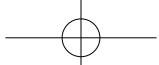


第 1 章

核物理与核辐射基础





| 核能利用与核材料 |

1.1 原子模型

1.1.1 关于原子——古典原子论和四元素论

为了介绍核能，作为必备的知识，先对“原子的结构”做简要说明。

英语单词“atom”源于希腊词“ATOMS”，后者是公元前400年前后最早由希腊哲学家德谟克里特(Democritus, 460BC—370BC)及伊壁鸠鲁(Epicurus, 341BC—270BC)使用的。他们将无论在形状上还是种类上都不能再细分的微粒命名为ATOMS，并提出世界是由ATOMS及其间的空虚空间所组成的古典原子论。

这种古典原子论那时并未被实验所证实，其意义在于哲学上。尽管古代原子论与现在的原子论相近，但在当时却遭到希腊哲学家亚里士多德(Aristoteles, 384BC—322BC)的反对，他认为，物质是由火、水、空气、土这四种元素组成的。

此后，法国学者拉瓦锡(Antoine Lavoisier, 1743—1794)发现了氧，并证明空气是氧气与氮气的混合物。据此，流行了2000多年以上的亚里士多德的四元素论被否定。进入17世纪，随着气体化学反应的完善与精细化，英国学者道尔顿(John Dalton, 1766—1844)发表了近代原子论。该原子论认为，原子是由化学方法不能再分的物质的小微粒，而化学反应是各种不同的原子或结合或分离的现象。

进入19世纪，电子(电荷的最小单位)被发现，人们进而提出有核的原子模型：原子是原子核周围有若干电子围绕其运动的构造模型。

1.1.2 原子模型——原子有核还是无核

现在关于原子的模型，即电子围绕原子核运动的有核原子模型，已成为常识。但20世纪初，人们还不相信原子核的存在，主张无核原子模型的科学家大有人在，两种观点的交锋十分激烈。所谓有核原子模型是指，原子的正电荷集中于原子中心一个特定位置的模型，而无核原子模型是指，原子整体均带正电荷的模型。

有核原子模型被判为优胜的证据，是英国物理学家卢瑟福(Ernest Rutherford, 1871—1937)于1911—1913年所进行的 α 粒子(一种带正电荷的粒子)散射实验。卢瑟福将 α 粒子射入金的薄板及氮气中，观察 α 粒子受金及氮气原子的作用是如何被背散射的。卢瑟福正是借由这一实验对原子中正电荷的分布进行观察的。

实验的结果是，几乎所有的 α 粒子相对于入射方向都以 $2^\circ\sim3^\circ$ 的小角度被散射。但其中也观察到极少量的散射角超过 90° 的 α 粒子。 α 粒子之所以被散射，是由于带正电荷的粒子之间的库仑斥力所造成的。为产生超过 90° 的大角度散射(背散射)， α 粒子必须与原子所带的所有正电荷都极为靠近，这样才能受到如此大的库仑排斥力。若是无核原子模型， α 粒子只能与一部分正电荷靠近，不可能产生如此大的库仑排斥力。据此，卢瑟福指出，在原子中，存在质量占原子的大部分，且带正电荷的核(原子核)。至此，实验结果为长期的争论打上了休止符。正是卢瑟福所提出的原子核中，蕴藏着核能的秘密。

1.1.3 关于原子核——带正电的原子核为什么不分离

卢瑟福 α 粒子散射实验中发现的背散射现象以无可辩驳的事实证明了原子核的存在，又根据此后的研究确认，原子核是由更小的基本粒子集合而成的，称这种基本粒子为核子。但是，若认为这种核子仅是同一种具有特定质量和电荷量的基本粒子，就会出现问题。以碳(C)和铀(U)为例，若按质量对比，铀是碳的约20倍，但按电荷量比，铀仅为碳的约15倍。理论和实验都证明，核子中包括两种质量几乎相同的基本粒子，一种是带一个基本正电荷的质子，另一种是不带电荷的中子。据此，上述矛盾迎刃而解。原子核正是这两种核子相结合而成的。

在核子中由于质子带正电荷，质子与质子之间必然受到库仑排斥力的作用。可以想象，为了使多个质子作为一个核而结合在一起，必然有足以克服库仑斥力的很强的结合力起作用。这种力便是核力。核力是在大约 2.1×10^{-13} cm近距离范围内起作用的短程力，在质子与质子间、中子与中子间、质子与中子间同样作用。核力是借由介子而产生的力，关于介子请见1.3.3节。

若仅是质子间的核力，由于有库仑斥力的相反作用，不足以使原子核稳定存在。但是，若核中一定程度地存在中子，则核力变强，即使有库仑排斥力的作用，仍能使核子结合在一起。这便是带正电的原子核为什么不被库仑斥力所分离的原因。

1.1.4 原子核的大小——坐镇原子中心的原子核

一般教材和参考书中给出的原子结构模型如图所示：原子核位于原子的中心，核周围有多个电子在不同轨道上旋转。那么，原子核的尺寸大概是多少呢？

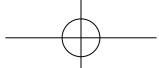
在讨论原子核的尺寸之前，先看看原子的大小。若取出一个原子，其大小(每种原子的大小不同)大约为1cm的亿分之一($1\text{Å}=10^{-10}\text{m}$)，1亿个原子排成一列，正好为1cm长。

若将原子的大小想像为一个棒球场的边长，则原子核的大小仅相当于一个比棒球更小，直径为1cm的小石子，由此可以想像原子中原子核所占的体积有多么小。若从原子与原子结合成分子的观点看，原子核的大小与原子核间距离的关系，犹如地面上的人看天空中飞行的客机。但是，如此小的原子核却占据了原子质量的绝大部分，而且还对电子轨道起控制作用。由于原子核坐镇原子中心，起到原子核心的作用，称其为原子核名副其实。

即使原子核如此之小，它却占据了原子几乎所有的质量。借由核反应使其质量发生变化，便可以向外发出与其质量亏损相当的巨大能量，这便是我们可以利用的核能。

本节重点

- (1) 是哪位科学家，用什么实验确定原子是有核的？
- (2) 带正电的原子核为什么不分离？
- (3) 原子和原子核的大小各为多少？



古典原子论和四元素论

古典原子论概要

德谟克里特 斯 伊壁鸠鲁
(两人提出的原子论与今天的原子论接近)

物质是由称作 ATOMS 的微粒子及其间的空虚空间所构成。

火 水 空气 土

物质是由火、水、空气、土这四种元素构成的。

四元素论与今天的原子论相差甚远，却长时间被人们深信不疑。

亚里士多德

道尔顿

物质是由通过化学方法不能细分的原子结合在一起而形成的。

《现在的原子论的基础》

原子无核还是有核

原子模型

电子
正电荷
(带正电荷的粒子)

无核原子模型
正电荷分散于原子的整体而存在 ("枣糕" 模型)。

有核原子模型
正电荷集中于原子的中心而存在。

卢瑟福的散射实验

正电荷
 α 粒子
金及氮的原子
(按无核原子的假说)

90° 以上的大角度散射
 α 粒子
金及氮的原子
(按有核原子的假说)

卢瑟福利用 α 粒子照射原子，观测到 90° 以上的大角度散射，从而由实验证明有核原子模型的正确性。

原子核中带正电的质子为什么能结合到一起？

质子和中子

质子
(带正电荷)

中子
(不带电荷)

※ 质子、中子统称为核子

库仑斥力
(同类电荷间的排斥力)

核力
(在核子间起作用的引力)

原子核

如果只有库仑斥力，原子核肯定四分五裂。正是核力使核子结合成原子核。

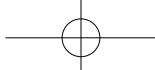
原子核的大小可比做棒球场中的一个棒球

原子核的大小

尽管常用图中所示的模型表示原子的结构，但原子核要比图中所示小得多

若原子整体的大小比做棒球场，则原子核的尺寸比棒球还小。

※ 原子核的大小大约为 1cm 的 1 万亿分之一



| 核能利用与核材料 |

1.2 卢瑟福散射实验

1.2.1 卢瑟福——实验证明原子核的存在

卢瑟福 (Ernest Rutherford, 1871—1937)，是一位出生于新西兰（当时属英国）的物理学家，由于其在核物理学方面的巨大贡献，被称为“核物理学之父”。

在卢瑟福的诸多贡献中，最有名的当数 1.1.2 节谈到的 α 粒子的背散射实验。但是，卢瑟福在进行此实验的 1911 年以前，就进行了关于放射性元素的研究，并于 1902 年与苏戴 (Frederick Soddy) 博士同时提出：辐射能是由于原子核衰变而产生的所谓“放射性元素的自发衰变理论”。同时，他还发现原子核衰变所产生 α 粒子 (α 射线) 就是氦 (He) 原子核。卢瑟福的研究成果受到高度评价，并获得 1908 年度的诺贝尔化学奖。

卢瑟福用自己发现的这种 α 粒子进行背散射实验，进一步确认了原子核的存在。而且在 1919 年，借由 α 粒子与氮原子发生碰撞，最早成功实现了原子核的人工变换，这是最早实现的人工核反应。

卢瑟福作为所长，受聘于英国卡文迪许研究所。在卢瑟福的精心组织下，研究所专门从事原子核的实验研究，并形成由世界各国研究人员组成的国际性的核物理学中心。由于卢瑟福的指导，从卡文迪什研究所产生了许多世界级的优秀研究工作者，并对 20 世纪初核物理学的飞跃发展做出了巨大贡献。

1.2.2 关于电子——带负电荷的粒子

电子与原子核一样，也是构成原子的要素之一，但电子在原子之外也能存在。尽管称位于原子中的电子为束缚电子，位于原子之外的电子为自由电子，以便加以区别，但二者却是同一种粒子。参与化学反应的是束缚电子，而阴极射线（真空管放电时所观察到的荧光线）中的是自由电子。后文将要详细说明的被称为 β 射线的放射线，实际上也是电子。电子的质量大约是质子及中子质量的 $1/1840$ ，与后二者相比，是相当轻的粒子；但电子所带电荷大小与质子相同，只是前者为负。

实际上，电子早在 1899 年借由显示阴极射线是电子流的实验而被发现。在此之前，尽管知道电荷中存在不能继续分割的最小单位，但通过电荷及质量测量，显示电子存在的是英国物理学家汤姆逊 (Joseph John Thomson, 1856—1940)，为此，他获得诺贝尔奖。顺便指出，电子这一名称作为负电荷的最小单元而广泛使用，是此后的事。

电子被发现 12 年后的 1911 年，美国物理学家密立根 (Robert Millikan, 1868—1953) 精确地计算出电子电荷的大小。密立根注意到，在水平放置的电极间移动的带电荷的油滴的速度，与其电荷的大小成正比，通过变更电荷的大小，反复进行速度测定，最终计算出电荷大小的单位，即电子电荷。

1.2.3 正电子——带正电荷的电子

所谓电子，如前节所述，通常是指带负电荷的基本粒子。但是，在电子中确有带正电荷的粒子存在，称其为正电子 (positron)。正电子与电子相比，所带电荷的极性相反，但电荷的绝对值相等，二者是具有相同质量的粒子。

英国物理学家狄拉克 (Paul Dirac, 1902—1984) 于 1928 年预言了正电子的存在，由美国物理学家安德森 (Carl David Anderson, 1905—1991) 于 1932 年从宇宙射线 (从宇宙射入地球的粒子) 中发现。正电子之所以不能轻易被看到，是由于正电子并不与其他粒子相结合构成原子及物质，而且正电子与负电子相结合，作为粒子就会湮灭 (电子对湮灭) 所致。

现在，不仅发现了发射正电子的物质，而且利用加速器 (下节详细说明) 也能产生正负电子对 (电子对产生)。这一反应，作为借由核裂变取出核能反应的逆反应，而受到关注。

除了核能领域，利用正电子湮灭技术还能很容易获得关于物质晶体结构中的缺陷以及物质表面构造等信息。这是由于物质内存在空位及缺陷时，正电子被这些位置所捕获而能比较稳定地存在。借由测定正电子的寿命就可以了解物质的缺陷结构 (缺陷类型、分布等)。如此说来，正电子在材料物性研究中也是很有用的。

1.2.4 加速器——产生高能粒子的有效手段

加速器，顾名思义是加速粒子的装置，利用电磁力给粒子以能量，并由此获得高能粒子。由于加速所利用的是电磁力，作为被加速粒子，必须是带电粒子，包括电子、质子、离子等。

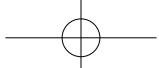
加速器按加速粒子的轨道形状可分为两类：使粒子按直线轨道加速的为线型 (串列) 加速器；使粒子按圆形轨道加速的为圆型 (回旋) 加速器。单独使用这些加速器并不能获得具有接近光速的高能量粒子。将这些加速器相结合，阶段性地获得高速粒子的加速器也是有的，不过这样的设备相当庞杂。

利用加速器可以得到高能粒子，通过使这种高能粒子与原子核相碰撞，就可以获得有关构成原子核的粒子的信息。因此，加速器在核物理学中起着极为重要的作用。当然，在其他领域，加速器也有各种不同的用途。

其中，生活中最常见的应用要数老式电视机的 CRT 管。在显示屏的 CRT 管中，被加速的电子 (束) 轰击显示屏背面的发光面，使其产生荧光。另外，加速器的其他用途还包括医疗机构所使用的放射性物质的制造、半导体的杂质掺杂、无损检测、物质的结构分析、医疗诊断 (治疗) 等，应用领域是相当宽的。作为最近的话题，使加速器与次临界反应堆相结合的加速器驱动次临界堆的研究也在进行之中。

本节重点

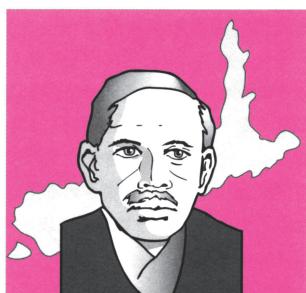
- (1) 简述卢瑟福在核物理学中的主要贡献。
- (2) 何谓正电子？正电子为什么难以轻易被看到？
- (3) 加速器有哪些类型？指出各自的原理和应用。



核物理学之父

卢瑟福

出生于新西兰的物理学家，在英国的卡文迪许实验室从事核物理学的研究。由于在研究放射性及 α 粒子等方面受到高度评价而获得诺贝尔奖。



卢瑟福的弟子和高徒

卢瑟福培养出以波尔和查德韦克为代表的众多著名核物理学家。由于卢瑟福的杰出贡献而被称为“核物理学之父”。



利用量子论阐明原子模型的物理学家。

发现中子的物理学家。

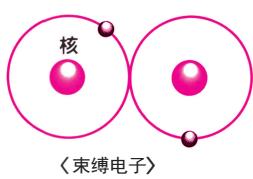
电子有束缚电子和自由电子之分

电子的属性



所谓电子，是在原子核周围旋转并带负电荷的粒子。其电荷大小与质子所带电荷相同，但质量仅为质子质量的 $1/1840$ ，是较轻的一种基本粒子。

束缚电子和自由电子



〈束缚电子〉



〈自由电子〉

绕原子核旋转的是束缚电子。参与化学反应的通常是最外层束缚电子。

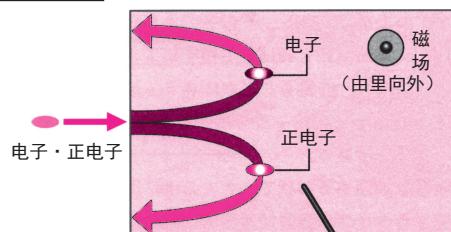


从原子核周围飞出的电子是自由电子。从荧光灯中便有电子从电极飞出，并在电路中流动。

2

带正电荷的电子——正电子

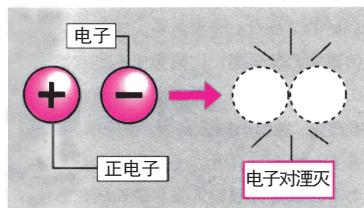
正电子



正电子具有与电子相同的质量，但二者的电荷符号正好相反，因此，在磁场中会以相反的方向运动。



电子对湮灭

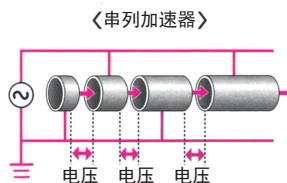


正电子一旦与电子结合便会消失，称此为电子对湮灭。这就是正电子不容易被发现的原因。

3

使带电粒子加速的加速器

串列加速器和回旋加速器



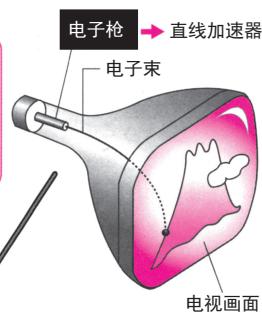
带电粒子在各个金属圆筒间所加电压的作用下，受电场力作用而不断被加速。



在磁场作用下做圆周运动的带电粒子，在加有电压的电极间多次通过而不断被加速。

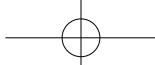
日常生活中的加速器

电子显像设备用布劳恩管中的电子枪就是一个直线(串列)加速器。被加速的电子在显示屏荧光面上扫描，将电视信号显示出电视画面。



4

5



| 核能利用与核材料 |

1.3 核子与核力

1.3.1 中子——不带电荷的粒子

1932年英国物理学家查德威克(J.Chadwick, 1891—1974),通过使氦(He)的原子核与铍(Be)的原子核碰撞,发现了与质子同时发射出来的中子。

构成原子核的粒子是质子和中子。由于质子带正电荷(与正电子所带相同的电荷),在电场力及磁场力的作用下,可以使其行进方向发生弯曲;而中子是不带电荷的“中性”粒子,即使在电场力及磁场力的作用下,也不会弯曲而保持直线方向。如同1.1.3节所讲到的,质子间的库仑斥力有使原子核分崩离析的趋势,但中子强化核力,具有平衡库仑力使原子核稳定的作用。

中子与带电荷的粒子相比,更容易进入到带正电的原子核中,因此,具有与原子核发生反应的性质。中子与原子核反应的结果,有可能使被中子碰撞的原子核发生分裂(核裂变),此时,原子核中的中子会有几个飞出。通过有效地利用这种中子,就有可能使核裂变连续地发生。这种连续发生的核裂变现象称为链式核裂变反应。在反应堆内,通过控制中子数量,就可以维持链式核裂变反应持续进行。另外,中子还能用于无损检测(称为中子射线照相术),与X射线照相相比,前者可以获得更鲜明的图像。

顺便指出,由于中子不带电荷,因此对中子本身的检测较难。一般是利用中子与原子核发生反应时所发生的荷电粒子,进行中子检测。

1.3.2 原子序数和质量数——对元素加以区别的原子序数

在元素中,有氧(O)、氢(H)、铁(Fe)、铝(Al)、铀(U)等100余种,每种元素冠以序号加以区别。例如,8号为氧,92号为铀等。这种序号称为原子序数,原子序数并非随意规定,而是遵守严格规则。原子序数与原子核中所含的质子数相同。换句话说,如果原子核中质子数目发生变化,元素的名称也要变化。氧的原子核中有8个质子,如果变成7个则变成氮,变成6则为碳。

原子核中不仅有质子,还含有中子。以氧为例,原子核中存在的中子的数目有8个、9个、10个三种情况,无论哪种都是氧,在特性上只有细微差别。因此,为了对这些加以区别,引入了“质量数”这一数值。所谓质量数,是构成原子核的质子数和中子数之和。这样,氧就有质量数分别是16、17、18的三种。本书中,将“质量数235的铀”记作“铀235”(U-235)。到19世纪中期前后,许多元素被发现。俄罗斯化学家门捷列夫[Дмитрий Иванович Менделеев(Dmitrij Ivanovich Mendelejev),1834—1907]在对这些元素按原子序数排列时,注意到被称为周期性的性质在元素中表现出来,并将所有元素排列在一个体系的表中,称其为元素周期表,最早的周期表于1869年发表。在该表中,尽管还存在几个空白位置——为性质特定,但仍未被发现的元素所预留,但这些元素此后均陆续按预言被发现。

1.3.3 介子——汤川秀树预言的粒子

介子这一名称的由来是其质量介于核子质量与电子质量之间。介子的质量大致为质子及中子质量的1/10,为电子质量的200倍左右。

但是,如1.1.3节所述,原子核是由质子和中子构成的。读者自然会问,为什么在原子核这么小的“块体”中,质子和中子会稳定地在一起存在呢?由原子核稳定存在的事实可以想象,在质子和中子之间,肯定有某种比质子间作用的电场排斥力(库仑力)更大的相互吸引力的作用。

因此,汤川秀树(H.Yukawa, 1907—1981)认为,原子核中的质子和中子还具有内部结构,可能受到具有一定质量的粒子的“取离”作用,从而相互间有很大的吸引力(核力)作用,并在1935年预言,存在这种被称为“ π 介子”的粒子。此后, π 介子于1947年从宇宙射线中被发现,由此证明汤川秀树预言的正确性。由于汤川秀树在核物理领域的巨大贡献,他获得了1949年的诺贝尔物理学奖。

由于介子产生的力,作用范围极短,仅在原子核大小的范围内起作用。这与电磁力等长程作用力形成鲜明对比。

现在,人们已知道介子有多种不同的种类,除了汤川秀树预言的 π 介子之外,还发现了 η 介子、 ω 介子等。

1.3.4 幻数(魔法数)——中子数和质子数的微妙平衡

原子核是由若干个质子和中子构成的,但在构成原子核的质子或者中子的数目,特别是在2、8、14、20、28、50、82、126的情况下,对应的原子核呈现出相对的稳定性。这些数被称为幻数(魔法数)。核子存在幻数的具体物质实例有:质子数、中子数均为2的氦(He),二者数目均为8的氧(O),二者数目均为20的钙(Ca)等。

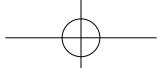
所谓幻数(魔法数)是指“致使原子核处于稳定的质子数或中子数”。经比较发现,大部分由相同的质子数与中子数构成的原子核,在各个原子序数段都是稳定的。也就是说,上面举出的氦、氧、钙都具有稳定的原子核。

原子核是不是稳定的,可根据从原子核中分离其构成要素(称为核子)所需要的能量(称为核子的结合能)的大小来判断。该结合能越大,构成的原子核越稳定。能说明幻数的原子核的模型是有的,但其内容需要高深的物理学知识,有兴趣的读者请查阅有关参考书。

顺便指出,16这一幻数于2000年初被发现,这一幻数仅存在于中子数比质子数多很多的原子核中,它是基于原子核裂变前所经历的时间极长(原子核是稳定的)这一事实而发现的。

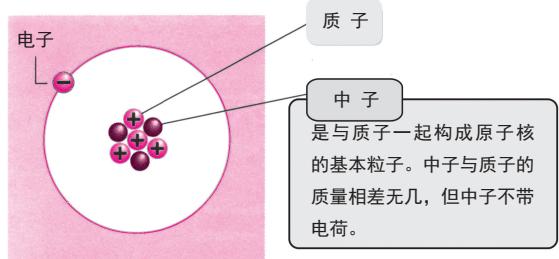
本节重点

- (1) 指出原子序数、质量数、相对原子质量的意义。
- (2) 何谓介子,介子起什么作用?
- (3) 举例说明幻数(魔法数)所代表的意义。



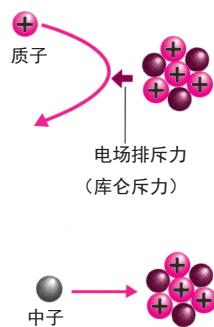
不带电荷的粒子

中子的特征



容易与原子核发生反应的中子

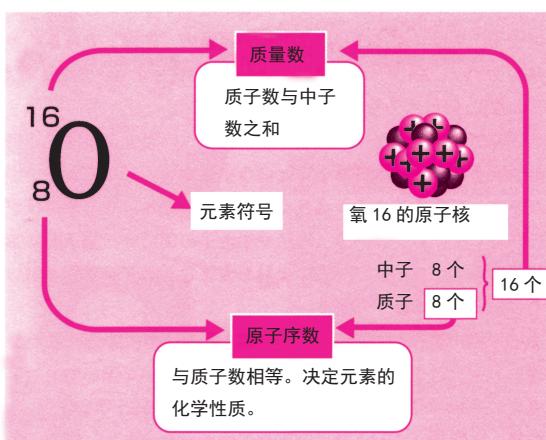
由于质子受到原子核电场排斥力的作用，因此难以引发核反应；而中子不受库仑排斥力的作用，因此容易引发核反应。



1

原子的标记

质子数与中子数之和

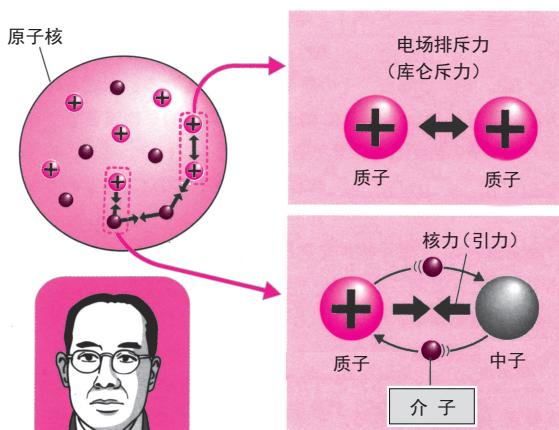


若写作 O(氧)，其质子数为 8 是确定的，图中所示原子表示质量数为 16 的氧，通常标记为氧 16 (O-16)。

2

使核子彼此相互结合的介子

介子使核力发生作用



汤川秀树

借由称作介子的粒子在质子和中子、中子和中子间起作用，产生称之为核力的引力，使核子相互结合成核。



3

取幻数(魔法数)的核

稳定的核



基于核结构上的理由，质子数或中子数取 2、8、20 的核是稳定的。称这种数为幻数——“魔法数”。此外，16、28、82、126 也都是幻数。

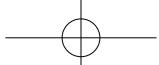
幻数核素种类很多

例如 幻数 [20]

核子数	原子核
中子 19	-
质子 19	钾 40、41
中子 20	硫 36、氯 37、氩 38、钾 39
质子 20	钙 40、42、43、44、46、48
中子 21	-
质子 21	钪 45

由于中子数或质子数取 20 的核是稳定的，因此这种核素种类也多；与中子数或质子数取 19（只有两种元素）或 21（只有一种元素）的核相比，取 20 的核共有 10 种核素存在。

4



| 核能利用与核材料 |

1.4 核反应与化学反应

1.4.1 核反应——使核发生变化的反应

由本节开始，我们将讨论产生核能的核反应。所谓核反应，严格地讲是“原子核反应”，是由原子核引起的反应的总称。最容易理解的实例，是中子碰撞铀 235 (U-235) 的原子核，使原子核裂变而产生巨大能量的反应，人们通过对这种反应的控制，可用于发电等。顺便指出，化学反应是电子发生转移(取舍)的反应，其中原子核毫发未动，而核反应中原子核发生变化。

核反应不仅可由中子，也可用质子及其他原子核碰撞引起。但是，由于原子核带正电荷，当质子等带正电荷的粒子与之靠近时，由于库仑排斥力的作用，会被弹出。因此，需要将带电粒子加速到足够高的能量，以高速粒子的形式，才能发生与原子核的碰撞。加速带电粒子的装置请见关于加速器的 1.3.1 节。

核反应的另一个特征是，一般在反应后会有放射线放出。由于核反应中原子核的构成发生变化，与其相伴，所释放能量的一部分以光(称之为 γ 射线的高能量的光)的形式放出，若照射到人体等，会发生辐射效应。这与核能利用的最大课题——放射性废物问题紧密相连。

核反应除了借由外部打入粒子而引发之外，还可由原子核自发引起。对此，请参阅关于半衰期的 1.6.2 节。

1.4.2 核裂变的发现——铀 235 核裂变为两块

最早发现核裂变的是德国化学家哈恩 (Otto Hahn, 1879—1978) 和斯特拉斯曼 (Fritz Strassmann, 1902—1980)。1938 年，当二人用中子照射天然铀 (U) 时，发现产生了质量数为铀质量数一半左右的人造同位素 (1.5.4 节) 钡 (Ba) 和镧 (La)。这些元素当然是铀核一分为二产生的，由此结果发现了核裂变现象。

核裂变分为两种，一种是钚 (Pu)、锔 (Cm) 这类核自然产生的核裂变，称其为自发核裂变。由于使用后的乏燃料会发生这种自发核裂变，对其产生的中子等必须加以防护。另一种是中子诱发核裂变。中子与核反应形成复合核，进而分裂为两个裂变碎片。两个裂变碎片并非对称产生，一个是质量数为 130~150 的核，另一个是质量数为 80~100 的核。这些核裂变碎片以及此后由 β 衰变 (1.5.3 节) 产生的核素，统称为核裂变产物。

核裂变发现之后，为了利用裂变能，在芝加哥大学创建了世界上第一个核反应堆，并于 1942 年达到临界状态(链式核裂变反应可维持的状态)。

核裂变是一把双刃剑，既可用于核能的和平利用，造福于人类；又可以用于核武器，威胁人类的和平生存。

1.4.3 原子核的结合能——为什么核子能紧密相处

所谓原子核的结合能是指，将构成核的中子和质子，即核子，取至核外并成为分离状态所需要的能量。换句话说，是使分离状态的核子结合而形成原子核时所放出的能量。

若将这种结合能平均到每一个核子，称为平均结合能。像锂 (Li) 这种质量轻的核(轻核) 平均结合能小，质量数为 60 左右的铁 (Fe) 等的核，平均结合能大，而铀 (U) 等质量重的核(重核) 与铁等相比要小些。

轻核的表面积与体积之比(称为比表面积) 大，表面附近的核子没有核力作用的对手，由于这种核子所占的比率大，因此平均结合能要小。另一方面，在重核中由于带正电荷的质子数多，质子间相互作用的电场排斥力(库仑斥力) 变大，从而平均结合能也小。

所谓平均结合能大的核，就是放出大量能量而成为稳定的核。相反，所谓平均结合能小的核，就是只能放出较小能量而成为稳定的核。若借由核反应由平均结合能小的核变为平均结合能大的核，就会有这种结合能之差的能量放出，如此便放出核能。

如上所述，质量数为 60 左右的核平均结合能最大。因此，为了使核能放出，有两种方法，一种是使轻核之间发生核反应，生成更重核的方法；二是使重核裂变，分裂成中重核的方法。前者是太阳中正发生的核聚变，后者是裂变反应堆中发生的核裂变。

1.4.4 质量亏损和能量——狭义相对论

核反应中发生的大能量是从何而来的呢？

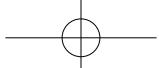
导出这一问题答案的是德国理论物理学家爱因斯坦 (Albert Einstein, 1879—1955) 的狭义相对论。在狭义相对论中，物质在接近光速 ($c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$) 运动的情况下，该物质的质量随着运动速度的增加而增加。这种质量的增加部分与被增加的能量成比例。也就是说，能量变为质量。在核能领域，所利用的是该关系的逆关系，即质量变化转变为能量。

构成原子核的核子(中子和质子) 的质量，与分散状态下的中子和质子质量的相加值相比要小，称这一质量差为质量亏损。根据狭义相对论，质量亏损越大，使核子成为分散状态所需要的能量(平均结合能) 越大，分散之前的核越稳定。

铬 (Cr)、铁 (Fe) 等原子核的平均结合能大，假如发生核裂变，则核的质量亏损大，故这类核是稳定的。在地球的中心，铬、铁这类元素的存在比率大。这是由于重核通过核反应而放出能量，变成铬、铁等所致。最终由这些物质形成的星体，由于没有能量而可以看作是“死星”。另一方面，轻核以及像铀这样的重核核子平均结合能小，质量相对重的被看作是不稳定的核。正是由这些不稳定的核，借由核反应来取出核能。

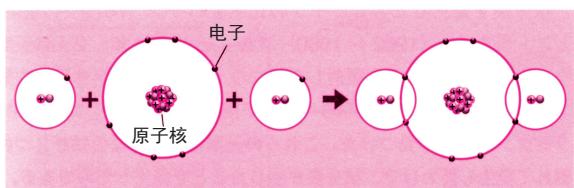
本节重点

- (1) 简述核反应与化学反应的区别。
- (2) 何谓原子核的结合能？从原子核平均结合能的观点解释裂变反应和聚变反应。
- (3) 何谓质量亏损，质量亏损与能量有什么关系？



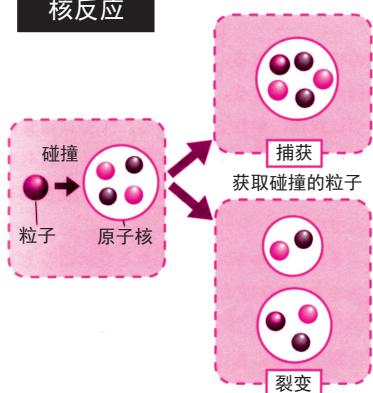
核反应不同于化学反应

化学反应



化学反应如上所示，仅是借由电子的得失而发生的反应。在化学反应中，原子核完全不发生变化。

核反应



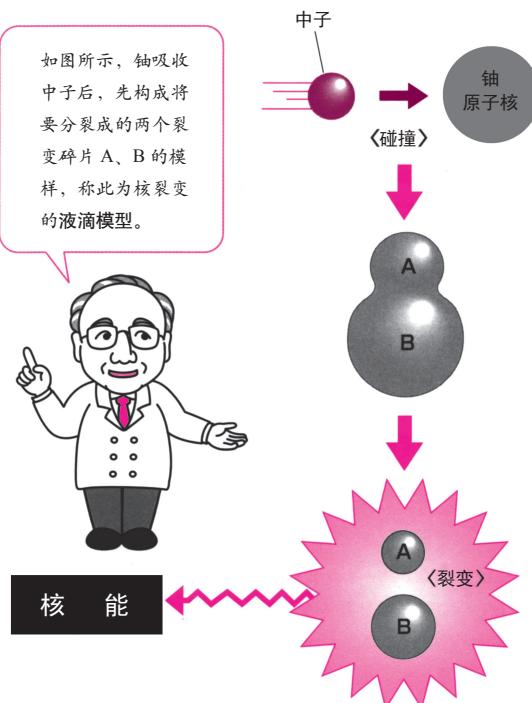
核反应是靠各种类型的粒子与原子核碰撞，原子核自身发生变化的反应，与化学反应的原理全然不同。

借由粒子碰撞，核一分为二

核裂变的液滴模型

铀的核裂变

如图所示，铀吸收中子后，先构成将要分裂成的两个裂变碎片A、B的模样，称此为核裂变的液滴模型。

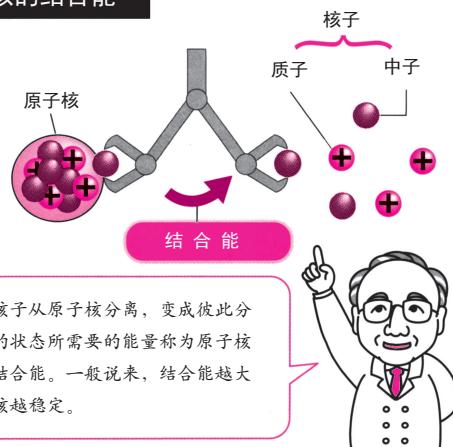


核能

2

使核子彼此分开所需要的能量为结合能

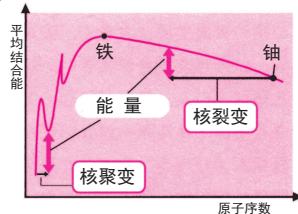
原子核的结合能



将核子从原子核分离，变成彼此分离的状态所需要的能量称为原子核的结合能。一般说来，结合能越大的核越稳定。

核聚变与核裂变

借由核反应，平均结合能小的核变成平均结合能大的核，与此同时释放出二者的结合能之差。



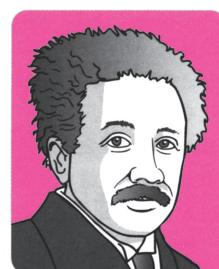
3

亏损的质量变为能量

爱因斯坦的“质能方程”

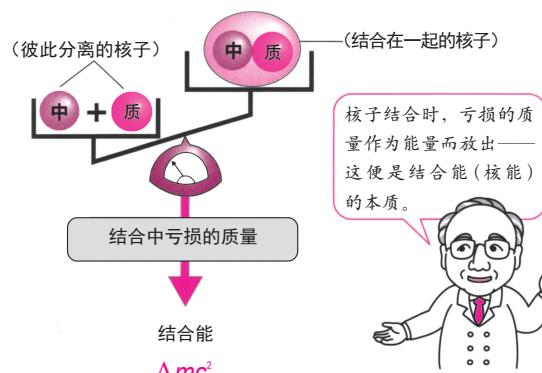
爱因斯坦根据“狭义相对论”——作为所有运动基准的绝对空间是不存在的（物体的运动是相对的，光速不因光源的运动而改变等），导出了著名的能量与质量等价的定律，即“质能方程” $E=mc^2$ 。

* E：能量、m：质量、c：光速度



爱因斯坦

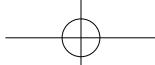
结合能的本质



核子结合时，亏损的质量作为能量而放出——这便是结合能（核能）的本质。



4



| 核能利用与核材料 |

1.5 质量亏损与核能

1.5.1 核裂变能量——高能量的发生

铀(U)、钚(Pu)这种重核一旦发生核裂变，便会分裂为两个核裂变碎片，在此核裂变过程中同时放出2~3个中子。铀、钚中质量数为奇数的核素，如U-235、Pu-239、Pu-241与质量数为偶数的核素，如U-238、Pu-240、Pu-242相比，前者容易发生中子诱发核裂变，这些核一旦受到速度慢的中子(称为热中子)的照射，便会产生核裂变。因此，称这些为易裂变物质。而另一方面，具有偶数质量数的核，即使受热中子照射也不能获得核裂变所必要的能量，因此不会引起核裂变。但是，若受到速度高的快中子照射，由于获得中子的动能，故也会引起核裂变。这样的反应需要中子的动能超过一定值才能发生，例如U-238的情况是1MeV，称这种反应为阈值反应(1.6.1节)。而且，U-238是通过吸收中子变换为Pu-239，后者是易裂变物质，故称前者的“可转化材料”。

无论是热中子还是快中子，只要引发铀、钚发生核裂变，平均每个原子便可发出约200MeV的能量。这200MeV的能量从何而来呢？其根源在于核裂变碎片与原来铀之间的质量亏损，后者以能量的形式释放出。这种能量被称为核裂变能。

1.5.2 化学能与核能——二者来源不同且数值差异极大

氢气(H₂)与氧气(O₂)发生化学反应生成水(H₂O)时所产生的化学能，与铀(U)发生核裂变时产生的核能有什么差别呢？下面对二者进行比较。

所谓化学反应，实质是围绕原子核周围的电子的放出与接收，引起两类原子的结合或分离，而原子核与该反应无关。例如，铁(Fe)在空气中放置会生锈，这是由于铁易失去电子，而在空气中的氧夺取电子，其结果，带正电的铁分子(正确地讲是离子)与得到电子而带负电的氧分子相结合而产生锈蚀。

化学能为什么会发生呢？反应后化合物的内能与反应前物质的内能存在差异，在此差值为负的情况下，反应会放热，而为正的情况下会吸热。由于向外放出的能量与系统内能之和是一定的，因此，内能变化必然伴随着放热和吸热反应。1个分子的氢与氧发生化合生成水的反应中，会放出 2.01×10^{-19} J的热量，相当于1.26eV能量的发热。

与化学能相比，核能是由核反应而放出的能量。一个核裂变过程所放出的能量大约为200MeV，粗略地讲，是化学反应放出能量的1亿倍。因此，1g铀若全部发生核裂变，其放出的能量与燃烧3000t煤炭所放出的能量相当。

1.5.3 核裂变产物是如何产生的——高放射性水平的核废物

核裂变一旦发生，铀(U)、钚(Pu)这样的重核便会分裂成两个非对称性的核碎片，但并非分裂为特定的核，而是产生若干种类的碎片。作为一般倾向，核裂变碎片以质量数80~100、135~150的核居多，表现为图中所示的双驼峰型的对称关系。

但是，这类核是不稳定的核，这是由于核中的中子数比质子数较多过剩所致。

为了从不稳定的核变为稳定的核，减少过剩的中子即可。为此，中子或者在核内分解为质子和电子，或者从核内向外飞出均可。前者由于放出电子(β 射线)，称其为 β 衰变，后者放出的中子称为缓发中子，不论是 β 射线还是缓发中子，都属于放射线。

由于核发生一次 β 衰变会增加一个质子，故原子序数要加一。例如，一旦产生作为核裂变碎片的原子序数为44的钌105(Ru-105)，经过1次、2次 β 衰变，会分别产生原子序数为45的铑(Rh)和46的钯(Pd)。

再如，一旦产生作为核裂变碎片的原子序数为53的碘135(I-135)，经过1次、2次 β 衰变会分别产生原子序数为54的氙(Xe)和55的铯(Cs)。

如此，经过 β 衰变会产生多种核素，统称其为核裂变产物。使用后的乏燃料中所含的核裂变产物是高放射水平的废物，如何对其进行有效处理，是核能产业的重要课题。

1.5.4 同位素——化学性质相同但质量数不同

一旦发生核反应，就会大量产生人造同位素。

化学反应是借由电子的授受引起，而这种电子的数目决定着元素的化学性质。电子的数目与质子数相等，因此，若构成原子核的质子数(原子序数)相同，则即使中子数不同，化学性质也是相似的。如此，仅中子数不同但在周期表中居同一位置的元素称为同位素。同位素是原子序数相同而质量数不同的核素。顺便指出，同一元素在不同条件下形成的不同晶体结构称为同素异构体，而其间的相互转变称为同素异构转变或多形性转变。读者要学会区分同位素和同素异构体两个概念之间的区别。

自然界中的绝大多数元素都是以多个同位素混合存在的方式出现。例如，原子序数26的铁(Fe)就是质量数为54~58的四种同位素的混合物。相反，也有以一种同位素存在的元素，例如金(Au，原子序数79，质量数197)，铝(Al，原子序数13，质量数27)等。这些都是自然界存在的，但在反应堆中利用核裂变，还能产生锶90(Sr-90)及铯137(Cs-137)这样的人造同位素。这样产生的人造同位素的大部分都具有放射性，从而加大了使用后乏燃料的处理难度。

但是，人造同位素也可有效利用。例如，将钴(Co)在反应堆中照射，其原子核吸收一个中子可形成Co-60。它作为发射强 γ 射线的放射性物质，已用于癌症治疗等。而且，由于同位素的化学性质相似，生物体难以区别地加以吸收。这样，通过混入少量的放射性同位素，借由捕捉(探测)其发射的放射线，就可以对生物体内这种物质的蓄积状态进行观察，称这种方法为同位素示踪法。

本节重点

- (1) 用爱因斯坦质能方程解释，每次核裂变会产生约200MeV的能量。
- (2) 核裂变碎片按原子序数是如何分布的？
- (3) 何谓同位素、同素异构体和多形性转变？