

15

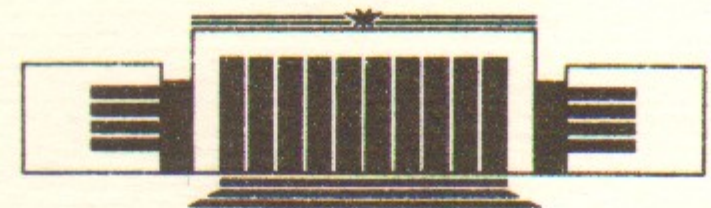
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР



П.В. Воробьев, Г.Я. Кезерашвили, А.П. Лысенко,  
А.А. Полунин, Ю.М. Шатунов

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ  
ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКОВ ВЭПП-2М  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПИРАЛЬНОГО ОНДУЛЯТОРА

ПРЕПРИНТ 86-140



НОВОСИБИРСК

1986



# ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКОВ ВЭП-2М

С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПИРАЛЬНОГО ОНДУЛЯТОРА

П.В.Воробьев, Г.Я.Кезерашвили, А.П.Лысенко,

А.А.Полунин, Ю.М.Шатунов

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

## А Н Н О Т А Ц И Я

Описываются эксперименты по измерению поляризации встречных электрон-позитронных пучков по обратному комптоновскому рассеянию фотонов из спирального ондулятора, установленного в промежутке встречи накопителя.

Новая методика позволяет в условиях накопителя ВЭП-2М обеспечить за время измерения 45 сек. 10% точность измерения степени поляризации и определить ее направление.

Для измерения поляризации электрон-позитронных встречных пучков по комптоновскому рассеянию в работе /1/ было предложено использовать в качестве источников интенсивных потоков циркулярно поляризованных фотонов спиральный ондулятор, установленный в промежутке встречи накопителя. При этом фотоны, излучаемые в ондуляторе электронами, используются для измерения поляризации позитронного пучка, и наоборот.

Коротко напомним свойства ондуляторного излучения. Его средняя мощность в дипольном приближении описывается выражением:

$$W = \frac{2}{3} r_e^2 H_{\perp}^2 \gamma^2 N_e f_0 \ell,$$

где  $H_{\perp}$  - амплитудное значение напряженности магнитного поля на оси ондулятора,  $N_e$  - число электронов (позитронов) циркулирующих в накопителе,  $f_0$  - частота обращения частиц,  $\ell$  - длина ондулятора. Энергия фотона в ондуляторном излучении связана с углом излучения  $n = \gamma \theta$  формулой:

$$\omega_1 = \frac{2\gamma^2 \omega_0}{1 + K^2 + n^2}, \text{ где } \omega_0 = \frac{2\pi c}{\lambda_0} = \frac{c}{\lambda_0}, K = \frac{e H_{\perp} \lambda_0}{m_0 c^2} -$$

фактор ондуляторности,  $\lambda_0$  - длина периода магнитного поля в ондуляторе.

Степень циркулярной поляризации фотонов  $\xi_2$  близка к 100% при  $\omega_1 = \omega_{1\max} = 2\gamma^2 \omega_0 / (1 + K^2)$ . При использовании ондулятора в качестве источника фотонов число комптоновских рассеяний в единицу времени  $\dot{N}$  можно записать в виде

$$\dot{N} = \frac{N_e}{S} \int_0^{\infty} \sigma \left( \frac{dN^+}{d\omega} + \frac{dN^-}{d\omega} \right) d\omega,$$

где  $dN^{\pm}/d\omega$  - спектральная плотность фотонов с положительной и отрицательной спиральностью,  $S$  - эффективная площадь взаимодействия.

Сечение комптоновского рассеяния фотона  $\omega_1$  с циркулярной поляризацией  $\xi_2$  при лобовом столкновении с ультрареля-



тивистским электроном (позитроном), обладающим поперечной поляризацией  $\zeta_1$  дается выражение: /2/.

$$d\sigma = d\sigma_0 + \zeta_2 \zeta_1 d\sigma_1,$$

$$d\sigma_0 = \frac{4r_e^2 [2\chi^2(1+n^2) + (1+n^2+2\chi)(1+n^4)] ndnd\varphi}{(1+n^2)^2 (1+n^2+2\chi)^3},$$

$$d\sigma_1 = \frac{8r_e^2 \chi n^2 dn \sin\varphi d\varphi}{(1+n^2)(1+n^2+2\chi)^3},$$

где  $\chi = 2\gamma\hbar\omega_1/m_0c^2$  - энергия фотона в системе покоя электрона, а  $\theta$  и  $\varphi$  полярный и азимутальный углы вылета вторичных  $\gamma$  - квантов в лабораторной системе.

Наличие поляризации  $\zeta_1$  приводит к несимметрии вылета вторичных  $\gamma$  - квантов по углу  $\varphi$ , которая характеризуется параметром  $\mathcal{P} = d\sigma_1/d\sigma_0$ . Максимальное значение  $\mathcal{P} = 0.3$  достигается  $\chi \approx 1$  и  $n \approx 1$ .

Для накопителя ВЭП-2М ( $E = 700$  МэВ) максимум асимметрии может быть получен при  $\hbar\omega_1 \approx 200$  эВ, что соответствует шагу ондулятора  $\lambda_0 = 2.5$  см. Энергия вторичных  $\gamma$  - квантов, определяемая формулой  $\omega_2 = 4\gamma^2\omega_1/(1+n^2+2\chi)$  может достигать при этих условиях значения  $\hbar\omega_{2max} \approx 400$  МэВ.

Интегральную асимметрию при степени поперечной поляризации электронного (позитронного) пучка  $\zeta_1$  можно вычислить следующим образом

$$\mathcal{P} = \zeta_1 \int_0^\infty \left( \frac{dN^+}{d\omega} - \frac{dN^-}{d\omega} \right) d\sigma_1 d\omega / \int_0^\infty \left( \frac{dN^+}{d\omega} + \frac{dN^-}{d\omega} \right) d\sigma_0 d\omega$$

Для выбора оптимальных параметров ондулятора для накопителя ВЭП-2М был произведен расчет (с усреднением по параметрам  $e^+e^-$  пучков и различным участкам энергетического спектра вторичных  $\gamma$  - квантов) величины  $\Delta = \langle P\sqrt{N} \rangle$ , характеризующей чувствительность поляриметра. Из результатов расчета, представленных на рис.1, видно, что область значений  $0.5 < K < 1$  ( $2 \text{ кГц} < H_1 < 4 \text{ кГц}$ ) является оптимальной. При токах пучков  $I^- \times I^+ = 6 \times 6 \text{ мА}^2$  ( $N^\pm = 2.5 \cdot 10^9$ ) в области энергетического спектра  $0.5 \omega_{2max} < \omega_2 < \omega_{2max} = 350$  МэВ  $\langle P \rangle = \pm 12\%$  и  $\langle N \rangle \approx 1.0$  кГц.

Фоновыми процессами для комптоновского рассеяния является тормозное излучение на атомах остаточного газа и однократное тормозное излучение при электрон-позитронных взаимодействиях /3/.

Простая оценка показывает, что допустимый уровень фона от первого процесса достигается при вакууме  $p \approx 1 \cdot 10^{-10}$  Тор. Фон от однократного тормозного излучения можно подавить электростатическим разведением электронов и позитронов в месте встречи по вертикали на величину нескольких размеров пучка. При этом светимость встречных  $e^+e^-$  пучков падает в  $10^2 + 10^3$  раз, а изменение электрон-фотонной светимости незначительно, ввиду того, что фотонное "пятно" в месте встречи вследствие расходимости ондуляторного излучения много больше вертикального размера электронного пучка  $\sigma_{z_0} = 5 \cdot 10^{-4}$  см.

В работе /3/ были приведены результаты эксперимента с "теплым" спиральным ондулятором ( $H_1 = 1,3$  кГц), установленным на прямолинейный промежуток накопителя ВЭП-2М в 1980 году. С помощью этого ондулятора наблюдался эффект обратного комптоновского рассеяния ондуляторных фотонов на электронах (и позитронах) встречного пучка. В 1981-1983 гг. на этом ондуляторе проводились эксперименты по использованию ондуляторного излучения для рентгеновской голографии /4/, а также по изучению спектральных и поляризационных характеристик излучения /5/.

В мае 1984 года на один из прямолинейных промежутков накопителя ВЭП-2М был установлен сверхпроводящий ондулятор с максимальным полем на оси 4.7 кГц, с периодом магнитного поля  $\lambda_0 = 2.4$  см. Конструкция и параметры магнитной системы ондулятора оптимизированные для измерения радиационной поляризации встречных пучков описаны в работе /6/.

При работе ондулятора, установленного на прямолинейном промежутке, допустимы лишь локальные искажения равновесной орбиты, поэтому конструктивно магнит ондулятора выполнен в виде двух половин, расположенных симметрично относительно места встречи, причем  $\int H_z dl = 0$  на длине ондулятора, а  $\int H_x dl = 0$  на длине каждой его половины, тем самым обеспечивается "самокомпенсация" краевых магнитных полей ондулятора. На рис.2 приведена траектория движения частиц в магнитном поле ондулятора.



Включение ондулятора показало практическое отсутствие искажений равновесной орбиты, измеренный сдвиг частот бетатронных колебаний равен  $\Delta\nu_{x,z} \approx 10^{-3}$ . На рис.3 показана схема нашего эксперимента. В промежутке встречи установлены так же витки с продольным высокочастотным магнитным полем - "флиппер" - высокочастотное устройство позволяющее переворачивать спин частиц без нарушения их степени поляризации /7/. По обе стороны от места встречи на расстоянии 6 метров установлены два детектора состоящие из: дистанционно управляемых (точность перемещения  $10^{-2}$  см.) пластических сцинтиляционных счетчиков размером  $1 \times 0,5 \times 4$  см<sup>3</sup> для измерения асимметрии "верх-низ", индукционных пропорциональных камер измеряющих координатные распределения гамма квантов (разрешение  $\approx 200 \mu\text{км}$ ) и калориметра на основе  $\text{NaI(Tl)}$  - 20 радиационных длин. Перед сцинтиляционными счетчиками установлен конвертор ( $2X_0$ -свинца), что обеспечивает эффективность регистрации системы 35%.

На рис.4 показаны измеренные координатные распределения гамма-квантового пучка получаемые с пропорциональных камер. В верхней части рис.4 (А) показаны распределения фоновых квантов тормозного излучения на атомах остаточного газа при включенной системе электростатического разведения электрон-позитронных пучков в месте встречи по вертикали ( $\Delta Z \approx 2\sigma_z = 10^{-3}$  см) и выключенном ондуляторе. Скорости счета фоновых фотонов при токах  $I^+ \times I^- = 5 \times 5 \text{ мА}^2$  составляет 400 Гц. На рис.4 (Б) показаны координатные распределения при включенном ондуляторе ( $H_1 = 3.75 \text{ кГс}$ ,  $K = 0.84$ ,  $\hbar\omega_1 = 100 \text{ эВ}$ ,  $\hbar\omega_2 = 330 \text{ МэВ}$ ), включенной системе электростатического разведения при тех же токах встречных пучков. Видно, что в горизонтальном распределении появились искажения в соответствии с локальной траекторией частиц в ондуляторе рис.2 (а). Ясно, что для улучшения отношения эффект/фон при комптоновском рассеянии следует вырезать аппаратно только центральную часть горизонтального распределения, это даст улучшение фоновых условий на  $\approx 40\%$ . Уменьшение размеров на полувисоте координатных распределений при включенном ондуляторе связано с появлением комптоновской светимости, а кроме того при факторе ондуляторности 0.84 еще не происходит уширения распределений за счет вклада от углов  $\psi = K/\gamma < 1/\gamma$  при движении частиц в магнитном поле онду-

лятора.

На рис.5 показан экспериментальный энергетический спектр комптоновских гамма квантов. Измеренное отношение эффект/фон составляет 1,5. Скорость счета комптоновских фотонов равна  $N_{\text{эксп}} = 600$  Гц. эта величина несколько ниже расчетной  $N_{\text{расч}} = 750$  Гц. К сожалению, фон от тормозного излучения на атомах остаточного газа, несмотря на все предпринятые усилия попрежнему остался большим /3, 4/. Область спектра в энергетическом диапазоне  $0.25 < \omega_2/E < 0.63$ . Рис 5 выделялась аппаратно при измерениях поляризации.

Измерение степени поляризации встречных пучков проводилось при энергии 650 МэВ, где время радиационной поляризации  $\tau_p = 1$  час. По истечении времени  $\tau = 2\tau_p$ , когда степень поляризации достигала  $\zeta_{\text{прис}} = 0.8$  (при токах встречных пучков  $I^+ = I^- = 5 \times 5 \text{ мА}^2$ ) включалась система электростатического разведения и магнитное поле ондулятора.

Измеряемой величиной является асимметрия

$$P_{\text{эксп}} = \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2}, \text{ где } N_1 \text{ и } N_2 \text{ скорость}$$

счета верхнего и нижнего сцинтиляционных счетчиков в выбранном энергетическом диапазоне. Время набора статистики в точке составляет 45 сек. По истечению 300 + 400 сек измерения асимметрии на поляризованных пучках, включался деполяризатор - резонансная деполяризация Рис.6. Измеренные значения величин скачков в асимметрии составляют  $\Delta P_{\text{эксп}}^- = (7.3 \pm 0.8)\%$ ,  $\Delta P_{\text{эксп}}^+ = (7.1 \pm 0.8)\%$  расчетное значение  $\Delta P_{\text{расч}} = (10.5 \pm 1.0)\%$ . Измеренная величина степени поляризации находится по формуле:

$$\zeta_{\perp \text{эксп}} = \zeta_0 \frac{\Delta P_{\text{эксп}}}{\Delta P_{\text{расч}}} \frac{N_{\text{эфф}} + N_{\text{фон}}}{N_{\text{эфф}}}$$

и составляют:

$$\zeta_{\perp \text{эксп}}^- \approx \zeta_{\perp \text{эксп}}^+ = 0.83 \pm 0.07 \pm 0.08$$

На рис.7 показано измеренное поведение асимметрии А в другом цикле измерений, когда в точке а, в и с производился адиабатический переворот спинов частиц осуществляемый с помощью "флиппера" /7/. В точке "а" произошел переворот спинов частиц



на  $180^\circ$  относительно "естественного" направления, в точках "в" восстановление поляризации (по значению и направлению), "с" — следующий поворот. В точке "d" — деполяризация пучков. Рис 7 демонстрирует хорошую чувствительность ондуляторного поляриметра к инверсии направления поляризации пучка электронов (позитронов).

В целом, из проведенных экспериментов, можно сделать заключение — методика измерения поляризации встречных пучков с помощью спирального ондулятора позволяет в условиях накопителя ВЭПП-2М обеспечить за время измерения 45 сек 10% точность измерения степени поляризации и определить ее направление.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е.Л.Салдин, Ю.М.Шатунов. Труды XV Всесоюзной конференции по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978, т.1, с.124.
2. В.Н.Байер, В.А.Хозе. ЯФ, 9, 409 (1969).
3. Г.Я.Кезерашвили, А.П.Лыленко, В.М.Хорев, Г.М.Черных, Ю.М.Шатунов. Труды Всесоюзного совещания по использованию синхронного излучения СИ-82, Новосибирск, 1982, с.109
4. E.S. Gluskin, P.P. Ilynsky, G. Ya. Kezerashvili, G.M. Kulipanov, V.F. Pindyurin, A.M. Skrinksky and A.S. Sokolov. Preprint INP 83-145, Novosibirsk, 1983. Also in Springer Series in Optical Sciences. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo. Ed. by T. Tamir, vol 43, p.336.
5. E.S. Gluskin, S.V. Gaponov, S.A. Gusev, P. Dhez, P.P. Ilynsky, Yu. Ya. Platonov, N.N. Salashchenko, Yu.M. Shatunov. Preprint INP, 83-163, Novosibirsk, 1984.
6. В.В.Анашин, Г.Я.Кезерашвили, А.П.Лысенко, Е.А.Переведенцев, Ю.М.Шатунов. Препринт ИЯФ 84-III, Новосибирск, 1984. Труды II-го Международного семинара по спиновым явлениям в физике высоких энергий. с.159, Серпухов, 1985.
7. A.A. Polunin, Yu. M. Shatunov. Preprint INP 82-16, Novosibirsk, 1982.



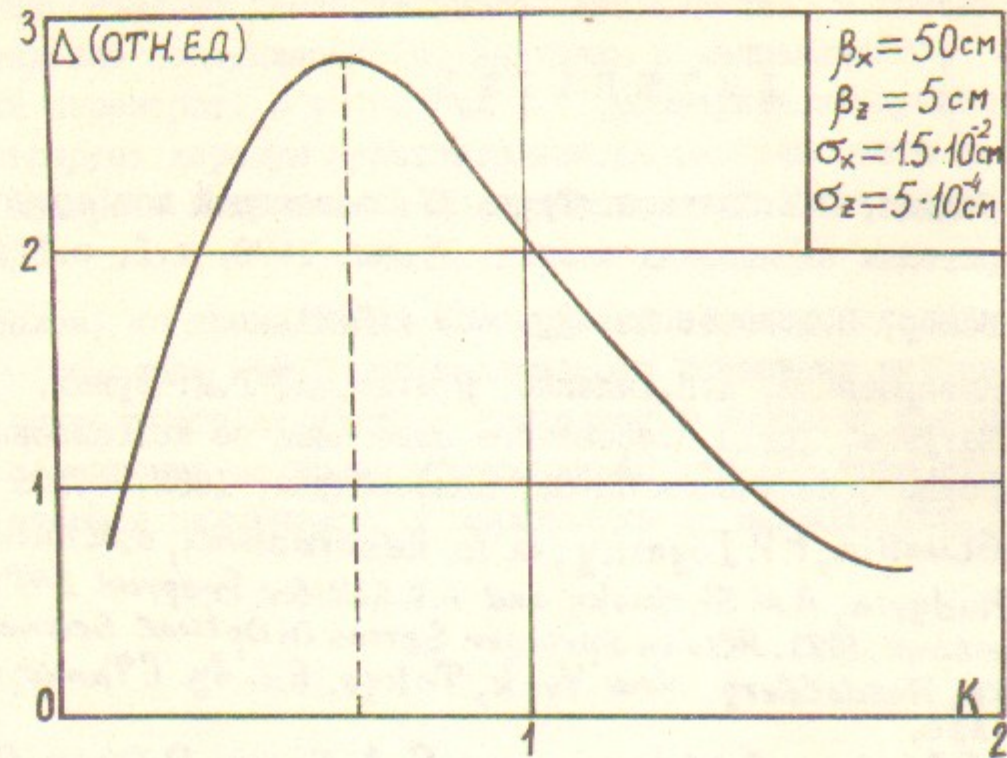


Рис.1. Зависимость чувствительности поляриметра  $\Delta$  от фактора ондулярности  $K$ .

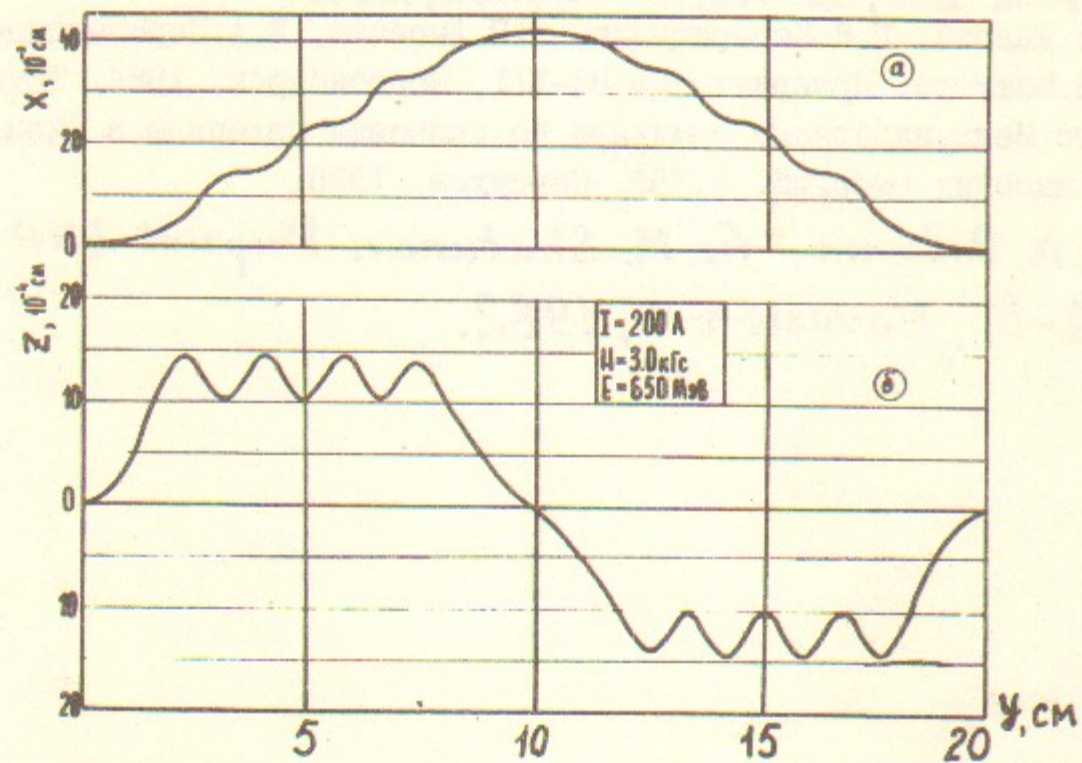


Рис.2. Траектория движения частиц в магнитном поле ондулятора.

а - траектория по  $X$  - координате  
 б - траектория по  $Z$  - координате.

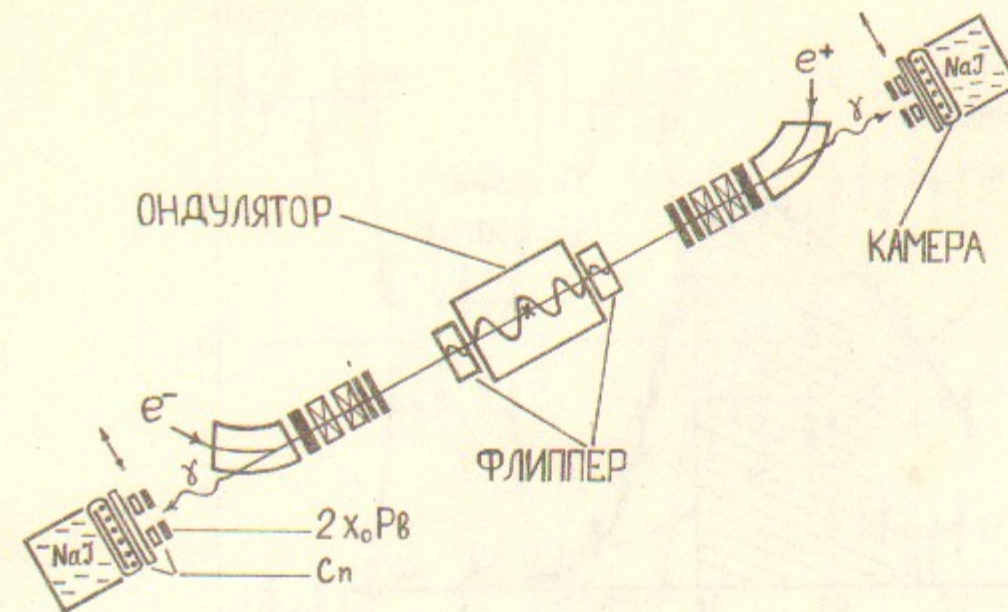


Рис.3. Схема эксперимента.

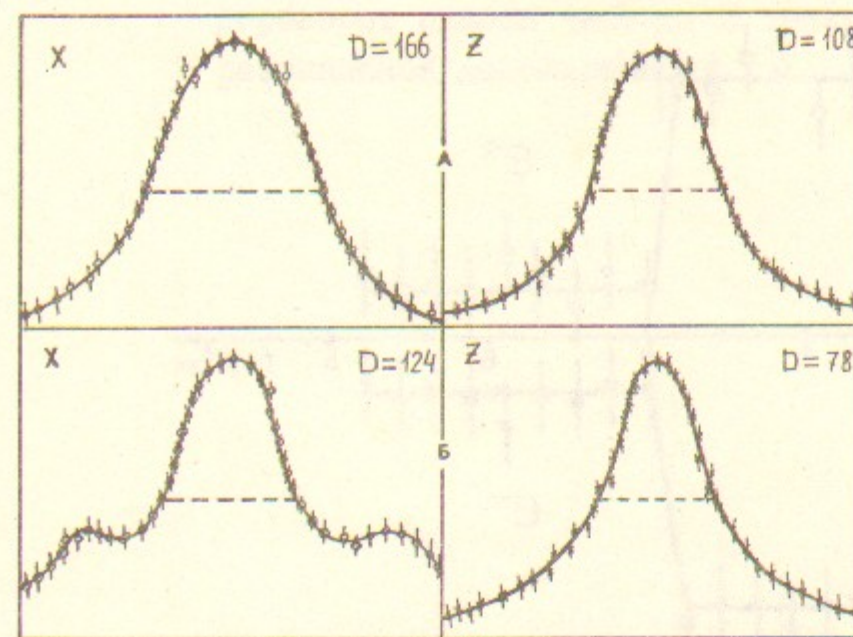


Рис.4. Координатные распределения гамма квантов.

А-распределения фоновых гамма квантов тормозного излучения на атомах остаточного газа, ондулятор выключен.  
 В-распределения гамма квантов при включенном ондуляторе.



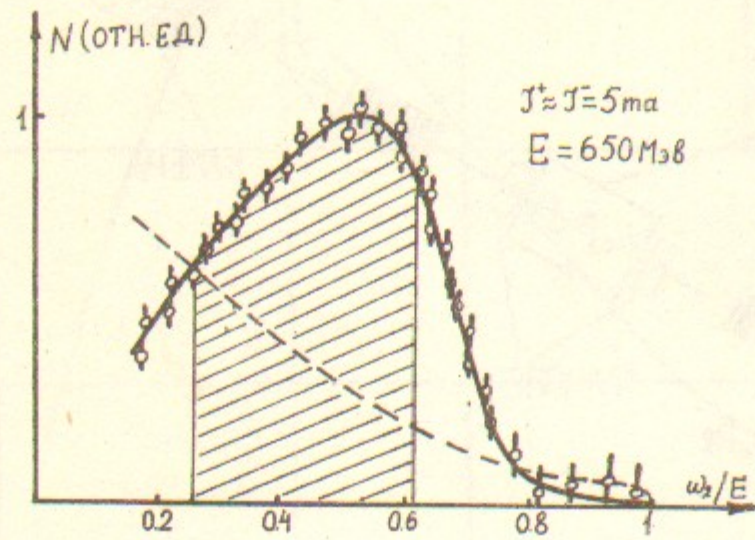


Рис.5. Экспериментальный энергетический спектр комptonовских гамма квантов.

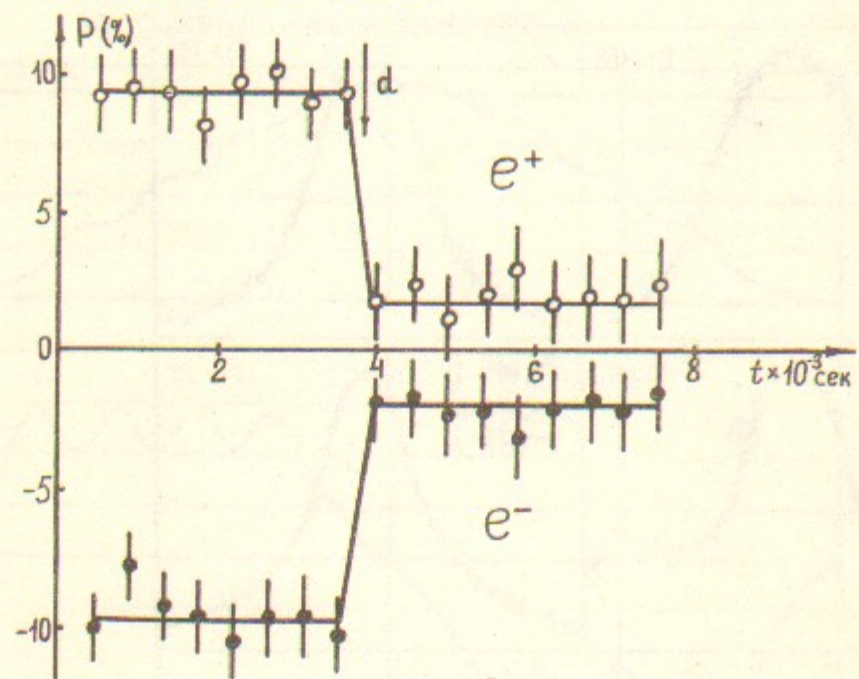


Рис.6. Резонансная деполаризация электрон-позитронных пучков.

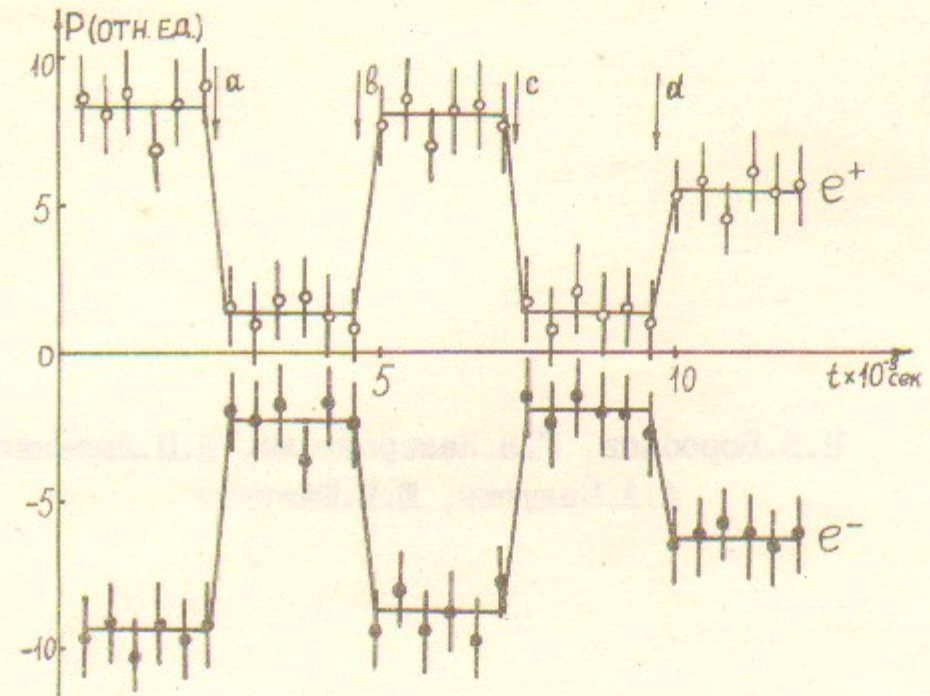


Рис.7. Зависимость асимметрии от времени.

В точках а, в и с производился адиабатический переворот спинов частиц. В точке **d** - произошла резонансная деполаризация.



П.В.Воробьев, Г.Я.Кезерашвили, А.П.Лысенко,  
А.А.Полунин, Ю.М.Шатунов

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКОВ ВЭП-2М  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПИРАЛЬНОГО ОНДУЛЯТОРА

Препринт  
№ 86- I40

Работа поступила - 29 августа 1986 г.

---

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов  
Подписано к печати 31.X.86 г. МН II845  
Формат бумаги 60x90 I/16 Усл.0,8 печ.л., 0,7 учетно-изд.л.  
Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ № I40.

---

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90