

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

3185/82

12/7-82

10-82-227

О.А.Займидорога, П.Лаурикайнен¹,
Л.К.Лыткин, Ф.Паломбо²

ОПТИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ
СПЕКТРОМЕТРА МИС

¹ Департамент физики высоких энергий,
Хельсинки, Финляндия.

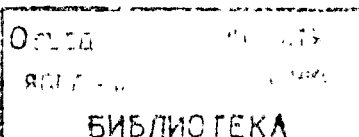
² Институт физики Миланского университета,
Италия.

Для геометрической реконструкции события, зарегистрированного на двух фотопленках, в пространстве спектрометра МИС ОИЯИ^{1/} необходимо построить математическую модель оптической системы спектрометра, однозначно связывающую результаты измерения изображения на пленке с положением в пространстве.

Параметры этой модели, не зависящие от условий фотографирования и измерений, являются оптическими константами. Исходными данными для поиска оптических констант служили измерения расстояний между реперами в пространстве и измерения изображений реперов на пленке с помощью автоматов ПРД^{2/} и полуавтоматов. При поиске оптических констант необходимо учесть те значительные растяжения пленки, которые возникают в процессе ее экспозиции, проявления и измерения, а также дисторсии оптической системы и смещения реперных меток в магнитном поле.

Вследствие этого процесс выработки оптических констант является сложным итерационным процессом, в течение которого осуществляется как поиск оптимальных независимых параметров системы, так и изменения самой математической модели и системы преобразований по мере учета искажений положения реперов на пленке с целью определения высокоточной эталонной системы реперов, свободной от искажений и адекватной пространственному положению реперных меток. Окончательным критерием качества найденных констант является как точность восстановления в пространстве координат физических реперов, так и количественная оценка искажений пленки, дисторсии системы и смещения пространственного положения реперов в магнитном поле, а также независимость найденных констант от координат реперов /то есть математическая модель и ее преобразования должны быть аналитической функцией координат пространственных точек, в противном случае достигнутая точность на границах фотографируемого объема не гарантирует такую же точность во всем объеме/.

Оптическая система спектрометра МИС ОИЯИ состоит из десяти независимых объективов, составляющих пять стереокамер^{1/}, при этом каждая стереокамера с помощью четырех зеркал "видит" однометровый блок искровых камер. Пять объективов находятся в стереоголовке одного фоторегистратора, а пять других - в другом фоторегистраторе. Таким образом, на кадре располагается пять независимых снимков. Так как зеркала закреплены в пространстве независимо, то оптические оси объективов, в ко-



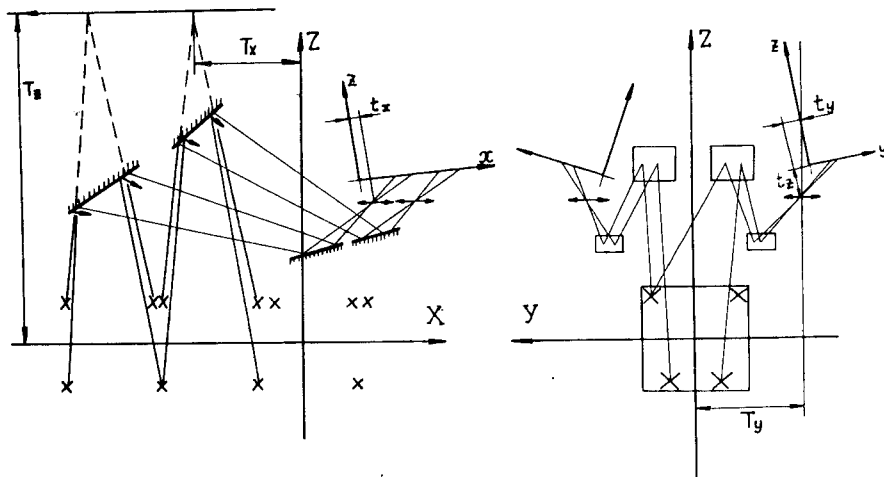


Схема оптической системы спектрометра МИС: T_x , T_y , T_z - пространственные координаты узловой точки объектива; t_x , t_y , t_z - координаты узловой точки объектива в системе координат на пленке.

нечном счете, не перпендикулярны плоскости реперов в пространстве, а также и плоскости пленки. Вследствие этого для описания положения системы координат на пленке относительно системы координат реперов в пространстве необходимо использовать три угла /углы Эйлера/, характеризующие взаимную ориентацию систем координат, три координаты узловой точки объектива в системе пленки и три - в системы реперов: ψ_i , θ_i , ϕ_i , t_{xi} , t_{yi} , t_{zi} , T_{xi} , T_{yi} , T_{zi} / $i=1,10$ /, на каждый объектив, где ψ_i , θ_i , ϕ_i - углы ориентации системы координат на пленке в системе координат спектрометра; t_x , t_y , t_z - положение узловой точки объектива в системе координат на пленке и T_x , T_y , T_z - положение узловой точки объектива в системе спектрометра /см. рисунок/. Координаты реперов в пространстве и на пленке связаны уравнениями светового луча:

$$X = T_x + (Z - T_z) \frac{X_E}{Z_E},$$

$$Y = T_y + (Z - T_z) \frac{Y_E}{Z_E}$$

и

$$\begin{pmatrix} X_E \\ Y_E \\ Z_E \end{pmatrix} = (E(\psi, \theta, \phi)) \begin{pmatrix} x - t_x \\ -t_z \\ y - t_y \\ -t_z \\ 1 \end{pmatrix}$$

где x , y - координаты реперов на пленке; X , Y , Z - координаты реперов в пространстве; E - матрица поворота; ψ , θ , ϕ - углы Эйлера.

Из описанной выше математической модели оптической системы видно, что искажения, вносимые зеркалами, объективами, пленкой, должны быть учтены дополнительными преобразованиями координат (x, y) .

Реперные кресты в объеме магнита располагались в двух плоскостях: 4 нижних креста и 4 верхних креста на каждую стереопару объективов. Причем, два нижних креста являются общими и видны соседним стереопарам. Такое расположение крестов значительно улучшает "шивку" блоков при пространственном восстановлении изображений крестов. Для определения взаимного положения реперных крестов в пространстве, а также относительно магнита /для "привязки" измерений магнитного поля/ измерялись все возможные расстояния между крестами в горизонтальной плоскости, а вертикальная координата была измерена с помощью водяного уровня. Точность измерений расстояний составляла ~ 20 мкм.

Для нижних крестов, кроме того, было определено расстояние от натянутой горизонтальной нити с точностью ~ 20 мкм. По двум фиксированным X -координатам, одной Y -координате и трем Z -координатам нижних крестов в центре магнита была выбрана физическая система координат спектрометра. В ней методом наименьших квадратов были найдены координаты остальных крестов. Точность определения координат ухудшалась по мере удаления от фиксированных крестов и для дальних реперов составляла ~ 40 мкм.

Линеаризованный функционал для крестов имел вид

$$D_{ij}^2 = (M_{xi}^0 + \delta M_{xi} - M_{xi}^0 - \delta M_{xj})^2 + (M_{yi}^0 + \delta M_{yi} - M_{yi}^0 - \delta M_{yj})^2 + 2 \Delta_{ij} \epsilon_{ij},$$

$$\frac{1}{2 \Delta_{ij}} (D_{ij}^2 - \Delta^2 x_{ij} - \Delta^2 y_{ij}) = \frac{\Delta x_{ij}}{\Delta_{ij}} (\delta M_{xi} - \delta M_{xj}) + \frac{\Delta y_{ij}}{\Delta_{ij}} (\delta M_{yi} - \delta M_{yj}) + \epsilon_{ij},$$

для нити*

$$W_i - (M_{yi}^0 - M_{xi}^0 a^0 - b^0) = \delta M_{yi} - M_{xi}^0 \delta a - \delta b + \epsilon_{wi},$$

где D_{ij} - искомое расстояние между i - и j -крестами в плоскости (xy) ; Δ_{ij} - измеренное расстояние; M_x , M_y - координаты крестов в плоскости (xy) ; a^0 , b^0 - параметры прямой, аппрок-

* Данные о нити не дали значительного улучшение фита из-за того, что точность измерений такая же, как у крестов, а количество измерений небольшое.

симирующей нить; δ - приращение параметров на одном шаге итерации; ϵ_{ij} - ошибки параметров.

Фокусное расстояние объективов составляло 181 мм, а расстояние узловой точки объектива до средней плоскости объема - 9203 мм, то есть средний коэффициент уменьшения был 1:50. Следовательно, для того, чтобы измерения реперов в пространстве и измерения их изображений на фотопленке входили в уравнения для поиска констант с одинаковым весом, необходимо знать положение реперов на пленке с точностью ~ 0,6 мкм. Локализацию центра изображения реперов можно получить лишь путем усреднения многократных измерений изображений. Такое усреднение проводилось в несколько этапов.

На первом этапе путем использования линейного преобразования координат измеряемых крестов примерно с 20 снимков переводились на один из снимков, и находились координаты центра тяжести кластеров крестов - координаты эталонной системы нулевого приближения. Далее результаты измерений каждого снимка с использованием этого эталона переводились в единую систему измерений крестов и делалось усреднение координат крестов в определенном радиусе вокруг эталонного значения, что давало следующее приближение: величина радиуса усреднения зависела от эффективности распознавания крестов и на первом этапе составляла ~100 мкм. После замены эталона, вновь выработанного, процедура повторялась с усреднением в меньшем радиусе, при этом контролировалась частота участия в усреднении каждого креста. При достижении радиуса порядка трех стандартных отклонений и близких частотах участия крестов в усреднении процесс получения эталона прекращался.

В результате такой процедуры определялась эталонная система координат крестов, статистически обеспеченная, со стандартным разбросом 1±1,2 мкм. Поиск оптических констант на этом этапе позволил для отдельных пленок достичь точности восстановления реперов в пространстве ~70 мкм и средней величины разброса измеренных точек пучкового трека на пленке 7-8 мкм. Уже эта достигнутая точность позволила установить, что нелинейная деформация пленки в фоторегистраторах, проявочном автомате и в процессе автоматических измерений значительно искажает выработанный эталон для разных групп пленок и сеансов измерений и необходимо было найти метод получения эталонной системы реперов, свободный от деформаций пленки. Для этих целей были получены фотографии крестов на плоскопараллельной стеклянной пластинке с безусадочным фотослоем. Многократные обмеры их на автомате НРД были использованы для получения прецизионного эталона реперных крестов. С помощью этого эталона были выработаны квадратичные преобразования^{/3/} для всего кадра, при этом преобразования для каждого объектива оста-

вались линейными. Полученный после таких преобразований эталон позволил выработать новый эталон реперов путем усреднения измерений реперов на пленках различных серий /сеансов на ускорителе и сеансов измерений/.

После устранения нелинейных искажений пленки в результате растяжений точности измерений реперов на пленке и в пространстве сравнялись, что оказалось приемлемым при поиске констант без поля. Поиск оптических констант в присутствии магнитного поля в спектрометре существенно усложняется. Реперы, расположенные в неоднородном магнитном поле, претерпевают смещения относительно измеренных положений без поля. Путем прямых измерений положения отдельных реперов в поле и без поля были определены эти смещения. Так как измерить положение всех крестов в магнитном поле оказалось невозможно, то при поиске констант было принято, что положения реперов в пространстве в пределах ошибок варьируются при фите, то есть координаты реперов также являются параметрами. Таким образом, задача сводится к нахождению минимума функционала $c/12+20/x2+9x10=154$ параметрами /12 нижних реперов, 20 верхних и 9 констант на объектив/. При этом Z-координаты крестов при фите были фиксированы, так как они сильно скоррелированы с Z-координатами узловых точек объективов как в системе спектрометра, так и на пленке.

Для поиска оптических констант была создана программа MUCOPT*, в которой для решения нелинейной задачи метода максимального правдоподобия использован метод линеаризаций Гаусса-Ньютона, хорошо работающий вблизи минимума, то есть при хороших начальных условиях.

Система линеаризованных уравнений имеет вид при $i=x,y$

$$DF = f_i - d^0 F_i = \frac{d_0}{E_Z^0 (S_Z^0 - T_Z^0)} [(E_i^0 - F_i E_Z^0) (S_i - \delta T_i) + (\delta E_i - F_i \delta E_Z) \times \\ \times (S_i - T_i) + (F_i - E_{j \neq i}) \delta T_Z - \frac{\delta t_i}{t_Z^0} + f_i \frac{\delta t_z}{t_z^0} + (f_x^2 + f_y^2) F_i \delta d_r + \frac{\epsilon}{t_z^0}.$$

Эти уравнения получены из уравнения светового луча $f_i = d F_i + \frac{\epsilon}{t_z^0}$. Обозначения следующие: $f_i = \frac{m_i - t_i - \delta t_i}{-(t_z + \delta t_z)}$; $F_i = S_i / S_Z; (E) -$ матрица обратного вращения Эйлера; $\delta(E) -$ матрица линейных приращений вращения.

* Существует две версии программы, в первой предполагаются малые вращения системы координат на пленке относительно пространства, во второй - произвольные вращения.

$$\begin{pmatrix} \delta E_x \\ \delta E_y \\ \delta E_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \delta_1 & \delta_3 \\ \delta_1 & 0 & \delta_2 \\ \delta_3 & \delta_2 & 0 \end{pmatrix},$$

где $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ - нелинейные функции углов ψ, θ, ϕ .

$$(S_{x,y,z}) = \begin{pmatrix} E_x^0 + \delta E_x \\ E_y^0 + \delta E_y \\ E_z^0 + \delta E_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X + \delta X - T_X - \delta T_X \\ Y + \delta Y - T_Y - \delta T_Y \\ Z + \delta Z - T_Z - \delta T_Z \end{pmatrix}$$

и

$$d = (d_r^0 + \delta d_r)(f_x^2 + f_y^2) + 1 \equiv d^0 + \delta d_r (f_x^2 + f_y^2),$$

m_j - координаты крестов эталона на пленке, (XYZ) - пространственные координаты крестов.

Программа определяет оценки ошибок найденных параметров, используя эти же уравнения. Для определения нелинейных искажений, вносимых объективом и связанной с ним парой зеркал, были проведены специальные исследования. В объем магнита устанавливалась оптическая стеклянная плита размером $1 \times 1 \text{ м}^2$. На ее поверхности были нанесены точки диаметром 25 мкм с шагом 15 мм. При этом точки на стекле образуют ортогональную систему. Точки освещались и фотографировались на пленку для каждой пары объективов. Положение плиты относительно крестов для каждого объектива измерить не удалось. Для определения оптических дисторсий была использована теорема проективной геометрии о конечном сечении. В системе, не имеющей дисторсий, коническое проектирование не меняет порядка плоских кривых, то есть прямые переходят в прямые, кривые 2-го порядка - в кривые 2-го порядка: таким образом, измеряя положение точек на пленке, можно найти вклад нелинейных искажений. На одном метре измерялось до 50 точек и результат фитировался кривыми до 5-го порядка. Фит показал, что ложная стрела прогиба в пространстве составляет менее 17 мкм на длине 2 м и существенно меньше ложной стрелы прогиба трека за счет ошибок измерения. Был найден эффективный радиус кривизны зеркал, который оказался $\sim 16350 \text{ м}$.

Измерения кривизны треков частиц пучка без магнитного поля позволили найти величину ложного радиуса кривизны $\sim 12,0 \text{ км}$, то есть ложный импульс составляет 7900 ГэВ/с, а импульсное разрешение спектрометра $\Delta p/p = 0,5 \pm 0,15\%$. Угловое разрешение спектрометра по глубинному и азимутальному углам соответственно равно $\delta\lambda = 0,15 \text{ мрад}$ и $\delta\phi = 0,15 \text{ мрад}$.

Точность восстановления реперов составляет 45 мкм в пространстве, что существенно меньше разброса положения искр относительно трека, который составляет $\sim 240 \text{ мкм}$.

Авторы благодарят И.М.Василевского и В.А.Моисеенко за предоставление результатов оптических и пространственных измерений, Л.П.Черненко за проведение измерений на ПУОСе, В.В.Вишнякова и Н.Д.Дикусара за обсуждение результатов и Э.Кюттала, принимавшего участие на ранней стадии работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анджек Р. и др. ОИЯИ, 13-3588, Дубна, 1967.
2. Бадалян С.Г. и др. ОИЯИ, 10-10338, Дубна, 1976.
3. Дикусар Н.Д., Мороз В.И. ОИЯИ, P10-10798, Дубна, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 марта 1982 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

D13-11182	Труды IX Международного симпозиума по ядерной электронике. Варна, 1977.	5 р. 00 к.
D17-11490	Труды Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1977.	6 р. 00 к.
D6-11574	Сборник аннотаций XV совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1978.	2 р. 50 к.
D3-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
D13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
D1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
D1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
D11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
D4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
D4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
D2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
D10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
D1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
D17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
D1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
P18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Займидорога О.А. и др.

10-82-227

Оптические константы спектрометра МИС

Для геометрического восстановления события, зарегистрированного на двух фотопленках, в пространстве магнитного искрового спектрометра /МИС/ построена математическая модель оптической системы спектрометра, связывающая измерение на фотопленке с положением точки в пространстве с целью нахождения параметров этой системы, являющихся оптическими константами. Процесс поиска оптических констант спектрометра является итерационным процессом, в ходе которого находятся оптические параметры системы в модифицированной модели за счет учета искажений положения реперов на пленке и в пространстве, возникающих вследствие растяжения пленки, смещения реперов в магнитном поле и дисторсий оптической системы. Найденные оптические константы спектрометра МИС позволили осуществить высокоточное восстановление в пространстве реперов и траекторий частиц и определить импульсное и угловое разрешение спектрометра.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Zaimidoroga O.A. et al.

10-82-227

Optical Constants of MIS Spectrometer

For geometrical reconstruction of events, registered on two films, in the space of magnetic spark spectrometer the mathematical model of the spectrometer optics is constructed. It couples measurements of fiducial marks on film with space position in order to find parameters of the system which are the optical constants. The search of spectrometer optical constants is an iterative process during which the parameters in question are found in a modified model taking into account the distortion of measurements and distortion in space due to stretching of film, shifting marks in magnetic field and optical distortion. The optical constants found allow one to achieve high accuracy reconstruction of fiducial marks and particle tracks and to determine the momentum and angular resolution.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.