

И Н С Т И Т У Т ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН С С С Р

ПРЕПРИНТ И Я Ф 62 - 73

В.А.Таюрский, Б.В.Чириков, В.Ф.Шмаков

РАСЧЁТ ОПТИМАЛЬНОГО ПОЗИТРОННОГО КОНВЕРТЕРА МЕТОДОМ МОНТЕ - КАРЛО

3. Цилиндрический конвертер

Новосибирск

1973

§ 1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением исследований оптимальных условий конверсии электронов высокой энергии в позитроны /1/. Расчеты, как и в работе /1/, выполнены с помощью программы, описанной в /2/. В настоящей работе рассматривается конвертер в форме достаточно длинного и тонкого цилиндра, расположенного вдоль оси начального пучка электронов. В качестве материала мишени рассматривается вольфрам. Все расчеты выполнены для пучка электронов с энергией 450 Мэв. Выбор оптимальных условий конверсии производится с учетом захвата позитронов в фазовый объем: $\Phi_m = 0,78$ рад.дл.х радиан - максимальный горизонтальный фазовый объем, $\Phi_v = 0,078$ рад.дл.х рад. вертикальный фазовый объем. Здесь и далее длина измеряется в радиационных длинах вольфрама (1 рад.длина = 0,35 см).

Расчеты /1/ показали, что число позитронов с энергией $E \geq 20$ Мэв, выходящих из мишени в случае конвертера-пластины, составляет всего несколько процентов от полного количества позитронов, рождающихся в конвертере. Основная часть этих позитронов не доходит до конца конвертера и гибнет в нем. Полный выход позитронов, в особенности позитронов низкой энергии, можно значительно увеличить, если взять конвертер в форме длинного и тонкого стержня. В этом конвертере меньшее количество позитронов будет погибать внутри, чем в случае плоского конвертера, т.к. за счет многократного рассеяния некоторая часть позитронов будет выходить через боковые стенки цилиндра. Данные по расчету такого конвертера содержатся в следующем параграфе. Выбор оптимального конвертера состоит в нахождении условия максимума, захватываемых в заданный фазовый объем, позитронов при заданной начальной энергии. Максимум ищется по длине конвертера, его радиусу и энергии позитронов.

§ 2. Расчет оптимального конвертера в форме цилиндра

Как указывалось, расчеты конвертера выполнены для энергии начального пучка $E = 450$ Мэв и для вольфрамовой мишени. Счи-

талось, что пучок имеет среднеквадратичный радиус $\chi = 0,07$ рад. дл., в отличие от расчетов конверсии в пластине. Этот разброс по радиусам незначительно влияет на захват позитронов, но его необходимо учитывать, так как радиус пучка оказывается сравнимым с радиусом оптимального конвертера. Как и в /1/, вычисления выполнялись для случая "полного согласования", т.е. фазовые объемы приемника по обеим координатам в поперечном направлении принимались равными и зависящими от энергии позитронов.

Учитывалось также уменьшение фазового объема при высокой энергии. Максимальный фазовый объем по одной координате задавался следующим образом:

$$\Phi_0 = \begin{cases} (\Phi_0)_m & E_+ < 22.5 \text{ мэВ} \\ (\Phi_0)_m \sqrt{\frac{22.5}{E_+}} & E_+ > 22.5 \text{ мэВ} \end{cases} \quad (2.1)$$

В зависимости от энергии позитрона, фазовый объем приемника равен:

$$\Phi_1 = \Phi_0 \left(1 - \frac{2|E_+ - \langle E_+ \rangle|}{\langle E_+ \rangle} \right) \quad (2.2)$$

где E_+ - энергия позитрона, $\langle E_+ \rangle$ - средняя энергия позитронов из некоторого интервала. В расчетах величина интервала $\Delta E_+ = 2|E_+ - \langle E_+ \rangle| = 0.29 \cdot \langle E_+ \rangle$. В работе /1/ коэффициент захвата, то есть доля позитронов, от общего числа выходящих из мишени, которые захватываются в накопитель, вычислялся с помощью некоторой аналитической формулы. Эта формула была получена в предположении гауссовского распределения частиц по углам и независимо - по проекциям отклонения. Вычисление распределений частиц, выходящих из цилиндра, показало, что эти распределения отличаются от гауссовых. Кроме того, несправедлива формула для фазового объема пучка позитронов, так как имеются корреляции между проекциями координат частиц по x и по y . Поэтому число захватываемых позитронов вычислялось непосредственно по попаданию их координат в заданный фазовый объем (одновременно по x и по y). Считалось, что фазовые

эллипсы приемника согласованы с пучком:

$$\frac{\bar{\chi}_0^2}{\bar{\chi}_1^2} = \frac{\bar{\theta}_\kappa^2}{\bar{\theta}_1^2} \quad (2.3)$$

где $\bar{\chi}_0^2$, $\bar{\theta}_\kappa^2$ относятся к пучку позитронов, а $\bar{\chi}_1^2$ и $\bar{\theta}_1^2$ к приемнику

Причем, $\bar{\theta}_1^2 \cdot \bar{\chi}_1^2 = \phi_1^2$.

можно получить:

$$\begin{aligned} \bar{\theta}_1^2 &= \phi_1 \cdot \sqrt{\frac{\bar{\theta}_\kappa^2}{\bar{\chi}_0^2}} \\ \bar{\chi}_1^2 &= \phi_1 \cdot \sqrt{\frac{\bar{\chi}_0^2}{\bar{\theta}_\kappa^2}} \end{aligned} \quad (2.4)$$

и то же самое для распределения частиц по y . При вычислении коэффициента захвата учитывались как частицы, выходящие через боковые стенки, так и те, что выходят через торец. Координаты частиц вычислялись в плоскости $z = z_M$, где z_M — длина цилиндра. Так как при пролете частиц от точки выхода из цилиндра до этой плоскости форма фазового объема искажается, координаты позитронов пересчитывались в некоторую плоскость, из которой они в среднем приходят. Таким образом, частица считалась захваченной, если одновременно выполнялись условия:

$$\frac{\left(x - \frac{\bar{x} \bar{\theta}_\kappa}{\bar{\theta}_1^2}\right)^2}{\bar{\chi}_1^2} + \frac{\bar{\theta}_\kappa^2}{\bar{\theta}_1^2} \leq 1, \quad \text{и} \quad (2.5)$$

$$\frac{\left(y - \frac{\bar{y} \bar{\theta}_\kappa}{\bar{\theta}_1^2}\right)^2}{\bar{\chi}_1^2} + \frac{\bar{\theta}_\kappa^2}{\bar{\theta}_1^2} \leq 1$$

Результаты расчетов оптимального конвертера в форме цилиндра приведены в таблицах 1-4. Вычисления выполнены для различных длин мишени z_M и радиусов R_M . В таблицах приводится полный

выход позитронов на $100\% \frac{dP}{P} - \alpha_0$, и число позитронов N_+ захватываемых в накопитель. Статистические ошибки расчета не превышают 10%.

Из данных монте-карловского расчета, которые приведены в таблицах, видно, что полный выход позитронов низкой энергии на $100\% \frac{dP}{P}$ довольно высок и в некоторых случаях достигает 1 - 1.2. Это в $2 \div 3$ раза больше того, что наблюдалось для конвертера-пластины. Однако из-за большой величины фазового объема позитронов, при низкой энергии число захватываемых позитронов лишь незначительно превышает то, что мы имели в случае конвертера - пластины. Оптимальные размеры мишени следующие: длина конвертера $Z_M = 2$; радиус конвертера $R_M = 0.2$. При этом оптимальная энергия позитронов $E_+ = 20 \div 40$ Мэв и величина N_+ составляет $N_+ \approx 0.28$. Эта величина получена при полном согласовании. Без полного согласования N_+ меньше на $15 \div 25\%$. Можно ограничить возрастание фазового объема позитронов и тем самым увеличить коэффициент захвата их в накопитель, если наложить магнитное поле. Фокусировка позитронов, вылетевших из мишени поперечным магнитным полем тока, пропускаемого по цилиндру рассматривается в следующем параграфе.

§ 3. Фокусировка позитронов, вылетевших из мишени, магнитным полем

Были выполнены расчеты с целью исследовать возможность фокусировки позитронов магнитным полем. Рассматривалась фокусировка поперечным магнитным полем, создаваемым током, который пропускается прямо по конвертеру и направлен в ту же сторону, что и пучок, как это предложено в работе [3]. Поперечное магнитное поле наиболее эффективно для фокусировки, так как действует практически на полный импульс частицы. Для такой фокусировки требуются весьма большие импульсные токи (10^4 а). В типичном режиме при частоте 1 мГц толщина скин-слоя составляет $\sim 0,2$ мм, тогда как диаметр конвертера ~ 1 мм. Поэтому можно приближенно считать, что поле не действует на частицы внутри цилиндра. Для позитронов, вылетевших через боковые стенки цилиндра, решались уравнения движения их в поле тока. Электро-

Таблица 1

$\begin{matrix} \langle E_+ \rangle \\ R_M \end{matrix}$	12	17	22	28	39	53	69	91	124
0.05	0.17 0.03	0.20 0.08	0.21 0.10	0.20 0.12	0.16 0.08	0.14 0.10	0.12 0.11	0.09 0.08	0.05 0.04
0.1	0.87 0.13	0.82 0.17	0.61 0.15	0.65 0.20	0.55 0.20	0.35 0.18	0.25 0.16	0.18 0.12	0.11 0.09
0.2	1.2 0.03	1.1 0.04	1.0 0.12	0.74 0.15	0.56 0.16	0.36 0.13	0.22 0.09	0.16 0.06	0.05 0.04
0.3	1.0 0.005	1.0 0.04	0.87 0.07	0.63 0.09	0.42 0.08	0.27 0.04	0.17 0.05	0.07 0.02	0.06 0.04

Число выходящих из мишени (α_0) и захватываемых в накопитель (N_+) позитронов на 100% $\Delta P/P$.

Длина мишени - $Z_M = 5$ р.д.

Таблица 2

$\langle E \rangle$ R_M	12	17	22	28	39	53	69	91	124
0.05	0.23	0.23	0.24	0.18	0.13	0.13	0.12	0.11	0.08
	0.05	0.07	0.12	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.06
0.1	0.85	0.63	0.61	0.59	0.40	0.31	0.21	0.21	0.11
	0.04	0.14	0.17	0.23	0.19	0.15	0.11	0.15	0.09
0.2	1.0	1.0	0.93	0.70	0.48	0.41	0.29	0.14	0.07
	0.04	0.11	0.19	0.12	0.09	0.17	0.11	0.06	0.05
0.3	1.1	0.93	0.77	0.62	0.39	0.25	0.13	0.12	0.04
	0.02	0.06	0.10	0.12	0.11	0.08	0.06	0.06	0.03

То же, что и таблица 1. Длина мишени - $Z_M = 4$ р.д.

Таблица 3

$\angle E \rangle$ R_M	12	17	22	28	39	53	69	91	124
0,05	0,18 0,01	0,22 0,06	0,19 0,08	0,17 0,09	0,12 0,07	0,15 0,10	0,14 0,10	0,05 0,04	0,04 0,03
0,1	0,7 0,09	0,7 0,2	0,59 0,21	0,51 0,24	0,42 0,18	0,41 0,27	0,29 0,17	0,16 0,12	0,13 0,11
0,15	1,0 0,06	0,86 0,24	0,84 0,25	0,64 0,25	0,49 0,21	0,42 0,21	0,25 0,13	0,19 0,13	0,09 0,07
0,2	1,0 0,09	0,84 0,13	0,63 0,16	0,59 0,18	0,46 0,18	0,39 0,20	0,25 0,15	0,19 0,12	0,09 0,07
0,3	0,89 0,05	0,85 0,12	0,59 0,15	0,64 0,21	0,39 0,17	0,28 0,15	0,23 0,15	0,12 0,09	0,08 0,08

То же, что и таблица 1, длина мишени $-Z_M = 3$ р.д.

Таблица 4

$\begin{matrix} \langle E \rangle \\ R_M \end{matrix}$	12	17	22	28	39	53	69	91	124
0,05	0,19	0,17	0,11	0,16	0,13	0,11	0,11	0,08	0,07
	0,09	0,11	0,08	0,13	0,10	0,10	0,11	0,08	0,07
0,1	0,52	0,51	0,46	0,42	0,39	0,30	0,24	0,20	0,12
	0,08	0,24	0,21	0,29	0,24	0,24	0,19	0,19	0,10
0,2	0,59	0,58	0,60	0,53	0,37	0,29	0,26	0,14	0,12
	0,1	0,18	0,31	0,26	0,27	0,20	0,17	0,11	0,10
0,3	0,58	0,54	0,51	0,49	0,35	0,22	0,23	0,19	0,14
	0,1	0,25	0,22	0,28	0,20	0,16	0,19	0,16	0,14

То же, что и таблица 1. Длина мишени $Z_M \approx 2$ р.д.

ны, вылетающие из цилиндра больше не учитывались в программе. Так как поле зависит только от расстояния до оси и движения ограничено, то частица вышедшая с некоторого радиуса снова на него возбуждается. С увеличением тока всё большая часть позитронов попадает снова в цилиндр, не дойдя до плоскости, проходящей через конец стержня (плоскость, где определяется, попадает ли позитрон в заданный фазовый объем). Позитроны, попавшие в цилиндр учитывались в программе и дальше, так как они могли потеряв часть энергии на радиационное торможение и ионизацию выйти из мишени, или же вызвать каскад.

Результаты расчётов представлены в таблицах 5-7. Вычисления выполнены для $R_M = 0.1$ различных Z_M и различных токов. $R_M = 0.1$ примерно соответствует оптимальному радиусу цилиндра при любых длинах (см. таблицы 1-4), поэтому величина радиуса не менялась. Как следует из данных таблиц радиальная фокусировка не увеличивает числа захватываемых частиц по сравнению со случаем без поля. При малых токах это число в пределах статистических ошибок ($\sim 10\%$) совпадает с тем, что было без поля. При больших токах количество захватываемых частиц уменьшается за счёт того, что позитроны возвращаются в цилиндр и часть их гибнет в нём. Таким образом, фокусировка позитронов поперечным магнитным полем не позволяет увеличить коэффициент захвата.

§ 4. З а к л ю ч е н и е

В работе выполнены расчеты оптимального конвертера в форме цилиндра для пучка начальных электронов с энергией 450 Мэв. Из результатов расчётов следует, что полный выход позитронов в фиксированном интервале $\Delta P/P$ может быть в 2-3 раза выше, чем в случае конвертера-пластины при энергиях позитронов 10-30 Мэв. Однако число захватываемых в заданный фазовый объем позитронов лишь незначительно превышает (примерно на 10%) величину, которая получается в случае плоского конвертера. Рассмотрена возможность фокусировки позитронов полем тока. При этом число захватываемых позитронов также не увеличивается.

Таблица 5

$\langle E \rangle$ $I(a)$	12	17	22	28	39	53	69	91	124	Число позитронов, вернувшихся в мишень
10^3	0,57	0,64	0,34	0,56	0,43	0,33	0,30	0,20	0,12	0,003
	0,10	0,17	0,25	0,20	0,20	0,18	0,20	0,15	0,08	
$5 \cdot 10^3$	0,68	0,69	0,71	0,55	0,48	0,31	0,28	0,21	0,14	0,021
	0,13	0,21	0,23	0,22	0,27	0,19	0,19	0,17	0,09	
10^4	0,63	0,59	0,66	0,54	0,46	0,36	0,25	0,16	0,10	0,085
	0,15	0,21	0,23	0,25	0,24	0,21	0,17	0,13	0,09	
$5 \cdot 10^4$	0,59	0,47	0,43	0,47	0,33	0,20	0,15	0,11	0,07	0,951
	0,12	0,14	0,14	0,20	0,19	0,12	0,07	0,06	0,05	

Число выходящих из мишени позитронов ($\mathcal{L}_0$) и число позитронов, захватываемых в накопитель (N_+), для конвертера с фокусировкой.

Все величины даны на 100% dp/p .

В последнем столбце — число позитронов, вернувшихся в мишень, на один начальный электрон. $Z = 4$ рад.дл. $R = 0,1$ рад.дл.

Таблица 6

$\langle E \rangle$ $I(a)$	12	17	22	28	39	53	69	91	124	Число — позитро- нов вер- нувших- ся в ми- шень
$2 \cdot 10^3$	0,57 0,16	0,64 0,22	0,55 0,21	0,49 0,23	0,41 0,22	0,37 0,24	0,28 0,15	0,18 0,12	0,12 0,10	0,003
10^4	0,55 0,18	0,60 0,25	0,49 0,27	0,43 0,25	0,43 0,30	0,46 0,30	0,27 0,20	0,18 0,12	0,11 0,08	0,027
$2 \cdot 10^4$	0,57 0,18	0,62 0,25	0,51 0,25	0,49 0,25	0,43 0,30	0,31 0,21	0,27 0,21	0,11 0,07	0,13 0,1	0,157
$5 \cdot 10^4$	0,48 0,19	0,53 0,23	0,52 0,24	0,40 0,25	0,30 0,20	0,33 0,21	0,19 0,15	0,14 0,12	0,11 0,09	0,544
10^5	0,41 0,11	0,36 0,16	0,45 0,20	0,35 0,22	0,26 0,18	0,24 0,19	0,18 0,12	0,06 0,06	0,07 0,06	0,998

То же, что и таблица 1. $Z = 3$ рад.дл., $R = 0,1$ рад.дл.

Таблица 7

$\angle E$ $I(a)$	12	17	22	28	39	53	69	91	124	Число позитро- нов вер- нувших- ся в ми- шень
$5 \cdot 10^3$	0,49 0,18	0,52 0,21	0,44 0,25	0,43 0,27	0,32 0,18	0,30 0,24	0,19 0,14	0,19 0,17	0,13 0,11	0,003
10^4	0,50 0,26	0,47 0,25	0,55 0,29	0,43 0,27	0,35 0,25	0,32 0,22	0,23 0,18	0,16 0,14	0,12 0,10	0,014
$2 \cdot 10^4$	0,39 0,16	0,47 0,29	0,51 0,30	0,37 0,26	0,37 0,29	0,32 0,25	0,24 0,18	0,18 0,16	0,09 0,08	0,059
$5 \cdot 10^4$	0,40 0,18	0,40 0,20	0,38 0,22	0,34 0,24	0,37 0,30	0,25 0,19	0,22 0,19	0,21 0,19	0,10 0,09	0,245
10^5	0,37 0,18	0,42 0,21	0,41 0,31	0,31 0,24	0,32 0,25	0,25 0,22	0,21 0,17	0,13 0,12	0,08 0,07	0,498
$2 \cdot 10^5$	0,32 0,09	0,32 0,13	0,34 0,19	0,29 0,19	0,27 0,18	0,24 0,18	0,19 0,14	0,12 0,12	0,08 0,08	0,734

То же, что и таблица 5; $\xi \approx 2$ рад.дл. $R = 0,1$ рад.дл.

Л и т е р а т у р а

1. В.А.Таюрский, Б.В.Чириков, В.Ф.Шмаков. Расчёт оптимального позитронного конвертера методом Монте-Карло.
2. Конвертор в форме пластины. Препринт ИЯФ СО АН СССР. Новосибирск, 1972.
2. Ф.М.Израйлев, В.С.Сынах, В.А.Таюрский, Б.В.Чириков, В.Ф.Шмаков. Расчёт оптимального позитронного конвертера методом Монте-Карло. Описание схемы счёта. Препринт ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1973г.
3. Г.И.Будкер и др. 2-ое Всесоюзное совещание по ускорителям (Москва, 1970).