

МАГНИТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ МЕЧЕНИЯ γ -КВАНТОВ

А. С. БАГДАСАРЯН, Э. О. БАРСЕГЯН, А. А. ТАШЧЯН, В. Х. ХАЛДЫБАНОВ

Предлагается магнитный спектрометр высокого разрешения, осуществляющий мечение квантов в широком диапазоне энергий, с использованием малого количества детекторов и блоков быстрой электроники.

1. Введение

Метод меченых квантов нашел широкое применение в экспериментах по электромагнитным взаимодействиям [1—3]. Определение энергии кванта тормозного излучения с хорошей точностью осуществляется путем измерения энергии электрона отдачи. Создание высокоразрешающего спектрометра, способного анализировать импульсы электронов отдачи в широком диапазоне, связано с необходимостью использования большого количества детекторов (отличающихся размерами) и громоздкой системы быстрой электроники.

Нахождение подходящего способа, позволяющего использовать малое количество детекторов (с одинаковыми размерами) на разных участках фокусной линии, существенно упростило бы задачу. Однако для этого необходимо, чтобы анализирующее магнитное поле обладало постоянной дисперсией, т. е.

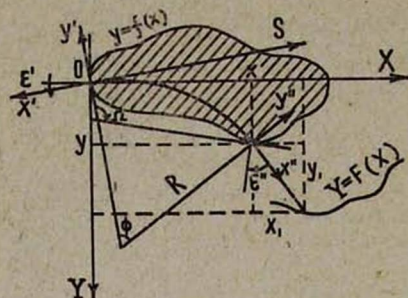
$$dL/dP = \text{const}, \quad (1)$$

где dL/dP — элемент дуги фокусной линии, соответствующий приращению импульса dP . Таким образом, возникает необходимость в решении задачи, заключающейся в нахождении соответствующей конфигурации магнитных полюсов, обеспечивающей выполнение условия постоянства дисперсии вдоль своей фокусной линии.

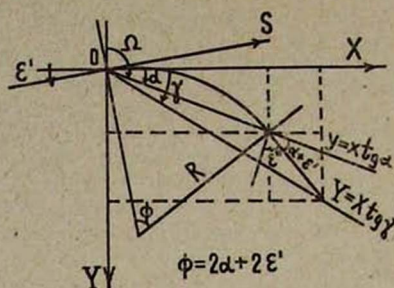
2. Определение формы полюсов магнитного поля

Рассмотрим сначала задачу без учета влияния рассеянных полей на траекторию движения частицы. Характер фокусной линии в этом случае зависит от конфигурации полюсов магнита, угла и места входа пучка в магнитное поле. На рис. 1 представлена декартова система координат OXY , начало которой совпадает с местом входа центрального луча пучка электронов в магнитное поле, x', y' и x'', y'' — системы координат Герцгога [4], а ϵ' и ϵ'' — углы входа и выхода из магнитного поля. X, Y и x, y — соответственно декартовы координаты фокусной линии и кривой, задающей границу полюсов магнита, x_1 и y_1 — проекции l'' на OX и OY .

Для нахождения формы полюсов магнита, обеспечивающей выполнение условия (1), воспользуемся геометрией рис. 1. Легко убедиться, что



a)



6)

Рис. 1. Фокусировка в однородном магнитном поле: а) с произвольной формой полюсов; б) форма полюсов — прямая, выходящая из начала координат.

$$X = X(R) = x + x_1 = 2R \sin \frac{S(R)}{2R} \sin(\varepsilon' + \varepsilon'') + l'' \cos \left(\frac{S(R)}{R} - \varepsilon' \right), \quad (2)$$

$$Y = Y(R) = y + y_1 = 2R \sin \frac{S(R)}{2R} \cos(\varepsilon' + \varepsilon'') + l'' \sin \left(\frac{S(R)}{R} - \varepsilon' \right),$$

где $S(R)$ — длина траектории частицы в магнитном поле, а l' и l'' — соответственно абсциссы источника и его изображения.

Из уравнения Герцога (при $l' \approx \infty$) имеем

$$l'' = -\frac{R \cos \varepsilon'' \cos(\Phi - \varepsilon')}{\sin(\Phi - \varepsilon'' - \varepsilon')}, \quad (3)$$

где

$$\Phi = \frac{S(R)}{R}, \quad (4)$$

$$\varepsilon'' = \Omega - \Phi + \varepsilon'. \quad (5)$$

Нетрудно также получить, что

$$\varepsilon'' = \frac{\pi}{2} - \frac{S(R)}{R} + \operatorname{arctg} \frac{\cos \frac{S(R)}{R} - \frac{S'(R)R - S(R)}{R} \sin \frac{S(R)}{R} - 1}{\sin \frac{S(R)}{R} + \frac{S'(R) - S'(R)}{R} \cos \frac{S(R)}{R}} + \varepsilon'. \quad (6)$$

Выражение (2) представляет собой явный вид уравнения фокусной линии в параметрической форме для заданной функции $S(R)$, описывающей форму полюсов магнита в системе, представленной на рис. 2. Координатами точки $A(S, R)$ в этой системе являются: S — длина дуги OA окружности, проходящей через точку A и являющейся продолжением траектории частицы, R — радиус этой окружности.

Рассматривая вышеуказанные выражения (3), (4) и (6), можно убедиться в том, что $X(R)$ и $Y(R)$ будут линейно зависеть от R только в том случае, если

$$S(R) = \Theta R, \quad (7)$$

где θ — некоторое положительное число.

В системе, изображенной на рис. 2, выражение (7) представляет собой уравнение прямой линии, выходящей из начала координат O . Коэффициент Θ при заданном ε' характеризуется углом наклона α прямой (7) к оси OX , где $\alpha = \frac{\Theta}{2} - \varepsilon'$.

Таким образом, для того, чтобы фокусная линия удовлетворяла условию (1), необходимо, чтобы форма полюсов на выходе частиц из

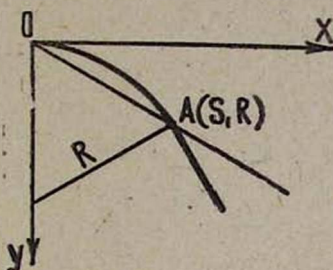


Рис. 2. Система координат, в которой задается искомая форма полюсов.

области магнитного поля представляла собой линию, проходящую через начало координат O .

3. Уравнение фокусной линии

Найденная форма полюсов магнита $y = x \operatorname{tg} \alpha$ позволяет получить простое уравнение для фокусной линии. Подставляя (7) в (2) с учетом (3), (5) и (6) и принимая во внимание справедливые в этом случае соотношения

$$\Phi = 2(\alpha + \varepsilon'), \quad \varepsilon'' = \frac{\pi}{2} - (\alpha + \varepsilon'),$$

получим

$$Y = F(\alpha, \varepsilon') X, \quad (8)$$

где

$$F(\alpha, \varepsilon') = \frac{2 \sin 2\alpha + \sin 2(2\alpha + \varepsilon')}{3 + 2 \cos 2\alpha + \cos 2(2\alpha + \varepsilon')}. \quad (9)$$

Таким образом, задавая α и ε' , по формуле (8) можно определить фокусную прямую, имеющую угол наклона $\gamma = \operatorname{arctg} F(\alpha, \varepsilon')$, вдоль которой дисперсия постоянна. Выражение для дисперсии вдоль фокусной прямой будет иметь вид

$$\frac{dL}{dP} = \frac{\sec \gamma \sin(\alpha + \varepsilon')}{300 H} \left[2 \cos \alpha + \frac{\cos^2(2\alpha + \varepsilon')}{\sin \left(3\alpha + 2\varepsilon' - \frac{\pi}{2} \right)} \right]. \quad (10)$$

4. Область изменения параметров α и ε'

Формально область изменения значений углов α и ε' задается интервалом $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$, однако условие действительной фокусировки вне магнитного поля и геометрия границы выхода накладывают определенное ограничение на область изменения значений углов α и ε' . Требование действительной фокусировки вне магнитного поля приводит к условию

$$2\alpha + \varepsilon' < \frac{\pi}{2}. \quad (11)$$

Из рис. 1 видно, что помимо условия (11) должно выполняться также условие

$$\alpha > -\varepsilon', \quad (12)$$

так как в противном случае частицы не попадут в магнитное поле. Указанная допустимая область изменения α и ε' графически представлена на рис. 3.

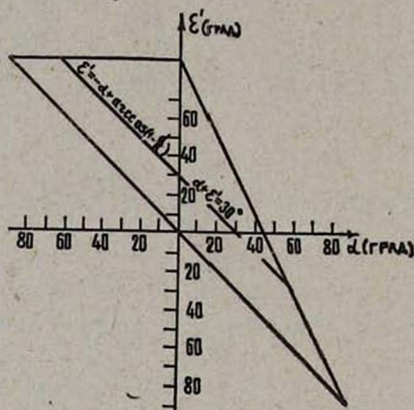


Рис. 3. Допустимая область изменения углов α и ε' .

5. Выбор параметров магнитного поля

Реальная форма полюсов магнита, удовлетворяющая условию (1), приведена на рис. 4. Появление параметров a и b связано с тем обстоятельством, что реальный пучок частиц имеет конечные размеры, а также необходимостью обеспечения однородности магнитного поля в области входа пучка. Выбор значений a и b определяется также минимальным значением $P_{\min}$ измеряемого спектрометром импульса электронов отдачи. Формулы, связывающие параметры, характеризующие размеры спектрометра (рис. 4), имеют вид:

$$d = R_{\max} [1 - \cos(\alpha + \varepsilon')], \quad (13)$$

$$L = 2 R_{\max} \sin(\alpha + \varepsilon'), \quad (14)$$

$$l_{\max}^* = 2 R_{\max} \operatorname{tg}(\gamma - \alpha), \quad (15)$$

где d — наибольшая ширина магнитной дорожки, L — длина прямой выхода, а $l_{\text{макс}}$ характеризует компактность установки в целом. Из

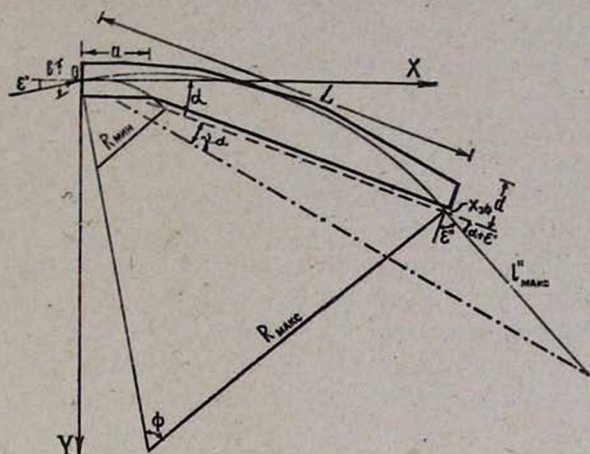


Рис. 4. Схематическое изображение магнита, обладающего постоянной дисперсией.

формул видно, что задание ширины d или длины L совместно с величиной энергетического окна ($R_{\text{макс}}$) однозначно определяет величину $(\alpha + \varepsilon')$, т. е. задает в плоскости (α, ε') (рис. 3) прямую

$$\varepsilon' = -\alpha + \arccos \left(1 - \frac{d}{R} \right). \quad (16)$$

Для выбора оптимальных значений α и ε' необходимо выяснить поведение функции $(\gamma - \alpha)$ вдоль прямой (16). Такая зависимость для $\alpha + \varepsilon' = 20^\circ + 30^\circ$ приводится на рис. 5.

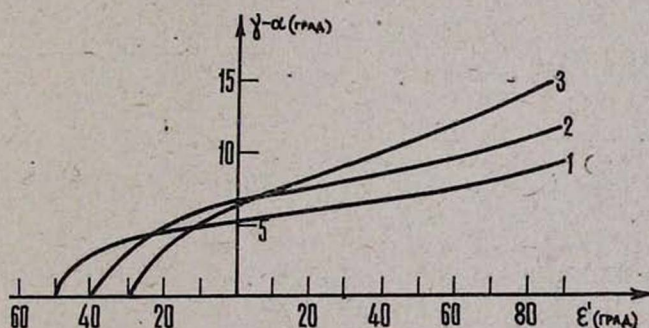


Рис. 5. Зависимость величины $(\gamma - \alpha)$, характеризующей расхождение между фокусной прямой и прямой выхода, от угла ε' вдоль прямых: 1) $\alpha + \varepsilon' = 20^\circ$, 2) $\alpha + \varepsilon' = 25^\circ$, 3) $\alpha + \varepsilon' = 30^\circ$.

Вышеуказанные вычисления были проведены в предположении о постоянном однородном магнитном поле с резкой геометрией границ. Однако строгий учет фокусирующих свойств магнита требует явного

задания аналитического вида реального поля, который включает в себя помимо однородного поля также и поле, рассеянное на гранях полюсных наконечников. Как было показано в работе [5], реальное однородное поле, непрерывно спадающее на краях, можно отождествить с некоторым резкоограниченным магнитным полем, которое считается эффективным аналогом реального поля. Таким образом, найденную нами выше конфигурацию полюсов, обеспечивающую постоянство дисперсии вдоль фокусной линии, можно отождествить с границей некоторого поля, параллельно сдвинутой на величину $X_{эфф}$ относительно механических прямолинейных граней полюсов магнита (рис. 4).

Величина дисперсии спектрометра оказывается достаточной для получения сравнительно высокого разрешения. Так, например, абсолютному разрешению прибора в 10 Мэв будет соответствовать линейный размер детекторов, равный 5+8 см, что превышает ширину монокристаллической линии (сумму оптических aberrаций) в несколько раз.

Ереванский физический институт

Поступила 29.VIII.1972

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. D. O. Caldwell et al. Rev. Scient. Inst., 36, 283 (1965).
2. D. O. Caldwell et al. Phys. Rev. Lett., 23, 1256 (1969).
3. G. R. Brooks et al. Nucl. Inst. Meth., 85, 125 (1970).
4. R. Herzog. Zs. Phys., 89, 447 (1934).
5. L. A. Konig, Hintenberger. Z. Naturforsch., 10a, 877 (1955).

ՖՈՏՈՆՆԵՐԻ ՆՇՄԱՆ ՀԱՄԱՐ ՄԱԳՆԵՏԱԿԱՆ ՍՊԵԿՏՐՈՄԵՏՐ

Լ. Ս. ԲԱԳԴԱՍԱՐՅԱՆ, Է. Շ. ԲԱՐՍԵԳՅԱՆ, Ա. Հ. ԹԱՇՉՅԱՆ, Վ. Խ. ԽԱԼԴԻԲԱՆՈՎ

Նկարագրվում է ֆոտոնային զգի երկայնքով հաստատուն դիսպերսիա ունեցող մագնիսական սպեկտրոմետր, որը հնարավորություն է տալիս փոքր քանակով հաշվիչների ու արագ էլեկտրոնիկայի սարքերով քվանտների նշում՝ էներգիայի լայն տիրույթում:

A MAGNETIC SPECTROMETER FOR PHOTON TAGGING SYSTEM

L. S. BAGDASSARIAN, E. O. BARSEGHIAN, A. A. TASHCHIAN,
V. Kh. KHALDIBANOV

A magnetic spectrometer having a constant dispersion on its focal line is described. It allows to tag photons in a wide energy range with only a small number of detectors and associated fast electronics.