

# **радиационная защита (2017 Ver.)**

**NuHRDeC / JAEA**

**Нобуо SASAMOTO  
(Sasamoto\_nobuo@yahoo.co.jp)**

# Основы дизайна щита

## ◆ Цели радиационной защиты

- Предотвращать люди от воздействия вредных излучений
- Предотвращать конструкционные материалы и механизмы от радиационного повреждения и нагрева

## ◆ Три основы для внешнего снижения воздействия

- **Расстояние**: Для того, чтобы сохранить достаточное расстояния между источником излучения и рабочим местом.
- **Время**: Для того, чтобы сократить лучевую рабочее время. Для этой цели, холодный запуск заранее рекомендуется.
- **экранирование**: Для установки экранирующих материалов между источником излучения и рабочим местом.

□ Значение имеет порядок экранирование, расстояние а также время,

## ◆ Целевые излучения для экранирования в инженерной области ядерной

- Нейтроны и фотоны (рентгеновские лучи и  $\gamma$ -лучей)

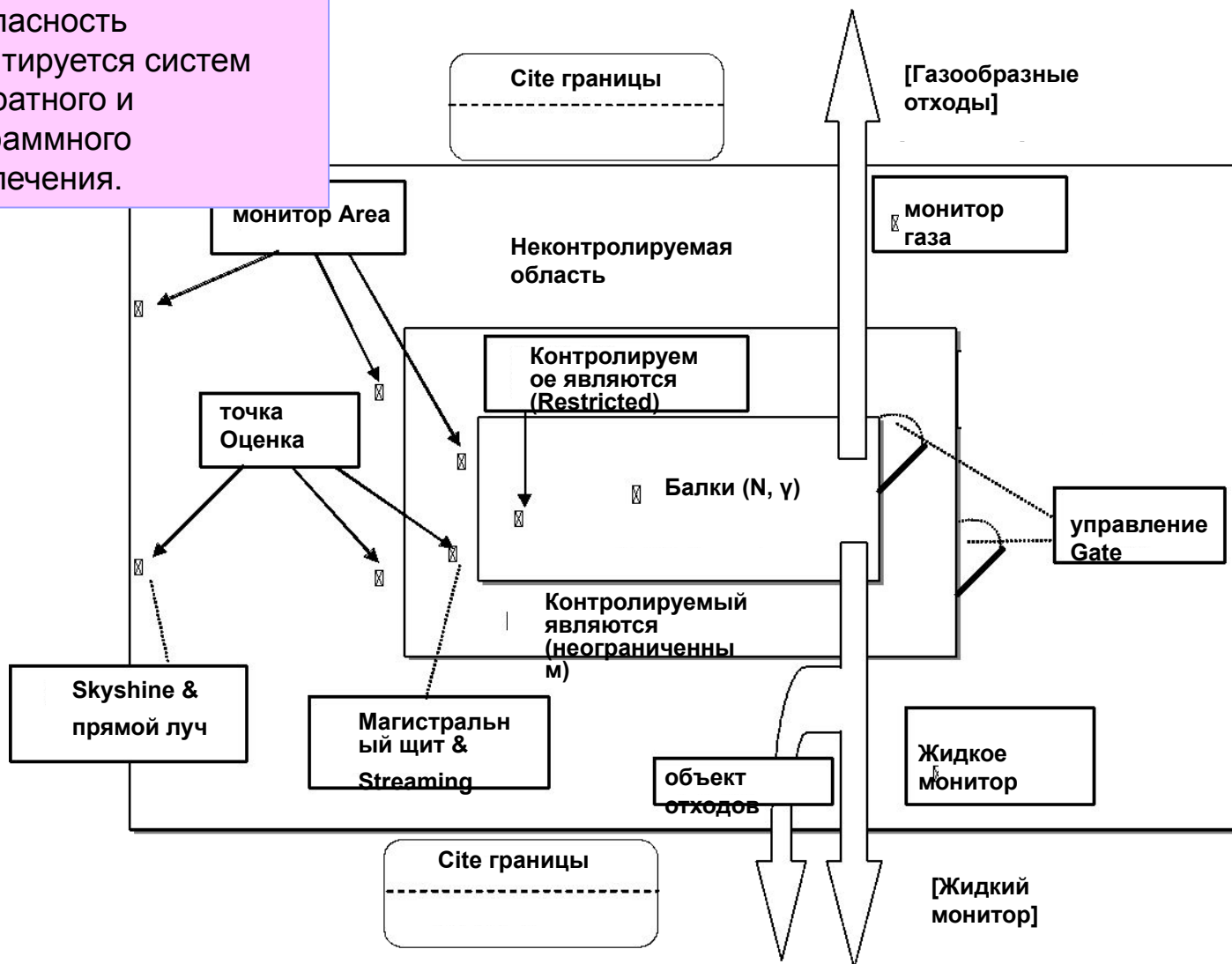
следует рассмотреть в связи с их большей

## Элементы дизайна щита

- ◆ Определение критериев проектирования экранирования
- ◆ Оценка источников излучения (нейтронов,  $\gamma$ -лучей) по абсолютной величине
- ◆ сплошное экранирование (Расчет затухания) определить толщину стенки щита
- ◆ Поточная передача данных: Для уменьшения излучения, проходящего через воздуховод, лабиринт и т.д.
- ◆ Skyshine (воздух рассеянного излучения)
- ◆ Индуцированные радиоактивности за счет нейтронной активации конструкционных материалов и даже окружающий воздух
- ◆ Радиационное повреждение [ответ; ]
- ◆ Лучевая отопление [ответ; ]
  - $R$  и  $R_{\text{eff}}$  являются функции отклика, такие как коэффициент преобразования DPA, массовый коэффициент поглощения энергии, соответственно.
- После того, как поток  $\phi$  определяются, различные физические

# Радиационная защита и Оценка системы безопасности

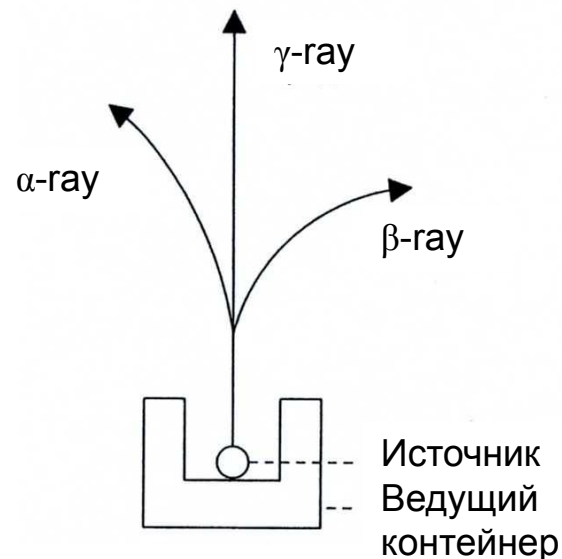
Безопасность гарантируется систем аппаратного и программного обеспечения.



# Тип излучения

## ◆ Тип излучения

- Излучение делится на электромагнитного излучения и одной частицы.
- Рентгенологическое и  $\gamma$ -ray, высокие энергетические электромагнитные волны, которые могут ионизируют атомы, называются электромагнитным излучением.
- Излучение частиц классифицируются также для заряженного излучения и незаряженных одного (нейтроны). Заряженные частицы отклоняются магнитными полями.
- Применяя магнитное поле, от передней части к задней части листа, альфа-лучи будут отклоняться влево, в то время как  $\beta$ -лучи находятся справа.  $\gamma$ -ray, однако, движется прямо (левая рука правило Флеминга).



**Рис. Прогиб излучения из-за магнитное поле**

# Излучение энергии (1)

## ◆ Энергия излучения частиц

- Пусть масса частиц  $m$  (кг) и скорость  $v$  (М / с) в единице СИ, кинетическая энергия частицы дается, (ньютоновская динамика)

## ◆ электронвольта

- Электронвольт является одним из самых основных единицы энергии излучения, что блок электронного приобретающего во время путешествия по разности потенциалов  $1В$   $1$  эВ.

Вот,  $e$  ( $= 1,6 \times 10^{-19}$  С) является заряд электрона.

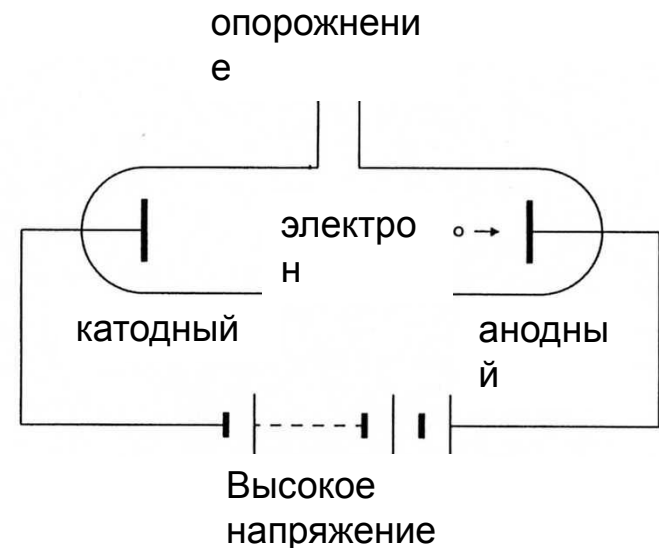


Рис. Ускорение электрона

## Излучение энергии (2)

### ◆ Энергия и импульс электромагнитного излучения

- Электромагнитная волна (масса = 0,0), как полагают, имеют как частицы и волны природы одновременно (Двойственность света)
- Обозначим через колебаний  $\nu$  (Гц) и длины волны  $\lambda$  (м), энергия электромагнитной волны  $E$

Здесь  $h$  постоянная Планка

$$h = 6,628 \times 10^{-34} \text{ (Дж / с)}.$$

- Так как скорость света  $c$  выражается как
- инерция  $p$  (кг·м / с) задается как

# Генерация рентгеновского излучения

## ◆ Генерирование механизм рентгеновских лучей

- При нагревании анода, тепловые электроны испускаются. Они будут ускоряться высоким напряжением, приложенного к рентгеновской трубке и образуют рентгеновские лучи.

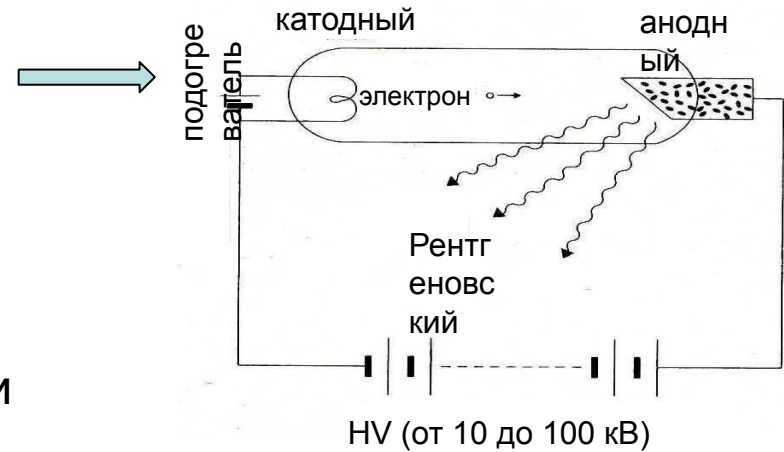


Рис. Генерация рентгеновского излучения

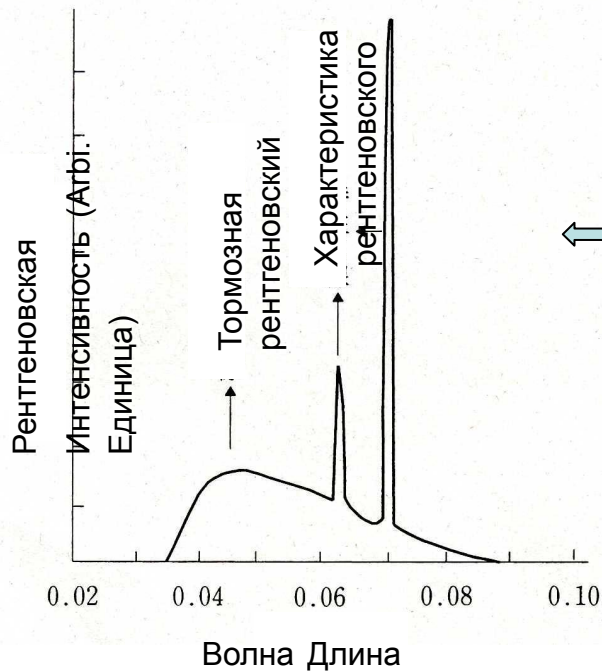


Рис. Энергетический спектр Рентгеновский из Мо

## ◆ Энергетический спектр рентгеновского излучения

- Получен энергетический спектр рентгеновских лучей состоит из непрерывного спектра и некоторых спектров крутой линии.
- Этот непрерывный спектр называется тормозного рентгеновского излучения и те линии, что и характеристического рентгеновского излучения Их



# Генерация характеристического рентгеновского

## ◆ Генерирование механизм характеристического рентгеновского излучения

- Быстрый электрон путешествия через целевые материалы, он будет страдать ионизации и возбуждения процессов с материалами.
- Когда атом ионизируется или возбуждается, вакансия происходит на более низкой орбите уровня энергии.
- Один из электронов высоких уровней орбиты сразу же попытаться пополнить вакансии, с последующим испусканием характеристического рентгеновского излучения.

## ◆ Энергия характеристического рентгеновского излучения

- Характеристика энергия рентгеновского излучения равна разности уровня энергии орбиты до и после перехода.

## ◆ оже-эффект

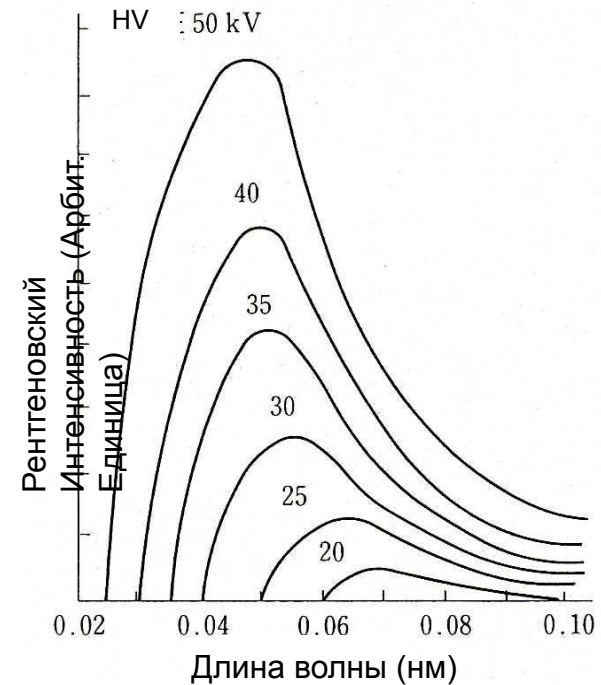
- В возбужденном атоме состояния, энергия будет использоваться для испускания характеристического рентгеновского излучения

# Генерация тормозного излучения

## ◆ Создание механизма

### тормозного излучения

- Проходя мимо ядра, высокая энергия электроны будут ускорены при отклонении направления его полета на кулоновской силу, с последующим испусканием высокой энергии рентгеновских лучей.
- Падающий электрон потеряет свою кинетическую энергию, а затем тормозится.
- Выделяемая энергия преобразуется в электромагнитную энергию, генерации тормозного рентгеновского луча.
- Рентгеновские лучи образуют непрерывный спектр, поскольку электрон показывает различным



**Рис. Энергетический спектр тормозного излучения от мишени W**

# Генерация гамма-излучения (1)

## ◆ создание $\gamma$ -ray

- Подобно тому, как атом содержит некоторые орбиты различных энергетических уровней, ядро также имеет различные возбужденные уровни энергии, включая уровень земли.
- После того, как  $\alpha$  и  $\beta$  распадов, генерируемые нуклиды обычно остаются возбужден. Возбужденные состояния могут быть стабилизированы с помощью перехода в основное состояние, испуская гамма-лучи.
- Излучаемая энергия  $\gamma$ -лучей равна разности энергий между

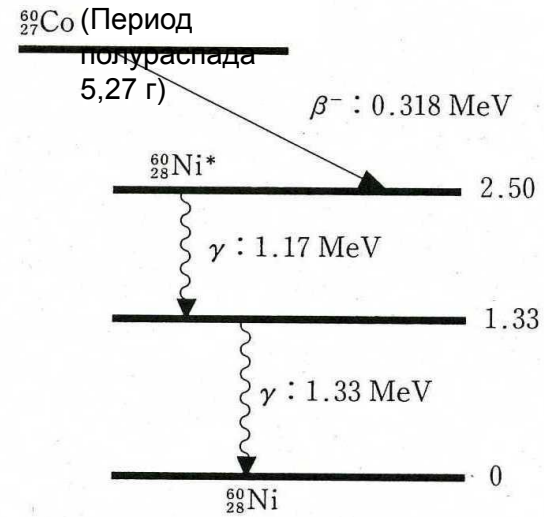


Рис. Распад схема  $^{60}\text{Колорадо}$

- При распаде бета,  $^{60}\text{Co}$  будет преобразован в  $^{60}\text{Ni}^*$  с последующим испусканием бета-лучей 0.318 МэВ.
- $^{60}\text{Ni}^*$  сразу же переходит к уровню земли, через 1<sup>улица</sup> возбужденный уровень, с последующим испусканием 2<sup>11</sup> гамма-лучи 1.17 МэВ и 1.33 МэВ

## Генерация гамма-излучения (2)

### ◆ Внутренняя конверсия (ИС)

- Возбужденное ядро обычно стабилизируется путем излучения гамма-лучи, но вместо этого, ядро иногда передает свою энергию на орбитальных электронов, чтобы выгнать из атома.
- Этот процесс называется ИС. Это похоже на оже-эффект, который выгоняет орбитальные электроны вместо того, чтобы излучать характеристические рентгеновский.
- После эмиссии электронов ИС, характерные рентгеновские лучи и / или оже-электроны будут также излучаются.
- Кинетическая энергия, передаваемая ИС электрона дается как,

$$E = (E_M - E_N) - I = \text{час}\nu - \text{я}$$

Вот я является энергия ионизации орбитального электрона.

# Рентгеновского и $\gamma$ -излучения

## ◆ Разница между $\gamma$ -лучей и X-ray

- Физические характеристики совершенно так же между рентгеновским и гамма-излучением
- Это, по-видимому неверная мысль, что более высокая энергия фотона является  $\gamma$ -лучей и нижний является рентгеновский.
- гамма-излучения испускается при нестабильных нуклидов возвращается на нижний энергетический уровень, включая уровня земли.
- Рентгеновское это электромагнитное излучение, которое излучается после перехода орбитальных электронов.
- Таким образом,  $\gamma$ -лучей происходит от ядра и Рентген от атома.

## Генерация нейтронов (1)

### ◆ Создание механизма нейтрон

- Нейтронный могут быть получены только в результате ядерных реакций. Пример приведен ниже.
- Эта реакция описана в виде  ${}^7\text{Li} (p, n){}^7\text{Be}$ , Это реакция, ускоряющий протоны поражаются в  ${}^7\text{Li}$  предназначаться для генерации  ${}^7\text{Be}$  и нейтрон.
- В случаях  $(\gamma, n)$  реакции и  $(\alpha, n)$  реакция на  ${}^7\text{Be}$ , падающие лучи не нужно ускоряться. Только попав гамма-излучения от  ${}^{124}\text{Sb}$  и  $\alpha$ -лучей из  ${}^{241}\text{Am}$  на бериллиевом может генерировать нейтроны.

## Генерация нейтронов (2)

### ◆ Генерация нейтронов деления ядер

- Так как одна реакция деления генерирует от 2 до 3 нейтронов каждый, цепная реакция возможно генерировать большое количество источника нейтронов в ядерных реакторах.

### ◆ энергия Neutron

- Другой тип деления, как спонтанное деление ( $^235\text{U}$ ) доступен. Типичный Реакция энергия  $Q$  распределяется на оба продукты деления и нейтроны.
- Энергетический спектр нейтронов деления в диапазоне от тепловой энергии до приблизительно 15 МэВ, со средней энергией около 2 МэВ.
- Спектр точно аппроксимировать формулой Вт для диапазона энергий от 0,075 до 17 МэВ.



Рис. Деление спектр нейтронов

# Фотон взаимодействия с веществом (1)

## ◆ Фотоэлектрический эффект

- Процесс, падающий фотон дает всю свою энергию орбитального электрона и выбросить его из атома. Электрон, излучаемый из атома фотоэффекта называется фотоэлектронами.
  - Этот процесс можно рассматривать как своего рода процесс ионизации.
  - В отличие от процесса ионизации заряженной частицы, с помощью которого она теряет свою энергию постепенно, фотоэлектрический эффект, однако, падающий фотон теряет всю энергию одним взаимодействием и исчезает.
  - Таким образом, фотоэлектрический эффект иногда называют фотоэлектрическим поглощением.
  - Поперечное сечение фотоэффекта дается как
- 
- Фотоэлектрический эффект показывает очень сильную зависимость от атомного номера  $Z$  и падающей энергии.



# Фотон взаимодействия с веществом (2)

## ◆ Комptonовское рассеяние

- Это процесс, который сталкивается падающий фотон с орбитальным электроном, откатами его и дает ему часть энергии фотона. Сам Фотон рассеивается в разных направлениях.

## ◆ Энергия рассеянного фотона

- Столкновения фотона с свободным электроном. (Упругое рассеяние)  
Поскольку законы сохранения энергии и импульса проводить до и после взаимодействия, энергия рассеянного фотона  $\nu'$  может быть получена  
Энергия рассеянного фотона описывается как функция угла рассеяния  $\theta$ , показывая непрерывный энергетический спектр.

## ◆ Поперечное сечение

- Сечение описывается формулой Клейна-Нишины (угловой дифференциальные  $\sigma$ ). Так как формула дает сечение одного орбитального электрона, сечение атома  $\sigma_{\text{КОМП}}$  Ниже приводится,

# Фотон взаимодействия с веществом (3)

## ◆ создание электронной пары

- Процесс, который с высокой энергией фотонов исчезает в кулоновском поле ядра, и пара электрона и позитрона созданы.

(Преобразование энергии к массе)

$$h\nu \rightarrow e^+ + e^-$$

- Энергия электронов, создаваемых  $E^+$  а также  $E^-$  находятся

$$E^+ + E^- = h\nu - 2m_0c^2$$

Вот  $m_0c^2$  это масса покоя электрона энергии.

- Распределение энергии для электрона и позитрона не может быть однозначно определено,  $E^+$  а также  $E^-$  изменяться от 0 до  $h\nu - 2m_0c^2$ ,
- Созданный электрон и позитрон теряют свою энергию, повторив ионизацию и возбуждение. Позитронной энергия которого исчерпаны, в сочетании с окружающей электрона, генерируя два аннигиляции гамма-лучами 0,511 МэВ. (Преобразование массы в энергию)

## ◆ Поперечное сечение рождения пар:

# Отношения между 3 Основными фотонными взаимодействиями

- ◆ Отношения между 3 основными взаимодействиями фотонов
- На рисунке справа показана взаимосвязь между тремя основными взаимодействиями фотоэффекта, комптоновского рассеяния и создание электронных пар.
- Полезно для качественного понимания фиксированных взаимодействий.

Энергия фиксированы, доминирующие изменения взаимодействия с фотоэлектрического доминирующими к созданию парного доминантному с увеличением энергии.

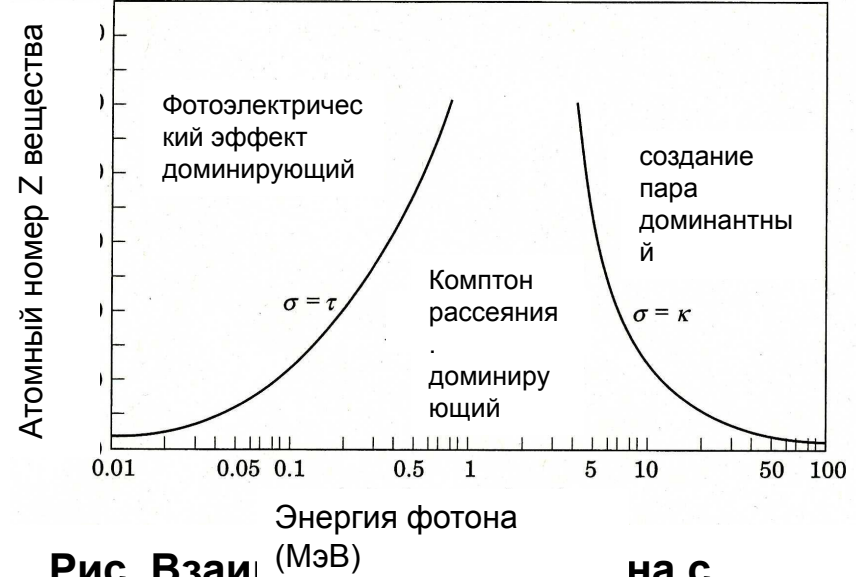


Рис. Взаимосвязь на с веществом

Энергия фиксированы, доминирующие сдвиги взаимодействия с комптоновского рассеяния на фотоэлектрические или Сопряжение с увеличением Z

# Фотон Затухание Коэффициент

## ◆ коэффициент затухания

- $\mu$  в формуле затухания называется линейным коэффициентом ослабления.
- $\mu$  в единицах  $\text{см}^{-1}$  или  $\text{м}^{-1}$  является суммой поперечного сечения 3 основных взаимодействий микроскопического, умноженная на плотности числа атомов  $N$

- $\mu_m (= M/\rho)$  это массовый коэффициент ослабления в единицах  $\text{см}^2\text{г}^{-1}$  или  $\text{м}^2\text{кг}^{-1}$

- Массовый коэффициент ослабления, в области где комптоновское рассеяние является доминирующим, показывает небольшую материальную зависимость.

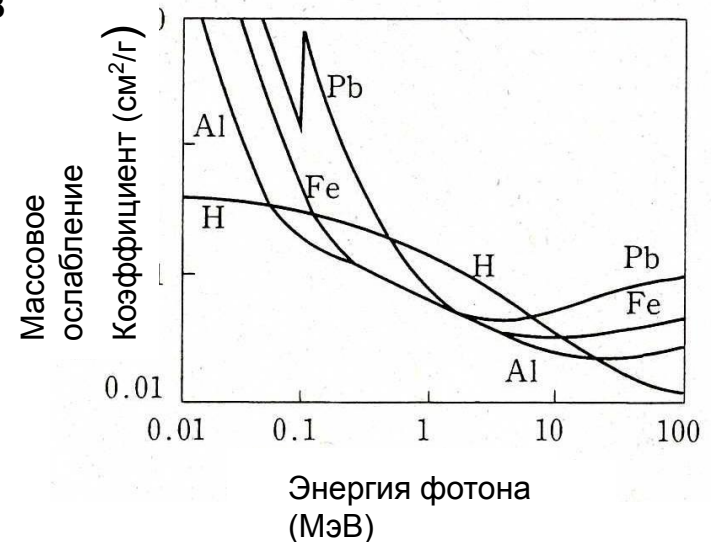


Рис. коэффициент затухания Масс  
вопросов

# Фотон Затухание с расстоянием

- ◆ Давайте предположим, что точка изотропным  $\gamma$  -ray источник (Бк) в интенсивности, испускающие  $S$   $\gamma$ -лучей каждый второй.
- ◆ Плотность потока (поток)  $\phi$  на месте  $d$  (М) друг от друга с точки источника выражается как

$S$ : Количество  $\gamma$  -ray  
испускаемый

- Формула, называется закон обратных квадратов расстояний,  
Объясняется следующим образом;

за единицу времени [ $\gamma$ -  
лучей / с]

- Давайте предположим, что шар радиуса  $d$  вокруг источника.
- Так как скорость флюенса  $\phi$  определяется как число частиц, проходящих через единицу площади ( $1 \text{ м}^2$ ) От общей площади поверхности сферической  $4\pi d^2$ ,  $\phi$  пропорциональна  $1 / (4\pi d^2)$
- Таким образом, умножая  $1 / (4\pi d^2)$  К интенсивности источника делает приведенную выше формулу.

**Внимание! Закон обратных квадратов из Расстояние справедливо только для точечного изотропного источника.**

**Затем, что справиться с проблемой исходного объема?**

# Фотон Затухание в веществе (1)

## ◆ Затухание из-за взаимодействия

- Давайте исследуем затухание фотонов из-за поглощения и рассеяния для геометрии в рисунке.

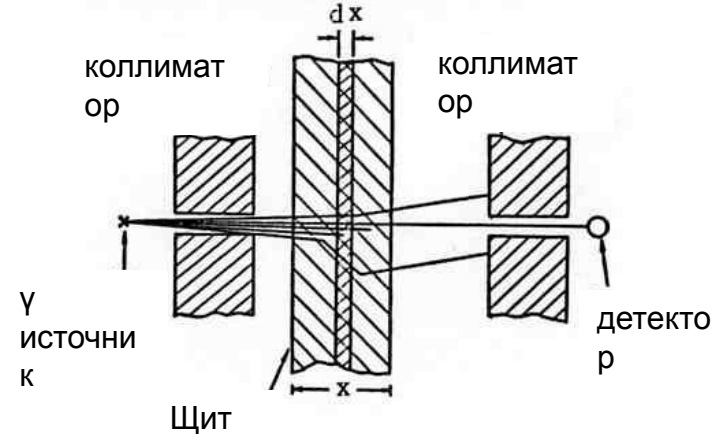


Рис. Геометрия коллимированного пучка (Узкие геометрии луча)

- Установив свинцовые

коллиматоры на обеих сторонах

- Фотоны потерял  $-dI$  из-за взаимодействия в бесконечно экранировании, только uncollided малой области  $dx$  пропорциональна как  $dx$  и фотоны достигают детектора.

интенсивность падающих фотонов на области,

представляющей интерес  $\mu$  является коэффициент линейного ослабления (Уже определен)



- Интеграция с обеих сторон по толщине щита

Это интересно знать, что приведенная выше формула имеет тот же формат формулы излучения распада

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

## Фотон Затухание в веществе (2)

- ◆ **Ослабление неколлимированного пучка**
  - В правой фигуре, как нерассеянный и рассеяны  $\gamma$ -лучей может достигать детектор.
  - Для того, чтобы рассмотреть рассеянные составляющая  $\gamma$ -лучи для расчета затухания, параметр  $B$ , Фактор накопления, вновь введен.
  - Определение коэффициента нарост

Здесь учащихся начальной  $\gamma$  означает нерассеянный  $\gamma$ -ray.  $B$

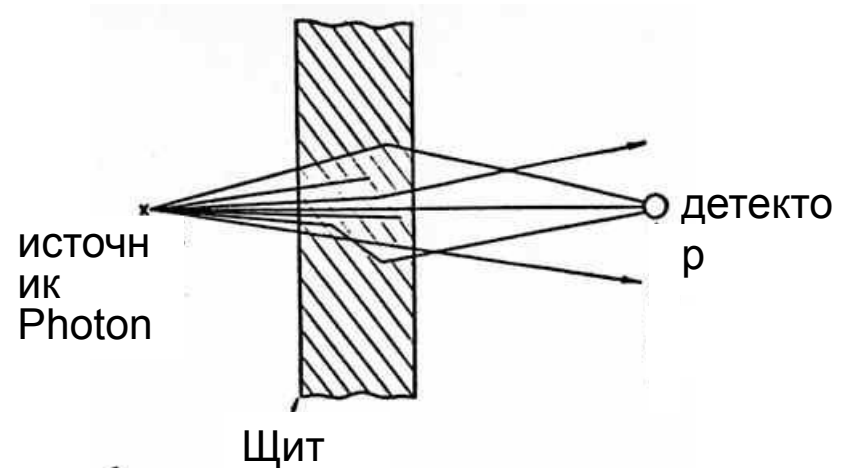
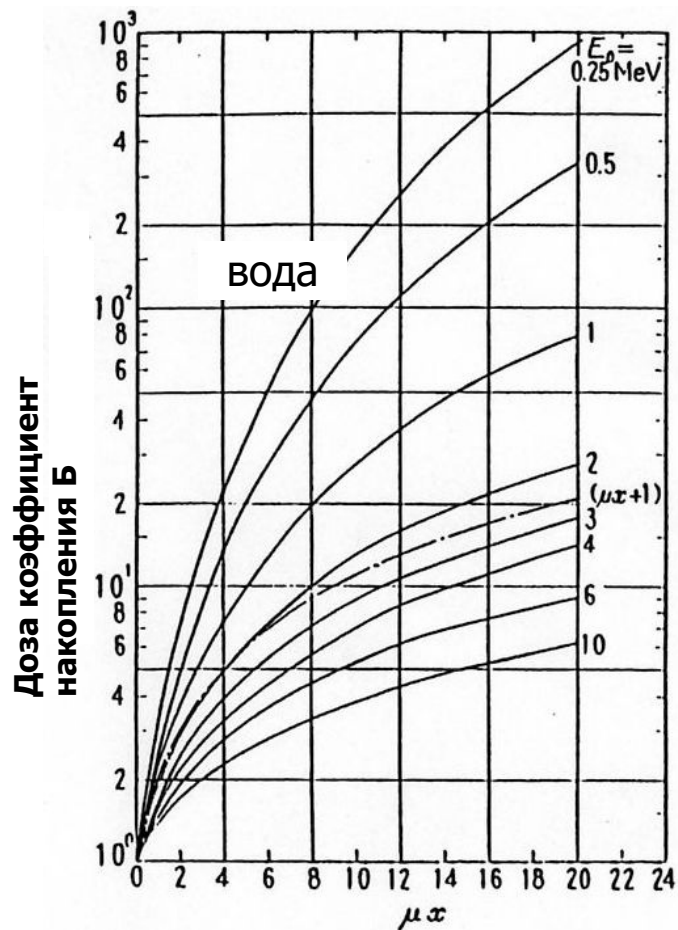


Рис. Геометрия Широкий луч  
(Без коллиматоров)

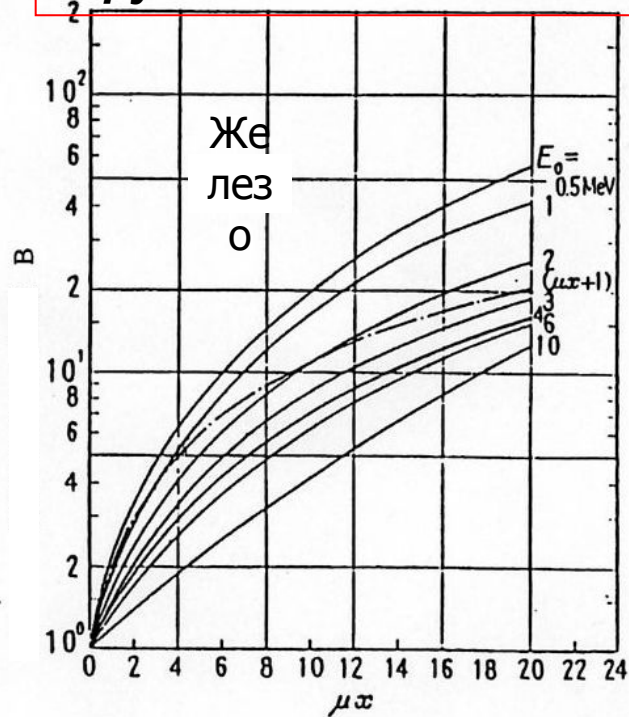
**Затухание ядро  $\gamma$ -ray**  
Два фактора затухания (расстояние и взаимодействия) объединяются, чтобы сделать ядро затухания  $K$  фотонов, основное уравнение упрощенного метода расчета.

# Пример фактор накопления



Толщина щита в мфу

Обратите внимание, что горизонтальная ось обозначает толщину экрана в **мфу**



Толщина щита в мфу

Рис. Коэффициент дозы накопление воды и железа



# Интерполяция Формула раскочки Factor с толщиной

(1) формула Тейлора»(x в см)

$\mu_{Икс}$  : Толщина в см

(2) формула Бергера (x в см)

$A, \alpha, \beta, A, \beta$  ;

подгоночных  
параметров

(3) формула ГП (X в MFP)

быть определенным

$Икс$  : Толщина в мфу

$B, a, v, g, X_K$  ;

подгоночных  
параметров

быть  
определенным

формула GP, казалось бы, сложной, дает очень точные результаты до толщины 40 мфу или более.

## Half-Value Толщина

На основе формулы затухания, некоторые полезные параметры экранирования являются производными.

Затухание задается

Тогда логарифмирование обеих сторон,

- ◆ Длина свободного пробега (МФФ):

Подставляя  $1/e$  для  $I/I_0$ , То можно получить

- ◆ Толщина Половины значения ( $d_{1/2}$ ):

Аналогичным образом, подставляя  $1/2$  до  $I/I_0$ , То можно получить

- ◆ Толщина Десятого значения ( $d_{1/10}$ ):

Далее, подставляя  $1/10$  до  $I/I_0$ , То можно получить

# Расчет поглощенной дозы (1)

## ◆ Energy absorption coefficient

- With  $\mu$ , we can calculate photon attenuation.
- Next, let's consider how to evaluate the absorbed dose using  $\mu$ .
- The absorbed dose is a very basic data for evaluation of radiation effect on human body. Absorbed dose  $D$  (Gy) is defined as the energy absorbed in matter per unit mass in (J/kg).
- Incident photon energy  $h\nu$ 
  - To electron → Absorbed in matter
  - To photon → Escaped from matter
- $\mu$  is a probability of photon interaction with matter. But when colliding, photon does not always transfer all its energy to electrons.
- Energy transfer coefficient  $\mu_{tr}$  is defined as the probability that the energy is transferred to secondary electrons.
- Among the energy transferred to electrons, the bremsstrahlung component must also be excluded.
- The energy absorption coefficient  $\mu_{en}$ , also called the true absorption coefficient, is obtained by subtracting the bremsstrahlung part from  $\mu_{tr}$ .

## Расчет поглощенной дозы (2)

### ◆ Расчет поглощенной дозы

- Поглощенной дозы на единицу массы и единицу времени ЧАС (МэВ · кг<sup>-1</sup> · с<sup>-1</sup>) Получается;

Вот,  $E$  (МэВ) и  $\varphi$  (м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>) Являются энергия и поток гамма-лучей, соответственно.

- Подставляя следующую связь для приведенных выше формул,  
 $1 \text{ МэВ} = 1,602 \times 10^{-13} \text{ Дж}$   
поглощенная доза  $D$  (Гр / ч) получают следующим образом.

# Виды ядерной реакции (1)

## ◆ Что такое ядерная реакция?

- Процесс, который маленькая частица взаимодействует с ядром для создания другого ядра.
- Бывшие один монументальная ядерная реакция, что Резерфорд открыл в первый раз в 1919 году последним является реакция, Соскcroft и др. обнаружен в 1932 году с помощью ускорителя.
- Ядерная реакция описана как
$$A + a \rightarrow B + b \text{ или } A (a, b) B$$
До и после реакции, как общее массовое число  $A$  и атомным номером  $Z$  сохраняются.
- После столкновения частицы  $a$  с ядром мишени  $A$  Ядро сразу формирует  $a$ Соединение один. Будучи очень нестабильным, составное ядро мгновенно испускает частицу  $b$  для

## Виды ядерной реакции (2)

### ◆ Виды ядерной реакции

- Ядерная реакция классифицируется на рассеяние и поглощение.
- Рассеяние и поглощение классифицируются более подробно.
- Ниже приведено схематические чертежи основных ядерных реакций

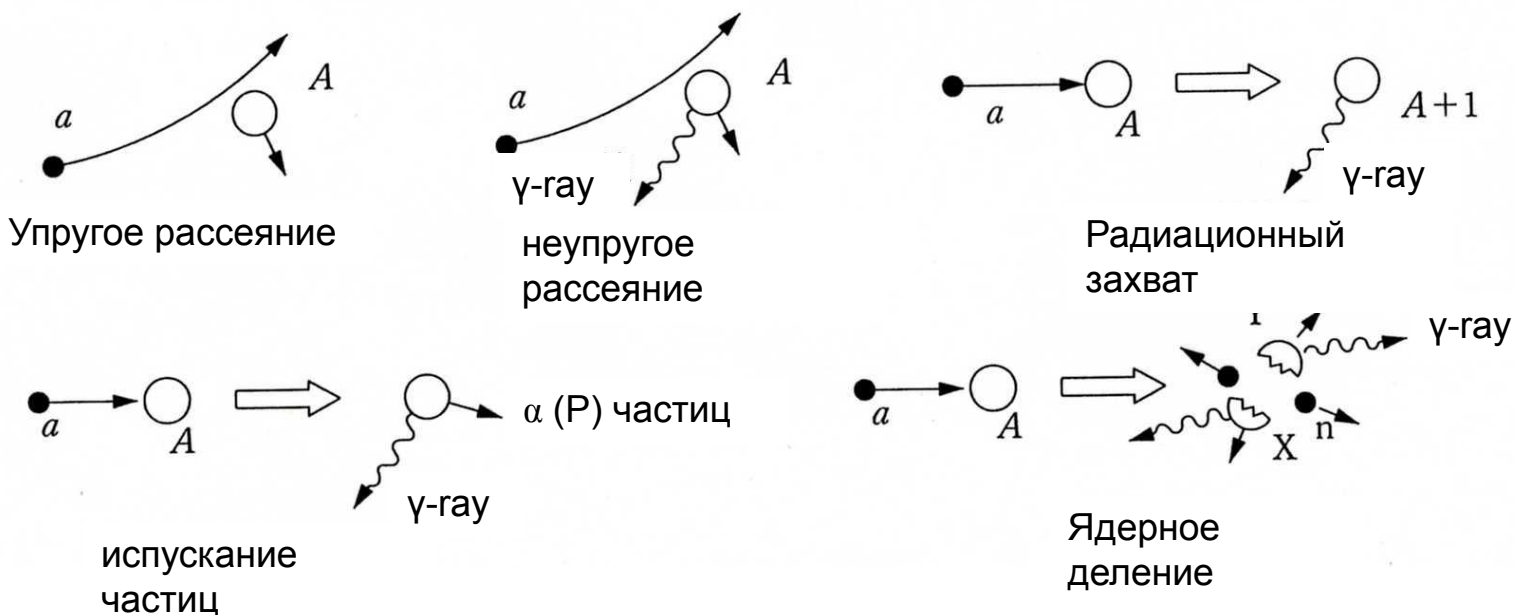


Рис. Концептуальная схема ядерных реакций

## Упругое рассеяние

- Это взаимодействие так же, как «бильярдный шар» типа столкновения.
- В этом процессе ядро-мишень не возбуждается.
- Кинетическая энергия и импульс сохраняются до и после столкновения, следовательно, энергия нейтронов после формулируется

$E_p$  : Recoil нуклида энергия

- Если мишень представляет собой водород ( $A= 1$ ) и  $\theta= 0^\circ$  (*лобовое столкновение*), Вся падающая энергия нейтронов может быть придана ядрами-мишени.
- После взаимодействия, отдача нуклид ведет себя как тяжелый ион в связи с тем, что отдачей нуклид летит на высокой скорости, в результате чего ее орбитальные электроны позади.

## неупругое рассеяние

- Эта реакция представляет собой явление, падающая частица возбуждает ядра-мишени.
- Возбужденное ядро возвращается в основное состояние, испуская гамма-лучи (неупругого рассеяния гамма-лучей). Эта реакция называется

*A (a, b) B*

- Пороговое взаимодействие (около 6 МэВ для кислорода до менее чем 20 кэВ для урана)
- Выше энергия падающего нейтрона, происходит более легко эта реакция.
- Замедление нейтронов
  - Выше несколько МэВ, оба упругих и неупругих процессов рассеяния способствуют замедлению нейтронов.
  - Ниже 1 МэВ, основной вклад от упругого рассеяния.



# Neutron Capture Reaction

- В нижней области энергий нейтронов, процесс захвата нейтронов является наиболее доминирующей ядерной реакцией.
  - Захват нейтронов, ядро-мишень остается в возбужденном состоянии и возвращается в стабильное состояние, испуская захвата гамма-лучи.
  - При более низкой энергетической области нейтронов, сечение пропорционально  $1 / v$ , теоретически подтвердил:
- 
- Если поперечное сечение в  $E_0$  является  $\sigma_0$ ,  $\sigma$  при  $v$  даются как

# Деление реакции

## ◆ реакция Деление

- когда  $^{235}\text{U}$  бомбардировке нейтрона, после формирования составного ядра, ядро разделяется на две частицы, вместе с излучением от 2 до 3 нейтронов.

- Во время процесса деления, как сумма атомных номеров и сумм массовых чисел сохраняется.
- На рисунке справа изображает концепцию цепной реакции деления, показывая, как реакция деления продолжается, и, как нейтроны, увеличиваются в каскадной образом.

$$a + b = 92$$

$$A + B + (2 \sim 3) = 236$$

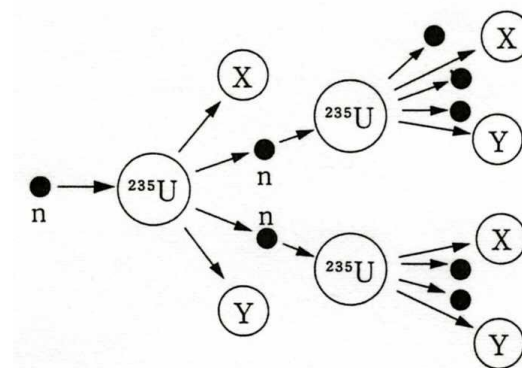
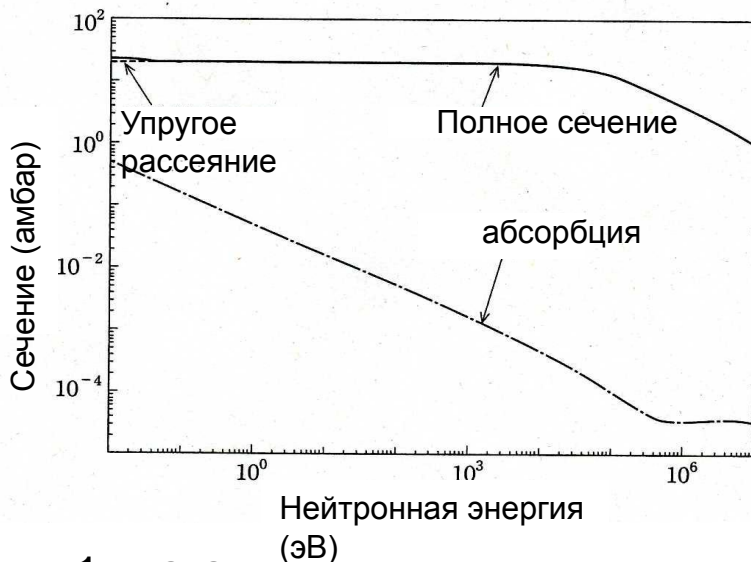


Рис. Деление реакция  $^{235}\text{U}$  и его цепная реакция

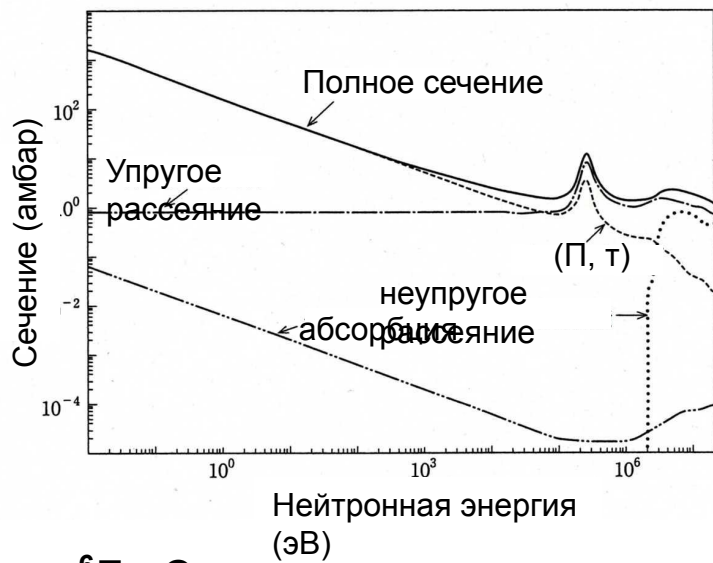
# Ядерные реакции Сечение нейтронов



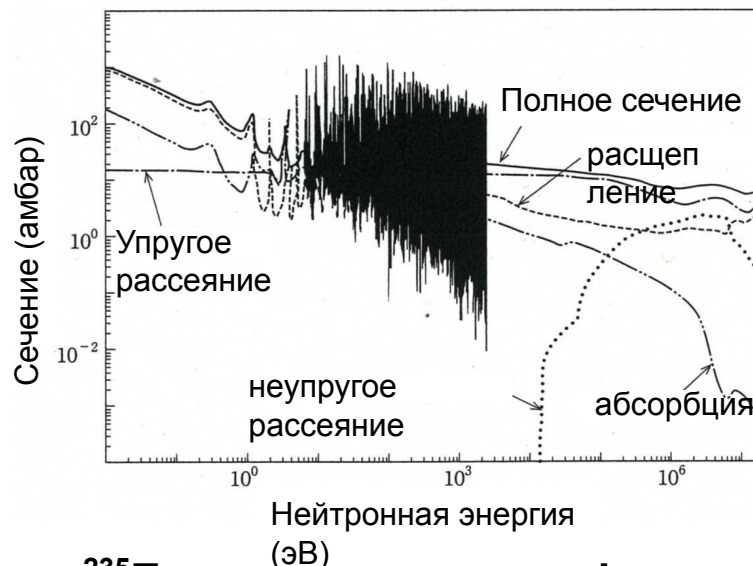
<sup>14</sup>C Сечение (JENDL-3.3)



<sup>56</sup>Fe Сечение (JENDL-3.3)



<sup>6</sup>Li Сечение (JENDL-3.3)

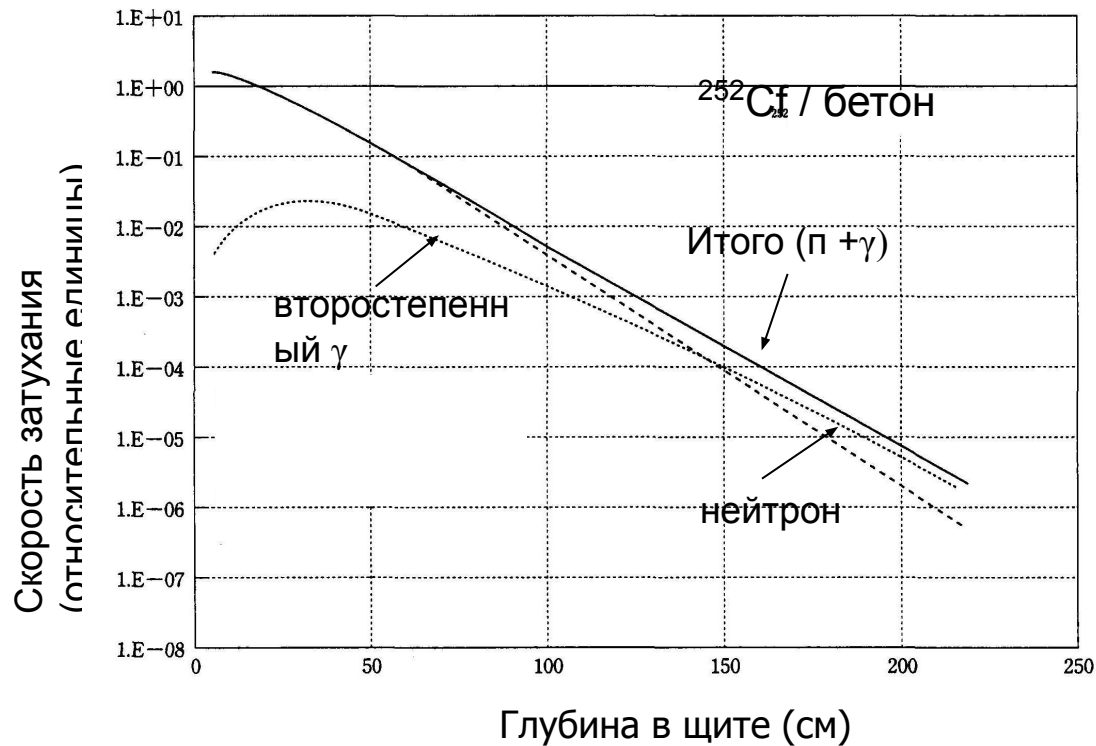


<sup>235</sup>U Поперечное сечение  $\Sigma$  (JENDL-3.3)

# Основная идея быстрого Экранирование Neutron

- ◆ затухания гамма-излучения может быть вычислена на основе достаточно упрощенной формулы, такие как  $\gamma$ -гау ядра затухания, так как энергетическая зависимость его сечения довольно просто.
- ◆ В противоположность этому, нейтрон сечение энергетическая зависимость является очень сложным с таким количеством резонансных пиков. Поэтому вы не можете ожидать простой формулой расчета  $\gamma$ -гау.
- ◆ Следующее описание о поведении нейтронов в веществе не может помочь, но становится качественным.
  - Для замедления быстрых нейтронов выше несколько МэВ (например, источник реактора), через как упругие и неупругие рассеяния при относительно тяжелых материалов, таких как железо.
  - Для того, чтобы замедлить нейтроны ниже  $\sim 1$  МэВ через упругое рассеяние с богатым водородом материалами.
  - Тепловые нейтроны легко захвачены активной зона реактора конструкционных материалов.
  - Необходимо учитывать экранирования вторичных  $\gamma$ -лучи, порожденные захват и неупругие процессы рассеяния.

# Нейтронный Поведение в Материи

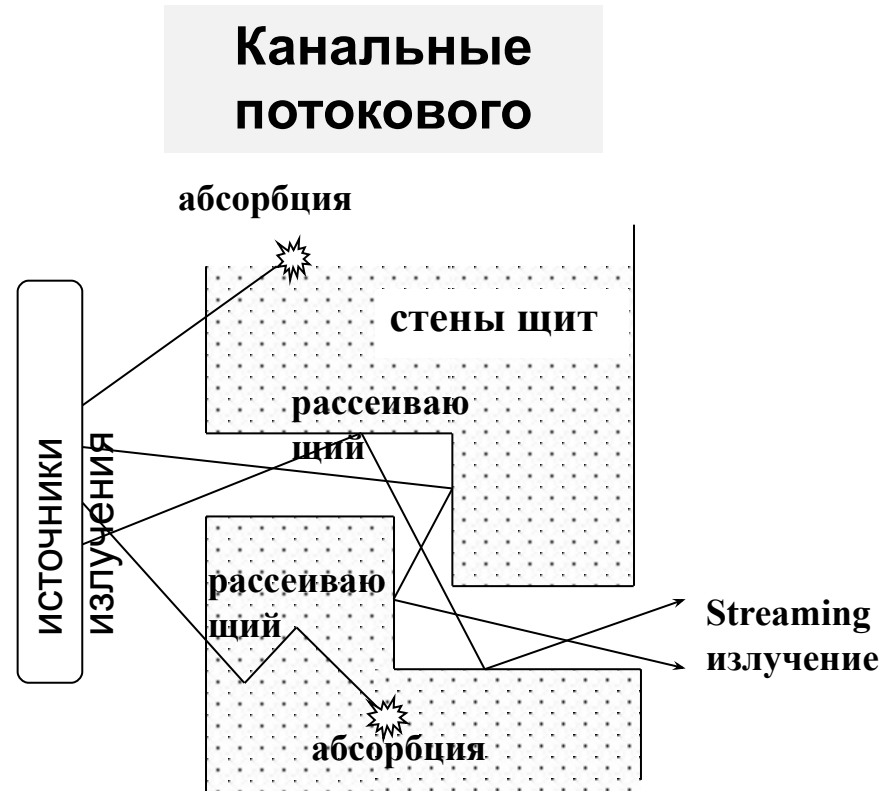


Важным моментом является то, что доза нейтронов и вторичного  $\gamma$ -гау доза всегда сопоставимы друг с другом для области относительно более тонкой глубине щита, за исключением.

# Streaming Расчет

## ◆ Что такое потоковое?

- Это явление, при котором излучение утечки через каналы или лабиринтов, пронизывающих стену щитов.
- Излучение проходит через проток повторяющегося рассеяния на поверхности канала или лабиринта.
- Изгиба частью воздуховода или лабиринт является очень полезным для уменьшения излучений, особенно для  $\gamma$ -лучей.
  - Грубая оценка показывает, что  $\gamma$ -гау как ожидается, будет снижена примерно на

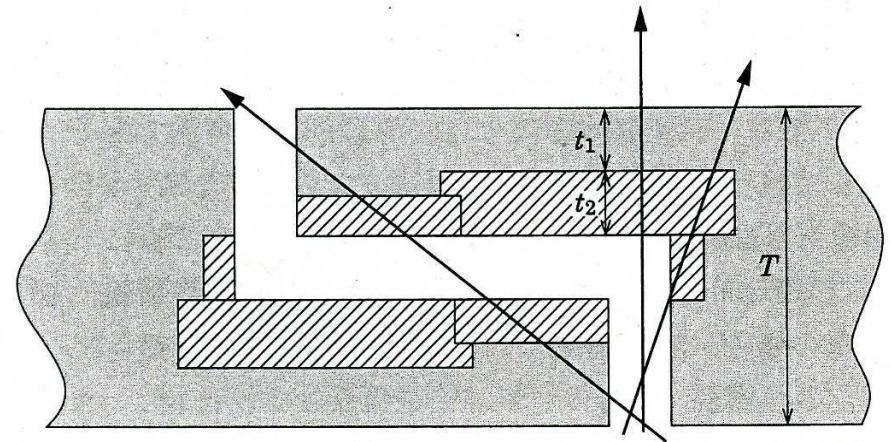


**Рис. Потоквые компоненты**

# Компенсация экранирование $\gamma$ -лучей

## ◆ Понятие компенсации щита

- Воздуховод может быть дефицит экранирования проникновения в стену щитов.
- В потоковых вычислениях, оценка утечки через дефицит защитного также требуется.
- На чертеже показан расположение компенсационного экранирования сделано из стали, встроенное в бетонную стену
- Все различные пути проникновения через дефицит должны быть



- Обычный бетон:  $\mu_1$  [см<sup>-1</sup>]
- Стальная защита:  $\mu_2$  [см<sup>-1</sup>]

**Рис. Компенсация экранирования для 2 изгибов канала**

$\mu$  а также  $T$  являются линейным коэффициентом ослабления и проникновение

# Skyshine Расчет

## ◆ Что такое Skyshine?

- Явление, когда часть излучения просочилась вверх от объектов вернуться обратно на землю за счет рассеяния с атомами или молекулами воздуха (Skyshine).
- В целом доза skyshine в месте, вдали от объекта выше, чем вблизи объекта.
- Поэтому оценка Skyshine является более важной, на границе площадки для широкой общественной безопасности.
- Дозы на границе сайта является суммой skyshine дозы и постоянной составляющей.

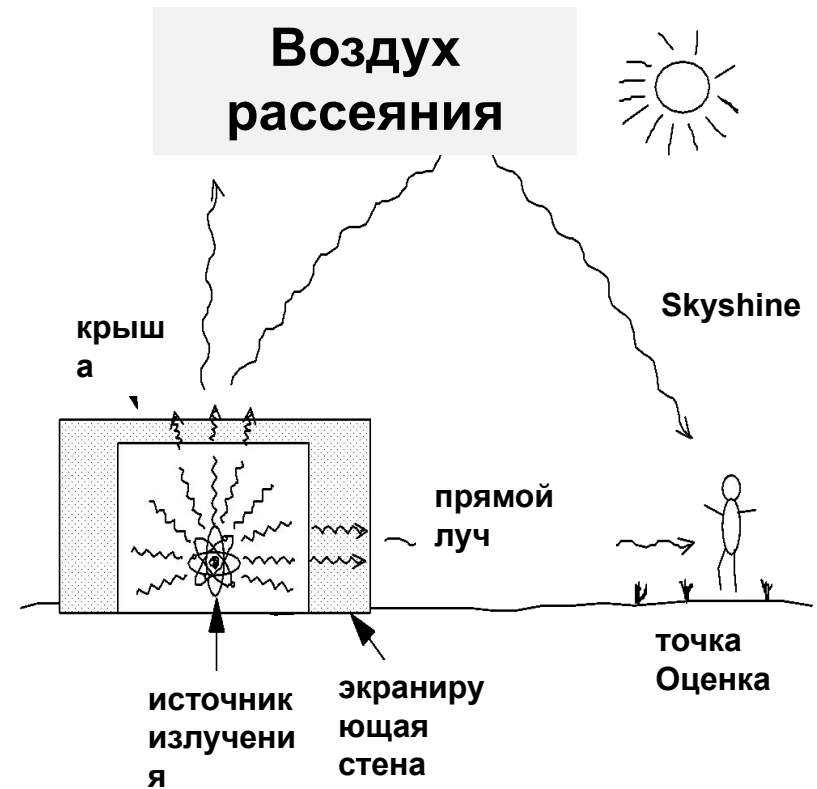


Рис. Геометрия для расчета skyshine

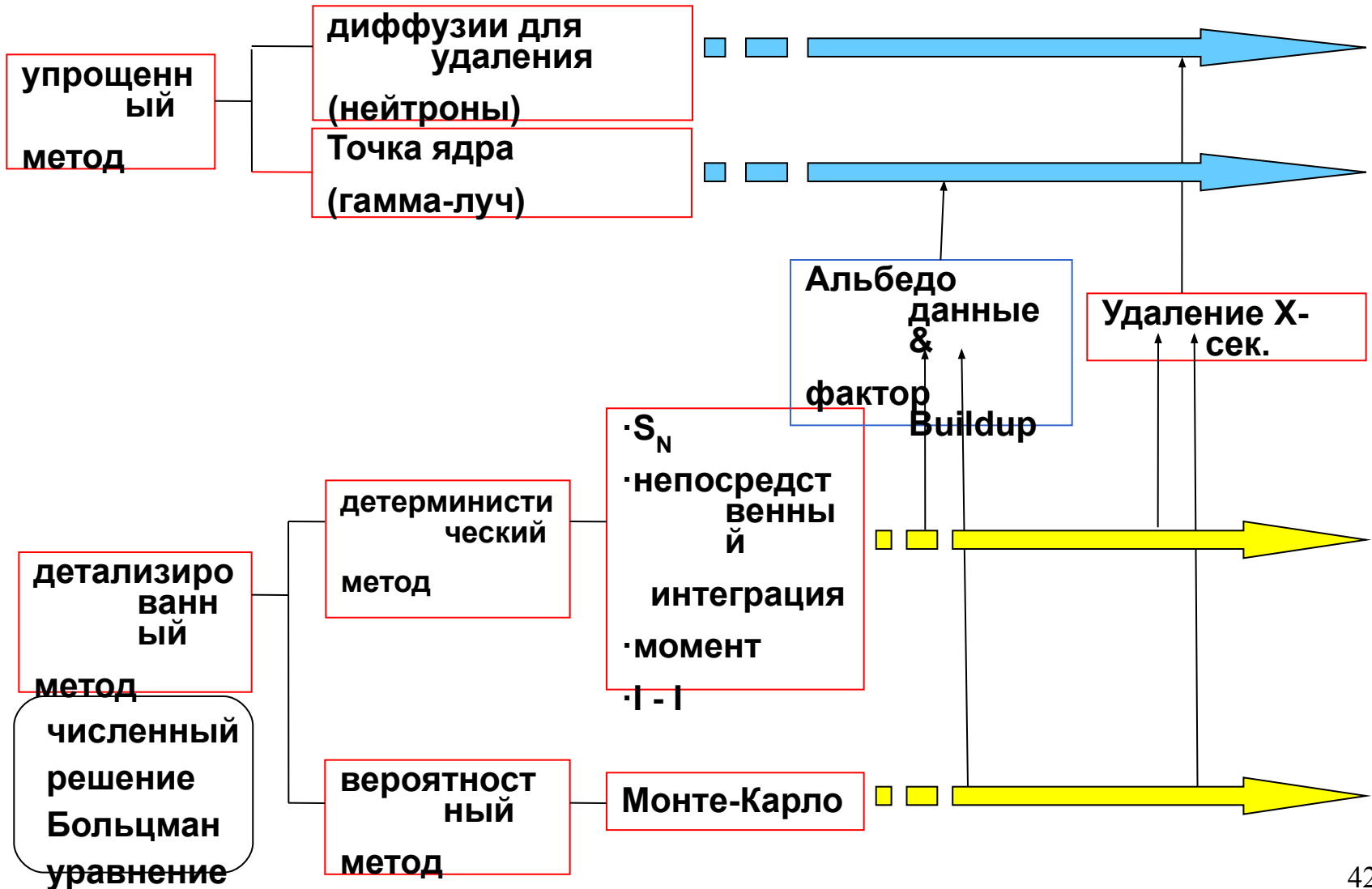


# Экранирование Метод расчета

## ◆ Классификация метода

- Упрощенный метод (только для фотона)
  - Последние тенденции в том, что метод объединен с основными параметрами экранирования оценивали с помощью подробных методов. В прежние времена, эти параметры должны быть получены только экспериментальными способами.
  - Сказанное означает, что в последнее время упрощенный метод дает достаточно точные результаты.
  - QAD код, G33 код - расчет затухания Photon
- Подробный метод (для нейтрона и фотона), который иногда называют как сложный метод.
  - Способ решить уравнение переноса Больцмана, принимая все процессы взаимодействия излучения с учетом вопросов строго.
  - $S_N$  Метод - Детерминированный метод
  - Метод Монте-Карло - вероятностный метод

# классификация методы расчета



# Упрощенный метод Photon (1)

## ◆ Метод ядра точки (QAD код)

- QAD код имеет сильную точку, которая может иметь дело с 3-D сложной геометрией, не ограничиваясь какими-либо системам координат.
- В основном он состоит из расчета uncollided потока, умноженной на фактор накопления.
- Uncollided поток  $d\Phi$  дифференциальный источник  $Sdr$  дано

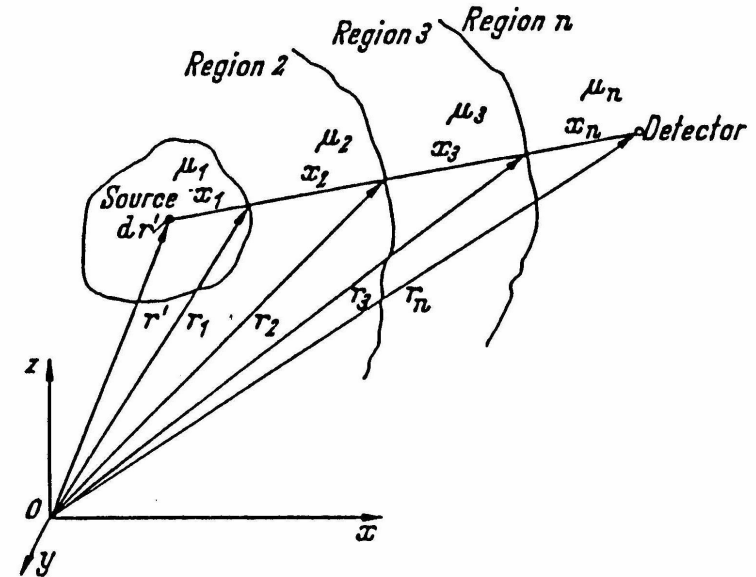


Рис. Геометрическая модель для QAD

## Упрощенный метод Photon (2)

### ◆ Метод ядра точки (QAD код)

- Умножив  $d\Phi_{\text{функции}}$  на коэффициент и коэффициент преобразования дозы, вы можете получить дифференциальную дозу  $\partial O$  из-за дифференциальный источник  $Sdr$  в виде
- Затем доза на детекторе получается путем интегрирования выше уравнения по всей энергии и пространству конечного объема источника.

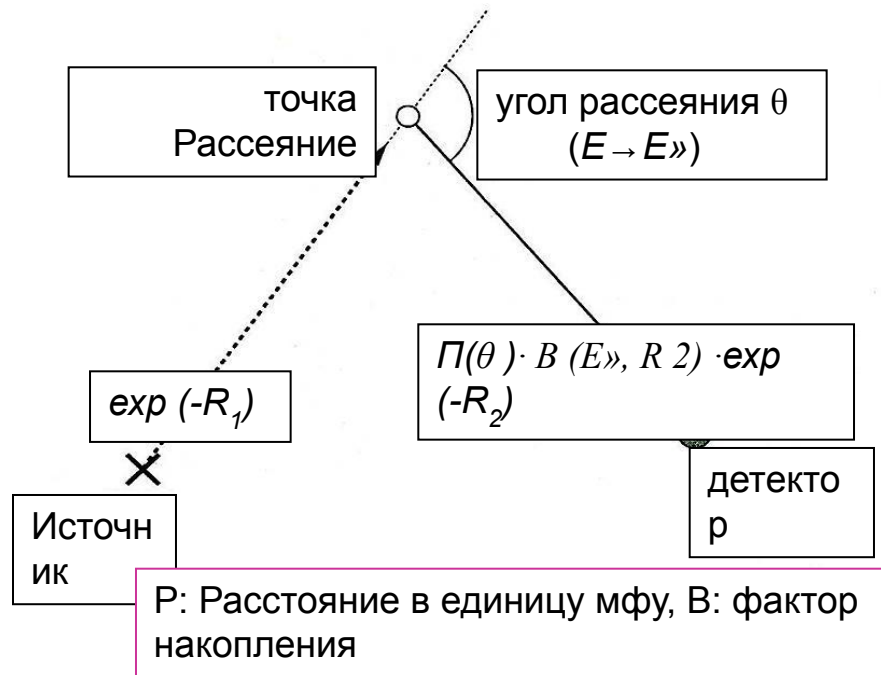
# Упрощенный метод Photon (3)

## ◆ Метод однократного рассеяния (G33 код)

- Для  $\gamma$ -ray Расчет skyshine, более чем на 80%  $\gamma$ -лучей вернется к земле одной Процесс рассеяния.
- Таким образом, код однократного рассеяния G-33, как правило, применим к skyshine расчетов.
- Рисунок показывает процедуру расчета skyshine G-33.

## ◆ методика расчета

- Вычислить uncollided поток на точка рассеяния указано.
- Вычислить вероятность излучения, проходящее от точки рассеяния до детектора, используя формулу Клейна-Нишин.
- Вычислить uncollided поток излучения на детекторе, и умножить его на коэффициент нарастания.
- Вклады от всех точек рассеяния на детектор интегрированы, чтобы получить дозу skyshine.



**Расчет рис. Skyshine на основе однократное рассеяние приближение**

## Подробный метод расчета

**Почему анизотропный поток углового так важно**

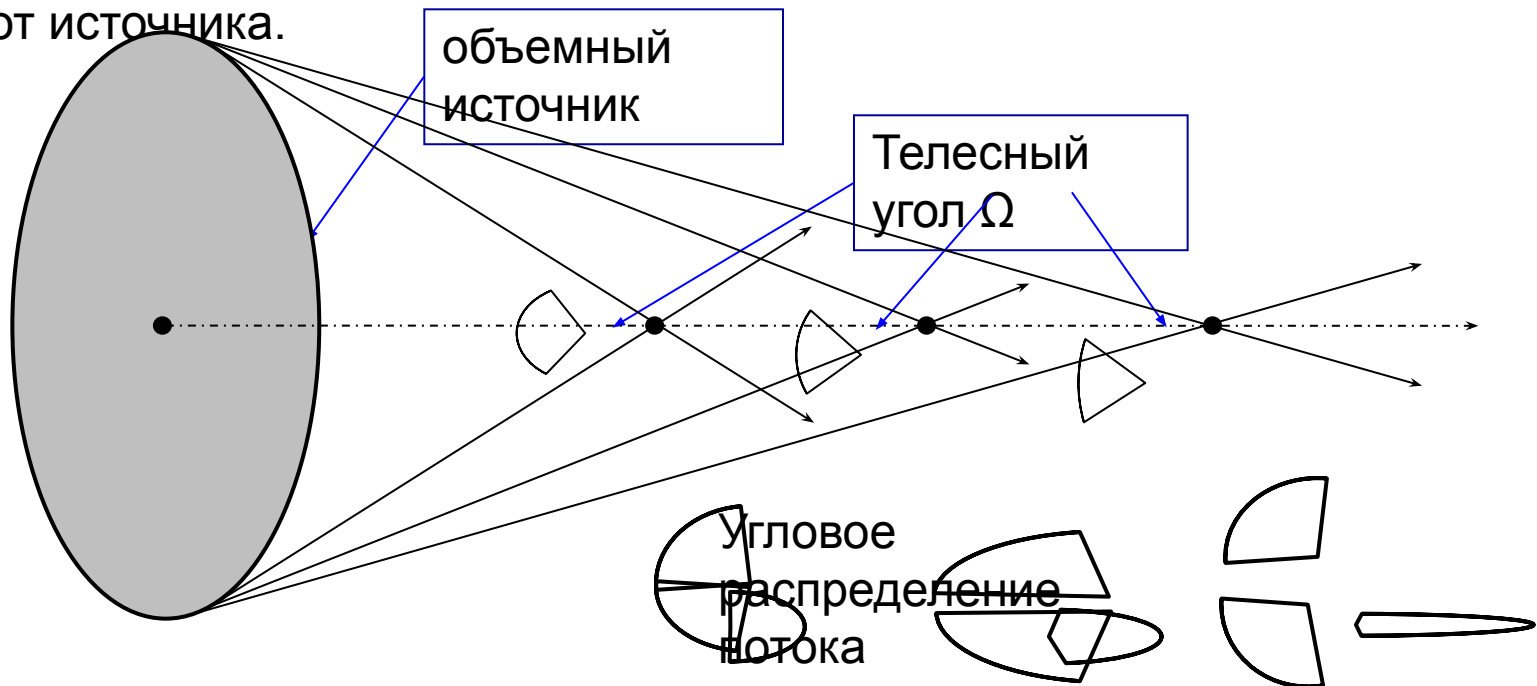
**Почему кинетическое уравнение**

**необходимо в экранировании**

- ◆ **Возьмем** расчеты для излучения реакторной установки, например.
  - В пределах активной зоны реактора региона, изотропное поведение излучения можно предположить, **Расчет Diffusion** применены
  - В области экрана, однако, существует анизотропное угловое распределение излучения **Расчет транспорта** необходимо
- ◆ Если анизотропное угловое распределение пренебрегали в экране, поток, полученный всегда следует недооценивать.
- ◆ Для того, чтобы рассмотреть анизотропию, абсолютно необходимо решить **уравнение переноса Больцмана**, Подробный метод состоит в получении углового зависимый потока путем решения уравнения переноса Больцмана численно.

# Происхождение вперед достигло максимум углового распределения

- ◆ Давайте предположим, что поток в основном определяется uncollided потоком. Телесный угол  $\Omega$  расширение над конечным источником объема, такими как реактор, становится все меньше и меньше, поскольку расстояние становится большим, угловое распределение потока излучения имеет тенденцию становиться все больше и больше вперед достиг своего пика в щите с увеличением расстояния от источника.



# История метода детального расчета (1)

- ◆ Подробный метод используется для получения численного решения уравнения переноса Больцмана. Из всех методов, наиболее значимых с точки зрения настоящего практического использования являются **Метод дискретных согласовывает и методом Монте-Карло**,
- ◆ **Дискретные координаты  $S_N$  метод**
  - Б. Карлсон из LASL разработал метод дискретно-ординаты в 1955 году, позже известный как  **$S_N$  метод**,
  - На основе метода дискретных ординат, У. Энгл из ОРНЛ разработан **ANISN** в 1956 г. Кроме того, двумерная версия ANISN, названная **DOT**, Был описан годом позже Ф. Mynatt и др. также ОРНЛ.
  - Эти усилия были наследовали двумерный **DORT** кода, а также трехмерный **TORT** код. Эти коды в настоящее время успешно применяется для практического проектирования щита работ.



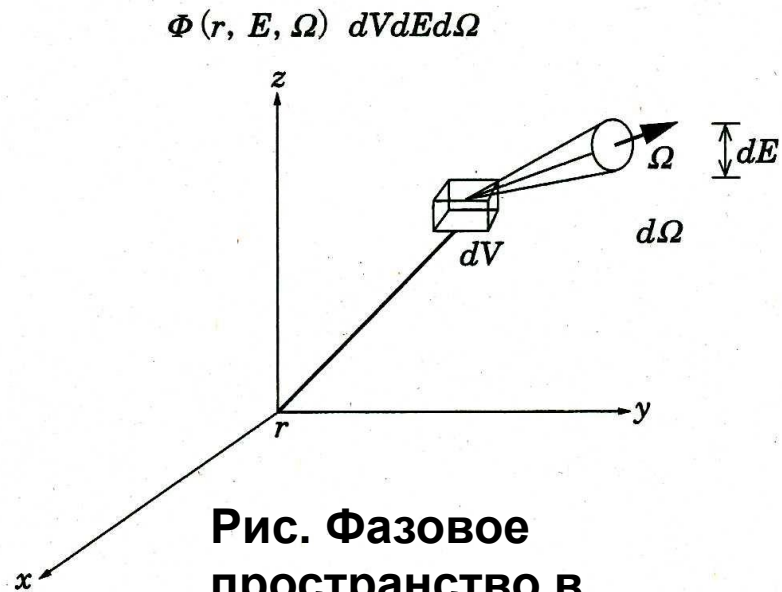
## История метода детального расчета (2)

### ◆ Метод Монте-Карло

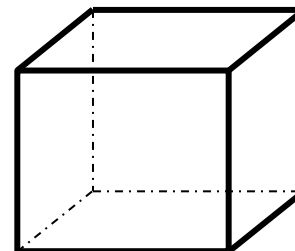
- Теория метод **Монте-Карло** для решения уравнения переноса было впервые установлено в 1950 году.
- **O5R** Система была завершена Р. Coveyou из ОРНЛА в 1958 году
- Общее назначение **Морзе** Код Монте-Карло Е. Straker и др. было завершено в 1969 году также в ORNL.
- Совсем недавно, непрерывная энергетическая модель кода Монте-Карло **MCNP** разработанная в LASL сейчас наиболее широко используются для анализа экрана во всем мире.
- Кроме того, непрерывный энергетический код Монте-Карло **MVP** разработанный в JAEA теперь доступен в основном для расчетов реакторов.

# Больцмана Транспорт Уравнение (1)

- Уравнение переноса Больцмана описывает перенос излучения в фазовом пространстве энергии, пространство и направление.
- Решение уравнения переноса для расчета потока излучения  $\Phi(r, \Omega, E)$  в 6 мерном фазовом пространстве (3 пространственной переменной, 2 угловых единиц и 1 энергии один).
- Уравнение переноса происходит на основе сохранения потока в 6-мерном фазовом пространстве.
- Это означает, что существует баланс притока в и отток из бесконечно малых ячеек



**Рис. Фазовое пространство в уравнении переноса**



**Рис. Пространство клеток Фаза**

# Больцмана Транспорт Уравнение (2)

## ◆ Введение частицы в и удаление из фазового пространства

- Частицы определенной энергии ( $LE$  около  $E$ ) И направление ( $d\Omega$  около  $\Omega$ ) Могут быть введены в  $DVD\Omega LE$  с помощью

- 1) Родился в  $\partial U$  на фиксированный (или внешний источник)
  - 2) Втекает  $\partial U$  из соседнего региона
  - 3) Проходят взаимодействие в рамках  $\partial U$  так, чтобы поток частиц рассеивается в  $DVD\Omega LE$
- Уравнение, описывающее ведение бухгалтерского учета дается как

- Частицы в пределах  $Dvd\Omega dE$  могут быть удалены из дифференциального элемента с помощью следующих процессов

- 1) Подвергнуться взаимодействию, которое заставляет частицы всасываться или измененные в направлении или энергии или оба
- 2) Поток из  $\partial U$  в соседние регионы

$NL$  (нетто утечки) +  $IL$  (Взаимодействие Loss)

знак равно  $IS$  (Inscattering) +  $S$  (внешний источник)

# Транспорт Больцмана Уравнение (3)

- ◆ Интегро-дифференциальный типа транспортных э.

$\Phi$  : Flux,

$S$  : Термин Источник,

$l$  : Матрица передачи,

$\Sigma_T$  : Макро полное сечение,

$\Sigma_s$  : Макро сечение рассеяния

- ◆ уравнение переноса интегрального типа

$Q$ : Сумма рассеяния источника выброса и внешнего источника

Основное уравнение для метода Монте-Карло

## Обзор $S_N$ Способ транспортировки (1)

- $S_N$  Способ транспортировки классифицируются как детерминированный способ, чтобы решить уравнение переноса Больцмана численно.
- Дискретизация переменных является важным моментом для  $S_N$  метод.
  - **энергии**- делится на ряд интервале энергий (группы). Сечение группы (группа константа) получают в виде усредненных значений.
  - **Угол** - в  $S_N$  Способ, направление полета излучений представлено заранее определенным дискретным угол бункер  $\Omega_m$ .
  - **Космос** - делятся на пространственные интервалы сетки, указанных пользователями кода.
- Выражение углового распределения является еще одним важным моментом. Угловой поток и угловое дифференциальное сечение рассеяния аппроксимированы полиномами Лежандра для рассеяния интегрирования первого члена в правой части уравнения переноса

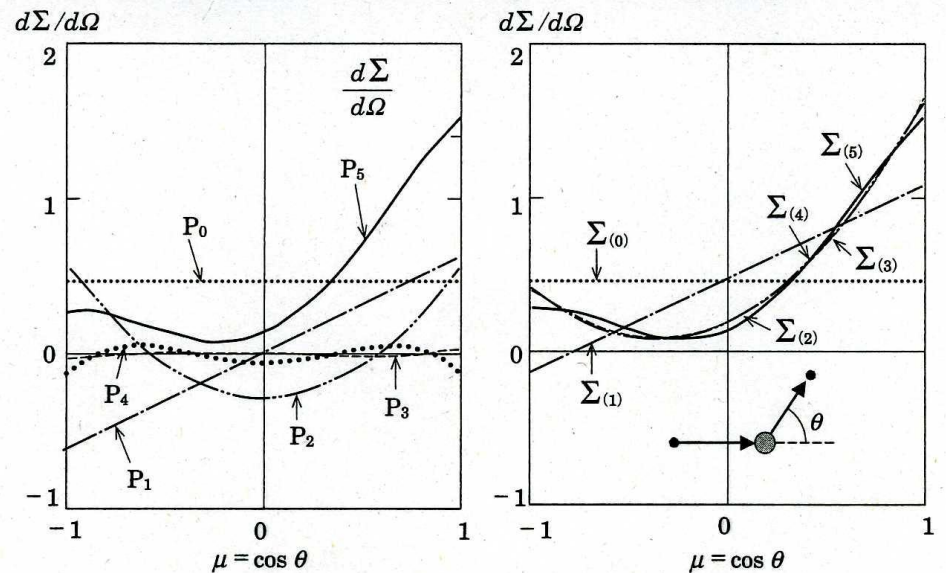
## Обзор $S_N$ Способ транспортировки (2)

- Целью решения Больцмана уравнения переноса, чтобы определить поток излучения  $\Phi(p, \Omega, E)$  как функция пространства, угла и энергия
- Оригинальное уравнение переноса Больцмана выражаются в предположении непрерывного изменения энергии.
- В  $S_N$  Способ транспортировки, однако, энергия дискретизируется на конечное число энергетических групп. Постоянные группы необходимы, чтобы быть сгенерированы.
- Постоянная группа представляет собой усредненное значение ядерного сечения в каждой группе энергии

- $\Sigma_g$  : Группа постоянной энергетической группы  $g$ -го
- $E_g$  а также  $E_{g+1}$  : Максимальная энергия  $g$ -го группы, и  $(g + 1)$ -й группы, соответственно.
- $\phi(E)$  : Энергетический спектр, как правило, используется для весовой функции.

# Лежандра полиномиальной аппроксимации

- $d\Sigma_s / d\Omega$ , дифференциальное сечение рассеяния относительно угла (или направления) играет важную роль в расчете углового потока.
- Она аппроксимируется с помощью многочлена Лежандра Прибл. Здесь косинус угла рассеяния  $\mu (= \cos\theta)$  используется в качестве угловой переменной вместо  $\theta$  сам.
- Левый показывает угловое распределение для каждого члена разложения  $P_L$  и право один для  $\Sigma(L)$ , это угловое
- ~~распределение~~ ~~функции~~ ~~приближения~~ не показывают ~~виде~~ ~~суммы~~ ~~практически~~ ~~разности~~ На самом деле  $P_3$  ~~приближение~~ достаточно для целей общих расчетов экранирования для частного случая, за исключением хорошо, такие как проблема потоковой передачи.



**Рис. Приближение расширения Лежандра дифференциального сечения рассеяния**

# Дискретизация угловой переменной

## ◆ Дискретизация угловой переменной

- Первоначально непрерывный угловой переменный, также дискретизируются с помощью ограниченного числа угловых бункеров  $\Omega_M$
- $\Omega_M$  определяется как полярный угол  $\theta$  и азимутальный угол  $\psi$ ,
- Именованное  $S_N$  Метод исходит из этого углового сегмента  $S$ .

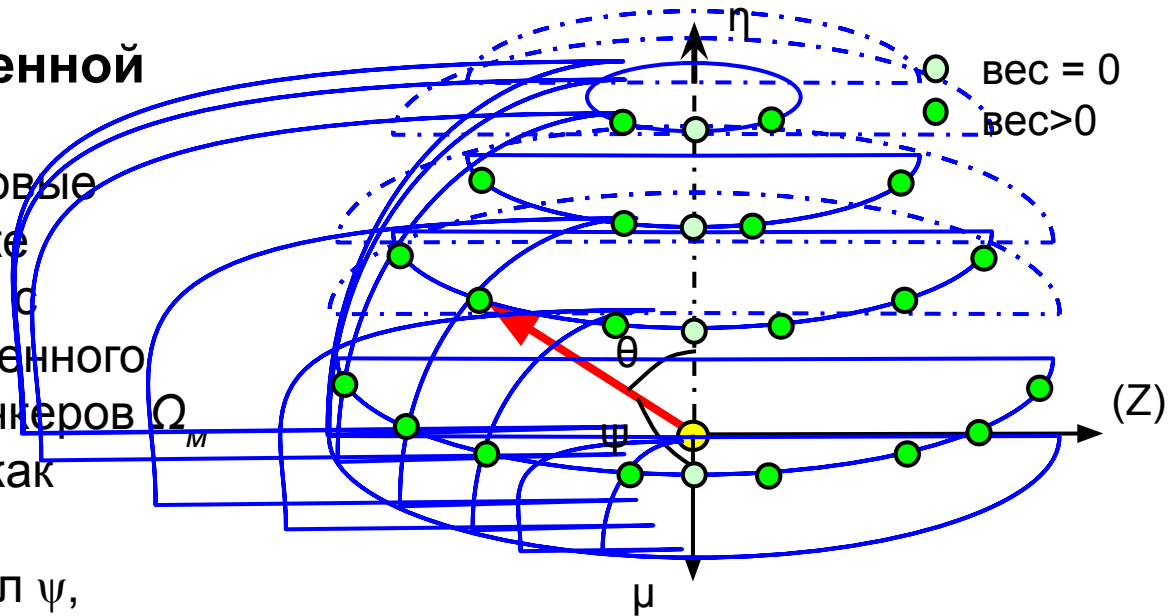


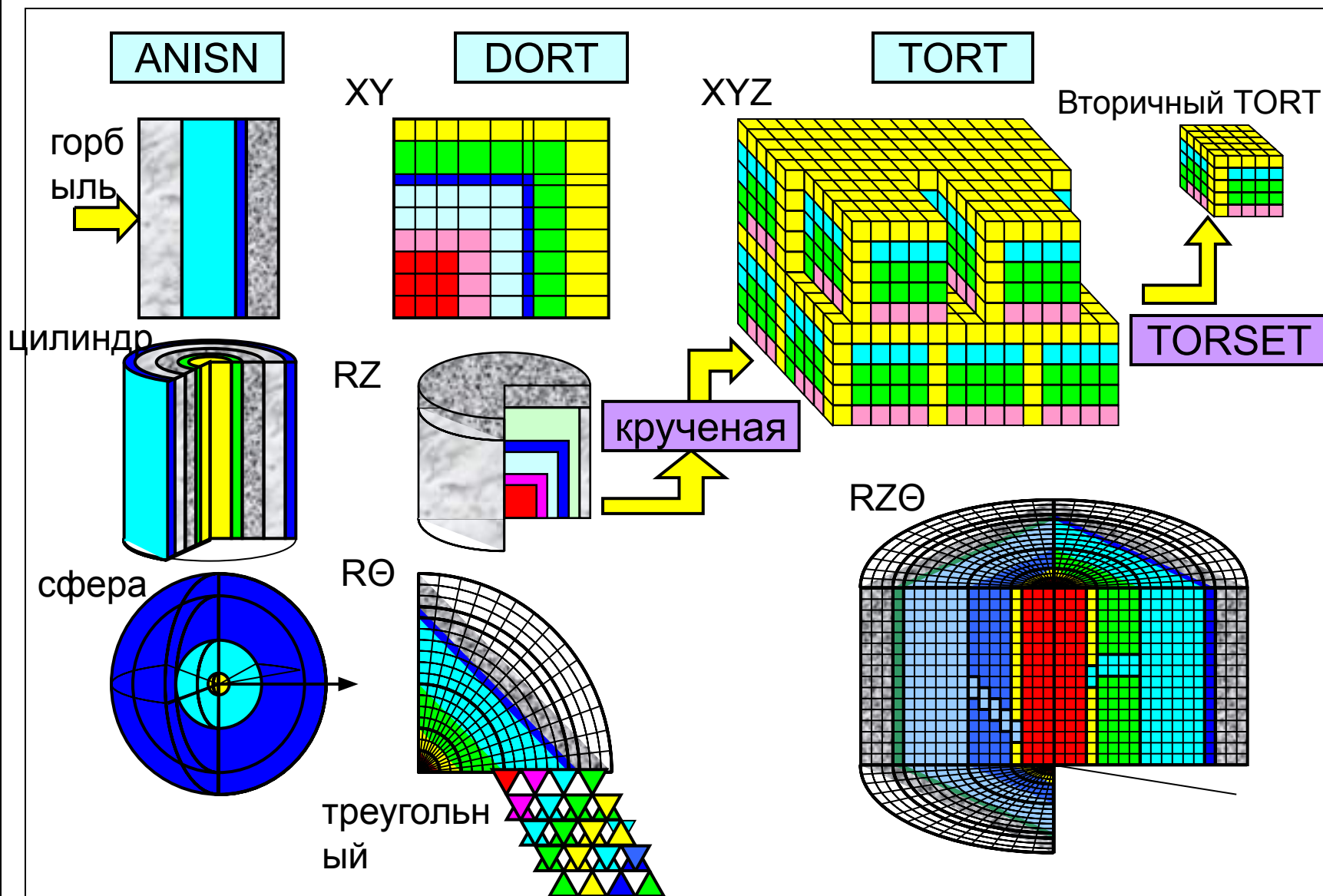
Рис. Угловой сегмент для  $S_N$  метод



## $S_N$ транспортный код

- Одно- (1D), двух- (2D) и трехмерных (3D)  $S_N$  транспортные коды были разработаны для практического использования конструкции экранирования.
- Они есть;
  - ✓ **ANISN** код 1D геометрии
  - ✓ **DORT** Код для 2D геометрии, который широко используется для расчетов энергетических реакторов, так как он может иметь дело с 2D конечных систем, таких как RZ цилиндрической геометрии
  - ✓ **TORT** Код для 3D-геометрии которых применение ограничивается анализом локальной системы и верификации 1D и / или 2D результатов.
- Комбинационный расчет между **DORT - TORT** а также **TORT - TORT** также доступны. Эти коды соединены через интерфейс коды **поддержали** а также **крученая**,

# Geometries принята 1-, 2- и 3-ДС<sub>N</sub> коды



# Преимущества и недостатки $S_N$ метод

## преимущества

1. Пространственные и угловые распределения излучения по всей конфигурации интереса, может быть вычислены
2. Относительно меньшее время вычислений требуется.
3. Вышеуказанные пункты имеют решающее значение для фактического расчета конструкции защитного

## Недостатки

1. Она, возможно, рассчитывает отрицательные потоки при определенном условии расчета, что это нереально.
2. Расчет с курсом шириной пространственной сетки вызывает серьезную ошибку на результатах.
3. Излучение вдоль некоторой угловой сетки подчеркивается при определенном условии (Ray-эффект).

# Метод Монте-Карло

- Способ решить уравнение переноса с методами Монте-Карло с использованием случайных Номер
  - Интегральное уравнение переноса Больцмана переписано в виде,

Здесь  $X(P)$  представляет собой плотность излучения при  $l$ ,  $S(P)$  это термин источник в  $l$ ,  $l$  показывает фазовое пространство.

Вот

Транспорт ядра:

Столкновение ядра:

- Расчеты транспортного ядра и ядра столкновения сделаны на основе выборки случайных чисел

## Решение методы (1)

### ◆ Два вида метода доступен в качестве метода решения

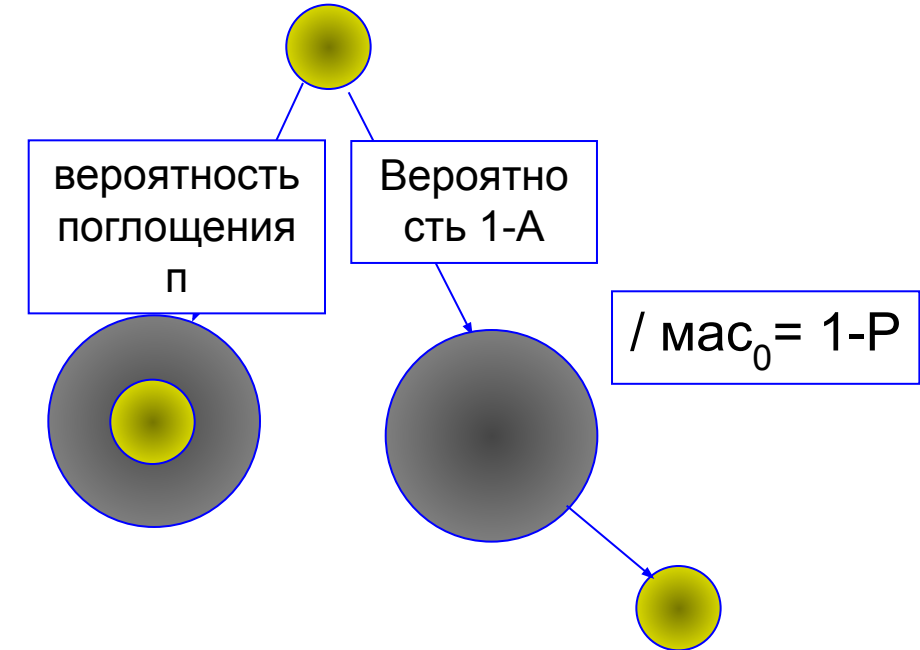
#### □ Метод Монте-Карло Analog:

- Если происходит реакция поглощения, частица излучения будет исчезать там.
- Тогда расчет будет прекращен, а затем перейти к следующей исходной частице для запуска нового расчета.
- Если, кроме поглощения ядерных реакций происходят, частицы излучения выживут, а расчет будет продолжаться.

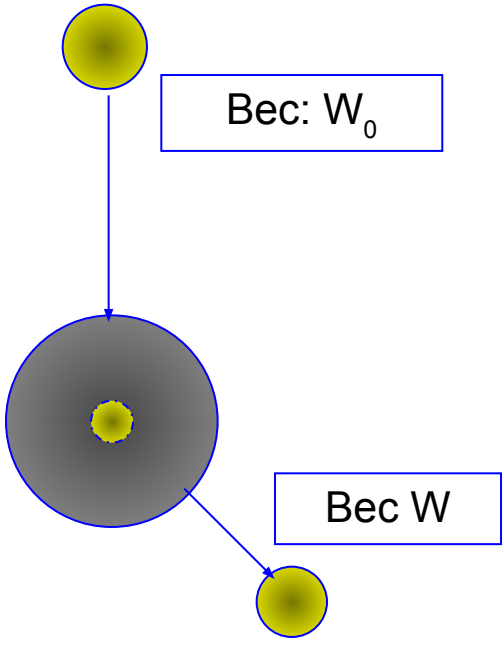
#### □ Взвешенный метод Монте-Карло:

- Даже если излучение частицы вызывают реакцию поглощения, само излучение до сих пор существует с уменьшенным весом, и вычисление продолжается. (Выжил)
- С точки зрения уменьшения дисперсии, этот метод является более предпочтительным, так как он не уменьшает количество частиц, хотя вес частицы уменьшается, что приводит к улучшению статистической погрешности результатов.

# Решение метода (2)



**Метод Монте-Карло Analog**



**Взвешенный метод Монте-Карло**

# Статистическая погрешность и дисперсия

- ◆ Статистическая погрешность и дисперсия в методе Монте-Карло
  - Ошибка описана с использованием стандартного отклонения ( $\sigma$ ).
  - Дисперсия представляет собой квадрат стандартного отклонения ( $\sigma^2$ ), и выражается с использованием обнаруженное значение,  $\bar{X}$  = Среднее Икс
- ◆ Формулы (стандартная ошибка, стандартное отклонение) приведены ниже

Обнаруженное значение,  $\bar{X}$  = Среднее Икс

**FSD** Качество бирки

0,5 - 1,0	отбросы
0,2 - 0,5	Коэффициент немного
0,1 - 0,2	Под вопросом
<0,10	Надежный, но и для точечного детектора
<0,05	Расписание для точечного детектора

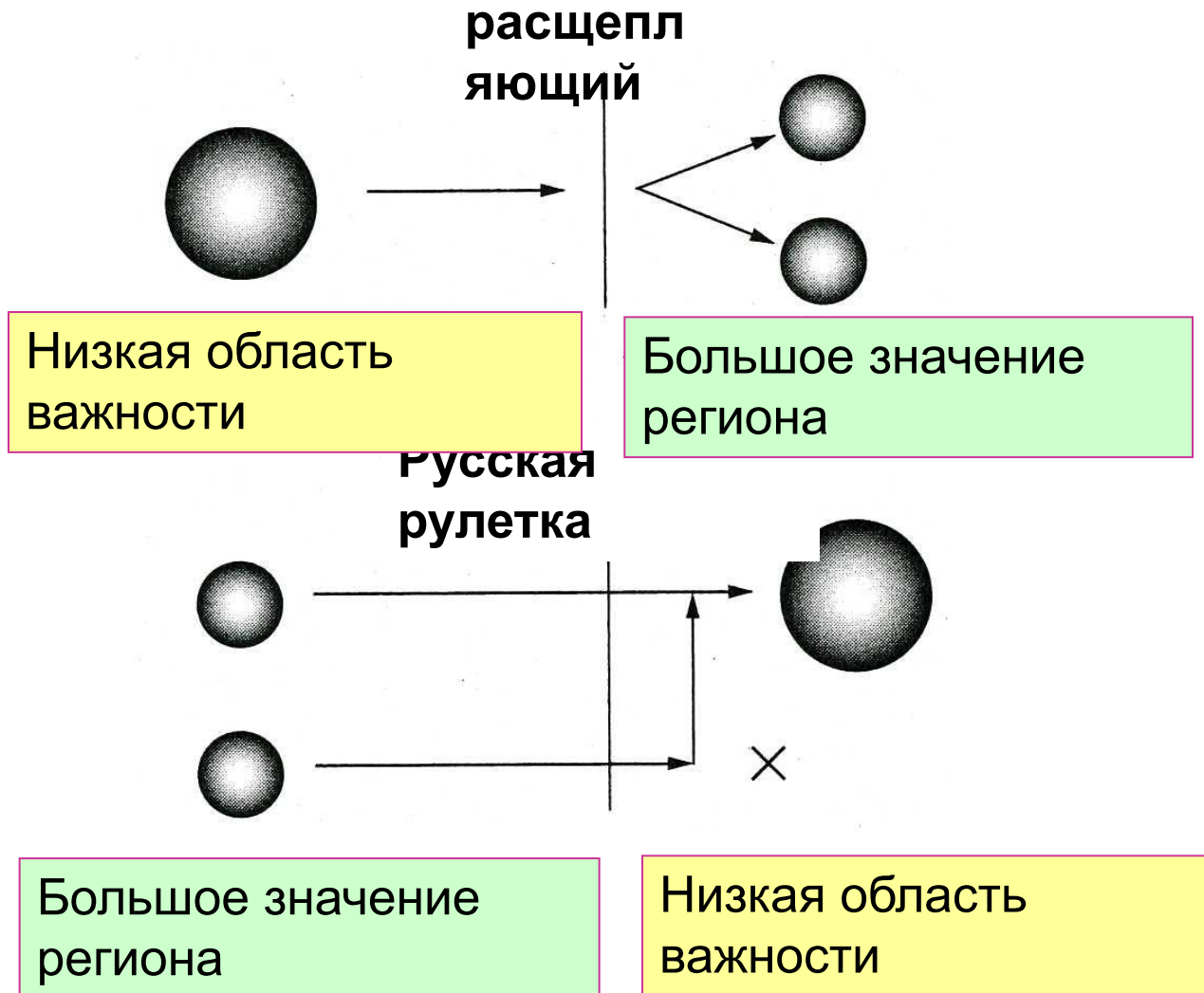
- Критерии точности FSD для кода MCNP дается в правой таблице.
- ФСД обратно пропорциональна квадратному корню из числа частиц N.
- Простое увеличение числа частиц источника никогда не является разумным способом для повышения точности расчета.
- ◆ Методы снижения дисперсии были изучены до сих пор и все еще изучаются.

## Способ снижения Дисперсия

- Как и в следующем рисунке, когда частицы двигаются от нижнего фазового пространства важности к более высокому,
  - ✓ Число частиц увеличивается путем разделения частиц, что приводит к улучшение дисперсии, [Расщепление]
  - Здесь понятие важности, чтобы показать степень вклада излучения частицы в детектор.
  - В противоположность этому, когда частицы движутся с более высокой значимости пространства в нижней одной частицы интегрированы и уменьшить их количество.
  - ✓ Это позволит избежать бесполезного расчета и приводит к повышение эффективности вычисления, [Русская рулетка]
  - В обоих расщеплении и российских дел в рулетку, общий вес частиц сохраняются до и после этих процессов
  - В способе оконной вес, однако, расщепление и русская рулетка наносятся на фазовом пространстве обоих космических и энергетических переменных.



# Концепция расщепления и русская рулетка



# Вес Метод окна

## ◆ Метод окна Веса

- Расщепление или русская рулетка производится всякий раз, когда частицы проходят через окно, в соответствии с  $W_L$  а также  $W_U$ , нижний предел и верхний предел веса частиц.
- Расщепление делается, когда вес частиц больше, чем  $W_U$ ,
- Русская рулетка сделана, когда масса частиц ниже  $W_L$ ,
- Никаких действий не будет сделано, когда вес частиц между  $W_L$  а также  $W_U$ ,
- Методика расчета метода показана на следующем рисунке. В этой геометрии, значение увеличивается в направлении от источника до точки детектора.
- Когда частицы движутся слева направо, частицы разбиваются, когда они пересекают границы. И наоборот, если они движутся в противоположном направлении, русская рулетка прикладывается к ним.

# Доза Оценка для JCO критичности аварии - Моделирование расчета геометрии -



**Рис. Оценка дозы экспозиции  
Для критичности аварии JCO**

- 30 сентября 1999 года в Токай-мура, Япония, авария произошла во время незаконного обращения с высоко-обогащенным раствором урана
- Трое рабочих были выставлены нейроны и два из них умерли.
- Анализ был необходим для оценки дозы внутренних органов работника.
- Метод Монте-Карло был применен для описания точного моделирования сложной геометрии и положения рабочих. (См рисунок)

# Преимущества и недостатки Монте-Карло

## преимущества

1. Он может иметь дело с 3-D сложной геометрией без привязки к каким-либо системам координат (наиболее выдающиеся заслуги).
2. Непрерывный код энергетической модели, MCNP, может быть свободен от ошибок, связанных с выработкой групповых постоянная.

## Недостатки

1. Обычно это занимает довольно больше машинного времени по сравнению с другими сложными методами. (—► срочно разработать методы снижения дисперсии методы --Вес-Window и т.д.)
2. В основном он вычисляет потоки в указанных точках оценки, а не поток распределения по геометрии.