

粒子探测器



MONTE CARLO
SIMULATION OF
PARTICLE DETECTORS

蒙特卡罗模拟

宋玉收 刘辉兰 李伟 著



重庆大学出版社

<http://www.cqsp.com.cn>

粒子探测器

LIZITANCEQI
MENGTEKALUO
MONI

蒙特卡罗模拟

宋玉收 刘辉兰 李伟 著

重庆大学出版社

内容提要

本书第1章介绍了蒙特卡罗方法的基本思想和发展历程,及其适合进行辐射探测器模拟的优点,并讲述了进行蒙特卡罗模拟的基本步骤。第2章结合简化的中子输运问题对蒙特卡罗方法进行关于粒子输运方法的应用介绍。在使用蒙特卡罗方法解决粒子输运问题的过程中,其核心内容是根据粒子与物质相互作用的密度分布函数进行抽样。第3章针对不同的入射粒子与物质相互作用和涉及分布函数进行了阐述。第4章对变量随机抽样的一般方法进行了介绍,并针对粒子探测器可能用到的分布抽样结合实例进行了探讨。第5章对探测器的几何建模进行讨论。在粒子输运基础上,第6章针对不同类型探测器类型(主要是闪烁体)的响应处理方法进行介绍。第7章对蒙特卡罗方法常用的减小方差的方法进行了举例介绍。

图书在版编目(CIP)数据

粒子探测器蒙特卡罗模拟 / 宋玉收,刘辉兰,李伟
著. —重庆:重庆大学出版社,2016.1
ISBN 978-7-5624-9637-3

I. ①粒… II. ①宋… ②刘… ③李… III. ①粒子探
测器—蒙特卡罗法—模拟 IV. ①O572.21

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第010938号

粒子探测器蒙特卡罗模拟

LIZI TANCEQI MENGTEKALUO MONI

宋玉收 刘辉兰 李伟 著

策划编辑:张慧梓

责任编辑:文 鹏 邓桂华 版式设计:张慧梓

责任校对:贾 梅 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:易树平

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路21号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆川渝彩色印务有限公司印刷

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:9.5 字数:145千

2016年5月第1版 2016年5月第1次印刷

ISBN 978-7-5624-9637-3 定价:38.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前 言

近年来,随着核科学与技术行业的发展,辐射探测技术的应用几乎遍及了工业、农业、医疗卫生、海关检查、科学研究等每一个领域。比如医学上的 CT、工业上的无损探伤、各种安检装置等。由于实际需求的推动,各种功能强大、结构复杂的辐射探测装置和谱仪不断被研究、开发和使用,在这种背景下,早期的探测器开发和研究方法已经不能适应需求。

目前各科研机构和设备开发公司普遍采用计算机模拟辅助探测器设计的思路。蒙特卡罗方法作为一种通用的数值方法,具有收敛速度与问题维度无关、误差容易确定和受几何条件限制小等特点。它在武器物理、反应堆临界安全分析、燃料循环、辐射输运计算、石油测井、物探、统计物理、生物医学、量子力学、分子动力学、金融、信息和航天等领域得到了广泛的应用。蒙特卡罗方法是一种随机数方法,与载能粒子在探测介质中的物理过程相似。因此,该方法就成了科研工作者和工程师们进行探测器辅助设计的重要手段。

本书内容主要基于作者在科学研究和设备开发中的相关工作。将粒子探测器的蒙特卡罗模拟分为几何建模、源项设定、粒子输运、探测器响应等几个要素分别进行讲解。鉴于粒子探测器的种类繁多,而作者知识和本书篇幅有限,不可能面面俱到给出所有探测器的模拟方法;而是主要以闪烁体探测器为例,力求将基本方法和实践经验介绍给读者。

本书的出版得到了国家自然科学基金(11205036)和中央高校基本科研业务费专项资金(HEUCFD1511)支持,在此表示感谢。虽然作者和编辑进行了多次修改、校对,但是时间仓促、作者能力有限,书中的缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

著 者
2015 年 12 月

目 录

1 绪 论	1
1.1 蒙特卡罗方法简介	1
1.1.1 蒙特卡罗方法的原理	1
1.1.2 收敛性	3
1.1.3 误 差	3
1.2 蒙特卡罗方法的起源	4
1.3 粒子输运的蒙特卡罗方法	6
1.3.1 粒子输运与马尔科夫过程	6
1.3.2 粒子输运的蒙特卡罗方法所解决的问题	7
1.4 蒙特卡罗粒子输运代码的发展	7
1.4.1 创立初期	7
1.4.2 后期发展	8
1.5 粒子探测器蒙特卡罗建模	11
1.5.1 几何建模	11
1.5.2 源项设定	12
1.5.3 粒子输运	12
1.5.4 探测器响应	13

2 粒子输运的蒙特卡罗方法	18
2.1 粒子输运	18
2.1.1 基本概念	18
2.1.2 运动论层次的描述	20
2.2 粒子输运的蒙特卡罗方法	21
2.2.1 平均自由程的确定	22
2.2.2 反应种类确定	24
2.2.3 散射角的选取	24
2.2.4 输运的起始和终止	26
2.3 粒子输运算法	27
2.4 蒙特卡罗粒子输运方法的误差	28
3 粒子与物质相互作用	31
3.1 中子	31
3.1.1 截面获取	32
3.1.2 反应类型	33
3.2 光子	37
3.2.1 光电效应	38
3.2.2 汤姆逊散射	40
3.2.3 康普顿散射	41
3.2.4 瑞利散射	49
3.2.5 电子对效应	52
3.3 带电粒子	53
3.3.1 库仑散射	53
3.3.2 带电粒子的能损	60
3.3.3 重带电粒子	64
3.3.4 电子	65

4 状态变量抽样	72
4.1 随机变量的抽样	72
4.1.1 解析取反抽样法	74
4.1.2 数值法取反抽样	76
4.1.3 舍选抽样	78
4.1.4 复合抽样	79
4.1.5 查表法	81
4.2 粒子的位置	81
4.2.1 点源分布	82
4.2.2 面源分布	82
4.2.3 体源分布	85
4.3 粒子运动方向	88
4.3.1 各向同性分布	88
4.3.2 锥角内各向同性点源分布	94
4.4 粒子能谱分布	95
4.4.1 裂变能谱(Watt 谱)	95
4.4.2 光子散射能谱	95
4.4.3 麦克斯韦分布	100
4.4.4 高斯分布	101
5 几何模型	105
5.1 几何建模过程	106
5.2 几何体的组合	109
5.2.1 曲面建立	110
5.2.2 几何单元定义	111
5.3 边界描述	112
5.4 粒子跟踪	113

6 探测器记录与响应	116
6.1 粒子输运模拟中的物理量	116
6.2 稳态系统的记录	117
6.2.1 体估计	117
6.2.2 面穿越估计	118
6.2.3 解析估计	119
6.3 信号产生及其数字化	120
6.3.1 闪烁体探测器的响应	121
6.3.2 气体探测器的响应	131
7 减小方差的技术	133
7.1 密度函数的偏倚	134
7.1.1 反应类型的偏倚	134
7.1.2 俄罗斯轮盘赌	135
7.1.3 自由程偏倚	135
7.1.4 指数变换	136
7.1.5 强制碰撞	137
7.2 分裂技术	138
7.2.1 基于俄罗斯轮盘赌的几何分裂	138
7.2.2 基于俄罗斯轮盘赌的能量分裂	140
7.2.3 基于俄罗斯轮盘赌的角度分裂	140
7.2.4 权重窗技术	141

1 绪 论

1.1 蒙特卡罗方法简介

蒙特卡罗方法是一种使用随机数序列获得问题变量的抽样值的数值分析方法,广泛应用于解决粒子输运及其物理、数学和工程等问题。随着高性能计算机技术的发展,该方法的应用范围也越来越广泛。

蒙特卡罗方法本身非常简单、直接,接下来,我们将结合实例对蒙特卡罗方法的原理进行介绍。

1.1.1 蒙特卡罗方法的原理

设有窄束中子经过一个厚度为 L 的屏蔽体入射到中子探测器上,探测器的面积近似等于束斑的尺寸,并且中子穿过屏蔽体就能被探测器探测到。探测器对中子束的探测效率

$$\varepsilon = \int \delta(\lambda) f(\lambda) d\lambda \quad (1.1)$$

其中, $\delta(\lambda)$ 为探测器对入射中子的探测效率, $f(\lambda)$ 是入射中子自由程的分布密度函数。 $\delta(\lambda)$ 只有两种取值,当 $\lambda < d$ 时 $\delta(\lambda) = 0$; 当 $\lambda \geq d$ 时 $\delta(\lambda) = 1$ 。

这里 $\bar{\varepsilon}$ 实际是探测器对入射中子探测效率的期望。假设实际有 N 个中子入射, 则

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \delta(\lambda) \quad (1.2)$$

从概率论的角度讲, $\bar{\varepsilon}$ 是 ε 在抽取 N 个子样情况下的近似估计值。实验中, 通常采用这种方法来处理实验数据。如果通过实验和理论分析的手段, 我们已经掌握了中子在屏蔽介质中的相互作用规律, 也就是说我们已知中子在屏蔽介质中自由程的分布密度函数 $f(\lambda)$ 。那么, 就可以通过人为产生随机数的数值方法来“模拟”自然界中的随机过程, 从而得到蒙特卡罗方法处理问题的一般过程。构造一个概率空间; 然后在该概率中确定一个依赖随机变量 x (可以为任意维) 的统计量 $g(x)$, 其数学期望

$$E(g) = \int g(x) dF(x) \quad (1.3)$$

正好等于所要求的值 G , 其中 $F(x)$ 为 x 的分布函数; 最后, 产生随机变量 x 的简单子样 x_1, \dots, x_N , 用其相应的统计量 $g(x_1), \dots, g(x_N)$ 的算术平均值

$$\bar{G}_N = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N g(x_n) \quad (1.4)$$

作为 G 的近似估计。

由以上过程看出, 采用蒙特卡罗方法的核心步骤是确定一个统计量, 确保其数学期望正好等于所要求的值。为方便起见, 后面将总称这样的统计量为无偏统计量。

由于其他原因, 如确定数学期望为 G 的统计量 $g(x)$ 有困难, 蒙特卡罗方法有时也用 G 的渐进无偏估计代替一般过程中的无偏估计 \bar{G}_N , 并用此渐进无偏估计作为 G 的近似估计。

蒙特卡罗方法的最低要求是确定一个与计算步数 N 有关的统计估计量 G_N , 当 $N \rightarrow \infty$ 时, G_N 依概率收敛于所要求的值。也就是说, 对于任意的 $\varepsilon > 0$, 应有

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P(|\bar{G}_N - G| < \varepsilon) = 1 \quad (1.5)$$

1.1.2 收敛性

蒙特卡罗方法的近似估计 \bar{G}_N 依概率 1 收敛于 G , 即

$$P(\lim_{N \rightarrow \infty} \bar{G}_N = G) = 1 \quad (1.6)$$

的充分必要条件是无偏统计量 $g(x)$ 满足

$$E(|g|) = \int |g(x)| dF(x) < +\infty \quad (1.7)$$

也就是说, 蒙特卡罗方法的收敛性取决于所确定的无偏统计量是否绝对可积, 或者说它的绝对数学期望是否存在。

若无偏统计量 $g(x)$ 满足条件

$$E(|g|^r) = \int |g(x)|^r dF(x) < +\infty \quad (1.8)$$

其中 $1 \leq r \leq 2$, 则

$$P[\lim_{N \rightarrow \infty} N^{\frac{r-1}{r}} (\bar{G}_N - G) = 0] = 1 \quad (1.9)$$

即 \bar{G}_N 依概率 1 收敛于 G 的速度为 $N^{\frac{r-1}{r}}$ 。也就是说, 蒙特卡罗方法的收敛速度取决于所确定的无偏统计量绝对可积的阶数, 但收敛速度不会超过 $N^{-\frac{1}{2}}$ 。

1.1.3 误差

根据中心极限定理, 只要所确定的无偏统计量具有有限的异于零的方差 σ^2 , 那么对于任意非负的 X 均有

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P\left(\frac{\sqrt{N}}{\sigma} |\bar{G}_N - G| < X\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-x}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (1.10)$$

因此, 当 N 足够大时, 就可以认为以下近似等式成立

$$P\left(|\bar{G}_N - G| < \frac{X\sigma}{\sqrt{N}}\right) \cong \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-x}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 1 - a \quad (1.11)$$

其中 a 为置信度, $1 - a$ 为置信水平。

根据以上结果,可以根据问题的要求,确定出置信水平,然后按照正态积分表确定出 X ,而近似估计 \hat{G}_N 与真值 G 之间的误差可以根据下式近似得到

$$|\bar{G}_N - G| < \frac{X\sigma}{\sqrt{N}} \quad (1.12)$$

通常取 X 为 0.674 5, 1.96 或 3, 相应的置信水平依次为 0.5, 0.95 或 0.997。

1.2 蒙特卡罗方法的起源

蒙特卡罗方法是一种用来模拟真实情况的数学模型,它是 20 世纪 40 年代发展起来的一门新兴计算科学。其起源可以追溯至 1777 年,法国数学家布丰提出用投针实验的方法求圆周率 π ^[1]。20 世纪 30 年代,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)的科学家 Enrico Fermi 首次尝试采用蒙特卡罗方法模拟中子扩散,利用大量的随机输入拟合出结果后随机抽样,最终取得了理想的成果。后来又用这种方法计算反应堆临界性。20 世纪 40 年代,曼哈顿计划的实施使原子核的裂变过程和特殊核材料(SNM)的获得成为当时迫切需要解决的科学难题。全世界的科学家精英汇聚美国共同研究,推进曼哈顿计划^{[2][3]}。巧合的是,另一项创举,电子计算机也在此时诞生。在物理学家 John Mauchly 和工程师 Presper Eckert 的领导下,第一台计算机 ENIAC 于费城的宾夕法尼亚大学建成。这台设备包含超过 1.7 万支真空管,调用 50 万军队参与建设。该计算机的建造初衷是替代人力,为美国军方进行导弹射表(射程与弹道的关系)的积分计算。兼任美国军方和洛斯阿拉莫斯国家实验室顾问的 John Von Neumann 对 Edward Teller 的热核能源领域非常熟悉,他对使用 ENIAC 进行热核反应模型的测试非常感兴趣。于是他说服了美国军方,允许洛斯阿拉莫斯国家实验室(Nicholas Metropolis 和 Stan Frankel)使用 ENIAC 进行热核反应计算。这项工作 在 1945 年第二次世界大战结束前开始,初期工作在战后的 1946 年完成。第二次世界大战结束之后,蒙特卡罗方法继续发展,在氢弹的研制过程中占有举

足轻重的地位。与此同时,兰德公司(The Rand Corporation)与美国空军成为蒙特卡罗方法研究的最大赞助商与组织者。

除 Nicholas Metropolis, Stan Frankel 和 John Von Neumann 外,Stan Ulam 也参加了洛斯阿拉莫斯国家实验室最后一个相关项目的评论会。Ulam 提出可以使用电子计算机进行统计抽样。Von Neumann 对 Ulam 的提议非常赞同,给出了使用统计方法求解中子输运问题的概要。Metropolis 建议将这种统计模拟的方法称为“蒙特卡罗”方法。该名称为这一方法增加了些许神秘色彩,之所以给出这样一个名称,是因为他的叔叔曾经经常从家里借钱,说他“必须去蒙特卡罗”。其实蒙特卡罗位于法国南部的摩洛哥,紧邻地中海,是一个以赌场、海滩、汽车比赛和美景著称的世界级赌城。

为了模拟中子进行不同相互作用的过程,模拟的开始阶段,Von Neumann 建议由包裹成球形的填充材料作为可裂变材料的核心。这个方法由变量输入和一系列复杂的算法两部分组成,基于多次随机抽样方法。每一个试验样本进行的过程其实是类似的:由一系列的随机过程生成输入变量,而后通过模型计算随机地生成各个结果。由于每个输入变量是随机产生的,因此其输出的结果也可以看成是随机的。在大量重复的运算后,将得到大量相应的输出结果,因此实施这种方法需要大量地使用随机数。John Von Neumann 发明了一种伪随机数的产生方法,即“平方取中法”^[4],对不同的相互作用以及相关的密度函数进行抽样。尽管这种方法有一定缺点,但在当时却是最可行、最快速的方法。与微分方程相比,蒙特卡罗方法在解决复杂问题过程中具有更大的灵活性。蒙特卡罗方法的成功使其在曼哈顿计划中占有重要地位。然而,作为一种统计过程,必然伴随着一定的方差。很长一段时间内,方差过大的问题以及大计算量耗费大量时间的问题一直阻碍着该方法的发展。为了提高计算效率,阿拉莫斯国家实验室的科学家们提出了一系列减小方差的技术,包括俄罗斯轮盘赌和分裂的方法^[5]。

1.3 粒子输运的蒙特卡罗方法

1.3.1 粒子输运与马尔科夫过程

粒子在介质中的输运可以用著名的玻尔兹曼方程进行描述。但在实际操作中,玻尔兹曼方程的求解通常比较困难。为了对玻尔兹曼方程进行近似求解,人们发明了扩散近似、离散坐标等方法,并取得了很大的成功^[6]。然而,当粒子输运模型的建立更加精细、更加接近真实时——截面与粒子能量相关、散射粒子角分布出现各向异性、输运介质的几何形状和物质构成比较复杂时,这些方程求解的数值方法遇到了巨大困难。由于蒙特卡罗方法解决的问题模型近似较少、接近于真实情况,并且解决问题的复杂程度不会因为问题的维数、几何条件产生本质性的困难,因此蒙特卡罗方法在处理几何和应用截面方面有较强的优势。

下面将介绍使用蒙特卡罗方法解决粒子输运问题的合理性。在概率与统计学理论中,马尔科夫过程是指具有马尔科夫性质的统计性过程。简而言之,马尔科夫性质是对随机过程“无记忆”性的一种描述。如果随机过程具有马尔科夫性质,则其后续状态的条件概率分布只依赖当前状态,而与导致当前状态的之前一系列状态无关。考虑在有限的离散状态空间中的随机数变量序列 $\{x_0, x_1, \dots\}$ 。如果该序列满足

$$P(x_{i+1} = y_{i+1} \mid x_i = y_i, \dots, x_0 = y_0) = P(x_{i+1} = y_{i+1} \mid x_i = y_i) \quad (1.13)$$

则称之为马尔科夫链。也就是说 x_{i+1} 只依赖于与其最近的历史状态 x_i 。对于任意的 $s > 0$,

$$P(x_{i+s} = y_{i+s} \mid x_i = y_i, \dots, x_0 = y_0) = P(x_{i+s} = y_{i+s} \mid x_i = y_i) \quad (1.14)$$

上述的马尔科夫链是马尔科夫过程的典型例子。

粒子(辐射)在介质材料中的输运过程可以视为一系列离散或者连续的随

机反应过程,并且下次相互作用发生时的状态参数和反应末态(包括次级粒子的产生)只与当次相互作用的情况有关,与粒子之前的相互作用情况无关。由此可知,粒子的这种输运过程是马尔科夫过程^[7]。因此,只要已知粒子与物质相互作用的物理过程,粒子运动的马尔科夫过程完全能够用蒙特卡罗方法正确地模拟,从而得到所要的解。

1.3.2 粒子输运的蒙特卡罗方法所解决的问题

根据蒙特卡罗方法处理问题的特点,原本只解决粒子输运问题的蒙特卡罗方法现在也广泛应用于处理核科学与技术问题,如通量计算、辐射屏蔽、反应堆临界计算等。在实际核科学实验和工程实践中,常借助辐射探测器来获得辐射装置内部及周围确定位置通量的物理参数和对辐射源项屏蔽的实际效果。为了更加接近实际地解决上述相关问题,同样要对辐射探测器进行模拟,这样得到的结果不仅仅局限于相关物理参数的测量结果,还有探测器本身的一些性能参数,如探测器本身的探测效率、响应函数、能量分辨、时间分辨等。同时根据相关参数模拟的模拟结果,也可以辅助探测器的设计。

1.4 蒙特卡罗粒子输运代码的发展

1.4.1 创立初期

1950年 Robert R. Wilson (此人也是质子辐照疗法的创始人),发表了第一篇利用蒙特卡罗方法解决电子输运的文章^[8],将其算法比喻为“机会的纺车(spinning wheel of chance)”。虽然相当复杂,但是相比于当时的解析算法仍然具有显著优势,尤其是在研究电子的普遍行为表现时。1955年 Hebbard 与 Robert R. Wilson 第一次使用计算机来研究电子在薄箔的离散与能量损失^[9]。

1958年 Butcher 和 Messel 发表了第一篇关于使用蒙特卡罗方法通过电子计算机来模拟高能粒子的文章^[10]。与此同时,1959年 Varfolomeev 和 Svetloolobov 也相应独立地发表了类似的文章^[11],1962年这两个团队一起合作出版了《簇射之书》(“shower book”)^[12],较全面地描述了簇射的分布。

到了19世纪60年代初期,两个用来模拟电磁簇射的代码^[13]出现了。其中一个代码发布于1962年,由橡树岭国家实验室的 Zerby 与 Moran 共同研发,给出了高能电子束簇射作用在各类设备与结构上的结果。随后,Alsmiller 等人应用这一代码完成了一系列开创性的研究工作^[14]。另一个代码被称为“SHOWER1”,发布于1965年,由 Nagel 开发,由 Ford 和 Nelson 命名,并且在1966年和1967年进行了补充。该代码由 FORTRAN 编写,用以解决高能电子($\leq 1\ 000\text{ MeV}$)入射圆柱形几何体问题,包括6种光子和电子的作用(韧致辐射,电子-电子散射,离子能损,电子对产生,康普顿散射,光电效应)以及库仑散射过程。除了湮没效应,正负电子的阈值最低可达1.5 MeV,光子可达0.25 MeV。其设定能量阈值要远低于前人的代码设定。Nagel 开发的代码扩大了 Nicoli^[15]用于实验物理研究工具的能量范围与灵活性,最终成为了 EGS 的起源^[16]。

1.4.2 后期发展

1.4.2.1 ETRAN 发展

1968年, Berger 发布了 $e\text{-}\gamma$ 代码 ETRAN^[17],虽然其内核版本在20世纪60年代早期就已用在 NBS 代码上(现在发展为 NIST 代码)。之后, ETRAN 便走上了“少许修改”的道路,衍生成一系列代码^[18]:1971年的 EZTRAN^[19],1973年的 EZTRAN2^[20],1973年的 SANDYL^[21],1975年的 TIGER^[22],1976年的 CYLTRAN^[23],1977年的 CYLTRANNM^[24],1978年的 SPHERE^[25],1979年的 TIGERP^[26],1980年的 ACCEPT^[27],1981年的 ACCEPTTM,1981年的 SPHEM^[28]。最后,在1986—1992年,所有的代码都被包含进 ITS^[29]中。1990年 ITS 的电子输运过程成为了 MCNP4^[30]代码的一部分。

1.4.2.2 MCNP 的发展

MCNP 是 Fermi, Von Neumann, Ulam, Metropolis 与 Richtmyer^[31] 4 位蒙特卡罗方法的创始人所在的洛斯阿拉莫斯国家实验室的后继者们编写的蒙特卡罗方法代码。大多数工作都在 1957 年 Cashwell 和 Everett 的蒙特卡罗方法的第一本书中提及^[32], 1963 年第一个中子输运代码 MCS (Monte Carlo Simulation) 完成, 1967 年被修改为 MCN, 1973 年两个光子输运代码 MCC 和 MCP 与 MCS 与 MCN 结合形成 MCNG 代码, 1977 年形成了第一代 MCNP (Monte Carlo Neutron Photon)。1979 年与 1981 年最初的两个 MCNP 用户手册由 W. L. Thompson 发布, 大量吸收采纳了其前辈的内容。2013 年 MCNP 经过持续开发, 发布了 MCNP6。

1.4.2.3 EGS 的发展

EGS 最先被开发应用于高能物理的屏蔽与探测器的模拟, 之后发展并应用于医学和物理学, 但是这些历史都不曾表现在文字记录上。1978 年, SLAC 发布了 EGS3^[16], 并且 Rogers 将 EGS3 应用在一些重要的发表论文上^[33], 其中一篇重要的发表论文提供了对于 EGS3 算法的一个补丁, 其模拟算法最终应用于 ETRAN。在电子输运步长大小的人工设置没有被解释清楚的前提下, 通过缩短模拟的相互作用步长, 使其基于电子的算法更加可靠。缩短步长是一种可以理解的解决问题的方法, 就如 Larsen 解释的情形一样, 但与此同时计算时间也相应增长。这些“步长大小的人工设置”, 引起了 Nelson 的注意。Nelson 曾被 Rogers 邀请去编写下一代的 EGS—EGS4, 与之共事的还有日本筑波市 KEK 的研究员 Hirayama。

随着 1985 年 12 月 EGS4 的发布, Rogers 的两个机构 (辐射标准实验室与其兄弟实验室 Berger 的 NIST) 成为了医学物理与剂量学蒙特卡罗算法的发布中心。他们接管了负责支持与发布 EGS4 代码的工作, 并且开始在全世界提供训练课程。Hirayama 主要负责亚洲地区的工作。