

带电粒子与中高能核数据的用途及其前景

庄友祥

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 本文综述了带电粒子与中高能核数据在基础学科研究和工程技术方面的应用,讨论了其发展前景.

关键词 带电粒子, 中高能核数据, 衰变.

1 引言

所谓的“核数据”,有下列五种基本类型:
(1)核常数(如核质量和同位素丰度);(2)核结构数据(包括核基态、激发态和它们的量子性质);(3)核衰变数据(包括核基态、激发态的总的与分的衰变半寿命和分支比,发射 α 、 β 、 γ 和中子的能量、强度,铀系同位素自发裂变的中子能谱等);(4)核反应数据(包括实用上最重要的中子核反应数据、光核和带电粒子反应数据);(5)基本粒子数据.

本文专门讨论核反应数据.核反应按不同的入射粒子种类可分为:(1)中子核反应;(2)带电粒子核反应;(3)光核反应;(4)基本粒子核反应.按入射粒子能量还可分为:(1)低能核反应(指入射粒子动能 $E \leq 20\text{MeV}$ 的核反应),此时产生的出射粒子的数目一般最多3~4个;(2)中能核反应(指 $20\text{MeV} < E \leq 1000\text{MeV}$ 的核反应),此时可以使靶核散裂成许多碎片,当 $E > 100\text{MeV}$ 时,还可以产生介子;(3)高能核反应(指 $E > 1000\text{MeV}$ 的核反应),此时除可以产生介子外,还可以产生其它一些基本粒子和形成奇特核.

需要指出的是,对于放能反应,阈能原则上等于零.但对于带电粒子却不是这样,当能量低于反应阈时,即使放能反应也不能引起反应.这种反应阈决定于库仑位垒的大小.这也是带电粒子核反应的一个特点.

2 带电粒子和中能核数据的用途

它们的用途大致分为基础科学研究和工程技术的应用两大类,后一类又可分为军用和民用两种.

2.1 基础科学研究方面的应用

2.1.1 核结构研究

利用高能电子散射确定核内电荷分布及电荷(质子)分布半径,因电子和原子核作用是电磁作用.近几年来,一个重要成果是测出了形变核的电荷分布,发现当 A 增加到比较大时,出现双中心的趋势.双中心的发现,对研究裂变机制是很有意义的.

利用高能质子散射可以测量核内中子分布及核力作用半径,利用 $(p, 2p)$ 反应可以直接测定原子核内壳层的结合能.

在研究原子核内部运动状态时,利用 π 介子(π^\pm, π^0)为炮弹具有特殊的意义.其原因是,由于 π 介子自旋为零,同位旋为1,角动量耦合简单,理论分析容易.另外,通过 π -核相互作用,有助于了解核内 π 自由度、激发粒子共振态核子对关联、核同位旋和集体转动及高激发态的能谱.

实验测得的激发曲线 $\sigma(E)$,当入射粒子能量为某些数值时,曲线呈现出一些尖锐的峰.这种现象称为核反应共振.复合核具有一定的能级结构,当入射粒子的相对运动动能加上入射粒子和靶核的结合能正好等于复合核

的一个能级的能量时,入射粒子就会被强烈吸收.由此可见,通过实验测得激发曲线即可求得复合核能级的激发能,也可利用共振理论公式求得该能级的自旋和宽度.此外,由于通过核反应形成的能级都较高,通常超过核子的分离能,这种能级称为非束缚能级,它们以各种方式进行退激发.通常,依据测量的各反应道激发曲线,可知道非束缚能级的宽度和寿命.

通过氘核削裂反应 $A(d,p)B$ 角分布和极化实验,可以获得核能级自旋和宇称的知识.这是研究核结构的一种重要方法.对于较重的核 ($A > 70$),利用 (α, n) 和 (p, n) 反应测定核能级密度,而对于较轻的核,则可利用 (p, α) 和 (α, p) 反应.

2.1.2 核反应研究

(1) 核子-核子相互作用

核力的研究是核物理学的一个基本课题.目前,公认核力的来源是由于介子的交换,这方面的理论称为核力的介子场理论.研究各种介子的基本性质及其与核子的相互作用,从而导出核力的特性.此外,也可用进行核子-核子散射等实验,直接从唯像方面(宏观上)来考虑核力问题,建立唯像的核子-核子相互作用势.现有的两体相互作用势的表达式相当复杂,但和实验结果的符合已相当好.

(2) 核反应机制

在核反应机制理论发展过程中,早期认为核反应主要是通过复合核和直接作用而进行;后来许多实验事实证明,核反应还存在介于两种机制之间的过程,即预平衡发射.

对于一个具体的反应,复合核、直接过程和预平衡发射往往同时并存,但对于不同的入射粒子、靶核和入射粒子能量,三者的截面的相对大小是不同的.

70年代以来,发展了多步核反应理论,其中比较重要的是多步复合核和多步直接反应的统计理论(FKK理论).对多步核反应理论的分析有不同的表述,还在讨论之中.实际计算是很困难的,因为很难分析清楚反应过程中的那些门槛态、走廊态.

现在,已有可用的程序,以计算多步反应截面,计算出了某些轻粒子反应的前平衡发射谱、激发曲线和角分布,例如 $^{94-100}\text{Mo}(p, xn)$, $E_p = 25.6\text{MeV}$ 的双微分截面.总的来说,FKK理论与实验符合较好,但仍有偏离.

核反应机制的研究来源于核反应实验.复合核反应的典型实验有 $^{63}\text{Cu}(p, n)$ 、 $(p, 2n)$ 、 (p, pn) 和 $^{60}\text{Ni}(\alpha, n)$ 、 $(\alpha, 2n)$ 、 (α, pn) 反应截面测量, $E_p = (1 \sim 33)\text{MeV}$, $E_\alpha = (8 \sim 40)\text{MeV}$.

直接反应的典型实验有 $^{16}\text{O}(d, p)^{17}\text{O}$ 反应的角分布, $E_d = 3.49\text{MeV}$.因此,人们推论存在着直接作用机制.

前平衡反应的典型实验有 $^{68}\text{Ni}(\alpha, p)$, $E_\alpha = 32\text{MeV}$; $\text{Pt}(\alpha, p)$, $E_\alpha = 40\text{MeV}$ 的能谱.复合核和直接作用机制都无法满意地解释核反应的实验现象,从而知道还存在第三种作用机制.总之,带电粒子和中能核数据,可用于验证、改善和发展核理论及模型程序.

2.1.3 核天体物理学研究

核物理学和天体物理学相结合,形成了一门新兴的学科——核天体物理学,这是当前国际上的一个“热点”.近年获得诺贝尔物理学奖的研究,有不少是和天体物理学有关.例如,1974年综合孔径射电望远镜的研究和脉冲星的发现,1978年宇宙微波背景的发现,1983年元素的起源和恒星的演化,都获得了当年的诺贝尔物理学奖.

在核天体物理学理论计算中,需要大量带电粒子核反应截面的激发函数数据.例如: $^{13}\text{N}(p, \gamma)$ 、 $^{14}\text{O}(\alpha, p)$ 、 $^{15}\text{O}(\alpha, \gamma)$ 、 $^{17}\text{F}(p, \gamma)$ 、 $^{21, 22}\text{Na}(p, \gamma)$ 、 $^7\text{Be}(p, \gamma)$ 、 $^{26}\text{Al}(p, \gamma)$ 、 $^6\text{Li}(\alpha, n)$ …….这些反应的靶核都是放射性核素.理论可以计算出反应截面,但对于 $A \leq 40$ 的靶核,理论值则不一定可靠,只能靠实验测量,那就需要放射性核束,将靶核和入射核互换一下,所以加速放射性束,至今仍是一个新课题.

在宇宙中,质子和 α 粒子被加速到几 MeV 或更高时,它们与周围介质的碰撞可能产生 γ 射线;而 γ 射线谱,为宇宙研究提供了一个独特的方式.这些存在,是宇宙中发生特

殊核反应的一个标记,已被用来研究太阳闪烁,星际气体和尘埃,恒星的形成,宇宙元素分布、形成与发展情况,新星、超新星和黑洞。应用需要的数据有: ^{12}C 、 ^{14}N 、 ^{16}O 、 ^{20}Ne 、 ^{24}Mg 、 ^{27}Al 、 ^{28}Si 、 ^{56}Fe (p, γ)和(α, γ)的反应截面, E_p 、 E_α = 阈 - 27MeV。

2.2 工程技术方面的应用

2.2.1 军用

(1) 核武器的研制和测试

原子弹需要中子源做点火器,而中子源则要用带电粒子核反应产生。氢弹的制造离不开轻核聚变反应数据,例如 $d + D$ 、 T 、 ^3He 、 $^6,7\text{Li}$; $t + T$ 等。此外,测试核武器也需要带电粒子活化数据,主要反应类型有(p, n)和($d, 2n$)等。

(2) 空间发展和战略防御

当今是人类已进入太空的时代,从地球走向太阳系、银河系、宇宙……。地球高空,有高能电子和质子辐射带以及比地面上强得多的宇宙辐射。人类向空间发展需发射人造卫星、空间站和航天飞机等,这些都需研究电子和质子对人体、仪器部件和材料的辐射损伤效应。

美国的星球大战计划,就是想利用高能带电离子束,摧毁高空核导弹、间谍卫星、飞船等,建立其所谓的“战略防御”体系。因为超越地球大气层的高空没有空气,中高能带电粒子束可以随意照射,射程远,它们与物质相互作用强、破坏力大。此外,高能带电离子束比中子束易产生。

2.2.2 民用

项目繁多,将其主要的列举如下:

(1) 生物医学用的放射性同位素的生产

反应堆和加速器都可以用来生产放射性同位素,前者是利用中子核反应,后者是利用带电粒子核反应。它们互相配合和补充。

1975年以后,国际医学界已经普遍使用带电脑的 γ 射线照相机,正电子照相机也已用于医学研究。因此,短半衰期和发射正电子的放射性核的生产,就成了临床和诊断的迫切需要,例如 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、和 ^{18}F 、反应堆已不能胜任。还有许多有重大医用价值的核素,只能用

加速器生产,如 $^{67,68}\text{Ga}$ 、 ^{207}Tl 、 ^{111}In 、 ^{52}Fe 、 ^{123}I 、 ^{81}Kr 、 ^{57}Co 、 ^{81}Rb 、 ^{125}Xe 和 ^{204}Bi 等。

现在,全世界约50%的加速器是医用加速器,全世界生产的所有放射核素中80%以上用于医学。

(2) 癌症治疗

目前,世界上治癌方法主要有两种:放疗和化疗。免疫疗法还在研究之中。

用回旋加速器提供的质子束、氦束或 ^3He 束等轰击Be或Li靶产生快中子束,照射癌部;用高能质子和电子直线加速器产生负 π 介子和质子治癌;重离子治癌把加速器治疗肿瘤提高到一个新阶段。首先是带电重离子在穿入组织后的深度剂量分布曲线,有个突出的特点,即在末端存在一个骤增的峰,通常称为Bragg峰;其次,这些重离子与X射线和 γ 射线及电子束相比,更有利于消灭肿瘤的缺氧细胞。Bragg峰的存在,使深部癌区能够得到相对集中的剂量,同时周围非癌变区的组织所受剂量甚少;再加上重离子的线能量传递高,对有氧和缺氧环境中的癌细胞都有较好的杀伤效果。这些都为重离子治癌展现了美好的前景。

加利福尼亚大学和马萨诸塞州中心医院已使用了质子束,用于脑垂体辐照和头与颈的表面部位的辐照。瑞士核研究所,正在进行负 π 介子辐照的临床研究。

(3) 中子源

自从1932年发现中子,1938年发现中子产生核裂变释放核能以来,原子能科学技术得到了迅速的发展。现在,中子已成为工业、农业、国防、科技和国民经济各部门的一个有力的科研生产工具。

既然自然界并不存在中子,那么怎样产生中子呢?常用的中子源有:同位素中子源、加速器中子源和反应堆中子源。前两种(除自发裂变中子源之外)都是利用带电粒子核反应,如(α, n)、(p, n)和(d, n)。而高通量、高能量的中子源,只能在加速器上利用高能带电粒子散裂反应来产生。

(4) 活化分析

利用放射性方法来分析材料,通常称为活化分析.其优点是无损伤、快速、可靠和简便.带电粒子活化分析,业已广泛地应用于测定金属、半导体、矿石和环境样品中的元素.加速器带电粒子活化分析适用于分析样品表面或研究薄层样品,低能带电粒子特别适合于分析轻元素,灵敏度可高达 PPM(百万分之一)或 PPb(亿万分之一)量级,优点是一次辐射可对样品进行多元素同时分析,并且不会形成放射性废物.这是在线分析.如果离线分析,那么形成产物的放射性半寿命必须在“天”和“秒”之间.西斯特森研究了如何在靶内活化体积中达到非常精确的定位,如何测量动物体中的 Ca 和小的化学样品及生物样品中的 Ca/p 摩尔比.现已进行了用带电粒子活化分析测量眼睛中的血液流动.巴雷冬用质子和 α 粒子活化分析研究古代冶金制品.耶吉成功地测定了生物物质中的 As、Mo、Sr、Ca、Fe、V、Zr、Zn 和 Ti.现在,用 α 粒子也已测定了血液中的 Cl、p、Ca 和 K.最近正致力于环境科学研究.

在半导体、合金、金属、机械部件、光学纤维和各固态物质的研究中,其发展方兴未艾.

(5) 带电粒子束的辐照效应

带电粒子束辐照固体材料,可引起其成分、原子环境、电子组态和相结构的变化,从而导致材料性能的改变,以获得新的高性能的材料和器件,在现代材料科学领域已得到广泛的应用.离子注入半导体的研究,推动了微电子学工业的发展.离子束冶金学的诞生,使亚稳态合金体系的研究以及金属材料的表面加工和强化,日益走向实用.玻璃、陶瓷等绝缘体以及高分子聚合物的离子注入,又开辟了新的研究和应用天地.

电子辐照使大分子之间产生交联,把线型分子转化成网状结构,其结果改善了高聚物的耐热性.对于某些具有良好特性的高聚物(如聚氯乙烯、氟碳树脂等),化学交联无法进行,而辐射交联却能达到这个目的.经辐照交联生产的聚酰亚胺绝缘电线,其耐辐照性能是目前有机材料中最好的,因此被用于宇宙航行,又

由于机械性能好,电线绝缘可以做得很薄,大大减轻了电线重量.据报道,美国大力神 III 远程导弹改用这种线后,重量减轻了 96kg.现在,它被大量用于各种新型飞机,如 F-15、波音 747、协和式飞机等.

法国国家重离子加速器和重离子跨国学科研究中心,利用重离子束辐照生产了孔径在 $(0.05 \sim 1) \mu\text{m}$ 的核微孔膜,以此制造工业过滤器.

此外,带电粒子束辐照还可用于消毒、食物保鲜等.

(6) 核废物处理、核燃料生产和增殖研究中能带电粒子束可以用于检验聚变材料或处理核废物,也能用于核燃料生产和增殖研究.此外,中能加速器的屏蔽设计和物理仪器响应曲线的计算,也离不开中能核数据.

(7) 荧光分析

物质受质子和氦束等辐射激发可产生次级荧光射线(特征 X 射线),测定此荧光 X 射线的能谱与强度,可以确定材料的成分以及厚度与密度等.X 射线荧光分析速度快、精确可靠、灵敏度高、成本低、易于操作和不受样品物理状态限制;而且可进行不取样破坏分析,特别适用于在线矿石分析与野外地质普查,能够在几分钟,甚至几秒钟内完成现场样品定量或半定量测定.

(8) 中能带电粒子束探伤

加速器加速出来的带电粒子可产生高能 X 射线,故在较厚工件的无损探伤中一直占有不可缺少的一席.1MeV 的静电加速器可探伤的钢板最大厚度为 200mm,2MeV 时为 300mm,(6~31)MeV 时为 500mm.目前,制造 0.5MeV 的 X 射线探伤机已十分困难.所以,用加速器对较厚工件探伤是不可缺少的方法.

(9) 带电粒子聚变和裂变反应——新能源对新一代能源的开辟,人们把希望寄托在带电粒子聚变和裂变反应上,因为地球上的氘与煤和石油相比,可以说是取之不尽、用之不竭的.

1991 年 11 月 9 日,联合欧洲核聚变实验

室首次成功地进行了受控核聚变反应实验,在研究利用核聚变能方面取得了突破性进展。

3 带电粒子与中能核数据发展前景

3.1 数据发展简况

在中子数据方面,实验数据(EXFOR)主库可被认为是比较完整的,评价数据库也在不断地更新。带电粒子核反应实验数据则要少得多,目前为止主库只有62万个记录,而中子实验数据主库约有400万个记录;评价数据工作也是根据需要时常做起,如聚变反应数据和带电粒子活化数据等,直到1990年才有评价数据格式可以存库,但还未形成完整的工作网。

世界各国对带电粒子和中能核数据日益重视,工作重心正向这方面转移。事实如下:

美国在完成了评价核数据库第五版(ENDF/B-5)之后,联合了加拿大、西德、英国等国的17个组织,于1986年成立中能核数据工作组。美国核数据中心主任亲自兼任该委员会主席,制定了方针和核数据格式,并评价了 $p+^{56}\text{Fe}$, $n+^{56}\text{Fe}$ 两种中高能核数据,1991年以ENDF/B-6格式分发到世界各国。能区 $10^5\text{eV} \sim 1000\text{MeV}$,主要利用半经典的ALIC和GNASH程序计算。

国际原子能机构也于1990年10月召开了中能核数据专门会议,会后出版了会议录,参与中能核数据的组织和引导工作,进行国际合作。

前苏联和其他一些国家,也开始这方面的

研究。前苏联镭研究所已制定了中能数据库的规划,包括四种数据:(1)薄靶实验数据,或包括基于各种核模型的计算;(2)ENDF/B-6格式的评价核数据;(3)拟合评价数据的系统学参数;(4)来自用大的靶组测量的基准实验数据。现已部分完成这个项目的结构和软件。

3.2 五类有前途的应用情况

(1)聚变堆应用 聚变评价核数据库(FENDL)已经发展到第二版。FENDL-2是正在大力发展的热门核数据。FENDL中的CPND包括:第一步26个反应道,如 $p+D, T, d+D, T, ^3\text{He}, t+T, ^3\text{He}, ^3\text{He}+^3\text{He}$;第二步约50个反应道,如 $p, d, t+^6\text{Li}, ^9\text{Be}, ^{10}\text{B}$ 。

(2)空间应用 包括:1.探索初级宇宙辐射及其次级辐射对人体、仪器构件及材料的活化和辐射损伤;2.天体物理问题的探索,涉及对太阳闪烁(黑子)的分析、陨星的成分、模拟宇宙辐射过的材料和用 γ 射线谱仪对行星表面的遥感。

(3)加速器应用 包括:1.搜集和分析中能带电粒子束轰击材料得到的信息,以便寻找可用的破裂中子源;2.检验裂变材料或直接轰击核废物得到的信息,以便处理核废物;3.加速器散蔽的设计。

(4)医学应用 生产中能束治癌和生物医学用的放射性同位素。

(5)基础学科研究应用 主要是验证和改善核理论和模型程序。

Application and Prospect of Charged Particle and Medium—high Energy Nuclear Data

Zhuang Youxiang

(Institute of Atomic Energy of China, Beijing 102413)

Abstract The application and prospect of charged particle and medium—high energy nuclear data in basic science research, engineering and technology are summarized in this paper.

Key Words charged particle, medium-high energy nuclear data, decay.