

УДК 539.1

АНАЛИЗ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ МАГНИТНЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ

Т.Г. НАВАСАРДЯН

Ереванский физический институт

(Поступила в редакцию 15 декабря 2005 г.)

Представлен способ улучшения временного разрешения совпадения между двумя спектрометрами. Данный метод анализа позволяет достигнуть максимально возможной независимости ширины и положения пика совпадения от значения кинематических переменных. Предлагаемый подход весьма универсален и может быть использован в широком классе экспериментов.

1. Введение

Целью эксперимента E00-108 [1] является изучение кварк-адронной дуальности в электроорождении мезонов, используя семиинклюзивное рассеяние ($eN \rightarrow e'\pi^{\pm}X$). В данном эксперименте были использованы два магнитных спектрометра: SOS (Short Orbit Spectrometer – спектрометр с короткой орбитой) и HMS (High Momentum Spectrometer – Спектрометр высокого импульса). HMS предназначен для регистрации и идентификации адронов вместе с SOS, где SOS в свою очередь регистрирует рассеянные электроны. Во втором разделе коротко описаны оба спектрометра и параметры, которые необходимы для оптимизации. В третьем разделе будет показано, как была ранее вычислена коррекция длины пути частицы и связанные с ней проблемы и что стало причиной данной работы. Наконец, в последнем разделе приведено решение вышеупомянутых проблем и результаты улучшения разрешающей способности времени совпадения.

2. Спектрометры

Стандартные детекторы Hall C TJNAF состоят из двух магнитных спектрометров HMS и SOS [2]. HMS имеет импульсный захват $\sim 20\%$, телесный угол ~ 6 msr и импульсное разрешение $\sim 10^{-3}$. Он обладает способностью анализировать частицы до максимального импульса 7.4 ГэВ/с. SOS в свою очередь также имеет большой пространственный угловой и импульсный аксептансы, способен анализировать частицы до значения центральных импульсов 1.75 ГэВ/с, но траектория полета частицы в нем намного короче (~ 10 м по сравнению с 25 м для HMS).

2.1. HMS – спектрометр высокого импульса

HMS содержит три квадрупольные магнитные линзы (Q_1, Q_2, Q_3), за которыми установлен дипольный магнит (D) с вертикально отклоняющим углом в 25° , который и транспортирует частицы к детекторному домику (detector hut) (см. рис.1).

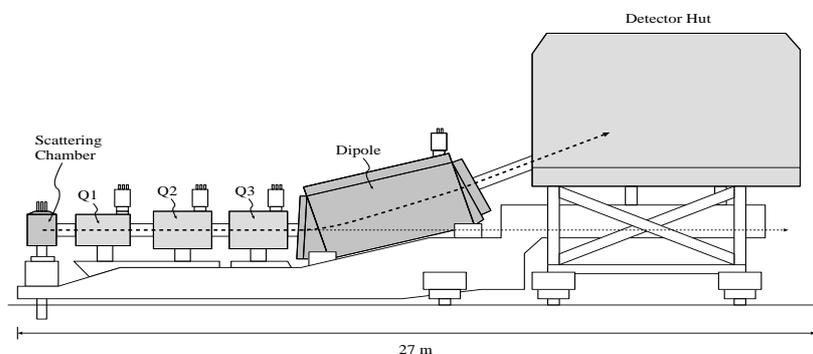


Рис.1. Схематическое представление HMS.

Магниты установлены на общей каретке, которая вращается вокруг неподвижно установленной центральной опоры. Весь спектрометр имеет возможность вращаться на паре рельсов в диапазоне углов 12° - 80° относительно направления пучка. На входе спектрометра установлен механизм коллимации. Этот механизм позволяет дистанционное введение любой из трех различных коллимационных щелей (диафрагм). В настоящем эксперименте экспериментальные данные были накоплены, когда в HMS был установлен большой восьмиугольный коллиматор.

Пакет детекторов HMS состоит из двух дрейфовых камер ($DC1$ и $DC2$), двух наборов $X-Y$ сцинтилляционных годоскопов ($S1X, S1Y$ и $S2X, S2Y$), газового порогового детектора Черенкова, аэрогелевого детектора Черенкова и ливневого детектора из свинцовых стекол (рис.2).

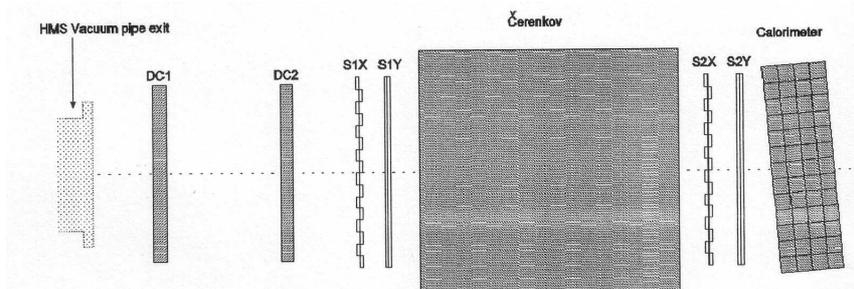


Рис.2. Схема расположения пакета детекторов HMS.

Определение траектории частицы осуществляется алгоритмом слежения, который использует информацию, предоставленную дрейфовыми камерами, о координате и

направлении полета данной частицы. Как только данная частица отслежена, все переменные фокальной плоскости становятся известны. Фокальная плоскость находится на равном расстоянии от двух дрейфовых камер. Переменные фокальной плоскости состоят из x_{fp} и y_{fp} (вертикальной и горизонтальной координаты, соответственно), и x'_{fp} и y'_{fp} (вертикального и горизонтального наклона траектории, соответственно) (рис.3). Пара комбинаций углов x_{fp} и x'_{fp} изображает след в рассеивающей плоскости спектрометра, в то время как другие комбинации (y_{fp} , y'_{fp}) изображают след в поперечной плоскости [3]. Эти величины являются основными для процедуры оптимизации спектров времени совпадения.

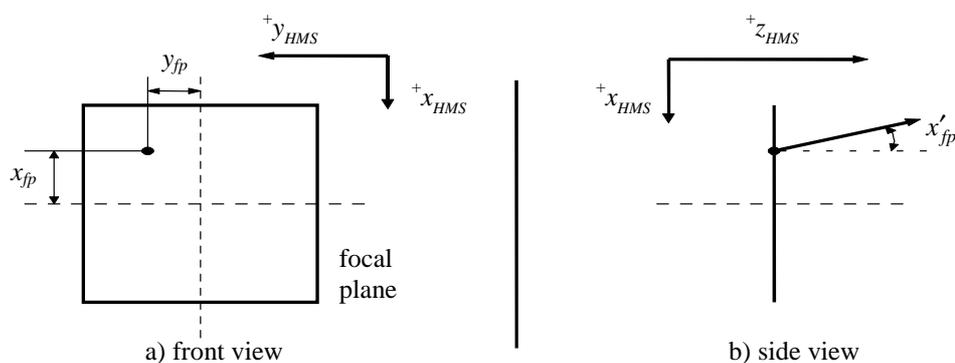


Рис.3. Переменные фокальной плоскости.

Если бы все регистрируемые частицы в каждом из спектрометров имели бы одинаковую длину траектории и фиксированные кинематические параметры, то ширина временного спектра совпадений определялась бы только временным разрешением элементов сцинтиляционных годоскопов и электроники, а также точностью определения параметров траектории.

Однако в реальности, из-за широкого углового и энергетического захвата спектрометров, длины траектории частиц от мишени до дальнего элемента годоскопа могут существенно отличаться, что приводит к дополнительному уширению спектров совпадений. Кроме того, размер этого уширения, а также положение самого максимума спектра времени совпадений, могут меняться в зависимости от кинематики эксперимента.

В связи с этим только корректный учет эффектов разброса траекторий и кинематических факторов позволяет свести к минимуму ширину временных совпадений и обеспечить независимость положения их максимумов от кинематики эксперимента.

Так как в данной статье нас интересует длина пути пролетающей частицы и траектория частицы в обоих спектрометрах, инициированные четырьмя магнитами, то мы остановимся на описании магнитной фокусирующей системы HMS более подробно, тем более что магнитная конструкция SOS аналогична. Квадрупольные магнитные линзы и анализирующие дипольные магниты являются сверхпроводящими и охлаждаются до 4К при помощи жидкого гелия. Магнитные поля линз настроены в режим "точка-в-точку": это означает, что частицы с одинаковыми импульсами и координатами вершин в мишени фокусируются на одной и той же точке в фокальной плоскости, которая располагается между

двумя дрейфовыми камерами. Квадрупольные магниты Q_1 и Q_3 фокусируют в плоскости рассеяния, тогда как Q_2 фокусирует в недисперсионном направлении. Диполь, анализирующий элемент системы, определяет центральный импульс спектрометра. Оптическая ось каждого магнита была предназначена для употребления магнитного коллоидного решения.

Карта магнитных полей четырехполюсников была использована для определения интеграла поля. Окончательные значения полей были точно настроены для лучшей фокусировки в фокальной плоскости. Эти значения были сверены с теми результатами вычислений, которые использовали оптическую модель HMS, сгенерированную программой COSY INFINITY [4].

2.2. SOS – Спектрометр с Короткой Орбитой

Магнитно-оптическая система SOS состоит из одного четырехполюсника (Q) и двух диполь-магнитов в расположении $QD\bar{D}$. Четырехполюсник фокусирует в горизонтальном (недисперсионном) направлении и состоит из двух диполей. Оба диполь-магнита заключены в общее ярмо. Все магниты – обычные резистивные и охлаждаются водой. Магниты (так же, как и домик детектора) лежат на одной и той же каретке. SOS изначально был построен для регистрации короткоживущих частиц. В данном эксперименте с помощью SOS регистрировались рассеянные электроны. Коллиматорная система SOS идентична HMS. SOS так же, как и HMS функционирует в режиме фокусировки “точка-в-точку”. Поле в SOS магнитной фокусируемой системе не так подробно изучено, как в HMS, и поэтому мы не располагаем картой SOS. Таким образом, настройки поля были определены при помощи оптических моделей, сгенерированных программой COSY INFINITY, предполагая, что у нас идеальный четырехполюсник.

Пакет SOS детектора идентичен HMS, и, следовательно, нет необходимости рассматривать его подробно. Единственная разница в том, что в SOS отсутствует аэрогельный детектор Черенкова и планировка детектора более компактна. Номинальная фокальная плоскость перпендикулярна направлению пучка и находится на расстоянии 6 см перед первой дрейфовой камерой. Истинная фокальная плоскость спектрометра наклонена вперед по отношению к номинальной на $\sim 70^\circ$.

3. Определение переменных длины пути частицы

Годоскопические сцинтилляционные плоскости обоих спектрометров предназначены для формирования триггера и определения времени совпадения событий у мишени. Время срабатывания сцинтиллятора в фокальной плоскости, вместе с информацией о длине пути частицы (путь, который частица проходит от мишени к годоскопам в HMS или в SOS) вычисляются с помощью параметров из модели COSY. Это называется предварительным (приближенным) временем совпадения ($\tau_{cointime_raw}$) и задается в следующем виде:

$$\tau_{cointime_raw} = \tau_{SOS} - \tau_{HMS} - TDC_{HMS}, \quad (1)$$

где τ_{SOS} и τ_{HMS} являются временами единичного плеча спектрометра, а TDC_{HMS} – это время, определяемое TDC , стартовым сигналом для которого является плечо SOS, а стоповым – от

HMS. Длина пути, в нашем случае, – это то расстояние, которое частица пролетает от мишени до детектора (фокальная плоскость спектрометра). Чем точнее мы будем знать длину пути, тем лучше сможем определить время совпадения и, следовательно, получить минимальное временное разрешение. Типичный временной спектр совпадения, когда SOS регистрирует рассеянные электроны, а HMS – вторичные положительные частицы (π^+ , k^+ или p), показан на рис.4.

Переменные, которые начинаются индексом h (h_time , h_fp) относятся к HMS, а переменные, в начале которых употребляется s (s_time , s_fp), связаны с плечом SOS.

Времена плеча SOS определяются выражением

$$\tau_{SOS} = \tau_{s_time_at_fp} + \frac{\tau_{s_pathlength}}{\beta_s} \quad (2)$$

а для HMS:

$$\tau_{HMS} = \tau_{h_time_at_fp} + \frac{\tau_{h_pathlength}}{\beta_h} . \quad (3)$$

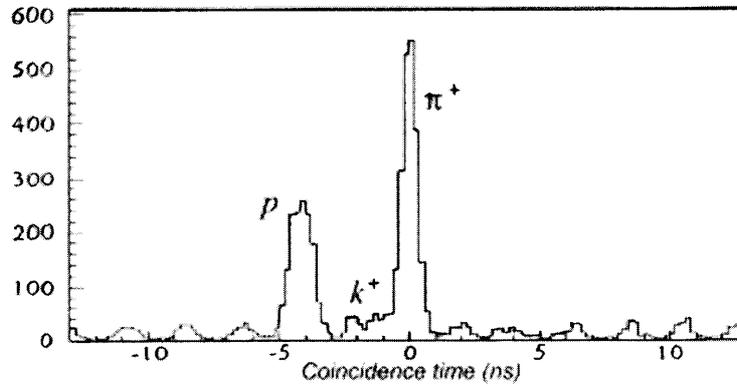


Рис.4. Спектр времени совпадения спектрометров, при положительной полярности HMS и импульсе $p_h = 3.0$ ГэВ/с. В точке 0 ns расположен пик π^+ , а в точке -4 ns – протоны. Маленький, еле видимый пик каона находится в точке -1 ns. 2 ns RF-структура электронного пучка видна на многократных случайных пиках.

В данных уравнениях $\tau_{x_time_at_fp}$ – это время, вычисленное в фокальной плоскости плеча HMS (или SOS, соответственно), $\tau_{x_pathlength}$ – длина пути частицы и $\beta_x = v_{particle} / c$, где $v_{particle}$ – скорость частицы и c – скорость света. В ходе эксперимента E00-108 SOS регистрировал электроны, которые являются релятивистскими частицами ($v_{particle} \approx c \Rightarrow \beta_s = 1$). Принимая во внимание все вышеуказанные формулы, время совпадения обоих спектрометров можно представить в следующем виде:

$$\tau_{coincidence_raw} = \tau_{s_time_at_fp} - \tau_{h_time_at_fp} + \tau_{s_pathlength} - \frac{\tau_{h_pathlength}}{\beta_h} - TDC_{HMS} . \quad (4)$$

4. Коррекция длины пути

Как можно заметить на рис.5, местоположение пика времени совпадения меняется по мере изменения центрального импульса HMS.

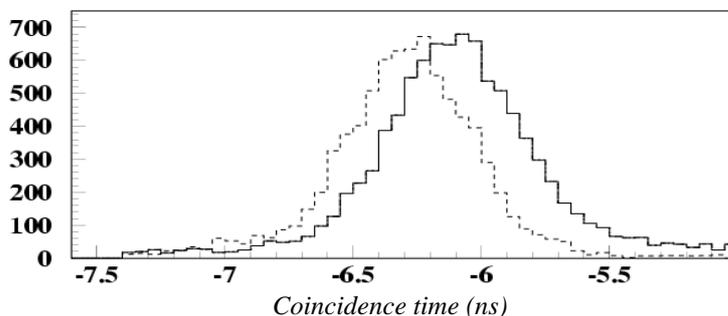


Рис.5. Спектр времени совпадения для двух различных импульсов HMS: сплошная линия – $P_{HMS} = 1.397$ ГэВ/с, пунктирная линия – $P_{HMS} = 3.703$ ГэВ/с.

Разница между двумя пиками может достигать 0.2 нс. Учитывая тот факт, что мы при отборе использовали интервал времени совпадения 2 нс, можно утверждать, что временной сдвиг может достигать 10% ширины интервала. В свою очередь, это приведет к зависимости доли потери “истинных” событий и отношения “случайных/истинных” от кинематики. Целью данной работы является оптимизация времени совпадения данного эксперимента и минимизация вышеуказанных факторов. В процессе возникли еще две проблемы, связанные с синхронизацией времени. Одна из них была вызвана сдвигом коллиматора вперед на 10 см, который мы имели на входе в HMS (см.2.1). Этот сдвиг послужил причиной некорректного расчета в длине пути, т.к. двигая коллиматор, мы фактически немного изменили карту поля, что никак не учитывалось при расчетах COSY в HMS. И второе, т.к. временной интервал совпадения – это один из важнейших критериев отбора событий, то необходимо достигнуть минимальной ширины, т.е. улучшения времени совпадения.

Вначале нам нужно довести до минимума ширину пика времени совпадения, т.е. мы должны найти минимальное возможное временное совпадение, которое находится в сильной зависимости от переменной длины пути. В ранее используемом алгоритме анализа событий длина пути являлась функцией, зависящей от нескольких переменных фокальной плоскости:

$$\tau_{h_time_at_fp} = a_1^* s s x p_{fp} - a_2^* s s x p_{fp}^2 + a_3^* s s x_{fp}^* s s x p_{fp} + a_4^* s s x_{fp} + a_5^* s s x_{fp}^2 + a_6^* s s y p_{fp}^2. \quad (5)$$

)Следует найти другую функцию длины пути, которая позволит избавиться от зависимости времени совпадения от кинематических параметров. Необходимо также проверить вручную различные параметры функции. Каждый раз, вводя новые параметры, появляется необходимость свести к минимуму уравнение и найти параметры, которые лучше опишут функцию и с минимальной дисперсией. Принимая во внимание, что для каждого значения TDC существуют разные значения времен для HMS и SOS фокальной плоскости, нам следует найти одну функцию коррекции длины пути, которая опишет все указанные значения

$$TDC_i = \tau_{h_time_at_fp} + \tau_{s_time_at_fp} + \frac{\tau_{h_pathlength}}{\beta_h} - \text{pathcorr}(x, y, z, \dots) \quad (6)$$

Мы можем представить длину пути и дисперсию следующим способом

$$Y_i = TDC_i - \left\{ \tau_{h_time_at_fp} + \tau_{s_time_at_fp} + \frac{\tau_{h_pathlength}}{\beta_h} \right\} \quad (7)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \{Y_i - \sum_{j=1}^n a_j * f_i(x_{ij}, y_{ij}, \dots)\}^2, \quad (8)$$

где a_{ij} – коэффициент, а x_{ij} – параметры искомой функции. Для нахождения минимально вероятного значения функции (8) надо решить систему линейных уравнений:

$$\frac{d\chi^2}{da_{ij}} = 0. \quad (9)$$

В конечном итоге у нас будет система более чем тысячи линейных уравнений [6].

Для решения этой проблемы нами была написана программа на языке FORTRAN. Быстро и надежно реализовать эту идею можно при помощи подпрограммы DEQN [7] из пакета CERNLIB (CERN Library). Данная подпрограмма решает матричное уравнение

$$AX = B_i, \quad (10)$$

которое представляет собой систему N одновременных (синхронных) линейных уравнений с K на правой стороне:

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} x_{ij} = b_{ik} \quad (i = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, K). \quad (11)$$

Подпрограмма DEQN подсчитывает инверсию квадратной матрицы A и решает систему (10). Для системы линейных уравнений функция DEQN использует метод инверсии матрицы. Применяя эту технику, мы находим данную функцию, которая лучше описывает длину пути полета частицы. Для HMS она имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \tau_{h_pathlength} = & a_1^* \tau_{hsxp_fp} + a_2^* \tau_{hsxp_fp}^2 + a_3^* \tau_{hsx_fp} + a_4^* \tau_{hsxp_fp}^2 + \\ & + a_5^* \tau_{hsx_fp}^2 + a_6^* \tau_{hsyp_fp}^2 + a_7^* \tau_{hsxp_fp}^3 + a_8^* \tau_{hsdelta} + a_9^* \tau_{hsdelta}^2 + \\ & + a_{10}^* \tau_{hsxp_tar} + a_{11}^* \tau_{hsxp_tar}^2 + a_{12}^* \tau_{hsy_tar} + a_{13}^* \tau_{hsy_tar}^2 + a_{14}. \end{aligned} \quad (12)$$

Для SOS соответственно имеем:

$$\begin{aligned} \tau_{s_pathlength} = & b_1^* \tau_{ssxp_fp} + b_2^* \tau_{ssxp_fp}^2 + b_3^* \tau_{ssx_fp} + b_4^* \tau_{ssxp_fp}^2 + \\ & + b_5^* \tau_{ssx_fp}^2 + b_6^* \tau_{ssyp_fp}^2 + b_7^* \tau_{ssxp_fp}^3 + b_8^* \tau_{ssdelta} + b_9^* \tau_{ssdelta}^2 + \\ & + b_{10}^* \tau_{ssxp_tar} + b_{11}^* \tau_{ssxp_tar}^2 + b_{12}^* \tau_{ssy_tar} + b_{13}^* \tau_{ssy_tar}^2 + b_{14}. \end{aligned} \quad (13)$$

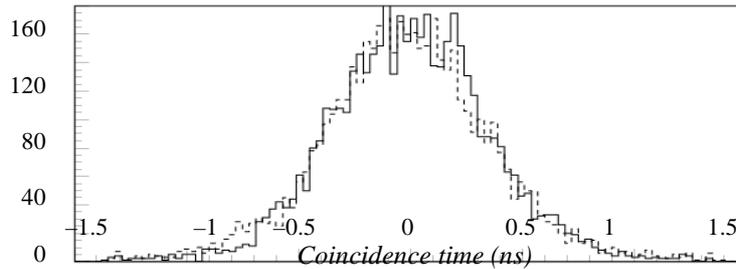


Рис.6. Сравнение позиций времени совпадения для разных значений центрального момента спектрометра HMS. Сплошная линия – $P_{HMS} = 1.397$ ГэВ/с, пунктирная – $P_{HMS} = 3.703$ ГэВ/с.

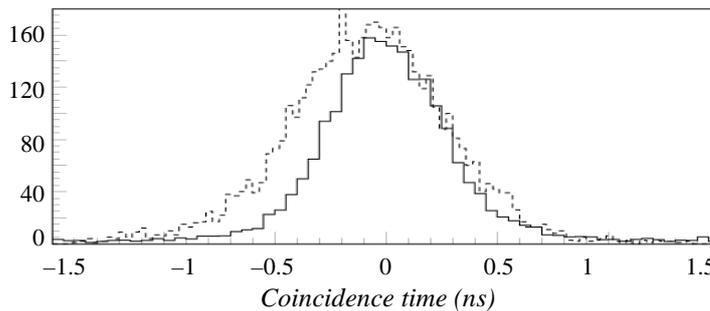


Рис.7. Сравнение спектров времени совпадения до коррекции (пунктирная линия) и откорректированного (сплошная линия).

Все вышеуказанные расчеты привели к стабильности положения пика совпадений и улучшению временного разрешения (до коррекции она была ~ 0.220 нс, а после ~ 0.190 нс). И теперь позиция пика временного совпадения независима от значения центрального импульса спектрометра (рис.6).

Эффект сужения ширины спектра времени совпадений очевиден из сравнения спектров до и после коррекции (рис.7).

5. Заключение

Новая версия коррекции длины пути приводит к сужению спектра времени совпадения и независимости пика времени совпадения от кинематических переменных. Это приводит к тому, что можно использовать более узкий срез на спектре времени совпадения для отбора полезных событий и достигнуть более высокого отношения “истинные/фоновые” события. Данное улучшение на сегодняшний день широко используется в стандартном пакете программ анализа событий Hall C Analysis Code [7], и может быть использовано и в других планируемых экспериментах совпадения Hall C.

Автор выражает благодарность Г.Мкртчяну, П.Бостеду, Р.Асатурияну, Р.Энту и В.Тадевосяну за полезные обсуждения, советы и помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **R.Ent, H.Mkrtchyan, G.Niculescu.** Duality in Meson Electroproduction, CEBAF HALL C approved experiments E00-108; 2001.
 2. CEBAF Conceptual Design Report, CEBAF Press, Newport News, 1990.
 3. **J.Cobb, J.Murray.** Nucl. Instrum. Meth., **46**, 99 (1976).
 4. **M.Berz.** COSY Infinity Version and Reference Manual, NSCL Technical Report MSUCL-977, Michigan State University, 1995.
 5. **G.A.Erskine, K.S.Kulbig.** CERNLIB Short Writeup Entries, CERN, 1992.
 6. **K.S.Kulbig.** Types of definite integrals suitable for the evaluation by symbolic algebra, CERN-DD-85-19, 1985.
7. **I.Niculescu, M.Jones.** Hall C Software Documentation. Internal Report, 2004.

ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՍՊԵԿՏՐԱԶՉԱՓԵՐԻ ԺԱՄԱՆԱԿԱՅԻՆ ԼՈՒԾՈՂԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ

Տ.Հ. ՆԱՎԱՍԱՐԴՅԱՆ

Ներկայացված է երկու սպեկտրաչափերի միջև ժամանակային համընկնումների լուծող հատկության լավացման միջոց: Ներկայացված մեթոդը թույլ է տալիս հասնել համընկման ժամանակային բաշխման լայնության և գագաթի դիրքի առավելագույն անկախությանը կինեմատիկ փոփոխականների արժեքներից:

ANALYSIS OF TIME RESOLUTION OF MAGNETIC SPECTROMETERS

T.H. NAVASARDYAN

A method of reaching better coincidence of time resolution between two spectrometers is described. This method allows one to reach a maximum possible coincidence of the time peak width and position independence from kinematic variables. The proposed approach is multipurpose and can be used in a wide range of experiments.