

Сибирское отделение Российской Академии наук
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им.Г.И. Будкера

А.В. Киселев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПО МОНТЕ-КАРЛО
ИСТОЧНИКА МЕДЛЕННЫХ ПОЗИТРОНОВ
НА БАЗЕ УСТАНОВКИ SPRING-8

ИЯФ 99-42

Новосибирск
1999

**Моделирование по Монте-Карло
источника медленных позитронов
на базе установки Spring-8**

A.V. Kiselev

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера
630090, Новосибирск, Россия

Аннотация

Разрабатывается комплекс программ SCIN_PC для численного моделирования источника медленных позитронов на основе использования синхротронного излучения из сверхпроводящего вигглера в накопителе Spring-8 (Япония). Представлены результаты Монте-Карло моделирования процесса рождения позитронов в мишенях из тяжелых элементов при облучении СИ.

**Monte-Carlo simulation of the slow positron source
based on SPring-8**

A.V. Kiselev

Budker Institute of Nuclear Physics,
630090, Novosibirsk, Russia

Abstract

Simulation program SCIN_PC for slow positron source based on synchrotron radiation from superconducting wiggler in SPring-8 (Japan) storage ring is being constructed. The results of Monte-Carlo simulating of SR-induced positrons in high-Z targets are presented.

© *Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера*

Оглавление

1. Введение	5
2. Спектр синхротронного излучения из вигглера	6
3. Вычисление спектра позитронов	13
4. Заключение	30
Литература	31

1. Введение

Данная работа производилась в рамках проекта МНТЦ №767-97 «RIKEN/BINP Low Energy Positron Source». Цель проекта создание источника медленных позитронов большой яркости с использованием жесткой части спектра синхротронного излучения из сверхпроводящего вигглера на базе накопителя SPring-8 (см. [1] - [5]). Фотоны с энергией более 1.022 MeV предполагается конвертировать в позитроны, которые в свою очередь тормозятся и термализуются подходящим модератором, собираются и транспортируются для дальнейшего использования или ускорения. Для выбора конфигурации и оптимизации параметров такой системы необходимо численное моделирование.

На основании имеющегося в ИЯФ СО РАН опыта по расчету параметров синхротронного излучения и позитронных конверторов для оптимизации инжекции в ускорители-накопители (см. [8] - [10]) разработан комплекс ЭВМ программ SCIN_PC для моделирования методом Монте-Карло источника медленных позитронов с учетом следующих физических процессов:

- ◇ синхротронное излучение электронов и позитронов;
- ◇ рождение пар электрон-позитрон в поле ядра;
- ◇ электрон-позитронная аннигиляция;
- ◇ электрон-электронное рассеяние;
- ◇ позитрон-электронное рассеяние;
- ◇ тормозное излучение;
- ◇ многократное рассеяние;
- ◇ фотоэффект;
- ◇ рассеяние Комптона;
- ◇ когерентное рассеяние Релея;
- ◇ возбуждение и ионизация атомов.

2. Спектр синхротронного излучения из вигглера

В расчете на достижение проектного значения 100 мА для тока электронов пучка в накопителе SPring-8 и для опорных значений поля сверхпроводящего вигглера:

Магнитное поле вигглера, Т	8.00	10.00	12.00
Радиус кривизны орбиты, м	3.37	2.67	2.22
Критическая энергия квантов СИ, MeV	0.34	0.43	0.51
Полная мощность излучения СИ, kW/mrad	1.73	2.16	2.59
Мощность СИ выше 1.022 MeV, kW/mrad	0.15	0.33	0.55
Поток фотонов выше 1.022 MeV, e15 1/s/mrad	0.72	1.47	2.38

Дифференциальные распределения для жесткой части спектра потока фотонов синхротронного излучения из сверхпроводящего вигглера выше порога 1.022 MeV рождения (e^+ , e^-) пар, нормированная на 1 mrad горизонтального угла и на 100 мА тока электронов в SPring-8 представлены на рис. 1–5.

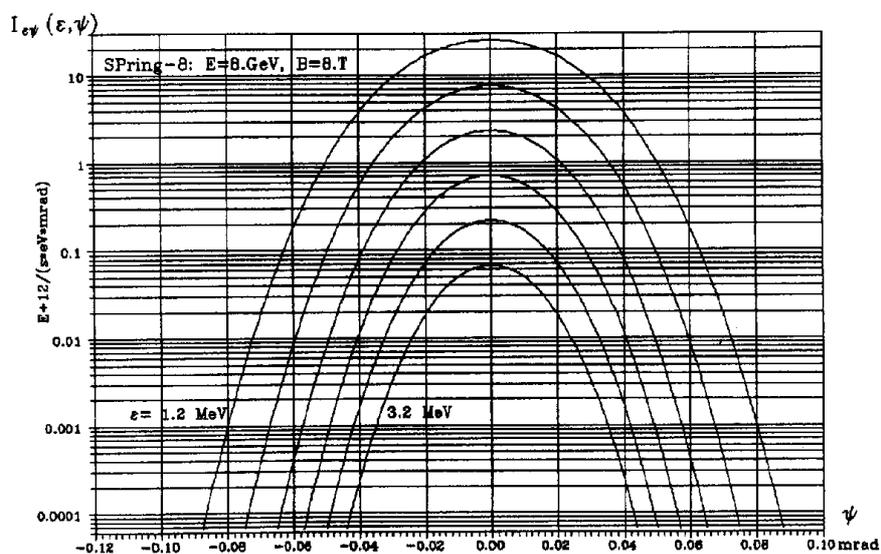


Рис. 1. Дифференциальное распределение потока фотонов СИ в зависимости от вертикального угла для поля $B = 8$ Т.

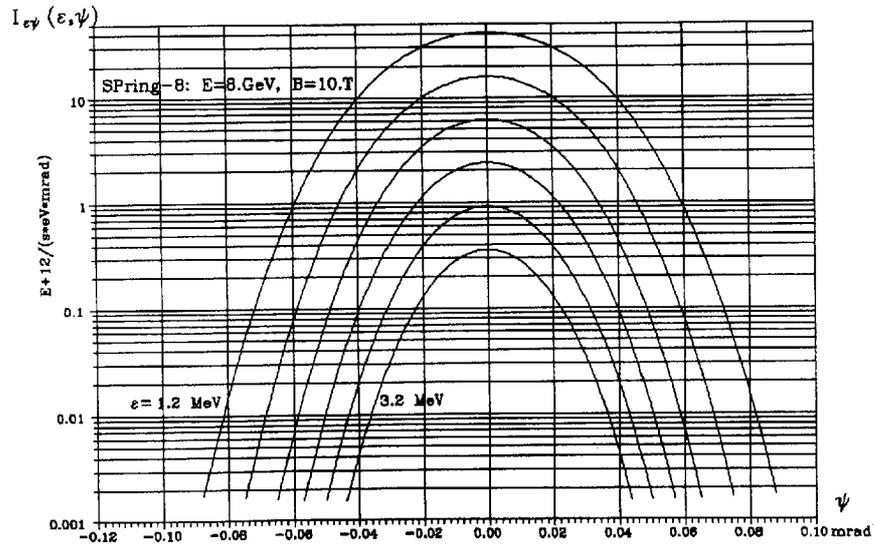


Рис. 2. Дифференциальное распределение потока фотонов СИ в зависимости от вертикального угла для поля $B = 10$ Т.

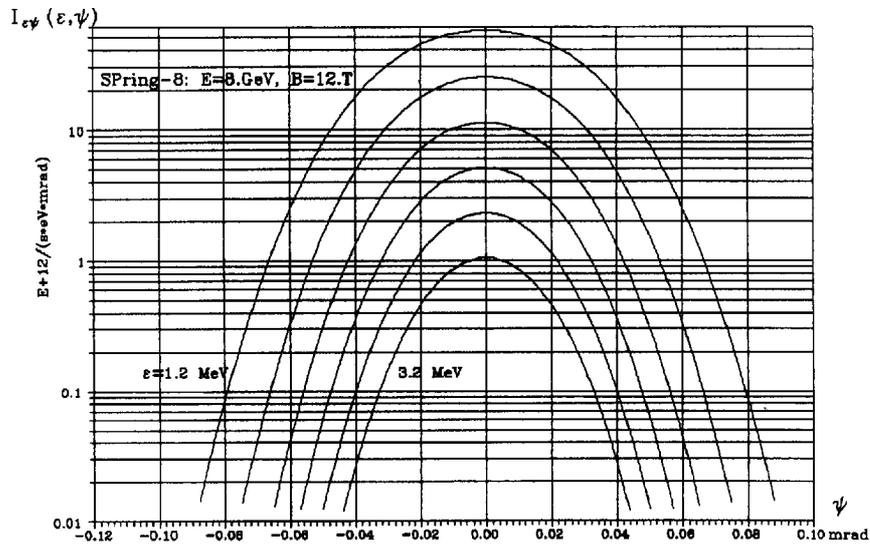


Рис. 3. Дифференциальное распределение потока фотонов СИ в зависимости от вертикального угла для поля $B = 12$ Т.

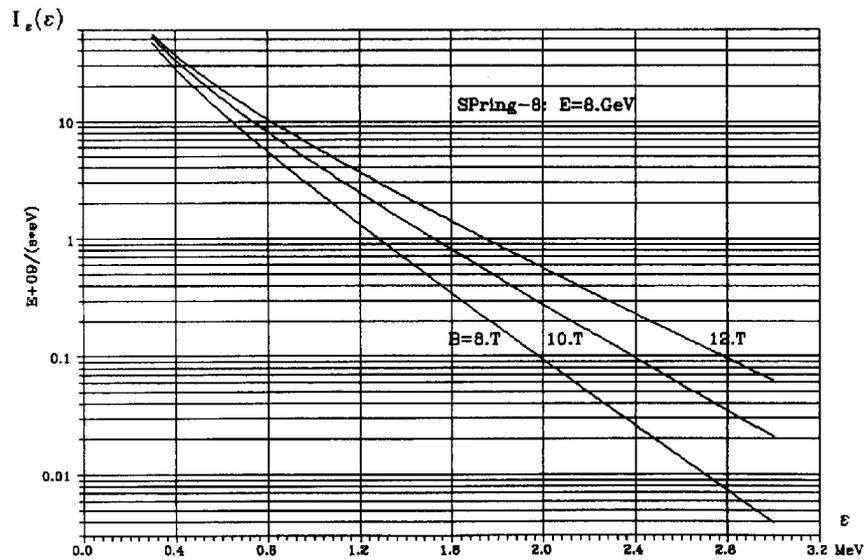


Рис. 4. Дифференциальное распределение потока фотонов СИ от их энергии, про- суммированное по всем вертикальным углам.

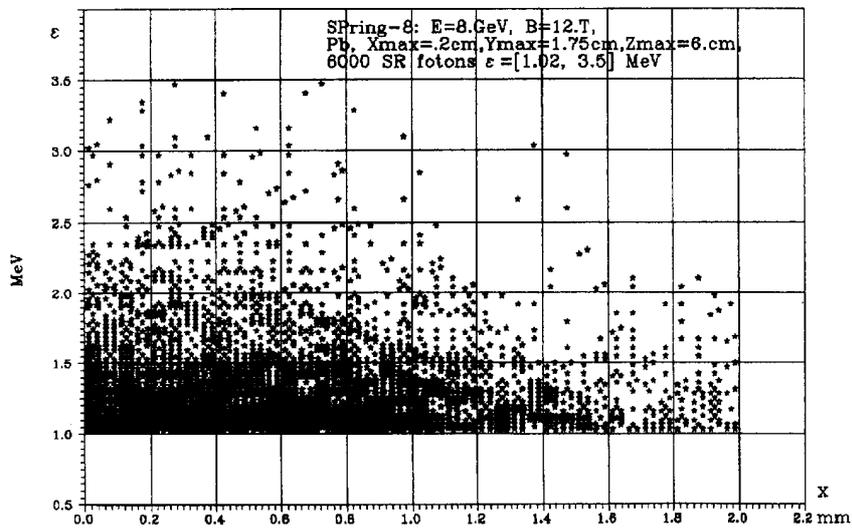


Рис. 5. Двумерное распределение жесткой части спектра фотонов СИ по высоте и энергии на расстоянии 35 м от вилгера.

На рис. 6 представлено распределение фотонов СИ по мощности для опорных значений поля вигглера, просуммированное по всем вертикальным углам. Рис. 7 дает представление о среднеквадратичном значении распределения мощности по вертикальному углу в зависимости от энергии фотонов СИ с учетом заданного предполагаемого размера пучка электронов в SPring-8 по вертикали.

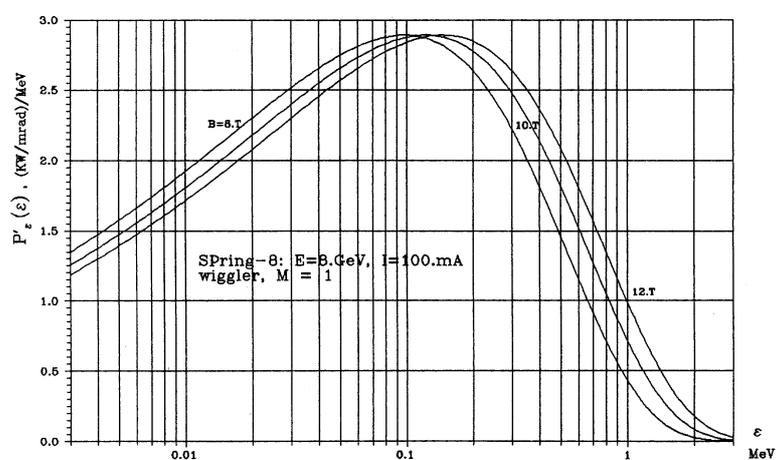


Рис. 6. Дифференциальное распределение мощности СИ в функции энергии фотонов.

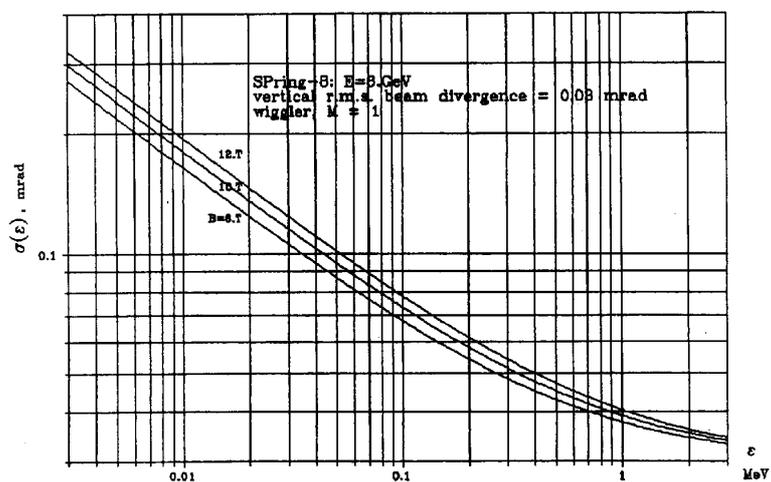


Рис. 7. Среднеквадратичный угол мощности СИ от энергии фотонов.

На рис. 8–11 приведены нормированные интегральные распределения фотонов СИ в специальном виде, подготовленном для Монте-Карло моделирования в качестве исходных данных.

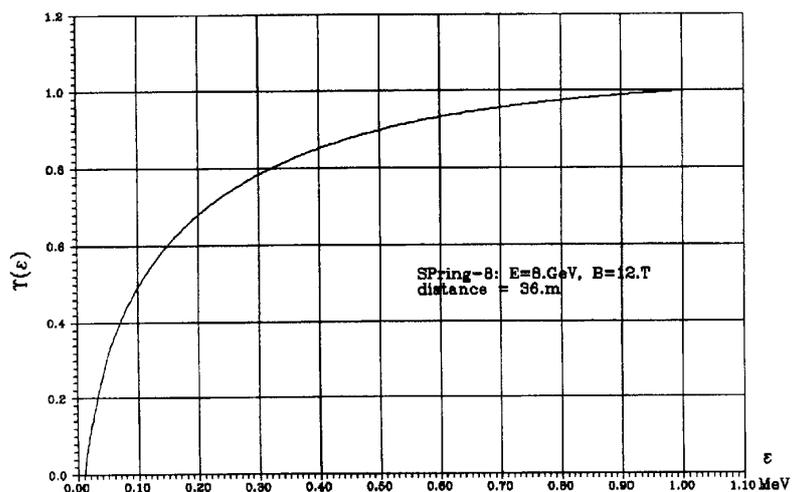


Рис. 8. Интегральное распределение мягкой части спектра фотонов СИ по энергии.

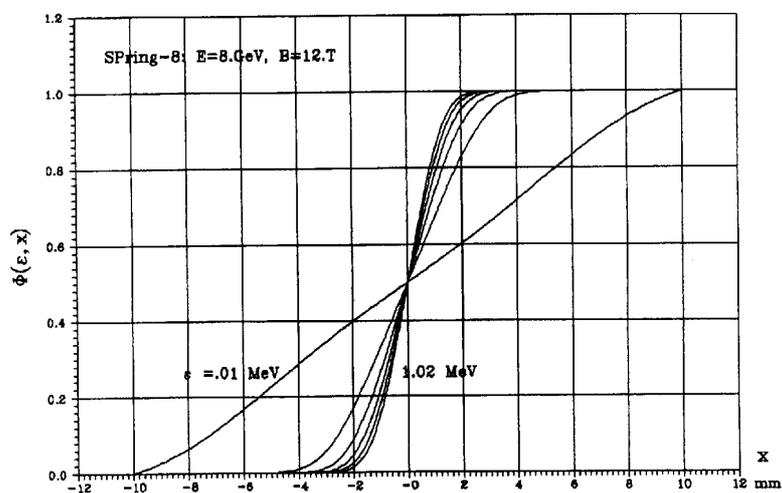


Рис. 9. Интегральное распределение мягкой части спектра фотонов СИ по вертикальной координате.

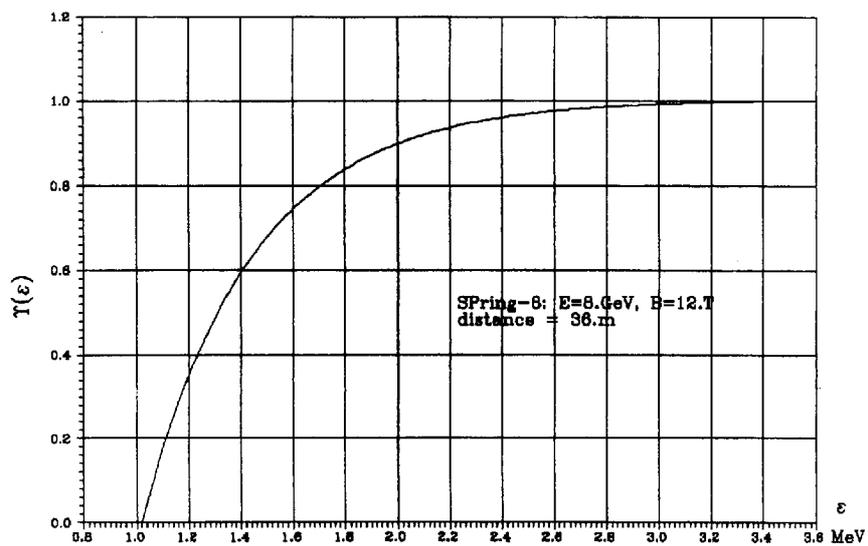


Рис. 10. Интегральное распределение жесткой части спектра фотонов СИ по энергии.

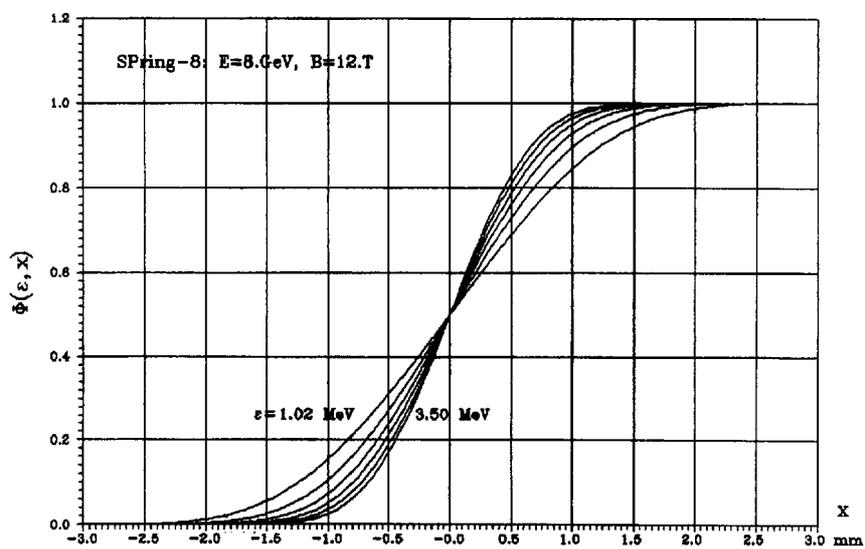


Рис. 11. Интегральное распределение жесткой части спектра фотонов СИ по вертикальной координате.

Примеры реальных спектров, полученных при моделировании на входе в мишень различной конфигурации, представлены на рис. 12 и 13.

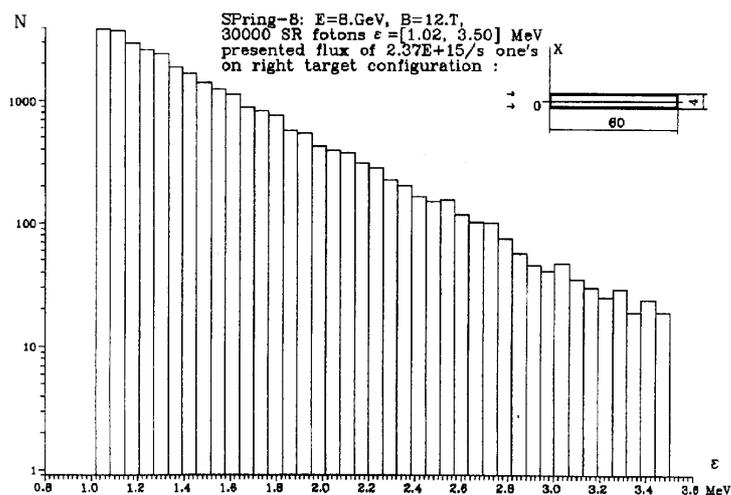


Рис. 12. Распределение фотонов СИ по их энергии для случая падения на мишень в прямоугольной конфигурации.

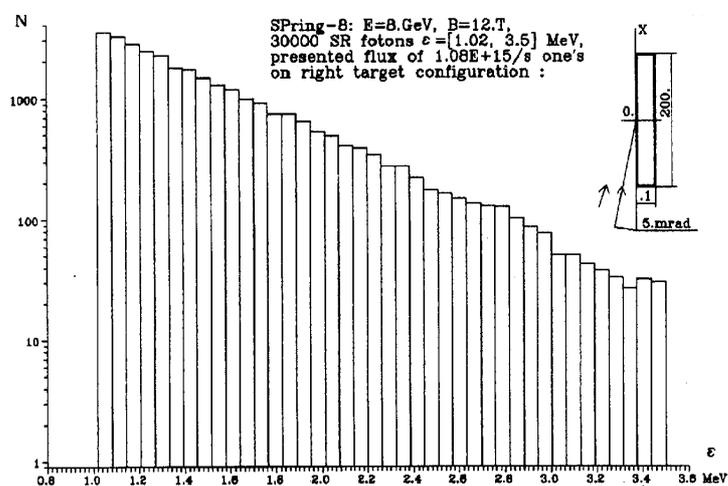


Рис. 13. Распределение фотонов СИ по их энергии для случая падения на наклонную тонкую мишень.

3. Вычисление спектра позитронов

В работе [1] были приведены некоторые результаты предварительных расчетов рождения (e^+ , e^-) пар и выхода позитронов при облучении плотных мишеней из тяжелых металлов синхротронным излучением накопителя SPring-8 со сверхпроводящим вигглером с полями 8–12 Т. Ниже даются дополнительные детали подобных расчетов.

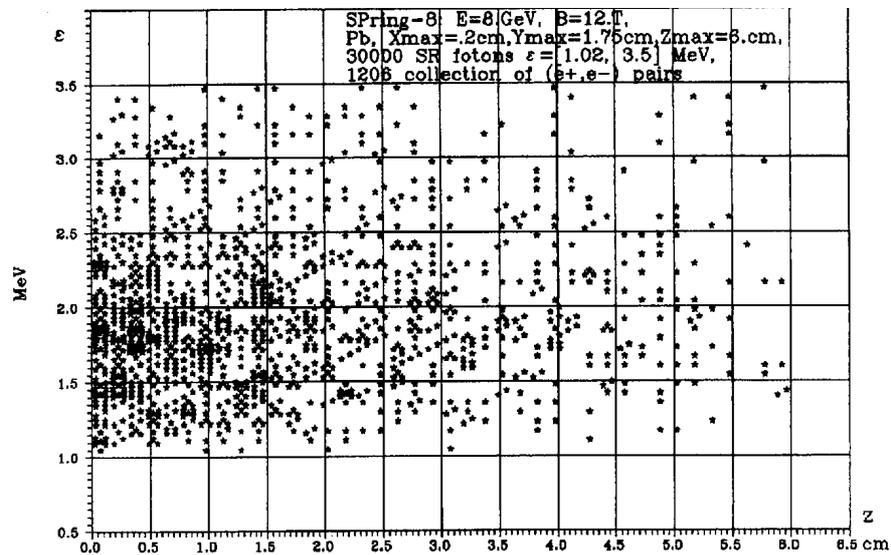


Рис. 14. Двумерное распределение рождения (e^+ , e^-) пар в свинцовой мишени в функции расстояния от места входа СИ и энергии фотонов СИ.

Поскольку для эффективной эмиссии позитронов из мишени нужно малое, менее 0.1 mm, расстояние от места рождения (e^+ , e^-) пар до поверхности выхода, а для максимально возможного рождения (e^+ , e^-) пар от фотонов СИ длина мишени в прямоугольной конфигурации должна быть ~ 2 –5 см при высоте не менее размеров пучка СИ, хорошие результаты расчета получаются лишь при расстояниях мишени от вигглера порядка 35–100 см, что пока представляется нереальным. По этим соображениям большая часть ре-

зультатов подобных вычислений, как представляющая лишь методический интерес, здесь не приводятся. Из них выбраны только те данные, которые позволяют производить оценки общего характера.

На рис. 14–23 приведены распределения рождения (e^+, e^-) пар в мишенях из свинца, урана и вольфрама в прямоугольной конфигурации рис.12 при отсутствии потерь жесткой компоненты СИ по высоте в приближении бесконечно длинной мишени. Эти данные необходимы для определения ожидаемой предельной эффективности источника позитронов на базе SPring-8, вне зависимости от конкретной конструкции мишени.

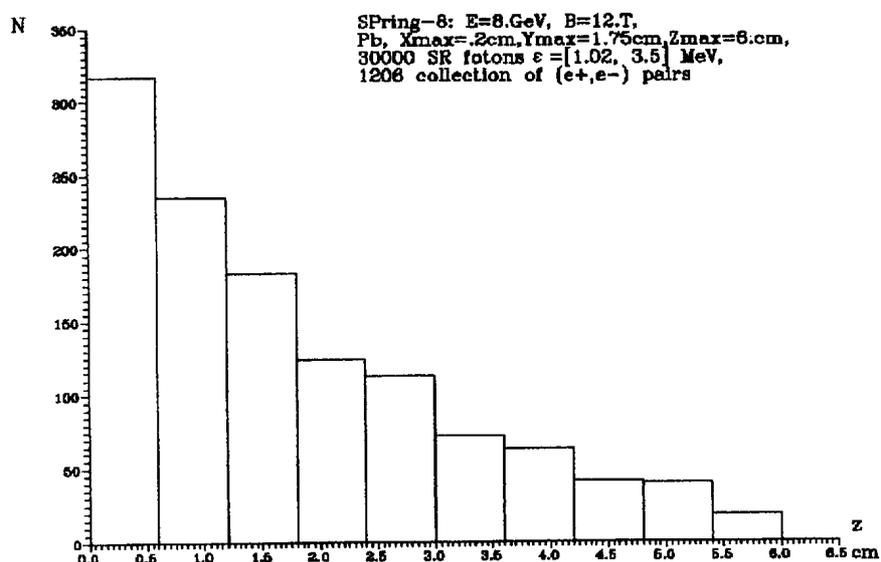


Рис. 15. Распределение рождения (e^+, e^-) пар в свинцовой мишени в функции расстояния от места входа СИ.

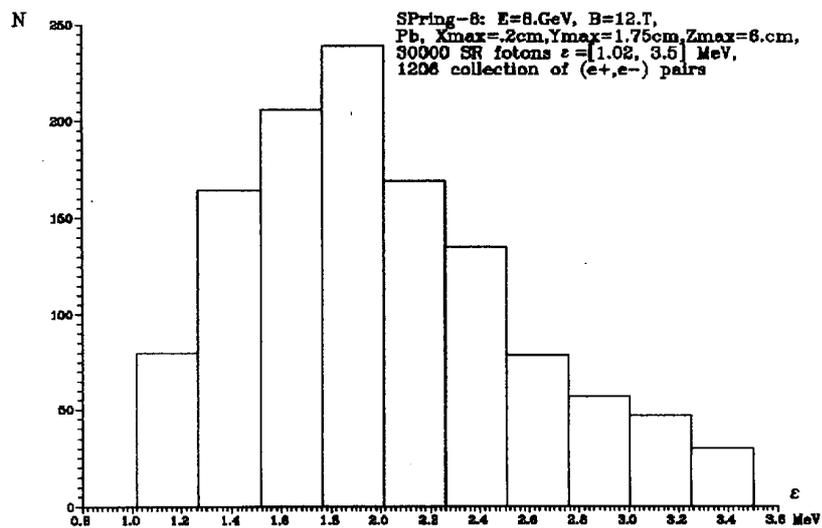


Рис. 16. Распределение рождения (e^+ , e^-) пар в свинцовой мишени в функции энергии фотонов СИ.

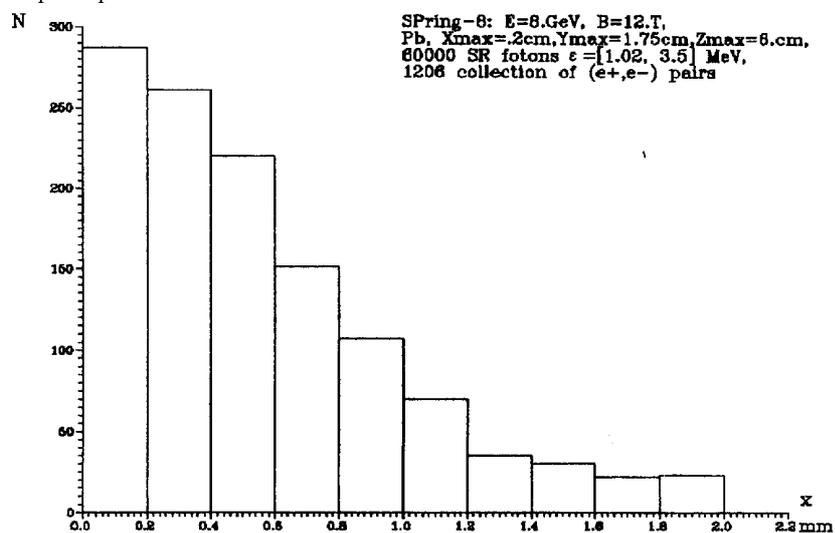


Рис. 17. Распределение рождения (e^+ , e^-) пар в свинцовой мишени в функции координаты по высоте от центра луча СИ.

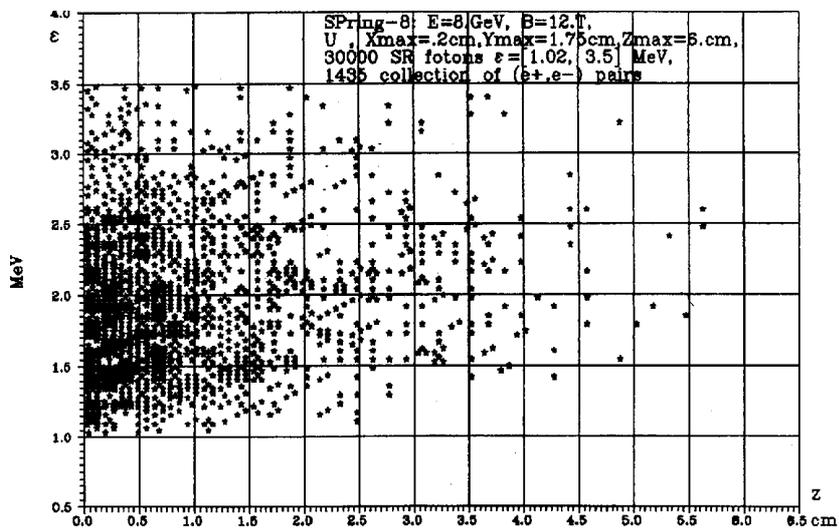


Рис. 18. Двумерное распределение рождения (e^+, e^-) пар в урановой мишени в функции расстояния от места входа СИ и энергии фотонов СИ.

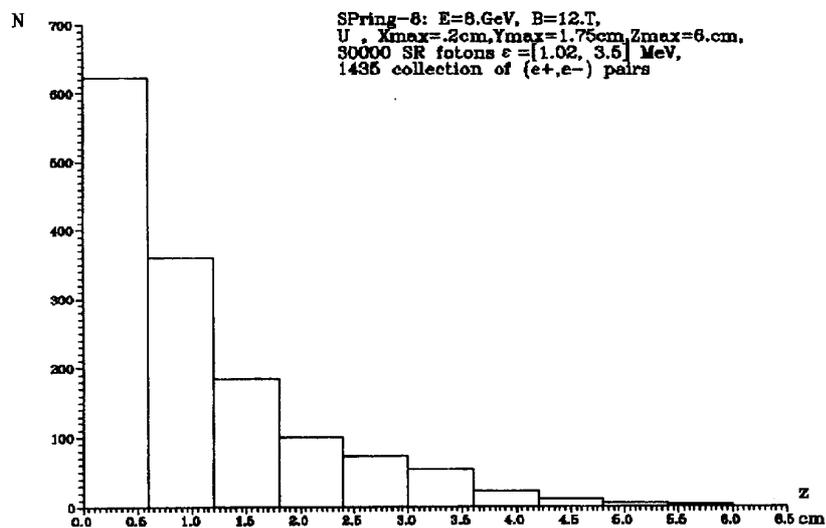


Рис. 19. Распределение рождения (e^+, e^-) пар в урановой мишени в функции расстояния от места входа СИ.

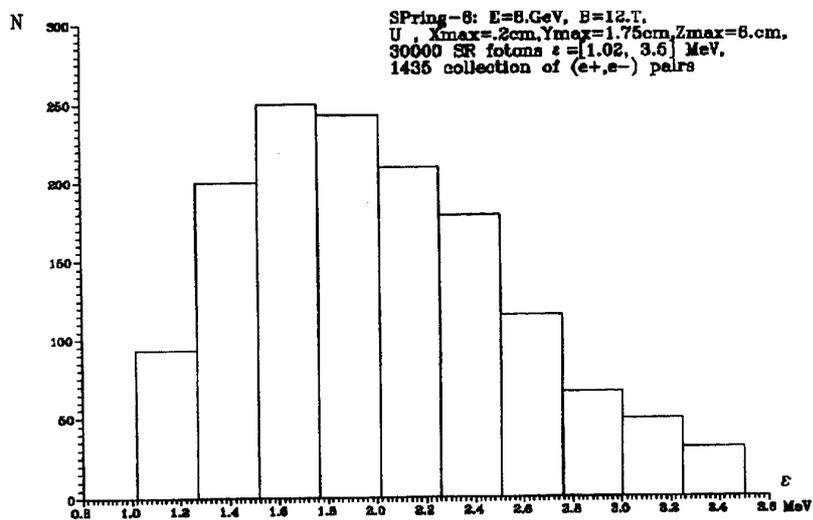


Рис. 20. Распределение рождения (e^+, e^-) пар в урановой мишени в функции энергии фотонов СИ.

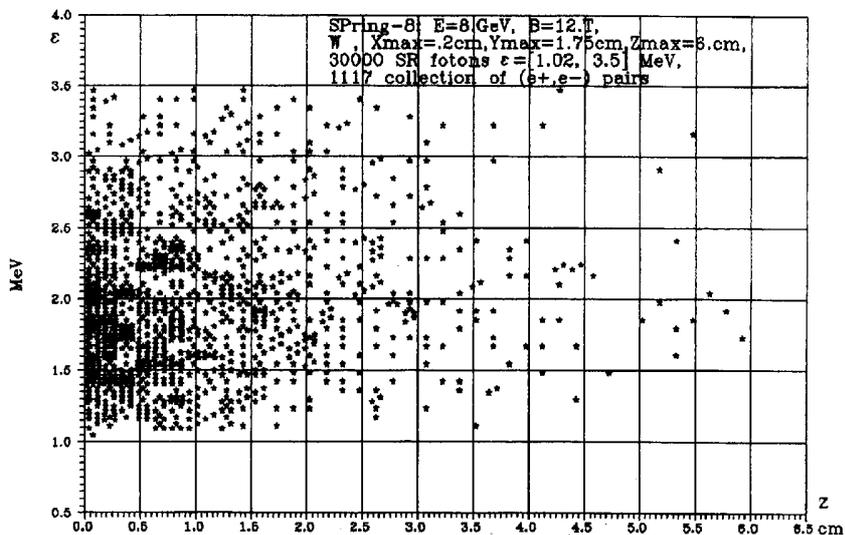


Рис. 21. Двумерное распределение рождения (e^+, e^-) пар в вольфрамовой мишени в функции расстояния от места входа СИ.

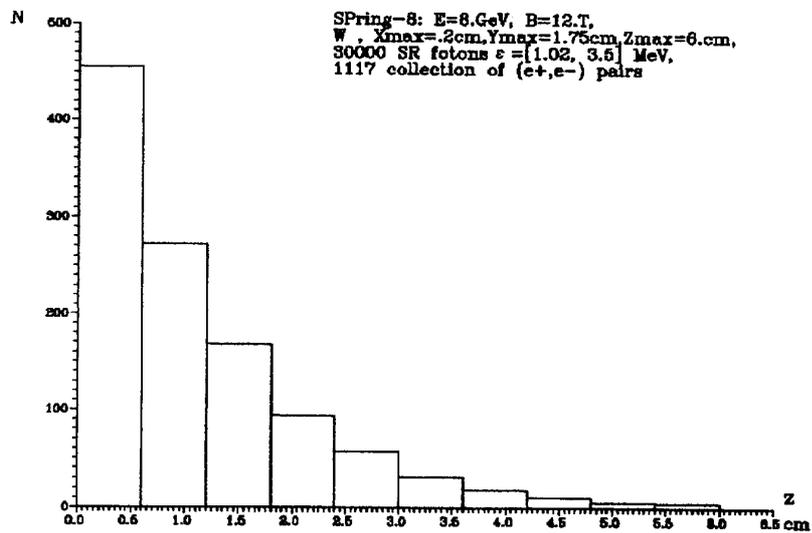


Рис. 22. Распределение рождения (e^+, e^-) пар в вольфрамовой мишени в функции расстояния от места входа СИ.

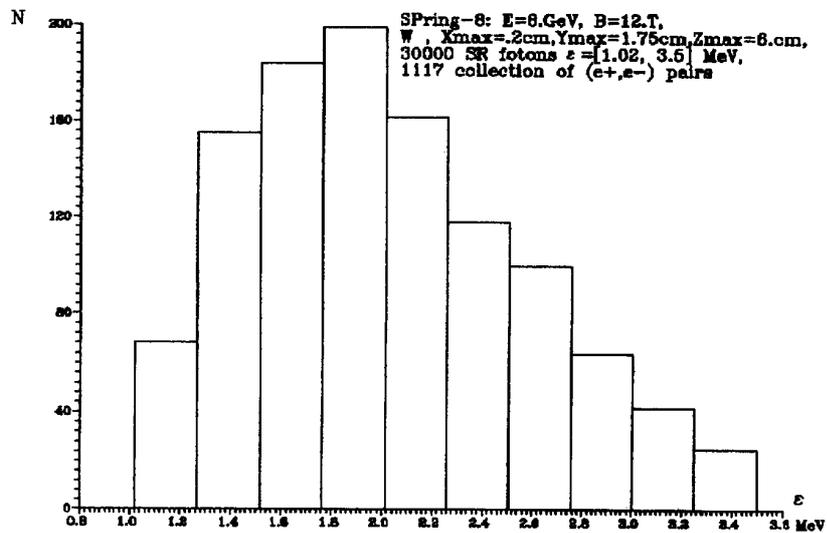


Рис. 23. Распределение рождения (e^+, e^-) пар в вольфрамовой мишени в функции энергии фотонов СИ.

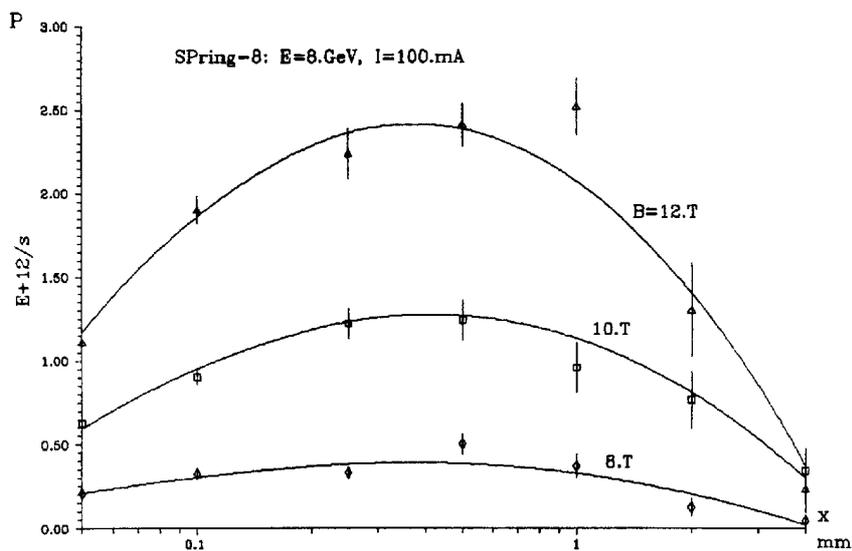


Рис. 24. Эмиссия позитронов из свинцовой мишени в прямоугольной конфигурации в функции высоты мишени для опорных значений поля вигглера.

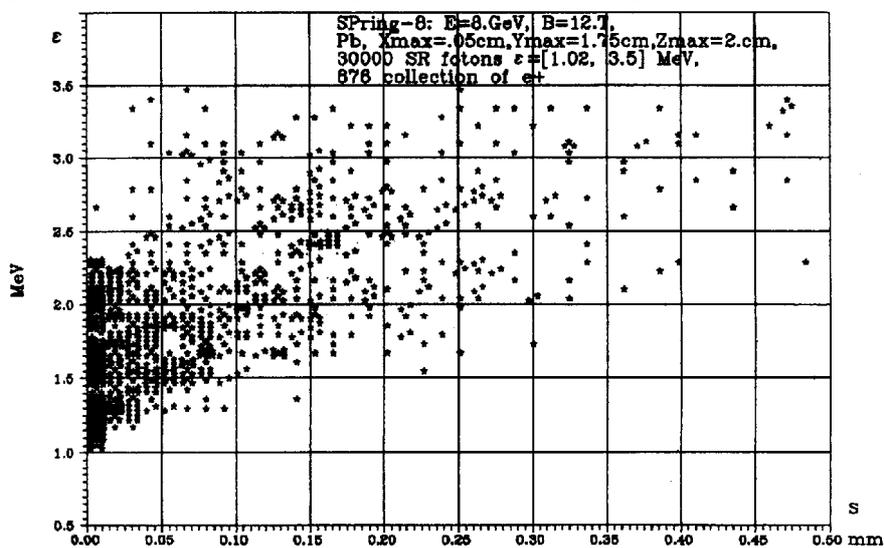


Рис. 25. Двумерное распределение позитронов по расстоянию от места рождения до остановки и по энергии фотонов СИ.

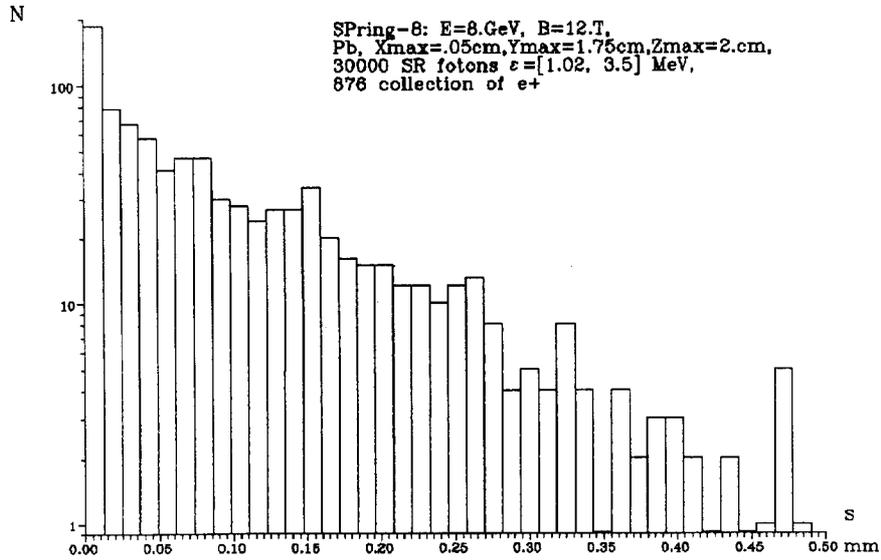


Рис. 26. Распределение позитронов по расстоянию от места рождения до остановки.

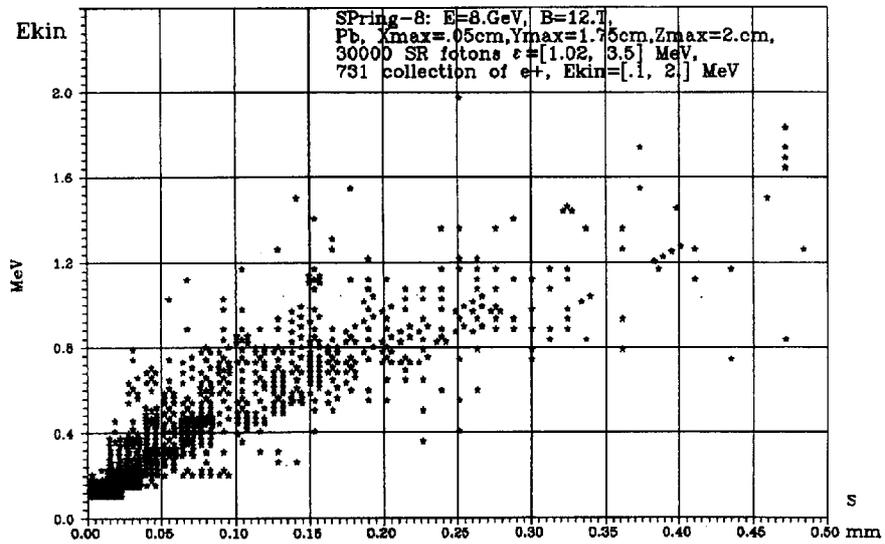


Рис. 27. Двумерное распределение позитронов по расстоянию от места рождения до остановки и по их кинетической энергии в момент рождения.

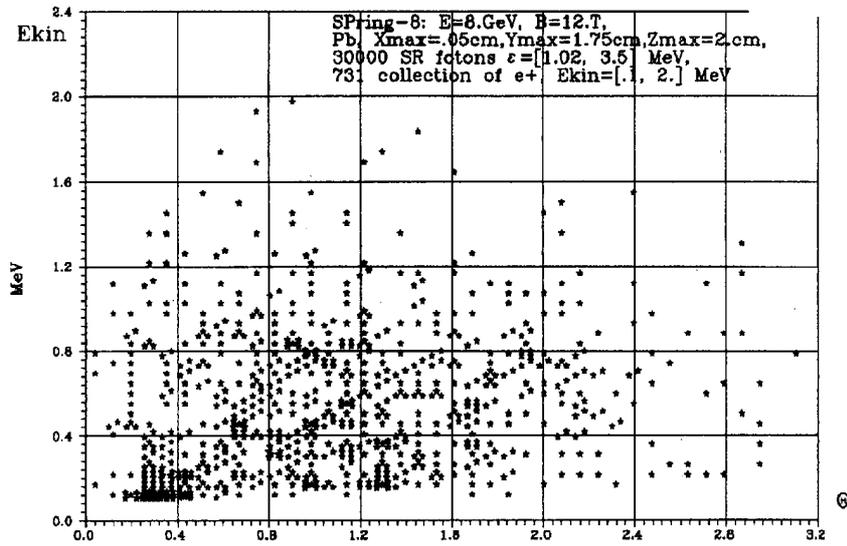


Рис. 28. Двумерное распределение позитронов по углу между направлением исходных фотонов СИ и лучем в точку остановки позитронов и по кинетической энергии позитронов в момент рождения.

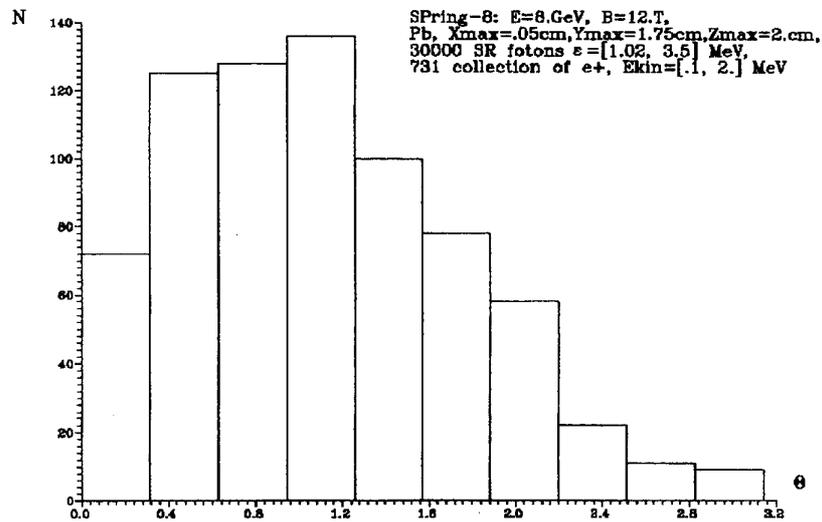


Рис. 29. Распределение позитронов по углу между направлением исходных фотонов СИ и лучем в точку остановки позитронов.

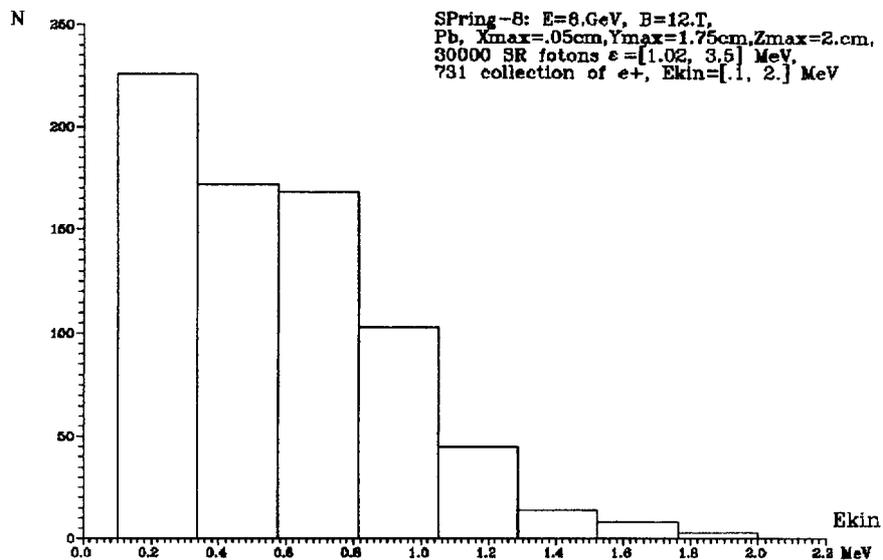


Рис. 30. Распределение позитронов по их кинетической энергии в момент рождения позитронов.

Далее на рис.31–41 приведены некоторые результаты моделирования рождения (e^+ , e^-) пар и выхода позитронов для тонкой свинцовой мишени в конфигурации рис. 13 с малым углом наклона СИ к поверхности мишени.

Рис.31 представляет двумерную гистограмму рождения (e^+ , e^-) пар, полученную в результате одного из сеансов моделирования по Монте-Карло наклонной свинцовой мишени в конфигурации рис.13.

На рис.32 и 33 приведены результаты суммирования по отдельным координатам гистограммы рис.31.

Часть позитронов, не достигающая поверхности и аннигилирующая в толще мишени, представлена на рис.34 и 35.

Другая часть, данные о которой изображены на рис.36–41, покидает мишень.

Конечно, подавляющее большинство позитронов аннигилируют лишь после термализации и остановки. Однако, они образуются, в основном, в толще мишени далеко от ее поверхности и потому относительный выход медленных позитронов мал и в данном сеансе моделирования не отражен.

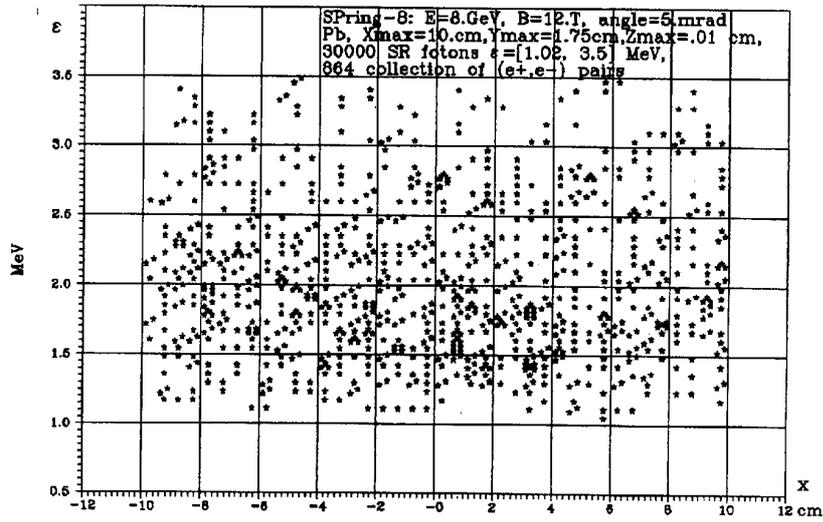


Рис. 31. Двумерное распределение рождения (e^+, e^-) пар по координате вдоль поверхности наклонной мишени и по энергии фотонов СИ.

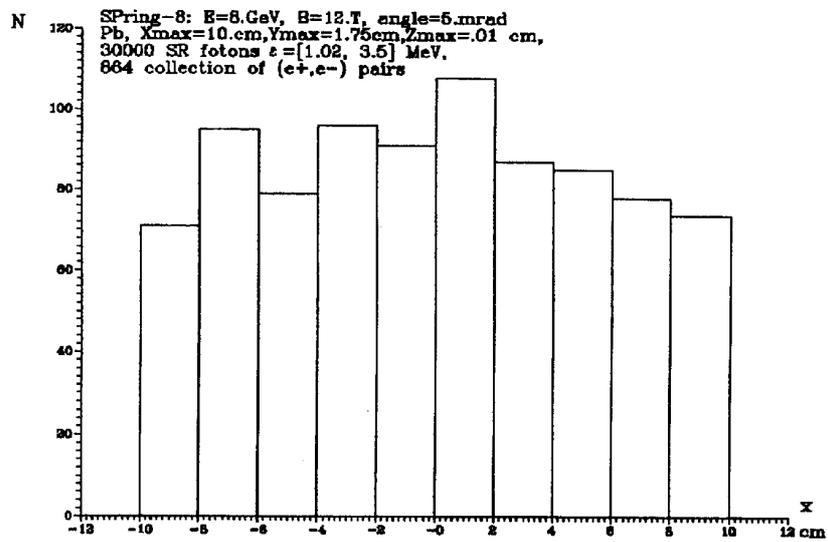


Рис. 32. Распределение рождения (e^+, e^-) пар по координате вдоль поверхности наклонной мишени.

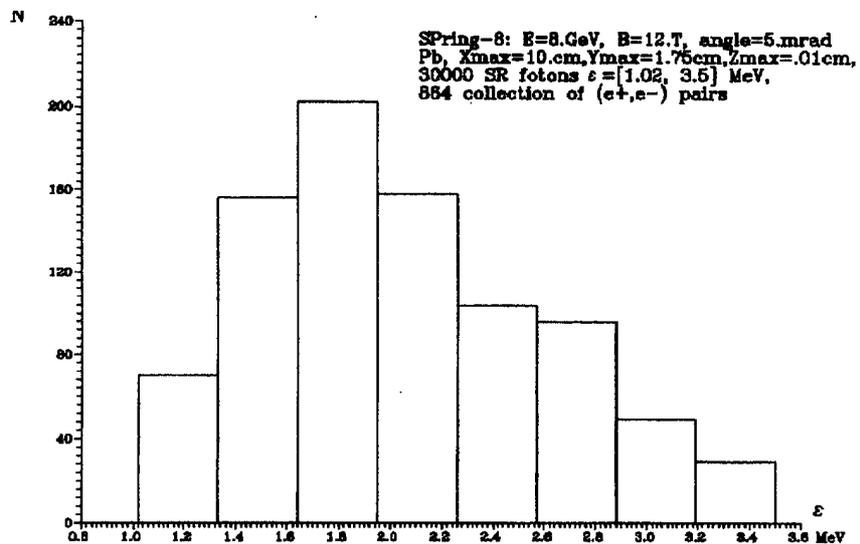


Рис. 33. Распределение рождения (e^+ , e^-) пар по энергии исходных фотонов СИ.

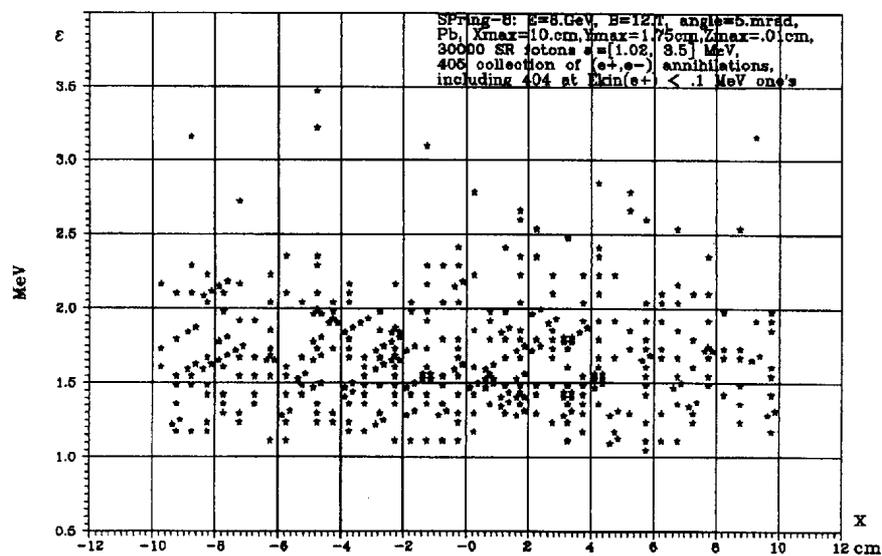


Рис. 34. Распределение аннигиляции позитронов в наклонной мишени по координате вдоль поверхности наклонной мишени и по энергии фотонов.

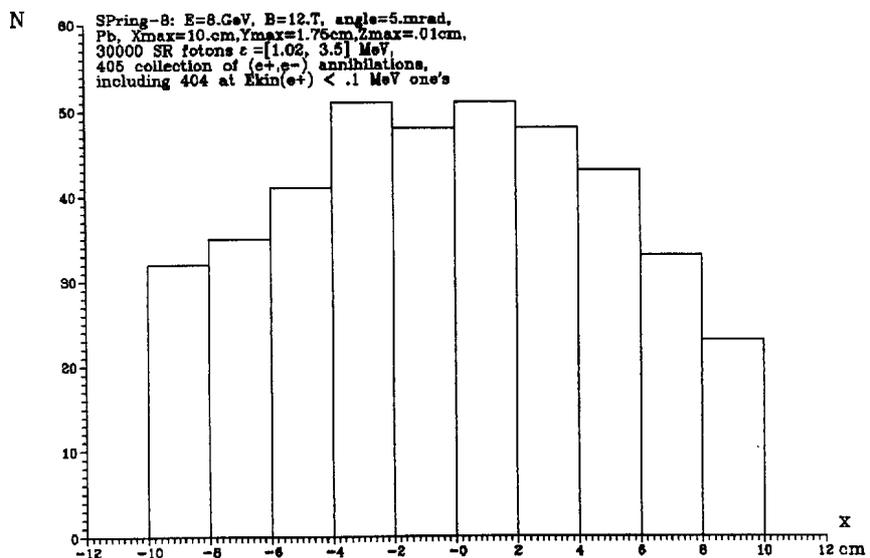


Рис. 35. Распределение аннигиляции позитронов по координате вдоль поверхности наклонной мишени.

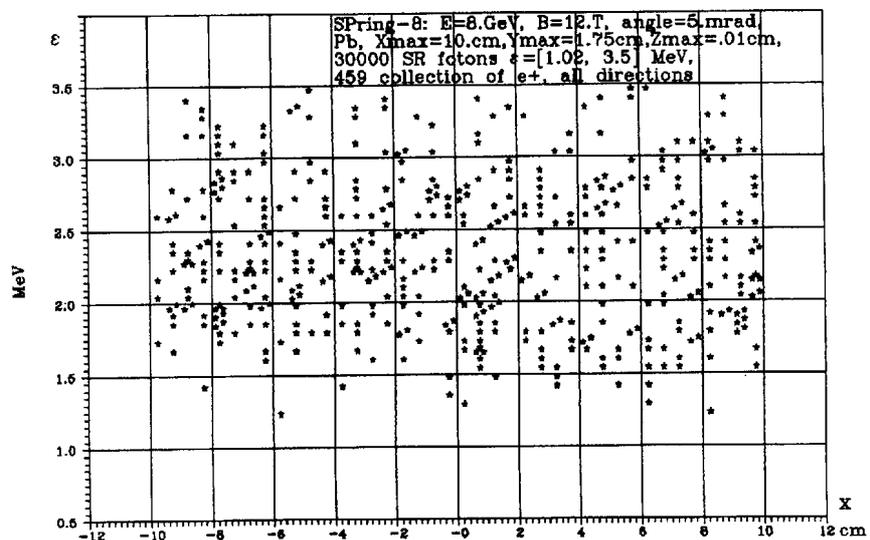


Рис. 36. Распределение эмиссии позитронов из наклонной мишени по координате вдоль поверхности наклонной мишени и по энергии фотонов СИ.

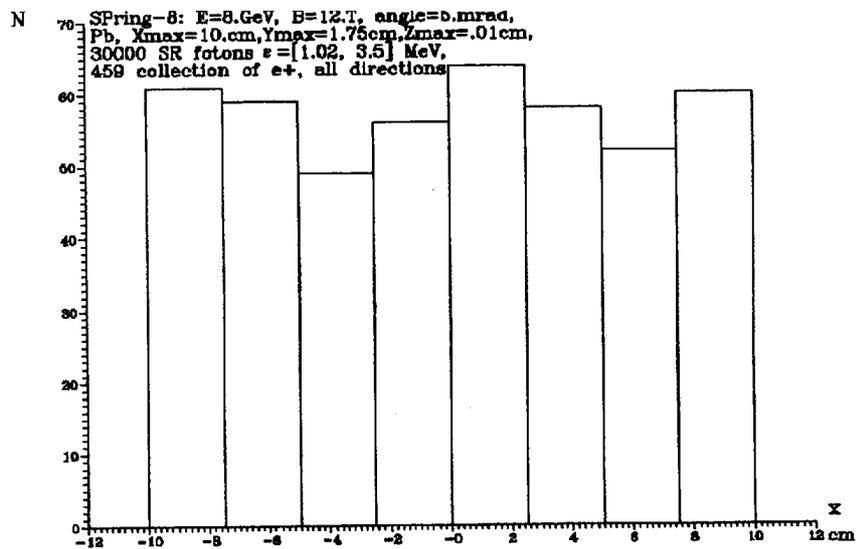


Рис. 37. Распределение эмиссии позитронов из наклонной мишени по координате вдоль поверхности наклонной мишени.

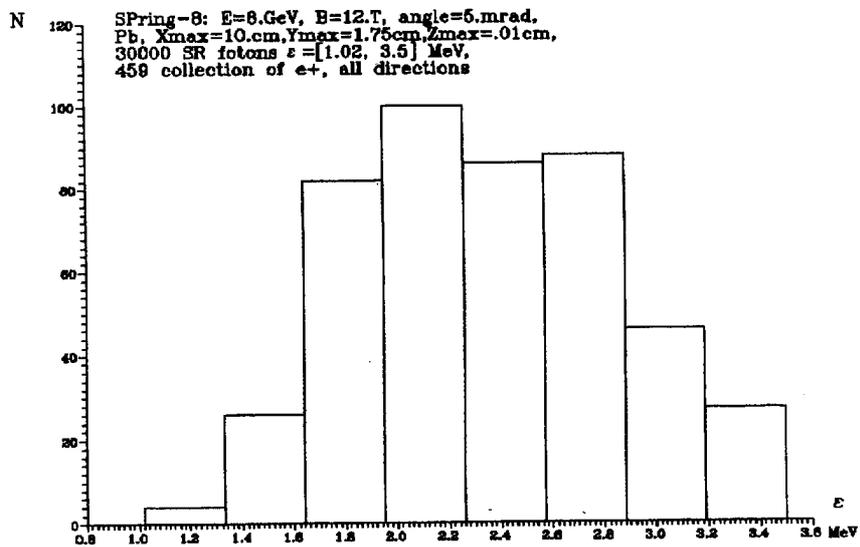


Рис. 38. Распределение эмиссии позитронов из наклонной мишени по энергии фотонов СИ.

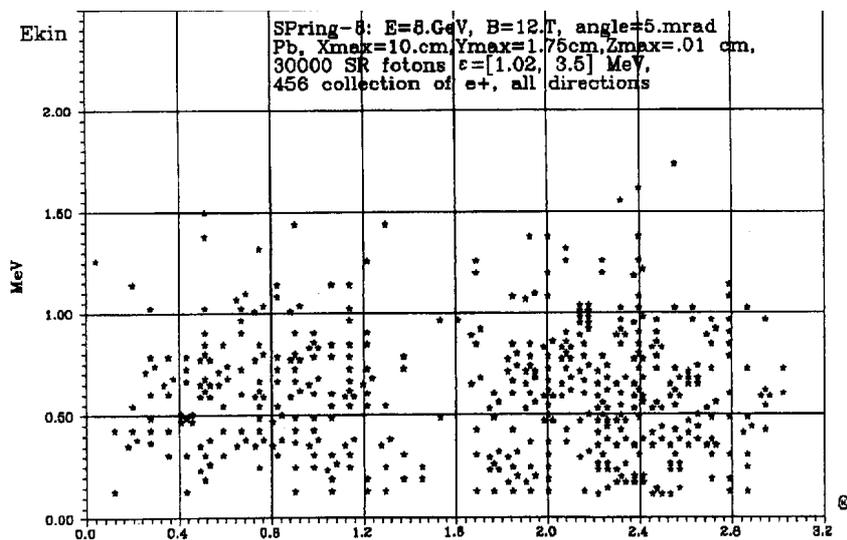


Рис. 39. Распределение эмиссии позитронов из наклонной мишени по кинетической энергии и по углу вылета.

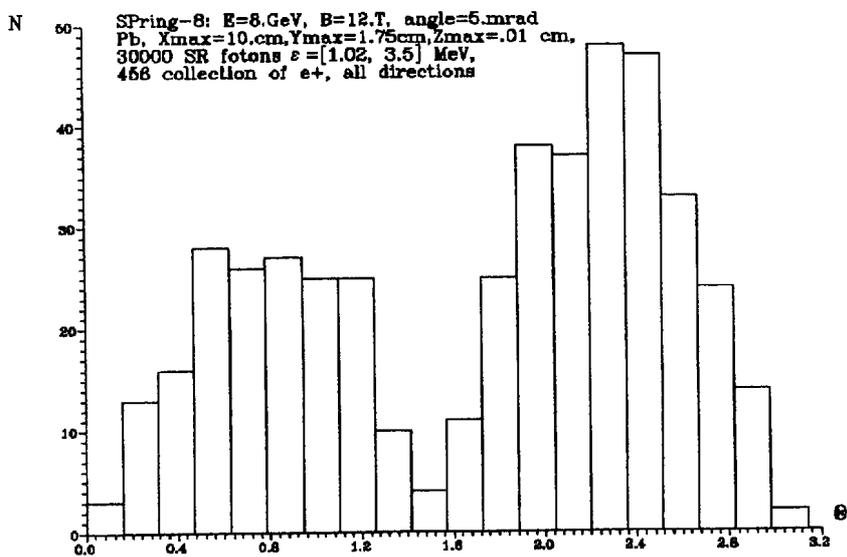


Рис. 40. Распределение эмиссии позитронов из наклонной мишени по углу вылета.

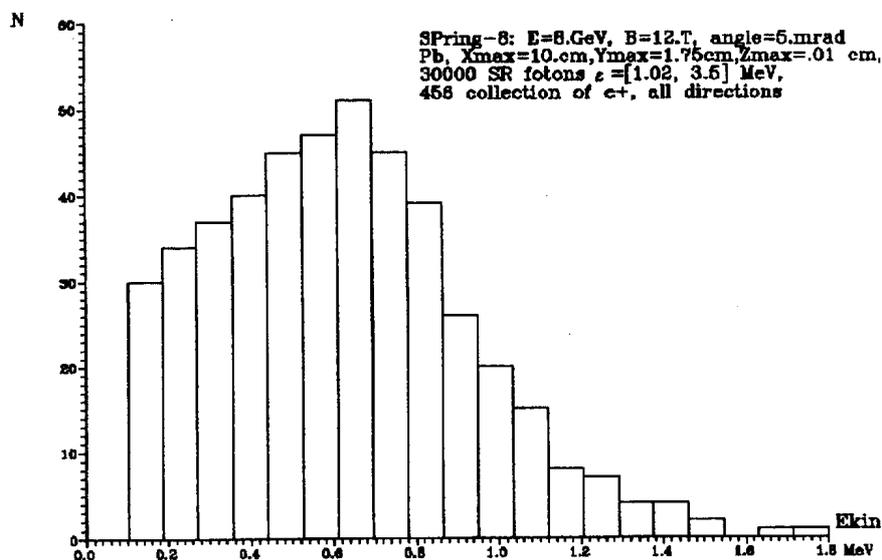


Рис. 41. Распределение эмиссии позитронов из наклонной мишени по кинетической энергии.

Результаты моделирования эмиссии позитронов из свинцовой мишени прямоугольной конфигурации при варьировании толщины мишени и при разных полях вигглера сведены в таблице 1. Рис.24 дает графическую интерпретацию данных таблицы 1.

В таблице 2 сведены сравнительные результаты моделирования для наклонной мишени из свинца в конфигурации рис.13 при варьировании магнитного поля вигглера, а в таблице 3 при варьировании угла наклона.

Таблица 1.

Эффективность рождения и выхода позитронов из свинцовой мишени на 100 mA электронного пучка в Spring-8 и на 1 mrad горизонтального угла СИ при расстоянии 35 m от вигглера для опорных значений магнитного поля в прямоугольной конфигурации мишени по рис.12 с нормальным к плоскости мишени падением СИ.

SC wiggler field B [T]	target height X [mm]	e^+ /phot (produced)	e^+ /phot (emitted)	phot [1/s] (total)	e^+ [1/s] (emitted)
12.0	4.00	$789/3 \cdot 10^4$	$3/3 \cdot 10^4$	$2.37 \cdot 10^{15}$	$(2.37 \pm 1.4) \cdot 10^{11}$
	2.00	$908/3 \cdot 10^4$	$21/3 \cdot 10^4$	$1.86 \cdot 10^{15}$	$(1.30 \pm 28) \cdot 10^{12}$
	1.00	$2906/9 \cdot 10^4$	$210/9 \cdot 10^4$	$1.08 \cdot 10^{15}$	$(2.52 \pm 17) \cdot 10^{12}$
	0.50	$9757/9 \cdot 10^4$	$384/9 \cdot 10^4$	$5.64 \cdot 10^{14}$	$(2.41 \pm 13) \cdot 10^{12}$
	0.25	$911/3 \cdot 10^4$	$236/3 \cdot 10^4$	$2.85 \cdot 10^{14}$	$(2.24 \pm 15) \cdot 10^{12}$
	0.10	$979/3 \cdot 10^4$	$500/3 \cdot 10^4$	$1.14 \cdot 10^{14}$	$(1.90 \pm 08) \cdot 10^{12}$
	0.05	$851/3 \cdot 10^4$	$585/3 \cdot 10^4$	$5.71 \cdot 10^{13}$	$(1.11 \pm 05) \cdot 10^{12}$
10.0	4.00	$651/3 \cdot 10^4$	$7/3 \cdot 10^4$	$1.47 \cdot 10^{15}$	$(3.43 \pm 1.3) \cdot 10^{11}$
	2.00	$736/3 \cdot 10^4$	$19/3 \cdot 10^4$	$1.20 \cdot 10^{15}$	$(7.60 \pm 1.7) \cdot 10^{11}$
	1.00	$719/3 \cdot 10^4$	$40/3 \cdot 10^4$	$7.15 \cdot 10^{14}$	$(9.53 \pm 1.5) \cdot 10^{11}$
	0.50	$775/3 \cdot 10^4$	$99/3 \cdot 10^4$	$3.75 \cdot 10^{14}$	$(1.24 \pm 12) \cdot 10^{12}$
	0.25	$756/3 \cdot 10^4$	$194/3 \cdot 10^4$	$1.89 \cdot 10^{14}$	$(1.22 \pm 09) \cdot 10^{12}$
	0.10	$725/3 \cdot 10^4$	$356/3 \cdot 10^4$	$7.60 \cdot 10^{13}$	$(9.02 \pm 49) \cdot 10^{11}$
	0.05	$783/3 \cdot 10^4$	$495/3 \cdot 10^4$	$3.80 \cdot 10^{13}$	$(6.27 \pm 28) \cdot 10^{11}$
8.0	4.00	$626/3 \cdot 10^4$	$2/3 \cdot 10^4$	$7.25 \cdot 10^{14}$	$(4.83 \pm 3.4) \cdot 10^{10}$
	2.00	$524/3 \cdot 10^4$	$6/3 \cdot 10^4$	$6.22 \cdot 10^{14}$	$(1.24 \pm 51) \cdot 10^{11}$
	1.00	$576/3 \cdot 10^4$	$29/3 \cdot 10^4$	$3.83 \cdot 10^{14}$	$(3.70 \pm 69) \cdot 10^{11}$
	0.50	$619/3 \cdot 10^4$	$74/3 \cdot 10^4$	$2.03 \cdot 10^{14}$	$(5.01 \pm 58) \cdot 10^{11}$
	0.25	$544/3 \cdot 10^4$	$96/3 \cdot 10^4$	$1.03 \cdot 10^{14}$	$(3.30 \pm 34) \cdot 10^{11}$
	0.10	$568/3 \cdot 10^4$	$236/3 \cdot 10^4$	$4.13 \cdot 10^{13}$	$(3.25 \pm 21) \cdot 10^{11}$
	0.05	$550/3 \cdot 10^4$	$301/3 \cdot 10^4$	$2.07 \cdot 10^{13}$	$(2.08 \pm 12) \cdot 10^{11}$

Таблица 2.

Эффективность выхода позитронов из наклонной свинцовой мишени на 100 мА электронного пучка в Spring-8 и на 1 mrad горизонтального угла СИ при расстоянии 35 м от вигглера с опорными значениями магнитного поля для конфигурации мишени по рис.13 с одним и тем же углом наклона луча СИ к плоскости мишени 5 mrad.

SC wiggler field B [Т]	target height X [mm]	e^+ /phot (produced)	e^+ /phot (emitted)	phot [1/s] (total)	e^+ [1/s] (emitted)
12.0	200.	$899/3 \cdot 10^4$	$469/3 \cdot 10^4$	$1.08 \cdot 10^{15}$	$(1.68 \pm 0.8) \cdot 10^{13}$
10.0	200.	$671/3 \cdot 10^4$	$311/3 \cdot 10^4$	$7.15 \cdot 10^{14}$	$(7.41 \pm 4.2) \cdot 10^{12}$
8.0	200.	$541/3 \cdot 10^4$	$215/3 \cdot 10^4$	$3.83 \cdot 10^{14}$	$(2.74 \pm 1.9) \cdot 10^{12}$

Таблица 3.

Эффективность выхода позитронов из наклонной свинцовой мишени на 100 мА электронного пучка в Spring-8 и на 1 mrad горизонтального угла СИ при расстоянии 35 м от вигглера с магнитным полем 8 Т для конфигурации мишени по рис.13 при вариации угла наклона СИ к плоскости мишени.

A [mrad]	X [mm]	Z [mm]	e^+ /phot (produced)	e^+ /phot (emitted)	phot [1/s] (total)	e^+ [1/s] (emitted)
5.0	200.0	0.10	$541/3 \cdot 10^4$	$215/3 \cdot 10^4$	$3.83 \cdot 10^{14}$	$(2.74 \pm 1.9) \cdot 10^{12}$
7.5	133.3	0.15	$576/3 \cdot 10^4$	$175/3 \cdot 10^4$	$3.83 \cdot 10^{14}$	$(2.23 \pm 1.7) \cdot 10^{12}$
10.0	100.0	0.20	$498/3 \cdot 10^4$	$122/3 \cdot 10^4$	$3.83 \cdot 10^{14}$	$(1.56 \pm 1.4) \cdot 10^{12}$
15.0	66.7	0.30	$461/3 \cdot 10^4$	$66/3 \cdot 10^4$	$3.83 \cdot 10^{14}$	$(8.43 \pm 1.0) \cdot 10^{11}$

4. Заключение

В данной работе представлены первые результаты моделирования программным комплексом SCIN_PC физических процессов источника медленных позитронов. Одновременно они являются демонстрацией возможностей используемых SCIN_PC программ, которые постоянно дополняются и со-

вершенствуются для соответствия вновь возникающим задачам и пока не имеют статуса законченной разработки. В публикациях [4] – [7] можно найти некоторые дополнительные материалы по данному вопросу.

Автор благодарен Кулипанову Г.Н., Мезенцеву Н.А. и Панченко В.Е. за интерес к работе и критический анализ результатов.

Литература

- [1] *A. Ando, V.N. Belyaev, S. Daté, H. Kamitsubo, A.V. Kiselev, G.N. Kulipanov, N. Kumagai, N.A. Mezentsev, Y. Miyahara, T. Nakamura, A.N. Skrinsky, K. Soutome, M. Takao, H. Tanaka, and I.S. Voronchev.* J. of Synch. Rad., 3 (1996) 201-206.
- [2] *A. Ando, S. Daté, M.G. Fedurin, M. Hara, H. Kamitsubo, A.V. Kiselev, G.N. Kulipanov, N. Kumagai, N.A. Mezentsev, Y. Miyahara, T. Nakamura, H. Ohkuma, V.A. Shkaruba, A.N. Skrinsky, K. Soutome, M. Takao, and H. Tanaka.* J. of Synch. Rad., 5 (1998) 360-362.
- [3] *S. Daté, M. Fedurin, M. Hara, H. Kamitsubo, A. Kiselev, G. Kulipanov, N. Kumagai, N. Mezentsev, Y. Miyahara, T. Nakamura, H. Ohkuma, V. Panchenco, V. Plokchoi, V. Shkaruba, A. Skrinsky, K. Soutome, M. Takao, and H. Tanaka.* Докл. на конф. SRSMS-2, Кобе, Япония (1998).
- [4] Annual Report on the RIKEN/Budker INP Low Energy Positron Source project №767-97 supported by ISTC, Russia (1998).
- [5] Final Report on the RIKEN/Budker INP Low Energy Positron Source project №767B supported by ISTC, Russia (1999).
- [6] *A.V. Kiselev, V.D. Shiltsev,* Pr. TESLA 96-04, Hamburg, 1996.
- [7] *A.V. Kiselev.* 12-th Nat. Synchrotron Radiation Conf. SR-98, Novosibirsk, Russia (1998).
- [8] *Ф.М. Израйлев, В.С. Сьмах, В.А. Таюрский, Б.В. Чуриков, В.Ф. Шмаков.* Препринт 63-73, Институт Ядерной Физики СО АН СССР, Новосибирск (1973).
- [9] *В.А. Таюрский.* Препринт 89-16, Институт Ядерной Физики СО АН СССР, Новосибирск (1989).
- [10] *А.Д. Букин, В.Н. Иванченко, М.Ю. Лельчук, В.А. Таюрский, С.И. Эйдельман, В.И. Юрченко.* Препринт 84-33, Институт Ядерной Физики СО АН СССР, Новосибирск (1984).