

# Операции симметрии Р, С и Т

Р.М. Джилкибаев





# P - ЧЕТНОСТЬ

- P оператор инверсии или четности действует на волновую функцию  
 $P\psi(r) \rightarrow \psi(-r) = \xi\psi(r)$
- При повторном действии P система переходит в исходное состояние  
 $PP\psi(r) = \xi P\psi(r) = \xi\xi\psi(r) = \psi(r) \quad \xi^2 = 1, \quad \xi = \pm 1$
- Атом водорода, потенциал  $V(r)$  - сферические гармоники  $Y_l^m(\theta, \varphi)$  действие оператора четности  $P Y_l^m(\theta, \varphi) = (-1)^l Y_l^m(\theta, \varphi)$
- Четность системы  $P | a+b \rangle = P | a \rangle P | b \rangle P | \text{орбит. мом.} \rangle$ , внутренней четности частицы  $P | a \rangle = \pi_a$ ;  $a+b \rightarrow c+d \Rightarrow \pi_a \pi_b (-1)^l = \pi_c \pi_d (-1)^{l'}$

# ЧЕТНОСТЬ ПИОНА

- четность протона принимается равной  $\pi_p = +1$
- эксперимент  $d\pi^- = nn$ ,  $d\pi^- = nn\gamma$  и нет  $d\pi^- = nn\pi^0$
- полная волновая фун.  $(nn)$  фермионов  $\rightarrow$  АНТИ-СИМ.
- Дейтрон  $(pn)$ , спин = 1, орбит. мом. = 0,  $\pi_d = \pi_p \pi_n$
- $\pi_d \pi_{\pi^-} (-1)^l = \pi_p \pi_n \pi_{\pi^-} = \pi_n \pi_n (-1)^{l'} = (-1)^1 = -1$
- два набора  $\pi_p = \pi_n = 1$   $\pi_{\pi^-} = -1$ ;  $\pi_p = \pi_{\pi^-} = 1$   $\pi_n = -1$

# СПИН ПИОНА

- $p + p \leftrightarrow \pi^+ + d$
- $|M_{if}|^2 = |M_{fi}|^2$
- $\sigma_{a+b \rightarrow c+d} = |M_{if}|^2 (2s_c + 1) (2s_d + 1) p_f^2 / v_i / v_f$
- $2s_\pi + 1 = 1 \pm 0.01$

- $$\frac{\sigma(pp \rightarrow \pi d)}{\sigma(\pi d \rightarrow pp)} = 2 \frac{(2s_\pi + 1)(2s_d + 1)}{(2s_p + 1)^2} \frac{p_\pi^2}{p_p^2},$$



# НАРУШЕНИЕ Р ЧЕТНОСТИ

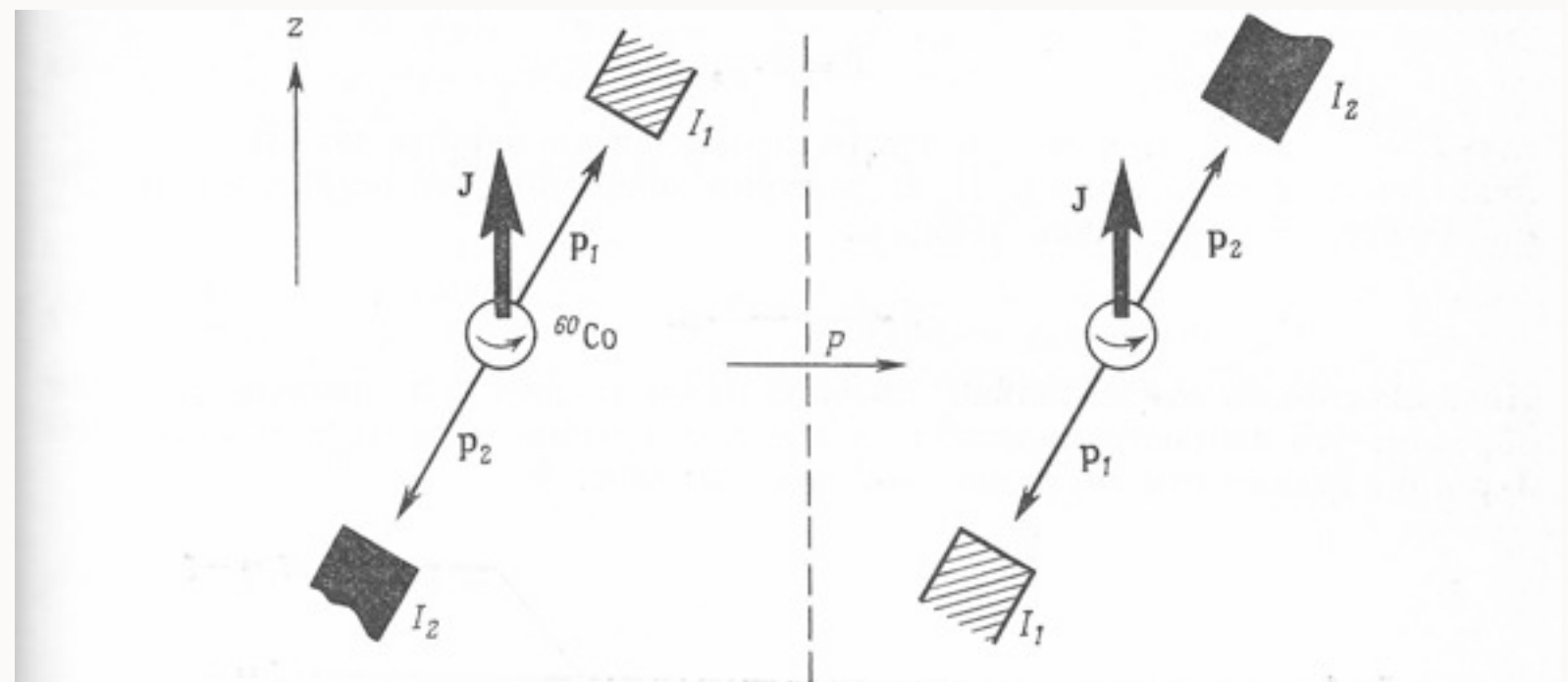
- $^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}$   $J = 5$ ,  $J p \rightarrow -J p$ ,  $kT \ll g \mu_p B$

- $T = 0.003 \text{ K}$ ,  $B = 2.3 \text{ T}$

- $k = 8.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$

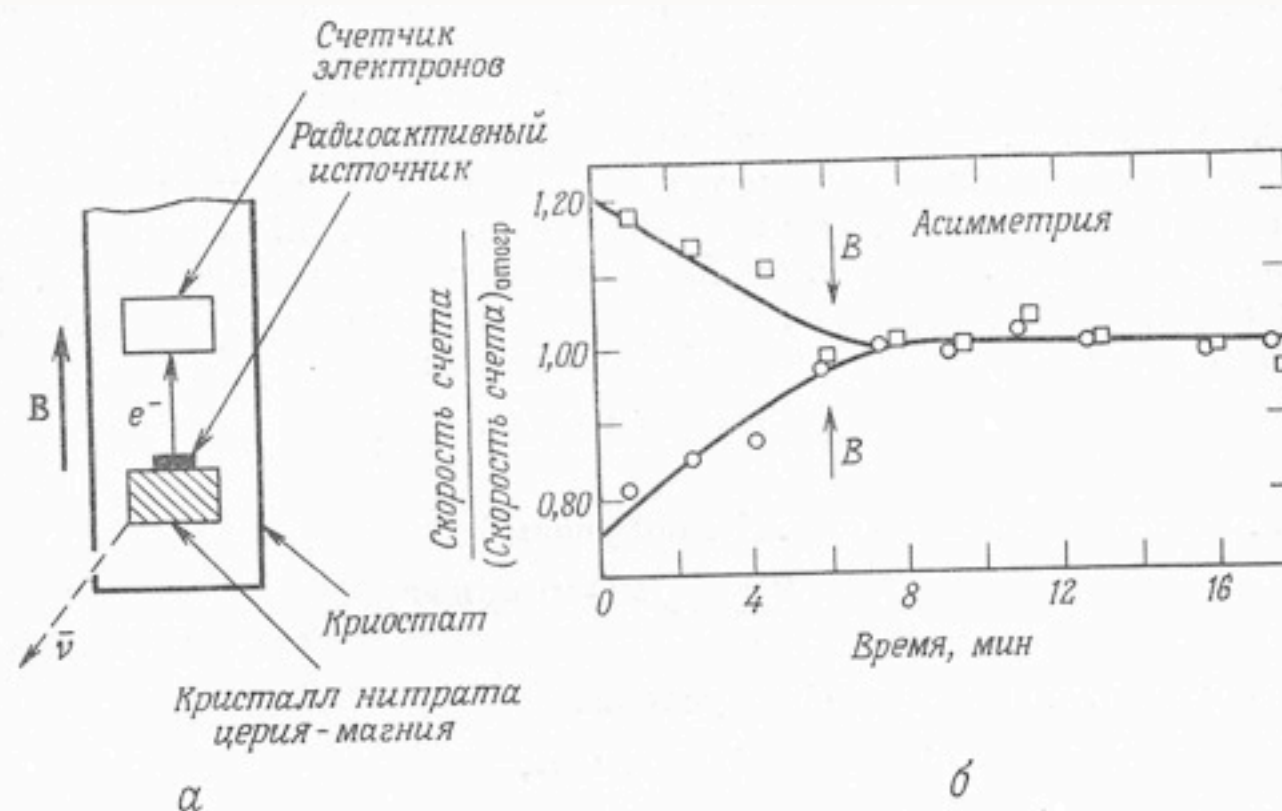
- $kT \ll J g \mu_N B$

- $\mu_N = 3.2 \cdot 10^{-8} \text{ eV T}^{-1}$



Фиг. 9.4. Идея эксперимента г-жи Ву и сотрудников. Поляризованное ядро испускает электроны с импульсами  $p_1$  и  $p_2$ . Исходное положение показано слева, а обращенное при преобразовании четности — справа. Инвариантность относительно преобразования четности означала бы, что оба положения нельзя различить.

# НАРУШЕНИЕ Р ЧЕТНОСТИ



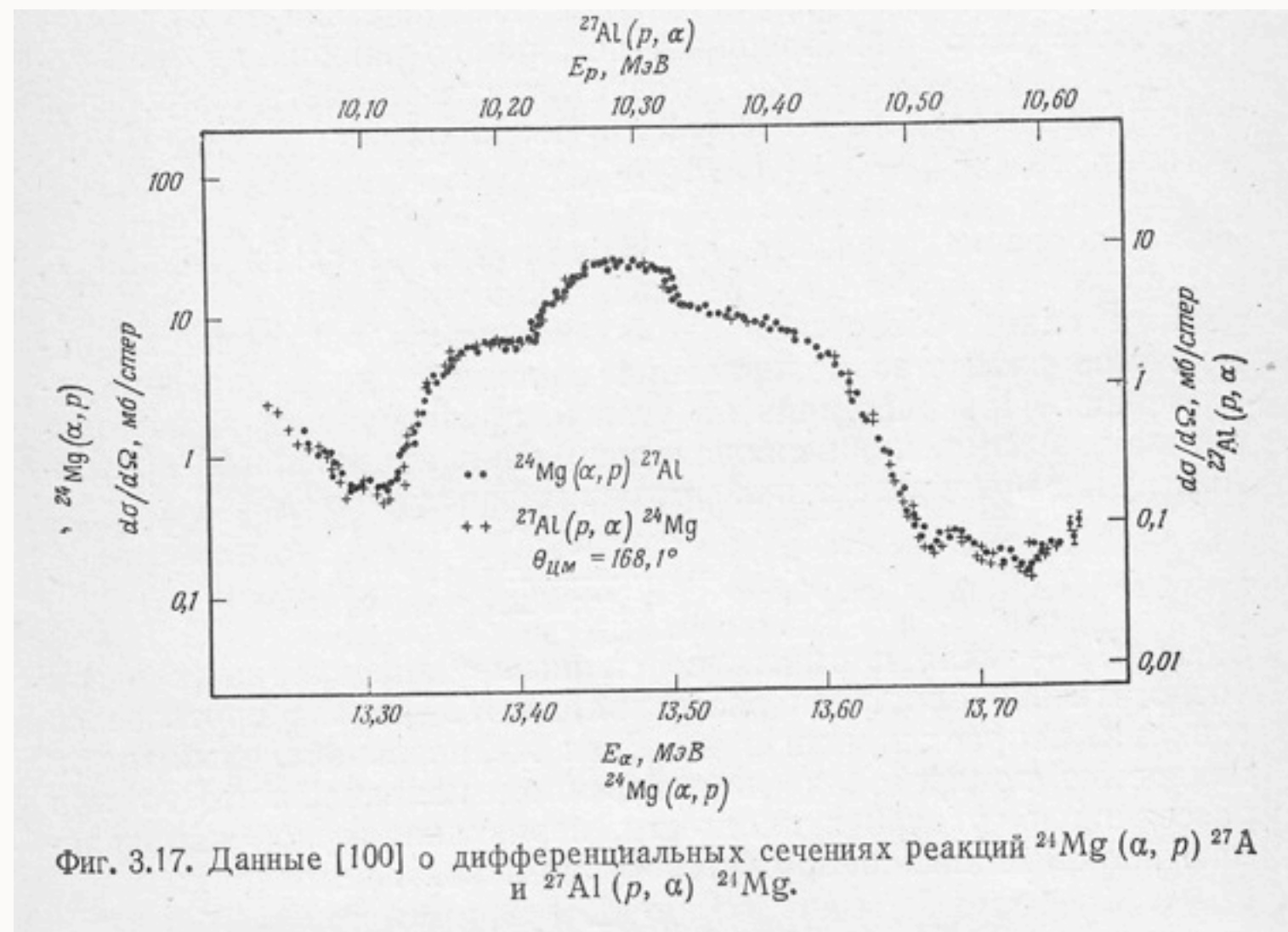
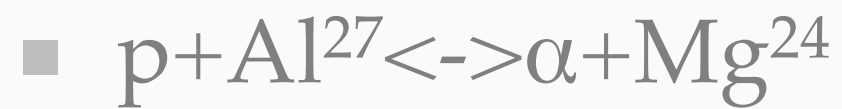
Фиг. 9.6. *a* — установка для измерения  $\beta$ -излучения, испускаемого поляризованными ядрами. *б* — результаты самого первого эксперимента, установившего несохранение четности [4]. Нормированная скорость счета в  $\beta$ -детекторе показана для двух направлений внешнего магнитного поля. После охлаждения с помощью адиабатического размагничивания источник отогревался, поляризация ядер разрушалась и эффект пропадал.



# T - ЧЕТНОСТЬ

- Обращение времени T:  $t \rightarrow -t$ ;  $x \rightarrow x$ ;  $p \rightarrow -p$ ;  $J \rightarrow -J$
- $T \psi(t) = \psi^*(-t)$ ;  $\psi(x,t) = e^{i(px - Et)/\hbar}$ ;
- $\psi^*(x,-t) = e^{-i(px + Et)/\hbar} = e^{i(-px - Et)/\hbar}$
- Операция T - обращает движение на обратное
- Сечения прямой и обратной реакций равны

# Т - ЧЕТНОСТЬ





# Р, Т - ЧЕТНОСТЬ

Величина	$T$	$P$	
$\mathbf{r}$	$\mathbf{r}$	$-\mathbf{r}$	
$\mathbf{p}$	$-\mathbf{p}$	$-\mathbf{p}$	Полярный вектор
$\sigma$ (спин)	$-\sigma$	$\sigma$	Аксиальный вектор ( $\mathbf{r} \times \mathbf{p}$ )
$\mathbf{E}$ (электрическое поле)	$\mathbf{E}$	$-\mathbf{E}$	( $\mathbf{E} = -\partial V / \partial \mathbf{r}$ )
$\mathbf{B}$ (магнитное поле)	$-\mathbf{B}$	$\mathbf{B}$	(Как $\sigma$ ; пример — круговой ток)
$\sigma \mathbf{B}$	$\sigma \mathbf{B}$	$\sigma \mathbf{B}$	Магнитный дипольный момент
$\sigma \mathbf{E}$	$-\sigma \mathbf{E}$	$-\sigma \mathbf{E}$	Электрический дипольный момент
$\sigma \mathbf{p}$	$\sigma \mathbf{p}$	$-\sigma \mathbf{p}$	Продольная поляризация
$\sigma (\mathbf{p}_1 \times \mathbf{p}_2)$	$-\sigma (\mathbf{p}_1 \times \mathbf{p}_2)$	$\sigma (\mathbf{p}_1 \times \mathbf{p}_2)$	Поперечная поляризация

# C - ЧЕТНОСТЬ

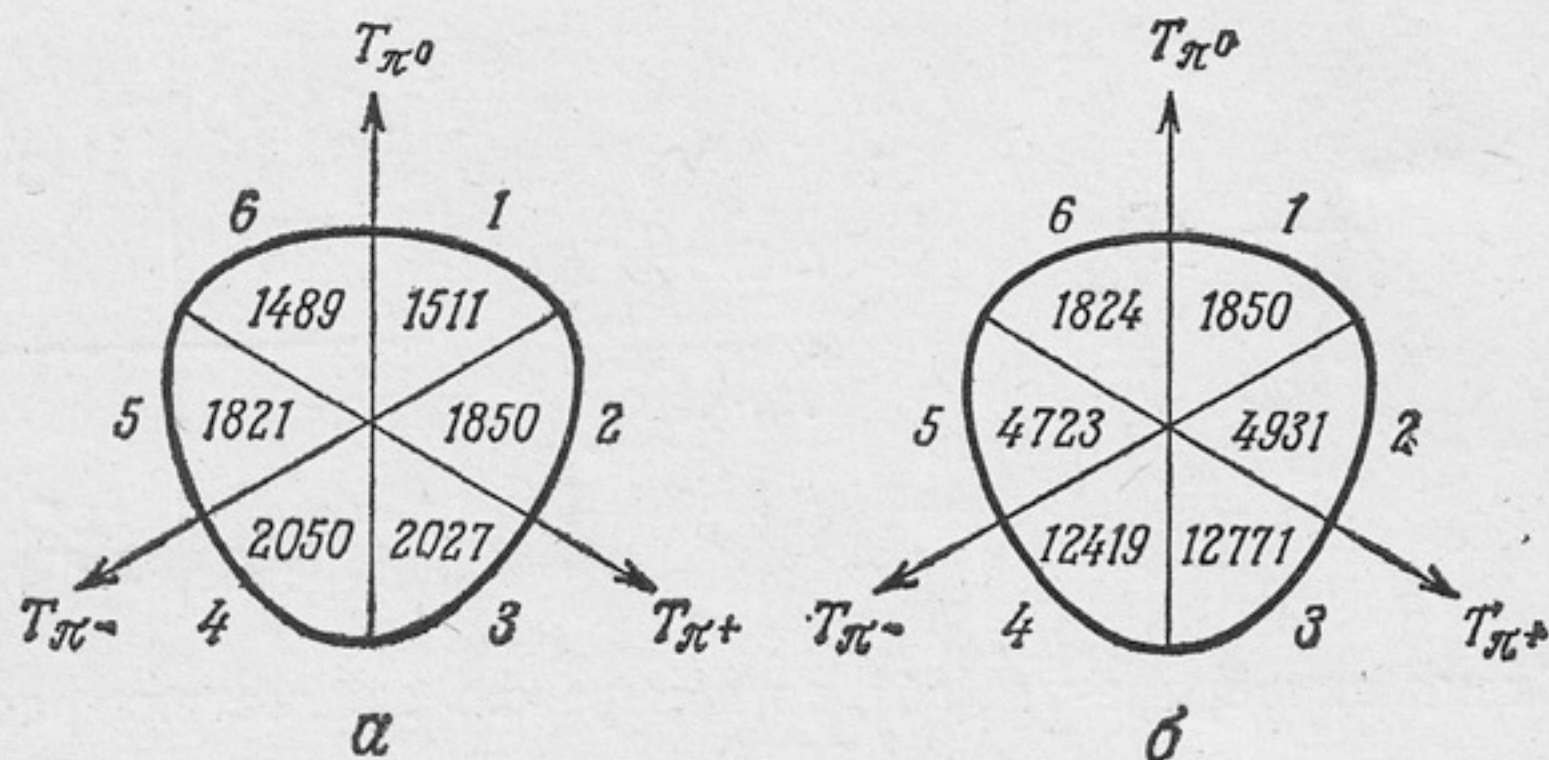
- $C|N\rangle = |-N\rangle$     частица - античастица
- $C|N\rangle = \eta_c |N\rangle$  ?     $C|N=0\rangle = \eta_c |N=0\rangle$ ,  $\eta_c = \pm 1$
- Фотон -  $C A \rightarrow -A$ ,  $\eta_c(\gamma) = -1$ ,  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ ,  $\eta^0 \rightarrow 2\gamma$
- нет распадов  $\pi^0 \rightarrow 3\gamma$ ,  $\eta^0 \rightarrow 3\gamma$
- $\text{Br}(\pi^0 \rightarrow 3\gamma) / \text{Br}(\pi^0 \rightarrow 2\gamma) < 5 \times 10^{-6}$



# РАСПАД ПОЗИТРОНИЯ

- $e^+ e^- \rightarrow 2\gamma, 3\gamma$
- перестановка спиновых координат  $(-1)^{S+1}$
- перестановка простран. координат  $(-1)^L$
- перестановка зарядовых координат  $C$
- $(-1)^{S+1} (-1)^L C = -1 \rightarrow C = (-1)^{S+L} = (-1)^n$
- синглет  $L=0, S=0$  ( $2\gamma$ )  $t=0.12$  ns ;  $L=0, S=1$  ( $3\gamma$ )  $t=143$  ns ;

# С - ИНВАРИАНТНОСТЬ



Фиг. 3.13. Диаграммы Далитца для распада  $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ .

**a** — по данным работы [35] (полное число событий 10 000); **b** — по данным работы [63] (полное число событий 37 000).

По осям, проведенным под углами  $120^\circ$ , откладывается кинетическая энергия пионов. Кривой ограничена область, разрешенная законами сохранения энергии и импульса. Инвариантность относительно зарядового сопряжения означает, что слева и справа от средней линии должно быть одинаковое число событий. На графике указано число событий в каждом сектанте.



# CPT - ТЕОРЕМА

- Мир - Зеркальный Мир
- Частица - Античастица
- движение -обратное

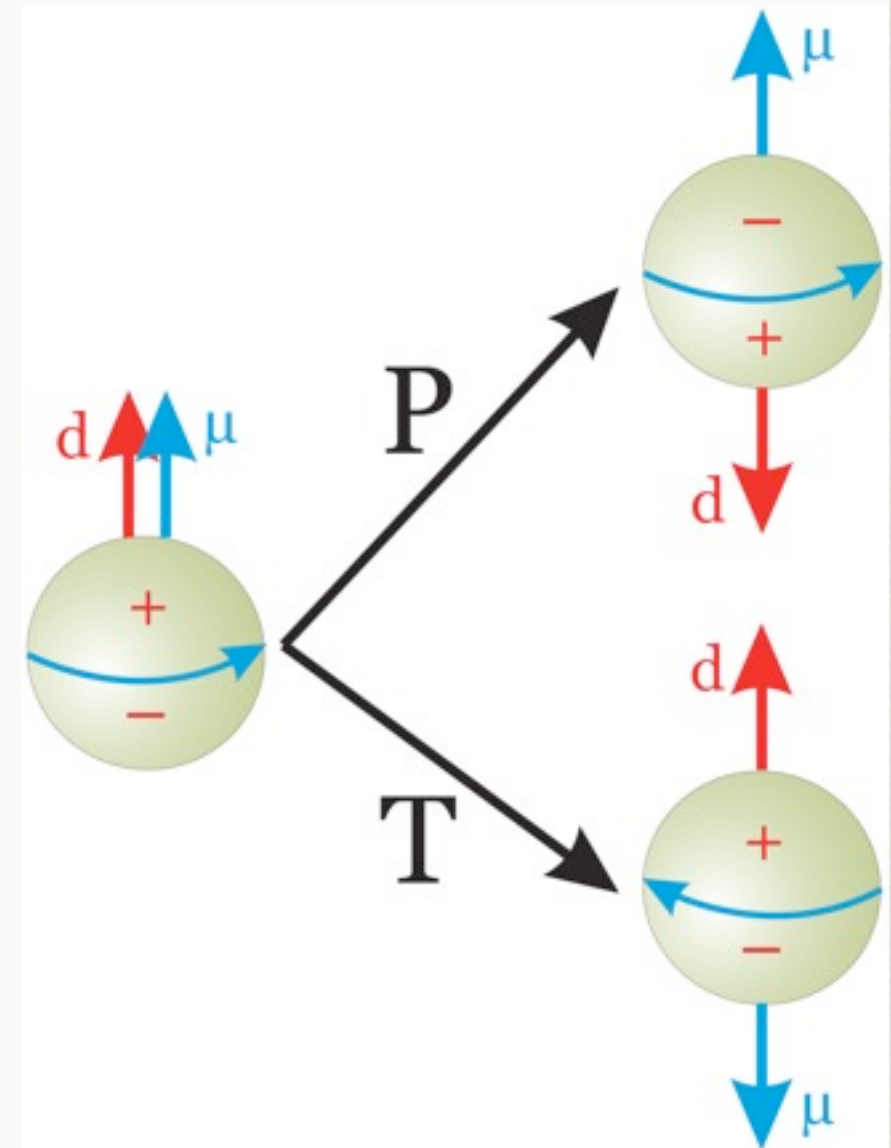
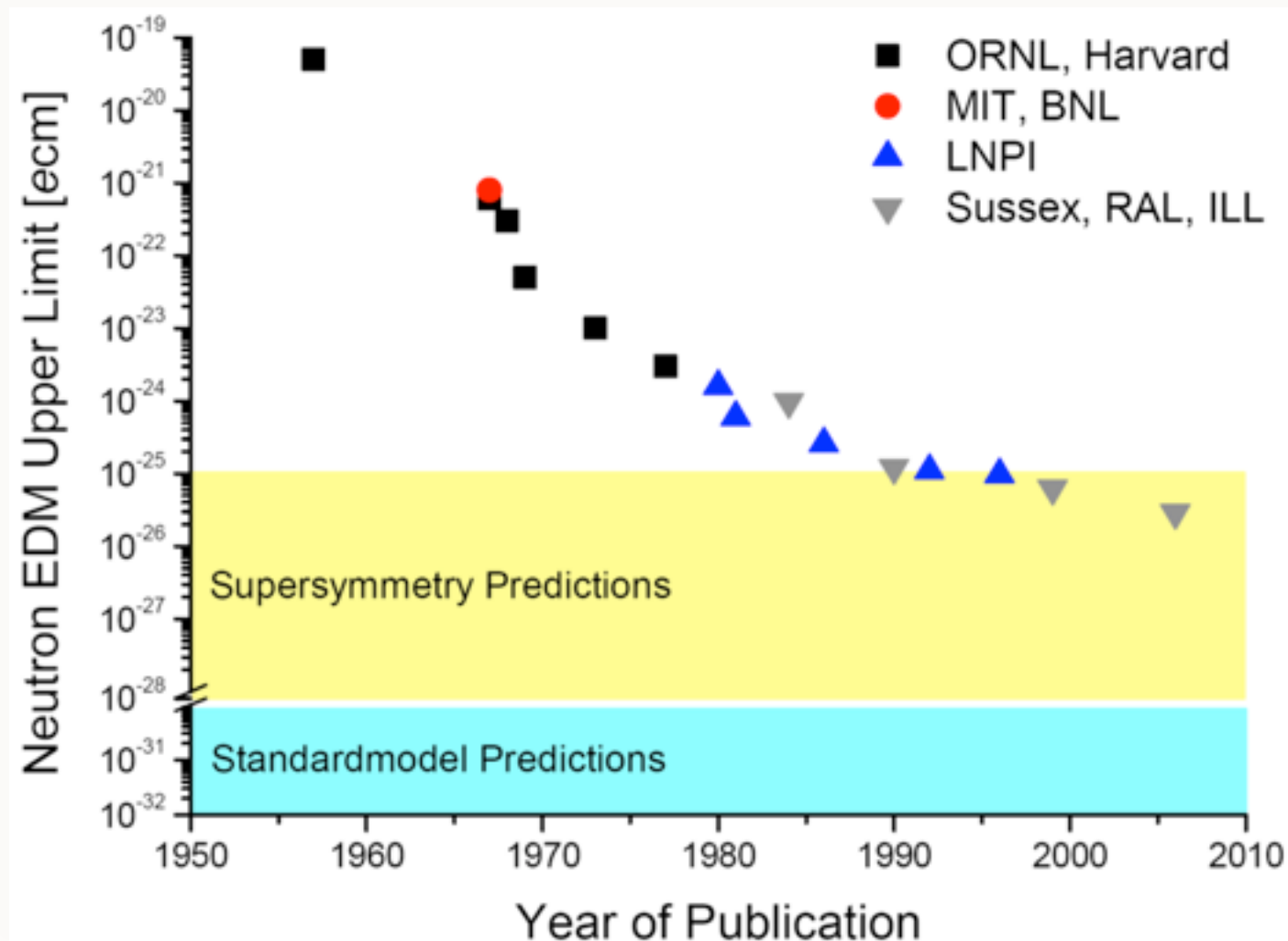
Таблица 3.7

Проверка *CPT*-теоремы

		Предельное значение относительной разности
Время жизни	$\tau_{\pi^+} - \tau_{\pi^-}$	$10^{-3}$
	$\tau_{\mu^+} - \tau_{\mu^-}$	$2 \cdot 10^{-3}$
	$\tau_{K^+} - \tau_{K^-}$	$10^{-3}$
Магнитный момент	$ \mu_{\mu^+}  -  \mu_{\mu^-} $	$10^{-6}$
Масса	$M_{\pi^+} - M_{\pi^-}$	$10^{-3}$
	$M_{p^+} - M_{p^-}$	$8 \cdot 10^{-3}$
	$M_{K^+} - M_{K^-}$	$10^{-3}$
	$M_{K^0} - M_{\bar{K}^0}$	$10^{-14}$

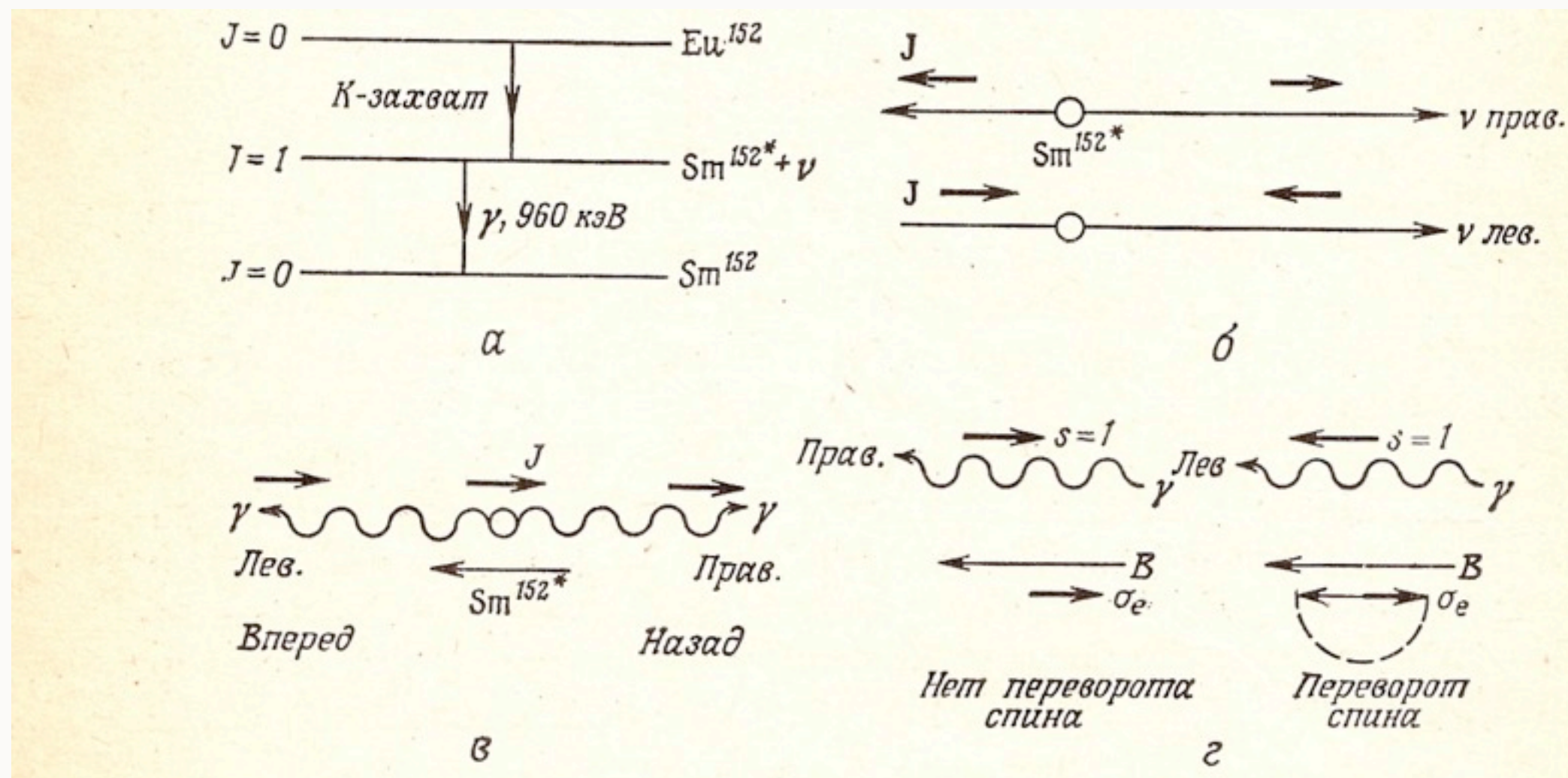
# EDM - НЕЙТРОНА

- EDM Нарушает P и T инвариантность
- $EDM < 0.29 \cdot 10^{-25} \text{ e cm}$ , 90% CL



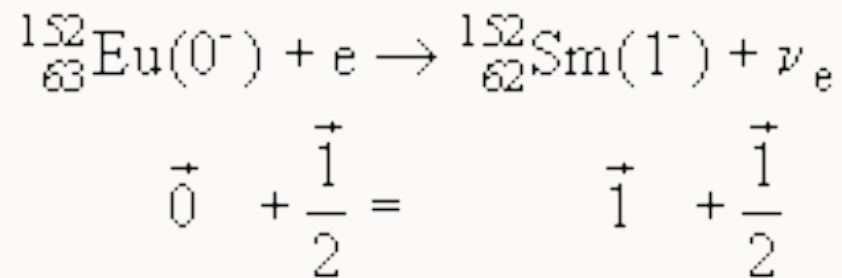


# СПИРАЛЬНОСТЬ НЕЙТРИНО





# ОПЫТ ГОЛЬДХАБЕРА И ДР.



- $\gamma + {}^{152}\text{Sm} \rightarrow {}^{152}\text{Sm}^*$
- ${}^{152}\text{Sm}^* \rightarrow \gamma + {}^{152}\text{Sm}$
- $h = -1.0 \pm 0.3$

