

蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用

MENGTEKALUOFANGFAZAI
YANHEWULIZHONGDEYINGYONG

(修订版)

许淑艳 编著



原子能出版社

蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用

(修订版)

许淑艳 编著

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用/许淑艳编著. 修订本. —北京:原子能出版社, 2006. 8

ISBN 7-5022-3641-4

I. 蒙… II. 许… III. 蒙特卡罗-应用-核物理学-实验 IV. 0571-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 089175 号

内 容 提 要

本书共分十二章。前四章是基础理论部分,对解决实际问题是不可缺少的。第五章叙述蒙特卡罗方法如何借助于计算机得以实现,使蒙特卡罗方法更加具体化。第六章至第十章叙述实验核物理中经常遇到的典型问题及解决方法。第十一章介绍蒙特卡罗方法应用软件。第十二章是本书的理论基础。

蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100037)

责任编辑 王裕新

责任校对 李建慧

责任印制 丁怀兰 潘玉玲

印 刷 保定市中国画美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 850mm×1168mm 1/32

印 张 10.125

字 数 311 千字

版 次 2006 年 8 月第 2 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5022-3641-4

印 数 1—2000

定 价 31.00 元

版权所有 侵权必究

网址: <http://www.aep.com.cn>

再版前言

1996年原子能出版社出版了我编著的《蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用》(第一版),自出版以来,受到了广大读者的欢迎。它已成为一些高等院校、研究生院学习蒙特卡罗方法的教科书,以及科研单位从事蒙特卡罗方法研究与计算人员的主要参考书。

应广大读者的要求,该书再次出版,以满足广大读者的迫切愿望。我希望该书的再版,对于从事蒙特卡罗方法研究和应用的读者能够起到“推波助澜”的作用。

在保持本书的内容和结构与第一版基本相同的基础上,对于第一版中的错误(包括内容方面以及印刷方面)进行了仔细的修订。尽管如此,仍然可能有不足之处甚至错误,希望广大读者给予批评指正。

许淑艳

于中国原子能科学研究院

2006年8月

前 言

蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用是该方法最重要的应用领域之一。由于受物理条件的限制,为了得到所求结果,必须借助于理论计算。蒙特卡罗方法具有逼真地描述真实的物理过程的特点,在一定意义上讲,它可以部分代替物理实验,因而成为解决实验核物理中实际问题的非常有效的工具。

本书可作为实验核物理、计算物理、应用数学及计算数学等专业的大学生、研究生和研究工作者的参考书。当然,读者需要具备核物理,高等数学,概率论与数理统计和程序设计等方面的知识。

本书从实验核物理中的典型实际问题出发,给出若干种蒙特卡罗解法,并附有示意框图,这对于提高读者解决实际问题的能力是会有帮助的。在此基础上,本书给出了粒子输运问题的积分模型及各种蒙特卡罗模拟技巧的统一描述,能使读者从理论上加深对蒙特卡罗方法的理解和认识,为深入研究蒙特卡罗方法提供了有利的条件。

本书共分十二章。前四章是本书的基础,对解决实际问题是不可缺少的。第五章叙述蒙特卡罗方法如何借助于计算机得以实现,使蒙特卡罗方法更加具体化。第六章至第十章叙述的是实验核物理中经常遇到的典型问题及解决方法。第十一章介绍蒙特卡罗方法应用软件。第十二章是本书的理论基础。

本书作为蒙特卡罗方法在实验核物理中应用的书,包括了作者多年来的研究成果,也包括了中国原子能科学研究院蒙特卡罗小组的同志们多年来在该领域的研究成果。作者在本书的写作过程中,

得到了裴鹿成同志的大力支持和具体帮助,还得到了蒙特卡罗小组的同志们的支持和鼓励。本书初稿完成后,曾经裴鹿成、张焕乔、刘恭櫟、黄正丰和苏宗瀚等有关同志审阅,其中裴鹿成同志仔细地审校了全文,并提出了许多宝贵意见。在本书定稿时充分吸收了他们的宝贵意见。在此,谨向以上诸位同志表示诚挚的谢意。

本书的内容曾在核工业研究生部多次讲授过。由于作者水平有限,书中可能存在不少缺点和错误,恳请读者批评指正。

许淑艳

于中国原子能科学研究院

1995. 12

目 录

第一章 蒙特卡罗方法概述	(1)
1.1 蒙特卡罗方法的基本思想	(1)
1.1.1 两个例子	(1)
1.1.2 基本思想	(3)
1.1.3 计算机模拟试验过程	(4)
1.2 蒙特卡罗方法的收敛性与误差	(6)
1.2.1 收敛性	(6)
1.2.2 误差	(7)
1.3 蒙特卡罗方法的特点	(8)
1.3.1 优点	(8)
1.3.2 缺点	(10)
1.4 蒙特卡罗方法的主要应用范围	(11)
思考题	(12)
参考文献	(12)
第二章 随机数	(13)
2.1 随机数的定义及产生方法	(13)
2.1.1 随机数的定义及性质	(13)
2.1.2 随机数表	(14)
2.1.3 物理方法	(15)
2.2 伪随机数	(16)
2.2.1 伪随机数	(16)
2.2.2 伪随机数存在的两个问题	(16)

2.2.3	伪随机数的周期和最大容量	(17)
2.3	产生伪随机数的乘同余方法	(17)
2.3.1	乘同余方法的最大容量的上界	(18)
2.3.2	关于 a 与 x_1 的取值	(18)
2.3.3	乘同余方法在计算机上的使用	(19)
2.4	产生伪随机数的乘加同余方法	(19)
2.4.1	乘加同余方法的最大容量	(19)
2.4.2	M, x_1, a, c 的取值	(20)
2.5	产生伪随机数的其他方法	(20)
2.5.1	取中方法	(20)
2.5.2	取中方法的最大容量	(22)
2.5.3	加同余方法	(22)
2.5.4	加同余方法的最大容量	(22)
2.6	伪随机数序列的均匀性和独立性	(23)
2.6.1	伪随机数的均匀性	(23)
2.6.2	伪随机数的独立性	(24)
	思考题	(26)
	参考文献	(27)
第三章	由已知分布的随机抽样	(28)
3.1	随机抽样及其特点	(28)
3.2	直接抽样方法	(29)
3.2.1	离散型分布的直接抽样方法	(29)
3.2.2	连续型分布的直接抽样方法	(32)
3.3	挑选抽样方法	(34)
3.4	复合抽样方法	(37)
3.5	随机抽样的一般方法	(39)
3.5.1	加抽样方法	(39)
3.5.2	减抽样方法	(43)

3.5.3	乘抽样方法	(46)
3.5.4	乘加抽样方法	(48)
3.5.5	乘减抽样方法	(52)
3.5.6	对称抽样方法	(55)
3.5.7	替换法抽样	(59)
3.5.8	多维分布抽样方法	(64)
3.5.9	积分抽样方法	(66)
3.6	随机抽样的其他方法	(67)
3.6.1	偏向抽样方法	(67)
3.6.2	近似抽样方法	(68)
3.6.3	近似-修正抽样方法	(70)
	思考题	(72)
	参考文献	(72)
第四章	解粒子输运问题的主要步骤与基本蒙特卡罗技巧 ..	(73)
4.1	解粒子输运问题的主要步骤	(73)
4.1.1	弄清粒子输运的全部物理过程	(73)
4.1.2	确定所用的蒙特卡罗技巧	(74)
4.1.3	确定粒子的状态参数与状态序列	(74)
4.1.4	确定粒子输运过程中有关分布的抽样方法	(76)
4.2	屏蔽问题的模型	(77)
4.3	直接模拟方法	(78)
4.3.1	确定初始状态 S_0	(79)
4.3.2	输运, 确定下一个碰撞点	(79)
4.3.3	确定被碰撞的原子核	(80)
4.3.4	确定反应类型	(80)
4.3.5	确定碰撞后的能量与运动方向	(81)
4.3.6	结果的估计与误差	(83)
4.3.7	中子穿透屏蔽的能量、角分布	(84)

4.4	简单加权法	(85)
4.4.1	简单加权法	(85)
4.4.2	加权法与直接模拟法的区别	(86)
4.4.3	加权法思想的应用	(87)
4.5	统计估计法	(88)
4.6	指数变换法	(91)
4.7	减小方差技巧简述	(93)
4.7.1	重要抽样及多段抽样	(93)
4.7.2	相关方法及对偶变数技巧	(93)
4.7.3	半解析方法	(94)
4.7.4	俄国轮盘赌与分裂	(94)
4.7.5	系统抽样与分层抽样	(94)
4.8	蒙特卡罗方法的效率	(94)
	思考题	(95)
	参考文献	(95)
第五章	蒙特卡罗方法在计算机上的实现	(97)
5.1	模拟粒子输运的第一个过程——源分布抽样过程	(97)
5.1.1	源粒子的位置常见分布的随机抽样	(97)
5.1.2	源粒子的能量常见分布的随机抽样	(102)
5.1.3	源粒子运动方向常见分布的随机抽样	(104)
5.2	模拟粒子输运的第二个过程——空间、能量和运动方向的 随机游动过程	(106)
5.2.1	碰撞点位置的计算公式	(106)
5.2.2	碰撞后能量 E_{m+1} 的随机抽样	(109)
5.2.3	碰撞后散射角的随机抽样	(111)
5.2.4	运动方向 $\vec{\Omega}_{m+1}$ 的确定	(113)
5.2.5	球形几何的随机游动公式	(115)
5.2.6	点到给定边界面的距离	(115)

5.3	模拟粒子输运的第三个过程——记录贡献与分析结果过程···	(120)
5.3.1	记录与结果	(120)
5.3.2	方差分析	(120)
5.4	蒙特卡罗方法解粒子输运问题的程序结构	(121)
5.4.1	程序结构	(121)
5.4.2	粒子输运的终止条件	(121)
	思考题	(123)
	参考文献	(123)
第六章	蒙特卡罗方法在通量计算中的应用·····	(124)
6.1	通量的定义	(124)
6.1.1	点通量的定义	(124)
6.1.2	面通量的定义	(125)
6.1.3	体通量的定义	(125)
6.1.4	粒子各次散射对通量的贡献	(125)
6.1.5	粒子 n 次散射后对通量贡献的表达式	(126)
6.2	通量的能与角分布	(127)
6.3	计算体通量的模拟方法	(128)
6.3.1	解析估计方法	(128)
6.3.2	径迹长度方法	(130)
6.3.3	碰撞密度方法	(131)
6.3.4	均匀径迹长度方法	(132)
6.3.5	点通量代替法	(134)
6.3.6	几种方法的比较	(134)
6.3.7	例题	(136)
6.4	计算面通量的模拟方法	(145)
6.4.1	解析估计方法	(145)
6.4.2	加权方法	(146)
6.4.3	点通量代替法	(146)

6.4.4	体通量代替法	(147)
6.4.5	例题	(148)
6.5	计算点通量的模拟方法	(157)
6.5.1	指向概率方法	(157)
6.5.2	实例	(163)
6.5.3	关于指向概率方法的估计量无界问题	(173)
6.5.4	倒易方法	(175)
6.6	与通量有关的物理量的计算	(176)
6.6.1	系统逃脱概率 P	(176)
6.6.2	各种反应率	(176)
	思考题	(177)
	参考文献	(177)

第七章	载钚液体闪烁体探测效率的计算——中子与光子的联合输运问题	(179)
7.1	物理问题与所求量	(180)
7.1.1	液体闪烁体	(180)
7.1.2	中子与闪烁体内原子核的碰撞机制	(180)
7.1.3	光子与闪烁体内原子核的作用机制	(181)
7.1.4	所求物理量	(182)
7.2	中子与光子的联合输运	(182)
7.2.1	中子-光子联合输运的模拟步骤	(182)
7.2.2	关于权重的处理	(186)
7.3	天然钚的热中子俘获光子能量的确定	(187)
7.3.1	双级联光子发射	(187)
7.3.2	多级联光子发射	(188)
7.3.3	连续能级区发射光子能量密度函数的抽样	(190)
7.3.4	连续能级密度函数中 A 和 a^2 的确定	(191)
7.4	中子热群截面的计算	(192)

7.5	单个光子探测效率模拟方法的改进	(194)
7.5.1	限制碰撞法	(195)
7.5.2	碰撞记录法	(196)
7.5.3	限制碰撞、碰撞记录法	(196)
7.6	多个光子探测效率模拟方法的改进	(196)
7.6.1	第 M 个光子碰撞记录法	(197)
7.6.2	第 M 个光子限制碰撞、碰撞记录法	(197)
7.6.3	M 个光子碰撞记录法	(198)
7.6.4	M 个光子碰撞记录,第 M 个光子限制碰撞法	(198)
7.6.5	多分支方法	(198)
7.6.6	限制碰撞多分支方法	(199)
7.7	实例	(202)
	思考题	(203)
	参考文献	(203)
第八章 NaI(Tl)晶体对光子响应函数计算——光子和电子		
	的偶合输运	(204)
8.1	响应函数及其功能	(205)
8.2	光子作用机制	(206)
8.2.1	光电效应	(206)
8.2.2	康普顿散射	(207)
8.2.3	对生成	(209)
8.2.4	三产生	(209)
8.3	电子反应机制	(210)
8.3.1	电子多次散射	(210)
8.3.2	电子韧致辐射	(211)
8.3.3	正电子静止湮没	(211)
8.3.4	正电子飞行湮没	(211)
8.4	光子与电子的偶合输运	(212)

8.5	蒙特卡罗方法模拟光子和电子的步骤	(214)
8.5.1	光子的模拟步骤	(214)
8.5.2	电子、正电子的模拟	(215)
8.6	实例计算	(220)
	思考题	(227)
	参考文献	(227)
第九章 蒙特卡罗方法在中子通量衰减和多次散射修正计算中的应用		
(228)		
9.1	物理问题	(228)
9.2	通量衰减修正因子	(229)
9.3	多次散射修正因子	(230)
9.4	样品非球形修正因子	(231)
9.5	角分辨修正	(231)
9.6	数学描述	(232)
9.7	修正弹性散射微分截面的迭代方法	(233)
9.7.1	计算通量衰减修正因子 $F_0/\bar{F}$	(233)
9.7.2	计算多次散射修正因子 Q	(234)
9.7.3	计算样品非球形修正因子 S	(234)
9.7.4	进行多次散射和角分辨的综合修正	(234)
9.8	修正弹性散射微分截面的直接方法	(239)
9.8.1	直接方法	(239)
9.8.2	方程组系数的计算	(240)
9.8.3	基函数 $\psi_K(\mu)$ ($K=1,2,\dots,K_0$) 的选取	(240)
9.8.4	直接方法与迭代方法的比较	(241)
9.9	实例	(242)
9.9.1	使用迭代方法	(242)
9.9.2	使用直接方法	(243)
	思考题	(246)

参考文献	(246)
第十章 正比管反冲质子谱的蒙特卡罗计算	(248)
10.1 物理问题	(248)
10.2 反冲质子谱的解析表达式	(249)
10.3 计算反冲质子谱的禁区方法	(252)
10.3.1 禁区方法	(252)
10.3.2 禁区方法的蒙特卡罗模拟步骤	(253)
10.4 计算反冲质子谱的相关方法	(254)
10.4.1 相关方法	(254)
10.4.2 相关方法的蒙特卡罗模拟步骤	(255)
10.5 实例	(256)
10.6 利用反冲质子谱解谱	(258)
10.6.1 基本原理	(258)
10.6.2 相关估计方法简介	(259)
思考题	(261)
参考文献	(261)
第十一章 蒙特卡罗方法应用软件简介	(262)
11.1 蒙特卡罗方法应用软件	(262)
11.2 蒙特卡罗方法应用软件的特点	(263)
11.2.1 具有灵活的几何处理能力	(263)
11.2.2 参数通用化,使用方便	(263)
11.2.3 元素和介质材料齐全	(263)
11.2.4 能量范围广,功能强,输出量灵活全面	(263)
11.2.5 含有简单可靠又能普遍适用的抽样技巧	(264)
11.2.6 具有较强的绘图功能	(264)
11.3 MORSE 程序	(264)
11.3.1 具有三维几何能力	(264)
11.3.2 具有多种功能	(265)

11.3.3	使用群截面	(265)
11.3.4	模块结构	(265)
11.3.5	包括几种减小方差技巧和计算技巧	(266)
11.3.6	程序具有很大的灵活性	(266)
11.4	MCNP 程序	(267)
11.4.1	程序中的几何是三维任意组态	(267)
11.4.2	MCNP 程序使用精细的点截面数据	(267)
11.4.3	程序功能齐全	(268)
11.4.4	在减小方差技巧方面,内容十分丰富	(268)
11.4.5	程序通用性很强	(268)
11.5	EGS 程序	(269)
11.5.1	元素和介质材料齐全	(269)
11.5.2	带电粒子和光子的输运均采用随机游动方式进行	(270)
11.5.3	带电粒子的动能允许范围从几十 keV 到 几千 GeV	(270)
11.5.4	光子的能量范围从 1 keV 到几千 GeV	(270)
11.5.5	反应类型齐全	(270)
11.5.6	PEGS4 为离线数据处理程序	(270)
11.5.7	具体的几何模块在用户程序 HOWFAR 中给出,可 以引入辅助程序	(271)
11.5.8	用户所需信息及结果的输出方式在用户程序 AUSGAB 中规定	(271)
11.5.9	EGS4 程序包括重要抽样以及其他减小方差技巧	(271)
11.6	SANDYL 程序	(271)
11.6.1	SANDYL 程序是三维几何程序	(272)
11.6.2	程序包括三种运行方式	(272)
11.6.3	电子与光子的能量范围从 1 keV 到 1000 MeV	(272)
11.6.4	较充分地考虑了电子-光子的偶合输运过程	(272)

11.6.5	元素数据齐全	(272)
11.6.6	功能性强	(272)
11.6.7	程序中采用了若干种减小方差的技巧	(272)
11.7	TIGER 程序系列	(273)
	参考文献	(273)
第十二章 蒙特卡罗方法解粒子输运问题的积分模型		(275)
12.1	描述粒子输运问题的积分方程	(275)
12.1.1	发射密度的积分方程	(275)
12.1.2	碰撞密度的积分方程	(276)
12.1.3	通量的积分方程	(276)
12.2	积分方程的核函数	(277)
12.2.1	迁移核	(277)
12.2.2	碰撞核	(278)
12.2.3	积分方程的核函数表达式	(287)
12.3	发射密度 $\chi(p)$ 、碰撞密度 $\Psi(p)$ 、通量 $\phi(p)$ 之间及其源项 之间的关系	(288)
12.3.1	发射密度 $\chi(p)$ 、碰撞密度 $\Psi(p)$ 和通量 $\phi(p)$ 之间的 关系	(288)
12.3.2	积分方程的源项 $S(p)$ 、 $S^+(p)$ 及 $\bar{S}(p)$ 之间的关系	(289)
12.4	积分方程的 Neumann 级数解	(289)
12.4.1	发射密度型积分方程的 Neumann 级数解	(289)
12.4.2	$\chi_m(p)$ 的物理意义	(290)
12.4.3	其他型积分方程的 Neumann 级数解	(291)
12.5	蒙特卡罗方法解粒子输运问题的逐项求积法	(292)
12.5.1	积分方程解的线性泛函	(292)
12.5.2	级数解	(292)
12.5.3	通项 I_m 的蒙特卡罗求积	(293)
12.6	蒙特卡罗各种技巧的统一描述	(302)