Измерения с поляризованным электронным пучком

А.Е. Блинов (ИЯФ, НГУ)

«Физическая программа Супер c-τ фабрики», 18-19.12.2017 г.

1. Что дает е- поляризация?

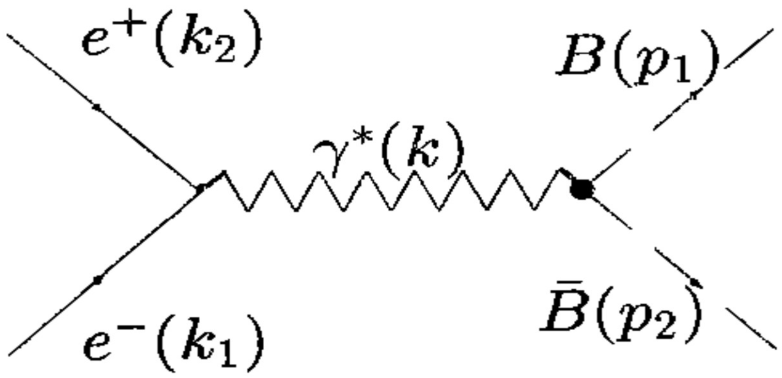
2. спиновая асимметрия в сечении рождения J/ψ-мезона,

3. ЭДМ τ: CP-нарушение в $e^+e^- \to \tau^+ \tau^-$,

4. CP-нарушение в τ-распадах,

5. Заключение.

Что дает поляризация?



$$\ell_\mu = \bar{u}(-k_2)\gamma_\mu u(k_1),$$

$$J_\mu = \bar{u}(p_1)\left[F_1(s)\gamma_\mu - F_2(s)\frac{\sigma_{\mu\nu}k_\nu}{2M}\right]u(-p_2),$$

В с.ц.м. e+ e-

$$\mathcal{M} = -\frac{e^2}{s}\vec{\ell}\cdot\vec{J}$$

$$|\mathcal{M}|^2 = \frac{e^4}{s}\ell_{ik}W_{ik}, \quad \text{где} \quad \ell_{ik} = \ell_i\ell_k^* \quad W_{ik} = J_iJ_k^*.$$

При аннигиляции поляризованных e^+e^--пар лептонный тензор

$$\ell_{ik} = (1+\vec{L}_1\cdot\vec{L}_2)(\delta_{ik} - m_i m_k) - (L_{1i}^{\perp}L_{2k}^{\perp} + L_{1k}^{\perp}L_{2i}^{\perp}) + i(L_1^{\parallel} + L_2^{\parallel})\epsilon_{ikl}m_l, \text{ где}$$

$\vec{m}$ - единичный вектор вдоль импульса e^-,
$\vec{L}_1, \vec{L}_2$ - вектора поляризации e^- и e^+.

Что все-таки дает поляризация?

Набор данных с разными направлениями е-поляризации даст наборы событий с разными знаками интерференции некоторых амплитуд. При наборе же данных на неполяризованных пучках сформируется один набор событий, равный их сумме.

Измерения с поляризацией дают существенный выигрыш в точности, когда измеряемые параметры так или иначе связаны с током соответствующей поляризации т. е. когда эта поляризация являются «физически выделенной» для выполняемого измерения. Если же измеряемые параметра «ортогональны» этим токам, раздельное фитирование образцов событий с разными поляризациями или не даст выигрыша в точности или, возможно, даст умеренное (sqrt(2)?) улучшение статистической точности измеряемых параметров по сравнению с фитированием суммарного образца событий.

Планируемая на *c*-τ фабрике продольная поляризация пучков является «физически выделенной» для измерений:

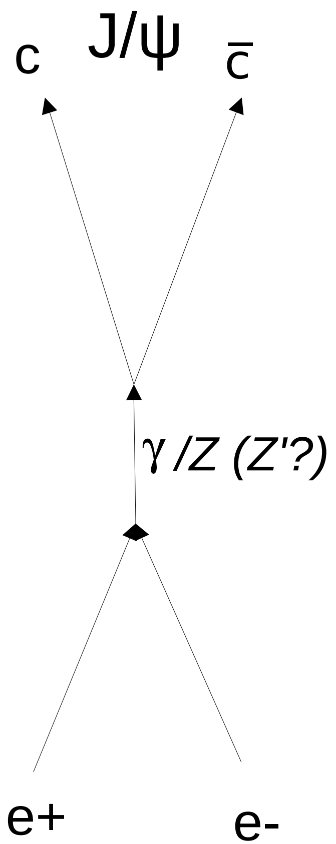
а) включающих рождение или распады с участием слабого взаимодействия, и

б) в которых, при этом, существенна поляризация частиц.

В таких процессах поляризация может дать значительный выигрыш в точности измерения.

Спиновая асимметрия в сечении рождения J/ψ-мезона

(следствие gamma-Z(+Z'?) интерференции в амплитуде)



$$H_\gamma = e_0\left[-\bar{e}\hat{A}e + \frac{2}{3}\bar{c}\hat{A}c - \frac{1}{3}\bar{b}\hat{A}b\right].$$

$$\begin{aligned} H_z \;=\; & \bar{g}\left[(\xi - \frac{1}{4})\bar{e}\hat{Z}e + (-\frac{1}{4})\bar{e}\hat{Z}\gamma^5 e + (-\frac{2}{3}\xi + \frac{1}{4})\bar{c}\hat{Z}c + (\frac{1}{4})\bar{c}\hat{Z}\gamma^5 c \right. \\ & \left. + (\frac{1}{3}\xi - \frac{1}{4})\bar{b}\hat{Z}b + (-\frac{1}{4})\bar{b}\hat{Z}\gamma^5 b\right], \\ & \bar{g} = \frac{e_0}{\sin\theta_w \cos\theta_w}, \quad \xi = \sin^2\theta_w \approx 0.23, \end{aligned}$$

$$x = \frac{(-2\xi + 3/4)}{4\xi(1-\xi)}\left(\frac{m_\psi}{m_Z}\right)^2 \mu = 4.75\times 10^{-4}\mu, \quad \mu = (\boldsymbol{\zeta}\cdot\boldsymbol{n})$$

где $\boldsymbol{\zeta}$ - поляризация электрона, $\boldsymbol{n} = \boldsymbol{p}/p$, $\boldsymbol{p}$ - импульс электрона.

$$A = \frac{\sigma_+ - \sigma_-}{<\sigma>} = 2x = 0.95\cdot 10^{-3}\mu \qquad (= 0.76\cdot 10^{-3}, \text{ при } \mu = 0.8)$$

Измерение спиновой асимметрии в рождении J/ψ

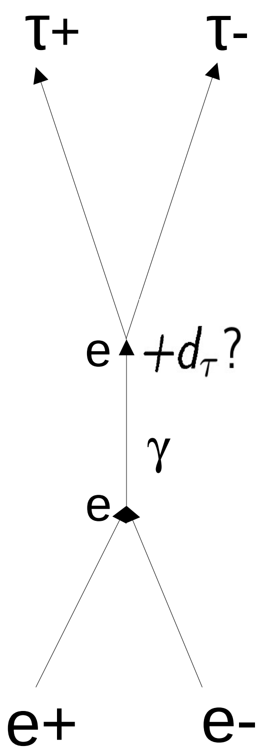
Спиновая асимметрия в сечении $e^+e^- \to J/\psi$ измеряется со статистической погрешностью δ при наборе δ^{-2} событий =>
$A = 0.76 \cdot 10^{-3}$, может быть измерена с относительной точностью 1% при наборе $(0.01 \cdot A)^{-2} = 1.7 \cdot 10^{10}$ событий J/ψ
(дни работы при $L = 10^{35}\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ и $\sigma = 1400$ нб$^{-1}$)

Однако, это потребует также:

1. измерения поляризации пучка с точностью $< 1\%$,
2. измерения A с систематической погрешностью $< 10^{-5}$ (!)

«Поляризационные» эффекты в мониторе светимости?

ЭДМ τ: CP-нарушение в e+e-→τ+ τ-



$$e^+(\boldsymbol{p})e^-(-\boldsymbol{p}) \to \tau^+(\boldsymbol{k}, \boldsymbol{S}_+)\tau^-(-\boldsymbol{k}, \boldsymbol{S}_-)$$

$$\mathcal{L}_{CP} = -id_\tau(s)\bar{\tau}\sigma^{\mu\nu}\gamma_5\tau\partial_\mu A_\nu,$$

В СМ τ+τ- рождаются с L=0, 2 и S=1, а через ЭДМ - с L=1 и S=0.

Спиновая матрица плотности τ+τ- (для неполяризованных e+e-):

$$\mathcal{M}^2_{\rm prod} = \mathcal{M}^2_{\rm SM} + Re(d_\tau)\mathcal{M}^2_{Re} + Im(d_\tau)\mathcal{M}^2_{Im} + |d_\tau|^2\mathcal{M}^2_{d^2},$$

$$\begin{aligned}\mathcal{M}^2_{\rm SM} = \frac{e^4}{k_0^2}[&k_0^2 + m_\tau^2 + |\boldsymbol{k}^2|(\hat{\boldsymbol{k}}\cdot\hat{\boldsymbol{p}})^2 - \boldsymbol{S}_+\cdot\boldsymbol{S}_-|\boldsymbol{k}|^2(1-(\hat{\boldsymbol{k}}\cdot\hat{\boldsymbol{p}})^2)\\ &+2(\hat{\boldsymbol{k}}\cdot\boldsymbol{S}_+)(\hat{\boldsymbol{k}}\cdot\boldsymbol{S}_-)(|\boldsymbol{k}|^2 + (k_0-m_\tau)^2(\hat{\boldsymbol{k}}\cdot\hat{\boldsymbol{p}})^2) + 2k_0^2(\hat{\boldsymbol{p}}\cdot\boldsymbol{S}_+)(\hat{\boldsymbol{p}}\cdot\boldsymbol{S}_-)\\ &-2k_0(k_0-m_\tau)(\hat{\boldsymbol{k}}\cdot\hat{\boldsymbol{p}})((\hat{\boldsymbol{k}}\cdot\boldsymbol{S}_+)(\hat{\boldsymbol{p}}\cdot\boldsymbol{S}_-) + (\hat{\boldsymbol{k}}\cdot\boldsymbol{S}_-)(\hat{\boldsymbol{p}}\cdot\boldsymbol{S}_+))],\end{aligned}$$

$$\mathcal{M}^2_{Re} = 4\frac{e^3}{k_0}|\boldsymbol{k}|[-(m_\tau + (k_0-m_\tau)(\hat{\boldsymbol{k}}\cdot\hat{\boldsymbol{p}})^2)(\boldsymbol{S}_+\times\boldsymbol{S}_-)\cdot\hat{\boldsymbol{k}} + k_0(\hat{\boldsymbol{k}}\cdot\hat{\boldsymbol{p}})(\boldsymbol{S}_+\times\boldsymbol{S}_-)\cdot\hat{\boldsymbol{p}}],$$

$$\mathcal{M}^2_{Im} = 4\frac{e^3}{k_0}|\boldsymbol{k}|[-(m_\tau + (k_0-m_\tau)(\hat{\boldsymbol{k}}\cdot\hat{\boldsymbol{p}})^2)(\boldsymbol{S}_+-\boldsymbol{S}_-)\cdot\hat{\boldsymbol{k}} + k_0(\hat{\boldsymbol{k}}\cdot\hat{\boldsymbol{p}})(\boldsymbol{S}_+-\boldsymbol{S}_-)\cdot\hat{\boldsymbol{p}}],$$

Спиновые члены в матрице плотности можно измерить благодаря корреляции спина с импульсом в распадах-поляриметрах: $\tau \to \pi\nu, \rho\nu, e\bar{\nu}\nu, \mu\bar{\nu}\nu$

Выделение вкладов слагаемых с Re(d) и Im(d)?

Метод оптимальных наблюдаемых

(D. Atwood and A. Soni, Phys. Rev. D 45 (1992) 2405)

Пусть дифференциальное сечение процесса = $\Sigma(\phi)d\phi$ и $\Sigma = \Sigma_0 + \lambda\Sigma_1$.

где ϕ - импульсные и спиновые переменные, λ - малая добавка от ЭДМ и т.п.

Нужно найти весовую функцию f, максимизирующую статистическую значимость Lambda-вклада в дифференциальное сечение после суммирования по событиям :

$$f^{(1)}(\lambda) = \int f(\phi)\Sigma(\phi)d\phi \quad \Leftrightarrow \quad f^{(1)}(0) = \int f(\phi)\Sigma_0(\phi)d\phi.$$

Максимальная стат. значимость $\delta_f = f^{(1)}(\lambda) - f^{(1)}(0) = \lambda \int f(\phi)\Sigma_1(\phi)d\phi$

достигается при $f = f_{opt} = \dfrac{\Sigma_1}{\Sigma_0}$.

Использовался в анализе ЭДМ τ на BELLE (близок к Maximum likelihood?).

Поляризация τ, рожденных 100% поляризованными e

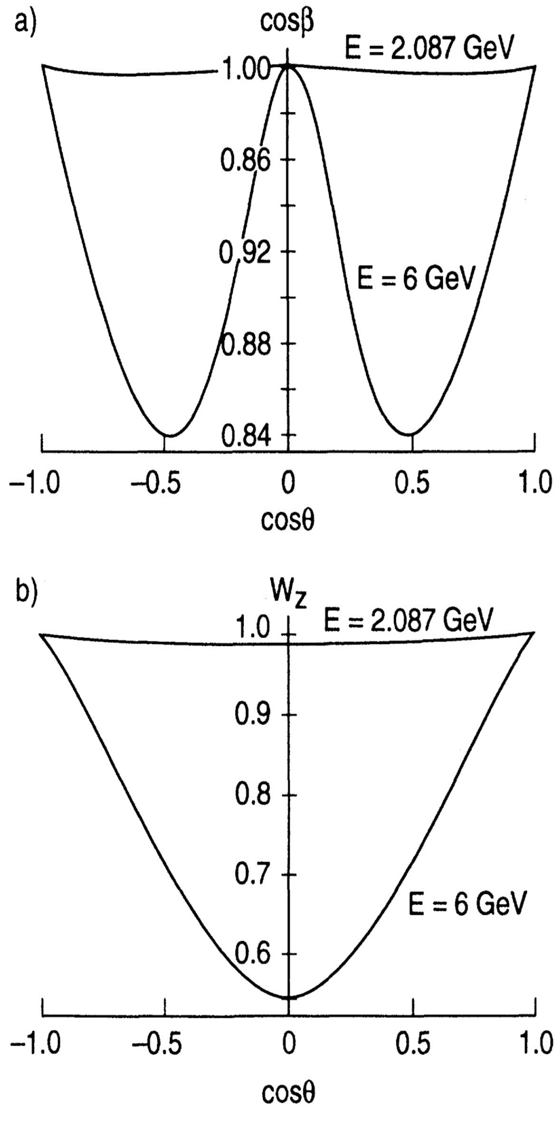


FIG. 3. (a) $\cos\beta$ versus $\cos\theta$; (b) w_Z is the component of τ polarization vector along the electron beam direction.

ЭДМ τ в e+e-→τ+ τ- с продольной поляризацией e-

$$e^-(p_-) + e^+(p_+) \to \tau^-(k_-) + \tau^+(k_+),$$

$$\tau^-(k_-) \to A(q_A) + \nu_\tau,\ \tau^+(k_+) \to \overline{B}(q_{\overline{B}}) + \overline{\nu}_\tau,$$

$$O_1 \equiv \frac{1}{2}\left[\hat{\mathbf{p}} \cdot (\mathbf{q}_{\overline{B}} \times \mathbf{q}_A) + \hat{\mathbf{p}} \cdot (\mathbf{q}_{\overline{A}} \times \mathbf{q}_B)\right]$$

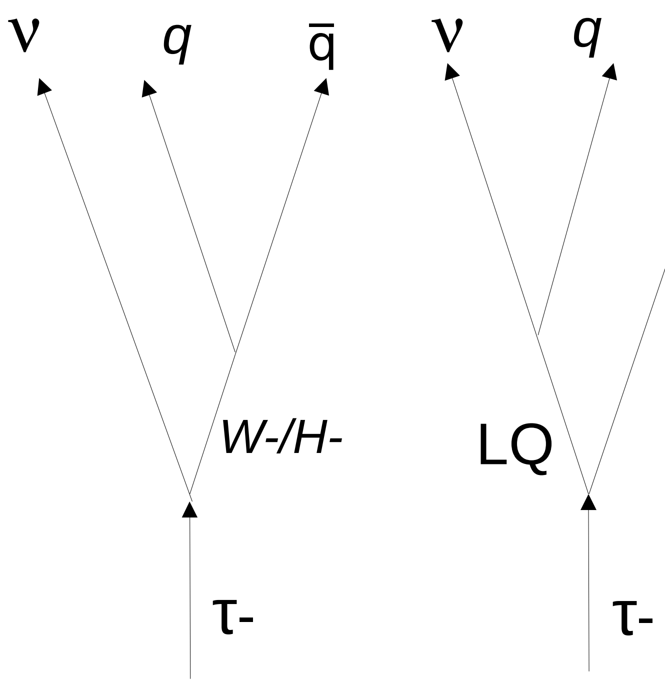
$$O_2 \equiv \frac{1}{2}\left[\hat{\mathbf{p}} \cdot (\mathbf{q}_A + \mathbf{q}_{\overline{B}}) + \hat{\mathbf{p}} \cdot (\mathbf{q}_{\overline{A}} + \mathbf{q}_B)\right],$$

Согласно Phys.Rev.51(1995)5996 CP-нечетные корреляторы O1, O2, измеряющие ЭДМ τ в процессе e+e-→τ+ τ- «значительно усиливаются» при продольной поляризации e+-.

Анализ делался для каналов-поляриметров $\tau \to \nu\pi, \nu\rho$

При использовании вместо корреляторов O1, O2 «оптимальных наблюдаемых» или макс.лайклихуд фита размер усиления будет численно иным, но «значительное усиление» в точности измерения, вероятно, сохранится.
Поскольку относительный вклад ЭДМ в амплитуду рождения растет с энергией, конкуренция Супер-c-тау с Супер-B здесь проблематична.

CP-нарушение в τ-распадах



$$A_f = |a_1| e^{i(\delta_1+\phi_1)} + |a_2| e^{i(\delta_2+\phi_2)};$$

$$\overline{A}_{\overline{f}} = |a_1| e^{i(\delta_1-\phi_1)} + |a_2| e^{i(\delta_2-\phi_2)}.$$

$$\mathcal{A}_f = -\frac{2|a_1 a_2| \sin(\delta_2-\delta_1)\sin(\phi_2-\phi_1)}{|a_1|^2+|a_2|^2+2|a_1 a_2|\cos(\delta_2-\delta_1)\cos(\phi_2-\phi_1)}.$$

Для интересующего нас, связанного с τ-поляризацией, CP-нарушения в амплитуде распада τ необходимо иметь в конечном состоянии не менее двух адронов (с импульсами q_1, q_2), чтобы получить вектор, сворачиваемый в дифференциальном сечении со спином τ: $\vec{S}_\tau[\vec{q}_1 x \vec{q}_2]$

CP-нарушение будет проявляться в отличии коэффициента перед $\vec{S}_\tau[\vec{q}_1 x \vec{q}_2]$ членом в дифференциальном сечении τ+ и τ-

Заключение

Представляется, что количество задач c-τ-фабрики, где продольная поляризация e- пучка позволит сделать что-то качественно новое или даст большое улучшение точности не велико. Наиболее интересной из них кажется поиск CP-нарушения в распадах поляризованных τ и Lambda_c. Другое такое измерение - спиновая асимметрия в сечении рождения e+e- → J/ψ, если систематические ошибки измерения малой асимметрии позволят получить интересную точность.

@¶@§ $\bar{c}$ $\bar{c}$ $\sigma_{\tau\tau}$ ν $\bar{q}$ $\bar{q}$ $\bar{c}$