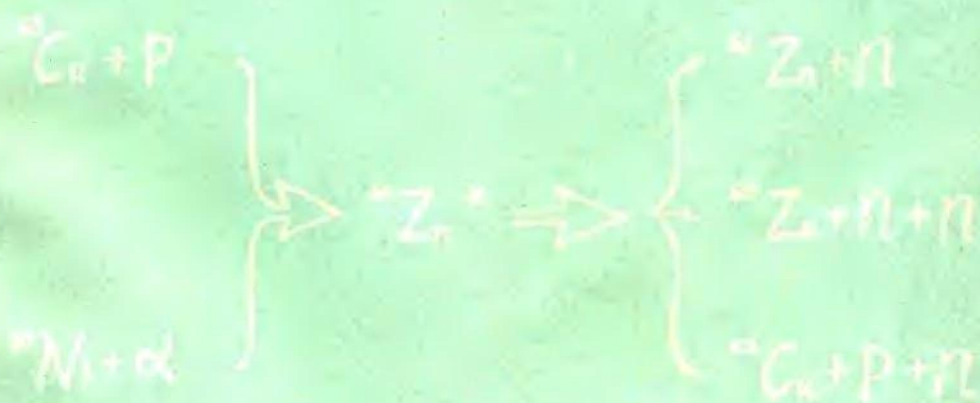


原子核物理学基础

下 册

王永芬 编著



清华大学出版社

原子核物理学基础

下 册

王永芬 编著

清华大学出版社

1986·北京

内 容 简 介

本书全面系统地叙述了原子核物理学的基本问题，介绍了本学科各个领域的最新研究成果。

全书共分八章：1、原子核的基本性质；2、核力；3、核结构模型；4、核衰变（横向编排）；5、核反应；6、核裂变；7、中子物理；8、粒子物理。以核衰变和核反应为重点，以核力、核结构为基础，以中子、粒子为延伸。本册包括5—8章。

本书内容深入浅出，既适合作教材，又适合自学，另有为提高、开阔知识领域的选学内容。每章附有适量的例题和练习题，附录中编入英文习题和简便适用的核衰变图和核素参量表。

该书可供原子核物理学、应用物理学、天体物理学和放射性测量技术等学科的教师、研究人员、工程技术人员、研究生和本科生参考。

原子核物理学基础

下 册

王永芬 编著

*

清华大学出版社出版

北京 清华园

1048信箱印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：26 字数：560千字

1986年12月第1版 1986年12月第1次印刷

印数：0001~3500

统一书号：15235·241 定价：3.75元

前 言

本书是近几年我在国防科学技术大学辐射物理专业和防化学院核探测专业讲授原子核物理学课程讲义的基础上，经过整理充实而编写的。在编写中考虑到兄弟院校核物理专业的情况，并照顾到有关学科核物理选修课的需要，力图使本书具有更大的适用性。

全书以核衰变和核反应为重点，以核力、核结构模型为基础，以中子、粒子为延伸。欲使全书内容结构严谨、系统和重点突出。在章节编排方面，从少而精和内容结构的内在联系出发，全书分为八章。①原子核的基本性质；②核力；③核结构模型；④核衰变（从横向编排以利于教学）；⑤核反应；⑥核裂变；⑦中子物理；⑧粒子物理。书中编入71道例题和447道练习题，其中思考题135个，中文计算题191个，英文计算题121个（在上、下册附录中）。附录中还编有简单而适用的核衰变图和核素表。

在内容编排中，着重从培养学生的独立能力出发，本着打好基础，精选内容，逐步更新和提高质量的思想。每一章节的内容均以两层次结构编排，第一层次为基本理论、原理和方法；第二层次为提高和开阔知识领域（带“*”号章节）的选学内容。每章后的习题同样分为两层次。这样使读者有回旋的余地，便于各取所需。本书试图具有重点与一般相结合、理论与实践相联系、基础理论与应用技术相结合的特点。

本书可作为原子核物理专业的核物理课程教材，1—5章可作为有关专业或基础物理系的选修课教材或研究生课教材。本书也可作为从事核物理、放射性等有关学科的教师、研究人员、工程技术人员、研究生和本科生参考。

本书初稿完成后，国防科学技术大学教材处曾请中国原子能科学研究院研究员卓益忠同志审阅了全稿。我院周立成、任政柯同志阅读了全稿，并提出了宝贵意见，闻淑兰同志绘制了插图。在出版过程中得到了我院王锡仁副院长、训练部张国治副部长的亲自支持和关怀，以及教研室、教保处印刷厂和有关领导的大力支持和帮助，致此表示感谢。由于本人水平及印刷条件的限制，错误难免，请读者批评指正。

编 者 王 永 芬

一九八五年一月于解放军防化学院

目 录

第五章 原子核反应

5·1	核反应描述	341
1	核反应的分类	342
2	反应道	343
3	核反应中的守恒定律	343
5·2	核反应中的能量与出射角	346
1	反应能	346
2	相对运动动能	351
3	阈能	357
4	核反应中的出射角	360
5·3	核反应截面	363
1	反应截面	363
2	微分截面	364
3	核反应产额	368
4	核反应截面的理论描述	375
* 5.4	核反应散射理论	389
1	散射积分方程	389
2	夫琅霍费 (Fraunhofer) 衍射近似	393
3	分布函数近似	399
4	格劳伯 (Glauber) 近似	401
5	散射矩阵	406
5·5	核反应的模型理论	410
1	核反应机制描述	410
2	光学模型	411
3	复合核系统的经典描述	432

4	复合核的统计理论	456
5·6	核反应的几种典型形式	501
1	中子核反应	501
2	光核反应	504
3	带电粒子核反应	507
*4	重离子核反应	514
小 结		517
习 题	5—1——5—60	523

第六章 原子核裂变

6·1	核裂变的概念	528
1	什么是核裂变	528
2	自发裂变	528
3	诱发裂变	529
4	裂变势垒	531
6·2	裂变产物	534
1	裂变过程	534
2	裂变碎片的质量分布	536
3	裂变碎片的动能	541
4	裂变中子	544
5	裂变产物的角分布	549
6·3	核裂变的液滴模型理论	553
1	裂变过程	553
2	裂变核的可裂变参量	554
3	核裂变中的能量关系	558
6·4	核裂变液滴模型理论的壳层修正	562
1	壳修正方法	562
2	应用	564

6·5	核裂变的应用	568
1	裂变反应堆	568
2	核爆炸装置	570
3	原子电池	570
6·6	原子核的聚变反应	572
1	聚变反应的一般原理	573
2	热核反应	574
小 结		576
习 题	6—1 — 6—35	578

第七章 中子物理

7·1	中子的性质	582
1	中子的发现	582
2	中子的性质	583
7·2	中子源	587
1	中子源的性质	587
2	中子源的类型	592
*3	中子源的研究方向	603
7·3	中子的宏观行为	604
1	宏观截面和平均自由程	604
2	中子的慢化	609
3	中子的扩散	615
*7·4	中子应用技术	621
1	中子衍射	621
2	中子活化分析	625
3	冷中子技术	627
4	中子计	628
小 结		629

习 题 7—1 —— 7—39	631
-----------------	-----

第八章 粒子物理

8 · 1 高能粒子的来源	634
1 宇宙辐射源	634
2 人工辐射源	640
8 · 2 粒子的特性	640
1 轻子	941
2 介子	643
3 重子	644
4 反粒子	645
5 奇异粒子与共振态	646
8 · 3 强子结构模型	953
1 坂田模型	653
2 多重态对称性	654
3 强子结构的层子模型	656
8 · 4 粒子间的相互作用	665
1 相互作用的性质与关系	665
2 相互作用与守恒定律之间的关系	666
3 统一相互作用的研究	669
小 结	671
习 题 8—1 —— 8—25	672
附录一 英文习题 5—8章	675
二 常用核素参量表	688
三 典型核衰变图(65例)	738
四 常用物理常数	743
主要参考书	747

第五章 原子核反应

原子核与原子核，或者原子核与其它粒子(α 粒子、质子、中子、 γ 光子等)之间的相互作用所导致的变化过程称为核反应。核反应中不但放出能量，而且还形成不同类型的产物粒子。核反应是产生不稳定原子核的根本原因。

原子核反应与核衰变的区别在于：它不是自发过程，而是诱发过程；通常由稳定核向不稳定核转变；核衰变只涉及3—4 Mev以下的低激发能级，而核反应涉及的能量在一个核子的分离能以上，甚至高达几百Mev。这些不同点决定了核反应比核衰变的内容更加丰富多彩，研究方法更加多式多样，在原子核物理学中的地位和作用更加重要。

本章主要讨论核反应中的能量，核反应截面，核反应的散射理论，核反应的模型理论，对于几种主要的核反应进行简要介绍。

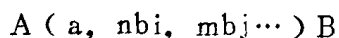
5.1 核反应描述

核反应过程的一般形式表示为

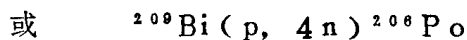
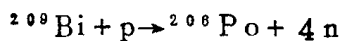


式中A和a分别表示靶(target)核和入射(Incident)粒子，B和b分别表示剩余(Residual)核和出射(Outgoing)粒子。Q是反应能。

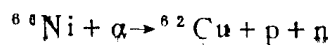
通常简写为

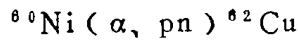


式中n, m分别为核反应中产生的同类出射粒子数，i和j为产生不同出射粒子的相应标号。例如：40 Mev的质子轰击Bi核的反应式为

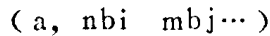


30 Mev的 α 粒子轰击 ${}^{60}\text{Ni}$ 的反应式为





核反应的更简化形式还可写为



1 核反应的分类

1) 按入射粒子种类分:

(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。又分为:

质子引起的核反应, 如 (p, p) , (p, n) , (p, α) 等。

氘核引起的核反应, 如 (d, p) , (d, α) 等。

α 粒子引起的核反应, 如 (α, n) , (α, p) 等。

重离子(比 α 粒子更重的离子)引起的核反应, 如 $({}^{12}\text{C}, 4n)$, $({}^{16}\text{O}, \alpha, 3n)$ 等。

(3) 光核反应, 是由 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, 与光核反应类似。

2) 按入射粒子的能量分:

(1) 低能核反应, 入射粒子动能 $E_i < 30 \text{ Mev}$ 。出射粒子数目最多为 3—4 个。

(2) 中能核反应, $50 \text{ Mev} < E_i < 1000 \text{ Mev}$ 时, 可以使靶核散裂成许多碎片。当 $E_i > 100 \text{ Mev}$ 时, 还可以产生介子。

(3) 高能核反应, $E_i > 1000 \text{ Mev}$, 除产生介子外, 还可以产生其它粒子或形成奇特核。

3) 按靶核的质量数分:

(1) 轻核反应, $A < 25$ 。

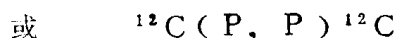
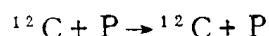
(2) 中量核反应, $25 < A < 80$ 。

(3) 重核反应, $A > 80$ 。

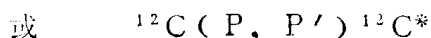
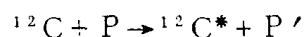
4) 按出射粒子性质分:

(1) 核散射, 特点是出射粒子与入射粒子相同。又分为:

弹性散射: 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。如:



非弹性散射: 散射前后系统总动能不相等, 原子核的内部能量要发生变化。如

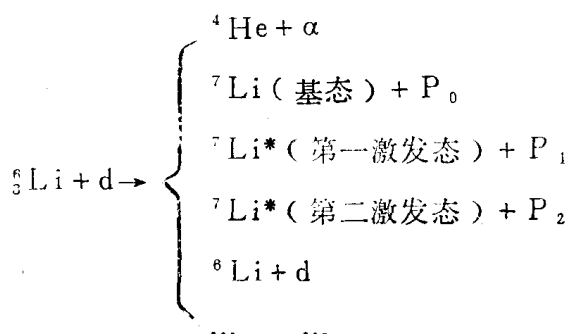


(2) 核转变。出射粒子与入射粒子不同的核反应。这是核反应研究的主要内容，应当把它理解为狭义的核反应；而把包括核散射在内的核反应，理解为广义的核反应。

2 反应道

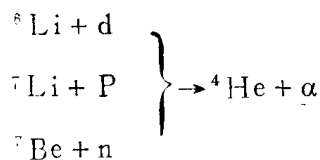
在一定条件下，发生核反应的可能途径称为反应道。对应于每一种核反应过程，称为一个反应道。反应前的道称为入射道，反应后的道称为出射道。

对于同一入射道，可以有若干出射道。例如，能量为2.5 Mev的氦核轰击 ^6Li 核时，可以产生下列反应：



式中， P_0 、 P_1 和 P_2 分别表示相应反应道中放出的质子。

对于同一个出射道也可以有若干入射道，例如



产生各个反应道的几率是不相等的，而且这种几率随入射粒子能量的变化而变化，入射粒子能量增大时，一般要增加出射道。通常用核反应截面来描述核反应道出现的几率。对于一定的入核粒子能量和靶核，到底能产生哪些反应道，这与具体的反应机制、核结构性质等因素有关，同时还被一些守恒定律所约束。

3 核反应中的守恒定律

在核反应过程中，遵守以下守恒定律：

1) 电荷数守恒，反应前后的总电荷数不变。例如，在 $^{14}_7\text{N}(\alpha, \text{P})^{17}_8\text{O}$ 反应中，反应前的总电荷数 $\Sigma Z = 7 + 2 = 9$ ，反应后 $\Sigma Z = 8 + 1 = 9$ 。

2) 质量数守恒，反应前后的总质量数不变。在1)的反应中，反应前 $\Sigma A = 14 + 4 = 18$ ，反应后 $\Sigma A = 17 + 1 = 18$ 。

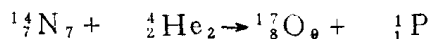
3) 能量守恒，反应前后体系的总能量（静止能量加动能）不变。

4) 动量守恒，反应前后体系的总动量不变。例如，在 $^{14}_7\text{N}(\alpha, \text{P})^{17}_8\text{O}$ 反应中，反应前靶核是静止的，于是质子与 $^{16}_8\text{O}$ 的动量矢量和必然等于 α 粒子的动量。在质心系中，整个体系的线动量在任何时刻都等于零，这一规律对计算核反应提供了方便。

5) 角动量守恒。在核反应中，反应前后粒子的总角动量不变。在 $^{14}_7\text{N}(\alpha, \text{P})$

$^{17}_8\text{O}$ 反应中，反应前体系的总角动量是 $^{14}_7\text{N}$ 和 α 粒子的角动量与两者相对运动轨道角动量的矢量和，反应后体系的总角动量应是 $^{17}_8\text{O}$ 和质子的角动量与二者相对运动轨道角动量的矢量和。已知， $^{14}_7\text{N}$ 和 α 粒子的自旋量子数分别为1和0，若二者对心碰撞，轨道角动量为0，于是反应前体系的总角动量为1。 $^{17}_8\text{O}$ 和质子的自旋量子数分别为5/2和1/2，两者的矢量和应为2或3。为了保持反应后体系的总角动量也是1，则 $^{17}_8\text{O}$ 和质子间的轨道角动量只能取1，2，3或2，3，4。

6) 同位旋守恒。反应前后体系的总同位旋不变。如果反应前后体系的各粒子都处于基态，则每一粒子的同位旋量子数 $T \approx |T_z| = \frac{1}{2} |Z - N|$ 由此可知，反应



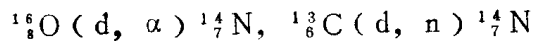
前后体系的总同位旋守恒。

7) 宇称守恒，反应前后体系的总宇称不变。在 $^{14}_7\text{N}(\alpha, \text{P})^{17}_8\text{O}$ 反应中，反应前的宇称为 $^{14}_7\text{N}$ 和 α 粒子的宇称与两者相对运动轨道宇称之积，反应后体系的宇称为 $^{17}_8\text{O}$ 和质子的宇称与二者相对运动的轨道宇称之积。已知 $^{14}_7\text{N}$ 和 α 粒子的宇称都是+1，如果对心碰撞，则轨道宇称也是+1，反应前体系的宇称 $\pi_i = (+1)(+1)(+1) = +1$ ； $^{17}_8\text{O}$ 和质子的宇称也都是+1，为使反应后体系宇称 $\pi_f = +1$ ，两者相对运动的轨道宇称必为+1，从而，它们的轨道角动量L只能取偶数，即 $L = 0, 2, 4, \dots$ 。如果入射波取 $L = 1$ 的分波，则 $^{17}_8\text{O}$ 和质子的相对运动角动量子数L只能取奇数，即 $L = 1, 3, 5$ 等。

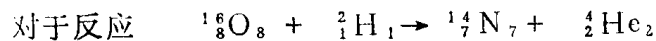
8) 统计性守恒, 反应前后的统计性不变。如果反应前后体系的核子数为偶数, 则服从玻色——爱因斯坦统计; 若反应前后体系的核子数为奇数, 则服从费米——狄拉克统计。在 $^{14}_7\text{N}(\alpha, p)^{14}_8\text{O}$ 反应中, 反应前后的核子数都是18, 故服从玻色——爱因斯坦统计。

可见核反应中的守恒定律是判断某一类型核反应能否发生的基本根据。

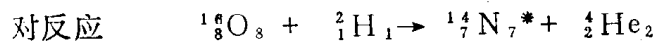
例5—1 若 $^{14}_7\text{N}$ 最低激发态的能量为2.3MeV, 同位旋量子数为 $T = 1$, 问下列核反应能否形成 $^{14}_7\text{N}$ 的基态和2.3MeV的激发态? 为什么?



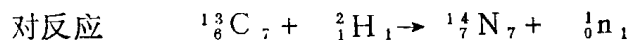
解: 用 $T \approx |T_3| = \frac{1}{2}|Z - N|$ 计算核反应中除 $^{14}_7\text{N}$ 激发态之外的基态核的同位旋量子数, 并根据同位旋守恒定律判断两种反应能否发生的可能性。



同位旋量子数 $T = 0 + 0 = 0 + 0 = 0$ 反应前后同位旋守恒, 所以能形成 $^{14}_7\text{N}$ 的基态。

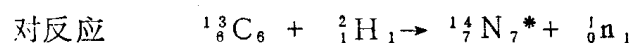


同位旋量子数 $T = 0 + 0 \neq 1 + 0$
反应前后同位旋不守恒, 不能形成 $^{14}_7\text{N}^*$ 激发态。



$$T = \frac{1}{2} + 0 = 0 + \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$$

同位旋守恒, 能产生 $^{14}_7\text{N}_7$ 的基态。



反应前T为 $\frac{1}{2}$ ，反应后T为 $\frac{1}{2}$ ， $\frac{3}{2}$

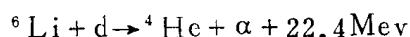
同位旋守恒，能产生 $^{14}\text{N}_7^*$ 的能量为2.3 Mev的激发态。

5.2 核反应中的能量与出射角

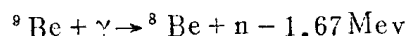
核反应中的能量和出射粒子的出射角度是衡量核反应性质与效果的基本运动学参量。通常从实验室坐标、质心坐标及其两坐标系之间这些参量的关系来描述核反应。

1 反应能

核反应中放出的能量称为反应能，通常用Q表示， $Q > 0$ 的核反应是放能反应； $Q < 0$ 的反应是吸能反应， $Q = 0$ 的反应是弹性散射。例如反应：



为放能反应



为吸能反应

如何对反应能进行定量描述？它的含义是什么？可以通过以下两条途径：

1) 根据广义质量亏损计算Q值

根据质量亏损的定义，把反应前后体系的静止质量之差称为广义质量亏损 ΔM

$$\Delta M = \sum M_i - \sum M_f \quad (5-2)$$

$\sum M_i$ 和 $\sum M_f$ 分别是反应前后体系的静止质量。

如果反应前后体系的动能之差为

$$\Delta E = \sum E_f - \sum E_i \quad (5-2a)$$

式中 $\sum E_i$ 和 $\sum E_f$ 分别为反应前后体系的总动能。

根据核反应的能量守恒定律有：

$$\begin{cases} \sum M_i c^2 + \sum E_i = \sum M_f c^2 + \sum E_f \\ \sum M_i c^2 - \sum M_f c^2 = \sum E_f - \sum E_i \end{cases} \quad (5-2b)$$

所以得到

$$\Delta E = \Delta M C^2 \quad (5-2c)$$

当 $\Delta M > 0$ ，反应后静止质量减少了，相应于 $\Delta E > 0$ ，即放能反应；当 $\Delta M < 0$ ，反应后静止质量增大，相应于 $\Delta E < 0$ ，即吸能反应。

根据(5-2c)把反应能定义为

$$\begin{cases} Q \equiv \Delta E = (E_B + E_b) - (E_A + E_a) \\ Q \equiv \Delta M C^2 = (M_A + M_a - M_B - M_b) C^2 \\ Q \equiv \Delta M C^2 = (m_A + m_a - m_B - m_b) C^2 \end{cases} \quad (5-2d)$$

式中， M_A 、 m_A ； M_a 、 m_a ； M_B 、 m_B ； M_b 、 m_b 分别为反应前后各原子或原子核的质量。

所以核反应能是反应后体系的动能与反应前体系动能之差或反应前体系静能量与反应后体系的静能量之差。

如果 M_{Aa} 为入射粒子与靶核结合成瞬态体系的质量； M_{Bb} 为出射粒子与余核结合成的瞬态体系质量，显然 $M_{Aa} = M_{Bb}$ ，对(5-2d)式的右边分别加减 M_{Aa} 和 M_{Bb} ，则

$$\begin{aligned} Q &= [(M_A + M_a - M_{Aa}) - (M_B + M_b - M_{Bb})] C^2 \\ &= B_{Aa} - B_{Bb} \end{aligned} \quad (5-2e)$$

式中 B_{Aa} 为入射粒子a与靶核A的结合能； B_{Bb} 为出射粒子b与余核B的结合能。显然 $B_{Aa} > B_{Bb}$ 为放能反应， $B_{Aa} < B_{Bb}$ 为吸能反应。

利用(5-2e)式可以方便地对反应能进行计算。根据质量过剩相应的能量也可以计算反应能。

例5-2 在 ${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$ 反应中，已知 $\Delta(1, 3) = 14.950 \text{ Mev}$ ， $\Delta(2, 4) = 2.425 \text{ Mev}$ ， $\Delta(1, 2) = 13.136 \text{ Mev}$

求反应能Q为多少Mev?

解：对(5-2d)式中，各项分别减质量数A，则反应能表达式为

$$Q = [(M_{3\text{H}} - 3) + (M_{2\text{H}} - 2) - (M_{4\text{He}} - 4) + (M_n - 1)] C^2$$

$$= \Delta(1, 3) + \Delta(1, 2) - \Delta(2, 4) - \Delta(0, 1)$$

查核素表知, 反应能为

$$\begin{aligned} Q &= 14.950 + 13.136 - 2.425 - 8.071 \\ &= 17.59 \text{ Mev} \end{aligned}$$

2) Q方程与实验Q值

在实验室中, 靶核往往是固定的, 即 $E_A = 0$

按(5-2d)式有

$$Q = E_B + E_b - E_a \quad (5-3)$$

通常, 入射粒子的动能 E_a 是容易知道的, 出射粒子的动能 E_b 可以直接进行测量, 剩余核的动能 E_B 一般较小, 很难准确测定, 有时还不能穿出靶物质, 根本无法测量。同时, (5-3)式没有反映出剩余核与出射粒子的出射方向。为此可以用动量守恒定律把 E_B 消掉, 可推导出核反应中的角度关系。

用 P_a 、 P_B 和 P_b 分别表示粒子 a、B 和 b 的动量, 按动量守恒定律有

$$P_a = P_B + P_b$$

若 θ 表示出射粒子方向与入射粒子方向间的夹角, 由余弦定理得

$$P_B^2 = P_a^2 + P_b^2 - 2 P_a P_b \cos \theta$$

由 $P^2 = 2mE$, 得到

$m_B E_B = m_a E_a + m_b E_b - 2(m_a m_b E_a E_b)^{\frac{1}{2}} \cos \theta$, 将 E_B 表达式代入(5-3)式得

$$\begin{cases} Q = \left(\frac{m_a}{m_B} - 1 \right) E_a + \left(\frac{m_b}{m_B} + 1 \right) E_b - \frac{2(m_a m_b E_a E_b)^{\frac{1}{2}} \cos \theta}{m_B} \\ Q = \left(\frac{A_a}{A_B} - 1 \right) E_a + \left(\frac{A_b}{A_B} + 1 \right) E_b - \frac{2(A_a A_b E_a E_b)^{\frac{1}{2}} \cos \theta}{A_B} \end{cases} \quad (5-4)$$

对(5-4)式进行以下讨论:

(1) (5-4)式通常称为Q方程。可见, 只要测量 θ 角方向上的出射粒子动能 E_b , 即可求得反应能Q。这为实验测量反应能提供了方便。

(2) 由(5-4)式可以推得出射粒子的能量角分布, 即出射粒子的能量——角度关系, 用 $E_b(\theta)$ 表示。

由Q方程可以解得

$$E_b(\theta) = \left\{ \frac{(A_a A_b E_a)^{\frac{1}{2}}}{A_B + A_b} \cos \theta \pm \left[\left(\frac{A_B - A_a}{A_B + A_b} + \frac{A_a A_b}{(A_B + A_b)^2} \cos^2 \theta \right) \right. \right. \\ \left. \left. E_a + \frac{A_B}{A_B + A_b} Q \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^2 \quad (5-4a)$$

式中, 方括号前的+号表示能量单值, 即一个出射角 θ 对应一个 $E_b(\theta)$; \pm 号表示能量双值, 即一个出射角对应于两个出射粒子能量 $E_b(\theta)$ 和 $E_{b_1}(\theta)$ 。

(5-4a)式为计算出射粒子的能量分布提供了方便。对于某一确定入射粒子能量 E_a 的核反应, 只要用原子质量或质量数求得Q值后, 即可算出出射粒子的能量分布 $E_b(\theta)$ 。这种能量—角度关系对于在实验中辨认粒子, 以及在不同出射角处选择一定能量的出射粒子很有用。

(3) 实验Q值。(5-4)式仅适用于反应前后的粒子都处于基态的情况。实际情况下, 反应产物(特别是剩余核)往往处于激发态, 通常把剩余核处于激发态时的Q值称为实验Q值, 用 Q' 表示。

设剩余核的激发能为 E^* , 则剩余核处于激发态时的静止质量为

$$m_B^* = m_B + \frac{E^*}{c^2}$$

$$\begin{aligned} \text{于是} \quad Q' &= \Delta mc^2 = (m_A + m_a - m_B^* - m_b) c^2 \\ &= (m_A + m_a - m_B - m_b) c^2 - E^* \\ &= Q - E^* \end{aligned} \quad (5-4b)$$

此式的物理意义是明显的, 由于激发态时剩余核的能量比基态时多了一部分激发能 E^* , 这部分能量在核反应中没有转化为出射粒子和剩余核的动能。因此, 在核反应过程中释放出的能量 Q' 要比剩余核处于基态时的Q值少 E^* 。

(5-4b)式还可改写为

$$E^* = Q - Q' \quad (5-4c)$$

由此可知, 只要由实验测得 Q' 后, 即可求得剩余核的激发能 E^* 。这是通过核反应获得