



南京航空航天大学
研究生系列精品教材

应用中子物理学

陈 达 贾文宝 编著



科学出版社

南京航空航天大学研究生系列精品教材

应用中子物理学

陈 达 贾文宝 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了中子的基本性质、常用中子源与中子的产生、中子与物质的相互作用及中子输运、中子及能谱测量、中子剂量测量、中子防护等中子物理的基础知识,同时全面介绍了中子散射、中子活化分析、中子治癌、中子照相技术等中子技术在各领域的应用。

本书符合教学要求,可供核科学与技术相关专业本科生和研究生教学使用,也可作为相关专业选修教材以及从事相关专业的教学和科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

应用中子物理学/陈达,贾文宝编著. —北京:科学出版社,2015. 8
ISBN 978-7-03-045307-5

I. ①应… II. ①陈… ②贾… III. ①中子物理学 IV. ①O571.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第180607号

责任编辑:罗 吉 窦京蓉 责任校对:张凤琴
责任印制:徐晓晨 / 封面设计:迷底书装

www.lib.ahu.edu.cn

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年8月第一次印刷 印张:19

字数:464 000

定价:59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

1932年英国物理学家J. Chadwick在实验中发现了中子,并借此获得了1935年的诺贝尔物理学奖,中子的发现及其应用是20世纪最重要的科技成就之一。

中子呈电中性,不受库仑势垒的影响,因而很容易进入原子核并与原子核发生反应,是研究物质结构和动力学性质的理想探针,而且中子诱发核裂变的发现也导致了核武器和核能源的开发。

21世纪以来,随着中子源科学装置的建立,尤其是大型的散裂中子源的发展,中子在材料、生物、生命、核物理等学科的应用也越来越广泛,成为相关尖端技术如纳米、信息、环境、医药等研究中不可缺少的工具之一。

中子散射技术利用中子散射方法研究物质的静态结构及物质的微观动力学性质。作为一种独特的、从原子和分子尺度上研究物质结构和动态特性的表征手段,在很多基础学科中如凝聚态物理(固体和液体)、化学(特别是高分子化学)、生物工程、生命科学、材料科学(特别是纳米材料科学)等多学科领域的研究中被广泛采用。

中子活化分析以中子轰击试样中元素发生核反应,通过测定产生的瞬发伽马或放射性核素衰变产生的射线能量和强度,进行物质中元素的定性和定量分析。中子活化分析技术原则上可以测定元素周期表内所有元素,在全元素、高准度和非破坏等综合分析方面独占鳌头。

中子照相技术利用中子束穿透物体时的衰减情况,显示物体内部结构的技术。按所用的中子的能量,中子照相可分为冷中子照相、热中子照相和快中子照相。

本书的撰写以中子的应用为主线,系统的介绍了有关中子学科的基础物理知识、中子的产生、中子与物质的相互作用及中子输运、中子测量、中子应用。因此,本书是为了使读者能够在了解中子物理的基础知识上,对中子的应用有更深刻的了解。我们希望本书能对有关的研究工作者、大学物理专业教师及研究生与高年级学生起导引的作用,成为有用的参考书。由于中子技术仍在不断发展,我们掌握的资料还不够全面,再加上水平有限,所以在书中难免会存在错误和不当之处,希望读者指正。

除两位作者之外,还有多位老师和同学为本书的编纂提供素材、修订和校正等工作。黑大千老师负责第1章Q方程及其应用、第2章中子源物理、第3章中子与物质的相互作用的编辑和修订工作;单卿老师负责第4章中子测量技术、第5章中子剂量测量方法、第6章中子能谱测量的编辑和修订工作;凌永生老师负责第9章中子输运、第10章中子散射的编辑和修订;汤晓斌老师负责第12章中子治癌、第13章中子照相技术的编辑和修改工作。课题组的博士生张焱、硕士研究生程璨、张皓嘉、侯闻宇、何燕泉、陈海涛、蒋舟、李佳桐、张新磊、王红涛、褚胜男、赵丹、蔡平坤等参加了本书的编辑和校稿,在此一并致谢。

编著者

2015年6月

目 录

前言

第1章 Q 方程及其应用	1
1.1 核反应和反应道	1
1.1.1 实现核反应的途径	1
1.1.2 核反应的分类	2
1.1.3 反应道	2
1.2 Q 方程的推导	4
1.2.1 反应能	4
1.2.2 质量亏损	5
1.2.3 结合能与比结合能	5
1.2.4 Q 方程的推导	6
1.3 反应阈能和临界能量	8
1.4 Q 方程的应用	9
1.4.1 对于弹性散射 Q 方程的应用	9
1.4.2 当 $E_a=0$ 时(常温或很低能的核反应)	10
1.5 L 系和 C 系中出射角的转换	11
1.5.1 C 系中的能量关系	11
1.5.2 θ_L 和 θ_C 的转换关系	12
1.5.3 γ 的计算	13
1.5.4 L 系和 C 系中的微分截面的转换	14
1.6 中子的基本性质	15
1.6.1 中子的粒子性	16
1.6.2 中子的波动性	17
参考文献	19
第2章 中子源物理	21
2.1 中子的产生及主要指标	21
2.2 同位素中子源	25
2.2.1 (α, n) 中子源	25
2.2.2 (γ, n) 中子源	26
2.2.3 自发裂变中子源	27
2.3 加速器中子源概况	28
2.3.1 1keV~20MeV 能区的白光中子源	29
2.3.2 20~200MeV 准单能中子源	30
2.3.3 白光中子源分类	30
2.3.4 电子直线加速器中子源	31

2.4 常用加速器中子源	31
2.4.1 $D(d,n)^3He$	31
2.4.2 $T(d,n)^4He$ 中子源	32
2.4.3 $^7Li(d,n)$ 中子源	32
2.4.4 $^9Be(d,n)^{10}B$ 中子源	33
2.4.5 $^7Li(p,n)^7Be$ 中子源	33
2.4.6 $^9Be(p,n)$ 中子源	34
2.5 反应堆中子源	34
2.5.1 堆的基本特征量	34
2.5.2 堆中子的空间分布	35
2.5.3 堆中子监测问题	37
2.6 散裂中子源	38
2.6.1 散裂中子源概述	38
2.6.2 散裂反应过程	39
2.6.3 散裂中子产额	39
2.6.4 散裂中子能谱	40
2.6.5 靶和慢化体	40
参考文献	41
第3章 中子与物质的相互作用	44
3.1 基本物理量	45
3.1.1 截面	45
3.1.2 角分布和微分截面	46
3.1.3 中子截面的特点	46
3.1.4 宏观截面	47
3.2 核反应机制	48
3.2.1 核反应过程的三个阶段	49
3.2.2 几种反应机制的特点	50
3.2.3 对各反应机制特点的解释	50
3.3 中子与物质相互作用的物理过程	50
3.3.1 势散射	50
3.3.2 复合核反应	50
3.3.3 中子的辐射损伤效应	53
3.3.4 用于中子探测的几个轻核反应(n, X)	53
参考文献	54
第4章 中子测量技术	57
4.1 中子探测基本原理	57
4.1.1 核反应	57
4.1.2 质子反冲($n-p$ 散射)	57
4.1.3 核活化[$^{197}Au(n, \gamma)^{198}Au$, $^{27}Al(n, \alpha)^{24}Mg$ 等]	58
4.1.4 核裂变	58

4.1.5 中子强度(注量、注量率)的测量	59
4.2 常用的中子探测器	59
4.2.1 长中子计数器	59
4.2.2 伴随粒子法	60
4.2.3 反冲质子望远镜	68
4.2.4 裂变电离室	72
4.2.5 活化探测器	73
参考文献	76
第5章 中子剂量测量方法	78
5.1 基本概念	78
5.1.1 比释动能和吸收剂量	78
5.1.2 剂量当量	79
5.2 中子雷姆计	80
5.3 n - γ 混合场的剂量测量	81
5.3.1 总吸收剂量的测量	81
5.3.2 配对电离室测量(n, γ)混合场中的吸收剂量	82
5.3.3 双电离室测量(n, γ)场吸收剂量的不确定度	84
参考文献	85
第6章 中子能谱测量	86
6.1 反冲质子法测量中子能谱	86
6.1.1 反冲质子微分法	86
6.1.2 反冲质子积分法	86
6.1.3 测量微分中子能谱的核乳胶方法	87
6.2 球形含氢正比管探测器测量中子能谱	89
6.3 特殊核乳胶测量中子能谱的方法	90
6.3.1 载锂核乳胶	90
6.3.2 测量 10~20MeV 中子能谱的 ^{11}B 乳胶	91
6.4 阈能探测器测量中子能谱	92
6.4.1 活化方程	93
6.4.2 用迭代法解中子能谱	93
6.4.3 常用的阈探测器的有关参数	94
6.5 中子 TOF 谱仪	94
6.5.1 TOF 原理	94
6.5.2 快中子 TOF 谱仪的结构	95
6.5.3 快中子 TOF 谱仪的分类	96
6.5.4 TOF 谱仪的有机闪烁探头	97
6.5.5 快中子 TOF 谱仪的应用	99
6.6 聚变中子测温	100
6.6.1 聚变中子谱	100
6.6.2 热核聚变中子数	102

6.6.3 用 TOF 法测量聚变中子谱和聚变温度	103
参考文献	104
第 7 章 辐射防护问题	106
7.1 γ 射线的屏蔽	106
7.1.1 窄束 γ 射线在物质中的减弱	106
7.1.2 宽束 γ 射线衰减规律	106
7.1.3 γ 点源的屏蔽计算	106
7.2 中子屏蔽	107
7.2.1 同位素中子源的屏蔽——分出截面法	107
7.2.2 快中子的屏蔽	108
7.2.3 中子反照率	110
7.2.4 中子的大气反散射	111
参考文献	113
第 8 章 宏观中子物理	114
8.1 中子慢化	114
8.1.1 质心系和实验室系的中子散射	114
8.1.2 实验室系的中子散射角余弦的平均值	115
8.1.3 质心系球对称系统的中子散射	115
8.1.4 弹性散射的能量损失	115
8.1.5 不同散射核散射性质的比较	116
8.1.6 不同散射核的慢化能力和慢化比	116
8.1.7 减速中子能谱	117
8.2 中子扩散	118
8.2.1 输运方程的扩散近似	119
8.2.2 简单扩散理论的适用条件	120
8.2.3 扩散方程的边界条件	121
8.2.4 扩散方程的应用	121
8.2.5 单群扩散方程	123
8.2.6 费米年龄方程	125
8.3 中子输运	129
8.4 多组理论	129
参考文献	131
第 9 章 中子输运	133
9.1 一般分析	133
9.2 中子与介质相互作用的物理过程	133
9.2.1 裂变过程	133
9.2.2 辐射俘获过程	134
9.2.3 散射过程	134
9.2.4 其他核反应过程	135
9.3 中子输运方程	135

9.3.1 基本物理量的定义	135
9.3.2 中子输运方程的建立	137
9.3.3 中子输运方程的边界条件	138
9.3.4 中子输运方程的共轭方程	139
9.3.5 输运方程的近似处理	140
9.3.6 单群理论	141
9.3.7 与能量有关的输运方程的数值求解方法	144
9.4 微扰理论和灵敏度分析方法	148
9.4.1 反应堆的微扰理论	148
9.4.2 灵敏度分析方法	149
参考文献	150
第 10 章 中子散射	152
10.1 引论	152
10.1.1 中子能量和其他物理量之间的转换关系	152
10.1.2 中子散射的动量守恒关系和能量守恒关系	152
10.1.3 束缚核对中子的散射	153
10.1.4 散射长度	154
10.1.5 中子散射实验的测量内容:微分散射截面和双微分散射截面	155
10.2 中子散射的基本理论	156
10.2.1 双微分散射截面的理论推导	156
10.2.2 Fermi 膺势	157
10.2.3 相干双微分散射截面和非相干双微分散射截面	157
10.2.4 散射函数	158
10.2.5 细致平衡原理	159
10.2.6 晶体对中子的散射	159
10.2.7 Van Hove 关联函数	162
10.2.8 准弹性散射	168
10.2.9 磁散射	170
10.2.10 中子光学基础	176
10.3 中子散射实验设备和方法	179
10.3.1 中子源概述	179
10.3.2 稳态反应堆	181
10.3.3 散裂中子源	182
10.3.4 中子衍射	183
10.3.5 磁性中子衍射	189
10.3.6 中子小角散射	191
10.3.7 中子反射仪	194
10.4 中子散射在基础研究及工业上的应用	195
10.4.1 磁形状因子测定	195
10.4.2 生物分子研究	196

10.4.3 工业应用	201
参考文献	203
第 11 章 中子活化分析	206
11.1 中子活化分析原理	206
11.1.1 活化分析公式推导	206
11.1.2 中子能量、通量和反应截面	208
11.1.3 中子活化分析中的标准化方法	211
11.2 快、慢中子活化分析技术	214
11.2.1 常用的中子核反应	214
11.2.2 中子活化分析设备	214
11.2.3 样品制备	217
11.2.4 干扰反应	217
11.2.5 放射性活度测量和核素鉴别	219
11.3 利用反应堆中子的元素分析	221
11.3.1 反应堆中子活化分析(ReNAA)简介	221
11.3.2 ReNAA 的基本操作	224
11.3.3 ReNAA 的主要应用	235
11.4 瞬发伽马中子活化分析	238
11.4.1 瞬发 γ 中子活化分析(PGNAA)简介	238
11.4.2 PGNAA 的基本操作	240
11.4.3 PGNAA 的主要应用	242
参考文献	247
第 12 章 中子治癌	250
12.1 快中子治癌	250
12.1.1 快中子治癌历史	250
12.1.2 物理基础	251
12.1.3 生物基础	252
12.1.4 临床应用	256
12.2 硼中子俘获治疗 BNCT	256
12.2.1 BNCT	257
12.2.2 B 载体	260
12.2.3 中子源	263
12.2.4 前景	264
参考文献	264
第 13 章 中子照相技术	266
13.1 中子照相技术的发展概况	266
13.2 中子照相技术	266
13.2.1 中子照相技术的基本原理	266
13.2.2 影响中子照相质量的因素	267
13.2.3 中子照相的分类	268

13.3 中子照相装置.....	270
13.3.1 中子照相装置的组成	270
13.3.2 固定式中子照相装置	270
13.3.3 可移动式中子照相装置	276
13.3.4 中子照相转换屏	284
13.3.5 中子照相成像系统	285
13.4 中子照相的应用.....	288
参考文献.....	289

第1章 Q 方程及其应用

核反应主要研究两个问题:①核反应运动学.在能量和动量守恒下,研究核反应的一般规律;②核反应动力学.研究参与核反应各类粒子之间的相互作用机制、发生概率、反应理论模型和核结构等.

1.1 核反应和反应道

19 世纪末,科学工作者对物质结构的研究开始到进入微观领域,人们在这方面的研究取得了可喜的成果.在这些发展中,原子核物理的研究起了关键作用.核物理是一个国际上竞争十分激烈的科技领域.世界各国都投入了相当大的人力物力来从事这方面的研究工作.

原子核与原子核,或者原子核与其他粒子(如中子、 γ 光子等)之间的相互作用所引起的各种变化叫做核反应.各式各样的核反应是产生不稳定原子核的最根本的途径.

核反应过程对原子核内部结构的扰动以及所牵涉的能量变化一般要比核衰变过程大得多.例如,核衰变只涉及低激发能级,通常在 $3\sim 4\text{MeV}$ 以下,这是衰变核谱学的一个局限性.核反应涉及的能量可以很高,通常在一个核子的分离能以上,甚至高达几百 MeV 以上.核反应是获得原子能和放射性核素的重要途径,对它的研究具有很大的实际意义.

1.1.1 实现核反应的途径

要使核反应过程能够发生,原子核或其他粒子(如中子、 γ 光子等)必须足够接近另一原子核,一般须达到核力作用范围之内,即小于 10^{-12}cm 的数量级.实现这一条件可以通过以下 3 个途径:

(1) 用放射源产生的高速粒子去轰击原子核.例如,1919 年卢瑟福实现的历史上第一个人工核转变就是用放射源 $\text{RaC}'(^{214}\text{Po})$ 的 α 粒子去轰击氮原子核,引起核反应



上式表示 α 粒子打在 ${}^{14}_7\text{N}$ 核上,使 ${}^{14}_7\text{N}$ 核变成 ${}^{17}_8\text{O}$ 核,同时放出一个质子 $p({}^1_1\text{H}$ 核).这里, α 粒子称为入射粒子,也叫轰击粒子; ${}^{14}_7\text{N}$ 核称为靶核; ${}^{17}_8\text{O}$ 和 ${}^1_1\text{H}$ 统称为反应产物,其中较重者 ${}^{17}_8\text{O}$ 称为剩余核,较轻者 ${}^1_1\text{H}$ 称为出射粒子.通常把反应式(1.1)简写为



用放射源提供入射粒子来研究核反应,入射粒子种类很少,强度不大,能量不高,而且不能连续可调,目前已很少使用.

(2) 利用宇宙射线来进行核反应.宇宙射线是指来自宇宙空间的高能粒子.宇宙射线的能量一般都很高,最高可达 10^{21}eV ,用人工办法要产生这样高能量的粒子近期是难以实现的.用它作为入射粒子来研究高能核反应有可能发现一些新现象.其缺点是强度很弱,能观测到核反应的机会极小.然而,它具有上述独到之处的优点,人们一直在努力弥补它的缺点,做了不少高能物理方面的研究工作.

(3) 利用带电粒子加速器或反应堆来进行核反应.这是实现人工核反应的最主要的手段.

随着粒子加速器技术的不断发展和性能改善,人们已经能够将几乎所有的稳定核素加速到单核子能量数百 MeV,甚至更高的能量,在束流强度和品质方面也有极大提高.人们已经可以使用种类繁多、能区宽、束流强和品质好的人射束进行核反应实验,从而极大地扩展了核反应的研究领域.

1.1.2 核反应的分类

一般核反应可表示为

$$A+a \rightarrow B+b \quad (1.3)$$

式中 A 和 a 分别表示靶核和入射粒子, B 和 b 表示剩余核和出射粒子,简写为

$$A(a,b)B \quad (1.4)$$

当入射粒子能量较高时,出射粒子可以不止一个,而有两个或两个以上.例如,30MeV 的 α 粒子轰击 ^{60}Ni ,可以产生反应

$$^{60}\text{Ni} + \alpha \rightarrow ^{62}\text{Cu} + p + n \quad (1.5)$$

简写为 $^{60}\text{Ni}(\alpha, pn)^{62}\text{Cu}$; 40MeV 的质子轰击 ^{209}Bi 可以产生反应

$$^{209}\text{Bi} + p \rightarrow ^{206}\text{Po} + 4n \quad (1.6)$$

简写为 $^{209}\text{Bi}(p, 4n)^{206}\text{Po}$.

核反应按出射粒子的不同,可以分为两大类,即核散射和核转变.

核散射是指出射粒子和入射粒子相同的核反应.核散射又分为弹性散射和非弹性散射两种.

弹性散射是指散射前后系统的总动能相等,原子核的内部能量不发生变化.弹性散射的一般表达式是

$$A+a \rightarrow A+a \text{ 或 } A(a,a)A \quad (1.7)$$

非弹性散射是指散射前后系统的总动能不相等,原子核的内部能量要发生变化.最常见的非弹性散射是剩余核处于激发态的情形,它的一般表达式是

$$A+a \rightarrow A^* + a' \text{ 或 } A(a,a')A^* \quad (1.8)$$

另一类核反应,即核转变,是指出射粒子和入射粒子不同的反应,如前面所举的式(1.5)反应即是.

核反应按入射粒子种类不同也可分为:

(1) 中子核反应.如中子弹性散射(n, n)、中子非弹性散射(n, n')、中子辐射俘获(n, γ)等.

(2) 带电粒子核反应.它又可分为:质子引起的核反应,如(p, p), (p, n), (p, α)等;氦核引起的核反应,如(d, p), (d, α)等; α 粒子引起的核反应,如(α, n), (α, p)等;重离子引起的核反应,如($^{12}\text{C}, 4n$), ($^{16}\text{O}, \alpha 3n$)等.

(3) 光核反应.即 γ 光子引起的核反应,如(γ, n), (γ, p)等.

此外,电子也可以引起核反应,其特点和光核反应类似.

核反应按轰击粒子的动能不同,分为:

(1) 低能核反应($E_\lambda \leq 140\text{MeV}$).

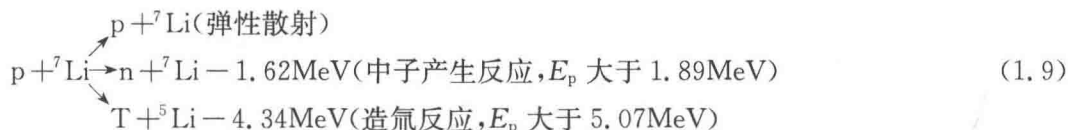
(2) 中能核反应($140\text{MeV} < E_\lambda \leq 1\text{GeV}$).

(3) 高能核反应($E_\lambda > 1\text{GeV}$).

1.1.3 反应道

一个入射粒子 a,打到靶核 A 上,可能发生的核反应不止一个,每一个反应过程称之为一个

个反应道. 例如

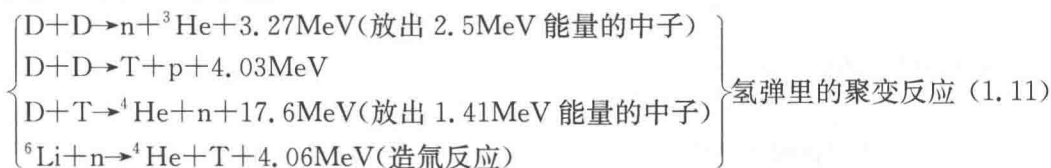


反应前的道称为入射道, 反应后的道称为出射道, 对于同一个人射道, 可以有若干个出射道, 如式(1.9)所示的反应. 对于同一个出射道, 也可以有若干个人射道, 例如

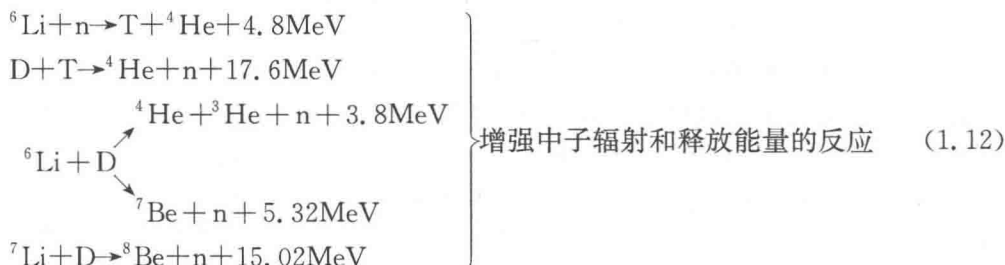


产生各个反应道的概率是不等的, 而且这种概率随入射粒子能量的变化而不同. 能量增大时, 一般要增加出射道. 对于一定的人射粒子和靶核, 到底能产生哪种反应道, 这与核反应机制和核结构等问题都有关, 同时它要被一些守恒定律所约束.

再例如, 氢弹里的核反应



两轻核聚合时, 必须克服库仑斥力, 高速运动的粒子必须在核力作用的 1fm (即 $1 \times 10^{-13}\text{cm}$) 范围内, 才可能发生聚变反应. 因此需要靠裂变反应提供高温、高压, 以增大核密度, 形成高浓密等离子体, 这就是氢弹的爆炸原理. 参与聚变的 D、T 来自 LiD(T) 固体或 D-T 混合气体.



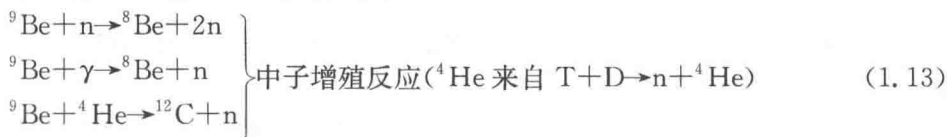
${}^{238}\text{U} + n$ (快中子) 可使爆炸当量增大超过总当量的 80% 左右. 由于 ${}^{238}\text{U}$ 裂变释放出大量放射性沉降物, 因此把含 ${}^{238}\text{U}$ 包层的三相核弹也称肮脏氢弹.

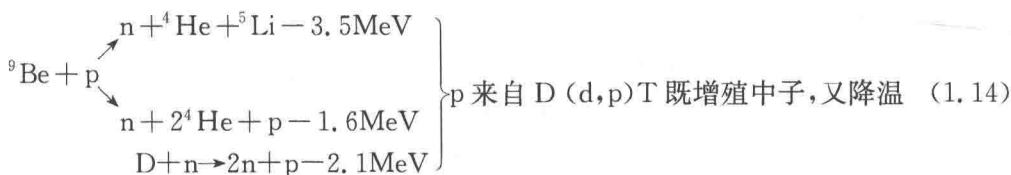
中子弹与其他核弹的区别在于: 力学能量大为降低 (即占约 20%), 以 1000 吨 TNT 当量的中子弹为例, 爆炸后瞬发核辐射当量约占总爆炸当量的 40%, 而原子弹瞬发核辐射当量仅占 5%. 但中子辐射能量高达 50%, 亦即力学破坏较小, 中子杀伤效应增大, 故把中子弹称为加强辐射弹. 这是因为:

(1) 中子弹不用 LiD(T) , 只用 D-T 混合气体, 这样裂变不需要提供太高压力和温度给 D-T 气体.

(2) 用同样 1000 吨 TNT 当量, 中子弹可释放 1.2×10^{25} 个高能中子, 而原子弹仅释放出平均能量为 0.8MeV 的 2×10^{23} 个中子.

(3) 先进的中子弹: 300 吨 TNT 当量, 主要利用如下核反应:





可见, Be 起如下作用: 吸收热核反应能量, 达到降温效果, 导致力学效应减弱, 增殖大量中子, 加强中子杀伤效应。

1.2 Q 方程的推导

1.2.1 反应能

对于两体反应



根据能量守恒

$$M_a c^2 + E_a + M_A c^2 + E_A = M_b c^2 + E_b + M_B c^2 + E_B \quad (1.16)$$

核反应过程中释放出的能量称为反应能, 通常用符号 Q 表示. 因此, 反应能就是反应后的动能减去反应前的动能. 因此

$$\begin{aligned}
 Q &\equiv [(M_a + M_A) - (M_b + M_B)]c^2 && \text{(静止能量的释放)} \\
 &= (E_b + E_B) - (E_a + E_A) && \text{(动能的增加)}
 \end{aligned} \quad (1.17)$$

式中 M_A, M_a, M_B, M_b 代表反应前后相应粒子的原子质量; E_A, E_a, E_B, E_b 分别表示靶核、入射粒子、剩余核、出射粒子的动能; 且本式的推导中采用原子质量来代替核的质量. 这是因为核的总电荷在反应前后不变, 则原子中的电子总数也不变, 于是在原子质量相减的过程中, 电子质量相消了. 当然, 反应前后电子在原子中的结合能是有变化的, 但它甚小, 可以忽略不计.

式中表明, Q 值既可以通过实验测量反应前后各粒子的动能求得, 也可以由已知的各粒子的原子质量算出.

由于 $1u = 1.6605655 \times 10^{-27} \text{ kg}$, $c = 2.99792453 \times 10^8 \text{ m/s}$, $1\text{MeV} = 1.60217733 \times 10^{-13} \text{ J}$, 所以 $1u \cdot c^2 = 1.492522 \times 10^{-10} \text{ J} = 931.5\text{MeV}$.

例如

$$\begin{aligned}
 p + {}^7\text{Li} &\rightarrow \alpha + \alpha + Q \\
 Q &= (M_p + M_{{}^7\text{Li}} - 2M_\alpha)c^2 \\
 &= (1.007825 + 7.01600 - 2 \times 4.002603) \times 931.5 = 17.35(\text{MeV})
 \end{aligned}$$

式(1.17)还可以通过反应前后有关粒子的结合能之差表示出来. 令 m_{aA} 表示粒子 a 与靶核 A 结合而成的中间核的质量, m_{bB} 表示粒子 b 与剩余核 B 结合时生成核的质量, 显然有 $m_{aA} = m_{bB}$. 当式中右边括号内同时减去 m_{aA} 时, 有

$$\begin{aligned}
 Q &= [(M_A + M_a - M_{aA}) - (M_B + M_b - m_{bB})]c^2 \\
 &= B_{aA} - B_{bB}
 \end{aligned} \quad (1.18)$$

式中 B_{aA} 为粒子 a 与靶核 A 的结合能, B_{bB} 为粒子 b 与剩余核 B 的结合能. 有此式可见, 当 $B_{aA} > B_{bB}$ 时, 为放能反应, 反之为吸能反应.

如果反应的剩余核不处于基态, 则 $Q' = Q - E'_B$, 这里 E'_B 是剩余核的激发态能量.

1.2.2 质量亏损

Q 值是参与核反应的粒子结合能的释放. 原子核是由质子和中子组成的, 但原子核的质量总是小于组成它的核子质量之和, 其差额称为质量亏损 Δm , 即组成某一原子核的核子质量和与该原子核质量之差.

$$\Delta M(Z, A) = ZM(^1\text{H}) + (A - Z)m_n - M(Z, A) \quad (1.19)$$

实验发现, 所有的原子核都有正的质量亏损, 即

$$\Delta M(Z, A) > 0 \quad (1.20)$$

以氦核为例, 氦核由一个中子和一个质子组成, $m_d = 2.014102\text{u}$, 而 $m_n = 1.008655\text{u}$, $m_p = 1.007825\text{u}$, 所以

$$\Delta M = (1.008665 + 1.007825) - 2.014102 = 2.388 \times 10^{-3}\text{u} \quad (1.21)$$

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 2.225\text{MeV} \quad (1.22)$$

这说明 1 个质子和 1 个中子聚合成 1 个氦核时, 就会释放出 2.225MeV 的能量.

任何两粒子结合成一个较重的粒子时, 都有能量释放出来. 一个电子和一个质子结合成一个氢原子时, 就释放出 13.6eV 能量, 这相对于电子静止能量 0.511MeV 来说, 仅为 $\frac{3.6\text{eV}}{0.511\text{MeV}} = 3 \times 10^{-5}$, 太小了. 虽然一个中子和一个质子结合成一个氦核时释放出 2.225MeV 能量, 但只是中子静止能量 939.61MeV 的 1.2%, 也是很小的.

1.2.3 结合能与比结合能

原子核的质量比组成它的核子的总质量小, 表示由自由核子结合而成原子核的时候, 有能量释放出来. 这种表示自由核子组成原子核所释放的能量称为原子核的结合能. 核素的结合能用 $B(Z, A)$ 来表示. 根据相对论质能关系, 它与核素的质量亏损 $\Delta M(Z, A)$ 的关系是

$$B(Z, A) = \Delta M(Z, A)c^2 \quad (1.23)$$

对于 ^4He 来说, $B(^4\text{He}) = \Delta M(^4\text{He})c^2 = 28.30\text{MeV}$. 这就是说, 2 个质子、2 个中子结合成一个氦核, 要放出 28.30MeV 的能量. 相应地有质量的减少, 这就是 ^4He 的质量亏损. 或者说, 若将 ^4He 核拆成自由的核子, 为了克服核子之间的作用力, 要用 28.30MeV 的能量对体系做功.

因而, 可由核素的原子质量来计算原子核的结合能. 如果一个原子核的质量为 M , 它由 Z 个质子和 N 个中子组成, 则结合能表示为

$$B(Z, A) = (Zm_p + Nm_n - M)c^2 = [ZM_H + (A - Z)m_n - M]c^2 \quad (1.24)$$

式中, M_H 为氢原子质量, m_n 为中子质量.

通常不同核素的结合能差别很大, 一般地说, 核子数 A 大的原子核结合能 B 也越大. 原子核平均每个核子的结合能又称为比结合能, 用 ϵ 表示

$$\epsilon = \frac{B(Z, A)}{A} \quad (1.25)$$

比结合能 ϵ 表示了若把原子核拆成自由核子, 平均对于每个核子所要做的功. ϵ 的大小可用以标志原子核结合松紧的程度. ϵ 越大的原子核结合得越紧; ϵ 较小的原子核结合得较松.

对于稳定的核素 ^A_ZX , 以 ϵ 为纵坐标, A 为横坐标作图, 可以连成一条曲线, 称为比结合能曲线, 如图 1.1 所示. 从图中可以看出一些特点, 找到一些规律.

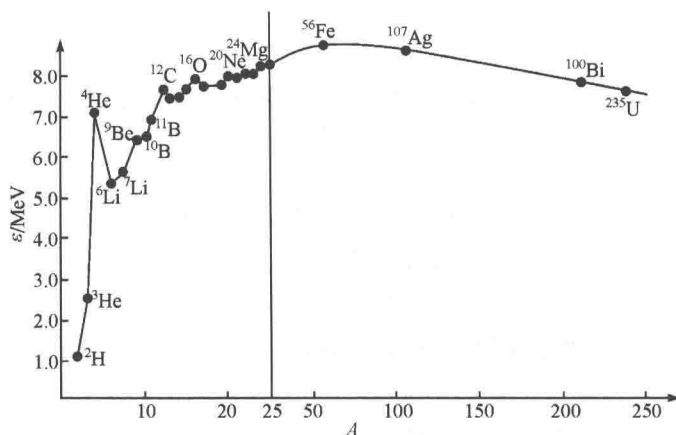


图 1.1 比结合能曲线

(1) 当 $A < 30$ 时, 曲线的趋势是上升的, 但是有明显的起伏. 在图中, 峰的位置都在 A 为 4 的整数倍的地方, 如 ${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$ 和 ${}^{20}\text{Ne}$ 等, 这些原子核的质子数 Z 和中子数 $N = A - Z$ 都是偶数, 称为偶偶核. 而且它们的 Z 和 N 还相等, 这表明对于轻核可能存在 α 粒子的集团结构.

(2) 当 $A > 30$ 时, $\epsilon \approx 8\text{MeV}$. 与 A 较小时, 曲线的明显起伏不同, 近似地有 $\epsilon \approx B/A \approx$ 常数, 即 $B \propto A$. 这表明原子核的结合能粗略地与核子数成正比. 每个核子的结合能比原子中每个电子的结合能要大得多, 说明在原子核中核子之间的结合是很紧的, 而原子中电子被原子核的束缚要松得多.

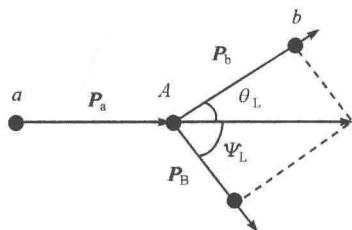
(3) 曲线的形状是中间高, 两端低. 说明 A 为 $50 \sim 150$ 的中等质量的核结合得比较紧, 很轻的核和很重的核 ($A > 200$) 结合得比较松, 正是根据这样的比结合能曲线, 物理学家预言了原子能的利用. 一种是重核的裂变, 一个很重的原子核分裂成两个中等质量的原子核, ϵ 由小变大, 有核能释放出来, 俗称原子能. 例如, 重核 ${}^{235}\text{U}$ 吸收一个中子而成为 ${}^{236}\text{U}$, 随之可裂变成为两个中等质量的碎片核, ϵ 由 7.6 增大到 8.5 MeV. 一次裂变约有 200 MeV 的能量释放出来. 这就是原子弹和裂变反应堆能够释放出巨大能量的道理. 另一种是轻核的聚变, 两个很轻的原子核聚合成一个重一些的核, ϵ 由小变大, 也有核能释放出来. 例如, 氘核和氚核聚合反应生成氦核, 并有中子放出, 反应式为



一次这样的聚变反应就有 20 MeV 以上的核能放出. 这就是氢弹和热核反应释放大量能量的基本原理.

1.2.4 Q 方程的推导

在实验室坐标系中, 假设靶核是静止的 (即 $E_A = 0$), 用 P_a 、 P_b 和 P_B 分别表示入射、出射粒子和剩余核的动量, θ_L 和 Ψ_L 分别表示出射粒子和剩余核的出射角 (如图 1.2).



根据动量守恒

$$P_a = P_b + P_B \quad (1.27)$$

根据能量守恒

图 1.2 核反应的粒子动量关系