

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТОКСА И СТЕПЕНИ ПОЛЯРИЗАЦИИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Б.А. Гришанин, А.В. Титов, К.Н. Шорин, А.С. Яров

УДК 621.384.63

В пределах основного конуса синхротронного излучения (СИ) впервые измерены параметры Стокса, адекватно описывающие поляризационную структуру СИ. Получены соответствующие угловые распределения.

Экспериментальные исследования поляризационных свойств синхротронного излучения проводились неоднократно. В некоторых работах (/1,2/ и ряде других) измерения выполнялись только с использованием линейных поляризаторов, в других /3,4/ были использованы и фазовращающие устройства, при этом была получена определенная объективная информация о поляризации СИ. Тем не менее ни одно из этих исследований нельзя считать исчерпывающим по принципиальным соображениям: они не дали возможности измерить наиболее фундаментальную характеристику — степень поляризации СИ.

Полную информацию о поляризации СИ можно получить путем измерения параметров Стокса s_0, s_1, s_2, s_3 /5/, имеющих размерность интенсивности I излучения, или трех безразмерных параметров Стокса $\xi_i = s_i/s_0$. Введем для описания поля СИ, полностью поляризованного в рамках теоретической модели круговой орбиты электронов /6,7/, комплексный вектор Джонса в виде

$$\vec{E} = \left\{ \beta \sqrt{\epsilon} K_{2/3}(z), i\Psi K_{1/3}(z) \right\}, \quad (1)$$

где Ψ — угол направления излучения, отсчитываемый от плоскости орбиты, $K_p(x)$ — функции Макдональда соответствующего дробного порядка, а отношение полной энергии к энергии покоя электронов γ и номер гармоники излучения ν учтены соотношениями $\beta = \sqrt{1 - \gamma^{-2}}$, $\epsilon = \gamma^{-2} + \Psi^2$, $z = \nu \epsilon^{3/2}$.

Параметры Стокса ξ_i вычислим из комплексной функции

$$\chi = i\Psi K_{1/3}(z) / \beta \sqrt{\epsilon} K_{2/3}(z) \quad (2)$$

с помощью соотношений

$$\xi_1 = \cos 2\delta \cos 2\varphi, \quad (3a)$$

$$\xi_2 = \cos 2\delta \sin 2\varphi, \quad (3б)$$

$$\xi_3 = \sin 2\delta, \quad (3в)$$

($\xi^2 = 1$), где δ — угол эллиптичности и φ — азимут эллипса (в данном случае — угол наклона его большой оси к плоскости орбиты) определяются уравнениями

$$\operatorname{tg} 2\varphi = 2\operatorname{Re} \chi / (1 - |\chi|^2), \quad (4)$$

$$\sin 2\delta = 2\operatorname{Im} \chi / (1 - |\chi|^2) = \frac{2\psi K_{1/3}(z) / \beta \sqrt{\epsilon} K_{2/3}(z)}{1 - [\psi K_{1/3}(z) / \beta \sqrt{\epsilon} K_{2/3}(z)]^2}. \quad (5)$$

Экспериментально значения параметров Стокса ξ_1 , ξ_2 , описывающих линейную поляризацию СИ, могут быть получены путем измерения интенсивностей I_a излучения, прошедшего через линейные поляризаторы с различной ориентацией (соответствующей значению индекса a)

$$\xi_1 = (I_0 - I_\pi) / (I_0 + I_\pi),$$

$$\xi_2 = (I_{\pi/4} - I_{-\pi/4}) / (I_{\pi/4} + I_{-\pi/4}).$$

Существенной деталью описываемой методики (в отличие от /1,2/) является принципиальная независимость начального угла ($a = 0$) от направления магнитного поля; точность эксперимента зависит только от точности взаимной ориентации поляризаторов.

Третий параметр Стокса ξ_3 получается в результате измерения интенсивностей I_R, I_L циркулярной поляризации (соответственно по правому и левому кругу), что осуществляется с помощью комбинации поляроида с четвертьволновой пластинкой /4/:

$$\xi_3 = (I_R - I_L) / (I_R + I_L).$$

При этом, как легко показать,

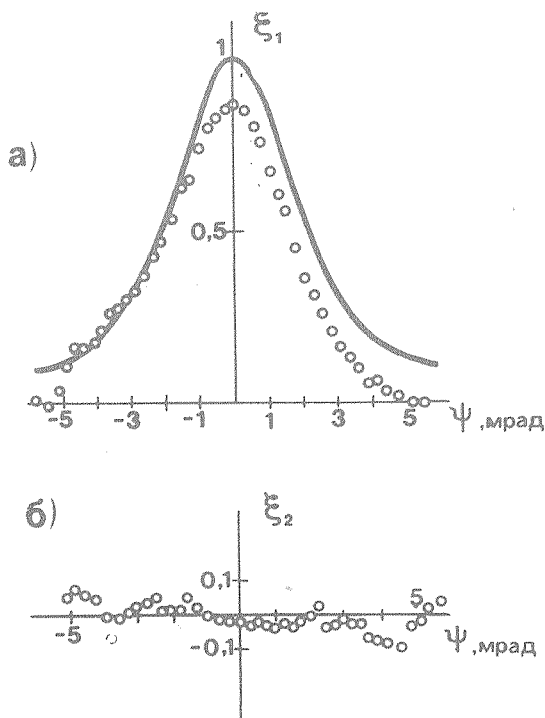
$$I_{R,L} = (1/2) (I_0 + I_\pi) \pm \operatorname{sign} \Psi \sqrt{I_0 I_\pi}$$

где знак "+" соответствует правой поляризации.

Степень поляризации СИ для любого направления излучения легко вычисляется с помощью соотношения

$$P^2 = \sum_1^3 \xi_1^2. \quad (6)$$

Измерение параметров Стокса было проведено в синхротроне ФИАН на 600 МэВ. Оптическая схема была построена согласно описанной методике (см. также /4/). Соответственно трансформировались комбинации оптических элементов. Угол $\alpha = 0$ был приблизительно выставлен на среднюю плоскость синхротрона исключительно из соображений удобства. Излучение с длиной волны 436 нм регистрировалось скоростной кинокамерой, что позволяло провести измерения при любой энергии электронов в диапазоне 200 — 600 МэВ с хорошей моноэнергетичностью. При этом для измерений бы-



Р и с. 1. Угловое распределение значений параметров Стокса линейной поляризации СИ

ла выбрана энергия 500 МэВ, при которой минимальны вертикальные бетатронные колебания, являющиеся основным деполяризирующим фактором [4].

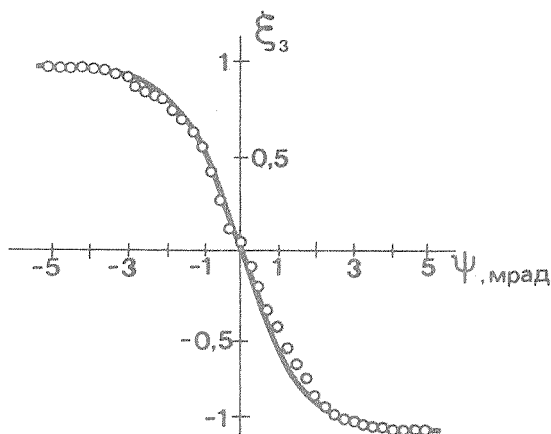


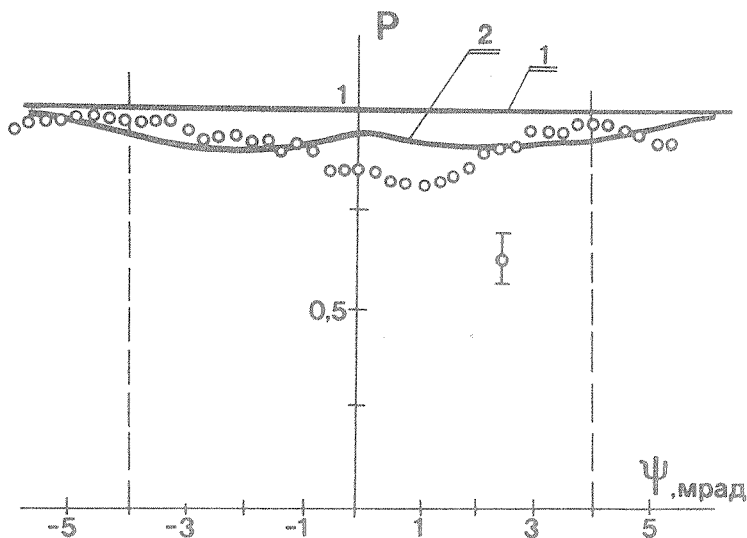
Рис. 2. Угловое распределение значений параметра Стокса круговой поляризации СИ

На рис. 1 и 2 представлены результаты измерения угловых распределений параметров Стокса СИ. Точки дают экспериментальные значения приведенных параметров Стокса ξ_i ; теоретические зависимости (сплошные линии) построены по формулам (1) – (5). Во всех случаях можно констатировать хорошее совпадение эксперимента с теорией. Из приведенных результатов следуют все основные наблюдаемые особенности поляризации СИ: при $\Psi = 0$ эллипс почти вырождается в прямую ($\xi_1 \cong 1$, $\xi_2 \cong \xi_3 \cong 0$), при достаточном отклонении от синхротронной плоскости ($|\Psi| > 5$ мрад) излучение становится практически циркулярно поляризованным по левому или правому кругу ($\xi_1 \cong \xi_2 \cong 0$, $\xi_3 \cong \pm 1$).

Измерение параметров Стокса дало возможность впервые получить экспериментальное значение степени поляризации СИ и ее зависимость от угла Ψ на основе соотношения (6). На рис. 3 точками нанесены экспериментальные значения P , при этом пунктиром выделена область, где гарантирована указанная там же точность измерения. Прямая 1 ($P \cong 1$) представляет собой зависимость $P(\Psi)$, предсказываемую теорией для случая однородного поля. Кривая 2 рассчитана с учетом деполяризирующего влияния бетатронных колебаний по формуле, полученной усреднением по большому числу оборотов:

$$P = \frac{\sqrt{\beta^2 \epsilon K_{2/3}^2 + (a_\rho^2 - a_z^2 - \psi^2) K_{1/3}^2 + 4\beta^2 \psi^2 K_{2/3} K_{1/3}^2}}{\beta^2 \epsilon K_{2/3}^2 + (a_\rho^2 + a_z^2 + \psi^2) K_{1/3}^2} \quad (7)$$

где a_ρ и a_z — безразмерные среднеквадратичные амплитуды горизонтальных и вертикальных колебаний, выраженные в долях радиуса орбиты. Важным



Р и с. 3. Угловое распределение степени поляризации СИ

результатом эксперимента является доказательство того факта, что в пределах всего исследованного диапазона углов степень поляризации СИ остается на достаточно высоком уровне. Не вызывает сомнения и то, что ее уменьшение по сравнению с теорией, использующей модель круговой орбиты ($P = 1$), обусловлено в основном бетатронными колебаниями. Тем не менее, существует и дополнительное расхождение с формулой (7), которое, по-видимому, связано со структурой магнитного поля и может стать предметом отдельного исследования. Заметим, что возможность магнитной коррекции поляризационных характеристик уже была проверена в эксперименте [8].

Поступила в редакцию 22 февраля 1984 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф.А. Королев и др., ДАН СССР, **110**, 542 (1956).
2. K. Codling, R.P. Madden, Journ. Appl. Phys., **36**, 380 (1965).
3. P. Joos, Phys. Rev. Lett., **4**, 558 (1960).
4. Ф.А. Королев, О.Ф. Куликов, А.С. Яров, Опт. и спектр., **34**, 316 (1968).
5. М. Борн, Э. Вольф, Основы оптики, "Наука", М., 1970 г.
6. А.А. Соколов, И.М. Тернов, Релятивистский электрон, "Наука", М., 1979 г.
7. В.Н. Байер, В.М. Катков, В.С. Фадин, Излучение релятивистских электронов, Атомиздат, М., 1973 г.
8. К.Н. Шорин, А.С. Яров, В.А. Орлов, Опт. и спектр., **51**, 855 (1981).