

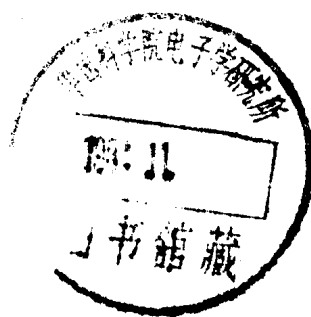
中子源物理

丁厚本 王乃彦 编著

科学出版社

中 子 源 物 理

丁厚本 王乃彦 编著



科 学 出 版 社

1984

1111771

0487/02
内 容 简 介

随着中子在工业、农业、科技、医学和国防等方面的广泛应用,中子源研制工作获得了巨大发展。本书比较全面地而系统地介绍了当代世界上中子源发展的最新成就,其中重点介绍了放射性同位素中子源、加速器中子源、单次和重复脉冲反应堆、铀氢锆反应堆、基准中子场、带电粒子束裂变和聚变中子源、浓密等离子体焦点装置、中子管、脉冲散裂中子源等。书中对各种中子源的物理基础作了较为深入的阐述,并列出了大量的有关公式和数据图表。对于各种中子源的辐射剂量问题也作了较为详细的讨论。

本书可供大专院校核物理、反应堆物理、放射化学、放射医学、辐射防护和环境保护等专业师生及从事中子源研制和应用的科技人员参考。

中 子 源 物 理

丁厚本 王乃彦 编著

责任编辑 荣毓敏

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1984年6月第一版 开本:787×1092 1/16
1984年6月第一次印刷 印张:36 1/2
印数:0001—2,600 字数:837,000

统一书号:13031·2581

本社书号:3547·13—3

定价:5.60元

1571111

序 言

早在 1920 年,杰出的物理学家 E. 卢瑟福就预言存在着一种尚未被觉察到的中性粒子,它具有较强的穿透能力。1932 年 J. 查德威克在给英国《自然》科学杂志的信中指出,镭的 α 粒子与铍相互作用可以获得一种粒子,它是中性的,称为“中子”,它的质量与质子的质量大致相等。从中子发现至今已经 50 年了,越来越多的获得中子的方法已被人们所掌握,中子源的强度也比以前大得多了。

人们研制的第一个中子源是镭铍源,它的缺点是中子的能谱分布很宽,而且在放出中子的同时,伴随有 γ 射线。后来人们研制了钋铍源,它的优点是几乎不伴随有 γ 射线,但它的中子能谱分布仍然很宽。为了获得能量单色性较好的中子源,曾广泛地利用各种核反应来获得中子,如用 (α, n) 、 (p, n) 、 (d, n) 反应。核反应堆的出现又使我们有了另一种获得高强度中子的方法,特别是强流脉冲粒子加速器和脉冲反应堆的出现,使人们能够获得 10^{18} 中子/秒平方厘米的中子通量。由于电子直线加速器和电子强流脉冲加速器的发展,人们已能利用电子在物质中产生的韧致辐射所产生的 (γ, n) (γ, f) 反应来获得中子。

本书较为全面地介绍了各种有意义的中子源,其中包括放射性同位素中子源,低能加速器中子源,裂变反应堆中子源(如快堆、单次脉冲堆、重复频率脉冲堆、基准中子场、TRIGA 堆等),等离子体中子源等。本书作者收集了大量有关中子源的资料、图表和数据,并作了分析和讨论,对各种中子源的安全问题也作了论述。本书可以作为一本较为完整的中子源手册性的书籍供读者使用。

中子源的研究在中子物理、原子核物理等科研工作中占有重要地位,在工农业生产、医疗卫生、能源及国防科研方面也很重要,因此《中子源物理》一书的出版对于国内开展这方面的研究必将起着促进作用。

王淦昌

1982.4.7

前 言

自1932年发现中子到现在仅五十年的历史,但是,已经形成了一门独立的学科——中子物理学。随着科学技术的发展,中子应用的范围已扩展到了工业、农业、科学、医学、国防和国民经济其他许多重要部门,而且取得了引人注目的成果。

中子的应用首先必须要有产生中子的中子源。那么,什么是中子源,中子源的主要性能指标有哪些,中子源的物理基础是什么,实际应用中应该如何选择能量、强度、通量、几何形状和尺寸都合适的中子源,如何正确使用和设计中子源,对于利用中子源获得的结果又如何进行分析,现在有哪些种类中子源,在最近的将来会出现哪些新型的中子源等等,这些都是本书要着重讨论的问题。目前国内外似尚无一本讨论上述问题的比较完整的、比较新的书,本书力图完成这个任务。

全书共分七章,并有四个附录。在第一章中我们首先概述中子源的基本特性;在第二章至第六章中分别专门介绍放射性同位素中子源,加速器中子源,裂变反应堆中子源,带电粒子束裂变和聚变中子源,以及其他中子源。在第七章中讨论当今世界上中子源的发展途径和方向。为了更透彻地理解中子源的物理基础,特在附录一、二中详细讨论了带电粒子、光子与物质的相互作用;为了使本书更具有实用价值,特在附录三中详细讨论了大家关心的氙的问题,在附录四中列了几个重要的数据表。

本书力求理论与实验相结合,比较系统、深入地阐述各类中子源的物理基础,包括基本的物理概念,理论分析和计算方法的要点,主要的实验方法和结果,以及辐射剂量学方面的问题。因此,本书可以作为高等学校核物理、反应堆物理、放射化学、放射医学、辐射防护和环境保护等专业的参考书。

在书中列出了有关中子源的大量公式和数据图表。有关专业的科技人员和各行各业的中子源使用者可以把它当作为一个方便的中子源手册来用。

本书力求做到内容新。作者在对近些年的数百万字的国外文献资料进行综合分析的基础上,尽可能全面地系统地介绍当代世界上中子源发展的最新情况。鉴于中子源这个概念现在已远远不只是通常所指的那几种放射性同位素中子源,低能加速器中子源和热中子反应堆中子源了,所以作者把本书的重点放在新型中子源上,例如脉冲堆、铀氢锆反应堆、基准中子场、带电粒子束裂变和聚变中子源、浓密等离子体焦点装置、中子管、脉冲散裂中子源等。本书第五章的作者王乃彦同志近年来曾就带电粒子束问题给中国科学院等有关单位专门讲过课。因此,中子源的研制者通过本书可以对当今世界上中子源发展的动态和新技术得到一个较全面较深入的了解。

值得指出的是,在整个编写过程中,有幸得到著名核物理科学家王淦昌教授的热情鼓励和亲切指导,他在百忙中还抽时间为本书撰写了序言。在定稿和出版过程中,著名物理学家钱临照教授给予了热情指导和重大帮助。研究员胡仁宇和傅依备同志在审阅本书初稿时提出过宝贵意见。沙因同志为本书写了第六章的第三节脉冲散裂中子源。王敬文、罗德勤、周永、王大伦、雷祥斌等同志曾对部分章节内容进行过推敲。许多同志为本书的出

版付出了巨大劳动。本书还引用了许多著作和文献资料的内容。作者在此谨向上述所有同志表示衷心感谢。

由于本书涉及面甚广，作者水平低，又是在几年的业余时间写成的，错误和不妥之处定会很多，恳请专家、同行和广大读者赐教。

绪论 中子的发现和应用

一、中子的发现

早在 1920 年,卢瑟福就认为存在一种中性粒子。他想这种粒子大概是由当时已知的质子和电子结合成的。他还指出用光谱方法不容易证实这种粒子的存在,而且不能被束缚在任何容器中。后来,卢瑟福实验室和几乎所有其它大实验室都做了不少努力,力求证明这种粒子的存在,但结果都没有成功。在 1930 年 W. Bothe 和 H. Becker 指出,当特别轻的元素(如锂和铍)以及其他许多元素受到 α 粒子轰击时能发射一种辐射。这种辐射具有很强的贯穿本领,能穿透很厚的铅。当时曾认为是 γ 射线。但是,许多事实(例如在铅中的吸收系数)都与这个看法相矛盾。I. Curie 和 F. Joliot 于 1932 年用电离室做实验,发现上述辐射可以从石蜡中打出质子来。他们测得这些质子在空气中的射程为 26 厘米,相当于 4.3 兆电子伏的能量。他们根据动量和能量守恒定律断定,观测到的反冲质子不可能由 γ 量子在质子上散射而形成的。如果反冲质子是由 γ 射线产生的,那么 γ 射线的能量必须达到 50 兆电子伏。另外,实际观察到的反冲质子的数量要比依据用于确定光子康普顿效应几率的克莱因-仁科公式得出的量大好几千倍。

卢瑟福实验室的 J. Chadwick 在 1932 年采用备置线性放大器和示波器的脉冲电离室证明,用 α 粒子轰击铍或硼不仅能产生上述那种辐射,而且还能产生碳或氮反冲核。这些反冲核的能量可以根据电离室内脉冲的大小或反冲核的射程来决定。J. Chadwick 分析了实验结果之后得出结论说,W. Bothe 和 H. Becker 所发现的辐射并不是由 γ 量子组成的,而是由具有一定静止质量的粒子组成的。因为所发现的这种粒子具有很大的贯穿本领,同时在威尔逊云室中不产生直接的电离,它的电荷必定非常小或者就等于零,于是 J. Chadwick 把它称为中子。中子这种中性粒子与卢瑟福假设的那种由质子和电子结合成的中性粒子并不相同,而是一种全新的基本粒子,其基本性质与质子完全一样,只是不带电。J. Chadwick 还从实验上测得中子的静止质量与质子的静止质量基本相同。后来,许多实验也进一步证实了 J. Chadwick 的结论。因此,后来人们认为中子是 J. Chadwick 于 1932 年发现的。

中子的发现促使原子核物理学研究工作飞速发展。例如,1934 年发现中子照射铀时会生成某些放射性同位素。汉恩和史脱喇斯曼发现了重核的裂变。同时,费米第一个提出用氢来减速中子的理论,并用实验加以证明。于是,在 1938 年正式实现了铀核的裂变。

二、中子的应用

中子的应用极其广泛,例如中子活化分析,中子照相,中子治癌,中子辐射育种,中子测水分,中子测井,生产放射性同位素和核燃料,材料研究,物理学研究,以及能源利用上的应用等。

1. 中子活化分析

这是中子源应用的一个很重要的方面。由于锂漂移锗半导体探测器的出现,电子学线路的改进,计算机的在线应用,加上中子源的发展,使得中子活化分析发展成为现代最先进的一种分析技术,成为分析痕量(10^{-6} — 10^{-9} 克)和超痕量(10^{-9} — 10^{-12} 克)元素的一种极其重要的有力手段。与其他分析方法相比,热中子和快中子活化分析具有灵敏度高,分析速度快,精度高,多元素同时分析,不易沾污和不受试剂空白的影响,非破坏性分析,以及可以对化学性质非常相近的元素进行分析等特点。所以,它在工业、农业、医疗卫生、环境保护、地质勘探、天体化学和考古学等许多部门和领域得到了广泛的应用。在工业上,广泛采用这种方法来分析和控制工业产品的质量。例如,在冶金工业中用来分析钢中氧和其他杂质的含量。测定高纯物质(如半导体材料)里面的微量和超微量元素;又如在食品工业中用来检查食品中有毒元素的含量。目前许多国家都已建立起专门的中子活化实验室以对各种食品、特别是进出口食品进行有毒元素的检查和鉴定。在农业上,中子活化分析技术可用来测定动植物及土壤中的微量和超微量元素,研究农药在农作物上的代谢和分解、在土壤中的积累和消失及其在农畜产品上的残留;还可用来测量河流的流速、检查堵坝的泄漏、研究地下水的移动等。在医学和生物学上,中子活化分析更是一种理想的工具,它可以更进一步了解某些痕量元素在人体或其他生物体代谢中的作用,它比过去常用的发射光谱、火焰光度计和原子吸收等方法要灵敏得多。现在,活化分析在一些大型医院的血、尿、组织样品的常规分析中已发挥越来越大的作用;在临床应用中,中子活化分析还经常用于研究碘代谢的失常,测定激素的分泌率,测量人体内各种不同的代谢库;通过活化分析发现正常组织与肿瘤组织中钾与铜和钾与锌之比值的明显差别,从而可以研究肿瘤病因;通过对心肌组织及其细胞内线立体甚至核糖核酸中的超痕量无机元素的活化分析测定,可以研究环境对心肌病的影响。在环境科学上,中子活化分析技术已成为现代环境分析中的一种极其重要的工具。近年来一些国家先后建立了专门的中子活化超痕量分析实验室,以进行环境极微量元素的分析研究。在地球化学和宇宙化学上,利用中子活化分析法测定地球岩石、陨石和月球样品中多种元素,并把各种岩石样品进行对比研究,以探索这些物质的成因关系;通过对地球和其他外来的宇宙物质中稀土元素的丰度和分布的分析测量,研究地球物质的演化过程和自然界元素的合成理论等。在考古学研究上,中子活化分析技术可用来测定岩石标本的地质年龄,考证一些古物的年代。在海洋学研究上,只要采集少量海水作中子活化分析就可对海水、海洋沉积物和海底岩石的微量元素的分布规律进行分析研究。……随着有关技术的进一步发展,中子活化分析法将在更广阔的领域里发挥更大的作用。

2. 中子照相

这是中子源应用的另一重要方面。中子照相虽是在传统的X射线照相术的基础上发展起来的,但是中子照相(尤其是热中子照相)某些方面要比X射线照相来得好,可以解决X射线照相难以解决的一些问题。所以它是X射线照相的一种很好的辅助手段。例如,中子与X射线跟物质相互作用的一个明显差别,反映在各种元素的质量吸收系数上。氢的热中子质量吸收系数很大,而一些重元素的中子质量吸收系数却很小,于是对于检查由

含氢物质和重金属所组成的物体中子照相特别有效。这方面应用最广的是对一些小型爆炸装置(如枪弹)进行照相检查。这种装置往往是在铅或不锈钢等金属外壳中装有含氢的炸药。中子照相不仅能透过金属外壳显示出里面装载的炸药,而且能观察到炸药密度是否均匀、有无空隙等。对于由含氢的塑料与金属组合而成的结构复杂的物体,采用中子和X射线照相,并进行比较,能对物体内部结构获得更正确的了解。有些原子序数邻近的元素或同一元素的不同同位素,往往中子质量吸收系数相差很远,因此利用中子照相就很容易将它们区分开来。例如在反应堆上观察镉-113 (^{113}Cd) 消耗的分布情况,显示燃料元件芯体中的裂缝和空隙等缺陷,区分元件的浓缩度差别等就是利用这一性质。中子照相特别适用于检查放射性物体,例如可以对在堆中辐照过的具有强放射性的燃料元件及时进行无损检查,观察元件的缺陷和尺寸变化。在生物学和医学上,可以用中子照相来检查骨膜的胶质和癌细胞,检查牙髓,进行病理学研究等。

3. 中子治癌

目前,世界上正在研究用中子来治疗癌症。中子治癌,可以分为快中子治癌和慢中子俘获治癌两大类。前者利用快中子产生的反冲质子以及反冲碳、氧核和 α 粒子来破坏癌细胞;后者是在癌组织中载入硼-10,利用慢中子引起的核反应 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 产生的 α 粒子和 ^7Li 核来破坏癌细胞。中子治癌的主要优点是氧增强比例小。初步情况表明,中子治癌的效果要比 γ 射线、X射线、电子束、质子束、 π^- 介子和重离子治癌的效果好得多。六十年代末到七十年代初,一些国家先后开展了中子治癌的临床研究。随着加速器中子源技术的发展以及医学基础研究和临床经验的积累,可以预计,中子治癌将会发展成为癌症治疗的重要手段之一。

4. 中子辐射育种

这是中子源在农业方面的一个重要应用。中子由于它比 γ 射线和X射线的相对生物效应高、电离密度大、能够诱发产生更多的对人类有益的突变而日益受到育种工作者的重视。自五十年代特别是六十年代以来,国际上利用中子进行辐射育种已经取得了一批很宝贵的成果。此外,利用中子源辐照、刺激生物体生长。例如,用镭-铍中子源照射柞蚕卵可以提高蚕茧的产量和蚕丝质量。

5. 中子测水分

这是通过测量热中子或超热中子密度的分布来确定被测物质中水分多少的一种方法。它比“称重、烘干、称重”法和电学、热学方法更为简易可靠,可以连续测量,反映迅速,灵敏,测量时间短,不用取样即可直接进行测量。现在,在农业、工业、土木建筑工程和水文地质等许多部门的水分测量中得到了应用。例如在工业上,中子测水分技术已被用来测定和控制烧结料、铸造砂、焦炭、煤、化肥、水泥以及建筑物的地基、路基等的含水量。在农业上,用来测量地表和地层深处土壤的含水量,研究农作物生长和土壤水分的关系。

6. 中子测井

中子测井技术,是利用中子与矿井周围岩石和井内介质起作用、研究钻井剖面、寻找有用矿藏及研究工程质量的一种矿场地球物理方法。这种技术自从四十年代初开始应用于油田的勘探和开发以来,已逐渐发展成为一门内容丰富、种类繁多的测井技术,例如有一般中子测井、中子寿命测井和能谱测井等。一般中子测井主要是指中子- γ 测井,包括超热中子测井和热中子测井,可以用来确定孔隙度、确定含油层、寻找和划分气层、划分岩性。中子寿命测井或称热中子衰减时间测井,是测量热中子被地层俘获所需时间与深度变化关系的一种测量方法。该法灵敏度高,可以有效地测定含油、气、水层,特别是对地层水中含氯量(如含NaCl)高的油田更为有效。能谱测井是通过对地层天然或中子诱生的放射性物质的 γ 能谱进行分析以达到了了解岩石组分和识别地层目的的一种测井方法,它通常包括自然 γ 能谱测井、快中子非弹性散射 γ 能谱测井、中子俘获 γ 能谱测井和中子活化 γ 能谱测井四个方面。能谱测井可用来划分油水层和判断水浸情况,可以测出水淹层、水淹厚度及残余油饱和度,确定油田的含油量,还可直接鉴定地层的岩性、确定地层的孔隙度。中子测井技术还可勘探其他一些金属和非金属矿藏,例如中子活化测井技术可用来勘探铜矿、铀、钍矿,缓发中子测井技术可用来分析矿石样品的铀、钍含量,进行区域性普查和勘测工作,灵敏度可高达 10^{-9} 克的铀。

7. 生产放射性同位素和核燃料

在现有的1500多种放射性同位素中,天然存在的仅50多种,其余的全是人工制造的。除了用加速器的高能带电粒子(氘、质子等)生产同位素和分离重核的裂变产物来获得同位素之外,各种中子源、特别是反应堆中子源和迴旋加速器中子源是生产一般放射性同位素的主要途径。我们知道,放射性同位素在工业、农业、医学和科学研究等各个领域中都已广泛应用。例如,在冶金方面,利用放射性同位素检查冶金炉壁损坏的情况;在机械方面,利用放射性同位素的 γ 射线探伤和焊缝检查,研究机械零件的磨损、润滑,研究翻砂杂质等;在纺织方面,利用放射性同位素来控制棉纱均匀度、温度,消除静电等;在农业方面,利用放射性同位素作示踪剂,可以观察各种营养物质被吸入和渗透入植物和动物有机体内的情况;在医学方面,可以用放射性同位素来诊断和治疗许多疾病;在分析化学中,可以用放射性同位素来进行元素的定量测定和溶解度的测定。在物理化学中,可用来测定难挥发性物质的饱和蒸气压和测定晶体表面。在有机化学中,放射性指示剂是解决一系列复杂的化学反应机构(如脂的皂化反应机构、重排作用和氢键等)的最重要和最有效的工具。在辐射化学中,利用中子源及由反应堆中子源生产的强 γ 辐射源(如 ^{60}Co 和 ^{137}Cs)来引发目前一般方法所难以实现的化学反应过程,还可用来研究物质受辐照时各种性能变化的规律从而找出更好的防护材料。例如,利用反应堆中子由苯的局部氧化来生产石炭酸,在反应堆上进行联胺合成的试验,用中子诱发裂变产生的裂变碎片的能量由苯加水来制造苯酚等等。

在核燃料生产方面,把 ^{232}Th 和 ^{238}U 放在生产堆和高通量反应堆内用中子照射,就可以得到裂变物质 ^{233}Th 和 ^{239}U ,这两种放射性同位素经过 β 衰变以后,就分别生成核燃料 ^{233}U 和 ^{239}Pu 。利用反应堆中子照射 ^6Li ,就可生产出聚变材料——氚。利用反应堆、高能

重离子加速器、以及地下核爆炸形成的强中子源,还能生产从 95 号的镅到 100 号的镎范围的超铀元素。

在核物质的生产、加工、运输和贮存等过程中,使用中子源的所谓“中子询问法”是反应性监测的一种简单、快速、准确可靠、非破坏性检查的好方法。

8. 中子辐照和材料研究

中子源可用来对电子学线路、电子元器件进行辐射加固;可用来进行裂变反应堆燃料元件的试验、长期考验和部件寿命考验;还可用来对聚变反应堆材料的辐射分解和辐照损伤问题进行研究,例如: 溶盐、冷却剂和增殖层的辐射分解,氘化锂、氚化锂屏蔽和结构材料的辐射分解,密封硼酸盐水溶液用的有机材料的辐射分解,中子辐照引起真空壁和结构材料延展性下降,气体和点缺陷产生、协萃效应、嬗变效应等,都可用中子源进行模拟试验。

中子源可用来对超导系统材料的特性例如电阻率、临界电流、场和温度进行研究。中子源还可用来进行新型半导体器件的生产。近年来还发展起来一种利用中子的“原子合金化”技术,可提高模具硬度,延长模具寿命。

9. 在物理学研究中的应用

在核物理学方面,中子源是探索原子核秘密的一个有效武器。可以用各种中子源、特别是加速器中子源来进一步测量各种有关的中子核参数,包括从热中子到 20 兆电子伏中子对给定核素引起的各种反应的微观截面,出射中子、带电粒子和 γ 射线的能谱、角分布和激发函数,裂变过程的各种特性参量(包括缓发中子的和缓发 γ 的参数),核温度与能级密度等核性质;可以用中子源来测量中子在大块介质中的慢化、扩散和吸收等宏观中子参数;还可以用中子源来测量聚变反应堆设计所要求的中子弹性和非弹性散射截面、微分角散射、二次中子的和光子的能谱;还可以用中子源来进行有关中子引起的核反应(包括裂变反应)的反应机制和反应能谱学的研究。

在凝聚态物理学方面,已用中子飞行时间测量技术和中子(特别是热中子和冷中子)的弹性和非弹性散射技术来研究物质的静态和动态特性,研究磁性材料在不同温度下原子间的磁相互作用关系,研究低量子现象和超导现象。在固体物理学中,通过利用热中子散射对单晶沿各个晶面间色散关系的测定,可以研究晶格内诸原子间的作用力。通过对某些材料的散射律的测定,则可以更好地了解中子在这些介质里的慢化、输运和扩散等过程。

在生物物理学方面,利用中子衍射方法测定生物结构,其依据是氢与氘的中子散射强度相差很大。这种方法可以弥补电子显微镜和 X 射线研究生物结构层次上的不足,能测定核糖体和染色质的结构、真核细胞膜结构,能确定 X 射线衍射得出的蛋白质三维结构中的氢原子位置等等。对于探索生命的奥秘来说,中子方法是一个有效手段。

10. 在核能利用等方面的应用

和平利用核能的装置——核电站,包括现有的裂变反应堆型和未来的聚变反应堆型,都需要中子源来点火和起动。核武器——原子弹、氢弹及所谓的“中子弹”,原则上都需要

使用某种特殊形式的“点火”中子源。此外，在核能科学技术方面的核物理仪器的调试与刻度，防护设备和生物学效应的研究等都离不开中子源。

上面概略地谈了一下中子源的应用。实际上中子源的应用还很多，这里不可能一一列举出来。总之，中子源的应用作为一门新的技术，应该大力提倡、运用和推广，应该积极创造条件发展各种中子源。

目 录

绪论	ix
第一章 中子源基本特性概述	1
§ 1.1 中子的基本性质	1
1.1.1 中子的特性	1
1.1.2 中子与物质的相互作用	5
1.1.3 中子的探测原理	20
§ 1.2 中子源的基本特性	30
1.2.1 中子源的分类	30
1.2.2 中子产额和强度	32
1.2.3 中子能量和能谱	36
1.2.4 中子角分布	39
§ 1.3 中子辐射场的特征	45
第二章 放射性同位素中子源	50
§ 2.1 (α, n) 反应型中子源	50
2.1.1 一般描述	50
2.1.2 $\text{Be}(\alpha, n)$ 源	54
2.1.3 其他 (α, n) 源	82
2.1.4 (α, n) 源在使用中的几个特殊问题	89
§ 2.2 (γ, n) 型中子源	107
2.2.1 (γ, n) 源的能量研究	108
2.2.2 $\text{D}(\gamma, n)$ 反应	109
2.2.3 ${}^9\text{Be}(\gamma, n){}^8\text{Be}$ 反应	111
2.2.4 光激中子源	113
§ 2.3 自发裂变中子源	119
2.3.1 ${}^{252}\text{Cf}$	121
2.3.2 ${}^{240}\text{Pu}$	125
§ 2.4 模拟裂变源	127
第三章 加速器中子源	131
§ 3.1 一般概述	131
3.1.1 加速器简介	131
3.1.2 加速器中子源中子能量单色性问题	147
3.1.3 加速器中子源中子通量恒定性问题	147
§ 3.2 (d, n) 反应	148
3.2.1 $\text{D}(d, n){}^3\text{He}$ 反应	148
3.2.2 $\text{T}(d, n){}^4\text{He}$ 反应	155
3.2.3 其他 (d, n) 反应	162
§ 3.3 (p, n) 反应	168
3.3.1 ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ 反应	169
3.3.2 $\text{T}(p, n){}^3\text{He}$ 反应	175
3.3.3 中等重量核的 (p, n) 反应	180

3.3.4 高能质子的 (p, n) 反应	185
§ 3.4 (α , n) 反应	190
3.4.1 ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ 反应	190
3.4.2 ${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$ 反应	190
§ 3.5 几种最常用的加速器单能中子源比较	193
§ 3.6 加速器中子源中一些特殊问题	201
3.6.1 加速器中氚的防护	201
3.6.2 低能加速器的中子本底	203
3.6.3 γ 射线	205
3.6.4 加速器中子源的中子注量测量标准	206
3.6.5 高能加速器的辐射环境	206
第四章 裂变反应堆中子源	211
§ 4.1 一般描述	211
4.1.1 反应堆的分类	211
4.1.2 历史和现状	212
4.1.3 反应堆的一些基本特征量	213
4.1.4 反应堆中子计算的 P_n 和 S_n 方法	255
§ 4.2 快脉冲堆	259
4.2.1 单次脉冲堆	259
4.2.2 重复脉冲堆	275
4.2.3 未来的其他脉冲堆	301
§ 4.3 脉冲堆几个问题的讨论	304
4.3.1 燃料问题	304
4.3.2 辐照样品对快脉冲堆特性的影响	311
4.3.3 安全问题	313
4.3.4 快脉冲堆的剂量测量	318
§ 4.4 基准中子场	332
4.4.1 引言	332
4.4.2 基准中子场装置简介	333
1. 天然中子源分布	333
2. 激励的中子场	337
3. 临界反应堆装置	344
§ 4.5 铀氢锆反应堆 (TRIGA)	347
4.5.1 概述	347
4.5.2 铀氢锆堆的结构	353
4.5.3 铀氢锆堆的特点	356
4.5.4 铀氢锆堆的反应堆分析和工作参数	359
4.5.5 U-ZrH 合金的特性及其在 TRIGA 燃料中的应用	361
§ 4.6 千电子伏能区准单能中子束	372
4.6.1 准单能中子束的应用	372
4.6.2 准单能中子束的研制	373
4.6.3 “过滤”中子束的基本原理	374
4.6.4 过滤装置及其选择	376
4.6.5 准单能中子束的测量	377
§ 4.7 SLOWPOKE 袖珍反应堆	378
4.7.1 结构	378
4.7.2 特点	379
4.7.3 用途	379

第五章 带电粒子束裂变和聚变中子源	385
§ 5.1 强流脉冲电子加速器	385
5.1.1 发展概况和主要技术指标	385
5.1.2 强流脉冲加速器的基本原理和结构	387
5.1.3 HERMES-II	402
5.1.4 强流脉冲电子加速器模拟核爆炸的辐射	416
§ 5.2 电子束裂变——新型脉冲堆	421
5.2.1 高压发生器	421
5.2.2 靶子设计	422
5.2.3 燃料装置的设计	425
§ 5.3 电子束聚变	429
5.3.1 电子束流的传播特性	430
5.3.2 电子束在靶上的能量沉积	435
5.3.3 电子束直接加热磁约束装置的等离子体	438
5.3.4 电子束点燃氘氦靶丸	439
5.3.5 电子束加速离子	443
§ 5.4 离子束惯性约束核聚变研究	444
5.4.1 强流离子束的特点	444
5.4.2 强流离子束的产生	448
5.4.3 离子束在靶上的能量沉积	453
5.4.4 强流离子束加速方案	454
5.4.5 离子束聚变研究进展情况	455
第六章 其他中子源	457
§ 6.1 浓密等离子体焦点装置	457
6.1.1 DPF 装置的特点	457
6.1.2 DPF 装置的基本结构和工作原理	457
6.1.3 DPF 装置的中子产额和应用	460
6.1.4 DPF 装置与裂变反应堆的配合使用	461
§ 6.2 中子管	463
6.2.1 引言	464
6.2.2 充气式中子管	464
6.2.3 真空式中子管	467
§ 6.3 脉冲散裂中子源	472
6.3.1 引言	472
6.3.2 基本原理和主要特征	472
6.3.3 脉冲散裂中子源装置设计	479
§ 6.4 BANG 中子源	482
6.4.1 基本原理和中子能谱	482
6.4.2 装置设计	483
§ 6.5 其他具体中子源装置	485
6.5.1 电爆炸线中子源	486
6.5.2 用旋转靶的加速器中子源(RTNS)	487
6.5.3 强中子源(INS)	488
第七章 关于中子源发展方向的讨论	492
§ 7.1 中子源发展情况综述	492
7.1.1 中子源发展途径	492
7.1.2 中子源现有水平概述	497

§ 7.2 关于当作热中子源用的脉冲堆发展方向的讨论	497
7.2.1 实验对热中子源强度的要求	497
7.2.2 热中子源通量发展概况	499
7.2.3 加速器-靶系统与加速器-裂变 Booster 系统的比较	500
§ 7.3 对中子源发展方向的几点看法	502
7.3.1 对现有中子源的改进	502
7.3.2 中子源发展的可能途径	506
附录	507
一、带电粒子与物质的相互作用	507
二、光子与物质的相互作用	525
三、氡的特性、测量及防护知识	538
四、一些重要参考数据	552

第一章 中子源基本特性概述

§ 1.1 中子的基本性质

1.1.1 中子的特性

我们知道,基本粒子可以大致分为四类,即光子、轻子、重子和介子(见表 1.1.1)。而其中,重子和介子又统称为强子。光子实质上就是电磁辐射,这包括 X 射线和 γ 辐射。光子的静止质量为零,以光速运动,自旋为 1,能与其他粒子发生电磁的和核的(强)相互作用。轻子包括正负电子($e^\pm$)、 μ 子($\mu^\pm$)和四种中微子($\nu_e^\pm, \nu_\mu^\pm$),它们的质量都比质子轻,自旋为 $\frac{1}{2}$ 。其中电子和 μ 子由于带有电荷,不仅能与其他带电粒子发生电磁相互作用,而且还能与那些具有磁矩的中性粒子(例如中子)发生电磁相互作用。中微子由于不带电荷,无静止质量(近似为零),也无磁矩,所以只能与其他粒子发生弱相互作用。重子和介子都属于强子。重子是指静止质量等于或大于质子的粒子,它们都具有半整数自旋值。质子和中子都是重子。介子是指发生强相互作用的自旋为零或整数的粒子,例如 $\pi^\pm$ 等。当强子之间相隔距离小于 10^{-13} 厘米(即核力范围)时,它们彼此发生核的(强)相互作用;当间距大于这个范围时,发生电磁相互作用。质子穿过物质时发生的散射和电离损失,就属于电磁相互作用。不稳定的强子还可以通过弱相互作用过程发生衰变,例如中子或放射性核的 β 衰变,空气或真空中带电的介子衰变成 μ 子,以及 μ 子衰变成电子。

由于本书是讨论中子源的,我们下面只着重介绍中子作为基本粒子的一些特征。至于光子、轻子和强子中的质子的特征,则放在附录中加以说明。其他基本粒子,如高能相互作用过程中产生的 μ 子、介子以及中子和质子以外的其他重子,由于与本书讨论的问题关系不大,不再作进一步的描述。

归纳起来,中子具有如下五种基本特性:

(1) 中子具有一定的静止质量。其静止质量为 1.00866520 原子质量单位¹⁾或 1.674920×10^{-24} 克,相应的能量为 939.57 兆电子伏。

(2) 中子不带电荷,据估计,中子即使带有电荷,最大也只能有 10^{-18} 电子电荷。所以,通常都可以把中子看成是不带电的中性粒子。在强相互作用中,还可以认为中子和质子不过是核子的两种不同的同位旋状态。

(3) 中子的自旋为 $\frac{1}{2}$ (以 $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ 为单位,这里 h 是普朗克常数),因此是费米子,它遵从费米-狄拉克统计规律。

(4) 中子具有负的磁矩,大小为 -1.913159 核磁子。

(5) 自由中子(指不在原子核内同质子相结合的中子)是不稳定的,必然要通过 β 衰

1) 1 原子质量单位 $= \frac{1}{12} {}^{12}\text{C}$ 原子质量 $= 1.660531 \times 10^{-24}$ 克。依据质能关系 $E = mc^2$,这相当于 931.481 兆电子伏的能量。