



黄润生
沙振舜 主编
唐 涛

近代物理实验

(第二版)

Experiments in Modern Physics

(Second Edition)

南京大学出版社



黄润生
沙振舜 主编
唐 涛

近代物理实验

(第二版)

**Experiments
in Modern
Physics**
(Second Edition)

南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

近代物理实验 / 黄润生, 沙振舜, 唐涛主编. —2 版.
南京: 南京大学出版社, 2008. 4
ISBN 978-7-305-01773-5

I. 近… II. ①黄… ②沙… ③唐… III. 物理学—
实验—高等学校—教材 IV. 041-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 053458 号

出版者 南京大学出版社
社 址 南京市汉口路 22 号 邮 编 210093
网 址 <http://press.nju.edu.cn>
出版人 左 健
书 名 近代物理实验(第二版)
主 编 黄润生 沙振舜 唐 涛
责任编辑 李 伟 潘新华
照 排 南京南琳图文制作有限公司
印 刷 南京紫藤制版印务中心
开 本 787×1092 1/16 印张 20.75 字数 544 千
版 次 2008 年 4 月第 2 版 2008 年 4 月第 1 次印刷
ISBN 978-7-305-01773-5
定 价 38.00 元
发行热线 025-83594756
电子邮箱 sales@press.nju.edu.cn(销售部)
nupress1@public1.ptt.js.cn

* 版权所有, 侵权必究

* 凡购买南京大学出版社图书, 如有印装质量问题, 请与所购
图书销售部门联系调换

本书撰写人员

(依内容先后次序排列)

黄润生	沙振舜	赵经武	徐其高
张治平	滕敏康	沈德勋	邹 迎
籍建萆	江若璉	柳承恩	胡立群
高学奎	吴卫国	嵇家本	邱 燕
鹿 牧	高文莉	唐 涛	王其和
张世远	刘先昆	刘 法	朱劲松
应学农	盛玉宝		

前 言

时光如箭,日月如梭,我校近代物理实验室编写的《新编近代物理实验》出版已逾五年,五年来为历届选修该课的学生所用,得到好评。然而,时代在进步,科学技术突飞猛进,近代物理实验也在不断发展、前进,随着教学改革的深入,我们的近代物理实验课程已更新了三分之一以上的内容,为适应新的形势,满足教学的需要,我们重新编写了本书。

在 21 世纪,面对科学技术迅速发展的形势,我们近年来积极进行实验教学的改革,推进近代物理实验教学的现代化建设,为使教育适应国民经济和社会发展的需要,培养新世纪的建设人才,我们建立了实验课程的新体系,不断更新教学内容,改进教学方法,进行教材建设,结合科研开发新的教学仪器,加强微机在实验中的应用等。在培养和提高学生的动手能力、分析能力和创新精神方面,取得显著成绩。可喜的是国家不断增大了教育的投入,我们利用世界银行贷款等经费,引进了一些先进的实验仪器和设备,教师利用这些仪器和自己研制的仪器排了一些新实验,为本书的编写打下良好的基础。

参加本书编写的是南京大学正在担任或曾经担任近代物理实验课的教师和实验技术人员,我们感谢各位作者对本书出版的支持以及付出的辛勤劳动,本书是集体智慧和劳动的结晶。也感谢历年来使用本书的师生和兄弟院校的同行提出的宝贵意见。在编写过程中曾参阅许多参考资料,由于篇幅所限,恕不一一列举,在此一并致谢。我们还要感谢南京大学教务处领导的支持和帮助。

本书共收录 11 个领域的 42 个实验,是依据《高校理科物理专业(四年制)近代物理实验教学基本要求》的精神而写,符合南京大学近代物理实验教学大纲的要求,本书可作为高校物理专业近代物理实验教学用书,也可供相关专业的师生参考使用。

由于编写时间紧迫,以及我们的水平所限,书中难免有错误和不妥之处,祈盼使用本书的教师、学生和各位读者批评指正。

主 编

2007.12 于南京大学

目 录

绪论:怎样做好实验	1
第一章 原子核物理实验	5
预备知识	5
实验 1.1 NaI(Tl)闪烁谱仪系列实验	6
实验 1.2 放射性半衰期测量	15
实验 1.3 射线的吸收	18
实验 1.4 穆斯堡尔谱	21
实验 1.5 符合测量技术和正电子湮没寿命谱	29
第二章 原子物理实验	39
实验 2.1 电子与原子碰撞实验	39
实验 2.2 X 荧光分析	50
实验 2.3 气体放电中等离子体的研究	56
实验 2.4 塞曼效应	66
实验 2.5 氢(氘)原子光谱	73
第三章 光物理相关实验	79
实验 3.1 椭偏光法测量薄膜的厚度和折射率	79
实验 3.2 法拉第效应	87
实验 3.3 拉曼光谱	91
实验 3.4 单光子计数	99
第四章 低温实验	108
预备知识	108
实验 4.1 西蒙气体温度计与蒸气压温度计	115
实验 4.2 低温实用温度计	120
实验 4.3 稳态热流法测量低温下固体材料的热导率	125
实验 4.4 高临界温度超导体临界温度的电阻测量法	131
实验 4.5 小型制冷装置制冷功率和制冷效率的测量	136
第五章 X 光衍射技术	142
预备知识	142

实验 5.1 单晶定向	148
实验 5.2 X 射线衍射物相分析	152
实验 5.3 X 射线衍射方法测量薄膜厚度	156
第六章 半导体实验	158
预备知识	158
实验 6.1 半导体的霍尔系数与电导率测量	164
实验 6.2 半导体器件特性的测量与分析	172
第七章 物质磁性测量	184
预备知识	184
实验 7.1 磁性材料 $B-H$ 特性的测量	186
实验 7.2 振动样品磁强计测量内禀磁特性	190
第八章 真空实验	193
预备知识	193
实验 8.1 高真空的获得与测量	200
实验 8.2 真空热蒸镀法制备介质膜	203
实验 8.3 磁偏转真空氦质谱检漏仪的应用	215
实验 8.4 蒸气冷凝法制备纳米微粒	218
实验 8.5 磁控溅射	225
第九章 磁共振实验	231
实验 9.1 核磁共振	231
实验 9.2 微波段电子自旋共振	240
实验 9.3 光磁共振	253
第十章 材料物性实验	263
实验 10.1 各向异性磁电阻、巨磁电阻测量	263
实验 10.2 铁电薄膜铁电性能的表征	269
实验 10.3 材料低频介电谱与磁谱	276
实验 10.4 缺陷与相变的力学谱研究	284
实验 10.5 原子力显微镜	289
第十一章 微波实验	297
预备知识	297
实验 11.1 体效应振荡器的特性测量	309
实验 11.2 微波衰减测量	312
实验 11.3 材料微波介电常数和磁导率测量	316
附录	321
附录 1 基本物理常量 2006 年推荐值	321
附录 2 中华人民共和国法定计量单位	321

绪论：怎样做好实验

物理学是一门以实验为基础的科学。物理实验教学是培养合格物理工作者必不可少的教学组成部分。理科大学生在校期间不少时间是在实验室里度过的。怎样做好实验,如何科学地利用这些时间,从而收效最大呢?如何才能从实验中学到有用的知识与实用技术呢?下面提出几点看法,供作参考。

1. 对实验应有正确的认识

(1) 实验在科学发展中的作用

美国有句谚语:“实验是打开科学大门的钥匙。”科学实验是研究自然规律与改造客观的“基本手段”。自然科学的研究包括理论与实验两个方面。科学技术发展的历史经验表明:科学实验和科学理论的研究是相互依赖、相互促进、相辅相成的。两者之间的辩证关系,一方面表现为科学实验是发展理论的源泉和检验科学理论的重要标准;另一方面,科学理论又能指导和促进科学实验。著名物理学家海森伯(W. Heisenberg)说过:“显而易见,不论在那里,实验方面的研究总是理论认识的必要前提,而且理论方面的主要进展,只是在实验结果的压力下而不是依靠思辨来取得的。另一方面,实验结果沿之向前发展的方向,应该总是由理论的途径来实现的。”美籍华裔物理学家黄克孙说:“过去的 300 多年里,物理学的伟大成就,是实验和理论密切结合的果实。”

实验方法由于其具有的优点,使它成为愈来愈多的人探索自然奥秘和改造自己的一种社会实践活动。在现代科学研究中,实验的手段越来越显示出它的重要作用,这在诺贝尔奖金的颁发中得到生动的体现。以物理学奖为例,从 1901~1978 年得奖项目中,属于实验技术或基本是从事实验性工作的项目约占 60%,理论性的项目占 40%。从下面一个例子又可以使我們认识到实验对理论科学家的重要性。牛顿因为地球加速度的测量值同按他的理论要求的值相差约 10%而推迟 20 年发表他的引力理论,牛顿没有想到,在他的计算中用到的地球半径的实验值误差会达到如此大的程度。

如上述那样的例子,不胜枚举。可见实验研究在科学技术的发展中有重要地位和作用。

(2) 实验是理工科教学的重要组成部分

虽然现在人们已普遍承认实验是重要的和有效的工作,但许多学生还不十分清楚实验课是他们教学计划中重要的组成部分。在理工科学生中,有时会听到这样的议论:“实验课真没劲,学不学没啥关系,理论才叫高明呢!”果真是这样吗?还是让我们用几位科学家的话给予回答吧!

实验科学的先驱、意大利的达·芬奇(L. da Vinci)说过:“科学如果不是从实验中产生,并以一种清晰的实验结束,便是毫无用处的,充满谬误的,因为实验乃是确实性之母。”日本科学家武谷三男说:“自然科学以实验为生命。”英国的罗吉尔·培根(R. Bacon)非常重视并自觉强调实验活动,他说:“真正的学者应当依靠实验来弄懂自然科学、医药、炼金术和天上地下的一切东西”。法国生物学家巴斯德(L. Pasteur)说:“科学家一旦离开实验室,就像战场上缴了械的士兵。”美籍华裔著名的物理学家丁肇中在 1967 年冬获诺贝尔物理学奖时发表了一篇演说,其中谈到:“我是在旧中国长大的,因此想借这个机会向发展中国家的青年强调实验工作的重

要性。中国有句古话:‘劳心者治人,劳力者治于人。’这种落后的思想,对发展中国家的青年们有很大害处。由于这种思想,很多发展中国家的学生都倾向于理论的研究,而回避实验工作。事实上,自然科学理论不能离开实验的基础,特别是物理学,它是实验中产生的。我希望由于我这次得奖,能够唤起发展中国家的学生们的兴趣,从而注意实验工作的重要性。”这番肺腑之言,正是对我们的同学说的啊!

实验教学是理工科教学的极为重要的组成部分,实验教学与理论讲授相配合,有利于学生对物理概念与原理的深入掌握。通过观察实验现象而形成的概念,将是生动的,可能一辈子也不会忘记。实验教学对于培养学生的能力与科学作风是必要的,也是很有效的措施。在实验室这个环境里,学生可以取得科学知识,培养科学兴趣,掌握科学方法和发展科学思维,学生通过实验研究问题、导出定律、验证理论……所以由重视实验到对实验产生兴趣,对做好实验是至关重要的。

(3) 实验与科学研究和今后工作的关系

有人说,没有实验,就没有现代科学技术,更谈不上什么科学技术的成果。

实验教学为科学研究准备必要的技术基础和素养。实验课上进行的训练,动手能力的培养,对从事科研活动和毕业后到社会上工作都是有用的。据估计,理工科学生中 60% 以上毕业后从事实验性工作,而进行纯理论研究的毕竟是少数。由此,一个大学生在校做好实验对今后工作的意义可想而知了。

(4) 实验教学与四个现代化的关系

四个现代化的关键是科学技术现代化。科学技术的发展要求有一定经验、知识、能动手动脑解决问题的人,培养这样的人离开科学实验是办不到的。过去的“高考指挥棒”使得某些学校在高中阶段广泛运用“题海战术”。有的人认为“做实验不如看实验,看实验不如背实验”。实验课不去动手,而去背书,做实验变成“纸上谈兵”,岂不成了笑话。结果培养出来的人“高分低能”、“眼高手低”,如何能担负四个现代化的艰巨任务呢!

总之,实验研究和理论研究一样是科学研究的重要手段。任何轻视实验或轻视理论的思想都是错误的。要做好实验,首先要对实验有正确的认识,像对理论课一样重视,认真对待。在实验课的学习中发挥学习主动性和积极性,变“要我做”为“我要做”,自然会克服困难,做好实验。

2. 做好实验的预习环节

一般实验可分为预习、操作和写报告三个环节,先谈谈如何做好预习。

预习是为正式操作作准备,为此需要做到:

(1) 认真阅读实验讲义、参考书,事先对实验内容作全面了解。有时还要看仪器的说明书、操作规程及其他参考资料,把实验的基础知识和背景知识搞清楚。弄清该实验的目的、要求、原理、仪器、方法、注意事项和预习问题等。

(2) 有条件者到实验室预习,看仪器设备,在教师同意之后试操作。

通过预习明确“做什么、怎么做、为什么”三个问题。

(3) 写预习报告。拟出实验步骤,把观测的内容、测量的数据表格设计好,列在预习报告上。

3. 做好实验的操作环节

这个环节是指学生进入实验室正式观测和操作。在这个环节里学生应该在教师的指导下主动地、自觉地、创造性地获取知识和技能。通过实验探索研究问题的方法,培养细致、踏实、

一丝不苟和实事求是的科学态度,以及勇于克服困难、坚韧不拔的工作作风。

(1) 认真细致观察

实验是一个综合过程,它是观察、分析、测量、交流、推论五个过程的全部或部分综合。观察是一个感知过程,它通过看、听、触、尝、嗅而直接感知客观事物。在实验中要培养良好的观察习惯,逐步提高观察能力。事实说明,透过现象很快看到本质,准确无误地观察实验的真实情况,不是一件轻而易举的事。有些人对一些异常现象视而不见,听而不闻。而有些人却从中有了新的发现和发明。

(2) 掌握“三先三后”的原则。在定量实验中,为了更好地进行观测,最好先观察后测量,先练习后测量,先粗测后细测,此即“三先三后”。

(3) 注意“三基”,抓住重点。每门实验课根据教学大纲要求,提出了应着重掌握的内容。例如,基本知识、基本方法和基本技能,称为“三基”,这是需要重点掌握的。应注意把主要精力放在重点内容上。

(4) 充分发挥学习的主观能动性

做好实验,固然教师的主导作用是重要的,但更重要的是学生具有研究问题的主动态度,对实验应有信心、耐心和细心。要逐步摆脱对教师的过分依赖,改变按实验讲义上的步骤看一步做一步的学习方法。要动脑思考,在实验室里不是要一个塞满东西的头脑,而是一个善于分析思考的头脑。曾经听到过一个小故事:一天深夜,著名的物理学家卢瑟福(D. Rutherford)查看实验室时,见一个学生还在埋头做实验,便问他:“你上午干啥?”学生回答:“做实验。”“下午呢?”同样的回答。卢瑟福提高了嗓门问:“那么晚上呢?”学生答道:“也是做实验。”同时这学生稍微挺起胸脯,准备接受老师的夸奖。然而卢瑟福却严肃地对他说:“你整天做实验,还有什么时间用于思考呢?”这个故事的寓意是不言而喻的。

(5) 不要单纯追求数据,学会分析实验

定量实验一般总要获取数据。有些指导实验的教师手里有所谓“标准数据”。然而,不要以为实验的目的就是为了做出与标准数据一致的结果。有的人满足于自己的结果与“标准数据”或理论计算一致,认为这样就大功告成。而当两者差别较大时,就感到失望,认为:“倒霉”,抱怨仪器装置,甚至拼凑数据或涂改数据结果。这都是极其错误的。实验中要学会分析实验。不论数据好坏,都要找出原因。分析实验包括分析实验方法、仪器设备、人的因素、操作技能、测量次数和周围环境对测量结果的影响。当自己的数据结果与指导教师的或别人的数据相差很大时,可能是自己有错,也可能仪器出了毛病,或有异常现象。这时要检查自己的操作和记录,必要时可重复一下实验。如果毛病出在仪器上,尽量争取自己解决,学会分析和排除故障,实在解决不了,再请教老师。

(6) 要养成良好的实验习惯

实验室工作的基本素养是逐渐养成的,而且一开始就应注意。例如,记录观测结果应该用记录本,不要随使用纸片,因为纸片极易丢失。记录本上记错了也不能撕掉。法拉第的实验室笔记是我们的楷模。记录数据要正确简明,有条有理,自始至终认真对待。如实记下观测数据、简单过程和出现的一切不正常的或自己认为有意义的现象,以便写报告时分析讨论。数据要记在表格中并注明单位。

(7) 严格要求,注意安全,遵守规则

要贯彻三个“严”字的要求,即严肃的态度、严格的要求、严密的观测。

另外实验室里有电、机械、化学、温度、压力、辐射等可能发生危险的因素,绝不能疏忽大

意。为了实验的顺利进行,避免人身事故和损坏仪器,必须注意安全,遵守必要的规章制度。

4. 写好实验报告

实验报告是实验的全面总结。写实验报告不是为了交差,而是实验的必然结果。应通过实验报告恰如其分地评定自己的实验工作。因此写报告应该实事求是、严肃认真,不能敷衍了事,更不能伪造和抄袭。实验结束后应尽早把报告写出,趁热打铁、一气呵成。

(1) 实验报告应该用实验报告纸书写。文体要端正,字句要简练,用语要确切,图表要按规定格式绘制,使得一目了然。

(2) 实验报告包括题目名称、目的、原理摘要或计算公式、仪器设备及编号、简图、实验步骤、观测和数据记录、数据处理、结论、问题回答及讨论等。

(3) 实验报告上要有实验的分析讨论,这是培养分析能力的重要方面。听说有位青年教师到法国巴黎大学去进修,按照国内传统的方式写实验报告,数据及处理都是正确的,就是缺少讨论和误差分析。导师说,这种报告不及格!可见国外对实验讨论的重视。实验后可供讨论的很多,例如:

① 实验的原理、方法、仪器你感到掌握了没有? 实验目的达到否?

② 实验误差的分析讨论,有哪些误差来源? 哪些是主要的? 哪些是次要的? 系统误差表现在哪里? 如何减少或消除?

③ 改进实验的设想。怎样改进测量方法或装置? 实验步骤怎样安排更好? 讲义如何改写,教学方法应如何改进? 对老师的希望。

④ 观察到什么异常现象,如何解释? 遇到什么困难,如何克服?

⑤ 测量结果是否满意? 误差是否在允许范围内,如实验结果不好,是何原因?

⑥ 该实验对进一步加深和巩固理论知识有何帮助? 实验涉及的原理、方法有何实用价值?

(4) 误差计算、作图、有效数字运用要符合要求,这是基本素养的重要方面。作图一定要用坐标纸或专用作图纸。作图法不仅具有简明直观的特点,而且是求很多量的有用方法,需要逐步掌握。

从某种意义上来说,实验报告是论文的前奏,有的实验报告本身就是一篇小论文。写实验报告是写论文和技术报告的很好锻炼。

(沙振舜)

第一章 原子核物理实验

预备知识

原子核物理的发展,加深了人们对微观世界的认识,推动了科学技术的变革,开辟了核能利用的新时代。而随着人们对核辐射与物质相互作用规律的深入了解,核技术在一系列科学研究领域都得到了日益广泛的应用,如固体性质、表面杂质分析、离子注入、辐射损伤、探伤和测厚、诊断和治疗肿瘤等。现在核技术已广泛用于工、农、医等国民经济各个部门,并日益发挥它的重要作用。

核物理部分的实验都是具有代表性的。通过这些实验可了解用于放射性和射线能量测量的基本原理和方法,了解探测器的工作原理、放射性的统计规律、核衰变规律和核辐射与物质相互作用的规律,和利用这些规律对射线进行防护和核技术应用。这部分实验中还包括核物理中重要实验方法和实验技术,如符合测量法、穆斯堡尔谱学技术和正电子湮没技术等,它们都是现代科学领域中应用广泛的实验技术。我们可以通过实验来了解和应用这些实验技术。

常用放射源数据及衰变纲图见图 1.0-1。

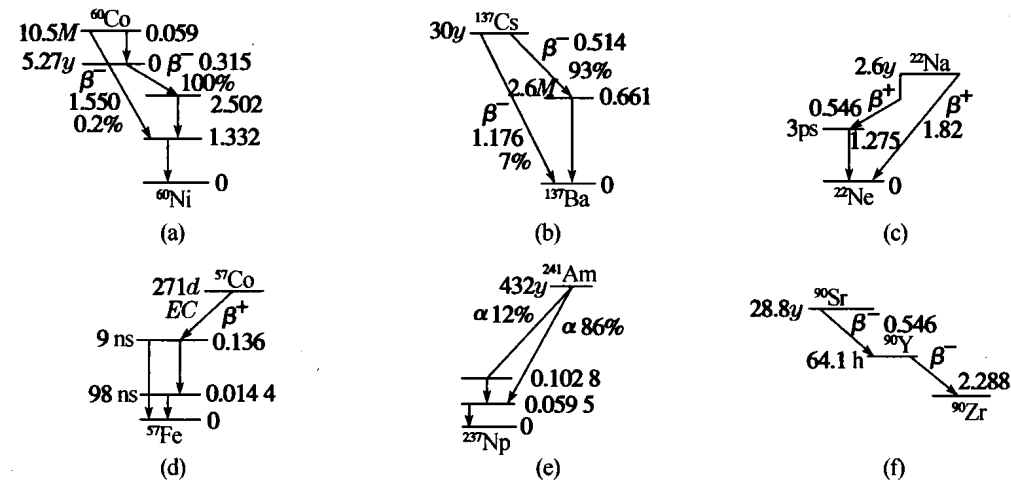


图 1.0-1 常用放射源衰变纲图

(a) ^{60}Co , (b) ^{137}Cs , (c) ^{22}Na , (d) ^{57}Co , (e) ^{241}Am , (f) ^{90}Sr

常用放射源数据见表 1.0-1。

表 1.0-1 常用放射源数据

同位素	半衰期	主要射线 (MeV)	规格(mm)			强度	性 状	包 装
			活性区 直径	径片 直径	托片 厚度	Bq		
⁶⁰ Co 钴	5.72 年	β^- 0.31 γ 1.17; 1.33	ϕ 10 ϕ 12	ϕ 18 外套 ϕ 15	2 外套 10	$10^5 \sim 10^6$	电镀在铝托片上,覆 盖有机膜	塑料盒
¹³⁷ Cs 铯	30 年	β^- 0.514 γ 0.662; 1.18	ϕ 10	ϕ 20	2	$10^4 \sim 10^5$	铯镀于铝托片上	塑料盒
²⁴¹ Am 镅	432 年	α 5.48; 5.44 γ 0.060	ϕ 10 ϕ 20	ϕ 15 ϕ 35	1 1	10^4	镅镀于不锈钢托片	铁盒
²³⁹ Pu 钚	2.4×10^4 年	α 5.15 5.14	ϕ 10 ϕ 25	ϕ 15 ϕ 35	1 1	10^3	钚镀于不锈钢托片	铁盒
²⁰⁴ Tl 铊	3.77 年	β^- 0.765	ϕ 10 ϕ 20	ϕ 18 ϕ 30	2 2	$10^4 \sim 10^5$	铊镀于铝托片上,盖 有机膜	塑料盒
⁹⁰ Si ⁹⁰ Y 锶钇	28.8 年	β^- 0.55 2.27	ϕ 10 ϕ 20	ϕ 18 ϕ 30	2 2	$10^4 \sim 10^5$	锶盐填充在铝片上的 氧化膜中,盖有机膜	塑料盒
⁵⁵ Fe 铁	2.7 年	X 5.9 keV 6.5 keV	ϕ 10	ϕ 12.5	2	$< 6 \times 10^8$	铁镀于铜片上	有机玻璃盒
²² Na 钠	2.6 年	β^+ 1.820 0.546 γ 1.275						
⁵⁷ Co 钴	271 天	γ 0.0144 0.122 0.136	ϕ 13 ϕ 14	ϕ 16 ϕ 19		10^8	钴嵌入基底如钨、铈 等金属中	铝盒

(赵经武 沈德勋)

实验 1.1 NaI(Tl)闪烁谱仪系列实验

引言

闪烁探测器是利用某些物质在射线作用下受激发光的特性来探测射线的仪器。它的主要优点是:既能探测各种带电粒子,又能探测中性粒子;既能测量粒子强度,又能测量粒子能量;且探测效率高,分辨时间短。它在核物理研究和放射性同位素测量中得到广泛的应用。本实验的目的是了解 NaI(Tl)闪烁谱仪的原理、特性与结构,掌握 NaI(Tl)闪烁谱仪的使用方法和 γ 射线能谱的刻度,学会 NaI(Tl)闪烁谱仪的应用。

实验原理

1. γ 射线与物质的相互作用

γ 射线与物质的相互作用主要是光电效应、康普顿散射和正、负电子对产生三种过程。

(1) 光电效应:入射 γ 粒子把能量全部转移给原子中的束缚电子,而把束缚电子打出来形成光电子。由于束缚电子的电离能 E_1 一般远小于入射 γ 射线能量 E_γ ,所以光电子的动能近似等于入射 γ 射线的能量

$$E_{\text{光电}} = E_{\gamma} - E_1 \approx E_{\gamma}$$

(2) 康普顿散射:核外电子与入射 γ 射线发生康普顿散射的示意图见图 1.1-1。设入射 γ 光子能量为 $h\nu$, 散射光子能量为 $h\nu'$, 则反冲康普顿电子的动能 E_e 。

$$E_e = h\nu - h\nu'$$

康普顿散射后散射光子能量与散射角 θ 的关系为

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \quad (1.1-1)$$

$$\alpha = \frac{h\nu}{m_e c^2}$$

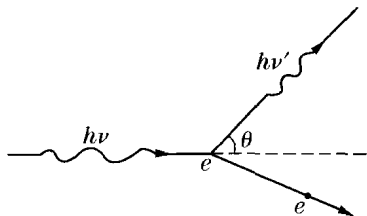


图 1.1-1 康普顿散射示意图

α 为入射 γ 射线能量与电子静止质量之比。由 (1.1-1) 式得, 当 $\theta=0$ 时, $h\nu' = h\nu$, 这时 $E_e = 0$, 即不发生散射; 当 $\theta=180^\circ$ 时, 散射光子能量最小, 它等于 $h\nu/(1+2\alpha)$, 这时康普顿电子的能量最大, 为

$$E_{e(\max)} = h\nu \cdot \frac{2\alpha}{1+2\alpha} \quad (1.1-2)$$

所以康普顿电子能量在 0 至 $E_{e(\max)}$ 之间变化。

(3) 正、负电子对产生: 当 γ 射线能量超过 $2m_e c^2$ (1.022 MeV) 时, γ 光子受原子核或电子的库仑场的作用可能转化成正、负电子对。入射 γ 射线的能量越大, 产生正、负电子对的几率也越大。在物质中正电子的寿命是很短的, 当它在物质中消耗尽自己的动能, 便同物质原子中的轨道电子发生湮没反应而变成一对能量各为 0.511 MeV 的 γ 光子。

2. 核衰变的统计规律

在重复的放射性测量中, 即使保持完全相同的实验条件 (例如放射源的半衰期足够长, 在实验时间内可以认为其活度基本上没有变化; 源与探测器的相对位置始终保持不变; 每次测量时间不变; 测量仪器足够精确, 不会产生其他的附加误差等), 每次的测量结果并不完全相同, 而是围绕着其平均值上下涨落, 有时甚至有较大的差别。这种现象就叫做放射性计数的统计性。放射性计数的这种统计性反映了放射性原子核衰变本身固有的特性, 与使用的测量仪器及技术无关。

放射性原子核衰变的统计分布可以根据数理统计分布的理论来推导。放射性原子核衰变的过程是一个相互独立彼此无关的过程, 即每一个原子核的衰变是完全独立的, 和别的原子核是否衰变没有关系, 而且哪一个原子核先衰变, 哪一个原子核后衰变也是纯属偶然的, 并无一定的次序, 因此放射性原子核的衰变可以看成是一种伯努里试验问题。设在 $t=0$ 时, 放射性原子核的总数是 N_0 , 在 t 时间内将有一部分核发生了衰变。已知任何一个核在 t 时间内衰变的概率为 $p = (1 - e^{-\lambda t})$, 不衰变的概率为 $q = 1 - p = e^{-\lambda t}$, λ 是该放射性原子核的衰变常数。利用二项式分布可以得到在 t 时间内有 n 个核发生衰变的概率 $p(n)$ 为

$$p(n) = \frac{N_0!}{(N_0 - n)! n!} (1 - e^{-\lambda t})^n (e^{-\lambda t})^{N_0 - n} \quad (1.1-3)$$

在 t 时间内, 衰变掉的粒子平均数为

$$m = N_0 p = N_0 (1 - e^{-\lambda t}) \quad (1.1-4)$$

其相应的均方根差为

$$\sigma = \sqrt{N_0 p q} = \sqrt{m(1 - p)} = (m e^{-\lambda t})^{\frac{1}{2}} \quad (1.1-5)$$

假如 $\lambda t \ll 1$, 即时间 t 远比半衰期小, 这时 σ 可简化为

$$\sigma = \sqrt{m} \quad (1.1-6)$$

N_0 总是一个很大的数目,而且如果满足 $\lambda t \ll 1$, 则二项式分布可以简化为泊松分布,因为在二项式分布中, N_0 不小于 100, 而且 p 不大于 0.01 的情况下, 泊松分布能很好的近似于二项式分布, 此时

$$p(n) = \frac{m^n}{n!} e^{-m} \quad (1.1-7)$$

在泊松分布中, n 的取值范围为所有的正整数 $(0, 1, 2, 3, \dots)$, 并且在 $n = m$ 附近时, $p(n)$ 有一极大值; 当 m 较小时, 分布是不对称的; m 较大时, 分布渐趋近于对称。当 $m \geq 20$ 时, 泊松分布一般就可用正态(高斯)分布来代替:

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(n-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.1-8)$$

式中 $\sigma^2 = m$, $p(n)$ 是在 n 处的概率密度值。

现在我们分析在放射性测量中原子核衰变的统计现象服从的泊松分布和正态分布, 因此, 只需将分布公式中的放射性核的衰变数 n 改换成计数 N , 将衰变掉粒子的平均数 m 改换成计数的平均值 M 就可以了:

$$p(N) = \frac{M^N}{N!} e^{-M} \quad (1.1-9)$$

$$p(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(N-M)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.1-10)$$

式中 $\sigma^2 = M$ 。

由(1.1-10)式可以看出, 正态分布决定于平均值 M 及均方根差 σ 这两个参数, 它对称于 $N = M$, 见图 1.1-2。对于 $M = 0, \sigma = 1$, 这种分布称为标准正态分布。一般的概率统计书上给出的正态分布数值表都是对应于标准正态分布的。

计数值处于 $N \sim (N + dN)$ 内的概率为

$$p(N)dN = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(N-M)^2}{2\sigma^2}} dN \quad (1.1-11)$$

为了计算方便, 需作如下的变量置换(称标准化)。

令

$$z = \frac{N - M}{\sigma} = \frac{\Delta}{\sigma}$$

则

$$\begin{aligned} p(N)dN &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} d\Delta \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \end{aligned} \quad (1.1-12)$$

而 $\int_0^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$ 称为正态分布概率积分, 此积分的数值表在参考资料[1]:《原子核物理实验方法》下册中的附录上可以查到。

如果我们对某一放射源进行多次重复测量, 得到一组数据, 其平均值为 $\bar{N}$, 那么计数值落

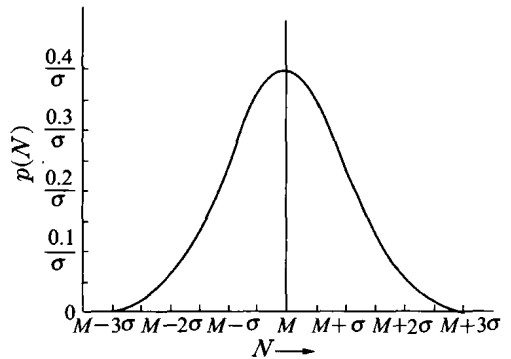


图 1.1-2 正态分布图

在 $\bar{N} \pm \sigma$ (即 $\bar{N} \pm \sqrt{\bar{N}}$) 范围内的概率为

$$\int_{\bar{N}-\sigma}^{\bar{N}+\sigma} p(N) dN = \int_{\bar{N}-\sqrt{\bar{N}}}^{\bar{N}+\sqrt{\bar{N}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(N-\bar{N})^2}{2\sigma^2}} dN$$

用变量 $z = \frac{N-\bar{N}}{\sigma}$ 来置换之, 并查表, 上式即为

$$\int_{-1}^{+1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz = 0.683$$

这就是说, 在某实验条件下进行单次测量, 如果计数值为 N_1 (N_1 来自一个正态分布总体), 那么我们可以说 N_1 落在 $\bar{N} \pm \sqrt{\bar{N}}$, 即 $(\bar{N} \pm \sigma)$ 范围内的概率为 68.3%; 或者反过来说, 在 $\bar{N} \pm \sqrt{\bar{N}}$ 范围内包含真值的概率是 68.3%。实质上, 从正态分布的特点来看, 由于出现概率较大的计数值与平均值 $\bar{N}$ 的偏差较小, 可以用 $\sqrt{N_1}$ 来代替 $\sqrt{\bar{N}}$ 。对于单次测量值 N_1 , 可以近似地说, 在 $N_1 \pm \sqrt{N_1}$ 范围内包含真值的概率是 68.3%, 这样用单次测量值就大体上确定了真值所在的范围, 这种由于放射性衰变的统计性而引起的误差, 叫做统计误差。放射性统计涨落服从正态分布, 所以用均方根差 (也称标准偏差) $\sigma = \sqrt{\bar{N}}$ 来表示。当采用标准偏差表示放射性的单次测量值 N_1 时, 则可以表示为 $N_1 \pm \sigma = N_1 \pm \sqrt{\bar{N}} \approx N_1 \pm \sqrt{N_1}$ 。用数理统计的术语来说, 将 68.3% 称为“置信概率” (或叫做“置信度”), 相应的“置信区间”即 $\bar{N} \pm \sigma$, 当置信区间为 $\bar{N} \pm 2\sigma$, $\bar{N} \pm 3\sigma$ 时, 相应的置信概率则为 95.5% 和 99.7%。

3. 闪烁谱仪结构与工作原理

NaI(Tl) 闪烁谱仪结构如图 1.1-3 所示。整个仪器由探头 (包括闪烁体、光电倍增管、极跟随器), 高压电源, 线性放大器、多道脉冲幅度分析器几部分组成。射线通过闪烁体时, 闪烁体的发光强度与射线在闪烁体内损失的能量成正比。带电粒子 (如 α, β 粒子) 通过闪烁体时, 将引起大量的分子或原子的激发和电离, 这些受激的分子或原子由激发态回到基态时就放出光子; 不带电的 γ 射线先在闪烁体内产生光电子、康普顿电子及正、负电子对 (当 $E_\gamma > 1.02$ MeV 时), 然后这些电子使闪烁体内的分子或原子激发和电离而发光。闪烁体发出的光子被闪烁体外的光反射层反射, 会聚到光电倍增管的光电阴极上, 打出光电子。光阴极上打出的光电子在光电倍增管中倍增出大量电子, 最后为阳极吸收形成电压脉冲。每产生一个电压脉冲就表示有一个粒子进入探测器。由于电压脉冲幅度与粒子在闪烁体内消耗的能量 (产生的光强) 成正比, 所以根据脉冲幅度的大小可以确定入射粒子的能量。利用脉冲幅度分析器可以测定入射射线的能谱。

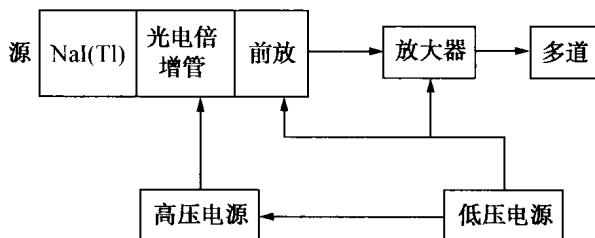


图 1.1-3 闪烁谱仪框图

4. 谱仪组件性能一般介绍

(1) 闪烁体: 闪烁体是用来把射线能量转变为光能的。闪烁体分无机闪烁体和有机闪烁

体两大类。实际运用中依据不同的探测对象和要求选择不同的闪烁体。本实验中采用含铯(Tl)的 NaI 晶体作 γ 射线的探测器。

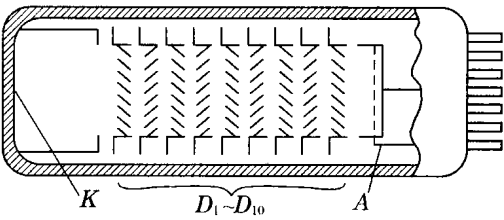


图 1.1-4 百叶窗式非聚集型光电倍增管

(2) 光电倍增管: 光电倍增管的结构如图 1.1-4 所示。它由光阴极 K 、收集电子的阳极 A 与在阳极与光阴极之间十个左右能发射二次电子的次阴极(又称倍增极、打拿极或联极)构成, 相邻的两个电极之间的电位差一般在 100 V 左右。当闪烁体发出的光子打到光阴极时, 它打出的光电子被加速聚焦到第一倍增极 D_1 上, 平均每个光电子在 D_1 上打出 3~6 个次级电子, 增殖的电子又为 D_1 和 D_2 之间的电场加速, 打到第二个倍增极 D_2 上, 平均每个电子又打出 3~6 个次级电子, ……这样经过 n 级倍增后, 在阳极上就收集到大量的电子, 在负载上形成一个电压脉冲。

(3) 能量分辨率: 由于形成阳极电流脉冲之前的各种过程的统计性质, 对应于某一定能量的粒子, 光电倍增管的输出脉冲的幅度的大小仍有起伏(图 1.1-5)。通常把脉冲计数率随脉冲幅度分布的半宽度 $\Delta U_{\frac{1}{2}}$ 与计数率最大值对应的脉冲幅度 U_0 之比定义为能量分辨 ϵ 。

由于粒子能量与脉冲幅度成正比, 所以能量分辨率

$$\epsilon = \frac{\Delta U_{\frac{1}{2}}}{U_0} = \frac{\Delta E}{E} \tag{1.1-13}$$

影响能量分辨率的主要因素有:

① 同一能量的粒子在闪烁体中产生的光子数目不同。这是由于:

- a. 闪烁体发光过程的统计涨落;
- b. 闪烁体的非均性使不同点的发光效率不同;
- c. 入射粒子穿过晶体的角度、位置不同所带来的在晶体内损失能量的不同。
- ② 粒子的入射位置不同, 闪烁体所发出的光能到达光阴极的收集效率也不同。
- ③ 光阴极表面的不均匀性, 阴极的不同位置发射光电子的效率不同。
- ④ 光阴极发射光电子数和光电倍增管的倍增系数的统计涨落。
- ⑤ 光电倍增管的本底脉冲噪声将叠加在入射粒子的脉冲信号上使之发生涨落。

NaI(Tl) 晶体对 ^{137}Cs 的 0.662 MeV 的 γ 射线能量分辨率为 6%~8%。

5. 闪烁谱仪对 ^{137}Cs 单能 γ 射线的响应

^{137}Cs 只放出单一能量的 γ 射线($E_\gamma=0.662\text{ MeV}$), 此 γ 射线能量小于正、负电子对的产生阈 1.02 MeV, 所以 Cs 的 γ 射线与 NaI(Tl) 晶体的相互作用只有光电效应和康普顿散射两个过程。图 1.1-6 给出了用 NaI(Tl) 晶体 γ 谱仪所测得的 ^{137}Cs 的 γ 能谱, 其中 1 号峰相应于光电峰, 1 号峰左面的平台相应于康普顿电子的贡献。如果康普顿散射产生的散射光子 $h\nu'$ 未逸出晶体, 仍然为 NaI(Tl) 晶体所吸收, 也即通过光电效应把散射光子的能量 $h\nu'$ 转换成光电子能量, 而这个光电子也将对输出脉冲作贡献。由于上述整个过程是在很短时间内完成的, 这个时间比探测器形成一个脉冲所需的时间短得多, 所以先产生的康普顿电子和后产生的光电子, 二者对输出脉冲的贡献是叠加在一起形成一个脉冲。这个脉冲幅度所对应的能量, 是这两

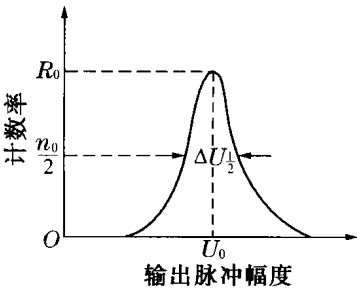


图 1.1-5 输出脉冲幅度涨落所带来的对能量分辨本领的限制