

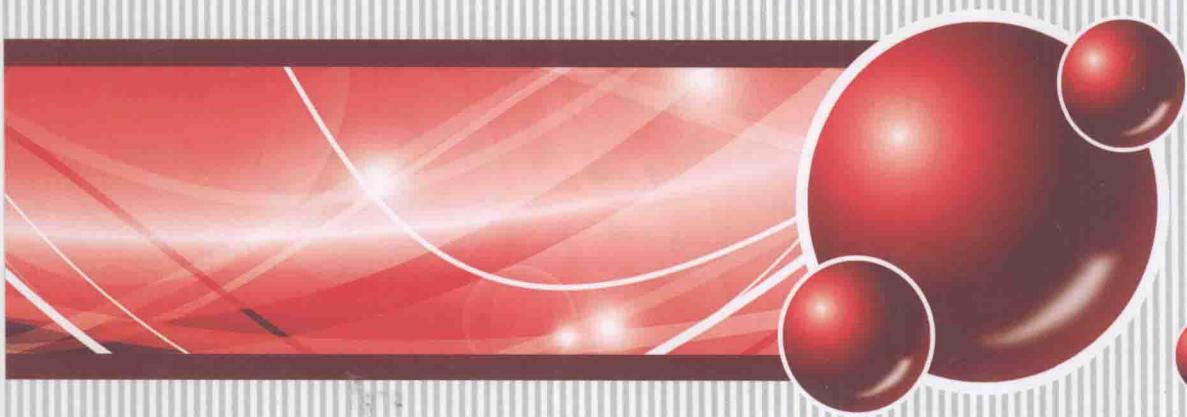


国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



现代原子核物理

核物理与粒子物理



孙汉城 寅新艺 编著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

2013 年度国家出版基金项目“现代原子核物理”

核物理与粒子物理

孙汉城 寅新艺 编著

内 容 简 介

核物理是研究原子核的结构及其反应变化的运动规律的科学。粒子物理是研究比原子核更深层次的微观世界中物质的结构、性质及在很高能量下这些物质相互转化及其产生原因和规律的物理学分支。

本书共分 12 章, 主要内容包括简史、射线与物质的相互作用、加速器、原子核的基本性质、原子核衰变、原子核反应、原子核结构、当代粒子观、宇宙演化及介子、重子、超子、超核、轻子等内容。

本书是中核集团“十二五”核专业研究生教育规划教材之一, 可作为核物理与粒子物理有关专业的研究生教材, 对于有关科研、教学、工程技术人员也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

核物理与粒子物理/孙汉城, 寅新艺编著. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社, 2014. 12
ISBN 978 - 7 - 5661 - 0958 - 3

I. ①核… II. ①孙…②寅… III. ①核物理 ②粒子物理学 IV. ①O57

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 011751 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 7
字 数 183 千字
版 次 2015 年 5 月第 1 版
印 次 2015 年 5 月第 1 次印刷
定 价 45.00 元
<http://www.hrbeupress.com>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

序 言

原子核物理学(简称核物理学、核物理或核子物理)是20世纪新建立的一个物理学学科,是研究原子核的结构及其反应变化的运动规律的物理学分支。它主要有三大领域:研究各类次原子粒子与它们之间的关系、分类与分析原子核的结构,并带动相应的核子技术进展。原子核物理的研究内容包括核的基本性质、放射性、核辐射测量、核力、核衰变、核结构、核反应、中子物理、核裂变和聚变、亚核子物理和天体物理等。它研究原子核的结构和变化规律,射线束的产生、探测和分析技术,以及同核能、核技术应用有关的物理问题。

原子核物理内容丰富多彩,是物理学非常活跃的研究领域,一百多年来共有七十多位科学家因原子核物理领域的优异成绩而获得诺贝尔奖。并且原子核物理是一个国际上竞争十分激烈的科技领域,各国都投入大量人力、物力从事这方面的研究工作。它是一门既有深刻理论意义,又有重大实践意义的学科。

在原子核物理学产生、壮大和巩固的全过程中,通过核技术的应用,核物理与其他学科及生产、医疗、军事等领域建立了广泛的联系,取得了有力的支持。核物理基础研究又为核技术的应用不断开辟新的途径。人工制备的各种同位素的应用已遍及理工农医各部门。新的核技术,如核磁共振、穆斯堡尔谱学、晶体的沟道效应和阻塞效应,以及扰动角关联技术等都迅速得到应用。核技术的广泛应用已成为科学技术现代化的标志之一。

核物理的发展,不断地为核能装置的设计提供日益精确的数据,从而提高了核能利用的效率和经济指标,并为更大规模的核能利用准备了条件。截至2013年3月,全世界有30多个国家运行着435座核发电机组,总净装机容量为374.1 GW,核能的发展必将为改善我国环境现状作出重要贡献。

“现代原子核物理”出版项目的内容包括激光核物理、工程核物理、核辐射监测与防护等理论与技术研究的诸多方面。该项目汇集和整理了我国现代原子核物理领域最新的一流水平的研究成果,是我国该领域的科学研究、技术开发的一个系统全面的出版项目。

值得称道的是,“现代原子核物理”项目汇集了国内核物理领域的多位知名学者、专家毕生从事核物理研究所积累的学术成果、经验和智慧,将有助于我国核物理领域的高水平人才培养,并进一步推动核物理有关课题研究水平的提高,促进我国核物理科学研究向更高层次发展。该项目的出版将有助于推动我国该领域整体实力的进一步提高,缩短我国与国外的差距,使我国现代原子核物理研究达到国际先进水平。

该系列丛书较之已出版过的同类书籍和教材,在内容组成、适用范围、写作特点上均有明显改进,内容突出创新和当今最新研究成果,学术水平高,实用性强,体系结构完整。“现代原子核物理”将是我国该领域的一个优秀出版工程项目,她的出版对我国现代原子核物理研究的发展有重要的价值。

该系列丛书的出版,必将对我国原子核物理领域的知识积累和传承、研究成果推广应用、我国现代原子核物理领域高层次人才培养、我国该领域整体研究能力提高与研究向更深与更高水平发展、缩短与国外差距、达到国际先进水平有重要的指导意义和促进作用。

我衷心地祝贺“原子核物理”项目成功立项出版。



中国工程院院士
中核集团科技委主任
二〇一三年十月

前 言

自从19世纪末,X光、放射性、电子这三大发现以来,物理学突飞猛进。人类对自然界,包括微观世界、宏观世界到宇观世界,都有了比较深入、比较全面的认识。在此基础上,工程技术也是日新月异,生产大发展,人类的物质文明更加丰富多彩。同时我们也更加敬畏自然,因为对于自然界,我们还只理解了其中的一小部分。还有更多的暗物质、暗能量,至今只有它们存在的证据,却不知道它们是什么东西。对于我们已经理解的普通物质世界,也还有许多规律及现象有待发现与研究。

本书是作者20多年在核工业研究生部讲授课程基础上改写的研究生教材,既注意了历史的发展,又着重于基础知识。

本书在成稿的过程中,得到了许多老师与学生的帮助,特别是白希祥、周书华两位教授对书稿提出了很多宝贵意见,作者深表感谢。同时,本书在撰写过程中,参考或引用了国内外一些专家学者的论著,在此表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中存在缺点和问题在所难免,欢迎读者指出,以便再版时更正。

编著者
2014年5月

目 录

第1章 简史	1
第2章 射线与物质的相互作用	3
2.1 重带电粒子与物质的相互作用	3
2.2 β 射线(电子)与物质的相互作用	5
2.3 X, γ 射线与物质的相互作用	7
2.4 中子与物质的相互作用	11
2.5 探测器简介	13
第3章 加速器	20
3.1 高压倍加器	20
3.2 静电加速器	20
3.3 直线加速器	22
3.4 回旋加速器	23
第4章 原子核的基本性质	26
4.1 原子核的组成	26
4.2 核的大小(半径)	28
4.3 核的结合能	29
4.4 核的自旋与统计性	31
4.5 原子核的磁矩	32
4.6 原子核的电四极矩	33
4.7 原子核的字称	34
第5章 原子核衰变	35
5.1 放射性衰变模式	35
5.2 放射性衰变基本规律	36
5.3 天然放射系	40
5.4 α 衰变	42
5.5 β 衰变	43
5.6 γ 跃迁	45
5.7 一些比较少见的衰变模式	47
第6章 原子核反应	50
6.1 二体反应运动学	50
6.2 核反应截面	54
6.3 核反应机制	55
6.4 核反应的守恒定律	58
6.5 核反应的模型理论	58
第7章 原子核结构	61
7.1 核的微观理论碰到的困难	61

7.2	核的独立粒子(单粒子)运动与壳模型	61
7.3	核子之间的对关联与超导模型	65
7.4	核的集体运动与集体模型	66
7.5	核的集团结构与集团模型	70
第8章	介子	71
8.1	π 介子的发现	71
8.2	π 介子的产生	73
8.3	π, k 介子与核子和核的反应	76
8.4	J/ψ 粒子的发现	80
第9章	重子、超子与超核	81
9.1	重子	81
9.2	重子、反重子及其发现	82
9.3	超核	87
第10章	轻子	91
10.1	轻子家族	91
10.2	轻子的螺旋度(或螺旋性)	92
10.3	中微子质量	92
10.4	轻子的产生与衰变	93
10.5	μ 子俘获	95
10.6	正电子素与 μ 子素(Muonium)(Mu)	95
10.7	μ 原子	96
第11章	当代粒子观	97
11.1	夸克模型	97
11.2	粒子物理的标准模型	99
第12章	宇宙演化	100
12.1	宇宙大爆炸学说	100
12.2	观测证据	100
12.3	宇宙演化简史	102
	参考文献	104

第1章 简史

1895年,德国物理学家伦琴(W. Röntgen,1845—1923)发现了X射线。

1896年,法国物理学家贝克勒尔(A. H. Becquerel,1852—1908)发现放射性。

1897年,英国物理学家汤姆孙(J. J. Thomson,1856—1940)发现电子。

1900年,德国柏林大学教授普朗克(M. Planck,1858—1947)首先提出了“量子论”。

1905年,德国物理学家爱因斯坦(A. Einstein,1879—1947)提出了光电子理论和狭义相对论。

1911年,英国卢瑟福(E. Rutherford,1871—1937)通过 α 粒子散射实验发现了原子核。

1913年,丹麦玻尔(N. Bohr,1885—1962)提出了氢原子结构的量子理论。

1919年,英国卢瑟福(E. Rutherford,1871—1937)发现质子(从核反应中打出氢原子核)。

1924年,法国物理学家德布罗意(L. de Broglie,1892—1987)提出了电子具有波动性。

1925年,在德布罗意物质波的基础上,年轻的德国理论物理学家海森伯(W. Heisenberg,1901—1976)建立了矩阵力学(量子力学)。

1925年,奥地利物理学家泡利(W. Pauli,1900—1958)提出了泡利不相容原理。

1926年,奥地利理论物理学家薛定谔(E. Schrödinger,1887—1961)提出了波动力学。

1926年,德国物理学家玻恩(M. Born,1882—1970)提出了波函数的统计解释,英国物理学家狄拉克(P. Dirac,1902—1984)提出正电子理论,建立了量子电动力学体系。

1930年,奥地利物理学家泡利在研究 β 衰变的过程中提出了中微子假说。

1932年,美国安德孙(C. D. Anderson,1905—1991)发现正电子,英国查德威克(J. Chadwick,1891—1974)发现了中子。

1933年,意大利费米(E. Fermi,1901—1954)提出 β 衰变理论,提出一种新的相互作用——弱作用。

1935年,日本著名的理论物理学家汤川秀树(H. Yukawa,1907—1981)提出了核力的介子场理论。

1936年,安德孙在宇宙射线云室实验中发现 μ 子。

1938年,德国科学家哈恩(O. Hahn,1879—1968)发现了核裂变现象。

1942年,费米在美国芝加哥大学建成了世界上第一座核反应堆。

1947年,英国鲍威尔(C. F. Powell,1903—1969)发现了 π 介子。

1956年,中国留美学李政道(Tsung-Dao Lee,1926—)、杨振宁(Chen Ning Yang,1922—)发现弱相互作用中宇称不守恒。

1956年,美国雷因斯(F. Reines,1918—1998)发现中微子。

1962年,莱德曼(L. M. Lederman,1922—)、施瓦茨(M. Schwarts,1932—2006)、史泰因伯格(J. Steinberger,1921—)发现 μ 中微子。

1964年,美国盖尔曼(M. Gell-Mann,1929—)提出了夸克模型。

1961年,美国格拉肖(S. Weinberg,1933—)提出了弱电统一理论思想,并于1967年由美国的温伯格(S. Weinberg,1933—)和巴基斯坦的萨拉姆(A. Salam,1926—1996)各自独立

完成了该理论。

1968年,美国傅里德曼(J. I. Friedman, 1930—)、肯达尔(H. W. Kendall, 1926—1999)、泰勒(R. E. Taylor, 1929—)实验发现质子有内部结构。

1974年,美籍华人丁肇中(S. Chao Chong Ting, 1936—)发现J粒子,美国人里克特(B. Richter, 1931—)发现 ψ 粒子,并正式命名为J/ ψ 粒子。

1975年,美国物理学家佩尔(M. L. Peil, 1929—1998)发现了重轻子(质量为1 776.9 MeV)—— τ 轻子。

1979年,丁肇中实验证明质子内部有胶子。

1983年,欧洲核子中心(CERN)意大利鲁比亚(C. Rubbia, 1934—)与荷兰范德密尔(S. Van de Meer, 1925—2011)发现中间玻色子 W^\pm 与 Z^0 。

1994年,美国费米实验室发现了顶夸克(质量达174 GeV)。

2012年,欧洲核子中心 ATLAS 和 CMS 两实验组发现了 Higgs 粒子。

第2章 射线与物质的相互作用

射线与物质的相互作用是核物理和高能物理实验、核辐射探测器以及核技术应用的基础知识。这里所说的射线,泛指核衰变、核反应和核裂变放出的粒子,也包括由加速器产生的,或来自宇宙线的多种粒子,包括 α 、 β 、 γ 、X射线及中子、裂变碎片和重离子;物质是指宏观意义上的物质,包括固体、液体和气体,可以是单质,也可以是混合物。

2.1 重带电粒子与物质的相互作用

2.1.1 在物质中的能量损失

重带电粒子(质子、 α 粒子等)穿过靶物质,与物质原子发生相互作用而损失的能量可以分成两部分:与靶原子的核外电子的非弹性碰撞引起的能量损失和与靶原子核的弹性碰撞引起的能量损失,即电子阻止与核阻止两部分。对于快速的重带电粒子,主要是电子阻止,第二部分可以忽略不计(比电子阻止小三个量级)。只有在入射重带电粒子能量很低时,才考虑核阻止。本节只讨论快速重带电粒子与靶原子中的电子非弹性碰撞引起的能量损失。

根据经典的弹性库仑碰撞理论可计算出重带电粒子在靶物质中经过单位路程长度时的能量损失(能量损失率,也叫阻止本领)。

一个速度为 v 、电荷为 ze 的重带电粒子穿过由原子序数为 Z 的元素组成的阻止介质时,由于与介质原子核外电子发生非弹性碰撞,经过单位路程的能量损失为(贝特-布洛赫公式)

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4 NZ}{m_0 v^2} \left[\ln\left(\frac{2m_0 v^2}{I}\right) + \ln\frac{1}{1-\beta^2} - \beta^2 \right] \quad (2-1)$$

式中, N 为靶物质中单位体积内的原子数, m_0 为靶物质中电子的静止质量,电荷为 $-e$, I 是靶原子的平均激发和电离能, v 是粒子速度, $\beta = v/c$, c 是光速,方括号中第二、三项是相对论修正项。 $-dE/dx$ 的单位一般用 MeV/cm ,也可以用单位质量厚度上的能量损失 $-dE/\rho dx$,即用 $\text{MeV}/(\text{mg/cm}^2)$, ρ 是靶物质密度。

由式(2-1)可以得到以下结论:

- (1) 阻止本领只与入射粒子的速度有关($1/v^2$),与它的质量无关;
- (2) 阻止本领与重带电粒子的电荷数平方(z^2)成正比;
- (3) 阻止本领与靶物质的 NZ 成正比,高原子序数和高密度物质具有较大的阻止本领。

2.1.2 重带电粒子的射程

重带电粒子在物质中运动时,不断损失能量,待能量耗尽后,它就会停止在物质中。它沿入射方向穿过的最大距离,称为入射粒子在该物质中的射程(用 R 表示)。注意“射程”和

“路程”是两个不同的概念。射程是指入射粒子沿入射方向穿透的深度,而路程则是入射粒子在物质中所经过的实际轨迹的长度。一般路程大于射程,射程是路程在入射方向上的投影。对于重带电粒子,由于其质量大,与阻止介质的碰撞,不会导致入射粒子运动方向有很大的改变,重带电粒子在介质中的轨迹几乎是直线,因此射程近似等于路程。可以通过下式来计算能量为 E_0 的入射粒子的射程:

$$R = \int_0^{E_0} \frac{dE}{(-dE/dx)} \quad (2-2)$$

但实际上人们一般使用由实验数据总结出来的经验公式。例如,对于 4 ~ 15 MeV 能区的 α 粒子在空气中的射程与能量之间的关系为: $R = (0.005E + 0.285)E^{\frac{3}{2}}$, 其中射程单位为 cm, 能量单位为 MeV。

对于具有相同速度 v 的两个重粒子, 它们的射程比简单表示为

$$\frac{R_1(v)}{R_2(v)} = \frac{Z_2^2 M_1}{Z_1^2 M_2} \quad (2-3)$$

式中, R_1 和 R_2 是两个粒子的射程, M_1 和 M_2 为两个粒子的静止质量。若第二个粒子是质子 ($M_2 = 1$ 且 $Z_2 = 1$), 这样另外一个粒子的射程 R 可由下式给出:

$$R(v) = \frac{M}{Z^2} R_p(v) \quad (2-4)$$

式中, $R_p(v)$ 为质子的射程。

能量为 E 的氦, 其射程为能量为 $E/2$ 的质子射程的 2 倍。

思考: 能量为 E 的 α 粒子, 其射程与质子射程有什么关系? (与能量为 $E/4$ 质子的射程相等)

α 粒子和质子的比电离结果如图 2-1 所示, α 粒子在空气中的射程的测量结果如图 2-2 所示, 不同重带电粒子在 Si 中的射程与能量关系如图 2-3 所示。

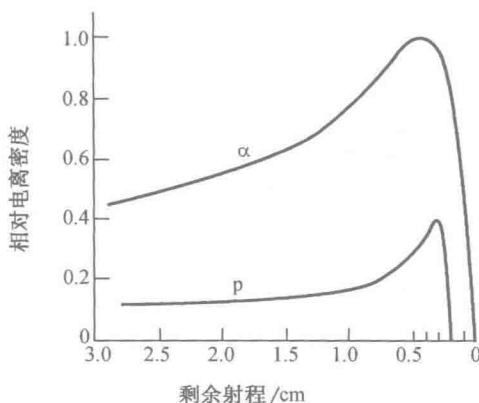


图 2-1 α 粒子和质子的比电离测量结果曲线

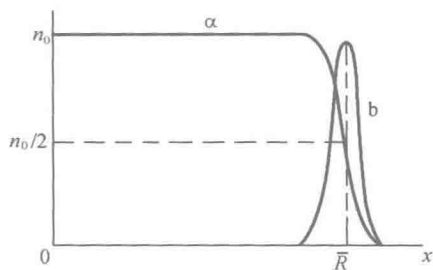
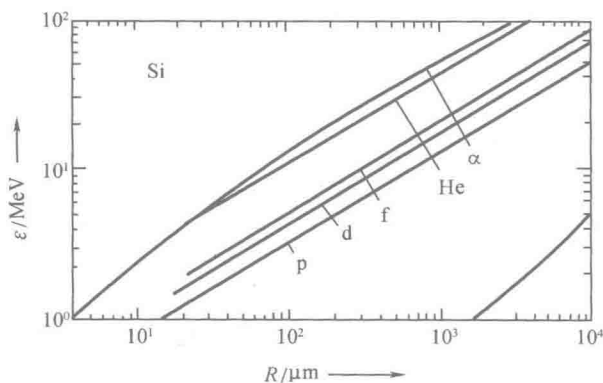
图 2-2 α 粒子在空气中的射程的测量结果曲线

图 2-3 不同重带电粒子在 Si 中的射程与能量关系曲线

2.2 β 射线(电子)与物质的相互作用

β 射线(包括电子和正电子)是轻带电粒子,质量小,能量损失情况和运动轨迹与重带电粒子相比很不一样。电子在物质中的运动轨迹十分曲折。电子与靶原子的作用除了电离能量损失外,还有辐射能量损失。

2.2.1 电离损失

快电子通过靶物质时,也会与原子的核外电子发生非弹性碰撞,使物质原子电离或激发而损失能量,这与重带电粒子情况类似。电离损失是 β 射线在物质中损失能量的主要方式。单位路径上的能量损失,即阻止本领由下面的公式给出:

低能时(非相对论)

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4}{m_0 v^2} NZ \left[\ln \frac{2m_0 v^2}{I} - 1.2329 \right] \quad (2-5)$$

高能时(相对论)

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi e^4 NZ}{m_0 v^2} \left[\ln \frac{m_0 v^2 E}{2I^2(1-\beta^2)} - \ln 2(2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) + (1-\beta^2) + \frac{1}{8}(1-\sqrt{1-\beta^2})^2 \right] \quad (2-6)$$

式中, E 为入射电子的动能, β 为相对论因子。因为能量为 MeV 级的 β 粒子速度已接近光速, 故需考虑相对论效应。

2.2.2 辐射损失

β 粒子穿过物质时, 除了使原子电离或激发损失能量外, 还有另一种损失能量的方式——辐射损失。

1. 韧致辐射

当电子经过原子核附近时受库仑场的作用, 产生加速度(速度发生变化), 会发射出电磁波(光子), 这种电磁辐射叫作韧致辐射。

根据电磁理论, 电磁波的振幅正比于加速度 a , 而加速度正比于入射带电粒子和原子核之间的库仑力, 即 $a \propto Ze^2/m_e$ 。因此电磁辐射的强度, 即振幅的平方正比于 Z^2/m_e^2 。理论计算得到的韧致辐射引起的能量损失率为

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{rad}} \propto \frac{Z^2}{m_e^2} NE \quad (2-7)$$

式中, m_e 是入射电子的质量, E 是入射电子的能量, Z 是靶物质的原子序数, N 为单位体积中物质的原子数, 脚标 rad 表示辐射损失。

(1) 辐射损失率与 Z^2 成正比, 表明电子打到重元素中, 容易发生韧致辐射。这一特性对选择合适的材料来阻挡 β 粒子很重要。因为电离损失率与 Z 成正比, 从电离损失角度考虑, 采用高 Z 元素来阻挡 β 粒子较好; 然而, 这会产生很强的韧致辐射, 反而起不到防护作用, 所以应采用低 Z 元素防护 β 粒子(一般用有机玻璃或铝来防护 β 粒子)。例如, 2 MeV 的电子, 它的辐射损失占总能量损失的比例, 在有机玻璃中只占 0.7%, 而在铅中超过 20%。

(2) 辐射损失率与粒子能量 E 成正比。这点与电离损失不同, 所以电子能量低时, 电离损失占优势; 能量高时, 辐射损失更加重要。在相对论能区, 辐射损失与电离损失之比为

$$\frac{\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{rad}}}{\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ion}}} = \frac{ZE}{800} \quad (2-8)$$

式中, 能量 E 的单位为 MeV。

2. 切伦科夫辐射(Cherenkov Radiation)

除了上面介绍的韧致辐射外, 快电子在穿过透明介质时, 其速度大于光在该介质中的速度 c/n (n 为该介质的折射率), 会在某一特定方向发射出电磁波, 称为切伦科夫辐射。切伦科夫辐射沿 $\theta = \cos^{-1}\left(\frac{1}{n\beta}\right)$ 方向传播, 即波前在张角为 θ 的圆锥面上, 如图 2-4 所示。

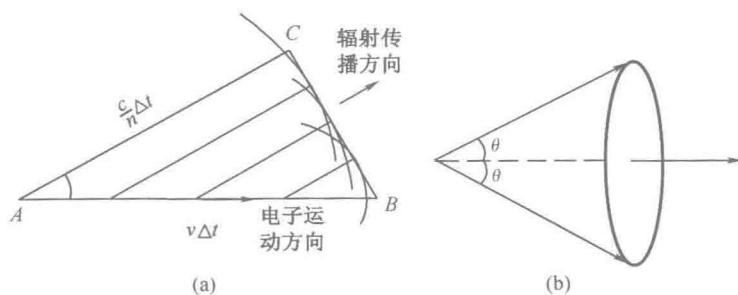


图 2-4 切伦科夫辐射示意图

2.2.3 β 射线的射程

由于电子很轻,可在物质中多次散射改变运动方向,因此射程概念只有有限的适用性。

β 谱是连续的,因此没有相应的射程。射线的最大射程与 β 射线能谱中的最大能量 $E_{\beta m}$ 之间的关系也只能用经验公式来表示,这样的经验公式同样适用于单能电子情况。对于铝吸收体, β 粒子射程与能量之间有下列经验公式:

$$R = 0.407E_{\beta m}^{1.38}, \text{ 当 } 0.15 \text{ MeV} < E_{\beta m} < 0.8 \text{ MeV}$$

$$R = 0.542E_{\beta m} - 0.133, \text{ 当 } 0.8 \text{ MeV} < E_{\beta m} < 3 \text{ MeV} \quad (2-9)$$

式中, $E_{\beta m}$ 为 β 粒子最大能量,单位为 MeV, R 的单位为 g/cm^2 ,射程的单位为质量厚度,可以避免直接测量薄吸收体线形厚度所带来的较大误差。

2.3 X, γ 射线与物质的相互作用

X, γ 射线本质上是一样的,都属于极短波长的电磁辐射,其区别只是产生的来源不同。由轫致辐射或原子内壳层电子跃迁产生的是 X 射线,而 γ 射线起源于核内能级跃迁或电子对湮没过程。它们与物质相互作用的机制与起源无关,只与它们的能量有关。

X, γ 射线与物质相互作用,最主要的三种机制为光电效应、康普顿效应(又称康普顿散射)和电子对效应。作为主要研究生,吴有训对康普顿效应的发现做出了重要贡献,对于电子对效应的发现,赵忠尧起了先驱者的重大作用。

2.3.1 光电效应

γ 光子与靶物质原子相互作用,将 γ 光子的全部能量转移给原子中的束缚电子,使电子从原子中发射出来,而光子消失。光电效应发射出来的电子称为光电子。原子吸收了光子的全部能量,其中一部分消耗于光电子脱离原子束缚所需的电离能(电子在原子中的结合能),另一部分就作为光电子的动能。所以,光电子的能量就是入射光子的能量和该束缚电子所处电子壳层的结合能之差。因此,要发生光电效应, γ 光子能量必须大于电子的结合能。

发生光电效应时,从原子内壳层上打出一个电子,在此壳层上就留下空穴,并使原子处于激发状态。这种激发状态是不稳定的,退激的过程有两种:一种过程是外层电子向内层

跃迁,来填补这个空穴,使原子恢复到较低的能量状态。两个壳层结合能之差,就是跃迁过程中释放的能量,以特征 X 射线形式释放出来;另一种过程就是原子的激发能交给外壳层的其他电子,使它从原子中发射出来,这种电子称为俄歇电子。铅的光电吸收曲线如图 2-5 所示。

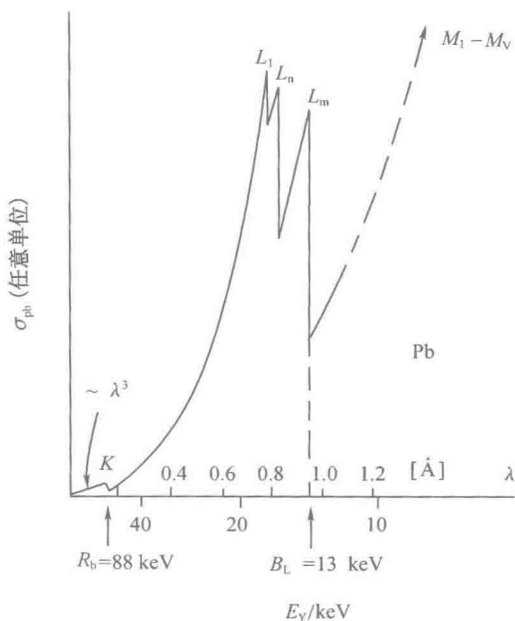


图 2-5 铅的光电吸收曲线

2.3.2 康普顿效应

入射 γ 光子与原子的外层电子发生非弹性碰撞,一部分能量转移给电子,使其成为反冲电子,而散射的光子的能量和运动方向发生变化,称为散射光子。

设入射光子波长为 λ , 出射光子波长为 λ' , 则有

$$\lambda' - \lambda = \frac{2\pi\hbar}{mc}(1 - \cos\theta) \quad (2-10)$$

式中, m 为电子质量。

反冲电子沿 φ 方向运动, 则有

$$\tan\varphi = \frac{\cot(\theta/2)}{1 + \alpha} \quad (2-11)$$

式中, $\alpha = \frac{\hbar\nu}{mc^2} = \frac{\lambda_c}{\lambda}$, $\lambda_c = \frac{2\pi\hbar}{mc} = 2.426 \times 10^{-10}$ cm, 即电子的康普顿波长。

反冲电子的动能为

$$E_{\text{kin}} = \hbar\nu \frac{2\alpha \cos^2\varphi}{(1 + \alpha)^2 - \alpha^2 \cos^2\varphi} \quad (2-12)$$

当 $\varphi = 0^\circ$ 时, 反冲电子能量最大, 为 $\frac{2\alpha}{1 + 2\alpha} \hbar\nu$ 。

康普顿散射光子能量与散射角的关系如图 2-6 所示,用极坐标表示的微分散射截面与散射角度、能量的关系如图 2-7 所示。

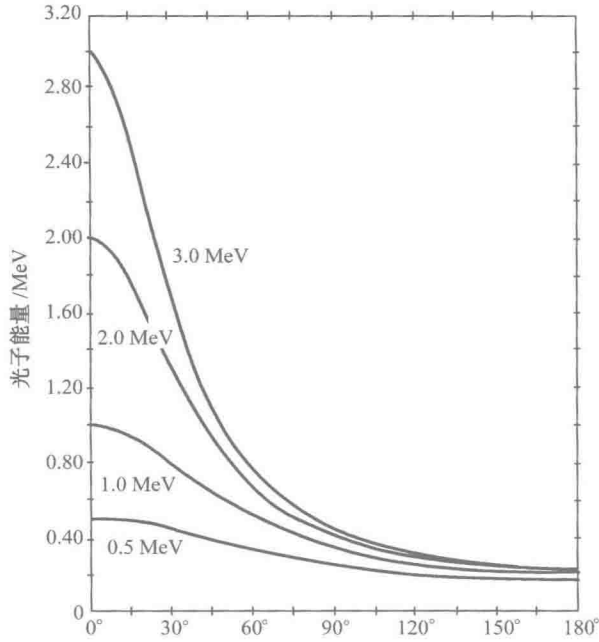


图 2-6 康普顿散射光子能量与散射角的关系曲线

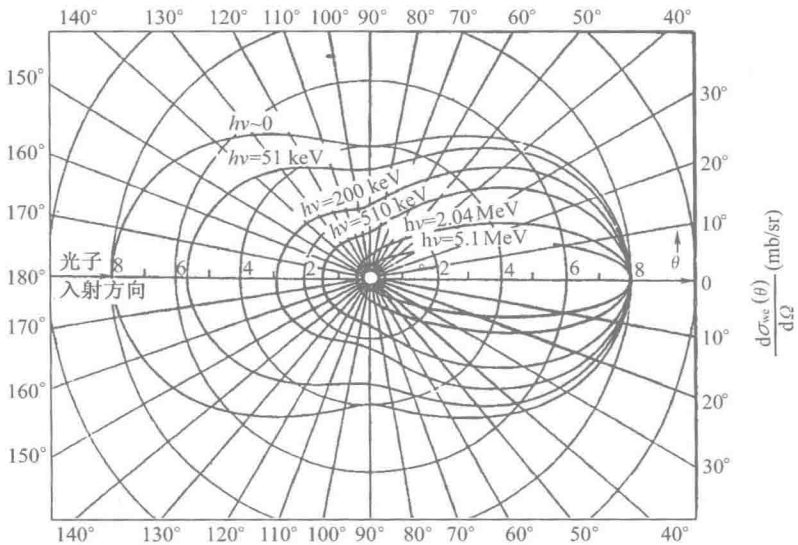


图 2-7 用极坐标表示的微分散射截面与散射角度、能量的关系示意图