

核科学百年讲座

第二讲 历史性发现及其对人类社会的影响(II)*

刘 军 许甫荣[†] 郑春开

(北京大学物理学院技术物理系 北京 100871)

沈文庆

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

4 核反应、核裂变和核聚变

放射性衰变是某些不稳定原子核自发产生的一种核蜕变反应,它只和发生蜕变的那个核本身的性质有关,而不需要外界的影响。那么,有没有办法通过外界影响使本身稳定的原子核产生变化呢?自从卢瑟福和合作者在 1909—1910 年通过用 α 粒子做“炮弹”轰击原子,并由散射 α 粒子的角分布推论出原子的核式结构以来,人们就认识到,要探索微观世界的奥秘,就必须利用能深入到微观粒子内部的“炮弹粒子”,使两个微观粒子相撞,发生变化,然后从发生的变化推断它们的行为和内部结构^[1]。由于原子核很小,其半径只有 10^{-14} m 量级,而且带正电荷,这就要求作为核反应的“炮弹粒子”(如 α 粒子)具有相当大的动能,才能克服库仑排斥力而进入核内,引起核反应。

4.1 第一个人工核反应和第一次合成放射性核素

直到 1919 年,人们才第一次实现人工方法的核反应。那年,卢瑟福在用 α 粒子轰击氮气的时候,发现在荧光屏上得到的闪光与轰击氢气时荧光屏上的闪光相同。在轰击氢气时, α 粒子使氢原子向前飞行,打到荧光屏上去^[1]。现在轰击的是氮,而得到的是质子的闪光,这使卢瑟福推论:它一定是从氮核里打出了质子^[1]。后来证明果然如此,其反应为



这是有史以来第一次通过人类有意识的实验行为改变了原子核,也是物理学家实现的第一个核反应。

核素有稳定性核素和放射性核素,放射性核素会自发地放出射线。1931 年前后,居里夫人的女儿伊伦·居里和女婿弗里德里克·约里奥利用云室,

对某些物质在 α 粒子的轰击下发射正电子的情况进行研究。1934 年,他们用 α 粒子照射铝箔,然后将 α 放射源拿走,结果发现铝箔样品仍然发射正电子。这说明被照射的样品中生成了放射性核素^[2]。这就是 20 世纪中最重要的发现之一——人工放射性。人工放射性的发现意义重大,为未来放射性研究与应用开辟了广阔的前景^[3]。

4.2 中子核反应和裂变的发现

中子被发现之后,费米(Fermi E)想到,用中子作为入射粒子应该比 α 粒子更有效。中子是不带电的核子,不会受到带正电荷原子核的库仑排斥,所以它比 α 粒子更容易接近原子核。利用中子穿透性强这个特点,费米开始进行用中子作为入射粒子的核反应研究。他按照周期表的顺序依次轰击各种元素,以检测中子作为入射源的有效性^[2]。1934 年,费米等人开始用中子轰击铀的实验,结果发现反应产物中存在一种新的放射性物质。这种物质的半衰期是 13min,经测量分析其化学性质,发现它不属于从铅到铀之间的那些重元素,也就是说,它们不是铀衰变的产物^[2]。但是,费米没有能够检测出它是哪种元素。1937 年,伊伦·居里用中子照射铀,发现了一种半衰期为 3.5h 的放射性产物(后来知道是放射性核素镭)。由于放射性核素半衰期是由核素本身性质决定的,所以费米和伊伦·居里得到的是不同产物。这一结果让科学家们吃惊。一般的核反应,产物都应该是固定的,但是费米和居里居然得到了不同的产物。1938 年,对此极表怀疑的德国物理学家哈恩(Hahn O)在柏林重复伊伦·居里的实验,发现:当中子轰击铀核时得到了一种半衰期为 4.0h 的放

* 国家自然科学基金(批准号 10075070)资助项目

2002-11-19 收到初稿 2003-01-14 修回

[†] 通讯联系人, E-mail: frxu@pku.edu.cn

射性产物,而且确认是钡.同时他的实验进一步证实,也存在伊伦·居里得到的镭.这无可辩驳地肯定了中子轰击铀核能得到不同的中间产物,但哈恩无法理解其中的原因.1939年1月,哈恩在德国《自然科学》杂志上发表他的实验结果之前,把研究结果写信告诉他原来的合作者,前一年离开德国流亡到瑞典国家物理研究所工作的奥地利女物理学家迈特纳(Meitner L)(犹太人).迈特纳约她的侄子,1934年流亡到丹麦玻尔研究所的弗里施(Frishi O)圣诞节来瑞典相会.迈特纳就和他讨论这一最新的实验结果.他们认为这是原子核分裂了,而且根据爱因斯坦的质能关系式,原子核分裂后还应该释放能量.几天后,弗里施急忙返回哥本哈根,把哈恩的最新发现及自己和迈特纳的看法告诉了即将动身去美国开会的玻尔,接着弗里施就在丹麦玻尔研究所重复哈恩的实验,并测定了原子核分裂释放的能量,从此证实了原子核分裂的新现象.1939年1月,弗里施和迈特纳在英国的《自然》(Nature)杂志上发表了铀核分裂成两半现象的论文,并仿照生物学中的细胞分裂现象,将所发现的新现象称为原子核“裂变”.这一发现开辟了人类利用原子能的时代^[2].

那么,为什么铀核会发生裂变?以一个中子与铀核反应为例,铀核结合一个中子之后就变成了一个所谓的复合核,复合核内有过剩的内能,使核处于激发态,是不稳定的,这部分激发能有可能通过 γ 射线释放出来,也有可能使得复合核的形状发生变化,变成椭球形甚至哑铃形.原子核带正电,哑铃状时的库仑排斥力大于吸引力,使得哑铃状继续畸变而最后分为两个碎片,同时还放出2—3个中子.哑铃状不一定是两头对称的(一般都是不对称的),形状可以各式各样,一次分裂后的两个碎片有各种各样的组合,其质量数在75—160之间,有80余种可能性.所以,前面的科学家得到了核裂变后不同的放射性产物是很正常的.自然界中并不是所有的放射性同位素都会在中子的轰击下发生裂变,只有少数几种,如:铀-233(^{233}U),铀-235(^{235}U),钚-239(^{239}Pu)等.

一个 ^{235}U 核裂变后约有200MeV的能量放出,裂变能量主要表现为裂变碎片的动能,占释放能量的80%左右.通过裂变碎片与物质碰撞,这些动能很容易转化为热能,可以用来发电.每公斤铀-235裂变所释放的能量相当于燃烧2700吨的优质煤释放的能量^[2],可见它是极有威力的能源.铀-235(^{235}U)核裂变原理如图1所示.

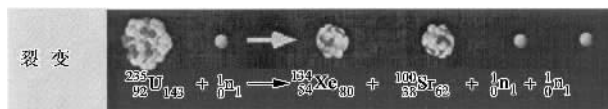


图1 铀-235(^{235}U)核裂变示意图

4.3 链式反应和核能

裂变的发现无疑是让人兴奋的,但是少量铀裂变放出的能量是很有限的,要使核裂变的能量得到实际应用,就必须维持大量裂变核的持续裂变.匈牙利物理学家西拉德(Sczilard L)最早考虑到实现链式反应的可能性^[1].他首先从理论上进行探讨,如果一个中子引起原子核裂变的同时,又产生一个或几个中子,这样可以使核裂变继续维持下去,就像一根链条一样一环一环地持续下去.西拉德的理论设想,就是当时关于“链式反应”的雏型.1939年约里奥-居里夫妇等人实验发现铀核裂变产生中子,探测到一个铀核(^{235}U)裂变会释放出2—3个中子.当然,实际上这2—3个中子由于某些原因会有部分丢失,如泄漏出铀块,或者是被非裂变材料吸收,或者虽被铀核吸收但是没有引起裂变反应.安全利用裂变能要求裂变反应的自持进行和可控制性.这个目标的实现,是以世界上第一座原子核反应堆建成和正常投入运转为标志.1941年12月到1942年12月,费米领导一批物理学家在芝加哥大学斯塔格(Stagg)运动场的西看台下,成功地建造了世界上第一座原子核反应堆.这个反应堆是由石墨层和铀层相间堆砌而成的,高约6.5m,宽9m,长10m.虽然这座反应堆的功率只有200W,但它解决了受控自持链式反应的众多技术问题,标志着核能释放成为现实.

随着理论和技术的成熟,核能(主要是裂变能)得到了极其广泛的应用.1954年,世界第一座核电站投入运行^[2].现在,人类对能源的需求正以惊人的速度增长,常规能源靠大量燃烧化石燃料(如煤、石油),它们数量有限,即将被耗尽,同时化石燃料的大量使用,给生态环境及自然气候带来不良影响,严重地威胁到人类的生存.相比之下,现在探明的铀储量按照目前的技术水平,可以使用几十到几百年,如果采用新的技术,使得燃料转化、再生,则可以再利用2000多年^[2],从而为人类的生存和发展提供了长期稳定的能源.核电是一种清洁的新能源,它不存在化石燃料燃烧引起的对环境的严重污染,所以对改善环境和改善人类的生存条件发挥着重要作用.

4.4 核聚变反应

核能不仅可以由较重的核通过裂变反应产生,也可以通过另外一个途径:两个较轻的核相撞,形成一个较重的核,释放能量,即聚变反应来获得。氘核(${}^2\text{H}$)可以与氚、氘(${}^3\text{H}$)、氦-3(${}^3\text{He}$)发生聚变反应,按照平均每个核子反应释放能量计算,比铀-235裂变反应中每一个核子平均释放能量要高出4倍左右。所以,聚变能比裂变能更具威力。太阳每天就是依靠氢核与氢核的聚变反应来释放能量的。另外,聚变利用的主要原料氘在海水中大量存在,海水中的氘含量约有35万吨,按照目前世界消耗的能量来计算,海水中的聚变能可以用上几百亿年^[2],可以说核聚变能是一种取之不尽、用之不竭的清洁能源。同时,核聚变的产物仍然是一些常见的轻核元素,对环境没有任何的负面影响,因此聚变能是最为理想的一种能源。

正是聚变能有如此诱人的优点,科学家们长期以来一直在积极地探索,希望它能对人类所利用。与裂变能的实际转化需要实现自持的链式反应类似,要使聚变能够作为能源输出,也要能实现自持的聚变反应。研究表明,这必须满足高温和高密度两个“点火”条件^[2],即:一是要提供氘核足够高的温度(1亿度量级),使得氘核能够克服核与核之间的库仑排斥力,具有足够高的动能相互碰撞,发生反应,在这样的温度下,氘气体已经完全电离成为等离子体状态;二是要使高温的等离子体紧密地聚集在一起,达到足够高的密度,维持足够的时间,实现自持的核聚变反应,获得能量的增益。经过几十年来的努力,科学家们在磁约束核聚变和惯性约束核聚变两条途径上取得了很大的进步。其代表性的工作是激光核聚变和托卡马克(环流器)装置^[2],特别是在托卡马克装置上进行核聚变研究方面,取得了让人鼓舞的进展。1991年欧共体的欧洲联合环(JET)第一次实现了氘-氘聚变反应^[2],1997年它又创造了核聚变输出功率为12.9MW的新纪录,随后提高到16.1MW,越来越接近点火条件^[2]。尽管聚变能的利用还在不断地探索之中,还会遇到很多的技术困难,但聚变能的和平利用终将会到来,它将作为最理想的能源造福人类,解决人类自古以来存在的能源问题。氘和氚核聚变原理如图2所示。

5 加速器的出现和发展

在核科学早期,物理学家只能利用天然放射性元素所放射的 α 粒子,或者宇宙中的高能粒子来轰

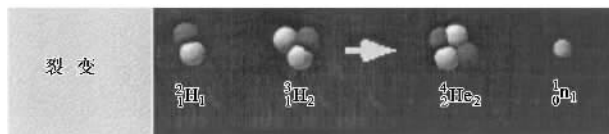


图2 氘和氚核聚变示意图

击原子,研究核反应。但是宇宙射线的强度太弱,而天然放射性元素产生的 α 粒子能量有限,这些限制了核反应的产生。20世纪30年代初,物理学家提出了加速器的设想,利用电磁场加速带电粒子,形成高强度高能量的射线束流。

1928年,英国物理学家考克饶夫(Cockroft J D)和沃耳顿(Walton E T S)建造了巨大的高压倍加器^[1]。1932年他们使用这个加速器加速质子,第一次成功地利用高能质子轰击锂原子核,使它分裂为两个氦原子核。1929年美国物理学家劳伦斯(Lawrence E O)提出了磁共振加速器即回旋加速器的构造原理,这种装置巧妙地利用了带电粒子在磁场中偏转,在电场中加速的性质,使得带电粒子可以多次加速。1931年劳伦斯建成了一个小型的样机,证明了这个原理的可行性^[1]。这是世界上第一台环形加速装置。1932年,劳伦斯及其合作者建成了一台震动当时科学界的巨型加速器。他们用这一装置把质子加速到1MeV的能量,使之成为轰击原子核的有力炮弹,引起了许多新的核反应^[1]。这个实验的结果之一就是得到了一系列强度比镭还强的人工放射性同位素。1939年,劳伦斯和合作者完成了一台重225吨的新回旋加速器,能量达到了20MeV,超过了天然放射源的能量水平^[1]。人类征服自然的能力再一次得到了体现。

自加速器诞生起,人们就注意到它在工业、医学的应用前景。回旋加速器的发明人劳伦斯,一开始就倡议把它应用于医学,并且安排了第一个用快中子流治疗深部恶性肿瘤的实验^[1]。20世纪50年代初,低能加速器从基础研究转向经济领域,成为开发新技术的有力手段。例如,利用加速的电子束进行辐射加工工艺。60年代加速器开始用于半导体的离子注入。加速器被公认为是生物医学、材料科学、固体物理学、生命科学以及环境科学等研究领域的有力工具。今天,加速器技术正在不断发展,种类已经超过20余种,加速器所能达到的最高能量以指数律增加。现在,高能加速器或对撞机已经发展成为高度精密大型科学工程。为了某些应用,如生产某些同位素而建造的加速器已经发展成为高效率的工业生产装

置. 为了应用而建造的大型同步回旋加速器装置, 也越来越受到人们的重视.

6 核科学的今天及未来

经过百余年的发展, 今天的核科学研究已经进入到一个更高阶段, 人们正用更先进的现代设施进行物质更深层次的研究和探索. 例如, 近几年人们建立了放射性核束装置, 合成和研究不稳定核. 在放射性核束装置中, 稳定核或长寿命核束流经加速器加速后轰击靶核, 并与靶核发生核反应而产生不稳定原子核, 形成次级核束流. 这些不稳定核有较大或较小的中子质子数比, 通常称作远离 β 稳定线核. 他们往往在较短的时间内发生衰变(通常通过 β 衰变、发射中子或质子), 具有放射性, 所以称为次级放射性核束. 利用放射性核束, 可以产生奇特原子核(非常远离 β 稳定线), 并进行奇特核性质的研究. 实验已经发现了有晕的原子核, 即少数核子(通常是一个或二个) 松散地围绕原子核核心运动, 在外面形成象晕一样的结构. 另外值得一提的是最近在核谱学方面的进步. 欧洲和美国相继建成了高灵敏 γ 射线探测系统——欧洲球(Euroball) 和伽马球(Gammasphere), 他们具有极高的 γ 射线探测能力. 利用它们, 实验科学家发现了原子核的新运动形式, 例如原子核超形变转动带、磁转动带、手征带及摇摆带等. 近几年, 合成超重核(或称超重元素) 是核科学界的另一个热点. 美国、俄罗斯、欧洲等都已投入大量人力物力进行超重核合成及性质研究. 从经典液滴模型看, 由于强大的库仑排斥力, 质子数 $Z > 104$ 的元素不能存在. 但量子壳模型预言存在 $Z > 104$ 的超重元素. 目前, 核物理学家已在实验室合成了质子数直到 116 的一批超重核. 中国科学院兰州近代物理研究所也正在积极地进行这方面的研究工作. 超重元素的合成与研究必将给物理和化学领域带来巨大的进步.

在 高能核物理方面, 世界强国更是投入巨资兴建重大核科学工程, 用于核科学研究. 欧洲核子中心(CERN) 拥有特大型核设施, 正在兴建大型强子加速器(LHC), 近期主要目标是通过极高能离子碰撞产生夸克、胶子、等离子体和寻找 Higgs 粒子. 美国、日本等国也都投入巨资兴建或升级大型核工程, 如美国的相对论重离子对撞机(RHIC) 和日本的强子加速器(JHF). 随着国力增强, 我国也正投入大量资金用于建造或升级大型核工程, 如投入 6 亿人民币用于中国科学院高能物理研究所的正负电子对撞机

升级工程, 3 亿人民币用于新建兰州冷却储存环(CSR) 装置. 这些大型核工程的兴建和运行, 必将给核科学带来巨大的生机和重大新发现, 必将促进自然科学本身和人类社会的进步.

7 核科学的应用前景

核科学的诞生和发展把人类的视野从宏观推向微观, 使人类有可能从分子、原子甚至是原子核的水平动态地观察自然现象, 掌握自然规律. 从核科学诞生起, 其涉足的领域就在不断扩大, 它与原有的众多学科相互渗透, 产生了一系列新兴学科和现代技术, 从而深刻地影响着能源、化工、医学及材料等事业的发展, 极大地促进了社会的进步. 由于加速器技术的发展, 目前人们可以产生各种各样的离子束流, 应用于材料科学、医学及工农业等领域. 在材料科学, 可以利用离子束技术测量材料的物性及合成新材料等; 在医学, 放射治疗和示踪技术中, 离子束流已经被广泛地用于临床. 辐照加工也已经兴起, 如通过辐照使材料改良或使食品灭菌保鲜; 在农业, 辐照育种、昆虫辐射不育及低剂量刺激生物生长等技术也正在发展.

我们看到, 核科学有着百年辉煌历史, 巨大地推进着人类历史的发展, 给能源、工业、医学、军事和农业等领域带来了革命性的进步. 在我国, 核科学一直很受重视. 我们拥有自己的核武器, 壮大了国威. 我国的核电也正在大力地发展, 以满足经济发展和改善人民生活需要, 同时也将减少火力发电所产生的环境污染. 核技术已经渗透到我国的许多行业, 正在发挥着重要的作用. 在以后的系列专题文章中, 我们将更详细地介绍核科学技术在各个领域中的应用成就.

致 谢 感谢中国原子能科学研究院张焕乔院士对我们工作提出的宝贵意见和建议, 感谢北京大学物理学院高早春博士仔细阅读原稿并提出有意义的意见

参 考 文 献

- [1] 黄祖洽. 探索原子核的奥秘. 长沙: 湖南教育出版社, 1994 [Huang Z Q. Exploring the Secrets of the Atomic Nuclei. Changsha: HuNan Education Press, 1994(in Chinese)]
- [2] 刘洪涛等. 人类生存发展和核科学. 北京: 北京大学出版社, 2001 [Liu H T *et al.* Nuclear Science and its Impact on the World. Beijing: Peking University Press, 2001(in Chinese)]
- [3] 杨福家等. 应用核物理. 长沙: 湖南教育出版社, 1996 [Yang F J *et al.* Applied Nuclear Physics. Changsha: HuNan Education Press, 1996(in Chinese)]