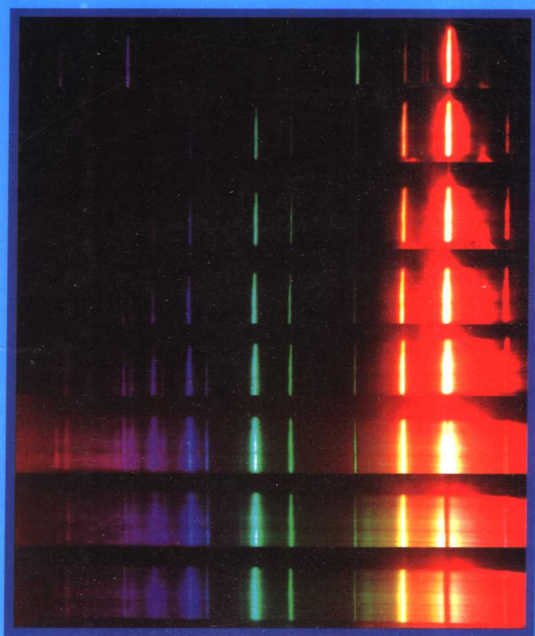




普通高等教育“十一五”规划教材

新编近代物理实验

王魁香 韩 炜 杜晓波 主编



科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书是参照教育部高等院校物理学与天文学教学指导委员会实验物理教学指导组 1999 年通过的“高校理科物理专业(四年制)近代物理实验教学基本要求”规定的实验内容编写的. 内容涉及原子核物理、原子与分子物理、激光与光学、微波、磁共振、真空、X 射线衍射、声学、凝聚态物理和显微观测技术等领域 10 个单元, 共计 40 个实验题目. 本书重点在于阐述实验的物理思想和方法, 注重培养学生的创新思维和实验动手能力, 提高其科学素质.

本书适合作为高等院校理工科本科生和硕士研究生的近代物理实验课程的教材或教学参考书, 也可供从事科学实验的科技人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

新编近代物理实验/王魁香, 韩 炜, 杜晓波主编. —北京: 科学出版社, 2007

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-03-018911-0

I. 新… II. ①王…②韩…③杜… III. 物理学-实验-高等学校-教材
IV. O41-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 062901 号

责任编辑: 胡云志 昌 盛/责任校对: 朱光光

责任印制: 张克忠/封面设计: 卢秋红

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京市文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 7 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2007 年 7 月第一次印刷 印张: 20

印数: 1—3 500 字数: 468 000

定价: 29.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈文林〉)

前 言

我校晏于模、王魁香主编的《近代物理实验》教材于 1995 年由吉林大学出版社出版。该书供历届物理专业和非物理专业的高年级本科生和低年级研究生使用,在培养学生综合思维能力、实践创新能力等方面收到了很好的效果。近年来,由于科学技术的飞速发展,对实验教学改革提出了“以培养 21 世纪科技创新人才为目标”的更高要求,为了适应新时期教学改革和人才培养的需要,我们编写了这本《新编近代物理实验》。

近代物理实验与普通物理实验不同,是一门综合性较强的专业基础实验课程,具有多种理论、多种技术、多种学科交叉的特点。自 1995 年以来,为了使科研与教学更好地结合,我们实施了“以科研促教学,与专业联合共建近代物理实验课”的教改方案,建立了一支稳定的由近代物理实验室教师、实验技术人员和具有博士学位(占 90%)、工作在科研第一线、有成就的专业教师(教授 6 人,其中博导 4 人)组成的教学团队,该团队知识结构、年龄结构和职称结构合理,积极开展科学研究和教学改革研究,及时转化科研成果,改革教学内容和教学方法,建立了近代物理实验课的新体系,取得了显著的教学改革实践效果。近代物理实验课被评为首批校级、省级精品课,是国家理科基地创名牌课的优秀课程。编写这本《新编近代物理实验》是对十几年来教学改革成果的总结。

《新编近代物理实验》具有以下几个主要特点。

1. 删去一些更适合普通物理实验开出或不常被选的实验(如密立根油滴实验、夫兰克-赫兹实验和正电子寿命谱等),增加了在 20 世纪近代物理发展史中起到重要作用的著名实验和能反映现代科学技术水平,更有利于培养学生理论思维能力、实践能力、创新能力的实验题目 16 个(如声学、凝聚态物理、显微观测技术三个单元以及相对论效应、薄膜的物理气相沉积——磁控溅射法、卫星云图接收与大气物理探测等);引进 CCD 和计算机等现代技术改进了部分保留实验的内容和方法;如真空镀膜增加了膜厚测量,微波的光学特性增加了天线增益的测量等;

2. 吸收广大教师的科研成果,自主研制一批新的实验仪器,如:微波电子顺磁共振,光学双稳、非稳、混沌振荡和控制,振动样品磁强计,磁电阻效应测量等,其中微波电子顺磁共振和振动样品磁强计都研制了两种不同的实验装置;

3. 引入新的科学前沿实验内容,如:纳米材料的制备与表征、高温超导材料制备和超导转变温度测量等,有利于培养学生的科研兴趣和认知能力;

4. 在部分实验中增加了选做的“实验设计”以及几个实验相结合的实验设计内容(如:磁控溅射法制备 ZnO 薄膜及结构表征、纳米材料制备与表征等);同样的实验有不同的方案供选择(如微波电子顺磁共振、振动样品磁强计),每种方案的实验内容都能作为一个实验题目供选择,以适应各层次的教学,给予更大的灵活性,进一步培养学生自主实践、自主创新的能力和兴趣;

5. 学生不很熟悉的原子核物理、微波、磁共振和 X 射线衍射技术单元都编写了基础

知识,而“误差和数据处理”未编写独立单元,因为它与普通物理实验明显不同的是原子核物理实验,为了更好地结合实验题目,将这部分内容放在原子核物理实验部分进行阐述.另外,由于实验室每个实验的实验卡片中已有实验预习、操作等具体要求,所以除个别实验外,未在每个实验中编写这部分内容,要求学生自行设计实验步骤,以期提高学生的自主性、创造性.

本书编写了 10 个单元,共计 40 个实验,供学生选择,但由于近代物理的实验仪器昂贵,有的实验只有一套实验装置,同学可选取不同的实验互相交流,扩大知识面,共同提高.

参加编写本书编写人员有王魁香[2.4,3.1,单元4,5.0,5.1,5.2,5.3,单元8];韩炜[单元7,9.3];杜晓波[9.1,9.2,9.4,9.5,10.2];贺天民[6.1,6.2,6.4,6.5,9.5,10.1];姚斌[6.2,6.3];苏雪梅[2.5];陆景彬[1.0,1.3];马玉刚[1.0,1.1,1.2,1.4,1.5];储昭坦[2.1,2.2,2.3,5.4];国秀珍,王刚[3.3,3.4];孙昕[2.1,2.2,2.3,2.4,3.1,3.3];崔海峰[6.5];张志杰[5.1,9.1].

本书是近十几年来曾经担任和正在承担近代物理实验教学任务的教师与实验技术人员的集体贡献,我们三位主编做了组织和统编工作,感谢各位老师、实验技术人员的辛勤劳动,也感谢历年来使用《近代物理实验》的师生和兄弟院校的同行提出的宝贵意见.在编写过程中,曾参阅了兄弟院校近代物理实验教材和讲义,在此一并致谢.我们还要感谢吉林大学教务处领导和物理学院领导的大力支持和帮助.

由于我们学术水平所限,编写时间仓卒,书中错误与不妥之处在所难免,敬请广大读者提出宝贵意见,以使它更臻完善.

编 者

2007 年 1 月

目 录

前言

单元 1 原子核物理	1
§ 1.0 基础知识	1
§ 1.1 盖革-弥勒计数器及核衰变的统计规律	16
§ 1.2 用闪烁计数器测 γ 能谱	21
§ 1.3 符合测量	27
§ 1.4 相对论效应	34
§ 1.5 特征 X 射线谱与吸收	39
单元 2 原子与分子物理	45
§ 2.1 塞曼效应	45
§ 2.2 氢-氘光谱	53
§ 2.3 钠原子光谱	59
§ 2.4 双原子分子光谱	67
§ 2.5 拉曼光谱	74
单元 3 激光与光学	81
§ 3.1 He-Ne 激光器的模式测量	81
§ 3.2 法拉第效应	86
§ 3.3 晶体电光调制和光学双稳	93
§ 3.4 光学非稳、混沌振荡和控制实验	97
单元 4 微波技术	103
§ 4.0 微波基础知识	103
§ 4.1 反射速调管的工作特性	119
§ 4.2 微波的波导传输与检测	126
§ 4.3 微波的光特性及天线增益的测量	137
§ 4.4 卫星云图接收与大气物理探测	144
§ 4.5 微波介质特性的测量	150
单元 5 磁共振技术	155
§ 5.0 磁共振基础知识	155
§ 5.1 核磁共振	165
§ 5.2 电子顺磁共振	172
§ 5.3 YIG 单晶铁磁共振	183
§ 5.4 光泵磁共振	189

单元 6 真空技术	198
§ 6.1 真空的获得与测量	198
§ 6.2 真空镀膜及膜厚测量	206
§ 6.3 薄膜的物理气相沉积——磁控溅射法	213
§ 6.4 气体放电等离子体研究	218
§ 6.5 He-Ne 激光器放电条件的研究	224
单元 7 X 射线衍射技术	230
§ 7.0 晶体结构的基本知识与 X 射线衍射	230
§ 7.1 X 射线衍射物相分析	236
单元 8 声学	252
§ 8.1 固体介质声学参数的测量和波形频谱分析	252
§ 8.2 声源定位及 GPS 模拟	260
单元 9 凝聚态物理	268
§ 9.1 振动样品磁强计	268
§ 9.2 磁电阻效应测量	274
§ 9.3 纳米材料制备与表征	278
§ 9.4 高温超导材料制备和超导转变温度测量	286
§ 9.5 半导体霍尔效应测量	292
单元 10 微观观测技术	299
§ 10.1 扫描隧道显微镜 (STM)	299
§ 10.2 扫描电子显微镜及能谱仪	306
附表 常用物理常数与物理量单位	312
附表 1 常用物理常数表	312
附表 2 常用物理量单位	313
附表 3 计量名词的词头	314

单元 1 原子核物理

§ 1.0 基础知识

核物理实验技术不仅在原子核物理的基础研究领域里,而且在工农业、医学、地质、宇航、核电、核安全、核测试等方面也有着重要的应用。

核物理实验探测的对象主要是核衰变时所辐射的 α 、 β 、 X 、 γ 射线和中子。相应的探测器也大致可分为径迹型与信号型两大类。径迹型探测器能给出粒子运动的径迹,如核乳胶、固体径迹探测器、威耳逊云室、气泡室等。这些探测器大多用于高能物理实验。信号型探测器则可以在一个辐射粒子到达时给出一个信号。根据工作原理的不同又可以分为气体计数器、闪烁计数器和半导体探测器三种,这是在低能核物理实验中最常用的探测器。

一、核测量的基本方法

核物理实验最基本的内容之一是测量辐射粒子的强度(单位时间内接收粒子的数目)、能谱(强度随能量的分布)、角分布(强度随角度的分布)以及它们随时间的变化关系。对于探测器和有关核电子学仪器装置的基本要求就是把入射粒子的强度、能量和粒子到达的时间记录下来。一般情况下,核辐射粒子进入探测器所产生的信号幅度与辐射粒子能量之间的比例关系以及探测器的效率、能量分辨率和输出脉冲的波形是我们选择探测器时要考虑的重要因素。

理想的探测器信号的幅度正比于辐射粒子在探测器中损失的能量,测定信号的幅度就能标定粒子的能量。实际上,探测器脉冲幅度与能量的关系不可能是严格线性的,而是存在一些偏离,称为非线性。对于一个具体的谱仪,人们利用一组已知能量的标准源对它进行标定,测出能量与脉冲幅度的关系曲线称为能量校准曲线。对能量未知的粒子测出其脉冲幅度,利用校准曲线,就可以求出射线的能量。

探测器的效率定义为探测器中产生的可被检测的信号计数与入射粒子数的比值。探测效率不仅与粒子的性质有关,也与粒子的能量有关。对于低能辐射,若所产生的信号幅度比噪声小,则无法检测,入射粒子可被检测时所需要探测器中损耗的最低能量称为该探测器的灵敏度。影响探测效率的另一个因素是分析信号所用的电子学设备尚存在对灵敏度的限制,低于此阈值的脉冲将检测不出来,因此探测效率还与电子学仪器的阈值有关。

探测器的能量分辨率是指探测器对于能量很接近的辐射粒子加以区别的能力。能量分辨率取决于相同能量的辐射所产生的脉冲幅度分布的展宽程度。以百分比表示的能量分辨率 R 的定义如下:

$$R = \frac{\text{峰半高处的宽度}}{\text{峰位所对应的能量}} \times 100\%$$

R 越小,分辨率越高.

探测器输出脉冲的波形由两部分构成,它的上升前沿部分由探测器的本身机制(如电子倍增过程、发光过程等)所决定.当利用探测器作时间测量仪器时(如时间符合测量),脉冲前沿是首先必须考虑的因素.另一部分是脉冲的下降部分,它取决于测量系统的时间常数,由它决定脉冲宽度.脉冲宽度过大,当计数率较高时会发生脉冲重叠现象,使相邻进入的两个脉冲无法分辨而造成计数损失,这时脉冲的高度也不反映粒子的能量.减小时间常数可以把脉冲宽度减小,但是为了保持能量线性关系和提高探测器的灵敏度,时间常数也不能太小.

下面就所涉及的核物理的实验方法简单介绍如下.

1. 散射实验

卢瑟福利用原子对 α 粒子的散射确定了原子的核模型.康普顿的 X 射线散射实验证实了光子是具有能量 $E = h\nu$ 和动量 $p = h\nu/c$ 的粒子,在微观的光子与电子的相互作用过程中,能量与动量守恒仍然成立.1960 年穆斯堡尔(Mössbauer)首先发现了原子核无反冲的 γ 射线共振吸收和共振散射现象,在该过程中入射光子完全为核所吸收,把原子核激发到激发态,此即 γ 射线的共振吸收,然后核退激时再放出 γ 光子.由于上述过程是在核无反冲的情况下发生的,穆斯堡尔谱线非常狭窄,它的测量精度可达 10^{-13} 数量级,是迄今物理学领域中测量精度最高的一种实验技术.

2. 符合测量

在核衰变现象中,有许多时间上相互关联的事件,这种相关的事件往往反映了原子核内在的运动规律,例如核级联衰变时所放射的粒子之间在时间上是相关的,级联衰变的平均时间间隔就是核激发态的平均寿命,又如上述衰变的粒子还有方向上的相关性即方向角关联.通过这些相关现象的研究可了解原子核结构和转化规律.符合测量就是研究相关事件的一种方法,近 20 年来由于快电子学、多道分析器和多参数分析系统(直接测定核反应过程中各种参数之间的相互关系)的发展和电子计算机在核物理实验领域中的应用,符合方法已成为实现多参数测量的必不可少的实验手段.

3. 能谱测量

测量带电粒子能量的方法最简单的是射程测量方法.这种方法比较粗糙,已较少应用.第二种是能量灵敏探测器方法,它包括电离室、正比计数器、闪烁计数器和半导体探测器.利用探测器的输出脉冲幅度与入射粒子能量成正比这一规律,通过脉冲幅度与时间变换器把不同幅度的脉冲信号记录在多道分析器的不同的地址单元中,以测定入射粒子的能谱(此方法也适用于 γ 射线和 X 射线能谱的测量).它是迄今为止最常用、技术设备发展最快的一种方法.第三种方法是能量色散的方法(又称磁分析法),如 α 和 β 磁谱仪等.它利用不同能量的粒子因其动量不同造成在磁场中运动的轨迹不同而把具有不同能量的

粒子区别开,目前它仍然是分辨率最好、精度最高的方法。

4. 时间谱测量

测量核事件之间短的时间间隔,如测量核激发态的短寿命、正电子在各种物质中平均湮没寿命、核粒子的飞行时间等是核物理实验的一项重要技术。而正电子湮没的研究和应用也是利用了短寿命测量的实验技术。

二、常用核电子仪器

本节仅对常用的前置放大器、线性脉冲电压放大器、高压电源、单道脉冲幅度分析器及多道脉冲幅度分析器的主要功能及使用作以介绍。

1. 前置放大器

探测器输出脉冲幅度较小,内阻较高,一般在探头内部安置一级射极跟随器以减少外界干扰的影响,同时使之与线性放大器输入端实现阻抗匹配。

2. 线性脉冲电压放大器

各种辐射探测器的原理及结构完全不同,被探测的辐射特性及能量也有差异,致使获得的电信号的幅度大小及波形各不相同。因此,必须采用线性脉冲电压放大器对脉冲信号放大和成形,同时又应严格保持原信号的能量信息和时间信息。一般线性放大器的放大倍数能在10~1000倍范围内变化,对其性能的要求是稳定性高、线性好和噪声小。

3. 高压电源

对探测器提供高压,要求高压电源稳定性好。高压变化对脉冲幅度影响很大,因而直接影响能量的测量。

4. 单道脉冲幅度分析器

单道脉冲幅度分析器,基本上是由两个脉冲甄别器(上甄别器和下甄别器,只对幅度超过一定值的脉冲才能动作的线路装置)和一个反符合电路组成,如框图1.0.1所示。

两个脉冲甄别器分别决定了触发脉冲高度的上限和下限,上限与下限之差称为道宽。从上下甄别器输出的触发脉冲送到反符合电路,反符合电路的逻辑功能是只有在下甄别器被触发而上甄别器没被触发的情况下,它才能有脉冲输出。如果下甄别器的阈值为 E_1 (触发脉冲高度的下限),上甄别器的阈值为 E_2 (触发脉冲高度的上限),则 $E_0 = E_2 - E_1$ 即为单道脉冲幅度分析器的道宽。当 E_0 一定时我们可以连续改值分别为 V_1 和 V_2 ,则输入脉冲高度为 V_0 时,只有当 $V_1 < V_0 < V_2$ 时,输入脉冲才能触发下甄别器而上甄别器不被触发,此时反符合电路才能有脉冲输出。即输入脉冲才能通过单道分析器。因此可以用 E_1 和 E_2 值来限定,只允许某一脉冲高度范围的输入脉冲通过,在这个范围以外的任何脉冲(大的或小的)都不能通过。所以我们可以利用单道脉冲幅度分析器测量出脉冲计数率按幅度的分布。

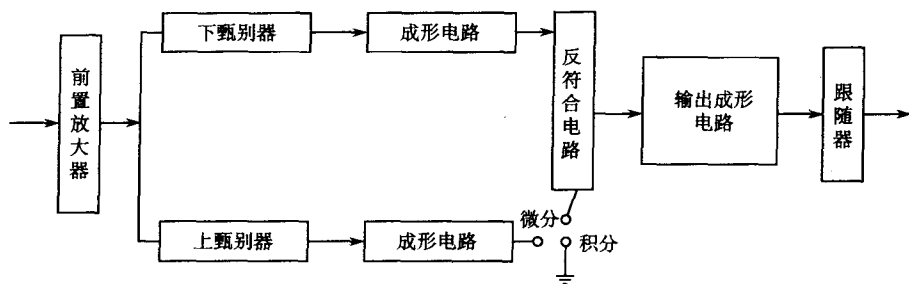


图 1.0.1 单道脉冲幅度分析器框图

5. 多道脉冲幅度分析器

多道分析器是核物理实验、核技术应用、凝聚态物理、光学以及许多学科用于实验测量的通用设备。其中比较常用而且我们实验中涉及的是多道微机系统。

从数据获得的观点，多道分析器所有应用可以采用脉冲高度分析(PHA)或多路定标(MCS)两种方式。下面分别予以介绍。

(1) 脉冲高度分析

在 PHA 操作方式，一系列脉冲，例如从一探测系统来的脉冲，被送到多道分析器输入端，这些脉冲的振幅(高度)正比于被探测器所吸收的入射粒子的能量，按照每一个高度脉冲的数目和形式的直方图，多道分析器记录的正是探测器得到的辐射能谱。

脉冲高度分析的一个主要内容是脉冲高度分布分析，因为输入脉冲是按电压振幅分类而产生一个直方图，代表不同脉冲高度产生的次数。图 1.0.2 用图示方法代表了这个过程。

图 1.0.2 (a)描述一系列可能出现在多道分析器输入端的电压脉冲。垂直轴分为相等间隔的 10 格，每一格代表 1V 的脉冲电压高度。图右边的数字代表落入各个间隔中的脉冲数。这个同样的数据在图 1.0.2 (b)中以直方图形式表示，水平轴分格相应原来信号电压分格。这就是在 PHA 数据获取方式期间，多道分析器所执行的脉冲高度分布分析。

PHA 操作的最初应用是定量分析从探测器吸收的辐射能量而产生的电流或电压脉冲(其幅度正比于探测器所吸收的能量)输出信号，常用的探测器有 NaI(Tl)闪烁探测器、半导体探测器和充气正比计数器等。所有这些探测器的共同特征是由探测器所产生的每一电压脉冲相应于每一个光子或粒子沉积在探测器中的能量，由于核衰变是一个随机的过程，从探测器输出的输入到多道分析器的一系列脉冲，具有所有可能振幅的时间随机混合的脉冲，在 PHA 操作方式下的多道分析器的任务，就是把这些脉冲按振幅分类并且存储后成谱。当然，实际的情况可以是 1024, 2048 或 4096 个分立的振幅电平(这远大于 10 个电平)，所对应的是 1024, 2048 或 4096 道直方图，这些脉冲高度分布直方图即是能谱图。

从分析的观点看，一个 PHA 分布直方图(谱)之所以能提供定性和定量的结果，是因为道数相应于输入电压，输入电压相应于入射到探测器的能量，而在谱中的任何峰的能量

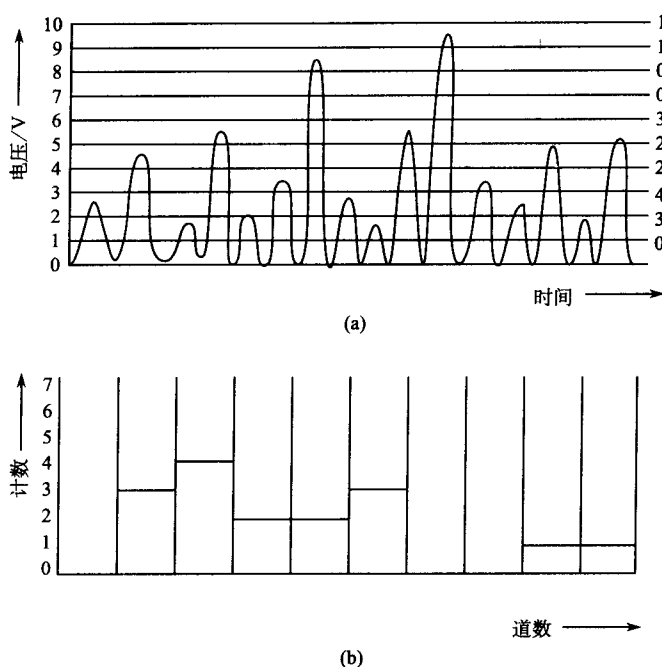


图 1.0.2 PHA 操作
(a)输入电压脉冲;(b)PHA 直方图

较容易确定,从而能进一步确定放射源的种类.

(2) 多路定标

MCS 分析产生一个代表事件(辐射强度)数相对于时间的直方图,正如在 PHA 中,输入信号是一系列脉冲,每一个代表一简单事件,但是,MCS 分析不涉及这些脉冲振幅的本身,所存储的数据是各个脉冲在一个给定的时间周期内被记录的数目.

在 MCS 操作方式下,在一个预先确定的时间周期内将多道分析器输入端探测到的脉冲一个接一个地记录到当前存储器道址中,在时间周期(dwell time)末尾,MCS 时间基准推进到下一存储道址.而当前脉冲在 dwell time 被记录入当前道.因此每一存储道按次序选择为一个时间函数.这种操作在图 1.0.3 中可以以一简化形式表示.在图 1.0.3 (a)中,输入脉冲系列将产生如图 1.0.3 (b)的直方图.注意,一个 MCS 分析产生一个积分直方图.

MCS 分析有几种应用,其中一种应用包括研究为时间函数的事件的分布.这类应用之一是研究核衰变,合成的 MCS 直方图代表指数衰变曲线.

许多其他应用(例如穆斯堡尔谱测量方法)包括 MCS 对外部装置的同步扫描,在这种情况下,时间轴事实上代表外部装置位置或条件,例如在穆斯堡尔工作中,就代表振子速度.

在所有应用中,合适的“dwell time”(也可称每道停留时间)必须预先选择好.以下几种因素能影响这种选择:

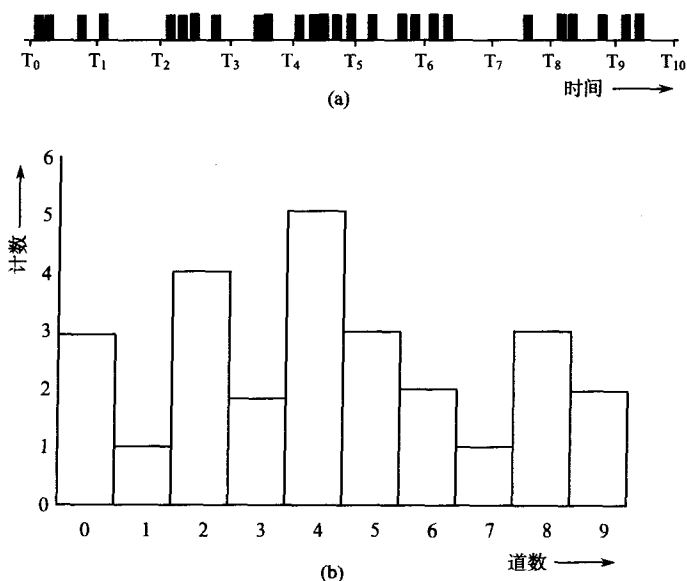


图 1.0.3 MCS 操作
(a)输入脉冲系列;(b)MCS 直方图

- ① 对整个扫描所要求的时间;
- ② 为数据存储所使用的道数;
- ③ 要求的计数统计性(每道计数);
- ④ 外部装置的情况.

在许多情况下,这些标准可能是不相容的.例如,对一个简单数据探测扫描要求合适的统计性,这时的穆斯堡尔谱仪的扫描速率可能是过快了,在这些情况下,35 系列和 40 系列允许多重 MCS 探测扫描.

多道脉冲幅度分析器微机数据采集及处理软件主要功能包括:

- ① 定时/定数据获取;
- ② 谱压缩及放大;
- ③ 光标随机指示道址和道计数;
- ④ 谱数据格式变换及存盘;
- ⑤ 建立感兴趣区,计算峰面积;
- ⑥ 谱平滑及自动寻峰,存/读盘;
- ⑦ 打印数据及谱线.

微机多道分析器使用方法:

运行 winmca 程序:点击开始→然后程序→winmca,主窗口见图 1.0.4.

其简单使用步骤为

- ① 设置测量预置时间;
- ② 按开始按钮开始测量,得到标准源能谱后,存谱;

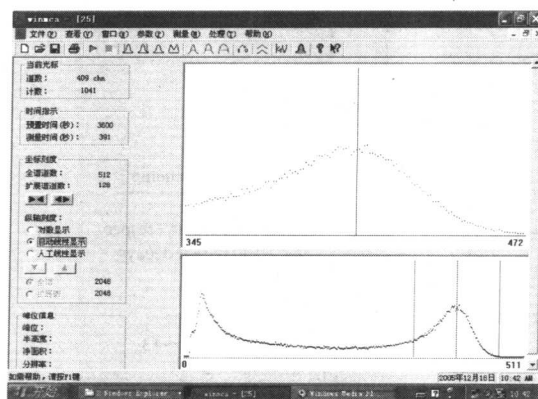


图 1.0.4 winmca 程序主窗口

- ③ 单击主菜单“处理”，选择“能量刻度”进行刻度；
- ④ 然后测量样品的能谱，得到谱后进行寻峰，得到峰的能量和峰面积。

三、放射源、射线及防护

1. 常用放射源

实验中常用的放射源有 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 、 ^{152}Eu 、 ^{238}Pu 、 ^{241}Am ，其中 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{152}Eu 是 γ 源， ^{90}Sr 是 β 源， ^{238}Pu 是X射线源， ^{241}Am 是 α 源。

原子核衰变过程可用图表来表示，这种图叫做衰变纲图。从衰变纲图可获得原子核及核衰变的许多信息，是核结构研究的一个重要内容，在核技术应用中也发挥着重要作用。下面，以 ^{137}Cs 为例，介绍一下衰变纲图，如图1.0.5的表示方法。

其余放射源的衰变纲图可参照 ^{137}Cs 的说明来理解。

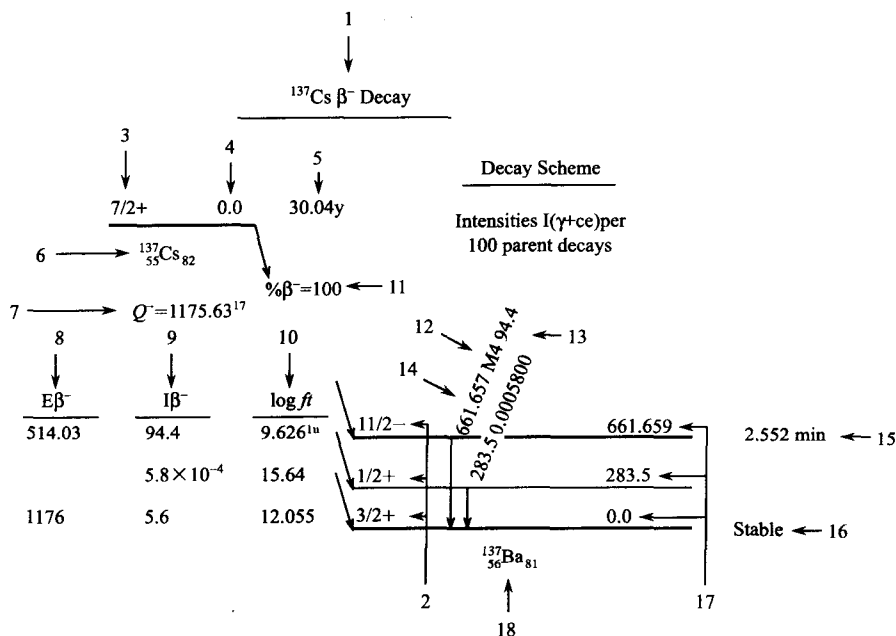
2. 射线种类和性质

(1) α 粒子

α 粒子是一个氦核，它是由 α 发射体以某一不连续的能量和特有的半衰期而发出来的。 α 粒子具有下列性质：①绝大多数 α 粒子在给定的气体中具有相同的射程；② α 粒子沿着直线径迹运动；③某些 α 粒子在射程末端附近散射；④少数 α 粒子在离开放射源不远的地方就被散射了。

由于 α 粒子有很强的电离本领，因此在致密物质中具有很短的射程，对人体的危害远比其他外来辐射为小。天然放射性物质发射能量最高的 α 粒子才刚好能穿过人体皮肤的角质层。因而，对于绝大多数 α 放射源，受损伤的只是无生命的组织，不存在外照射危害。

相反，一旦到体内， α 粒子的短射程就变得非常有害了。在体内 α 放射源受活组织包围，损伤高度地集中在 α 粒子源点附近。因此，如果 α 粒子辐射源积在人体内的重要器官，这器官就会受到严重的损伤，因为粒子的能量全部被这器官吸收，而不会分布到较大体积的整个组织。因此， α 粒子作为一种内照射时其危害是值得重视的。

图 1.0.5 ^{137}Cs 衰变纲图

- 核素衰变的类型, 所列纲图中出现衰变类型的符号有: α 表示 α 衰变; β 表示 β 衰变, 包括 β^- 表示 β^- 衰变, β^+ 表示 β^+ 衰变; 2. 表示子核基态及激发态的自旋及宇称; 3. 衰变核素的自旋及宇称; 4. 衰变核素的基态, 在图中基态用粗黑线表示, 基态能量值表示为 0; 5. 衰变核素的半衰期; 6. 衰变核素符号, 左上角数字表示质量数, 左下角数字为原子序数, 右下角数字为中子数; 7. 衰变能, 表明衰变后整个系统静止能量的减少; 8. 衰变核素衰变时放出的粒子的能量, 单位是 keV; 9. 衰变核素衰变时放出的粒子的分支比; 10. 表示 β 衰变的比较半衰期, 即 $\log ft$ 值; 11. 图中所示的所有衰变核素衰变时放出粒子的分支比总和; 12. 表示 γ 跃迁的多极性; 13. 表示 γ 跃迁的绝对强度; 14. 表示 γ 跃迁的能量值, 以 keV 为单位; 15. 表示核素长寿命激发态半衰期, 图中用较粗黑线表示这种同核异能态; 16. 表明子和基态是稳定的, 不再衰变. 如果子核是不稳定的, 就在其基态线旁边列出半衰期并标明衰变类型; 17. 表示子核激发态的能量值, 以 keV 为单位; 18. 子核的核素符号

(2) β 粒子

β 粒子是由不稳定的原子核发射出来的高速电子. β 辐射的概念已经扩大到包括正电子辐射, 可以认为 β 粒子是正电子和电子, 它们的静止质量相同, 电荷相等, 但符号相反, 和 α 粒子不同, β 粒子展示出一个连续能谱. 当电子通过物质时, 它们以多种方式损失能量. 与轨道电子碰撞引起电离和激发而损失能量是发生的最多的机理. 但是 β 粒子也会和核发生相互作用, 引起 X 射线的发射(韧致辐射).

一个 β 辐射源可以构成外部危害, 危害的大小取决于 D 的能量. 大约 70keV 能量的 β 粒子就能穿透皮肤角质层而损伤活组织. 通常 β 辐射被认为只是一种轻微的外部危害因素. 用很薄的铅层(例如 1mm 的铅片)就能完全屏蔽掉 β 辐射源.

对高能 β 辐射源进行屏蔽时, 在屏蔽物中产生的 X 射线也可以引起外照射危害. 选

降低原子序数 Z 的屏蔽物质能减小韧致辐射的数量。

β 粒子在体内的危害不如 α 粒子大。在组织中, β 具有较大的射程, 但是它的比电离要比 α 粒子的小, 在组织的一个小体积中, β 粒子放出的能量没有 α 粒子放出的多。因而 β 粒子在引起体内损伤方面不是那么严重。

(3) X 射线和 γ 辐射

X 射线具有如下性质: ①X 射线能穿透绝大多数物质; ②许多物质受到 X 射线照射时会发光; ③X 射线在气体中产生电离; ④高能电子打到固体上产生 X 射线; ⑤X 射线对照相底片起作用; ⑥X 射线在电场和磁场中并不偏转, γ 射线也具有相同的性质。更进一步的工作表明, X 射线和 γ 射线都是电磁波。惟一的区别是来源: γ 射线是属于由原子核发射出来的辐射; X 射线是在原子核外部产生的辐射。

作为潜在的外部危害, X 和 γ 射线最为严重。X 和 γ 射线在空气和其他物质中具有很大的射程, 所以即使在离开放射源相当远的地方也可以造成重大的危害。为了保证不受危害, 在绝大多数情况下, 都需要进行屏蔽。X 和 γ 射线所要求的屏蔽层厚度远大于用来屏蔽 α 和 β 粒子的厚度。由于 X 和 γ 射线穿透物质的能力很强, 以致对组织的损伤遍及全身。因而, 当人的身体处在外部 γ 场中时, 辐射敏感性较高的组织会受到照射。这些器官的损伤对人体的影响比其他部位的损伤要大得多。为此, 在外照射情况下, X 和 γ 射线比 α 和 β 射线有更大的危害。

反之, 在内照射情况下, X 和 γ 辐射对人体内的危害并不如 α 或 β 辐射那么大, 如同 β 辐射一样, γ 射线在组织中的能量较少。一个光子只是在它和物质相互作用时才交出能量。它不像 α 和 β 那样产生连续的电离径迹。因此, γ 放射源对人体小器官的损伤比相同强度的 α 和 β 放射源所引起的损伤要小。

(4) 中子

中子能以各种方式产生出来, 用放射源和一定的靶物质借助于 (α, n) 反应就可以产生中子; 在加速器中用高能粒子打击靶材时, 也能产生中子; 反应堆中裂变过程也生成中子。而我们在这里主要讨论 (α, n) 反应中子源。这类中子源经常是将 α 辐射体和细而均匀的靶物质粉末完全混合而制成的。通常采用的 α 辐射体是 ^{226}Ra , ^{210}Po , ^{239}Pu 。作为靶物质的是 B, Be, Li, Na 和 F。Be 是最常用的靶物质, 因为它能给出最高的中子产额。中子源强度经常用 α 辐射体的强度来表示。

由于 Ra, Po, Pu 和 Be 的剧毒性, 这些中子源必须密封在金属容器中。由于中子不带电, 它们在空气和其他物质中, 可以走过很大距离, 因而, 屏蔽中子要比屏蔽 α 和 β 困难得多。

3. 放射性工作中的安全操作和防护

在核物理实验中, 所用的放射源基本上分成两类: 一类是将放射性物质放在密封的容器中, 正常使用中不会泄漏, 称为封闭源; 另一类是将放射性物质黏附在小托盘上或镀在小金属片上 (有时在这种源的活性面上覆盖一层极薄的有机膜), 在使用过程中放射性物质有可能向周围环境扩散, 这类放射源称为开放源。在实验教学中, 源的放射性强度不宜太大, 除必须用毫居里 (mCi) 级的实验外, 其余一般用微居里 (μCi) 级。

(1) 外照射防护的基本原则与措施

外照射是指射线从外部照射人体组织,其防护原则及措施是

① 控制时间. 接触放射源的时间越短,人体所受的照射量就越小,因而要求操作人员事前要做好充分准备,操作步骤尽可能简单快捷,同时避免在辐射场所中作不必要的逗留.

② 控制距离. 人体受到辐照的剂量与离放射源的距离的平方成反比. 因此,增大人体与放射源的距离,可以显著地减少人体所受的辐射剂量. 如利用镊子或具有不同功用的长柄器械及机械手进行远距离操作,让控制室与放射源之间有足够的距离等.

③ 实施屏蔽. 利用射线通过物质后能量、强度会损失的性质,在人体与放射源之间设置屏障,可以有效地减少辐射对人体的伤害. 常用的屏蔽材料有砖石、混凝土、有机玻璃以及铅、铁、铝等金属.

在实际工作中,以上三种防护措施常常是综合使用的.

(2) 内照射防护的原则与措施

内照射是指放射性物质经过吸入、吃入或伤口渗入等途径进入人体内,造成辐射及其化学毒性对人体器官的双重危害,其防护原则及措施是:

① 防止放射性物质由呼吸道进入体内. 在操作开放性液体源时,需在通风橱中进行;操作粉末状放射物质,必须在手套箱中进行,并要带上口罩.

② 防止放射性物质经手转移或直接入口. 放射性工作场所内,严禁进食、吸烟、饮水和存放食物,要正确使用相应的个人防护用品,实验结束后要洗手.

③ 防止放射性物质经体表进入体内. 面部和手臂等处有伤口者,应暂时停止从事可能受到放射性污染的工作.

(3) 放射源的安全操作

① 放射源要有固定的存放地点(如保险柜),并加铅块屏蔽. 实验结束应立即归还原处锁好.

② 任何形式封装的放射源,均不得直接用手接触其活性区,取放射源必须使用专用镊子或托盘等工具.

③ 操作 β 、 γ 、X 源时,应配戴防护眼镜,切忌用眼睛直视活性区,以免损伤角膜.

四、放射性测量的统计误差

1. 泊松分布,高斯分布,标准误差,置信度和置信区间

我们知道核衰变的过程本身以及用于探测的射线与物质相互作用过程都具有统计特征.

对于大量原子核 N , 经过时间 t 后,平均地说其数目将按指数规律 $e^{-\lambda t}$ 衰减, λ 为衰变常数,它与放射源的半衰期 T 之间满足公式

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

在 t 时间内平均衰变的原子核数目 m 为

$$m = N(1 - e^{-\lambda t}) \quad (1.0.1)$$

根据上式,统计平均看,每个核在 t 时间内发生衰变的概率为 $1 - e^{-\lambda t}$,不发生衰变的概率为 $e^{-\lambda t}$. 因此,在 t 时间内,统计平均看,在 N 个原子核中有 n 个核发生衰变的概率为

$$P(n) = \frac{N!}{(N-n)!n!} (1 - e^{-\lambda t})^n (e^{-\lambda t})^{N-n} \quad (1.0.2)$$

上式小系数 $N! / [(N-n)! n!]$ 是考虑了 N 个原子核中发生衰变的 N 个核的各种可能的组合数. 现设原子核总数 N 远大于 1, 测量时间 t 远小于放射源的半衰期 T , 即 λt 远小于 1, 即衰变数 n 远小于粒子总数 N . 这时式(1.0.2)分子中的 $(N-1), (N-2), \dots, (N-n+1)$ 均可用 N 代替, 于是有

$$P(n) \approx \frac{N^n}{n!} (\lambda t)^n (e^{-\lambda t})^{N-n} \approx \frac{(N\lambda t)^n}{n!} e^{-N\lambda t}$$

由式(1.0.1)可知,这时 $m = N\lambda t$, 则有

$$P(n) \approx \frac{m^n}{n!} e^{-m} \quad (1.0.3)$$

此即泊松分布. 它告诉我们如果在时间间隔 t 内平均衰变次数为 n , 则在时间间隔 t 内衰变数为 n 出现的概率 $P(n)$ 即如式(1.0.3)所示. 图 1.0.6 给出了 $m=3.5$ 的泊松分布.

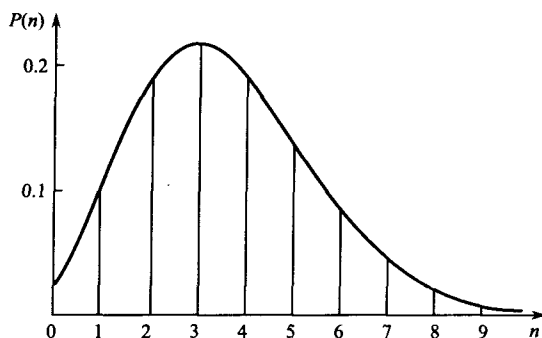


图 1.0.6 $m=3.5$ 时的泊松分布曲线

泊松分布有下列四个重要性质:

① 满足归一化条件

$$\sum_{n=0}^{\infty} P(n) = e^{-m} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{m^n}{n!} = e^{-m} e^m = 1$$

② 根据上式, t 时间内平均衰变数应

$$\sum n P(N) = e^{-m} \sum n \frac{m^n}{n!} = e^{-m} m \frac{d}{dm} \left(\sum \frac{m^n}{n!} \right) = m e^{-m} e^m = m$$

③ 每次测量得到的衰变数 n 与平均衰变数 m 之间的偏差的平均值为 0, 即

$$\overline{(n-m)} = \sum_{n=0}^{\infty} (n-m) P(n) = 0$$

④ 通常用上述偏差 $n-m$ 的均方根值 σ 来表征核衰变统计涨落的大小, σ 称为标准