

哈爾濱工業大學

毕业设计（论文）中期报告

题 目：利用 GEANT4 研究伽马辐射在无限大
介质中的累积因子

专 业 光电信息科学与工程

学 生 朱铭浩

学 号 1183200317

指导教师 任延宇教授

日 期 2022 年 4 月 3 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	1
2	已完成的研究工作及成果	1
2.1	课题简介	1
2.2	GEANT4 仿真可靠性验证	1
2.3	无限大介质累积因子的仿真计算	4
2.4	无限大平板无限大面源理想模型的累积因子仿真计算	8
3	后期拟完成的研究工作及进度安排	8
4	存在的问题与困难	8
4.1	高能区仿真误差	8
4.2	理论计算累积因子	8
5	论文按时完成的可能性	9
6	参考文献	9

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，现已完成利用实际实验和参考数据验证 GEANT4 仿真模拟的准确性与可行性、无限大介质累积因子的模拟与修正、无限大平板无限大面源理想模型的累积因子模拟等内容，无限大介质累积因子的模拟中对于入射能量在 0.5-2MeV 之间的 γ 光子，仿真结果与预期结果符合良好。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

本课题通过 GEANT4 模拟不同能量伽玛辐射在经过不同厚度屏蔽物质后衰减过程，从而研究伽玛辐射屏蔽中累积因子的相关规律，为在不同情境下对人体、仪器设备等的辐射防护提供指导。主要研究内容包括：通过实验对比验证 GEANT4 仿真数据的可靠性、计算无限大介质情况下伽玛辐射的累积因子以及结果修正、计算无限大平板无限大面源理想模型的累积因子等。

2.2 GEANT4 仿真可靠性验证

利用 GEANT4 进行仿真模拟计算，首先需验证 GEANT4 模拟计算结果的可靠性，即利用现有条件设置实验，分别利用实际实验进行测量和利用 GEANT4 进行仿真计算，以及现有参考值的理论计算结果，对三者结果进行分析以确定 GEANT4 模拟的可靠性。

根据实验是现有条件，采用有准直的 ^{137}Cs 源作为 γ 放射源，其衰变纲图如图1所示。可以看出， γ 源 ^{137}Cs 发出的 γ 射线能量为 0.6617MeV。

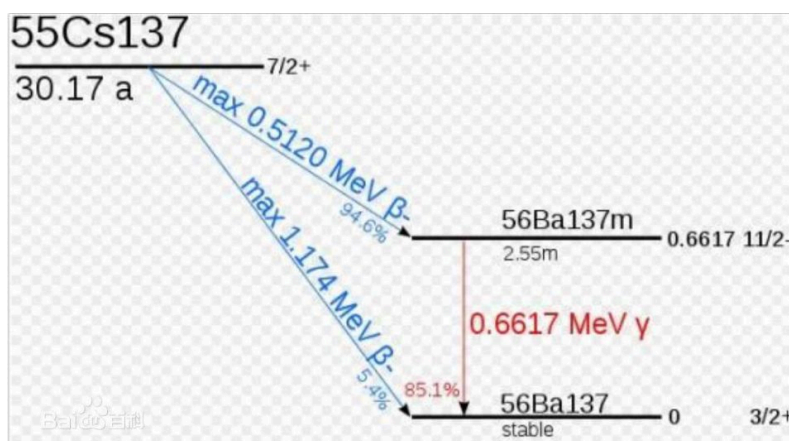


图 1: ^{137}Cs 衰变纲图

实验装置如图2所示，左侧为 $^{137}\text{Cs}\gamma$ 源，中部为平板形 Pb 屏蔽介质，右侧为 γ 光子探测器。改变平板形 Pb 屏蔽介质厚度的方法是通过增减屏蔽介质的数量来完

成的。每一块 Pb 屏蔽介质由同一块 Pb 板切割而来，厚度为 $2.04 \pm 0.02\text{mm}$ ，实验中使用 1-4 块屏蔽板分别测量一定时间内到达探测器的 γ 光子数。

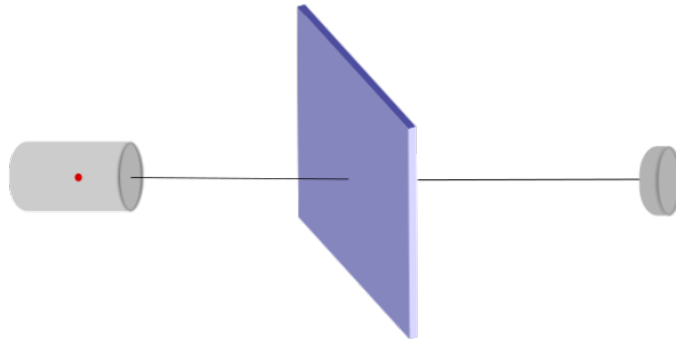


图 2: 实验装置示意图

在 GEANT4 中进行仿真模拟时，设置空间内物质为空气以符合实验环境，左侧设置一能量为 0.6617MeV 的单向点源以模拟实验中有准直的 γ 源 ^{137}Cs ，中部建模设置一 Pb 屏蔽板，多次仿真中设置其厚度分别为 2.04mm 、 4.08mm 、 6.12mm 、 8.16mm ，即与实验设定相同，右侧设置一探测器用于统计 γ 光子数，如图3所示，分别进行仿真，统计源发射 1000000 个 γ 光子，到达探测器的 γ 光子数，其中绿色线条即为 γ 光子径迹。

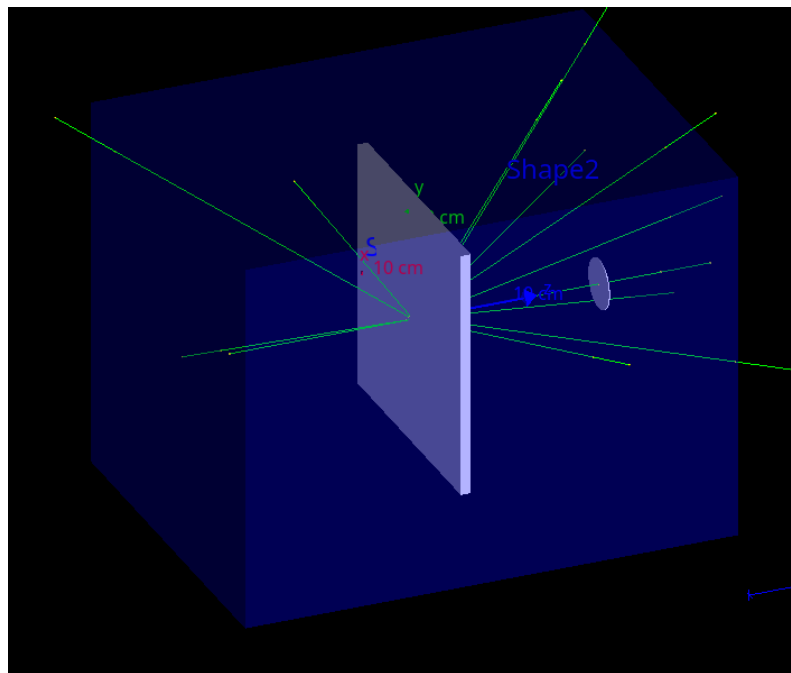


图 3: 实验装置示意图

分别进行实验与模拟后可得数据结果如表1所示。

表 1: 实验与仿真模拟数据

屏蔽厚度 (mm)	实验值 (粒子数)	仿真值 (粒子数)
$2.04 \pm 0.02\text{mm}$	799078	780755
$4.08 \pm 0.04\text{mm}$	667237	610813
$6.12 \pm 0.06\text{mm}$	552643	478211
$8.16 \pm 0.08\text{mm}$	451419	374819

对实验和仿真数据进行分析, 对于有准直的情况, γ 射线在物质中的衰减规律满足式1, 以粒子数衡量, 则 N 为到达探测器的粒子数, N_0 为粒子源发射的粒子数, 因此, 判断 GEANT4 仿真模拟结果是否可靠需要比较实验数据的 μ_1 与仿真结果的 μ_2 是否相等。

$$N = N_0 e^{-\mu d} \quad (1)$$

利用 Octave 对表1中数据按照式1规律进行拟合, 其结果如图4所示。

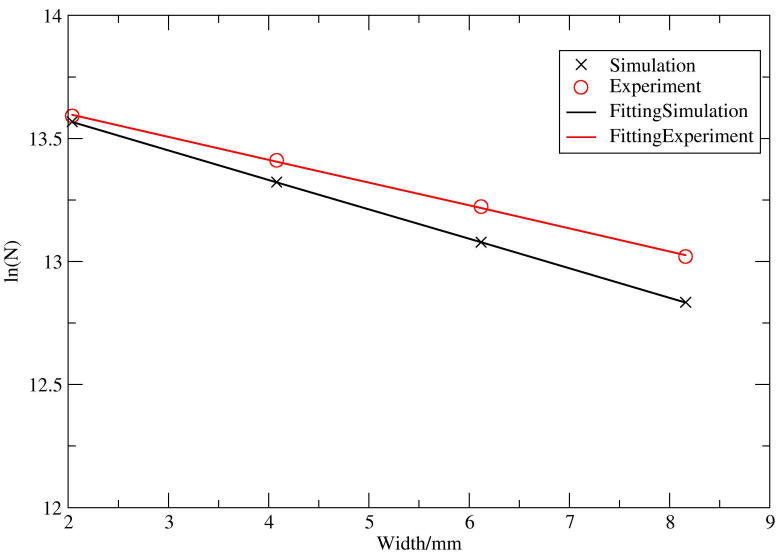


图 4: 实验与仿真数据拟合结果

其中数据点已标出, 曲线为拟合曲线。拟合结果得 $\mu_1 = 0.093217\text{mm}^{-1}$, $\mu_2 = 0.1199\text{mm}^{-1}$ 。仿真结果与实验结果相差约为 28.6%。依据美国国家标准与技术研究院 NIST 的数据可知, 0.6MeV 的 γ 光子在物质 Pb 中的质量衰减系数 $\mu/\rho =$

0.1248cm²/g, 0.8MeV 的 γ 光子在物质 Pb 中的质量衰减系数 $\mu/\rho = 0.0887\text{cm}^2/\text{g}$, 插值法估计 0.6617MeV 光子在物质 Pb 中的质量衰减系数 $\mu/\rho \approx 0.1137\text{cm}^2/\text{g}^{[1]}$ 。取 Pb 的密度为 11.34g/cm³ 计算得 Pb 的线衰减系数参考值 $\mu = 1.289\text{cm}^{-1} = 0.1289\text{mm}^{-1}$, 如表2所示。

表 2: 线衰减系数 μ (mm⁻¹)

实验值及与参考值偏差	仿真值及与参考值偏差	参考值 (插值估计)
0.093217 27.7%	0.1199 6.9%	0.1289 -

仿真值与参考值的偏差约为 6.9%，可以认为 GEANT4 仿真结果可靠。实验值与参考值偏差约为 27.7%，分析原因主要有一下几个方面：实验用 ¹³⁷Cs 放射源的准直器屏蔽效果有限，出射的 γ 光子并非完全准直，会受到累积因子影响，导致衰减较慢， μ 值偏小；实验用 Pb 屏蔽板有纯度限制，并非绝对纯净物 Pb 屏蔽板，含有少量杂质，可能对屏蔽效果产生影响。因此，GEANT4 仿真结果可靠，可以代替实验进行研究，且对实验条件有限的条件下，GEANT4 结果可能比实验结果更加准确。

2.3 无限大介质累积因子的仿真计算

准直的 γ 光子在屏蔽物质中的衰减规律可以表示为式2，但对于未经准直的情况，由于探测器接收到的 γ 光子不仅包括未经碰撞直接到达探测器的部分，还包括经过散射后到达探测器的部分，因此计数强度会比有准直情况高很多。为衡量因散射而多到达探测器的粒子数，引入累积因子 B ，次数 γ 光子在屏蔽物质中的衰减规律可以表示为式3。

$$N = N_0 e^{-\mu d} \quad (2)$$

$$N = N_0 B e^{-\mu d} \quad (3)$$

由于累积因子是描述由于散射而对衰减的影响，依据式2与式3，累积因子 B 可表述为式4。

$$B = \frac{N}{N_{nc}} \quad (4)$$

以粒子数衡量时，式4中， N 表示所有到达探测器的 γ 光子数， N_{nc} 表示在屏蔽介质中未经碰撞直接到达探测器的粒子数。假定在屏蔽介质中发生散射后到达探

测器的粒子数为 N_s ，则累积因子的式4可以进一步表述为式5。

$$B = \frac{N_s + N_{nc}}{N_{nc}} = 1 + \frac{N_s}{N_{nc}} \quad (5)$$

因此，依据式4和式5，在仿真模拟中，为计算累积因子，需统计的量为所有到达探测器的 γ 光子数 N 及在屏蔽介质中未经碰撞直接到达探测器的粒子数 N_{nc} ，或者统计在屏蔽介质中发生散射后到达探测器的粒子数 N_s 及在屏蔽介质中未经碰撞直接到达探测器的粒子数 N_{nc} 。为便于数据统计，后续仿真计算中采用在屏蔽介质中发生散射后到达探测器的粒子数 N_s 及在屏蔽介质中未经碰撞直接到达探测器的粒子数 N_{nc} 数据，利用式4进行累积因子的仿真计算。

在建模选择上，无限大介质时的累积因子测量应采用图5所示结构进行测量。图

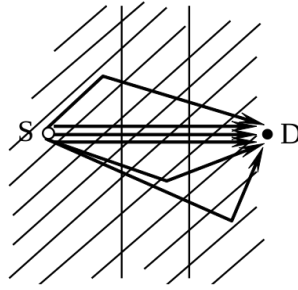


图 5: 累积因子测量模型

中为 γ 源 S 点，考察点（探测器）D 点，两点处于无限大介质中。

但在进行仿真模拟时，采用该模型会遇到以下困难，即由于考察点过小，能够到达考察点的粒子数过少，为减少蒙特卡罗模拟时的统计误差，需要模拟的粒子数过多，对仿真研究时间及计算机性能有较大影响。因此，需要对此测量模型进行改进，改进后的测量模型如图6所示。

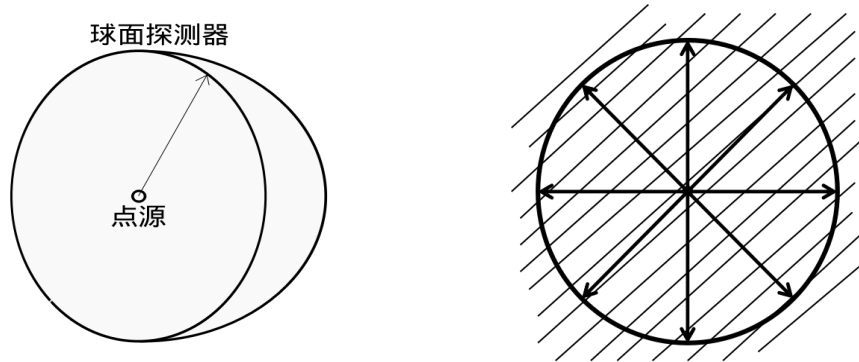


图 6: 改进后的测量模型

其中球壳为 γ 光子探测器，球壳中心为一各向同性 γ 点源。对于图5中的无限大介质情况，假使点源 S 为各项同性，则以长度 SD 为内径，球心在 S 点做一球壳 σ ， σ 上每一点元与图5中考察点 D 都是等效的，由于式4，累积因子计算的是所有到达探测器的 γ 光子数 N 与在屏蔽介质中未经碰撞直接到达探测器的粒子数 N_{nc} 的比值，因此球壳 σ 与考察点 D 的累积因子数据在理论上是相等的。

由于散射作用，累积因子 B 屏蔽厚度和探测距离有关，为能够更好的比较不同能量的 γ 光子在不同厚度下的累积因子，可以采用 γ 射线平均自由程来衡量厚度。平均自由程是指在有准直时， γ 射线强度降低到入射强度的 $1/e$ 时对应的吸收物质的厚度，根据式1， γ 射线的平均自由程可表示为式6，相应的， μd 则为平均自由程数。本项目将利用 GEANT4 仿真 0.5-8MeV 能量区间， μd 为 2, 4, 7, 10, 15 五种厚度下 Pb 屏蔽介质的累积因子。

$$\lambda = \frac{1}{\mu} \quad (6)$$

利用 GEANT4 进行仿真模拟，首先进行建模数据准备，查询美国国家标准与技术研究院 NIST 的数据得到质量衰减系数 μ/ρ ，利用 Pb 的密度求出线衰减系数，再根据式6求出平均自由程如表3，以依据平均自由程设置屏蔽厚度^[4]；编写各向同

表 3: 平均自由程 λ (mm)

能量 (MeV)	质量衰减系数 μ/ρ (cm ² /g)	线衰减系数 μ (mm ⁻¹)	平均自由程 λ (mm)
0.5	0.1614	0.183189	5.45884305
1	0.07102	0.0806077	12.40576272
2	0.04606	0.0522781	19.12846871
3	0.04234	0.0480559	20.8090994
4	0.04197	0.04763595	20.99254869
8	0.04675	0.05306125	18.84614479

性点源，各向同性即向空间中每个方向发射 γ 光子的概率相等，利用球坐标式7进行方向设置。

$$x = R \cos \theta \sin \phi, y = R \sin \theta \sin \phi, z = R \cos \phi \quad (7)$$

各项同性则到球面上每一点元的概率相等，球面上某处点元的面积可表示为

$$dS = R^2 \sin \phi d\theta d\phi = -R^2 d\theta d \cos \phi \quad (8)$$

因此，考虑取值范围，另 θ 取 $0-2\pi$ 之间的随机数， $\cos \phi$ 取 $0-1$ 之间随机数，不妨另 $R = 1$ ，再以式7作为发射方向的三个分量，即可实现点源的各项同性；进行建模，设置一无限大介质 Pb 作为屏蔽物质，以图形界面运行 1000000 个粒子，没

有粒子飞出边界作为无限大的判断依据，以屏蔽厚度为半径，各向同性点源为圆心作一球壳作为探测器如图7所示；

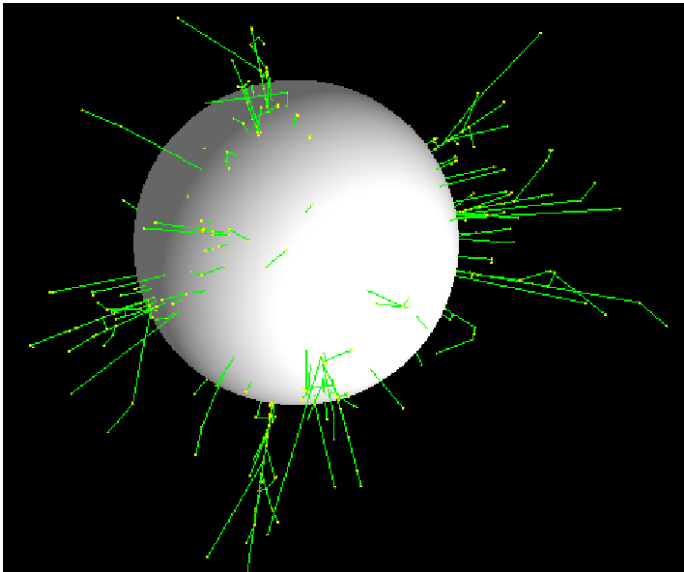


图 7: 累积因子测量模型

通过改写程序，判断到达探测器的 γ 光子的能量是否等于入射能量，记录所有到达探测器的 γ 光子数 N 及在屏蔽介质中未经碰撞直接到达探测器的粒子数 N_{nc} 用于计算累积因子；改变入射能量与屏蔽厚度等参数，重复测量，整理分析数据。所得数据如表3所示

表 4: 仿真数据

能量 (MeV)	平均自由程数 μd	总粒子数	未散射粒子数	总/未散射
0.5	2	2088	1518	1.375494071
1.0	2	2509	1420	1.766901408
2.0	2	2757	1441	1.913254684
3.0	2	2706	1380	1.960869565
4.0	2	2554	1357	1.882092852
8.0	2	2090	1311	1.594202899
0.5	4	371	232	1.599137931
1.0	4	493	218	2.26146789
2.0	4	599	212	2.825471698
3.0	4	580	205	2.829268293
4.0	4	558	193	2.89119171
8.0	4	409	166	2.463855422

与参考值和累积因子经验公式计算值做图如图8。可以看出，在 1MeV 及以下的低能区域仿真数据与参考值和经验公式符合良好，偏差在 5% 以内，但在能量较

高时出现一点偏差，在两倍平均自由程的屏蔽厚度下最大偏差约为 21%。

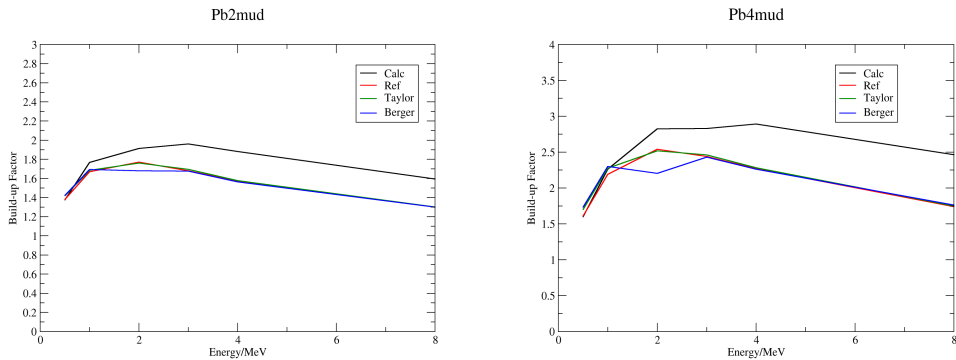


图 8: 无限大介质累积因子

2.4 无限大平板无限大面源理想模型的累积因子仿真计算

考虑一种理想模型如图9所示，左侧为无限大单向面源，中部为无限大平板形屏蔽介质，右侧为无限大探测器。对此理想模型，左侧面源上发出的 γ 光子，经过屏蔽物质后，全部都能到达右侧探测器，即将左侧面源上每一小面元视为一单向点源，则该点源发出 γ 光子，经过屏蔽物质后，无论是否发生散射都全部到达探测器。依据式4可知，此理想模型的累积因子与一单向点源的累积因子等效，若已知散射截面等信息，则存在理论计算的可能性，这也是选取该理论模型的原因。

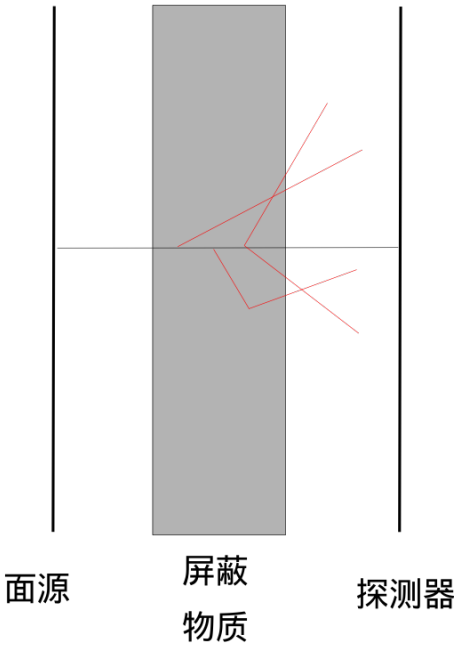


图 9: 无限大面源理想模型

目前已经进行了该模型的部分仿真模拟工作，其结果如图10所示。

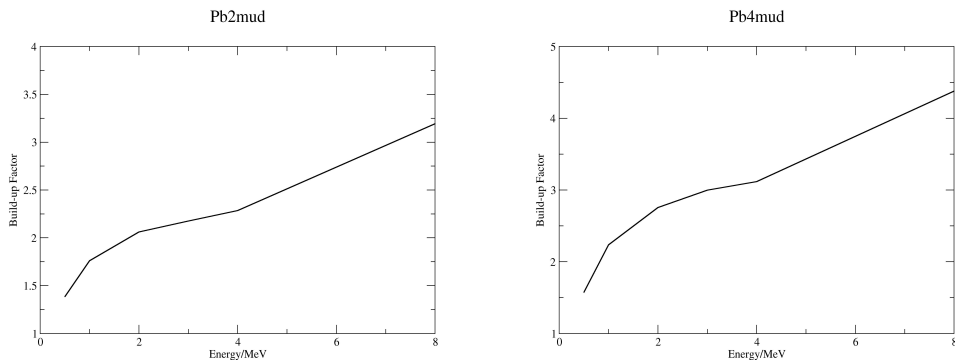


图 10: 无限大介质累积因子

3 后期拟完成的研究工作及进度安排

时间	进度安排
4 月	进一步修正无限大介质仿真结果 无限大面源理想模型的进一步仿真
5 月	仿真计算其他不同材料和厚度的累积因子 撰写毕业论文

4 存在的问题与困难

4.1 高能区仿真误差

能量在 4MeV 及以上时，无限大介质累积因子的仿真结果仍有一定偏差，目前已经排除了电子对效应，探测区域外其他干扰等情况，其中原因目前尚不明确，其结果有待进一步验证和修正。

4.2 理论计算累积因子

理想无限大面源无限大平板屏蔽的模型中，有希望从理论上对累积因子进行计算，但由于散射方向问题，由于大角度散射的存在，会有一些 γ 光子经散射后返回源一侧，并非全部发射粒子都能到达探测器，因此在理论计算上仍有一定困难。

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 月份完成无限大面源理想模型的进一步仿真、无限大介质仿真结果的进一步修正、其他不同材料和厚度的累积因子的仿真计算、撰写毕业论文等工作，论文可以按时完成。

6 参考文献

- [1] Hubbell J H, Seltzer S M. Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements Z= 1 to 92 and 48 ad-

ditional substances of dosimetric interest[R]. [S.l.]: National Inst. of Standards and Technology-PL, Gaithersburg, MD (United States). Ionizing Radiation Div., 1995.