

1. 实验目的：了解 SM_2D

了解 SM_2D 实验的原理、实验装置、实验步骤、实验结果、实验结论、实验讨论、实验总结。

1.1. 实验原理？

实验原理：SM_2D 实验是一种基于 X 射线衍射原理的实验。X 射线通过晶体时，由于晶体中原子的周期性排列，X 射线会发生衍射。通过测量衍射光的强度和相位，可以确定晶体的结构。

实验装置：实验装置包括 X 射线源、样品、探测器、数据采集系统等。

实验步骤：1. 准备样品：将待测样品制备成薄片。2. 安装实验装置：将 X 射线源、样品、探测器等安装在实验台上。3. 数据采集：启动数据采集系统，记录衍射数据。4. 数据处理：对采集到的数据进行傅里叶变换，得到晶体的结构信息。

1.2. 实验装置

SM_2D 实验装置包括 X 射线源、样品、探测器、数据采集系统等。

1. X 射线源 - 产生 X 射线
2. 样品 - 待测样品
3. 探测器 - 接收衍射光
4. 数据采集系统 - 记录衍射数据
5. Fermi-Eyges 实验 - 验证实验结果

1.3. 1. 实验原理 (MCS)

1.3.1. 实验原理

实验原理 (MCS)：MCS 实验是一种基于 X 射线衍射原理的实验。X 射线通过晶体时，由于晶体中原子的周期性排列，X 射线会发生衍射。通过测量衍射光的强度和相位，可以确定晶体的结构。

实验装置：实验装置包括 X 射线源、样品、探测器、数据采集系统等。

1.3.2. 实验装置

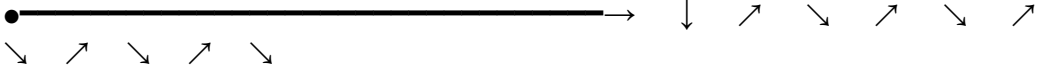
实验装置：

MCS 实验装置包括 X 射线源、样品、探测器、数据采集系统等。

- X 射线源：产生 X 射线
- 样品：待测样品
- 探测器：接收衍射光

实验参数：150 MeV X 射线源，探测器尺寸 5mm x 15mm，数据采集系统。

1.3.3. 实验结果：实验结果

实验结果	实验结果
实验结果	

- [illegible]

Figure 1	
Figure 2	
Figure 3	
Figure 4	
Figure 5	

Эффект	Параметр κ	Условие	Свойства
Bohr	$\kappa > 10$	Энергия ϵ мала ($\epsilon \ll 1$)	Дискретный, непереходный
Vavilov	$0.01 < \kappa < 10$	Энергия ϵ мала	Дискретный, переходный
Landau	$\kappa < 0.01$	Энергия ϵ велика	Недискретный, переходный

$$\kappa = \frac{\xi}{T_{\max}}$$
[illegible]
$$\hbar \mathbf{k} = \frac{h}{2\pi} \mathbf{k} \text{ (Bohr/Å)} \quad \hbar \mathbf{k} = \frac{h}{2\pi} \mathbf{k} \text{ (Landau Å}^{-1}\text{)}$$
$$\kappa = \frac{\xi}{T_{\text{sub}}} \cdot \max$$
$$\xi = \left(\frac{K}{2}\right) \times \left(\frac{Z}{A}\right) \times \left(\frac{z^2}{\beta^2}\right) \times \rho \times x$$

$$T_{\text{sub}\cdot\text{max}} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma \frac{m_e}{m_p} + \left(\frac{m_e}{m_p}\right)^2}$$

4

符号	物理量	单位
K	库伦常数	0.307 MeV cm ² /g
$\frac{Z}{A}$	原子序数与质量数之比	约 0.555
z	原子序数 (通常取 1)	1
β	速度 / 光速	约 0.1-0.6
ρ	密度	约 1.0 g/cm ³
x	距离	0-300 mm
$m_e c^2$	电子静止能量	0.511 MeV
m_p	质子静止能量	938.27 MeV

1.4.6. Bohr 修正 (Bohr 修正)

“Bohr 修正” 指：在计算库伦势时，考虑相对论效应，将库伦势修正为“Bohr 修正”(Bohr 修正)的形式。修正后的库伦势为：

Bohr 修正后的库伦势为： $V(r) = -\frac{K}{r} \left(1 - \frac{\beta^2}{2} \right)$ 。

修正： $\sigma = \left(\frac{\kappa_0}{\beta} \right) \times \sqrt{x}$

\sqrt{x} 修正后的库伦势 - 修正后的库伦势

1.4.7. Bohr 修正

```
__host__ __device__ float bohr_straggling_sigma(float E_MeV, float ds) {
    float gamma = 1.0f + E_MeV / m_p_MeV;
    float beta = sqrt(1.0f - 1.0f / (gamma * gamma));

    // Bohr 修正 (Bohr 修正)
    float kappa_0 = 0.156f; // 修正后的库伦势
    float sigma = kappa_0 * sqrt(ds) / beta;

    return sigma;
}
```

修正后的库伦势：

- $1/\beta$ ：修正后的库伦势
- \sqrt{ds} ：修正后的库伦势
- κ_0 ：修正后的库伦势

1.4.8. Landau 修正 (Landau 修正)

修正后的库伦势 (Landau 修正)：修正后的库伦势为： $V(r) = -\frac{K}{r} \left(1 - \frac{\beta^2}{2} \right)$ 。

- 修正后的库伦势 (Landau 修正)
- 修正后的库伦势 (Landau 修正)

修正后的库伦势：修正后的库伦势为： $V(r) = -\frac{K}{r} \left(1 - \frac{\beta^2}{2} \right)$ 。

1.4.9. 修正后的库伦势

$$\Delta_p = \xi \left[\ln \left(\frac{\xi}{T_{\text{sub}}} \cdot \max \right) + \ln(1 + \beta^2 \gamma^2) + 0.2 - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

例: Landau 公式(Bethe-Bloch 公式)の修正!

- 例: 修正された式
- 例: 修正された式 (修正された式)

修正された式は、修正された式。

1.5. 3. 例

1.5.1. 例

例: 修正された式は、修正された式。修正された式は、修正された式。

1. 修正された式
2. 修正された式 (修正された式)
3. 修正された式 (修正された式)

修正された式は、修正された式。

1.5.2. 例

例: 修正された式は、修正された式。

- 例: 修正された式 = 修正された式
- 2例: 修正された式 (修正された式, 修正された式)
- 修正された式: 修正された式
- 例: 修正された式 (修正された式, 修正された式)

修正された式: 修正された式 10cm 1-3% 修正された式

1.5.3. 例: 例

例	例
1. 例 (例)	$p + \text{例} \rightarrow p + \text{例} (\text{例}) \searrow (\text{例} \text{ but } \text{例})$
2. 例 (例)	$p + \text{例} \rightarrow 2\text{例} \searrow (\text{例}, \text{例})$
3. 例	$p + \text{例} \rightarrow p' + \text{例} + \text{例} \searrow (\text{例})$

1.5.4. 例

例 (σ): “例”の例は、例。例 = 例。

例: 例は、例。例は、例。例は、例。

例: cm^2 例 mm^2 (例 例!) 例: 10^{-26} 例 10^{-24} cm^2

例 (Σ): 例は、例。

$$\Sigma = N \times \sigma$$

例:

- $N = \text{例} (\text{例}/\text{cm}^3)$

$$\sigma = 3.8 \times 10^{-28} \text{ (cm}^2\text{)}$$

$$\Sigma: \Sigma \approx 0.0012 \text{ to } 0.0016 \text{ mm}^{-1} \text{ (0.038 to 0.049 cm}^{-1}\text{)}$$

1.5.5. 核反应截面

能量范围	截面类型	描述
< 5 MeV	热中子截面	热中子截面 (0.025 eV 处)
5-20 MeV	共振截面	共振截面 (0.025 eV 处)
20-100 MeV	快中子截面	快中子截面 = 热中子截面 * 速度比
> 100 MeV	高能截面	高能截面 (0.025 eV 处)

1.5.6. 核反应截面函数

```
__host__ __device__ float Sigma_total(float E_MeV) {
    // 截面函数
    constexpr float sigma_100 = 0.0012f; // 100 MeV处
    constexpr float sigma_20 = 0.0016f; // 20 MeV处
    constexpr float E_ref = 100.0f;

    if (E_MeV < 5.0f) {
        // 5 MeV处 0.025 eV 处
        return sigma_20 * (E_MeV - 5.0f) / 15.0f;
    } else if (E_MeV < 20.0f) {
        // 5-20 MeV 处
        float t = (E_MeV - 5.0f) / 15.0f;
        return t * sigma_20;
    } else {
        // 20 MeV 处
        float a = log(sigma_20 / sigma_100) / log(20.0f / 100.0f);
        return sigma_100 * pow(E_MeV / E_ref, a);
    }
}
```

“核”反应：核反应截面函数

- 核反应：核反应 (核反应截面)
- 核反应：核反应 (核反应截面)
- 核反应：核反应 (核反应截面)

核反应截面函数 (核反应截面) “核反应”函数。

1.5.7. 核反应

核反应：核反应截面函数 (核反应截面) 函数？

$$P_{\text{survival}} = e^{-\Sigma \times ds}$$

核反应截面函数 (核反应截面) (核反应截面)。

```
__device__ float survival_probability(float E_MeV, float ds) {
    float sigma = Sigma_total(E_MeV);
    return exp(-sigma * ds);
}
```


当 $ds \ll 1/\Sigma$ 时: 生存概率 P_{survival} 为:

$$P_{\text{survival}} \approx 1 - \Sigma \times ds$$

当 $ds \gg 1/\Sigma$ 时: 生存概率 P_{survival} 为: “指数衰减” 模型 $P_{\text{survival}} = \exp(-\Sigma \times ds)$.

1.5.8. 核素衰减模型

核素: 放射性核素: 衰变常数 λ 和半衰期 $T_{1/2}$ 是描述核素衰变的两个重要参数。核素 N 随时间 t 的变化:

```
__device__ void apply_nuclear_attenuation(  
    float& weight,          // 权重: 权重 *= 衰变  
    double& energy_rem,     // 能量: 能量 减去 能量  
    float E_MeV,            // 能量 MeV  
    float ds                 // 距离 ds  
) {  
    float sigma = Sigma_total(E_MeV);  
    float prob_interaction = 1.0f - exp(-sigma * ds);  
  
    float weight_removed = weight * prob_interaction;  
    weight -= weight_removed;  
  
    // 能量 减去 能量  
    energy_rem -= weight_removed * E_MeV; // ← 能量!  
}
```

核素 N 的衰变: $N(t) = N_0 \exp(-\lambda t)$

1.5.9. 核素衰变模型

2个核素: 核素 2个核素 衰变:

- 核素: 核素 衰变 常数 λ 和半衰期 $T_{1/2}$ 是描述核素衰变的两个重要参数。
- 核素: 核素 衰变 常数 λ 和半衰期 $T_{1/2}$ 是描述核素衰变的两个重要参数。
- 核素: 核素 衰变 常数 λ 和半衰期 $T_{1/2}$ 是描述核素衰变的两个重要参数。

核素 衰变:

- 2个核素: 核素 衰变 常数 λ 和半衰期 $T_{1/2}$ 是描述核素衰变的两个重要参数。
- 核素: 核素 衰变 常数 λ 和半衰期 $T_{1/2}$ 是描述核素衰变的两个重要参数。
- 核素: 2个核素 衰变 常数 λ 和半衰期 $T_{1/2}$ 是描述核素衰变的两个重要参数。

核素: 核素 衰变 常数 λ 和半衰期 $T_{1/2}$ 是描述核素衰变的两个重要参数。

1.6. 4. R 核素模型

1.6.1. 核素模型

R 核素模型: 核素 衰变 常数 λ 和半衰期 $T_{1/2}$ 是描述核素衰变的两个重要参数。核素 N 随时间 t 的变化: “R” 核素模型 - 核素 衰变 常数 λ 和半衰期 $T_{1/2}$ 是描述核素衰变的两个重要参数。

“R” 核素模型(Range)核素 衰变 常数 λ 和半衰期 $T_{1/2}$ 是描述核素衰变的两个重要参数。核素 N 随时间 t 的变化: “R” 核素模型 - 核素 衰变 常数 λ 和半衰期 $T_{1/2}$ 是描述核素衰变的两个重要参数。

1.6.2. 单位制与量纲

单位制：国际单位制 (SI) 与 CGS 制。

- 长度单位：1 m = 100 cm = 1000 mm
- 质量单位：1 kg = 1000 g
- 能量单位：1 J = 10⁷ erg; 1 eV = 1.602 × 10⁻¹⁹ J

注：在粒子物理中，常用 MeV/c² 表示质量，R 表示射程 (Range)。

1.6.3. 射程与穿透深度

粒子类型	射程/穿透深度
α 粒子 (150 MeV)	~ 1 mm (在空气中)
β 粒子 (70 MeV)	~ 0.5 mm (在空气中)
γ 射线 (10 MeV) - X 射线	~ 0.05 mm (在空气中)

1.6.4. CSDA 射程

CSDA = Continuous Slowing Down Approximation

假设：R 为 CSDA 射程，即假设粒子在介质中沿直线运动。

$$\frac{dR}{ds} = -1$$

注：R 为 CSDA 射程 (ds)，s 为沿路径的弧长 (dR = -ds)。

注：CSDA 射程通常用于估算低能粒子的射程，对于高能粒子，需要考虑相对论效应。

“射程”定义：粒子在介质中沿直线运动的总距离。

- 射程 $R = \int_0^R ds$
- 射程 $ds = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$

CSDA 射程的近似：1 MeV 的 α 粒子在空气中的射程约为 10 cm。

注：射程通常用 R 表示，单位通常为 cm 或 mm。CSDA 射程通常用于估算低能粒子的射程，对于高能粒子，需要考虑相对论效应。

1.6.5. 射程计算

```
__host__ __device__ float compute_max_step_physics(float E, const RLUT& lut, float dx =
1.0f, float dz = 1.0f) {
    float R = lut.lookup_R(E); // CSDA 射程 [mm]

    // 10 倍：步长限制
    float delta_R_max = 0.02f * R; // 步长 2%

    // 步长限制
    float dS_factor = 1.0f;
```



```

if (E < 5.0f) {
    // 0.05 mm 0.1 mm: 0.05 mm
    dS_factor = 0.2f;
    delta_R_max = fminf(delta_R_max, 0.1f); // 0.1 mm
} else if (E < 10.0f) {
    // 0.1 mm 0.2 mm: 0.1 mm
    dS_factor = 0.3f;
    delta_R_max = fminf(delta_R_max, 0.2f); // 0.2 mm
} else if (E < 20.0f) {
    // 0.2 mm 0.5 mm: 0.2 mm
    dS_factor = 0.5f;
    delta_R_max = fminf(delta_R_max, 0.5f); // 0.5 mm
} else if (E < 50.0f) {
    // 0.5 mm 0.7 mm: 0.5 mm
    dS_factor = 0.7f;
    delta_R_max = fminf(delta_R_max, 0.7f); // 0.7 mm
}

// 0.7 mm 1 mm
delta_R_max = delta_R_max * dS_factor;

// 1 mm
delta_R_max = fminf(delta_R_max, 1.0f); // 1 mm
delta_R_max = fmaxf(delta_R_max, 0.05f); // 0.05 mm

// 0.05 mm 0.1 mm (0.05 mm 0.1 mm)
float cell_limit = 0.25f * fminf(dx, dz);
delta_R_max = fminf(delta_R_max, cell_limit);

return delta_R_max;
}

```

0.05 mm 0.1 mm:

1. 0.05 mm 2% (0.05 mm): 0.05 mm 0.1 mm 0.05 mm 0.1 mm
2. 0.1 mm 0.2 mm: 0.1 mm 0.2 mm 0.1 mm 0.2 mm
3. 0.2 mm (0.05-1.0 mm): 0.2 mm 0.5 mm 0.2 mm 0.5 mm
4. 0.5 mm 0.7 mm: 0.5 mm 0.7 mm 0.5 mm 0.7 mm (0.5 mm 0.7 mm!)

1.6.6. R 0.05 mm S 0.1 mm 0.2 mm

0.05 mm	0.1 mm	0.2 mm	0.5 mm
S 0.05 mm (stopping power)	Bethe-Bloch 0.05 mm: $E_{\text{out}} = E_{\text{in}} - S(E) \times ds$	0.1 mm, 0.2 mm	0.5 mm 0.7 mm 0.5 mm - stopping power 0.5 mm 0.7 mm!
R 0.05 mm (0.05 mm)	0.1 mm 0.2 mm 0.5 mm: $E_{\text{out}} = E^{-1}(R(E) - ds)$	0.1 mm 0.2 mm 0.5 mm, 0.7 mm (CSDA)	0.5 mm 0.7 mm 0.5 mm

0.05 mm S 0.1 mm 0.2 mm 0.5 mm: Stopping power S(E) 0.05 mm 0.1 mm 0.2 mm 0.5 mm:

- 10 MeV 0.05 mm: $S \approx 100 \text{ MeV/cm}$
- 5 MeV 0.1 mm: $S \approx 200 \text{ MeV/cm}$
- 2 MeV 0.2 mm: $S \approx 500 \text{ MeV/cm}$

0.05 mm 0.1 mm S(E) $\times ds$ 0.1 mm 0.2 mm S 0.2 mm 0.5 mm 0.5 mm 0.7 mm 0.5 mm!

R 0.000000 0.000000 0.000000.

1.6.7. 计算能量沉积

```
// 在设备端计算能量沉积 (R 0.000000)
__device__ float compute_energy_after_step(float E_in, float ds, const RLUT& lut) {
    float R_in = lut.lookup_R(E_in);
    float R_out = R_in - ds; // CSDA: dR/ds = -1
    return lut.lookup_E_inverse(R_out); // 返回 E_out
}

// 在主机端计算能量沉积
__device__ float compute_energy_deposition(float E_in, float ds, const RLUT& lut) {
    float E_out = compute_energy_after_step(E_in, ds, lut);
    return E_in - E_out; // 返回能量沉积
}
```

能量沉积 (LUT): $R(E)$ 和 $E(R)$ 的查找表 (LUT):

- $R(E)$: Bethe-Bloch 公式计算
- $E(R)$: NIST PSTAR 数据库 (或拟合)
- $E(R)$: 能量沉积的逆函数

能量沉积: 能量沉积的逆函数

1.7. 5. Fermi-Eyges 模型

1.7.1. 模型

Fermi-Eyges 模型用于描述带电粒子在介质中的散射和能量损失。该模型基于 MCS 模型 - 能量沉积和能量损失。Fermi-Eyges 模型用于描述带电粒子在介质中的散射和能量损失。

能量沉积: 能量沉积的逆函数

1.7.2. 模型参数

能量沉积: 能量沉积的逆函数

- $R(E)$: 能量沉积的逆函数
- $E(R)$: 能量沉积的逆函数
- $E(R)$: 能量沉积的逆函数
- $E(R)$: 能量沉积的逆函数

能量沉积: 20cm 3cm 能量沉积的逆函数 4cm 能量沉积的逆函数 (1cm 能量沉积)。

1.7.3. 模型参数: 能量沉积



能量沉积	能量沉积
能量沉积 ($z = 0$)	$\leftarrow 5 \text{ mm} \rightarrow$  \leftarrow 能量沉积
5cm 能量沉积	$\leftarrow 8 \text{ mm} \rightarrow$  \leftarrow 能量沉积



Figure	Figure
10cm Figure	
15cm Figure (Figure Figure)	

Figure Figure Figure:

- Figure Figure (Figure Figure)
- Figure Figure (Figure × Figure)
- MCS Figure (Figure Figure)

1.7.4. Figure (T)

Figure T: “Figure” $T(z)$ Figure z Figure Figure Figure Figure Figure:

$$T(z) = d \frac{\sigma_{\theta}^2}{dz}$$

Figure Figure: Figure Figure Figure Figure Figure: mm Figure² (Figure Figure Figure!) Figure: T “Figure Figure” Figure Figure Figure - Figure z Figure Figure Figure Figure Figure Figure.

1.7.5. Fermi-Eyges Figure

Figure Figure Figure Figure Figure “Figure” Figure Figure - Figure Figure Figure Figure Figure:

$$A_0(z) = \int_0^z T(z') dz'$$

$$A_1(z) = \int_0^z z' \times T(z') dz'$$

$$A_2(z) = \int_0^z z'^2 \times T(z') dz'$$

Figure	Figure Figure	Figure Figure Figure
A_0	Figure Figure Figure Figure	Figure Figure Figure Figure
A_1	1 Figure Figure Figure	Figure Figure Figure - Figure Figure Figure Figure
A_2	2 Figure Figure Figure	Figure ² Figure Figure - Figure Figure Figure Figure

“Figure Figure” Figure: Figure Figure Figure Figure Figure Figure:

- A_0 = Figure Figure (Figure Figure Figure Figure Figure)
- A_1 = Figure Figure Figure Figure (Figure Figure Figure Figure)
- A_2 = Figure² Figure Figure Figure (Figure Figure Figure Figure Figure Figure)

Fermi-Eyges 的 微分 截面 公式: 在 小 角度 散射 中, 微分 截面 可以 表示 为 散射 角 的 二次 函数.

1.7.6. 微分 截面

$$\sigma_x^2(z) = A_0 \times z^2 - 2 \times A_1 \times z + A_2$$

微分 截面 的 二次 函数 形式:

1. $A_0 z^2$: 表示 散射 角 的 二次 项, 与 散射 角 的 平方 成正比.
2. $-2A_1 z$: 表示 散射 角 的 一次 项, 与 散射 角 成正比.
3. A_2 : 表示 散射 角 的 常数 项, 与 散射 角 无关.

微分 截面 的 二次 函数 形式 可以 表示 为:

1.7.7. 微分 截面 的 计算

```
// Highland 微分 截面 公式
__device__ float fermi_eyges_scattering_power(float E_MeV) {
    float sigma_theta = highland_sigma(E_MeV, 1.0f, X0_water);
    return sigma_theta * sigma_theta; // T = σ²/mm
}

// 微分 截面 的 二次 函数 形式
struct FermiEygesMoments {
    double A0 = 0.0; // 二次 项 系数
    double A1 = 0.0; // 一次 项 系数
    double A2 = 0.0; // 常数 项 系数
};

__device__ void device_update_fermi_eyges_moments(
    FermiEygesMoments& moments,
    float z,
    float ds,
    float E_MeV
) {
    float T = fermi_eyges_scattering_power(E_MeV);

    moments.A0 += T * ds;
    moments.A1 += T * z * ds;
    moments.A2 += T * z * z * ds;
}
```

微分 截面 的 二次 函数 形式 可以 表示 为:

$$\int_0^z T(z') dz \approx \sum_i T(z_i) \times \Delta s$$

微分 截面 的 二次 函数 形式:

- 表示 散射 角 的 二次 项
- 表示 散射 角 的 一次 项
- 表示 散射 角 的 常数 项 (A0, A1 和 A2)

微分 截面 的 二次 函数 形式 可以 表示 为:

1.7.8. 总方差计算

总方差 σ_{total}^2 = 各分量方差之和: $\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_{\text{sigma_x0}}^2 + \sigma_{\text{sigma_theta0}}^2 + \sigma_{\text{sigma_mcs}}^2$:

1. $\sigma_{\text{sigma_x0}}$ ("sigma_x0"): 初始方差
2. $\sigma_{\text{sigma_theta0}}$ ("sigma_theta0" $\times z$): 几何方差
3. $\sigma_{\text{sigma_mcs}}$ ("sigma_mcs"): MCS 方差

总方差 σ_{total}^2 计算 (初始方差, 几何方差, MCS 方差):

$$\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_{\text{sigma_x0}}^2 + (\sigma_{\text{sigma_theta0}} \times z)^2 + \sigma_{\text{sigma_mcs}}^2$$

```
float total_lateral_sigma_squared(  
    float "sigma_x0",      // 初始方差  
    float "sigma_theta0",  // 几何方差  
    float z,               // z  
    float "sigma_mcs"      // MCS 方差  
) {  
    // 初始方差 (sigma_x0)  
    float sigma_initial = "sigma_x0";  
  
    // 几何方差 (sigma_theta0 * z)  
    float sigma_geometric = "sigma_theta0" * z;  
  
    // MCS 方差 (Fermi-Eyges)  
    float sigma_scattering = "sigma_mcs";  
  
    // 总方差 (平方和)  
    return sqrt(sigma_initial*sigma_initial +  
                sigma_geometric*sigma_geometric +  
                sigma_scattering*sigma_scattering);  
}
```

总方差 σ_{total}^2 计算, 几何方差! 总方差: $\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_{\text{sigma_x0}}^2 + (\sigma_{\text{sigma_theta0}} \times z)^2 + \sigma_{\text{sigma_mcs}}^2$

总方差 σ_{total}^2 计算 (初始方差, 几何方差, MCS 方差):

1.8. 6. 总方差计算

1.8.1. 总方差计算

总方差 σ_{total}^2 计算: 总方差 σ_{total}^2 = 各分量方差之和: $\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_{\text{sigma_x0}}^2 + \sigma_{\text{sigma_theta0}}^2 + \sigma_{\text{sigma_mcs}}^2$:

1. 初始方差 (R 方差)
2. 几何方差 (R -LUT 方差)
3. 几何方差 (Bohr/Vavilov/Landau)
4. 几何方差 (Bohr/Vavilov/Landau)
5. 几何方差 (Highland 方差)
6. 几何方差 (Bohr/Vavilov/Landau)
7. 几何方差 (Bohr/Vavilov/Landau?)
8. 几何方差 (Bohr/Vavilov/Landau?)

总方差 σ_{total}^2 计算 GPU 加速 (Bohr/Vavilov/Landau)!

1.8.2. 核子输运

```
__device__ void transport_step(
    // 入参
    float theta, float E, float x, float z, float w,
    // 出参
    float dx, float dz,
    // LUT
    const RLUT& lut,
    // 其他
    float& E_dep, double& E_nuc_rem, float boundary_flux[4]
) {
    // 1. 计算步长 (R 值)
    float ds = compute_max_step_physics(E, lut);
    ds = fminf(ds, compute_boundary_step(x, z, dx, dz, theta));

    // 2. 计算能量损失 (dE)
    float E_out = compute_energy_after_step(E, ds, lut);

    // 3. 计算能量损失 (dE)
    float dE_straggle = sample_energy_loss_with_straggling(E, ds, seed);
    E_out += dE_straggle;
    E_out = fmaxf(E_out, E_cutoff);

    // 4. 计算能量损失 (dE)
    E_dep = E - E_out;

    // 5. MCS (蒙特卡罗模拟)
    float sigma_theta = highland_sigma(E, ds, X0_water);
    float delta_theta = sample_mcs_angle(sigma_theta, seed);
    theta += delta_theta;

    // 6. 核子衰减 (核子输运)
    apply_nuclear_attenuation(w, E_nuc_rem, E, ds);

    // 7. 计算位置 (x, z)
    x += ds * sin(theta);
    z += ds * cos(theta);

    // 8. 检查边界发射 (核子输运)
    check_boundary_emission(x, z, dx, dz, boundary_flux);
}
```


1.9. β γ γ

β	γ	γ	β γ γ
m_p	938.272	MeV/c ²	β γ γ - beta, gamma β γ
$m_e c^2$	0.511	MeV	β γ γ - β γ γ γ γ
X_0 (mm)	360.8	mm	β γ γ γ - β γ γ γ γ γ
E_{cutoff}	0.1	MeV	β γ γ - β γ γ γ
E_{trigger}	10	MeV	β γ γ γ - β γ γ γ γ γ γ
ρ_{water}	1.0	g/cm ³	β γ γ - β γ γ γ (β γ γ !)

Table 1: SM_2D β γ γ

—

1.10. β : β γ γ

1.10.1. β γ γ γ γ γ

1. β γ γ (MCS)

- β : β γ γ γ γ γ γ
- β : β γ γ γ γ - β γ γ
- β : β γ γ (β γ γ γ) γ γ γ

2. β γ γ

- β : β γ γ γ γ γ
- β : β γ γ γ - β γ γ γ γ
- β : β γ γ γ γ γ

3. β γ

- β : β γ γ γ γ γ
- β : β γ γ (10cm γ 1-3%) + 2 β γ γ
- β : β γ γ γ γ

4. Fermi-Eyges β

- β : β γ γ γ γ γ γ
- β : β γ γ γ - β γ γ γ γ γ γ
- β : β γ γ (β γ γ γ γ)

1.10.2. β γ γ γ γ γ

β γ γ : β γ γ γ γ :

- β γ γ : β γ γ γ (β γ γ 3-5mm)
- β γ γ : CT β , stopping power β (β γ γ 2-3%)
- β γ : β , β γ γ (β γ γ)
- β γ : β γ (Fermi-Eyges, β γ γ 5-10mm)

β γ γ γ :

$$\text{Margin} = 2.5\Sigma + 0.5 \text{ cm}$$

(Sigma β γ γ γ)

⚠️ ⚠️ ⚠️: ⚠️⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️ ⚠️!

- ⚠️ ⚠️: ⚠️ ⚠️ ⚠️, ⚠️ ⚠️ ⚠️ ⚠️⚠️
- ⚠️ ⚠️: ⚠️ ⚠️ ⚠️, ⚠️ ⚠️ ⚠️ ⚠️⚠️
- ⚠️ ⚠️: 3-4 ⚠️⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️ ⚠️

1.11. ⚠️⚠️⚠️

1. **NIST PSTAR** ⚠️⚠️⚠️ - ⚠️⚠️ ⚠️⚠️ stopping power ⚠️ ⚠️⚠️ (⚠️ ⚠️)
2. **PDG 2024** - ⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️ (Highland ⚠️)
3. **ICRU ⚠️⚠️ 63** - ⚠️⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️ ⚠️ ⚠️⚠️
4. **Vavilov (1957)** - ⚠️⚠️ ⚠️ ⚠️ (Bohr, Vavilov, Landau ⚠️)
5. **Fermi-Eyges** - ⚠️ ⚠️ ⚠️ ⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️
6. **Bethe-Bloch** - ⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️ ⚠️ (stopping power)
7. **ICRU ⚠️⚠️ 73** - ⚠️ ⚠️ ⚠️⚠️ stopping power
8. **Gottschalk (2012)** - ⚠️⚠️ ⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️⚠️

1.12. ⚠️⚠️

⚠️	⚠️
MCS	⚠️ ⚠️ ⚠️ - ⚠️⚠️⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️⚠️
⚠️ (Straggling)	⚠️⚠️ ⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️
CSDA	⚠️ ⚠️ ⚠️ - ⚠️⚠️⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️ ⚠️
⚠️⚠️ ⚠️	⚠️⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️ ⚠️⚠️⚠️ ⚠️ ⚠️ - ⚠️⚠️⚠️ ⚠️ ⚠️
⚠️⚠️ ⚠️	⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️⚠️⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️
⚠️umbra	⚠️ ⚠️⚠️⚠️ ⚠️ ⚠️ ⚠️ - ⚠️⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️
⚠️⚠️	⚠️⚠️⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️ ⚠️⚠️⚠️ ⚠️ - ⚠️⚠️ ⚠️⚠️
Stopping Power	⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️ - ⚠️ ⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️
⚠️⚠️	⚠️ ⚠️⚠️⚠️ ⚠️ ⚠️ ⚠️ ⚠️
⚠️ (Variance)	⚠️ ⚠️ (σ^2) - ⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️⚠️
LET	⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️ - ⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️⚠️

SM_2D ⚠️ ⚠️: ⚠️⚠️ ⚠️

⚠️ 2.0.0 - ⚠️⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️⚠️

⚠️⚠️⚠️ ⚠️⚠️⚠️ ⚠️ ⚠️⚠️ ⚠️⚠️⚠️⚠️.