

哈爾濱工業大學

毕业设计（论文）中期报告

题 目：带电粒子在不同材料下的屏蔽模拟分析

专 业 核物理

学 生 李岳松

学 号 1171100214

指导教师 任延宇副教授

日 期 2021 年 4 月 9 日

哈尔滨工业大学教务处制

1. 论文工作是否按开题报告预定的内容及进度安排进行

经过前期工作，现已完成利用 Geant4 验证单位质量屏蔽物质的阻止本领公式、探究不同屏蔽物质对中高能质子的屏蔽效果、自编程序计算带电粒子在物质中的射程等内容，并推导出对于入射动量在 $0.1\sim 1\text{GeV}/c$ 之间的质子，在分别使屏蔽层质量越小、屏蔽层厚度越小的条件下，选取屏蔽层物质的原则。论文工作按开题报告预定内容及进度安排进行。

2. 已完成的研究工作及成果

2.1. 课题简介

本课题旨在研究带电粒子的能量在物质中的衰减规律，从而计算带电粒子的射程、能量沉积等物理量，进而得到在不同情境下对人体、仪器设备等屏蔽效果最佳的屏蔽层。主要研究内容包括：利用 Geant4 验证屏蔽物质阻止本领公式、计算带电粒子在物质中的射程与能量沉积、研究在满足屏蔽层质量最小、厚度最小等条件下屏蔽物质的选取原则。

2.2. 最优屏蔽层的理论研究

2.2.1. 屏蔽层厚度最小

屏蔽层须使得带电粒子的能量降低到安全水平，此处我们将安全水平粗略得理解为带电粒子能量降低为零，因此屏蔽层厚度须大于等于带电粒子射程。

带电粒子在不同屏蔽物质中射程 R 的计算公式为：

$$R = \int_{E_0}^0 \frac{dE}{dE/dx} \quad (1)$$

其中， E_0 为粒子初始能量， dE/dx 为屏蔽物质的阻止本领。

由于单位质量物质阻止本领 $dE/\rho dx$ 与物质的密度无关，为了方便分析，我们将屏蔽层物质的阻止本领 dE/dx 变换为单位质量物质的阻止本领 $dE/\rho dx$ ，即：

$$R = \int_{E_0}^0 \frac{dE}{\rho \cdot dE/\rho dx} \quad (2)$$

由（2）式我们得知，带电粒子射程与屏蔽物质的单位质量阻止本领和密度有关。要使带电粒子射程最短，只需使 $\rho \cdot dE/\rho dx$ 最大。

2.2.2. 屏蔽层质量最小

假设某一辐射场中带电粒子入射方向相同，且辐射场均匀分布，则计算屏蔽层质量只

需计算沿带电粒子入射方向的屏蔽层线质量密度 m_L ，计算公式如下：

$$m_L = \rho \int_{E_0}^0 \frac{dE}{dE/dx} \quad (3)$$

其中 ρ 为屏蔽层物质的密度。

为了方便分析，我们将屏蔽层物质的阻止本领 dE/dx 变换为单位质量屏蔽层物质的阻止本领 $dE/\rho dx$ ，则（3）式变换为

$$m_L = \int_{E_0}^0 \frac{dE}{dE/\rho dx} \quad (4)$$

由（4）式得知，在带电粒子入射能量 E_0 一定的情况下，沿带电粒子入射方向的屏蔽层线质量 m_L 只与单位质量屏蔽层物质的阻止本领 $dE/\rho dx$ 有关， $dE/\rho dx$ 越大， m_L 越小。因此想要屏蔽层线质量密度 m_L 最小，只需寻找单位质量屏蔽层物质阻止本领 $dE/\rho dx$ 最大的物质即可。

2.3. 单位质量阻止本领计算公式的验证

单位质量物质的阻止本领计算公式^[1]如下：

$$\frac{dE}{\rho dx} = K \frac{Z}{A} \left(\frac{z}{\beta} \right)^2 \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right] \quad (5)$$

式中：

v ：入射粒子的速度

z, m ：入射粒子的核电荷数与质量

Z, A, M ：组成物质的元素的核电荷数、核子数与质量

$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \approx 0.3071 \text{ MeV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^2$

I ：屏蔽物质的平均电离能

$$\beta = \frac{v}{c} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

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

δ ：与物质密度有关的参数，当 $\gamma\beta > 1$ 时对结果影响显著

根据（5）式，我们可以得出以下结论：单位质量物质的阻止本领与物质原子序数、入射粒子电荷量有关，物质原子序数越大，入射粒子电荷量越大，单位质量物质的阻止本领越小。这一定性结果有助于我们之后对问题的分析。

我们利用 Geant4 程序包的电磁相互作用模型对理论公式进行验证。验证具体过程如下：（1）建模。建立一个厚度为微米量级的 Al 薄板，在薄板前放置一个粒子枪，设置粒子种类为质子，入射动量为 0.1GeV/c，粒子枪与薄板之间设置为真空环境，如图 1。

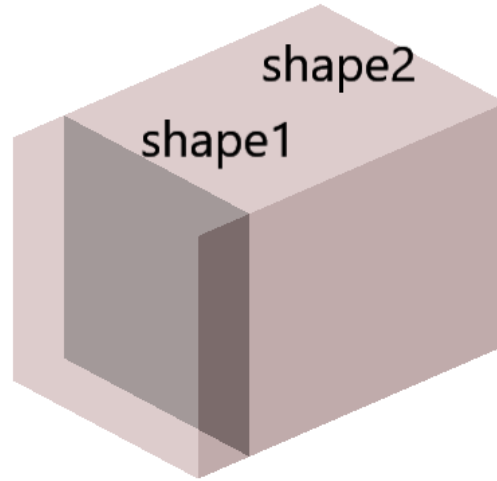


图 1 Geant4 中的薄板模型，其中 shape1 为薄板，shape2 为真空环境，粒子枪未显示

（2）统计能量沉积。设置粒子枪内出射 100 个粒子，运行案例后 Geant4 会返回给用户薄板的吸收剂量 D ，根据吸收剂量与沉积能量的关系

$$\Delta E = D * m \quad (6)$$

其中 m 为薄板质量。可得到单位长度薄板上的能量沉积 $\Delta E / \Delta x$ 。

（3）改变参数。改变入射粒子能量与薄板材料，记录不同参数下单位长度薄板的能量沉积 $\Delta E / \Delta x$ 。

（4）与理论值比较。将模拟值 $\Delta E / \Delta x$ 与理论值 $100 \times dE / dx$ 比较（ $\times 100$ 是由于粒子枪出射 100 个粒子），如图 2。

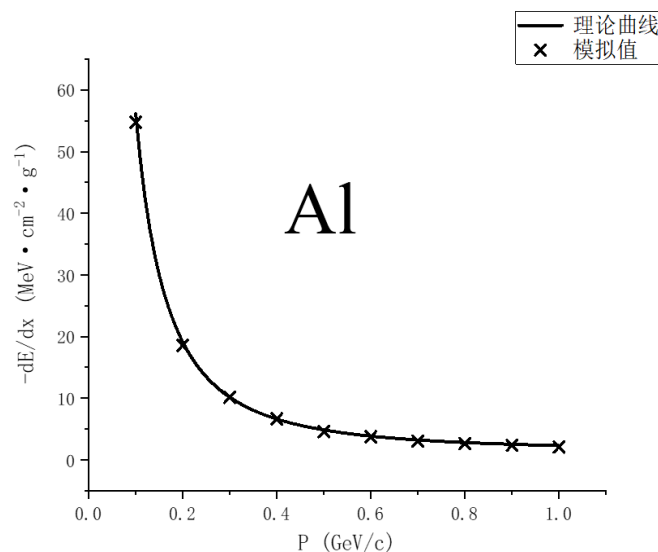


图 2 入射粒子为质子，粒子入射动量为 0.1GeV/c~1GeV/c，屏蔽材料为 Al 时，理论曲线 $100 \times dE / dx$ 与模拟结果 $\Delta E / \Delta x$ 的比较

由图 2 我们得知，在 Geant4 的电磁相互作用模型下模拟质子轰击 Al 板，在入射动量为 0.1GeV/c~1GeV/c 时，理论计算结果与 Geant4 模拟结果高度吻合。除了研究屏蔽物质为 Al 之外，我们还研究了 B、Cu、Sn、W、Pb 等物质，结果如图 3：

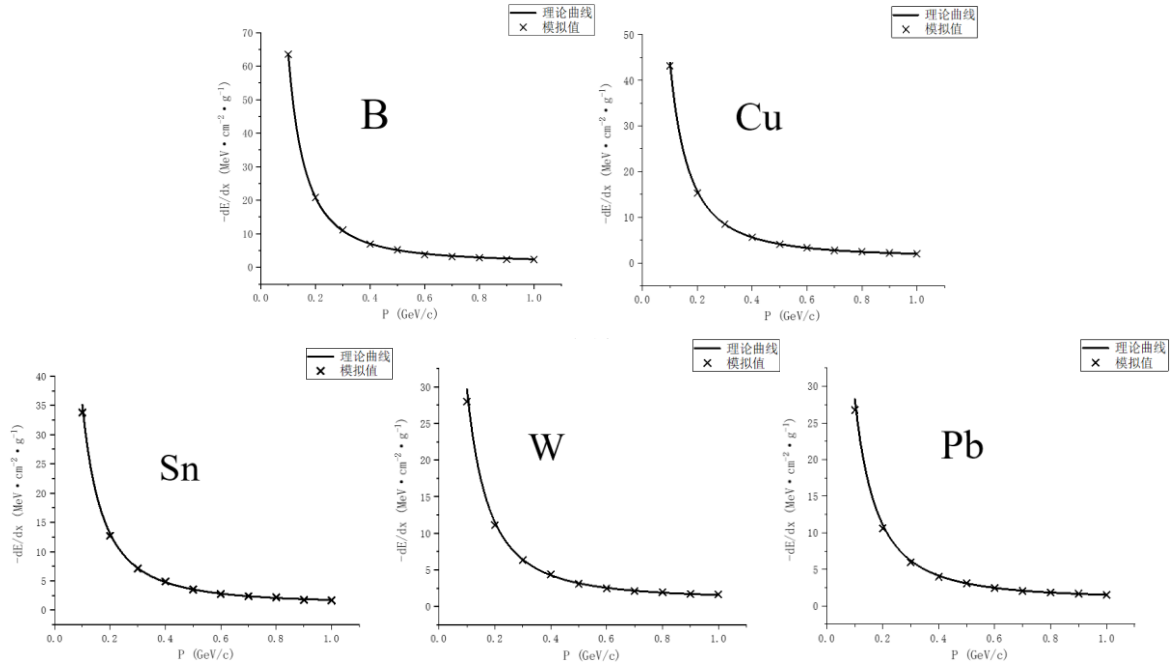


图 3 入射粒子为质子，入射动量为 0.1GeV/c~1GeV/c，屏蔽材料分别为 B、Cu、Sn、W、Pb 时，理论曲线 $100 \times dE/dx$ 与模拟结果 $\Delta E/\Delta x$ 的比较

由此我们认为，在计算入射动量为 0.1GeV/c~1GeV/c 的质子在屏蔽物质中的能量损失时，可以由（5）式进行精确计算。

2.4. 不同物质对高能质子的屏蔽效果

2.4.1. 不同物质对于高能质子的阻止本领

（5）式虽然可以精确计算单位质量物质的阻止本领，但在实际辐射防护中，屏蔽层的防护效果不只与屏蔽层物质元素种类有关，还与屏蔽层物质密度有关。因此在实际辐射防护中计算时，我们需要对（5）式作以改变：

$$\frac{dE}{dx} = \rho K \frac{Z}{A} \left(\frac{z}{\beta} \right)^2 \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right] \quad (7)$$

此时方程左边为真正意义上的阻止本领，即在单位长度物质中带电粒子所损失的能量。

我们选取 C、Fe、W 三种物质作为屏蔽材料，研究它们对入射动量为 0.1GeV/c~1GeV/c 的质子的屏蔽效果，结果如图 4 所示。

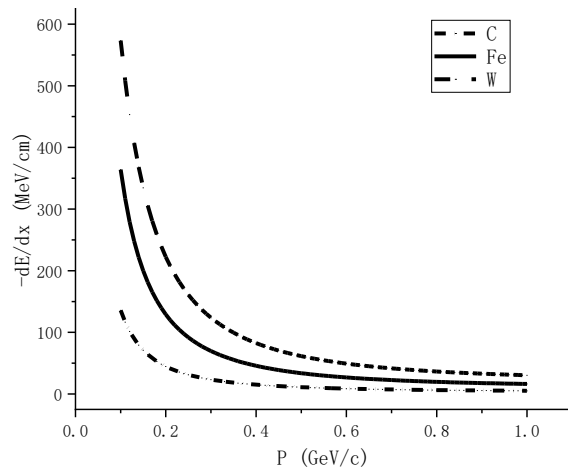


图 4 入射粒子为质子，入射动量为 0.1~1GeV/c，屏蔽物质分别为 C、Fe、W 时，屏蔽物质的阻止本领

图 4 表明，虽然 W 的原子序数最大，单位质量阻止本领最弱，但由于 W 的密度大于 Fe、C 的密度（W：19.3g/cm³，Fe：7.874g/cm³，C：2g/cm³），因此在实际辐射防护中，W 的阻止本领大于 Fe、C 的阻止本领。

2.4.2. 中高能质子在不同物质中射程的计算与比较

由于理论公式的积分稍显复杂，不便于计算，因此我们通过编写程序来计算射程。程序的实现思路如下：将屏蔽层沿粒子入射方向划分为若干层，每层厚度为微米量级。设粒子穿行至第 N 层屏蔽物质时能量为 E ，将能量 E 设置为粒子进入第 $N+1$ 层屏蔽物质时的初始能量，将初始能量与物质原子序数等相关参数代入（7）式中，以此得到第 $N+1$ 层屏蔽物质的阻止本领，进而得到粒子在第 $N+1$ 层屏蔽物质中所损失的能量。以此类推，经过每层物质的迭代计算，当粒子的能量从 E_0 降低到阈值（用户设定）时，记录此时粒子所在的层数，层数乘以每层物质的厚度即为粒子在屏蔽物质中的射程。

我们通过上述思路成功实现了程序，并计算了初始能量分别为 1、100、200、300、400 MeV 的质子分别在 C、Fe、W 三种物质的射程，结果如图 5 所示。为了验证自编程序计算结果的合理性，我们将同样的参数输入 Geant4 中，得到 Geant4 所追踪到的粒子运动轨迹，进而得到粒子的射程。我们将自编程序的计算结果与 Geant4 仿真结果做了对比，如表 1。

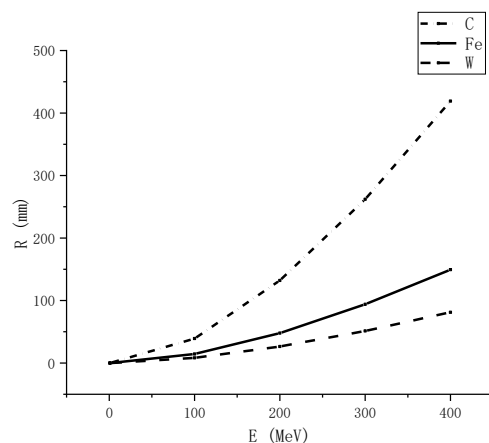


图 5 入射粒子为质子，初始能量分别为 1、100、200、300、400 MeV，屏蔽物质分别为 C、Fe、W 时，入射粒子在屏蔽物质中的射程

物质 种类	入射能量 /MeV						
		1	100	200	300	400	
C	Geant4	0.016	43.60	145.50	286.00	461.00	
	自编程序	0.015	43.19	145.30	287.85	460.17	
	二者差别	6.25%	0.92%	0.13%	0.65%	0.18%	
Fe	Geant4	0.008	14.60	48.70	95.50	149.20	
	自编程序	0.009	14.48	47.82	93.93	149.31	
	二者差别	12.5%	0.82%	1.81%	1.64%	0.06%	
W	Geant4	0.011	8.36	26.50	51.40	81.60	
	自编程序	0.023	8.15	26.37	51.33	81.13	
	二者差别	52.2%	2.57%	0.51%	0.14%	0.58%	

表 1 入射质子能量分别为 1、100、200、300、400 MeV，屏蔽物质分别为 C、Fe、W 时，Geant4 与自编程序射程计算值（单位：mm）的比较

表 1 表明，自编程序计算结果与 Geant4 仿真结果在粒子初始能量分别为 100、200、300、400 MeV 时符合得很好。因此我们可以认为，自编程序的计算结果在粒子入射能量区间为 100~400 MeV 时较为合理。自编程序的好处在于我们可以一次性计算多种入射能量、多种屏蔽物质下的带电粒子射程，节省了大量时间，为我们之后在不同情境下研究最优屏蔽层的选取原则提供了便利。

3. 后期拟完成的研究工作及进度安排

目前我们完成了入射动量为 0.1~1GeV/c（入射能量为 5~433MeV）的质子屏蔽计算，包括单位质量屏蔽层物质阻止本领、质子射程、屏蔽层厚度与质量等，接下来我们将进行其他能量区间质子的屏蔽计算，以及对于 α 粒子、电子的屏蔽计算。具体进度安排如下：

时间	进度安排
4 月	电子的屏蔽计算 α 粒子的屏蔽计算
5 月	其他能量区间质子的屏蔽计算 撰写毕业论文

4. 存在的问题与困难

4.1. 复杂屏蔽材料的选取

当前研究中我们使用的屏蔽材料均为单质，提出的最优屏蔽层物质选取原则也只针对单质。根据我们查阅到的相关文献，目前人们已经使用陶瓷材料、合金、聚合物等物质作为带电粒子的屏蔽材料。这些复杂材料在不同的应用环境中如何选择，我们目前还没有明确的思路。

4.2. 自编程序在低能区的误差

表 1 结果表明自编程序计算结果与 Geant4 仿真结果在粒子入射能量为 1 MeV 时差别较大，尤其当屏蔽物质为 W 时差别十分明显，对于其中的原因我们目前还不清楚。

5. 论文按时完成的可能性

按照目前的进度，我们将在 4 月与 5 月份完成电子、 α 粒子与其他能量区间质子的屏蔽计算，论文可以按时完成。

6. 参考文献

[1]. Nagashima Yorikiyo. Elementary Particle Physics:Quantum Field Theory and Particles[M]. Weinheim, Germany : Wiley - VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010： 384.