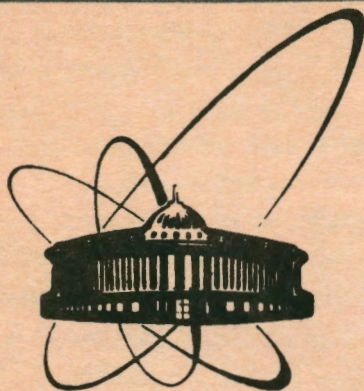


92-427



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P6-92-427

Ю. Зафар

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ТРИПЛЕТНЫХ СИСТЕМ
В УСТАНОВКЕ СПИН-3 НА ЯСНАПП-2

Направлено в "Чехословацкий физический
журнал"

1992

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей работе [1] вычислены матрицы триплетной фокусирующей системы, рассмотрены фокусирующие свойства триплета в стигматическом режиме изображения и графическим методом определены параметры конкретной системы.

В настоящей статье также рассматривается действие триплета в стигматическом режиме изображения предмета и дается решение проблемы в более общей и точной форме, а именно прямым численным решением соответствующего достаточно сложного уравнения с точностью до 10^{-5} .

В заключении приведен расчет стигматической фокусировки триплетных систем, использованных в установке "он-лайн-СПИН-3" на комплексе ЯСНАПП-2 в ОИЯИ.

СТИГМАТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

Триплет в общем случае является астигматичной системой. Однако при определенном соотношении параметров он может создать стигматическое изображение. В этом случае расстояния до изображений на обеих плоскостях xoz и yoz одинаковы ($b_c = b_d = b$, рис. 1 а, б).

Для получения условия стигматического изображения напишем уравнение траектории частицы в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & b_c \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t_{11c} & t_{12c} \\ t_{21c} & t_{22c} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} y \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & b_d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t_{11d} & t_{12d} \\ t_{21d} & t_{22d} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_0 \\ y'_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

где a - расстояние до предмета, b_c и b_d - расстояния до изображений от края линзы на плоскостях xoz и yoz , t_{1jc} и t_{1jd} - элементы матриц T_c и T_d триплета [1].

Распишем уравнения (1) и (2) в виде

$$x = (t_{11c} + b_c t_{21c}) x_0 + (at_{11c} + ab_c t_{21c} + t_{12c} + b_c t_{11c}) x'_0 \quad (3)$$

$$x' = t_{21c} x_0 + (at_{21c} + t_{11c}) x'_0 \quad (4)$$

$$y = (t_{11d} + b_d t_{21d}) y_0 + (at_{11d} + ab_d t_{21d} + t_{12d} + b_d t_{11d}) y'_0 \quad (5)$$

$$y' = t_{21d} y_0 + (at_{21d} + t_{11d}) y'_0 \quad (6)$$

Из (3) и (5) при $x = x_0 = y = y_0 = 0$ (рис. 1а, б) получим

$$b_c = -(at_{11c} + t_{12c}) / (at_{21c} + t_{11c}) \quad (7)$$

$$b_d = -(at_{11d} + t_{12d}) / (at_{21d} + t_{11d}) \quad (8)$$

В случае стигматического изображения ($b_c = b_d$) из (7) и (8) получим

$$(at_{11c} + t_{12c}) / (at_{21c} + t_{11c}) - (at_{11d} + t_{12d}) / (at_{21d} + t_{11d}) = 0 \quad (9)$$

Решение этого уравнения дает информацию о параметрах триплета, отвечающих его действию в стигматическом режиме. Однако, учитывая сложность элементов t_{1jc} и t_{1jd} , содержащихся в (9), его аналитическое решение невозможно. Поэтому для решения этого уравнения здесь был использован численный метод (см. программу: "iter-sti.bas" в приложении). В этом расчете фокусирующий параметр $(\beta_1 L)^2$ и напряжение U_1 крайних квадрупольных линз [1] представлены как функции расстояния до изображения b ($b = b_c = b_d$). Фокусирующий параметр $(\beta_2 L)^2$, напряжение U_2 средней квадрупольной линзы и расстояние до предмета a служат параметрами.

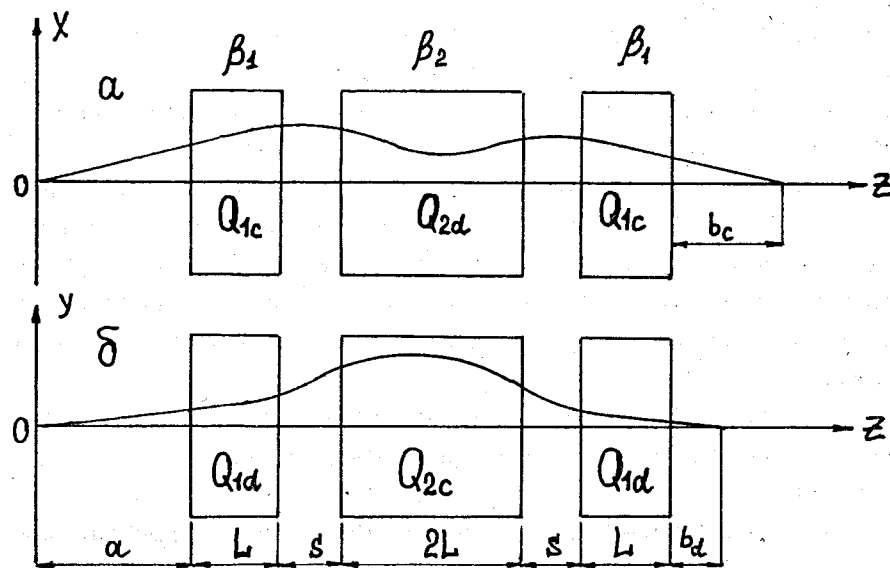


Рис. 1. Траектории частицы в двух плоскостях триплета

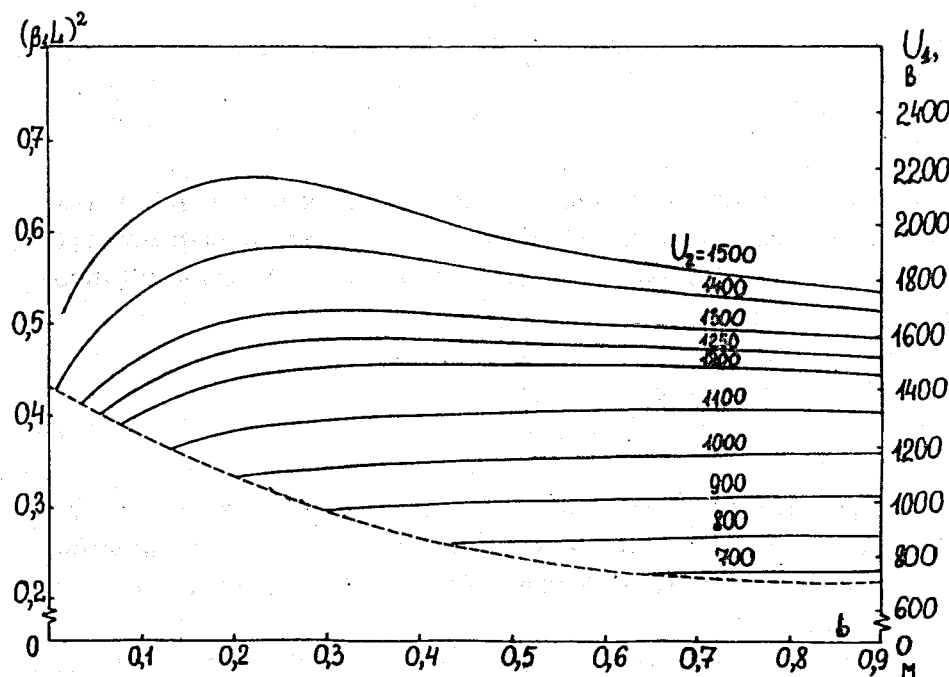


Рис. 2. Зависимость $(\beta_1 L)^2$ и U_1 от b

В табл. 1 и 2 приведены некоторые результаты этого расчета. Величина d ($d=b_c-b_d$) в последнем столбце этих таблиц действительно представляет точность, с которой решен вопрос стигматического изображения предмета триплетом.

На рис. 2 представлены результаты вычисления значений $(\beta_1 L)^2$ и U_1 в зависимости от координаты b . Эти результаты вполне совпадают с результатами, полученными графическим методом [1]. Кроме того, они имеют более общий характер и точнее, чем предыдущие, и, в дополнение, не ограничены узким диапазоном b .

Штриховая кривая на рис. 2 представляет границу стигматичной и астигматичной областей (при $(\beta_2 L)^2 \geq 0.2129$ ($U_2 \geq 700$ В)).

Необходимо отметить, что в рассматриваемом выше расчете энергия частицы E выбрана равной $E = E_0 = 50$ кэВ. Далее из выражения [2]

$$\beta_{10} = 2/d \cdot (ZU_{10}/E_0)^{1/2} \quad (i=1,2) \quad (10)$$

$$\beta_1 = 2/d \cdot (ZU_1/E)^{1/2} \quad (i=1,2) \quad (10')$$

вытекает, что при изменении значения E изменяется β_1 , а значит, и параметры изображения. Однако если мы меняем одновременно и U_1 так, чтобы согласно (10) и (10') выполнилось условие

$$\beta_1 = \beta_{10},$$

то получим

$$U_1 = E/E_0 \cdot U_{10}.$$

При этом условии кривые на рис. 2 при изменении энергии частицы ($E \neq E_0$) остаются неизменными. Однако величину U_{10} надо заменить на U_1 . Кроме этого, единичный вектор на оси U_1 умножается на E/E_0 .

Подобным образом в случае магнитного триплета получаем условие

$$I_1 = (E/E_0)^{1/2} \cdot I_{10}.$$

Табл. 1

$(\beta_1 L)^2$	U_1	a	b_c	b_d	d
0.334	1097.86	35.00	0.208540	0.208530	9.89E-06
0.336	1105.87	9.19	0.224402	0.224439	9.34E-06
0.339	1113.20	5.30	0.240916	0.240917	-1.10E-06
0.343	1127.55	2.70	0.281316	0.281321	-4.80E-06
0.344	1131.90	2.30	0.296610	0.296618	-8.14E-06
0.350	1151.20	1.20	0.403447	0.403404	4.33E-05
0.353	1160.20	0.80	0.540589	0.540657	-6.81E-05
0.353	1160.20	0.70	0.609082	0.609027	5.52E-05
0.353	1161.36	0.60	0.711319	0.711261	5.76E-05
0.350	1150.81	0.40	0.126975	1.216917	5.76E-05

Табл. 2

$(\beta_1 L)^2$	U_1	a	b_c	b_d	d
0.416	1366.73	5.80	0.069852	0.069855	-3.48E-06
0.436	1433.83	1.90	0.100187	0.100187	5.96E-08
0.458	1505.56	1.00	0.149021	0.149022	-1.45E-06
0.485	1593.45	0.40	0.344502	0.344506	-4.23E-06
0.483	1588.55	0.30	0.459611	0.459618	-7.84E-06
0.472	1550.18	0.20	0.702205	0.702223	-1.81E-05
0.462	1517.27	0.16	0.912620	0.912609	1.06E-05

ПРИМЕРЫ СТИГМАТИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКИ ТРИПЛЕТНЫХ СИСТЕМ

Ниже кратко приведены расчеты стигматической фокусировки триплетных систем, использованных в установке "он-лайн СПИН-3" на ЯСНАПП-2 в ОИЯИ (рис. 3).

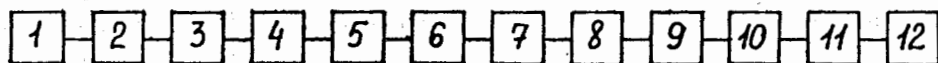


Рис. 3. Схема установки "он-лайн спин-3" на ЯСНАПП-2 в ОИЯИ: 1-сепаратор; 2-электростатическая триплетная линза (ТР.1); 3-турбомолекулярный насос (ТМН.1); 4-ТР.2; 5-отклонитель; 6-ТМН.2; 7-фильтр; 8-ТР.3; 9-имплантатор; 10-ТМН.3; 11-ТР.4; 12-рефрижератор

На линии ионопровода к установке "СПИН-3" между сепаратором и центром рефрижератора действуют четыре триплета (рис. 4).

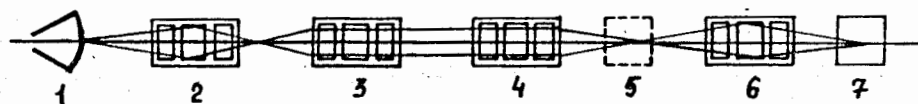


Рис. 4. Траектории частиц в триплетных линзах установки "спин-3": 1-сепаратор; 2, 3, 4, 6-электростатические триплетные линзы; 5-имплантатор; 7-рефрижератор

Пучок частиц, выходящих из сепаратора, фокусируется первым триплетом, выход которого является одновременно входным фокусом симметричной фокусирующей системы, созданной из второго и третьего триплетов. Пучок частиц в пространстве, свободном от поля между вторым и третьим триплетами, параллелен оси системы и фокусируется на выходе этой системы, где одновременно поставлена мишень имплантатора.

При измерениях с ориентированными ядрами имплантатор выключен, и пучок частиц вновь фокусируется четвертым триплетом и попадает в центр рефрижератора.

Используя уравнения (3), (5) и программу "stig-foc." (см. приложение) при $x = x_0 = y = y_0 = 0$ (при расстоянии от сепаратора до входного края первого триплета $a = 0.47$ м,

энергии частиц $E=50$ кэВ и геометрии триплета [1]); получим расстояние от изображения до выходного края первого триплета $b = b_c = b_d$.

В табл. 3 и 4 приведены результаты этого расчета с точностью $d = |b_c - b_d| \leq 10^{-2}$ и 10^{-4} м. Как вытекает из данных этих таблиц, получение более точного стигматического изображения возможно лишь при условии более тонкой регулировки напряжений U_1 и U_2 , которой можно достигнуть только с помощью специального источника высокого напряжения.

Табл. 3

$(\beta_1 L)^2$	U_1	U_2	b_c	b_d	d
0.30392	999.1	895.9	2.054298	2.058832	-4.53E-03
0.30392	999.1	896.0	2.055708	2.51935	3.77E-03
0.30396	999.2	896.0	2.053374	2.055304	-1.93E-03
0.30396	999.2	896.1	2.054785	2.048426	6.36E-03
0.30399	999.3	896.0	2.051043	2.058672	-7.63E-03
0.30399	999.3	896.1	2.052449	2.051772	6.76E-04
0.30399	999.3	896.2	2.053853	2.044921	8.93E-03

Табл. 4

$(\beta_1 L)^2$	U_1	U_2	b_c	b_d	d
0.30269	995.040	893.160	2.112130	2.112068	6.27E-05
0.30269	995.042	893.160	2.112075	2.112150	-6.53E-05
0.30269	995.044	893.162	2.112054	2.112070	-1.64E-05
0.30269	995.046	893.164	2.112039	2.111986	5.34E-05
0.30269	995.048	893.164	2.111984	2.112064	-8.01E-05
0.30269	995.048	893.166	2.112013	2.111914	9.89E-05

В симметричной системе, составленной из второго и третьего триплетов, расстояния от фокусов до краев системы на обеих сторонах в плоскостях xoz и yoz одинаковы [3]

$$Z_{fc2} = Z_{fc3} \quad Z_{fd2} = Z_{fd3}$$

Используя уравнения (3) и (5) при $x=y=x'=y'=0$, получим

$$Z_{fc2} = Z_{fc3} = b_c = -t_{11c} / t_{21c} \quad Z_{fd2} = Z_{fd3} = b_d = -t_{11d} / t_{21d}$$

Заменяя строки 380 и 400 в программе "stig-foc" этими выражениями и исключив величину a , получим в результате расчета табл. 5.

Табл. 5

$(\beta_1 L)^2$	U_1	U_2	b_c	b_d	d
0.2116928	695.90	658.85	0.7301863	0.7302506	-6.42E-05
0.211708	695.95	658.90	0.7300921	0.7300673	2.49E-05
0.2118144	696.30	659.20	0.7292389	0.729255	-1.61E-05
0.2118297	696.35	659.25	0.7291456	0.7290731	7.25E-05
0.2119209	696.65	659.45	0.7283866	0.7284446	-5.79E-05
0.2119361	696.70	659.55	0.7282937	0.7282638	2.30E-05
0.2120273	697.00	659.80	0.7275372	0.7276350	-9.77E-05

1. Программа "iter-sti"

```

0 rem"iter-sti.bas "
10 read s,l'
15 input I0,IN,IP,j0,jn,jp,a0,an,ap
20 for i=I0 to IN step IP
30 for j=j0 to jn step jp
40 for a=a0 to an step ap
50 u1=i
60 u2=j
62 v=sqr(u1/20)*l
64 w=sqr(u2/20)*l
70 p=(exp(2*v)+exp(-2*v))/2
80 q=(exp(2*v)-exp(-2*v))/2
90 m=(exp(v)+exp(-v))^2/4
100 n=(exp(v)-exp(-v))^2/4
110 ch(2*w)=(exp(2*w)+exp(-2*w))/2
120 sh(2*w)=(exp(2*w)-exp(-2*w))/2
150 c11=cos(2*v)-s*v/l*sin(2*v)
160 c12=(w^2-v^2)/2/v/w*sin(2*v)
170 c13=s*w/l*cos(2*v)-1/2*s^2*v*w/l^2*sin(2*v)
180 t11c=c11*ch(2*w)+(c12+c13)*sh(2*w)
190 c21=l/v*sin(2*v)+2*s*cos(v)^2
200 c22=s*w/v*sin(2*v)+w/v^2*1*sin(v)^2+l/w*cos(v)^2
210 c23=s^2*w/l*cos(v)^2
220 t12c=c21*ch(2*w)+(c22+c23)*sh(2*w)
230 c31=2*s*v^2/l^2*sin(v)^2-v/l*sin(2*v)
240 c32=w/l*cos(v)^2+s^2*v^2*w/l^3*sin(v)^2+v^2/w/l*sin(v)^2
250 c33=-s*v*w/l^2*sin(2*v)
260 t21c=c31*ch(2*w)+(c32+c33)*sh(2*w)
270 d11=cos(2*w)-s*w/l*sin(2*w)
280 d12=(v/2/w-w/2/v-s^2*v*w/l^2/2)*sin(2*w)+s*v/l*cos(2*w)
290 t11d=d11*p+d12*q
300 d21=l/v*cos(2*w)-s*w/v*sin(2*w)
310 d22=2*s*cos(2*w)+(l/w-s^2*w/l)*sin(2*w)
320 d23=-w/v^2*1*sin(2*w)
330 t12d=d21*q+d22*m+d23*n
340 d31=v/l*(cos(2*w)-s*w/l*sin(2*w))
350 d32=-w/l*sin(2*w)
360 d33=v^2/l^2*(2*s*cos(2*w)+(l/w-s^2*w/l)*sin(2*w))
370 t21d=d31*q+d32*m+d33*n
380 bc=-(a*t11c+t12c)/(a*t21c+t11c)
390 if bc<=0 then goto 450
400 bd=-(a*t11d+t12d)/(a*t21d+t11d)
410 if bd<=0 then goto 450
420 d=bc-bd
430 if abs(d)>.00001 then goto 450
440 lprint v^2,u1,u2,a,bc,bd,d
450 next a
460 next j
470 next i
480 data .032,.078
490 end

```


2. Программа "stig-foc.bas"

```

0 rem "stig-foc.bas"
10 read s,l
15 input I0,IN,IP,j0,jn,jp,a
20 for i=I0 to IN step IP
30 for j=j0 to jn step jp
50 u1=i
60 u2=j
62 v=sqr(u1/20)*l
64 w=sqr(u2/20)*l
70 p=(exp(2*v)+exp(-2*v))/2
80 q=(exp(2*v)-exp(-2*v))/2
90 m=(exp(v)+exp(-v))^2/4
100 n=(exp(v)-exp(-v))^2/4
110 ch(2*w)=(exp(2*w)+exp(-2*w))/2
120 sh(2*w)=(exp(2*w)-exp(-2*w))/2
150 c11=cos(2*v)-s*v/l*sin(2*v)
160 c12=(w^2-v^2)/2/v/w*sin(2*v)
170 c13=s*w/l*cos(2*v)-1/2*s^2*v*w/l^2*sin(2*v)
180 t11c=c11*ch(2*w)+(c12+c13)*sh(2*w)
190 c21=1/v*sin(2*v)+2*s*cos(v)^2
200 c22=s*w/v*sin(2*v)+w/v^2*l*sin(v)^2+1/w*cos(v)^2
210 c23=s^2*w/l*cos(v)^2
220 t12c=c21*ch(2*w)+(c22+c23)*sh(2*w)
230 c31=2*s*v^2/l^2*sin(v)^2-v/l*sin(2*v)
240 c32=w/l*cos(v)^2+s^2*v^2*w/l^3*sin(v)^2+v^2/w/l*sin(v)^2
250 c33=-s*v*w/l^2*sin(2*v)
260 t21c=c31*ch(2*w)+(c32+c33)*sh(2*w)
270 d11=cos(2*w)-s*w/l*sin(2*w)
280 d12=(v/2/w-w/2/v-s^2*v*w/l^2/2)*sin(2*w)+s*v/l*cos(2*w)
290 t11d=d11*p+d12*q
300 d21=1/v*cos(2*w)-s*w/v*sin(2*w)
310 d22=2*s*cos(2*w)+(1/w-s^2*w/l)*sin(2*w)
320 d23=-w/v^2*l*sin(2*w)
330 t12d=d21*q+d22*m+d23*n
340 d31=v/l*(cos(2*w)-s*w/l*sin(2*w))
350 d32=-w/l*sin(2*w)
360 d33=v^2/l^2*(2*s*cos(2*w)+(1/w-s^2*w/l)*sin(2*w))
370 t21d=d31*q+d32*m+d33*n
380 bc=-(a*t11c+t12c)/(a*t21c+t11c)
390 if bc<=0 then goto 450
400 bd=-(a*t11d+t12d)/(a*t21d+t11d)
410 if bd<=0 then goto 450
420 d=bc-bd
430 if abs(d)>.0001 then goto 450
440 lprint u1,u2,a,bc,bd,d
450 next j
460 next i
470 data .032,.078
480 end

```

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зафар Ю. : Препринт ОИЯИ, Р6-91-557, Дубна, 1991.
- [2] Enge Н. А. : Rev. Scient. Instr. 32(1961) 662.
- [3] Явор С. Я. : Фокусировка заряженных частиц квадрупольными линзами. М. : Атомиздат, 1968.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 октября 1992 года.