

Санкт-Петербургский Государственный Университет

Кафедра Ядерно-физических Методов Исследования



**Влияние геометрии отдельных секций
на характеристики изогнутого нейтронотода**

Магистерская диссертация

студента Гайсина А.У.

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., доц. Москвин Е.В.

Рецензент:

к.ф.-м.н., с.н.с. Булкин А.П.

Санкт-Петербург

2017

Оглавление

Введение	4
1 Нейтроноводы	7
1.1 Нейтронная оптика	7
1.1.1 Волновые свойства нейтрона	7
1.1.2 Полное внешнее отражение	8
1.1.3 Зеркала и суперзеркала	11
1.2 Суперзеркальные нейтроноводы	14
1.2.1 Прямой нейтроновод	14
1.2.2 Изогнутый нейтроновод	16
1.3 Механизмы потерь потока в нейтроноводах	18
Выводы и формулировка задач	21
2 Моделирование нейтроноводов	22
2.1 Расчет нейтронных потоков в оптических устройствах и системах нейтронного транспорта	22
2.2 Программный пакет McStas	24
2.3 Применение McStas	24
3 Результаты	26
3.1 Геометрические механизмы потерь потока в изогнутом нейтроноводe	26
3.1.1 Влияние приближение окружности многоугольником	26
3.1.2 Линейные смещения	28
3.1.3 Угловые отклонения	29
3.2 Подход к выбору оптимальной длины нейтроноводной секции	30

3.3	Примеры расчетов оптимальной длины секции для изогнутых нейтроноводов	32
3.3.1	Нейтроновод Н25, ILL, Гренобль	32
3.3.2	Нейтроновод НЗ-2, ПИК, Гатчина	33
	Заключение	35
	Литература	36
	Приложение А	41

Введение

Актуальность темы исследования

Нейтронное излучение широко используется в материаловедческих исследованиях, а также в фундаментальной физике. При существующих на сегодня методах и технологиях нейтронные источники различных типов практически достигли предельно возможных светимостей. Поэтому на первый план выходят задачи по оптимизации работы исследовательских установок, а также средств доставки нейтронных потоков к ним — нейтроноводов. Для получения наиболее качественных условий эксперимента необходимо доставить на установку высокоинтенсивный пучок тепловых нейтронов с низким фоном гамма-излучения и быстрых нейтронов. Для фильтрации вредоносной доли спектра используются изогнутые нейтроноводы [1–4]. Реальный изогнутый нейтроновод представляет собой набор отдельных прямых секций, которые лишь с некоторой точностью аппроксимируют контур заданной кривой. Помимо этого, сборка осуществляется с минимальными допусками по юстировке. Данные факторы непосредственно влияют на пропускание нейтроновода, то есть, на эффективность его работы в качестве устройства нейтронного транспорта. Исследования характера и степени этих влияний - это важный вклад в развитие нейтронной оптики и необходимы для повышения качества экспериментов на нейтронах.

Цель работы

Актуальность вышеизложенных проблем определяет цель данной выпускной квалификационной работы — изучить влияние длины нейтроноводных секций на пропускание изогнутого нейтроновода.

Методология

Для расчетов нейтронно–оптических процессов и анализа потерь в полезном потоке применялся программный пакет McStas, разработанный для моделирования методом Монте–Карло взаимодействия нейтронов с веществом, в том числе, оптическими устройствами.

Содержание

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения.

Первая глава имеет обзорный характер и состоит из трех разделов. В первом разделе изложены основные физические принципы нейтронной оптики. Во втором разделе дается обзор по рассматриваемым типам нейтронных волноводов. В третьем разделе описываются механизмы потерь потока в нейтронных волноводах.

Во второй главе кратко описываются различные методы расчета нейтронных потоков. Изложены принципы работы программ, основанных на методе Монте–Карло. Описано применение программного пакета McStas, выбранного в качестве основного рабочего инструмента для данных вычислений.

Третья глава содержит полученные результаты. Проанализировано влияние геометрических факторов потерь. Сформулирован подход к нахождению оптимальной длины секции. Приведены примеры нахождения оптимальной длины оптической секции для конкретных нейтронных волноводов.

В заключении сформулированы основные выводы из проделанной работы. Приложение содержит универсальный код McStas модели для расчета нейтронно-физических характеристик реального нейтронного волновода.

Положения, выносимые на защиту

1. Создана модель расчета пропускания изогнутого нейтронного волновода с учетом приближения короткими секциями и пространственных разъюстировок
2. Проанализированы геометрические факторы потерь в нейтронном волноводе.

Оценен характер их зависимости от длины секции.

3. Показана возможность проведения оптимизации по длине нейтронОВОД-ной секции.

Апробация

Результаты работы были представлены в рамках следующего доклада: А. У. Гайсин, К. А. Павлов, Е. В. Москвин «Влияние геометрии отдельных секций на характеристики изогнутого нейтронОВОДА», «ФКС-2017», 11–16 марта 2017, Роcцино, стендовый доклад.

Глава 1

Нейтроноводы

1.1 Нейтронная оптика

1.1.1 Волновые свойства нейтрона

В силу принципа корпускулярно-волнового дуализма нейтрон может рассматриваться как частица или как волна. Если длина волны де Бройля нейтрона

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{mv}, \quad (1.1)$$

где \hbar - редуцированная постоянная Планка, m - масса нейтрона, а v - скорость, сопоставима с межатомными расстояниями порядка 10^{-8} см, то можно провести аналогию между оптическими свойствами фотона и нейтрона [5]. Нейтронные волны подобно световым могут интерферировать и дифрагировать, что ведет к ряду оптических явлений.

Рассмотрим плоскую нейтронную волну с волновым вектором k_i

$$\psi = e^{ik_i r}, \quad (1.2)$$

падающую под углом θ_i к гладкой плоской поверхности среды, как показано на рисунке 1.1. Преломленная волна k_i распространяется в среде под углом θ_i , а отраженная волна с волновым вектором k_r под углом θ_r .

Введем потенциал взаимодействия нейтрона со средой $V(r)$ равный:

$$V(r) = \frac{2\pi\hbar^2}{m} \sum N_i b_i, \quad (1.3)$$

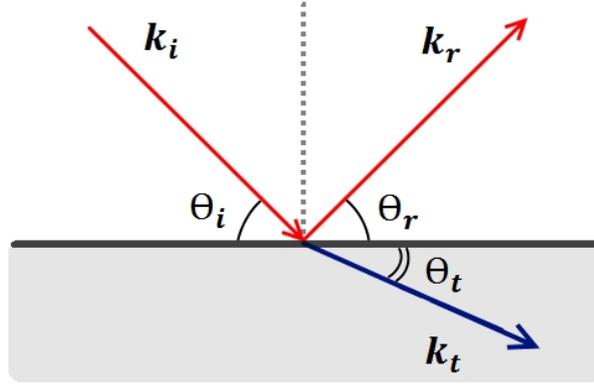


Рис. 1.1. Падающая, отраженная и преломленная нейтронные волны на гладкой плоской границе

где N_i - число ядер определенного сорта в единице объема вещества, а b_i - длина когерентного рассеяния, величина, характеризующая способность атомов определенного химического элемента рассеивать нейтроны.

Из дальнейшего рассмотрения взаимодействия нейтронной волны со средой следуют:

1. Закон Снеллиуса в углах скольжения:

$$\frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_t} = n, \quad (1.4)$$

где показатель преломления на границе среды определяется следующим образом:

$$n = \frac{k_i}{k_t} \quad (1.5)$$

2. Закон зеркального отражения:

$$\theta_i = \theta_r \quad (1.6)$$

1.1.2 Полное внешнее отражение

Согласно общей теореме физической оптики, показатель преломления связан с амплитудой рассеяния вперед $f(0)$ следующим образом [6]:

$$n^2 = 1 + \frac{\lambda^2}{\pi} \sum_i N_i f_i(0), \quad (1.7)$$

где сумма берется по различным типам рассеивающих центров. Типы рассеивающего центра для нейтронных волн определяется химическим элементом, видом изотопа и спиновым состоянием нейтрона и ядра.

Учтем магнитное взаимодействие нейтрона со средой и ограничимся содержанием атомов одного сорта. Тогда показатель преломления нейтронной волны на границе среды примет следующий вид:

$$n = \left(1 - \lambda^2 \left[\frac{1}{\pi} N b_{coh} \pm \frac{m}{2\pi^2 \hbar^2} \mu B \right] \right)^{\frac{1}{2}} \approx 1 - \lambda^2 \left[\frac{1}{2\pi} N b_{coh} \pm \frac{m}{4\pi^2 \hbar^2} \mu B \right] \quad (1.8)$$

где μ – магнитный момент нейтрона, а B – магнитная индукция среды. Направление спина нейтрона при взаимодействии со средой определяет знак перед магнитным членом. Зависимость коэффициента преломления от магнитного поля среды широко используется в технике для поляризации нейтронного пучка [7, 8]. Спин-манипуляционная и поляризующая оптика находятся вне рамок задач, решаемых в нашей работе, поэтому более подробно вклад магнитного потенциала мы рассматривать не будем.

Из выражения (1.7) видно, что, чем меньше длина волны, тем ближе к единице показатель преломления. Стоит отметить, что даже в случае достаточно длинных волн нейтронного излучения коэффициент преломления близок к единице. К примеру, для длины волны $\lambda = 1 \text{ \AA}$, $1 - n \approx 10^{-6}$. Таким образом, выражение для показателя преломления может быть упрощено, как это показано в (1.8).

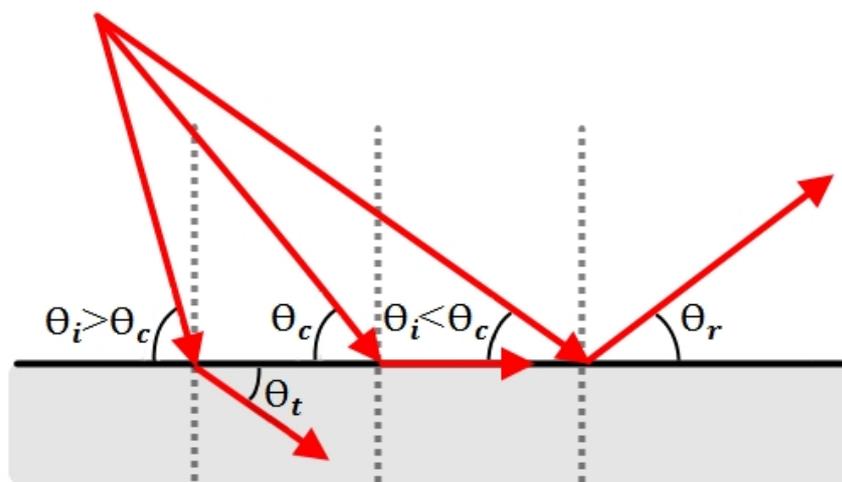


Рис. 1.2. Преломление и полное внешнее отражение

Обратим внимание на то, что для большинства веществ $b_{coh} > 0$, а значит, $n < 1$. Рассмотрим для них процесс преломления на границе раздела сред (рис. 1.2). Как следует из Закона Снеллиуса (ур .1.4), с уменьшением угла падения θ_i угол преломления θ_t уменьшается. При некотором угле падения θ_i , называемым критическим углом θ_c , нейтронный луч начнет полностью отражаться от границы раздела сред. Данное явление называется полным внешним отражением.

Характерные значения углов для данных эффектов имеют значения порядка 1 мрад, и угол можно считать малым параметром. Закон Снеллиуса в этом случае примет следующий вид:

$$n = \cos \theta_c \approx 1 - \frac{\theta_c^2}{2}. \quad (1.9)$$

Выразим критический угол следующим образом:

$$\theta_c = \lambda \sqrt{\frac{Nb_{coh}}{\pi}}. \quad (1.10)$$

Нейтроны, угол скольжения которых превосходит критический угол для заданной среды, отражаются от ее границы.

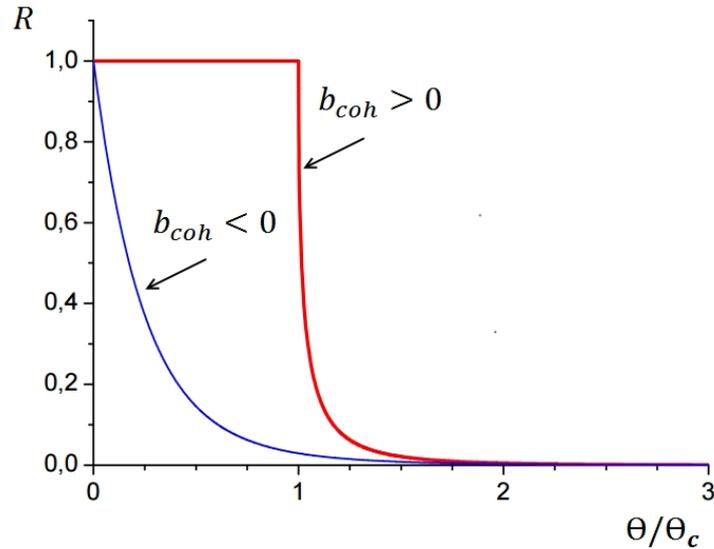


Рис. 1.3. Рефлективность материалов с $b_{coh} < 0$ и $b_{coh} > 0$

Количественной характеристикой для описания процесса отражения пучка является коэффициент отражения или рефлективность $R = I_r/I_i$ - отноше-

ние интенсивности отражённого пучка к интенсивности падающего. Характерная зависимость коэффициента отражения R от параметра θ/θ_c приведена на рисунке 1.3 [9] :

$$R = \begin{cases} 1, & \text{при } \theta < \theta_c; \\ (\theta_c/\theta)^4, & \text{при } \theta > \theta_c. \end{cases} \quad (1.11)$$

Как следует из рисунка 1.3 для $b_{coh} > 0$ область $R=1$ соответствует полному внешнему отражению. Для материалов с отрицательной длиной рассеяния $b_{coh} < 0$ коэффициент R быстро спадает с ростом угла скольжения, поэтому из них могут делать антиотражающие поглотители [10].

1.1.3 Зеркала и суперзеркала

Явление полного внешнего отражения позволяет говорить об использовании ряда материалов в качестве **нейтронных зеркал**. Согласно таблице 1.1 наилучшими материалами для этого являются тонкие пленки никеля Ni и его изотопа ^{58}Ni , нанесенные на полированные стеклянные подложки. Изотоп никеля ^{58}Ni имеет максимальный критический угол из всех природных веществ и их изотопов в стабильном состоянии.

Материал	$N, \text{ см}^{-3} \times 10^{24}$	$b_{coh}, \text{ фм}$	$(1 - n)$ для $1 \text{ \AA}, \times 10^{-6}$	$\theta_c, \text{ deg/\AA}$
Al	0.603	3.5	0.34	0.047
Ti	0.0566	-3.4	0.31	-
Fe	0.0847	9.5	1.28	0.092
Ni	0.0898	10.3	1.47	0.097
^{58}Ni	0.0898	14.4	2.06	0.113
Cu	0.0847	7.6	1.02	0.082
SiO_2 (кварц)	0.0267	15.8	0.67	0.066

Таблица 1.1. Нейтронно-оптические свойства ряда материалов [11]

В современных нейтронно-оптических устройствах активно применяются так называемые суперзеркала. Суперзеркалом называется многослойная структура с переменным периодом, у которой толщины и материалы (то есть,

длины рассеяния b_{coh}) слоев подобраны так, что результирующий критический угол отражения от покрытия превышает критические углы используемых веществ [7, 12]. Таким образом, становится возможным создание материалов, отражательная способность которых превосходит природные, в том числе и принятый за эталон никель Ni.

Суперзеркала принято характеризовать относительным параметром m , показывающим, во сколько раз критический угол отражения от данного покрытия превосходит критический угол для природного никеля Ni:

$$m = \frac{\theta_c}{\theta_c(Ni)}. \quad (1.12)$$

Так, для природного никеля Ni $m = 1$, а для изотопа ^{58}Ni $m = 1.2$. Современные технологии позволяют создавать зеркала с рекордными значениями $m = 8$ [13]. (рис.1.4).

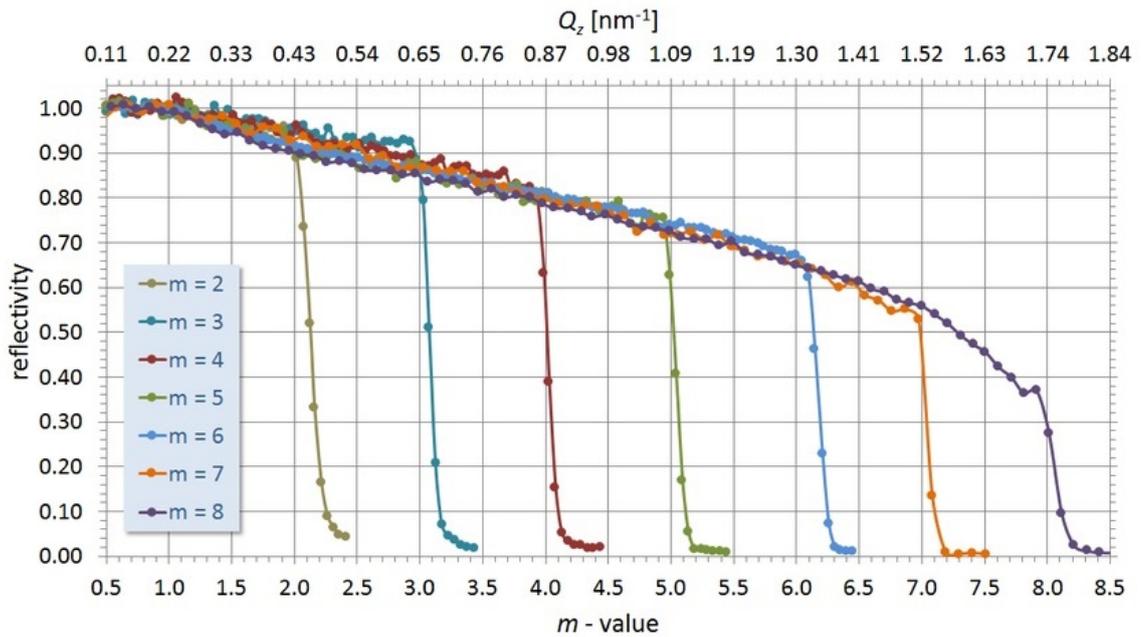


Рис. 1.4. Профили рефлексивности Ni/Ti неполяризующих суперзеркал для $2 \leq m \leq 8$. [13]

Рассмотрим принцип работы суперзеркал несколько подробнее. Суперзеркало представляет собой поочередно нанесенные бислои материалов с разными нейтронно-оптическими свойствами, как это показано на рисунке 1.5. Период структуры d есть сумма толщин слоев одной пары. Такую мультибислойную структуру можно представить в виде одномерного искусственного кристалла

с постоянной решетки d . Тогда отраженная интенсивность от всех пар слоев будет иметь максимумы при выполнении условия Брэгга:

$$m\lambda = 2d \sin \theta, \quad (1.13)$$

где θ – угол скольжения, $m = 1, 2, 3, \dots$

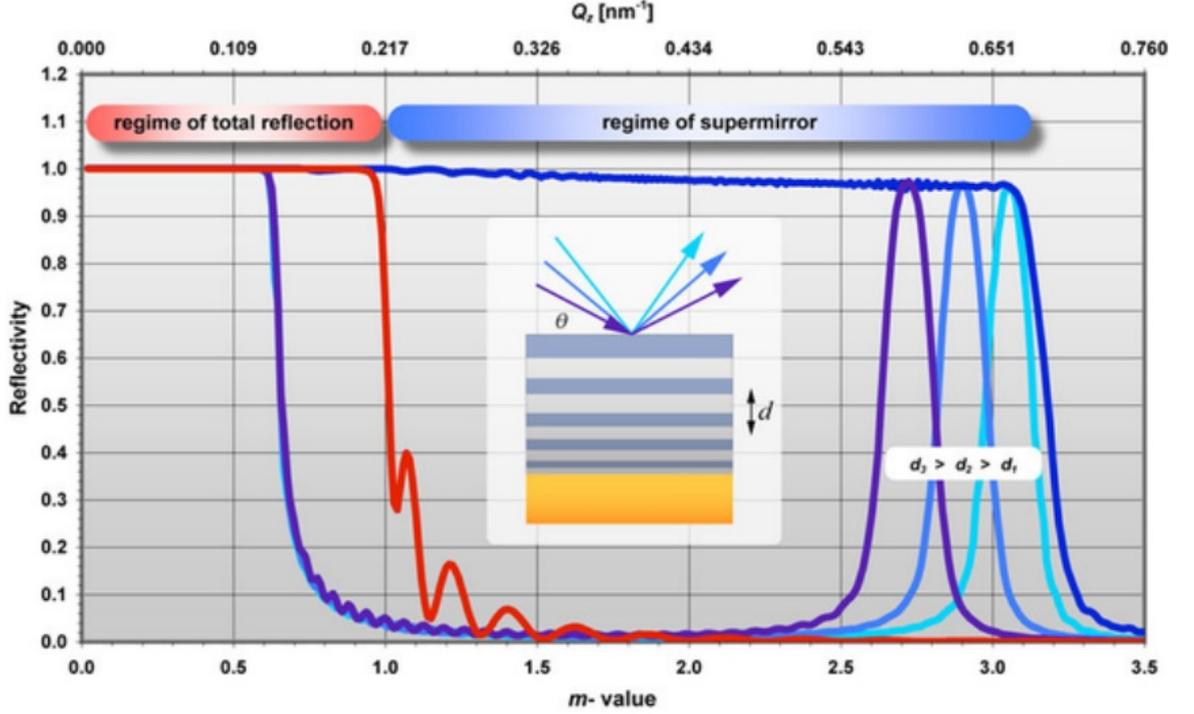


Рис. 1.5. Рефлективность многослойной структуры с изменяющимся периодом d [13].

Если структура будет иметь период бислоя, плавно спадающий в зависимости от глубины многослойной структуры, тогда серия брегговских максимумов приведет к следующему характеру зависимости коэффициента отражения (рис. 1.5):

$$R = \begin{cases} 1, & \text{при } Q < Q_c; \\ 1 - Q, & \text{при } Q_c < Q < mQ_c; \\ (Q_c/Q)^4, & \text{при } Q > mQ_c. \end{cases} \quad (1.14)$$

где Q - переданный импульс, определяемый как разность волновых векторов отраженной k_r и падающей волны k_i :

$$|Q| = |k_i - k_r| = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta. \quad (1.15)$$

Критическое значение импульса будет зависеть от свойств среды:

$$Q_c = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta_c \approx \frac{4\pi}{\lambda} \lambda = \sqrt{\pi N b_{coh}} \quad (1.16)$$

Область $Q < Q_c$ на рисунке 1.5 соответствует полному внешнему отражению. Области $Q_c < Q < mQ_c$ называются областью суперзеркального отражения, в этом случае рефлективность как функция переданного импульса медленно спадает до определенного значения mQ_c .

1.2 Суперзеркальные нейтроноводы

1.2.1 Прямой нейтроновод

Эффект полного внешнего отражения позволяет транспортировать нейтроны через полые каналы с зеркальным покрытием. Такие каналы называются **нейтроноводами**. Впервые нейтроноводы были предложены и применены Майер-Лейбницем на исследовательском реакторе FRM (Мюнхен) в 1962 году [1, 14]. В настоящее время большинство экспериментальных станций использует в качестве средства доставки различные виды нейтроноводов для высокоэффективного использования нейтронного пучка. Основным преимуществом нейтроновода является его способность легко переносить нейтронный пучок без существенных потерь в интенсивности, т.е. сохранять высокую плотность потока вдали от источника.

Рассмотрим идеальный прямой нейтроновод длиной L , имеющий прямоугольное сечение шириной W и высотой h . Поток на выходе из нейтроновода выражается следующим образом:

$$\Phi(\lambda) = \Phi_0(\lambda) \frac{\Omega}{4\pi}, \quad (1.17)$$

где $\Phi_0(\lambda)$ – поток на поверхности источника, а Ω – апертура, или телесный угол нейтронного потока на выходе из нейтроновода. Апертура прямопролетной компоненты, соответствующая апертуре неотражающего канала таких же размеров, равна

$$\Omega_s = \frac{wh}{L^2}. \quad (1.18)$$

Телесный угол второй компоненты, то есть отраженных нейтронов, выражается следующим образом:

$$\Omega_0 = 4\theta_c^2. \quad (1.19)$$

Для достаточно длинных нейтронотодов можно пренебречь прямопролетной компонентной. Тогда выигрыш в потоке нейтронов для прямого нейтронотода по сравнению с неотражающим каналом составит

$$G \approx \frac{4\theta_c^2}{\Omega_s}. \quad (1.20)$$

К примеру, для нейтронотода с никелевым покрытием, сечением $30 \times 100 \text{ см}^2$ и длиной 30 м выигрыш для тепловых нейтронов $\lambda = 1.5 \text{ \AA}$ составит 250, а для холодных $\lambda = 4.5 \text{ \AA}$ около 2300.

Увеличение захватываемой апертуры может быть получено при использовании нейтронотодов с суперзеркальным покрытием [15–17]. В работе [18] проведен сравнительный анализ выигрыша использования суперзеркальных нейтронотодов (рис. 1.6). Пропускание T в данном случае определяется как отношение интенсивности на выходе рассматриваемого нейтронотода к интенсивности на выходе из прямого нейтронотода с параметром $m = 2$. Падающая рефлексивность с ростом параметра m и многократное отражение нейтронов ограничивают эффективность суперзеркальных покрытий.

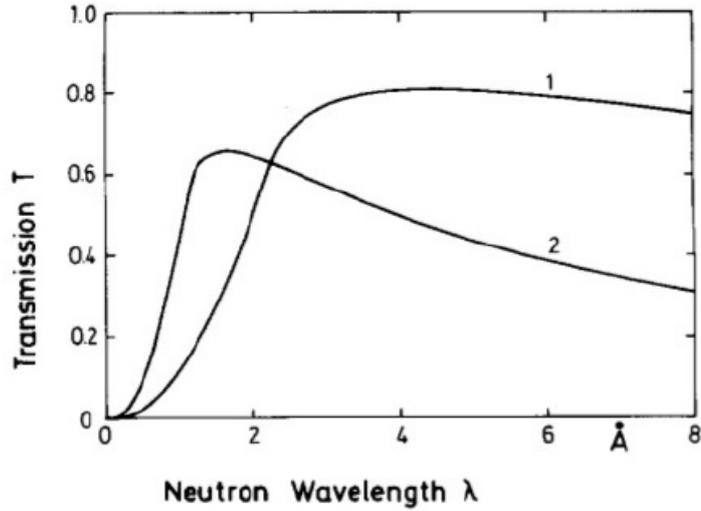


Рис. 1.6. Расчетная функция пропускания нейтронов для прямого с никелевым покрытием (1) и изогнутого суперзеркального (2) нейтроноводов [18].

1.2.2 Изогнутый нейтроновод

Изогнутая геометрия нейтроновода (рис. 1.7) позволяет использовать его как фильтр быстрых нейтронов (рис. 1.6) и γ -излучения [1, 19]. Чтобы на выходе из нейтроновода не было прямой видимости излучающих стенок и дна канала, нужно удовлетворить условию

$$\rho < \frac{L^2}{2w}. \quad (1.21)$$

Введем характеристический угол нейтроновода θ_* , выражаемый следующим образом:

$$\theta_* \approx \sqrt{\frac{2w}{\rho}}, \quad \text{при } \rho \gg w. \quad (1.22)$$

Нейтроны, попадающие в канал под углами $\theta < \theta_*$ к его оси, распространяются по гирляндной траектории, то есть, испытывают многократные отражения только от внешней стенки нейтроновода, отдаляясь от стенки на расстояние, не превосходящее [20]:

$$x_m = \frac{\rho\theta}{2}. \quad (1.23)$$

При углах скольжения $\theta > \theta_*$ нейтроны отражаются как от внешней, так и от внутренней стенки, двигаясь по зигзагообразной траектории. Стоит отметить, что углы скольжения на внешней стенке изогнутого нейтроновода оказываются больше, чем на внутренней, поэтому зачастую для внешней стенки

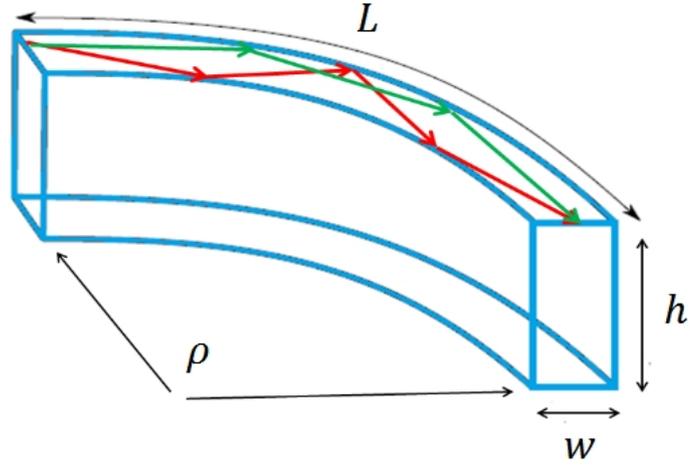


Рис. 1.7. Изогнутый нейтронотвод с радиусом кривизны ρ . Красными стрелками показана зигзагообразная траектория нейтронов, зелеными - гирляндная.

нейтронотвода используют покрытие с большим параметром m , чем для внутренней [21].

Суммарная апертура на выходе из нейтронотвода выглядит следующим образом [19]:

$$\Omega = \begin{cases} \frac{8}{3} \frac{\theta_c^4}{\theta_*}, & \text{при } \theta_c < \theta_*; \\ \frac{8}{3} \frac{\theta_c^4}{\theta_*} \left[1 - \left(1 - \frac{\theta_*^2}{\theta_c^2} \right)^{3/2} \right], & \text{при } \theta_c > \theta_*; \\ 4\theta_c^2, & \text{при } \theta_c \gg \theta_*. \end{cases} \quad (1.24)$$

Исходя из этого, можно определить пропускание - отношение переданной интенсивности изогнутого нейтронотвода относительно переданной интенсивности прямого нейтронотвода, имеющего ту же величину параметра m для всех стенок. Зависимость пропускания от длины волны нейтрона имеет следующий характер:

$$T = \begin{cases} \frac{2}{3} \frac{\lambda^2}{\lambda_*^2}, & \text{при } \lambda \leq \lambda_*; \\ \frac{2}{3} \frac{\lambda^2}{\lambda_*^2} \left[1 - \left(1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_*^2} \right)^{3/2} \right] & \text{при } \lambda > \lambda_*. \end{cases} \quad (1.25)$$

где λ_* , где характерная длина волны:

$$\lambda_* = \frac{\theta_*}{m\theta_c}. \quad (1.26)$$

Из выражений ?? следует, что изгиб нейтронотода слабо влияет на пропускание для длинноволновой части спектра, как это показано на рисунке 1.8. Для коротковолновой области $\lambda \leq \lambda_*$ пропускание резко убывает с уменьшением длины волны.

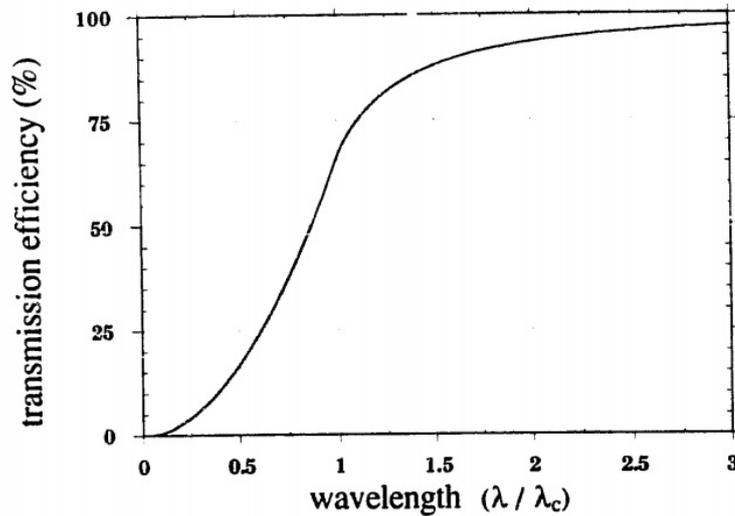


Рис. 1.8. Относительное пропускание изогнутого нейтронотода в единицах характеристического угла [22].

По-мимо вышеописанных типов нейтронотода применяются и другие: баллистические, параболические, эллиптические [23, 24]. Благодаря особенностям своей геометрии. В этой работе данные типы нейтронотофов рассматриваться не будут.

1.3 Механизмы потерь потока в нейтронотодах

Прежде чем говорить о механизмах потерь, стоит обсудить, что собой представляют реальные нейтронотофы. Вне зависимости от геометрии все нейтронотофы не являют собой монолитные конструкции, а состоят из прямых оптических секций прямоугольного сечения длиной от 0.5 до 2 м. Исключением можно назвать бендеры ввиду их компактности — многоканальные нейтронотофы длиной от 10 см до 2–3 м, которые могут исполнять и дополнительную функцию поляризации пучка [25, 26]. Нейтронотофные секции, или оптические модули, в свою очередь, собираются из оптических деталей, которые в сущности являются зеркалами или суперзеркалами. Основой оп-

тической детали является полированная с оптической точностью стеклянная или металлическая пластина, на которую нанесено отражающее покрытие, в случае суперзеркала состоящее из множества последовательно напыленных слоев в несколько десятков ангстрем толщиной.

Исходя из вышесказанного, можно рассуждать о причинах потерь потока и распределении их влияния по спектру выводимых нейтронов. Условно их можно поделить на два вида: потери, связанные с неидеальной геометрией нейтронновода и его составляющих, и потери, связанные с артефактами поверхности покрытия нейтронновода.

Последние могут объясняться наличием микроструктуры поверхности — шероховатости — или волнистостью поверхности, под которой подразумеваются относительно гладкие неровности макроскопического масштаба. Наличие таких дефектов, вызванных неровностью подложки или неравномерным нанесением отражающего покрытия, ведет к незеркальному, иначе говоря, диффузному рассеянию. При попадании на неровность нейтрон может поглотиться из-за несоблюдения условий отражения, или же его угол скольжения увеличится, что может привести к поглощению при следующих столкновениях с поверхностью [1]. Помимо этого, увеличивается количество столкновений нейтрона с поверхностью, как это показано на рисунке 1.9 [27].

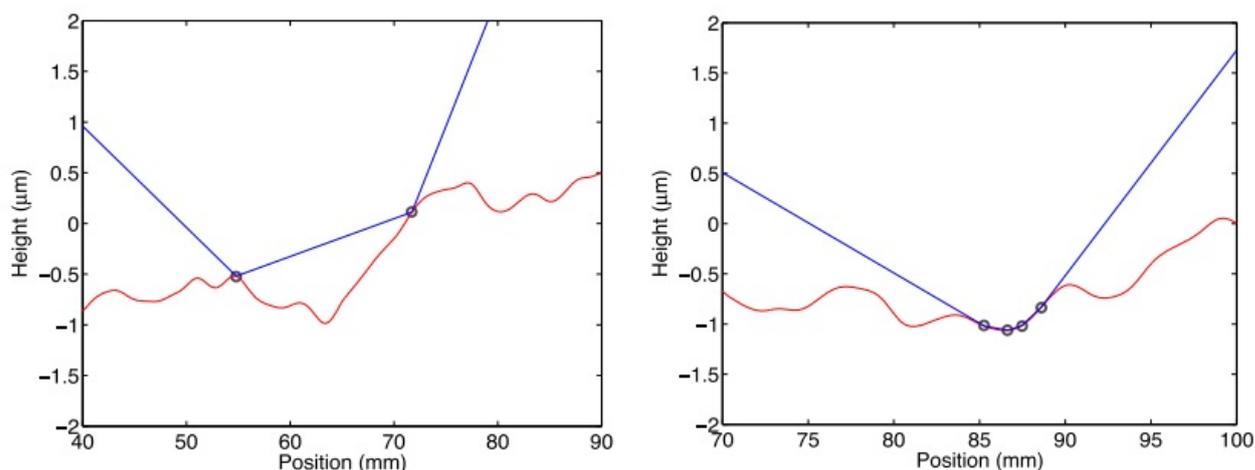


Рис. 1.9. Примеры многократного отражения нейтрона от поверхности, обладающей волнистостью. [27].

Ряд материалов используемых в суперзеркальных покрытиях (табл. 1.1), являются магнитными металлами. Согласно выражению 1.8, случайные маг-

нитные поля могут повлиять на условия отражения, поэтому, при падении под одинаковым углом, нейтроны с одним направлением спина могут отразиться, а нейтроны с противоположным спином – поглотиться [20].

Шероховатость, наряду с процессам некогерентного рассеяния и поглощения, приводят к тому, что показатель преломления при полном внешнем отражении меньше 1. Многократное отражение нейтронов приводит к потерям в холодном спектре, как это показано на рисунке 1.10. Этот же механизм потерь ограничивает эффективность использования суперзеркал.

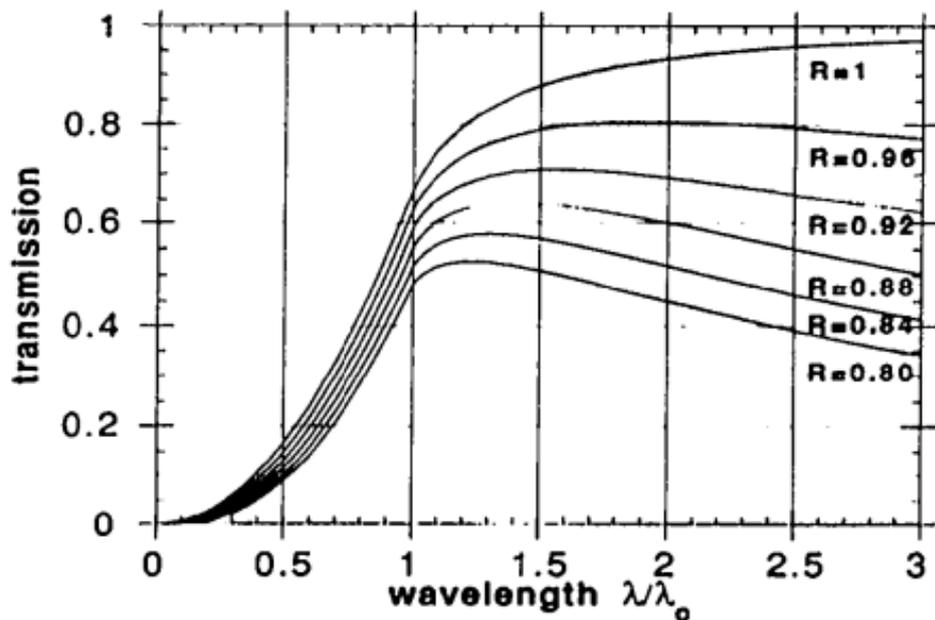


Рис. 1.10. Пропускание изогнутого нейтроновода в зависимости от разных значений коэффициента отражения R. [28].

Механизмы потерь в нейтроновом волноводе могут объясняться неидеальной сборкой оптических элементов, что может привести к несоответствию поперечного сечения на входе и на выходе секции. В этой работе влияние данного фактора будет учтено в рамках разъюстировки секции относительно главной оптической оси, иначе говоря, несоосности оптического элемента.

Шестимерную несоосность оптического элемента учитывают следующим образом: задать три сдвига в системе координат δx , δy и δz и три типа вращения на угол разориентации $\delta\chi$ (плоскость $x - y$), $\delta\phi$ (плоскость $x - z$) и $\delta\psi$ (плоскость $y - z$). Количество секций и величина разъюстировки будут влиять на пропускание нейтроновода. Помимо этого потери в изогнутом

нейтроноводе могут возникать из-за приближения изогнутого контура короткими прямыми секциями.

Оценки влияния данных факторов были приведены в ранних работах [1,2]. Анализ реальных геометрических разъюстировок нейтроноводов на реакторе JRR-4 (Япония) представлен здесь [29,30]. В работе [31] предложен аналитический метод, позволяющий в некоторых случаях описать многосекционность. В последнее время влияние геометрических неидеальностей анализируют с помощью программных пакетов, использующих метод Монте-Карло [32–34]. Следует отметить, что в вышеуказанных работах целенаправленно не проводился анализ влияния размеров нейтроноводной секции.

Выводы и формулировка задач

Реальные нейтроноводы теряют в пропускании из-за неидеальной геометрии. Пространственные разъюстировки секций, описание окружности или эллипса многогранником, как следствия многосекционной составляющей нейтроновода, влияют на пропускание, причем степень влияния зависит от геометрических параметров нейтроноводной секции. Учитывая вышесказанное, цель данной работы — изучить влияние длины нейтроноводной секции на пропускание изогнутого нейтроновода. Для достижения цели работы были поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать потери потока изогнутого нейтроновода в зависимости от приближения окружности.
2. Проанализировать влияние пространственных разъюстировок секций на пропускание.
3. Рассмотреть возможности выбора оптимальной длины нейтроноводной секции.

Глава 2

Моделирование нейтроноводов

2.1 Расчет нейтронных потоков в оптических устройствах и системах нейтронного транспорта

На сегодня существует несколько методов расчета физических характеристик нейтронного пучка при его взаимодействии с оптическими системами. Условно их можно разделить на три основные категории: аналитические, диаграммные и численные.

Аналитические методы, как правило, применяются для нахождения функций разрешения дифрактометров и спектрометров. Каждый элемент установки обладает определенной функцией пропускания, которые принято аппроксимировать нормальным распределением. Функция параметров пучка на выходе будет представлять собой свертку входной функции пучка с функциями пропускания всех элементов установки. Наличие большого числа оптических элементов делает анализ функций трудоемким, а задачи по оптимизации прибора — многопараметрическими, зачастую не имеющими решения. В качестве примеров использования аналитических методов для расчета нейтроноводов можно привести следующие работы [1, 18, 19]

Иной подход — техника акцепторных диаграмм. Суть метода состоит в

анализе проекции фазового пространства на плоскость, образованную ортогональными координатами этого пространства. Фазовое пространство строится на пространственных и угловых координатах и длине волны. Анализ состоит в последовательном учете возможных ограничений, создаваемых оптическими элементами на пути пучка. Внося преобразования от всех оптических устройств тракта, можно получить довольно точную проекцию фазового пространства на выходе. Акцепторные диаграммы применялись и для анализа различных типов нейтроноводов [22, 31].

К недостаткам вышеописанных методов можно отнести большое количество допущений и приближений, ухудшающих точность решений, трудоёмкие вычисления при большом количестве оптических элементов, трудности учета различных факторов потерь.

Моделирование методом Монте–Карло с ростом возможностей вычислительной техники приобретает всё большую популярность. Точная математическая модель позволяет разработать дизайны новых, а также оптимизировать работу уже существующих экспериментальных установок. В настоящее время практически каждый новый или модернизируемый нейтронный инструмент сначала моделируется методом Монте–Карло для проверки функциональности посредством одного из следующих программных пакетов: VITESS, McStas, NISP или RESTRAX.

Все представленные программные пакеты работают на одних и тех же принципах и базируются на методе трассировки луче. Каждому нейтрону соответствует определенная вероятность быть рассеяным -вес, который в процессе прохождения нейтроном оптических элементов прибора будет умножаться на веса последующих актов рассеяния. Суммарный вес соответствует вероятности распространения нейтрона по выбранной траектории. Неупругие процессы рассеяния учитываются посредством вычисления вероятности изменения энергии нейтрона. Вся информация о нейтроне, прошедшем через инструмент, описывается 12 координатами: временем распространения, длиной волны, вероятностным весом, тремя координатами, тремя направляющими косинусами и тремя компонентами спина. В результате моделирования с большим количеством случайно заданных начальных траекторий получается набор данных, описывающих множество траекторий нейтронов в пучке. Из

набора данных, визуализируя пучок по желаемым параметрам посредством мониторов, можно получить картины расходимостей, профилей пучка, спектров и т.д.

Главным достоинством метода Монте–Карло является возможность моделировать сложные с точки зрения геометрии и содержащие большое количество оптических элементов системы. Однако моделирование стоит проводить на основе выводов, подкрепленных аналитическими и/или диаграммными расчетами. Моделирование позволяет уточнить различные эффекты, плохо поддающиеся описанию другими методами, и найти оптимальные параметры.

2.2 Программный пакет McStas

Из вышеуказанных программных пакетов, реализующих метод Монте–Карло, в данной работе был применен McStas [35]. McStas разрабатывается с 1998 года и на сегодня является самым широко используемым пакетом для моделирования нейтронных инструментов. Основой программы является компилятор, который считывает файл-описание инструмента, составленный на высокоуровневом языке программирования и затем генерирует исполняющий файл на языке C. Основные компоненты разрабатываются в Техническом университете Дании, Копенгагенском университете, Институте Пауля Шеррера (Швейцария) и Институте Лауэ–Ланжевена (Франция). McStas обеспечивает возможность моделировать практически любые инструменты. Включено моделирование следующих компонентов: импульсных и стационарных источников нейтронов, нейтронородов, коллиматоров, монохроматоров, селекторов скоростей, прерывателей, образцов и различных видов детекторов. Помимо этого пакет включает в себя графический интерфейс. Поддерживаются параллельные вычисления.

2.3 Применение McStas

Опишем конкретные компоненты и их параметры, применяемые для моделирования нейтронородов.

В качестве источника был выбран компонент SOURCE_GEN, моделирующий стационарный источник. Прямоугольная форма источника задается высотой h и шириной w . Расходимость пучка определяется размерами окна xw и yh , располагаемого на определенном расстоянии $dist$. Пределы спектра задается параметрами λ_{min} и λ_{max} . С помощью наборов параметров $T_{1,2,3}$ и $I_{1,2,3}$, можно описать спектр тремя Максвелловскими распределениями.

Каждая секция нейтроновода моделировалась компонентом GUIDE_GRAVITY, который описывает прямой нейтроновод с прямоугольным сечением. Входное и выходное сечение задавалось параметрами $h_0 = h_1$, $w_0 = w_1$. Длина задается параметром l . Координаты каждой секции определялись относительно идеальной оси с учетом угла поворота по отношению к предыдущей секции и случайных пространственных смещений и угловых отклонений. Секции устанавливались таким образом, чтобы углы секций со стороны внутренней стенки примыкали. Рефлективность стенок нейтроновода, как и во многих программных пакетах, задавалось кусочно-линейной функцией [35, 36]:

$$R(Q) = \begin{cases} R_0, & \text{при } Q < Q_c; \\ R_0 [1 - \alpha(Q - Q_c)], & \text{при } Q_c < Q < mQ_c; \end{cases} \quad (2.1)$$

где критический волновый вектор имел значение $Q_c = 0.0219 \text{ \AA}$, соответствующее обычному никелю Ni. Параметр имел значение $\alpha = 4.38$. Рефлективность в области полного внешнего отражения для идеальных поверхностей составляла $R=1$, для неидеальных - $R=0.98$.

Глава 3

Результаты

3.1 Геометрические механизмы потерь потока в изогнутом нейтроноводе

3.1.1 Влияние приближение окружности многоугольником

Как было отмечено в первой главе, изогнутые участки нейтроноводов собираются из прямолинейных секций длиной от 0.5 до 2 м. Угол между секциями выражается следующим образом:

$$\theta_{bs} = \frac{L}{n\rho} = \frac{l}{\rho} \quad (3.1)$$

где n - количество секций, l - длина одной секции.

Для изучения влияния приближения изогнутого по окружности нейтроновода многогранником было рассчитано пропускание изогнутого нейтроновода относительно прямого нейтроновода той же длины $L = 30$ м, сечением 20×100 мм², с никелевым покрытием стенок и радиусом кривизны $\rho = 1000$ м для разных длин секций. Результаты показаны на рисунке 3.2. Как видно, с уменьшением количества секций пропускание нейтроновода падает. в первую очередь это связано с тем, что увеличение угла между секциями θ_{bs} ведет к росту угла скольжения на стенках нейтроновода, как это показано на рисунке 3.1.

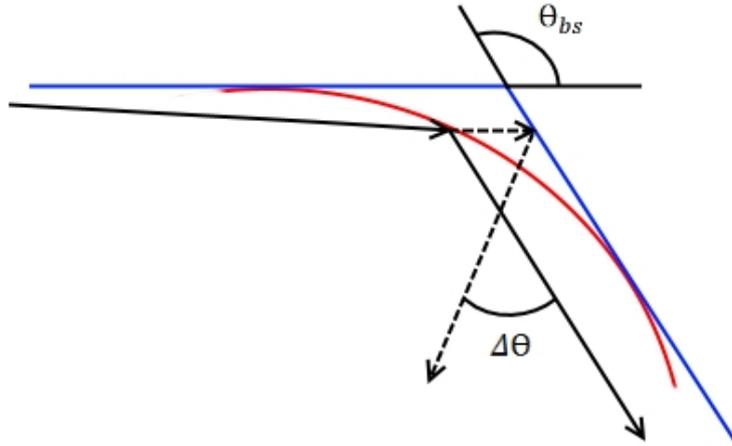


Рис. 3.1. Отражение нейтроны от стенки идеального изогнутого нейтронотода и от стенки прямой секции.

В таблице 3.1 показаны факторы потерь F , определяемые как отношения интенсивности при длине $l = 0.3$ м к интенсивности нейтронотода с большей длиной нейтронотодной секции. Из-за многосекционности нейтронотода обозначить явную зависимость от длины волны трудно. Но однозначно то, что потери растут с уменьшением длины волны. Отчасти это объясняется вторым механизмом потерь: коротковолновые нейтроны, распространяющиеся по гирляндной траектории не попадают из одной секции в другую из-за отклонения на фиксированный угол. Вследствие чего, неоднородность пучка на выходе существенно меньше для нейтронотодов с большей длиной секции (рис. 3.3).

Длина волны λ/λ_*	$l = 1$ м	$l = 1.5$ м	$l = 3$ м
0.72	1.19	1.44	2
1	1.06	1.13	1.6
1.55	1.04	1.11	1.27
2.44	1	1	1.14

Таблица 3.1. Факторы потерь для разных длин волн при увеличении длины секции с $l=0.3$ м.

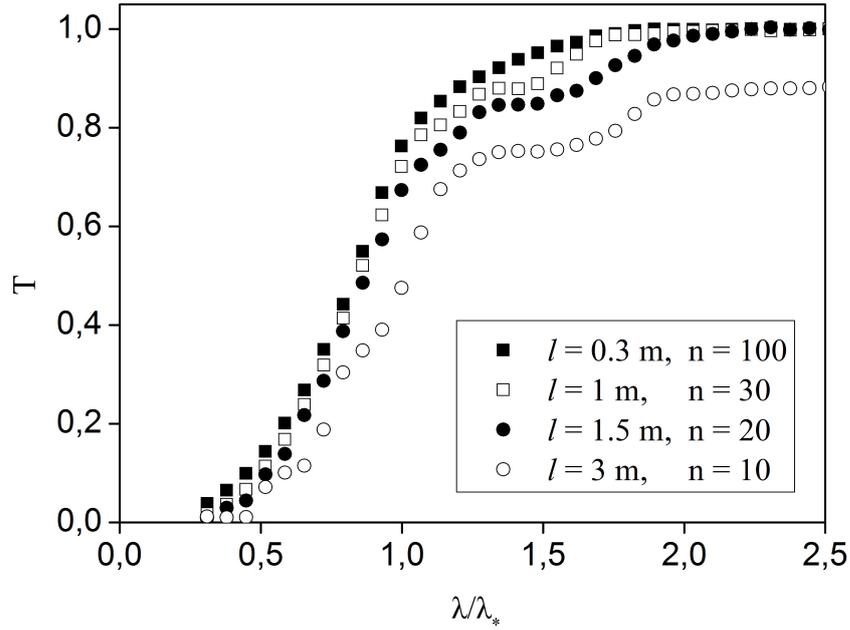


Рис. 3.2. Относительное пропускание многосекционного изогнутого нейтроновода с постоянной длиной $L = 30$ м, сечением 20×100 мм и радиусом $\rho = 1000$ м для разных длин секций l . Характеристическая длина волны $\lambda_* = 3.63 \text{ \AA}$

3.1.2 Линейные смещения

Пространственные смещения реализованы в модели как независимые одновременные сдвиги в горизонтальном направлении. Величина сдвига определяется распределением Гаусса с среднеквадратичным отклонением δx .

Пропускание T_{sm} прямого нейтроновода со смещениями по сравнению с пропусканием подобного же нейтроновода без смещений T_0 , может быть описано следующей формулой:

$$T = \frac{T_{sm}}{T_0} = \prod_i^n \left(1 - \frac{\sigma x_i}{w} - \frac{\sigma y_i}{h}\right) \approx \left(1 - \frac{\sigma x}{w} - \frac{\sigma y}{h}\right)^n = \left(1 - \frac{\sigma x}{w} - \frac{\sigma y}{h}\right)^{L/l} \quad (3.2)$$

На рисунке 3.4а показано пропускание для нейтроновода длиной 30 м при длине волны $\lambda/\lambda_* = 2.75$ (10 \AA) в зависимости от отношения среднеквадратичного отклонения к ширине нейтроновода. Пропускание, предсказываемое функцией 3.2, расходится с результатами моделирования не более чем на 10% для смещений менее 1%, но на всем диапазоне. Расхождения растут с увели-

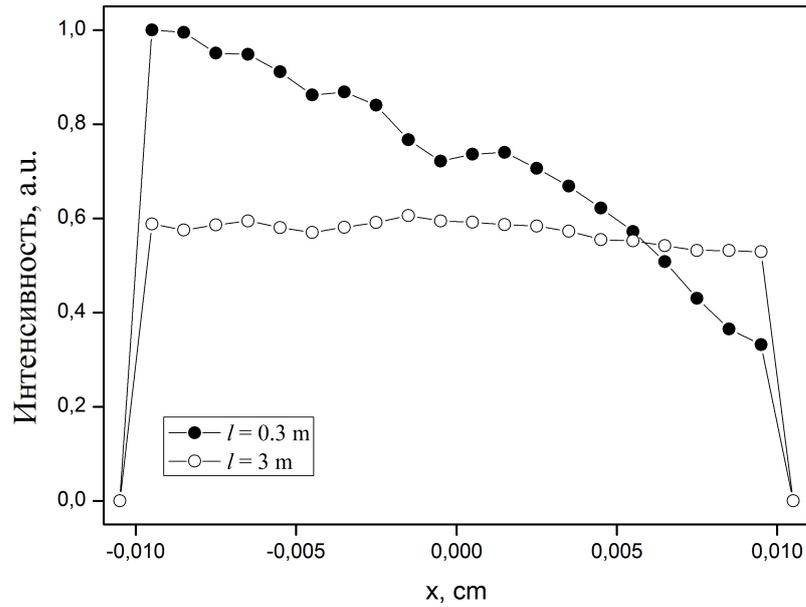


Рис. 3.3. Профиль пучка в горизонтальной плоскости на выходе из нейтроновода при разных длинах оптической секции.

чением количества секций. Следовательно функция 3.2 адекватно оценивает максимальные потери только для нейтроноводов с небольшим количеством секций. Для большого количества секций функция завышает результаты из-за неучета Гауссова характера распределения смещений: 68% секций имеют смещение меньше, чем предполагаемое значение. На рисунке 3.4б показана зависимость пропускания от длины волны для разного количества секций при среднеквадратичном отклонении $\delta x = 0.02$ мм. При длинах $\lambda \geq \lambda_*$ величина потерь не зависит от длины волны, при $\lambda < \lambda_*$ потери резко возрастают с уменьшением длины волны, а так же растут с ростом количества секций. Объясняется это тем, что нейтроны, движущийся по гирляндной траектории из-за случайных смещений, могут не попасть в следующую секцию.

3.1.3 Угловые отклонения

Угловые отклонения оптической секции моделируются подобно пространственным смещениям. Величина отклонения определяется распределением Гаусса со среднеквадратичным отклонением $\delta\phi$ и стандартным отклонением от оси. Пропускание определяется как отношение потока на выходе из нейтро-

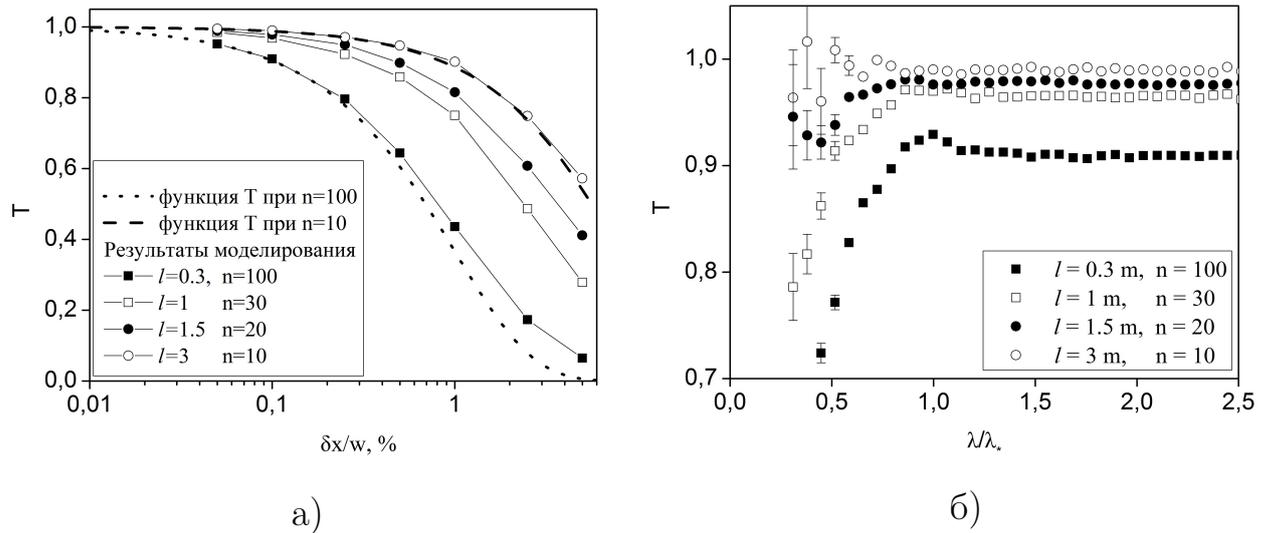


Рис. 3.4. Относительное пропускание многосекционного изогнутого нейтронновода с постоянной длиной $L = 30$ м, сечением 20×100 мм и радиусом $\rho = 1000$ а) как функция отношения среднеквадратичного отклонения к ширине и б) как функция длины волны для $\sigma x = 0.02$ мм при разных длинах нейтронной секции.

новода с разъюстировками к потоку на выходе нейтронновода без разъюстировок. На рисунке 3.5 представлены зависимости пропускания от величины среднеквадратичного отклонения $\delta\phi$ в плоскости $y - z$.

Поскольку при юстировке нейтронной системы положение оптического элемента проводится с помощью автоколлиматора и/или теодолита, то величина угловых отклонений не превышает значения макроволнистости (для современных оптических элементов составляет не более 0.2-0.3 мрад). При таких значениях среднеквадратичного углового отклонения потери составляет не более 1%. Величина потерь слабо зависит от количества секций.

3.2 Подход к выбору оптимальной длины нейтронной секции

Из анализа потерь, связанных с геометрическими неидеальностями следует, что существуют две причины, заметно влияющие на пропускание нейтронновода и зависящие от длины нейтронной секции при постоянной длине нейтронновода: потери в пропускании, вызванные приближением изогнутого

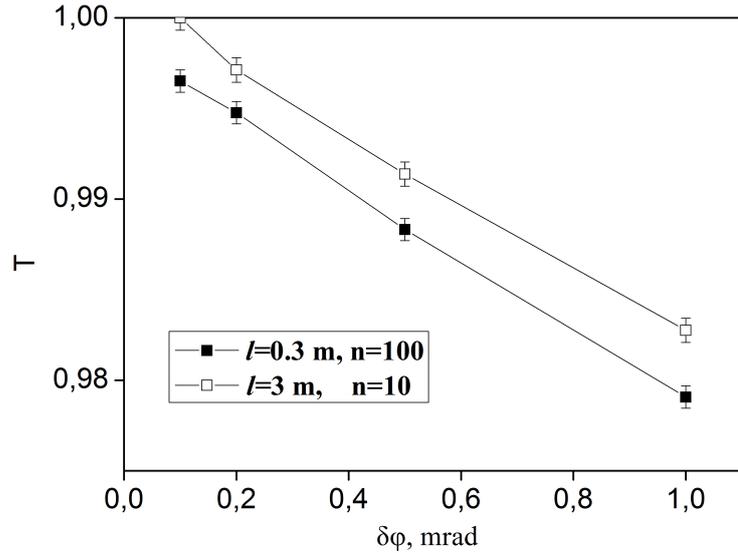


Рис. 3.5. Относительное пропускание многосекционного изогнутого нейтроновода с постоянной длиной $L = 30$ м, сечением 20×100 мм и радиусом $\rho = 1000$ м для разных длин секций в зависимости от величины угловых отклонений.

нейтроновода короткими прямыми секциями, растут при увеличении длины секции, а потери, связанные со случайными смещениями секций в пространстве, растут с уменьшением длины секции. Следовательно при подборе оптимальной длины нейтроноводной секции можно добиться наименьших потерь в пропускании, как это показано на рисунке 3.6. Как видно из рисунка, два крайних случая при $l=0.3$ м и $l=3$ м при моделировании нейтроновода со случайными смещениями $\delta=0.02$ мм является не оптимальными, так как имеют пропускание на всём спектре ниже, чем для других случаев. Использование секции с длинами $l=1$ м и $l=1.5$ м дают лучшее пропускание на разных диапазонах длин волн. Следовательно поиск оптимальной длины секции для конкретного нейтроновода стоит производить исходя из требований прибора по длине волны. В следующем разделе приведены результаты моделирования пропускания для нахождения оптимальных длин секций для определенных нейтроноводов с учетом возможных факторов потерь. В таблице 3.2 приведены параметры для моделирования реального нейтроновода со значениями, допустимыми при постройке современных нейтроноводов.

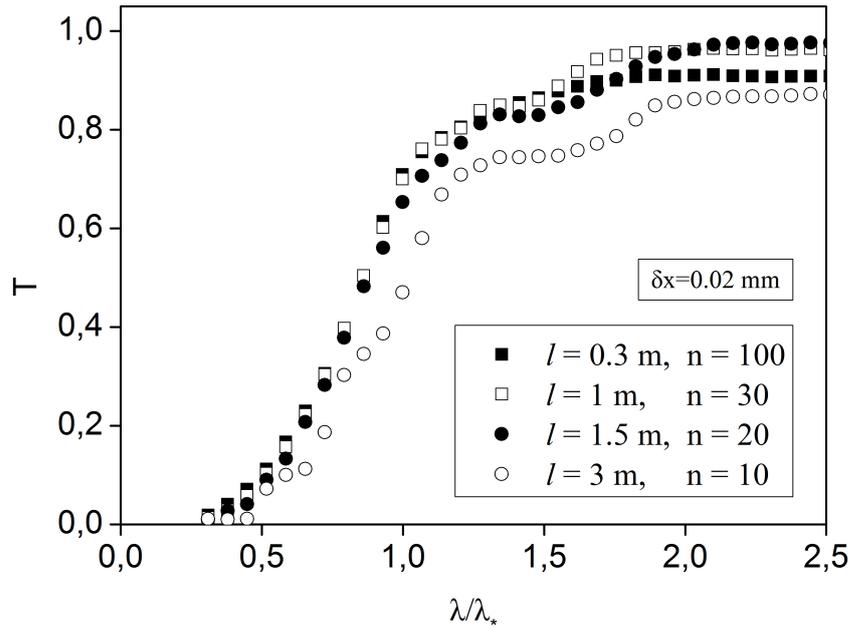


Рис. 3.6. Относительное пропускание многосекционного изогнутого нейтронновода с постоянной длиной $L = 30$ м, сечением 20×100 мм и радиусом $\rho = 1000$ м для разных длин секций со среднеквадратичным значением сдвига секций $\delta x = 0.02$ мм.

Параметр	Значение
$\sigma x = \sigma y$, мм	0.02
$\sigma \phi = \sigma \psi$, мрад	0.2
Волнистость, мрад	0.2
R	0.98

Таблица 3.2. Параметры моделирования реальных нейтроннопроводов

3.3 Примеры расчетов оптимальной длины секции для изогнутых нейтроннопроводов

3.3.1 Нейтроннопровод N25, ILL, Гренобль

Нейтроннопровод N25 предназначен для доставки горячих нейтронов до интерферометра S-18, дифрактометра D-23 и спектрометра неупругого рассеяния IN-22. Рабочие длины волн приборов находятся в диапазоне от 1 \AA до 3 \AA .

Общая длина изогнутой части нейтронотода составляет 62,7 м метров. Общее количество количество секций $N=67$. Длина варьируется от 0.86 м до 1 м. Проведено моделирование пропускания в зависимости от длины нейтронотодной секции для диапазона длин волн 1-3 Å (рис. 3.7а). Из рисунка видно, что наименьшие потери составляют 16% при длине секции $l=2.5$ м. При этом потери при конфигурации, соответствующей действительной, со средней длиной $l=0.95$ м составляют около 18%.

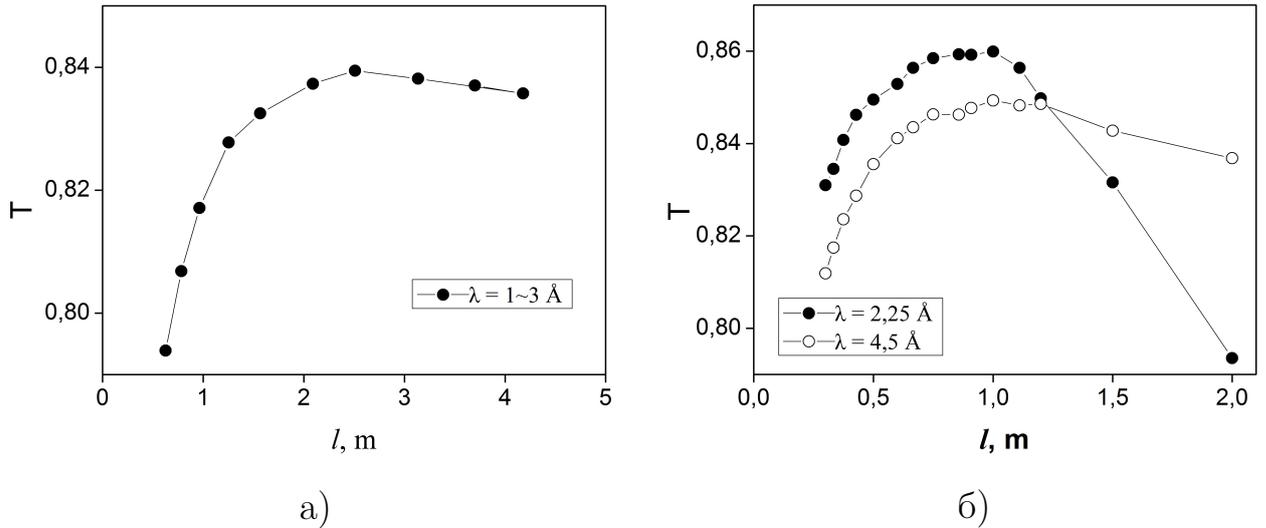


Рис. 3.7. Относительное пропускание изогнутого нейтронотода а) Н25 для диапазона волн 1-3 Å и б) Н3-2 для 2.25 Å и 4.5 Å в зависимости от длины оптической секции с учётом факторов потерь.

3.3.2 Нейтронотод Н3-2, ПИК, Гатчина

Нейтронотод Н3-2 предполагается расположить на канале ГЭК-3 реактора ПИК. Предназначен для доставки нейтронов до дифрактометра D2, рефлектометра NeRo и ультрамалогоугловой установки DCD. Рабочие длины D2 – $\lambda = 2.3$ Å и $\lambda = 4.5$ Å, NeRo – $\lambda = 4.5$ Å, а рабочая длина DCD $\lambda = 2.25$ Å. Длина изогнутой части нейтронотода $L = 30$ м. Сечение нейтронотода 30×200 мм², для верхней, нижней и внутренней стенки нейтронотода параметр $m = 2$, для внешней $m = 3$.

Для нахождения оптимальной длины нейтронотодной секции посчитано пропускание для рабочих длин волн с учётом величин параметров, приведенных в таблице 3.2. Результаты представлены на рисунке 3.7б. Диапазон

оптимальных длин секций, при которых потери пропускание для рабочих длин волн не более 15%, составляет от 0.7 м до 1.1 м, что соответствует стандартным длинам секций. Стоит отметить, что для всего рассмотренного диапазона от 0.3 м до 2 м потери в потоке различны не более, чем на 7% для 2.25 Å и 4% для 4.5 Å.

Заключение

Целью данной работы было изучить влияние длины нейтронной секции на пропускание изогнутого нейтронного волновода. В ходе выполнения работы было проанализировано влияние на пропускание приближения окружности многоугольником, пространственных смещений и угловых отклонений. На примере моделирования нейтронных волноводов H25 (ILL, Гренобль) и H3-2 (ПИК, Гатчина) показано, что возможно найти оптимальную длину нейтронной секции, при которой суммарные потери минимальны. Потери для приведенных примеров в диапазоне от 0.5 м до 2.0 м различны не более чем на 7% на рабочих длинах волн. Хотя и для данных конфигураций нейтронных волноводов выигрыш является не значительным, для ряда случаев оптимизация нейтронного волновода по длине секции может быть осуществима.

Литература

- [1] H Maier-Leibnitz and T Springer. The use of neutron optical devices on beam-hole experiments on beam-hole experiments. Journal of Nuclear Energy. Parts A/B. Reactor Science and Technology, 17(4-5):217–225, 1963.
- [2] F Samuel. Thin film neutron optical devices. SPIE Proc. 983, 59, 1988.
- [3] M Th Rekveldt, P Verkerk, and AA Van Well. Stacked neutron mirrors as efficient filter for use in thermal and subthermal neutron beams. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 34(2):285–289, 1988.
- [4] AA Van Well, VO de Haan, and DFR Mildner. The average number of reflections in a curved neutron guide. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 309(1-2):284–286, 1991.
- [5] Исай Исидорович Гуревич and Лев Васильевич Тарасов. Физика нейтронов низких энергий. 1965.
- [6] Melvin Lax. Multiple scattering of waves. Reviews of Modern Physics, 23(4):287, 1951.
- [7] F Mezei. Novel polarized neutron devices: supermirror and spin component amplifier. Communications on Physics (London), 1(3):81–85, 1976.
- [8] АГ Гукасов, ВА Рубан, and МН Бедризова. О возможности интерференционного увеличения области «зеркального» отражения нейтронов на многослойных «квазимозаичных» структурах. Письма в ЖТФ, 3(3):8, 1977.

- [9] Thomas Brueckel, Gernot Heger, Dieter Richter, Georg Roth, and Reiner Zorn. Neutron scattering. lectures. 2010.
- [10] NK Pleshanov, AF Shchebetov, SV Metelev, IG Peskov, VM Pusenkov, VG Syromyatnikov, and VA Ul'yanov. Polarizing feco/tizr supermirror with $m=2.5$ based on antireflecting tizrgd sublayer. In XVII Workshop on neutron scattering application for condensed matter investigations. Programme and abstracts, 2002.
- [11] Klein A. Werner S. Methods of Experimental Physics. Volume 23 Neutron Scattering. Part A. Academic Press, 1989.
- [12] F Mezei and PA Dagleish. Corrigendum and first experimental evidence on neutron supermirrors. Communications on Physics (London), 2(2):41–43, 1977.
- [13] www.swissneutronics.ch.
- [14] Heinz Maier-Leibnitz and T Springer. Production and use of thermal reactor neutron beams. Annual review of nuclear science, 16(1):207–262, 1966.
- [15] MAM Bourke, DC Dunand, and E Ustundag. Smarts-a spectrometer for strain measurement in engineering materials. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 74:s1707–s1709, 2002.
- [16] Benedicte Ballot, Francois J Samuel, and Bernard Farnoux. Supermirror neutron guide. In San Diego'92, pages 159–165. International Society for Optics and Photonics, 1992.
- [17] Tsunekazu Akiyoshi, Tohru Ebisawa, Takeshi Kawai, Fukuo Yoshida, Masayoshi Ono, Seiji Tasaki, Sigesi Mitani, Tohru Kobayashi, and Sunao Okamoto. Development of a supermirror neutron guide tube. Journal of Nuclear Science and Technology, 29(10):939–946, 1992.
- [18] D Dubbers. The transmission of a lossy curved supermirror neutron guide. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 349(2-3):302–306, 1994.

- [19] B Alefeld, J Christ, D Kukla, R Scherm, and W Schmatz. Neutronenleiter. JUL-294-NP, 1965.
- [20] Kudrashev V.A. Исследование нейтронородных систем, методы расчета и эксперимент. ЛИЯФ, 1984.
- [21] DFR Mildner and JC Cook. Curved–straight neutron guide system with uniform spatial intensity distribution. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 592(3):414–419, 2008.
- [22] DFR Mildner. Acceptance diagrams for curved neutron guides. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 290(1):189–196, 1990.
- [23] Christian Schanzer, Peter Böni, Uwe Filges, and Thomas Hils. Advanced geometries for ballistic neutron guides. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 529(1):63–68, 2004.
- [24] Hartmut Abele, D Dubbers, H Häse, M Klein, A Knöpfler, M Kreuz, T Lauer, B Märkisch, D Mund, V Nesvizhevsky, et al. Characterization of a ballistic supermirror neutron guide. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 562(1):407–417, 2006.
- [25] KP Coulter, TE Chupp, AB McDonald, CD Bowman, JD Bowman, JJ Szymanski, V Yuan, GD Cates, DR Benton, and ED Earle. Neutron polarization with a polarized ^3He spin filter. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 288(2-3):463–466, 1990.
- [26] Otto Schärpf. Thin-film devices and their role in future neutron spectroscopic investigations. Physica B: Condensed Matter, 174(1-4):514–527, 1991.
- [27] Ursula Benggaard Hansen, Mads Bertelsen, Erik Bergbäck Knudsen, and Kim

- Lefmann. Simulation of waviness in neutron guides. Journal of Neutron Research, 18(2-3):45–59, 2015.
- [28] DFR Mildner and B Hammouda. The transmission of curved neutron guides with non-perfect reflectivity. Journal of applied crystallography, 25(1):39–45, 1992.
- [29] Yuji Kawabata, Masatoshi Suzuki, Masanobu Sakamoto, Taikan Harami, Hidetake Takahashi, and Nobuaki Onishi. Transmission efficiency of neutron guide tube with alignment errors. Journal of Nuclear Science and Technology, 27(5):406–415, 1990.
- [30] Yuji Kawabata, Masatoshi Suzuki, Hidetake Takahashi, Nobuaki ONISHI, Akio SHIMANUKI, Yutaka SUGAWA, Nobuyuki NIINO, Taijiro KASAI, Katsuyuki FUNASHO, Shoji HAYAKAWA, et al. Construction of neutron guide tubes in upgraded jrr-3. Journal of Nuclear Science and Technology, 27(12):1138–1146, 1990.
- [31] JRD Copley. An analytical method to characterize the performance of multiple section straight-sided neutron guide systems. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 287(3):363–373, 1990.
- [32] Carolin Zendler, D Martin Rodriguez, and PM Bentley. Generic guide concepts for the european spallation source. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 803:89–99, 2015.
- [33] C Zendler and Phillip M Bentley. Systematic neutron guide misalignment for an accelerator-driven spallation neutron source. Physical Review Accelerators and Beams, 19(8):083501, 2016.
- [34] Peter M Allenspach, Peter Boeni, and Kim Lefmann. Loss mechanisms in supermirror neutron guides. In International Symposium on Optical Science and Technology, pages 157–165. International Society for Optics and Photonics, 2001.

- [35] Kim Lefmann and Kristian Nielsen. Mcstas, a general software package for neutron ray-tracing simulations. Neutron news, 10(3):20–23, 1999.
- [36] Henrik Jacobsen, Klaus Lieutenant, Carolin Zendler, and Kim Lefmann. Bi-spectral extraction through elliptic neutron guides. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 717:69–76, 2013.

Приложение А

Модель нейтроновода для расчётов

```
DEFINE INSTRUMENT section ( w= 0.02, h = 0.100, L = 30, R=1000, n=10, R0=1,m=1, ml=1,mr=1,
wavy = 0, Lmin=1, Lmax=11, x_shift = 0, y_shift = 0,
z_shift=0,
ax0=0, ay0=0, az0=0 )
```

```
DECLARE
```

```
%{
double d=2;
double sT1=310.0, sI1=1.75e12;
double sT2=150.0, sI2= 6.65e12;
double sT3=26.0, sI3=1.05e13;
double shift_x[200], shift_y[200], rot_x[200], rot_y[200], rot_z[200], coord[200];
int i;
double dx, dz;
double l;
double angle;
double Win;
%}
```

```
INITIALIZE
```

```
%{
angle=(L/(R*n))*RAD2DEG;
Win=n*(angle)*DEG2RAD;
dz=0;
l=L/n;

for (i=0; i<200; i++) {
  shift_x[i] = randnorm()*x_shift-w/2;
  shift_y[i] = randnorm()*y_shift;
  rot_x[i] = randnorm()*ax0;
  rot_y[i] = randnorm()*ay0;
  rot_z[i] = randnorm()*az0;
}
```

```
%}
```

```
TRACE
```

```
COMPONENT Origin = Progress_bar()
```

```
  AT (0,0,0) ABSOLUTE
```

```
COMPONENT Source_PIK = Source_gen(
```

```
  dist = d, focus_xw = w, focus_yh = h, I1 = sI1,
```

```

    yheight = h, xwidth = w, T1 = sT1, T2 = sT2, I2 = sI2,
    T3 = sT3, I3 = sI3, Lmin=Lmin, Lmax=Lmax)
  AT (0, 0, 0) RELATIVE Origin
  ROTATED (0, 0, 0) RELATIVE Origin
COMPONENT Arm0 = Arm( )
  AT (w/2, 0, d) RELATIVE Origin
  ROTATED (0, 0, 0) RELATIVE Origin
COMPONENT section = Guide_gravity(
  w1 = w, h1 = h, w2 = w, h2 = h, l = l, R0 = R0,
m = m, mleft=ml, mright=mr,
wavy = wavy)
  AT (shift_x[0], shift_y[0], 0) RELATIVE Arm0
  ROTATED (rot_x[0], rot_y[0], rot_z[0]) RELATIVE Arm0

COMPONENT Arm1= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm0
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm0
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[1], shift_y[1], 0) RELATIVE Arm1
  ROTATED (rot_x[1], rot_y[1], rot_z[1]) RELATIVE Arm1
COMPONENT Arm2= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm1
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm1
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[2], shift_y[2], 0) RELATIVE Arm2
  ROTATED (rot_x[2], rot_y[2], rot_z[2]) RELATIVE Arm2
COMPONENT Arm3= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm2
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm2
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[3], shift_y[3], 0) RELATIVE Arm3
  ROTATED (rot_x[3], rot_y[3], rot_z[3]) RELATIVE Arm3
COMPONENT Arm4=Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm3
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm3
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[4], shift_y[4], 0) RELATIVE Arm4
  ROTATED (rot_x[4], rot_y[4], rot_z[4]) RELATIVE Arm4
COMPONENT Arm5= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm4
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm4
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[5], shift_y[5], 0) RELATIVE Arm5
  ROTATED (rot_x[5], rot_y[5], rot_z[5]) RELATIVE Arm5
COMPONENT Arm6= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm5

```

```

    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm5
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[6], shift_y[6],0) RELATIVE Arm6
    ROTATED (rot_x[6], rot_y[6], rot_z[6]) RELATIVE Arm6
COMPONENT Arm7= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm6
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm6
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[7], shift_y[7], 0) RELATIVE Arm7
    ROTATED (rot_x[7], rot_y[7], rot_z[7]) RELATIVE Arm7
COMPONENT Arm8= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm7
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm7
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[8], shift_y[8], 0) RELATIVE Arm8
    ROTATED (rot_x[8], rot_y[8], rot_z[8]) RELATIVE Arm8
COMPONENT Arm9= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm8
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm8
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[9], shift_y[9], 0) RELATIVE Arm9
    ROTATED (rot_x[9], rot_y[9], rot_z[9]) RELATIVE Arm9
COMPONENT Arm10= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm9
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm9

COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[10], shift_y[10], 0) RELATIVE Arm10
    ROTATED (rot_x[10], rot_y[10], rot_z[10]) RELATIVE Arm10
COMPONENT Arm11= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm10
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm10
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[11], shift_y[11], 0) RELATIVE Arm11
    ROTATED (rot_x[11], rot_y[11], rot_z[11]) RELATIVE Arm11
COMPONENT Arm12= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm11
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm11
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[12], shift_y[12], 0) RELATIVE Arm12
    ROTATED (rot_x[12], rot_y[12], rot_z[12]) RELATIVE Arm12
COMPONENT Arm13= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm12
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm12
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[13], shift_y[13], 0) RELATIVE Arm13

```

```

    ROTATED (rot_x[13], rot_y[13], rot_z[13]) RELATIVE Arm13
COMPONENT Arm14=Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm13
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm13
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[14], shift_y[14], 0) RELATIVE Arm14
    ROTATED (rot_x[14], rot_y[14], rot_z[14]) RELATIVE Arm14
COMPONENT Arm15= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm14
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm14
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[15], shift_y[15], 0) RELATIVE Arm15
    ROTATED (rot_x[15], rot_y[15], rot_z[15]) RELATIVE Arm15
COMPONENT Arm16= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm15
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm15
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[16], shift_y[16],0) RELATIVE Arm16
    ROTATED (rot_x[16], rot_y[16], rot_z[16]) RELATIVE Arm16
COMPONENT Arm17= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm16
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm16
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[17], shift_y[17], 0) RELATIVE Arm17
    ROTATED (rot_x[17], rot_y[17], rot_z[17]) RELATIVE Arm17
COMPONENT Arm18= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm17
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm17
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[18], shift_y[18], 0) RELATIVE Arm18
    ROTATED (rot_x[18], rot_y[18], rot_z[18]) RELATIVE Arm18
COMPONENT Arm19= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm18
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm18
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[19], shift_y[19], 0) RELATIVE Arm19
    ROTATED (rot_x[19], rot_y[19], rot_z[19]) RELATIVE Arm19
COMPONENT Arm20= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm19
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm19
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[20], shift_y[0], 0) RELATIVE Arm20
    ROTATED (rot_x[20], rot_y[20], rot_z[20]) RELATIVE Arm20
COMPONENT Arm21= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm20
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm20

```

```

COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[21], shift_y[21], 0) RELATIVE Arm21
  ROTATED (rot_x[21], rot_y[21], rot_z[21]) RELATIVE Arm21
COMPONENT Arm22= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm21
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm21
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[22], shift_y[22], 0) RELATIVE Arm22
  ROTATED (rot_x[22], rot_y[22], rot_z[22]) RELATIVE Arm22
COMPONENT Arm23= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm22
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm22
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[23], shift_y[23], 0) RELATIVE Arm23
  ROTATED (rot_x[23], rot_y[23], rot_z[23]) RELATIVE Arm23
COMPONENT Arm24=Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm23
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm23
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[24], shift_y[24], 0) RELATIVE Arm24
  ROTATED (rot_x[24], rot_y[24], rot_z[24]) RELATIVE Arm24
COMPONENT Arm25= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm24
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm24
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[25], shift_y[25], 0) RELATIVE Arm25
  ROTATED (rot_x[25], rot_y[25], rot_z[25]) RELATIVE Arm25
COMPONENT Arm26= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm25
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm25
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[26], shift_y[26],0) RELATIVE Arm26
  ROTATED (rot_x[26], rot_y[26], rot_z[26]) RELATIVE Arm26
COMPONENT Arm27= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm26
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm26
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[27], shift_y[27], 0) RELATIVE Arm27
  ROTATED (rot_x[27], rot_y[27], rot_z[27]) RELATIVE Arm27
COMPONENT Arm28= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm27
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm27
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[28], shift_y[28], 0) RELATIVE Arm28
  ROTATED (rot_x[28], rot_y[28], rot_z[28]) RELATIVE Arm28
COMPONENT Arm29= Arm( )

```

```

    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm28
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm28
    COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[29], shift_y[29], 0) RELATIVE Arm29
    ROTATED (rot_x[29], rot_y[29], rot_z[29]) RELATIVE Arm29
    COMPONENT Arm30= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm29
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm29
    COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[30], shift_y[30], 0) RELATIVE Arm30
    ROTATED (rot_x[30], rot_y[30], rot_z[30]) RELATIVE Arm30
    COMPONENT Arm31= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm30
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm30
    COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[31], shift_y[31], 0) RELATIVE Arm31
    ROTATED (rot_x[31], rot_y[31], rot_z[31]) RELATIVE Arm31
    COMPONENT Arm32= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm31
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm31
    COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[32], shift_y[32], 0) RELATIVE Arm32
    ROTATED (rot_x[32], rot_y[32], rot_z[32]) RELATIVE Arm32
    COMPONENT Arm33= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm32
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm32
    COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[33], shift_y[33], 0) RELATIVE Arm33
    ROTATED (rot_x[33], rot_y[33], rot_z[33]) RELATIVE Arm33
    COMPONENT Arm34=Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm33
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm33
    COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[34], shift_y[34], 0) RELATIVE Arm34
    ROTATED (rot_x[34], rot_y[34], rot_z[34]) RELATIVE Arm34
    COMPONENT Arm35= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm34
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm34
    COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[35], shift_y[35], 0) RELATIVE Arm35
    ROTATED (rot_x[35], rot_y[35], rot_z[35]) RELATIVE Arm35
    COMPONENT Arm36= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm35
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm35
    COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[36], shift_y[36],0) RELATIVE Arm36

```

```

    ROTATED (rot_x[36], rot_y[36], rot_z[36]) RELATIVE Arm36
COMPONENT Arm37= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm36
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm36
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[37], shift_y[37], 0) RELATIVE Arm37
    ROTATED (rot_x[37], rot_y[37], rot_z[37]) RELATIVE Arm37
COMPONENT Arm38= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm37
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm37
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[38], shift_y[38], 0) RELATIVE Arm38
    ROTATED (rot_x[38], rot_y[38], rot_z[38]) RELATIVE Arm38
COMPONENT Arm39= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm38
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm38
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[39], shift_y[39], 0) RELATIVE Arm39
    ROTATED (rot_x[39], rot_y[39], rot_z[39]) RELATIVE Arm39
COMPONENT Arm40= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm39
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm39
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[40], shift_y[40], 0) RELATIVE Arm40
    ROTATED (rot_x[40], rot_y[40], rot_z[40]) RELATIVE Arm40
COMPONENT Arm41= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm40
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm40
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[41], shift_y[41], 0) RELATIVE Arm41
    ROTATED (rot_x[41], rot_y[41], rot_z[41]) RELATIVE Arm41
COMPONENT Arm42= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm41
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm41
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[42], shift_y[42], 0) RELATIVE Arm42
    ROTATED (rot_x[42], rot_y[42], rot_z[42]) RELATIVE Arm42
COMPONENT Arm43= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm42
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm42
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[43], shift_y[43], 0) RELATIVE Arm43
    ROTATED (rot_x[43], rot_y[43], rot_z[43]) RELATIVE Arm43
COMPONENT Arm44=Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm43
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm43

```

```

COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[44], shift_y[44], 0) RELATIVE Arm44
  ROTATED (rot_x[44], rot_y[44], rot_z[44]) RELATIVE Arm44
COMPONENT Arm45= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm44
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm44
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[45], shift_y[45], 0) RELATIVE Arm45
  ROTATED (rot_x[45], rot_y[45], rot_z[45]) RELATIVE Arm45
COMPONENT Arm46= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm45
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm45
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[46], shift_y[46],0) RELATIVE Arm46
  ROTATED (rot_x[46], rot_y[46], rot_z[46]) RELATIVE Arm46
COMPONENT Arm47= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm46
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm46
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[47], shift_y[47], 0) RELATIVE Arm47
  ROTATED (rot_x[47], rot_y[47], rot_z[47]) RELATIVE Arm47
COMPONENT Arm48= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm47
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm47
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[48], shift_y[48], 0) RELATIVE Arm48
  ROTATED (rot_x[48], rot_y[48], rot_z[48]) RELATIVE Arm48
COMPONENT Arm49= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm48
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm48
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[49], shift_y[49], 0) RELATIVE Arm49
  ROTATED (rot_x[49], rot_y[49], rot_z[49]) RELATIVE Arm49
COMPONENT Arm50= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm49
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm49

COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[50], shift_y[50], 0) RELATIVE Arm50
  ROTATED (rot_x[50], rot_y[50], rot_z[50]) RELATIVE Arm50
COMPONENT Arm51= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm50
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm50
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[51], shift_y[51], 0) RELATIVE Arm51
  ROTATED (rot_x[51], rot_y[51], rot_z[51]) RELATIVE Arm51

```

```

COMPONENT Arm52= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm51
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm51
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[52], shift_y[52], 0) RELATIVE Arm52
  ROTATED (rot_x[52], rot_y[52], rot_z[52]) RELATIVE Arm52
COMPONENT Arm53= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm52
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm52
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[3], shift_y[3], 0) RELATIVE Arm53
  ROTATED (rot_x[3], rot_y[3], rot_z[3]) RELATIVE Arm53
COMPONENT Arm54=Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm53
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm53
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[54], shift_y[54], 0) RELATIVE Arm54
  ROTATED (rot_x[54], rot_y[54], rot_z[54]) RELATIVE Arm54
COMPONENT Arm55= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm54
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm54
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[55], shift_y[55], 0) RELATIVE Arm55
  ROTATED (rot_x[55], rot_y[55], rot_z[55]) RELATIVE Arm55
COMPONENT Arm56= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm55
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm55
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[56], shift_y[56],0) RELATIVE Arm56
  ROTATED (rot_x[56], rot_y[56], rot_z[56]) RELATIVE Arm56
COMPONENT Arm57= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm56
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm56
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[57], shift_y[57], 0) RELATIVE Arm57
  ROTATED (rot_x[57], rot_y[57], rot_z[57]) RELATIVE Arm57
COMPONENT Arm58= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm57
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm57
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[58], shift_y[58], 0) RELATIVE Arm58
  ROTATED (rot_x[58], rot_y[58], rot_z[58]) RELATIVE Arm58
COMPONENT Arm59= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm58
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm58
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()

```

```

    AT (shift_x[59], shift_y[59], 0) RELATIVE Arm59
    ROTATED (rot_x[59], rot_y[59], rot_z[59]) RELATIVE Arm59
COMPONENT Arm60= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm59
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm59
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[60], shift_y[60], 0) RELATIVE Arm60
    ROTATED (rot_x[60], rot_y[60], rot_z[60]) RELATIVE Arm60
COMPONENT Arm61= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm60
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm60
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[61], shift_y[61], 0) RELATIVE Arm61
    ROTATED (rot_x[61], rot_y[61], rot_z[61]) RELATIVE Arm61
COMPONENT Arm62= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm61
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm61
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[62], shift_y[62], 0) RELATIVE Arm62
    ROTATED (rot_x[62], rot_y[62], rot_z[62]) RELATIVE Arm62
COMPONENT Arm63= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm62
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm62
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[63], shift_y[63], 0) RELATIVE Arm63
    ROTATED (rot_x[63], rot_y[63], rot_z[63]) RELATIVE Arm63
COMPONENT Arm64=Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm63
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm63
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[64], shift_y[64], 0) RELATIVE Arm64
    ROTATED (rot_x[64], rot_y[64], rot_z[64]) RELATIVE Arm64
COMPONENT Arm65= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm64
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm64
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[65], shift_y[65], 0) RELATIVE Arm65
    ROTATED (rot_x[65], rot_y[65], rot_z[65]) RELATIVE Arm65
COMPONENT Arm66= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm65
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm65
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[66], shift_y[66],0) RELATIVE Arm66
    ROTATED (rot_x[66], rot_y[66], rot_z[66]) RELATIVE Arm66
COMPONENT Arm67= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm66

```

```

ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm66
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[67], shift_y[67], 0) RELATIVE Arm67
  ROTATED (rot_x[67], rot_y[67], rot_z[67]) RELATIVE Arm67
COMPONENT Arm68= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm67
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm67
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[68], shift_y[68], 0) RELATIVE Arm68
  ROTATED (rot_x[68], rot_y[68], rot_z[68]) RELATIVE Arm68
COMPONENT Arm69= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm68
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm68
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[69], shift_y[69], 0) RELATIVE Arm69
  ROTATED (rot_x[69], rot_y[69], rot_z[69]) RELATIVE Arm69
COMPONENT Arm70= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm69
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm69
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[70], shift_y[70], 0) RELATIVE Arm70
  ROTATED (rot_x[70], rot_y[70], rot_z[70]) RELATIVE Arm70
COMPONENT Arm71= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm70
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm70
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[71], shift_y[71], 0) RELATIVE Arm71
  ROTATED (rot_x[71], rot_y[71], rot_z[71]) RELATIVE Arm71
COMPONENT Arm72= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm71
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm71
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[72], shift_y[72], 0) RELATIVE Arm72
  ROTATED (rot_x[72], rot_y[72], rot_z[72]) RELATIVE Arm72
COMPONENT Arm73= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm72
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm72
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[73], shift_y[73], 0) RELATIVE Arm73
  ROTATED (rot_x[73], rot_y[73], rot_z[73]) RELATIVE Arm73
COMPONENT Arm74=Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm73
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm73
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[74], shift_y[74], 0) RELATIVE Arm74
  ROTATED (rot_x[74], rot_y[74], rot_z[74]) RELATIVE Arm74

```

```

COMPONENT Arm75= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm74
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm74
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)( )
  AT (shift_x[75], shift_y[75], 0) RELATIVE Arm75
  ROTATED (rot_x[75], rot_y[75], rot_z[75]) RELATIVE Arm75
COMPONENT Arm76= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm75
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm75
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)( )
  AT (shift_x[76], shift_y[76],0) RELATIVE Arm76
  ROTATED (rot_x[76], rot_y[76], rot_z[76]) RELATIVE Arm76
COMPONENT Arm77= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm76
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm76
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)( )
  AT (shift_x[77], shift_y[77], 0) RELATIVE Arm77
  ROTATED (rot_x[77], rot_y[77], rot_z[77]) RELATIVE Arm77
COMPONENT Arm78= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm77
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm77
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)( )
  AT (shift_x[78], shift_y[78], 0) RELATIVE Arm78
  ROTATED (rot_x[78], rot_y[78], rot_z[78]) RELATIVE Arm78
COMPONENT Arm79= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm78
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm78
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)( )
  AT (shift_x[79], shift_y[79], 0) RELATIVE Arm79
  ROTATED (rot_x[79], rot_y[79], rot_z[79]) RELATIVE Arm79
COMPONENT Arm80= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm79
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm79
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)( )
  AT (shift_x[80], shift_y[80], 0) RELATIVE Arm80
  ROTATED (rot_x[80], rot_y[80], rot_z[80]) RELATIVE Arm80
COMPONENT Arm81= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm80
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm80
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)( )
  AT (shift_x[81], shift_y[81], 0) RELATIVE Arm81
  ROTATED (rot_x[81], rot_y[81], rot_z[81]) RELATIVE Arm81
COMPONENT Arm82= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm81
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm81
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)( )

```

```

    AT (shift_x[82], shift_y[82], 0) RELATIVE Arm82
    ROTATED (rot_x[82], rot_y[82], rot_z[82]) RELATIVE Arm82
COMPONENT Arm83= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm82
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm82
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[83], shift_y[83], 0) RELATIVE Arm83
    ROTATED (rot_x[83], rot_y[83], rot_z[83]) RELATIVE Arm83
COMPONENT Arm84=Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm83
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm83
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[84], shift_y[84], 0) RELATIVE Arm84
    ROTATED (rot_x[84], rot_y[84], 0) RELATIVE Arm84
COMPONENT Arm85= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm84
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm84
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[85], shift_y[85], 0) RELATIVE Arm85
    ROTATED (rot_x[85], rot_y[85], rot_z[85]) RELATIVE Arm85
COMPONENT Arm86= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm85
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm85
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[86], shift_y[86],0) RELATIVE Arm86
    ROTATED (rot_x[86], rot_y[86], rot_z[86]) RELATIVE Arm86
COMPONENT Arm87= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm86
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm86
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[87], shift_y[87], 0) RELATIVE Arm87
    ROTATED (rot_x[87], rot_y[87], rot_z[87]) RELATIVE Arm87
COMPONENT Arm88= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm87
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm87
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[88], shift_y[88], 0) RELATIVE Arm88
    ROTATED (rot_x[88], rot_y[88], rot_z[88]) RELATIVE Arm88
COMPONENT Arm89= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm88
    ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm88
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
    AT (shift_x[89], shift_y[89], 0) RELATIVE Arm89
    ROTATED (rot_x[89], rot_y[89], rot_z[89]) RELATIVE Arm89
COMPONENT Arm90= Arm( )
    AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm89

```

```

ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm89
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[90], shift_y[90], 0) RELATIVE Arm90
  ROTATED (rot_x[90], rot_y[90], rot_z[90]) RELATIVE Arm90
COMPONENT Arm91= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm90
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm90
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[91], shift_y[91], 0) RELATIVE Arm91
  ROTATED (rot_x[91], rot_y[91], rot_z[91]) RELATIVE Arm91
COMPONENT Arm92= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm91
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm91
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[92], shift_y[92], 0) RELATIVE Arm92
  ROTATED (rot_x[92], rot_y[92], rot_z[92]) RELATIVE Arm92
COMPONENT Arm93= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm92
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm92
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[93], shift_y[93], 0) RELATIVE Arm93
  ROTATED (rot_x[93], rot_y[93], rot_z[93]) RELATIVE Arm93
COMPONENT Arm94=Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm93
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm93
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[94], shift_y[94], 0) RELATIVE Arm94
  ROTATED (rot_x[4], rot_y[4], rot_z[4]) RELATIVE Arm94
COMPONENT Arm95= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm94
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm94
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[95], shift_y[95], 0) RELATIVE Arm95
  ROTATED (rot_x[95], rot_y[95], rot_z[95]) RELATIVE Arm95
COMPONENT Arm96= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm95
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm95
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[96], shift_y[96],0) RELATIVE Arm96
  ROTATED (rot_x[96], rot_y[96], rot_z[96]) RELATIVE Arm96
COMPONENT Arm97= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm96
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm96
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[97], shift_y[97], 0) RELATIVE Arm97
  ROTATED (rot_x[97], rot_y[97], rot_z[97]) RELATIVE Arm97

```

```

COMPONENT Arm98= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm97
ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm97
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[98], shift_y[98], 0) RELATIVE Arm98
  ROTATED (rot_x[98], rot_y[98], rot_z[98]) RELATIVE Arm98
COMPONENT Arm99= Arm( )
  AT (dx, 0, l+dz) RELATIVE Arm98
  ROTATED (0, angle, 0) RELATIVE Arm98
COMPONENT COPY(section)= COPY(section)()
  AT (shift_x[99], shift_y[99], coord[99]) RELATIVE Arm99
  ROTATED (rot_x[99], rot_y[99], rot_z[99]) RELATIVE Arm99
COMPONENT Mon_lambda_2 = Monitor_nD(
  xwidth = w, yheight = h, bins =40,
  restore_neutron = 1, options="lambda, limits=[1 11] per cm2")
  AT (0, 0, 1) RELATIVE PREVIOUS
  ROTATED (0, 0, 0) RELATIVE PREVIOUS
COMPONENT Mon_x = Monitor_nD(
  xwidth = w, yheight = h,
  restore_neutron = 1, options="x limits=[-0.011 0.011] bins=22 " )
  AT (0, 0, 0) RELATIVE PREVIOUS
  ROTATED (0, 0, 0) RELATIVE PREVIOUS

END

```