

中图分类号:

UDC:

学校代码: 10055

密级: 公开

南 开 大 学
硕 士 学 位 论 文

基于 Geant4 的加速器法制备医用核素锝-99m 的模拟及优化

Simulation and optimization of producing medical radioactive
nuclide technetium-99m via electron accelerator based on Geant4

论文作者	陈康	指导教师	赵明刚 教授
申请学位	硕士	培养单位	南开大学
学科专业	粒子物理与原子核物理	研究方向	高能物理实验
答辩委员会主席	缪炎刚 教授	评阅人	匿名评阅

南开大学研究生院

二〇二五年三月

南开大学学位论文使用授权书

本人完全了解《南开大学关于研究生学位论文收藏和利用管理办法》关于南开大学(简称“学校”)研究生学位论文收藏和利用的管理规定,同意向南开大学提交本人的学位论文电子版及相应的纸质本。

本人了解南开大学拥有在《中华人民共和国著作权法》规定范围内的学位论文使用权,同意在以下几方面向学校授权。即:

1. 学校将学位论文编入《南开大学博硕士学位论文全文数据库》,并作为资料在学校图书馆等场所提供阅览,在校园网上提供论文目录检索、文摘及前 16 页的浏览等信息服务;
2. 学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存学位论文;学校根据规定向教育部指定的收藏和存档单位提交学位论文;
3. 非公开学位论文在解密后的使用权同公开论文。

本人承诺:本人的学位论文是在南开大学学习期间创作完成的作品,并已通过论文答辩;提交的学位论文电子版与纸质本论文的内容一致,如因不同造成不良后果由本人自负。

本人签署本授权书一份(此授权书为论文中一页),交图书馆留存。

学位论文作者暨授权人(亲笔)签字: _____

20 年 月 日

南开大学研究生学位论文作者信息

论 文 题 目	基于 Geant4 的加速器法制备医用核素 ^{99m} Tc 的模拟及优化				
姓 名	陈康	学号	2120220235	答辩日期	
论 文 类 别	博士 ☐ 学历硕士 ☒ 专业学位硕士 ☐ 同等学力硕士 ☐ 划 ☒ 选择				
学院(单位)	物理科学学院		学科/专业(专业学位) 名称		粒子物理与原子核物理
联 系 电 话	15826814690		电子邮箱	chenk@mail.nankai.edu.cn	
通讯地址(邮编): 300071					
非公开论文编号			备注		

注:本授权书适用我校授予的所有博士、硕士的学位论文。如已批准为非公开学位论文,须向图书馆提供批准通过的《南开大学研究生申请非公开学位论文审批表》复印件和“非公开学位论文标注说明”页原件。

南开大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下进行研究工作所取得的研究成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律 responsibility 由本人承担。

学位论文作者签名：_____ 年 月 日

非公开学位论文标注说明

(本页表中填写内容须打印)

根据南开大学有关规定，非公开学位论文须经指导教师同意、作者本人申请和相关部门批准方能标注。未经批准的均为公开学位论文，公开学位论文本说明为空白。

论文题目			
申请密级	☐ 限制 (≤2 年) ☐ 秘密 (≤10 年) ☐ 机密 (≤20 年)		
保密期限	20 年 月 日至 20 年 月 日		
审批表编号		批准日期	20 年 月 日

南开大学学位评定委员会办公室盖章 (有效)

注：限制 ★2 年 (可少于 2 年); 秘密 ★10 年 (可少于 10 年); 机密 ★20 年 (可少于 20 年)

摘要

钨-99m 是核医学诊断领域使用最为广泛的核素，约占世界全部核医学应用的 80 % 以上。现在的主流工业化生产方式是依靠核反应堆裂变产生钼-99，钼-99 再衰变为钨-99m。目前我国的钨-99m 制备原料钼-99 完全依靠进口，一旦国际市场出现供给紧张的局面，供给数量和供给周期不能得到充分保障，将会对我国医疗保障体系造成极大冲击。所以电子加速器辐照法成为一种新的有未来市场的技术路线。

本研究就是利用 Geant4 对电子加速器辐照法生产钨-99m 这一过程进行模拟及优化。这一路线是使电子加速器辐照重金属转换靶，再让产生的韧致辐射光子轰击钼-100 靶，发生光核反应生成钼-99，钼-99 衰变为钨-99m 后利用化学方法分离钼钨，提取钨药。本项目只涉及前半部分，对生成钼-99 的整个物理过程进行蒙特卡洛模拟。

最开始在 Geant4 中进行验证部分的模拟，保证设置完物理过程后的模拟结果能很好地符合理论，结果是 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应和韧致辐射效应都能很好符合。而后构建完整的模拟系统，用电子轰击钼靶，钼靶放置在钨靶后面。电子的能量范围为 8.2 ~ 50 MeV，每隔 0.1 MeV 设置一个能量点，用以优化电子加速器能量。首先可以得到韧致辐射光子能谱，一定能量的电子加速器可以得到不超过该能量的韧致辐射光子，且大部分都集中在低能区。之后可以得到钼-99 产额随电子加速器能量变化的曲线，不过该曲线并不能用来评判电子加速器能量的适宜程度，因为加速器能量越高，产生的可以发生光核反应的光子就越多，产额也必定越高，但是单位功率的产额提升会受到限制。所有定义一个相对产额，确定最优能量范围在 20 ~ 30 MeV 之间，为该制备方案的设计提供参考。

此外，本研究还进行了副产物和辐射防护的模拟。通过模拟结果，得知电子加速器的能量如果过高，会使副产物钼-98 和钼-97 大幅度增加，这是需要避免的。而且这个方案在进行中会有 MeV 量级的中子辐射，需要相应的隔离防护措施。

关键词： 钨-99m；钼-99；光核反应；蒙特卡洛模拟

Abstract

Technetium-99m (Tc-99m) is the most widely used radionuclide in the field of nuclear medicine diagnostics, which accounts for over 80% of all nuclear medicine applications worldwide. Currently, the mainstream industrial production method relies on the fission of molybdenum-99 (Mo-99) in nuclear reactors, which then decays into Tc-99m. In China, the production of Tc-99m is entirely dependent on imported Mo-99. Any supply disruptions in the international market could severely impact China's healthcare system. Therefore, the electron accelerator irradiation method has emerged as a promising alternative technology.

This article uses Geant4 to simulate and optimize the production of Tc-99m via the electron accelerator. This approach involves irradiating a heavy metal conversion target with an electron accelerator, generating bremsstrahlung photons that irradiate a Mo-100 target, inducing photonuclear reaction to produce Mo-99. Mo-99 then decays into Tc-99m, which is chemically separated and extracted for medical use. This project focuses on the first part of the process, using Monte Carlo simulations to model the physical production of Mo-99.

Initially, a verification simulation was conducted in Geant4 to ensure that the simulated results accords with theoretical predictions. The results confirmed that both $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ reaction and the bremsstrahlung effect fit well. Subsequently, a complete simulation system was constructed, where electrons were used to irradiate a tantalum target, with a molybdenum target placed behind it. The electron energy range was set from 8.2 to 50 MeV, with an energy point for each 0.1 MeV to optimize the electron accelerator energy. Firstly, the bremsstrahlung photon spectrum was obtained, showing that photons with energies up to the incident electron energy were produced, with most photons concentrated in the low-energy region. The yield of Mo-99 as a function of electron accelerator energy was also derived. However, this value could not determine the optimal energy, as higher energies naturally increased the yield of photons capable of inducing the photonuclear reaction, but the yield per unit power was limited. There-

fore, a relative yield was defined, identifying the optimal energy range to be between 20 and 30 MeV, providing a reference for the design of this production method.

Additionally, simulations of byproducts and radiation protection were conducted. The results indicated that excessively high electron accelerator energies would significantly increase the production of unwanted byproducts, Mo-98 and Mo-97, which should be avoided. Furthermore, the process generates MeV-level neutron radiation, which needs appropriate shielding and isolation measures.

Key Words: technetium-99m; molybdenum-99; photonuclear reaction; Monte Carlo simulation

目录

摘要	I
Abstract	II
第一章 绪论	1
第一节 研究背景	1
第二节 铈-99m 的制备方法	2
1.2.1 高/低浓缩铀裂变产物提取制备铈-99	3
1.2.2 中子辐照法制备铈-99	4
1.2.3 电子加速器辐照法（非铀基法）制备铈-99	4
第三节 研究目的及动机	5
第四节 论文的结构	6
第二章 电子加速器辐照法制备铈-99m	7
第一节 电子加速器辐照法制备铈-99m 介绍	7
第二节 电子在靶中的物理过程	9
2.2.1 激发或电离	9
2.2.2 多次散射	9
2.2.3 韧致辐射	10
第三节 光子在靶中的物理过程	12
2.3.1 光电效应	12
2.3.2 康普顿效应	13
2.3.3 对产生	14
2.3.4 光核反应	15
第四节 生成铈-99 的后续过程	17
第三章 电子加速器法制备铈-99m 的 Geant4 模拟	18
第一节 Geant 模拟	18
3.1.1 Geant4 的规则	19
3.1.2 设置几何模型	20
3.1.3 设置物理过程	21
3.1.4 设置粒子源	21

3.1.5	数据处理	22
第二节	蒙特卡洛模拟的验证	22
3.2.1	$^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应验证	22
3.2.2	韧致辐射光子验证	24
3.2.3	生成钼-99 后续过程的验证	26
第三节	靶材设计	28
3.3.1	转换靶设计	28
3.3.2	目标靶设计	30
第四节	电子加速器参数设置	31
第五节	使用 Geant4 模拟完整流程	33
3.5.1	对完整系统的测试	33
3.5.2	优化电子加速器能量的模拟	37
3.5.3	研究副产物的模拟	40
3.5.4	辐射防护的模拟	41
第四章	模拟结果和讨论	42
第一节	优化电子加速器能量的模拟结果	42
第二节	研究副产物的模拟结果	45
第三节	辐射防护的模拟结果	46
第五章	总结与展望	48
第一节	结论	48
第二节	进一步工作的方向	49
参考文献		50
致谢		52
个人简历		53

第一章 绪论

第一节 研究背景

医用锝-99m (^{99m}Tc) 是核医学诊断领域中使用最为广泛的放射性同位素, 约占世界医用放射性核素的 80% 以上。全球每年使用 ^{99m}Tc 进行临床单光子发射计算机断层显像 (Single-Photon Emission Computed Tomography, SPECT) 诊断达 3000-4000 万人次。据统计, 截至 2015 年底年我国共有 SPECT 设备 774 台, 年诊断次数已达 2106283, 共设有核素治疗专用病床 1882 张^[1]。

^{99m}Tc 是一种优良的单光子显像核素, 具有较为适宜的半衰期 ($t_{1/2}=6.02$ h), 可以满足生产, 运输, 合成, 成像的需求。 ^{99m}Tc 为纯 γ 光子发射, 且能量适中 (140 keV), 几乎能对人体所有重要脏器进行显像, 这些特性使得 ^{99m}Tc 在临床成像应用广泛。 ^{99m}Tc 标记的放射性药物其用量约占 SPECT 显像药物的 70% 以上。2017 年全球每周需求 ^{99}Mo 约 9000 居里 (Ci)^[2]。

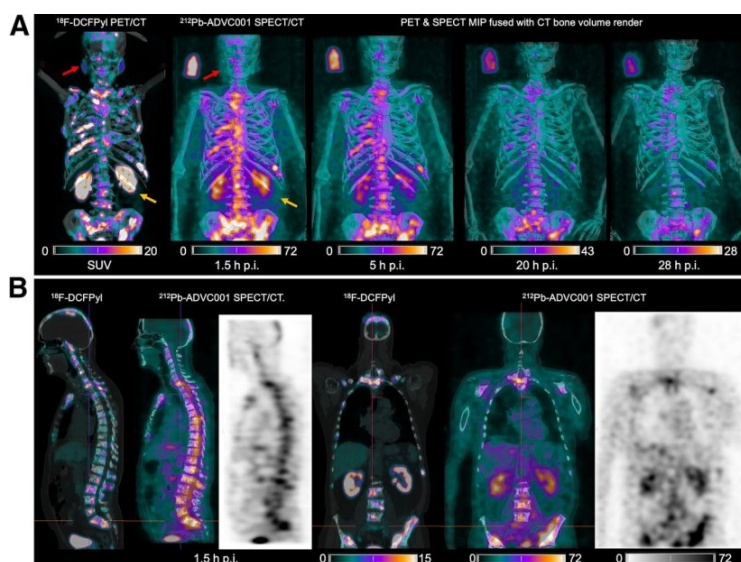


图 1.1 SEPCT 成像^[3]

目前, 我国的 ^{99m}Tc 核药原料 100% 依靠进口, 来源于加拿大、荷兰、比利时、南非、俄罗斯、澳大利亚等国的反应堆。一方面随着风云诡谲的国际政治

形势的不断变化，未来一些国家可能会对我国限制供应医用核素；另一方面这些国家的反应堆有很多会在 2030 年前关停退役，这将会造成全球性医用核素供应的严重短缺^[4]。目前放射性同位素国际供应情况见表1.1。由于核药半衰期的限制，无法提前生产储备，因此如果某类核药的进口遭到封锁，所有基于该类核药的核医学检测或治疗会完全停摆，可以预计，这将对我国的医疗体系造成巨大冲击，人民的身体健康也得不到现代社会应有的保障。

表 1.1 放射性同位素国际供应情况^[5]

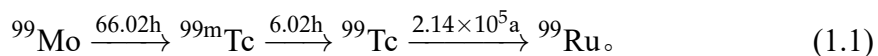
所属国家	反应堆名称	功率 (MW)	临界时间	退役时间	所生成同位素
澳大利亚	OPAL	20	2006 年	2057 年	⁹⁹ Mo, ¹³¹ I
比利时	BR-2	100	1961 年	2026 年	⁹⁹ Mo, ¹⁷⁷ Lu
荷兰	HFR	45	1961 年	2024 年	⁹⁹ Mo, ⁸⁹ Sr
捷克	LVR-15	10	1957 年	2028 年	⁹⁹ Mo, ¹⁷⁷ Lu
波兰	MARIA	20	1974 年	2030 年	⁹⁹ Mo, ¹³¹ I, ¹⁷⁷ Lu
南非	SAFARI-1	20	1965 年	2030 年	⁹⁹ Mo, ¹³¹ I
德国	FRM-II	20	2004 年	2054 年	⁹⁹ Mo
俄罗斯	WWR-TS	15	1964 年	2025 年	⁹⁹ Mo, ¹³¹ I, ¹²⁵ I

医用核药事实上已经成为类似高端芯片领域的“卡脖子”产业。2021 年由国家国防科工局、科技部、公安部、生环部、交通部、卫健委、医保局、药监局等八部委联合发布的《医用同位素中长期发展规划（2021-2035 年）》，明确提出要尽快解决我国医用同位素短缺问题，并把 ^{99m}Tc 放在我国医用同位素需求的第一位。

第二节 钼-99m 的制备方法

^{99m}Tc 通常是由它的母体核素钼-99 (⁹⁹Mo) 衰变得到的，并且我们知道，⁹⁹Mo 的半衰期为 66.02 h，远长于 ^{99m}Tc 的半衰期 (6.02 h)。在由各种途径得到 ⁹⁹Mo 后，让其通过钼钽发生器的淋洗，产生所需的放射性核素 ^{99m}Tc。^{99m}Tc 的成像原理就是发射单能光子转化为基态 ⁹⁹Tc，⁹⁹Tc 会发生 β 衰变生成 ⁹⁹Ru，但 ⁹⁹Tc 的半衰期非常长，达到了 2.14×10^5 年。得到该核药整个过程的有效核衰变反应

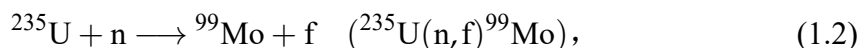
方程式可以表示为



由上述反应式可以得到，想要制备 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ，首要任务就是制备 ^{99}Mo ，再由其自发衰变得到目标核素。目前，共有三种可行的工业化路线来制备 ^{99}Mo ：第一种是基于浓缩铀裂变产物提取制备；二是利用中子流辐照钼-98 (^{98}Mo) 制备；第三种是电子加速器辐照目标核素靶制备。

1.2.1 高/低浓缩铀裂变产物提取制备钼-99

在人类如今生活的地球上，天然铀主要以铀-238 (^{238}U) 的形式存在，其丰度为 99.3%，且不易发生裂变反应，容易裂变的铀-235 (^{235}U) 丰度只有 0.7%。为了充分利用铀元素制造武器和开发核能，通常将 ^{235}U 浓缩，提高其含量。而浓缩铀又分为两种——高浓缩铀 (HEU) 和低浓缩铀 (LEU)，顾名思义，高浓缩铀的 ^{235}U 丰度更高，大于 80%，低浓缩铀的 ^{235}U 丰度只有大约 20%。利用中子流辐照浓缩铀，可以诱发其发生裂变反应，得到数百种裂变产物，其中一种就是 ^{99}Mo ，约占 6%。得到 ^{99}Mo 的反应方程式如下：



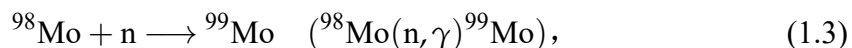
其中 ^{235}U 是裂变核燃料铀-235，n 代表中子， ^{99}Mo 是目标产物钼-99，f 则是除钼-99 之外的其他裂变产物。

此类方法由于产额高，早已成为国际上工业化生产的主流方法，一座小型核反应堆的产能几乎可以满足我国全国需求。不过，此路线也有缺点，HEU 的丰度已经达到了核武器的量级，是敏感材料，而 LEU 相对来说生产效率较低，并且，在生产过程中还伴随着核废料的产生。此外，还有一些生产过程之外的问题：首先就是货源稳定性问题，核反应堆不可能从开始运行到退役期间从不进行检修维护，一旦停机，会造成核药断供；其次，放射性核药的运输也是一大问题，不管是放射性风险还是旅途中的有效物质损失，都一定程度影响了核药的调配；最后，核反应堆对一个区域的覆盖有限，在辐射范围内可能会优先供给大城市，技术成熟的小城市可能难以得到核药支援。

综上所述，产量高的反应堆裂变制造法虽然成为目前商业化生产 ^{99}Mo 的主流办法，其局限性对其未来发展仍有抑制作用。所以，人们开始探寻其他非浓缩铀裂变法。

1.2.2 中子辐照法制备钼-99

中子辐照法制备是让 ^{98}Mo 俘获一个中子生成 ^{99}Mo ，核反应方程式如下：



式中 ^{98}Mo 和 ^{99}Mo 分别是原料钼-98 和产物钼-99， n 代表中子。

其中， ^{98}Mo 可以从天然钼中分离提纯得到，相比高/低浓缩铀裂变法，中子辐照法的主体过程不在反应堆中进行，反应堆的长期停机检测、维修和加料并不会影响 ^{99}Mo 的制造，只需要保证被辐照物品在中子辐照通路上；而且反应结束后的分离提纯也不涉及到危险的裂变产物，只需要进行钼锆分离。

不过，中子辐照法的劣势也非常明显，天然钼中核子数最高的同位素为 ^{100}Mo ，最低的是 ^{92}Mo ，而该反应的母核素是 ^{98}Mo ，取中间值，技术上分离相对来说较复杂。并且此核反应需要热中子，想要高通量的热中子流，可能仍需要依靠核反应堆。另一方面，该核反应截面相对较小，这种技术即使满足了工业供应，也很难实现全面供给。

1.2.3 电子加速器辐照法（非铀基法）制备钼-99

上述提到，高/低浓缩铀裂变产物提取制备钼-99 需要依靠核反应堆；对于中子辐照法制备钼-99，以现有的技术，能够稳定持续提供高通量中子的装备只有核反应堆，因此这个方法依然需要铀基产业链。而电子加速器辐照法可以实现脱离铀产业链生产 ^{99}Mo ，这一技术路线通过加速器产生的高能电子轰击靶核产生目标核素，因此可以称为非铀基法。在这一流程中，首先让高能电子轰击重金属靶材，发生韧致辐射产生适宜能量的光子，光子与 ^{100}Mo 发生光核反应，生成所需核素 ^{99}Mo ，核反应方程式如下：



式中 ^{100}Mo 和 ^{99}Mo 分别是作为原料的钼-100 和最终产物钼-99， γ 表示光子， n 是原子核放出的中子。

这一技术路线全程没有铀系、钍系、镭系等重放射性元素参与，相应的也不会有铀基核反应所产生的核废料。并且，诱导发生该反应仅需要一台电子加速器，附带一块重金属转换靶，不需要铀基法所要求的高通量粒子束。从表1.2可以看出，非铀基路线是未来核药制造技术发展的必然方向。

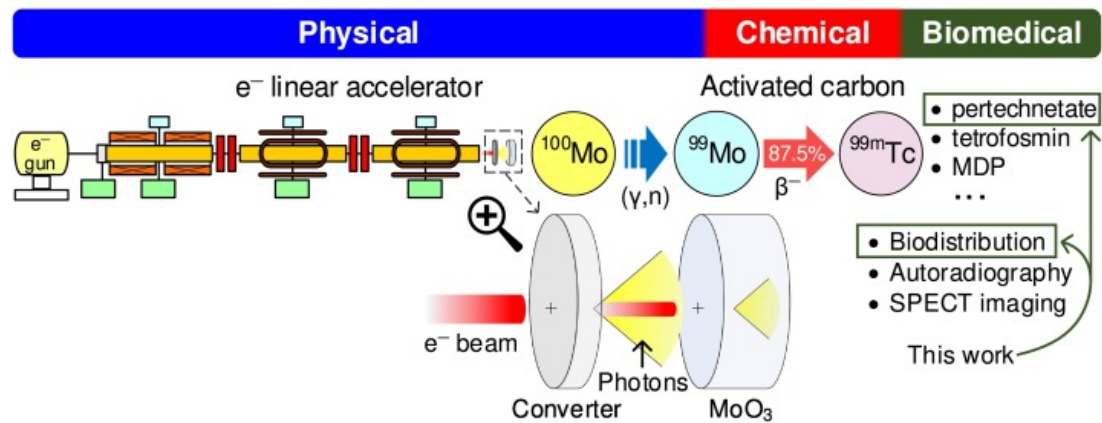


图 1.2 基于电子加速器的 ⁹⁹Mo 生产系统示意图^[6]

此外，加速器法还具有成本可控的优势。利用反应堆制备放射性核素，目标核素的需求多寡并不会影响运行成本，因为反应堆必须达到临界输出工况。而电子加速器法则不同，目前市面上流通的已经工业化的电子加速器大多数都是可调节的，自行决定输出功率。在其他参数不变的前提下，可以通过调整加速器的输出功率实现产额的控制。并且，在需求相对较少的偏远地区，完全可以建设投资更小运行成本更低的小功率电子加速器制备系统来满足放射性核素的柔性供给需求。

表 1.2 铀基与非铀基制备 ⁹⁹Mo 技术比较^[7]

	HEU 制备 ⁹⁹ Mo	LEU 制备 ⁹⁹ Mo	电子加速器法 ²
涉及 ²³⁸ U、 ²³⁵ U、 ²³⁴ U	是	是	否
涉及 ²³⁹ Pu	是	是	否
产生裂变产物	是	是	否
产生 α 放射性废物	是	是	否
产生长寿命核素 ¹	是	是	是

¹ 长寿命核素包括 ^{99m}Tc

² 处理核废料的成本 < 1 ¢/mCi ^{99m}Tc

第三节 研究目的及动机

如上所述，现有的 ⁹⁹Mo 制备方法主要分为两大类：其中之一是包括反应堆裂变和中子辐照的铀基生产路线，另一种则是可以脱离核反应堆的加速器辐照

法。其中，反应堆裂变是目前世界范围内主流的大规模商业化生产方法，其优点是产量高，缺点是反应堆造价高昂、不易维护、核裂变废料较多等。而且最近十几年，因安全问题或技术问题发生了一系列停堆事件，导致医用核素尤其是 ^{99}Mo 的供应经常出现短缺。加速器辐照生产的优点是造价低、无裂变核废料、运营简单等，缺点是生产效率低。另外，需要特别指出的是，加速器辐照制备 ^{99}Mo 的路线并不依赖铀元素，这对贫铀的我国而言尤为重要。

加速器制备 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的方案具有非常诱人的应用前景，近些年来，美欧等国都在大力研究该方案，用以作为越来越受到各种限制的反应堆制备方法的补充。加速器方案产量低的缺点是可以技术手段改进的，但是，加速器方案的优点是反应堆方案所不具备的。

本项目将基于 Geant4 蒙特卡洛模拟方法，研究非铀基法制备医用放射性同位素 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的关键参数与产额等要素之间的关联曲线。这些曲线将作为基于电子加速器的非铀基 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 制备技术的设计参考。

第四节 论文的结构

本论文总共有五章内容，具体结构如下：

第一章：介绍当今世界范围内医用核素钼-99m 的主流工业化生产方式和有未来市场的电子加速器辐照法。

第二章：具体介绍电子加速器法制备钼-99m，讲述原理。

第三章：详细阐述利用 Geant4 模拟电子加速器法制备钼-99m 的整个过程，包括验证，优化电子加速器能量，副产物和辐射防护的模拟几个部分。

第四章：模拟结果和讨论。

第五章：总结和展望。

第二章 电子加速器辐照法制备钨-99m

第一节 电子加速器辐照法制备钨-99m 介绍

在上一章我们简单提到过电子加速器法制备钨-99m 的整个流程，这一节将对其作具体介绍。这一方法也被称为非铀基法，因为它是利用加速器产生的高能粒子流轰击特定核素产生目标核素，不与核工业铀产业链直接关联。这个方法的原理是电子加速器产生高能电子流，再通过高能电子流轰击重金属靶材发生韧致辐射产生光子，光子与 ^{100}Mo （天然钼中 ^{100}Mo 丰度为 9.63%）发生光核反应生成 ^{99}Mo ，该核反应的光子临界阈值能量为 8.292 MeV。

表 2.1 钼同位素含量^[8]

钼同位素	自然含量，%	初始溶液中的含量，%
92	14.84	14.80630 ± 0.14290
94	9.25	9.31356 ± 0.19903
95	15.92	15.90653 ± 0.19113
96	16.68	16.62644 ± 0.19945
97	9.55	9.64547 ± 0.17835
98	24.13	24.01053 ± 0.44047
100	9.63	9.69117 ± 0.09780

辐照后的 ^{100}Mo 经光核反应部分成为 ^{99}Mo ， ^{99}Mo 经 β 衰变成为 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 。在分离提取有用核素时，需要先对辐照后的钼靶进行溶解处理，然后通过放射化学分离得到 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 并制备成高锝酸钠。

美国北极星公司是美国重要的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 供应商，有着多年核药制备运营经验。北极星公司原计划投资在全美布设 16 台直线电子加速器，考虑到检修维护等，计划每天保证至少 12 台工作，4 台冗余，这样可以保证每天 2000 Ci ^{99}Mo 的供应。后续变更建设计划，该公司 2019 年公布信息，以每台加速器 600 万欧元的价格，从位于比利时 IBA 公司购置 8 台 Rhodotron TT300-HE 型电子加速器，计

算器能量值为 40 MeV，最大功率 125 kW。北极星公司计划在每个钼药供应点设置两台电子加速器，在全美不同地区设置 4 个供应点，通过配送网络解决全美供应。

中国原子能科学研究院先后开展利用 LEU U-Al 弥散体靶核 HEU 靶提取裂变 ^{99}Mo 的工艺研究，建立了单次生产 100 ~ 200 Ci 裂变 ^{99}Mo 生产工艺，因种种原因现已停止运行。

加速器法替代反应堆供应核药，在未来大医院实现“前店后厂”或者在某一地区实现区域化供应是社会对核药产业的必然要求，也是其技术发展的必然趋势。核药是短寿命但具有一定放射危险的医用物品，只有实现多节点链式柔性供给的产业结构形式，才能真正在我国广大地区实现核医学的有效推广。

电子加速器法制备核药不依靠反应堆，也不涉及任何军用核素，没有外交政治风险，加速器及相关设备报废后，除辐照靶材和热室的少量物品外，几乎没有辐照残留物品产生，整体系统是环境友好的，并且整套系统价格也远远低于反应堆。



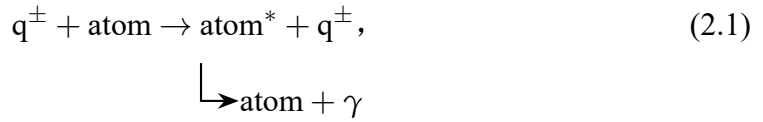
图 2.1 Rhodotron TT300-HE 型电子加速器^[9]

第二节 电子在靶中的物理过程

电子加速器法制备 ^{99m}Tc 的第一步就是让电子加速器辐照重金属转换靶，电子在靶中会涉及到许多物理过程，我们在模拟时为了保证可靠性，需要添加所有可能发生的过程。

2.2.1 激发或电离

带电粒子在穿越物质时可以使物质中的原子激发或电离，损失一部分动能，一般电离起主导作用。激发过程可以表示为



退激发的原子释放出光子。电离过程是将能量传给原子中的电子，使其摆脱原子的束缚形成电子离子对。一次能够传递的最大能量取决于入射粒子的属性。入射粒子的电离能损率由 Bethe-Bloch 公式给出：

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ion}} = \frac{4\pi N_0 z^2 e^4}{m v^2} \frac{Z}{A} \left(\ln \frac{2mv^2 \gamma^2}{I} - \beta^2\right), \quad (2.2)$$

其中 m 是电子质量, v 和 ze 是入射粒子的速度和电荷量, $\beta = v/c$, $\gamma^2 = 1/(1 - \beta^2)$, N_0 是阿伏伽德罗常数, Z 和 A 是物质中原子的原子序数和质量数, x 是粒子在物质中的路程, 通常以 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 为单位。 I 是物质的平均电离势, 对物质原子中的所有电子取平均, 大概取值为 $I \approx 10Z \text{ eV}$ 。

2.2.2 多次散射

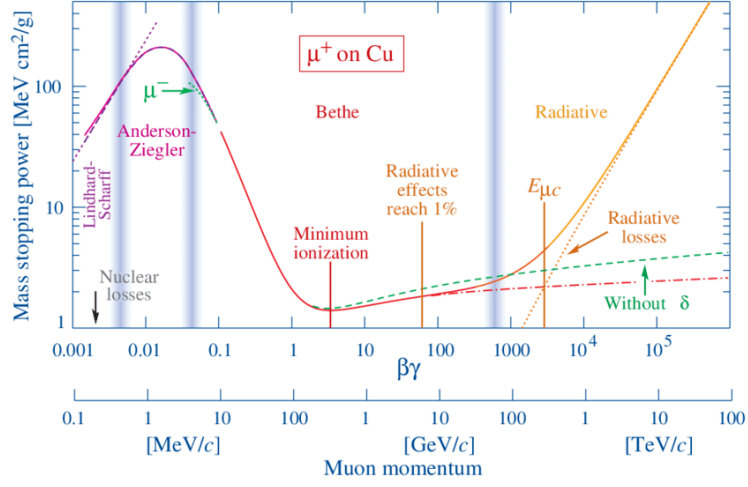
在穿过物质时, 带电粒子会受到介质中原子核核电子的库仑散射, 每次散射都会轻微影响入射粒子的运动, 大量的散射会让带电粒子略微偏离初始入射方向。在一个有限路径长度 t 中, 连续的散射结合形成一个多重库仑散射分布, 这个分布大致是高斯型的, 其均方根值为

$$\varphi_{\text{rms}} = \frac{zE_s}{pv} \sqrt{\frac{t}{X_0}}, \quad (2.3)$$

其中, $E_s = (4\pi/\alpha)^{1/2} mc^2 = 21 \text{ MeV}$, X_0 是辐射长度, 为

$$\frac{1}{X_0} = 4\alpha \frac{Z}{A} (Z+1) r_e^2 N_0 \ln \frac{183}{Z^{1/3}}, \quad (2.4)$$

这里 r_e 是经典电子半径, $\alpha = 1/137$ 。

图 2.2 μ^+ 在铜内的能量损失与粒子动量和 $\beta\gamma$ 的关系^[10]

2.2.3 韧致辐射

韧致辐射是这一流程较为核心的物理过程，高能电子在穿越物质时，由于发射光子而受到辐射损失。一个电子穿过厚度 dx 的介质时，因这种辐射产生的平均能损率为

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle_{\text{rad}} = -\frac{E}{X_0}。 \quad (2.5)$$

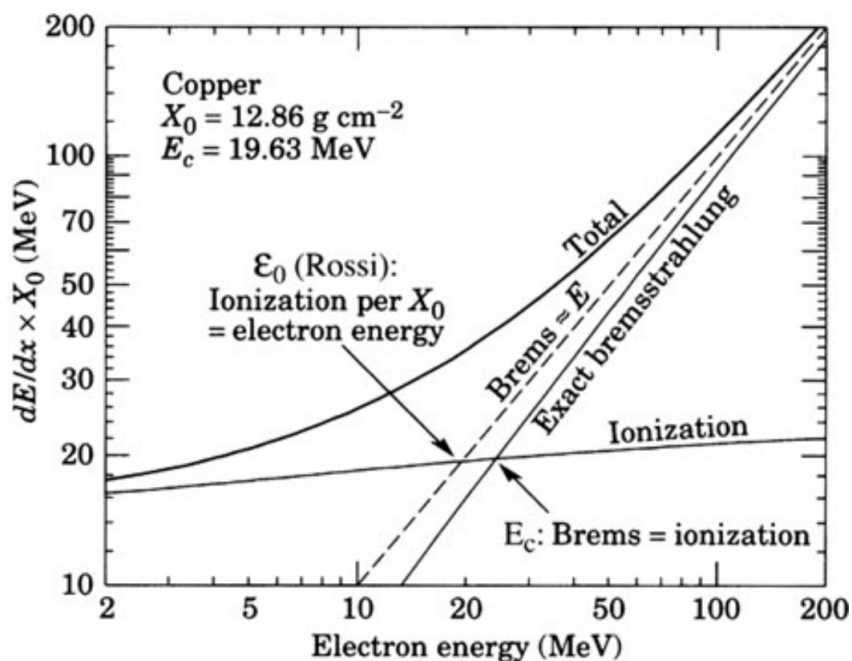
因为辐射几率正比于加速度的平方， $X_0 \propto 1/r_e^2 \propto m_e^2$ ， μ 子的辐射长度的量级为电子的 $(m_\mu/m_e)^2$ 倍，所以在大多数实际情况下，只有电子的辐射损失才需要考虑。如果电离能损可以忽略，那么一个初始能量为 E_0 的电子在走过厚度 x 的介质之后的平均能量为

$$\langle E \rangle = E_0 \exp\left(-\frac{x}{X_0}\right)。 \quad (2.6)$$

对于高能电子，电离能损实际上是常数，而辐射能损正比于能量 E 。满足 $(dE/dx)_{\text{ion}} = (dE/dx)_{\text{rad}}$ 的能量称为临界能量 E_c ^[11]，能量高于 E_c 的电子在介质中主要通过辐射过程损失能量，而临界能量之下的电子损失能量的主要过程是电离。

此外，洛西（Rossi）还给出另外一种临界能量的定义^[12]，即要求在 E_c 处每辐射长度的电离能损等于入射电子的总能量。两种定义有略微不同，如图2.3

并且，表2.2还给出了一些物质的辐射长度和临界能量。与辐射长度一样，

图 2.3 临界能量 E_c 的两种定义^[13]

临界能量也正比于入射粒子质量的平方。例如，对于 μ 子在铁中的临界能量，

$$E_c^\mu \approx E_c^e \frac{m_\mu^2}{m_e^2} = 890 \text{ GeV}。 \quad (2.7)$$

表 2.2 一些吸收体物质的辐射长度和临界能量^[14]

物质	Z	A	$X_0[\text{g/cm}^2]$	$X_0/\rho[\text{cm}]$	$E_c[\text{MeV}]$
氢	1	1.01	63.0	7.0×10^5	350
氧	8	16.00	34.2	2.4×10^4	75
铁	26	55.85	13.8	1.75	20.7
钨	74	183.9	6.8	0.35	8.0
空气	7.3	14.4	36.7	2.8×10^4	84
水	7.5	14.2	36.1	36.1	83

由上表可知，对于重金属靶材，20 MeV 电子加速器发射的电子就已经高于了临界能量，在这种情况下辐射能损大于电离能损。

第三节 光子在靶中的物理过程

在电子加速器发射的电子辐照重金属转换靶发生韧致辐射之后，产生的光子会轰击转换靶后的钨靶，发生一系列反应。

2.3.1 光电效应

光子穿越介质时，介质原子中的电子可以完全吸收一个光子的能量，摆脱原子束缚，由于动量守恒的限制，自由电子不可能完成这个过程，需要第三者参与碰撞，在这里是原子核，反应式可以写为

$$\gamma + \text{atom} \rightarrow \text{atom}^* + e^- \quad (2.8)$$

能量为 E_γ 的光子在原子 K 壳层的吸收截面特别大，占总截面的 80%，原因是 K 壳层的电子最接近原子核。远离吸收线的非相对论性范畴的总光电效应截面由非相对论性玻恩近似公式给定^[15]：

$$\sigma_{\text{photo}}^{\text{K}} = \left(\frac{32}{\varepsilon^7}\right)^{1/2} \alpha^4 \cdot Z^5 \cdot \sigma_{\text{Th}}^e (\text{cm}^2/\text{atom}), \quad (2.9)$$

其中 $\varepsilon = E_\gamma / m_e c^2$ 为约化光子能量， $\sigma_{\text{Th}} = 8\pi r_e^2 / 3 = 6.65 \times 10^{-25} \text{cm}^2$ 是光子-电子弹性散射的汤姆孙截面。吸收线附近的截面的能量依赖关系需要用一个函数 $f(E_\gamma, E_\gamma^{\text{edge}})$ 进行修正。对于光子能量较高的情形 ($\varepsilon \gg 1$)，光电效应截面的能量依赖不那么明显：

$$\sigma_{\text{photo}}^{\text{K}} = 4\pi r_e^2 Z^5 \alpha^4 \cdot \frac{1}{\varepsilon} \quad (2.10)$$

式2.9和式2.10中，截面近似正比于 Z^5 ，这表明光子并不是与每一个原子电子孤立地发生相互作用。考虑其他与 Z 有关的修正后，光电效应截面成为有关 Z 的一个非常复杂的函数。在能量区间 $0.1 \text{ MeV} \leq E_\gamma \leq 5 \text{ MeV}$ ， Z 的幂指数在 4 到 5 之间变化。

当原子内壳层发生光电效应时，还可能产生其他次级效应。电子摆脱原子束缚后会在内壳层留下一个空位，如果该空位被一个来自外层的电子填充，则内外层之间的能量差 ΔE 将以特征 X 射线的形式发射出来。同时，这个能量也可能被同一原子中的其他电子所吸收，如果 ΔE 大于那个电子所处壳层的束缚能，原子会再发出一个电子，这个效应称为俄歇效应，第二个发射出来的电子叫俄歇电子，俄歇电子的能量和光电子相比要小得多。例如 K 壳层（束缚能 B_K ）发生光电效应，并且 K 壳层剩下的空缺被 L 层（束缚能 B_L ）的一个电子填充，激

发能 $B_K - B_L$ 可以传递给另一个 L 壳层的电子, 如果 $B_K - B_L > B_L$, 那么这个 L 壳层的电子会飞离该原子, 成为俄歇电子, 能量为 $B_K - 2B_L$ 。

2.3.2 康普顿效应

忽略原子中的束缚能, 光子会与原子中的准自由电子发生散射, 称为康普顿效应。单电子的康普顿散射截面由 Klein-Nishina 公式给出^[16]:

$$\sigma_c^e = 2\pi r_e^2 \left\{ \left(\frac{1+\varepsilon}{\varepsilon^2} \right) \left[\frac{2(1+\varepsilon)}{1+2\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon} \ln(1+2\varepsilon) \right] + \frac{1}{2\varepsilon} \ln(1+2\varepsilon) - \frac{1+3\varepsilon}{(1+2\varepsilon)^2} \right\} (\text{cm}^2/\text{electron}), \quad (2.11)$$

其中 $\varepsilon = E_\gamma / m_e c^2$ 。对于原子的康普顿散射, 其截面增加为 Z 倍, 因为原子中共有 Z 个电子。

在高能情况下, 康普顿散射截面可以近似为^[17]

$$\sigma_c^e \propto \frac{\ln \varepsilon}{\varepsilon}. \quad (2.12)$$

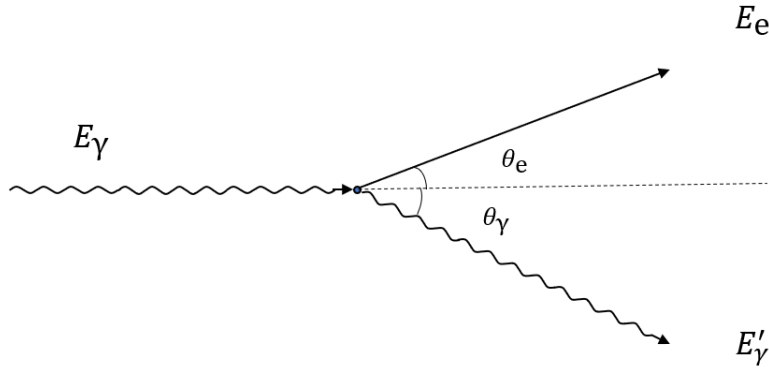


图 2.4 康普顿散射中运动学参数定义

散射光子与入射光子的能量之比为

$$\frac{E'_\gamma}{E_\gamma} = \frac{1}{1 + \varepsilon(1 - \cos \theta_\gamma)}, \quad (2.13)$$

式中 θ_γ 是光子在实验室系中的散射角。在背散射的情形下 $\theta_\gamma = \pi$, 光子传递给电子的能量达到最大, 此时

$$\frac{E'_\gamma}{E_\gamma} = \frac{1}{1 + 2\varepsilon}. \quad (2.14)$$

电子相对光子入射方向的散射角为

$$\cot \theta_e = (1 + \varepsilon) \tan \frac{\theta_\gamma}{2}, \quad (2.15)$$

受到动量守恒的限制，电子散射角 θ_e 不可能超过 $\pi/2$ 。

除了正常的康普顿效应，还有逆康普顿效应，就是高能电子散射低能光子，光子获得能量之后蓝移，频率增加。

2.3.3 对产生

当光子的能量达到阈值，就可能在原子核的库仑场中产生电子-正电子对。这个阈值等于正负电子的静质量加上核的反冲能量，由能量和动量守恒，计算出阈值为

$$E_\gamma \geq 2m_e c^2 + 2 \frac{m_e^2}{m_{\text{nucleus}}} c^2. \quad (2.16)$$

对任何物质，都有 $m_{\text{nucleus}} \gg m_e$ ，式2.16可以近似为

$$E_\gamma \geq 2m_e c^2. \quad (2.17)$$

然而，如果是在电子库仑场中产生正负电子对，该阈值为

$$E_\gamma \geq 4m_e c^2, \quad (2.18)$$

不过在电子库仑场中产生正负电子对的几率远远小于在原子核库仑场中的几率。

在原子核的电荷没有被周围电子屏蔽的情况下（低能光子必须非常靠近原子核使对产生成为可能，这意味着光子看见了“裸核”），

$$1 \ll \varepsilon \ll \frac{1}{\alpha Z^{1/3}}, \quad (2.19)$$

此时对产生截面如下式^[12]：

$$\sigma_{\text{pair}} = 4\alpha r_e^2 Z^2 \left(\frac{7}{9} \ln 2\varepsilon - \frac{109}{54} \right) (\text{cm}^2/\text{atom}); \quad (2.20)$$

但对于原子核电荷被完全屏蔽的情形（ $\varepsilon \gg 1/(\alpha Z^{1/3})$ ），则有^[12]

$$\sigma_{\text{pair}} = 4\alpha r_e^2 Z^2 \left(\frac{7}{9} \ln \frac{183}{Z^{1/3}} - \frac{1}{54} \right) (\text{cm}^2/\text{atom}). \quad (2.21)$$

当光子能量很高时，即使离核较远，也可能产生正负电子对，但这时必须考虑原子中电子对原子核电荷的屏蔽作用。

光子能量逐渐增加，最终对产生截面趋近于式2.21所示的与光子能量无关的量。忽略式中小量 $1/54$ ，可以得到渐近值

$$\sigma_{\text{pair}} \approx \frac{7}{9} 4\alpha r_e^2 Z^2 \ln \frac{183}{Z^{1/3}} \approx \frac{7}{9} \cdot \frac{A}{N_A} \cdot \frac{1}{X_0}, \quad (2.22)$$

这里用到了式2.4中的辐射长度 X_0 。

而对于中低能的光子，对产生过程偏向于产生能量相近的电子和正电子，但是对于高能光子，能量分布会略微不对称，以传递给正电子的能量 E_+ 为参考量，对产生的微分截面是

$$\frac{d\sigma_{\text{pair}}}{dE_+} = \frac{\alpha r_e^2}{E_\gamma - 2m_e c^2} Z^2 f(\epsilon, Z) [\text{cm}^2 / (\text{MeV} \cdot \text{atom})], \quad (2.23)$$

$f(\epsilon, Z)$ 是一个无量纲函数，截面随 Z^2 的变化已经从 $f(\epsilon, Z)$ 中分离出去。因此 $f(\epsilon, Z)$ 只是缓慢地随原子序数变化（对数变化）。

2.3.4 光核反应

光核反应 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 是电子加速器法制备 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的核心物理反应，合适能量的光子轰击 ^{100}Mo 靶，打出一个中子生成 ^{99}Mo 。

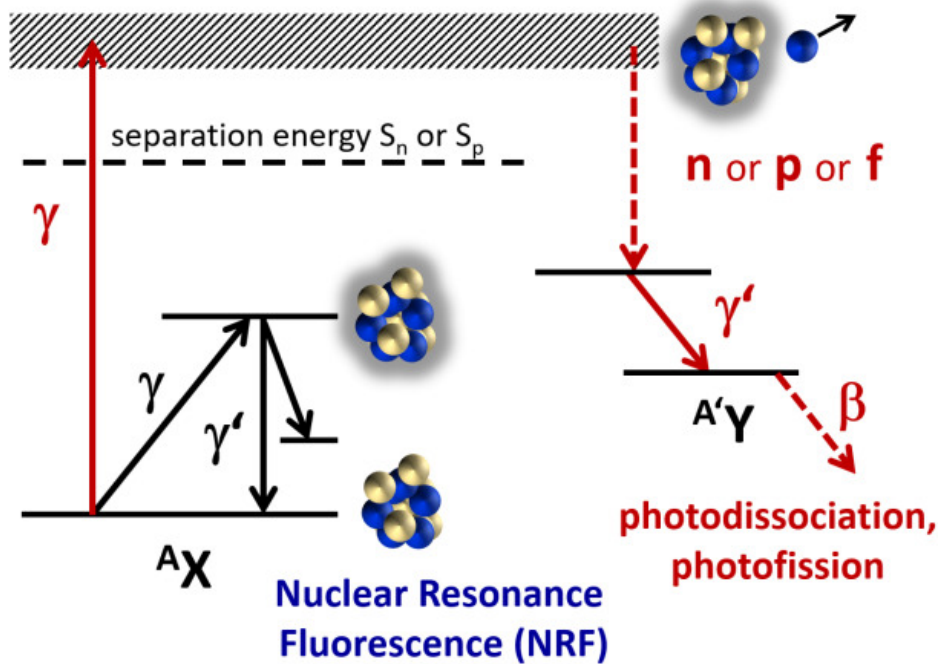


图 2.5 光核反应示意图。分别为核共振荧光现象和光致解离，光致裂变^[18]

入射光子与物质原子核之间没有核力干扰，只存在电磁过程，如上述的光电效应、康普顿效应和对产生过程。而当光子能量高于靶核的光核反应阈值时，会诱发光核反应，主要有光中子反应 $(\gamma, xn)(x = 1, 2, 3 \dots)$ 、光质子反应 (γ, p) 、核共振荧光反应 (γ, γ) 和 (γ, γ') 等过程。

原子核吸收光子后的典型行为分区说明如下^[19]：

(1) $E_\gamma \leq 9 \text{ MeV}$ ，单粒子束缚态和非束缚态的激发，微观性质可以用壳层模型描述。

(2) $10 \text{ MeV} \leq E_\gamma \leq 30 \text{ MeV}$ ，巨共振区，是集体模型的系统激发。除氦核之外的其他核有此行为。

(3) $30 \text{ MeV} \leq E_\gamma \leq 140 \text{ MeV}$ ，准氦核吸收区。

(4) $E_\gamma \geq 140 \text{ MeV}$ ，光介子阈，此区域光子产生 π^+ 介子，达到核子共振区。

受激原子核的能量全都来自于所吸收的入射光子，该原子核退激发时释放若干中子的反应称为光中子反应。光中子反应是有阈的吸能反应，质量数在 80 ~ 120 之间的原子核的光中子阈值比较相近（约 8 MeV）。当入射光子的能量大于光中子反应阈值时，在阈值之上几 MeV 处反应截面会迅速上升，逐渐到达最大值，而后又降到较低的值，将这一较宽的能区称为巨偶极共振能区。

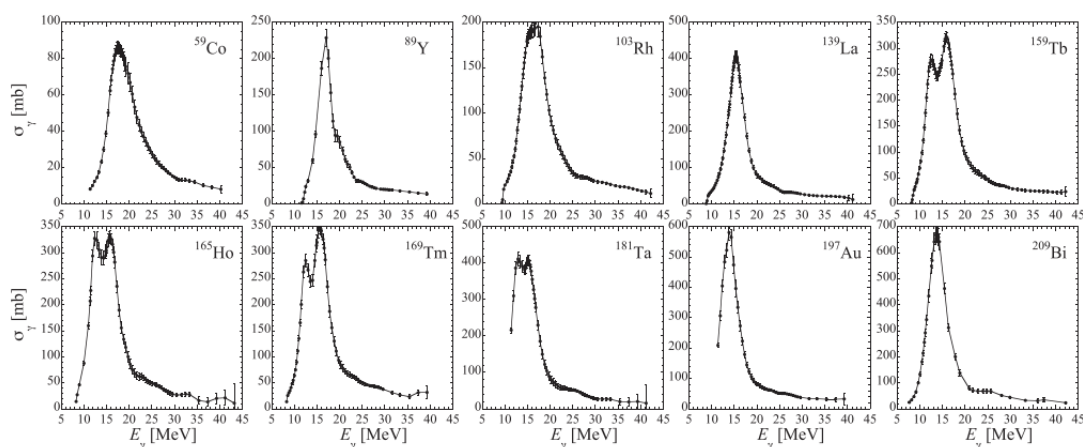
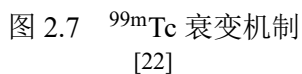


图 2.6 光中子截面随光子能量的变化
[20]

由于宇称守恒的限制，原子核不能具有静态电偶极矩。然而光子和原子核之间的电磁相互作用可以产生动态电偶极矩。一个最著名的例子就是由 Bothe 和 Genter^[21]在一次光核反应中发现的巨偶极共振。它们显现为光核反应中宽阔的共振，平均能量从轻核的 22 MeV 左右系统地减少到重核的 14 MeV 左右。共

其中 A 为核子质量数。

^{99}Mo 由光核反应产生，不过该核素并不是最终需要的核药。生成的 ^{99}Mo 首先通过 β 衰变成为能级 142.683 keV 的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ，半衰期为 66.02 h。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 会通过内部转换（Internal Conversion）衰变到 140.511 keV 能级，同时放出电子，而后立即（0.221ns）衰变到基态 ^{99}Tc ，发出 140.511 keV 的单能光子，该光子可以用做扫描成像。



第三章 电子加速器法制备钨-99m 的 Geant4 模拟

第一节 Geant 模拟

本研究的所有模拟工作都使用 11.1.1 版本的 Geant4^[23]。Geant4 (GEometry ANd Tracking) 是一个用来模拟粒子与穿过的物质发生相互作用的软件。它有非常全面的功能，包括追踪相互作用的信息，构建探测器几何，定义物理模型和统计击中，并且能处理从 250 eV 开始，一直延伸到 TeV 范围内的所有反应。它已被广泛应用于粒子物理、核物理、加速器设计、空间工程以及医学物理领域。Geant4 由多个模块组成，每个模块具有不同的功能，例如几何构建、物理过程和探测器响应被不同模块分别处理，易于管理。图3.1展示了 Geant4 中的所有类，不同的类有不同的功能。图3.2为 Geant4 运行时的界面。

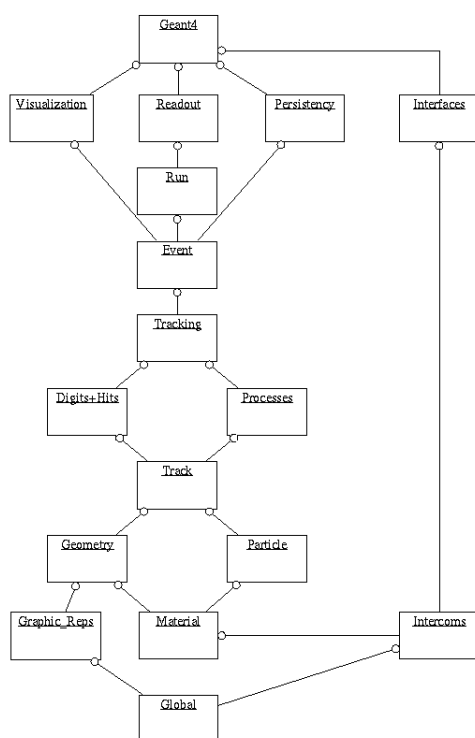


图 3.1 Geant4 程序框架^[23]

```

*****
Geant4 version Name: geant4-11-01-patch-01 [MT] (10-February-2023)
<< in Multi-threaded mode >>
      Copyright : Geant4 Collaboration
      References : NIM A 506 (2003), 250-303
                  : IEEE-TNS 53 (2006), 270-278
                  : NIM A 835 (2016), 186-225
                  WWW : http://geant4.org/
*****

G4VModularPhysicsList::RegisterPhysics: a physics with given type already exists
Type = 8 : existing physics is ionPhysicsXS
New ionInelasticFTFP_BIC_PHP can not be registered

----- WWW ----- G4Exception-START ----- WWW -----
*** G4Exception : Run0202
      issued by : G4VModularPhysicsList::RegisterPhysics
Duplicate type for ionInelasticFTFP_BIC_PHP
*** This is just a warning message. ***
----- WWW ----- G4Exception-END ----- WWW -----

```

图 3.2 Geant4 运行界面，版本号为 11.1.1

3.1.1 Geant4 的规则

Geant4 在模拟一个过程时会分解成很多模块，由大到小为 Run、Event、Track 和 Step。Run 是最大的一个部分，属于模拟的最高层级。举例来说，模拟 1000 个光子轰击靶核，需要在一次模拟过程中发射 1000 个光子，那么从第一个光子开始反应到所有 1000 个光子都反应结束，称为一次 Run（包括产生的次级粒子也结束相应的反应）。而 Event 是模拟的中间层级，表示每一个入射粒子从反应开始到结束的过程，若干 Event 构成了一个 Run。还是如上举例，模拟 1000 个光子打靶，那么对这次 Run 来说就有 1000 个 Event。而 Track 是 Event 的组成部分，在模拟中描述单个粒子运动轨迹。一个 Track 有若干 Step 构成，Step 是粒子在模拟过程中移动的最小单位，描述粒子在某一时刻的状态变化，如图 3.3。一个 Step 由两个端点组成，分别是 PreStepPoint 和 PostStepPoint，PreStepPoint 是粒子在步长开始时的状态，PostStepPoint 则是粒子在步长结束时的状态。

Step 记录粒子在某一时间步长内的运动信息，例如能量、动量、位置等，同时也记录在该步长内的能量沉积和生成的次级粒子。Track 记录粒子在每个 Step 中的信息。相应的，Event 和 Run 都会统计和记录较低层级的所有信息。



图 3.3 Step 示意图

3.1.2 设置几何模型

设置几何模型是在使用 Geant4 进行模拟时关键的一步，因为我们的目的是研究粒子与探测器物质的相互作用，而几何模型就是发生反应的场所，所以设置探测器几何的形状和材料等等属性是重中之重。

在 Geant4 中，几何模型由多个几何体组成，最大的几何体的叫做 **World Volume**，几何模型的所有部分必须都包含在其中，而且需要有一定盈余空间。每个几何体的创建需要描述其形状和物理特性，然后将其放置在一个包含它的几何体中。当一个几何体被放置在另一个几何体之内时，前者被称为 **Daughter Volume**，后者叫做 **Mother Volume**。几何体的层级有严格限制，不同层级的几何体相互之间不能出现交叠，并且 **Daughter Volume** 必须完全位于 **Mother Volume** 之中，不能超出边界。如图3.4，蓝色的长方体就是 **World Volume**，白色圆柱体是定义的几何模型，位于 **World Volume** 内部。

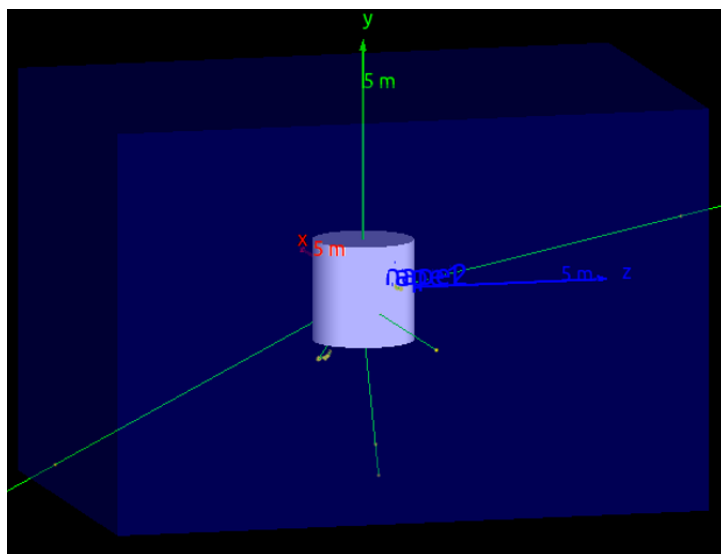


图 3.4 Geant4 中的几何模型示意图

一个几何体的形状用 **Solid Volume** 描述，**Solid Volume** 是一个几何对象，也有其相应的尺寸。不过，光有形状属性并不能完整构建一个几何模型，**Logical Volume** 不仅包含形状属性，还能反映出其物理特性，例如材料。构建完模型后，需要利用 **Physical Volume** 明确该模型所处的位置。

3.1.3 设置物理过程

设置物理过程是该流程的核心步骤，这决定了粒子与物质的相互作用方式。Geant4 提供了七大类物理过程：电磁过程、强子过程、输运过程、衰变过程、光学过程、光轻子-强子过程和参数化过程。不过，在具体模拟过程中，我们只需要添加需要的物理过程即可。

表3.1描述了电子加速器法制备 ^{99}Mo 过程中电子和光子可能发生的物理过程以及对应的类。涉及到电子的主要过程有激发或电离、多次散射和韧致辐射，这些都属于电磁过程。而光子参与的主要反应包含光电效应、康普顿效应、对产生和光核反应。

在 Geant4 中，一个物理过程可能可以通过多种模型实现，不同模型对应不同能区。所以在模拟中设置物理过程时，要根据实际情况选取合适模型，提高模拟的准确性。

表 3.1 电子加速器法制备 ^{99}Mo 过程中电子和光子的物理过程及相应的类

粒子	物理过程	物理过程对应的类
电子	电离	G4eIonisation
	多次散射	G4eMultipleScattering
	韧致辐射	G4eBremsstrahlung
光子	光电效应	G4PhotoElectricEffect
	康普顿效应	G4ComptonScattering
	对产生	G4PairProductionSim
	光核反应	G4PhotonNuclearProcess

3.1.4 设置粒子源

在设置粒子源时，首先要确定粒子的种类，既可以设置简单粒子，如光子、电子，也能设置为一个不停衰变的放射性离子。而后可以通过 G4ParticleGun 确定粒子的能量和动量信息，或者利用更为复杂的 G4GeneralParticleSource 设置粒子源的能量分布、位置分布和方向分布。

图3.5是 G4ParticleGun 发射出的粒子在整个 World 中发生相互作用的示意图，其中绿色线条为中性径迹，红色线条是带负电径迹，蓝色线条是带正电径迹。

迹。

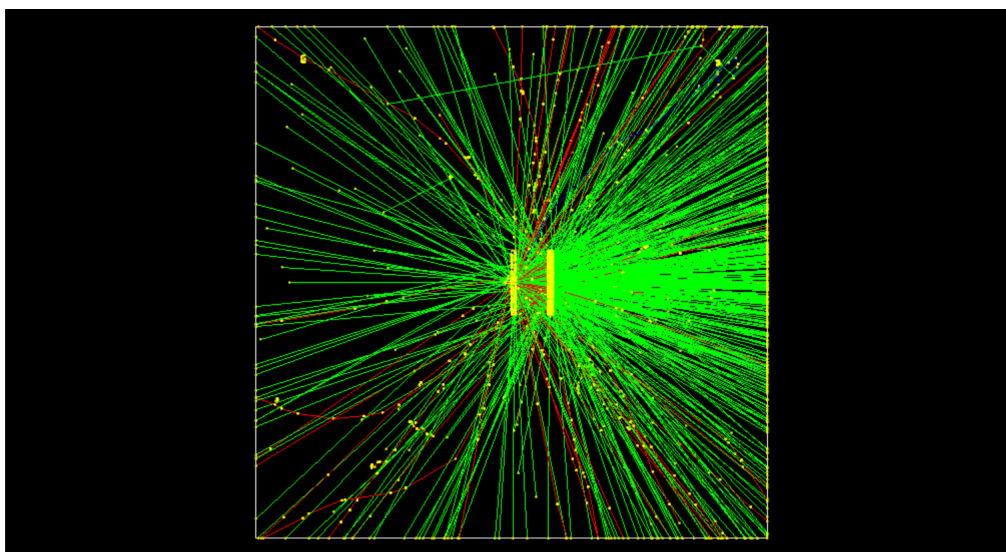


图 3.5 G4ParticleGun 发射的粒子相互作用示意图

3.1.5 数据处理

模拟结束后，最终会得到产生的次级粒子的 Track 信息。一般来说，可以进行设置详细输出所有粒子的 Track 信息，得到 Track 信息表，不过这是很不方便的，因为输出过多信息不仅会增加整个模拟花费的时间，还会提升处理数据的难度。

在 Geant4 模拟中，生成的数据（如粒子轨迹、能量沉积、次级粒子信息等）通常非常庞大。将这些数据以结构化形式存储，不仅便于后续分析，还能提高数据处理效率。ROOT 的 TTree 数据结构非常适合存储此类数据。所以，本项目采用 ROOT 存储所有的模拟数据。

第二节 蒙特卡洛模拟的验证

3.2.1 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应验证

如图3.6所示， $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应的光子阈值能量为 8.29 MeV，并且在 14.5 MeV 时反应截面达到最大值。所以我们需要设置合适的物理过程，保证模拟中产生的反应与实验测得的结果相符。我们以 Geant4 自带的 QGSP_BIC_HP^[24]物理列表为基础，手动添加了 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应的截面数据库，解决了能量低于 10 MeV 的光子无法与 ^{100}Mo 发生 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应的问题。

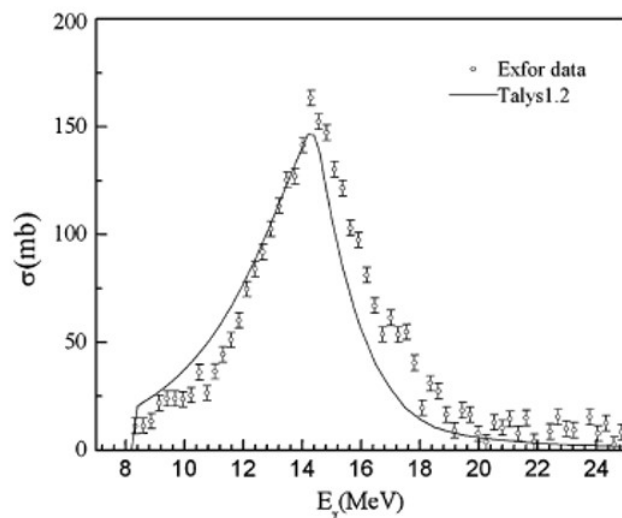


图 3.6 TALYS 1.2 计算与实验得到的 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应截面^[24]

物理过程设置完毕后，首先进行初步模拟，让光子直接轰击由 ^{100}Mo 组成的多层钼板，查看 ^{99}Mo 的产生情况，如图3.7。初始的光子能量范围为 7 ~ 25 MeV，每间隔 0.1 MeV 取值作为光子的能量，每个能量值发射 10^6 个光子，最终 ^{99}Mo 产额如图3.8。

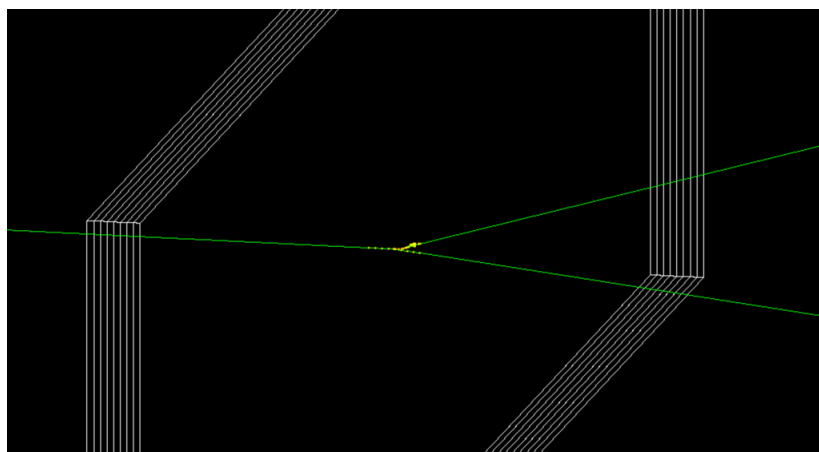
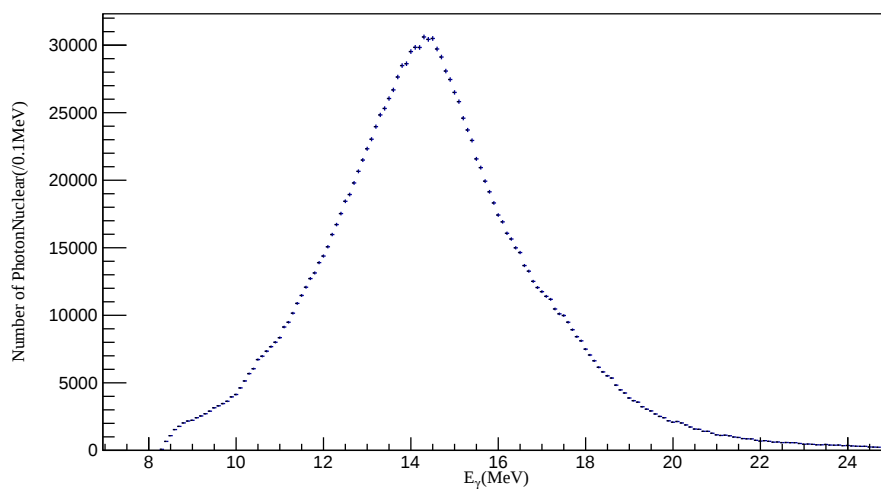


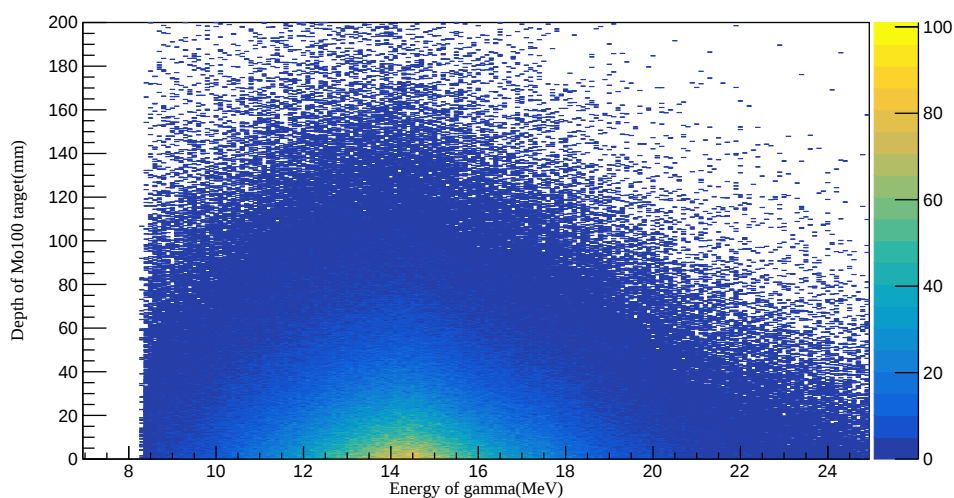
图 3.7 模拟光子直接轰击多层 ^{100}Mo 靶

由图3.8可以看出，在当前设置好的物理过程下，模拟 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应的截断光子能量在 8.3 MeV 左右，并且绝对产额最大时对应的光子能量值大约为 14.5 MeV，我们的模拟结果与实验数据（图3.6）符合得很好。这说明该物理列表能模拟出符合实验结果的 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应。

除此之外，目标核素 ^{99}Mo 在 ^{100}Mo 靶中的分布也值得考虑，这可以为靶的


 图 3.8 模拟光子直接轰击多层 ^{100}Mo 靶的 ^{99}Mo 产额

形状设计提供参考。产物在靶中的深度分布如图3.9。可以看出，大部分目标核素都产生在深度小于 10 cm 的位置。


 图 3.9 模拟光子直接轰击 ^{100}Mo 靶的 ^{99}Mo 深度分布

3.2.2 韧致辐射光子验证

因为本次模拟是利用电子加速器辐照转换靶产生的光子去轰击目标钼靶，所以除了对光核反应进行验证，还需验证韧致辐射产生的光子这一过程。之前已经有实验测过不同靶材的韧致辐射谱，O'Dell 等人利用面密度为 0.490 g/cm^2

的钨与面密度为 0.245 g/cm^2 的金组成的复合靶材进行实验，结果如图3.10。

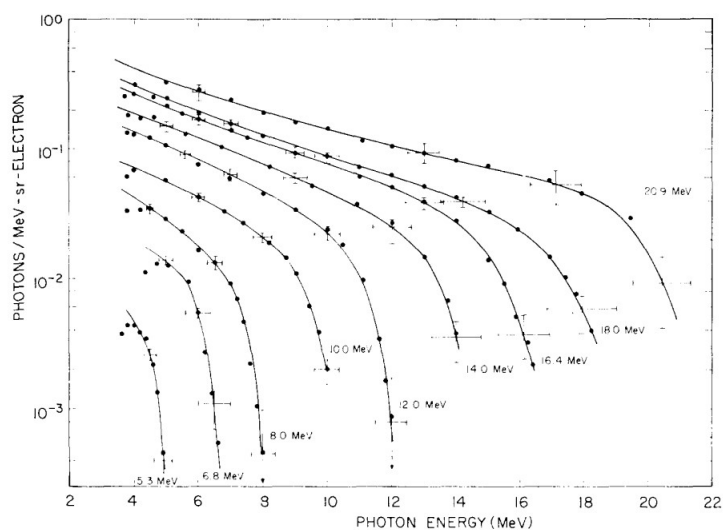


图 3.10 O'Dell 等人所测韧致辐射谱^[25]

我们在 Geant4 中构建出钨金复合靶的几何进行模拟，如图3.11，我们按照 O'Dell 等人的实验细节设置参数，利用 20.9 MeV 的电子轰击复合靶，统计结果。模拟后可以得到韧致辐射光子的能谱，将其与实验结果进行对比，如图3.12，其中蓝色误差棒是模拟结果，红色三角是 O'Dell 等人的实验结果，在误差范围内符合得很好。

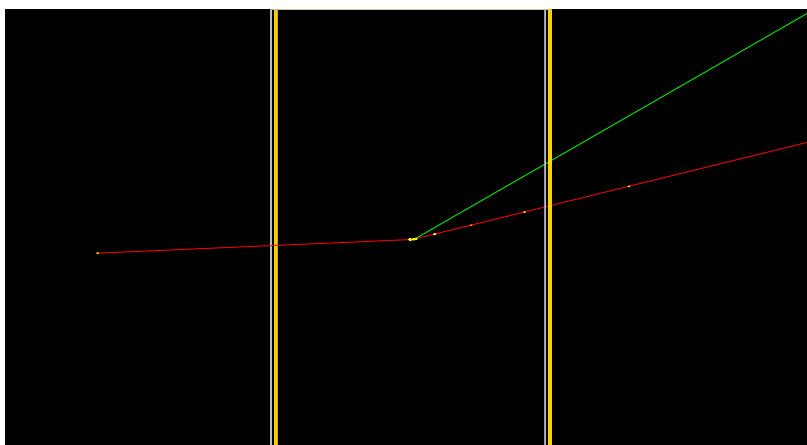


图 3.11 Geant4 中模拟电子轰击钨金复合靶

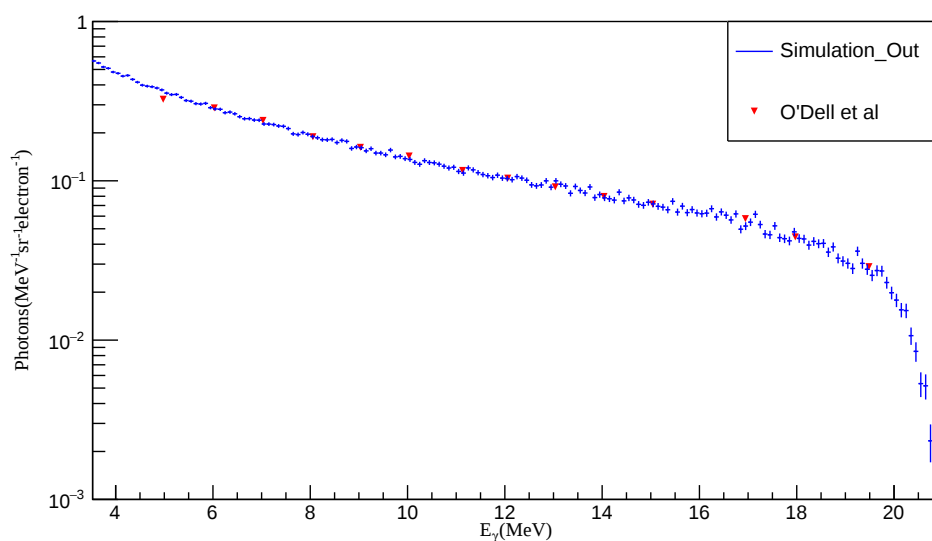


图 3.12 韧致辐射光子能谱

3.2.3 生成钼-99 后续过程的验证

上一章提到，生成的 ^{99}Mo 首先通过 β 衰变成为能级 142.683 keV 的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 会通过内部转换衰变到 140.511 keV 能级，同时放出电子，而后立即 (0.221ns) 衰变到基态 ^{99}Tc ，发出 140.511 keV 的单能光子。

我们可以在 Geant4 中验证这一过程，看看模拟中产生的 ^{99}Mo 会不会如预期一样衰变。该模拟仍旧借用 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应验证过程中所构造的系统，从得到的 Track 信息表中搜寻次级粒子。

结果如图3.13，可以看到，产生的 ^{99}Mo 确实是先衰变成为能级 142.683 keV 的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ，而后 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 会通过内部转换衰变到 140.511 keV 能级。

```

* G4Track Information: Particle = Tc99[142.683], Track ID = 823, Parent ID = 772
*****
Step#    X            Y            Z            KineE            dEStep            StepLeng            TrakLeng            Volume            Process
0      -2.099 mm      3.964 mm      6.171 cm      7.908 eV            0 eV              0 fm              0 fm              Mo              initStep
1      -2.099 mm      3.964 mm      6.171 cm      0 eV              7.908 eV          6.354 Ang          6.354 Ang          Mo              ionIoni
2      -2.099 mm      3.964 mm      6.171 cm      0 eV              0 eV              0 fm              6.354 Ang          Mo              RadioactiveD

-- List of secondaries -----
Tc99[140.511]: energy = 9.677 meV  time = 3.645 d
e-: energy = 31.41 eV  time = 3.645 d
e-: energy = 30.7 eV   time = 3.645 d
e-: energy = 247.5 eV  time = 3.645 d
e-: energy = 115.3 eV  time = 3.645 d
e-: energy = 1.741 keV time = 3.645 d
:-----

```

图 3.13 142.683 keV 能级的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 衰变为 140.511 keV 能级的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$

并且在 Track 信息表中还发现了 ^{99}Mo 的另一种衰变模式，如图3.14。 ^{99}Mo 并未如预期一样直接衰变为 142.683 keV 能级的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ，而是先到一个更高的激发态，衰变为 920.579 keV 能级的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ，再由 920.579 keV 能级的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 跃迁到 142.683 keV 能级。

```
* G4Track Information: Particle = [Tc99[920.579]], Track ID = 20, Parent ID = 19
*****
Step#    X          Y          Z          KineE          dEStep    StepLeng  TrakLeng  Volume    Process
0      3.027 mm    1.813 cm    5.118 cm    1.985 eV          0 eV        0 fm        0 fm    MoLayer  initStep
1      3.027 mm    1.813 cm    5.118 cm      0 eV          1.985 eV    4.713e-297 fm 4.713e-297 fm MoLayer  RadioactiveDecay

-- List of secondaries -----
[Tc99[142.683]]: energy = 3.285 eV   time = 3.114 d
               gamma: energy = 777.9 keV time = 3.114 d
:-----
```

图 3.14 920.579 keV 能级的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 衰变为 142.683 keV 能级的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$

以上两种衰变模式都能产生 140.511 keV 能级的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ，发生如图3.15所示的单光子衰变，140.511 keV 的单能光子可以用做扫描成像。

```
* G4Track Information: Particle = [Tc99[140.511]], Track ID = 25, Parent ID = 23
*****
Step#    X          Y          Z          KineE          dEStep    StepLeng  TrakLeng  Volume    Process
0      3.027 mm    1.813 cm    5.118 cm    10.64 meV          0 eV        0 fm        0 fm    MoLayer  initStep
1      3.027 mm    1.813 cm    5.118 cm      0 eV          10.64 meV  2.757e-296 fm 2.757e-296 fm MoLayer  RadioactiveDecay

-- List of secondaries -----
[Tc99]: energy = 107.2 meV   time = 3.267 d
       gamma: energy = 140.5 keV time = 3.267 d
:-----
```

图 3.15 140.511 keV 能级的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生单光子衰变

不过，并不是所有产生的激发态 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 都能到达 140.511 keV 能级，图3.16就描述了一种特殊情况。920.579 keV 能级的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 先衰变到 181.094 keV 能级，然后直接到基态。这几种情况的出现取决于能级间的跃迁概率。

```
* G4Track Information: Particle = [Tc99[920.579]], Track ID = 14, Parent ID = 13
*****
Step#    X          Y          Z          KineE          dEStep    StepLeng  TrakLeng  Volume    Process
0     -3.322 mm    2.244 mm    5.098 cm    1.46 eV          0 eV        0 fm        0 fm    MoLayer  initStep
1     -3.322 mm    2.244 mm    5.098 cm      0 eV          1.46 eV    4.714e-299 fm 4.714e-299 fm MoLayer  RadioactiveDecay

-- List of secondaries -----
[Tc99[181.094]]: energy = 2.968 eV   time = 2.159 d
               gamma: energy = 739.5 keV time = 2.159 d
:-----

* G4Track Information: Particle = [Tc99[181.094]], Track ID = 17, Parent ID = 14
*****
Step#    X          Y          Z          KineE          dEStep    StepLeng  TrakLeng  Volume    Process
0     -3.322 mm    2.244 mm    5.098 cm    2.968 eV          0 eV        0 fm        0 fm    MoLayer  initStep
1     -3.322 mm    2.244 mm    5.098 cm      0 eV          2.968 eV    3.893 Ang    3.893 Ang    MoLayer  ionIoni
2     -3.322 mm    2.244 mm    5.098 cm      0 eV          0 eV        0 fm        3.893 Ang    MoLayer  RadioactiveDecay

-- List of secondaries -----
[Tc99]: energy = 178 meV   time = 2.159 d
       gamma: energy = 181.1 keV time = 2.159 d
:-----
```

图 3.16 不产生 140.511 keV 单能光子的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 衰变模式

第三节 靶材设计

电子加速器法制备核素 ^{99}Mo 的完整流程是先让加速器辐照一块重金属转换靶，使产生的韧致辐射光子再去轰击 ^{100}Mo 靶，生成 ^{99}Mo ，所以整个靶系统应由两个独立的靶构成如图3.17，左边为转换靶系统，右边是目标靶 ^{100}Mo 。图3.18是模拟电子加速器轰击最初靶材系统的示意图，其中绿色线条为中性径迹，红色线条是带负电径迹。

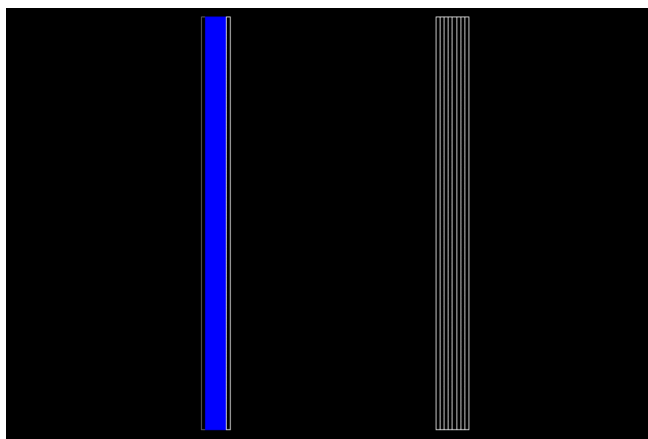


图 3.17 最初靶材系统的设计图

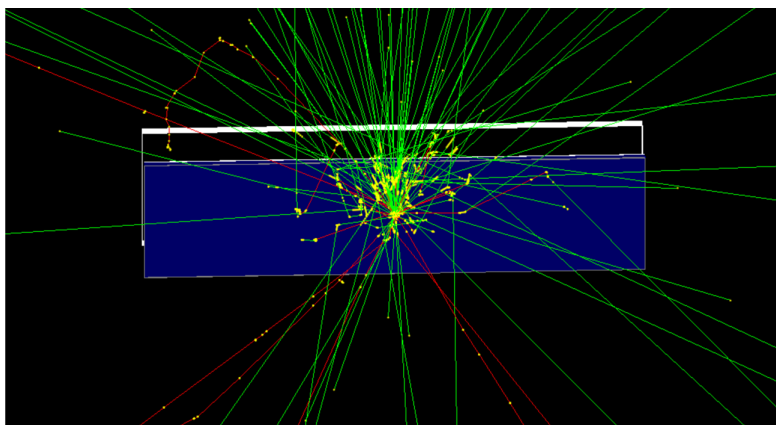


图 3.18 模拟电子加速器轰击最初靶材系统

3.3.1 转换靶设计

制备 ^{99}Mo 的转换靶材需要尽可能提升有效光子（能量在 8.29MeV 以上）的通量密度，而不是像工业辐照那样以提升全能域光子的转化效率和射线均匀度为目标。理论上最好的方式就是减少电子加速器展宽，以类似医用加速器近乎

点射的方式辐照靶材。但是与医用加速器的 μA 级电子束流不同，本项目采用的 mA 级加速器点射会产生几千度高温，进而熔化靶材，还可能损坏电子加速器真空，因此，本方案选用水作为导热剂。

初步模拟研究之后发现，在模拟中加入水层之后，对整个反应流程的影响较小，所以在模拟中选择简化整个靶材系统，去除水层，仅仅留下重金属靶。

转换靶的材料有多种选择，通常情况下，韧致辐射转换靶可以选用钨、钽、铅或铀制作。但铅和铀在此技术流程中首先被排除，因为铅有毒性，并且熔点较低，不适合作为被电子加速器辐照的转换靶，而且此方法要脱离铀产业链，铀也不是优先选项。钽和钨的原子序数相近，我们可以对比它们物理性质，如表3.2。

表 3.2 钽和钨的物理性质对比

性质	钽 (Tantalum, Ta)	钨 (Tungsten, W)
原子序数 (Z)	73	74
原子量 (g/mol)	180.95	183.84
密度 (g/cm ³)	16.69	19.25
熔点 (°C)	3017	3422
沸点 (°C)	5458	5555
热导率 (W/m·K)	57	173
热中子吸收截面 (barn)	21.3	19.2
延展性	好	差

从表中可以得知，钽和钨的熔点相近，钨的导热率更好。但是钽拥有较好的延展性，适合加工成薄片状的靶，而钨的延展性较差，尤其是在室温下。它是一种硬而脆的金属，难以进行冷加工。并且钽有极强的耐腐蚀性，而钨在高温下容易氧化，会形成挥发性的氧化物 (WO_3)，导致材料损耗。所以本项目采用钽作为转换靶。

韧致辐射转换靶是整个过程中的关键一环，它将高能电子束转换为需要的光子。由于本次模拟使用的电子加速器能量较大，不能忽略对靶材的破坏作用，在这个情况下，即使温度没有高到足以熔化靶材，一个束流脉冲也很可能击穿重金属转换靶。

在长时间的多脉冲工作环境下，提高靶材的持续工作能力非常重要，首先

就是弄清楚束流破坏靶的机理。能量在 MeV 以下的电子束，在材料中的能量沉积集中在靶材的表面，会熔化或汽化入射材料^[26]。而当电子加速器的能量达到了 10 MeV 以上，对靶材有极强的穿透能力，不光表面，内部各部分都可能获得电子的能量，与低能情况会完全不同。

根据中国工程物理研究院的实验^[27]，他们利用能量为 12 MeV、束流约 2.2 kA、束脉冲半高宽 90 ns 的直线电子加速器轰击 1.2 mm 的钨靶的不同位置，然后分析其对靶材的破坏效果。能量沉积在靶中的纵深分布如图 3.19，靶吸收的总能量约占入射电子能量的 1/3，中心吸收能量多，两侧近似中心对称。

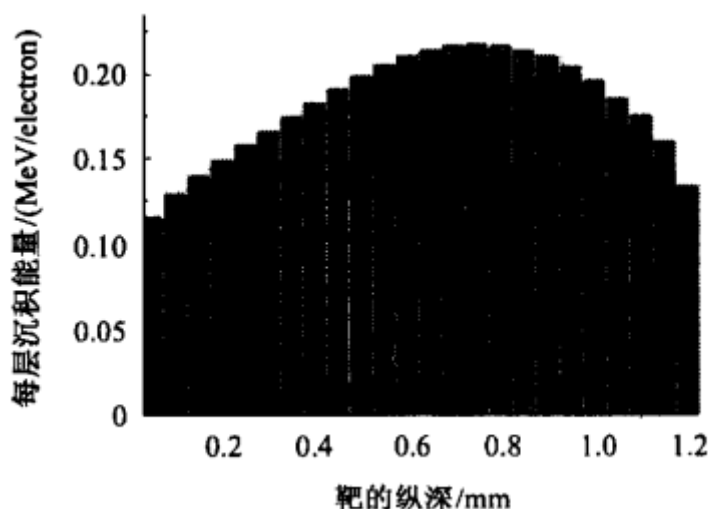


图 3.19 钨靶内电子能量的沉积分布图^[27]

理论上，增厚靶材可以提高电子能量的转换效率，产生更多的韧致辐射光子。但是，过厚的靶材又会阻挡部分光子到达钨靶，降低韧致辐射光子的有效输出，还会增加冷却靶材的难度，所以我们采用 1 mm 厚的钨靶作为转换靶进行模拟。

3.3.2 目标靶设计

目标靶是发生 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应生成 ^{99}Mo 的场所，最初的设想是将钨靶设计为多层钨板，这样便于在反应过程中提取产物和添加原材料，如图 3.17 中右边白色靶材。不过本次模拟目的主要是优化电子加速器能量，所以仍可以对钨靶进行简化，我们让其横截面的参数与钨靶一样。再由图 3.9 的结果可知，产物大部分都分布在靶中深度小于 10 cm 的位置，所以最终钨靶的尺寸为 1 cm ×

1 cm × 10 cm。

第四节 电子加速器参数设置

本项目采用的是直线型电子加速器，其基本结构如图3.20所示。图中为较常见的工业辐照类电子加速器，工作原理是：电子枪产生的电子经聚焦之后注入加速管，已经进入加速管的电子再经速调管产生的微波电场加速，指导能量达到预设能量，成为所需的高能电子，高能电子通过扫描窗展束后照射到束下装置上承载的被照物品。

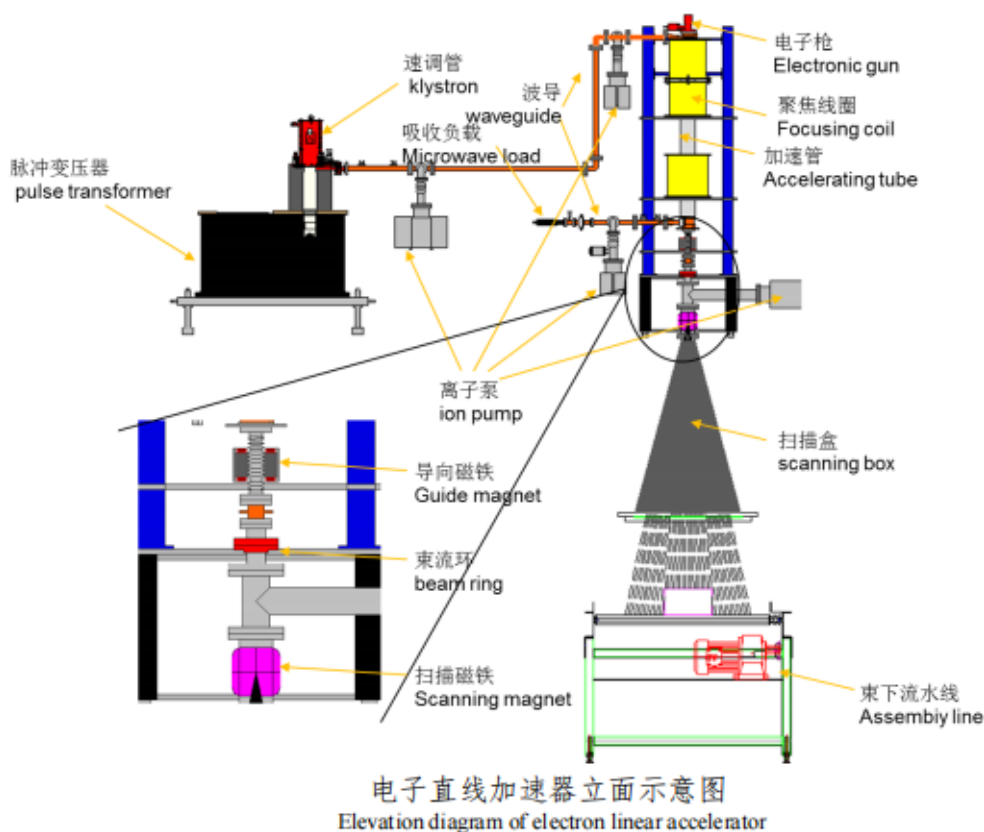


图 3.20 直线型电子加速器结构示意图^[28]

与普通的工业辐照不同，本项目不是让高能电子直接辐照目标靶材，而是在中间加入了一个重金属靶。该重金属靶是受到电子束辐照的被照物品，产生光子后，再让光子辐照目标钼靶，生成最终产物 ^{99}Mo 。

由于 Geant4 中无法模拟真实电子加速器的情况，让电子束一个脉冲一个脉冲地打出来，而电子加速器又有束流形状、发射度等等性质，所以我们需要对初

始发射的粒子进行属性设置。在 Geant4 中，初始粒子由 PrimaryGenerator 控制，我们可以在其中定义初始粒子的能量、动量等信息。

在本模拟项目中，我们可以限制束流中的电子在一个给定的立体角中均匀分布，如图3.21，极角为 θ ，其中方位角 φ 的范围是 $[0, 2\pi]$ ， $\tan\theta$ 在 $[0, \frac{1}{20}]$ 之间。所以，我们在参数设置时需要对这两个角度进行随机抽取。

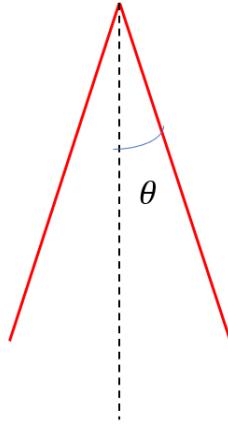


图 3.21 加速器束流约束示意图

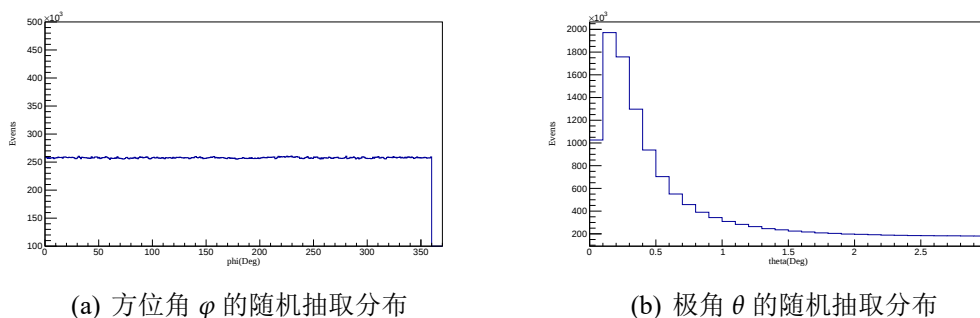
方位角 φ 的随机抽取相对简单，各个方位角的分布是等概率的，所以在 $[0, 2\pi]$ 上，随机公式可以直接写为

$$\varphi = \varphi_1 + R_\varphi(\varphi_2 - \varphi_1) = 0 + R_\varphi(2\pi - 0) = 2\pi R_\varphi. \quad (3.1)$$

极角 θ 的随机抽取公式可以写成

$$\theta = \arccos(1 - \cos\beta)R_\theta + \cos\beta, \quad (3.2)$$

其中 $\tan\beta$ 的值为 $1/20$ 。上述的 R_φ 和 R_θ 是两个在 $[0, 1]$ 上的均匀随机数，随机抽取的结果如图3.22。将满足该分布的粒子设置为粒子源，就能模拟出电子加速器发射电子束。


 图 3.22 方向角 φ 和极角 θ 的随机抽取分布

第五节 使用 Geant4 模拟完整流程

3.5.1 对完整系统的测试

前面进行了正式模拟之前的一些必要工作，经过初步模拟测试和验证，我们确定了模拟的一些参数信息。最终，在结合实际情况的前提下，模拟调整后的靶如图3.23所示，左下方的薄片几何是尺寸为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 0.1\text{ cm}$ 的钽靶，作为前置转换靶，接受电子加速器辐照产生韧致辐射电子。右边的长条块状靶是由纯 ^{100}Mo 构成的目标靶，受到韧致辐射光子的轰击生成 ^{99}Mo 。

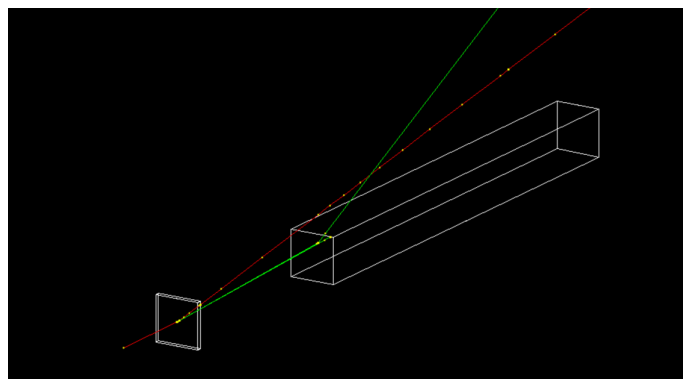


图 3.23 Geant4 中构造的靶材几何

在构建完整个模拟系统之后，我们需要先获取次级粒子的 Track 信息，看看预期产物。首先在 PrimaryGenerator 中设置 10^5 个 20MeV 的电子，让其满足上一节中的随机分布，这些电子作为初始粒子轰击钽靶，产生韧致辐射光子。我们可以获取每个韧致辐射光子的能量并画出能谱，如图3.24。

从该能谱图可以看出，产生的韧致辐射光子的能量最大不超过初始电子的能量，这也与理论相符合，因为韧致辐射是带电粒子在穿越物质时，受到原子

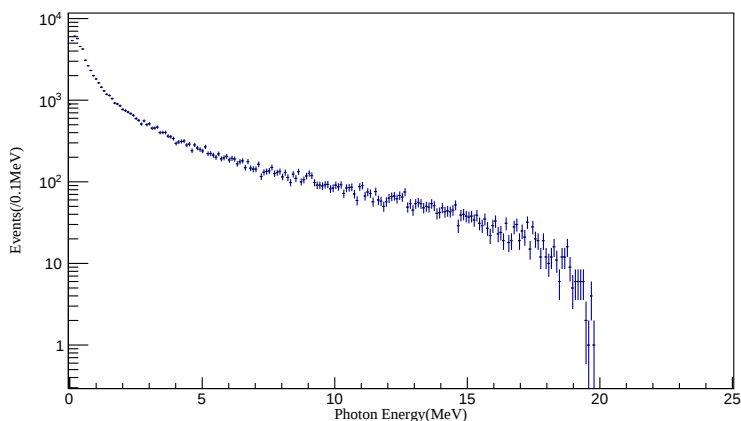


图 3.24 20MeV 电子加速器产生的韧致辐射光子能谱

核的库仑场的影响而减速，将一部分动能以光子的形式发射出来。所以，我们在设置初始电子能量时，至少应该保证其能量不低于 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应的能量阈值。

如上所述，我们可以获取所有粒子的 Track 信息，如图3.25所示，这个表显示了一个光子从产生到转变为其他粒子的整个流程。Track ID 是当前粒子的 ID 号，Parent ID 是其母粒子的 ID 号，在这里，光子的母粒子一般是电子，因为绝大部分光子都是通过韧致辐射得到。除此之外，这个表中还有一些其他信息，粒子的整条径迹称为 Track，一条 Track 被分为许多小段，每一段叫做 Step，而每个 Step 都是一条线段，由两个端点构成。在这里，X, Y, Z 就是该段 Step 起始端点的位置坐标，Process 是该 Step 末端经历的物理过程。一般来说，不管是初始粒子还是次级粒子，第一个 Step 对应的 Process 都是 initStep，如果这个粒子发生了反应生成了新次级粒子或损失了能量，最后一段 Step 的 Process 就会对应显示这个过程。

除了该光子的 Track 信息，图3.25下半部分还有 List of secondaries，显示出了光子通过 photonNuclear 这一步，也就是光核反应过程产生的所有次级粒子。根据反应式1.4， ^{100}Mo 受到适宜能量的光子辐照会被打出一个中子，生成 ^{99}Mo ，表中的次级粒子恰好含有一个 ^{99}Mo 和一个中子，剩下的光子应该是反应释放的能量。

并且我们很容易证明其中每个 ^{99}Mo 的来源，看其是否由 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应产生。如图3.26，该 ^{99}Mo 的 Parent ID 为 503944，正好是图3.25中光子的

```

* G4Track Information: Particle = gamma, Track ID = 503944, Parent ID = 31053
*****
Step#    X          Y          Z          KineE          dEStep    StepLeng  TrakLeng  Volume  Process
0    -556.2 um    1.227 mm    -153 um    17.73 MeV      0 eV      0 fm      0 fm      TaLayer  initStep
1    -613.3 um    1.192 mm     500 um    17.73 MeV      0 eV      656.4 um    656.4 um    TaLayer  Transportation
2    -1.051 mm    923.9 um     5.5 mm    17.73 MeV      0 eV      5.026 mm    5.683 mm    WaterLayer Transportation
3    -1.139 mm    870.3 um     6.5 mm    17.73 MeV      0 eV      1.005 mm    6.688 mm    SteelLayer Transportation
4    -5.516 mm    -1.807 mm    5.65 cm    17.73 MeV      0 eV      5.026 cm    5.695 cm    World    Transportation
5    -5.603 mm    -1.86 mm     5.75 cm    17.73 MeV      0 eV      1.005 mm    5.796 cm    MoLayer  Transportation
6    -5.691 mm    -1.914 mm    5.85 cm    17.73 MeV      0 eV      1.005 mm    5.896 cm    MoLayer  Transportation
7    -5.778 mm    -1.967 mm    5.95 cm    17.73 MeV      0 eV      1.005 mm    5.997 cm    MoLayer  Transportation
8    -5.866 mm    -2.021 mm    6.05 cm    17.73 MeV      0 eV      1.005 mm    6.097 cm    MoLayer  Transportation
9    -5.891 mm    -2.036 mm    6.078 cm    0 eV           0 eV      283.5 um    6.125 cm    MoLayer  photonNuclear

-- List of secondaries -----
Mo99[684.100]: energy = 36.94 keV time = 1.238 ns
neutron: energy = 2.777 MeV time = 1.238 ns
gamma: energy = 4.4 MeV time = 1.238 ns
gamma: energy = 1.055 MeV time = 1.238 ns
gamma: energy = 481.5 keV time = 1.238 ns
:-----

```

图 3.25 20MeV 电子加速器轰击完整靶材系统的部分 Track 信息表 1

Track ID，也就是说这个 ^{99}Mo 直接来源于发生光核反应的光子；换个说法，光子通过光核反应生成了这个 ^{99}Mo ，反应场所正好在钼靶中。

```

* G4Track Information: Particle = Mo99[684.100], Track ID = 503945, Parent ID = 503944
*****
Step#    X          Y          Z          KineE          dEStep    StepLeng  TrakLeng  Volume  Process
0    -5.891 mm    -2.036 mm    6.078 cm    36.94 keV      0 eV      0 fm      0 fm      MoLayer  initStep
1    -5.891 mm    -2.036 mm    6.078 cm    0 eV           36.94 keV  44.37 nm    44.37 nm    MoLayer  ionIoni

```

图 3.26 20MeV 电子加速器轰击完整靶材系统的部分 Track 信息表 2

不过，我们还可以从 Track 信息表中找到该反应的副产物，如图3.27，光子轰击 ^{100}Mo 发生光核反应还有可能打出两个中子，生成 ^{98}Mo 。图3.28是 ^{100}Mo 的几种光核反应截面，可以看出 $^{100}\text{Mo}(\gamma, 2n)^{98}\text{Mo}$ 的反应截断值在 14.2MeV 左右，高于 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 。

```

G4WT0 > * G4Track Information: Particle = gamma, Track ID = 4, Parent ID = 1
G4WT0 > *****
G4WT0 >
G4WT0 > Step#    X          Y          Z          KineE          dEStep    StepLeng  TrakLeng  Volume  Process
G4WT0 > 0    -1.86 mm    -1.958 mm    98.97 um    19.31 MeV      0 eV      0 fm      0 fm      TaLayer  initStep
G4WT0 > 1    -1.768 mm    -1.953 mm    500 um    19.31 MeV      0 eV      411.5 um    411.5 um    TaLayer  Transportation
G4WT0 > 2    9.736 mm    -1.288 mm    5.05 cm    19.31 MeV      0 eV      5.131 cm    5.172 cm    World    Transportation
G4WT0 > 3    9.937 mm    -1.277 mm    5.137 cm    0 eV           0 eV      895.2 um    5.262 cm    MoLayer  photonNuclear
G4WT0 >
G4WT0 > ----- List of secondaries -----
G4WT0 > Mo98: energy = 43.09 keV time = 1.843 ns
G4WT0 > neutron: energy = 1.323 MeV time = 1.843 ns
G4WT0 > neutron: energy = 294.9 keV time = 1.843 ns
G4WT0 > gamma: energy = 2.644 MeV time = 1.843 ns
G4WT0 > gamma: energy = 787 keV time = 1.843 ns
G4WT0 > :-----

```

图 3.27 20MeV 电子加速器轰击完整靶材系统的部分 Track 信息表 3

同时， $^{100}\text{Mo}(\gamma, 3n)^{97}\text{Mo}$ 反应也有几率发生，不过因为该反应截断值更高，20MeV 电子加速器不足以产生足够能量的光子驱动该反应。所以后面还需考虑副产物的产额，已确定最优电子加速器能量。

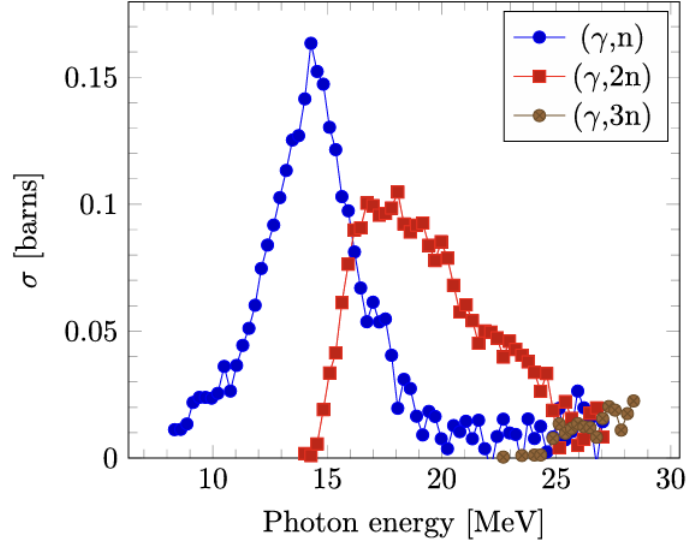


图 3.28 ^{100}Mo 光核反应截面 [29]

我们还可以得到产物 ^{99}Mo 在钼靶中的位置分布，不过 10^5 个电子得不到足够的样本量，所以我们增加初始发射的电子数，设置 10^7 个 20 MeV 的电子来扩大样本。

上面提到，目标钼靶的尺寸为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ ，我们可以记录下产生的 ^{99}Mo 的空间分布。在 X-Y 平面上的分布如图 3.29 所示，可以看到，通过转换靶，产物在靶中 X-Y 平面上的分布较为均匀，且中心相对边缘的密度更高。

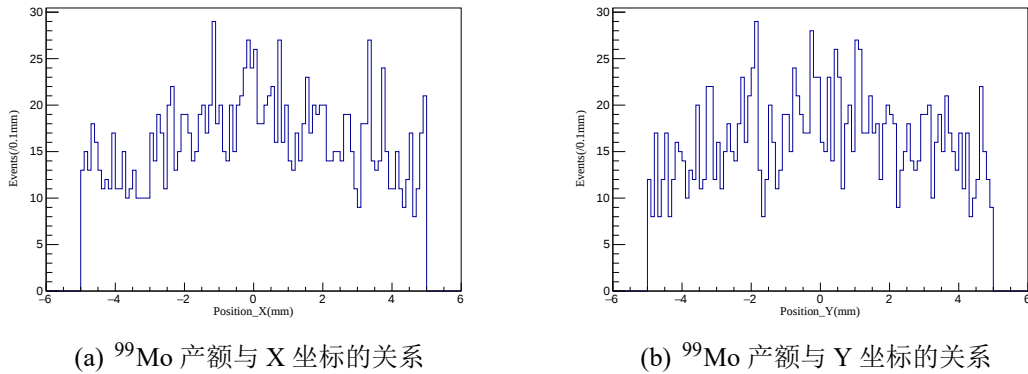


图 3.29 ^{99}Mo 在 X-Y 平面上的分布

通过模拟结果，还能得到在完整系统中最终产物的深度分布。因为产生的 ^{99}Mo 是静止的，而通过 ^{99}Mo 衰变得到的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 也是在相同位置静止，所以可

以通过 ^{99}Mo 的空间分布来反映 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的位置信息。结果如图3.30所示，长度为 100 mm 的钼靶，绝大部分产物都位于前 50 mm，可以推断该系统中的钼靶长度不应太长，因为后半段 ^{99}Mo 的产额很少，过长的钼靶增加不了多少产额。

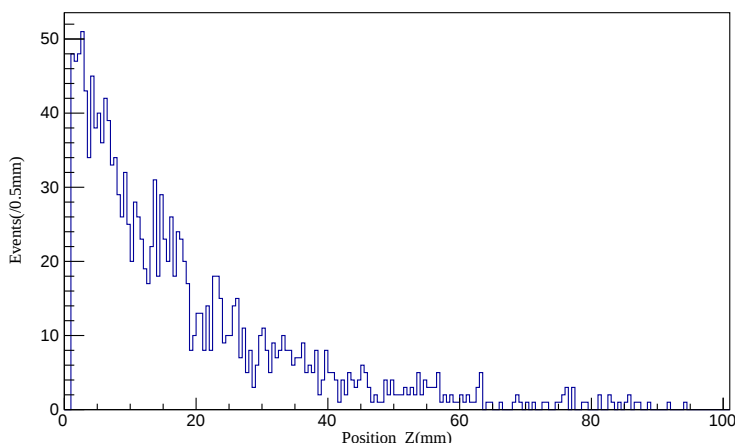


图 3.30 ^{99}Mo 在钼靶中的深度分布

3.5.2 优化电子加速器能量的模拟

通过前面的分析得知，虽然电子加速器能量越大，产生的能够发生 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应的光子越多，但也会带来其他一些缺陷。首先，更高能量的电子加速器产生的高能光子也越多，不过 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应截面最大时对应的光子能量为 14.5 MeV，更高能量的光子反而会有更小的反应截面，不利于提高产额；其次，产生的高能光子可能提高副产物 ^{98}Mo 和 ^{97}Mo 的产额，也会相对减少 ^{99}Mo 的产出；最后就是成本问题，提高电子加速器能量确实能提高单位功率下 ^{99}Mo 的产额，但不可忽视的是，电子加速器的成本也会大幅增加，收益可能并不能弥补成本。所以，我们需要通过 Geant4 进行蒙特卡洛模拟，优化电子加速器的能量，找出最优解。

为了探究电子加速器能量的影响，我们需要设置不同能量的电子加速器，分别让它们轰击靶材系统，统计次级粒子信息。本次模拟在 8.2 ~ 50 MeV 之间每隔 0.1 MeV 设置一个能量点，每个能量点发射 50000 个电子，如图3.31。

发射的电子首先到达前端的钼靶，发生韧致辐射生成光子，通过 Geant4 模拟，我们可以提取所需次级粒子的信息，获得韧致辐射光子能谱，不同能量电子加速器产生的韧致辐射光子能谱如图3.32所示。

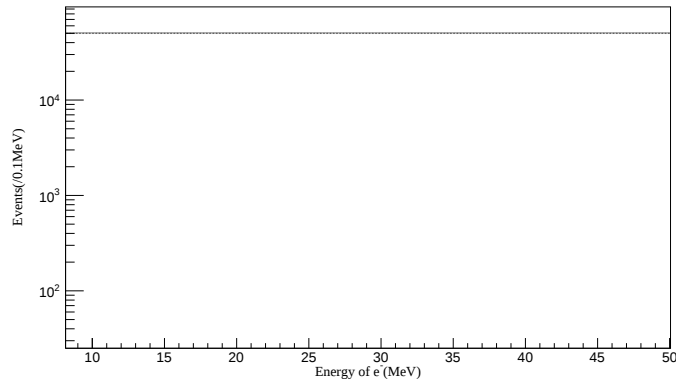


图 3.31 初始电子能量分布

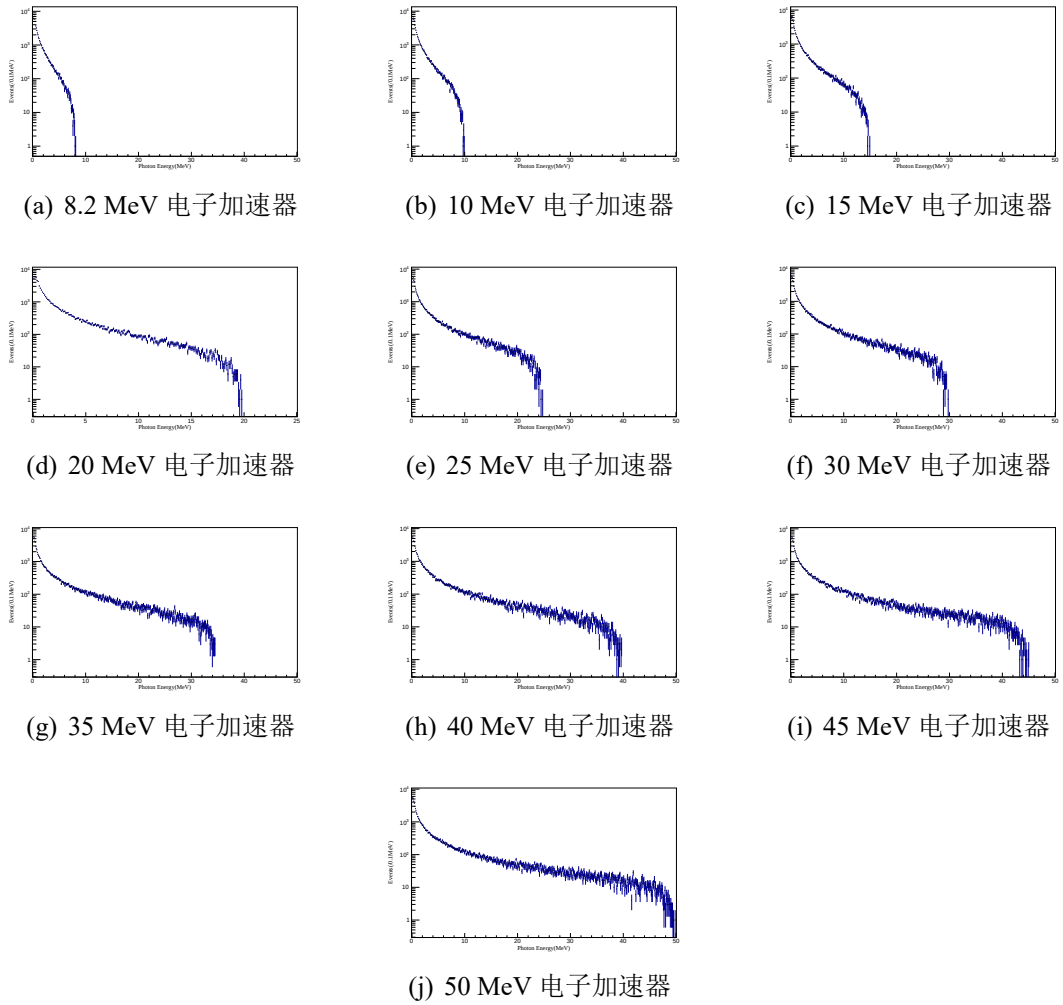


图 3.32 不同能量电子加速器产生的韧致辐射光子能谱

从图中可以看出，不管电子加速器能量是高还是低，通过韧致辐射产生的绝大部分都是能量较低，不能与 ^{100}Mo 发生光核反应的光子，这说明转换靶产生的有效光子比率相对于所有光子较小。除此之外还能得知，光子能量越接近电子加速器能量，其数量也越少，低能光子和接近加速器能量的光子数量级相差巨大。

并且，我们可以将不同能量电子加速器产生的韧致辐射光子能谱放到一起进行对比，如图3.33，其中横坐标是光子能量值，纵坐标是产生的数量，不同颜色代表不同能量的电子加速器，也就是不同能量的初始电子。在较低能区域，不同能量电子加速器产生的光子数量差距并不大，最可几值在 1 MeV 左右。而低能区的光子并未到达 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应的能量阈值，不会驱动光核反应，是不可利用的光子。

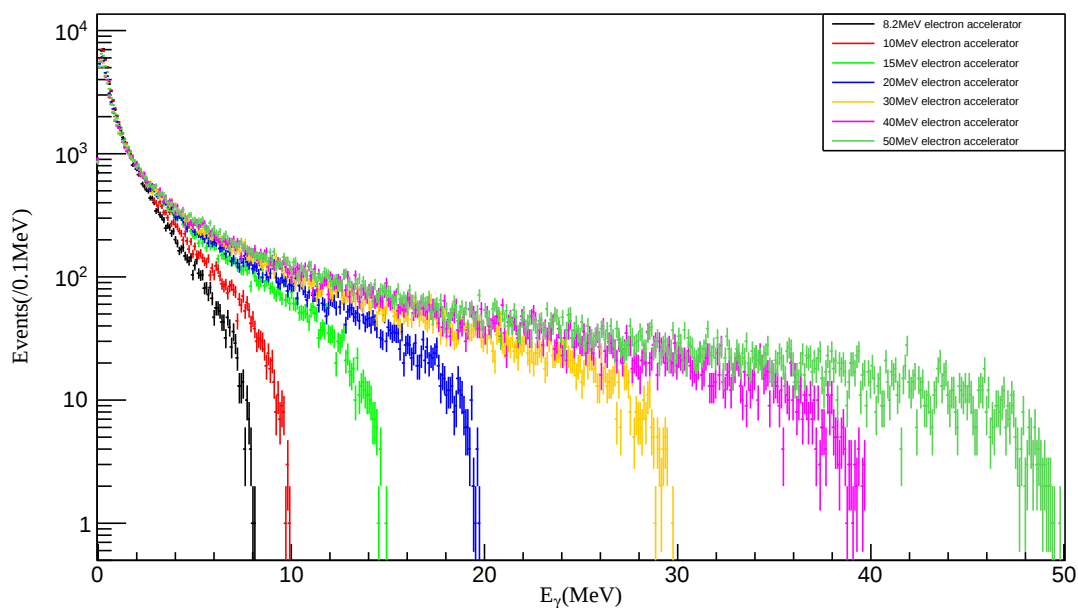


图 3.33 电子加速器产生的韧致辐射光子能谱

为了提升有效光子的数量，当然需要相对地提高电子加速器能量。由于 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应的能量阈值为 8.29 MeV，所以电子加速器的能量必须在这之上，否则产生的光子都不是有效光子，无法得到目标产物 ^{99}Mo 。同时，该光核反应截面最大时对应的能量是 14.5 MeV，所以产生能量在 14.5 MeV 附近的光子越多，预期产额也越大。

我们还可以画出电子产生韧致辐射光子的二维分布，如图3.34。其中横坐标是电子加速器的能量，纵坐标是产生的韧致辐射光子的能量，颜色深浅表示该能量电子加速器产生的某个能量韧致辐射光子数量的多少。二维图也能说明上述结论：电子产生的韧致辐射光子的能量不会高于电子本身的能量，并且产生的绝大部分光子都分布于图中的低能区，在 1 MeV 左右。

产生的韧致辐射光子随后会到达钨靶，钨靶与钨靶相距 5cm，由于产生的光子动量方向并不都垂直于钨靶，有些可能会错过钨靶，这就导致了某些有效光子（能量在反应阈值之上）的损失。下一章我们会展示最终产物 ^{99}Mo 的产额，并加以分析讨论。

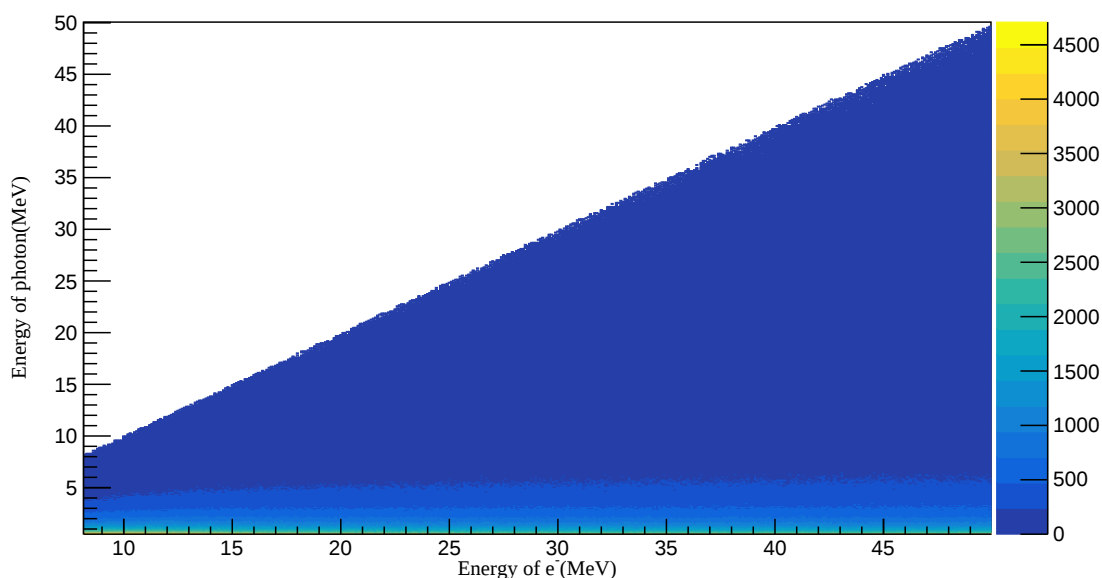


图 3.34 电子加速器产生韧致辐射光子的二维分布

3.5.3 研究副产物的模拟

由于本项目在发生光核反应 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 的同时,还伴随着 $^{100}\text{Mo}(\gamma, 2n)^{98}\text{Mo}$ 和 $^{100}\text{Mo}(\gamma, 3n)^{97}\text{Mo}$ 的发生,我们需要通过进一步模拟去探究压低副产物 ^{98}Mo 和 ^{97}Mo 的方法。此次模拟不设置转换靶,让一定能量的光子直接轰击纯的 ^{100}Mo 靶,分别统计 ^{99}Mo 、 ^{98}Mo 和 ^{97}Mo 的产额。

已知 $^{100}\text{Mo}(\gamma, 2n)^{98}\text{Mo}$ 反应的截断值为 14.5 MeV,峰值在 17 ~ 18 MeV 之间; $^{100}\text{Mo}(\gamma, 3n)^{97}\text{Mo}$ 反应的截断值为 25 MeV 左右^[30]。我们设置光子的能量在

7 ~ 35 MeV 之间，每间隔 0.1 MeV 定一个能量点，每个能量点发射 10^6 个光子，让它们直接辐照钨靶，最终画出钨的几种同位素的产额随光子能量的变化，该结果会在下一章阐述。

3.5.4 辐射防护的模拟

在光核反应中，高能光子与原子核相互作用，可能导致核子（如中子）从原子核中被击出。这些中子在反应过程中可能无法被靶材完全吸收，从而飞出靶材系统，到达外部环境。在这种情况下，辐射防护在设计整个实验时至关重要，我们需要进行详细的辐射防护模拟。

辐射防护模拟与优化电子加速器能量的模拟需要用到的靶材系统一样，都是让电子轰击转换靶，再利用转换靶产生的韧致辐射光子辐照钨靶，这个模拟的加速器能量值设置为 20 MeV，较为适中。同时，我们为整个模拟系统设定一个边界，看中子是否会射出边界，该边界是一个边长为 80 cm，包围整个靶材系统的立方体。如果有中子能到达边界外，我们就记录下来，这些中子都是需要另外设置屏蔽材料进行吸收的。同样的，下一章会给出这部分的模拟结果。

第四章 模拟结果和讨论

本项目是基于 Geant4 的加速器法制备医用核素钼-99m 的模拟及优化，上文介绍了优化电子加速器能量模拟的整个过程，包括模拟前的验证、完整系统的参数设置和正式模拟部分。本章将展示该模拟的具体结果，主要是不同能量电子加速器对应的 ^{99}Mo 产额，通过该结果分析最优电子加速器能量值。此外，副产物也需要加以考虑，过多副产物的产生不利于后续药品的分离提取，所以何种能量的电子加速器在保证 ^{99}Mo 产额的前提下能压低副产物的产出也需要模拟进行确定。

第一节 优化电子加速器能量的模拟结果

图4.1表示了 ^{99}Mo 的产额，横坐标是电子加速器的能量，纵坐标是该能量对应的 ^{99}Mo 绝对产额。从该图能够看出，电子加速器能量越高，对应的产额也越高，这符合理论预期。

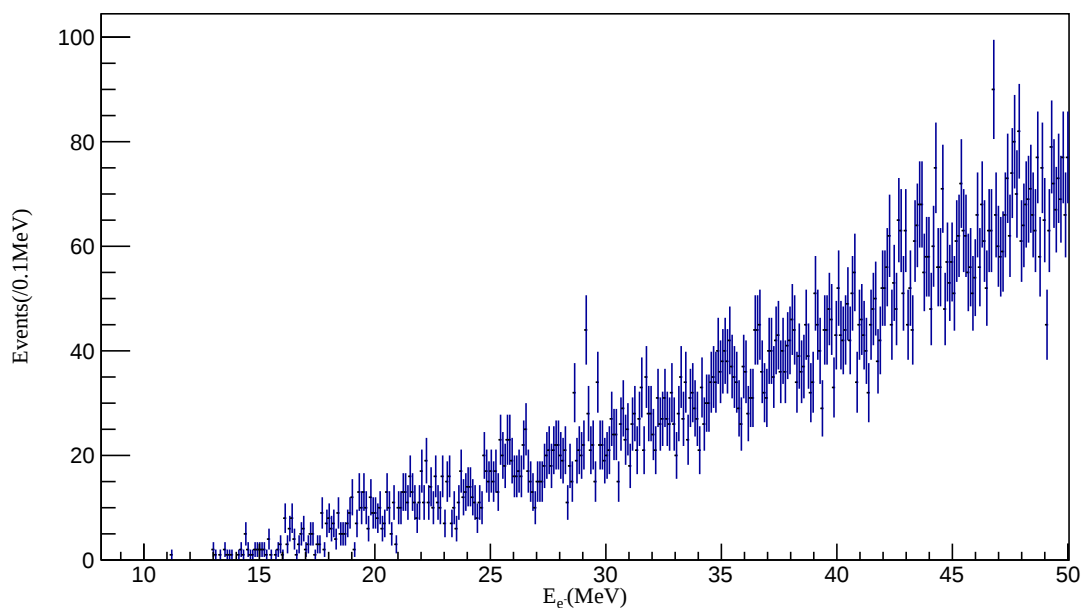


图 4.1 不同能量电子加速器的 ^{99}Mo 产额

但是，这个数据并不能直接用来评判最优能量值，因为多出产额的效益需要相对更高能的加速器，成本大大提高。我们可以采取和通量加权平均截面相似的方法计算相对产额，通量加权截面的计算方法如式4.1：

$$\sigma_a = \frac{\Sigma\varphi(E)\sigma_{GDR}(E)}{\Sigma\varphi(E > E_{th})}, \quad (4.1)$$

式中 $\varphi(E)$ 和 $\sigma_{GDR}(E)$ 是能量为 E 的光子数量和光子能量为 E 时 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 的反应截面， $\Sigma\varphi(E > E_{th})$ 是大于阈值能量的所有光子数量， $E_{th} = 8.29 \text{ MeV}$ 。通量加权平均截面通常用于描述在某种入射粒子的通量分布下，某种核反应的平均截面，表达的是该反应的平均发生概率，比单纯的反应截面更有实际意义，因为入射粒子通量一般是不均匀的，不同能量粒子对反应的贡献也不同。

同样的，我们可以计算出 ^{99}Mo 的相对产额，令相对产额为 Y ，计算 Y 的表达式为

$$Y = \frac{Q}{N_{\gamma(E \geq E_{th})}}, \quad (4.2)$$

其中， Q 代表该电子枪能量下的绝对产额，而 $N_{\gamma(E \geq E_{th})}$ 是当前能量的电子枪产生的所有大于 (γ, n) 反应阈值能量的光子数量，这里 $E_{th} = 8.29 \text{ MeV}$ 。计算结果如图4.2所示。该图横坐标是不同电子加速器的能量值，纵坐标是上图计算的相对产额 Y 。

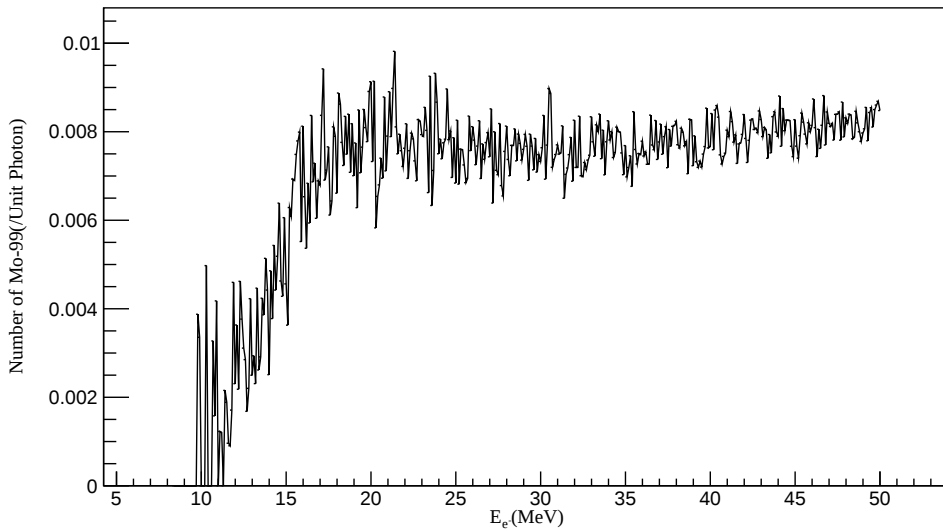


图 4.2 不同能量电子加速器的 ^{99}Mo 的相对产额

这样计算相对产额 Y 的理由也很简单，在绝对产额的分布图中，横坐标是电子加速器的能量，但是，光核反应的母粒子是合适能量的光子而非电子。电子加速器发射的大量初始电子会首先到达钽靶，根据韧致辐射效应，电子到达靶材中原子核附近时会被电场影响并改变其路径。当电子的速度发生了变化，韧致辐射光子就会被激发。而这些韧致辐射光子的能量就在 0 到入射电子能量的范围内。而产生的光子才是驱动光核反应的入射粒子，所以计算时的入射粒子都应带入光子。

图4.2可以清晰显示出相对产额随电子加速器能量的变化趋势：在 20 MeV 之前，电子加速器能量越高，相对产额也就越高，呈稳步上升态；而在电子加速器能量到达 21 MeV 左右时，相对产额不仅不随能量增加，反而还有些许下降趋势，这说明虽然更高能量的电子加速器能产生更多可以反应的韧致辐射光子，但绝对产额的提升量相对较少，效率反而下降。

对比图4.3计算的通量加权平均截面，横坐标为电子加速器的能量值，纵坐标是计算的归一化通量加权平均截面，可以看到，文献中计算的最大反应截面对应的能量值为 25 MeV，之后增加电子加速器的能量反而会引起平均截面的下降。

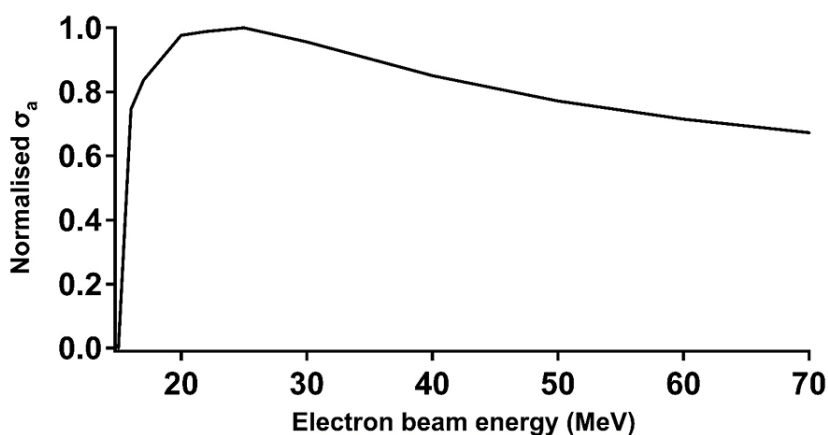


图 4.3 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应的归一化通量加权平均截面^[24]

由于统计误差，模拟结果可能与理论计算有一定程度的差异，但整体趋势基本符合，所以可以进行初步分析，电子加速器的能量设置在 20 ~ 30 MeV 之间是较为合适的。

第二节 研究副产物的模拟结果

前面提到，光子轰击钼靶发生的光核反应不只有 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 一种，还可能发生 $^{100}\text{Mo}(\gamma, 2n)^{98}\text{Mo}$ 和 $^{100}\text{Mo}(\gamma, 3n)^{97}\text{Mo}$ 。所以我们设计了另外一个模拟系统，用以统计副产物产额随光子能量变化的情况，为进一步优化电子加速器能量提供模拟数据的支撑。

每间隔 0.1 MeV 设置一个能量点，每个能量点发射 10^6 个光子，让它们直接辐照钼靶，我们将结果画到一张图上，如图4.4，横坐标是初始发射的光子能量，纵坐标是钼的同位素产额。红色是 ^{100}Mo 发生 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应生成 ^{99}Mo 的绝对产额，相应的，黑色代表发生 $^{100}\text{Mo}(\gamma, 2n)^{98}\text{Mo}$ 反应生成的 ^{98}Mo 的产额，绿色对应 ^{97}Mo 的产额。

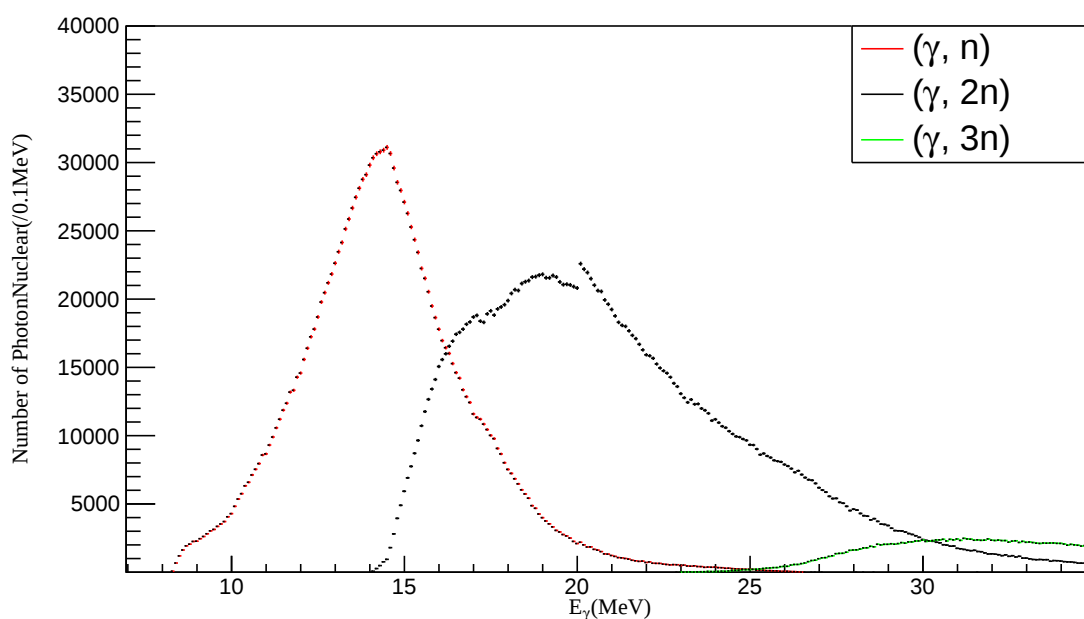


图 4.4 ^{99}Mo 、 ^{98}Mo 、 ^{97}Mo 的产额与光子能量的关系

并且，我们可以将该结果与现有理论进行对比，理论计算的 ^{100}Mo 的光核反应截面如图4.5。对比看到，模拟得到的各反应光子能量截断值和理论符合， $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 截断值为 8.2 MeV， $^{100}\text{Mo}(\gamma, 2n)^{98}\text{Mo}$ 和 $^{100}\text{Mo}(\gamma, 3n)^{97}\text{Mo}$ 的截断值分别在 14.5 MeV 和 24 MeV 左右。

为了抑制副产物的产生，电子加速器的能量不应过高，因为能量大于 20 MeV 的光子会让我们的期望反应 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 截面骤降，同时 $^{100}\text{Mo}(\gamma, 2n)^{98}\text{Mo}$

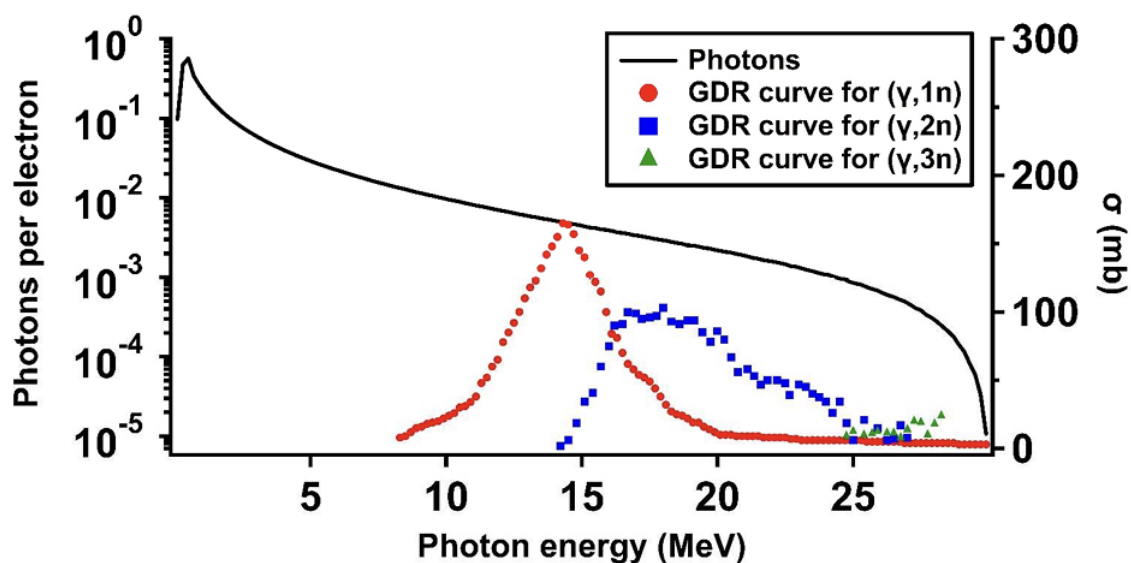


图 4.5 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 、 $^{100}\text{Mo}(\gamma, 2n)^{98}\text{Mo}$ 、 $^{100}\text{Mo}(\gamma, 3n)^{97}\text{Mo}$ 反应截面^[24]

反应截面会达到峰值；能量继续提高，会超过 $^{100}\text{Mo}(\gamma, 3n)^{97}\text{Mo}$ 的截断值，生成 ^{97}Mo 。通过之前模拟的结果得知，电子加速器能量越高，产生的韧致辐射光子也越多，但大部分光子的能量都在 1 MeV 附近，低于 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应的阈值能量，无法发生光核反应。

虽然在光子能量大于 20 MeV 时， ^{98}Mo 的生成概率远大于 ^{99}Mo ，但需要结合韧致辐射能谱分析，30 MeV 的电子加速器相较于 20 MeV 的电子加速器来说，产生的有效光子也更多，所以最终的 ^{99}Mo 产额肯定更多。而如果加速器的能量过高，达到 50 MeV 甚至 60 MeV，最终产生的韧致辐射光子中，能发生 $^{100}\text{Mo}(\gamma, 2n)^{98}\text{Mo}$ 和 $^{100}\text{Mo}(\gamma, 3n)^{97}\text{Mo}$ 的远远多于能发生 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 的数量，这当然不是我们想看到的。

第三节 辐射防护的模拟结果

辐射防护的模拟中，我们将电子加速器的能量设置为 20 MeV，靶材系统依旧沿用模拟完整流程所使用的，将初始电子的数量定为 10^6 个，统计中子辐射能谱。

辐射能谱如图4.6所示，可以看到，大部分出射的中子能量都小于 3 MeV，还有较小部分的中子能量分布在 3 ~ 10 MeV 之间。目前已知，MeV 量级的中子能够穿透较厚的材料，并对人体组织有很强的破坏性，能够直接损伤细胞和

DNA，导致辐射病或癌症。所以，我们需要在靶材系统外再构建一个隔离防护材料，以有效保护制备过程的安全稳定。

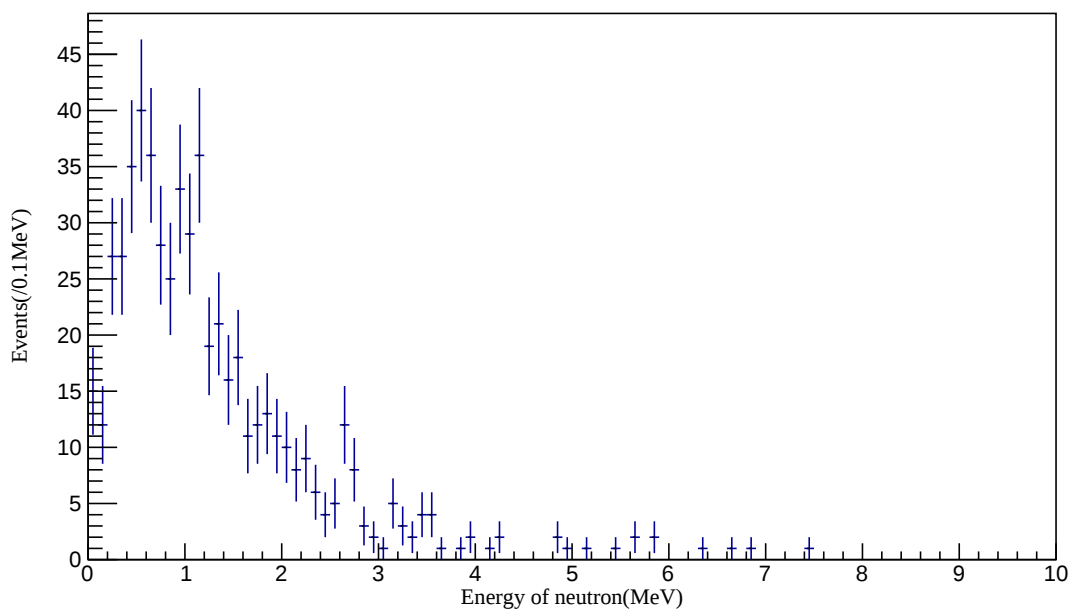


图 4.6 反应过程中的中子辐射能谱

对于这些中子辐射，可以先用石蜡或聚乙烯等等富含氢的材料有效地减缓中子的能量；而后，在外层再加上重金属屏蔽层吸收中子减速后产生的次级 γ 射线。并且，在制备室可以使用专业的中子探测器进行实时监测，确保辐射水平在安全范围内。

第五章 总结与展望

第一节 结论

在当今世界形势下，电子加速器法制备医用核素 ^{99}mTc 已成为未来最有希望的商业化生产方式，所以现在需要大力研究该方法的整个流程，包括前面制备 ^{99}Mo 的部分和从钼靶中将 ^{99}Mo 和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 分离的过程。对于前一部分，需要确定最优的电子加速器能量值，这一部分一般都是通过实验完成。但是电子加速器的造价昂贵，不可能买许多不同能量的电子加速器进行实验，这时候，Geant4就是我们可以利用的工具。我们完全可以利用 Geant4 进行早期的模拟，初步确定最佳能量的范围，实验时就能在该范围内花更少的代价确定最优能量。本研究主要是利用 Geant4 模拟电子加速器法制备 ^{99}Mo 的整个流程，并确定最优能量的大致范围。

本研究在正式模拟之前先将验证结果与理论进行对比，模拟系统中各反应截面能有效符合理论计算，保证了可靠性。而后设计了完整的靶材系统去优化电子加速器的能量，我们的设置了由钽构成的转换靶和钼构成的目标靶，让电子加速器辐照转换靶。首先得到了不同能量电子加速器产生的韧致辐射光子能谱，得知光子能量分布范围，而后得到 ^{99}Mo 产额随电子加速器能量的关系。不过绝对产额并不能很好的用来优化加速器能量值，因为更高能量的电子加速器需要更高的成本，而单位功率的 ^{99}Mo 产额提升有限，效益难以填补成本。所以我们定义了相对产额，相对产额变化趋势为：在 20 MeV 之前，电子加速器能量越高，相对产额也就越高，呈稳步上升态；而在电子加速器能量到达 21 MeV 左右时，相对产额不仅不随能量增加，反而还有些许下降趋势，这说明虽然更高能量的电子加速器能产生更多可以反应的韧致辐射光子，但绝对产额的提升量相对较少，效率反而下降。这样确定最优电子加速器能量在 20 MeV 左右，不超过 30 MeV。

并且，本研究还研究了该过程产生的副产物 ^{98}Mo 和 ^{97}Mo ，它们也是由光核反应生成，反应阈值分别为 14.5 MeV 和 24 MeV。在增加电子加速器能量的过程中，要尽量避免生成过多副产物，于是可以得到不同能量电子加速器下几

种同位素的产额，我们的模拟结果与理论计算符合得很好。最后还进行了辐射防护的模拟，发现有 MeV 量级的中子辐射出来，在实验或制备过程中需要设置吸收屏蔽材料以保证安全。

第二节 进一步工作的方向

在这阶段工作中主要是针对电子加速器能量的优化，提供了合适能量的范围，为实验提供数据支撑。但是，靶材的几何参数也需要考虑，优化能量过程中可以采用简单的几何形状，但在制备过程中需要考虑实际情况，便捷、安全是优先考虑的点。所以，钼靶的具体参数需要经过更深入的调研来确定，并经过模拟进行优化。

还有一点需要考虑的就是产物 ^{99}Mo 在生产过程中也可能发生衰变， ^{99}Mo 衰变为 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的半衰期为 66.02 h，因为分离提取过程主要是将锝元素与钼元素进行分离，所以我们需要计算 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 产额。不过这一点在 Geant4 中较难实现， $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反应截面较小，所以要获得大量的样本需要几百甚至上千倍的初始粒子；并且一个粒子是否衰变在随机数种子确定时就已经确定了，会直接给出粒子寿命。所以这部分的研究最好是依靠实验完成。

参考文献

- [1] 中国核学会. 2016-2017 核技术应用学科发展报告[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2018.
- [2] CHARLTON K. The future of medical isotope supply-2017 status update[J]. NEA News, 2017, 35(1): 13.
- [3] GRIFFITHS M R, PATTISON D A, LATTER M, et al. First-in-Human ^{212}Pb -PSMA-Targeted α -therapy SPECT/CT imaging in a patient with metastatic castration-resistant prostate cancer[J]. Journal of Nuclear Medicine, 2024, 65(4): 664-664.
- [4] PONSARD B. MO-99 Supply Issues: Status Report and Lessons Learned[R]. Belgium: BR2 Reactor, SCK.CEN, 2010.
- [5] 罗志福. 放射性同位素技术进展[R]. 中国北京: 中国（国际）核技术应用产业发展论坛, 2021.
- [6] JANG J, KUMAKURA Y, TATENUMA K, et al. A preliminary biodistribution study of [$^{99\text{m}}\text{Tc}$] sodium pertechnetate prepared from an electron linear accelerator and activated carbon-based $^{99\text{m}}\text{Tc}$ generator[J]. Nuclear Medicine and Biology, 2022, 110: 1-9.
- [7] HARVEY J, ISENSEE G, MESSINA G, et al. Domestic Production of Mo99[C]//Mo-99 Topical Meeting, Santa Fe, New Mexico December. 2011: 4-7.
- [8] BORTS B V, SKOROMNAYA S F, TKACHENKO V I, et al. Separation of Molybdenum Isotopes at Supercritical Fluid Extraction with Carbon Dioxide in a Vertical Gradient Field of Temperatures[J]. Open Journal of Metal, 2020, 10(01): 1.
- [9] Nuclear Newswire. NorthStar marks milestone in non-uranium production of Mo-99 [EB/OL]. <https://www.ans.org/news/article-4639/northstar-marks-milestone-in-nonuranium-production-of-mo99/>.
- [10] KUGER F. Signal formation processes in micromegas detectors and quality control for large size detector construction for the ATLAS new small wheel[D]. Wurzburg U., 2017.
- [11] BERGER M J, SELTZER S M. Tables of energy losses and ranges of electrons and positrons[R]. National Bureau of Standards, Washington, DC, 1964.
- [12] ROSSI B, FRETTER W B. High-Energy Particles[J]. American Journal of Physics, 1953, 21(3): 236-236.
- [13] FABJAN C W, FOURNIER D. Calorimetry[M]//FABJAN C W, SCHOPPER H. Particle Physics Reference Library: Volume 2: Detectors for Particles and Radiation. Cham: Springer International Publishing, 2020: 201-280.
- [14] 汪晓莲, 李澄, 邵明, 等. 粒子探测技术[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [15] MARMIER P, SHELDON E. Physics of Nuclei and Particles: vol. 1[M]. New York: Academic Press, 1969.

- [16] KLEIN O, NISHINA Y. Über die Streuung von Strahlung durch freie Elektronen nach der neuen relativistischen Quantendynamik von Dirac[J]. Zeitschrift für Physik, 1929, 52(11): 853-868.
- [17] BURCHAM W E, JOBES M, HENLEY E M. Nuclear and particle physics[M]. Longman Burnt Mill, 1995.
- [18] ZILGES A, BALABANSKI D, ISAAK J, et al. Photonuclear reactions—From basic research to applications[J]. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2022, 122: 103903.
- [19] 顾复华. 光核反应研究概况[J]. 物理, 1982, 11(2): 69-76.
- [20] GORIELY S, PÉRU S, COLÒ G, et al. E1 moments from a coherent set of measured photoneutron cross sections[J]. Phys. Rev. C, 2020, 102: 064309.
- [21] BOTHE W, GENTNER W. Atomumwandlungen durch γ -Strahlen[J]. Zeitschrift für Physik, 1937, 106: 236-248.
- [22] Laboratoire National Henri Becquerel. Tc-99m Decay Data Tables[EB/OL]. https://web.archive.org/web/20160804083942if_/http://www.nucleide.org:80/DDEP_WG/Nuclides/Tc-99m_tables.pdf.
- [23] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K A, et al. GEANT4—a simulation toolkit[J]. Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, 506(3): 250-303.
- [24] SHAIKH A, DIXIT T, DESHPANDE A, et al. GEANT4 based simulation study of converter and direct target design and optimization of target for ^{99}Mo production using 30 MeV electron linear accelerator[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2022, 185: 110239.
- [25] O'DELL JR A, SANDIFER C, KNOWLEN R, et al. Measurement of absolute thick-target bremsstrahlung spectra[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1968, 61(3): 340-346.
- [26] 周南, 乔登江. 脉冲束辐照材料动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [27] LONG J D, LIN Y Z, LUO F, et al. Destruction Study of Tantalum Target Impacted by 12MeV Electron Beam[J]. Chinese Physics C, 2004, 28(5): 564-568.
- [28] IMSEE. 高频高压电子加速器[EB/OL]. https://web.archive.org/web/20160804083942if_/http://www.nucleide.org:80/DDEP_WG/Nuclides/Tc-99m_tables.pdf.
- [29] TSECHANSKI A, FEDORCHENKO D, STAROVOITOVA V, et al. Converter optimization for photonuclear production of ^{99}Mo [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2019, 461: 118-123.
- [30] BEIL H, BERGERE R, CARLOS P, et al. A study of the photoneutron contribution to the giant dipole resonance in doubly even Mo isotopes[J]. Nuclear Physics A, 1974, 227(3): 427-449.

致谢

时光荏苒，光阴似箭，三年的硕士生涯即将结束。硕士研究生就读期间，我不仅学习了高能物理知识，还理解了科研方法、科研思维。在此我特别感谢我的导师赵明刚老师，赵老师治学严谨，待人亲近，幽默风趣，在本科期间就带我进入了高能物理实验的大门，从基础开始，循序渐进，教会了我许多知识。在科研方面外，赵老师会通过一个个的趣事告诉我为人处世的道理。同时，我由衷的感谢复旦大学的王小龙老师，在他的指导下逐步学习 **Geant4** 模拟和硬件相关知识。并且，王老师还提供了可以用来模拟的服务器，极大优化了模拟工作。在进行 **Belle II** 实验相关的科研工作时，会遇到各种困难，这时候我总会去请教殷俊昊老师，殷老师也不厌其烦地为我解答；在日本参加学术会议时，也是殷老师一直在悉心照顾我，在此我特别感谢殷俊昊老师。

此外，我也由衷感谢一直帮助我的师兄师姐和同门，特别是高宝胜师兄，是他在我学习 **Geant4** 时帮助我解决一系列问题，在我迷茫时与我进行讨论。我还要感谢我的室友和朋友，大家的和睦相处为这几年的学习生活提供了良好的环境。

最后我要感谢我的父母，他们含辛茹苦将我抚育长大，并时刻不忘教育我如何成人，进而如何成事。在我孤独的时候，有他们陪伴；失意的时候，有他们安慰；迷茫的时候，有他们指导。可以说，没有我的父母，也就没有我的今天，我永远爱我的父母。当然，其他亲朋好友也在我需要的时候给予我帮助，助我前行，在背后一直支持着我。

在此，我感谢身边的每一个人。

个人简历

姓名：陈康

出生日期：2000 年 7 月 31 日

教育背景：

2018 年 9 月-2022 年 7 月 南开大学 物理科学学院 物理学类 学士

2022 年 9 月-2025 年 7 月 南开大学 物理科学学院 物理学 硕士