F Q_W (Z\alpha)^2 R, \quad (\sim 10^{-11} \text{ for Cs, } Z = 55).$$

## Степень циркулярной поляризации

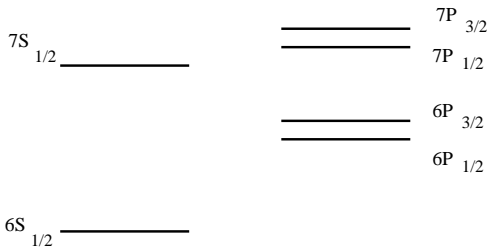
$$P = \frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-} = \frac{|A_+|^2 - |A_-|^2}{|A_+|^2 + |A_-|^2} \approx 2\eta \frac{A(E1)}{A(M1)}.$$

Для Cs:  $P \sim 10^{-4}$ ; для Tl, Pb и Bi:  $P \sim 10^{-7}$ .

Результат Л.М. Баркова и М.С. Золоторёва 1978 года в эксперименте с висмутом:  $P = (3.8 \pm 1.0) * 10^{-7}$ .

	exp. err.	th. unc.
Bi (Z=83), 1991 (Oxford)	2%	10%
Pb (Z=82), 1993 (Seattle)	1.2%	8%
Tl (Z=81), 1995 (Oxford)	2.9%	3%
Tl (Z=81), 1995 (Seattle)	1.2%	3%
Cs (Z=55), 1997 (Boulder)	0.4%	1%

Цезий - лучший объект исследования для проверки СМ при низких энергиях!



## Спектр цезия

$$A_{PNC} = \sum_n \frac{\langle 7S | \mathbf{D} | nP \rangle \langle nP | H_{PNC} | 6S \rangle}{E_{6S} - E_{nP}} + \frac{\langle 7S | H_{PNC} | nP \rangle \langle nP | \mathbf{D} | 6S \rangle}{E_{7S} - E_{nP}}, \quad H_{PNC} = G_F Q_W \rho(r) \gamma_5$$

Здесь  $\mathbf{D}$  - оператор дипольного момента,  $\rho(r)$  - ядерная плотность, нормированная условием  $\int \rho(r) d\mathbf{r} = 1$ .

# Поиски Новой физики

- ▶ **Tl, Pb, Bi** : V.A.Dzuba, V.V.Flambaum, P.G.Silvestrov, O.P.Sushkov (1987-1988);  
**Cs** : V.A.Dzuba, V.V.Flambaum, O.P.Sushkov (1989);  
S.A. Blundell, J.Sapirstein, W. R. Johnson, (1990).

$$H_C = \sum_{i=1}^N [\alpha_i \mathbf{p}_i + (\beta_i - 1)m - Z\alpha^2/r_i] + \sum_{i<j} e^2/|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|.$$

- ▶ S.C. Bennet and C.E. Wieman (1999)  
**Теоретическая неопределённость в Cs**  
**1% → 0.5%**  
**Отклонение от СМ 2.5σ**

- Учётён вклад магнитного электрон-электронного взаимодействия.

$$H_{Breit} = \sum_{i < j} [\boldsymbol{\alpha}_i \cdot \boldsymbol{\alpha}_j + (\boldsymbol{\alpha}_i \cdot \mathbf{n}_{ij})(\boldsymbol{\alpha}_j \cdot \mathbf{n}_{ij})] / |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j| .$$
$$\mathbf{n}_{ij} = (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) / |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$$

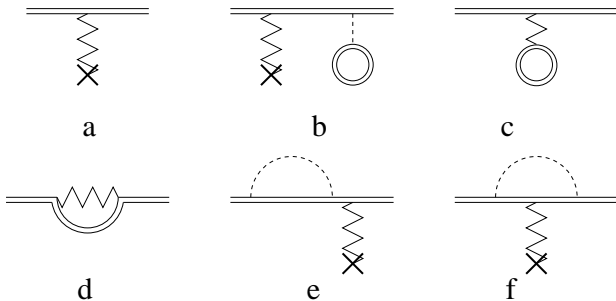
A. Derevianko (2000); M.G. Kozlov, S.G. Porsev,  
I.I. Tupitsyn (2001); V.A. Dzuba, C. Harabati, W.R.  
Johnson, M.S. Safronova (2001)

**Поправка  $-0.61\%$**

**Отклонение от СМ  $2.5\sigma \rightarrow \sim 1\sigma$**



# Радиационные поправки



(a) Главный вклад в матричный элемент с  $Z$ -бозоном.  
(b-f) Однопетлевая радиационная поправка. Двойная линия обозначает точную по кулоновскому полю ядра волновую функцию и точный пропагатор электрона, зигзаг обозначает  $Z$ -бозон, штриховая линия - фотон.

- ▶ Поправка за счёт пересчёта  $\theta_W$  от  $q = 0$  до  $q = 1/r_0 \sim 30\text{MeV}$  [A.I.Milstein, O.P.Sushkov (2002)]:

$$\delta_{cd} = \frac{4\alpha Z}{3\pi Q_W} (1 - 4 \sin^2 \theta_W) \ln(\lambda_C/r_0) \sim -\mathbf{0.1\%},$$

- ▶ Учёт поляризации вакуума приводит к замене

$$\frac{Z\alpha}{r} \longrightarrow \frac{Z\alpha}{r} \left( 1 + \frac{2\alpha}{3\pi} \ln \frac{r}{\lambda_C} \right).$$

Поправка  $\delta_b$  [A.I. Milstein and O. P. Sushkov (2002)]:

$$\delta_b = \alpha \left( \frac{1}{4} Z\alpha + \frac{2(Z\alpha)^2}{3\pi\gamma} [\ln^2(b\lambda_C/r_0) + f] \right) \sim \mathbf{0.42\%}.$$

Здесь  $b = \exp(1/(2\gamma) - C - 5/6)$ ,  $\gamma = \sqrt{1 - (Z\alpha)^2}$  и  $f \sim 1$  плавная функция  $Z\alpha$  (не зависит от  $r_0$ ).

**$Z\alpha = 0.4$ ,  $\ln(\lambda_C/r_0) = 5.7$ .** Совпадает с численным результатом W.R.Johnson et al. (2001).

- ▶ Поправка к вершине и собственной энергии [A.I.Milstein, O.P.Sushkov, I.S. Terekhov (2002)]:

$$\delta_{ef} = \delta_e + \delta_f = \mathcal{A} \ln(b\lambda_C/r_0) + \mathcal{B} \sim -\mathbf{0.85\%} \quad ,$$

где  $\mathcal{A}$  и  $\mathcal{B}$  - функции  $Z\alpha$ .

- ▶ Вклад электрон-электронного слабого взаимодействия [A.I.Milstein, O.P.Sushkov (2002)]  $+\mathbf{0.04\%}$
- ▶ Вклад “нейтронной шкуры” [A. Derevianko (2002)]  $-\mathbf{0.2\%}$

$$Cs : \quad Q_W = -72.81 \pm (0.28)_{ex} \pm (0.36)_{theor}.$$

Предсказание СМ:

$$Q_W = -73.09 \pm 0.03$$

**Согласие в пределах  $0.6 \sigma$  !**

# Tl

- ▶ Учёт вклада магнитного электрон-электронного взаимодействия: **-0.88%**
- ▶ Поправка за счёт пересчёта  $\theta_W$  от  $q = 0$  до  $q = 1/r_0$ : **-0.08%** ,
- ▶ Учёт поляризации вакуума: **0.9%**.
- ▶ Поправка к вершине и собственной энергии : **-1.48%**
- ▶ Вклад “нейтронной шкуры”: **-0.2%**
- ▶ Вклад электрон-электронного слабого взаимодействия: **+0.01%**

$$Tl : \quad Q_W = -116.8 \pm (1.2)_{ex} \pm (3.4)_{theor}.$$

Предсказание СМ:  $Q_W = -116.7 \pm 0.1$

**Согласие в пределах  $0.03 \sigma$  !**

# Заключение

- ▶ В настоящий момент можно говорить о надёжном последовательном сравнении предсказаний СМ с результатами экспериментов по изучению несохранения чётности в атомах.
- ▶ Получено трогательное согласие теории и эксперимента (**в пределах  $0.6 \sigma$  для цезия**).
- ▶ Проведение прецизионных экспериментов и анализ их результатов требует глубокого понимания происходящих процессов. Иначе будешь открывать Новую физику каждый день. Однако, эта физика будет “новой” только для тебя.

Всем спасибо!