

# Барионная асимметрия и условия Сахарова

1. Нарушение CP
2. Неравновесные условия
3. Переходы, нарушающие сохранение барионного числа

## Симметрии в распадах K-мезонов

- ▶ 1. Нарушение CP= T-неинвариантность
- ▶ Величина эффекта :
- ▶ 1 распад с нарушением CP на 1000 распадов K-мезонов или на 600 распадов B-мезонов.

# Нарушение CP в физике нейтронов: ЭДМ, распад нейтрона, рассеяние нейтронов.

---

- ▶ При нарушении CP атомы и элементарные частицы
- ▶ могут иметь ЭДМ  $\vec{d} = a\vec{s}$  Иначе это P-,T-нечетный эффект.
- ▶ При сохранении CP в слабом взаимодействии в распаде нейтронов, а также в рассеянии асимметрии в скорости счета определяются равенством
- ▶ T – инвариант. Спин частицы можно заменить на поляризацию ядра  $\vec{p} = b\vec{s}$
- ▶ Для бета распадов и рассеяния нейтронов имеется один вектор со свойствами симметрии ЭДМ . Это вектор . Поэтому при нарушении CP существует асимметрия типа

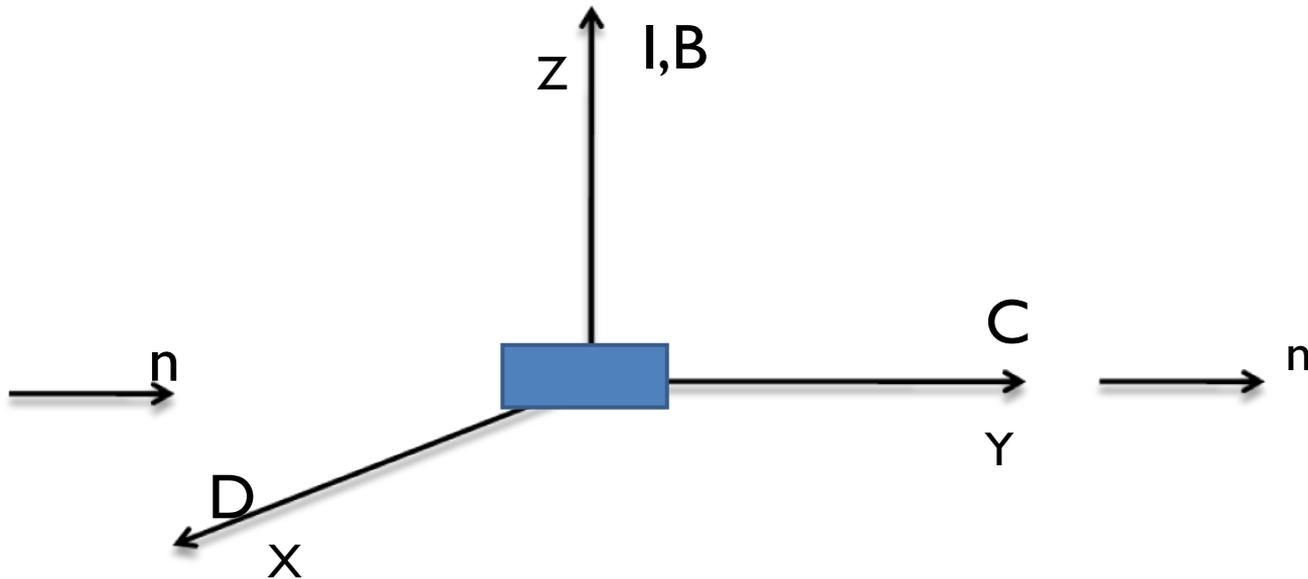
$$[\vec{k} \times \vec{I}]$$

$$[\vec{k} \times \vec{I}] = c\vec{s}$$

# Взаимодействия нейтронов с мишенью

---

Оси координат, мишень и взаимодействия

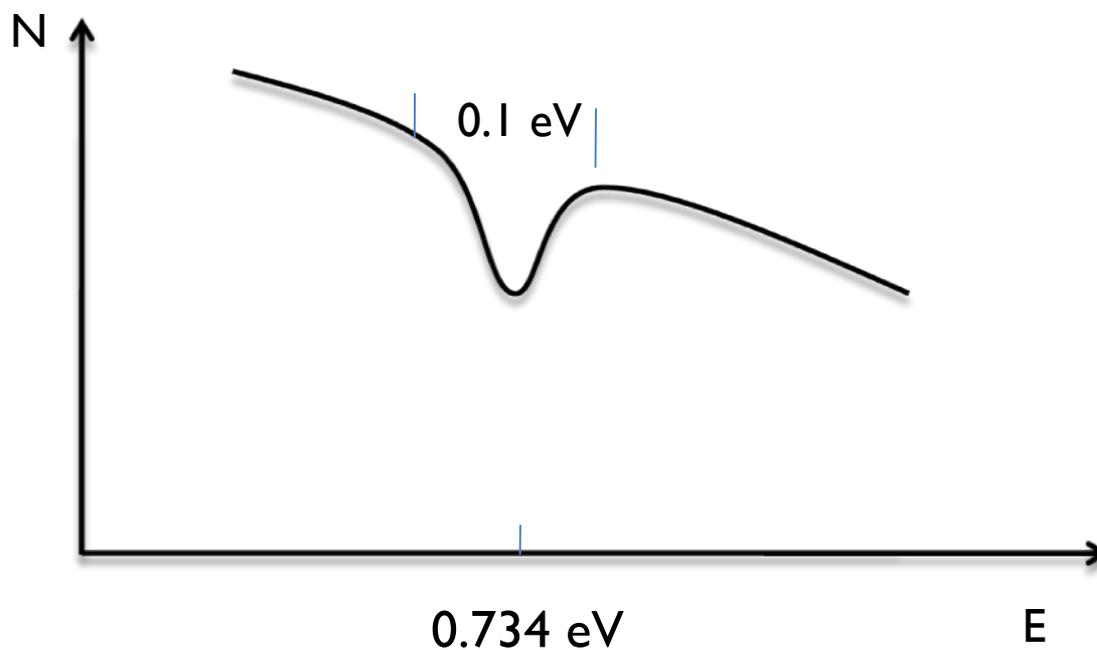


Амплитуда рассеяние  
Псевдопотенциал Ферми

$$F = A + B(\sigma \cdot I) + C(\sigma \cdot k) + D(\sigma \cdot [k \times I])$$

$$H = A + (\vec{\sigma} \cdot \vec{b})$$

# Свойства р-резонанса, $^{139}\text{La}$



Продольная асимметрия в р- резонансе около 10%.

## Амплитуда слабого взаимодействия $C$

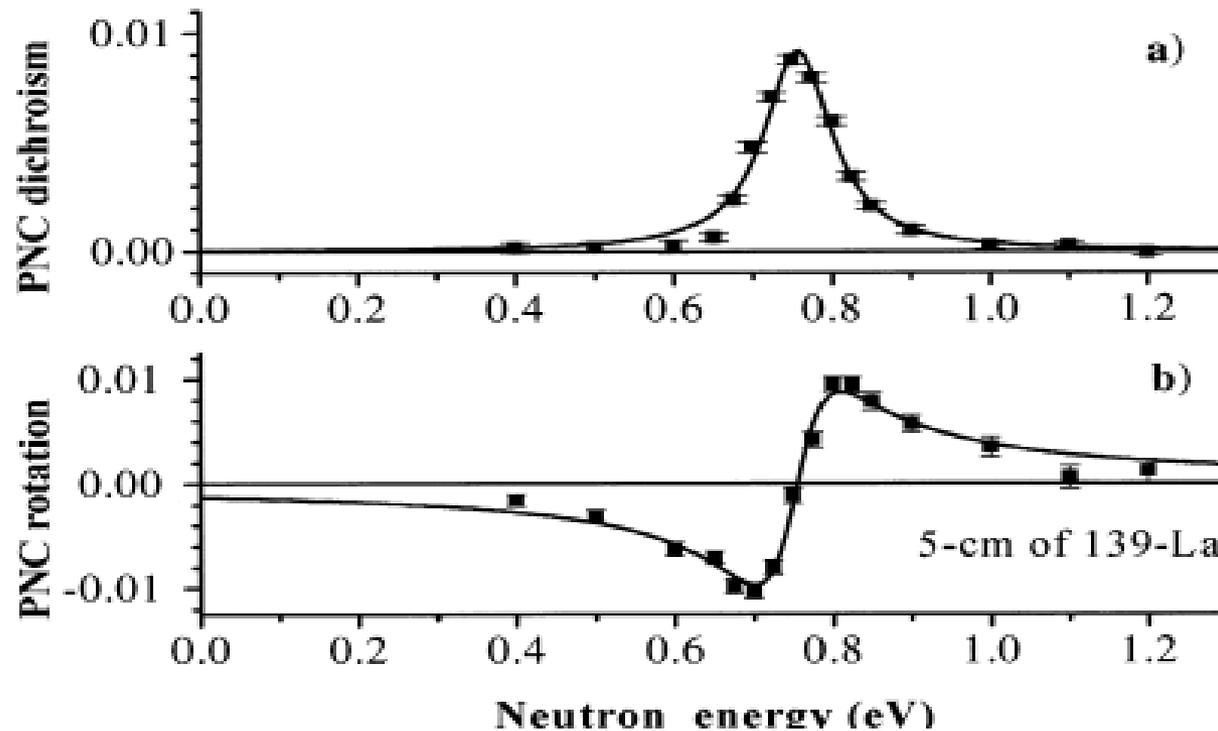


Рис. 5. Величины  $ImCt$  (a) и  $ReCt$  (b) в зависимости от энергии нейтронов

# Порядок взаимодействий в мишени

	1	2	3	4
оси	Z	Y	Y	X
	$(\sigma \cdot l)$	$(\sigma \cdot k)$	$(k \cdot l)$	$(\sigma \cdot [k \times l])$
	сильное	слабое		P, T – нечетное
	$p_t B = b_z$	$C = b_y$	$C'$	$p_t D = b_x$ EDM

$$10^{-7} \text{eV}$$

$$10^{-14} \text{eV}$$

$$\leq 10^{-17} \text{eV}$$

$$\leq 10^{-21} \text{eV}$$

Теория предсказывает  $D/C \leq 10^{-3}$ ,  $Dt$  – порядка микро радиан.

Спиновый гамильтониан  $H = (\sigma b) / 2 = q(\sigma n) / 2$ ,  $g_n = \hbar = 1$

Единичный вектор  $n = b / q$ , где  $q = \sqrt{\vec{b} \cdot \vec{b}}$

Оператор эволюции

$$U = \exp(-iqt(\sigma n) / 2)$$

Матрица плотности

$$\rho = (1 + (\sigma \cdot p)) / 2$$

$$\rho \rightarrow \rho' = U \rho U^+$$

$$\langle Q \rangle = \text{Tr}(\hat{Q} \rho')$$

## Мишень является поляризатором

Пучок нейтронов не поляризован. На нейтроны действует только поле слабого взаимодействия  $\mathbf{b}_y$ . Мишень - поляризатор

$$N = \text{Tr}(\rho_a U U^+) = e^{\sigma_y \text{Im} b_y t} (\cosh(\text{Im} b_y t) + \sigma_y \sinh(\text{Im} b_y t)) / 2$$

$$N = \text{Tr}((1 + f \sigma_y) \rho') / 2 = e^{-\text{Im} A t} (\cosh(\text{Im} b_y t) + f \sinh(\text{Im} b_y t)) / 2$$

$$f = \pm 1 \quad R = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} = \text{tgh}(\text{Im} b_y t) \approx \text{Im} b_y t$$

Результат Алфименкова

$$R \approx 10\%$$

Поскольку матрица  $\sigma_y$  коммутирует сама с собой, то результат будет тем же самым и для поляризованного пучка. Мишень – анализатор.

$$N = \text{Tr}(U \rho_p U^+)$$

Скорость счета для поляризованного пучка

$$N_{pct}(\delta, t) = \frac{1}{2} \text{Tr}(U_t U_{ct} U_c \rho_p U_c^+ U_{ct}^+ U_t^+),$$

Скорость счета для неполяризованного пучка

$$N_{tca}(\delta, t) = \frac{1}{2} \text{Tr}(\rho_a U_c U_{tc} U_t U_t^+ U_{tc}^+ U_c^+).$$

В обоих случаях скорость счета описывается равенством,

$$N_{pct(tca)}(\delta, t) = \frac{1}{2} \exp(-At) [N_0 + p_{p(a)} p'_{a(p)} \cos(\alpha_{pct(tca)})]$$

где  $N_0$  – новая нормировка пучка, появившаяся из-за поглощения пучка в мишени, величина

$$p'_{a(p)} = \sqrt{p'_{xa(p)}^2 + p'_{ya(p)}^2}$$

является азимутальной анализирующей (поляризующей) способностью мишени и угол  $\alpha$  – угол между векторами  $p$  и  $p'$ .



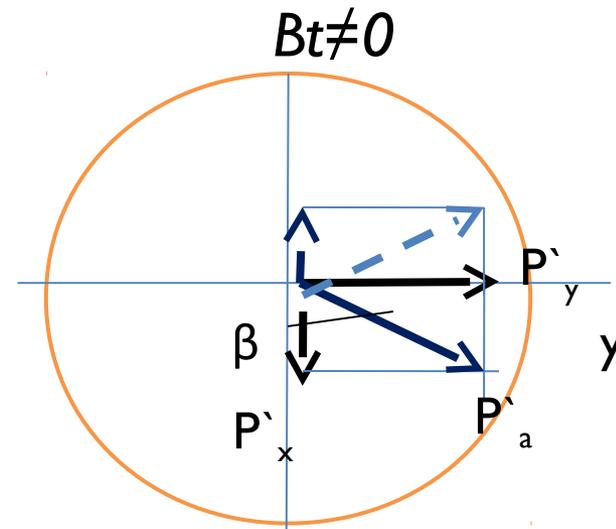
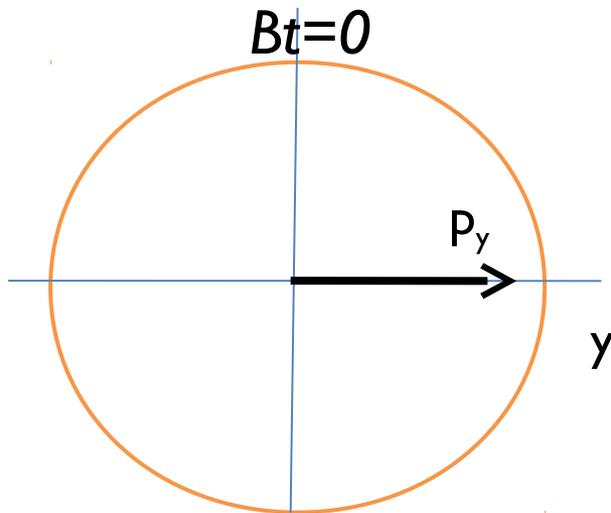
$$p'_{xa(p)} = 2 \operatorname{Im}(b'_x{}^* \cos qt) \pm 2 \operatorname{Im}(b'_y b'_z{}^*)$$

$$b'_i = \frac{b_i \sin qt}{qt}$$

$$p'_{ya(p)} = 2 \operatorname{Im}(b'_y{}^* \cos qt) \pm 2 \operatorname{Im}(b'_z b'_x{}^*)$$

$$\frac{\operatorname{Re} b_x}{\operatorname{Im} b_x} = \frac{\operatorname{Re} b_y}{\operatorname{Im} b_y}$$

$$\beta_{a(p)} = \operatorname{arctg}(p'_{ya(p)} / p'_{xa(p)})$$



$$\operatorname{tg} \beta_{a(p)} = \operatorname{tg}(\beta_1 \pm \beta_2), \operatorname{tg} \beta_1 = - \frac{\operatorname{Im}(b'_z b'_x{}^*)}{\operatorname{Im}(b'_y b'_z{}^*)} = \frac{\operatorname{Im}(b'_x{}^* \cos qt)}{\operatorname{Im}(b'_y{}^* \cos qt)} = \frac{\operatorname{Im} b_x}{\operatorname{Im} b_y} = \frac{\operatorname{Im} D}{\operatorname{Im} C}$$

$$\operatorname{tg} \beta_2 = \frac{\operatorname{Im}(b'_y b'_z{}^*)}{\operatorname{Im}(b'_y{}^* \cos qt)}$$

$$\text{Re}B \approx \text{Re}2q \gg \text{Im}2q$$

$$p'_{xa(p)} \approx -ap_t \text{Im}Dt \pm b \text{Im}Ct$$

$$p'_{ya(p)} \approx -a \text{Im}Ct \mp bp_t \text{Im}Dt$$

$$p' = \sqrt{p_x'^2 + p_y'^2} = \frac{\text{Im}(b'_y \cos qt)}{\cos \beta_2} \sqrt{1 + (p_t \text{Im}Dt / \text{Im}Ct)^2} \approx c \text{Im}Ct$$

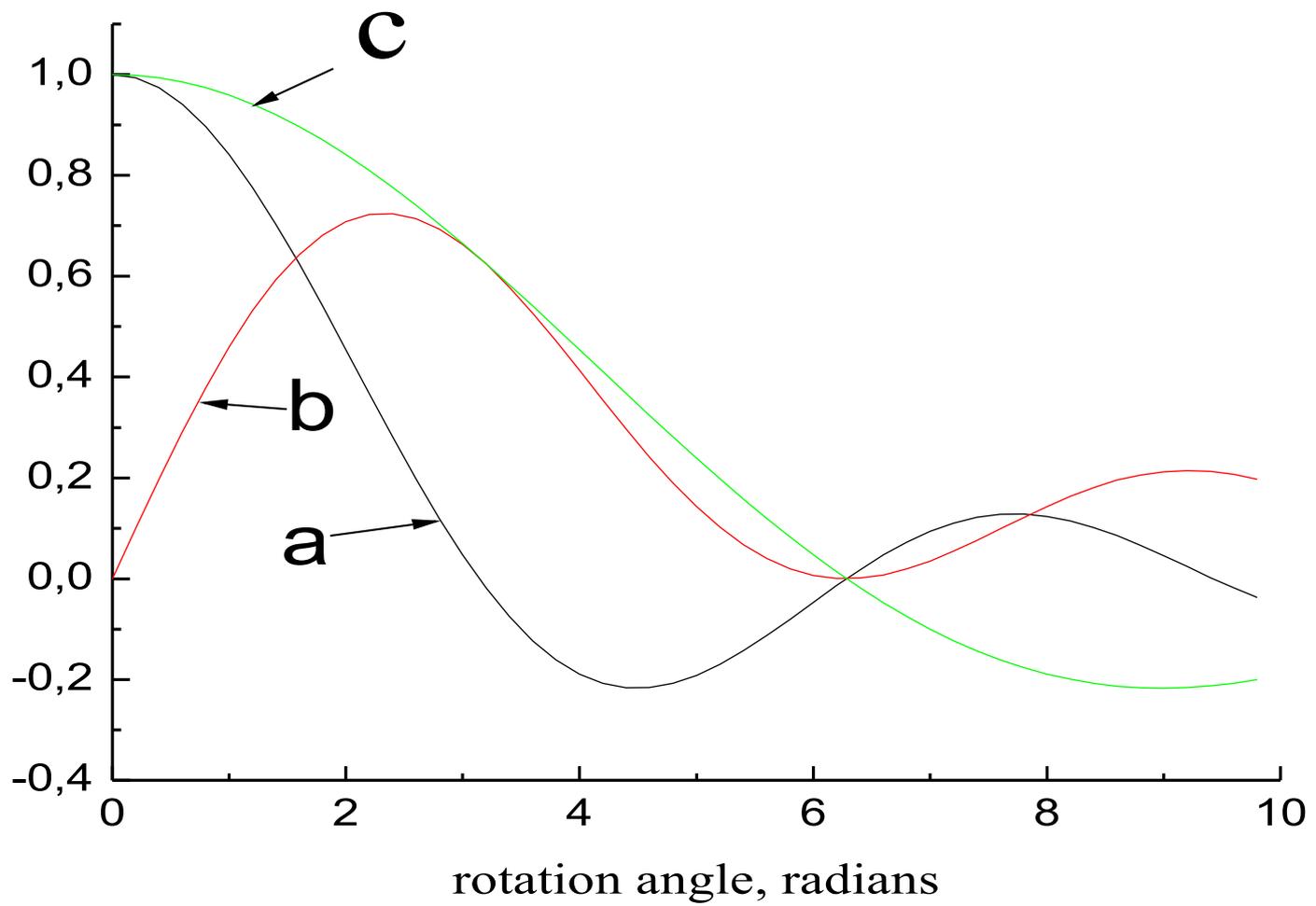
$$a = \frac{\sin(\text{Re}Bt)}{\text{Re}Bt}$$

$$b = \frac{2 \sin^2(\text{Re}Bt / 2)}{\text{Re}Bt}$$

$$c = \frac{\sin(Bt / 2)}{Bt / 2}$$

Коэффициент  $a$  показывает как прецессия спина уменьшает действие полей  $C$  и  $D$ , а коэффициент  $b$  – ослабление интерференции





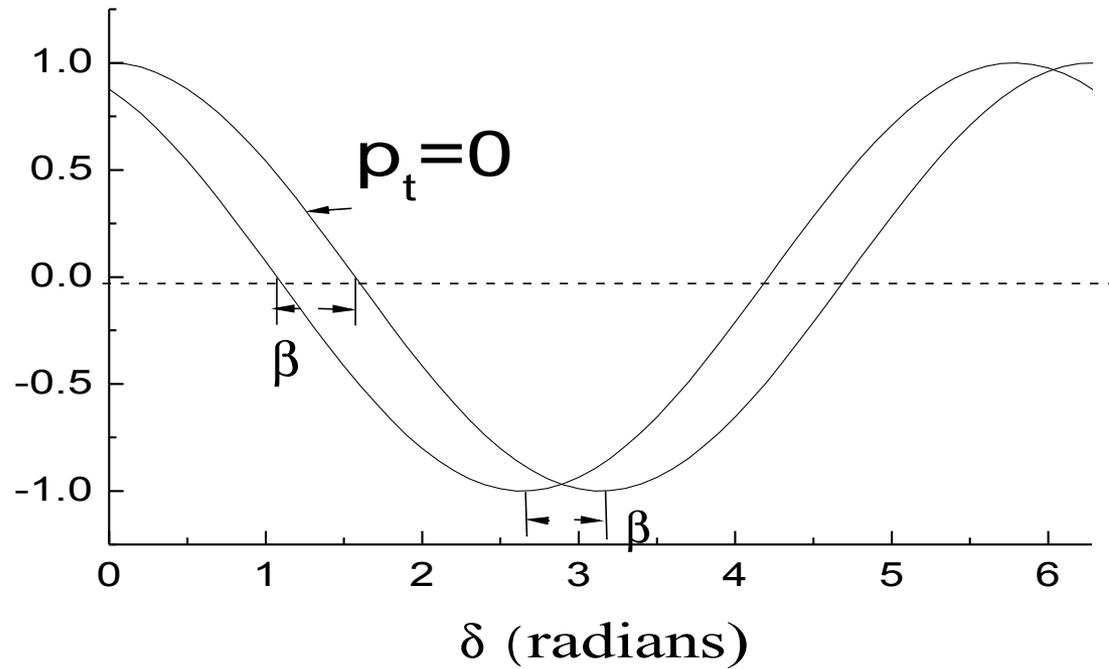


Fig. 3. . Phase shift of a neutron spectrum concerning a calibrating spectrum when the field of the target magnet and the polarization of the target are switched off.

$$\Delta = 2p_t \frac{\text{Im } D}{\text{Im } C} + \alpha_{tl} - \alpha_{tr}$$

$$\frac{\partial \Delta}{\partial p_t} = 2 \frac{\text{Im } D}{\text{Im } C}$$

$$n_1 = \frac{n}{2\pi} (1 + A \cos \alpha) \quad n_2 = \frac{n}{2\pi} (1 + A \cos(\alpha + \chi))$$

$$\chi = \frac{\pi}{2An} (n_1 - n_2) \quad \sigma(\chi) = \frac{\pi \sqrt{2}}{2A\sqrt{n}}$$

$$\chi \leq 5 \cdot 10^{-4} \quad n \approx 2 \cdot 10^{10}$$

Оценим чувствительность определения сдвига фаз.

$$n_1 \approx \frac{n}{2\pi} (1 + A \cos \alpha) \quad n_2 \approx \frac{n}{2\pi} (1 + A \cos(\alpha + \Delta))$$

$$N_1 - N_2 = \frac{2nA}{\pi} \Delta \quad n = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi}{A \sigma_{\Delta}} \right)^2$$

$$A = 0.09, \quad \sigma_{\Delta} = 10^{-4}, \quad n = 7 \cdot 10^{10}$$

При скорости счета  $10^5$  такая статистика набирается за 8 дней измерений и для измерения 3 точек потребуется 60 дней.



Угол поворота спина  $(p_t B' - H)l = \frac{2\pi\nu}{3g_n}, \quad g_n = 1.8 \cdot 10^4 \frac{\text{рад}}{\text{гаусс} \cdot \text{сек}}$

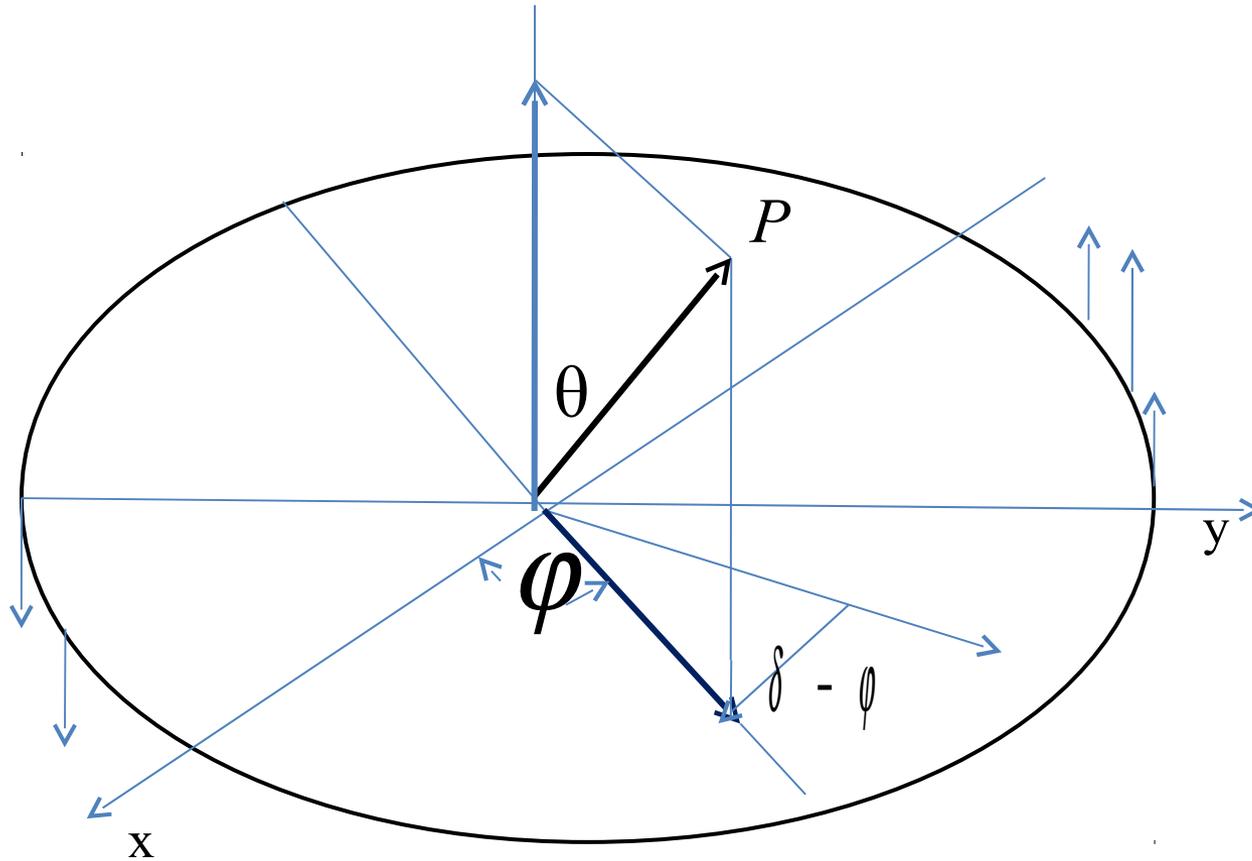
$$\Delta p_t = \frac{0.23}{l} \quad \nu \approx 10^6 \text{ см/сек}, \quad B' \approx 10^3 \text{ гаусс}$$

Что может быть источником систематической погрешности? В рассмотренную задачу поля  $D$  и  $C$  входят равноправно. Остается только поле  $\text{Im}B$ . Действительно, к появлению этой величины может привести не параллельность оси поляризатора (анализатора) с магнитным полем ячейки Рамзея. В этом случае к спектру добавится величина, равная

$$f_z p'_z = f \sin \vartheta \text{ Im} B t \sin(\delta - \varphi)$$

Эту фоновую величину можно наблюдать в интервалах до и после  $p$ -резонанса.





$$pa \sin \vartheta \cos(\varphi) \operatorname{Im} B t$$

$$\operatorname{Im} B \leq 10^{-3} \cdot \operatorname{Re} B$$

## Заключение

Величина  $D/C$  может быть измерена методом фазовых сдвигов с чувствительностью  $10^{-4}$ . Этот результат важен для теории, поскольку дает представление об изовекторной константе связи мезонов в ядре. Измеряется относительная величина, что значительно проще, чем измерение абсолютной величины.

Нет фоновых эффектов, маскирующих измерение отношения  $D/C$ . Предварительно необходимо измерить реальную и мнимую части псевдомагнитного поля.

Оба эксперимента можно поставить на пучке нейтронов реактора ПИК.

