

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	3
2.3	无限大介质累积因子的仿真计算	6
2.4	理想无限大面源处于无限大平板屏蔽情况理想模型累积因子仿真计算	10
3	后期拟完成的研究工作及进度安排	12
4	存在的问题与困难	12
4.1	高能区仿真误差	12
4.2	理论计算累积因子	12
5	论文按时完成的可能性	12
6	参考文献	12

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，对于无限大介质累积因子的模拟中对于入射能量在 0.5-2MeV 之间的伽马光子，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

核技术被越来越多地应用于生产生活的各个领域，发挥越来越重要的作用。在世界应对气候变化的严峻挑战和不断加剧的能源紧张问题下，核能也作为一种不可或缺的清洁能源迅猛发展，为未来的能源发展提供选择。核技术的发展于人们的生活密切相关，工业探伤、灭菌消毒、辐照加工、医学诊断与治疗、空间探测、成影技术等都极大地推动着人类社会的进步^[1]。核技术核工程的迅猛发展虽然促进了人类的进步，但人类和器件受到核辐射损伤的风险也大大提高^[2,3]。

随着科学的发展，电离辐射对人体的危害也逐渐为人们所熟知。电离辐射对人体的危害主要可分为直接作用和间接作用两类。直接作用是指当射线直接击中生物大分子，辐射能量直接沉积在受作用的分子上，引起其激发和电离，使生物大分子化学键断裂、降解或解聚，使某些酶分子活性降低或失活，从而导致细胞正常功能和代谢发生障碍或受到干扰；间接作用是指辐射引起机体中水分子的电离和激发，成簇产生的原发电离产物，对生物活性大分子造成损伤。根据机体受照射剂量的不同，会出现白内障、皮肤良性损伤等确定性效应和以癌症为主的随机性效应。由于电离辐射可以造成严重的辐射损伤，因此我们有必要研究其屏蔽防护，以便寻找出合适的屏蔽物质来保护人体^[4]。

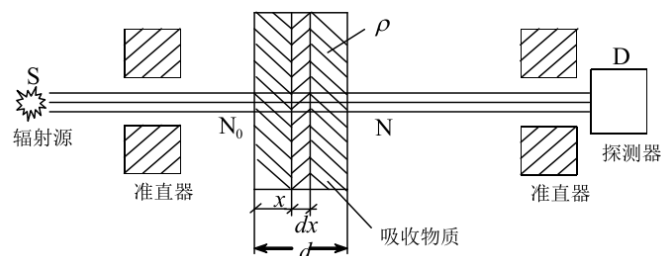


图 1: 获得单能窄束伽马射线示意图

对于单能窄束的伽马射线，即平行入射的单一能量的伽马射线，假设屏蔽物质的厚度为 d ，密度为 ρ ，穿过吸收物质前的强度为 N_0 ，穿过吸收物质后的强度为 N

其在物质中的衰减规律满足式(1)，其中系数 μ 为线衰减系数。单能窄束伽马射线可如图1方式获得，这里的窄束指的是物理意义上的窄束，即射线束可以有一定的宽度，但其中没有被散射的光子。

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

对于图2所示未经准直的宽束的入射伽马射线，在探测器和放射源与有准直的伽马射线示意图入射相同时，由于探测器接收到的伽马射线不仅包括未与物质相互作用的伽马射线，还有经过相互作用改变原来方向的散射伽马射线，因此探测器的计数强度比窄束情况高很多。

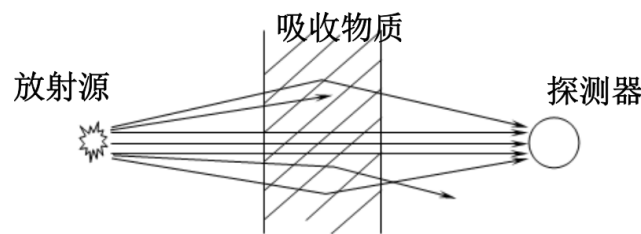


图 2: 未经准直的宽束伽马射线经过物质的减弱示意图

此时伽马射线的减弱规律可表示为公式(2)。

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

常见的累积因子计算模型有无限大介质模型和无限大平板模型^[5]。目前较为权威的累积因子数据库是来自美国标准 ANSI/ANS-6.4.3—1991^[6]。

现有的累积因子计算式为针对无限大介质模型的泰勒公式与伯杰公式。周文明等对泰勒公式和伯杰公式计算累积因子进行比较，在辐射屏蔽设计中， μd 在 1-20 之间时，利用伯杰公式计算 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 放射源的累积因子较泰勒公式小，所需屏蔽厚度较小^[7]。

本课题通过 GEANT4 模拟不同能量伽马辐射在经过不同厚度屏蔽物质后衰减过程，从而研究伽马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马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，分别设计实验测量计算和利用 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^[3]有条件，采用有准直的 ^{137}Cs 源作为伽马放射源，其衰变纲图如图3所示。可以看出，伽马源 ^{137}Cs 发出的伽马射线能量为 0.6617MeV。

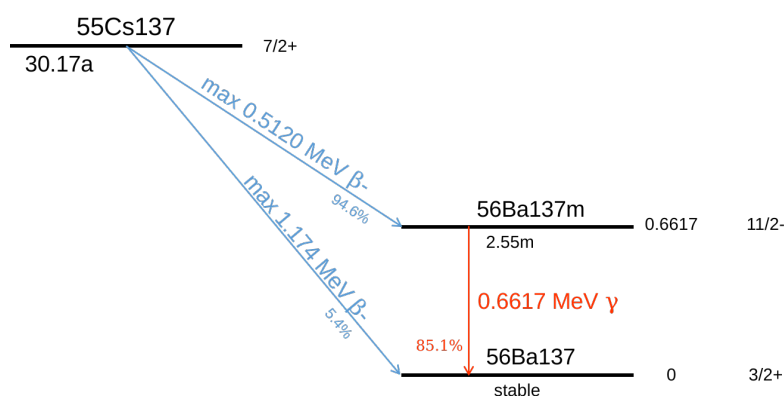


图 3: ^{137}Cs 衰变纲图

实验装置如图4所示，左侧为 ^{137}Cs 伽马源，中部为平板形 Pb 屏蔽介质，右侧为伽马光子探测器。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伽马光子数。

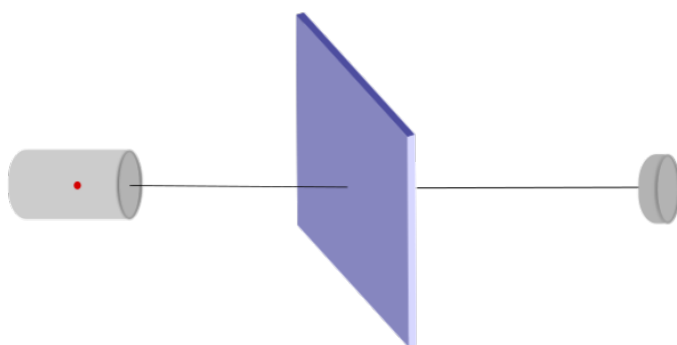


图 4: 伽马透射实验装置示意图^[3]

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伽马源 ^{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伽马光子数，如图5所示，分别进行仿真，源发射 1000000 个伽马光子，统计到达探测器的伽马光子数，其中绿色线条即为伽马光子径迹。

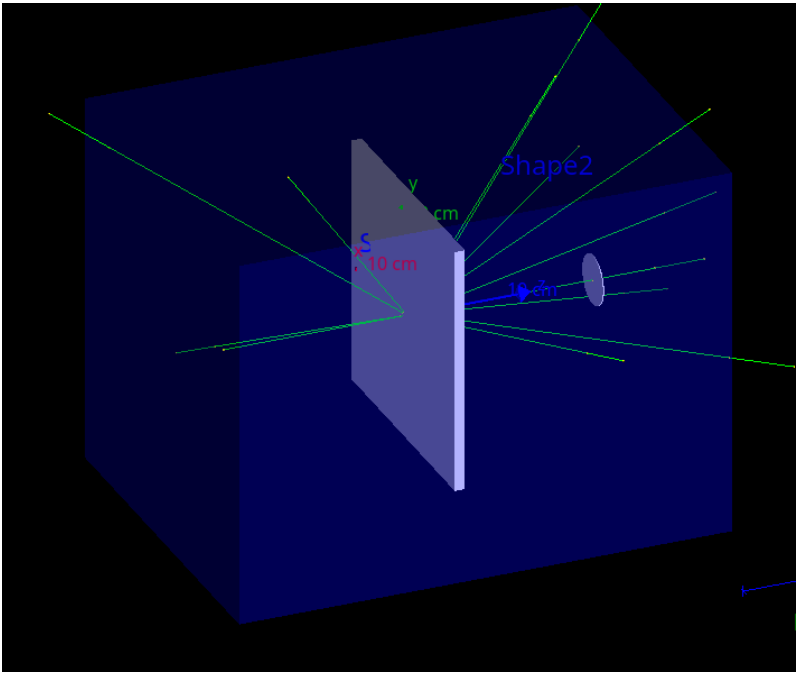


图 5: 伽马透射实验 GEANT4 仿真模拟示意图

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，伽马射线在物质中的衰减规律满足公式(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。

利用 Octave 对表1中数据按照公式(1)规律进行拟合，其结果如图6所示。图中横坐标为屏蔽厚度，单位是 mm，纵坐标是粒子数的自然对数值，红色坐标点实验测

得的数据点，黑色坐标点为 GEANT4 仿真模拟所得数据点，红色曲线是对实验数据按公式(1)拟合所得曲线，黑色曲线是对 GEANT4 仿真模拟数据按公式(1)拟合所得曲线。

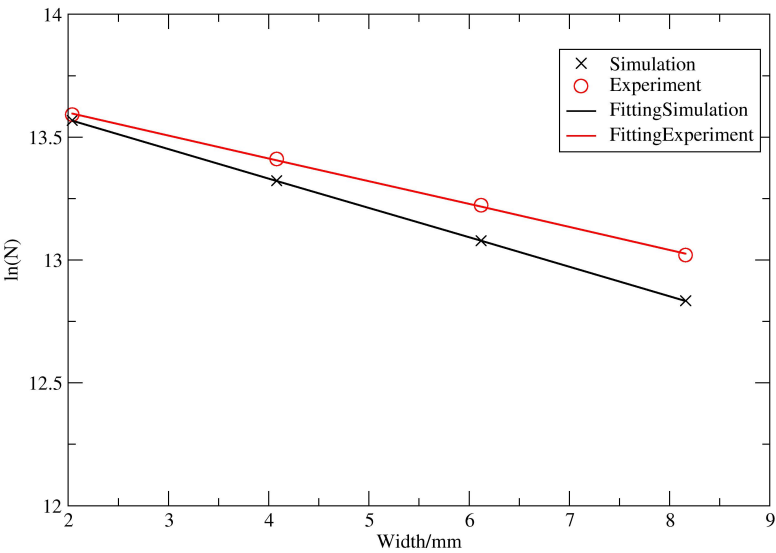


图 6: 实验与仿真数据拟合结果

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 的伽马光子在物质 Pb 中的质量衰减系数 $\mu/\rho = 0.1248\text{cm}^2/\text{g}$ ，0.8MeV 的伽马光子在物质 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 $\mu/\rho \approx 0.1137\text{cm}^2/\text{g}$ ^[8]。取 Pb 的密度为 $11.34\text{g}/\text{cm}^3$ 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	0.1199	0.1289
27.7%	6.9%	-

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%，仿真结果与参考值基本吻合，而实验结果与参考值相差较大。分析原因主要包括：实验用 ^{137}Cs 放射源的准直器屏蔽效果有限，出射的伽

马光子并非完全准直，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，受实验条件限制，上述因素会影响实验结果的准确性在实验条件有限的条件下，实验结果具有很大的局限性，此时采用仿真模拟计算进行研究就很有必要，在本项目所涉及的模型中 GEANT4 结果比实验结果更加准确，故后续研究主要采用 GEANT4 仿真模拟进行。



2.3 无限大介质累积因子的仿真计算

准直的伽马光子在屏蔽物质中的衰减规律可以表示为公式(1)，但对于未经准直的情况，由于探测器接收到的伽马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 ，此时伽马光子在屏蔽物质中的衰减规律可以表示为公式(2)。

由于累积因子是描述由于散射而对衰减的影响，依据公式(1)与公式(2)，累积因子 B 可表述为公式(3)。

$$B = \frac{N}{N_{nc}} \quad (3)$$

以粒子数衡量时，公式(3)中， N 表示所有到达探测器的伽马光子数， 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 ，则累积因子的公式(3)可以进一步表述为公式(4)。

$$B = \frac{N_s + N_{nc}}{N_{nc}} = 1 + \frac{N_s}{N_{nc}} \quad (4)$$

因此，依据公式(3)和公式(4)，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伽马光子数 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，利用公式(3)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7所示结构进行测量。图中为伽马源 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8所示。

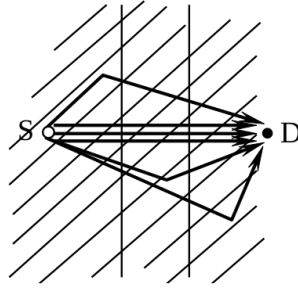


图 7: 累积因子测量模型

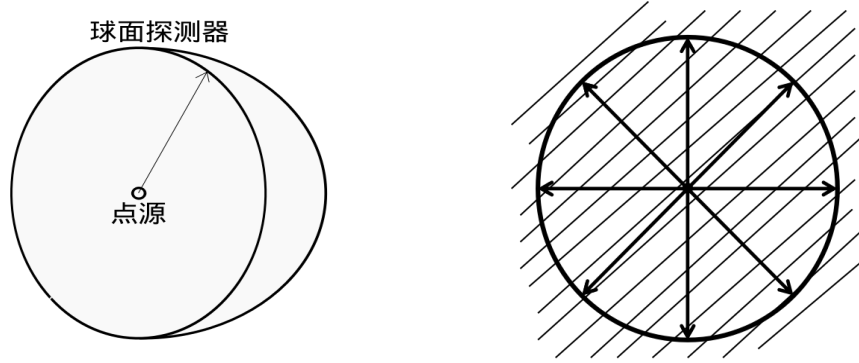


图 8: 改进后的测量模型

其中球壳为伽马光子探测器，球壳中心为一各向同性伽马点源。对于图7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7中考察点 D 都是等效的，由于公式(3)，累积因子计算的是所有到达探测器的伽马光子数 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伽马光子在不同厚度下的累积因子，可以采用伽马射线平均自由程来衡量厚度。平均自由程是指在有准直时，伽马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，根据公式(1)，伽马射线的平均自由程可表示为公式(5)，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。

$$\lambda = \frac{1}{\mu} \quad (5)$$

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，再根据公式(5)求出平均自由程如表3，以依据平均自由程设置屏蔽厚度^[8]；编写各

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

向同性点源，各向同性即向空间中每个方向发射伽马光子的概率相等，利用球座标公式(6)进行方向设置。

$$x = R \cos \theta \sin \phi, y = R \sin \theta \sin \phi, z = R \cos \phi \quad (6)$$

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

$$dS = R^2 \sin \phi d\theta d\phi = -R^2 d\theta d \cos \phi \quad (7)$$

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 $R = 1$ ，再以公式(6)作为发射方向的三个分量，即可实现点源的各向同性；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9所示；

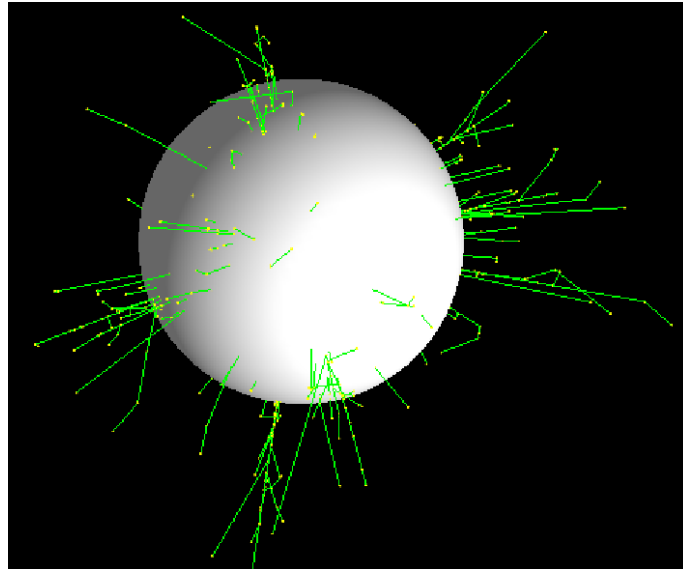


图 9: 累积因子测量模型

通过改写程序，判断到达探测器的粒子的能量是否等于入射能量，记录所有到

达探测器的伽马光子数 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。图10以两倍平均自由程的厚度为例，展示了对仿真计算的修正过程，图中横坐标为伽马辐射能量，纵坐标为累积因子。首次仿真结果如图10中绿色曲线所示，与表示参考值的红色曲线在能量为 8MeV 时相差约 700%。分析后认为，原因是统计粒子数时只对能量进行了判断，没有排除伽马光子在物质中由于光电效应等产生的电子等其他粒子的影响，另外，理想情况下，伽马光子到达探测器后应立即被吸收，但在此模型下会发生伽马光子穿过探测器后再次在屏蔽介质中经过散射到达探测器的情况，因此出现计数错误。

GEANT4 将粒子在物质中相互作用进行划分，发射一定数量的粒子，粒子及其次级粒子全部被吸收或飞出区域的过程称为 run，其中发射的某一个粒子在物质中发生相互作用及其产生的次级粒子的全部生命周期称为一个 event，某一粒子在物质中连续发生两次相互作用之间的过程称为 step。因此可修正计数程序，在 GEANT4 的 step 程序中声明数组 eventIDflag[] 用于记录到达探测器光子的 eventID，每当有粒子到达探测器时，首先判断其 eventID 是否在数组 eventIDflag[] 中，若在则不对其进行计数，若不在则计数并将此 eventID 加入数组 eventIDflag[]。修改后的仿真结果如图10中蓝色曲线，偏差有所减小，但仍有约 500% 的偏差。

进一步分析发现，偏差较大的区域主要为能量大于 4MeV 的较高能量区，此时伽马光子与物质相互作用时电子对效应显著，而由电子对效应产生的电子在物质中会继续发生相互作用产生伽马光子等次级粒子。理想情况下，发生电子对效应的光子已经转化为电子，不应在计数统计，但若不排除电子对效应的影响，会由于伽马光子发生电子对相应，电子在物质中由于韧致辐射等又产生伽马光子，如此循环，会在较高能量区间产生较大的计数误差，因此需要排除电子对效应的影响。继续修正 step 计数程序，对每一 step 发生相互作用的物理机制进行判断，若发生电子对效应，则不再对该 event 的后续粒子进行计数。修改后的仿真结果如图10中黑色曲线，偏差大幅减小，累积因子随能量增加的变化趋势与参考值相同。

按照最后修正的仿真计算方法，分别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4所示。

与参考值和累积因子经验公式计算值做图如图11。图中横坐标为伽马辐射能量，纵坐标为累积因子，黑色曲线表示仿真计算累积因子的结果，黑色曲线表示累积因子的参考值，绿色和蓝色曲线分别为泰勒公式和伯杰公式两个经验公式计算累积因子的结果，左图为厚度是两倍平均自由程的情况，右图是厚度为四倍平均自由程的情况。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

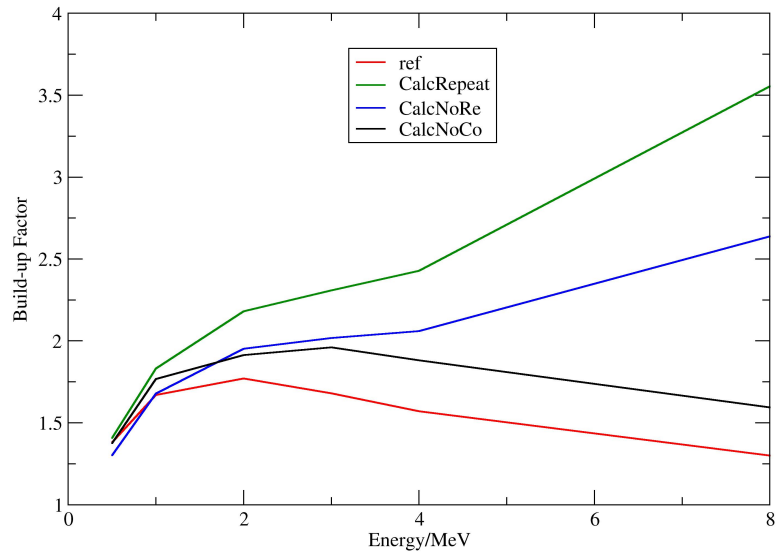


图 10: 仿真模拟结果的修正

由程的屏蔽厚度下最大偏差约为 21%。

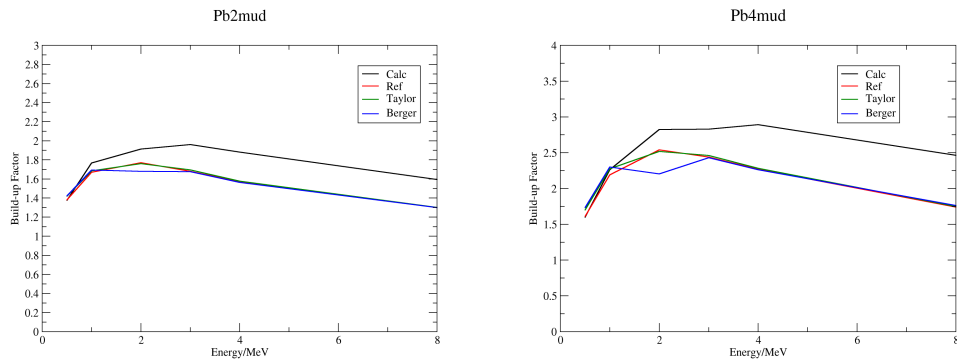


图 11: 无限大介质累积因子



2.4 理想无限大面源处于无限大平板屏蔽情况理想模型累积因子仿真计算

考虑一种理想模型如图12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，左侧面源上发出的伽马光子，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，则该点源发出伽马光子，经过屏蔽物质后，无论是否发生散射都全部到

表 4: 无限大介质累积因子仿真数据

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

达探测器。依据公式(3)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。

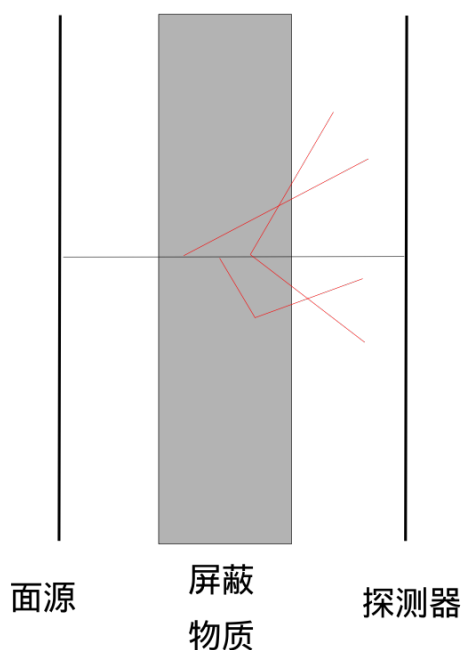


图 12: 理想无限大面源处于无限大平板屏蔽情况理想模型

目前已经进行了该模型的部分仿真模拟工作，其结果如图13所示。

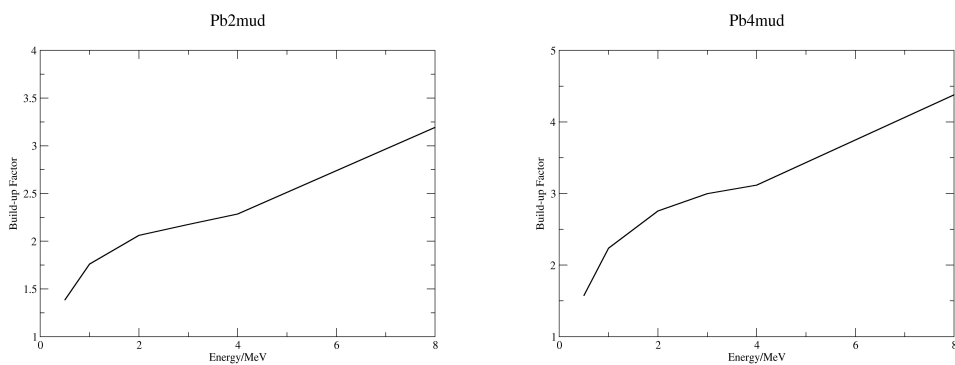


图 13: 无限大介质累积因子

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

3 后期拟完成的研究工作及进度安排

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

理想无限大面源处于无限大平板屏蔽情况的模型, 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, 会有一些伽马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, 我们将会在 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] 杨福家, 王炎森, 陆福全. 原子核物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2002: 194-219.
- [2] Slayman C. JEDEC standards on measurement and reporting of alpha particle and terrestrial cosmic ray induced soft errors[G] // Soft Errors in Modern Electronic Systems.

- [S.l.]: Springer, 2011: 55-76.
- [3] Auden E C, Quinn H M, Wender S A, et al. Thermal Neutron-Induced Single-Event Upsets in Microcontrollers Containing Boron-10[J/OL]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2020, 67(1): 29-37. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2019.2951996>.
 - [4] 霍雷, 刘剑利, 马永和. 辐射剂量与防护[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 64-102.
 - [5] Luis A, Durani, Charlotta E, et al. Overview Of Update To Ansi/ans-6.4.3-1991 Gamma-ray Buildup Factors[J]. Transactions of the American Nuclear Society, 2008, 99: p.615-617.
 - [6] Trubey D, Eisenhauer C, Foderaro A, et al. Gamma-Ray Attenuation Coefficients and Buildup Factors for Engineering Materials[J], 1991.
 - [7] 周文明, 战景明, 郝杰. 两种不同经验公式法计算累积因子的比较[J]. 中国辐射卫生, 2017(4): 424-425.
 - [8] 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 additional substances of dosimetric interest[R]. [S.l.]: National Inst. of Standards and Technology-PL, Gaithersburg, MD (United States). Ionizing Radiation Div., 1995.